

性能設計分科会報告

性能設計指針（案）と設計計算例

目 次

はじめに	61
第 1 編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008	62
道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008 -目次-	62
I 総則	63
1. 適用の範囲	63
2. 用語の定義	64
3. 要求性能	64
4. 性能の照査	66
5. 作 用	70
6. 解析手法	72
7. 部分係数	74
II 要求性能と照査	77
1. 安全性	77
2. 使用性	82
3. 耐久性	98
4. 維持管理性	118
5. 社会・環境適合性	123
第 2 編 道路橋床版の設計計算例	129
第 1 章 設計に関する共通事項	129
1.1 床版の設計条件	129
1.2 対象とする床版の種類	129
1.3 床版の要求性能	129
1.4 計算に用いる部分係数	130
第 2 章 R C 床版	133
2.1 概要	133
2.2 安全性	133
2.3 使用性	137
2.4 耐久性	139
2.5 維持管理性	145
2.6 社会・環境適合性	147
2.7 まとめ	153

第 3 章 PC床版	155
3.1 概要	155
3.2 安全性	155
3.3 使用性	157
3.4 耐久性	157
3.5 維持管理性	159
3.6 社会・環境適合性	160
3.7 まとめ	160
第 4 章 鋼・コンクリート合成床版	161
4.1 概要	161
4.2 安全性	162
4.3 使用性	163
4.4 耐久性	163
4.5 維持管理性	166
4.6 社会・環境適合性	166
4.7 まとめ	167
第 5 章 鋼床版	168
5.1 概要	168
5.2 安全性	168
5.3 使用性	169
5.4 耐久性	170
5.5 維持管理性	173
5.6 社会・環境適合性	173
5.7 まとめ	173
第 6 章 まとめ	175

はじめに

2008年3月、「鋼・合成構造標準示方書」が土木学会鋼構造委員会によって制定され、構造物全般に対して性能照査型設計法を標準とする流れが進んでいる。そのような中、橋梁の床版設計に関しては、鋼橋床版の調査研究小委員会(委員長：松井繁之)において、2000年に「道路橋床版の性能照査型設計指針(試案)」の提案を行った。その後2004年に道路橋床版の調査研究小委員会(委員長：堀川都志雄)では、さらに性能照査型設計法に踏み込んだ「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)」を提案した。これらの提案を受けて、鋼・合成構造標準示方書にも床版の章が設けられ、道路橋床版の性能照査型設計法として組み込まれている。この章は、道路橋床版の合理化検討小委員会(委員長：日野伸一)の性能設計分科会メンバーを中心とした示方書床版WG(主査：川畑篤敬)によって執筆されたものである。

本分科会の活動報告の第1編となる「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008」は基本的には鋼・合成構造標準示方書と異なるものではないが、示方書においてページ数の制約などから解説が十分でなかった点や、示方書が構造物全体を対象としていたために床版の設計に特化できなかった点などを考慮し、具体の床版設計を行いやすいように内容を再構成している。

特に今回提案する第1編の指針案では、床版設計において重要な部分係数の設定に関する一つの考え方を解説に示している。床版に作用する活荷重状態としては、従来の設計荷重のほか類似路線での実測結果から得られる最大輪荷重や荷重の頻度分布としている。また、使用性はその照査項目が多岐にわたる上、安全性ともかかわりをもった重要な性能であるが、実際に個々の項目を照査している事例は少ない。本指針ではこれらの照査項目についてもできる限り記述した。さらに、時間の関数である耐久性は耐疲労性と材料の耐久性(耐腐食性と材料劣化抵抗性)に分けられるが、特に材料の耐久性に関して詳細に記述している。このように本指針では従来から課題とされていた部分を補う内容となっている。

第2編では、設計指針をもとにRC床版、PC床版、鋼・コンクリート合成床版に対する設計計算例を作成した。これらは、これまでの検討成果である「道路橋床版の新技术と性能照査型設計」(鋼橋床版の調査研究小委員会,2000年)および「道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上」(道路橋床版の調査研究小委員会,2004年)において試算した内容に加え、床版形式ごとの個別な設計例を示すとともに、床版としての部分係数を提案し、部分係数法の導入を試みた。なお、鋼床版に関しては各機関において劣化損傷メカニズムを調査研究中であることから、今回の設計計算例には具体的な設計例を示すには至らなかったが、現状における設計法の最新技術について要求性能に基づいて記述している。

これらの設計指針(案)および設計計算例は一つの試みであり、今後の議論とさらなる調査研究を喚起することで、道路橋床版の性能照査型設計が十分に周知され実務に用いるための重要な資料になるものであると確信するとともに、より多くの設計技術者・研究者に役立てていただければ幸いである。

(社)土木学会 鋼構造委員会
道路橋床版の合理化検討小委員会
性能設計分科会
主査 浜田 純夫

道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008 - 目次 -

I 総 則

1. 適用の範囲……………設計指針(案) - 1-
2. 用語の定義……………設計指針(案) - 2-
3. 要求性能……………設計指針(案) - 2-
4. 性能の照査……………設計指針(案) - 4-
5. 作 用……………設計指針(案) - 8-
6. 解析手法……………設計指針(案) -10-
7. 部分係数……………設計指針(案) -12-

II 要求性能と照査

1. 安全性……………設計指針(案) -15-
2. 使用性……………設計指針(案) -20-
3. 耐久性……………設計指針(案) -36-
 - 3.1 耐疲労性
 - 3.2 耐腐食性および材料劣化抵抗性
4. 維持管理性……………設計指針(案) -56-
5. 社会環境適合性……………設計指針(案) -61-

第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008

I 総 則

1. 適用の範囲

本指針(案)は、道路橋に使用する床版を性能照査型設計法に基づいて設計する場合に適用する。

【解 説】

近年、道路橋床版のみならず、橋梁全般における建設技術の進歩は著しく、新技術や新材料の開発、新しい構造や設計方法の提案等、さまざまな面で技術開発が進んでいる。このような状況においては、性能規定、すなわち、必要とされる要求性能のみを明確に規定し、性能を証明できれば、設計、製作、施工の自由度が増し、新技術や新材料の導入が容易となり、コスト削減を図ることができる性能照査型設計法が望まれている。また、この設計法によることは、公共事業の品質の確保、説明責任、技術基準類の国際化への対応、透明性の確保等にも有効とされる。

このような中、土木学会鋼構造委員会では、鋼橋床版の調査研究小委員会(松井繁之委員長、平成9年～平成12年)および、鋼道路橋床版の調査研究小委員会(堀川都志雄委員長、平成13年～平成16年)において、鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)¹⁾(以下、第1期委員会指針とする)、道路橋床版の性能照査型設計指針(案)²⁾(以下、第2期委員会指針とする)を作成し、道路橋床版の合理的な設計を可能にするための性能照査型設計指針の構築を目指してきた。

さらに平成19年3月には、国際競争力強化を目指して世界標準である限界状態設計法に基づく性能照査型による鋼・合成構造物の設計規準を構築するための鋼・合成構造標準示方書 設計編³⁾が鋼構造委員会より出版されたが、鋼・合成構造物において橋梁床版は極めて重要な部材であるとの認識から、前述の第2期委員会指針の成果を取り入れつつ最新の知見を追加する形で「第14章 床版」が設けられた。しかしながら、この示方書は今後新たに鋼・合成構造物に関する設計規準等が作成される際の基本的な規準(Code for Code writer)との位置付けがなされており、道路橋床版以外の幅広い構造を対象にしていることなどから、必ずしも道路橋床版を設計する際の利便性を最優先にした構成となっておらず、個々の床版形式について留意すべき項目を網羅したものではない。

本指針は、道路橋床版の合理化検討小委員会(日野伸一委員長、平成17年～)によって、これまでの成果である第1期委員会指針および第2期委員会指針に、鋼・合成構造標準示方書における基本的な考え方を取り入れ、最新の知見や国内外の趨勢に対応した設計指針として、新たにまとめたものである。

なお、本指針を適用して道路橋床版を設計する場合、特に以下の点に留意する必要がある。

- ・ 舗装の剛性：道路橋床版では、舗装を介して面外荷重を受けることが多い。舗装の剛性は温度依存性により著しく変化するため、床版の面外曲げ剛性についてはその影響を無視することが望ましい。しかしながら、舗装厚による荷重の分散効果については一般に考慮することができると考えられる。
- ・ 防水層の設置：コンクリートを用いた床版では、水の浸入により繰り返し荷重に対する

強度が著しく低下したり，鋼部材の腐食を著しく進展させたりする可能性があるため，雨水等が浸入しないように防水層を床版上面に設置しなければならない。

2. 用語の定義

本編に用いられる用語は，以下に示すものを除き基本的に「鋼・合成構造標準示方書」と同様の定義とする。

- ・ コンクリート系床版：鉄筋コンクリート床版（ＲＣ床版）やプレストレストコンクリート床版（ＰＣ床版）等のようにコンクリート版と線状の鋼材より構成される床版およびコンクリートと鋼板により構成される鋼・コンクリート合成床版など
- ・ 鋼床版：鋼板により構成される床版
- ・ 合成床版：異種材料または異種構造が接合部材を介して一体化して挙動する床版の総称

【解 説】

用語の定義は，鋼・合成構造標準示方書に示されるものを基本とする。また，床版形式と称されるものにはＲＣ床版，ＰＣ床版，鋼・コンクリート合成床版，鋼床版などがあるが，主に構成部材に着目した分類として，上記のような用語が用いられる。なお，コンクリート系床版も広義には合成床版の一種であると言えるが，ここではコンクリートを主体として鋼材（鉄筋，ＰＣ鋼材，鋼板）にも耐力を期待した床版はコンクリート系床版と分類する。

3. 要求性能

3.1 一般

- (1) 一般に構造物は以下に示す５つの基本的要求性能を満たすよう設計しなければならない。特に道路橋に使用する床版においては，これらの基本的要求性能に対応した以下の性能項目を定義する。

(要求性能)	(性能項目)
安 全 性	構造安全性，施工時安全性
使 用 性	走行性，歩行性，第三者被害の防止，その他の配慮
維持管理性	維持管理性
耐 久 性	耐疲労性，耐腐食性，材料劣化抵抗性
社会・環境適合性	社会的適合性，経済的合理性，環境適合性

- (2) 各性能項目について具体的な照査項目および照査指標は「Ⅱ要求性能と照査」に規定する。

【解 説】

- (1) 設計にあたっては，まず，対象とする構造物に要求すべき性能を明確に設定しなければならない。構造物の要求性能には，その定義や分類方法に関して様々な考え方があるが，ここでは，「鋼・合成構造標準示方書」における「構造物の基本的要求性能と性能項目の例（表一解 3.1）」に基づき，特に道路橋床版において考慮すべき要求性能および性能項目を定義した。

表-解 3.1 構造物の基本的要求性能と性能項目の例（鋼・合成構造標準示方書の場合）

基本的要求性能	基本的要求性能の性能項目の例	
安全性	構造安全性（耐荷力，安定性，他）	耐久性 耐疲労性 耐腐食性 材料劣化抵抗性
	公衆安全性（落下物等第三者への被害）	
	地震時の安全性（耐荷力，変形性能，安定性）	
	施工時の安全性（耐荷力，変形性能，初期健全性）	
使用性	利用者の使用性（走行性，歩行性）	
	地震後の使用性（走行性，歩行性）	
	構造物管理者の使用性（維持管理の容易性）	
修復性	地震後の修復性（地震時の損傷に対する修復）	
	維持管理性（経年変化に対する修復）	
社会・環境適合性	社会的適合性（社会的重要度の考慮）	
	経済的合理性（LCC，LCU）	
	環境適合性（騒音・振動，環境負荷LCA，景観 他）	
	施工時環境適合性（騒音・振動，環境負荷LCA）	

なお，第1期委員会指針および第2期委員会指針では，図-解 3.1 のように，床版に着目した要求性能として，安全性，使用性，社会・環境適合性の基本的な性能の下に7つの性能を定義しているが，前述の鋼・合成構造標準示方書における分類と比べ，耐久性の扱いや用語の表記に違いはあるものの，取り扱う性能項目の考え方はほぼ同じであるといえる。構造物の設計において複数の要求性能の定義や分類が存在することは，設計の実務上の混乱を生じさせ，設計指針類の適正な利用を妨げる原因となるため，ここでは，鋼・合成構造標準示方書における分類を適用した。

基本性能

第2期委員会指針における要求性能（第1期委員会指針による性能）

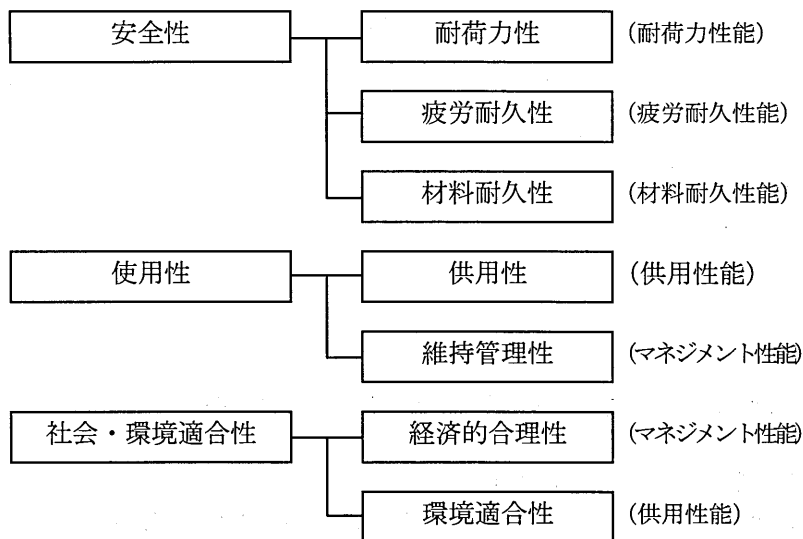


図-解 3.1 前委員会指針における床版の要求性能

- (2) 性能照査型設計では、要求性能に対応して定義された性能項目を実現するために、必要な事項を照査項目として細分化し、これを照査することとした。具体的な項目は「Ⅱ 要求性能と照査」に示されている。

3.2 床版に着目した要求性能と性能項目

- (1) 安全性：設計供用期間中の設計作用に対して、床版が直接荷重を支持する版および橋梁構造の一部材として、所定の安全性を確保する性能である。性能項目として、耐荷力、安定性などの構造安全性のほか、施工時の作用に対して設計時に考慮する必要がある項目も取り扱う。
- (2) 使用性：設計供用期間中において、床版が利用者および第三者に対する快適性や利便性を確保する性能である。性能項目として、橋梁を通過する車両に対する走行性、歩行者に対する歩行性、第三者被害の防止、利用者に対するその他の配慮を取り扱う。
- (3) 維持管理性：管理者が構造物を管理する際に、劣化損傷等によって他の要求性能を損なわないよう、損傷メカニズムや損傷部位を踏まえ、橋梁の設計供用期間全体に対して、点検、補修、補強、取替等の可能性を確保する性能である。
- (4) 耐久性：設計供用期間中に受ける作用に対して、床版の性能が低下することに対する抵抗性である。性能項目として、交通荷重およびその他の繰返し作用に対し所用の安全性や使用性を確保する耐疲労性、および、床版を構成する材料が受ける作用に対し安全性や使用性の低下を招く有害な劣化・損傷を生じない耐腐食性（鋼材）または材料劣化抵抗性（コンクリート）を取り扱う。
- (5) 社会・環境適合性：構造物が健全な社会、経済、文化等の活動に貢献し、周辺の社会環境、自然環境に及ぼす悪影響を最小限にする性能である。性能項目としては、設計上の橋梁の重要度が社会環境に見合ったものであることを示す社会的適合性、橋梁全体の設計供用期間中において床版に求められる全ての要求性能を満たすために必要となるコストの合計を適性に保つ経済的合理性、および床版のライフサイクル全般において、環境への影響を考慮して環境負荷の低減を図るとともに、橋梁に隣接して居住する第三者に対する快適性や利便性を確保する環境適合性を取り扱う。

【解 説】

ここでは、3.1 に示す一般的な要求性能に対し、床版の設計において特に着目すべき点を示した。各々の要求性能に対する照査方法の詳細は、「Ⅱ 要求性能と照査」に示されている。

4. 性能の照査

4.1 一般

- (1) 設計にあたっては、道路橋に使用する床版に要求すべき性能を明確に設定しなければならない。
- (2) 要求される性能項目ごとに、考慮すべき作用の状態やレベルを定義すると同時に、設計供用期間中に床版が保つべき状態を明示し、それぞれの項目について照査を行わなければならない。
- (3) 床版の性能照査は、一般には、照査指標に基づいて応答値と限界値を算定し、応答値が限界値を超えないことを照査することにより行うものとする。応答値は適切な数値解析法を用いて算定され、限界値は材料強度の特性値等により算定される。

- (4) (3)の照査方法によらない場合は、実験等による確認、あるいは構造・材料等の仕様を満足することを構造物の性能照査とみなすことができる。
- (5) 床版の性能照査においては、完成時および床版の設計供用期間におけるすべての時点での要求性能を満たす必要がある。すなわち、限界値が当該時点で設定された応答値を上回っていることを照査するものとする。

【解 説】

照査指標を用いた性能照査の方法の例を図-解 4.1 に示す。たとえば、耐荷力性能について、限界状態設計法を用いて終局限界状態の照査を行う場合には、部材に発生する断面力を「照査指標」とすると、荷重の特性値を作用させ発生する断面力が「応答値」となり、材料強度の特性値に対する断面耐力が「限界値」となって、限界値と応答値を比較することで照査を行う。

照査の方法としては、限界状態設計法による方法、許容応力度による設計方法、実験・解析による方法、各種の環境基準値で判定する方法等のいずれか、またはこれらの組み合わせ等が考えられる。近年の我国における土木構造物に関する設計規準（土木・建築に関する設計の基本⁴⁾、コンクリート標準示方書⁵⁾、鋼・合成構造標準示方書³⁾）においては、信頼性設計の考え方を基礎とした部分係数法による限界状態設計を用いることを基本とする考え方が主流となっており、本指針においても 4.2 節に述べる通りこれらの考え方を基本的に踏襲している。

なお、既存の設計資料等に基づく仕様を採用することで必要な性能が確保できるとする「みなし適合仕様」を適用する場合には、性能照査を省略することができる。

ただし、修復性や社会・環境適合性などの性能に対しては、従来の照査手法における限界状態を明確に定めた上での応答値と限界値との大小関係で照査することが困難な場合もあり、様々な解を組み合わせることで目的関数の最適化を図る「最適化問題」としてとらえることも必要となってくる。

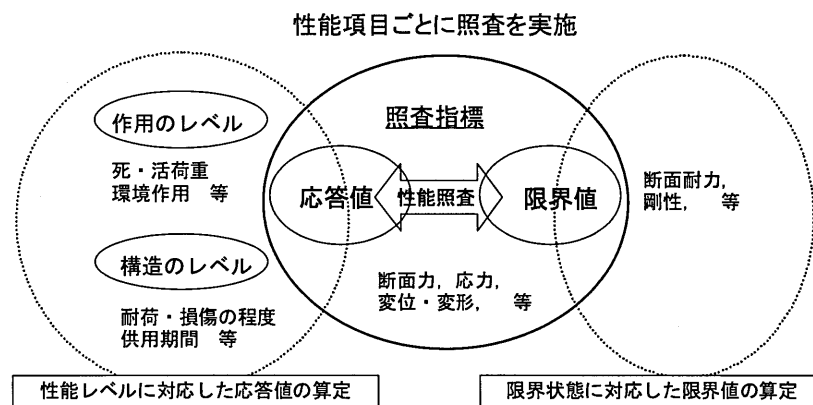


図-解 4.1 各性能項目における性能照査手法

疲労耐久性の照査を、S-N 曲線を用いて行う場合を例とした概念図を図-解 4.2 に示す。

この図において、S-N 曲線の照査指標を用いて、作用荷重の代表値 S と、床版の設計供用期間を考慮した繰返し回数 N_r は、作用のレベル (S_a, S_b, S_c)・保つべき状態のレベル (N_{r1}, N_{r2}) の2つの応答値として定義される。さらに、ある床版に対して設定される1本の線が、その床版の限界性能であり、作用レベル S_a に対する限界性能 N_a と保つべき状態のレベル N_r の大小関係によって照査を行う。

具体的には、例えば、実測されるトレーラー最大荷重を考慮した輪荷重を作用のレベル $S_a=140\text{kN}$ とした場合、保つべき状態のレベル N_{r1} （設計供用期間 100 年に相当する載荷回数）に対しては $N_{r1} > N_a$ となることから、床版の限界値である S-N 曲線に対する載荷回数は $N < N_r$ とな

り、要求性能を満たすことができない。一方、保つべき状態のレベルを N_{r2} (設計供用期間 40 年に相当する載荷回数) とした場合、または作用のレベルを道示荷重に相当する作用のレベル $S_c=100\text{kN}$ とした場合には、 $N_{r2} < N_a$ または $N_{r1} < N_c$ となり、要求性能を確保したことが確認される。

なお、実際の照査においては作用の特性値、荷重の特性値、断面力の算定、構造解析および応答値と限界値の比較にあたって所要の部分係数を考慮する。

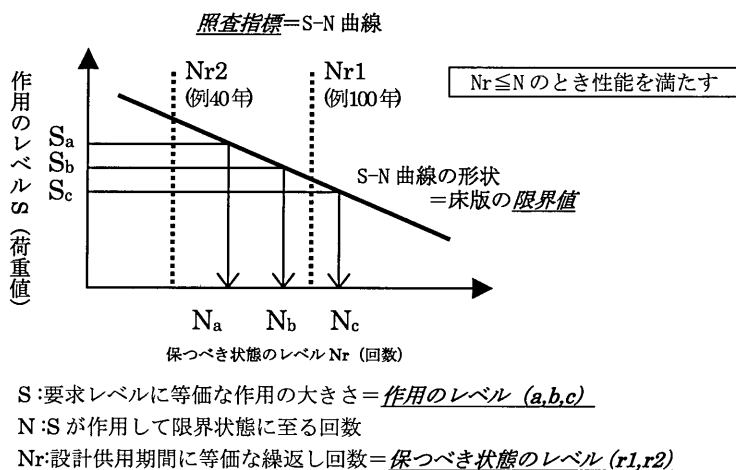


図-解 4.2 耐疲労性照査における性能照査の概念 (例)

4.2 照査方法

- (1) 照査の方法は、信頼性設計の考え方を基礎とした部分係数法の書式を採用した限界状態設計法によることを基本とする。
- (2) 照査の方法は、原則として、設計作用による設計応答値と設計材料強度に基づく設計限界値、ならびに部分係数を用いて行うものとする。この際、式(4.1)の照査式を用いることを原則とする。

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} \leq 1.0 \quad (4.1)$$

ここに、 R_d : 設計限界値
 S_d : 設計応答値
 γ_i : 部分係数 (構造物係数)

- (3) 設計においては、考えられるすべての限界状態について照査を行うものとする。

【解 説】

- (1) 照査の方法としては、4.1 に述べたとおり、信頼性設計の考え方を基礎とした部分係数法による限界状態設計を用いることを基本とする。
- (2) 基本照査式は、構造物の重要度や限界状態に達した際の社会的・経済的影響によって定める部分係数(構造物係数 γ_i) を用いた式(4.1) によって行うことを標準とした。この式を用いる限り、構造解析手法を問わず、設計用値としての R_d や S_d には、性能項目に応じて荷重、断面力、応力、変位などを選ぶことが可能である。一般には、設計計算では

線形解析が用いられており、部材の設計により性能照査を行う場合、設計限界値 R_d と設計応答値 S_d の算出においては、以下の部分係数法を用いた照査様式の式(解 4.1) が便利である。

ここに、 γ_f 、 γ_m 、 γ_a 、 γ_b はそれぞれ作用係数、材料係数、構造解析係数、部材係数であり、これらは特性値からの望ましくない方向への変動、計算における値の算出方法の不確実性、作用や実構造物・実材料などのばらつき等を考慮して定めるものとする。

$$\gamma_i \frac{\sum \gamma_a S(\gamma_f F_k)}{R(f_k/\gamma_m)/\gamma_b} \leq 1.0 \quad (\text{解 4.1})$$

ここに、
 f_k : 材料強度の特性値
 γ_m : 材料係数
 γ_b : 部材係数
 $R()$: 材料強度から構造物の限界値を算出するための関数
 F_k : 個々の作用の特性値
 γ_a : 構造解析係数
 γ_f : 個々の作用に対する作用係数
 $S()$: 作用から構造物の応答値を算出するための関数
 γ_i : 構造物係数

構造物あるいは構造部材の設計においては、それらの限界値が応答値を超える確率を要求された値以下にとどめることができるように形式・形状・寸法を決定するのが最も望ましいが、実務上はこれらの確率の算出が可能な場合はほとんどない。そこで、構造物あるいは構造部材に要求される性能が満足されているか否かを照査する方法として、ここでは、部分係数を用いた式(解 4.1)を照査式として用いればよいこととした。

耐荷力に関する安全性の照査を行う場合を例に、式(解 4.1)に従う照査の流れの概念図を示すと図-解 4.3 のようになる。

照査においては、式(4.1) または式(解 4.1) の左辺の数値で、有効数字 2 桁が得られるように、設計応答値、限界値等の各値には、一般に 3 桁の有効数字が必要である。

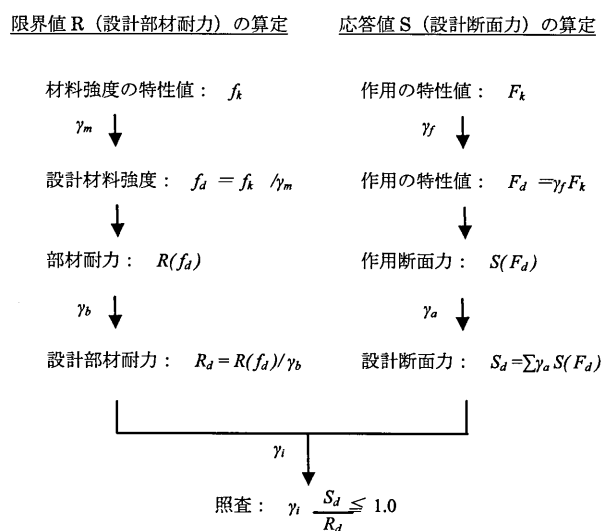


図-解 4.3 耐荷力に関する安全性照査の概念³⁾

- (3) 限界状態としては、安全性に対する限界状態、使用性に対する限界状態を基本とし、耐久性に対しては、疲労・劣化に対する限界状態を考慮するものとする。

5. 作 用

5.1 一 般

床版の設計では、施工中および設計供用期間中に発生する可能性のある作用を、照査すべき性能に応じてそれぞれ定めるものとする。

【解 説】

作用には、構造物に対する影響の与え方によって分類される直接作用・間接作用・環境作用の他に、頻度・持続性・変動の過程によって分類される永続作用・変動作用・偶発作用、および構造物の応答の仕方によって分類される静的作用・動的作用・繰り返し作用がある。

また、作用とは構造物または部材に応力、変形の増加、材料特性に経時変化をもたらすすべての働きであり、荷重とは、構造物に働く作用を、構造モデルを介して、断面力、応力または変位等の算定という設計を意図した計算に用いるために、構造物に直接載荷できる力の集合体として表現したものをいう。具体的には、作用のうち、直接作用に相当するものを荷重という。

構造物を設計する際に用いる一般的な作用の種類を表-解 5.1 に示すが、本指針ではⅡにおいて具体的に考慮すべき作用を記述している。

表-解 5.1 作用の種類

	直接作用	間接作用	環境作用
永続作用	(1) 死荷重 (2) 土圧 (3) プレストレス力	(18) コンクリートの収縮の影響 (19) コンクリートのクリープの影響	(23) 飛来塩分の影響 (24) 排気ガスの影響 (25) 二酸化炭素濃度の影響 (26) 酸の濃度の影響 (27) 乾湿繰返しの影響 (28) 日射の影響
変動作用	(4) 活荷重(静的・動的・繰返し) a) 自動車荷重 b) 列車荷重 c) 群集荷重 (5) 衝撃(静的・動的) (6) 流水圧(静的・動的) (7) 静水圧 (8) 浮力・揚圧力(静的) (9) 風荷重(静的・動的) (10) 雪荷重(静的) (11) 制動荷重・始動荷重(静的・動的)* (12) 遠心荷重(静的)* (13) ロングレール縦荷重(静的)* (14) 車両横荷重および車輪横圧荷重(静的)* (15) 波圧(静的・動的)	(20) 温度変化の影響(静的) (21) 支点移動・不等沈下の影響(静的)	(29) 凍結の影響
偶発作用	(16) 施工時荷重 (17) 衝突荷重	(22) 地震の影響(静的・動的)	(30) 火災の影響

* 鉄道車両に起因する作用であり、通常の道路橋では考慮しない。

5.2 作用の組合せ

通常の構造設計では、設計の対象とする限界状態に応じて作用を組み合わせるものとする。

【解説】

作用の組合せは表-解 5.1 を標準とする。ただし、特別な組合せが想定される場合には、責任ある技術者の判断で、表-解 5.1 以外の組合せを用いることができる。

表-解 5.1 作用の組合せ

要求性能	設計作用の組合せ
安全性	永続作用＋主たる変動作用＋従たる変動作用 永続作用＋偶発作用＋従たる変動作用
使用性	永続作用＋変動作用
耐久性	永続作用＋変動作用

5.3 作用の大きさ

- (1) 破壊・崩壊などの安全性の照査に用いる永続作用、および主たる変動作用の大きさは、作用の大きさのばらつきを想定したうえで、構造物の施工中および設計供用期間中の最大値分布または最小値分布から求められる統計的特性値としてよい。偶発作用の大きさは既往最大値としてよい。また、従たる変動作用の大きさは、主たる変動作用または偶発作用との組合せに応じて定める。
- (2) 使用性の照査に用いる作用の大きさは、構造物の施工中および設計供用期間中に比較的しばしば生じる値とし、確保すべき性能および作用の組合せに応じて定める。
- (3) 耐久性の照査に用いる作用の大きさは、設計供用期間中の作用の変動を考慮して定める。

【解 説】

作用の大きさおよび作用の組合せについては、鋼・合成構造標準示方書と同じ規定とした。

6. 解析手法

- (1) 解析モデルは構造物全体、あるいは、照査箇所の応力状態が適正に表現できる範囲を抽出し、適切な境界条件を与えてモデル化するものとする。
- (2) 解析では床版部を板構造として抽出することを原則とするが、照査の目的によっては、照査箇所の応力状態に与える影響が大きい構造部材もモデル化の対象とするものとする。
- (3) 各構造部材のモデル化にあたっては、部材の構造特性を考慮した適切な要素を使用するものとする。
- (4) 各材料の材料物性値は実挙動に即した適切な値を用いるものとする。
- (5) 解析結果の評価は、モデル化の条件を踏まえ、適切に行うものとする。

【解 説】

- (1) モデル化の範囲は対象とする構造物全体とすることが望ましいが、照査箇所の応力状態が全体をモデル化した解析と同じ結果が得られる範囲を抽出してモデル化を行ってもよい。鋼橋の場合、例えば直線橋の一方方向版では、一般に橋軸直角方向は全幅、橋軸方向は幅方向の2倍程度をモデル化すればよいが、一方方向版でない場合や曲線橋や縦横断勾配が大きい場合にはモデル化範囲の検討が必要である。

支持条件については、鋼I桁で支持される場合には、ウェブ位置で単純支持されていると仮定することも考えられる。なお、箱桁で支持される場合には、箱桁上フランジ上面での支持条件を適切にモデル化しなければならない。

- (2) FEM解析を用いた設計では、基本的には床版を板構造としてとらえ、床版の剛性、床版の異方性、床版支間、桁配置、斜角等を考慮し、設計断面力やたわみ量を算出する。コンクリート系床版であれば、コンクリート部のみのモデル化が一般的であるが、鋼板、鉄筋、PC鋼線、スタッド等は照査部位に与える影響を考慮して適宜モデル化を行う^{7),8)}。また、アスファルト等、高温環境下で剛性が低下する舗装をモデル化する場合には、荷重の分散性能のみを考慮し、曲げ剛性は考慮しない。

解析の目的が設計断面力やたわみ量の算出ではなく、局部応力の算出や耐荷力の確認、振動特性の把握、コンクリートのひび割れ特性把握、コンクリート中に発生する温度応力の大きさ、PC床版のプレストレス導入量等である場合には、過去の事例等^{9)~13)}を参

考に、床版以外の構造部材も適宜モデル化を行うと良い。

- (3) 床版の全体挙動を確認し、設計断面力やたわみを算出する場合には板要素を用いると効率的である。この際、床版自体の異方性が高い場合やRC床版の劣化度^{8), 14), 15)}等を考慮する場合は異方性を考慮できる要素を用いるとよい。なお、鋼床版の直交異方性を考慮する際は、帯状板要素と横リブから成立した力学モデルを考慮した Finite Strip Method による解析も有効である¹⁶⁾。また、板厚方向の応力分布を求める場合や、床版内部の部材の局所的な応力を算出する場合は、固体要素、板要素、梁要素等を組合せてモデル化を行うとよい。

モデル化の際、固体要素を用いるにあたっては、Shear Locking を避けるために、版厚あるいは板厚方向の要素分割に配慮する必要がある。また、自由度の異なる要素を結合する場合は適切な自由度の処理を行う必要性があり、高次要素を用いる場合は、要素特性が解析結果に与える影響を把握しておく必要がある。その他、鋼桁も考慮する場合には版厚分の偏心を考慮することも必要である。

- (4) 設計断面力やたわみを算出する場合、道路橋では、鋼材は道路橋示方書にある物性値、あるいは実験結果を用い、線形弾性体として取り扱うこととする。コンクリートは荷重による桁の弾性たわみが $L/500$ (片持ち部については $L/300$) 程度以下の場合にはひび割れ等を無視した線形弾性体と仮定して道路橋示方書にある物性値を使用する。また、耐荷力を確認する場合にはコンクリートの非線形性やひび割れも考慮する必要があるが、適切なモデル化については今後の課題である。なお、床版コンクリートの温度応力解析を行う場合はコンクリート標準示方書に示された材料非線形性を考慮する¹²⁾。その他、鋼とコンクリート以外の材料を使用する場合は、その物性値を明確にし、必要に応じて材料非線形性を考慮する。
- (5) 適切なモデル化が行われていれば解析結果に対する構造解析係数 $\gamma = 1.0$ としてよい。但し、モデル化の際の仮定が不明確である場合や、非線形解析についてはこの限りではない。

解析結果を評価する際は、使用した要素の種類、形状、サイズによっても結果が異なることを留意する必要がある。着目部近傍の要素形状は正方形や立方体が望ましく、その要素サイズは設計断面力を算出する場合は 50mm 程度を目安とし、局部応力を算出する場合には別途検討が必要となる。また、板要素の交差部、剛性の大きく異なる要素同士の節点を共有させた箇所、荷重直下の要素、拘束部の要素等では極端に大きな解析値を示すことがあるので、その場合は近傍の要素の解析値を用いて評価を行う。その他、仮定した要素座標系と全体座標系の関係にも十分な注意が必要である。

7. 部分係数

床版の設計に用いる部分係数は以下に示す5種類とし、それぞれの値は床版の特性を把握した上で設定しなければならない。

- ① 構造物係数 γ_i : 床版を含む構造物全体の重要度により設定する
- ② 作用係数 γ_f : 床版に作用する設計荷重の変動を考慮して設定する
- ③ 構造解析係数 γ_a : 床版の構造解析精度より設定する
- ④ 材料係数 γ_m : 床版を構成する材料強度の変動を考慮して設定する
- ⑤ 部材係数 γ_b : 構造物における床版の重要度や部材耐力の変動を考慮して設定する

【解 説】

4.2 節に示す通り、照査にあたっては近年の我国における土木構造物設計規準改訂の傾向に従い、部分係数法を採用することを基本とし、上記に示す5つの部分係数を考慮することとした。

床版を設計する際の部分係数の設定にあたっては、床版の重要度や設計時の諸条件を十分考慮する必要がある。しかしながら、部分係数法による性能照査型設計での実績を持たない現状においては、既往の設計手法による床版が保有している安全率と同等程度となるための部分係数がどの程度であるかを把握した上で設計を行う必要がある。

また、部分係数法の照査様式において、個々の部分係数をさらに分割したり、あるいは複数の係数を1つの係数にまとめたりした照査様式も考えられるが、どの程度まで部分係数を分割あるいは一括して設計するかは合理的な判断のもと、設計者の裁量に委ねられている。

以上のような状況を考慮し、本指針においては、特に床版の設計において定めるべき部分係数として、鋼・合成構造標準示方書による値や、これまでの床版設計に関する技術の蓄積を反映して、以下のような値が考えられる。ただし、これらの値は部分係数を設定する上で必要な要因を全て考慮したものではなく、係数の数値化に対するひとつの試みであり、今後の議論を期待するとともに、さらなる調査研究の成果を踏まえた改訂を前提として提示するものである。

なお、維持管理性や社会・環境適合性などの性能に対しては、様々な解を組み合わせる目的関数の最適化を図る「最適化問題」としてとらえることとなるため、現時点では部分係数による照査は安全性、使用性、耐久性のみを対象とする。

① 構造物係数

構造物係数は、構造物の重要度から決定されるため、床版の設計では与条件となる。

なお、鋼・合成構造標準示方書においては、安全性（構造安全性）で1.0～1.2、使用性（走行性、歩行性）で1.0、耐久性（耐疲労性）で1.0として構造物係数が用いられることが多いとされている。

② 作用係数

作用係数は、荷重の変動を考慮して決定する必要がある。特に床版の設計において重要な安全性、耐疲労性照査においては、活荷重が支配的となる場合が多いと考えられるため、活荷重の設定方法により作用係数が異なる。たとえば、実態交通をもとにした既往最大荷重で設定した設計活荷重であれば、作用係数は1.0に近い値となる。逆に、行政的立場から決定された設計活荷重の場合には、実測交通との変動を考慮して決定する必要がある。実測最大軸重約300kNより求まる輪荷重にタンデムの影響を考慮すると、道路橋示方書のT荷重1輪

100kNで設計される場合に対して、作用係数は1.5以上となる。死荷重については、コンクリート床版厚を200mm程度とすると、最大施工誤差20mmを考慮して作用係数は1.1となる。鋼床版では、鋼部材の板厚較差は十分小さいと考えられるので1.0となる。風荷重や地震荷重については、再現期待値から設計荷重が設定されるため作用係数は1.0となる。また、耐疲労性照査に用いる交通荷重の繰返し作用については、設計供用期間中の走行車両に対し、載荷回数と荷重の大きさの双方を考慮して設計作用を定めた場合（累積損傷度による照査など）には作用係数は1.0となるが、一定振幅応力に対する打ち切り限界を用いた照査などの場合には、実測最大荷重を踏まえて別途、作用係数を検討する必要がある。

なお、鋼・合成構造標準示方書においては、安全性（構造安全性）で1.0～1.7、使用性（走行性、歩行性）で1.0、耐久性（耐疲労性）で1.0～1.1を標準的な作用係数の値としている。

③ 構造解析係数

構造解析係数は、解析精度を考慮して設定する必要がある。理論式に基づく解法やFEM板解析、FEMソリッド解析で各部の応力を算出する場合は、モデル化の程度を考慮して設定する必要があるが、断面力を算出する場合には通常1.0としてよい。道路橋示方書のような設計曲げモーメント式では、設計式に見込まれた余裕（道示の場合1.2程度）を構造解析係数として表現する。

なお、鋼・合成構造標準示方書においては、安全性（構造安全性）で1.0～1.1、使用性（走行性、歩行性）で1.0、耐久性（耐疲労性）で1.0を標準的な構造解析係数の値としている。

④ 材料係数

材料強度の特性値は、一般には試験そのもののばらつきを考慮して所要の非超過確率を確保できるよう設定されているが、材料係数には、それ以外の特性値からの望ましくない方向への変動、供試体と構造物中の材料特性の差異なども考慮して定める必要がある。鋼はミルシートにより強度が保証され、製造工程等に起因するばらつきも少ないので1.0となる。また道路橋示方書では、鋼の許容応力度と降伏応力の比1.7に許容応力度の割増の最大値1.5（地震時・暴風時）を考慮すると $1.7/1.5=1.1$ 程度が確保されていると考えることができる。コンクリートでは、JIS規格に適合するレディーミクストコンクリートを用いた場合、呼び強度の85%強度が保証されているので（JIS A 5308）、もっとも強度の低い状態となった場合を想定すると材料係数は $1.0/0.85=1.2$ 程度となるが、その他、実構造物として施工する際の諸条件によるばらつき等を材料係数に考慮する必要がある。コンクリート標準示方書では、終局限界状態におけるコンクリートの材料係数を1.3、使用限界状態に対しては1.0としている。

ただし、時間軸を考慮すると、鋼は疲労や腐食による劣化が懸念され、コンクリートも劣化が懸念されるためそれらを考慮した値とする必要がある。たとえば、6mm厚の耐候性鋼材を用いた合成床版で、100年間に0.5mm程度の腐食減肉が生じると想定¹⁷⁾すると、材料係数は $6.0/5.5=1.1$ となる。コンクリートの場合には、強度そのものの劣化よりも、塩害や中性化による劣化を別途検討する必要がある。

なお、鋼・合成構造標準示方書においては、安全性（構造安全性）で1.0～1.05、使用性（走行性、歩行性）で1.0～1.05、耐久性（耐疲労性）で1.0を標準的な材料係数の値としている。

⑤ 部材係数

部材係数は、主要部材とそれ以外の部材など、部材としての重要度を考慮して設定する必要がある。主要部材であれば、地震や暴風等の異常時においても最低限の安全性を確保する必要がある。また、コンクリート部材ではコンクリート標準示方書において、コンクリート

の面部材の押し抜きせん断耐力に対して1.3, 曲げモーメントを受ける部材の設計断面耐力に対して1.1が考慮されている。

特に床版に対しては, 床版の劣化が鋼橋の損傷事例の大きな要因であることが知られており, 道路橋示方書による設計でも過酷な荷重状態にさらされる床版に対しては, 有害なひび割れの防止, 不等沈下等による付加断面力を担保することなどを目的として許容応力度の低減 ($\sigma_a=180\text{N/mm}^2$ を 140N/mm^2 に低減し, さらに 20N/mm^2 程度の余裕を持たせることとしている) を行っている。したがって, 部材係数にはこれらを踏まえた値を設定することが必要となる。

なお, 鋼・合成構造標準示方書においては, 安全性(構造安全性)で1.0~1.3, 使用性(走行性, 歩行性)で1.0, 耐久性(耐疲労性)で1.0~1.1を標準的な部材係数の値としている。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計, pp. 243-311, 2000. 10.
- 2) 土木学会 鋼構造委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, pp. 63-141, 2004. 11.
- 3) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書[設計編], 2007. 3
- 4) 国土交通省 土木・建築にかかる設計の基本検討委員会：土木・建築にかかる設計の基本, 2002. 10
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕, 2002.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2002. 3.
- 7) 坂本純男, 中菌明広, 安川義行, 稲葉尚文, 長井正嗣：2 主桁橋における床版の死荷重曲げモーメント算定式の提案, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1409-1416, 2002.
- 8) 本間淳史, 長谷俊彦, 榎原和成, 中村和己, 上原正, 河西龍彦：長支間場所打ち PC 床版の設計と施工, 橋梁と基礎, 第 36 巻第 10 号, pp. 2-10, 2002. 10
- 9) 三木千尋, 菅沼久忠, 富澤雅幸, 町田文孝：鋼床版箱桁橋のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因, 土木学会論文集, No. 780/I, pp. 57-70, 2005.
- 10) 長山秀昭, 市川和臣, 川畑篤敬, 猪村康弘：長支間リブ付きプレキャスト PC 床版の耐荷特性に関する実験的研究, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 143-148, 1998.
- 11) 川畑篤敬, 村上琢哉：道路橋床版の振動特性について, 第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 79-84, 2004.
- 12) 日本橋梁建設協会・膨張材協会：場所打ち PC 床版における膨張材の有効性評価検討報告書, 2004.
- 13) 安松敏雄, 田中伊純, 志村泰広, 中原智法, 利根川太郎：鋼横梁を有する連続ラーメン PC 床版 2 主桁橋の設計検討, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 103-108.
- 14) 松井繁之, 江頭慶三, 石崎茂：長支間床版の設計曲げモーメント式に関する 2, 3 の考察, 鋼構造年次論文報告集, 第 3 巻, pp. 215-220, 1995.
- 15) 佐藤貢一, 金田尚志, 吉川弘道, 小玉克巳：RC 床版の二方向の劣化度に関する一考察, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp. 31-36, 1998
- 16) 多田和夫：Finite Strip Method による鋼床版の実用的計算法, 橋梁と基礎, 第 5 巻第 5 号, pp. 6-14, 1971. 5
- 17) 日本鋼構造協会：耐候性鋼橋の可能性と新しい技術, JSSC テクニカルレポート No73, pp16-17, 2006

Ⅱ. 要求性能と照査

1. 安全性

1.1 一般

- (1) 床版は作用荷重を直接支持するとともに、床版支持部に安全に伝達しなければならない。
- (2) 床版は以下の2つの性能項目について、それぞれ、およびその両方の組み合わせに対して安全性を確保しなければならない。
 - ① 荷重を直接支持する床版としての安全性
 - ② 主構造部材としての安全性

【解 説】

- (1) 床版には、死荷重に加えて活荷重などの繰り返し荷重が作用する。床版は、これらの荷重を安全に支持するとともに、床組部材の一部として支持げたに荷重を安全に伝達する性能が必要である。とくに大きな荷重の繰り返し載荷を受ける場合には、設計上の供用期間が経過した後にも安全であることを確認しなければならない。
- (2) 床版は荷重を直接支持する版として、床版の形状や支持条件のもとで、荷重に対する安全性が求められるが、一般部に加えて床版支持部の安全性についても十分確保しなければならない。また、プレキャスト床版や合成床版など、床版の輸送がある場合や、施工時の構造系が変化する場合には、施工段階での安全性の確認を行う必要がある。床版がけたと合成され主構造部材として用いられる場合や、地震荷重や風荷重などが床版の面内方向に作用する場合には、これらの断面力に対しても十分な安全性を確保する必要がある。

1.2 照査項目および照査指標

1.2.1 面外せん断

- (1) 面外に作用する荷重を支持する床版は、荷重近傍での押し抜きせん断に対して安全でなければならない。
- (2) 面外に作用する荷重を支持する床版は、床版支持部でのせん断に対して安全でなければならない。
- (3) 繰り返し荷重の作用により、力の伝達メカニズムが変化する場合には、その影響を考慮しなければならない。

【解 説】

- (1) 荷重を直接支持する床版は、荷重直下に作用する面外押し抜きせん断力を受ける。鉄筋コンクリート床版では、面外押し抜きせん断力は、荷重作用位置から45度で分布すると仮定して安全性を照査する。この場合、荷重の設置面積内での偏心や不均等がある場合には、その影響を考慮する必要がある。道路橋示方書¹⁾では、最小の床版厚を規定することにより、面外せん断に対する安全性を確保している。なお、コンクリート部材についてはコンクリート標準示方書等により照査することができる。鋼床版では、リブにより補剛されたデッキプレート構造により、面外せん断力に対して照査を行う。

- (2) 面外荷重を支持する床版は床版支持点付近で大きなせん断力を受ける。せん断力が最大となるような荷重位置で生じるせん断力について安全であることを確認する。床版支持部の安全性の照査においては、せん断力の大きさは解析や実験により求めることを原則とする。なお、道路橋示方書では、床版の最小版厚を規定し、かつ床版支持部にハンチを設けることで、床版各部のせん断に対する安全性を確保している。
- (3) コンクリート床版では、引張応力により、ひびわれ等の力の伝達メカニズムの変化が生じる場合がある。繰り返し荷重が作用する場合では、力の伝達メカニズムが変化した影響を考慮して安全性を考慮しなければならない。具体には、断面力算出時にひびわれによる異方性を考慮し、引張応力域のコンクリートにひび割れの影響を考慮して照査する方法などが用いられる。

1.2.2 面外曲げ

- (1) 面外荷重を支持する床版は、適切な方法で算出された面外曲げモーメントに対して十分安全でなければならない。
- (2) 提案された曲げモーメント式を用いる場合については、適用範囲や解析条件、またその精度に留意し、必要に応じて適切な補正を行わなければならない。

【解 説】

- (1) 面外荷重を支持する床版は、発生する面外曲げモーメントに対して十分安全でなければならない。面外曲げモーメントの算出に際しては、床版支持部における不等沈下や、面外曲げモーメントの発生する方向性に影響を与える支持条件の影響を考慮して解析や実験により、着目点に対して最も不利な載荷状態を想定して求める。
- (2) 道路橋示方書では、活荷重による面外曲げモーメントを与える式が規定されている。これらを利用する場合については、想定されている荷重状態、床版支間などの適用範囲、床版の支持条件、異方性の有無、曲げモーメント算出式の精度や含まれる安全率等を理解した上で適用しなければならない。床版の支持条件や荷重の条件などが仮定されたものと異なる場合には、その影響を明確にし、必要となる補正を行うなど、適切な面外曲げモーメントを求めなければならない。

1.2.3 面内力

- (1) 床版が主構造の一部として機能する場合や、地震、風、温度変化などの荷重が作用する場合には、床版面内の力に対して安全でなければならない。
- (2) 床版を支持するけた等の大きなたわみにより、床版面内の力を受ける場合はその影響を考慮しなければならない。

