

No.	著者	タイトル	文献名	発表年月	床版種類	キーワード
148	東京都建設局道路管理部	走行車両の軸重集積調査委託報告書		H11.2	重荷重	
149	栗本龍彦、安田法律、岡崎展也	第21回阪神高速道路路況調査報告書	阪神高速道路路況調査報告書	2002	重荷重	
150	東京都建設局道路管理部	走行車両の軸重集積調査報告書		H14.3	重荷重	
151	中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太、石尾真理	橋梁を用いた車両重量計測システムの開発	土木技術資料44-12	2002	重荷重	Bridge Weight-in-Motion
152	石尾真理、中谷昌一、玉越隆史、中洲啓太	多様な橋梁条件に対するWIMの適用型に関する考察	土木学会第58回年次学術講演会	H15.9	重荷重	Weight-in-motion、車両重量計測、自動車荷重、維持管理
153	松尾一志、山口栄輝、川村進一、小林登介	2 径間連続橋を用いたWIMの精度	土木学会第58回年次学術講演会	H15.9	重荷重	Weight-In-Motion、交通荷重、斜橋、連続桁橋
154	小林登介、三木千尋	F B G 光ファイバセンサーを用いたWIMの精度	土木学会第58回年次学術講演会	H15.9	重荷重	FBG、光ファイバセンサー、Weight-In-Motion、モニタリング
155	小堀達也、山田健太郎	荷重集積調査に基づく道路橋の疲労要因の分析	土木学会第58回年次学術講演会	H15.9	重荷重	疲労、Bridge Weight-In-Motion、大型車両、過積載
156	坂山功一、井上嗣三、永原隆	道路橋床版の衝撃係数に関する実験	構造工学論文集 Vol.1.35A	1989.3	衝撃係数	道路橋床版、衝撃係数
157	国広哲男、井刈治久、他1名	床版の曲げモーメント計算図表 その1	土木研究所資料第771号	S47.9	設計	鉄筋コンクリート床版、曲げモーメント、トラス橋
158	国広哲男、井刈治久、他1名	床版支持けたの不等沈下によって生じる床版の曲げモーメント計算図表 その2	土木研究所資料第875号	S48.9	設計	鉄筋コンクリート床版、曲げモーメント、けた橋、荷重分配構架
159	前田幸雄、松井繁之	道路橋RC床版の設計曲げモーメント式に関する一考	土木学会論文報告集第252号	1976.8	設計	道路橋、RC床版、設計曲げモーメント
160	佐伯彰一、高野義武、他1名	床版支持けたの不等沈下によって生じる床版の曲げモーメント計算図表 その3	土木研究所資料第1338号	S53.2	設計	床版支持けた橋、支持けた不等沈下、床版曲げモーメント、理論解、支持けた本数、補強効果
161	平川達也、松尾和政、堀川都志雄、藤田琢也	主桁と結合された床版の軸荷重点近傍の応力と断面力について	第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集	1998.10	設計	床版の応力と断面力、軸荷重、主桁と結合された床版
162	大山勇、嶋田昇	連続合成桁橋および止め構造の現状と課題	第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集	H15.6	設計	連続合成桁、止め、設計基準、設計法
163	榎山啓久、山本晃久、高林和生、田中正明、戸川邦彦、玉置一清、上坂靖男、正司明夫、野瀬智之、和内博樹	鋼道路橋コクリート系床版の構造と設計の現状と課題	第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集	H15.6	設計	道路橋床版、床版の構造、床版の解析手法
164	秋元丸子、川畑篤敬、大田孝二、中原智法、内田大介、田中千尋、浜田純夫	性能照査型設計の現状分析と道路橋床版への応用に関する考察	第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集	H15.6	設計	性能照査型設計、床版、要求性能、性能照査
165	毛明隆、浜田純夫、松尾栄治、樫秋寧	国内外のデータによる土木学会押抜きせん断強度式の評価について	土木学会第58回年次学術講演会	H15.9	設計	RC床版、押抜きせん断耐力、圧縮強度、鉄筋比、床版寸法
166	日本道路公団試験所コンクリート試験室	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	試験所技術資料第413号	S60.3	その他	
167	日本道路公団	維持修繕要領（橋梁床版編）			その他	ひびわれ幅
168	新時代における阪神高速道路の維持管理研究会	新時代における阪神高速道路の維持管理			その他	維持管理
169	独立行政法人土木研究所	軸荷重走行試験機クラック計測システム資料（抜粋）			その他	クラック計測

第2分科会報告

道路橋床版の性能照査型設計

まえがき	65
第 1 編 道路橋床版の性能照査型設計指針 (案)	
I 総則	
1. 適用範囲	67
2. 用語の定義	68
3. 要求性能	69
4. 性能照査	70
II 性能照査型設計	
第 1 章 安全性	
1.1 耐力性	72
1.2 疲労耐久性	78
1.3 材料耐久性	85
第 2 章 使用性	
2.1 供用性	94
2.2 社会・環境適合性	99
第 3 章 社会・環境適合性	
3.1 経済的合理性	102
3.2 環境適合性	105
第 2 編 性能照査型設計資料	
第 1 章 現行道示床版の保有性能	
1.1 振動に対する保有性能	107
1.2 LCA	108
1.3 塩害に対する保有性能	109
第 2 章 RC 床版の疲労耐久性照査例	
2.1 はじめに	111
2.2 交通荷重実態	111
2.3 所要安全率の設定	111
2.4 押し抜きせん断疲労強度評価方法	112
2.5 疲労耐久性照査計算	112
2.6 たわみと疲労耐久性の関係	113
2.7 使用性に対する疲労耐久性照査	114
2.8 まとめ	114

第 3 章 鋼床版の疲労損傷と疲労耐久性を考慮した構造細目	115
第 4 章 材料の耐久性に関する既存資料の調査	
4.1 はじめに	125
4.2 鋼材料に関する資料調査	125
4.3 コンクリート材料に関する資料調査	126
4.4 まとめ	128
第 5 章 材料の耐久性に関する既存資料の調査	
5.1 損傷部位と損傷メカニズム	129
5.2 点検計画の策定	129
5.3 評価・判定手法	130
5.4 対策工法の選択	130
5.5 ライフサイクルコストと維持管理計画	130
第 6 章 ライフサイクルコストとリスクマネジメント	
6.1 性能照査型設計とライフサイクルコスト	132
6.2 リスクコストの算出	132
6.3 維持管理コストとリスクコスト	133
6.4 まとめ	134
第 7 章 床版の環境負荷評価 (LCA) 試算例	
7.1 算出における前提条件	135
7.2 二酸化炭素排出量の算出	135
7.3 床版形式による環境負荷の比較	136
7.4 LCA 算出原単位の比較	137
7.5 まとめ	138
あとがき	139

まえがき

平成 14 年度の道路橋示方書の書式が改訂され、道路橋の設計に際して要求される性能が条文化されることとなった。構造物に期待される性能を規定する設計法は、構造物が使用される状況を想定し、破壊に対する安全性や耐久性に対する性能を明確に示すことで、費用対効果を明らかにすることができる設計手法である。構造物の性能には、基本性能としての安全性や耐久性に加えて、構造物の使われ方や建設される場所に応じた供用性や経済性、そして環境との適合性等が強く要求される場合も想定される。性能設計法は、設計される構造物に要求される各種の性能を規定し、設計された構造物が所定の性能を満足していることを照査する設計手法である。性能設計では要求される性能の内容に対しては、関係者のコンセンサスが必要であり、コンセンサスの内容を明確化するために、指標の選択と要求値の規定が必要となる。また、設計された構造物が要求された性能を満足していることを、何らかの方法で照査することが必要となるが、性能を照査する方法の妥当性の検証と、照査結果に対する関係者のコンセンサスが必要と考えられる。

土木学会鋼構造委員会「鋼橋床版の調査研究小委員会 性能照査分科会」(平成 12 年 10 月)では、鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)を提案するとともに、鋼橋で使用されることの多い RC 床版に対して指針を適用した計算例を示した。鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)では、鋼橋床版に要求される性能を、供用性能、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能、マネジメント性能の 5 つに分類し、各要求性能の意図を理解しやすいように性能項目を列挙した。各性能項目に対する要求レベルについては、平成 8 年版の道路橋示方書により設計される床版を想定しつつ、各性能項目に対して要求されるレベルを概念的な表現により示した。また、性能の照査方法については、道示の許容応力度設計法、コンクリート標準示方書の限界状態設計法を肯定しつつ、実験等による照査方法についても示した。また、指針を適用した計算例については、同じ幅員を有する橋梁を、それぞれ 2 主桁とした場合と 4 主桁とした場合について要求性能を照査することで床版の設計例を示し指針の適用性に対する理解を容易にすることを試みた。

しかしながら、学会の各分野で提案されている性能設計指針との整合性や、照査過程の複雑性を指摘する声も大きく、新形式の床版への適用性についての問題点が指摘された。

そこで、平成 13 年末より、新たに召集された土木学会鋼構造委員会「道路橋床版の調査研究小委員会 第 2 分科会」では、前回の指針(試案)で指摘された課題を解決することにより、実務者がより理解しやすい道路橋床版の性能照査型設計指針をめざして活動を開始した。まず、最近の各種性能照査型設計指針と比較することで、床版に関する要求性能を再度整理することを試みた。その結果、性能照査型設計の枠組みの見直しを行い、耐久性や維持管理性、社会環境への適合性等の社会的な要求に対応できる性能を明確に定義することとし、床版に要求される基本的な性能を、安全性、使用性、社会・環境適合性とするとともに、安全性を具体的に確保するための性能として、耐荷力性能、疲労耐久性、材料耐久性を位置づけた。同様に、使用性を確保するための性能として供用性と維持管理性を、社会・環境適合性を確保するための性能として経済的合理性、環境適合性を位置づけた。

本報告書では、第1編に道路橋床版の性能照査型設計指針(案)を示し、各種性能に対して、要求性能を明示するとともに、具体的な照査項目、照査に際して求められる作用(荷重)のレベル、照査を行う場合の指標や照査方法、作用を受けた際の構造物の状態レベルを示すこととした。この指針では、床版の性能を作用レベル(荷重の大きさ等)と構造物に期待される強度を状態レベル(安全率の大きさ等)の両面から規定することによって、構造物の重要性や荷重の厳しさの両面が考慮できるような指針とすることで、新形式床版の合理的設計を可能としている。

第2編では、設計実務者にとって非常に理解が困難との指摘が多く寄せられた使用性ならびに社会・環境適合性に関して、具体的な設計例を示すことで、設計実務者の理解をはかることを試みた。

性能設計法は、従来の道路橋示方書の条文によって設計する場合に比較して、非常に自由度の高い設計手法であり、新しい材料や新しい構造の出現を容易にするものであるが、その反面、設計された構造物が従来の延長線上にないため、リスクをも含んだ設計法であるといえる。しかしながら性能設計法は、コスト縮減への要請や公共工事におけるアカウンタビリティ等の社会的要請への回答として、道路橋にかかわる技術者の創造性を育むものとして、さらには、欧米諸国に先行されがちな規準国際化への対応として、大きな期待が寄せられており、ここで示される「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)」がその一助となることを期待し、活発な分科会活動によりまとめられたものである。

(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
性能照査型設計分科会

主査 川畑 篤敬

第1編 道路橋床版の性能照査型設計指針(案)

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、その実現方法は原則自由とし、新技術や新材料の利用を阻害しないための設計法として性能照査型設計法が望まれている。さらに、この設計法によることで、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。

これに対して、現行の道路橋示方書等では、これまでの橋梁構造や構造材料を前提に具体的な材料や寸法を指定したいわゆる仕様規定(みなし適合仕様)を性能照査型の書式にあらためることに主眼をおいた改訂が進められているものの、実際の個別の構造に対する照査手法やその評価については具体的に記述されていない。そのため、現時点では従来の仕様規定型の設計法を基に設計を行っているのが実情であり、性能照査型設計を一般に認知、普及するには至っていないと言える。