【解 説】

- (1) 橋梁が床版とけたの合成げたとして設計される場合や、鋼床版については、面外荷重に加えて、主構造の一部として床版面内の力も発生する。この床版面内の力と荷重を直接支持することによる床組みとしての断面力のそれぞれ、およびその両方の組み合わせに対して安全性を確認する。主構造としての作用と床組み作用の組み合わせに際しては、組み合わせ断面力の発生状況を考慮した安全率の設定を行ってよい。道路橋示方書では、この重ね合わせの断面力に対して、許容応力度を割り増しさせる方法等により安全性を

評価している。

- (2) 床版を支持するけたに、大きなたわみが生じる場合には、面外曲げモーメントに加えて、面内力が作用する場合も想定される。このような場合には、その面内力に対しても安全性が確保できるように設計しなければならない。

1.3 設計作用

- (1) 床版は以下の2種類の活荷重状態、および衝撃による影響を考慮する

- 1) 設計活荷重状態：100kN の輪荷重（車両進行方向 20cm×直角方向 50cm）が、床版の着目断面に対して最も不利なように、橋軸方向には1組、橋軸直角方向には載荷できるだけ載荷した荷重状態
- 2) 照査活荷重状態：類似路線での実測結果から得られる最大輪荷重が、床版の着目断面に対して最も不利なように1組が単独で載荷された荷重状態

- (2) (1)に示された活荷重の他に、総則編「5. 作用」に示される設計作用のうち、想定される設計作用を適切に組み合わせた作用状態において適切な作用係数を考慮して、耐力を確保しなければならない。

【解 説】

構造物の耐力性能を照査する場合の荷重として、道路橋示方書には、①主荷重として、死荷重、活荷重、衝撃、プレストレス力等がある。また、②従荷重として風荷重、温度変化の影響、地震の影響等があり、さらに③その構造物の用途や施工方法、または設置場所等から個別に考える特殊荷重等が規定されており、各々係数を乗じて組み合わせた設計作用として設計するものとされている。過去の構造物の耐力に関連した破壊を見ると、劣化していない構造物で耐力が問題となる事例は、地震荷重や風荷重（静的、動的）等の道路橋示方書では従荷重として取り扱われている荷重による事例が多いようである。主荷重下で耐力が問題となるのは、主に疲労や腐食・材料劣化による部材耐力の低下に起因するものが多く、特殊荷重下では、衝突荷重による損傷や施工途中での部材耐力の不足が多いようである。

床版構造を想定した場合の耐力照査では、風荷重や地震荷重等の従荷重による床版の損傷事例は比較的少ないが、橋梁全体の耐力性能が失われることなく、風荷重や地震荷重を伝達する性能が求められる。また、主荷重に対しては、活荷重を直接支持する部材であるため、活荷重の実態に則した活荷重の設定と経年の供用にともなう部材耐力の低下を想定した安全率の設定が求められる。この場合、単に床版として荷重を直接支持する性能と、主げた等の支持点への荷重の伝達性能、さらには主げたの一部として床版に発生する断面力への抵抗性能が求められる。また、プレストレスやクリープ、乾燥収縮等の影響や、施工中に作用する輸送時や架設時に作用する荷重に対する耐力性能の照査も重要である。

- (1) 1) 設計活荷重状態は、図-1.1に示すような道路橋示方書に記されたT荷重に対して耐力を確保することを要求している。

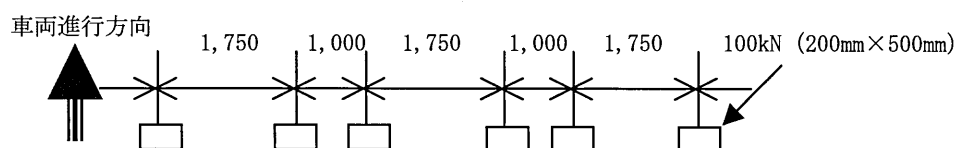


図-1.1 設計活荷重状態

- 2) 道路橋示方書で記される活荷重の設定は、設計自動車荷重を 245kN として定められており、風荷重や地震等のように、設計供用期間に対して確率的な考察を加えて設定された荷重とは、設定方法に大きな差があると言える。そこで、類似路線で実測された活荷重の最大輪荷重 1 組を照査活荷重状態とした。土木研究所資料第 2700 号「限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ」²⁾によると、1 週間の調査期間中に軸重約 300kN が 1 軸あるいは 2 軸（タンデム）で実測されている。したがって、重交通が予想される路線では、照査活荷重として図-1.2 に示すような 1 ヶ所 150kN の輪荷重（車両進行方向 200mm×直角方向 500mm）によるタンデム荷重（軸重 300kN，合計荷重 600kN）1 組を考慮して照査するのが望ましい。なお、実測された荷重は衝撃の影響を含んだ荷重と推察されるが、土木研究所資料第 2539 号「限界状態設計法における設計活荷重に関する検討」³⁾で示された衝撃係数は平均 1.04 と比較的小さいため、対象とする構造別に別途考慮する必要があるものとする。

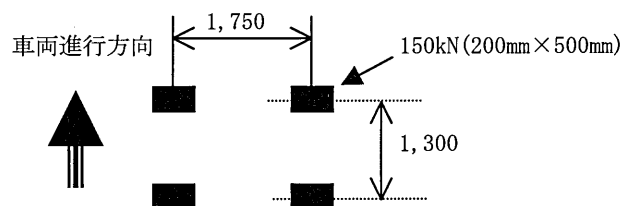


図-1.2 照査活荷重状態(例)

なお、図-1.2 に示した照査活荷重状態は、比較的大型車の交通量が多い重交通路線の橋梁に適用すべき荷重状態の例である。照査活荷重状態は、橋梁の地理的状況、交通網における路線の位置づけなどにより見直すことも必要である。

1.4 安全性の照査方法

- (1) 床版の安全性は、所定の部分係数を考慮して照査しなければならない。
- (2) 照査は少なくとも以下の部位に対して行うものとする。
 - ① 単純版部・連続版部
 - ② 片持版部（支持部、壁高欄等取り付け部）
 - ③ けた端部（不連続部）
 - ④ 開口部（断面急変部）

【解 説】

(1) 安全性の照査においては、各部分係数を適切に決定しなければならない。特に、床版の厚さ不足などの施工誤差が床版の強度に与える影響が大きいため、床版厚さの不足の可能性が懸念される場合には、別途安全率を大きくとる必要がある。なお、道路橋示方書に規定される曲げモーメント式は、構造解析の影響や施工誤差の影響を考慮して、理論値に対して 10～20% の安全側の式となっている。

< 許容応力度法 >

許容応力度設計法では、部材の基準強度（材料強度あるいは、疲労や座屈のように部材や構造全体としての強度）を所定の安全率で除した許容応力度を用いて、荷重により発生する応力

度と比較し、状態レベルが確認される。

道路橋示方書では、主荷重と主荷重に相当する特殊荷重に対しては、材料の降伏に対して1.7程度の、破壊に対して3.0程度の安全率を確保している。主荷重と従荷重や従荷重に相当する特殊荷重の組み合わせや従荷重単独の作用に対しては、許容応力度を割り増すことによって、荷重の発生確率に配慮した安全率の低減が行われている。状態レベルを安全率の大小により規定する場合、活荷重や地震荷重等の変動荷重では、作用する荷重の設定値により同じ安全率でも状態レベルに差が生じる場合がある点に留意しなければならない。

＜ 限界状態設計法 ＞

限界状態設計法では、想定された限界状態で求められる部材や構造全体の抵抗断面力と、荷重により部材や構造全体に作用する断面力の比率が、所定の安全率を満足することで照査される。耐荷力に対する安全率の算出では、死荷重と活荷重の比率が異なると構造物の安全性が変化するため、想定される限界状態が安全性に与える影響の程度を考慮して安全率を設定する必要がある。

＜ その他 ＞

照査荷重の設定値に応じて、従来構造物と同程度の安全率となるような状態レベルの設定において、とくに留意すべき点は照査手法の精度との関連である。すなわち、簡便な設計手法によりある安全率によって設計された既設構造物が健全であることと、FEM等の手法により詳細な応力状態を再現して従来と同じ安全率によって設計した新しい構造物が、既設構造物と同じ健全性を示すとは限らないことである。たとえば、けた設計において、格子解析により非合成として設計された構造物全体をFEMで解析した場合、床版の荷重分担が表現されるため、けたにはより小さな応力分布が生じ、床版には、格子解析では考慮されなかった断面力が発生することとなる。このような場合、FEMの解析結果をもとにけた断面を小さくし、許容される応力度レベルと発生応力度を近づけることで、一見構造の合理化が図れることとなるが、設計された構造は、格子解析で設計された構造と同じ健全性を保証したことにはならない点に注意しなければならない。

(2) 床版の安全性照査は、少なくとも条文に示した①～④の部位で実施する。上記の他、床版の断面変化部、施工上の継ぎ手部、PC鋼材の定着部、PC鋼材の偏向部などがある。これらの箇所では、部材の強度や床版の支持条件が変化するため、構造上の弱点となる可能性があるため、十分な補強を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編，2002
- 2) 土木研究所：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ，資料第2700号，1989.1
- 3) 土木研究所：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討，資料第2539号，1987.1

2. 使用性

2.1 一般

- (1) 床版は、想定される設計作用のもとで、設計供用期間を通して使用性が保持されなければならない。
- (2) 設計供用期間中の使用性に関する性能項目として、利便性を受ける対象に応じて以下の4つの性能に分類される。
 - 1) 走行性
道路橋床版は、通常の使用および気象条件のもとで、走行車両の走行安全性や利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えない性能を有しなければならない。
 - 2) 歩行性
道路橋床版および歩道橋床版は、歩行者に対して安全で快適な歩行性を確保するために、通常的作用および気象条件のもとで、ある限度以上の不安感、不快感を与えない性能を有しなければならない。また設計を行うにあたっては、高齢者や障害のある人を含むすべての人々が安全かつ快適に利用できるような性能を有しなければならない。
 - 3) 第三者被害の防止
橋梁を直接利用しない第三者に対しても、床版が有害または不快な影響を与えない性能を有しなければならない。
 - 4) 利用者に対するその他の配慮
道路橋床版および歩道橋床版は、通常的作用および気象条件のもとで、その構造物の利用者、および第三者に対してある限度以上の不安感や不快感を与えないよう配慮するものとする。
- (3) 使用性に関する照査は、性能を表現しうる適切な指標を設定し、それぞれの項目ごとに設定された限界状態に対して行うものとする。

【解 説】

- (1) 橋梁が供用される際に、利用者や第三者に利便性や安全の確保および快適性等を確保するための性能のうち、道路橋床版に起因する性能を、床版の使用性とする。ただし、気象条件や地震等により供用が出来ない場合や利用制限がある場合は除くものとする。
- (2) 本指針では、走行車両の運転者もしくは同乗者が対象となる走行性、歩行者が対象となる歩行性、橋梁を直接利用しない第三者に対して有害または不快な影響を与えないようにする第三者被害防止、および上記以外に必要と考えられる利用者に対するその他の配慮を求めるものとした。
 - 1) 走行性
橋梁が供用される際に、走行車両に対して走行安全性や快適性を確保するために、通常的设计作用(死荷重などの永続作用、活荷重や風などの変動作用)および車両が走行できる気象条件のもとで、利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えないこと。このとき車両が安全に走行できることを含めて走行性に対する要求性能として設定した。
走行性には、通常時の走行性、雨天時の走行性、強風時の走行性、および冬期の走行性が考えられる。走行性に関する要求性能および照査項目の項目を表-解2.1.1に示す。具体的な照査項目および照査指標の例については「2.2 照査項目および照査指標」に述べる。

表-解 2.1.1 走行性に関する性能項目および照査項目

性能項目		照査項目
走行性	通常時の走行性	線形への対応
		路面の健全性
		剛性
		耐振動性
		走行時の視界
	雨天時の走行性	路面排水に対する配慮
	強風時の走行性	強風に対する配慮
	冬期の走行性	路面凍結に対する配慮

通常時の走行性は、通常の状態で利用者にある限度以上の不安感、不快感を与えない性能であり、その照査項目には、線形への対応、路面の健全性、剛性、耐振動性および走行時の視界が挙げられる。

雨天時、強風時、および冬期の走行性は、走行安全性に関わる性能であり、これらの性能に対する照査項目には、それぞれ路面排水に対する配慮、路面上での強風発生頻度あるいは強風対策、路面凍結に対する配慮が挙げられる。

床版の走行性に関する性能項目および照査項目には、とくに考慮する必要はないが、橋梁全体として地震時における走行性を考慮する必要がある。地震時の走行性には、想定する地震動および橋の重要度に応じたレベルの耐震性を想定している。たとえば、V耐震設計編¹⁾に基づき、鋼・合成構造標準示方書²⁾では、レベル1地震振動とレベル2地震動を設定している。地震時の走行性の確保としてレベル1地震振動、すなわち設計供用期間中に発生する確率が高い地震動に対して、伸縮装置の遊間やけた遊間を確保して、走行車両の機能を保持できるように設計するものとする。また、濃霧あるいは降雪時、地吹雪における走行性については、設計段階で要求性能として設定する必要は少ないと考え、ここでは考慮した上で必要に応じて設定すればよい。

2) 歩行性

道路橋床版および歩道橋床版は、歩行者にはある限度以上の不安感、不快感を与えないことを歩行性に対する要求性能として設定した。歩行性には、通常時の走行性が考えられる。歩行性に関する性能項目および照査項目を表-解 2.1.2 に示す。また、歩行者には、ユニバーサルデザインの考え方を可能な限り取り入れ、高齢者や障害のある人を含むすべての通行者が快適に利用できる構造物とすることを努力規定として設定した。

なお、具体的な照査項目および照査指標の例については「2.2 照査項目および照査指標」に述べる。

表-解 2.1.2 歩行性に関するおよび照査項目

性能項目		照査項目
歩行性	通常時の歩行性	路面の健全性
		耐振動性
		視認性

3) 第三者被害の防止

橋梁を直接利用しない第三者に対しても、床版が有害または不快な影響を与えることのないように要求性能を設定した。第三者被害の防止するための照査項目として、落下物等による被害防止および騒音・振動について設定した。第三者被害を防止に関する性能項目および照査項目を表-解 2.1.3 に示す。なお、具体的な照査項目および照査指標の例については「2.2 照査項目および照査指標」に述べる。

表-解 2.1.3 第三者被害の防止に関する性能項目および照査項目

性能項目	照査項目
第三者被害防止	落下物等による被害防止
	振動・騒音

これらの第三者被害の防止に対しては、走行性、歩行性と同一の照査項目を含む場合もあるが、それぞれの性能項目に応じた照査方法を考慮して各々照査すべきである。なお、耐振動性に対する性能等、様々な供用性に影響を与える床版の剛性の大小は、鋼げたに発生する二次応力に関わりがあり、鋼げたの疲労耐久性に影響を及ぼす要因となる。しかしながら、ここでは床版が機能を発揮するための性能について取り扱うものとする。

4) 利用者に対するその他の配慮

道路橋床版および歩道橋床版が、直接の利用者、第三者に対して、走行性、歩行性、第三者被害の防止以外にも、ある程度以上の不安感や不快感を与えることがないように、利用者に対するその他の配慮を求めるものとした。

一般には、橋梁床版の過度の変形や外観の劣化により、利用者や第三者に対して不安や不快な影響を与えないことが必要である。一般に、床版表面にある限度以上のひび割れ、汚れなどが認められた場合には、利用者や第三者に対して不安感や不快感を抱かせることになる。このため、橋梁管理者は橋面および床版の外観が利用者の感覚に及ぼす影響を事前に検討するとともに、外観が悪化した場合における対策を検討する必要がある。

また、床版の水密性が十分確保されていない場合には、床版の許容できない幅のひび割れからの雨水の浸透等により、水漏れが発生することもある。一般に、コンクリート表面のひび割れ、鋼床版部材の接合部、およびコンクリートと鋼鉄の界面が水密性に及ぼす影響を検討しなければならない。

- (3) これらの走行性、歩行性、第三者被害の防止、利用者に対するその他の配慮に対しては、同一の照査項目を含む場合もあるが、それぞれの要求性能に応じた照査方法、要求レベルを考慮して各々照査するものとする。性能項目の照査に関しては、それぞれの要求性能に応じた照査項目、照査方法、および限界設計状態を考慮するものとする。

2.2 照査項目および照査指標

床版の設計供用期間中の使用性に対する性能項目に係わる照査は、以下により行うものとする。

(1) 走行性に対する照査

1) 通常時の走行性に対する照査

通常時の走行性として、線形への対応性、路面の健全性、剛性、耐振動性および

走行時の視界について下記の内容を照査する。

- a) 線形への対応性：道路線形は、縦横断勾配、平面形状等が走行に適していることを確認する。
- b) 路面の健全性：路面の平坦性および摩擦係数がある限界値を下回らないことを確認する。
- c) 剛性：活荷重によるたわみがある限界値を超えないことを確認する。
- d) 耐振動性：変動荷重による動的影響と車両振動が、床版に有害な影響を与えないことを確認する。
- e) 走行時の視界：視距が設計速度に応じ確保されていることを確認する。

2) 雨天時の走行性に関する照査

雨天時の走行性の照査は、あらかじめ設定された降雨量以上の路面排水性能を持つ排水システムが構築されていることを確認するとともに、床版表面に防水層が施されていることを確認しなければならない。

3) 強風時の走行性に関する照査

強風時の走行性の照査は、構造物上の風速がある限界値を超えた場合には、風速に応じて適切な走行速度等の規制が行われていることを確認することにより行う。

4) 冬期の走行性に関する照査

冬期の走行性の照査は、路面凍結が生じにくい床版形式が採用されているかどうか、あるいは路面凍結防止の対策が採られているかどうかを確認することにより行う。

(2) 歩行性に対する照査

1) 路面の健全性に対する照査

路面の健全性の照査は、路面の平坦性を確保するとともに、すべり抵抗係数がある評価指標の範囲内であること、勾配がある限界値を上回らないことを確認する。

2) 耐振動性に関する照査

耐振動性の照査は、歩行性に影響する振動速度または加速度が、固有周期に応じて設定されたある限界値を超えないこと、または固有振動数が共振域にないことを確認する。

3) 視認性に対する照査

歩行性に影響する視認性の照査は、視界に関する限界値を下回らないことを確認することにより行う。誘導ブロックや階段においては、その境界や段差が判別できる程度の明度差があることを確認する。

(3) 第三者被害の防止に対する照査

1) 耐振動性に対する照査

第三者に与える耐振動性に対する照査は、継続時間や振動を感受する状態が異なるため、その物理現象が走行性や歩行性に対する耐振動性と同一であっても、要求性能の状態レベルは異なる場合もある。

2) 落下物等による被害防止に対する照査

落下物等による被害防止に対する照査は、衝突荷重、風荷重、地震荷重あるいは材料の劣化にともなって部材が飛散する等して、橋梁下を通行する車両、歩行者、周辺居住者等に対して二次災害を引き起こさないことが必要である。

3) 振動・騒音に対する照査

一時的に橋梁上を通過する車両や歩行者にとって、床版に起因する振動・騒音は一時的な現象であるが、周辺居住者にとっては、大きな影響を及ぼす可能性があり、照査が必要な項目である。振動・騒音は空気振動であると考えられるため、振動数領域と振幅の大きさから求まる音圧レベル等を用いて照査を行う。

(4) その他の配慮に対する照査

その他の配慮に対しては、適切な照査指標を設定し、適切に設定された限界値を用いて照査することを原則とする。

【解 説】

使用性に関する照査項目および照査指標は、本来、床版の設計では以下に示す全ての項目を別個に照査すべきであるが、現状での照査技術を踏まえると実際に床版のみで照査できる項目は限られることから、本指針では、照査技術の現状を示すとともに、照査において留意すべき事項を述べることとする。

(1) 走行性に対する照査

通常時、雨天時、強風時および冬期の走行性に対する照査は、それぞれに対する適切な照査指標を用いて行う。走行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例を表-解 2.2.1 に示す。

表-解 2.2.1 走行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例

性能項目		照査項目	照査指標の例
走行性	通常時の走行性	線形への対応性	平面曲率, 縦断勾配・曲率, 横断勾配および設計速度, 道路規格
		路面の健全性	路面の平たん性, 摩擦係数
		剛性	たわみ
		耐振動性	床版の固有周期と共振する可能性のある構造物等の固有周期の関係
		走行時の視界	視距
	雨天時の走行性	路面排水に対する配慮	路面の排水性能
	強風時の走行性	強風に対する配慮	路面上での強風発生頻度と対策(速度等の規制, 防風柵等)
	冬期の走行性	路面凍結に対する配慮	路面凍結が生じ難い構造の採用 凍結対策の有無

1) 通常時の走行性に対する照査

通常時の走行性に対する照査は、線形への対応、路面の健全性、剛性、耐振動性および走行時の視界に対して、適切に設定された照査指標を用いて行う。

a) 線形への対応

線形への対応は、定められた道路線形を作用とし、縦横断勾配、平面形状等が走行に適しているか、さらにその条件で床版または路面が形成可能な床版であるかどうかを照査指標とする。一般に、最低限確保すべき線形は、道路構造令³⁾の規定として整理され、床版の設計にあたっては道路詳細設計の結果を設計条件とすることになる。

路面の縦断勾配は、同じ設計速度区間においては、同一走行状態が得られるような線形を確保しなければならない。当該道路の設計速度に応じて一定値が定められ、設計速度による走行が保証されるが、この縦断勾配に対しては車両の能力の差が大きく作用し、勾配区間における速度の低下は高速車の走行を妨害し、交通を混乱させ、安全性の低下が生じる原因となる。また、路面の横断勾配は、路面に降った雨水を側溝または排水桝に導くために必要であり、横断形状は、路面の排水に対して十分であるとともに、交通車両の走行に対して安全かつ支障のないものでなければならない。横断勾配を決定する

にあたっては、交通車両の種類、気象、道路の線形、縦断勾配、路面の種類などを考慮すべきである。さらに、縦断勾配と横断勾配とを合成した路面の合成勾配についても考慮しなければならない。たとえば、道路構造令の解説と運用⁴⁾では、縦断勾配に関しては、設計速度に応じた基準値を定め、設計速度が100km/hが3%以下、80km/hが4%以下、60km/hが5%以下と基準値を定めている。また、舗装道の横断勾配は1.5%～2.0%以下と基準値を定めている。ただし、自動車の交通量が少ない場合、その他の特別の理由がある場合においては、3.0～5.0%の値を標準としている。合成勾配については、当該道路の設計速度に応じ、設計速度100～120km/hが10%以下、60～80km/hが10.5%以下、50～60km/h以下が11.5%以下と設計速度に応じた基準値を定め、積雪寒冷地域での合成勾配は8%以下としている。

b) 路面の健全性

路面の健全性は、路面の凹凸、伸縮装置部の段差、路面とタイヤとの摩擦係数で表される。路面の健全性が低下すると車両の振動による変動荷重あるいは騒音を引き起こし、走行安全性に影響を及ぼし、利用者の快適性を損なう可能性がある。これらがある限界値を満足していれば、車両の走行安全性あるいは利用者の快適性が確保される。これらの限界値は走行試験等に基づき設定されることが望ましい。

路面の健全性を確保するためには、舗装のひび割れやわだち掘れ等による路面凹凸を最小限にする必要がある。舗装は供用性のみならず、耐久性に対しても重要な照査指標である。舗装に関する性能照査項目は、車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令⁵⁾、舗装標準示方書⁶⁾で基準を設けている。また、舗装の性能指標に関する評価は、発注者が対象となる現場の状況や地域性等を踏まえ、データのバラツキ等から安全性を考慮して統計的な検討を加えて定められる。なお、舗装の構造設計に関する基準は、舗装の構造に関する技術基準同解説⁷⁾に定められている。

橋梁の路面の凹凸は、衝撃係数値に大きく影響することから、設計値の設定には実橋の路面平たん性の程度を明らかにする必要がある。路面の凹凸の測定は3mプロファイルメータによる σ (標準偏差:mm)と8mプロファイルメータによるPI(Profile Index:cm/km)が一般的である。また、路面の縦断プロファイル(路面の縦断方向の凹凸)と乗り心地の関係から世界銀行が利用している平たん性の指標であるIRI(International Roughness Index:国際ラフネス指標)の路面管理指標⁸⁾や、ISO路面凹凸の評価基準⁹⁾がある。舗装路面の平たん性に関する基準は、車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令⁵⁾では2.4mm以下とされ、平たん性の測定は、実地にて行うものとしている。

道路橋伸縮装置付近の路面は、舗装の摩耗や流動、橋台背面の沈下などにより段差が生じる可能性が多く、走行車両による衝撃力は一般路面よりも大きくなっている。この伸縮装置付近の路面性状について、伸縮装置の前後にある長さの評価区間を設け、この範囲内での最大高低差を読み取り最大段差量として整理されている。伸縮継手の段差量は、伸縮装置付近の路面の維持管理水準にも係わり、たとえば、道路維持修繕要綱¹⁰⁾では、維持修繕要否判断の目標値が自動車専用道路で10mm、交通量の多い道路で15～20mm、交通量の少ない一般道では20～30mmとなっている。したがって20mm程度の段差量が及ぼす影響を設計上も考慮する必要があると考えられる。

自動車のタイヤと路面との摩擦係数は自動車の走行性に影響するため、走行性を確保できる限界値以上であることが必要である。摩擦係数には縦すべり摩擦係数、横すべり摩擦係数の2種類があり、道路構造令の解説と運用⁴⁾では、縦すべり係数には湿潤状態を想定し0.29から0.44として制動停止距離が規定されている。一方、横すべり係数には設計速度に応じ0.1から0.15を考慮して曲線部の線形が規定されている。

c) 剛性

車両の走行性に大きな影響を与えるのは、舗装のひび割れやわだち掘れ等の路面凹凸

による滞水の有無等、舗装や防水層の状態に関する事象である。橋面舗装は、橋梁床版上に防水層、基層（レベリング層を兼ねる）および表層を設ける構造である。施工上は、床版との接着性および水密性の確保が重要であることから、舗装敷設時の施工性確保や、防水層が追従できる床版の変形性能を有する剛性の確保が必要である。

橋梁全体の剛性が低い場合には、過大なたわみや振動によって走行安全性に問題が生じ、二次応力による予期せぬ損傷が生じるなど、橋梁に要求される性能が満たされなくなることがある。

橋梁の剛性に関する照査には、衝撃を含まない活荷重によるたわみの限界値を対象とする鋼橋の形式や規模、および、その使用条件に応じて定めるものとする。類似の橋梁に設計基準等の定めがある場合にはそれを準用し、設計基準がない場合には類似の橋梁における検討事例を参考にして適切に設定する必要がある。

コンクリート床版を有する鋼橋は、鋼げた部分には相当量のたわみが生じても安全性や耐荷力はほとんど影響を受けることはないが、鋼げたのたわみ量がコンクリート系床版に及ぼす影響は大きいとされている。これらのことから、Ⅱ鋼橋編¹¹⁾では、鋼橋のたわみの限界値を表-解 2.2.2 で規定し、その限界値以下であることを照査するものとしている。

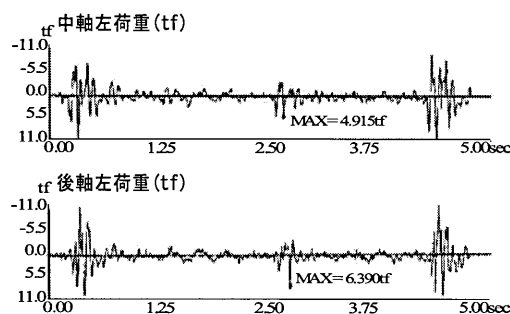
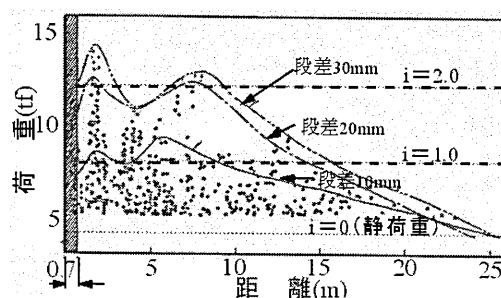
表-解 2.2.2 たわみの限界値

橋の形式			けたの形式	単純げた 及び連続げた	ゲルバーげたの 片持部
鋼げた形式	コンクリート 床版をもつ鋼 げた	L≤10		L/2,000	L/1,200
		10<L≤40		$\frac{L}{20,000/L}$	$\frac{L}{12,000/L}$
		40<L		L/500	L/300
	その他の床版をもつ鋼げた			L/500	L/300
吊橋形式				L/300	
斜張橋形式				L/400	
その他の形式				L/600	L/400

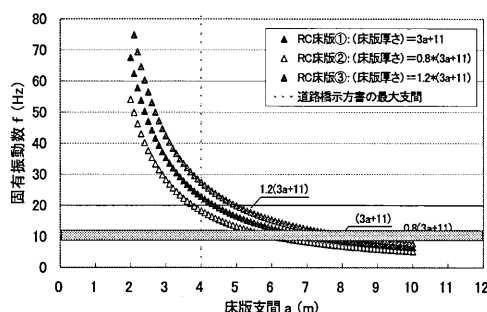
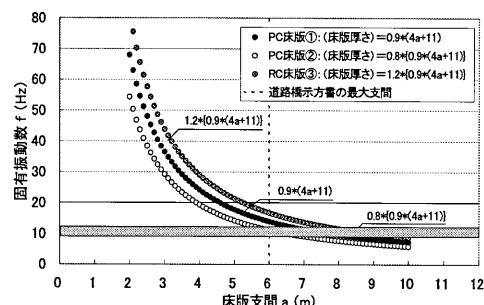
構造物によっては、動的作用を併用し、振動が利用者に及ぼす影響について、特に配慮する場合には、鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物¹²⁾では、たわみの限界値を緩和してもよいと想定されている。なお、コンクリート系床版に関するたわみの限界値については基準が定められていないことから、d)耐振動性における床版と走行車両の振動特性に伴う共振現象が生じない床版厚を確保することで剛性が確保されるものと見なすことができる。また、道路橋示方書・Ⅱ鋼橋編¹¹⁾の規定が参考なる。

d) 耐振動性

床版の振動特性の物理指標としては、変動荷重、たわみ、固有振動数、加速度等が考えられる。大型自動車が伸縮継手を通過する際には、伸縮継手の段差量によってその床版付近には大きな変動荷重が作用していることになる。たとえば、変動荷重に関して、橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書¹³⁾および橋梁の設計動荷重に関する試験調査報告書¹⁴⁾では、伸縮継手を通過する際に発生する荷重変動、段差部通過後の荷重分布および包絡線について、それぞれ図-解 2.2.1、図-解 2.2.2 を示している。大型車両が段差量 20mm を通過する場合の荷重変動は、軸重量の 2.7 倍前後となる。一方、段差部通過後の荷重分布は、段差部から 2m と 8m にピークが見られる。この前後の区間の橋面および床版には大きな衝撃力が作用し、コンクリート床版にはひび割れが発生し、舗装にはわだち掘れ等の原因となることから床版の剛性と最小厚さを確保する必要がある。

図-解 2.2.1 大型自動車の荷重変動¹³⁾図-解 2.2.2 段差部通過後の荷重分布および包絡線¹⁴⁾

上部構造の設計では、歩道橋については共振振動数に制限値が設定されており、道路橋では活荷重によるたわみの制限値が設定されている。床版固有の振動現象に関して、道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上¹⁵⁾では、道路橋の鉄筋コンクリート床版（連続版）およびプレストレストコンクリート床版（単純版）について固有振動数と床版支間の関係が、それぞれ図-解 2.2.3、図-解 2.2.4 のように示されている。

図-解 2.2.3 固有振動数と床版支間（RC 床版）¹⁵⁾図-解 2.2.4 固有振動数と床版支間（PC 床版）¹⁵⁾

一方、大型車両が 60km/h で走行する際に発生するバネ下振動数は 10～20Hz である¹⁶⁾。¹⁷⁾ すなわち、長支間の床版では、伸縮継手を通過することによって発生するバネ下振動数と床版の固有振動数とが一致し、床版は共振を起こす原因となる可能性が考えられる。この対策として、床版厚さが厚くなる大型車両の交通量が多い橋、床版を支持するけたの剛性が著しく異なるため大きな曲げモーメントが付加される橋など、特殊な条件下にある鉄筋コンクリート床版およびプレストレストコンクリート床版の最小厚さの決定については、道路橋示方書¹¹⁾では、床版支間と大型車両の計画交通量より、最小全厚を割り増しさせて設計されている。この場合の、鉄筋コンクリート床版およびプレストレストコンクリート床版の床版厚は、共振振動に関する性能は確保されている。また、共振振動に起因すると同時に衝撃が作用する。衝撃の影響は、床版支間に対する衝撃係数 ($i=20/(50+L)$, L : 床版支間長) が考慮されている。

近年、鋼橋においては少数主げた構造による床版支間が長大化するとともに耐久性のある新構造形式や新材料を用いた床版開発が進められている。これらの床版に対しても、走行車両の振動特性との共振振動が生じないような剛性の確保が必要となる。

e) 走行時の視界

自動車はその進行方向前方に障害物（または対向する自動車）を認め、衝突しないように制動をかけて停止（制動停止視距）するか、あるいは障害物を避けて走ることがで

きる長さ（追越視距）の視距を確保しなければならない。視距の確保については、

道路構造令の解説と運用⁴⁾では、運転者が車線の中心線上 1.2m の高さから当該車線の中心線上にある高さ 0.1m の物の頂点を見通すことができることとしている。また、積雪・寒冷地域の走行時の視界は、路面が凍結した場合の制動停止視距を十分に確保する必要がある。また、凍結路面の制動停止視距については、急ブレーキをかけた場合に横ブレに対する視距の確保も必要である。一般に、設計速度に応じた視距を確保することによって、積雪・寒冷地域の走行時の視界が確保される。

2) 雨天時の走行性に対する照査

雨天時においては、路面に雨水が溜まらないような路面の排水と、床版の劣化防止のための床版表面の防水性を確保することを使用性として要求するものとする。路面の排水性能を確保するために、排水システムの構築と水が直接的に接する舗装面の状態、すなわち舗装性を考慮する必要がある。

a) 排水

路面に雨水が滞水する場合、ハイドロプレーニング現象に対する運転者の恐怖心や、先行車、対向車による雨水の巻上げ、跳水、あるいは夜間照明の路面反射による視界不良によって車両の走行速度の低下を招く結果となる。このような状況は、走行性が低下する原因となり、走行時の使用性を決定づける要因の一つになる。

雨天時の走行性を確保するためには、路面に雨水が溜まらないような橋面上の縦横断勾配より、確実に排水される排水系統が確保されるような排水システムの構築が必要である。雨天時の走行性を確保するための路面勾配は、道路構造令の解説と運用⁴⁾では、適切な横断勾配（線形への対応）を設定し、適切な位置に排水柵を設けることとしている。また、雨天時の走行性に対する照査は、地域ごとに想定される雨量（降雨強度）に対し、集水幅の横断勾配と縦断勾配を考慮して流量計算を行い、排水柵が適切に配置されているかを確認する。さらに、排水柵の形式や排水管径、排水勾配等による排水装置の排水能力を確認することにより行う。排水システムは、道路土工―排水工指針¹⁸⁾に基づいて排水システムを構築することにより、排水に対する性能を確保することができる。さらに、実橋では排水柵の土砂詰まりにより、排水性能が低下することが考えられるため、ある水準で管理されることを前提に、この影響を考慮して排水性能を照査する必要がある。

路面の排水は、直接的には舗装に求められる性能でもある。近年、路面の雨水を早い時点で排除して走行性を確保する目的で、排水性の高い舗装（排水性舗装：国土交通省、高機能舗装：道路公団）が使用されている。この場合でも、通常床版上面には防水層が施されているため、直接的には床版そのものが排水性能に影響を及ぼすことは少ない。舗装面における浸透水量は、直径 15cm の円形の舗装路面の路面下に 15 秒間に、透視する水の量であり、一般に、車道及び側帯の舗装の構造の基準に関する省令⁵⁾では、普通の道路で 1.0l、その他の路面では 0.3l であり、舗装の表層の厚さ、および材質が同一である区間ごとに定められるものをいう。なお、浸透水量の測定は、実地に行うものとする。

したがって、橋や高架橋の走行面となる路面を直接的に構成する床版においても、このような状態に対する性能が規定されることになる。

b) 防水

橋面舗装は、床版上面に防水層、基層（レベリング層を兼ねる）および表層を設ける構造であり、施工上は床版との接着性および水密性の確保が重要であるが、床版の性能保持には、ひび割れへの浸水を防止するための防水層の設置が必要となる。また、寒冷地における融雪剤、凍結防止剤の散布により、塩水がコンクリート系床版および鋼床版のひび割れに浸水することがある。そこで、鋼材の腐食、コンクリートの劣化や凍結・

融解作用を防止するために床版上面には必ず防水層を施す必要がある。

3) 強風時の走行性に対する照査

強風時は走行安全性が損なわれる可能性があり，その場合には減速走行が必要になる。たとえば，高速道路における特別巡回，警戒体制および緊急体制の発令基準として，日本道路公団の特別巡回，警戒体制及び緊急体制の発令基準¹⁹⁾では，強風時における警戒体制として，暴風警報が発令された場合は速度規制がなされ，緊急体制では，最大風速が 25m/s では通行止め等の道路通行規制が行われている。強風時の走行に対する規制および発令は道路管理者が警戒体制に入った場合に発令して，強風時の走行に対する安全性が確保されている。

次に，風による部材振動は部材の安全性，耐疲労性に影響するため，その振幅は制限されるが，利用者への不安感についても無視できないことがあるので，その振幅はある限界値に制限され必要がある。

4) 冬期の走行性に関する照査

冬期の走行性に関しては，路面凍結が生じる地域において，とくに重要な要求性能である。構造物の設置目的や重要度によっては，積雪にともなう路面凍結を防止し，走行性を確保することを構造物の要求性能とすることが考えられる。たとえば，橋面の凍結防止対策としては，融雪剤，凍結防止剤やすべり止め材の散布，機械による除雪，あるいは粗面形成，ロードヒーティング等が挙げられる。また，熱容量が特に小さい鋼床版については蓄熱材封入による熱容量の改善等も試みられている。その他，看板等の設置によりドライバーに注意喚起を行うことも有効な対策である。ただし，融雪剤，凍結防止剤を使用することが予想される橋の床版は，錆の促進や周辺環境への影響に注意を払うなど，冬期における路面の管理方法を考慮することが望ましい。また，コンクリート床版や鋼床版の耐久性の向上を目的として，床版上面に防水層を施す必要がある。なお，コンクリート床版や鋼床版の耐久性については第3章で述べることとする。

(2) 歩行性に対する照査

路面の健全性，歩行時の耐振動性および視認性の照査は，それぞれに対する適切な照査指標を用いて行う。歩行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例を表-解 2.2.3 に示す。

表-解 2.2.3 走行性に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例

性能項目		照査項目	照査指標の例
歩行性	通常時の走行性	路面の健全性	路面の平たん性，すべり抵抗係数，透水性，
		耐振動性	速度，加速度，固有振動数
		歩行時の視認性	前方の視界，路面の明るさ，階段や誘導ブロックと周囲の明度差

1) 路面の健全性

路面の健全性に関する性能指標は，すべり抵抗性，路面の平たん性，透水性で表される。路面の平たん性は，路面の凹凸，舗装の割れ，段差量，路面の勾配（縦断勾配，横断勾配），に関する平たん性を評価したもので，利用者の歩行性を損ない，不快感を与えないように，路面の平たん確保に十分注意する。歩行者が安全，快適に歩行するための路面の健全性に関する性能指標は，適用実績が少ないことから目標値が示されていないものもあるが，各道路管理者は，当該路線の状況を踏まえ関連する参考図書等を基に設定している。

すべり抵抗性は、歩行時の使用性のみならず安全性に影響するため特に重要であり、使用性が確保できる評価指標の範囲内であることを照査する。路面のすべり抵抗係数は O-Y・PSM (O-Y・Pull Slip Meter) によるすべり指標 C.S.R または BPST (British Portable Skid Resistance Tester) によるすべり指標 BPN 等により、実験的に評価するものとする。すべり抵抗性は湿潤路面で歩行者がすべりやすさを感じない抵抗値の目標として BPN で 40 以上としている。

路面の平坦性における段差量および勾配が限界値を超えないことを照査する。たとえば、沿道道路環境保全のための道路用地の取得及び管理に関する基準について²⁰⁾では、段差量は、歩車道境界部の段差量 20mm を目標値としている。また、勾配は、縦断勾配および横断勾配について、それぞれ目標値が示されている。縦断勾配は 5%以下とされているが沿道の状況等によりやむを得ない場合は 8%以下としている。また、横断勾配は 2%以下を標準値としているが、交通バリアフリー法²¹⁾にもとづき整備される場合は、1%以下とするが、やむを得ない場合は 2%とする。また、縦断勾配を設ける箇所には横断勾配を設けないとしている。

歩道橋における階段、斜路、斜路付階段の昇降方式を定め、歩行者、自転車、乳母車および車椅子等の利用のしやすさを十分考慮して縦断勾配の限界値を定める。階段の勾配は、立体横断施設技術基準・同解説²²⁾では、50%を標準とし、斜路および斜路付階段の勾配はそれぞれ 12%、25%を超えないものとされているが、斜路についてはユニバーサルデザインの考え方を取り入れ、高齢者や障害のある人に配慮し勾配は小さくすることが望ましい。また、必要に応じてエスカレーターやエレベーターの設置を検討するものとする。

歩道の透水性の性能指標は、浸透水量であり、現場透水量試験によって求められる。透水性性能を設定した場合は、施工直後における浸透水量が 300ml/15s 以上を目標値として定めている。

2) 耐振動性

歩行時の振動は歩行者に不快感を与える可能性があるため、構造物の振動応答値（速度、加速度）がある限界値を満足することを照査すること、あるいは固有振動数が共振域を避けることを照査する。構造物の振動には車両走行にともなう振動、歩行者の歩行にともなう振動、歩行者の歩行にともなう振動および風による振動が考えられる。これらの振動に対する限界値は人間の振動感覚に着目した実験等で求められた値を用いる。また、歩行時の速度あるいは加速度の評価は、構造形式、荷重の載荷状態が複雑に絡むため、道路橋では車両走行を、歩道橋では歩行者の歩行をモデル化した構造物の動的解析に基づくことを基本とする。

風による振動に関しては風洞試験により推定された振幅より算定すればよい。また実験や解析に基づき簡易的照査法が示されている場合は、簡易な照査法を適用してもよい。

a) 歩行者の走行にともなう鉛直振動

歩道橋の鉛直振動の評価指標およびその限界値に関しては、立体横断施設技術基準・同解説²²⁾では、活荷重による主桁の振動が利用者に不快感を与えないことを要求しており、歩行者の歩調 2Hz との共振を防ぐため、1 次固有振動数が 2Hz 付近 (1.5~2.3Hz) になることを避けるように解説している。また、共振域を避けた場合においてもたわみ振動が歩行者に不快感を与えないようにするために、1 m²あたりに 1 人程度の通常時の使用状況で 2Hz の強制周期力による最大加速度が 100gal 以下とすることが望ましいとされている。また、小幡ら²³⁾の研究によれば、2Hz 付近以外に半共振状態を考慮した 4Hz、ジョギング等が頻繁に行われる歩道橋ではこれらに加えて 3Hz 程度の固有振動数においても不快感を示すことから、立地条件や利用層を考慮し、照査指標を定めることが望ましい。

b) 歩行者の歩行にともなう水平振動

歩道橋の水平振動に関しては、立体横断施設技術基準・同解説²²⁾や建設省制定土木構造

物標準設計の手引き²⁴⁾においても明記されていないため、これまでの設計では特別な検討を実施していない。しかしながら、斜張橋形式や吊床版橋形式などにおいて群集の移動による水平振動の影響が無視できないことが分かっている。水平振動の照査は、米田²⁵⁾の研究が参考になる。

3) 歩行時の視認性

歩行時の視界は構造物を快適に利用するための要求性能と考えられ、構造物の設置目的、位置および重要度に応じ歩行時の視界に関する要求性能を設定するのが合理的と考えられる。したがって、歩行時の視界の照査は、前方の視界あるいは路面の明るさが構造物に応じて設定された限界値を満足していることを確認する。なお、路面の明るさの照査は、立体横断施設技術基準・同解説²²⁾や道路照明施設設置基準・同解説²⁶⁾が参考になる。

(3) 第三者被害の防止に対する照査

第三者被害の防止に対する性能は、落下物等による被害防止、振動・騒音であり、それぞれに対する適切な照査指標を用いて行う。第三者被害の防止に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例を表-解 2.2.4 に示す。

表-解 2.2.4 第三者被害の防止に関する要求性能の照査項目および照査指標の一例

性能項目	照査項目	照査指標の例
第三者被害防止	落下物等による被害防止	破壊や剥落に対するかぶり厚の保有安全率や耐久年数
	振動・騒音	振動数領域と振幅の大きさから求まる音圧レベル

1) 落下物等による被害防止

衝突荷重、風荷重、地震荷重あるいは材料の劣化にともなって部材が飛散する等して、橋梁下を通行する車両、歩行者、周辺居住者等に対して二次災害を引き起こさないことが必要である。一般に、床版において部材の飛散の原因となり得る事象は、壁高欄への水平方向荷重による壁高欄付近の部材飛散、照明柱や標識柱等では橋梁振動より疲労破壊による部材の飛散、床版下面の経年劣化によるコンクリート片剥落、および伸縮装置付近等からの漏水等が考えられる。これらの影響は、一般には安全性（耐荷力性、疲労耐久性、材料耐久性）として照査されるが、安全性に直接寄与しない部位については別途、照査が必要となる。

2) 振動・騒音

走行車両が一定の条件で運行する場合に発生する振動・騒音は、一時的に橋梁上を通過する走行者や歩行者にとって、一時的な現象であり、大きな問題となることは少ない。しかしながら、周辺居住者にとっては継続して発生する振動・騒音は、その程度によっては大きな影響を及ぼす可能性があり、照査が必要な項目である。振動・騒音は、空気振動であると考えられるため、振動数領域と振幅の大きさから求まる音圧レベル等を用いて照査を行う。

低周波振動は、橋梁床版の自由振動、橋梁の振動応答、空気振動を一連の現象として関連し、橋梁床版が振動することによって空気に攪乱が生じることによって発生する。低周波振動は、騒音と同様に周辺居住者に不快感を与える原因となる。振動および低周波問題に影響を及ぼす床版単体の固有振動数は 10Hz 前後、走行車両のバネ上振動数が 3Hz 前後の場合に、低周波振動を発生する可能性が高いと考えられる。なお、人体感覚上問題とされる振動数は 1～90Hz である。低周波振動に関しては、走行車両が路面の平たん性と橋梁振動特性により発生することから、橋梁全体として考慮する必要があるが、床版としては

とくに考慮しないものとする。

騒音は、高架橋の低周波音の音圧レベルを床版直下 1m で測定するとピーク値は 100dB 前後で、道路境界面から 15m 離れると 80～85dB となり、周辺には振動音などの二次音が発生する。騒音の対策としては伸縮装置の段差によって発生することが主たる原因であることから、路面の健全性（伸縮装置の段差、路面の凹凸）を確保しなければならない。

一般に、住環境に近接する大型幹線道路の騒音・振動は、振動規制法により車両走行が発生する音圧レベルの規制を受ける。また、地方自治体により環境基準の定められている地域もあり、これらの値をもとに照査を行うことが一般的であると考えられる。たとえば、高架橋を管理する諸機関が遵守すべき法律として振動規制法がある。たとえば、道路交通振動の要請基準²⁷⁾として表-解 2.2.5 のように示している。

表-解 2.2.5 道路交通振動の要請基準

時間の区分 区域の区分	昼間	夜間
	第一種区域	65db
第二種区域	70db	65db

騒音に係わる基準は、環境基本法がある。たとえば、沿道道路環境保全のための道路用地の取得及び管理に関する基準について²⁸⁾では、騒音に係わる環境上の条件について生活環境を保全し、人の健康の保護に資するうえで、維持されることが望ましい環境基準を定めている。また、自動車騒音の要請限度として騒音規制法がり、自動車騒音に係る許容限度等²⁹⁾では、指定地域内における自動車騒音の限度として定められている。たとえば、都道府県知事が指定する地域および時間の区分による音圧レベルを要請している。

設計段階において床版単体に起因する騒音等の音圧レベルを精度よく推定することは困難であるが、橋梁本体の固有周期や床版単体の固有周期、また、これらの組合せにより、振動特性を把握することである程度の推定が可能である。

(4) その他の配慮に対する照査

道路橋床版および歩道橋床版が過度の変形や外観の劣化により、利用者や第三者に対して不安や不快な影響を与えないことが必要である。

コンクリートで被覆された床版の外観は、コンクリート表面のひび割れや劣化によるはく離によって損なわれない必要がある。ひび割れ幅の限界値は、要求される水密性の程度や卓越する作用断面力の種類によって異なると考えられているが、たとえば、コンクリート標準示方書³⁰⁾では、0.1～0.2 mm 以下であるとし、コンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針³¹⁾では 0.3mm 以下であるとしている。また、塩害作用を受けたコンクリート系床版に対する外観変形状態は、たとえば、(仮称) 塩害橋梁維持管理マニュアル(案)³²⁾では、ひび割れ、鉄筋の錆汁、剥落の程度により判定基準が示されている。

外観が特に重要である構造物においては、橋梁管理者は鋼およびコンクリートの表面性状に応じて適切な対策を施す必要がある。鋼材の塗装およびコンクリートの表面仕上げに留意するとともに、コンクリートの部材表面の汚れ防止や吹き溜まり部分の排除などの対策を施すことが重要である。

また、床版の水密性については、コンクリートの表面のひび割れに対して水密性が損なわれないようにする必要がある。高い水密性が必要とされる場合には、防水工の適用について検討する。また、凍結防止剤散布による塩害、凍結・融解に対しても防水工の適用について

検討する必要がある。

2.3 設計作用

- (1) 使用性の照査にあたっては、Ⅰ総則「5. 作用」に示される設計作用のうち、想定される設計作用を適切に組み合わせた作用状態において、使用性を確保すること。
- (2) 設計作用の設定においては、構造物に求められる性能のレベルを適切に判断し、気象条件等を設定するものとする。

【解 説】

使用性の照査に用いる設計作用は、照査すべき項目と構造物に求められる性能のレベルに配慮して適切に設定しなければならない。

① 走行性

走行性の照査に用いる設計作用は、作用の種類および気象条件と重要度を勘案し、性能のレベルを適切に設定した上で定めなければならない。走行性は風および雨などの気象条件の影響を強く受け、気象条件に応じて性能レベルを設定するのが妥当と考えられることから、表-解 2.3.1 に示すような性能レベルを設定するとよい。

表-解 2.3.1 走行性に関する要求性能レベルの例

レベル	作用および気象条件	性能項目	内容
レベル1	・設計供用期間中に作用する活荷重 ・気象条件1(風速, 雨量が十分小さい)	通常時の走行性	走行安全性を確保し, 利用者に不快感を与えない。
レベル2	・気象条件2(風速, 雨量があるレベル以上)	通常時以外の走行性	通常時の走行性がある程度損なわれることを許容するが, 走行安全性を確保する。

表-解 2.3.1 に示す気象条件 1 は、風速、雨量あるいは路面凍結などの気象条件が走行性に影響しない範囲であり、通常時の走行性を満足させる必要がある。気象条件 2 は、走行性に大きな影響を受ける気象条件であり、有料自動車道で、速度規制が行われているように、通常の走行性がある程度損なわれることを許容するのが合理的と考えられる。

なお、構造物の設置目的および重要度に応じて、気象条件 2 のような場合でもレベル 1 を満足させるように設定することも考えられる。

② 歩行性

歩行性の照査に用いる設計作用は、作用の種類および気象条件と重要度を勘案し、性能のレベルを適切に設定した上で定めなければならない。歩行者の使用性は、一般には通常の気象条件のもとで確保すればよいと考えられるが、通常時以外の状態においても最低限の安全性を確保する必要がある。表-解 2.3.2 に性能レベルの例を示す。

表-解 2.3.2 歩行性に関する要求性能レベルの例

レベル	作用および気象条件	性能項目	内容
レベル1	・設計供用期間中に作用する活荷重 ・気象条件1(風速, 雨量が小さい)	通常時の歩行性	歩行者に不安感・不快感を与えない。
レベル2	・気象条件2(風速, 雨量があるレベル以上)	通常時以外の歩行性	振動を感知し, ある程度の不安感・不快感を持つことを許容するが, 歩行者の安全性を確保する。

表-解 2.3.2 に示す気象条件 1 は, 風速, 雨量あるいは路面凍結などの気象条件が歩行性に影響しない範囲であり, 通常時の走行性を満足させる必要がある。気象条件 2 は歩行が可能であるが歩行性に影響するレベルの気象条件であり, 通常の歩行性がある程度損なわれることを許容することが合理的と考えられる。

気象条件 2 では一般には歩行者に対する使用性を確保しないものとするが, 構造物の設置目的および重要度に応じて, 気象条件 2 のような場合にもレベル 1 を満足させるように設定することも考えられる。例えば, 通常では歩行できない強風時に対して防風対策により歩行性を保持させるようなことが考えられる。

③ 第三者被害の防止

これらの第三者被害の防止に対しては, 走行性, 歩行性と同一の照査項目を含む場合もあるが, それぞれの要求性能に応じた照査方法, 作用のレベル, 性能のレベルを考慮して各々照査する必要がある。

2.4 使用性の照査

使用性の照査においては, それぞれの照査項目に対して適切な照査指標を定め, 規格値との比較, 数値解析・実測その他の方法による応答値の算出を行い, 所要の性能が確保されていることを確認するものとする。

【解 説】

性能照査においては, 照査する項目ごとに適切な照査指標を定めて限界値と応答値を算出し, 部分係数を考慮して「Ⅰ 総則」の式(4.1)によって照査することが基本となるが, 使用性の照査にあたっては, 数値解析等によって応答値が定められるもの(例: 振動特性)の他に, 目的に応じて定められた規格値を限界値とする場合(例: 道路構造令)や, 床版以外の構造性能を確保することで床版の使用性が確保できる場合(例: 舗装の状態)など, 様々である。

そのため, 定められた適切な照査指標に対して照査を行う際には, 照査の形態が, 本来の照査式の主旨を満足しているかどうかを十分に考慮して行う必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅴ 耐震設計編，2002
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 総則編・構造設計編・設計編，2007
- 3) 政令：道路構造令，2003
- 4) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，2004
- 5) 国土交通省：車道及び側道の舗装の構造の基準に関する省令，国土交通省令第103号，2001
- 6) 土木学会：舗装標準示方書，2007
- 7) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準同解説，2001
- 8) 中日本高速道路：高速道路の舗装技術の動向，中日本高速道路(株)中央研究所道路研究部，1997
- 9) ISO：Proposals for generalized road inputs to vehicles, ISO/TC 108/WG9 Document No.2, pp.1-9, August, 1973.
- 10) 日本道路協会：道路維持修繕要綱，1978
- 11) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ，2002
- 12) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART A 一般構造物，1997
- 13) 土木研究所：橋の衝撃荷重に関する試験調査報告書(I-1987)，土木研究所資料，No. 2508，1987
- 14) 土木研究所：橋梁の設計動荷重に関する試験調査報告書(I-1985)，土木研究所資料，No. 2258，1987
- 15) 土木学会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004
- 16) 阪神道路公団：橋脚振動測定報告書，1981
- 17) 日本道路公団：若戸大橋拡張前後の振動実験，1990
- 18) 日本道路協会：道路土工－排水工指針，1987
- 19) 中日本道路：日本道路公団の特別巡回，警戒体制及び緊急体制の発令基準(東名高速道路)
- 20) 建設省都市局長，道路局長通達：沿道道路環境保全のための道路用地の取得及び管理に関する基準について，1994
- 21) 国家公安委員会，運輸省，建設省，自治省告示：交通バリアフリー法(高齢者，身体障害者等の公共交通機関を利用した移動の円滑化の促進に関する法律，法律第68号，2000
- 22) 日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1978
- 23) 小幡卓司，林川俊郎，佐藤浩一：人間の振動感覚に基づいた歩道橋の使用限界状態に関する研究，土木学会論文集，No. 537/I-35, pp. 217-231. 1997
- 24) 全日本建設技術協会：建設省制定土木構造物標準設計第5巻(横断歩道橋・地下横断歩道)の手引き，1984
- 25) 米田昌弘：歩道橋上を群衆が移動する場合の振動使用性評価法，構造工学論文集，Vol. 49A, pp. 263-272, 2003
- 26) 日本道路協会：道路照明施設設置基準・同解説，1981
- 27) 振動規制法：第四章 道路交通振動に係る要請，法律第94号，2004
- 29) 建設省都市局長，道路局長通達：沿道道路環境保全のための道路用地の取得及び管理に関する基準について，1994
- 28) 騒音規制法：第四章 自動車騒音に係る許容限度等，法律第33号，2005
- 30) 土木学会：コンクリート標準示方書，2002
- 31) 日本コンクリート工学協会：コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針，2003
- 32) 国土交通省：(仮称) 塩害橋梁維持管理マニュアル(案)，北陸地方整備局道路部，2007

3. 耐久性

3.1 耐疲労性

3.1.1 一般

- (1) 床版は設計供用期間中に予測される荷重の繰返し作用に耐えうる耐疲労性を有していることを確認しなければならない。その際、活荷重のほか、風荷重等の影響を考慮しなければならない。
- (2) 床版の耐疲労性の確認においては、床版が疲労により破壊に至るまでのメカニズムを把握し、面外せん断および面外曲げ疲労が問題となる部位の検討を行わなければならない。
- (3) 床版の耐疲労性は、適切な疲労強度評価法に基づき確認するものとする。

【解説】

本節では、RC 床版、PC 床版、および鋼・コンクリート合成床版等のコンクリート系の床版と、鋼床版を対象としている。

- (1) 床版の耐疲労性とは、ある一定以上の荷重(活荷重、あるいは疲労荷重)が繰返し作用するときの破壊に対する床版の耐久性である。道路橋床版の性能を左右する最も重要な作用は輪荷重である。輪荷重は床版に直接載荷され、床版は輪荷重の繰返し作用に対して非常に過酷な条件下に置かれている。床版の耐疲労性としては、この輪荷重の繰返し作用に対して床版の設計供用期間終了時点まで、許容される以上の安全性や使用性の低下を招くような損傷が生じないことが必要とされる。一般に、走行車両以外の疲労が床版で問題となる例は少ない。しかしながら、壁高欄に大きな遮音壁を設けたような場合、片持ち部の床版には風荷重により比較的大きな作用を受ける可能性があり、また、このような構造物が固有の振動等を起こすことも考えられる。

その際、床版の応力の値によっては、設計供用期間に風荷重が繰返し作用することや固有の振動による繰返し効果に対する耐疲労性の検討を行うことが必要になる場合がある。風荷重や振動に限らず、繰返しが想定される作用のすべてに対して、耐疲労性を確保する必要がある。

- (2) 疲労破壊のメカニズムは床版の種類によって異なるため、床版の疲労設計を行うには、対象床版の疲労破壊メカニズムの解明が重要である。疲労破壊のメカニズムが明確化されることにより、部材に対する疲労強度が求まり、床版の設計供用期間中に予測される荷重の繰返しに対する床版の耐疲労性の照査が可能となる。

RC 床版では、設計供用期間に作用する繰返し荷重に対し、床版の鉄筋およびコンクリートに生ずる曲げ応力度に対する耐疲労性を有すること、床版断面に生ずるせん断力に対する耐疲労性を有すること、および床版断面に生ずる押抜きせん断力に対する耐疲労性を有することが必要である。PC 床版では、RC 床版と同様の耐疲労性に加え、PC 鋼材、およびその定着部の耐疲労性の確保が必要である。鋼・コンクリート合成床版では、底鋼板や骨組部材、あるいは鉄筋部材等の鋼部材に対する照査と、コンクリート部材に対する照査、鋼部材とコンクリート部材の接合部の照査が必要である。

鋼床版は比較的薄い鋼板を溶接によって複雑に組み合わせた構造であり、これらの溶接継手部が設計供用期間中に作用する繰返し荷重に対し、耐疲労性を有していることを照査する必要がある。

- (3) 疲労強度評価においては、作用する荷重強度、頻度、および適切な評価方法を用いることが重要である。交通荷重や風荷重等の繰返し作用の設定は、基本的には床版の設計供用期間中に生じる作用を予測して定めることとなる。コンクリート系床版の評価方法としては、輪荷重走行試験などの疲労試験結果より求めた S-N 曲線による疲労強度評価、疲労強度を相対比較することによる評価、等価荷重と疲労安全率による疲労強度評価等が提唱されている。なお、現状のコンクリート系床版では道路橋示方書の規定を満足すれば、過去の RC 床版と比較して大幅に疲労強度が改善されることがわかっており、所定の安全率が確保されているものと考えられる。

コンクリート系床版の疲労には、床版面外方向荷重による曲げ疲労やせん断疲労と、面外押抜きせん断疲労が考えられる。鋼・コンクリート合成床版等では、前者の曲げ疲労は主に鋼材の疲労破壊となるが、後者の活荷重による押抜きせん断疲労は、既存の多主桁道路橋に用いられている鉄筋コンクリート床版の疲労破壊形態として知られているコンクリートの疲労破壊となる。耐疲労性を検証するためには、床版形式の破壊のメカニズムを再現できる適切な実験や解析手法を用いなければならない。

一方、鋼床版の疲労では、複雑な応力場にある溶接継手部の疲労強度評価が必要となる。昨今ではデッキプレートを貫通するような疲労損傷が報告され始めているが¹⁾、疲労損傷のメカニズム解明に関する研究^{2)~5)}が進められている段階にあり、疲労強度評価方法が確立されるまでには至っていない。現状では、設計計算による応力度の照査などではなく、構造詳細により耐疲労性を確保する対応が行われている⁶⁾。

3.1.2 照査項目および照査指標

3.1.2.1 面外せん断疲労

- (1) 床版は輪荷重等による面外押し抜きせん断疲労に対して耐久性を有していなければならない。
- (2) 床版は支持点近傍の面外せん断疲労に対して耐久性を有していなければならない。

【解説】

床版は直接荷重を支持するため、荷重から面外力を受ける。また、ずれ止めを介して鋼げたと一体化されるコンクリート系床版や、鋼床版では主構造として面内力を受ける。安全性同様、耐疲労性についても、これらの重ね合わせを考慮した照査が必要であるが、繰返し荷重としては、面外力が卓越することが多いため、耐疲労性の照査項目、照査指標は主に面外力に対するものとした。

- (1) コンクリート系床版では、荷重直下に作用する面外押し抜きせん断力を受ける。そのため、押し抜きせん断により疲労破壊することが考えられる。押し抜きせん断に対する耐疲労性評価方法としては、輪荷重走行試験機による疲労試験があるが、これは自動車の車輪を模擬した鉄輪やゴムタイヤを用いて床版上を移動しながら荷重を載荷する試験方法であり、これによって実橋の RC 床版の疲労破壊が再現されることが確認されている。輪荷重走行試験結果に基づいた S-N 曲線として、例えば図-解 3.1.1 や(解 3.1.1)が案提されている⁷⁾。S-N 曲線の縦軸(荷重)は P_0 を基本耐荷力として無次元化しているが、後述する梁状化の影響が大きい床版では、S-N 曲線も異なったものとなる点に留意する必要がある。

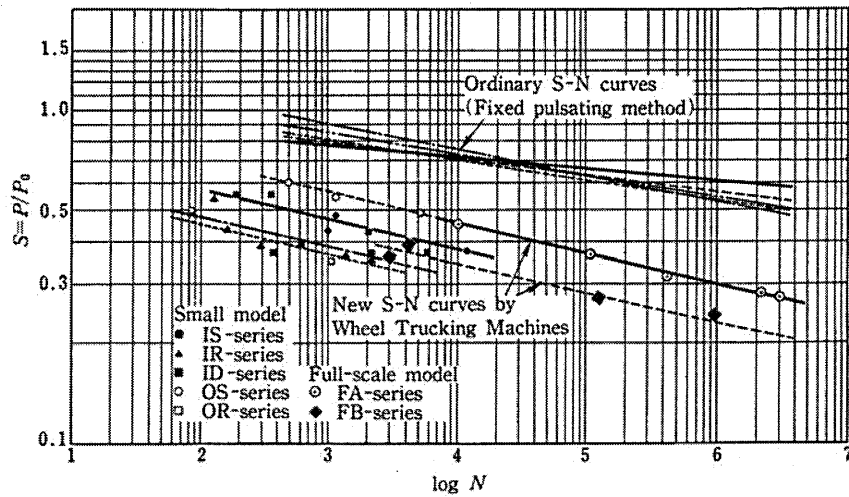


図-解 3.1.1 輪荷重走行試験機による RC の S-N 曲線の例 ⁷⁾

$$\log\left(\frac{P}{P_0}\right) = -0.0892 \log N + \log 1.02 \quad (\text{解 3.1.1})$$

P_0 : 押し抜きせん断強度

$$P_0 = f_v \{2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m\} + f_t \{2(a + 2d_m)C_d + 2(b + 2d_d + 4C_d)C_m\}$$

a : 載荷板の主鉄筋方向の辺長

b : 載荷板の配力鉄筋方向の辺長

f_v : コンクリートのせん断強度

f_t : コンクリートの引張強度

x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを考慮しないときの中立軸高さ

x_d : 配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを考慮しないときの中立軸高さ

d_m : 引張側主鉄筋の有効高さ

d_d : 引張側配力鉄筋の有効高さ

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ

C_d : 引張側配力鉄筋のかぶり深さ

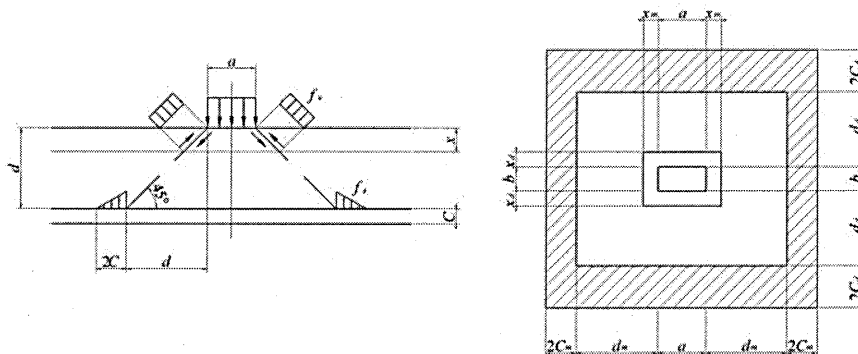


図-解 3.1.2 RC 床版の押し抜きせん断破壊モデル

この他、コンクリート系床版の耐疲労性の安全率を明確にする方法として、所要の設計供用期間中に想定される荷重を代表荷重とその繰返し回数で表し、代表荷重と S-N 曲線上の破壊荷重の比として定める照査方法も提案されている⁸⁾。

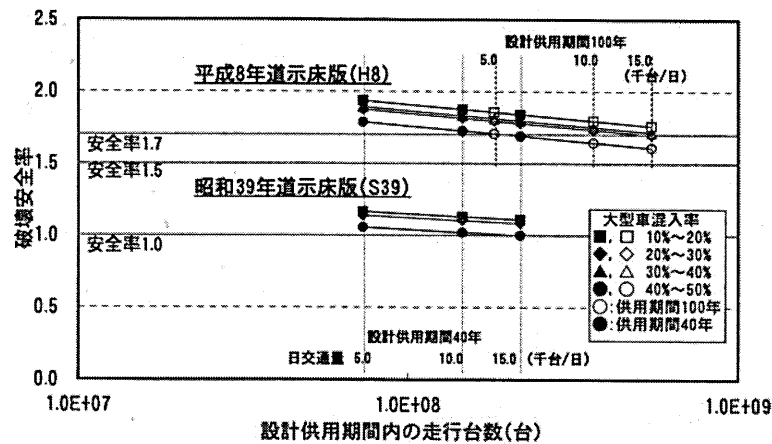


図-解 3.1.3 安全率による耐疲労性の評価例⁸⁾

$$P = \left(1 - \frac{\log N_{eff}}{14}\right) \times \frac{V_{pcd}}{k} \quad (\text{解 3.1.2})$$

$$\nu = \frac{P}{P_{max}} \quad (\text{解 3.1.3})$$

N_{eff} : 最大輪荷重 P_{max} による疲労被害が等価となるように換算した等価繰返し回数

V_{pcd} : 設計押抜きせん断耐力

$$k : \text{輪荷重載荷面 (} a : \text{載荷幅, } b : \text{載荷長) の係数 } k = \frac{(2 \times a + b)}{a + b}$$

ν : 破壊安全率 (解 3.1.3)

主鉄筋と配力筋の比率が大きく異なる RC 床版が、ひび割れにより梁状化した後の押抜きせん断破壊については種々の研究が進んでおり、輪荷重走行試験結果に基づいた S-N 曲線図-解 3.1.4 や(解 3.1.4)も提案されている^{7),9),10)}。

なお、RC 床版の S-N 曲線の適用に際しては、勾配が極めて緩やかな ($m=1/11 \sim 1/14$ 程度) 片対数曲線であることから、時間軸である載荷回数 N による疲労強度の変化に比べ、材料や施工のばらつき、荷重形態の違いによる荷重強度の変化が極めて大きいということに留意しなければならない。

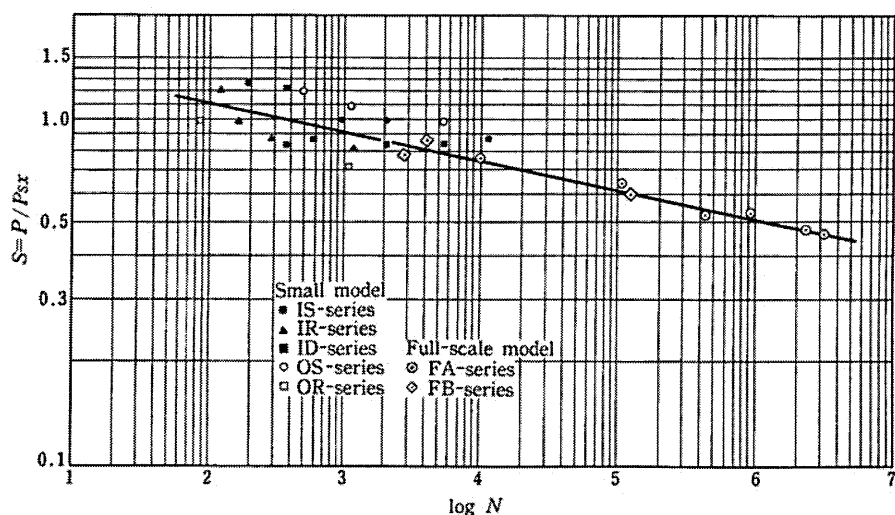


図-解 3.1.4 梁状化を考慮した RC 床版の S-N 曲線の例 ^{7),9)}

$$\log\left(\frac{P}{P_{sx}}\right) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (\text{解 3.1.4})$$

P_{sx} : 梁状化した RC 床版の押し抜きせん断耐力 $P_{sx} = 2B(f_v x_m + f_t C_m)$

B : 梁状化の梁幅 $B = b + 2da$

b : 載荷板の橋軸方向の辺長

f_v : コンクリートのせん断強度

f_t : コンクリートの引張強度

x_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを考慮しないときの中立軸高さ

da : 配力鉄筋の有効高さ

C_m : 引張側主鉄筋のかぶり深さ

このほか、PC 床版や鋼・コンクリート合成床版の押し抜きせん断による疲労破壊については、式(解 3.1.4)を基準とした疲労強度評価が試みられている ^{11),12)}。

(2) 輪荷重等が直接載荷される部分のほか、床版上に載荷された荷重の反力が作用する床版支持点近傍でのせん断疲労破壊も考えられるため注意が必要である。

3.1.2.2 面外曲げ疲労

- (1) 床版は、面外曲げ疲労に対して耐久性を有していなければならない。
- (2) 床版を構成する材料を接合している結合部材は、床版の面外曲げ疲労に対する応力に対して耐久性を有していなければならない。

【解説】

- (1) 面外荷重を受ける床版は、発生する面外曲げモーメントに起因する疲労に対して安全でなければならない。

コンクリート系床版の疲労破壊形態は押抜きせん断疲労が最も一般的な破壊であるが、PC 床版では床版支間が大きくなり床版厚が増加した場合の疲労破壊の報告はなく、押抜きせん断破壊よりも曲げによる鉄筋、あるいは PC 鋼材の疲労破壊が支配的と推測されている^{11),13),14)}。鋼・コンクリート合成床版に関しても、同様であると考えられる。

コンクリート系床版において、床版の耐疲労性確認の一手法として行われている輪荷重走行試験は、主に供試体サイズの制約（床版支間が短いため）から、床版に作用する曲げモーメントは実橋より小さいものとなる場合がある。曲げ応力度に対する耐疲労性を照査するためには、載荷荷重や繰り返し回数を増加させた試験や、橋軸方向、または橋軸直角方向の断面を模擬した梁状の供試体を用いた定点載荷による疲労試験等の適切な方法で照査しなければならない。

鋼床版は主げたの上フランジとしての作用（Ⅰ系）、剛な主げたに支持された版または格子構造（Ⅱ系）、縦リブに支持され直接荷重を受けるデッキプレート（Ⅲ系）としての役割があるが、これらの組合せが、面外曲げ疲労の要因となる。Ⅰ系やⅡ系により発生する応力は、一次応力として設計計算より求められるため、これらが支配的な部位においては通常の鋼構造物と同様の疲労照査事例もあるが¹⁵⁾、Ⅲ系により発生する二次応力の影響が大きい部位については舗装剛性の変化や輪荷重の大きさ・走行位置を考慮した疲労照査を行う必要がある。Ⅲ系により発生する応力度の算出は困難なため、特定の構造詳細について疲労強度評価式を構築した例¹⁶⁾や実測した局部応力を用いて疲労強度評価を試みた例¹⁷⁾、FEM 解析を用い、一般的には疲労強度評価が可能とされるホットスポット応力¹⁸⁾やエフェクティブノッチストレス¹⁹⁾等が算出された事例はあるが、これらの評価の妥当性については十分検証されているとは言えない。現状、二次応力の影響が大きく、疲労強度が不明確な部位については、鋼道路橋の疲労設計指針⁶⁾や鋼構造物疲労設計指針¹⁵⁾など、適切な規準に示される耐疲労性に優れるとされた構造詳細を考慮して設計する必要がある。

- (2) コンクリート系床版を構成する材料を接合している部材には、鋼コンクリート合成床版のコンクリートと鋼板を接合しているずれ止め、PC 床版の PC 鋼材定着具等が挙げられる。これらの部位の疲労照査は輪荷重走行試験により包括的に疲労強度を確認することも考えられるが、個々の部位での性能は不明確である。個々の部位に疲労照査について検討する場合、一般的に溶接構造となるコンクリート合成床版のずれ止めは、接合部の複雑な挙動についても留意する必要がある²⁰⁾⁻²³⁾。その他、コンクリート系床版を構成する鋼部材の疲労に関しては、静的実験または FE 解析等により鋼材に発生する応力範囲を求め、疲労強度等級を用いて照査する方法も考えられるが、輪荷重の移動に伴って着目部の応力度が交番の影響を受ける場合もあり、載荷位置や載荷方法については十分な検討が必要である。

3.1.2.3 水の影響

- (1) 床版の耐疲労性に悪影響を及ぼす路面からの浸水に対して、床版上面には防水層等の防水工を設置するものとする。
- (2) 防水工を設置しない場合は、床版上の滞水の影響を考慮しなければならない。

【解説】

- (1) RC 床版に代表されるコンクリー系床版では、床版上に滞水がある場合は、水張り輪荷重載荷試験等により耐疲労性が著しく低下することが知られている。このため、路面からの床版上面への滞水を防止するために、防水層等の防水工を設置するものとする。また、鋼床版については、床版上の耐水が直接的には耐疲労性の低下につながらないが、腐食防止の観点より、舗装の基層をグースアスファルト舗装としない場合には、適切な防水層を用いることが望まれる。
- (2) 上記の防水工を設置しない場合は、床版上に滞水した水が疲労性に及ぼす影響を十分に考慮する必要がある。

3.1.3 設計作用

床版の設計供用期間中に予測される荷重の繰返し作用の大きさと頻度の分布、および作用位置分布を設計作用として考慮する。

【解説】

交通荷重の繰返し作用の設定は、基本的には床版の設計供用期間中の走行車両を想定することであり、具体的には輪荷重の大きさとその累積頻度分布を設定することである。床版の設計供用期間中の走行車両による繰返し作用の累積については、交通形態が社会情勢や周辺の道路整備状況、過積載車両の取り締まり状況あるいは車両技術の進歩等により変わり得るため、これを正確に想定することは極めて困難なことであるといわざるを得ない。計画する道路に類似すると判断できる供用路線の交通荷重実態の実測値^{10),24)-26)}をもとに、できるだけ正確に将来の交通量を予測して定めることが基本となるが、これを路線毎に定めることは非現実的であり、産業道路か観光道路かといった道路の性格により決定される大型車混入率や当面の計画交通量をもとに、ある程度のパターン化も必要となる。また、鋼部材の疲労設計のように、走行車両のシミュレーションを行って、荷重頻度スペクトル、あるいは代表荷重を設定することも考えられるが、局所応力が支配的となる鋼床版への適用には留意が必要である^{27),28)}。

また、その他の作用、例えば風荷重等による繰返し作用の影響が考えられる場合においても、基本的には、床版の設計供用期間中に想定される繰返し作用の累積は、その大きさと頻度分布を設定することが必要となり、適切にこれを評価しなければならない。

3.1.4 耐疲労性の照査

荷重の繰返し作用の累積により、許容される以上の耐力力性や使用性の低下をもたらすような損傷が生じるまでの耐用年数が、床版の設計供用期間以上であることを照査するものとする。

$$\text{耐用年数} \geq \text{床版の設計供用期間}$$

【解説】

床版の耐疲労性は、床版の設計供用期間に対する耐用年数の長短により性能のレベルを表現すべきであるが、下記の理由より、床版の耐疲労性に関する照査式は、耐用年数と床版の設計供用期間を用いた。

耐疲労性に係わる状態レベルとしては、対象床版が荷重の繰返し作用の累積により許容される限界状態に達するまでの耐用年数を算出して、床版の設計供用期間に対する安全率として表現する方法と、設計供用期間に対応する破壊荷重を算出して、作用荷重に対する安全率として表現する方法が考えられる。前者は時間的な安全率という概念であるが、例えばコンクリート系床版の耐疲労性を S-N 曲線を用いて行った場合、S-N 曲線の傾きが緩やかであることから、床版厚のごくわずかな変化に対して耐用年数がオーダー単位で変わり、過大な設計ととらえられかねない。後者は荷重的な安全率という概念であるが、破壊荷重により照査をおこなった場合、作用荷重の推定精度や施工誤差による影響が大きくなり、安全率の概念が合理的に評価されないという問題が生じる。このような問題から、照査式は耐用年数と設計供用期間の大小比較とした。

限界状態については「床版の設計供用期間終了時点で許容される以上の耐力力性や使用性の低下を招くような損傷が生じる限界の状態」と考え、標記の記述とした。

3.2 耐腐食性および材料劣化抵抗性

3.2.1 一般

床版を構成する各種材料は、設計供用期間を通じて有害な劣化・変質を生じることなく、以下に示す性能を有していなくてはならない。

(1) 鋼材の耐腐食性

鋼材の供用状態を2種類に大別し、それぞれの性能は以下のとおりとする。

- 1) 塗膜やめっき等の被覆材料（以下、一般的な被覆材料と称する）を施し、大気中で供用する鋼材に対しては、有害な錆の発生がないこと。
- 2) コンクリート中の鋼材に対しては、次のとおりとする。
 - ① ひび割れによる鋼材腐食が生じないこと。
 - ② 中性化による鋼材腐食が生じないこと。
 - ③ 塩化物イオンによる鋼材腐食が生じないこと。

(2) コンクリートの材料劣化抵抗性

コンクリートに対しては、次のとおりとする。

- ① アルカリ骨材反応が生じないこと。
- ② 凍結融解が生じないこと。
- ③ 化学的腐食が生じないこと。

(3) その他使用材料の材料劣化抵抗性

その他の材料に対しては、材料の変質・材料強度の低下が生じないこと。

【解 説】

本指針における有害な劣化・変質とは、床版の耐荷力、疲労等の安全性や使用性等に影響を及ぼす材料の劣化・変質のことを示すものとする。

床版はその構造上の特性から軽量であることが合理的であると考えられ、結果として広がりのある薄い構造部材として設計・供用されることが多い。そのため橋梁の他の構造部材に比べて環境の影響を受けやすい。また、過去に多用されたRC床版に代わり合成床版やPC床版が利用される機会が多くなってきている。さらに、床版が主構造部材とみなされることも増えてきたため、以前にもまして環境に対する耐久性に留意することが必要とされる。

鋼材やコンクリート等の床版構成材料に対しては、これまでに数々の研究がなされてきており、材料劣化の原因や床版材料の損傷過程が解明されてきているものも多い。それら既往の研究成果に照らし合わせると、新規の床版構造に対してもその材料劣化の進行状況や損傷過程を概ね予測することができる。

本指針では、鋼材とコンクリートのほか、その他の材料（新材料を含む）を含めて床版構成材料の耐久性について整理した。

- (1) 床版構成材料のうち鋼材の使用状態は、①鋼・コンクリート合成床版の鋼材のように塗膜やめっき等の被覆を施して大気に触れる用い方の場合、および、②床版内部（コンクリート中）で使用されて大気に触れない用い方の場合の2種類に大別できる。どちらの場合であっても有害な錆の発生は防ぐべき問題として挙げられるが、鋼材の用いられる部位により発錆に至るまでの過程が異なることから、本指針において鋼材は、その使用状態とそれに伴う劣化・変質という観点から照査項目を設定した。なお、本指針における有害な錆と

は、錆の発生によって耐荷力、疲労等の安全性や使用性等に影響を及ぼす錆のことを示すものとする。

1) 塗膜やめっき等の被覆を施して大気に触れる用い方の場合

この場合、劣化形態は大気中で供用される鋼材と同様と考えられることから、一般的な鋼材の劣化・変質と捉えることができる。なお、塗膜、めっき、溶射等の被覆材を施した鋼材、すなわち、一般的な被覆材を施した鋼材を大気中で供用する場合、被覆材の耐久性が照査項目であるとの考え方もあるが、ここでは、結果として鋼材に有害な錆が生じなければよいと考え、有害な錆の発生を照査項目とした。耐候性鋼材を使用して被覆材を用いない場合も想定されるが、その場合は保護性さび（耐候性鋼材の緻密な表面錆）を事実上の被覆材料と考えることで、上記の表現が適用できる。

2) 床版内部（コンクリート中）で使用されて大気に触れない用い方の場合

一方、床版内部で使用されて大気に触れない場合、構造部材であるコンクリートが鋼材被覆材としての役割も担うため、一般には劣化しにくくなるとされているが、供用環境によっては、コンクリートが構造部材としての性能を保ちつつも劣化していき、その影響で鋼材の劣化・変質が進行することも考えられる。この場合の鋼材の劣化・変質は、一般的な鋼材のそれとは異なることに留意しなくてはならない。

鋼材をコンクリート中で使用する場合、あるいはコンクリートに接触させて使用する場合には、コンクリートのアルカリ性が確保されることから、その中では鋼材表面に不働態皮膜が形成され、錆は生じにくいとされている。しかし、実際には輪荷重によってひび割れが生じた場合、あるいは、海塩粒子や凍結防止剤、海砂等に含まれる塩分がコンクリート内に浸透、存在した場合、コンクリート中といえども鉄筋や鉄骨、PC鋼材、鋼製のシース管等（以下、鉄筋等と称する）に錆が生じることがある。また、空気中の炭酸ガスによってコンクリートのアルカリ性が低下し（いわゆる中性化）、コンクリート中の鋼材が錆びやすくなることも知られている。ここではそれらをふまえ、コンクリート中の鉄筋等に有害な錆が生じる理由をこの3項目とし、それら各々によって鋼材腐食が生じるか否かを照査項目とした。

- (2) コンクリートについては材料の変質や材料強度の低下という観点からアルカリ骨材反応、凍結融解、化学的腐食（化学物質による劣化）を照査項目として挙げた。コンクリートが使用される環境に対応した照査項目が対象となることに留意しなければならない。
- (3) ここで述べるその他の材料とは、床版を構成する材料のうち、鋼材およびコンクリート以外の材料のことを示すものとする。その他の材料については、材料の変質や材料強度の低下という観点から照査項目を設定した。

昨今、実用化が進められている、鋼材およびコンクリート以外の材料を使用した床版構造については、上記の耐久性に関する諸性能のほか、耐火性、耐水性、耐紫外線性、耐アルカリ性、クリープ特性等、発生し得るあらゆる劣化について調査し、有害な材料劣化が生じないことを確認しなければならない。

例えば、その他の材料で既に実績のある樹脂系材料やカーボンファイバーのシートの中には、鋼材やコンクリートではほとんど問題にならない紫外線によって材料としての耐久性が低下するものがあるが、その材料の照査項目は、紫外線による劣化を生じないことになる。

3.2.2 照査項目および照査指標

(1) 鋼材の耐腐食性

鋼材被覆材料の劣化進行状況によって、以下の項目を照査指標とする。

(照査項目)	(照査指標)
1) 一般的な被覆材料により被覆された鋼材	塗膜表面やめっき表面の腐食状態
2) コンクリート中の鋼材	
① ひび割れによる鋼材腐食	: ひび割れの大きさ
② 中性化による鋼材腐食	: 中性化深さ
③ 塩化物イオンによる鋼材腐食	: 鋼材位置での塩化物イオン濃度

(2) コンクリートの材料劣化抵抗性

コンクリートの劣化進行状況によって、以下の項目を照査指標とする。

(照査項目)	(照査指標)
1) アルカリ骨材反応	: コンクリート中のアルカリ総量
2) 凍結融解	: 相対動弾性係数
3) 化学的腐食	: 各作用因子の程度・総量等

(3) その他使用材料の材料劣化抵抗性

その他の使用材料についても材料に応じた項目および照査指標を選定する。

【解 説】

(1) 鋼材については各々の供用状態に応じて照査指標を設定する必要がある。

1) 一般的な被覆材料により被覆された鋼材

一般的な被覆材料により被覆された床版の鋼材についていえば、従来の鋼橋に用いられている鋼材とその使用環境は同じといえる。橋梁の腐食等については既往の研究・報告等^{29)~31)}の数も多く、劣化の進行状況が明らかになってきていることから、ここでの記述は割愛する。各種文献等を参照されたい。

塗膜や亜鉛めっき等は鋼・コンクリート合成床版や鋼床版にも用いられてきており、照査指標はそれら被覆材料、具体的には塗膜表面やめっき表面の腐食状態とした。床版の場合、橋梁と異なる点として、降水のたびに、桁端部や排水装置周辺から流水・漏水の影響を受ける可能性が挙げられる。また、床版はその特性上、水平に近く舗装等が施されており、水分が乾燥し難い状態で供用されることから、滞水や浸水の可能性も高く、腐食が促進されやすい環境下にあるといえる。そのため、桁部や梁部材に比べてその腐食環境は厳しく、さらに塩分を含んだ水分やコンクリートのアルカリ分を含んだ水分が供給されることも考えられることから、塗膜寿命は一般的な橋梁の場合より短くなることが予想される。したがって、その照査指標もそれらを反映させたものでなくてはならない。

2) コンクリート中の鋼材

コンクリート中の鋼材が腐食する要因は、水分を前提として、①ひび割れの大きさ、

②中性化深さ、③鋼材位置における塩化物イオン濃度であることから、これらを照査指標とした。中性化に関しては中性化速度式が、また、塩化物イオン濃度については塩化物イオン濃度の浸透式が、それぞれコンクリート標準示方書等に示されており、これらを用いることで材料耐久性を設計耐用年数として予測することができる。これにより耐久性を具体的な期間で表現することが可能であることから、ここではこれらの研究成果を床版の設計に適用し、設計段階で算定式による試算を行い、その結果を適宜設計に反映することとした。以下に各々の算定式を示す^{32)～38)}。このとき、照査指標を示す物理量に回帰式を用いる場合が多いが、その物理量のばらつきをどのように評価した回帰式かを確認することが重要である。回帰式の値が平均的な値であるか、あるいは安全側の値であるかによって照査指標のもつ意味が変わってることがあり、注意を要する。

① ひび割れによる鋼材腐食

ひび割れの大きさについてはひび割れ幅とそのひび割れ深さとが考えられるが、鋼材腐食の発生しやすさの程度はひび割れ幅で評価することができる。

ひび割れ幅については、曲げを受けるコンクリート部材に生じるひび割れとの前提で計算をされる場合が多い。許容ひび割れ幅 w_a として文献（コンクリート標準示方書）には「特に厳しい腐食環境」で、かぶりを c としたとき、床版に用いられる異形鉄筋の場合には

$$w_a = 0.0035c \quad (\text{解 3.2.1})$$

が示されている。床版では通常コンクリートのかぶりは 30 mm であるから、その許容ひび割れ幅は

$$w_a = 0.0035c = 0.105 \text{ mm} \quad (\text{解 3.2.2})$$

ということになる。

ただ、この許容ひび割れ幅は床版の輪荷重が通ったあとはそのひび割れが閉じるという特殊状況（以下、息をするひび割れと称する）を反映したものではなく、そのひび割れが持続する場合の値と考えられる。平成 12 年道路橋床版の新技術と性能照査設計³⁹⁾では、この息をするひび割れ幅を考慮して、活荷重載荷時点のひび割れの値を 0.5 倍して持続ひび割れの幅とすることを推奨していたが、ひび割れが開いた状態と、息をする状態の評価が 0.5 倍でよいかどうかは難しい評価である。これらの解明や妥当な判断基準の提案は、今後の研究課題としたい。

また、ひび割れが単なる曲げによって生じるのではなく、乾燥収縮や温度応力によって貫通したひび割れが生じる可能性もある。その場合に上面からの水分の浸透等、材料の耐久性に影響を及ぼすことは勿論、床版の疲労耐力にも大きな影響があることも分かっている。コンクリートの打設順序や養生等施工方法を適切に選択するとともに、防水層の使用等により、材料の耐久性が損なわれることのないよう配慮しなくてはならない。なお、これらについては文献 40)、文献 41) が参考となる。

また、ひび割れ幅の算定式はコンクリート標準示方書に示される手法によるのが一般的であるが、連続合成桁の中間支点部の負曲げを受ける場合等には、初期ひび割れによる影響が顕著な場合もあり、特に連続合成桁の設計等においてはこれらを考慮した提案式⁴²⁾を用いるのがよい。また、横リブを有する合成床版など、特殊なひび割れの発生状況に特徴のある場合のひび割れ幅算定式なども提案されており⁴³⁾、状況に応じて適切な算定式を使うことが必要である。

② 中性化による鋼材腐食

中性化については、中性化速度式により中性化の深さを算出し、鉄筋位置まで中性化が進行しているか否かを予測できることから、中性化深さをその指標とした。コン

クリート構造物における中性化深さは、供用期間の平方根にほぼ比例することが広く知られており、中性化の進行予測手段のひとつとして、コンクリート標準示方書（施工編第2章）にも中性化速度式が記載されている。以下に中性化速度式を示す。

< 中性化速度式 >

$$y_b = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t} \quad (\text{解 3.2.3})$$

ここに、 y_b ：中性化深さの設計値（mm）

γ_{cb} ：中性化深さの設計値のばらつきを考慮した安全係数

α_d ：中性化速度係数の設計値（mm/√年）

$$= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c \quad (\text{解 3.2.4})$$

α_k ：中性化速度係数の特性値（mm/√年）

β_e ：環境作用の程度を表す係数

γ_c ：コンクリートの材料係数

t ：中性化に対する耐用年数（年）

③ 塩化物イオンによる鋼材腐食

塩害の照査指標はそのまま鋼材位置における塩化物イオン濃度とした。塩化物イオン濃度は土木学会のコンクリート標準示方書（施工編第2章）にあるように、腐食発生限界塩化物イオン量 1.2 kg/m³ 以下であるなら、鋼材は腐食していないとしてよい。鋼材位置の塩化物イオン濃度を次の式から計算し、その濃度が 1.2 kg/m³ を超えれば、鉄筋に錆が生じると考えることにする。

< 鋼材位置の塩化物イオン濃度 >

$$C_{dc} = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (\text{解 3.2.5})$$

ここに、 C_{dc} ：鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値

γ_{cl} ：鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_{dc} のばらつきを考慮した係数

C_0 ：コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度（kg/m³）

$\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数

$$= \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta \quad (\text{解 3.2.6})$$

c ：かぶりの期待値（mm）

D_d ：塩化物イオンに対する設計拡散係数（cm²/年）

t ：塩化物イオンの侵入に対する耐用年数（年）

s ：誤差関数の積分範囲で次式による。

$$s = \frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \quad (\text{解 3.2.7})$$

これにより、供用期間中の塩化物イオン濃度が 1.2 kg/m³ 以上となることが予想されるような場合には、塗装鉄筋の使用等の対処方法を検討することになる。なお、ここで示した誤差関数については近似式も提案されている。たとえば、文献 44)、あ

るいは建築工事標準仕様書・同解説（日本建築学会）の「海水の作用を受けるコンクリート」に示された次の近似式を使用するとよい。

$$\operatorname{erf}(x) \cong \sqrt{1 - e^{-\frac{4x^2}{\pi}}} \quad (\text{解 3.2.8})$$

- (2) 現在、アルカリ骨材反応についてはコンクリート中に含まれるアルカリ ($\text{Na}^+ \cdot \text{K}^+$) の総量が規制されている (3.0 kg/m^3 以下, JIS A5308, 附属書 6)。したがって、ここではそれにならない、アルカリ総量の値を照査指標とした。ただし、昨今、塩分によりアルカリ骨材反応が促進される事例も報告されており、塩分量がアルカリ骨材反応の照査項目になり得る可能性も否定できない。現段階では詳細な劣化機構や塩分量がアルカリ骨材反応に及ぼす影響の程度については明らかになっていないが、今後の研究を待ちたい。なお、耐アルカリ骨材反応性の照査については、コンクリート標準示方書施工編・第 6 章に規定されている。

凍結融解は、AE コンクリートを用いて凍結融解に対処しており、そのメカニズムが、コンクリート中のエントレインドエアによる膨張圧の低減にあることから、ここでは、その評価が可能な相対動弾性係数を照査指標として掲げた。

- (3) その他の材料については抽象的な表現にならざるを得ない。例えば、紫外線に弱い材料を使用した場合には、その紫外線の程度や総量が照査指標となることが考えられる。さらには、直射日光の傾き（仰角）をも考慮すれば、季節毎の日射時間の総量等もその指標となることも考えられる。日射自体が変質の可能性につながるとすれば、直射日光に晒されぬこと、という条件が照査指標となる可能性もある。

いずれにせよ、材料に応じた項目を選定することになる。

3.2.3 設計作用

(1) 鋼材の耐腐食性

鋼材の被覆材料および使用状態によって以下の項目の作用レベルを適用する。

(項目)	(作用レベル)
1) 一般的な被覆材料により被覆された鋼材	床版が供用される環境の塩化物イオン濃度・水分・気温
2) コンクリート中の鋼材	
① ひび割れによる鋼材腐食	: 床版が供用される環境の塩化物イオン濃度・水分・気温
② 中性化による鋼材腐食	: CO_2 濃度等
③ 塩化物イオンによる鋼材腐食	: 塩化物イオン濃度

(2) コンクリートの材料劣化抵抗性

コンクリートの劣化機構によって以下の項目の作用レベルを適用する。

(項目)	(作用レベル)
1) アルカリ骨材反応	: 気温・水分
2) 凍結融解	: 気温・水分
3) 化学的腐食	: 各々の劣化原因となる作用因子のレベル

(3) その他使用材料の材料劣化抵抗性

その他の使用材料に対しても、劣化原因となる因子の作用レベルを設定する。

【解 説】

材料に対する作用としては、床版供用環境下での劣化・変質要因（以下、環境要因と称する）に的をしぼって作用レベルを設定する。ただし、材料耐久性の項目の中には、環境要因と床版構成材料そのものに起因する劣化・変質要因（以下、潜在的な劣化要因と称する）とが相俟って劣化が進行し、潜在的な劣化要因を排除できれば、環境要因が作用しても材料劣化が進行しないものもある。本指針では、建設時に潜在的な劣化変質要因を排除することを前提として、環境要因を作用レベルとしてまとめている。また、材料劣化は水分および気温という環境要因が与えられていることを前提として進行する。これらについては定量的な認識がなされておらず、どの程度の水分、気温が付与された場合に劣化が促進されるのか、具体的な数値を掲げることは困難だが、それらの作用も念頭において設計を行う必要がある。

- (1) 鋼材については各々の供用状態および劣化要因に対して個別にレベルを設定する必要がある。

1) 一般的な被覆材料により被覆された鋼材^{45), 46)}

鋼材の材料耐久性が主として腐食によることから、その作用とは、鋼材を酸化させることである。鋼材について、その被覆材料に関わらず、酸化反応を引き起こす因子（以下、作用因子と称する）を照査項目とした。

2) コンクリート中の鋼材

① ひび割れによる鋼材腐食

作用因子としては塩分・水分・気温が支配的と考えられるが、それらの中で最も影響が大きいものとして鋼材表面を錆びやすい状態にする塩分量が考えられる。塩分は海浜起源と融雪剤起源、また、コンクリート中に含まれる塩分（海砂や混和材中の塩分も含む）の3つが考えられ、作用レベルとしてそれらを別々に取り上げることになる。また、これらの反応を助長する作用因子として、水分、気温のレベルもこの並びの順に重要と考えた。

② 中性化による鋼材腐食

中性化は、通常の床版供用環境下では大気中のCO₂の影響が支配的であることから、着目すべき作用レベルとして可能ならば、CO₂濃度も設定、あるいは測定しておくことよい。一般にコンクリートの中性化は乾燥した状況でその進行速度が速いと言われており、部位としては下面よりも上面のほうの進行が早いと考えられている。しかし、床版の供用環境を考慮すると、雨水を受ける床版上面よりも下面のほう乾燥し、中性化が進行する可能性も否定はできない。それらも十分考慮して設計を行う必要がある。

なお、炭酸ガス濃度等から中性化速度を推定する場合には、文献 47)、文献 48) が参考になる。

③ 塩化物イオンによる鋼材腐食

鋼材の不導態皮膜を破壊する塩化物イオンは、周辺の塩化物イオン濃度により、その進行程度が異なることから、ここでは床版が供用される環境の塩分イオン濃度を作用レベルとして挙げている。

- (2) コンクリートについては各々の現象に対して個別にレベルを設定する必要がある^{49)~52)}。

1) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応の場合、コンクリート表面から浸入する水分、化学反応を引き起こすための気温という環境要因にくわえ、潜在的な劣化要因の排除についても設計段階で十分に検討する必要がある。昨今、アルカリ骨材反応の潜在的な劣化要因の排除については、コンクリート中のアルカリ総量規制、抑制効果のある混合セメント等の使用、安全と認められる骨材の使用による抑制対策が採られている。アルカリ骨材反応抑制対策（国土交通省）では、海水または潮風の影響を受ける地域においてアルカリ骨材反応による損傷が構造物に重大な影響を及ぼすと考えられる場合（ただし、安全な骨材を使用した場合は除く）には、塩分の浸透を防止するための塗装等の措置を講ずることが望ましいとされている。潜在的な劣化要因と環境要因とを考慮し、将来的な劣化防止、または、仮に劣化が生じたとしても極めて軽微な損傷にとどまるよう設計を行うことを基本とする。