性能照査型設計法を採用した本指針(案)の主な目的のひとつは、新形式床版の導入機会の拡大、迅速化、これに伴う技術開発意欲の向上である。道路橋示方書等における床版の仕様規定は、標準的な鉄筋コンクリート床版には、設計の簡便さ等一定の効果があつたが、長支間の床版や新構造形式、新材料を用いた床版にはむしろ技術的な制約となってきた。また、輪荷重走行試験機等による研究により、過酷な交通環境下にある鉄筋コンクリート床版の研究が進み、より合理的な指針等を整備する環境が整いつつある。

このような中、鋼橋床版の調査研究小委員会(土木学会鋼構造委員会、松井繁之委員長、平成9年~平成12年)では、「鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)」(平成12年11月)(以下、前委員会指針とする)として、鋼橋の床版に関する指針を作成したが、今回、さらに床版に関する最新の技術導入や、性能照査型設計に対する認識の高まりに応えるため、新たに指針(案)を作成した。本指針(案)の特徴は、性能照査型設計の枠組みの見直しを行い、耐久性や維持管理性、社会環境への適合性等の社会的な要求に対応できる性能を明確に定義したこと、および供用性に対する具体的な照査項目を細分化したこと等である。

2. 用語の定義

本編に用いる用語は次のとおりとする。

- ・ 要求性能：道路橋床版の目標とする性能。
- ・ 照査項目：要求性能を細分化したもの。一般に、各照査項目に関して照査指標を定める。
- ・ 作用：道路橋床版に与える外的条件。荷重等の物理的作用，環境等の化学的作用がある。
- ・ 要求レベル：道路橋床版が果たすべき性能のレベルの総称。外的条件の程度を表す作用レベルと，床版が果たすべき性能の程度を表す状態レベルがある。
- ・ 作用レベル：照査項目に対応した作用の大きさ等であり，期間の影響も含む。
- ・ 状態レベル：作用を受けた床版に求められる状態。一般には、「状態レベル」を「要求レベル」と定義する場合もある。作用の応答値に対する許容値や安全率として表す。
- ・ 照査指標：照査項目の要求値，または床版の保有値を評価する物理量等。
- ・ 保有値：照査項目に対応して道路橋床版が持っている物理量を照査指標で表したものの。
- ・ 設計供用期間：橋梁全体や道路橋床版に設計上期待される供用期間。床版の取替え等を考慮することで，橋梁全体と道路橋床版では設計供用期間が異なる場合もある。
- ・ 耐用年数：道路橋床版が，照査項目に対応する性能を保有できる期間。耐久性に関する照査において，照査指標を期間で表す場合には，床版の保有値として表現される。
- ・ 安全率：照査項目に対応して，床版が保有している性能のレベル（保有値）と必要とされる状態レベル（要求値）の比率。状態レベルそのものを安全率で表す場合もある。
- ・ 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。
- ・ 鋼床版：鋼板により構成される床版。
- ・ 合成床版：鋼板とコンクリートのように，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。FRPとコンクリートの合成や，PC床版とRC床版の合成等も含む。）

【解説】

性能照査型設計法では，一般に，まず要求性能を規定するために照査項目に細分し，その照査項目ごとに作用レベルおよび状態レベルを要求値として設定する。つぎに，道路橋床版の保有値を照査指標で評価し，上述の要求値と比較して照査する構成になる。従来の床版設計法では，いわゆる仕様規定を特徴としているが，本指針（案）では要求性能による性能規定を基本にしている。

用語の定義においては，前委員会指針における用語に対し，性能照査型設計に対する共通認識の形成や，既存の他の設計指針に用いられる用語等を調査して追加，ならびに修正を行っている。

3. 要求性能

3.1 一般

- (1) 道路橋に使用する床版は，以下に示す3つの基本性能に対応して，7つの要求性能に分類される。

（基本性能）	（床版に着目した要求性能）
安全性	耐荷力性能，疲労耐久性，材料耐久性
使用性	供用性，維持管理性
社会・環境適合性	経済的合理性，環境適合性

- (2) 各要求性能について照査項目を規定する。

【解説】

- (1) ここでは，前委員会指針で取り上げた5つの性能に対して，既存の設計指針の比較検討結果を基に要求性能を定義した。一般に，構造物に求められる上位の性能としては，安全性，使用性，社会・環境適合性等の3つの基本性能があげられる。一方，設計の実務において，これらの基本性能は，対象とする構造物に対応して，耐荷力や疲労耐久性等の具体的な性能として表現する必要があり，道路橋床版においては図-I.1のように整理できる。

既存の指針等では，安全性に分類される構造強度に関わる物理的な性能に比べ，使用者に対する利便性や社会への影響に関する性能，マネジメントに関する性能については整理されている事例は少ないが，これらの性能も床版に必要な社会的な要求性能であることから，これらを維持管理し易さ（維持管理性）や経済性の確保（経済的合理性），環境保全

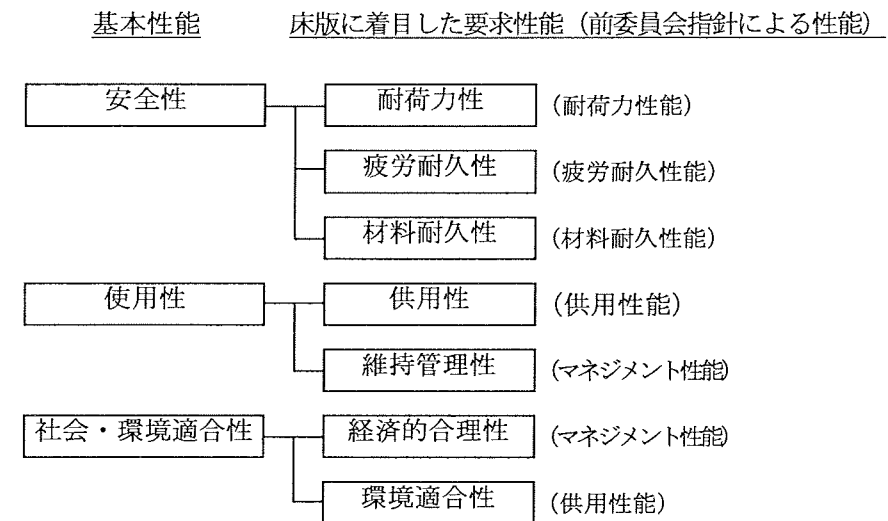


図-I.1 床版の要求性能

（環境適合性）等の観点から性能として明示した。

また，使用性を利用者側の使用性（＝供用性）と管理者側の使用性（＝維持管理性）の2種類に分類することで，供用期間中に実際に時系列で検討を必要とするであろう現象を使用性として整理した。

- (2) 各要求性能に対してこれ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する。具体的な項目は「II 性能照査型設計」において示す。

3.2 床版に着目した要求性能

- (1) 耐力性能：この性能は、設計供用期間中の荷重作用に対して、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。
- (2) 疲労耐久性：この性能は、床版の設計供用期間中における交通荷重、およびその他の繰返し作用に対し、所用の耐力性能や使用性を確保する性能である。
- (3) 材料耐久性：この性能は、床版を構成する材料が受ける作用に対し、床版の設計供用期間中を通じて安全性や使用性の低下を招く有害な劣化・損傷を生じない性能である。
- (4) 供用性：この性能は、床版の設計供用期間中において、利用者および橋梁に隣接して居住する第三者に対する体感性や利便性を確保する性能である。
- (5) 維持管理性：この性能は、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。
- (6) 経済的合理性：この性能は、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性能である。
- (7) 環境適合性：この性能は、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性能である。

【解説】

各要求性能の詳細については、「Ⅱ 性能照査型設計」において述べる。

4. 性能照査

性能照査は、一般に以下に示す構成で行われる。

- (1) 床版の性能照査は、要求性能の各照査項目について行う。
- (2) 照査項目に対して、作用する荷重や周辺環境から作用の要求レベル（作用レベル）を規定する。
- (3) 照査項目に対して、床版が保つべき状態（状態レベル）を規定する。
- (4) 作用レベルと状態レベルを、照査指標を用いて要求値として表す。
- (5) 床版の材料や構造の特性値等に対して、床版の保有値を照査指標により表す。
- (6) 照査指標の要求値と保有値を比較して照査する。

【解説】

本項では、照査項目に対応した照査方法の構成を記した。

照査指標を用いた性能照査の方法の例を図-1.2に示す。照査指標で表した要求値と保有値については、たとえば、耐力性能について、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」として、荷重の特性値は「作用レベル」、重要度等から決まる安全率を「状態レベル」と考え、作用の結果発生する断面力に状態レベルをあわせて表現したものが「要求値」となる。また、材料強度の特性値に対する断面耐力が「保有値」であり、保有値と要求値を比較することで照査を行う。

照査の方法としては、実験・解析による方法、各種の環境基準値で判定する方法、限界状態設計法による方法、許容応力度による設計方法等のいずれか、またはこれらの組み合わせ等が考えられる。

なお、既存の設計資料等による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出来る。

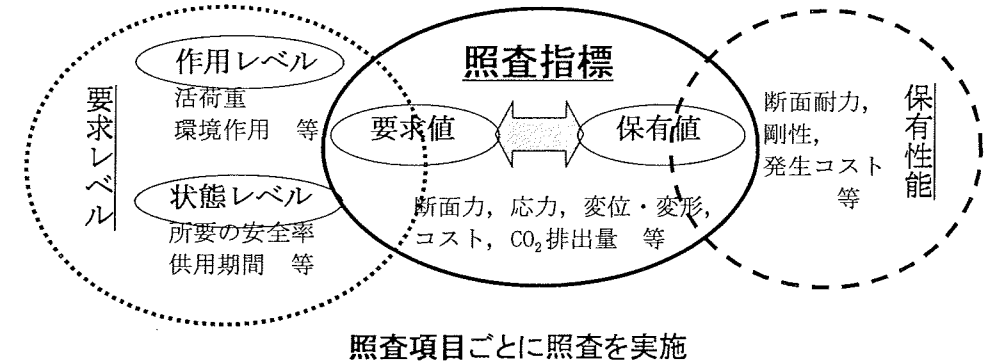


図-1.2 各照査項目における性能照査手法

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-1.3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、作用レベル (S_a, S_b, S_c)・状態レベル (N_{r1}, N_{r2}) の要求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、その床版の保有性能であり、作用レベル S_a に対する保有性能 N_a と状態レベル N_r の大小関係を照査し、所要の安全率が確保されていることを確認する。

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レベル $S_a=140\text{kN}$ とした場合、状態レベル 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、床版の保有値である S-N 曲線に対する載荷回数の安全率 N/N_r は1.0を下回り、要求性能を満たすことができない。一方、状態レベルを N_{r2} （設計供用期間40年に相当する載荷回数）とした場合、または作用レベルを道示荷重に相当する作用レベル $S_c=100\text{kN}$ とした場合には、 $N_{r2} < N_a$ または $N_{r1} < N_c$ となり、 N/N_r が所要の安全率 (≥ 1.0) 以上であるかどうかを確認することで性能が照査される。

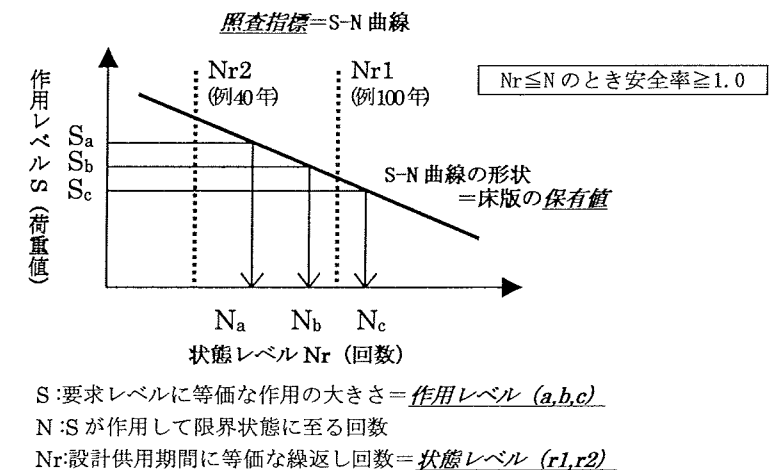


図-1.3 疲労耐久性照査における性能照査の事例（概念）

II 性能照査型設計

第1章 安全性

1.1 耐荷力性能

1.1.1 要求性能

設計供用期間中の荷重作用に対して所定の安全性が損なわれないこと。
道路橋床版の耐荷力性能は以下の2つの性能に分類できる。

- (1) 荷重を直接支持する版としての耐荷力性能
- (2) 橋梁構造の一部材としての耐荷力性能

【解説】

道路橋床版の耐荷力性能としては、床版自身の耐荷力性能と、橋梁構造の一部としての耐荷力性能の、2つの性能が要求される。また、耐荷力性能は建設当初のみ確保されるのではなく、床版の設計供用期間が経過した後において、所定の安全率が確保されていない。たとえば、道路橋示方書に規定されるRC床版では、設計供用期間が経過した段階で、設計計算上の抵抗部材となる鉄筋と圧縮域のコンクリートが健全な状態であることが期待されている。材料の劣化や自動車荷重の繰り返しによって、耐荷力に対する所定の安全率が確保できなくなると、補修補強を検討する時期（耐荷力性能の管理限界状態）となる。鋼床版等では、鋼材の腐食や疲労亀裂等の進展によって、断面性能に影響する時期が耐荷力性能の管理限界状態となる。

1.1.2 照査項目

- (1) 荷重を直接支持する版としての耐荷力性能
 - 1) 床版形状や支持状況等の境界条件下で、荷重により生じる断面力に対して耐荷力を有すること
 - 2) 床版を支持する構造との接合部に生じる断面力に対して耐荷力を有すること
 - 3) 輸送架設時に作用する荷重に対して耐荷力を有すること。
- (2) 橋梁構造の構成部材としての耐荷力性能
 - 1) 主桁の一部として床版に作用する断面力に対する耐荷力を有すること。
 - 2) 床版を支持する主桁間の荷重分配に対する耐荷力を有すること。
 - 3) 地震や風、車両の衝突等の水平荷重に対して耐荷力を有すること。
 - 4) 版としての耐荷力性能との組み合わせにおいても耐荷力を有すること。

【解説】

- (1) 1) 道路橋床版は、床版上に載荷された死活荷重を主桁に伝達することが基本の性能となるが、鋼桁による床版の支持条件は橋梁の各部位により異なっている。たとえば、

主桁間の床版は2辺支持版であり、主桁から外側は片持ち版、端横桁で支持された桁端部の主桁間床版は3辺支持床版とみなされる。その他、主桁に加えて各横桁で支持される場合には4辺支持版となり、桁幅の細い箱桁や波形鋼板等面外剛性の大きな主桁で支持される場合には支持辺が単純支持とは見なせない場合もある。

また、大きな形鋼を使用した合成床版や、供用期間中に方向性を有するひびわれが発生したコンクリート床版では、直交する方向で剛度差が大きくなり、断面力の分担や床版の変形に異方性を示す場合がある。このような床版についても異方性を適切に評価して、耐荷力を確保することが必要である。

- 2) 道路橋床版がその機能を十分に発揮するためには、床版を支持する部分の健全性が確保されなければならない。特に、桁と合成されて用いられる床版においては、鉛直方向だけでなく、水平方向や回転等の断面力が作用すると考えられる。これらの断面力について所定の安全率が確保されることを確認しなければならない。
- 3) 橋梁の床版には、①仮設の型枠支保工を使用して、コンクリート床版全体が現場で施工される場合、②プレファブ合成床版等、完成後もその一部あるいは全部が強度部材としても利用される型枠支保工を使用することで、工場と現場で分担して施工される場合、そして③プレキャスト床版や鋼床版のように主として工場で施工される場合がある。①や②の場合には床版の打設順序によって、材齢の小さな床版コンクリートに桁の変形にともなう施工時断面力が作用し、②の場合には完成時には架設時の断面力が残留し、③の場合には輸送や架設時に、完成時とは異なる向きの断面力が生じる場合がある。このような輸送架設時に生じる断面力に対しても耐荷力を確保しなければならない。
- (2) 1) 道路橋の床版は、合成桁はもとより、非合成桁として設計された場合においても、桁とコンクリートの付着や摩擦があるかぎり、桁と床版は一体として挙動すると考えられる。したがって、支間中央等正の曲げを受ける箇所では床版コンクリートに発生する圧縮応力に対して耐荷力を確保し、連続桁の中間支点等負の曲げを受ける箇所では、橋軸方向の鉄筋等により、床版に有害なひび割れが発生することを抑止しなければならない。
- 2) 道路橋の床版は、主桁を支持点とした荷重分配作用を考慮して設計しなければならない。たとえば、片持ち床版の先端に、大型の遮音壁等の大きな荷重が載荷される場合には、隣接する床版支間の設計ではその影響を考慮する必要があり、特に床版にプレストレスによる荷重を与える場合には、死荷重による断面力の分布状況を十分に把握した上で、導入するプレストレス量を決定しなければならない。また、主桁の剛性差の影響を考慮して設計しなければならない。道路橋示方書でも考慮されているように、桁位置で単純支持されていると仮定して求めた床版曲げモーメントに対して、床版を支持する桁の相対剛度の差が大きいために、剛性の小さな縦桁等の支持点が他の支持点に対して相対的に沈下することにより付加される曲げモーメントを加算した断面力に対しても耐荷力を有する必要がある。
- 3) 道路橋の床版は、地震荷重や風荷重、衝突荷重等に対して、高欄基部等の作用点付近の耐荷力を確保することに加えて、横荷重を下部工まで伝達する性能が期待される。特に横構が省略され、比較的小さな横桁が使用される橋梁では、横荷重に対する耐荷力が床版に求められる。このような場合には、荷重伝達経路を明確にし、荷重の作用点から下部工の伝達点までの耐荷力を確保する必要がある。

1.1.3 作用レベル

- (1) 床版は以下の2種類の活荷重状態と、衝撃による影響を加える
- 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)に示された活荷重と道路橋示方書・解説Ⅰ共通編¹⁾に示される主荷重、従荷重、特殊荷重に係数を乗じて組み合わせた設計荷重に対して、耐荷力を確保すること。

【解説】

構造物の耐荷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（衝撃含む）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いる。過去の構造物の耐荷力に関連した破壊を見ると、劣化していない構造物で耐荷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。主荷重下で耐荷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荷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荷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荷力照査では、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、橋梁全体の耐荷力性能が失われないよう構造部材の一つとして、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ともなう部材耐荷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、主桁等の支持点への荷重の伝達性能、さらには主桁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荷性能の照査も重要である。

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

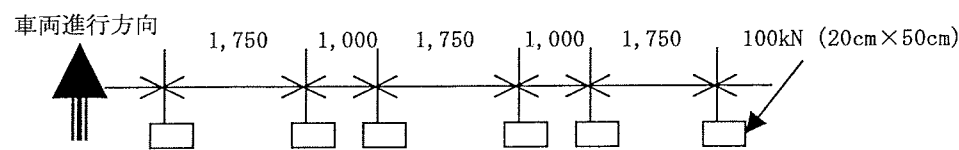


図-II.1 設計活荷重状態

- 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-II.2に示すような150kNのタンデム輪荷重（車両進行方向20cm×直角方向50cm）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」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考えられる。

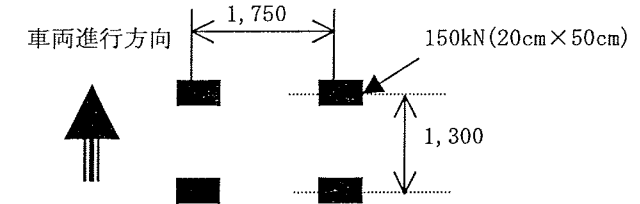


図-II.2 照査活荷重状態

なお、照査活荷重状態は、比較的大型車の交通量が多い路線の橋梁に適用すべき荷重状態であるため、橋梁の地理的状況、交通網における路線の位置づけにより省略することができる。

1.1.4 照査指標

設計荷重を作用させる実験・解析等により、設計上想定される耐荷メカニズムが明らかとなっていることを前提として以下のいずれか、あるいは組み合わせにより照査する。

- (1) 荷重ベクトル（荷重の大きさと作用する方向）とその作用位置。
- (2) 部材に作用する断面力成分。
- (3) 部材各部に発生する応力度。

【解説】

床版の耐荷力を評価する方法には、(1)設計荷重より大きな荷重に対して、耐荷力があることを示す方法、(2)荷重により発生する断面力と床版部材が有する耐力を比較する方法、(3)断面に発生する応力度と、部材断面の材料が有する強度を比較する方法等が想定される。したがって、これら三つの物理量を照査指標とした。

照査に際しては、まず設計で想定している耐荷メカニズムを確認しなければならない。荷重が作用することにより、材料や部材に発生するひずみや変形が所定のメカニズムに従っていることを確認する。具体的には、異方性の有無、引張り域のコンクリートの挙動、接合部の挙動、降伏や座屈等のメカニズムの変化点の確認等が必要となる。また、形状や寸法、境界条件が異なる構造物に対して適用される場合に、耐荷メカニズムが確実に予想できなければならない。

- (1) 作用荷重に対して、部材の保有する値が何倍大きいかを安全率として表し、所定の安全率が確保できるかどうかで判断する方法であるが、形状寸法、境界条件が異なる場合には、実構造物への実験・解析値の補正が確実に行えなければならない。
- (2) 限界状態設計法等のように、限界状態を想定し、荷重の増加率を考慮した照査荷重に対

して、所定の安全率を持って部材が降伏しない、あるいは過大な変形や不安定な現象が生じないことを確認する方法である。

たとえば、2002年度制定のコンクリート標準示方書（土木学会）³⁾では、安全性に対する検討として、軸方向力、曲げモーメント、部材形状毎のせん断力、ねじり、剛体安定等を照査することとなっている。コンクリート系床版を想定すると、地震等の軸方向や版面内の曲げやせん断、死荷重や活荷重、壁高欄を介した風荷重に対する版としての面外曲げ、面外せん断力、荷重直下の押し抜きせん断力等に対して所定の安全率が確保されていることを照査することとなる。

また、平成9年度の鋼構造物設計指針（土木学会）⁴⁾によると、終局状態の照査として、板部材では面内力、面外力、その両方が作用する場合について、板としての応力度（垂直、面内せん断、面外せん断）、座屈、連結部等を照査することとなっている。鋼床版を想定すると、コンクリート系床版と同様に、地震等の軸方向力や版面内の曲げやせん断、死荷重や活荷重、壁高欄を介した風荷重に対する版としての面外曲げ、面外せん断力、荷重直下の板曲げ等に対して所定の安全率が確保されていることを照査することとなる。

- (3) 許容応力度設計法等のように、設計荷重により発生する応力度が許容される応力度以下になることで、耐荷力性能が満足していることを確認する平成14年度の道路橋示方書の方法である。

1.1.5 状態レベル

作用する荷重に対して、想定される破壊状態に応じた安全率を確保する。

【解説】

床版は、想定される作用荷重に対して、十分な強度（耐荷力性能）を持って抵抗する方法により設計される。構造物の強度をもって抵抗させる場合には、公的に（社会的コンセンサスに基づいて）規定されている場合はその荷重、公的に規定されていない場合には、過去の類似事例、実測された荷重を再現確率や経験から補正して設定した荷重と、構造断面が抵抗可能な耐荷力の相対差あるいは相対比率（安全率）から状態レベルが評価される。

< 許容応力度法 >

許容応力度設計法では、部材の基準耐荷力（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特に留意すべき点は、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、桁設計において、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、桁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桁断面を小さくし、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。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説I共通編，平成14年3月
- 2) 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，平成元年1月
- 3) (社)土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，2002年
- 4) (社)土木学会：鋼構造物設計指針 Part A，平成9年