アルカリ骨材反応による劣化は、種々の劣化や損傷を助長する可能性がある。例えばアルカリ骨材反応によってひび割れが生じた場合、そのひび割れから水分や酸素のほか、塩分飛来環境においては塩化物イオン、凍結防止剤散布環境においては塩化ナトリウム等の含有塩分がコンクリート中に侵入する。それらにより、アルカリ骨材反応がさらに促進されたり、塩害や凍結融解との相乗的複合劣化が発生したりすることが懸念される。また、塩化物イオン存在下でアルカリ骨材反応が進行した場合、コンクリート中の細孔溶液中の OH^- イオンが消費されてコンクリートのアルカリ性が低下するため、アルカリ骨材反応よりもコンクリート内部の鋼材腐食が促進される可能性もある。さらに、これまではアルカリ骨材反応による劣化が構造物の耐荷力に影響を及ぼすことはないと考えられてきたが、最近になって、アルカリ骨材反応によりコンクリート内部の鉄筋が破断する事例⁵³⁾も報告されている。より詳細な劣化機構や対策等については、今後の研究が待たれるところである。

2) 凍結融解

凍結融解現象とは、コンクリート中の空隙に存在する水分が凍結したときの体積膨張によって生じるコンクリートの劣化であり、水分の凍結と外気温の上昇に伴う融解の繰返し作用により、コンクリート中にひび割れを伝播させ、結果としてコンクリートに重大な強度劣化を及ぼすものである。凍結融解に対しては 0°C を挟んだ気温の上下変動の程度が作用レベルであり、ここでは単に気温と記した。

凍結融解の根本的な原因となる水分については、コンクリート中にもともと存在する余剰水などの水分のほかに、供用中に外部から浸入する水分が考えられ、後者のほうが凍結融解に及ぼす影響の程度が甚だしいことが知られている。現在までに凍結融解による損傷が報告されている事例の多くは、過去に防水工を施さずに設計・供用された構造物に生じたものであり、作用因子である水分の供給を抑制できていれば凍結融解の程度を小さく抑えられていたと考えられる。凍結融解が生じる可能性のある環境下で供用される床版を設計する際には、良好な品質のコンクリートに防水工を施す等、作用因子の影響を抑制できるような対処方法を適宜選択する必要がある。

3) 化学的腐食

床版の供用環境条件によっては、温泉雰囲気中の H_2S 、 SO_2 や都市内における NO_x 、 SO_x 、また、酸性雨等の影響で劣化が進行する場合も考えられる。床版の供用環境を考慮して、適宜、環境に応じた作用因子をも考慮する必要がある。

- (3) その他の材料についても、各々の材料の劣化原因となる作用因子のレベルを適宜設定し、対処方法を選択する必要がある。

3.2.4 耐腐食性および材料劣化抵抗性の照査

対象とする材料がどの程度の耐久性をもつか、耐用年数という物理量を用いて評価する。材料耐久性の観点から見て、実際に供用される材料がどの程度の余裕を有しているかが材料耐久性の状態レベルであり、ここでは耐用年数が床版の設計供用年数以上であることを確かめるものとする。

耐用年数 $\geq$ 床版の設計供用年数

(1) 鋼材の耐腐食性

鋼材被覆材料の劣化の程度によって、以下の項目の状態レベルを適用する。

(項目)	(状態レベル)
1) 一般的な被覆材料により被覆された鋼材 :	耐用年数
2) コンクリート中の鋼材	
① ひび割れによる鋼材腐食 :	耐用年数
② 中性化による鋼材腐食 :	耐用年数
③ 塩化物イオンによる鋼材腐食 :	耐用年数

(2) コンクリートの材料劣化抵抗性

コンクリートの劣化の程度によって、以下の項目の状態レベルを適用する。

(項目)	(状態レベル)
1) アルカリ骨材反応 :	耐用年数
2) 凍結融解 :	耐用年数
3) 化学的腐食 :	耐用年数

(3) その他使用材料の材料劣化抵抗性

その他の使用材料についても、劣化・変質が生じない状態とする。

【解 説】

- (1) 設計に用いられている鋼材に有害な錆が生じないこと、と記述することは簡単であるが、鋼材やコンクリートに関してはこれまでの膨大な研究成果等があることをふまえ、定性的な表現を一步進めて、極力、定量的な表現とした。すなわち、鋼材に有害な錆が生じるまでにどの程度の耐用年数を所有しているかをもって、床版の状態レベルとした。こうすることで、徐々に進行する材料の変質、劣化を時間軸で評価できると考えられる。

一般的な被覆材料により被覆された鋼材については、塗膜やめっきの種類によって耐用年数が大まかながら予想できることから、設計耐用年数の設定も可能だと考えられる。

照査指標の項で述べたが、ひび割れの大きさ、中性化、塩化物イオン濃度については、過去の研究により、鋼材腐食が生じるとされる年数（以下、設計耐用年数と称する）を推定できる算定式が提案されている。したがって、それらの算定式を用いれば、具体的な床版設計の耐用年数がどの程度かを予測でき、なおかつ、結果的に鋼部材と同じ表現で材料耐久性の状態レベルを表現できるとした。

- (2) コンクリートに関するアルカリ骨材反応、凍結融解反応はいずれも時間の経過にともな

って進行する劣化ではあるが、耐用年数を計算することは難しいため、ここでは初期の設計段階で確保すべき状態を示した。すなわち、アルカリ骨材反応が生じない状態であること、また、凍結融解が生じない状態であることを初期の設計で確保し、供用期間中を通じてアルカリ骨材反応、凍結融解が発生しないことをその状態レベルとした。

化学的腐食の可能性が考えられる場合には、それらによるコンクリートの劣化、変質が生じないことを設計段階で事前に確認する必要がある。

- (3) その他材料については過去の研究や実績は少なく、上記のように定性的な表現とならざるを得ない。今後の研究を待ちたい。

参考文献

- 1) 土木学会 鋼構造委員会：第 10 回 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告書—鋼床版の疲労損傷とその対策—，2007。
- 2) 川畑篤敬，江崎正浩，加藤靖，杉村誠，鈴木大也，原直人，矢ヶ部彰，横山薫：デッキプレート厚・U リブ厚・溶接溶け込み量が鋼床版の応力性状に与える影響，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 17-22，2004。
- 3) 川畑篤敬，江崎正浩，加藤靖，杉村誠，鈴木大也，原直人，矢ヶ部彰，横山薫：鋼床版のデッキ貫通型亀裂に関する一考察，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 23-28，2004。
- 4) 三木千壽，菅沼久忠，富澤雅幸，町田文孝：鋼床版箱桁のデッキプレート近傍に発生した疲労損傷の原因，土木学会論文集，No. 780 / I -70，pp. 57-69，2005。
- 5) 森猛，鳴原志保，中村宏：溶接溶け込み深さを考慮した鋼床版デッキプレート・トラフリブ溶接部の疲労試験，土木学会論文集 A，Vol. 62，No. 3，pp. 570-581，2006。
- 6) 日本道路協会：道路橋の疲労設計指針，2002。
- 7) 阪神高速道路公団：道路橋 RC 床版のひびわれ損傷と耐久性，1991。
- 8) 川畑篤敬，秋元礼子：RC 床版の疲労耐久性評価方法の提案，第四回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 179-184，2004。
- 9) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，pp. 627-632，1987。
- 10) 松井繁之：橋梁の寿命予測，道路橋 RC 床版の疲労寿命予測，安全工学，Vol. 30，NO. 6，pp. 432-440，1991。
- 11) 安松敏雄，長谷俊彦，篠原修二，長瀬嘉理：交通荷重実態を考慮した鋼橋床版の疲労設計に関する検討，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 77-82，1998。
- 12) 街道浩，松井繁之：鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労評価，土木学会論文集 A，Vol. 64，No. 1，pp. 60-70，2008。
- 13) 本間淳史，杉崎幸樹，河西龍彦，生駒元：PC 床版の限界状態に関する照査方法の検討，第 55 回年次学術講演会講演概要集，CS-285，1999。
- 14) 長谷俊彦，上東泰，安松敏雄：長支間 PC 床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価，日本道路公団試験研究所報告，Vol. 36，pp. 25-34，1999。
- 15) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993。
- 16) 藤原稔，村越潤，田中良樹：鋼床版横リブのスリット周辺部の疲労強度，構造工学論文集，Vol. 37 A，pp. 1151 -1162，1991。
- 17) 村越潤，程小華，西川和廣：実測局部応力に基づく鋼床版詳細構造の疲労評価，鋼構造年次論文報告集，第 5 巻，pp. 191-198，1997。
- 18) 古土井健，千葉照男，菅沼久忠，三木千壽：高耐久性鋼床版構造の検討，第 61 回年次学術

- 講演会講演概要集, 1-567, pp. 1131-1132, 2006.
- 19) 菅沼久忠, 三木千壽: 鋼床版のデッキプレートとトラフリブ間の縦方向溶接部の疲労に対する EFFECTIVE NOTCH STRESS による評価, 土木学会論文集 A, Vol. 63, No. 1, pp. 35-42, 2007.
 - 20) 梶川靖治, 前田幸雄: 組み合わせ荷重下におけるスタッド溶接フランジの疲労強度の評価, 土木学会論文集, 第 362 号 / I-4, pp. 285-292, 1985.
 - 21) 松井繁之, 佐々木洋, 福本嘸士, 梶川靖治: 走行荷重下における鋼板・コンクリート合成床版の疲労特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 34A, pp. 409-420, 1988.
 - 22) 松井繁之, 文兌景, 福本嘸士, 高田嘉秀: 回転せん断力を受けるスタッドの応力と疲労寿命との相関について, 土木学会第 45 回年次学術講演会, I-257, pp. 544-545, 1990.
 - 23) 館石和雄, 崔誠珉, 内田大介, 浅野 浩一, 小林 潔: L 形鋼をずれ止めに用いた鋼・コンクリート合成床版の疲労耐久性, 鋼構造論文集, 第 14 巻第 55 号, pp. 123-132, 2007.
 - 24) 建設省土木研究所 構造橋梁部橋梁研究室: 土木研究所資料 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ, 土木研究所資料第 2700 号, 1988.
 - 25) 建設省土木研究所 道路部舗装研究室: 土木研究所資料 車両重量調査結果の解析(その 4), 土木研究所資料第 3321 号, 1995.
 - 26) 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室: 道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書—全国活荷重実態調査—, 国総研資料第 295 号, 2006.
 - 27) Chitoshi MIKI, Yuji GOTO, Takeshi MORI, Hitoshi YOSHIDA: Computer Simulation Studies on The Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, Journal of Structural Mechanics and Earthquake Engineering of JSCE, No. 356, pp. 37-46, 1985.
 - 28) 森猛, 梶原仁, 長谷川洋介: JSSC 指針に基づく鋼構造物の疲労安全性照査プログラムの開発とその利用, 鋼構造論文集, 第 2 巻第 8 号, pp. 37-45, 1995.
 - 29) 日本橋梁建設協会: 橋梁技術者のための塗装ガイドブック, 2000 年 3 月
 - 30) 日本道路協会: 鋼道路橋塗装便覧, 平成 2 年 6 月
 - 31) 日本溶融亜鉛鍍金協会: 溶融亜鉛めっき橋ガイドブック, 1998 年 2 月
 - 32) 日本道路協会: 道路橋示方書 I 共通編, 平成 14 年 3 月
 - 33) 日本道路協会: 道路橋示方書 III コンクリート橋編, 平成 14 年 3 月
 - 34) 土木学会: 【2002 年制定】コンクリート標準示方書[施工編], 2002 年
 - 35) 土木学会: 2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料, 2002 年
 - 36) 土木学会: 【平成 11 年版】コンクリート標準示方書—耐久性照査型—[施工編], 平成 11 年
 - 37) 土木学会: 平成 11 年版コンクリート標準示方書[施工編]—耐久性照査型—改訂資料, 平成 11 年
 - 38) 土木学会: コンクリートライブラリー86 高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの施工指針, 平成 8 年 6 月
 - 39) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, p. 307, 平成 12 年 10 月
 - 40) 土木学会 鋼構造委員会 道路橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 床版の構造と設計, pp151~176, 2004
 - 41) 日本コンクリート工学協会: 「コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針」, 2003
 - 42) 長井正剛, 奥井義昭, 岩崎英治: 「連続合成桁の初期ひび割れ状態を考慮したひび割れ幅, 鉄筋応力算定法の一提案」, 土木学会論文集 No759/1-67, pp283~292, 2004
 - 43) 街道浩, 渡辺滉, 橘吉宏, 松井繁之, 栗田章光: 「鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験」, 構造工学論文集, Vol 49A, pp1115~1126, 土木学会, 2003

- 44) 大野豊, 磯田和男: 数値計算ハンドブック, 確率と分布, (株) オーム社, 1990
- 45) 土木学会: コンクリート技術シリーズ 40 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向「その2」, 2000 年 12 月
- 46) プレストレストコンクリート建設業協会編: 海洋コンクリート構造物の防食 Q&A, 技報堂出版, 2004 年 6 月
- 47) 日本コンクリート工学協会: 「コンクリートの炭酸化に関する研究の現状」, 炭酸化研究委員会報告書, 1993 年 3 月
- 48) 高田良章, 魚本健人: 「炭酸ガス濃度がコンクリートの中性化速度に及ぼす影響」, 日本コンクリート工学協会, コンクリート工学年次論文報告集, 13-1, pp673~676, 1991
- 49) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術 '04 [基礎編], 2004 年
- 50) 日本コンクリート工学協会: コンクリート診断技術 '04 [応用編], 2004 年
- 51) 岡田清: コンクリートの耐久性, 朝倉書店, 1986 年
- 52) 林正道, 鮎田耕一: コンクリート工学, 山海堂
- 53) 土木学会コンクリート委員会アルカリ骨材反応対策小委員会: アルカリ骨材反応による鉄筋破断が生じた構造物の安全性評価 (中間報告), 土木学会誌, 2003 年 9 月号

4. 維持管理性

4.1 一般

床版の設計にあたっては、予め損傷メカニズムを踏まえた維持管理計画を策定しなければならない。

【解 説】

道路橋床版は環境作用や活荷重による経年劣化の顕著な構造であり、橋梁本体における経年劣化以上に床版の劣化が橋梁の機能に影響を及ぼす事例が数多く報告されている。とりわけ RC 床版については 1960 年代後半から損傷問題が報告され¹⁾、配力鉄筋量や床版厚等に関する設計上の改善がなされており、損傷メカニズムを解明するための移動繰返し載荷試験²⁾や輪荷重走行試験³⁾による研究成果が数多く報告されている。その結果、床版の損傷メカニズムは輪荷重の繰返し載荷による疲労損傷が主体であり、床版内部への雨水浸入により疲労損傷は加速することが明らかになっている。さらに、外来塩分による鉄筋腐食を伴う塩害⁴⁾や凍結融解作用が複合した劣化・損傷メカニズム⁵⁾についても報告されている。床版の維持管理においては、これらの損傷メカニズムに基づき床版の健全度判定や補修工法の選択がなされている⁶⁻⁷⁾。

一方で床版の補修には、工事期間における車両通行止め等の社会的影響が発生する可能性が高い。そのため、日常のおよび定期的な管理による床版の耐久性向上は、橋梁本体の機能維持や社会的影響を適正に保つために有効であり、維持管理性は床版にとって極めて重要な性能であるといえる。

ここでは、床版の維持管理性を「維持管理のし易さ」に視点を置くものと考え、設計段階において損傷メカニズムの解明を行うことと、それに基づく維持管理計画を策定することを要求性能と定義した。維持管理計画とは、床版の構造特性、使用条件、雨水の供給等の環境条件などを考慮して、点検、損傷メカニズムの推定、劣化予測、性能評価、判定、対策（補修・補強・更新）、記録の実施時期、頻度、方法、体制、費用を総合的に計画することをいう⁸⁾。

4.2 照査項目および照査指標

(1) 損傷メカニズムの明確化

構造や荷重の特性を考慮して、橋梁および床版の設計供用期間を設定し、安全性、耐疲労性、耐腐食性および材料劣化抵抗性において明らかにした損傷メカニズムに基づき、床版全体の劣化プロセスを明確にしなければならない。

(2) 損傷部位の想定

床版に損傷が発生する可能性のある部位および損傷形態を、(1)で定義したメカニズムとその他予想される事象に基づき想定しなければならない。

(3) 維持管理計画の容易さ

損傷メカニズムや損傷部位の想定に基づいて、床版の点検計画を策定し、健全度の評価・判定基準および想定される変状に対する補修工法を予め計画しなければならない。

【解 説】

- (1) 設計供用期間全般にわたる損傷メカニズムを明確に把握することは極めて困難である。

しかしながら、ここでは、安全性や耐久性（耐疲労性、耐腐食性、材料劣化抵抗性）の照査結果とその際に想定される破壊状況を踏まえ、性能確保のために設計上考慮していた事象が何であるかを明確にし、想定外の損傷が発生した場合にも最適な対策を再選択するため、破壊メカニズムをできる限り想定しておくことが重要である。床版の破壊メカニズムは床版の種別（RC床版、PC床版、鋼・コンクリート合成床版、鋼床版）により異なるが、それぞれの床版の構造的特徴や弱点部に着目し、設計供用期間における設計作用（環境作用、荷重作用）のレベルや頻度を想定した上で、設計時に破壊メカニズムを想定しておく必要がある。なお、本来は床版が完全に終局状態に至るまでのメカニズムを把握することが望ましいが、設計供用期間に対し、終局状態までに要する時間が極めて長い場合もあるため、合理性を考慮して床版の設計供用期間において想定すればよいこととした。

- (2) 床版の損傷は、版そのものの疲労によるひび割れや剥離・鉄筋露出等、損傷メカニズムによって説明できる部位のみでなく、付属物への影響や滞水による劣化等、経験的に損傷が考えられる部位もある。また、道路橋床版は床版防水層を介して舗装と一体となっているのが一般的であるが、舗装修繕時に既設舗装部分を切削する際において床版防水層や床版上面も同時に切削される場合もある。これらを含め予め損傷する可能性のある部位を定義しておくことで、維持管理計画上で必要な点検や補修を効率的に行うことができる。損傷の発生する可能性のある部位および変状の例を表-解 4.2.1 に示す⁹⁻¹²⁾。

表-解 4.2.1 損傷の発生する可能性のある部位および変状の例

種 別	部 位	変 状（劣化・損傷）
RC 床版	床版上面側	ひび割れ、コンクリートの脆弱化、鉄筋腐食、
	床版下面側	ひび割れ、漏水・遊離石灰、鉄筋腐食、剥離・剥落
PC 床版	目地部・接合部	漏水・遊離石灰、錆汁、鉄筋腐食
合成床版	鋼板	漏水・滞水、塗膜劣化、錆、断面欠損
	ずれ止め・接合部	疲労亀裂、破断
鋼床版	鋼板	漏水・滞水、塗膜劣化、錆、断面欠損
	溶接接合部	疲労亀裂、破断
	部材連結部	ボルトの緩み・脱落

- (3) 床版の維持管理においては、所要の性能が確保されているかを確認するため、モニタリング等も含めた点検手法や損傷メカニズムに基づいた劣化状態の判定基準を予め確保し、予防保全に努めることを前提とする。床版の点検においては、目視による外観調査が行われるのが一般的である。外観目視点検において、床版上面での舗装路面のひび割れやポットホール、床版下面での漏水、ひび割れ、遊離石灰、かぶりコンクリートの浮き、鉄筋露出等の変状が発見された場合は、想定される損傷メカニズムに応じて詳細調査を実施することになる。代表的な点検・調査手法の例を表-解 4.2.2 に示す⁹⁻¹²⁾。詳細調査は、舗装路面や床版下面のひび割れ・剥離状態を把握するための打音調査や赤外線カメラによる調査、応力状態を把握するためのひずみ計測、たわみ計測等の非破壊調査を主体として実施するが、劣化状態の判定のためには、コア採取による局所破壊試験を実施する場合もある。なお、これらの詳細調査は、損傷メカニズムの検証や健全度の評価・判定のみならず、補修範囲や補修方法の選定に活用できるように計画しておくことが効率的な維持管理の観点からは重要となる。補修の実施にあたっては、最も有効な方法（構造上、施工上）を予め想定しておかなければならない。これらの点検、評価判定、対策は、技術の進歩により実際にはその工法を採用しないこともあり得るが、現時点での最適な手段を明示すること

で、最低限の性能確保を保証できると考える。

なお、経年劣化による損傷が極めて少なく、供用期間中の補修を不要とする場合には、補修不要であることに対し、損傷メカニズムとして合理的なコンセンサスが得られれば、必ずしも補修や取替えを考慮した計画としなくてもよい。ただし、その場合にも、継続的に性能が確保されていることを確認するための点検や、万一の災害に対する対策方針は考慮する必要がある。

これらの点検、評価・判定、補修にかかるコストは、経済的合理性として評価することとなるため、ある程度具体的な計画を立てることで維持管理コストを明確にし、ライフサイクルコストの算定に繋げることが可能となる。

表-解 4.2.2 点検・調査手法の例

着目位置	点検・調査対象（変状）	点検・調査手法
床版上面 （舗装路面）	ひび割れ、ポットホール 剥離、空洞の有無	目視、打音法、赤外線法、 弾性波法、磁気法など
床版内部 （鉄筋） （コンクリート）	鉄筋位置・かぶり、鉄筋腐食 塩化物量、中性化深さ コンクリートの物性値	電磁レーダ法、電磁誘導法、 自然電位法、分極抵抗法、 採取したコアによる試験など
床版下面 施工継目 （接合部）	ひび割れ、漏水・遊離石灰 かぶりコンクリートの浮き 錆汁、鉄筋腐食、鉄筋露出	目視、打音法、赤外線法、弾性波法 ひずみ計測、たわみ計測など

維持管理計画には以下のような内容を含む。

- 1) 点検計画の策定：初期点検、日常点検、定期点検、詳細点検、臨時点検、緊急点検により、床版の損傷を事前または早期に発見するため、損傷状態や発生時期等を想定して、実施可能な点検計画を策定するものとする。点検計画は①点検項目（経年劣化または自然災害により性能を低下させる部位と現象を特定）、②点検期間（劣化進展速度に基づく期間、自然災害等臨時点検すべき事象の特定）、③点検方法の確保（足場取付設備、点検口等）を含む。
- 2) 評価および判定手法の選択：安全性、使用性、耐久性（耐疲労性、材料劣化抵抗性）において明らかにした損傷メカニズムと点検結果に基づき、損傷に対する詳細な資料を収集し、補修を含む対処方法の実施有無の判断が行える調査方法や調査項目、評価判定基準を予め想定するものとする。RC 床版の評価判定基準の例を表-解 4.2.3 に示す¹³⁾。

表-解 4.2.3 RC 床版の評価判定基準の例

機 関	評価判定基準
国土交通省	ひび割れ幅とひび割れ間隔に着目した判定
旧日本道路公団	漏水ひび割れ（遊離石灰）の程度に着目した判定
その他	ひび割れ密度、ひずみ変化、たわみ変化

- 3) 対策工法の選択：想定される損傷に対する複数の補修工法（取替等を含む）および工法の選定について、施工性を含め、予め工法選定基準や対策実施方法を検討するものとする。なお、建設後には点検・調査結果に基づき、必要と判断される場合には対

策を実施するものとする。RC床版の補修・補強工法の例を表-解 4.2.4 に示す¹⁴⁻¹⁸⁾。

表-解 4.2.4 RC床版の補修・補強工法の例

対象位置	補修・補強工法
床版上面側	橋面防水システム（床版防水層，地覆・縁石防水層），上面増厚
床版下面側	縦桁増設，ひび割れ注入，断面修復，鋼板・FRP 接着，下面増厚
床版全厚	外ケーブルによるプレストレス導入，部分打換え，床版取替え

これらの点検，評価判定，対策は，予め設計供用期間に対して策定された維持管理計画に基づき実施することとする。すなわち，設計時に日常管理の手法，補修が必要となる部位の把握と実施のタイミング・方法，取替を想定する場合の時期・方法等の計画を立てることを前提とする。

4.3 設計作用

維持管理性における作用は，安全性，使用性，耐久性（耐疲労性，材料劣化抵抗性）に挙げるすべての作用のうち，損傷メカニズムに影響を与える以下の作用である。

- (1) 環境作用（降雨，気温，飛来塩分等）
：耐腐食性，材料劣化抵抗性，使用性における照査項目に定義する
- (2) 荷重作用（繰返し活荷重，地震，風荷重等）
：耐疲労性，安全性における照査項目に定義する

【解 説】

維持管理性における作用のレベルは，床版の設計供用期間中に起こりうる環境作用や荷重作用のうち，先に想定した損傷メカニズムに影響を与える作用を選択することとする。

4.4 維持管理性の照査

維持管理における管理状態（管理コスト，管理体制，供用期間，路線の重要度等）によって，床版に求められる状態のレベルを設定し，設計供用期間を通して維持管理計画の中でこれらの状態が確保されることを照査する。

【解 説】

床版の維持管理性の照査は，損傷メカニズムを想定する際に考慮した作用の状態や，維持管理計画にかかるコスト等によって照査することが考えられる。また，状態のレベルは，道路管理者ごとに設定される設計供用年数やその道路の重要度，交通状態に応じて決定される。

維持管理における照査指標やレベルをコストとして設定する場合には，維持管理計画に従って管理した際に発生すると想定される維持管理コストが，道路管理者が管理に費やすことのできる体制や予算等と比較して妥当であるかどうかによって判断するのが現実的である。

建設時に初期投資を大きくして高耐久性の床版を建設した場合は，供用後の維持管理コストを全く必要としない場合もあるため，維持管理コストを基にした維持管理性の照査においては，

建設時の初期投資から更新時の維持管理コストまでを含めたライフサイクルコスト (LCC) を算定し、LCC が最適となるような観点で照査しなければならない¹⁹⁾。

LCC 以外で維持管理性を照査する場合は、設計供用期間中に想定される部材の疲労や腐食による損傷および材料劣化などによる部材の経時的な機能低下に対し、修復が容易に実施できる状態のレベルに着目するとよい。修復の容易さレベルは補修施工の容易さレベルに関連しており、例えば、補修施工段階での足場設置に必要な吊り金具が適切な箇所に適切な数だけ取り付けられているか等に着目することになる。

参考文献

- 1) 国広哲男：道路橋床版の問題点，橋梁と基礎，pp. 1-5，1968. 7
- 2) 後藤祐司：鋼橋 RC 床版の破損機構に関する一考察，橋梁と基礎，pp. 111-115，1983. 8
- 3) 松井繁之，大田孝二，西川和廣：RC 床版とその損傷，橋梁と基礎，pp. 49-53，1998. 5
- 4) 関口武一，笹井幸男，石塚喬康：塩害を受けた RC 床版の劣化度調査と保全工事，コンクリート工学，Vol. 32, No. 5，pp. 41-49，1994. 5
- 5) 片桐良貴，岸 達比呂，木曾 茂：積雪寒冷地における鋼橋床版の劣化・損傷について，E X T E C，pp. 51-53，1998. 6
- 6) 日本道路公団試験所：道路橋鉄筋コンクリート床版の損傷機構にもとづく健全度判定と補修工法の選択，1985. 3
- 7) 小松秀樹，飯束義夫：道路橋床版の変状と補修・補強工法，コンクリート工学，Vol. 31, No. 7，pp. 43-47，1993. 7
- 8) 土木学会：2007 年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]，pp. 13-15，2008. 3
- 9) 国土交通省 道路局 国道・防災課：橋梁定期点検要領（案），2004. 3
- 10) 道路保全技術センター 道路構造物保全研究会：橋梁点検ハンドブック，鹿島出版会，pp. 177-200，2006. 12
- 11) 東・中・西日本高速道路㈱：保全点検要領（構造物編），2006. 4
- 12) 土木学会：複合構造物の性能照査指針（案），2002. 10
- 13) 松井繁之 編著：道路橋床版，森北出版，pp. 221-234，2007. 10
- 14) 桧貝 勇：床版の補修・補強の概要，橋梁と基礎，pp. 105-108，1994. 8
- 15) 日本道路公団：上面増厚工法設計施工マニュアル，高速道路調査会，1995. 11
- 16) 笹井幸男，松本吉正，佐藤雅則，奥谷祐介：中央自動車道古川渡橋における床版取換え，橋梁と基礎，pp. 27-33，1994. 10
- 17) 松尾伸二，西川和廣，内田賢一，川間重一：既設鉄筋コンクリート床版の補修・補強に関する検討，橋梁と基礎，pp. 25-32，1998. 6
- 18) 東・中・西日本高速道路㈱：設計要領第二集 橋梁保全編，2007. 8
- 19) 西川和廣：道路橋の寿命と維持管理，土木学会論文集，No. 501/ I -29，pp. 1-10，1994. 10

5. 社会・環境適合性

5.1 社会的適合性

5.1.1 社会的適合性に対する照査

社会的適合性に対する照査は、橋梁の重要度を考慮しながら適切な性能項目を設定し、それぞれの性能項目に対して限界状態を満足することを確認することにより行うものとする。

【解 説】

橋梁の重要度により床版の重要度も左右される。特に大型車の交通量が多いと、輪荷重が直接作用する床版の損傷は起こりやすくなり、当然ながら、維持・補修コストが大きくなる。

橋梁の重要度の一つの指標として道路構造令¹⁾の種級がある。道路構造令によれば高速自動車国道および自動車専用道路とその他の道路の別、道路の位置する地域・地形の状況や計画交通量により、第1種第1級から4級、第2種1級からおよび2級、第3種第1級から5級、第4種第1級から4級までの種別および級別に区分されている。さらに通行できる車両により普通道路と小型道路に区分されている。

これらとは別に、交通量に限らず、社会的な重要度も存在する。例えば、災害時において他の路線が破損した場合の代替路線として計画されている橋梁では、有事における橋梁の破壊が社会的に著しい影響を及ぼす。災害時、海の孤島あるいは陸の孤島が生じないように災害箇所に対する別ルートを作る必要があり、このような箇所に位置する橋梁の床版は必ずしも主ルート上の橋梁と同等でなくてもよいが、ある程度高い限界状態を有する必要がある。

このように社会経済活動に及ぼす影響が極めて大きい場合にはその重要度を高く設定し、想定される作用に対して当初要求した機能を喪失する可能性を低くする必要がある。社会的適合性に関する要求性能として鋼・合成構造標準示方書²⁾においては「その重要度に応じた機能を発揮できるような性能を有すること」と設定されている。具体的には構造物係数の設定をもって性能を照査することになるが、一般には床版のみに対してではなく橋梁構造物全体の位置づけによって構造物係数を設定することとなるため、道路橋床版単独で社会的適合性の照査を行うことはないと考えられる。

しかしながら、床版は橋梁の部材であり、床版自体の強度のばらつき、維持補修コストなどによる床版の重要度は、部材係数として考慮されるので注意を要する。

5.2 経済的合理性

5.2.1 要求性能

橋梁全体の設計供用期間中において、床版に求められる全ての要求性能を満たすために必要となるコストの合計が適正でなければならない。

【解 説】

床版の経済的合理性は、床版に求められる耐荷力、疲労耐久性、材料耐久性、供用性、環境

適合性等全ての要求性能を満たすために必要となるライフサイクルコストで評価する。

性能確保にかかるコストは、確保する性能の状態レベルによって異なる。例えば、目標とする性能に対してはるかに高いレベルの性能を確保すれば構造としての性能は満足するが、大幅なコスト増につながる可能性もあり、必ずしも合理的な設計とはいえない。つまり構造としての性能を満足する選択肢の中から、経済的合理性においてもっとも合理的な構造を選択することが必要となる。

5.2.2 照査項目

橋梁全体の設計供用期間中における床版の初期建設費用 (C_I)、維持管理費用 (C_M)、更新・廃棄費用 (C_R)、破壊損失費用 (C_F) を算出することとする。

- (1) 初期建設費用 (計画・建設に関わる費用)
- (2) 維持管理 (点検・評価に関わる費用、補修補強に関わる費用)
- (3) 更新・廃棄 (取替時および最終廃棄に関わる費用)
- (4) 破壊損失 (ハザードによって損失する費用)

【解 説】

ライフサイクルコスト (LCC) は、一般に以下の式で表されることが多い。

$$LCC = C_I + C_M + C_R$$

ここに C_I : 初期建設費用

C_M : 維持管理費用 (予め作成した維持管理計画に基づく点検、評価、補修コスト)

C_R : 更新・廃棄費用 (橋梁全体の設計供用期間で取替を想定する際の解体廃棄および再建設費用、最終廃棄にかかる費用)

この式では、 C_M : 維持管理費用、 C_R : 更新廃棄費用は全て顕在化が予想される費用であるが、一方では構造物の設計や維持管理計画が内包する不確定要素を考慮することができない。また、目標とする状態レベルが異なるものを比較する場合、実際には破壊超過確率や荷重の再現確率等に対する安全率が異なっているが、初期建設費用、維持管理費用、更新・廃棄費用の合計ではこれらを表現することができない。

ライフサイクルコストには事故や自然災害等の不確定要素も考慮すべきであり、これらの顕在化していない事象に対するコストを表現するため、破壊損失コストを考慮することが望ましい。破壊損失コスト C_F を考慮したライフサイクルコストは以下のように表される。

$$LCC = C_I + C_M + C_R + C_F$$

ここに $C_F = C_f \cdot P_f$

C_f : 破壊損失費用 (リスクコスト)

C_f : 破壊によって生じる損失に相当するコスト

P_f : 床版の供用期間中に破壊を起こす事象が発生する確率

破壊損失費用はリスクコストとも呼ばれ、想定する補修工法では機能回復のできない部分の

材料劣化や、自然災害、事故等のハザードによって生じるであろう潜在的なコストであり、ハザードの発生確率と破壊した場合に機能回復に必要となるコストの積（期待値）として表される。損失コストは単に撤去・再建設費のみを考慮すればよいわけではなく、多種多様なハザードによる損失や、損失による社会的影響等も考慮することが必要であるが、これらを見積もることは極めて難しい。一般には、十分に信頼性のある材料や設計法を採用することや、設計供用期間中に顕在化する可能性のある材料劣化に対しては適切な期間内に補修を行うこと、風荷重や衝突荷重等の再現期間の比較的長い事象も考慮した設計を行うこと、コストの比較においては目標とする状態レベルが同一の構造に対して行うこと、等で破壊損失コストの算出は省略できると考えられる。

ただし、特殊または新しい材料や構造形式を採用する場合には、同じ条件で使用しても、既存構造と比べて破壊損失コストを著しく低減または増加させる可能性もあるため、破壊損失コストにも注意を払って比較検討を行う必要がある。

なお、実際にハザードが発生して床版を補修した場合、維持管理計画で想定している取替等の更新は行わないという考え方もあるが、更新廃棄費用で想定する更新は、橋梁本体やその他種々の要因による更新であるため、リスクコストを考慮しても、更新廃棄費用は別途見積もる必要がある。

また、更新廃棄費用に対しては、解体工事等に伴って発生する建設副産物をリサイクル原料として用いることで全体としての支出を減少させる効果を期待できる場合もあるため、特に鋼材など需要が多く単価の高い建設副産物に対しては、これらの売却コストを考慮することも可能である。

5.2.3 設計作用

経済的合理性の照査では、ライフサイクルの各段階における荷重作用や環境作用等、コストに影響を与える作用を考慮することとする。

【解 説】

経済的合理性における作用とは、ライフサイクルの各段階において、耐荷力、疲労耐久性、材料耐久性、供用性、環境適合性等全ての要求性能を満たすために考慮する全ての荷重作用、環境作用である。これらは各要求性能の確保の段階で既に考慮されているものであり、実用上は各性能の照査結果に基づく設計内容が経済的合理性における作用となる。

5.2.4 経済的合理性の照査

橋梁の設計供用期間中において、床版の初期建設費用と、床版に要求される性能を保持するのに要する維持管理費用、および床版更新・撤去費用、破壊損失の期待値の総計（ライフサイクルコスト）を算出し、橋梁全体の設計供用期間中において、床版のコストが合理的であることを照査することとする。

【解 説】

橋梁全体の設計供用期間において床版の取替を考えない場合には更新費用は含まない。
本来、ライフサイクルコストには、構造物に対する費用のみでなく、交通規制や渋滞による

経済損失、経済状況に応じた利子率の影響、ハザード発生時における人命等の損失も含まれる。これらのうち、特に更新時の交通規制等による社会的損失は床版にとって影響の大きいものであるにもかかわらず、算出期間や算定手法、評価に対するコンセンサスが確立されていないため、真のライフサイクルコストを求めることは現状では困難であり、ある一定の前提条件のもとでの相対比較とするのが最も実用的である。さらに、コストという絶対値としては、管理者における事業予算および管理予算等を考慮することも考えられる。

5.3 環境適合性

5.3.1 一般

- (1) 床版のライフサイクル全般において、設計、施工、供用、維持管理、解体廃棄、解体後の再利用に際して、それらが環境に及ぼす影響を検討しなければならない。
- (2) 一般に、床版のライフサイクルにおける以下の各段階において、照査を行うものとする。
 - ① 初期建設：材料の採取、素材の製作、製品の製作、輸送、建設
 - ② 維持管理：供用、点検・調査、補修・補強
 - ③ 更新廃棄：取替や撤去等に伴う解体、廃棄

【解 説】

- (1) 地球環境問題が重要視されるようになり、建設産業においても地球温暖化防止、天然資源の持続可能な利用が求められている。床版構造の設計にあたっては、ライフサイクル全体に対して排出ガスや天然資源の消費における環境影響を調査し、その負荷をできる限り少なくするよう努めることとする。
- (2) 一般に、製品製造のライフサイクルには、資料採取、素材製造、製品製造、流通、販売・購入、使用、廃棄の7つの段階が挙げられる³⁾が、建設事業におけるライフサイクルは、初期建設（材料採取、施工）、維持管理、更新廃棄の3つに集約することができると考えられる。また、供用時の車両走行に伴う排ガス等については、床版単体によるものではなく橋梁全体として評価すべきものであり、床版構造単体での環境負荷の増減は考えにくいことから、初期建設と補修補強を含めた床版の製作と施工に関わるもの、撤去処分に関わるもののみを考慮するのが実用的である。

5.3.2 設計作用（環境側面）

地球環境や地域環境、施工における作業環境などを考慮して、環境に影響を及ぼす要素を検討しなければならない。

特に道路橋に使用する床版においては、以下の項目について検討を行うものとする。

- (1) 温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物
- (2) 騒音・振動
- (3) その他

【解 説】

環境適合性における設計作用とは、環境負荷を与える可能性のある要素を生じさせる全ての作用を意味する。環境に影響を与える可能性のある要素（環境側面という）とは、具体的には

床版の初期建設・維持管理・廃棄更新に伴って発生する、温室効果ガスなどの排出物や消費資源、騒音・振動などが挙げられ、これらを生じさせる作用は、車両の走行などの物理的な性能に対する設計作用に該当するもののみでなく、建設に伴う材料の調達や施工作业そのものなども含まれる。

実際の照査においては、これらの作用の全てを考慮して環境側面を検討することは非常に困難であるため、環境側面ごとに影響が顕著であると考えられる作用を取り上げて照査することとなる。

5.3.3 照査項目および照査指標

(1) 温室効果ガス，大気汚染物質，資源・エネルギー，廃棄物

照査方法：ライフサイクルアセスメント

照査指標：二酸化炭素排出量，環境負荷コスト 等

(2) 騒音・振動

照査方法：騒音および振動の発生予測または計測，振動解析 等

照査指標：騒音の大きさ（音圧レベル），振動加速レベル，固有振動数 等

【解 説】

環境影響を評価する項目としては、環境影響評価法等におけるライフサイクルアセスメントでは、騒音、振動、悪臭、排ガス、排熱、天然資源の消費等がある。ただし、床版の設計においては、騒音、振動等の周辺環境への影響は床版の使用性として整理されることから、ここでは排ガス量、排熱量、天然資源の消費、廃棄物処理等を考慮すればよいこととなる。

これらの項目のうち、地球温暖化防止の観点からは現時点では二酸化炭素排出量による評価を行うことが最も一般的である。したがって、床版の環境適合性の評価においても、一般的な設計・施工・供用を行う床版に対しては、二酸化炭素排出量を照査指標として照査してよい。ただし、廃材処分に関する環境負荷として、リサイクルが可能なものや安定型産業廃棄物（性質が安定しており生活環境上の支障を及ぼすおそれが少ないと考えられるもの）以外の廃棄物を処理する必要がある場合等には考慮が必要である。

ライフサイクルアセスメントの解析手法としては、「積み上げ法」と「産業連関分析法」の2種類の手法が代表的であるが、総務省が発行する産業連関表⁴⁾に基づいた統計データを元に環境負荷を算定する「産業連関分析法」が簡易評価法としてよく用いられている。また、近年では土木学会でもコンクリート構造物を対象とした「コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)⁵⁾」が出されており、温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー消費、廃棄物にかかるインベントリ分析（環境負荷項目の消費・排出量の定量化）に関する各種データが提案されている。

5.3.4 環境適合性の照査

橋梁全体の設計供用期間中において、環境影響が適正な大きさであることを確認するものとする。

【解 説】

環境影響の照査は、床版単体での評価が困難であることや、算出精度や前提条件によって結

果が大きく変化することから、現時点ではRC床版、PC床版、合成床版、鋼床版等に分類される各種構造間での相対的な比較等で評価することとなる。ただし、騒音および振動のように法令^{6),7)}や政令に基づいて、上限値（制限値）と構造物固有の値（保有値）が同じ指標を用いて明確に定められる環境側面に対しては、構造物が要求性能を満たすかどうかについて、Rd（限界値）とSd（応答値）の大小関係で比較することも可能である。

二酸化炭素排出量を環境負荷の代表的指標として用いる場合は、各種構造間での比較を行うことは可能であるが、実際には二酸化炭素以外の排ガス、排熱、その他環境負荷を生じる事象は多数あるため、これらを同列に比較するためには、各種排ガスの二酸化炭素等価排出量への変換などの手法が必要となる。

さらに、環境適合性にかかるコストも経済的合理性として評価するべきであることから、これらの環境負荷もコストで表現してゆく必要があると言える。近年、市場における二酸化炭素排出権取引が活発化していることから、今後は構造物のライフサイクルに対しても二酸化炭素排出量の定量化が求められると考えられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，2004
- 2) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 設計編，2007.
- 3) 文部科学省 科学技術・学術審議会技術士分科会：技術士制度における総合技術監理部門の技術体系（第2版），2004. 1
- 4) 総務省：産業連関表，<http://www.stat.go.jp/data/io/index.htm>
- 5) 土木学会：コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案），コンクリートライブラリ 125，2005. 11
- 6) 例えば 法令：騒音規制法（1968年制定，最終改正 2005年）
- 7) 例えば 法令：振動規制法（1976年制定，最終改正 2004年）

第2編 道路橋床版の設計計算例

第1章 設計に関する共通事項

1.1 床版の設計条件

道路橋床版について、「第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008」による設計計算を行う。設計条件は以下の内容とする。

- (1) 橋梁形式 : 2 径間連続鋼 I 桁
- (2) 支間割 : 53m+53m
- (3) 橋梁総幅員 : 9,910mm (車線 2×3, 500mm)
歩道なし
- (4) 設計交通量 :
 - ①設計指針(案)「Ⅱ 1. 安全性」による活荷重
(道路橋示方書 T 荷重および 1 ヶ所 150kN の輪荷重によるタンデム荷重 1 組)
 - ②下記の重交通路線の実測データによる活荷重
日交通量 13,000 台, 大型車混入率 45%
最大活荷重 : 輪荷重 100kN 以上 1 日 1 台以上
(国総研資料第 295 号¹⁾ より)
 - ③歩行者荷重 : なし
- (5) 橋梁の設計供用期間 : 100 年
- (6) 環境条件
 - 最大時間降雨量 : 50mm/h
 - 設計基準風速 : 40m/s
(高度 10m で 120 年非超過確率 0.6)
 - 水平震度 : 0.2
 - 飛来塩分環境 : 0.05mdd 以下 (普通の環境)
 - 氷点下以下の気温 : まれ
 - 融雪剤使用 : まれ

1.2 対象とする床版の種類

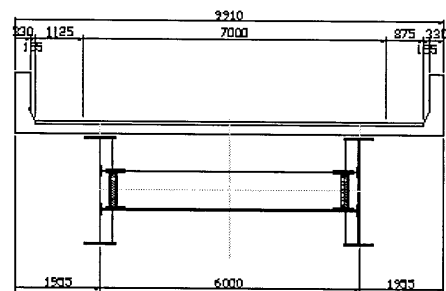
床版の設計は, a) 主桁を 2 本, 床版支持間隔 6 m (張出 1.955m) の床版と, b) 主桁を 4 本床版支持間隔 2.6m (張出 1.055m) の床版について設計する。(図-1.2.1 参照)

対象とする床版形式は, ①RC 床版, ②PC 床版, ③鋼・コンクリート合成床版とし, 表-1.2.1 に示す通り, a) 床版支間 6.0m および b) 床版支間 2.6m のうち, 計算上, 適用が可能と考えられる床版支間を採用する。なお, ここでの適用可能な床版支間とは, 既往の規準や実績によって規定される値でなく, 性能照査型設計により性能を確認できる範囲で幅広く試算するものとする。

表-1.2.1 対象とする床版形式および床版支間

床版形式	床版支間
RC 床版	2.6m および 6.0m
PC 床版	6.0m
鋼・コンクリート合成床版	2.6m および 6.0m

2 主桁案



4 主桁案

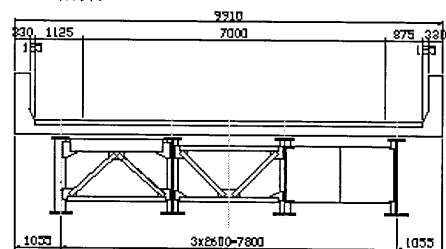


図-1.2.1 対象とする床版の形状

1.3 床版の要求性能

床版の設計においては, 「第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008」に示す, 各種要求性能および性能項目について, 照査を行う。なお, 本設計計算例では下記のような照査項目を取り扱う。

1.3.1 安全性

設計供用期間中に作用する死荷重, 活荷重などの作用に対し, 荷重を直接支持する版としての安全性および主構造部材としての安全性, 施工時安全性のうち設計上考慮すべき安全性として, 以下の照査項目に関し照査を行う。

- (1) 面外せん断に対する安全性
- (2) 面外曲げに対する安全性
- (3) 面内力に対する安全性

1.3.2 使用性

使用性には性能項目として, 車両の走行にかかわる走行性, 歩行者に対する歩行性, 第三者被害の防止, 利用者に対するその他の配慮がある。本来, 設計においてはすべての性能項目について床版単体での照査をおこなうべきであるが, 照査の前提となる使用性における橋梁と床版の要求性能の違いや照査手法が現状では十分に検討されていない部分が多い。そこで本設計計算例では, 「第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008」に示したそれぞれの項目について以下のように扱う。

(1) 走行性

1) 通常時の走行性

a) 線形への対応：一般に最低限確保すべき線形は道路構造令²⁾の規定として整理されており、床版の設計にあたっては道路詳細設計の結果を設計条件とすることによって線形への対応がなされるとみなす。

b) 路面の健全性：床版としての性能を満たすための舗装の確保、および路面の健全性の確保には、道路構造令²⁾および舗装に関する技術規準³⁾に基づく舗装の設計・施工および適正な維持管理がされることが前提となる。また、過度なたわみ等が生じないことを c) たわみ、d) 耐振動性に照査することによって、確保されるとみなす。

c) たわみ（剛性）：過度なたわみ等が生じないことを照査する。現状では鋼けたのたわみにより照査することとなる。

d) 耐振動性：床版の振動特性について照査する。

e) 視界：線形への対応と同様に、一般には最低限確保すべき視界は道路構造令²⁾の規定として確保されているとみなす。

2) 雨天時の走行性

雨天時の橋面排水に関しては、道路構造令²⁾の規定として整理される線形を確保するとともに、必要な排水システムが設置されていることを照査する。

また、防水に関しては、道路橋床版の設計においては、防水層またはそれに代わる防水システムの設置を前提とする。

3) 強風時の走行性

通常時の走行性を確保できない程の強風時には、道路管理者による走行制限（速度規制、通行止め）が実施されるものとする。

4) 冬期走行性

凍結が懸念される寒冷地においては、路面凍結に対する対策として、ロードヒーティングや消雪パイプ、蓄熱材封入などの凍結しにくい構造の採用、凍結防止剤や滑り止め剤の散布、除雪などの対応が考えられる。なお、本設計計算では、冬期において氷点下以下の気温となることはまれであり、融雪剤の使用はほとんどないものとする。

(2) 歩行性

本設計計算においては、歩道は併設しないものとする。

(3) 第三者被害の防止

本設計計算においては、周辺に住居や商業施設、交差物件等はないものとする。

(4) 利用者に対するその他の配慮

必要に応じて照査項目を設定し、照査する。

1.3.3 耐久性

(1) 耐疲労性

設計供用期間中に作用する死荷重、活荷重などの

作用に対し、耐疲労性として、以下の照査項目に関し照査を行う。

1) 面外せん断疲労に対する耐久性

2) 面外曲げ疲労に対する耐久性

3) 水の影響に対する耐久性

(2) 耐腐食性および材料劣化抵抗性

設計供用期間中に作用する環境作用に対し、材料に対する耐久性として、耐腐食性および材料劣化抵抗性に関する以下の照査を行う。

1) 鋼材料の耐腐食性

2) コンクリート材料の材料劣化抵抗性

なお、鋼、コンクリート以外の材料を使用する場合には、

3) その他の使用材料の材料劣化抵抗性についても検討が必要となる。

1.3.4 維持管理性

橋梁の設計供用期間において、床版の劣化メカニズムを考慮した維持管理計画を策定するとともに、維持管理計画に基づいた点検・補修を踏まえた床版構造となっていることを確認する。

1.3.5 社会・環境適合性

橋梁の設計供用期間中における社会・環境適合性として、以下の性能項目について照査する。

(1) 社会的適合性

社会的な重要度を考慮して定められる、構造物係数などの妥当性を照査するものであるが、床版単体で決定されるものではないため、本設計計算では構造物係数 $\gamma_i = 1.0$ として扱う。

(2) 経済的合理性

初期建設から更新廃棄に至るまでのコストを最小化する性能であり、一般にはライフサイクルコストとして評価されるが、ここでは、個々の床版形式ごとに経済的合理性を高める方策について検討することとする。

(3) 環境適合性

橋梁の設計供用期間を通した環境への影響を最小化するものであり、騒音・振動レベル、景観、温室効果ガス排出などがあるが、本設計計算では周辺に影響を受ける住居や施設等がないものとして、温室効果ガスの排出量について環境影響評価を行う。なお、温室効果ガスのうち、幅広い産業活動に影響があり、近年その排出権取引などが議論されている二酸化炭素を対象とする。

1.4 計算に用いる部分係数

1.4.1 部分係数の提案値

床版の設計においては、「第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案) 7. 部分係数」に基づき、設計計算においては、以下のような部分係数を採用する。なお、この部分係数の値は①既存の設計規準

である道路橋示方書⁶⁾において設計された道路橋床版がどの程度の部分係数を有しているかを考慮した上で、②コンクリート標準示方書⁴⁾などに提案されている値を参考にして定めたものであり、ひとつの試みの値である。鋼・合成構造標準示方書⁵⁾においても、部分係数については今後課題を多く残している現状を踏まえると、今後、様々な試算を重ねて適切な部分係数を検討してゆく必要があると考えられる。

表-1.4.1 計算に用いる部分係数

部分係数	安全性	使用性	耐久性
構造物係数 γ_i	*1	*1	*1
作用係数 γ_f			
鋼材	1.5	1.0	1.5 ^{*2}
コンクリート	1.5	1.0	1.0
構造解析係数 γ_a	1.0	1.0	1.0
材料係数 γ_m			
鋼材	1.1	1.0	1.0
コンクリート	1.3	1.0	1.0
部材係数 γ_b	1.5	1.0	1.0

*1 橋梁の構造物係数に従う。

*2 鋼材単体での耐疲労性照査のみ 1.5

(1) 構造物係数

床版単体で決定されるものではないため、橋梁の構造物係数に従う。本計算例では 1.0 とする。

(2) 作用係数

照査に用いる作用の形態によって異なるが、ここでは「第1編 性能照査型設計指針(案)2008」の規定に従い、安全性に対しては①設計活荷重として車両の輪荷重 100kN (満載)、②照査活荷重として実測される荷重を参考に 150kN (タンデム) で照査することとする。このとき、算出される曲げモーメントの値などから②照査活荷重は実質的には作用係数 1.5 程度と考えられる。

また、耐疲労性照査においては、実測荷重の大きさと頻度を考慮した累積損傷度を元に照査する場合は 1.0 であるが、一定応力振幅による疲労限照査による場合などは 1.0 より大きな値となる。本計算例においては、鋼単体の耐疲労性照査において、鋼材の作用係数を 1.5 とし、150kN (1組) で疲労限照査を行っている。

(3) 構造解析係数

照査に用いる解析手法によって異なるが、本計算例では、FEM によって求めた断面力等を使用する場

合には 1.0 とする。

(4) 材料係数

鋼材の規格値とのばらつきやコンクリートの強度試験におけるばらつき等によって算定されるものであるが、これらを厳密に踏まえた資料が現時点では十分に整っていないため今後、さらに解明されることが期待される。

ここでは、鋼部材に対して、従来の許容応力度設計法では降伏応力を 1.7 で割った値を基準の応力 (=許容応力) としているが、これに各種作用の組み合わせによる割り増し (最大 1.5, 地震時等) を考慮すると、実際には少なくとも 1.7/1.5=1.1 程度の材料としての安全率を持つものと考えられること、コンクリート標準示方書においても鋼材の材料係数を 1.05 としていることなどから 1.1 とする。

コンクリート部材に対しては、コンクリート標準示方書に提案されている値を参考に 1.3 とする。

(5) 部材係数

「床版部材」という観点から部材係数を考えると、鋼橋の損傷で問題となっているのは、ほとんどが「床版」と「塗装」であるという実態を踏まえ、床版部材の部材係数は他部材より大きくするのが妥当であるといえる⁷⁾。また、道路橋示方書⁶⁾において、RC 床版に使用する鉄筋の許容応力度は、特に過酷な荷重状態にさらされる床版では、有害なひび割れを防ぐために、鉄筋比を小さくし過ぎない事を目的とし、応力的にどの程度とすべきかについてはよくわかっていないものの、安全確保のために鉄筋の許容応力を 180 kN/mm² から 140kN/mm² に低減してきた経緯がある。さらに、けたの不等沈下を考えると 120kN/mm² まで低減するのが望ましいとされており、現状と同等の安全率を確保するには床版部材に 180/120=1.5 程度の部材係数が必要であると考えられることができる。

以上より、本計算例においては床版部材の部材係数 $\gamma_b=1.5$ を提案する。

表-1.4.2 安全性の照査における部分係数の積

構造物係数 × 作用係数 × 構造解析係数 × 材料係数 × 部材係数	
$\gamma_i \times \gamma_f \times \gamma_a \times \gamma_m \times \gamma_b$	
鋼材で決定する断面	本計算例 = $1.0 \times 1.5 \times 1.0 \times 1.1 \times 1.5 = 2.475$
	道示設計 = $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times (1.7 \times 1.5) \times 1.0 = 2.55$ ※1 $\gamma_m(\text{道示}) = \sigma_y / \sigma_a \times (180/120)$
コンクリートで決定する断面	本計算例 = $1.0 \times 1.5 \times 1.0 \times 1.3 \times 1.5 = 2.925$
	道示設計 = $1.0 \times 1.0 \times 1.0 \times 3.0 \times 1.0 = 3.00$ ※2 $\gamma_m(\text{道示}) = \sigma_{ck} / \sigma_a$

1.4.2 本計算例における安全率のイメージ

1.4.1 に示す部分係数を用いて計算を行った場合、既存の道路橋床版と比べて部分係数の積（応力レベルで降伏応力以下の照査を行う場合には総合的な安全率の概念に相当）がどの程度となるかを以下に試算する。

安全性を例に、道路橋示方書⁶⁾における設計を行った場合に部分係数に相当すると考えられる値を整理すると、表-1.4.2 に示す通りとなる。これらの値は厳密な意味での安全率を意味するものではないが、既存の設計手法との違いがどの程度になるかといった現状を把握する参考値となり得ると考えられる。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書—全国活荷重実態調査—，国総研資料第 295 号，2006.
- 2) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，2004
- 3) 日本道路協会：舗装の構造に関する技術基準同解説，2001
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002 年制定，丸善，2002.
- 5) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 設計編，2007.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，丸善，2002.
- 7) 西川和廣：道路橋示方書の性能規定化とこれらからの橋，第二回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，土木学会，pp39-48，1999.

第2章 RC床版

2.1 概要

本項では、道路橋床版の性能照査型設計指針(案)2008に準じ、RC床版の試設計を行う。

対象とする床版は、道路橋示方書・Ⅱ鋼橋編¹⁾(以下、道示)第8章のRC床版の適用範囲である床版支間4m未満の構造に加え、性能照査型設計の採用によって採用可能となる可能性を試算するため、床版支間6mの構造も対象とする。

なお、既存の道路橋RC床版と比較するため、道示による設計結果をあわせて表記する。

2.2 安全性

2.2.1 床版の曲げモーメントによる断面設計

(面外曲げ)

(1) 設計曲げモーメント

100kNの輪荷重をできるだけ載荷した満載時の活荷重状態(100kN満載)、および150kNタンデム荷重1組を載荷した活荷重状態(150kNタンデム単載)での床版曲げモーメントは、主桁位置を単純支持辺とする連続版によるFEM解析により求める。

解析モデルは橋梁全幅と床版の最大支持間隔6mの5倍にあたる30mを橋軸方向にモデル化する。輪荷重の載荷幅は200mm×500mmとして床版厚方向の載荷幅の分散は考慮しない。FEM要素は4節点厚板シェル要素を使用し、解析上の床版厚さは道示式により求めた値を使用した。

なお、死荷重曲げモーメントについても同様に解析により求めるのが望ましいが、簡単のため、ここでは道示式により求めた。求めた死活荷重による床版の設計曲げモーメントの値を表-2.2.1、表-2.2.2に示す。

表-2.2.1 床版支持間隔2.6m床版の設計曲げモーメント

床版設計曲げモーメント	単位	道示式	FEM	
			100kN満載	150kNタンデム単載
主鉄筋方向	kN・m/m	36.2	31.0	55.7
配力筋方向	kN・m/m	24.0	22.4	31.8

表-2.2.2 床版支持間隔6.0m床版の設計曲げモーメント

床版設計曲げモーメント	単位	道示式	FEM	
			100kN満載	150kNタンデム単載
主鉄筋方向	kN・m/m	109.2	98.5	151.2
配力筋方向	kN・m/m	51.2	59.4	79.0

(2) 断面設計

床版の断面設計では、道示の最小床版厚規定、道示の死活荷重設計曲げモーメント式、そして道示の床版鉄筋許容応力度(140N/mm²に20N/mm²程度の余裕を持たせた120N/mm²)を用いた道示式による断面設計と、「第1章 設計に関する共通事項」の表-1.4.1に提案する部分係数を用いた鉄筋強度およびコンクリート強度を用いてFEM解析結果から床版厚や配筋を決定する断面設計を行った。

その結果を表-2.2.5、表-2.2.6に示す。なお、鉄筋の設計強度およびコンクリートの設計強度は式(2.2.1)および式(2.2.2)から、表-2.2.3、表-2.2.4に示す値とする。また、コンクリート表面から主鉄筋中心までの距離はD19以下では40mm、D22では50mmに設定している。

<鉄筋に対する曲げ強度の照査>

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} = \gamma_i \frac{\gamma_a \cdot \gamma_f \cdot F_k}{f_k / \gamma_m / \gamma_b} = 1.0 \cdot \frac{1.0 \cdot 1.5 \cdot M}{\sigma_y / 1.1 / 1.5} \quad (2.2.1)$$

よって $S_d = 1.5 \times M$

$$R_d = \sigma_y / 1.65$$

ここに M : FEMによる曲げモーメント

σ_y : 鉄筋の降伏応力度

<コンクリートに対する曲げ強度の照査>

$$\gamma_i \frac{S_d}{R_d} = \gamma_i \frac{\gamma_a \cdot \gamma_f \cdot F_k}{f_k / \gamma_m / \gamma_b} = 1.0 \cdot \frac{1.0 \cdot 1.5 \cdot M}{\sigma_{ck} / 1.3 / 1.5} \quad (2.2.2)$$

よって $S_d = 1.5 \times M$

$$R_d = \sigma_{ck} / 1.95$$

ここに M : FEMによる曲げモーメント

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度

表-2.2.3 鉄筋の設計強度

鉄筋	降伏応力 σ_y (N/mm ²)	強度 R_d (N/mm ²)
SD295	295	175
SD345	345	205

表-2.2.4 コンクリートの設計強度

コンクリート	設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	強度 R_d (N/mm ²)
$\sigma_{ck}=24$	24	12
$\sigma_{ck}=27$	27	13
$\sigma_{ck}=30$	30	15
$\sigma_{ck}=36$	36	18

表-2.2.5 床版支持間隔 2.6m 床版の設計結果

設計 活荷重	床 版 厚 (mm)	主鉄筋 配置 径@ピッチ (mm)	配力筋 配置 径@ピッチ (mm)	コンクリート 強度 (N/mm ²)	鉄筋 強度 (N/mm ²)
道示設計	240	D16@100	D16@150	8.00 $\sigma_{ck}=24$	120 SD295
100kN 満載	160	D16@100	D16@125	12. $\sigma_{ck}=24$	175 SD295
150kN 単載	240	D16@100	D16@150 *2	12 $\sigma_{ck}=24$	175 SD295

表-2.2.6 床版支持間隔 6.0m 床版の設計結果

設計 活荷重	床 版 厚 (mm)	主鉄筋 配置 径@ピッチ (mm)	配力筋 配置 径@ピッチ (mm)	コンクリート 強度 (N/mm ²)	鉄筋 強度 (N/mm ²)
道示設計	430	D22@100	D16@150	8.00 $\sigma_{ck}=24$	120 SD295
100kN 満載	230	D22@100	D16@100	12 $\sigma_{ck}=24$	175 SD295
150kN 単載	380	D22@100	D16@125	12 $\sigma_{ck}=24$	175 SD295

(3) 断面設計のまとめ

以上の計算結果より、FEMによる床版では、いずれのケースでも100kN満載ではなく150kN単載によって決定する事がわかった。また、床版支間が2.6mでは、道示設計とFEMの150kNタンデム単載が同等の断面となったが、床版支間6.0mでは、FEMによる断面力を用いると道示の規定を6mにまで拡大した設計に比べ、版厚を減少できることがわかった。

以下では、道示式により設計された床版を道示床版、FEMによる床版を性能設計床版と称する。

2.2.2 床版の押抜きせん断による断面照査

(面外せん断)

(1) 道示コンクリート橋編による照査

押抜きせん断許容荷重 P_a は道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編²⁾による式(2.2.3)よりもとめる。

$$P_a = \tau_p \times u_p \times d \quad (2.2.3)$$

ここに、

 P_a : 押抜きせん断許容荷重 τ_p : せん断許容応力度コンクリートの設計基準強度 σ_{ck} により $\sigma_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の場合、 $\tau_p = 0.9\text{N/mm}^2$ u_p : 設計断面の周長で、載荷面から $d/2$ 離れた位置で算出する。 d : 有効高さ

式(2.2.3)により求めた各床版の許容押抜きせん断荷重の計算結果を、表-2.2.7、表-2.2.8に示す。

表-2.2.7 床版支持間 2.6m 床版の
許容押抜きせん断荷重

記号	単位	性能設計床版	道示床版
τ_p	N/mm ²	0.9	0.9
u_p	mm	2003	2003
d	mm	192	192
P_a	kN	346	346
判定	150kN	OK	OK

表-2.2.8 床版支持間隔 6m 床版の
許容押抜きせん断荷重

記号	単位	性能設計床版	道示床版
τ_p	N/mm ²	0.9	0.9
u_p	mm	2402	2559
d	mm	319	369
P_a	kN	690	849
判定	150kN	OK	OK

(2) 土木学会コンクリート標準示方書による照査
面部材の設計押抜きせん断耐力 V_{pcd} は、土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕³⁾により、式(2.2.4)のようにして求められる。

$$V_{pcd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_r \cdot f'_{pcd} \cdot u_p d / \gamma_b \quad (2.2.4)$$

ここに、 $f'_{pcd} = 0.20\sqrt{f'_{cd}}$ (N/mm²)ただし、 $f'_{pcd} \leq 1.2\text{N/mm}^2$

$$\beta_d = \sqrt[4]{(1/d)} \quad (d : \text{m})$$

ただし、 $\beta_d > 1.5$ の場合 $\beta_d = 1.5$

$$\beta_p = \sqrt[3]{(100p)}$$

ただし、 $\beta_p > 1.5$ の場合 $\beta_p = 1.5$

$$\beta_r = 1 + 1/(1 + 0.25u/d)$$

 u : 載荷面の周長 (mm) p : 鉄筋比

$$\gamma_b = 1.5$$

式(2.2.4)により求めた、各床版の押抜きせん断耐力の計算結果を、表-2.2.9、表-2.2.10に示す。

表-2.2.9 床版支持間隔 2.6m 床版の
押抜きせん断耐力

	単位	性能設計床版	道示床版
f'_{cd}	N/mm ²	24	24
f'_{pcd}	N/mm ²	0.98	0.98
β_d		1.51	1.51
β_p		1.01	1.01
β_r		1.35	1.35
p		0.0103	0.0103
V_{pcd}	k N	518	518
判定	150kN	OK	OK

表-2.2.10 床版支持間隔 6.0m 床版の
押抜きせん断耐力

	単位	性能設計床版	道示床版
f'_{cd}	N/mm ²	24	24
f'_{pcd}	N/mm ²	0.98	0.98
β_d		1.34	1.29
β_p		1.04	1.01
β_r		1.47	1.51
p		0.0113	0.0105
V_{pcd}	k N	984	1177
判定	150kN	OK	OK

(3) 押抜きせん断照査のまとめ

表-2.2.7, 表-2.2.8 から, いずれの床版も載荷荷重は許容押抜きせん断荷重に対して十分小さいことがわかる。また, 表-2.2.9, 表-2.2.10 から, いずれの床版も 150kN の輪荷重に対して十分安全な押抜きせん断耐力を有している。以上より, 性能設計床版, 道示床版のいずれも, 十分な押抜きせん断強度を有していると判断できる。

2.2.3 桁端部の床版の断面照査 (面外曲げ)

桁端部の床版は, 一般部の床版と境界条件が異なることや, 伸縮装置などによる不陸により衝撃が大きくなることが予想される。そこで, 支間 6m の床版に, 輪荷重 100kN が作用する場合について, 端横桁の有る場合と無い場合を FEM 解析により比較する。解析結果を表-2.2.11 に示す。

表より, 端横桁のない場合, 衝撃 (一般部の 2 倍を想定) を考慮した主鉄筋方向曲げは, 端横桁がある場合に比較して, 最大 2.92 倍となる。これに対して, 端横桁を設けた場合には, 主鉄筋方向および配力筋方向とも, 一般部の曲げモーメントと同等以下の曲げモーメントとなる。そこで, 本橋では, 桁端部に大きなモーメントが発生することを防ぐため, 桁間部の床版には端横桁を設け, 片持ち部の床版にはブラケットを設けることとする。

表-2.2.11 桁端部床版の活荷重曲げモーメント
(支間 6m, $P = 100\text{kN}$)

活荷重曲げ (kN・m/m)	一般部	桁端部 端横桁なし	桁端部 端横桁あり
衝撃係数	0.357	0.714 [*]	0.714 [*]
主鉄筋方向 (比率)	65.3 (1.00)	191.1 (2.92)	21.8 (0.33)
配力筋方向 (比率)	59.4 (1.00)	-25.5 (-0.43)	-51.4 (-0.87)

^{*}桁端部の衝撃係数は, 一般部の 2 倍を考慮した。

2.2.4 主桁作用による断面照査 (面外曲げ)

床版剛性に比して剛性のあまり大きくない鋼桁で床版を支持した場合, 鋼桁のたわみによって床版に付加される曲げモーメントが発生する。ここでは, 桁のたわみにより発生する曲げモーメントについて, 概略照査を行う。

ここでは, 主桁たわみ δ/L が 0, 1/1,000, 1/500 となる 3 ケースについて各々, 床版に作用する断面力を算出した検討例⁴⁾を参考に, 照査を行う。床版を等方性版とした場合の検討例によれば, 橋軸直角方向 (主鉄筋方向) の曲げモーメントは, 主桁たわみの影響をほとんど受けないことが分かっている。そこで, 本照査計算では, 橋軸方向の曲げモーメントの増加に対し, コンクリートおよび配力鉄筋の応力照査を行う。

なお, 本設計計算においては主桁の断面力に起因する検討であることから, 対象とする照査活荷重は主桁に対して厳しくなる L 荷重 (100kN 満載) とする。

表-2.2.12 主桁作用による橋軸方向
曲げモーメント⁴⁾

δ/L	0	1/1000	1/500
M_x (kN・m/m)	90.4	127.2	164.0
曲げモーメント倍率	$1 \times M_0$	$1.41 \times M_0$	$1.81 \times M_0$
N (kN/m)	0	300	300

表-2.2.12 に示すように, 桁のたわみを想定しない場合に比べ, $\delta/L = 1/1,000$ では曲げモーメントが 1.4 倍程度, $\delta/L = 1/500$ では 1.8 倍程度となるが, 軸力を考慮することにより, 鉄筋の引張応力の軽減が期待できる。

以下に断面計算結果を示す。

表-2.2.13 床版支持間隔 2.6m 床版の主桁作用

たわみ δ/L	鉄筋強度 R_d $\sigma_y/1.65=175$ (N/mm ²)	コンクリート強度 R_d $\sigma_{ck}/1.95=12$ (N/mm ²)	判定
$\delta/L=0$ (元の設計)	$163 < 175$	$7.8 < 12$	—
$\delta/L=$ 1/1000	$80.7 < 175$	$8.9 < 12$	OK
$\delta/L=1/500$	$148 < 175$	$11.6 < 12$	OK

表-2.2.14 床版支持間隔 6.0m 床版の主桁作用

たわみ δ/L	鉄筋強度 R_d $\sigma_y/1.65=175$ (N/mm ²)	コンクリート強度 R_d $\sigma_{ck}/1.95=12$ (N/mm ²)	判定
$\delta/L=0$ (元の設計)	$175 < 175$	$9.3 < 12$	—
$\delta/L=$ 1/1000	$157 < 175$	$13.3 > 12$	NG
$\delta/L=1/500$	$226 > 175$	$16.9 > 12$	NG

以上の検討結果より、主桁作用を考慮した場合、2.6m支間では特にコンクリートの圧縮応力に影響が出るが、全体としては耐荷力確保できるが、6.0m支間ではたわみの制限値を設けることによって厳しい結果となることが分かる。

本検討では、照査対象たわみを道路橋示方書の活荷重たわみ制限の $\delta_{\text{許}}=L/500$ としているが、床版の耐荷力が不足する場合、床版への影響を軽減するため、主桁設計においてたわみを抑えることで耐荷力性能を満足させる方法も考えられる。

2.2.5 荷重分配作用による断面照査（面外曲げ）

主桁に作用する断面力が上フランジとの結合部を介して床版に伝達する作用（主桁作用、合成桁作用）による断面照査は、床版および主桁・分配横桁等を適切にモデル化した立体 FEM 解析等が適切であると考えられる。

しかしながら、ここで対象とした 4 主桁では各主桁の剛性の差が小さく、桁の不等沈下などによる床版曲げへの影響が小さいと考えられること、また、2 主桁では一般には横桁への分配断面力が小さいことなどから、床版の荷重分配作用による断面照査を省略する。

ただし、これまでに床版の荷重分配作用を研究した文献は非常に少なく、分配横桁と床版への荷重分配率については、十分に解明されていない。このため、特に、横桁を従来の構造に対して省略する場合、斜角桁や曲線桁の場合、歩道のマウンドアップや高い遮音壁などが設置される橋梁などにおいては、分配作用として床版への応答値が最大となる荷重状態を検討し、立体 FEM 解析等により照査することが

必要であると考ええる。

なお、主桁間の剛性が大きく異なり、桁の不等沈下による床版への断面力分配作用が無視できない場合には、道路橋示方書の不等沈下による付加曲げモーメント算定資料（巻末）などを参考に照査することとなる。

2.2.6 水平荷重による断面照査（面内力）

上部工に作用する水平荷重による床版の断面照査を行う。

ここでは、①地震荷重、②風荷重により、床版に発生する断面力を算出する。

床版支持間隔 $L=2.6\text{m}$ の場合

① 地震荷重

設計水平震度 $K_h = 0.20$

上部工自重（支間平均） $W = 131.5 \text{ kN/m}$

設計地震力 $W_e = 0.2 \times 131.5 \text{ kN/m} = 26.3 \text{ kN/m}$

② 風荷重

設計基準風速 40m/s

橋の総幅 $B = 9.91\text{m}$

橋の総高 $D = 6.0\text{m}$

道路橋示方書 I 共通編 2.1.10 風荷重 より

設計風荷重 $W_w = 22.0 \text{ kN/m}$

以上より、本設計計算では

地震荷重 $W_e = 26.3 \text{ kN/m}$ によって照査する。

床版支持間隔 $L = 6.0\text{m}$ の場合

①地震荷重

設計水平震度 $K_h = 0.20$

上部工自重（支間平均） $W = 150.4 \text{ kN/m}$

設計地震力 $W_e = 0.2 \times 150.4 \text{ kN/m} = 30.1 \text{ kN/m}$

②風荷重

設計基準風速 40m/s

橋の総幅 $B = 9.91\text{m}$

橋の総高 $D = 7.1\text{m}$

道路橋示方書 I 共通編 2.1.10 風荷重 より

設計風荷重 $W_w = 26.4 \text{ kN/m}$

以上より、本設計計算では

地震荷重 $W_e = 30.1 \text{ kN/m}$ によって照査する。

各々算出した設計水平力に対し、2 径間連続梁モデルにおいて曲げモーメントを算出し、床版の水平方向の断面照査を行う。

表-2.2.15 床版の水平荷重照査結果

		床版支間 2.6m	床版支間 6.0m
水平荷重による 曲げモーメント	kN・m	7793	8918
床版コンクリート 応力(端部)	N/m ²	2.3<12	2.1<12
床版主鉄筋 応力(端部)	N/m ²	165<175	104<175
判定		OK	OK

以上の検討により、水平荷重による床版の耐荷力性能は満足していることが分かった。

なお、風荷重による壁高欄基部に生じる断面力については、別途考慮する必要があるが、ここでは省略する。

2.3 使用性

2.3.1 振動に対する照査

一般にコンクリート系床版を用いた橋梁の場合、伸縮装置部等、一部を除いては振動や低周波の問題が発生することは少ないと考えられている。そのため、設計時に床版単体の耐振動特性について考慮することは一般的ではない。ここでは、床版の振動に着目した場合、一般的な道路橋 RC 床版ではどの程度の固有振動数となるか、検討を行った。

本検討では床版単体の振動に着目して耐振動特性を評価している。床版を 2 対辺単純支持、2 対辺自由長方形版とみなし、土木学会発刊の構造力学公式集⁵⁾をもとに床版の固有振動数を算出した。なお、構造力学公式集において、一部、ポアソン比を 0.3 として算出した図表を用いているが、いくつかのケースで同じモデルの FEM による固有値解析を実施した結果、固有振動数には大きな影響がないことを確認している。

検討は、床版支間をパラメーターとし、床版支間の変化に伴う固有振動数の推移に着目して行った。また、床版の剛性を左右する床版厚は、一般的な道路橋 RC 床版での耐振動性をみるため、既存の現行道示どおり床版支間によって決定されるものとし、その版厚を 0.8 倍、1.0 倍、1.2 倍することにより、版厚の変化に伴う固有振動数の推移についても検討を行っている。

なお、床版の橋軸方向の長さは、各々、床版支間の 3 倍とした。

以下に、固有振動数の算出式を式(2.3.1)に示す。

〈 固有振動数の算出式 〉

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (2.3.1)$$

ここに、

f : 固有振動数

π : 円周率

ω : 円振動数

$$\frac{\omega a^2}{\pi^2} = \sqrt{\frac{\rho h}{Dg}}$$

a : 床版支間長

ρ : 密度

h : 床版厚

連続版のとき $h = (3L + 11)$ cm

単純版のとき $h = (4L + 11)$ cm

ただし、 L = 床版支間 m

D : 曲げ剛性

g : 重力加速度

図-2.3.1 および図-2.3.2 に固有振動数と床版支間の関係を示す。

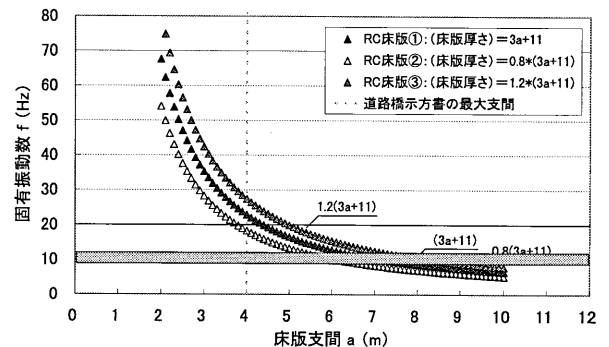


図-2.3.1 固有振動数と床版支間(RC 床版:連続版)

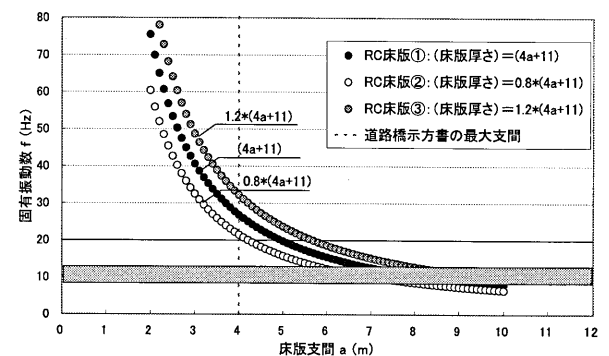


図-2.3.2 固有振動数と床版支間(RC 床版:単純版)

グラフ中の着色ゾーンは、低周波の影響等が懸念される固有振動数の範囲(10Hz 前後とした)である。振動および低周波問題に関してはこれまでに各種研究および調査^{6)~12)}が行われており、その影響が懸念される固有振動数についても明らかになりつつある。表-2.3.1 に、振動および低周波問題の調査結果を示す。

表-2.3.1 振動および低周波問題の調査結果

研究者	調査結果
山田ら ⁶⁾	トラックのバネ下振動数 8-20Hz
清水ら ⁷⁾	ジョイント音の卓越周期 10-50Hz
梶川康男 ⁸⁾	振動体感時、14.5Hz 付近の振動が卓越 高架橋ではジョイント音が 10-30Hz 付近で卓越
村井逸朗 ⁹⁾	
内田ら ¹⁰⁾	12.5Hz でピークが出現
石井ら ¹¹⁾	12Hz 付近でピークが出現
山家祥三 ¹²⁾	トラス橋：10-14Hz でピークが出現 鋼鈑桁橋：10-18Hz でピークが出現

床版形状等の条件による程度の差が生じることは否定できないものの、これらの調査結果から、一般に、床版単体の固有周期が 10Hz 前後の場合に振動および低周波被害の発生する可能性が高いと考えられる。これは、床版単体の固有周期がトラックのバネ下振動数とほぼ一致することに起因する。

これらの検討により、以下のことがわかった。

- 1) 本検討ケースの場合、支間が短いときには床版単体の振動から低周波被害が発生する可能性は比較的低いことが予想される。床版支間が道路橋示方書に示される最大支間以内のときには低周波被害が発生する可能性は極めて低いと考えられる。
- 2) 現行道示に示される最大支間長を上回る床版を想定した場合、床版の固有振動数は低周波が懸念される振動数の領域を通過し、5Hz 程度に収束する傾向がある。この結果を考慮すると床版単体の振動により低周波が発生する可能性は否定できないことから、過去の実績や既存の構造物から確実な安全性を保障できる場合を除いては、振動特性についても充分検討することが望まれる。
- 3) 「2.2 安全性」において計算された床版においては、グラフから読み取ると以下のような結果となる。
 - a) 床版支間 2.6m の場合、性能設計床版、道示床版ともに固有周期は 60Hz 程度となり（床版厚 240mm＝道示最小床版×1.3 程度）、振動被害が発生する可能性は低い。
 - b) 床版支間 6.0m の場合、性能設計床版、道示床版とも固有周期は 15Hz～20Hz（程度であり床版厚はそれぞれ 380mm で最小版厚の 1.1 倍、430mm で 1.2 倍）、現状では概ね振動被害の懸念はないが、版厚をさらに薄くできる可能性がある場合には何らかの耐振動対策が必要である。

2.3.2 橋面排水に関する照査

降雨時に橋面上の排水が滞ると、滞水により車両、歩行者の通行に支障を生じるのみならず安全性にも重大な影響を及ぼす。

床版の排水には縦横断の勾配と排水ますによって行われているが、排水ますの部分で構造上の弱点となりやすく、排水性を確保しつつ排水ます間隔をできるだけ大きくすることは床版の供用性を満足しつつ床版の耐久性に悪影響を与えないことにもつながる。そこで、ここでは排水ます間隔を十分にとりつつ排水性を確保するための床版の条件を検討するものとする。

ここでは、地域の降雨強度などにより雨水流出量を算定し、十分な排水能力があることを確認する。ここでは算定方法として「道路土工―道路排水工指針」¹³⁾に基づき、簡易的に雨水流出量を計算する。

1) 水流出量の計算

$$q = \frac{1}{3.6 \times 10^3} C \cdot I \cdot W \quad (2.3.2)$$

$$= 0.060 \text{ (1/sec/m)}$$

ここで

q : 道路の単位幅あたり雨水流出量 (1/sec/m)

C : 流出係数: 0.95 と仮定

I : 流達時間内の降雨強度 (mm/h)

設計条件より 50mm/h

W : 道路の集水幅 (m): $9.91/2 = 4.955$

2) 床版の設計

排水ます部分は床版の弱点になりやすい。そこで、排水ます間隔を 20m に設定し、それに合わせて十分な排水能力が得られるような床版の横断勾配を検討する。

排水ますの間隔 L_s は以下の式によって求められる。

$$L_s = \frac{\gamma \cdot Q}{q} \quad (2.3.3)$$

ここで

q : 道路の単位長あたりの流出量 (1/sec)

Q : 側溝流出量 (1/sec)

γ : 排水ますの落下率 0.9

上式より

$$Q = L_s \cdot q / \gamma$$

$$= 20 \times 0.060 / 0.9$$

$$= 1.3 \text{ (1/sec)}$$

橋梁の縦断勾配が 3%、通水可能幅を 500mm と仮定したとき『道路土工―道路排水工指針』より

- ・ 横断勾配が 2% の時、許容通水量 $Q \approx 1.0\%$
- ・ 横断勾配が 4% の時、許容通水量 $Q \approx 3.0\%$

となり、上記の条件で横断勾配を検討すると 2% 以上の横断勾配とする必要がある。

上記の例では一定の条件下での横断勾配の検討例であり、ここでの横断勾配は舗装面で確保されているものであるが、今後増加してくるであろう排水

性舗装の橋梁の場合には、舗装面ではなく床版の勾配が直接排水に影響を与えるようになる可能性もある。このような場合ではやはり床版上面での排水の検討が必要となる可能性があり、上記のような検討が必要となる。

2.4 耐久性

耐久性には耐疲労性、耐腐食性、材料劣化抵抗性がある。

そのうち、繰返し作用に対する耐疲労性としては、

- 1) 面外せん断疲労に対する耐久性
- 2) 面外曲げ疲労に対する耐久性
- 3) 水の影響に対する耐久性

を照査するものとしているが、一般的な RC 床版の損傷事例においては、面外押しぬきせん断による疲労が最も顕著であることが知られている。また、水の影響に関しては、防水層敷設、使用性による橋面排水性の確保を前提としていることから、ここでは耐疲労性の照査としては、面外押し抜きせん断疲労に対する照査をおこなうこととする。

また、鋼材としての疲労強度として、鉄筋単体における耐疲労性照査についても、コンクリート標準示方書を参考に実施する。

耐腐食性に関しては、RC 床版に使用する鉄筋を対象とすると、

- 1) ひびわれによる鋼材腐食
- 2) コンクリート中性化による鋼材腐食
- 3) 塩化物イオンによる鋼材腐食

が挙げられる。このうち、コンクリートの中性化に関しては、水セメント比(W/C)の値が50%を下回るコンクリートを使用することで、中性化の照査を省略するもの¹⁴⁾として、ここではひび割れによる鉄筋の腐食および塩化物イオンによる鉄筋の腐食について照査する。

コンクリートの材料劣化抵抗性に対しては、

- 1) アルカリ骨材反応による材料劣化
- 2) 凍結融解による材料劣化

が挙げられるが、アルカリ骨材反応については、化学法やモルタルバー試験、またアルカリ総量などから、コンクリートが所要の耐アルカリ骨材反応性を満足することを確認することで、耐久性の照査を行うことが可能であり¹⁴⁾、凍結融解については、氷点下以下の気温がまれな地域(設計条件)であることから、具体的な照査は省略する。なお、凍結融解は、相対動弾性係数の値を測定し、最小限界値を上回る値であることを確認することで、耐久性の照査が可能であることが知られている¹⁴⁾。

2.4.1 実測交通を用いた床版の押抜きせん断強度による疲労照査(耐疲労性)

(1) はじめに

床版の耐疲労性は、「床版の設計供用期間において、交通荷重その他の繰返し荷重に対し、所要の耐荷力や使用性を確保すること」と定義される。

また、作用荷重としては供用路線に対し、輪荷重の大きさとその累積頻度分布を想定したものとすることが求められる。

しかしながら、全ての路線について、その交通実態を予測することは極めて困難であり、合理的な荷重分布の推定方法が必要であるといえる。

ここでは、一般的な RC 床版に対し、床版の設計供用期間において確保すべき耐疲労性(押し抜きせん断耐疲労)について、以下の点に着目して試算を行う。

- ① 類似交通荷重の設定
- ② 耐荷力に対する疲労耐久性照査

(2) 交通荷重実態

疲労に対する交通荷重は、供用路線の輪荷重の大きさとその累積頻度分布で表現される。ここでは、照査荷重として、既往の調査資料^{15)、16)}による実測交通荷重の分析結果を用いる。これらの資料によれば、日本国内の重交通路線における1車線1日あたりの全走行車両台数(以下、日交通量とする)は最大級の路線で1.5万台～2.0万台程度であり、大型車混入率別の輪荷重頻度分布は表-2.4.1のようにまとめられる。従って、既往の路線等から日交通量と大型車混入率を推定し、頻度分布と日交通量の積を求めることで、計画路線の輪荷重の大きさとその頻度分布を推定することが可能となる。

本計算では、設計条件に基づき、以下の条件にて計算する。

日交通量：13,000 台

大型車混入率：45%程度

(都市部における重交通幹線クラス)

(3) 押し抜きせん断疲労強度評価方法

コンクリート標準示方書では、せん断補強鉄筋のない面部材に対する設計押し抜きせん断疲労耐久性 V_{rpd} として次式が提案されている³⁾。

$$V_{rpd}/V_{pcd} = (1 - V_{pd}/V_{pcd}) \{1 - (\log N)/14\} \quad (2.4.1)$$

V_{rpd} ：設計押しぬきせん断疲労耐久性

V_{pcd} ：設計押しぬきせん断耐力

V_{pd} ：永久荷重(死荷重等)による設計せん断力
(道路橋床版においては $V_{pd} \doteq 0$ と考える)

この式に、輪荷重の交番載荷の影響を考慮した道路橋床版の疲労耐久性評価式は、以下の式(2.4.2)のように与えられる¹⁷⁾。

表-2.4.1 大型車混入率別輪荷重分布*

(単位：％)

輪荷重(kN)	大型車混入率						
	10%～20%	20%～30%	30%～40%	40%～50%	50%～60%	60%～70%**	70%～80%
0 ～ 19.6	85.00	75.00	65.00	55.00	45.00	0.00	25.00
19.6 ～ 29.4	7.3661	12.4363	17.5172	20.8053	24.2556	0.0000	28.8053
29.4 ～ 39.2	3.5942	5.8788	8.2030	10.7415	13.1780	0.0000	24.0165
39.2 ～ 49.0	1.9014	3.0603	4.4993	5.8662	7.0340	0.0000	12.4965
49.0 ～ 58.8	1.1402	1.8043	2.5666	3.5280	4.9242	0.0000	5.6130
58.8 ～ 68.6	0.5433	0.9515	1.2751	1.8842	2.9733	0.0000	2.9153
68.6 ～ 78.4	0.2447	0.4245	0.5418	0.8784	1.4064	0.0000	0.7538
78.4 ～ 88.2	0.1178	0.2045	0.2303	0.4136	0.7123	0.0000	0.2535
88.2 ～ 98.0	0.0482	0.1110	0.0994	0.1881	0.3322	0.0000	0.0900
98.0 ～ 117.6	0.0308	0.0985	0.0525	0.1508	0.1810	0.0000	0.0473
117.6 ～ 137.2	0.0108	0.0295	0.0137	0.0590	0.0039	0.0000	0.0090
137.2 ～	0.0027	0.0010	0.0014	0.0351	0.0000	0.0000	0.0000
合計	100.00	100.00	100.00	99.55	100.00	0.00	100.00

* 参考文献15) 限界状態設計法における設計活荷重に関する検討Ⅱ, pp.8 表-1.3 を, 補正して使用.

** 60%～70%地点が調査に含まれていないため, 計測データなし.

$$P = \{1 - \log(N) / 14\} \times V_{pcd} / k \quad (2.4.2)$$

ここで、 P : 移動輪荷重の大きさ

V_{pcd} : 設計押し抜きせん断耐力

N : 荷重 P の繰り返し回数

k = (2×a + b) / (a + b)

a : 輪荷重進行方向に直行する載荷幅

b : 輪荷重進行方向に平行な載荷幅

式(2.4.2)に対し, 図-2.4.1 に示す押し抜きせん断疲労耐久性の評価フローに基づき, 照査する.

(1) 設計輪荷重の設定

荷重頻度の実測値あるいは, 規定された輪荷重分布による疲労被害と, 最大輪荷重 P_{max} による疲労被害が等価となるように換算した等価繰り返し回数 N_{eff} を計算する.

$$D(P_{max}, N_{eff}) = \sum D(P_i, N_i)$$

(2) 疲労破壊荷重の計算

式(2.2)に基づき, 等価繰り返し回数が作用した場合の押し抜きせん断疲労破壊荷重 P を計算する.

$$P = \{1 - \log(N_{eff}) / 14\} \times V_{pcd} / k$$

(3) 保有する安全率の計算

押し抜きせん断疲労破壊荷重 P と最大輪荷重 P_{max} より保有安全率 ν を計算し, 所定の安全率 ν_{req} が確保されていることを照査する.

$$\nu = P / P_{max} \geq \nu_{req}$$

図-2.4.1 照査フロー¹⁷⁾

(4) 疲労耐久性照査計算

(3)に示す評価手法を用いて, 「2.2 安全性」に示す4種類の床版(床版支間 2.6m および 6.0m のそれぞれ性能設計床版および道示床版)について, 押し抜きせん断疲労耐久性の照査を行い, 結果を表-2.4.4 および図-2.4.2 に示す.

表-2.4.2 床版諸元(床版支間 2.6m)

	性能設計床版	道示床版
床版厚	240mm	240mm
コンクリート設計基準強度	24N/mm ²	24N/mm ²
押し抜きせん断強度 V _{pcd}	777kN	777kN
部材係数 γ _{b=1.5 とした場合の V_{pcd}}	518kN	518kN
設計供用期間	100 年	100 年

表-2.4.3 床版諸元(床版支間 6.0m)

	性能設計床版	道示床版
床版厚	380mm	430mm
コンクリート設計基準強度	24N/mm ²	24N/mm ²
押し抜きせん断強度 V _{pcd}	1477kN	1765kN
部材係数 γ _{b=1.5 とした場合の V_{pcd}}	984kN	1175kN
設計供用期間	100 年	100 年

なお, 各ケースとも最大荷重 P_{max} は実測最大値を考慮して150kNとし, 輪荷重載荷面は20cm×50cm(k=1.7)とした.