1.2 疲労耐久性

1.2.1 要求性能

- (1) 床版の設計供用期間中における交通荷重の繰返し作用に対し、所用の耐荷力性や使用性を確保すること。
- (2) 床版の設計供用期間中における風等交通荷重以外の繰返し作用に対し、所用の耐荷力性や使用性を確保すること。

【解説】

床版の疲労耐久性とは、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。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、疲労設計は各床版に対して必要である。そこで、本項では床版の疲労耐久性に関する一般的な記述に加え、コンクリート系床版、鋼床版、合成床版に関する解説文を追加した。なお、床版の疲労耐久性に関しては、床版の剛性不足により鋼桁に二次応力が発生し、鋼桁に疲労損傷が発生することも考えられるが、ここでは、床版自体の疲労耐久性についてのみ取り扱うこととし、床版の剛性不足に起因する桁の疲労については別途、桁の設計で検討することとする。

- (1) 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。床版の疲労耐久性としては、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設計時に定めた各限界状態に対する安全率を確保し、許容される以上の耐荷力性や使用性の低下を招くような損傷が生じないことが要求される。
- (2) 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、例えば、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、床版の応力度の値によっては、設計供用期間に風荷重が繰返しことや固有の振動による繰返し効果による疲労耐久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、疲労耐久性を確保する必要がある。

以下にコンクリート系床版、鋼床版、合成床版の疲労耐久性の特徴について述べる。

< コンクリート系床版について >

コンクリート系床版の疲労破壊形態は曲げ疲労、せん断疲労、押抜きせん断疲労の3種類が考えられる。これらのうち、RC床版の疲労破壊としては、ひび割れにより梁状化した後の押抜きせん断破壊が最も一般的な破壊である。また、PC床版では床版厚が薄い場合にはRC床版と同様に押抜きせん断破壊が報告されている¹⁾。コンクリート系床版では、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^{1)~3)}。

< 鋼床版について >

鋼床版は鋼板を溶接により組み立てた床版であり、鋼材溶接部の疲労破壊を考慮する必要がある。鋼桁一般部の疲労設計と比較して輪荷重の作用を直接受けること、1輪の車両走行ごとに応力変動が生じること、複雑な溶接構造物のため各部の応力挙動の把握が難しい等の問題があり、構造詳細の決定には注意が必要である。

< 合成床版について >

近年、採用が増加する傾向にある鋼コンクリート合成床版では、コンクリートの有する大きな床版剛性と鋼床版の有する大きな強度を期待した床版である。合成床版の採用に際しては、鋼部材とコンクリート部材の双方、およびその接合部について、それぞれの照査項目を満足させる必要がある。

1.2.2 照査項目

床版の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疲労強度を有していることを照査しなければならない。

【解説】

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、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疲労耐久性の照査が可能となる。

以下にコンクリート系床版、鋼床版、合成床版における疲労強度（疲労照査が必要となる箇所）について述べる。

< コンクリート系床版の疲労強度 >

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疲労耐久性（曲げ疲労耐久性）を有すること、床版断面に生ずるせん断力に対する疲労耐久性（せん断疲労耐久性）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疲労耐久性（押抜きせん断疲労耐久性）を有することが必要である。

PC床版では、上記に加え、PC鋼材、およびその定着部の疲労耐久性の確保が必要である。なお、PC床版のうち、プレキャストコンクリート床版ではプレキャスト版と現場打ちコンクリートの接合面の剥離に対する疲労耐久性も考慮する必要がある。

< 鋼床版の疲労強度 >

鋼床版では、設計供用期間に作用する繰返し荷重により、溶接部や構造的な応力集中箇所（部材の交差部や、切欠き部、部材の変形が拘束されるような箇所等）に対し、疲労耐久性が確保されている必要がある。

< 合成床版の疲労強度 >

鋼コンクリート合成床版では、底鋼板や骨組み部材、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。

1.2.3 作用レベル

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作用レベルとする。

【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言わざるを得ない。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^{4),5)}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を行い、シミュレーション荷重、荷重頻度スペクトル、あるいは代表荷重を設定する必要がある^{6),7)}。

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。

1.2.4 照査指標

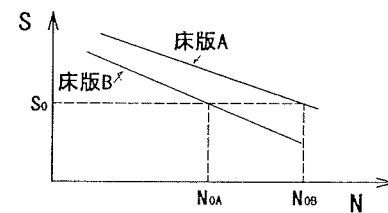
床版の疲労耐久性照査では設計時に要求される耐荷力性・使用性が、床版の設計供用期間終了まで確保されることを目的とし、以下の照査指標を用いて照査を行う。

- (1) 床版の設計供用期間中に繰返される作用のベクトル(大きさと方向)と累積頻度分布(大きさに応じた回数)に応じた作用、または断面力、応力度、および回数を耐荷力性に対する照査指標とする。
- (2) 床版の設計供用期間中に繰返される作用のベクトル(大きさと方向)と累積頻度分布(大きさに応じた回数)に応じて生じるたわみや振動特性の変化等を使用性に対する照査指標とする。

【解説】

- (1) 荷重の繰返し作用の累積については、単に荷重の大きさとその回数だけで表現できるものではない。輪荷重を考えれば、車両毎に輪荷重の大きさ、タイヤの大きさや数・接地面積、走行位置、衝撃の影響等が異なり、それぞれ厳密には頻度分布で表現される量である。また車両が1台のみ走行した場合と、複数台が同時に走行した場合では床版に加わる作用の状態は異なる。設計時にこれらの作用をすべて分布量として扱うことは困難であるため、作用は想定する疲労損傷の形態に応じて単純化が行われる。

耐荷力性に対する疲労耐久性の照査では、照査指標としては作用そのものよりも、作用の応答値としての各部位における断面力や応力度とその累積頻度を用いる。照査方法は、想定される繰返し荷重を累積被害則(マイナー則)を用いて等価換算し、対象とする床版の疲労強度との比較により行う。等価換算とは、作用または断面力や応力度、あるいは回数のどちらか一方を固定し、累積被害則により他の一方を換算する方法である。なお、疲労強度を設定するためには、一般に疲労試験を数多く行って、限界状態に至るまでの作用または、断面力や応力度の大きさ(S)と限界状態に至るまでの回数(N)の関係(S-N関係あるいはS-N線図)が求められていなければならない。(図-II.3参照。)

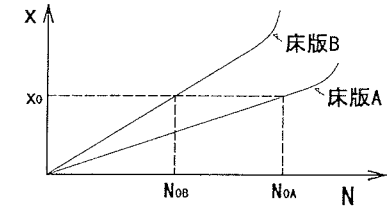


So : 等価な作用の大きさ
NoA : Soが作用した場合の床版Aの疲労寿命
NoB : Soが作用した場合の床版Bの疲労寿命

図-II.3 S-N線

疲労強度が不明確であり等価な換算が困難な場合には、対象床版とすでに疲労寿命が明らかになっている床版についても併せて疲労試験を行い、疲労試験結果の相対比較を行って評価および照査を行う方法が考えられる。ただし、この場合においても荷重を作用させる位置や前提となる境界条件の一致等に留意しなければならない。

- (2) 使用性に対する疲労耐久性の照査指標は繰返し作用に応じて生じるたわみや振動特性の変化等となる。照査方法は耐荷力性と同様に、種々の使用性能ごとに想定される繰返し荷重による疲労被害を累積被害則(マイナー則)を用いて等価換算し、対象とする床版における使用性の限界との比較により行う。この際、疲労被害の等価換算手法、および疲労被害と繰返し作用の回数の関係については、数多くの疲労試験を行って定める必要がある。図-II.4に疲労被害と繰返し作用の回数の関係の概念図を示す。



xo : 使用性の限界(例えばたわみ量)
NoA : 床版Aが限界状態に至るまでの等価換算された作用の回数
NoB : 床版Bが限界状態に至るまでの等価換算された作用の回数

図-II.4 疲労被害と繰返し作用の回数

以下にコンクリート系床版、鋼床版、合成床版の疲労耐久性の耐荷力性、および使用性に対する照査方法について述べる。

< コンクリート系床版の照査方法 >

コンクリート系床版の照査指標を記述すると、荷重ベクトル(荷重の大きさと作用する方向)とその作用位置および繰返し回数、部材に作用する断面力成分、部材各部に発生する応力度、たわみ(スパンの大きさや境界条件にもよるが、輪荷重走行試験機等による試験結果によれば、同一の供試体ではたわみがある値を超えたときには疲労破壊が生じる可能性がある。)等が考えられる。床版が疲労破壊の可能性を有するときは、ひび割れやたわみ性能から判別することも可能であり、点検の際にもこれらの指標は有用になる。

RC床版、PC床版の耐荷力性に対する疲労耐久性の照査手法としては、押抜きせん断破壊に対しては輪荷重走行試験の結果より提案されているS-N線を用いた照査^{2),8),9)}が提案されている。また、コンクリート、鉄筋、およびPC鋼材等の材料の疲労強度についてはコンクリート標準示方書[構造性能照査編]に疲労強度評価式が提案されているので参考にされたい。

また、使用性に対する照査例としては、輪荷重走行試験より得られた弾性たわみと走行回数の関係にマイナー則を適用した、たわみに対する照査が考えられる。

< 鋼床版の照査方法 >

耐荷力性に対する疲労耐久性照査は、本来は各ディーテールにおいて代表荷重、あるいはシミュレーション荷重等を用いて発生する応力度を算出し、各ディーテールの疲労強度や想定される疲労き裂の応力拡大係数からき裂発生寿命、き裂伝播寿命を推定することが望ましい。しかし、鋼床版は比較的薄い鋼板を溶接により組み立てた構造であるために各部に生じる応力が複雑であること、舗装の剛性や輪荷重のばらつき、輪荷重走行位置の分布等の影響も大きいこと等から、発生する応力度の算出は困難であり、疲労強度評価式も確立されていない。特定の構造詳細について疲労強度評価式を構築した例¹⁰⁾や実測した応力度を用いて疲労強度評価を試みた例¹¹⁾もあるが、現状では設計計算より求められる一次応力が支配的な部位においては疲労照査を行い、二次応力の影響が大きい部位の疲労照査は、その疲労耐久性が疲労試験により確認された構造詳細を満足させることにより省略していることが多い。

鋼床版で疲労損傷が生じる典型的な位置としては、平成14年版の道路橋示方書にもチェックポイントとして挙げられているように、縦リブと横リブの交点、縦リブの継手部等である。これらのき裂が大規模な脆性破壊に結びつくことは考えにくい、床組部材の破断にまでき裂が進展した例も報告されており¹²⁾、(社)日本道路協会の鋼道路橋の疲労設計指針¹³⁾や(社)日

本鋼構造協会の鋼構造物疲労設計指針¹⁴⁾等、適切な規準に示された疲労耐久性に優れるとされた構造詳細を考慮して設計しなければならない。(第2編3参照。)また、昨今ではデッキプレートとリブの溶接部においてデッキが陥没する危険性のあるき裂等、これまでに例のない疲労き裂も報告されているが¹⁵⁾、従来の構造であるにもかかわらず、基準に構造詳細が示されていない場合や適用範囲外の新しい構造を採用する場合には相対的に応力変動が大きくなるような箇所の有無を、FEM解析等を用いて求めた応力分布から明確にし、必要に応じて疲労強度を評価することが重要である。

鋼床版の使用性に対する疲労耐久性の照査例としては舗装割れに対する照査が挙げられる。道路橋示方書では、輪荷重によるたわみが縦リブ腹板間隔の1/300とした場合に鋼床版舗装が健全に供用されていたとの調査結果より、デッキプレート厚と縦リブ腹板間隔を定め¹⁶⁾、縦リブの寸法、間隔および横リブの間隔の設定については本四公団の橋面舗装の基準¹⁷⁾等を参考に輪荷重に対するデッキプレートの曲率半径を20m以上とし、かつ縦リブ間のたわみ量を0.4mm以下とすることが望ましいとしている。