表-2.4.4 押し抜きせん断疲労耐久性照査結果
(床版支間 2.6m)

	性能設計 床版	道示床版
予想破壊荷重	191kN	191kN
最大荷重	150kN	150kN
等価繰り返し回数 (日あたりの回数)	17 万回 (4.6 回)	17 万回 (4.6 回)
破壊に対する荷重の 安全倍率	1.27	1.27

表-2.4.4 押し抜きせん断疲労耐久性照査結果
(床版支間 6.0m)

	性能設計 床版	道示床版
予想破壊荷重	323kN	370kN
最大荷重	150kN	150kN
等価繰り返し回数 (日あたりの回数)	155 万回 (43 回)	326 万回 (89 回)
破壊に対する荷重の 安全倍率	2.15	2.47

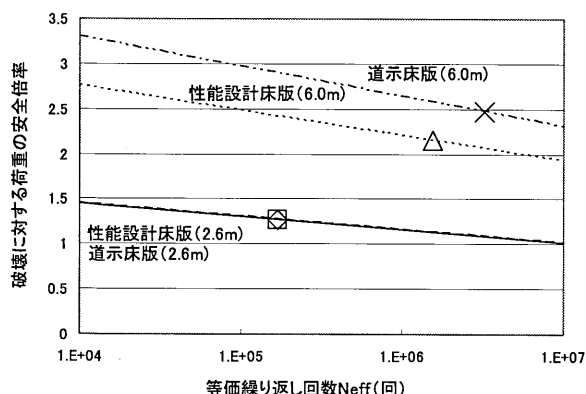


図-2.4.2 押し抜きせん断疲労耐久性照査結果

これらの結果より、「2.2 安全性」により設計された床版は、押しぬきせん断疲労に対して十分な体力を有していることが確認された。

2.4.2 梁状化を仮定した床版の押し抜きせん断強度による疲労照査（耐疲労性）

床版の耐疲労性については、設計指針(案)の「3.1 耐疲労性」に記述されるように、コンクリート版の静的な押しぬきせん断強度を元に行うことが標準的であるが、床版の損傷事例等に関する既往の研究によれば、床版の梁状化を仮定したときの耐荷力を求める方法がよく知られている。ここでは、梁状化を仮定した床版の押しぬきせん断強度による耐疲労性について概略の照査を実施する。梁状化耐荷力（松井式） P_{sx} は以下のように算出する¹⁸⁾¹⁹⁾。

$$P_{sx} = 2 B (\tau_{smax} X_m + \sigma_{tmax} C_m) \quad (2.4.3)$$

ここで

$B = b + 2 d_d$: 梁幅

b : 配力筋方向の載荷幅 (= 20cm)

d_d : 配力筋方向の有効高さ (cm)

X_m : 主鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視したときの中立軸深さ (cm)

C_m : 引張り側主鉄筋のかぶり深さ (cm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断強度 (kg/cm²)

$$= 0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$$

σ_{tmax} : コンクリートの引張強度 (kg/cm²)

$$= 0.583 (\sigma_{ck})^{2/3}$$

σ_{ck} : コンクリートの圧縮強度 (kg/cm²)

荷重 P が繰り返し作用する場合、梁状耐荷力 P_{sx} を用いて、RC床版に対する使用限界のS-N曲線は次式で与えられる¹⁹⁾。

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.52 \quad (2.4.4)$$

ここで、 N : 使用限界繰り返し回数

各床版について、 P をそれぞれ 100kN, 150kN とした場合について計算した N の値を表-2.4.5, 表-2.4.6 に示す。

表-2.4.5 床版支持間隔 2.6m 床版の疲労耐久性

	単位	性能設計床版	道示床版
σ_{ck}	N/mm ²	24	24
d_d	cm	18.4	18.4
B	cm	56.8	56.8
X_m	cm	7.821	7.821
C_m	cm	4	4
τ_{smax}	N/mm ²	4.63	4.63
σ_{tmax}	N/mm ²	2.25	2.25
P_{sx}	k N	514	514
$N(P=100kN)$	回	2.5×10^{11}	2.5×10^{11}
$N(P=150kN)$	回	1.4×10^9	1.4×10^9

表-2.4.6 床版支持間隔 6.0m 床版の疲労耐久性

	単位	性能設計床版	道示床版
σ_{ck}	N/mm ²	24	24
d_d	cm	31.1	36.1
B	cm	82.2	96.2
X_m	cm	13.384	14.661
C_m	cm	5	5
τ_{smax}	N/mm ²	4.63	4.63
σ_{tmax}	N/mm ²	2.25	2.25
P_{sx}	k N	1204	1460
$N(P=100kN)$	回	1.3×10^{16}	1.5×10^{17}
$N(P=150kN)$	回	7.3×10^{13}	8.6×10^{14}

設計条件より大型車は約 6,000 台/日の通行が予想されるため年間では、210 万台の通行が予想される。また、国総研資料第 295 号¹⁶⁾では 100kN の輪荷重が一日 1 台程度、3 日間の実測最大輪荷重は 150kN 程度が通行している結果が得られている。

ここでは、安全側の評価として、6,000 台/日の大型車交通がすべて 100kN または 150kN と仮定して、各床版が使用限界に至る期間を計算した。計算結果を表-2.4.7 に示す。

表-2.4.7 床版が使用限界に至る期間

最大荷重	支間 2.6m 床版		支間 6.0m 床版	
	性能設計	道示	性能設計	道示
100kN	1.2×10^5 年	1.2×10^5 年	6.1×10^9 年	7.1×10^{10} 年
150kN	660 年	660 年	3.4×10^7 年	4.0×10^8 年

表-2.4.7 より、床版支間が 2.6m の床版は使用限界に至る期間が短く、6.0m に比べると疲労に関して厳しい床版となっている。しかしながら、本検討においては、押し抜きせん断強度に対して耐疲労性に大きな問題が発生することはないと考えられる。

2.4.3 鉄筋に対する耐疲労性の検討（耐疲労性）

RC 床版の部材に使用される鉄筋に発生する応力に対し、コンクリート標準示方書³⁾における鉄筋の疲労強度式(2.4.5)を用いて、主鉄筋の耐疲労性照査を行う。

なお、照査に用いる活荷重は、大型車交通量（日約 6000 台）すべてを 150kN タンデムとした場合、疲労強度が不足するため、ここでは、表-2.4.4 で算出した等価換算回数を用いる。

$$\gamma_i \frac{\sigma_{rd}}{f_{srd}/\gamma_b} \leq 1.0 \quad (2.4.5)$$

ここに f_{srd} : 異形鉄筋の設計疲労強度で

$$f_{srd} = 190 \frac{10^a}{N^k} \left(1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}} \right) / \gamma_s$$

σ_{rd} : 設計変動応力
 σ_{sp} : 永久荷重による鋼材の応力度
 N : 疲労寿命
 f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度
 γ_s : 鉄筋の材料係数 1.1 とする
 γ_b : 床版の部材係数 1.5 とする
 γ_i : 橋梁の構造物係数 1.0 とする

ただし $N \leq 2 \times 10^6$ の場合

$$a = k_{of} (0.81 - 0.003 \phi)$$

$$k = 0.12$$

ϕ : 鉄筋直径

k_{of} : ふしの形状に関する係数 1.0

表-2.4.8 性能設計床版における鉄筋の疲労強度

	単位	2.6m	6.0m
ϕ	mm	16	22
a		0.762	18.4
σ_{sp}	N/mm ²	11.6	3.68
σ_{rd}	N/mm ²	151	173
N	回	17 万回	155 万回
f_{ud}	N/mm ²	440	440/1.1=400
f_{srd}	N/mm ²	252	189
式(2.4.5)	左辺	0.60	0.92
判定		OK	OK

表-2.4.8 より、床版支間が 2.6m の床版は最大応力の発生する主鉄筋においても鉄筋単体での耐疲労性が確保されているが、床版支間が 6.0m の床版においては、厳しい結果となっている。ここでは換算荷重を 150kN と極めて大きなものとしていることなどから、従来の設計法と比べると厳しい評価となっているといえるが、ここで用いた等価換算回数は本来の鉄筋照査に相当するものではないため、実際には精査が必要である。

以上より、特に 6.0m などの長支間での設計を行う場合には、活荷重の大きさと回数を適正に評価した累積損傷度による疲労照査が必要であるといえる。

2.4.4 ひび割れ幅の検討（耐腐食性）

床版は曲げを受ける部材として設計されており、結果として床版裏面の支間中央部分には、死荷重や活荷重によってひび割れが生じることとなる。活荷重によるひび割れは、理論的には活荷重が作用する度に開口が生じ、活荷重が通過した後は閉じた状態となる。

コンクリート標準示方書³⁾には、許容のひび割れ幅が示されているが、これは擁壁などのように持続する荷重に関して定められた値である。これを床版裏面の開閉する曲げ引張りひび割れにそのまま適用することは、活荷重によるひび割れの開口している時間が活荷重の通過時間であり、ごくわずかの時間であることから、厳しすぎるとの意見もある。また、床版の永久ひび割れの研究は少なく、不明な点も多い。そのため、ひび割れ幅の算定においては活荷重によって生じるひび割れ幅の 1/2 と死荷重によるひび割れ幅の和を床版のひび割れ幅とみなして検討するという考え方もある²⁰⁾が、その比率は十分に検討されたものであるとはいえない。

ここでは、コンクリート標準示方書³⁾「許容ひび割れ幅」、「曲げひび割れ幅の検討」に基づいて検討

を行う。活荷重によって生じるひび割れ幅と死荷重によるひび割れ幅の和（各々 1 倍）を床版のひび割れ幅とみなして検討することとした。

コンクリート標準示方書³⁾によれば、曲げによって生じるひび割れ幅 w は、式 (2.4.6) で与えられる。

$$w = 1.1k_1k_2k_3\{4c + 0.7(C_s - \phi)\} \cdot (\sigma_{se}/E_s + \varepsilon'_{csd}) \quad (2.4.6)$$

ここで、

k_1 : 鋼材の付着性状を表す係数で、

異形鉄筋では $k_1 = 1.0$

k_2 : コンクリートの品質の影響を表す係数で、

$k_2 = 15/(f'_c + 20) + 0.7$ (f'_c は一般に f'_{cd})

ここでは $f'_{cd} = 24 \sim 30 \text{ N/mm}^2$ の場合、 $k_2 = 1.0$

k_3 : 引張鉄筋の段数の影響を表す係数で、

1 段配筋の場合 $k_3 = 1.0$

c : かぶり

C_s : 鉄筋の中心間隔

ϕ : 鉄筋径

σ_{se} : 鉄筋応力度の増加量

E_s : 鋼のヤング係数 ($2.0 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値、 150×10^{-6} とする³⁾。

一方、普通の環境における許容ひび割れ幅 w_a は、 $0.005c$ で与えられる。表-2.4.9 に検討結果を示す。

表-2.4.9 性能設計床版のひび割れ幅照査

	単位	2.6m	6.0m
c	mm	32	39
C_s	mm	100	100
ϕ	mm	16	22
$\sigma_{se(dead)}$	N/mm ²	11.6	3.68
$\sigma_{se(live)}$	N/mm ²	151	173
w	mm	0.088	0.092
w_a	mm	0.160	0.195
判定		OK	OK

本検討では普通の環境として照査しており、耐久性に問題はないとの結果となっているが、非常に厳しい環境 ($w_a = 0.0035c$) の場合には照査結果も厳しくなってくる。ただし、これらは、活荷重によるひび割れの開きを静的なひび割れに換算する係数（ここでは 0.5）によって、評価が変わってくる。昭和 61 年のコンクリート標準示方書²⁰⁾では、瞬間的に生じるひび割れ幅を持続的なひび割れ幅に換算する係数として、0.5 を与えている。この係数は計算結果に与える影響が大きく、この値によって評価や結論が変わる可能性もある。今後の研究課題といえる。

なお、ここでは床版裏面の水分（床版内部を通過して来る水や、排水の不備から流出してくる水に関しては対象としない。床版下面に結露によって付着する水を対象とする）に対して、ひび割れ幅が許容値以内なら耐久性に問題がないとの立場で検討を行った。

しかし、床版裏面の塩分濃度や水分の実態（結露の頻度や量）は不明であり、かりに塩分を含む水が床版下面に生じ、毛細管現象によってひび割れを通して鉄筋まで達することがあれば、鉄筋の腐食は避けられない。床版下面の腐食例としては、海砂使用による鉄筋腐食や浸透による塩害の報告は見られるものの、塩分を含む結露水と毛細管現象による鉄筋の発錆やそれに基づく床版損傷の実態に関する明確な報告はなされていない。したがって、床版裏面のひび割れと毛細管現象による鉄筋腐食については、ここでは検討しないこととしたが、今後の課題といえる。

また、床版上面にひび割れが生じると、継続して浸水した状態が続くことが考えられ、凍結防止材の塩分が含まれることも予想され、ひび割れが生じた場合に、耐久性が損なわれる可能性がある。しかし、これらは防水層によって水の滲入を防ぐこととし、ここでの検討の対象外とした。

2.4.5 塩化物イオンによる鉄筋腐食（耐腐食性）

既存の設計基準（主に道示）において設計された、一般的な道路橋 RC 床版において、設計供用期間を 100 年とした場合の水セメント比（以下、 W/C ）と耐用年数の関係を検討する。このとき、 W/C は 35% ~ 65% 程度の範囲とした。また、パラメーターは環境条件（一般的な供用環境および塩害環境）、セメント種類（普通セメントおよび高炉セメント）、鋼材のかぶり（30mm、50mm および 70mm）とした。

30mm: 床版の最小かぶり

50mm: 塩害地域のかぶりとして道示に記載

70mm: 塩害地域のかぶりとして道示に記載

床版のかぶりとして 70mm は一般的とはいえないが、現行道示に「塩害の影響の度合いが激しい地域」等、特殊な環境下で耐用年数 100 年を確保するための塩害対策として記載されていることから、本検討でもパラメーターとして採用した。表-2.4.10 に塩害の影響による最小かぶり（平成 14 年版道路橋示方書²⁾より抜粋）を示す。

耐塩害特性については土木学会のコンクリート標準示方書等¹⁴⁾の鋼材位置の塩化物イオン濃度算出式をもとに、腐食発生限界塩化物イオン濃度 1.2 kg/m^3 とし、その濃度に達するまでの年数を耐用年数として算出した。

表-2.4.10 塩害の影響による最小かぶり
(平成14年版道路橋示方書²⁾より抜粋)

塩害の影響 の度合い	対策 区分	(1) 工場で製作さ れるプレスト ンクリート構造	(2) (1)以外のプレ ストンクリート 構造	(3) 鉄筋コンク リート構造
影響が激しい	S	70 ^{*1}		
影響を受ける	I	50	70	
	II	35	50	70
	III			50
影響を受けない		6.6.1「鋼材のかぶり」による		

^{*1} 塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

コンクリート中の鋼材腐食については、これまでに実橋や暴露試験体を対象とした種々の計測²¹⁾がなされている。それらによると、鋼材位置での塩化物イオン濃度が $1.2 \text{ kg/m}^3 \sim 2.5 \text{ kg/m}^3$ 程度で鋼材に腐食が発生した事例が多く、この塩化物イオン濃度の範囲が鋼材腐食を引き起こすグレーゾーンと考えられている。土木学会のコンクリート標準示方書等¹⁴⁾で腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2 kg/m^3 としていること等を考慮し、本試算における鋼材位置での腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2 kg/m^3 とした。

式(2.4.7)に鋼材位置の塩化物イオン濃度算出式を示す。

〈 鋼材位置の塩化物イオン濃度算出式 〉

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0.1 \cdot c}{2\sqrt{D_d \cdot t}} \right) \right) \quad (2.4.7)$$

ここに、

C_d : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値

γ_{cl} : 鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 C_d のばらつきを考慮した係数

C_0 : コンクリート表面における想定塩化物イオン濃度 (kg/m^3)

一般環境下 : 1.5 kg/m^3

塩害環境下 : 3.0 kg/m^3

$$\operatorname{erf}(s) = \frac{2}{\pi^{1/2}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

: 誤差関数

c : かぶりの期待値 (mm)

D_d : 塩化物イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)

t : 塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年)

図-2.4.11、図-2.4.12 および図-2.4.13 に耐用年数とかぶりの関係を示す。

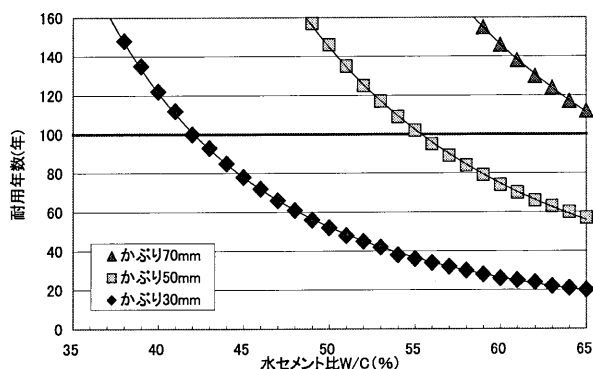


図-2.4.11 耐用年数とかぶり
(一般環境で普通セメント使用)

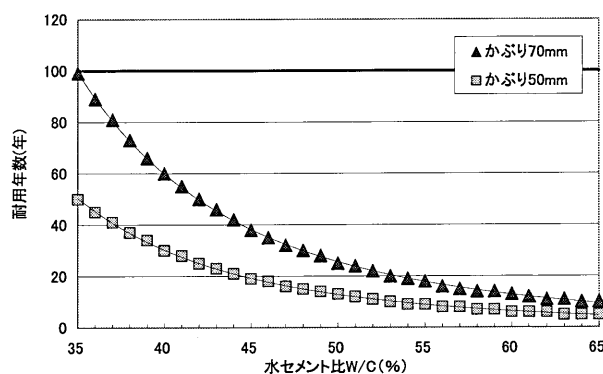


図-2.4.12 耐用年数とかぶり
(塩害環境で普通セメント使用)

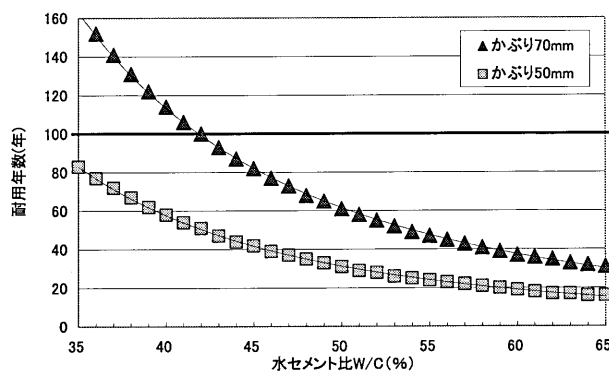


図-2.4.13 耐用年数とかぶり
(塩害環境で高炉セメント使用)

これらの検討により、以下のことがわかった。

1) 一般的な供用環境について

一般的な供用環境において W/C 一定で比較した場合、当然のことではあるが、かぶりが大きいほど耐用年数が長くなる。また、道路橋示方書の目標期間である 100 年に着目すると、かぶり 30mm の場合で W/C=42% 以下、かぶり 50mm の場合で W/C=55% 以下が要求される。ただし、これは便宜上、最少量の塩分飛来があると想定した場合のコンクリート表面における塩化物イオン濃度 (1.5 kg/m^3) により算出した結果である。実際は一般的な供用環境下での飛来塩分量は極めて 0 に近いことから、塩害に

対する耐用年数は十分に確保されると考えられる。また、一般的なプレストレストコンクリートを例にとると、設計基準強度 $\sigma_{sk}=40\text{N/mm}^2$ の場合、W/C=40%以下を用いている。このことから考えると、一般的な供用環境において耐用年数を十分に確保できると考えられる。

2) 塩害環境について

塩害環境において W/C 一定で比較した場合、一般的な供用環境と同様にかぶりが大きくなれば耐用年数が長くなる。耐用年数 100 年に着目すると、普通セメント使用でかぶり 70mm の場合は W/C=35%、耐腐食性能が高いとされる高炉セメント使用でかぶり 70mm の場合は W/C=42% のときに安全率 1.0 となる。

塩害環境では、普通セメント、高炉セメントともにかかなり低い W/C が要求される。W/C の低いコンクリートは一般に高強度であることから、塩害環境下では必然的に高強度コンクリートが要求されると考えられる。

3) セメント種類について

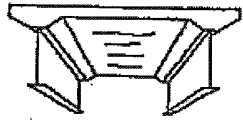
耐用年数 100 年に着目すると、かぶり 70mm の場合、普通セメントと比べて高炉セメントは W/C を 7% 程度高く設定できることがわかる。しかしながら、かぶり 50mm の場合において耐用年数 100 年を可能とするためには、高炉セメントを用いてもなお、W/C を低減することが要求される。

2.5 維持管理性

床版の設計時点における維持管理性は、維持管理を行う期間全般で想定される損傷に対する損傷メカニズムとそれらの発生部位を明らかにし、これに対応した維持管理計画を策定することによって、確保されるものである。

ここでは、一般的な RC 床版における維持管理性の照査事例として、損傷メカニズムと維持管理計画の留意点について検討する。

表-2.5.1 RC 床版の損傷メカニズムと評価・判定、対策工法

損傷メカニズム ²²⁾		ひび割れによる 評価・判定 ²⁴⁾	たわみによる 損傷度判定 ²³⁾	対策工法 ²⁵⁾
潜伏期	①版として挙動	 〔ひびわれ間隔と性状〕 ひびわれは主として 1 方向のみで、最小ひびわれ間隔が概ね 1.0m 以上 〔ひびわれ幅〕 最大ひびわれ幅が 0.05mm 以下 (ヘアークラック程度)	$\delta = \delta_o$ (D=0)	定期的な点検
	②並列梁状クラック	 〔ひびわれ間隔と性状〕 1.0m ~ 0.5m, 1 方向が主で直行方向は縦、かつ格子状でない 〔ひびわれ幅〕 0.1mm 以下が主であるが、一部に 0.1mm 以上も存在する		
進展期	③二方向曲げクラック	 〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m 程度、格子状直前のもの 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以下が主であるが、一部に 0.2mm 以上も存在する	$\delta_o < \delta \leq \delta_c$ (0 < d ≤ 1)	曲げ補強 (繊維シート接着, 下面増厚, 縦桁増設)
加速期	④貫通クラック	 〔ひびわれ間隔と性状〕 0.5m ~ 0.2m, 格子状に発生 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以上がかなり目立ち部分的な角落ちもみられる	↓ $\delta > \delta_c$ (D > 1)	曲げ・せん断補強 (上面増厚, 鋼板接着, アンダーデッキ, 及びこれらの併用)
	⑤摺り磨き発生	 〔ひびわれ間隔と性状〕 0.2m 以下, 格子状に発生 〔ひびわれ幅〕 0.2mm 以上が目立ち連続的な角落ちが生じている		
劣化期	⑥抜け落ち発生			床版打ち換え

δ : 床版支間中央に発生するたわみ

δ_o : 全断面のコンクリートを有効とみなした断面のたわみ

δ_c : 引張コンクリートを無視した断面のたわみ

D : 劣化度 = $(\delta - \delta_o) / (\delta_c - \delta_o)$

2.5.1 損傷部位と損傷メカニズム

維持管理計画の前提条件として、損傷メカニズムの把握が必要である。RC 床版の損傷段階は、既往の研究^{22)~25)}によれば、以下のように表現される。

(表-2.5.1 参照) これらの研究成果によれば、RC 床版の損傷として最も問題視されることは、活荷重による床版本体のひび割れ発生が、版の耐荷力そのものを低下させる現象であることがわかる。

＜RC 床版の損傷メカニズム＞

- ① 版として挙動する初期段階
- ② 乾燥収縮クラックの発生による並列梁状の段階
- ③ 活荷重により縦横の曲げクラックが交互に発生し、格子状に至るまでの段階
- ④ 下面から発生した格子状の曲げクラックが移動荷重の影響で上面まで貫通する段階
- ⑤ 貫通したクラックの破面同士が摺り磨き作用により平滑化されてせん断力を失う段階
- ⑥ 低下した押し抜きせん断強度を超える輪荷重により抜け落ちを生じる段階

なお、活荷重による版の損傷の他に、滞水による伸縮装置との接合部腐食や、地覆部・水切り部の剥離等の損傷も報告されており、これらについても維持管理計画においてフォローする必要がある。

2.5.2 点検計画の策定

床版の点検は、一般に日常点検、定期点検、詳細点検、臨時点検の4種類が実施されている。

表-2.5.1 に示すメカニズムの各段階において、それぞれの点検は以下のような位置付けとなる。
潜伏期：日常点検および定期点検を実施し、損傷メカニズムが進展していないことを確認する。必要に応じてひび割れの状況等を詳細に点検し、前回点検からの進展状況やその他状況を勘案して追跡調査や次回の定期点検予定を検討する。予防的措置として補修補強を検討する場合もある。

進展期：日常点検および定期点検の結果、格子状のクラックが発見された場合、直ちに詳細点検を実施し、適切な対策工法を検討。

加速期：日常点検および定期点検において、潜伏期または進展期の段階で適切な対応を取ることが望ましい。加速期以降においては、急激な劣化の進展による安全性の低下に注意し、直ちに対策が取れない場合は、継続的な点検（監視）を行う。

表-2.5.2 に、国土交通省等における橋梁点検要領における点検計画の概要を示す。

表-2.5.2 点検計画^{23),24)}

	実施期間	点検項目例	点検方法
日常点検	1 回/日 ～ 1 回/週 程度	舗装面異常、伸縮継手部異常、下面漏水・欠落	車両による路面走行、検査通路、橋梁下道路等を利用した目視
定期点検	1 回/数年 程度	日常点検項目の他、ひび割れ状況（幅・密度）、鉄筋腐食・露出状況、コンクリート強度調査	専門判定員により、検査通路や点検用装置を用いて、対象物に近接し、目視や道具を使用。
詳細点検	日常/定期点検で必要が生じた時	たわみ、ひび割れ深さ、配筋と鉄筋腐食状況の関係	下面の足場など必要な装置や道具を用いて実施。
臨時点検	災害等発生時（随時）	発生事象に応じて調査項目を設定。	定期点検及び詳細点検と同じ方法

点検の主な目的

日常点検	異常の有無確認。およびその耐荷力性と落下物等による第三者被害の判定。
定期点検	床版の荷重に対する耐荷力性と耐久性の評価・判定。
詳細点検	日常及び定期点検で異常が確認された場合、精度を高めて耐荷力性と耐久性を判定。
臨時点検	地震等の天災、荷物落下や衝突事故などの突発事象に対し、安全性を確認。

2.5.3 評価・判定手法

前述の定期点検および詳細点検を実施した場合、耐荷力性や耐久性に対して評価・判定を行う必要が生じる。評価・判定手法は、現在、各道路機関において設定されている²³⁾。国土交通省では、損傷判定項目としてひび割れ、剥離・鉄筋露出、漏水・遊離石灰、抜け落ち、の4つを設けているが²⁴⁾、ここでは、ひび割れに関する損傷区分を元に、表-2.5.1 に、損傷メカニズムごとの判定基準を示す。

なお、版の耐荷力・耐久性の判定基準として、ひび割れ性状の他に、漏水・遊離石灰の有無、たわみ値を用いた劣化度なども用いられているが、多くの道路機関では、ひび割れ幅やひび割れ密度による手法が一般的である。しかしながら、損傷が進行するとひび割れの進行が止まることも知られており、進行状況によっては別の判定指標を用いる事が必要となる場合もある。

2.5.4 対策工法の選択

補修等の対策工法は、損傷メカニズムに基づいて最も合理的な方法を選択する。

例えば RC 床版では、表-2.5.1 に示す床版の損傷メカニズムに基づき、対策工法を検討すると、②の状態に至る主たる原因はコンクリートの乾燥収縮であることから、遊離石灰が発生している場合を除き、一般に補修の必要はないことも多く、継続的な点検を必要とする段階であると考えられる。また、③の状態までであれば、大半のクラックが貫通していない、いわゆる曲げクラックであることから、下面からの曲げ補強が効果的である。（炭素繊維シート接着、下面鋼板接着等）一方、貫通クラックが進行した⑤の状態では、せん断強度の低下が始まっていると考えられ、上面増厚等のせん断補強が必要となる。さらに段階が進んだ⑥の状態では、一般には床版打ち換えなどの抜本的な対策が必要であると言える。

2.6 社会・環境適合性

2.6.1 環境適合性

(1) 環境適合性の照査項目

環境適合性の照査においては、設計供用期間を通して環境負荷を与える可能性のある要素を生じさせる全ての作用を設計作用として、その影響を評価する必要がある。

環境影響評価においては、これらの“環境に影響を与える可能性のある要素”は環境側面と定義され、「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）²⁶⁾」では考慮すべき環境側面および評価方法として表-2.6.1 のように示されている。

表-2.6.1 環境側面と評価方法

環境側面	評価方法
1) 温室効果ガス、大気汚染物質、資源・エネルギー、廃棄物	ライフサイクルアセスメント（LCA手法）
2) 水質・土壌汚染物質	原因物質の特定および試験・分析
3) 騒音・振動	直接的な測定または予測
4) その他	対象とする環境側面に応じて定める

道路橋床版の環境適合性照査においては、一般には、初期建設・維持管理・廃棄更新に伴って発生する、二酸化炭素をはじめとする各種温室効果ガスの排出量や大気汚染物質排出量、資源・エネルギーの消費、廃棄物の排出量などをLCA手法によって算定することが考えられる。

また、建設副産物や供用時に車両から排出される

物質などによる水質・土壌の汚染、建設時や供用時の車両走行に伴う騒音・振動の影響なども評価する必要があるといえる。

しかしながら、一般には建設事業全体に対してこれらの影響を評価する事例は増えつつあるが、設計時点において床版のみの環境適合性を検討した事例はほとんどなく、特に車両走行に起因する排出物に関しては、事業全体の中で床版がどの程度、直接寄与しているのかを定量的に評価することは困難であると言える。

そこで、本計算例では床版単体での算出が可能な項目に絞って、諸条件を仮定した上でLCA手法による環境影響評価を行い、床版形式や諸元の変化に対する環境影響の違いについて相対的に評価することを目的として検討することとする。

なお、表-2.6.1 の 1) に示す環境側面のうち、地球温暖化防止の観点から、現時点では、資源消費や廃棄物処理も含め、二酸化炭素排出量による評価を行うことが最も一般的である。従って、本計算例においても照査指標を床版のライフサイクルにおける二酸化炭素排出量（LCCO₂）とする。

(2) 算出における前提条件

一般に、製品製造のライフサイクルには、資源採取、素材製造、製品製造、流通、販売・購入、使用、廃棄の7つの段階が挙げられる²⁷⁾が、建設事業におけるライフサイクルは、下記に示すように、初期建設、維持管理、更新廃棄の3つに集約することができると考えられる。

- ① 初期建設：材料調達、輸送、製作・施工
- ② 維持管理：供用、点検・管理、補修
- ③ 更新廃棄：取壊し、輸送、廃棄・リサイクル

ここでは、供用時の車両走行に伴う排ガス等については、床版単体によるものではなく橋梁全体として評価すべきものであり、床版構造単体での環境負荷の増減は考えにくいことから省略する。同様に、点検等の維持管理に伴う環境負荷についても、床版単体での算出が困難なことから省略する。

補修や更新については、本来、橋梁本体の設計供用期間に対して維持管理計画を策定し、その実施有無を検討すべきものである。ここでの試算においては初期建設時以降、橋梁の設計供用期間を通して大掛かりな補修を行わずに健全な状態を保つと仮定し、補修・更新は想定しない。

使用材料については、リサイクルが可能なものや安定型産業廃棄物（性質が安定しており生活環境上の支障を及ぼすおそれが少ないもの）の使用を基本とし、材料処分にかかる環境負荷は想定しない。なお、鋼材については一部、リサイクルされるものとする。

二酸化炭素排出量を照査指標として用いる場合は、総務省が発行する産業連関表に基づいた統計データを元に環境負荷を算定する「産業連関分析法」と、排出要因ごとに細かく排出量を算出して積み上げる「積み上げ法」がよく用いられている。これらの二酸化炭素排出量に関する原単位については様々な検討がなされているが、ここでは既往の研究成果を基に、いくつかの原単位を用いて検討する。

(3) 二酸化炭素排出量の算出

表-2.6.2 に示す各床版に対し、ライフサイクルの各段階において二酸化炭素排出量を算出した。

床版の諸元および施工数量は、実際の施工事例に基づき、形式ごとに異なる設計条件のもとで設計された橋梁床版について検討する。

以下のその検討過程を示すとともに、使用した原単位を表-2.6.7 に、各段階における二酸化炭素排出量を表-2.6.10（本節末尾）に示す。

表-2.6.2 床版諸元

床版形式	R C床版	プレキャスト P C床版	鋼・コンクリート合成床版
橋長	120m	170m	120m
幅員	11m	16m	11m
橋面積	1338m	2635m	1338m

1) 初期建設

1-1) 材料調達

材料調達に起因する二酸化炭素排出量は、構成材料別の詳細なインベントリ分析を積み上げて生コンクリートや高炉鋼、電炉鋼の原単位を検討している事例は複数あるが^{26), 28), 29)}、計算の前提や着目方法が異なるために、検討事例ごとに原単位の値が異なっているのが現状である。

ここでは「コンクリート構造物の環境性能照査指針（試案）²⁶⁾」におけるインベントリ分析の原単位で検討した場合、鋼材はコンクリートと比べて、単位生産重量あたりの排出量が約 10 倍程度になっているため、高炉製鋼材を多く使用した床版形式では排出量が極めて大きな値となる。

なお、実際の使用材料には、型枠合板やゴム材料なども含まれるが、本検討においては、コンクリートおよび鋼材による影響が支配的であることから、これらに絞って算出している。

表-2.6.3 鋼材分類

分類	使用材料
高炉製鋼材	鋼板、PC 鋼材、合成床版の底鋼板
電炉製型鋼	鉄筋、型钢、鋼型枠

1-2) 輸送

各資材の輸送距離は、メーカーにて製作する部材および高炉鋼材については、製作会社の工場が現場から 300km 程度の位置とすると仮定した。また、現場施工に使用する電炉鋼材については、現地から最も近い鋼材取扱業者を想定し、現場から 50km を、生コンクリートについては、現地近辺に生コンプラントがあると想定して 10km をそれぞれの輸送距離とする。表-2.6.10 に示す結果より、重量の大きいコンクリート部材をプレキャスト化する場合に、負荷が増大することがわかる。

1-3) 製作・施工

建設に起因する二酸化炭素排出量は、使用する重機の燃料負荷をベースに算出する。なお、建設時は主要材料であるコンクリートおよび鋼材以外の製作・施工（付属物等）に要する消費エネルギーが大きくなると予想されるが、工種が複雑で算出が困難である上、床版形式によらず概ね共通であると考えられることから、床版の主部材部分のみの値として検討する。

表-2.6.4 輸送距離

材 料	輸送距離	適 用
生コン（工場）	300km	床版製作会社の工場
生コン（現場）	10km	現場近くの生コン工場
高炉鋼（工場）	300km	床版製作会社の工場
高炉鋼（現場）	300km	高炉鋼材取扱業者
電炉鋼（工場）	300km	床版製作会社の工場
電炉鋼（現場）	100km	現場近くの鋼材取扱業者
廃棄時	50km	現場近くの安定型処理場 またはリサイクル施設

既往のインベントリ分析⁶⁻¹⁾によるコンクリート構造物の製作に必要となる単位体積あたりの消費エネルギーを電力に換算した場合の消費電力、および、実際の製作事例における鋼材の加工（切断・溶接）必要となる単位重量あたりの消費エネルギーを電力に換算した場合の消費電力は表-2.6.5 の通りである。

表-2.6.5 製作施工における消費電力

分類	使用材料
R C施工	7.7 kWh/m ³
R C施工	3.7 kWh/m ³
鋼材加工	12.8 kWh/tf

2) 維持管理

(2)で述べたとおり、供用時の走行車両による排ガスの影響や、点検等における環境負荷については、これらが床版単体に起因せず、床版が直接寄与する割合が低いと考えられることや、床版の構造形式によって大きく変わらないと考えられることから、排

出量の算出を省略する。

なお、ここでは補修を前提としないため、補修による排出量を算出しないが、補修工法に合わせて、既存部位の取り壊しから新設部位の材料調達、輸送、施工などの各項目を別途算出する必要がある。

3) 更新・廃棄

ここでは橋梁全体と床版の設計供用期間が一致すると仮定し、更新は想定しないものとして、廃棄・更新に起因する二酸化炭素排出量を計算する。

3-1) 取壊し工

取り壊し工に起因する二酸化炭素排出量についても、製作・施工と同様に、使用する重機等の燃料負荷をベースに算出する。なお、対象とする工種も床版の主部材であるコンクリートおよび鋼材部分のみの値として検討する。

3-2) 輸送

廃棄時の輸送は、廃棄物の種類ごとに廃棄物処分場またはリサイクル施設等に搬送する必要があるが、ここでは、現地から 50km 程度のところにこれらの処分場および施設等が存在するものと仮定して算出する。

3-3) 廃棄・リサイクル

床版に使用する材料は主にコンクリート、鉄鋼などのリサイクルが可能なものや比較的管理の容易な処分場で処分することが可能な安定型産業廃棄物であるが、これらの処理を行うまでの過程でエネルギーを投入する必要がある。ここでは、これらを二酸化炭素量として換算する。なお、管理型処分場や遮断型処分場での処分が必要な材料を使用する場合には、別途考慮が必要である。

また、建設副産物は近年、高いリサイクル率で再利用されており、コンクリート塊は路盤の碎石等利用されるが、鋼材は再び加工されて電炉材等に再生される。従って、廃棄に際して鋼材は、新たな天然資源の消費を軽減できるとして、その重量の半程度程度の電炉材製造負荷を低減できると仮定する。

(3) 床版形式による環境負荷の比較

表-2.6.6 および図-2.6.1 に床版形式ごとのライフサイクルにおける二酸化炭素排出量（ $LC CO_2$ と呼ぶ）の集計結果を示す。

ここでは、プレキャスト PC 床版は打ち継ぎ部以外は工場製作、鋼・コンクリート合成床版は、鋼部材は工場製作、コンクリートは現場打ちとしている。

これらの比較検討は、実際の施工事例に基づく数量を用いた、橋梁支間や床版支間、上部工・下部工の構造など、設計条件の異なる床版に対する比較であり、一概に同レベルでの比較はできない。

しかしながら、これらの検討結果から、使用材料

の違いによる床版の LCA に関する一般論として、以下のようなことがわかる。

表-2.6.6 床版の $LC CO_2$ (合計)

単位 (kgC/m ²)	RC 床版	プレキャスト PC 床版	鋼・コンクリート合成床版
初期建設	材料調達	106.201	84.334
	建設輸送	1.408	24.258
	製作施工	0.672	0.514
維持管理			
更新廃棄	取壊し工	4.346	4.727
	更新輸送	3.975	4.339
	リサイクル	-19.933	-3.154
合計	96.668	115.017	173.554

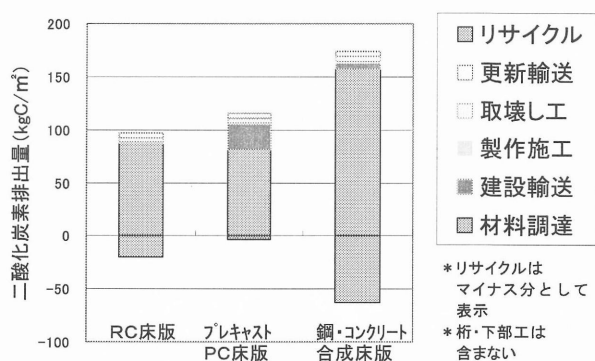


図-2.6.1 床版の $LC CO_2$ (合計)

鋼材の製作における二酸化炭素排出量は非常に大きいため、材料調達時点ではコンクリート系材料の方が環境負荷は少ないと言える。

特に高炉鋼材は負荷が大きく、型钢や鉄筋の利用を有効に利用した方が、環境負荷は少ない。

しかしながら、重量物であるコンクリートは輸送に際しての環境負荷が大きいため、特にプレキャスト部材など、工場と現場の距離が離れている場合には、環境負荷が大きくなる。

ライフサイクル全般を通して考えると、材料調達時の負荷が支配的であるが、大規模な補修や更新を想定する場合は注意が必要である。

なお、現在、高速道路整備計画において施工命令が出されている道路の未整備区間、約 2000km のうち、15%が幅員 20m の橋梁であると仮定すると、この橋梁が全て同じ床版形式で整備された場合には、環境負荷の大きい床版と小さい床版の差（約 50kgC/m²）は 0.3MtC 程度となる。これは、1999 年における日本の年間総排出量（320MtC）の約 0.1% にあたり、道路建設にかかる総排出量（国内総排出量の 2.4%）に対しては、約 3.9%に相当する³⁰⁾。

表-2.6.7 LCCO₂の原単位

ライフサイクル	工種	単位	原単位
初期建設	材料調達	生コンクリート	kgC/m ³ 250.1
		鋼材：高炉鋼	kgC/kg 1.322
		鋼材：電炉鋼	kgC/kg 0.767
	建設輸送	運輸	kgC/t・km 0.122
	製作施工	PCの施工	kWh/m ³ 7.7
		RCの施工	kWh/m ³ 3.7
		鋼材の加工	kWh/t 12.8
		消費電力換算	kgC/kWh 0.407
更新廃棄	取壊し工	PC/RC (地上で解体)	kgC/m ³ 15.6
		鉄骨造軸組み	kgC/t 7.00
	更新輸送	運輸	kgC/t・km 0.122
	リサイクル	Ⅲ種再生粗骨材 (現場外処理)	kgC/t 2.45
		安定型処分場	kgC/t 1.64

斜体字は加工実績による推定値，他は文献6-1)による

(4) LCCO₂の算定原単位の比較

LCCO₂の算定に使用する原単位は，様々な方法で試算されているが，一般にコンセンサスを得た値はなく，絶対的な数値としてのLCCO₂を把握する事は現時点では困難である。

ここでは，これらの中から最も差が大きく影響度の高い材料調達に関する原単位について，表-2.6.8に示す原単位表をもとに，①コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)⁶⁻¹⁾，②土木学会・LCA小委員会推奨値⁶⁻⁴⁾，②日本建築学会・地球環境建築特別研究委員会報告⁶⁻³⁾，③国土開発技術センター・建築委員会報告書⁶⁻³⁾における値の比較を行った。結果を表-2.6.9および図-2.6.2に示す。

表-2.6.8 原単位の比較 (材料調達)

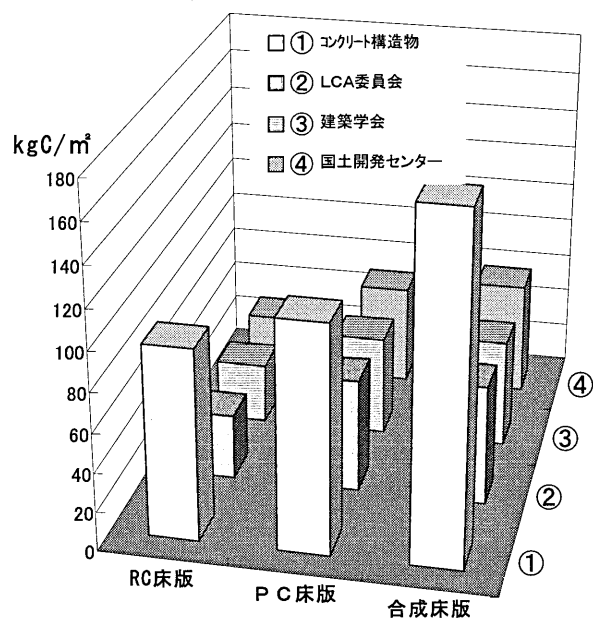
分類項目	単位	①コンクリート構造物	②LCA委員会	③建築学会	④国土開発センター
生コンクリート	kgC/m ³	250.1	84.9	60.4	60.4
鋼材：高炉鋼	kgC/kg	1.322	0.411	0.355	0.436
鋼材：電炉鋼	kgC/kg	0.767	0.128	0.254	0.189

* 斜体字はデータがないため他を準用

表-2.6.9 原単位の違いによるLCCO₂の比較

	RC床版	プレキャストPC床版	鋼・コンクリート合成床版
①コンクリート構造物	96.668	115.017	173.554
②LCA委員会	32.983	57.389	60.716
③建築学会	30.285	50.823	54.550
④国土開発センター	28.472	50.476	57.888

表-2.6.9 および図-2.6.2より，原単位の算出方法によって数値間に差があり，特に「①コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」においては全般に原単位が大きくなっている。これは，この文献においては可能な限りの要因や工種を取り込んで積み上げ法により原単位を算出しているためであり，他の文献より詳細な検討がなされているといえるが，本試算全体の精度から考えると考慮した要素としていない要素で評価に差が出てしまうことも懸念される。

図-2.6.2 原単位の違いによるLCCO₂の比較 (桁・下部工は含まず)

一方，床版形式ごとの比較においては相対的な大小関係の順位にはあまり影響しないが，鋼材に対しては「①コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案)」による原単位が極めて大きいため，結果的に鋼・コンクリート合成床版の排出量が他の1.5倍以上となっている。これは，この文献においては主にコンクリート構造物を対象とした検討であり，鋼材については鉄筋やPC鋼材を念頭においた値であるためと考えられる。

従って現時点では、原単位について一般に十分なコンセンサスを得られるような値が存在しているとはいえず、これらのLCCO₂評価結果は、絶対値としての評価より、何か一つの条件を変えた場合に二酸化炭素排出量にどのような影響を与えるのかを比較検討するなどの目的に用いることが妥当であると考えられる。

(5) 道路橋示方書による床版のLCCO₂比較

一般的な道路橋床版において、諸元による環境影響の違いがどの程度であるかを比較するため、既存の現行の道路橋示方書によって設計されたRC床版とPC床版について、LCCO₂の試算を行う。

検討モデルは、支間割 53m+53m、橋梁総幅員 14.0mとし、床版支間(主桁本数)を以下の3種類とした。

- ① 床版支間 2.0m (主桁本数 7 本), 張出し 1.0m
- ② 床版支間 3.0m (主桁本数 4 本), 張出し 1.0m
- ③ 床版支間 6.0m (主桁本数 3 本), 張出し 1.0m

これら3種の検討モデルに対し、各々、現行道示に則って場所打ちRC床版を設計した場合と場所打ちPC床版を設計した場合を想定し、計6種類についてLCCO₂の算出を行った。

なお、二酸化炭素排出量算出に用いる原単位には、土木学会 LCA 小委員会提案の値²⁹⁾を用いて検討を行っている。

表-2.6.9 および図-2.6.3 にLCCO₂と床版支間の関係を示す。また、図-2.6.4 に各検討モデルの内訳を示す。

表-2.6.9 LCCO₂と床版支間(kgC/m³)

床版支間 (m) (主桁本数)		LCA(単位面積あたりのCO ₂ 量)									
		材料調達				輸送	建設	維持管理	廃棄	合計	
		Con	鉄筋・鋼材	合板型枠	合計						
RC 床版	2	[7]	18.68	20.52	0.24	39.44	0.72	7.94	-	10.08	58.18
	4	[4]	24.62	30.25	0.24	55.11	0.98	11.09	-	13.93	81.11
	6	[3]	31.41	36.43	0.25	68.09	1.23	13.70	-	17.30	100.32
PC 床版	2	[7]	13.58	28.47	0.24	42.29	0.68	8.49	-	10.18	61.64
	4	[4]	17.83	29.32	0.24	47.39	0.80	9.52	-	11.66	69.37
	6	[3]	22.92	35.36	0.24	58.53	1.00	11.76	-	14.48	85.77

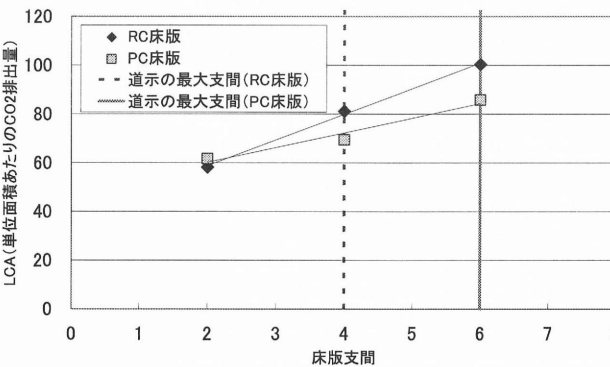


図-2.6.3 LCCO₂と床版支間(kgC/m³)

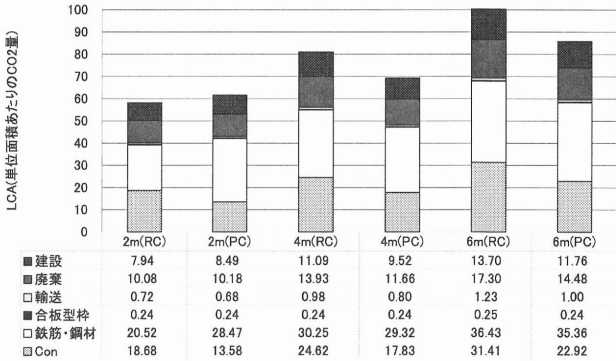


表-2.6.4 各検討モデルにおける内訳

表-2.6.8 より、割合としては初期建設時の材料調達に関わって発生する二酸化炭素、とりわけ、鉄筋・鋼材を調達する際に発生する値が大きいことがわかる。LCCO₂の観点で比較する場合、床版支間が長くなるにつれ、PC床版のほうがRC床版よりも有利になる傾向があるが、これは、床版支間が長くなるにつれて必然的にRC床版の鉄筋量が増えることに起因するためと考えられる。

(6) まとめ

ライフサイクルにおける二酸化炭素排出量(LCCO₂)を原単位により推定する方法は、産業連関表や既往の研究成果の利用により、理解し易く定量的な評価を容易に行える手法であり、床版の環境負荷評価に有効な照査方法であるといえる。

しかしながら、本来、床版形式は橋梁の立地条件を勘案して決定される橋長、橋梁支間、上下部工形式などを前提として選択されるものである。例えば鋼材を多く使用する床版形式においては、地形や交差物件などの支配的な条件があり長支間が要求される場合や、軟弱地盤上であるため上部工の軽量化が必要な場合など、橋梁全体として捉えたとき、その形式を採用することで結果的に全体の環境負荷の低減が実現されている可能性が高く、単なる床版形式ごとの比較ではその点が表現されないために注意が必要である。

また、本検討では補修を必要としない期間での比較を前提としたため、一般に他の形式に比べて耐用年数が短いとされているRC床版についても、補修や更新を考慮していない。従って、環境負荷が最も少ないRC床版であっても、実際の設計供用期間と床版の耐用年数を比較し、補修や更新を考慮する場合には、耐用年数の長い他の床版形式の方が、ライフサイクルを通しての環境負荷が小さくなる可能性があるため、この点にも注意が必要である。

表-2.6.10 床版の各段階における二酸化炭素排出量（集計）

構造形式	RC床版	プレキャストPC床版 (工場製作)	鋼(工場製作)+ コンクリ(現場打ち) 合成床版
橋長	81.00 m	170.00 m	119.50 m
幅員	16.36 m	15.50 m	11.20 m
橋面積	1324.76 m ²	2635.00 m ²	1338.40 m ²
数量			
生コン(工場)	m ³	730.54 m ³	0.00 m ³
生コン(現場)	335.90 m ³	52.82 m ³	314.52 m ³
高炉鋼(工場)	t	1.12 t	80.30 t
高炉鋼(現場)	t	0.07 t	0.00 t
電炉鋼(工場)	t	20.36 t	83.52 t
電炉鋼(現場)	73.90 t	11.88 t	59.49 t
1. 初期建設			
1-1 材料調達による二酸化炭素排出量(橋面積あたり kgC/m ²)			
生コン(工場)	0.00 kgC/m ²	69.34 kgC/m ²	0.00 kgC/m ²
生コン(現場)	63.41 kgC/m ²	5.01 kgC/m ²	58.77 kgC/m ²
高炉鋼(工場)	0.00 kgC/m ²	0.56 kgC/m ²	79.32 kgC/m ²
高炉鋼(現場)	0.00 kgC/m ²	0.04 kgC/m ²	0.00 kgC/m ²
電炉鋼(工場)	0.00 kgC/m ²	5.93 kgC/m ²	47.86 kgC/m ²
電炉鋼(現場)	42.79 kgC/m ²	3.46 kgC/m ²	34.09 kgC/m ²
LCA合計	106.20 kgC/m ²	84.33 kgC/m ²	220.05 kgC/m ²
1-2 輸送による二酸化炭素排出量(橋面積あたり kgC/m ²)			
生コン(工場)	0.00 kgC/m ²	23.85 kgC/m ²	0.00 kgC/m ²
生コン(現場)	0.73 kgC/m ²	0.06 kgC/m ²	0.67 kgC/m ²
高炉鋼(工場)	0.00 kgC/m ²	0.02 kgC/m ²	2.20 kgC/m ²
高炉鋼(現場)	0.00 kgC/m ²	0.00 kgC/m ²	0.00 kgC/m ²
電炉鋼(工場)	0.00 kgC/m ²	0.28 kgC/m ²	2.28 kgC/m ²
電炉鋼(現場)	0.68 kgC/m ²	0.06 kgC/m ²	0.54 kgC/m ²
LCA合計	1.41 kgC/m ²	24.26 kgC/m ²	5.70 kgC/m ²
1-3 製作時の使用電力量による二酸化炭素排出量(橋面積あたり kgC/m ²)			
PC/RC製作	0.38 kgC/m ²	0.45 kgC/m ²	0.35 kgC/m ²
鋼加工	0.29 kgC/m ²	0.07 kgC/m ²	0.87 kgC/m ²
LCA合計	0.67 kgC/m ²	0.51 kgC/m ²	1.22 kgC/m ²
1. 初期建設合計			
	108.28 kgC/m ²	109.11 kgC/m ²	226.97 kgC/m ²
3. 更新廃棄			
3-1 解体工事による二酸化炭素排出量(橋面積あたり kgC/m ²)			
PC/RC製作	3.96 kgC/m ²	4.64 kgC/m ²	3.67 kgC/m ²
鋼加工	0.39 kgC/m ²	0.09 kgC/m ²	1.17 kgC/m ²
LCA合計	4.35 kgC/m ²	4.73 kgC/m ²	4.83 kgC/m ²
3-2 輸送			
総重量	863.27 t	1874.33 t	962.45 t
輸送距離	50.00 km	50.00 km	50.00 km
LCA合計	3.98 kgC/m ²	4.34 kgC/m ²	4.39 kgC/m ²
3-3 リサイクルによる二酸化炭素排出量削減(橋面積あたり kgC/m ²)			
コンクリート処理	1.46 t/m ²	1.71 t/m ²	1.35 t/m ²
電炉鋼再生	-21.39 kgC/t	-4.87 kgC/t	-63.99 kgC/t
LCA合計	-19.93 kgC/m ²	-3.15 kgC/m ²	-62.64 kgC/m ²
3. 更新廃棄合計			
	-11.61 kgC/m ²	5.91 kgC/m ²	-53.41 kgC/m ²
LCA合計	96.67 kgC/m ²	115.02 kgC/m ²	173.55 kgC/m ²

2.6.2 経済的合理性

経済的合理性は一般にライフサイクルコストによって評価されるが、RC床版では2.5に示す維持管理計画をどのように捕らえるかによってライフサイクルコストに大きな影響がでる。

例えば、橋梁の設計供用期間100年に対し、床版の全ての部材、材料についての耐久性を100年として設計すると、橋梁の供用中には床版の補修や打ち換えを必要とせず、初期建設費用と廃棄費用以外には、点検費用のみを考慮すればよい事となる。

一方、橋梁の設計供用期間100年に対し、例えば、床版の押し抜きせん断疲労耐久性の耐用年数が70年程度の場合そのままでは打ち換えが必要となり、補修可能な段階（例えば格子状クラック発生時点）で曲げ補強を実施し、延命措置をはかるケースと比較して、どちらがライフサイクルコストの低減に繋がるかを検討する必要がある。

さらに、床版の全ての部材、材料についての耐久性を100年として設計し、補修や打ち換えを必要としない場合であっても、地震や衝突などの突発的事象や、材料強度や施工精度の不確実性が極めて大きく耐久性の低下が過度に進んでしまうような事象（これらをハザードと呼ぶ）に対する危険性（リスク）を考慮した場合、必ずしもライフサイクルコストの最適値となるとは限らない。