< 合成床版の照査方法 >

鋼コンクリート合成床版を構成する各部について、鋼部材あるいはコンクリート部材としての照査指標を用いて照査する。また、照査の前提としてのずれ止め等による構造の一体性の確保についても、残留変形量や版剛性等により、別途照査を行わなければならない。

1.2.5 状態レベル

荷重の繰返し作用の累積により、許容される以上の耐荷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の床版の設計供用期間に対する所定の安全率を状態レベルとする。

$$\text{安全率} = \text{耐用年数} / \text{床版の設計供用期間}$$

【解説】

床版の疲労耐久性は、床版の設計供用期間に対する耐用年数の安全率のレベルにより性能のレベルを表現可能と考え、安全率を床版の疲労耐久性に関する状態レベルと定めた。

疲労耐久性に係わる状態レベルと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の、床版の設計供用期間に対する安全率となる。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荷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。

以下にコンクリート系床版、鋼床版、合成床版の疲労耐久性に関する状態レベルの考え方について述べる。

< コンクリート系床版の状態レベル >

コンクリート系床版の耐荷力性に対する状態レベルは、床版の鉄筋あるいはコンクリートの曲げ疲労破壊、コンクリートのせん断疲労破壊、および押抜きせん断疲労破壊に至るまでの耐用年数の床版の設計供用期間に対する安全率であり、使用性に対する状態レベルとしてはひび割れの進展によるたわみの増加等、設計における要求性能を確保できない状態に至るまでの耐用年数の床版の設計供用期間に対する安全率となる。

これらのうち、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曲線も提案されている^{8), 9)}。しかしながら、提案されているS-N曲線は、勾配が極めて緩やかな(m=1/11~1/14程度)対数関数であ

ることから、時間軸である荷重回数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く、設計供用期間に対する耐用年数の安全率という概念を用いて状態レベルを判断することは難しい。そこで、コンクリート系床版の疲労耐久性の安全率については、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こと等も考えられる。(第2編2参照。)

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。

< 鋼床版の状態レベル >

鋼床版の耐荷力性に対する状態レベルは、脆性破壊(デッキプレートの陥没や部材破断等)に至るまでの耐用年数の床版の設計供用期間に対する安全率である。また、使用性に対する状態レベルとしては設計における要求性能を確保できない状態(疲労き裂の進展による床版剛性の低下等)に至るまでの耐用年数の床版の設計供用期間に対する安全率である。これらの安全率は、各限界状態に至るまでの耐用年数の決定根拠となる実験データ量により、応力度や損傷度の算出方法の信頼性により異なるため、その算出は難しい。現状では推奨される構造詳細を満足することで、所定の安全率が確保されているものとされている。

< 合成床版の状態レベル >

合成床版の耐荷力性に対する状態レベルは、鋼部材、コンクリート部材の各々の疲労寿命に対する安全率、および床版支間長に対する残留変形量の比率、版剛性の低下率等で表される。

参考文献

- 1) 長谷, 上東, 安松: 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年11月
- 2) 安松, 長谷, 篠原ほか: 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年11月
- 3) 本間, 杉崎, 河西ほか: 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年9月
- 4) 例えば, 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, 平成元年1月
- 5) 例えば, 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, 平成7年2月
- 6) Miki, Goto, Mori, Yoshida: Computer Simulation Studies on The Fatigue Load and Fatigue Design of Highway Bridges, 土木学会論文集, No.356, pp.37-46, 1985年4月
- 7) 森, 梶原, 長谷川: 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, Vol.2, No.8, 1995年12月
- 8) 松井: 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年
- 9) 松井: 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年
- 10) 藤原, 村越, 田中: 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.37A, pp.1151-1162, 1991年3月
- 11) 村越・程・西川: 実測局所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年11月
- 12) (社)土木学会: 鋼床版の疲労, 1990年

- 13) (社) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，平成 14 年 3 月
- 14) (社) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993 年
- 15) 川畑，江崎，加藤ほか：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，2004 年 11 月
- 16) 多田宏行編著：橋面舗装の設計と施工，平成 8 年 3 月
- 17) 本州四国連絡橋公団：橋面舗装基準（案），昭和 58 年 4 月

1.3 材料耐久性

1.3.1 要求性能

床版を構成する各種材料が設計供用期間を通じて有害な劣化・変質を生じないこと。

【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。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てきている。

鋼材料やコンクリート材料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，鋼材料とコンクリート材料のほか，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。

1.3.2 照査項目

(1) 鋼材料

鋼材料の供用状態を以下の 2 種類に大別し，照査項目を示す。

- 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。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。
- 2) コンクリート中の鋼材に対しては，以下に示す項目を照査項目とする。
 - 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) コンクリート材料

コンクリート材料に対しては，以下に示す項目を照査項目とする。

- 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) その他の材料

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】

- (1) 床版構成材料のうち鋼材料の使用状態は，①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料は、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。

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、一般的な鋼材料の劣化・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、結果として鋼材料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、その場合は安定錆（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、コンクリート材料が構造部材としての性能を保ちつつも劣化していき、その影響で鋼材料の劣化・変質が進行することも考えられる。この場合の鋼材料の劣化・変質は、一般的な鋼材料のそれとは異なることに留意しなくてはならない。

鋼材料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中和され（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、クリーブ特性等、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、鋼材料やコンクリート材料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。

1.3.3 作用レベル

(1) 鋼材料

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。

- 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：CO₂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) コンクリート材料

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。

- 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) その他の材料：各々の劣化原因となる作用因子のレベル

【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）に的をしばって作用レベルを設定した。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) 鋼材料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^{1),2)}

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。鋼材料について、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CO₂濃度を明記している。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の方が乾燥し、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。

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) コンクリート材料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^{3)~6)}。

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侵入する水分、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⁷⁾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材料の劣化であり、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℃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水分（余剰水）のほかに、供用中に外部から侵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H₂S、SO₂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。

1.3.4 照査指標

(1) 鋼材料

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。

- 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) コンクリート材料

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。

- 1) アルカリ骨材反応：コンクリートのアルカリ総量
 - 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) その他の材料：各作用因子の程度・総量等

【解説】

照査指標は耐久性をはかる指標であり、これまでの定性的な表現を一步進め、極力、定量的な表現を目指した。各種条件に応じた算定式をもとに、その算定結果を実設計に反映することを推奨する。

(1) 鋼材料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鋼材（床版）について言えば、床版は桁に支持される部材であり、従来の橋梁に用いられている鋼材（桁）とその使用環境は同じといえる。橋梁（桁）の腐食等については既往の研究・報告等^{8)~10)}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。第2編4および各種文献等を参照されたい。

塗膜や亜鉛めっき等は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コンクリート中の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時間（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おこない、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^{11)~17)}。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くることもあり、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

$$w_a = 0.0035c$$

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

$$w_a = 0.0035c = 0.105 \text{ mm}$$

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术と性能照査設計¹⁸⁾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事のないよう配慮しなくてはならない。

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 >

$$y_b = \gamma_{cb} \cdot \alpha_d \sqrt{t}$$

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)

$$= \alpha_k \cdot \beta_e \cdot \gamma_c$$

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コンクリート中の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にあるように、腐食発生限界塩化物イオン濃度 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 >

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

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_{cd} ：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/m³)

$\operatorname{erf}(s)$ ：誤差関数

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

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)

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。

(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 (Na⁺・K⁺) の総量で規制されている。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。1.3.3 作用レベルの項で述べたが、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。

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。

1.3.5 状態レベル

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、ここではその余裕の程度を下式に定義される安全率で示す。

$$\text{安全率} = \frac{\text{耐用年数}}{\text{床版の設計供用年数}}$$

(1) 鋼材料

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。

- 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) コンクリート材料

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。

- 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) その他の材料：劣化・変質のないこと

【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) コンクリート材料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材料の劣化、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) (社)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
- 2) (社)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
- 3) (社)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
- 4) (社)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
- 5) 岡田清：コンクリートの耐久性, 朝倉書店, 1986年
- 6) 林正道, 鮎田耕一：コンクリート工学, 山海堂
- 7) (社)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
- 8) (社)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
- 9) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧, 平成2年6月
- 10) (社)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
- 11) (社)日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編, 平成14年3月
- 12) (社)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
- 13) (社)土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編], 2002年
- 14) (社)土木学会：2002年版コンクリート標準示方書改訂資料, 2002年
- 15) (社)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
- 16) (社)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
- 17) (社)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
- 18) (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, p.307, 平成12年10月

第2章 使用性

2.1 供用性

2.1.1 要求性能

橋梁が供用される際に、利用者や第三者に対する利便性や安全確保に関する性能のうち、床版に起因する性能を床版の供用性能とする。供用性は、利便性を受けの対象に応じて、以下の3つの性能に分類される。

- (1) 走行性
- (2) 歩行性
- (3) 第三者被害の防止

【解説】

橋梁が供用される際に、利用者や第三者に対する利便性や安全確保に関する性能のうち、床版に起因する性能を床版の供用性能とする。

道路橋床版の利用者は、自動車に乗車して橋梁上を通過する走行車両と、歩道等を使用して橋梁を通過する歩行者に分けられる。走行車両に対しては、高速での走行安全性や快適性を確保するため、道路の線形形状や、路面の排水状態、凍結状態、舗装面の状態等を適正に保つ必要がある。一方、歩行者に対しては、歩行時の安全・快適性を確保するため、適切な振動特性や路面の排水状態等に関する性能が求められる。

さらに、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、第三者被害を防止するための性能を求めることとした。

これらの走行性、歩行性、第三者被害の防止に対しては、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べきである。

なお、振動特性や舗装に対する性能等、様々な供用性に影響を与える床版の剛性の大小は、鋼桁に発生する二次応力に関わりがあり、鋼桁の疲労耐久性を左右する要因となる。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ため、桁の疲労耐久性については別途、桁の設計で検討することとする。

2.1.2 照査項目

- (1) 床版上を走行する車両に対し、安全で快適な走行性を確保すること。走行性は以下のような照査項目を含む。(走行性)
 - 1) 線形への対応性
 - 2) 排水性
 - 3) 耐凍結性
 - 4) 舗装性
- (2) 床版上を歩行する歩行者に対し、安全で快適な歩行性を確保すること。歩行性は以下のような照査項目を含む。(歩行性)
 - 1) 排水性
 - 2) 耐振動性
- (3) 床版を直接的に使用しない第三者に対し、有害または不快な第三者被害を発生させないこと。第三者被害には以下のような照査項目を含む。(第三者被害の防止)
 - 1) 落下物等による被害防止
 - 2) 低騒音性
 - 3) 耐振動性

【解説】

- (1) 1) 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。(例えば、プレキャストのコンクリート系床版では、パネルのひとつひとつの勾配が縦横断に変化する床版は、実際には適用できない可能性がある。)一般には最低限確保すべき線形は道路構造令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。

- (1) 2), (2) 1) 排水性

歩道を含む道路の、走行性・歩行性等の使用性を決定づける要因の一つに路面の排水性能がある。降雨による路面の雨水は、通常路面の縦横断勾配により、横断的に路肩もしくは中央分離帯側の限定された幅に誘導され、さらにこの幅を通水幅として路線方向に誘導され、排水ますから排水される。

この現象が連続的に継続する場合には、路面に常時雨水が滞水した状態となる。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き、渋滞等による道路の便益が損なわれる結果となる。このような状況は、道路の使用性が低下する状態として定義される。

本来道路路面の排水性能は、水が直接的に接する材料の表面状態に大きく影響を受けるので、直接的には舗装に求められる性能と考えられる。近年車両の走行にともなう騒音の低減や、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、ポーラスな舗装材を用いた高機能舗装が使用されている。この場合でも、通常床版上面にはシート等の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。

しかしながら、将来的にコンクリート含浸系の防水材の使用が想定され、床版上面の状態が直接排水性に影響を及ぼす可能性があることや、路面排水と流末排水とのイ

ンターフェースとなる排水ますが床版に埋め込まれるかたちで配置されることを考える場合、床版上面の排水性能、あるいは排水ますの設置の可否や設置のし易さは、床版の使用性能を照査する上で、床版に要求される性能であると考えられる。

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。

(1) 3) 耐凍結性

耐凍結性能は、冬季に気温が0℃前後になる積雪地・寒冷地において特に考慮すべき性能である。路面凍結はドライバーの精神的ストレスの増幅や、路面の摩擦係数の急変によるスリップ事故の要因となる。特に橋梁とその前後の土工部では熱容量が大きく異なるために路面状態に差が生じやすい。

橋面の凍結防止対策としては、凍結防止剤やすべり止め剤の散布、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剤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。

(1) 4) 舗装性

車両の走行に大きな影響を与えるのは、路面凹凸や滞水の有無等、舗装や防水層の状態に関する事象である。施工時における締固め状態や供用時の舗装面下の変形状態等が、舗装・防水層としての性能に大きな影響を与えることから、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、床版の舗装性と考える。

敷設時の締固めが充分でない場合、舗装の疲労耐久性やわだち掘れ量、平坦度に影響を受ける。また、舗装からの透水に対して床版の機能を保護する防水層の付着性は、床版面粗度等の影響を受ける。さらに、床版供用時の活荷重変形によるたわみ・ひび割れと防水層の追従性の関係は、防水層の性能に大きな影響を及ぼす。このように、床版の状態が舗装や防水層の耐久性を低下させたり、舗装の破損が床版の耐久性が低下したりすることも考えられ、舗装性は供用性のみならず、耐久性に対しても重要な指標である。

(2) 2), (3) 3) 耐振動性

車両の通行荷重によって、橋梁や床版が振動して振幅と加速度を発生させ、橋梁上を歩行する歩行者の感覚に影響をおよぼす。歩行者が不快な振動を感受することにより、安全で快適な通路としての橋梁歩道の機能を損なう可能性があるため、振動に対する性能を確保することとする。一方、床版に起因する振動が橋梁外に伝達し、継続的に不快な影響を与えることがないよう、あわせて第三者被害としての耐振動性も必要である。歩行者に対する耐振動性と第三者に対する耐振動性は、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。

また、付属物等に対しては床版が振動することにより、照明柱や標識柱等が疲労破壊する場合が想定されるが、床版設計としては、付属物設置への要求性能として、固有周期を提示するといった扱いにとどまる。

(3) 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、床版下面の経年劣化によるコンクリート片剥落、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。

(3) 2) 低騒音性

一般に、一時的に橋梁上を通過する走行者や歩行者にとって、床版に起因する騒音は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。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。

2.1.3 作用レベル

各照査項目に対し、以下の作用レベルを適用する。

- (1) 線形への対応：道路線形（設計条件）
- (2) 排水性：設計地点における観測データに基づき、定められた再現期間での時間降雨量に、構造物の重要度に応じた係数を乗じた設計降雨量。
- (3) 耐凍結性：設計地点における最低気温、0℃以下となる平均日数、湿度、平均風速、積雪量、日照条件等の気象作用
- (4) 舗装性：舗装施工時の施工荷重、走行車両等の荷重の大きさ、速度、走行台数
- (5) 耐振動性：走行車両等の荷重の大きさ、速度、連行間隔、台数、風荷重等の大きさ・継続時間、歩行者荷重の大きさ・歩行者数等
- (6) 落下物等による被害防止：衝突荷重（壁高欄等）、剥落を生じる材料耐久性に関わる環境作用
- (7) 低騒音性：走行車両等の荷重の大きさ、速度、連行間隔、台数風荷重等の大きさ・継続時間、歩行者荷重の大きさ・歩行者数等

2.1.4 照査指標

各照査項目に対し、以下の事項を照査指標とする。

- (1) 線形への対応：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
- (2) 排水性：設計降雨量における、円滑な表面排水及び床版の耐荷力を損なうことのない適正な排水ますによる橋面排水量
- (3) 耐凍結性：気象作用や床版構造を考慮した凍結予測による
- (4) 舗装性：活荷重変位に対する床版剛性（曲率）、舗装敷設に対する床版剛性（舗装の動的安定度）、床版面粗度、ひび割れ幅
- (5) 耐振動性：たわみ、振動数、加速度等
- (6) 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
- (7) 低騒音性：振動数領域と振幅の大きさから求まる音圧レベル

2.1.5 状態レベル

各照査項目に対し、以下に状態レベルを示す。

- (1) 線形への対応：設計条件として与えら得た安全な道路線形を実現すること。
- (2) 排水性：表面排水と排水ますの設置によって排水された際、必要な走行可能幅員を確保すること。必要な走行可能幅員については、道路の重要度や地域性によって決定される。
- (3) 耐凍結性：橋梁の前後の路面に比して著しい路面状態の不連続性を発生させないこと。
- (4) 舗装性：舗装および防水層の要求性能の確保
- (5) 耐振動性：歩行者感覚の限度や ISO の振動暴露基準等
- (6) 落下物等による被害防止：破壊や剥落を生じないこと
- (7) 低騒音性：環境基準等により定められた音圧レベルの制限値

【解説】

- (3) 耐凍結性における照査は、対象箇所の平均的な冬期の気象条件と、床版材料や、閉断面・開断面等床版構造を考慮した種々の凍結予測解析手法も提案されており、路面凍結についてはある程度のシミュレーションが可能である。その他、簡便な方法として床版材料の違いのみに着目した熱容量の相対的な比較も考えられるが、隣接道路との不連続性については証明が難しい。また、状態レベルとしては、冬季に橋梁の前後の路面に比して著しい不連続性を起こさないことが重要である。しかし、どの程度の路面状態の不連続性が利用者に対する不安感や支障を与えるのかは明瞭になっていないため、今後の研究課題である。
- (4) 舗装性についての物理指標としては、わだち掘れの発生しにくい締め固めの状態を評価するための動的安定性や、防水層の付着し易さを評価する床版面粗度等がある。たとえば、鋼床版のように版剛性が小さい場合には、舗装の締め固めが不十分となり、舗装の動的安定性が低下する。舗装の締め固めに必要な剛性を床版のたわみで示すことも考えられる。あわせて、活荷重変位やひびわれに対する追従性を確保できるような床版剛性、ひびわれ制御等も照査が必要である。
- (5)、(7) 耐振動特性の物理指標としては、たわみ、振動数、加速度等がある。実際の設計においては、歩道橋では共振振動数が、道路橋ではたわみの制限等が、物理指標として用いられている。したがって、作用レベルとしては、荷重の大きさ、速度、連行間隔台数等が想定され、状態レベルとしては歩行者感覚の限度や ISO の振動暴露基準等が想定される。なお、第三者被害に関する耐振動特性は、床版に起因する振動が橋梁外に伝達する際の、たわみ、振動、加速度等の物理指標に対して、作用、状態レベルを設定して照査する。一般に住環境に近接する大型幹線道路の騒音・振動は、騒音規制法・振動規制法により車両走行により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。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事は困難であるが、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推定が可能である。

参考文献

- 1) (社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，平成 14 年 3 月
- 2) (社) 日本道路協会：道路構造令の解説と運用，平成 16 年 2 月
- 3) 多田宏行編著：橋面舗装の設計と施工，1996 年 3 月，鹿島出版会

2.2 維持管理性

2.2.1 要求性能

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が策定できること。

【解説】

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。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、床版の維持管理性能を「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。

2.2.2 照査項目

- (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、耐荷力性や疲労及び材料耐久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できること。
- (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すること。
- (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・判定基準及び想定される劣化に対する補修工法が予め計画できること。

【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、耐荷力や耐久性の照査結果とそれ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。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クラックや亀裂等、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。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。
- (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。さらに、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證できると考える。

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對し、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。

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：定期点検、臨時点検等により、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こと。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) 評価及び判定手法の選択：耐荷力性や疲労及び材料耐久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こと。
- 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こと。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こと。

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。

2.2.3 作用レベル

維持管理性能における作用は、耐荷力性能、疲労耐久性、材料耐久性、供用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）：材料耐久性、供用性等の照査項目参照
- (2) 荷重作用（繰返し活荷重、地震、風荷重等）：疲労耐久性、耐荷力性等の照査項目参照

【解説】

維持管理性能における作用レベルは、床版の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。

2.2.4 照査指標

維持管理性能の照査にあたっては、損傷メカニズムの想定内容、維持管理計画の策定内容等の妥当性を照査指標とする。

2.2.5 状態レベル

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、状態レベルを設定する。

【解説】

床版の維持管理の照査は、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、状態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。

参考文献

- 1) (財)道路保全技術センター：橋梁点検・補修の手引き，平成13年7月

第3章 社会・環境適合性

3.1 経済的合理性

3.1.1 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あること。

【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。

3.1.2 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。

- (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。

そこで、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なコストの積（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、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。

3.1.3 作用レベル

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作用レベルとする。

【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。

3.1.4 照査指標

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）。

【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。

3.1.5 状態レベル

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。

【解説】

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関わらず、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。

参考文献

- 1) (社)日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，平成13年10月
- 2) 伊庭，松島，関，川田：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集NO.704/V-55, pp1-11, 2002年5月
- 3) 横山・齋藤・大村・続石：道路橋におけるライフサイクルコストの考え方と米国の事例，第1回 鋼構造物の維持管理に関するシンポジウム，平成11年7月

3.2 環境適合性

3.2.1 要求性能

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に努めること。

【解説】

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。

3.2.2 照査項目

床版における以下のライフサイクルの各段階における環境影響を照査する。

- (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】

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材料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。

3.2.3 作用レベル

ライフサイクルの各段階における環境負荷を作用とする。

3.2.4 照査指標

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

【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が、騒音、振動、悪臭等の周辺環境への影響は床版の供用性として整理されることから、一般には、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と考えられる。これらの項目のうち、地球温暖化防止の観点からは二酸化炭素排出量による評価を行うことが一般的である。従って、床版の環境適合性の評価においても、一般的な作用に対しては、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には、「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。

3.2.5 状態レベル

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。

【解説】

環境影響の評価基準となる状態レベルは、環境基準等において明確化されているものもあるが、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、現時点では各種構造間での相対的な比較等で評価することとなる。

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や、環境負荷をコストとして表現する、等の手法が必要となる。本来、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、環境負荷もコストで表現してゆく必要があると言える。

参考文献

- 1) 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年1月
- 2) (社)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、平成8年

第2編 性能照査型設計資料

現在、我が国の道路橋床版は、主として道路橋示方書によって設計されている。一方、本指針で求める性能は、床版に本来求められる機能に着目したものとされており、道示で規定されたみなし仕様がどのような保有性能を有しているかは定かではない。

さらに、本指針では、これまでの設計体系ではほとんど触れられていないいくつかの性能についても新たに定義している。

そこで本編では、実際に設計作業を行うにあたって、現行道示床版が保有している性能を明らかにすると同時に、既往の設計指針等では照査方法を提示することが困難であると考えられる性能に対し、照査事例や背景となる資料を提示する。

第1章 現行道示床版の保有性能

本章では、床版を現行の道路橋示方書^{1)~3)}に則って設計した場合、どの程度の性能を有しているかについて試算および検討を行った。検討対象は、現行道示で具体的な規定がなされていない耐振動特性およびLCAと、現行道示でみなし仕様が規定されている塩害の3項目とした。

なお、耐荷力性能、疲労耐久性能、材料耐久性能の一部については、第三回道路橋床版シンポジウムの分科会報告⁴⁾として検討しているので、そちらも参照されたい。

1.1 振動に対する保有性能

(1) 検討概要

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。今回は現行道示床版の保有性能を把握する作業の一環として、床版の振動に着目した場合、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工学公式集⁵⁾をもとに床版の固有振動数を算出した。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検討を行った。また、床版の剛性を左右する床版厚は、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示す。