したがって、経済的合理性の照査には社会全体への影響を含めたリスクを踏まえ、ライフサイクルコストを適性に見極めることが必要となっていくものと考えられる。

2.7 まとめ

床版支間2.6mの床版に対しては、性能照査型設計においても従来と概ね同等の諸元（版厚240mm）のRC床版となる。ただし、耐久性の面では、耐疲労性の鉄筋単体で照査や、耐腐食性のひび割れ幅など、クリティカルになる可能性の高い照査項目もあり、疲労照査に用いる重交通荷重や腐食の照査に用いる環境作用の設定には注意を要する。

なお、参考値として算出した床版支間6.0mの床版については、従来の活荷重による曲げモーメント式（安全性）を主体とした諸元では主桁作用や使用性、耐久性が十分に確保できない可能性もあるため、長支間のRC床版を設計する場合にはこれらの性能にも着目した設計が不可欠であるといえる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002.3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 III コンクリート橋編，2002.3
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能

照査編]，2002

- 4) 長山秀昭・新谷卓也・川畑篤敬・柳原則行：主桁たわみを考慮した長支間PC床版の断面力に関する解析検討，土木学会第52回年次学術講演会，1997.
- 5) 土木学会：構造工学公式集（昭和61年版），pp371-373，1986.
- 6) 山田伸志，小坂敏文，中沢清人：橋梁振動の低減に関する考察，騒音振動，VOL2，N05，pp22-25，1978
- 7) 清水和男，落合博明：橋梁振動と低周波音の測定，騒音振動，VOL6，No6，pp15-18，1982
- 8) 梶川康男：橋梁交通振動と環境対策の現状，プレストレストコンクリート Vol145，No4，pp37-42，2003
- 9) 村井逸朗：道路事業と低周波音，騒音制御，Vol123，No5，pp319-323，1999
- 10) 内田英夫，栗田秀實：中央高速道西宮線阿知川橋からの低周波空気振動と騒音・振動，長野県衛公研報告，Vol11，pp80-91，1979
- 11) 石井皓，樋口茂生，水上雅義，根木輝久，松島景一，真船洋：習志野市谷津の京葉道路周辺の低周波空気振動，千葉県公害研究所研究報告，第13巻，第1号，pp1-7，1981.7
- 12) 山家祥三：低周波空気振動に関する調査一音圧実態調査及び家屋に対する影響，日本道路公団試験所報告，pp311-323，1977.12
- 13) 日本道路協会：道路土工一排水工指針，1987
- 14) 土木学会：コンクリート標準示方書[施工編]，2002
- 15) 藤原実，岩崎泰彦，田中良樹：限界状態設計法における設計活荷重に関する検討II，土木研究所資料第2700号，1988.1
- 16) 国土交通省国土技術政策総合研究所 道路構造物管理研究室：道路橋の設計自動車荷重に関する試験調査報告書一全国活荷重実態調査一，国総研資料第295号，2006.
- 17) 川畑篤敬，秋元礼子：RC床版の疲労耐久性評価方法の提案，第四回道路橋床版床版シンポジウム，2004.11
- 18) 渡海大輔・松井繁之・大西弘志：橋軸直角方向PC床版の疲労特性と耐久性，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp.113-118，1998.
- 19) 阪神高速道路公団：道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性，1991.
- 20) 土木学会，昭和61年制定，コンクリート標準示方書 設計編，pp.77-78，1986.
- 21) 建設省・（財）国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト コンクリートの耐久性向上技術の開発 報告書，1988.
- 22) 松井繁之，大田孝二，西川和廣：RC床版とそ

- の損傷, 橋梁と基礎 98-5, pp49-53, 建設図書, 1998 年 5 月
- 23) (社)土木学会鋼構造委員会 道路橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, 維持管理分科会報告書, 2004 年 11 月
- 24) 国土交通省: 橋梁点検要領(案), 2003 年 4 月
- 25) (社)土木学会鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会: 道路橋床版の新技术と性能照査型設計, 第一分科会報告書, pp54, 2000 年 10 月
- 26) 土木学会: コンクリート構造物の環境性能照査指針(試案), コンクリートライブラリ 125, 2005. 11
- 27) 文部科学省 科学技術・学術審議会技術士分科会: 技術士制度における総合技術監理部門の技術体系(第2版), 2004. 1
- 28) 酒井寛二: 土木建設物の二酸化炭素排出量原単位の推定, 第4回地球環境シンポジウム講演集 1996. 7, pp43-pp48
- 29) 土木学会地球環境委員会 LCA 小委員会: 土木建設業における環境負荷評価研究小委員会報告書, 1996.
- 30) 森口祐一, 近藤美則, 清水浩, 石谷久: 自動車による CO2 排出のライフサイクル分析, 第9回エネルギーシステム・経済コンファレンス講演論文集, 1993. 1, pp411-pp416

第3章 PC床版

3.1 概要

プレストレストコンクリート床版（以下PC床版）は、コンクリートにPC鋼材を配置し、プレストレスを導入することにより板の耐久性を高めた床版形式である。PC床版には、場所打ちPC床版とプレキャストPC床版がある。床版の橋軸方向および直角方向にプレストレスを導入し、それぞれの方向の応力をコントロールできる。プレキャストPC床版は、建設コスト縮減、周辺環境への配慮から、現場施工の省力化を目的として開発されたものであるが、近年、高い耐荷力および疲労耐久性が確認され、鋼2主げた橋、鋼少数主げた橋、鋼開断面箱げた橋などに積極的に採用されるに至っている。

プレキャストPC床版は、製品管理の徹底されている工場で製作された製品であり、品質の信用性が高く高耐久性に優れた床版である。図-3.1の概念図に示すように、主桁上に橋軸方向に並べて架設され、橋軸方向の場所打ち床版部の間詰部に配置されたループ継手筋により接合される。場所打ち床版と比べてコンクリートのクリープ・乾燥収縮に対する拘束の影響が小さく、現場施工での床版支間方向の緊張がないため、プレストレスによる二次力が発生しない特徴がある。

PC床版の設計計算例は、床版支間長が6mの場合について試設計を行うものとする。

PC床版の試設計のフローチャートは図-3.2に示すとおりである。なお、試設計の初期条件として、場所打ち床版については、定着部の縁端距離を確保した場合の床版厚を、また、プレキャスト床版に関しては文献1)において規格化されているJIS A 5373²⁰⁰⁴のPC床版の支間6mでの床版厚を採用し各要求性能項目を照査した。

3.2 安全性

PC床版の安全性の照査を行う。まず、初期条件として想定した床版厚に対して、場所打ち床版におけるコンクリートの施工安全性の照査を行う。

場所打ち床版は、架設現場においてコンクリートを打設することから、品質管理のゆきとどいたプレキャスト床版に比較して、コンクリート打設時においてコンクリートが十分にゆきわたることを確認する必要がある。表-3.1に示す照査の結果から、文献2)において最小あきとして規定されている40mm以上かつ粗骨材の最大寸法の4/3倍以上の規定を、床版厚が250mmの場合、鋼材と鋼材のあきが確保できない。後述するが、部材の安全性の照査によって決まった床版厚については、あきを満足していることが確認できる。本例の鋼材配置の場合の、場所打ち床版において、あきを確保できる最小床版厚は260mmとなる。

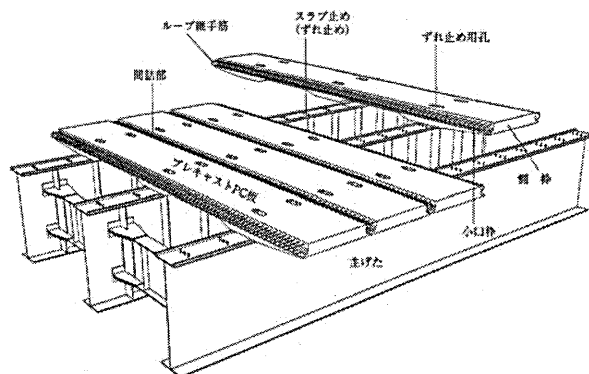


図-3.1 プレキャストPC床版の概念図

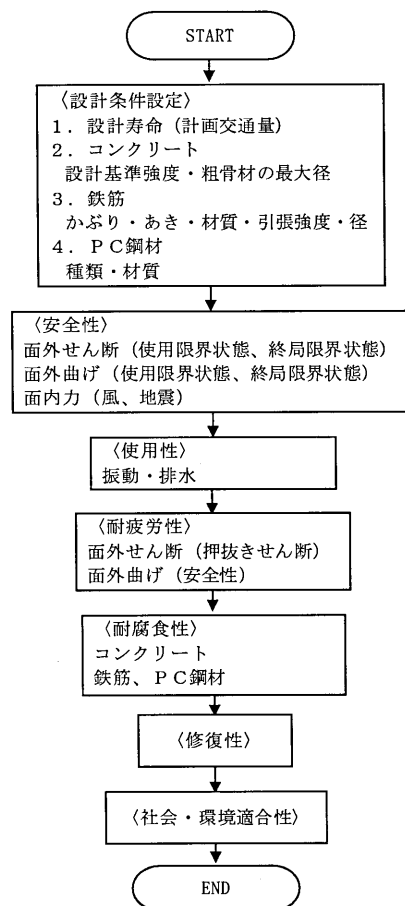


図-3.2 PC床版の性能照査設計フローチャート

表-3.1 鉄筋のあきの照査

	単位	場所打ち床版	プレキャスト床版
床版厚		250	320
上縁かぶり		35	30
下縁かぶり		35	35
主方向鉄筋直径		D13	D13
上配力方向鉄筋		D16	D22
下配力方向鉄筋		D22	D22
シース・鋼材		45	16
シースと鋼材・鋼材 どうしのあき		35.5	45.6
粗骨材の最大寸法の 4/3倍かつ40mm以上		40	40
判定		NG	OK

次に、部材の安全性の照査を行う。照査の方法は、設計断面力に対してP C床版の各部位に発生する応力度が所定の強度以下であることを確認する。

設計断面力の一覧表を表-3.2 に示す。活荷重による設計曲げモーメントは、文献3) において提示されている値をフレーム計算により算出した死荷重断面力から差し引いて算出した。

構造諸元の一覧表を表-3.3.1、表-3.3.2、表-3.4 に示す。床版厚は、安全性の照査が満足できる厚さまで増厚した床版厚を載せている。主方向の鉄筋は、上下ともにD13を150mm間隔に配置している。配力鉄筋方向は、場所打ち床版では、上側にD16を250mm、下側にはD22を125mm、プレキャスト床版では、上下にD22を125mm間隔で配置している。なお、P C鋼材配置本数は安全性の照査でコンクリート下縁の引張応力度が -1.0N/mm^2 以下となるように決定している。

安全性の照査結果を表-3.5 に示す。場所打ち床版およびプレキャスト床版の床版厚は支間6mの道路橋示方書により設計したRC床版厚の約8割程度の床版厚となった。

表-3.2 設計断面力一覧表

床版支間		6m		
床版種類		場所打ちP C床版	プレキャストP C床版	
床版厚		330mm	340mm	
活荷重による設計曲げモーメント(*1)	主鉄筋方向	100kN	81.969	81.969
		150kN	128.920	128.920
	配力鉄筋方向	100kN	55.447	55.344
		150kN	75.047	74.944
死荷重による設計曲げモーメント(*2)	主鉄筋方向	100kN	23.718	24.337
		150kN	23.718	24.337
	配力鉄筋方向	100kN	3.953	4.056
		150kN	3.953	4.056

(*1)：文献3)における断面力は死荷重と活荷重断面力の合計であり、死荷重断面力は床版厚によって異なる。それぞれFEM解析時の床版厚、100kN満載時では床版厚230mm、150kNタンデムでは床版厚310mmでの死荷重断面力を算出し、死活荷重断面力から差し引くことにより活荷重断面力を算出した。

(*2)：橋軸直角方向の死荷重断面力の1/6とした²⁾。

表-3.3.1 場所打ちP C床版の構造諸元一覧表

場所打ちP C床版		
最小床版厚	安全性の照査により床版厚を決定する。 *ただし、道示で示されている最小床版厚は、以下となる。 (30×L+110)×0.9=30×6.0×0.9=270mm	
コンクリート	設計基準強度	$\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$
上側鉄筋	主鉄筋方向	D13@150mm(橋軸直角方向)
	配力鉄筋方向	D16@250mm(橋軸方向)
下側鉄筋	主鉄筋方向	D13@150mm(橋軸直角方向)
	配力鉄筋方向	D22@125mm(橋軸方向)
P C鋼材	橋軸直角方向	1S28.6@450mm
	橋軸方向	RC

表-3.3.2 プレキャストP C床版の構造諸元一覧表

プレキャストP C床版		
最小床版厚	安全性の照査により床版厚を決定する。 *ただし、JISに規定されている床版厚は、以下となる。 (40×L+110)×0.9=320mm (2主げた用)	
コンクリート	設計基準強度	$\sigma_{ck}=50\text{N/mm}^2$
上側鉄筋	主鉄筋方向	D13@150mm(橋軸直角方向)
	配力鉄筋方向	D22@125mm(橋軸方向)
下側鉄筋	主鉄筋方向	D13@150mm(橋軸直角方向)
	配力鉄筋方向	D22@125mm(橋軸方向)
P C鋼材	橋軸直角方向	1S15.2×34本 (10本×1段+12本×2段/枚)
	橋軸方向	RC

表-3.4 P C床版の断面図

床版種別	場所打ちP C床版
床版厚	330mm
主鉄筋方向	
配力鉄筋方向	
床版種別	プレキャストP C床版
床版厚	340mm
主鉄筋方向	
配力鉄筋方向	

表-3.5 応力計算結果

場所打ちPC床版			d=330mm		強度
			100kN	150kN	
主鉄筋方向 (橋軸直角方向)	コンクリート	上縁	4.5	7.1	<20.0 N/mm ² (*)1)
		下縁	1.9	-0.7	<-1.0 N/mm ² (*)2)
配力鉄筋方向 (橋軸方向)	コンクリート	上縁	5.7	7.6	<20.0 N/mm ²
	鉄筋	下側	79.2	105.3	<175.0 N/mm ² (*)3)

※強度算出時の部分係数

【材料係数： $\gamma_m = 1.1$ (鉄筋)， $\gamma_m = 1.3$ (コンクリート)，部材係数： $\gamma_b = 1.5$ 】

(*)1) $f'_{ck} / \gamma_m / \gamma_b = 40 / 1.3 / 1.5 = 20 \text{ N/mm}^2$

(*)2) $f_{tk} / \gamma_m / \gamma_b = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} = 0.23 \times 40^{2/3} / 1.3 / 1.5 = 1.0 \text{ N/mm}^2$

(*)3) 鉄筋はSD295を使用するものとし， $f_y / \gamma_m / \gamma_b = 295 / 1.1 / 1.5 = 175 \text{ N/mm}^2$

プレキャストPC床版			d=340mm		強度
			100kN	150kN	
主鉄筋方向 (橋軸直角方向)	コンクリート	上縁	12.1	14.5	<25.0 N/mm ² (*)4)
		下縁	1.7	-0.83	<-1.5 N/mm ² (*)5)
配力鉄筋方向 (橋軸方向)	コンクリート	上縁	5.8	8.6	<25.0 N/mm ²
	鉄筋	下側	78.9	105.0	<175.0 N/mm ²

(*)4) $f'_{ck} / \gamma_m / \gamma_b = 50 / 1.3 / 1.5 = 25 \text{ N/mm}^2$

(*)5) $f_{tk} / \gamma_m / \gamma_b = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} = 0.23 \times 50^{2/3} / 1.3 / 1.5 = 1.5 \text{ N/mm}^2$

3.3 使用性

次に、P C床版の使用性の照査を行う。照査する項目としては、P C床版の振動特性、橋面排水に関する照査について検討を行う。

3.3.1 P C床版の振動特性

一般に、トラックのバネ下振動数が10Hz 前後であることに起因して、床版単体の固有振動数がこの程度の値である場合に低周波被害の発生する可能性が高いと考えられる。P C床版がこの振動と共振しないことを照査するために、文献4) に示される方法により算出した床版支間と固有振動数の関係を図-3.3 に示す。床版支間6m の場合の固有振動数を表-3.6 に示すが、10Hz を上回っていることが確認できる。

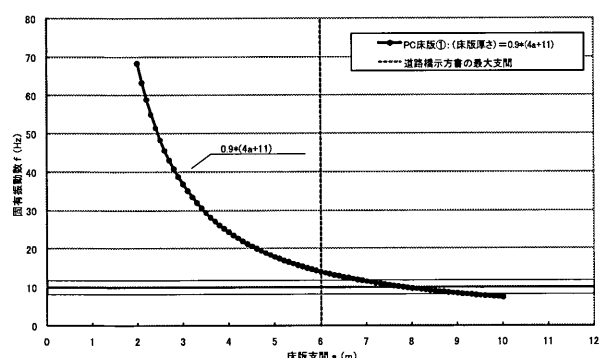


図-3.3 合成床版の固有振動数と床版支間の関係

表-3.6 P C床版の固有振動数

床版支間	L=6.0m	
固有振動数	14.0Hz	>10Hz

3.3.2 橋面排水に関する照査

P C床版の橋面排水に関する照査は、R C床版と同様であると考えられる。

3.4 耐久性

P C床版の耐疲労性については、押抜きせん断疲労による照査、鉄筋の疲労照査、P C鋼材の疲労照査が必要であると考えられる。

3.4.1 押抜きせん断疲労

押抜きせん断による耐疲労性の照査方法は、文献5) にもとづき実施する。具体的には、以下に示す式(3.1) によりP C床版の押抜きせん断強度を計算し、載荷荷重を押抜きせん断強度により除した無次元量を式(3.2) に代入して繰返し回数を求め、計画交通量から疲労寿命を算出した。

$$P_{sx} = 2B(\tau_{smax} \cdot x_m \cdot \alpha_m + \sigma_{tmax} \cdot c_m) \quad (3.1)$$

$$B = b + 2 \cdot d_d$$

$$\tau_{smax} = 2.214\sigma_{ck}^{0.553}$$

$$\alpha_m = 1/\tan \theta$$

$$\theta = 1/2 \times \tan^{-1}(2\tau_{cr}/\sigma_{pe})$$

$$\sigma_{tmax} = 0.583(\sigma_{ck})^{2/3}$$

ここで、 P_{sx} : 貫通ひび割れ発生後の押抜きせん断強度(kN)

B : 疲労に対する床版の有効幅(mm)

b : 配力鉄筋方向の載荷板の辺長(mm)

d_d : 配力鉄筋の有効高さ(mm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断応力度(N/mm²)

x_m : 主鉄筋断面の中立軸位置(mm)

α_m : 橋軸直角方向プレストレスによるせん断破壊面の傾きの逆数

σ_{tmax} : コンクリートの最大引張応力度(N/mm²)

c_m : 主鉄筋断面のかぶり(N/mm²)

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.52 \quad (3.2)$$

ここで、 P : 載荷荷重(kN)

N : 繰返し回数

押抜きせん断による床版厚の算出結果を表-3.7 に示す。計算の結果、耐久年数は疲労耐久性を十分に満足する結果となった。

表-3.7 押抜きせん断疲労による照査

			場所打ち床版	プレキャスト床版
床版厚 ^{(*)1}	d	mm	330	340
P C鋼材の種別	-	-	1S28.6	1S15.2
PC鋼材配置間隔	-	mm	@450 ^{(*)2}	@140 ^{(*)2}
配力鉄筋の有効高さ	d_d	mm	59	59
設計基準強度	σ_{ck}	N/mm ²	40	50
コンクリートの最大せん断応力度	τ_{smax}	N/mm ²	6.030	6.822
コンクリートの最大引張応力度	σ_{tmax}	N/mm ²	3.144	3.649
主鉄筋断面の中立軸深さ ^{(*)3}	x_m	mm	165	170
載荷版の配力鉄筋方向の辺長	b	mm	200	200
疲労に対する床版の有効幅	B	mm	318	318
押抜きせん断強度	P_{sx}	kN	1375	1399
$P/P_{sx}(P=100kN)$	-	-	0.073	0.067
繰返し回数	N	回	3.19E+16	8.81E+16
疲労寿命	年		4.37E+10	1.21E+11

(*)1 : 安全性の検討によって決定した床版厚

(*)2 : 安全性の照査で引張側応力度を1.0N/mm²に制限した場合の鋼材配置プレキャスト床版の配置間隔は平均値とする。

(*)3 : 本計算例では、全断面圧縮応力となったため床版厚の1/2とした。

3.4.2 鉄筋の疲労照査

鉄筋の耐疲労性については、コンクリート標準示方書⁶⁾に示される鉄筋の疲労強度の照査式である式(3.3)、式(3.4)により実施する。疲労の照査荷重としては、床版作用を対象としていることから、道路橋示方書に規定されているT荷重とし、衝撃係数についても同様に従った。また、安全性の照査時に用いた1輪150kNの活荷重1組についても照査荷重とした。鉄筋の疲労強度の判定結果を表-3.8に示す。設計寿命の100年を満足する鉄筋の疲労強度となっていることが確認された。

$$\gamma_i \frac{\sigma_{rd}}{f_{srd} / \gamma_d} \leq 1.0 \quad (3.3)$$

$$f_{srd} = 190 \frac{10^\alpha}{N^k} \left[1 - \frac{\sigma_{sp}}{f_{ud}} \right] / \gamma_m \quad (3.4)$$

ここで、 f_{srd} : 永久荷重による鉄筋の設計疲労強度(N/mm²)

k : 鉄筋の係数で0.12とした。

$$\alpha = k_{0f} (0.81 - 0.003\phi)$$

k_{0f} : 鉄筋のふし形状に関する係数で1.0とした。

N : 疲労寿命(100年)相当の繰返し回数で21400万回とした

σ_{sp} : 永久荷重による鉄筋の応力度(N/mm²)

f_{ud} : 鉄筋の設計引張強度で、材料係数を1.0とした($f_{ud}=440/1.0=440$)

γ_i : 橋梁の構造物係数で1.0とした。

γ_d : 床版の部材係数で1.0とした。

γ_m : 鉄筋の材料係数で1.0とした。

3.4.3 P C鋼材の疲労照査

P C鋼材の耐疲労性については、コンクリート標準示方書に示されるP C鋼材の疲労強度の照査式である式(3.5)により実施できる。ただし、今回の計算例では、P C鋼材の配置している橋軸直角方向は、使用限界状態においては、びびり発生を許さないため、変動荷重による鋼材の応力度も小さい、よって、疲労に対する鋼材の安全度の検討は省略する。

$$f_{prd} = 280 \frac{10^{\alpha_r}}{N^k} \left[1 - \frac{\sigma_{pp}}{f_{pud}} \right] / \gamma_m \quad (3.5)$$

ここで、 f_{prd} : 永久荷重によるP C鋼材の設計疲労強度(N/mm²)

k : 鉄筋の係数で0.19とした

α_r : 鉄筋の係数で1.14とした

N : 疲労寿命(100年)相当の繰返し回数で21400万回とした

σ_{pp} : 永久荷重によるP C鉄筋の応力度(N/mm²)

f_{pud} : P C鋼材の設計引張強度で、材料係数を1.0とした。

γ_m : P C鋼材の材料係数で1.0とした。

表-3.8 鉄筋の疲労照査

場所打ち床版		d=330mm	
		100kN	150kN
鉄筋径	ϕ (mm)	22	22
	α	0.744	0.744
構造物係数	γ_i	1.0	1.0
部材係数	γ_b	1.0	1.0
材料係数	γ_m	1.0	1.0
鉄筋の引張強度(SD295)	f_{ud} (N/mm ²)	400	400
永久荷重による鉄筋応力度	σ_{sp} (N/mm ²)	5.3	5.3
疲労寿命	N (回)	2.14E+08	2.14E+08
鉄筋の疲労強度	f_{srd} (N/mm ²)	104.2	104.2
活荷重作用時の発生応力度	σ_{rd} (N/mm ²)	73.8	100.0
式(3.3)左辺		0.71	0.96
判定	—	OK	OK

プレキャストPC床版		d=340mm	
		100kN	150kN
鉄筋径	ϕ (mm)	19	22
	α	0.753	0.744
構造物係数	γ_i	1.0	1.0
部材係数	γ_b	1.0	1.0
材料係数	γ_m	1.0	1.0
鉄筋の引張強度(SD295)	f_{ud} (N/mm ²)	400	400
永久荷重による鉄筋応力度	σ_{sp} (N/mm ²)	5.4	5.4
疲労寿命	N (回)	2.14E+08	2.14E+08
鉄筋の疲労強度	f_{srd} (N/mm ²)	104.2	104.2
活荷重作用時の発生応力度	σ_{rd} (N/mm ²)	73.5	99.6
式(3.3)左辺		0.71	0.96
判定	—	OK	OK

3.4.4 耐腐食性および材料劣化抵抗性

(1) コンクリートのひび割れ幅

P C床版の橋軸方向はR C構造で設計しており中間床版の下縁には引張力が作用する。この引張力によりコンクリートに有害なひび割れが発生しないことを照査する。

ひび割れ幅の照査はコンクリート標準示方書の照査式である式(3.6)により実施する。

$$w = 1.1k_1k_2k_3 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right] \leq w_a \quad (3.6)$$

ここで、 w : ひび割れ幅(mm)

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及

ばす影響を表す係数

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を表す係数

$$k_2 = \frac{15}{f'_c + 20} + 0.7$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数

$$k_3 = \frac{5(n+2)}{7n+8}$$

n : 引張鉄筋の段数

c : かぶり(mm)

c_s : 鋼材の中心間隔(mm)

ϕ : 鋼材径(mm)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリー

プ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値

σ_{se} : 配力鉄筋応力度の増加量(N/mm²)

E_s : 配力鉄筋のヤング係数(N/mm²)

w_a : 許容ひび割れ幅(mm)

照査の結果は表-3.9 に示すように、コンクリート標準示方書に示される一般の環境の場合の許容ひび割れ幅以下であることが確認できる。

(2) 鋼材の腐食

場所打ちPC床版の場合、PC鋼材とシース間の隙間にPC鋼材の腐食からの保護、PC鋼材とコンクリートとの一体性確保するために、グラウトを充填する。グラウトの性能項目は下記の3点であり、

- ①「塩化物イオン含有量」
- ②「圧縮強度」
- ③「有害となる残留空気の有無」

所要の要求性能を満足するように表-3.10 の品質管理を行っている⁷⁾。また、PC鋼材に被膜を施したものや耐食性PC鋼材、シースにポリエチレン製のプラスチック(PE)シース等を採用することにより、鋼材を腐食から防ぐ対策をとることも可能である。さらに、グラウト作業が不要なプレグラウトPC鋼材が開発され、耐腐食性への配慮が行われている。PC鋼材定着部の防錆保護には、コンクリート標準示方書で示されている最小かぶりコンクリートを施すために、壁高欄等で保護や、防錆処理(エポキシ樹脂塗装等)を施した定着具を使用する等の保護対策を行う。なお、鉄筋とコンクリートに関してはRC床版と同様である。

表-3.9 コンクリートのひび割れ幅の照査

場所打ち床版		L=6.0m	
		d=330mm	
		100kN	150kN
床版の有効高	H (mm)	271	271
鉄筋純かぶり	c (mm)	48	48
鉄筋の中心間隔	c_s (mm)	125	125
鉄筋径	ϕ (mm)	22	22
鉄筋応力度	σ_{se} (N/mm ²)	79.1	105.3
曲げひび割れ幅	w (mm)	0.1578	0.1956
許容曲げひび割れ幅(0.005c)	w_a (mm)	0.24	0.24

プレキャスト床版		L=6.0m	
		d=340mm	
		100kN	150kN
床版の有効高	H (mm)	271	271
鉄筋純かぶり	c (mm)	58	58
鉄筋の中心間隔	c_s (mm)	125	125
鉄筋径	ϕ (mm)	22	22
鉄筋応力度	σ_{se} (N/mm ²)	78.9	105
曲げひび割れ幅	w (mm)	0.1742	0.2159
許容曲げひび割れ幅(0.005c)	w_a (mm)	0.29	0.29

表-3.10 PCグラウトの性能項目

PCグラウトの性能項目	性能試験および規定値	
塩化物イオン含有量	普通ポルトランドセメントに混和剤を添加したグラウト剤: C×0.08 質量%以下 上記以外のグラウト材: 0.3kg/m ³ 以下	
圧縮強度	材齢28日で30N/mm ² 以上	
有害となる残留空気の有無	レオロジー特性	製品ごとに定められた規格値
	単位容積質量	製品ごとに定められた水セメント比の推奨範囲±1.5%かつ使用可能範囲以内
	材料分離抵抗性	ブリーディング水の移動現象やブリーディング跡が認められないこと
	ブリーディング率	0.3%以下0.0% (24時間後)
	体積変化率	-0.5%~0.5% (鉛直管試験) -1.0%~0.5% (改良容器方法)

3.5 維持管理性

PC床版の維持管理性については、コンクリート・鉄筋の損傷とPC鋼材の損傷に関して評価を行う。

3.5.1 コンクリート・鉄筋の損傷

コンクリートの軽微なひび割れや錆汁を伴わない漏水に対しては、ひび割れの補修もしくは止水を行う。ひび割れ幅が0.2mmを超える場合は注入工などで対応する。

コンクリートの著しいひび割れによって床版剛性が低下している場合は、コンクリートの部分打替えを行う。補修作業の手順は、①車線規制 ②舗装・損傷コンクリート部の除去 ③鉄筋配筋 ④コンクリートの打ち込み・養生 ⑤防水層・舗装の施工の

順で行う。なお、コンクリートを撤去する方法としては、ブレーカーによる方法やウォータージェットによる方法がある。

3.5.2 P C鋼材の損傷

P C床版については、現在のところ損傷事例がなく、高耐久性が確保できていることが伺える。

また、R C床版の取り換え工事には、全線を規制することなく、車線規制等により架け換えることが可能なプレキャスト床版の採用が増えている。

3.6 社会・環境適合性

3.6.1 経済的合理性

安全性の照査において決定した $t=330\text{mm}$ の場所打ち床版について、P C鋼材と床版厚をパラメータとした経済性の比較を行った。検討した床版は、床版厚をできるかぎり薄くした。表-3.11 に示すように、床版厚を薄くするとP C鋼材本数が増えるため、床版厚が 330mm の方が経済的合理性が高いことが確認できた。現在建設されている支間 6m の少数主桁形式の橋梁調査⁸⁾では、おおむね床版厚 320mm で鋼材間隔が 500mm 程度である。

3.7 まとめ

以上、照査の結果をまとめると、場所打ちP C床版では、床版厚 330mm 、プレキャストP C では、床版厚 340mm 、となり、全ての照査項目を満たす床版厚が決定した。さらに、最も経済的なP C鋼材配置の間隔は場所打ち床版でP C鋼材を 1S28.6 とした場合 450mm 間隔となった。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用プレキャスト床版 設計・製造便覧 (JIS A 5373-2004)，2004。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，III コンクリート橋編，丸善，2002。

表-3.11 経済的合理性の比較結果

場所打ちP C床版			
床版支間	m	6	
床版幅	m	9.54	
床版厚	mm	330	280
PC鋼材種類	//	1S28.6	1S28.6
// 配置間隔	//	ctc450	ctc290
コンクリート体積*	mm^3	3.1482	2.6712
PC鋼材長	m	21.200	32.897
コンクリート材料費	円	37,464	31,787
// 工費	//	13,496	11,451
PC鋼材材料費	//	28,241	43,823
// 工費	//	14,374	22,304
PC鋼材緊張工	//	36,527	56,679
合計	//	93,575	109,365
比率	—	1.0	1.2

* 橋軸方向1m当たりの体積

- 3) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000。
- 4) 土木学会 鋼構造委員会 道路橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004。
- 5) 川間重一，西川和廣，内田賢一：一方向をプレストレスしたP C床版の疲労耐久性に関する検討，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp.167-172，2000。
- 6) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002年制定，丸善，2002。
- 7) プレストレスト・コンクリート建設業協会：P Cグラウト&プレグラウトP C鋼材施工マニュアル（改訂版），2006。
- 8) (社)日本橋梁建設協会ホームページ，鋼橋Q&A，設計(1)床版

第4章 鋼・コンクリート合成床版

4.1 概要

4.1.1 対象とする合成床版

鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と略す）は、鋼板とコンクリートを鋼板に溶接したジベルにより合成した床版形式である。当初は、鋼製型枠としてのけた下空間の安全性の確保、プレファブ化による現場工期の短縮、床版厚の低減による死荷重の軽減などを目的として開発されたものであるが、近年、高い耐荷力および疲労耐久性が確認され、鋼2主げた橋、鋼少数主げた橋、鋼開断面箱げた橋などに積極的に採用されるに至っている。

合成床版はジベルの種類によって分類されているが、本設計計算例においては合成床版の基本形であるロビンソン型の合成床版を対象とした。ロビンソン型の合成床版は、図-4.1 に概念図を示すようにジベルに頭付きスタッドを採用し、コンクリート打設時の鋼板の変形を許容値以内に低減するために鋼板を橋軸直角方向に横リブで補剛した合成床版である。また、鉄筋は上側のみに主鉄筋および配力鉄筋を配置している。

合成床版の用途としては、高い疲労耐久性が要求される床版支間の長い合理化げたのみならず、けた下空間の安全性の確保を目的とした比較的床版支間の短い場合も少なくない。したがって、以降に示す設計計算例は、床版支間長がRC床版と同様な2.6mの場合と、PC床版と同様な6.0mの場合の両者について試設計を行うものとする。

4.1.2 試設計のフローチャート（押抜きせん断照査による床版厚の初期設定：面外せん断）

合成床版の試設計のフローチャートは図-4.2 に示すとおりである。なお、試設計の初期条件として、文献1)において提案されている合成床版の最小床版厚を採用せずに、押抜きせん断による耐疲労性の照査により設計条件である設計供用期間100年を満足する床版厚を求め、試設計における床版厚の初期値とした。押抜きせん断による耐疲労性の照査方法は、文献2)にもとづき実施した。具体的には、以下に示す式(4.1)および式(4.2)により合成床版の押抜きせん断強度を計算し、載荷荷重を押抜きせん断強度により除した無次元量を式(4.3)に代入して繰返し回数を求め、計画交通量から疲労寿命を算出した。

なお、以降の試設計において使用する下鋼板の材質はSS400、板厚は9mm、鉄筋の材質はSD295とし、主鉄筋・配力鉄筋ともに異形鉄筋D16を200mm間隔に配置した。また、使用するコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ とした。

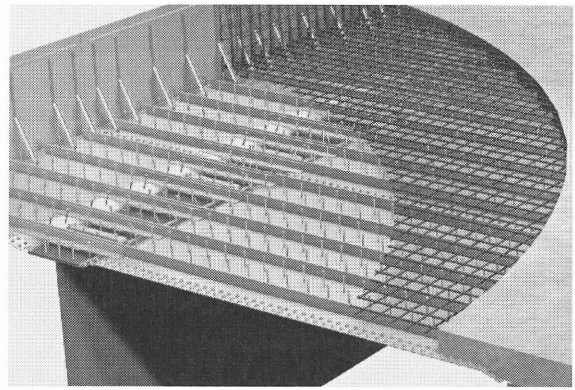


図-4.1 ロビンソン型合成床版の概念図

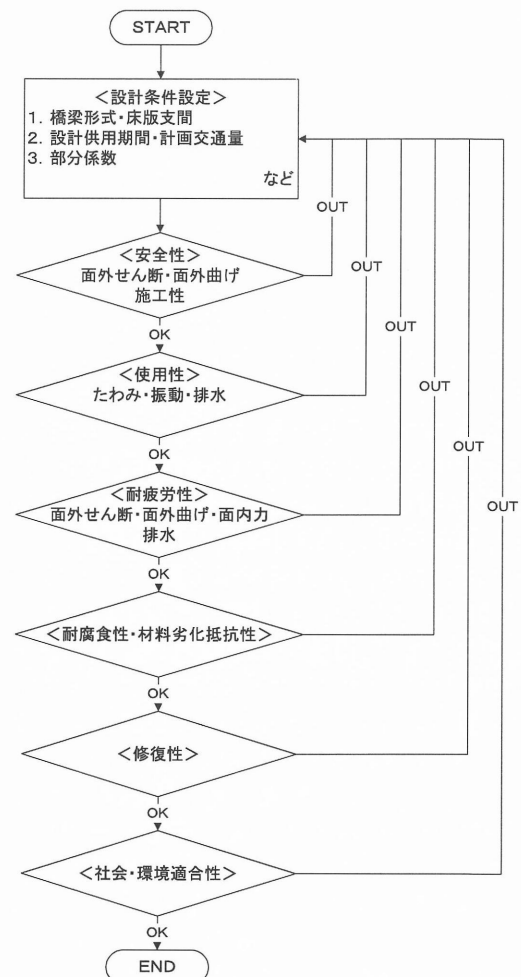


図-4.2 合成床版の性能照査設計フローチャート

$$P_{sx} = 2 \cdot \tau_{s\max} \cdot x_m \cdot B \quad (4.1)$$

$$B = b + 2 \cdot d_a \quad (4.2)$$

ここで、 P_{sx} : 貫通ひび割れ発生後の押抜きせん断強度 (kN)
 $\tau_{s\max}$: コンクリートの最大せん断応力度 (N/mm^2)
 x_m : コンクリートの引張領域を無視した場合の主鉄筋断面の中立軸位置 (mm)

B : 疲労に対する床版の有効幅(mm)
 b : 配力鉄筋方向の載荷板の辺長(mm)
 d_d : コンクリート版厚(mm)

$$\log(P/P_{sx}) = -0.07835 \cdot \log N + \log 1.51965 \quad (4.3)$$

ここで, P : 載荷荷重(kN)
 N : 繰返し回数

押抜きせん断による床版厚の初期値の算出結果を表-4.1に示す。計算の結果, 設計供用期間100年を満足する合成床版の床版厚は130mmとなった。

4.2 安全性

ここでは, 安全性に関して, 曲げモーメントによる断面設計およびコンクリートの施工性の照査を行う。

4.2.1 曲げモーメントによる断面設計：面外曲げ

曲げモーメントによる断面設計は, 設計断面力に対して合成床版の各部位に発生する応力度が所定の強度以下であることを照査するものである。

設計断面力の一覧表を表-4.2に示す。活荷重による設計モーメントはRC床版と同様に, 文献3)において提示されている1輪150kNのタンデム荷重を載荷した値を採用し, 作用係数1.5を考慮した。比較のために, 表中には道路橋示方書⁴⁾に示されるT荷重(1輪100kN1組)を満載した設計曲げモーメントを併記した。死荷重による設計曲げモーメントは, 道路橋示方書にもとづいて算出した。また, スタッドの設計に用いる活荷重による設計せん断力は文献1)に示される値を採用した。この設計せん断力はスタッドの疲労照査に用いられるものであるが, 合成床版の床版厚の決定に際して重要な要因となることから, ここではスタッドの疲労照査も合わせて行うものとする。

床版支間2.6mおよび6.0mの応力計算結果を表-4.3に示す。各部位の応力度は, コンクリートの引張領域が抵抗しないものと仮定して算出した。また, 表中の強度は, 材料係数および部材係数を考慮した値である。床版支間2.6mに関しては, 床版厚を初期値である130mmとした場合において, すべての部位の発生応力度は強度を下回り, 文献1)に規定されている最小版厚よりも60mm程度小さい値となっている。床版厚を最小版厚とした場合の結果と, 加えてスタッドの本数を減少するために直径を19mmのスタッドを用いた場合の結果を同表に併記する。なお, スタッドの最大間隔は文献1)に従って250mmとした。

一方, 床版支間6.0mに関しては, 床版厚を初期

表-4.1 押抜きせん断強度による床版厚の初期値の算出

床版厚	d	mm	120	130
コンクリート版厚	d_d	mm	111	121
鋼板厚	t	mm	9	9
設計基準強度	σ_{ck}	N/mm ²	30	30
コンクリートの最大せん断応力度	τ_{smax}	N/mm ²	5.3	5.3
主鉄筋断面の圧縮側コンクリート表面から中立軸までの距離	x_m	mm	77	83
載荷板の配力鉄筋方向の辺長	b	mm	120	120
疲労に対する床版の有効幅	B	mm	342	362
押抜きせん断強度	P_{sx}	kN	279	319
P/P_{sx} ($P=100kN$)	—	—	0.358	0.314
等価繰返し回数	N	回	1.03×10^8	5.55×10^8
疲労寿命	年		49	263

表-4.2 設計断面力一覧表

床版支間			2.6m	6.0m
活荷重による設計曲げモーメント	主鉄筋方向	100kN	31.0kN・m/m	98.5kN・m/m
		150kN	55.7kN・m/m	151.2kN・m/m
	配力鉄筋方向	100kN	22.4kN・m/m	59.4kN・m/m
		150kN	31.8kN・m/m	79.0kN・m/m
死荷重による設計曲げモーメント	合成前死荷重(主鉄筋方向)		2.4kN・m/m	18.4kN・m/m
	合成後死荷重(主鉄筋方向)		0.9kN・m/m	4.6kN・m/m
活荷重による設計せん断力	主鉄筋方向	$V_d=k(0.011L+0.747)P$	38.8kN/m	40.7kN/m

表-4.3 応力計算結果

(a) 床版支間 2.6m

床版厚		130mm		180mm (最小床版厚)			強 度 N/mm ²	
スタッド配置	直径	φ 16mm	φ 16mm	φ 16mm	φ 19mm			
	主鉄筋方向	160mm	210mm	210mm	250mm			
	配力鉄筋方向	160mm	210mm	210mm	250mm			
荷重種別		100kN	150kN	100kN	150kN	100kN	150kN	
コンクリート 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	-7.0	-12.4	-3.9	-6.9	-3.9	-6.9	<-15
	配力鉄筋方向	-5.3	-7.5	-2.8	-4.0	-2.8	-4.0	<-15
上側鉄筋 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	-29.3	-52.1	-21.6	-38.3	-21.6	-38.3	<-175
	配力鉄筋方向	-12.6	-17.8	-11.4	-16.2	-11.4	-16.2	<-175
下鋼板 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	45.2	76.2	33.8	54.1	33.8	54.1	<140
	配力鉄筋方向	28.8	40.9	19.2	27.3	19.2	27.3	<140
スタッド 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	44.9		49.0		49.2		<50

(b) 床版支間 6.0m

床版厚		120mm		210mm		260mm (最小版厚)		
スタッド配置	直径	φ 16mm		φ 16mm		φ 16mm		強度 N/mm ²
	主鉄筋方向	160mm		220mm		250mm		
	配力鉄筋方向	160mm		220mm		250mm		
荷重種別		100kN	150kN	100kN	150kN	100kN	150kN	
コンクリート 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	-18.9	-28.5	-9.3	-14.1	-6.4	-9.7	<-15
	配力鉄筋方向	-14.0	-18.6	-5.6	-7.5	-3.8	-5.1	<-15
上側鉄筋 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	-74.0	-111.8	-56.6	-85.4	-43.1	-65.1	<-175
	配力鉄筋方向	-33.3	-44.3	-26.2	-34.8	-20.6	-27.4	<-175
下鋼板 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	134.1	196.3	94.7	129.3	78.0	104.0	<140
	配力鉄筋方向	76.4	101.6	42.4	56.3	33.0	43.9	<140
スタッド 応力度N/mm ²	主鉄筋方向	47.7		46.3		43.9		<50

値である130mmとした場合において, 下線を施したコンクリートと下鋼板の発生応力度が強度を上回っている。すべての部位の発生応力度が強度を下回するための床版厚は210mmとなり, 最小版厚よりも

50mm 程度小さい値となる。同表には、最小版厚とした場合の結果も併記する。

4.2.2 コンクリートの施工性

合成床版は RC 床版に比較し床版厚が小さいことから、コンクリート打設時においてコンクリートが十分にゆきわたることを確認する必要がある。このため、床版厚の小さい床版支間 2.6m の合成床版について鋼部材のあきの照査を行った結果を表-4.4 に示す。照査の結果から、床版厚が最も小さい 130mm の場合においても、文献 5) において最小あきとして規定されている粗骨材の最大寸法の 4/3 倍以上を満足していることが確認できた。

4.3 使用性

ここでは、合成床版の使用性の照査を行う。照査する項目は、振動特性、橋面排水、現場施工時におけるコンクリート打設時の下鋼板のたわみとする。

4.3.1 振動に対する照査

一般に、トラックのバネ下振動数が 10Hz 前後であることに起因して、床版単体の固有振動数がこの程度の値である場合に低周波被害の発生する可能性が高いと考えられる。

合成床版がこの振動と共振しないことを照査するために、文献 6) に示される方法により算出した床版支間と固有振動数の関係を図-4.3 に示す。なお、固有振動数の算出において、床版厚は文献 1) に示される最小版厚を採用した。床版支間 2.6m の場合と 6.0m の場合の固有振動数を図-4.3 から抽出して表-4.5 に示すが、両者とも 10Hz を上回っていることが確認できる。

4.3.2 橋面排水に関する照査

合成床版の橋面排水に関する照査は、RC 床版と同様であると考えられる。ただし、現場施工において、下鋼板設置からコンクリート打設までの期間が長い場合には、仮の排水装置を設置して、雨水の流末処理に配慮する必要がある。

4.3.3 コンクリート打設時の下鋼板のたわみ

現場施工におけるコンクリート打設時の下鋼板のたわみの照査を行う。これは、下鋼板のたわみが大きい場合、作業の安全性が確保できないこと、コンクリート版厚の精度の確保が困難であることなどが問題となるためである。

文献 7) では、下鋼板のたわみの許容値は床版支間長の 1/500 以下に抑えることが規定されている。表-4.3 に示す応力計算結果のうち最も床版厚の大きい場合に関して、コンクリート打設時のたわみを照査した結果を表-4.6 に示す。床版支間 2.6m の場合、6.0m の場合ともに許容値を満足していること

表-4.4 鋼部材のあきの比較

床版支間長	m	2.6	
床版厚	mm	130	180 (最小版厚)
鋼板厚	"	9	9
かぶり	"	40	40
主鉄筋直径	"	D16	D16
配力鉄筋直径	"	D16	D16
鋼部材の最小あき	"	49	99
粗骨材最大寸法の 4/3 倍	"	34	34
判定	—	○	○

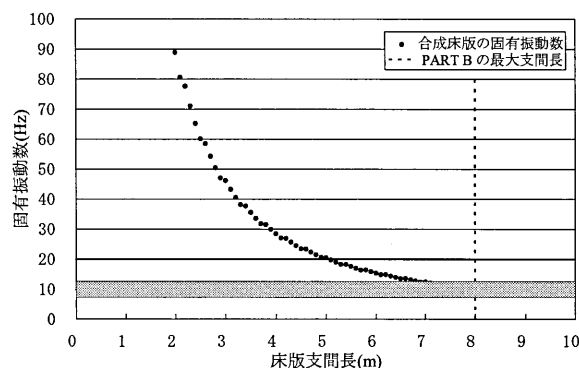


図-4.3 合成床版の固有振動数と床版支間の関係

表-4.5 合成床版の固有振動数

床版支間	2.6m	6.0m
固有振動数	58.6Hz	15.4Hz

表-4.6 コンクリート打設時の下鋼板のたわみ

床版支間	2.6m	6.0m
床版厚	180mm	260mm
たわみ	3.7 <L/500 =2.6/500=5mm	11.4 <L/500 =6.0/500=12mm

が確認できた。

4.4 耐久性

ここでは、合成床版の耐久性の照査として、耐疲労性と耐腐食性および材料劣化抵抗性について検討を行う。

4.4.1 耐疲労性

合成床版の耐疲労性については、押抜きせん断強度による照査、鋼部材の疲労照査、スタッドの疲労照査が必要であると考えられる。押抜きせん断強度による照査については概要において示したとおりであり、床版厚が 130mm 以上であれば設計供用期間を満足することが確認されているため、ここでは省略する。また、上記の疲労照査に加えて、コンクリートのひび割れ幅の照査および橋面排水の検討を行う。

(1) 鋼部材の疲労照査：面外曲げ

鋼部材の疲労照査として、下鋼板の耐疲労性について検討を行う。疲労の照査荷重としては、床版作用を対象としていることから、道路橋示方書⁴⁾に規

定されている T 荷重（1 輪 100kN 1 組）を 1.5 倍（1 輪 150kN 1 組）することによって作用係数 1.5 を考慮した。なお、衝撃の影響については道路橋示方書に示される衝撃係数を採用した。

疲労照査荷重による曲げモーメントを算出するために有限要素解析（以下、FE 解析と略す）を実施した。解析コードは MSC. Marc⁸⁾を使用しており、解析条件は表-4.7 に示すとおりである。図-4.4 に示すように床版支間 2.6m と 6.0m の解析モデルを作成し、文献 3）と同様に橋軸直角方向は床版の全幅員をモデル化し、橋軸方向については床版支間の 5 倍の長さの床版をモデル化した。支持条件については、主げたの位置において鉛直方向変位を拘束した。この解析モデルの中央に 1 輪 150kN の活荷重 1 組を載荷し、橋軸直角方向に活荷重を移動させて求めた最大曲げモーメントを表-4.8 に示す。比較のために、同表には T 荷重を載荷した場合の曲げモーメントも併記した。

一方、下鋼板の各部位の疲労強度等級と一定振幅応力に対する打切り限界は、文献 9）に従うと表-4.9 に示すとおりである。疲労照査用曲げモーメントにより下鋼板の①～③の各部位の応力範囲を算出し、打切り限界と比較した結果を表-4.10 に示