〈固有振動数の算出式〉

$$f = \omega / 2\pi$$

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 $h = (3L + 11) \text{ m}$

単純版のとき $h = (4L + 11) \text{ m}$

ただし、 L = 床版支間

D : 曲げ剛性

g : 重力加速度

(2) 検討結果

図-1.1 および図-1.2 に固有振動数と床版支間の関係を示す。

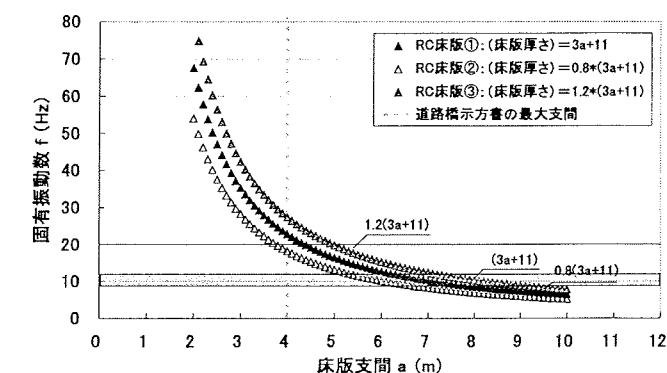


図-1.1 固有振動数と床版支間 (RC床版—連続版)

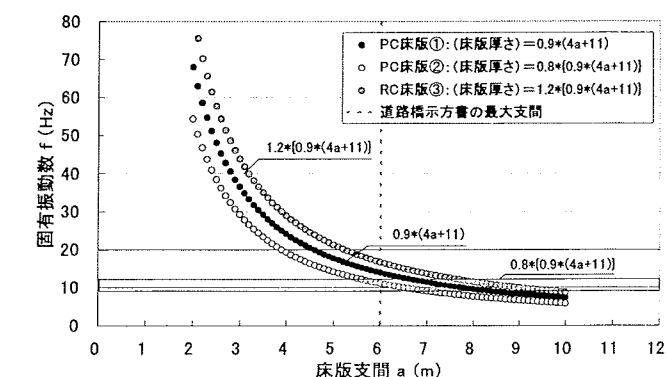


図-1.2 固有振動数と床版支間 (PC床版—単純版)

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-1.1に、振動および低周波問題の調査結果を示す。

表-1.1 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⁾	トラックのパネ下振動数 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
村井逸朗 ⁹⁾	高架橋ではジョイント音が 10-30Hz 付近で卓越
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パネ下振動数とほぼ一致することに起因する。

(3) 考察

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。特に RC 床版の場合は、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。一方、PC 床版の場合、床版支間が短いときには RC 床版同様、低周波被害が発生する可能性は低いことが予想されるが、現行道示に示される最大支間 6m に近づくあたりから床版単体の固有振動数が低周波懸念ゾーンに入りつつある。これまでに実橋で低周波問題が報告された例は稀ではあるが、必要に応じて(例えば、過去に低周波問題が報告されたときと同一の形状・構造形式とする場合等)振動特性について検討することが望まれる。

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) RC 床版：床版支間 3m に着目し、①床版支間 3m のままで床版厚のみを 20%変化させた場合の固有振動数と、②床版支間を 20%変化させ、その支間(すなわち 3.6m)から計算される床版厚の場合の固有

振動数とを比較すると、前者変化が 7Hz 程度であるのに対し、後者の変化は 10Hz 程度である。すなわち、版厚を 20%変化させた場合と床版支間を 20%変化させた場合を比較すると、若干ではあるものの、床版支間を変化させた場合のほうが固有振動数の変化が大きい。したがって振動特性という観点で考える場合、床版厚よりも床版支間のほうが支配的だと考えられる。

1.2 LCA

(1) 検討概要

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 LCA の検討を行った。

環境影響の評価指標は単位面積あたりの二酸化炭素排出量とした。二酸化炭素排出量算出に用いる原単位はさまざまな機関から提案されているが、ここでは土木学会 LCA 小委員会提案の値¹³⁾を用いて検討を行っている。

建設作業のライフサイクルは、①初期建設、および、②維持管理、③更新廃棄の 3 つに分類できるが、本検討では、ライフサイクルの中で支配的となる、①初期建設(材料調達、輸送、建設等)、③更新廃棄(廃棄等)に着目し、簡便に二酸化炭素排出量の算出を行っている。すなわち、今回は床版の維持管理は想定していない。

なお、各種床版の試算および詳細な比較検討については、「6. 床版の環境負荷評価(LCA)試算例」を参照されたい。

(2) 検討結果

表-1.2 および図-1.3 に LCA と床版支間の関係を示す。また、図-1.4 に各検討モデルの LCA の内訳を示す。

表-1.2 LCA 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

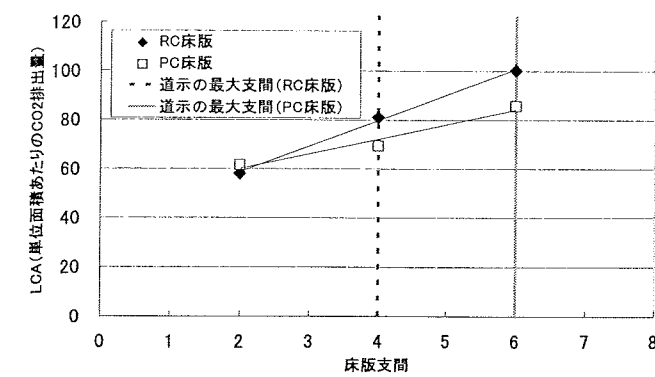


図-1.3 LCA と床版支間

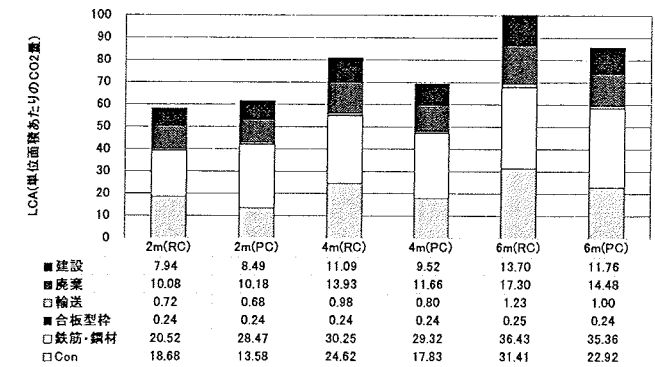


図-1.4 各検討モデルの LCA の内訳

(3) 考察

表-1.2 から、LCA の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 LCA、とりわけ、鉄筋・鋼材を調達する際に発生する LCA が大きいことがわかる。LCA 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。

1.3 塩害に対する保有性能

(1) 検討概要

平成 14 年版の道路橋示方書³⁾に今回新たに設けられた耐久性に関する事項は、設計上の目標期間を 100 年として設定されている。この目標期間を念頭におき、水セメント比(以下、W/C)と耐用年数の関係について検討することとした。このとき、W/C は 35%~65%程度の範囲とした。また、パラメータは環境条件(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として採用した。表-1.3 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³⁾より抜粋)を示す。

表-1.3 塩害の影響による最小かぶり (平成 14 年版道路橋示方書³⁾より抜粋)

表-5.2.1 塩害の影響による最小かぶり (mm)				
塩害の影響の度合い	構造	(1)	(2)	(3)
		工場で作成されるプレストレストコンクリート構造	(1)以外のプレストレストコンクリート構造	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

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),15)}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/m³ 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。

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^{16),17)}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 kg/m³ ~ 2.5 kg/m³ 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),15)}で腐食発生限界塩化物イオン濃度を 1.2 kg/m³ 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/m³ とした。

以下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〉

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

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_0 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)

一般環境下 : 1.5 kg/m³

塩害環境下 : 3.0 kg/m³

$$\operatorname{erf}(s) : \text{誤差関数} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^s e^{-\eta^2} d\eta$$

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)

(2) 検討結果

図-1.5, 図-1.6および図-1.7に耐用年数とかぶりの関係を示す。

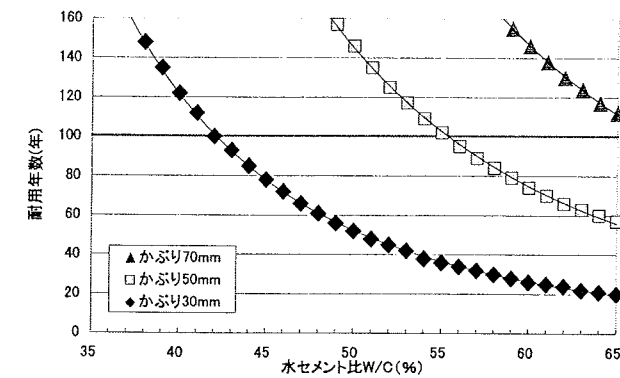


図-1.5 耐用年数とかぶり
(一般環境で普通セメント使用)

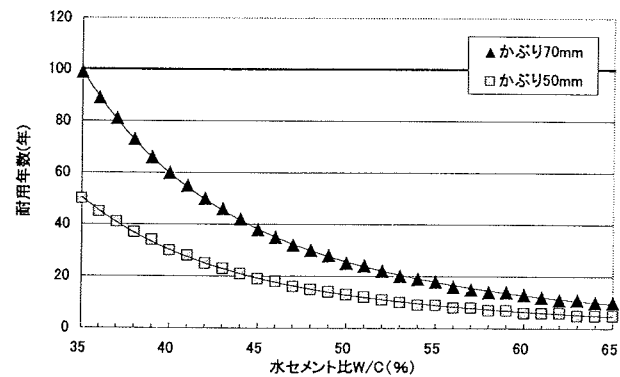


図-1.6 耐用年数とかぶり
(塩害環境で普通セメント使用)

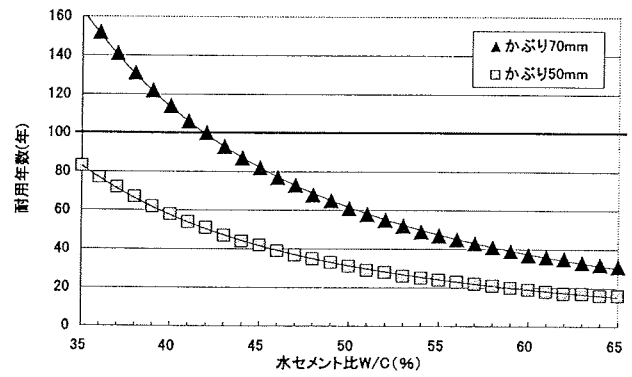


図-1.7 耐用年数とかぶり
(塩害環境で高炉セメント使用)

面における塩化物イオン濃度 (1.5 kg/m³)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 $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ 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ぶり低い 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。

(3) 考察

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

第2章 RC床版の疲労耐久性照査例

2.1 はじめに

床版の疲労耐久性は、「床版の設計供用期間において、交通荷重その他の繰り返し荷重に対し、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して求められる。

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荷力性（押し抜きせん断耐荷力）および使用性（たわみ性状）に関する疲労耐久性について、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 所要安全率の設定
- ③ 耐荷力に対する疲労耐久性照査
- ④ たわみに対する疲労耐久性照査

2.2 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^{1), 2)}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-2.1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。

本検討では、以下の3ケースについて検討する。

- 1) 大都市近郊の重交通路線
大型車混入率 41%, 日交通量 19000 台
(東関東の基幹的産業道路における実測値)²⁾
- 2) 都市部における主要幹線
大型車混入率 28%, 日交通量 13000 台
(北関東の主要幹線道路における実測値)²⁾
- 3) 一般的な地方幹線
大型車混入率 14%, 日交通量 8000 台
(東北地方の地方幹線道路における実測値)²⁾

2.3 所要安全率の設定

時間軸を介した性能である疲労耐久性は、所要の設計供用期間に対する床版保有の耐用年数を、耐久性の安全率として設定することが性能確保の観点からはもっとも合理的である。

しかしながら、既往の研究によれば、RC床版の疲労耐久性を表す S-N 曲線は、勾配が極めて緩やかな (m=1/11~1/14 程度) 対数関数であることから、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、荷重形態等の諸条件の違いによる荷重強度の変化の方が顕著となる。