す。床版支間 2.6m の場合および 6.0m の場合とも、応力範囲が打切り限界以下であることが確認できた。

(2) スタッドの疲労照査：面外せん断

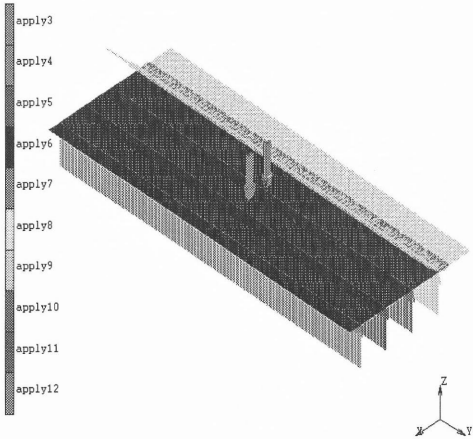
文献 1）にはスタッドの疲労照査方法が示されており、照査結果を表-4.3 に併記した。具体的な照査方法は、設計せん断力に対してスタッドに作用

表-4.7 FE 解析条件

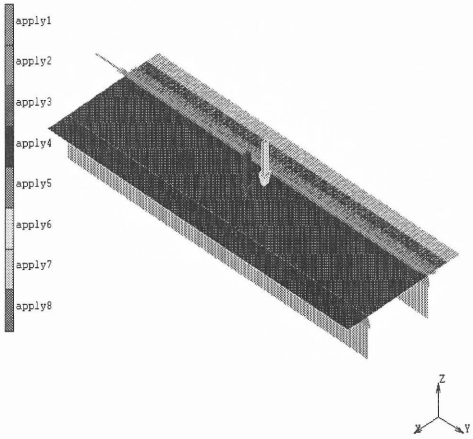
	単 位	項 目		備 考
床版支間	m	2.6m	6.0m	
ヤング係数	N/mm ²	28,000		
ポアソン比	—	0.167		
床版厚	mm	180	260	鋼板厚含む
載荷荷重	kN	輪荷重100kN一組ないし輪荷重150kN一組		
解析コード	—	MSC. Marc		
要素種類	—	等方性厚板シェル要素		
要素分割	—	主鉄筋方向：55mm+196@50mm+55mm=9,910mm		
		配力鉄筋方向：300@100mm=30,000mm		
		節点数59,899・要素数59,400		

表-4.8 下鋼板の疲労照査用曲げモーメント

	単 位	2.6m		6.0m	
		100kN載荷	150kN載荷	100kN載荷	150kN載荷
主鉄筋方向	kN・m/m	28.2	42.3	51.8	77.7
配力鉄筋方向	kN・m/m	24.7	37.0	45.4	68.1



(a) 床版支間 2.6m



(b) 床版支間 6.0m

図-4.4 FE 解析モデル

表-4.9 下鋼板の疲労強度等級

部 位	強度等級	2×10 ⁶ 回基本許容応力範囲 $\Delta\sigma_f \cdot \Delta\tau_f$ N/mm ²	一定振幅応力に対する打切り限界 $\Delta\sigma_{ce} \cdot \Delta\tau_{ce}$ N/mm ²	継手の構造および 応力の作用方向	備 考
①下鋼板と横リブ (主鉄筋方向)	F	65	46		アンダーカット は0.5mm以下
②下鋼板と横リブ (配力鉄筋方向)	F	65	46		アンダーカット は0.5mm以下
③下鋼板とスタッド (主板断面)	E	80	62		—
④下鋼板とスタッド (スタッド断面)	S	80	67		—

するせん断応力範囲を求め、スタッドの疲労強度である 50N/mm^2 以下であることを照査するものである。文献1) において提案されているスタッドのS-N曲線である式(4.4) (PRAT BのS-N曲線)は図-4.5 に示すように非常に平坦であることから、疲労強度を 50N/mm^2 と一定にしたものである。

$$\log \tau = -0.0519 \cdot \log N + 2.0697 \quad (4.4)$$

ここで、 τ : スタッドに作用するせん断応力範囲 (N/mm^2)

N : 繰返し回数

図-4.5 に式(4.4) と文献 8) に示されるスタッド断面のS-N曲線(S等級のS-N線)の比較を示す。両式はせん断応力範囲が 48.6N/mm^2 において交差しており、応力範囲がこれより小さい領域ではS等級の疲労寿命が短く、これより大きい領域ではPART Bの疲労寿命が短い。せん断応力範囲が 50N/mm^2 より小さい領域に関してはスタッドの疲労が問題となることが少ないことから、スタッド断面の耐疲労性の照査はPRAT Bに示される照査方法が安全側の評価を与えるものである。参考のために、スタッドのせん断応力範囲とS等級の一定振幅応力に対する打ち切り限界の比較を表-4.10 に併記すると、スタッドの応力範囲が打ち切り限界を下回っていることが確認できる。

(3) コンクリートのひび割れ幅の照査：面内力合成床版を連続げたに適用した場合において、中間支点部の床版コンクリートには引張力が作用する。この引張力によりコンクリートに有害なひび割れが発生しないことを照査する。

ひび割れ幅の照査は文献 10) に示されるロビンソン型合成床版の照査式である式(4.5) により実施する。なお、式(4.5) 中の横リブ間隔とひび割れ間隔を関連付ける係数と配力鉄筋比の関係は図-4.6 に示すとおりである。また、ここでは主げたの試設計を行わないことから、照査に用いる諸数値は、一般的なプレストレスしない連続合成げたの標準的な値を用いた。

$$w = \kappa_b \cdot c_r \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon_{csd}' \right] \leq w_a \quad (4.5)$$

ここで、 w : ひび割れ幅(mm)

κ_b : 横リブ間隔とひび割れ間隔を関連付ける係数

c_r : 横リブ間隔(mm)

σ_{se} : 配力鉄筋応力度の増加量 (N/mm^2)

E_s : 配力鉄筋のヤング係数 (N/mm^2)

表-4.10 下鋼板の疲労照査
(a) 床版支間 2.6m

部 位	単 位	応力範囲		一定振幅応力に対する打ち切り限界	備 考
		100kN載荷	150kN載荷		
①下鋼板と横リブ(主鉄筋方向)	N/mm^2	29.4	44.1	<46	
②下鋼板と横リブ(配力鉄筋方向)	N/mm^2	26.5	39.8	<46	
③下鋼板とスタッド(主板断面)	N/mm^2	29.4	44.1	<62	
④下鋼板とスタッド(スタッド断面)	N/mm^2	49.2	—	<67	文献1) の設計せん断力を適用

(b) 床版支間 6.0m

部 位	単 位	応力範囲		一定振幅応力に対する打ち切り限界	備 考
		100kN載荷	150kN載荷		
①下鋼板と横リブ(主鉄筋方向)	N/mm^2	25.6	38.3	<46	
②下鋼板と横リブ(配力鉄筋方向)	N/mm^2	25.2	37.8	<46	
③下鋼板とスタッド(主板断面)	N/mm^2	25.6	38.3	<62	
④下鋼板とスタッド(スタッド断面)	N/mm^2	43.9	—	<67	文献1) の設計せん断力を適用

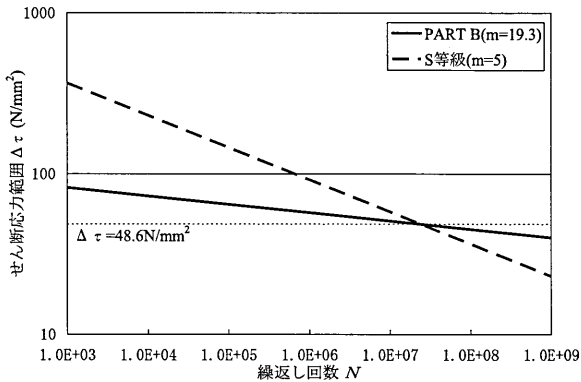


図-4.5 スタッドのS-N曲線の比較

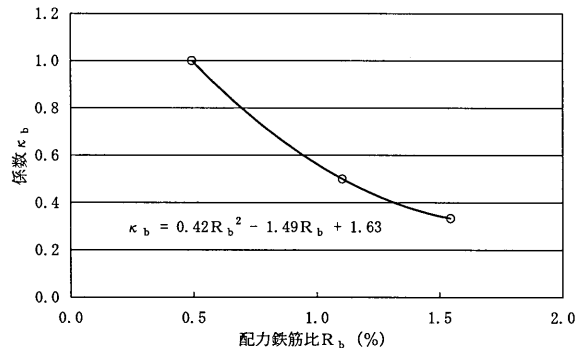


図-4.6 係数 κ_b と配力鉄筋比の関係

表-4.11 コンクリートのひび割れ幅の照査

配力鉄筋比	$R_b = 1.5\% \rightarrow \kappa_b = 0.34$
横リブ間隔	$c_r = 650\text{mm}$
配力鉄筋応力度の増加量	$\sigma_{se} = 100.0\text{N/mm}^2$
許容ひび割れ幅	$w_a = 0.005c$ (一般環境の場合)
配力鉄筋のかぶり	$c = 40\text{mm}$
ひび割れ幅の照査	$w = 0.34 \times 650 \times (100.0/2.0 \times 10^3 + 150 \times 10^{-6}) = 0.14\text{mm} < w_a = 0.005 \times 40 = 0.2\text{mm}$

ε_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープなどによるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 (150×10^{-6})

w_d : 許容ひび割れ幅 (mm)

照査の結果は表-4.11 に示すように、文献 5) に示される一般環境の場合の許容ひび割れ幅以下であることが確認できる。

(4) 橋面排水に関する照査

合成床版のコンクリートと舗装の間の排水(スラブドレーンの設置など)は RC 床版と同様である。また、文献 11) において RC 床版に関して指摘されているように、合成床版についても床版の疲労耐久性を確保するために防水層を設置することは必須である。合成床版特有の処置は、万が一床版コンクリート内に雨水が浸入した場合において雨水を床版の外に排出するために、下鋼板にモニタリング孔を兼ねた水抜き孔を設置することである。

4.4.2 耐腐食性および材料劣化抵抗性

ここでは、文献 7) に示されている鋼材の耐腐食性をもとに、下鋼板の耐用年数を評価した結果を表-4.12 に示す。設計供用期間 100 年を満足する下鋼板の防錆処理は一般環境における耐候性鋼材の裸使用のみである。また、塗装仕様を採用する場合は、供用期間に 3 度の塗替えが必要となる。なお、鉄筋とコンクリートに関しては RC 床版と同様であると評価した。

4.5 維持管理性

合成床版の維持管理性については、文献 12) を参考にしてコンクリート・鉄筋の損傷と下鋼板の損傷に関して評価を行う。

4.5.1 コンクリート・鉄筋の損傷

コンクリートの軽微なひび割れや錆汁を伴わない漏水に対しては、ひび割れの補修もしくは止水を行う。ひび割れ幅が 0.2mm を超える場合は注入工などで対応する。

コンクリートの著しいひび割れによって床版剛性が低下している場合は、コンクリートの部分打替えを行う。補修作業の手順は、①車線規制 ②舗装・損傷コンクリート部の除去 ③鉄筋配筋 ④コンクリートの打ち込み・養生 ⑤防水層・舗装の施工の順で行う。なお、コンクリートを撤去する方法としては、ブレーカーによる方法やウォータージェットによる方法がある。

4.5.2 下鋼板の損傷

下鋼板の防錆処理に損傷が発生した場合は、発錆

した部分に適切な素地調整を行い、再度防錆処理を施す。

下鋼板にき裂などが発生した場合は、下鋼板の取替えにより機能回復を図る。この場合の補修作業の手順は、コンクリートの部分打替えの場合に加え、下鋼板撤去時の足場や支保工などの組立・解体が必要である。

4.6 社会・環境適合性

4.6.1 経済的合理性

表-4.3 に示す床版支間 2.6m および 6.0m の断面設計結果に関して、床版のみに着目した初期費用の経済的合理性の試算を行った結果を表-4.13 に示す。試算の結果、床版支間 2.6m に関してはスタッドの本数を最も低減できる最小版厚の 180mm が、床版支間 6.0m に関しては僅差ではあるが床版厚

表-4.12 耐腐食性および材料劣化抵抗性の評価

下鋼板の耐用年数	・一般環境 (山間部)	
	ポリウレタン樹脂塗装 (薄膜形重防食)	初期30年・塗替25年
	耐候性鋼材 (裸使用)	初期100年・塗替なし
	・やや厳しい環境 (市街地部)	
	ポリウレタン樹脂塗装(C-2)	初期30年・塗替25年
	溶融亜鉛めっき (塗替: ポリウレタン)	初期60年・塗替25年
	・厳しい環境 (海岸部)	
	ふっ素樹脂塗装(C-4)	初期30年・塗替25年
鉄筋	・ R C 床版と同様	
	・ R C 床版と同様	

表-4.13 経済的合理性の比較

(a) 床版支間 2.6m

床版厚	mm	130	180 (最小版厚)	
スタッド径×長さ	〃	φ 16×80	φ 16×120	φ 19×120
〃 間隔	〃	160×160	210×210	250×250
コンクリート体積	m ³	0.121	0.171	0.171
スタッド本数	本	39	23	16
コンクリート材料費	円	1,450	2,050	2,050
〃 工費	〃	480	680	680
スタッド材料費	〃	3,510	2,210	1,860
〃 工費	〃	6,750	3,980	2,770
合 計	〃	12,190	8,910	7,360
比 率	—	1.00	0.73	0.60
判 定	—	×	×	○

(b) 床版支間 6.0m

床版厚	mm	130	210	260 (最小版厚)
スタッド径×長さ	〃	φ 16×80	φ 16×140	φ 16×180
〃 間隔	〃	160×160	220×220	250×250
コンクリート体積	m ³	0.121	0.201	0.251
スタッド本数	本	39	21	16
コンクリート材料費	円	1,450	2,410	3,010
〃 工費	〃	480	800	1000
スタッド材料費	〃	3,510	2,210	2,060
〃 工費	〃	6,750	3,630	2,770
合 計	〃	12,190	9,040	8,840
比 率	—	1.00	0.74	0.73
判 定	—	×	×	○

210mm よりも最小版厚である 260mm の方が経済的合理性が高いことが確認できた。

4.6.2 環境適合性

合成床版の環境適合性については、第2章 RC 床版において記述した。

4.7 まとめ

以上の照査結果をまとめると、表-4.14 に示すように床版支間 2.6m に関しては床版厚を 180mm としスタッド径を $\phi 19\text{mm}$ とした場合が、床版支間 6.0m に関しては床版厚を 260mm とした場合が優位であるという結果が得られた。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，平成9年版，丸善，1997.
- 2) 街道 浩，松井繁之：鋼・コンクリート合成床版の支間部および張出し部のせん断疲労強度評価，土木学会論文集 A，Vol. 64，No. 1，pp. 60-70，2008.
- 3) 土木学会 鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，II 鋼橋編，丸善，2002.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002年制定，丸善，2002.
- 6) 土木学会 鋼構造委員会 道路橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上，2004.

表-4.14 合成床版の断面図

床版支間	2.6m	6.0m
床版厚	180mm	260mm
主鉄筋方向		
配力鉄筋方向		

- 7) 日本橋梁建設協会：合成床版設計・施工マニュアル，2005.
- 8) 日本エムエスシー：MSC. Marc 2003 日本語オンラインマニュアル，2003.
- 9) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，丸善，2002.
- 10) 街道 浩，渡辺 滉，橘 吉宏，松井繁之，栗田章光：鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験，構造工学論文集，Vol. 49A，土木学会，pp. 1115-1126，2003.
- 11) 松井繁之：移動荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について，コンクリート工学年次講演会論文報告集，Vol. 9，No. 2，pp. 627-632，1987.
- 12) 橘 吉宏，横山仁規，上村明弘，高田和彦，数藤久幸，佐藤 徹：鋼・コンクリート合成床版の施工と維持管理について，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，土木学会，pp. 205-210，2006.

第5章 鋼床版

5.1 概要

鋼床版の設計はコンクリート系床版や鋼・コンクリート合成床版と異なる点が多い。コンクリートを用いた床版がソリッドな版により荷重を受ける構造であるのに対して、鋼床版はリブで支持されたデッキプレートで荷重を受ける構造となる。鋼板が組み合わされる鋼床版には、その接合部を中心に局部的な板の曲げ応力が発生し、これが鋼床版の疲労強度に影響する。このため、疲労強度を設計計算により照査する方法が十分確立されておらず、現状では構造詳細を満足することにより照査を省略している。しかしながら、鋼床版の耐疲労性については、昨今、デッキプレートを貫通するような、これまでにない疲労損傷が報告されてきており、これらへの対策について検討が進むことで、適切な照査手法が早急に確立されることが望まれる。このような背景から、鋼・合成構造標準示方書¹⁾でも、鋼床版の疲労設計に関する記述は少なく、現段階で鋼床版の性能設計事例を示すことは困難である。本章では鋼・合成構造標準示方書に記された内容を補完すること、ならびに、今後の高耐久性鋼床版を設計する際の参考となるよう、鋼床版の各性能についてとりまとめる。

5.2 安全性

5.2.1 鋼床版の構造

鋼床版は縦リブ、横リブでデッキプレートを補剛したものであり、縦げた、横げた等の床組み構造または主げたで支持される。鋼床版は、デッキプレートと縦リブを主げたのフランジとして、主げた応力の一部を受け持たせるのができる利点がある。したがって、鋼床版の構造は、主げたの上フランジとしての作用（Ⅰ系）、剛な主げたに支持された版または格子構造（Ⅱ系）、縦リブに支持され直接荷重を受けるデッキプレート（Ⅲ系）に分けて考えられる²⁾。

5.2.2 構造解析法

鋼床版を主げた構造の一部とした場合（Ⅰ系）は主げた構造の一部として設計し、床版あるいは床組構造とした場合（Ⅱ系）は、縦リブ横リブの剛性を考慮した直交異方性版と考えて設計する。最も不利となる載荷状態は、Ⅰ系とⅡ系では異なる場合が多いこと、Ⅲ系では、デッキプレートの膜力による大きな強度が期待できることから、それぞれ独立に設計されている。

Ⅰ系では、縦リブ断面と有効幅を考慮したデッキプレートを主げたフランジとして設計に考慮する。

Ⅱ系における直交異方性版としての設計は、従来、横リブ間の鋼床版に対して、フーバーの微分方程式の微小項を省略して解き、横リブの弾性変形の影響を別途考慮するペリカン・エスリンガーの提案した方法が用いられる場合が多かったが、近年は、パウエルとオグデンにより提唱された有限帯板法（FSM）により、横リブの影響も含めた形で断面力を求める方法が一般的であり、市販の解析ソフトも利用可能である。

Ⅲ系については、デッキプレートの膜力による強度が大きいため終局強度に問題はないが、デッキプレートの変形により舗装が損傷することや、デッキプレートと縦リブの溶接部が疲労により損傷する場合があるため、構造詳細が規定されている。鋼床版のデッキプレート厚に関して、道路橋示方書³⁾では、車道部分のデッキプレート最小板厚は舗装への影響という観点から、12mm 以上とされているが、文献4)に示されるように海外では、鋼床版の疲労を考慮して、14mm あるいは 16mm のデッキプレートが用いられている。日本でも近年、重交通路線において疲労損傷の発生している事例が報告されているため、疲労を考慮する必要がある路線では、デッキプレート厚を 14mm、重交通路線では、デッキプレート板厚を 16mm 以上など厚く設定することが望ましい。

5.2.3 舗装剛性の評価（曲げ剛性と荷重分散）

鋼床版では、夏場に舗装が高温となり剛性が低下することがある。図-5.1 は、名古屋高速での舗装（75mm）施工前後、夏冬時に同じ荷重を載荷した場合の応力計測結果⁵⁾である。図より、舗装が高温となる夏場は、舗装が低温となる冬場に比較して大きな応力が発生しているが、舗装のない状態に比べて、舗装がある場合には夏場でも応力が小さくなっている。すなわち、舗装が高温となる夏場では、舗装の剛性については期待できないものの、舗装による荷重分散効果については考慮できるものと考えられる。

5.2.4 荷重（温度荷重）

鋼床版の設計上、通常の桁構造と異なる荷重として、断面内での温度差分布がある。通常は、デッキプレート表面で、基準温度より 15 度高く、デッキプレート表面から、けた高さ方向に 30cm 位置まで漸減するものと仮定して設計する。また、舗装時には、局所的に 200 度を超える舗装がデッキ表面に載荷される場合がある。上下分離構造で、上下線の遊間が 20mm 程度だとすると、鋼床版が隣接する橋梁に接触し、塗装などに損傷が発生する場合があるの

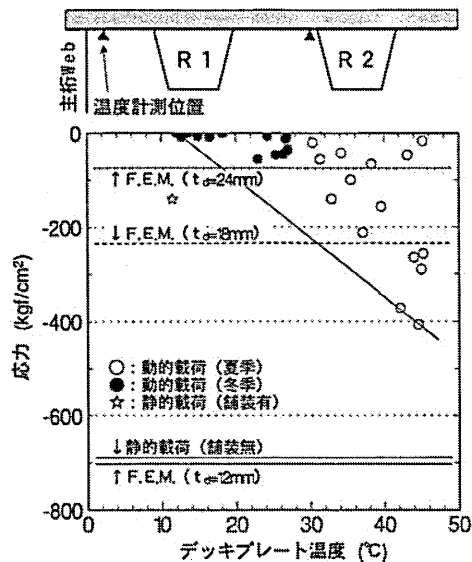


図-5.1 鋼床版温度と発生応力⁵⁾

で留意する必要がある。舗装温度を 250 度と仮定し、この温度まで鋼床版温度が上昇すると考えると、鋼床版の幅員を W とした場合の鋼床版の幅方向の伸び ΔW は、 $\Delta W = \alpha \times W \times \Delta T = 0.0024W$ となる。

伸びが偏って発生することを考慮して、 $0.0024W$ 以上の遊間を確保することが望ましい。また、地覆など断面積の小さいコンクリート構造物では、舗装時の温度膨張により、ひびわれが発生しやすいため、鋼製の地覆に変更したり、橋軸方向の配力筋の追加や数 m 間隔で目地を設け、膨張剤を用いるなどの対策が必要である。

5.2.5 横リブ、横桁

鋼床版の縦リブと横リブあるいは横桁の交差部は、大きな応力の発生しやすい縦リブを優先し、横リブにスロットを設けて貫通させる構造が一般的である。縦リブと横リブ交差部は、デッキプレートを通じて伝達される鉛直応力をせん断力として横リブに伝達する必要があるため、縦リブの腹板と横リブの腹板は鉛直方向の溶接により接合される。一方で、縦リブのフランジ部は横リブによる拘束を避けるため、スロットが設けられる。このため、横リブの腹板とデッキプレートの溶接は断続溶接となり、溶接部のせん断応力が大きくなることに注意して設計する必要がある。デッキプレートとの溶接部の耐荷力が不足する場合には、横リブ腹板ならびに溶接材料を高材質に変更することが行われている。米国では³⁾、横桁と閉断面リブとの交差部には、横桁の断面力を伝達させるために、トラフ内部にバルクヘッドと呼ばれる隔壁を設けることがあるが、隔壁と閉断面リブ、閉断面リブと横桁腹板の溶接部に疲労損傷の発生が懸念されるため、対策として閉断面

リブと横桁腹板の溶接部に開先溶接を採用する、バルクヘッドを省略し横桁腹板の板厚を厚くするなどの対策が行われている。さらに、縦リブ支間を大きくとることで、閉断面リブの高さが大きくなる鋼床版では、横リブ交差部のスロットを大きくとる際に閉断面リブ腹板の剛性不足を懸念して、閉断面リブ内に鉛直方向の補剛リブを設ける構造が提案されている。いずれも実物大の疲労試験により強度評価がなされているが、実橋への適用事例は少ないため、類似構造の採用に際しては十分な検討が必要である。

5.3 使用性

5.3.1 舗装割れ

(デッキプレート最小厚、最小支持間隔)

鋼床版上の舗装は、縦リブ部や、主げたや縦げた腹板上の舗装のひびわれを抑制する必要がある。道路橋示方書³⁾では、縦リブ部のひびわれ抑制については縦リブ間隔の活荷重たわみが $L/300$ (L : 縦リブ間隔) 以下となるデッキプレート厚を規定している。また、主げたや縦げた上の舗装のひびわれ抑制については、輪荷重の走行位置がけたの腹板直上と一致しないような配慮が望ましいとされている。また、舗装の剛性を $2 \times 10^3 \text{ N/mm}^2$ と仮定し、舗装と鋼床版の合成効果を考慮した状態で、デッキプレートの曲率半径が $20m$ 以上となるようにすることが望ましいとされて、縦リブの剛性と縦リブ支間長(横リブ間隔)の関係の一例が示されている。

これらの規定のうち、デッキプレート厚の規定はドイツにおける知見、縦リブの剛性と縦リブ支間長の関係については旧本四公団の一連の検討から得られた知見であるが⁶⁾、舗装のひび割れが完全に防止できているとはいえず、主げた腹板上などデッキプレート下面の剛性が著しく大きい箇所については、舗装に目地を設ける等の対策も行われている。鋼床版構造とデッキプレートの局部変形、鋼床版の局部変形と舗装に発生するひずみ、舗装自体の強度の三者の関連には不明確な点が多く、舗装のひび割れ制御は今後の課題である。

5.3.2 凍結

鋼床版部は熱容量が小さく、周辺空気の影響を受けやすいと考えられるため、地盤上の路面や、コンクリート床版上の路面と比較して、結露凍結や圧雪が生じやすく、鋼床版橋梁とその前後の道路では路面状態に差が生じやすいと言われる。この対策として、①凍結防止剤の散布、②すべり止め剤の散布、③散水による消雪、④機械による除雪、⑤融雪材の散布、⑥粗面形成、⑦鋼床版下面の断熱、⑧舗装へ

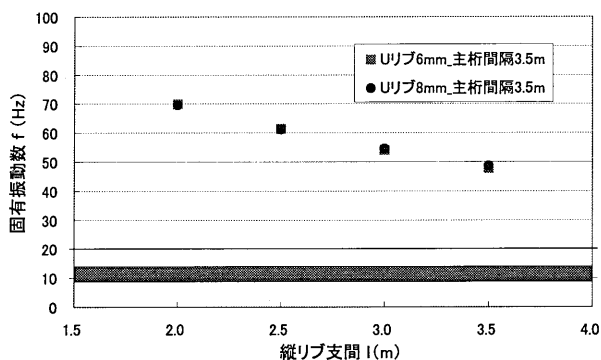
の蓄熱，⑨舗装や鋼床版への入熱，⑩凍結しにくい舗装の採用などが行われている。これらについては，それぞれ長短があるため，架橋位置，地域性，橋梁の維持管理体制などを考慮して，適切な方法を選択することが必要である。特に鋼床版下面の断熱については，凍結を促進する場合のあることが指摘されており，適用に際しては注意が必要である⁷⁾。

5.3.3 パネルの振動特性

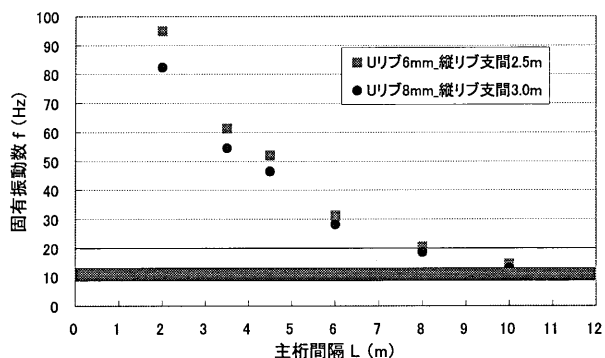
鋼床版は，コンクリート床版と比較して，重量が小さいため，剛性に対する質量が小さく固有振動数が大きいと推察される。デッキプレートの固有振動数に対し，主桁間隔（床版間隔）と縦リブ支間長が与える影響の一例を図-5.2(a)，(b)に示す。これらは，アスファルト舗装厚 80mm，デッキプレート厚 12mm，Uリブ 6mm，主桁間隔 3,500mm，縦リブ支間長 2,500mm の連続版パネル，あるいはアスファルト舗装厚 80mm，デッキプレート厚 12mm，Uリブ 8mm，主桁間隔 3,500mm，縦リブ支間長 3,000mm の連続版パネルを基本モデルした FEM を用いた固有振動解析の結果である。

図-5.2(a)はUリブの板厚ごとの固有振動数と縦リブ支間長の関係を示している。このケースではUリブの板厚の影響は小さく，縦リブ支間長が500mm長くなると固有振動数が12%程度低くなることがわかる。図-5.2(b)はUリブの板厚ごとの固有振動数と主桁間隔の関係を示している。なお，各Uリブの板厚の縦リブ支間長は一般的に用いられるもので，Uリブの板厚が6mmのモデルでは2,500mm，8mmのモデルでは3,000mmとしている。コンクリート系床版と同様，主桁間隔が大きくなると固有振動数が低下することがわかる。また，図中の着色部はトラックのパネ下振動数と一致し，振動および低周波被害が発生する可能性が高いとされる床版単体の固有周期 8)（第二期報告書）を示しているが，主桁間隔が10mを超えた場合には対策が必要となる可能性がある。

③縦リブとデッキプレートの溶接部，④縦リブ突合せ溶接部，⑤デッキプレートの順となっている。



(a) 縦リブ間隔の影響



(b) 主桁間隔の影響

図-5.2 鋼床版単体の固有振動数

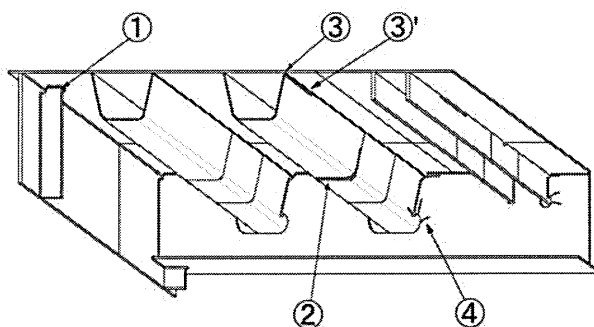


図-5.3 疲労損傷部位¹¹⁾

5.4 耐久性

5.4.1 耐疲労性

(1) 疲労損傷部位

鋼床版の疲労損傷の事例については，土木学会の「鋼床版の疲労」⁹⁾，日本道路協会の「鋼橋の疲労」¹⁰⁾などに紹介されているが，近年の都市高速の重交通路線で確認された損傷状況（図-5.3）が「厚板溶接委員会報告書」¹¹⁾に報告されている（表-5.1）。これによれば，損傷の多い順に，①縦リブと横リブの交差部，②垂直補剛材とデッキプレートの溶接部，

表-5.1 都市交通の鋼床版損傷箇所数¹¹⁾

損傷タイプ		開断面リブ		U・Y リブ	
		首都	阪神	首都	阪神
①	垂直補剛材上端部とデッキプレート溶接部	117	0	1102	161
②	縦リブ突合せ溶接部	7	0	193	36
③	トリアプとデッキプレート溶接部（デッキプレート貫通）	0	0	9	1
③'	縦リブとデッキプレート溶接部（ビード貫通）	3	0	502	22
④	縦リブと横リブの交差部	950	1210	1259	293
⑥	その他	165	2	441	18

(2) 疲労設計上の留意点

既往の各種検討結果から、各種損傷の主な要因を整理すると以下のようになる。

1) 縦リブと横リブの交差部

閉断面リブ構造では、横リブとの溶接部の閉断面リブ側に発生する損傷と横リブ側のスカラップ側に発生する場合がある。前者は、閉断面リブの高力ボルト継手近傍に発生する場合が多く、解析によると継ぎ手部の密閉ダイアフラムによる閉断面リブの断面変形性能の低減や添接板による曲げ剛性の影響により、閉断面リブの変形が拘束されることにより生じると推定される。後者は、輪荷重が横リブ上を通過する場合に縦リブを介して横リブをねじるような変形が生じることにより発生すると推定されている。

閉断面リブと横リブ交差部の構造詳細は鋼道路橋の疲労設計指針¹²⁾により、デッキ側のスカラップは設けないこと、閉断面リブ下側のスリットは閉断面リブ腹板側に切り上げを設けた形状とすることが規定されている。前者は閉断面リブの溶接ビード部に発生する応力度を低減することを意図したものであり、後者はスリット付近の応力集中を緩和することを意図したものである。これらは、実験や解析結果からよりよい構造として導入されたと考えられるが、これらの構造を採用した実橋でも疲労損傷が確認された事例があり、今後さらに性能を検証することが必要である。

平板やバルブプレートなどの開断面リブと横リブの交差部は、開断面リブの片面を横リブ腹板と溶接し、開断面リブ先端に円形のスリットを設けているが、この円形スリットの半径が30mm以下となる場合には、スリットまわりの応力が大きくなり、溶接作業性も劣るため疲労損傷が多く報告されている。このため、円形スリットの径は、35mm以上確保することが望ましい。また、開断面リブと横リブ腹板が溶接されていない側の横リブ腹板とデッキプレートの溶接部での損傷事例も報告されている。横リブの桁高さが小さい鋼床版などでは、荷重直下の開断面リブについては、開断面リブの両面を横リブ腹板と溶接する構造とすることも考えられる。ただし、曲線桁などでは、開断面リブと横リブ腹板のギャップが大きくなる場合もあるため、製作精度の大幅な向上が必要となる。

2) 垂直補剛材とデッキプレートの溶接部

垂直補剛材直上を輪荷重が通行することにより、デッキプレートとの溶接部には非常に大きな応力集中が生じる。このため、垂直補剛材直上に輪荷重走行位置があると比較的早期に疲労き裂が発生する。鋼道路橋の疲労設計指針¹²⁾では、輪荷重走行位置

に主桁腹板を配置しないこととしているが、実際の設計では、各種構造上の制約から、すべての輪荷重位置を回避して主桁腹板を配置することは困難である。垂直補剛材とデッキプレートを溶接せず、50mm～100mm離して設置し、かつ主桁腹板と隣接する閉断面リブの腹板との間隔を250mm以下と小さくすることによりこの部位の応力集中を低減することができる¹³⁾。この場合、腹板上の垂直補剛材上端部の損傷および腹板パネルの座屈耐荷力の低下が懸念されるが、垂直補剛材の上端部をデッキプレートから100mm程度離しても、腹板の座屈耐荷力に与える影響は小さい¹⁴⁾。

3) 閉断面リブとデッキプレートの溶接部

閉断面リブを用いた縦リブとデッキプレートの溶接部の疲労はイギリスのセバーン橋で損傷事例が報告されている¹⁵⁾。応力計測の結果によると、大型車の前輪が閉断面リブの腹板の横を通過することにより、閉断面リブの腹板は面外に曲げられ溶接ビードを貫通するような疲労き裂が発生する。この疲労強度は、閉断面リブとデッキプレートの溶接のど厚の大きさの影響を受けるため、欧米の基準ならびに鋼道路橋の疲労設計指針¹²⁾では、溶接部に開先を設けてのど厚を大きくすることで疲労損傷を防ぐこととしている。のど厚が閉断面リブの板厚程度に確保された場合には、溶接ルート部からビードを貫通するような破断から、閉断面リブ側の溶接止端部より閉断面リブの母材を貫通するき裂が発生するようになるが、その疲労強度は十分大きい。

閉断面リブとデッキプレートの溶接部に生じた損傷は、橋軸方向に長く進展する場合があります。数十cmの長さに成長すると、損傷が閉断面リブ腹板面に進展する場合があります¹⁷⁾。

4) 縦リブ突合せ溶接部

閉断面リブの突合せ溶接部の施工は、閉断面リブの内側に裏あて材を設けて表側から溶接するが、裏あて材として閉断面リブのダイアフラム板厚面を利用する場合には、突合せ溶接部のルートギャップを十分に確保することが困難となり、十分な断面積を確保して突合せ溶接を行うことは困難となる。このような突合せ溶接部には容易にき裂が生じる。また、帯状の鋼板などを裏あてに用いる場合においては、取り付け方法が疲労強度に与える影響は小さいが、閉断面リブと裏あて間の隙間が大きくなりやすい閉断面リブのコーナー部で良好な溶け込みが得られるよう、開先形状と溶接方法を工夫する必要がある¹⁶⁾。

5) デッキプレート

デッキプレートを貫通する損傷は、発生確率は低いものの、発生した場合には、路面が陥没し、走行

車両に危険を及ぼす可能性があるので重要である。報告されている発生状況は、輪荷重走行位置の閉断面リブとデッキプレートの溶接ルート部からデッキプレート板厚方向に進展している¹⁸⁾。発生部位は、横リブとの交差部付近、閉断面リブ支間部、架設時の部材吊金具切除跡近傍などである。横リブ交差部では、閉断面リブ内外でデッキプレートの支持状態が大きくことなるため、閉断面リブ内を輪荷重が走行することにより、ルート部近傍のデッキプレート下面から損傷が発生する。閉断面リブ支間部には閉断面リブ内外の支持状況に差はないが、輪荷重が着目位置に近づいてくるとにより、閉断面リブが下方に引張られ、デッキプレート下面に引張り応力が作用する。また直上を通過することでデッキプレート下面には、大きな圧縮応力が作用する。これらの繰り返しにより溶接ルート部から損傷が発生するものと推察される。このほか、吊金具の切除跡などデッキプレートの応力集中より発生したと推察されるもの、デッキプレートと閉断面リブの溶接部を貫通するき裂がデッキプレートに進展したと推察されるものなどが報告されている¹⁷⁾。

(3) 疲労設計荷重

近年発生している鋼床版の疲労損傷は、通常の設計で評価される公称設計応力よりも、より局所的な応力状態により発生している。したがって、まずは、構造詳細を改良して、このような局所応力発生を回避することが求められるため、鋼道路橋の疲労設計

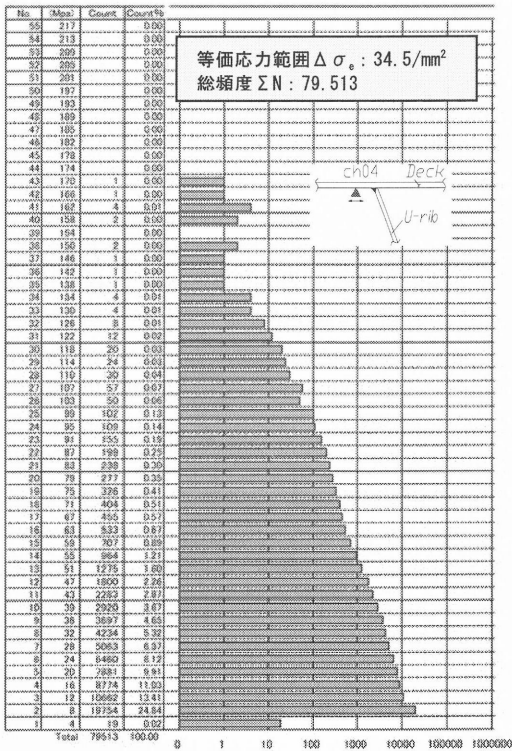


図-5.4 デッキプレート近傍の
応力頻度分布の事例¹⁹⁾

指針では、構造詳細による疲労設計が採用されている。しかしながら、鋼床版構造詳細として回避できない構造もあるため、このような部位については、局所応力の頻度分布を考慮した応力による疲労設計を行うべきである。たとえば、デッキプレートに損傷が生じた鋼床版の、夏期における72時間応力頻度分布の計測結果を図-5.4に示す¹⁹⁾。計測位置は閉断面リブ溶接止端から5mm位置のデッキプレート下面の応力頻度分布である。橋梁の交通状況毎、季節毎にこのような応力頻度分布が与えられ、かつ各部で計測されるリファレンス応力と疲労強度の関係が与えられれば応力による疲労設計が可能になると考えられる。

5.4.2 耐腐食性および材料劣化抵抗性

(1) 防食設計

鋼床版は補剛した板を組み立てて断面を構性するため、耐久性の高い防食を選択する必要がある。また、グースアスファルト舗装は、200度以上の高温で施工されるため、耐温度性能の高い塗装を採用する必要がある。

縦リブに閉断面リブを用いる場合は、施工後の塗装が困難なため密閉構造が採用されている。写真-5.1は原板ジンクリッチプライマーで施工し20年以上経過した実橋の調査結果であるが、閉断面リブ内部にはさび等の発生はみられず健全であった。

この他、防食法として耐候性鋼材を裸で使用する場合には、環境条件や地形条件、細部の構造等を十分に考慮する必要がある。

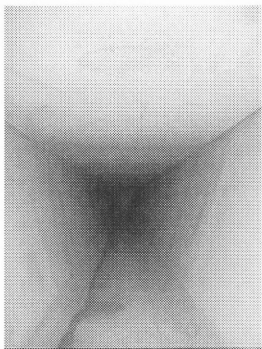


写真-5.1 閉断面リブ内部の状況

(2) 閉断面リブ最小板厚（耐候性）

道路橋示方書では、縦リブの最小板厚は8mm以上と規定されているが、腐食環境が良好又は腐食に対して十分な配慮がなされる場合には、縦リブの最小板厚を6mmとしてよいと規定されている。耐候性裸

仕様の鋼材で鋼床版を製作する場合、6mm 板厚の閉断面リブを用いる場合には、保護性さびが確実に形成されるよう十分配慮する必要がある。

5.5 維持管理性

5.5.1 検査方法¹⁹⁾

一般に鋼床版の損傷は、主に輪荷重直下の応力が集中する溶接部に生じ、塗膜われが生じている場合が多い。したがって、目視により塗膜われ箇所を見出し、塗膜を除去して、目視あるいは、PT（浸透探傷試験）や MT（磁粉探傷試験）により損傷の有無や大きさを確認することができる。

閉断面リブを用いた鋼床版の閉断面リブの溶接ルート部からデッキプレート板厚方向に進展する損傷については、目視により確認することが困難である。このような損傷は、デッキプレートを貫通するまでは、大きな変状が現れないため、UT（超音波探傷試験）等による調査が必要となる。デッキプレートを貫通すると、直上の舗装が容易に損傷するため、繰り返し舗装が損傷する箇所では、舗装補修時にデッキプレート表面を目視あるいは MT により確認し損傷の有無を調査することができる。また、デッキプレートを貫通する損傷が発生した場合には、閉断面リブ内部に浸透水が滞水するため、打音により滞水の有無を確認することができる。また、鋼床版を下面から赤外線カメラにより撮影することで、滞水箇所を確認することもできる。

5.5.2 損傷と各種補強方法

鋼床版の損傷は主に溶接部に発生するため、一般に補修は困難である。損傷部の補修に関しては、単に復旧するだけでなく、その発生要因を明らかにした上で補強を行う必要がある。たとえば、製作時の溶接不良等が原因と考えられる場合には、再溶接による補修が考えられるが、現場環境で、かつ作業姿勢が制約され上、軽量の鋼床版桁では振動による影響も大きく、溶接欠陥や新たな応力集中源の発生などが懸念されるため慎重に行う必要がある²⁰⁾。

あて板による補修は比較的容易に施工可能であるが、閉断面リブの密閉環境を保持しながら施工する場合には、補強板の大きさやボルト配置について十分検討するとともに、現地での施工誤差を吸収できる構造とする必要がある。特に補強材を用いた補強では、補強材により応力が再配分され新たな応力集中箇所が生じないことを FEM 解析等により確認する必要がある^{21), 22)}。

近年、アスファルト舗装を SFRC（鋼繊維補強コンクリート）等の剛性のある舗装に置き換え、鋼床

版各部の応力を大幅に低減する工法も採用されてきている^{17), 18)}。供用下で舗装施工を行う場合には、作業時間、作業スペースに制約が大きいため、打ち継ぎ目や養生が不十分にならないよう留意するとともに、水がコンクリート舗装の下面に侵入することがないように施工することが重要である。

5.6 社会・環境適合性

鋼床版は、1m²あたり 0.25t～0.30t の重量となる。単位重量あたりの製作架設単価を 50 万円とすると単位面積あたりの工費は、12～15 万円/m²となる。地盤条件や桁高制限、急速施工などの特別な理由がない場合、RC 床版（設置 3 万円/m²、取替え 9 万円/m²）と同程度の LCC コストとするには、RC 床版（約 40～50 年程度）の 2 倍とすると鋼床版は 100 年以上の寿命を確保する必要がある。

5.7 まとめ

鋼床版は従来の設計法を見ても前章までのコンクリート系床版と異なっており、横並びとすることは困難である。本章では鋼床版の各性能について現状の知見をとりまとめた。昨今、耐疲労性の問題が取り上げられているが、各機関で疲労き裂発生メカニズムや疲労耐久性の高い構造について、種々の検討が行われおり、耐疲労性については RC 床版同様、克服されると考えられる。耐疲労性の合理的な性能設計手法についても確立されていくであろう。その他の性能についても、鋼床版耐久性を考慮した構造検討に際し、本章を参考としていただければ幸いである。

参考文献

- 1) (社)土木学会：鋼・合成構造標準示方書[設計編]，2007. 3.
- 2) (社)日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，1980. 8.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，2002. 3.
- 4) 土木学会 鋼構造委員会道路橋床版の合理化検討小委員会 鋼床版分科会：鋼床版の構造設計と研究動向，第五回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 229～234，2006. 7.
- 5) 名古屋高速道路公社：鋼床版の合理化と耐久性向上に関する調査研究報告書，1995. 10.
- 6) 多田宏行 編著：橋面舗装の設計と施工，鹿島出版会，1996. 3.
- 7) 宮本重信，室田正雄：鋼床版橋の路面凍結と蓄

- 熱材封入による抑制, 橋梁と基礎, 1998. 6.
- 8) (社) 土木学会: 道路橋床版の設計の合理化と耐久性の向上, pp. 107~114, 2004. 11.
- 9) (社) 土木学会: 鋼床版の疲労, 1990. 9.
- 10) (社) 日本道路協会: 鋼橋の疲労, 1997. 5.
- 11) (社) 土木学会: 厚板溶接継手に関する調査研究小委員会報告, pp. 155~164, 2007. 10.
- 12) (社) 日本道路協会: 鋼道路橋の疲労設計指針(案), 2002. 3.
- 13) 山本泰幹, 斉藤亮, 川畑篤敬, 横山薫: 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の改良ディテールの局部応力の検討, 土木学会年講概要集 Vol. 60, CS10-014, 2005.
- 14) 横山薫, 山本泰幹, 斉藤亮, 川畑篤敬: 鋼床版デッキプレートと垂直補剛材溶接部の改良ディテールの腹板補剛機能の検討, 土木学会年講概要集 Vol. 60, CS10-015, 2005.
- 15) J. R. Cuninghameh 他: Strengthening and refurbishment of Severn Crossing, Proc. Instn Civ. Engr Structs & Bldgs, Vol. 194, pp. 37-49, 1992. 2.
- 16) 三木千壽, ミューラホルヘ: 鋼床版縦リブ現場継手部の疲労強度について, 鋼構造論文集, 第5巻第18号, pp. 11-20, 1998. 6.
- 17) 平林泰明, 牛越裕幸, 木ノ本剛: 首都高速道路における鋼床版疲労損傷, 土木学会 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 39~53, 2007. 8.
- 18) 菊池孝雄, 児玉孝喜, 後藤和満: 湘南大橋における鋼床版の疲労対策, 土木学会 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 1~10, 2007. 8.
- 19) 国土技術政策総合研究所資料第188号: 鋼部材の耐久性向上に関する共同研究, 2004. 7.
- 20) 山田健太郎: 重交通下における鋼床版の疲労損傷-名古屋周辺での事例-, 土木学会 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 11~18, 2007. 8.
- 21) 村越潤, 梁取直樹, 宇井崇: 鋼床版の疲労損傷と補修・補強技術に関する検討, 土木学会 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 19~37, 2007. 8.
- 22) 堀江佳平, 高田佳彦: 阪神高速道路の鋼床版疲労損傷の現状と取り組み, 土木学会 鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, Vol. 10, pp. 55~69, 2007. 8.

第6章 まとめ

本編におけるRC床版、PC床版、鋼・コンクリート合成床版の設計計算例は、既往の設計技術を基に性能照査型設計の観点から各要求性能を満たすための照査手法についての試みを行ったものである。これらの照査方法の中には、これまでに床版の設計に一般的に用いられたものとは異なる手法も含まれており、その妥当性については十分に議論を尽くしたとはいえない。特に、部分係数法の導入によって、これまでの許容応力度設計法を主体とした設計とは概念の異なる安全率（部分係数）の数値化が必要となるが、ここでの部分係数は、道路橋示方書¹⁾やコンクリート標準示方書²⁾、鋼・合成構造標準示方書³⁾等の記述を参考に考えられる数値を試みに提案したものであり、5つの部分係数（構造物係数、作用係数、構造解析係数、材料係数、部材係数）を定めるにあたって必要な全ての検討を行ったとは言えない。したがって、この設計計算例を契機に、今後の多方面の議論を喚起することを期待するものである。

しかしながら、本計算例に用いた部分係数を用いる限りでは、既往の設計手法によって設計された各種道路橋床版と大きく異なる諸元となることがないことが確認された。

特に、床版厚については、従来の安全性だけを主体とした照査のみでは版厚をかなり薄くすること

が可能であるが、一方で、耐疲労性や施工安全性、経済的合理性などのこれまでみなし仕様や経験的手法として潜在的に確保されていた性能を顕在的に照査した結果、従来の版厚と概ね同等のものとなることがわかった。

鋼床版については現在、各機関で特に疲労現象の解明について検討が進められている段階であり、計算例の作成は時期尚早と判断し、本編では今後の高耐久性鋼床版を設計する際の参考資料となるよう、性能毎に昨今の検討概要の紹介を中心として構成した。

なお、使用性や社会・環境適合性などの社会的な要求にかかわる性能については、本来、橋梁全体としては照査すべき性能項目であり、実際の橋梁設計においては、本計算例による床版単体での照査とは別に、橋梁全体での照査が不可欠である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅱ 鋼橋編，丸善，2002.
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書，構造性能照査編，2002年制定，丸善，2002.
- 3) 土木学会：鋼・合成構造標準示方書 設計編，2007.