従って、RC床版の疲労耐久性照査においては、代表荷重とその等価な載荷回数を設定し、荷重倍率をもって安全率とする方が、実際上は合理的であると考えられる。

なお、確保すべき安全率の具体的な値については、施工環境の影響や、公共構造物としての重要度などを踏まえ、今後、詳細な現地状況調査を行って決定してゆく必要があるが、暫定案として鋼部材と同様な 1.7 程度の安全率を確保することを提案する。

表-2.1 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 1) 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。

2.4 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⁴⁾。

$$V_{rpd}/V_{pcd} = (1 - V_{pd}/V_{pcd}) \{1 - (\log N) / 14\} \quad (2.1)$$

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 $V_{pd} \approx 0$ と考える)

この式に、輪荷重の交番荷重の影響を考慮した道路橋床版の疲労耐久性評価式は、以下のように与えられる⁵⁾。

$$P = \{1 - \log(N) / 14\} \times V_{pcd} / k \quad (2.2)$$

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
 $k = (2 \times a + b) / (a + b)$
 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(2.2)に対し、図-2.1 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。

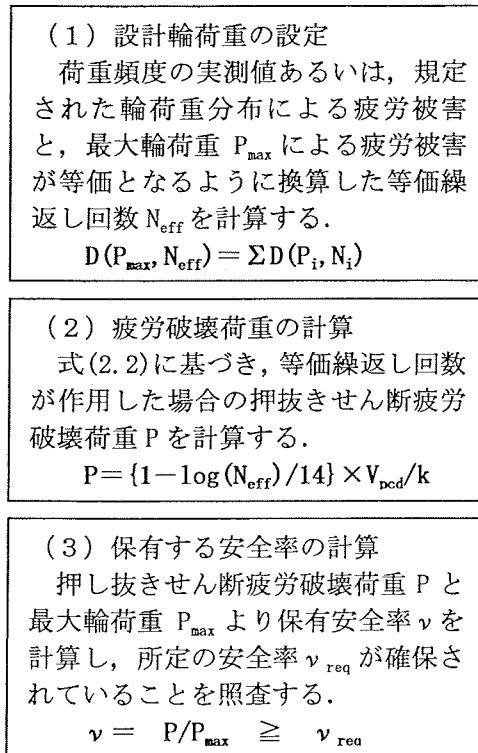


図-2.1 照査フロー⁵⁾

2.5 疲労耐久性照査計算

2.4 の評価手法を用いて、平成 8 年および昭和 39 年道路橋示方書により設計された床版(表 2-2 参照)に、2.2 の荷重ケース 1), 2), 3) を載荷した場合の押し抜きせん断疲労耐久性の照査を行い、結果を表 2-3 および図-2.2 に示す。

表-2.2 床版諸元

	H8 道示床版	S39 道示床版
床版厚	250mm	190mm
コンクリート設計基準強度	24N/mm ²	21N/mm ²
押し抜きせん断強度 V_{pcd}	660kN	378kN
設計供用期間	100 年	40 年

なお、両ケースとも最大荷重 P_{max} は実測輪荷重の最大レンジである 137.2kN、床版支間 2.5m、輪荷重載荷面は 20cm×50cm ($k=1.7$) とした。

表-2.3 押し抜きせん断疲労耐久性照査結果

	1) 重交通路線	2) 主要幹線	3) 地方幹線
日交通量	19000 台	13000 台	8000 台
大型車混入率	41%	28%	14%
最大荷重	137.2 kN		
①平成 8 年道示床版			
破壊荷重	217.8 kN	234.5 kN	248.9 kN
等価繰り返し回数	143 万回	36 万回	11 万回
安全率	1.59	1.71	1.81
②昭和 39 年道示床版			
破壊荷重	135.5 kN	149.6 kN	156.5 kN
等価繰り返し回数	29 万回	4 万回	1 万回
安全率	0.99	1.09	1.14

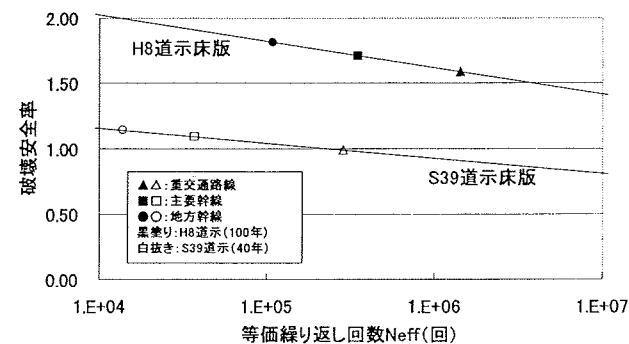


図-2.2 押し抜きせん断疲労耐久性照査結果

これらの結果より、平成 8 年道示床版は、重交通路線においても、1.5 以上の安全率を有していると考えられるが、安全率を鋼部材と同等の 1.7 とした場合には、十分な耐久性を有しているとは言えず、

PC 床版や合成床版など、高い耐久性を有する床版を選択する必要があることがわかる。

また、S39 年道示床版では、設計供用期間を 40 年としても、安全率は 1.2 より小さく、特に重交通路線下においては 1.0 を下回ることから、損傷を受けている可能性があることがわかる。

2.6 たわみと疲労耐久性の関係

一般に、鋼床版に比べて RC 床版は剛性が大きく、床版支間でのたわみが床版の性能に与える影響はあまり大きくないと考えられているが、ここでは、既往の研究データ⁶⁾をもとに、たわみと疲労耐久性の関係について考察する。表-2.4 に示す床版に対する $\delta-N$ 曲線を図-2.3 に示す。図中の理論値は、直交異方性板理論により算出した、コンクリートを全断面有効とした場合のたわみ量と、引張側コンクリートを無視した場合のたわみ量である。

表-2.4 床版諸元(たわみ測定)⁶⁾

	DR-1	DR-5
適用示方書	S39 道路橋示方書	
床版厚	190mm	
床版支間	1800mm	
コンクリート圧縮強度 σ_{ck}	288kgf/cm ² (=28.2N/mm ²)	327kgf/cm ² (=32.1N/mm ²)
配筋	上側主鉄筋	D16@180
	下側主鉄筋	D16@90
	上側配力鉄筋	D13@400
	下側配力鉄筋	D13@250
鉄筋降伏点 σ_{sy}	3450kgf/cm ² (=33.8N/mm ²)	
主鉄筋かぶり	30mm	
静的押し抜きせん断耐荷力 P_s	50.9t (=499kN)	52.7t (=516kN)
荷重比 P/P_s	0.279	0.269

*参考文献 6) 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, pp. 119 図-37 および pp. 120 表-4~6 より抜粋

載荷荷重は $P=14.2\text{tf}$ (=139kN) の移動荷重である(輪荷重面の確保と荷重の移動をシミュレートするため、5mm 間隔で並べた 19 枚の 12cm×30cm×5cm の鋼製ブロック上を移動式鉄輪により移動載荷)。この値は、供試体のコンクリート強度を 300kgf/cm² (=29.4N/mm²) と仮定したときに、引張側主鉄筋が許容応力度に達する荷重値である。一般的な道路橋 RC 床版の設計では、想定される設計曲げモーメントに対して、鉄筋の引張応力度が許容値以下となるように鉄筋量を決めるため、概ね実橋の床版を反映した荷重値であると考えられる。

RC 床版は鋼床版等と比較して剛性が高いため、RC 床版自体のたわみ量を問題とした文献は少なく、RC

床版の許容たわみ量を規定することは難しい。鋼床版では AASHTO の直交異方性床版のたわみ制限として床版支間の 1/300 の規定があるが、この値をそのまま RC 床版で使用すると非常に大きなたわみ量となる。例えば、表-2.4 の DR-1 供試体にあてはめると 1800/300=6.0mm となり、供試体破壊時の活荷重たわみ量が 3.0mm であることから、一般的な RC 床版に対してはかなり大きな値であると考えられる。

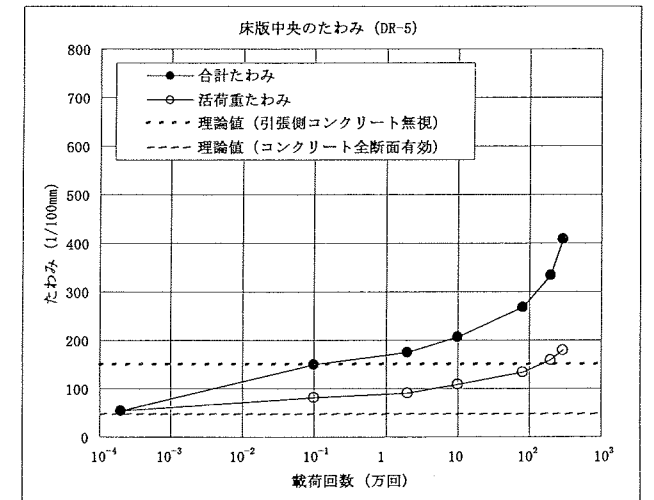
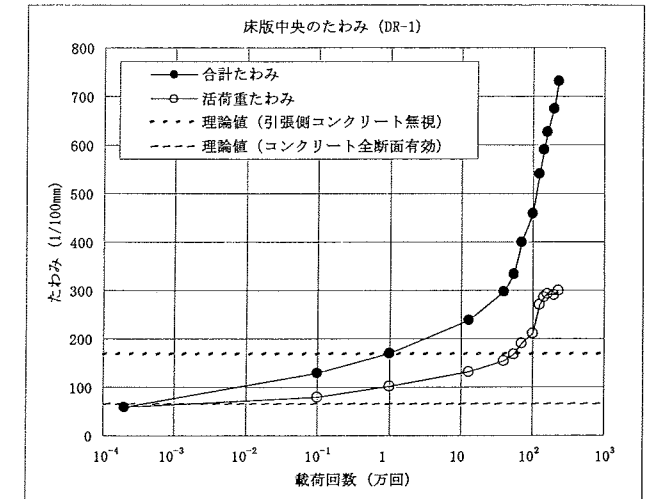


図-2.3 たわみ-載荷回数曲線

*参考文献 6) 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, pp. 137 図-52 をたわみと載荷回数に着目して整理

ここで、供試体の載荷回数と活荷重たわみの増加量との関係に着目する。供試体 DR-1 では、活荷重たわみ量が引張側コンクリート無視の理論値を超えた載荷回数 60 万回付近から増加量が大きくなり始め、100 万回付近で急増している。合計たわみ量の増加傾向から推測しても、この 60 万回付近を境として、床版の破壊が進行したと推察できる。このときの活荷重たわみ量は 1.7mm(床版支間の 1/1060)である。また、供試体 DR-5 でも、DR-1 ほど明確ではないが、活荷重たわみ量が引張側コンクリート無視の理論値を超えた載荷回数 100 万回付近から増加量が大きく

なる傾向が見られる。このときの活荷重たわみ量は1.5mm（床版支間の1/1200）である。

床版の疲労破壊と活荷重たわみ量の関連について検討したが、引張側コンクリート無視した場合の活荷重たわみ量は、床版の疲労破壊の進行と大きな関係があると言える。このことに着目すると、活荷重たわみ量が引張側コンクリート無視の理論値に達する時をRC床版の管理限界と考えることができる。また、管理限界のたわみ量に達する荷重回数で考えると、DR-1の管理限界は約60万回、DR-5の管理限界は約100万回となる。

実橋のRC床版においては、荷重荷重Pを設計上想定される代表荷重と考え、管理限界となる活荷重たわみ量が算定可能である。この場合、一般的なRC床版では、主鉄筋と配力鉄筋方向の剛性の差が比較的少ないため、引張側コンクリートを無視した等方性板理論から解析的に求めればよい。なお、簡易的な点検方法として、供試体と同等なRC床版の活荷重たわみ量の管理限界を考えた場合、安全率を考慮して1/1500~1/2000程度以下までに抑えた方がよいことになる。

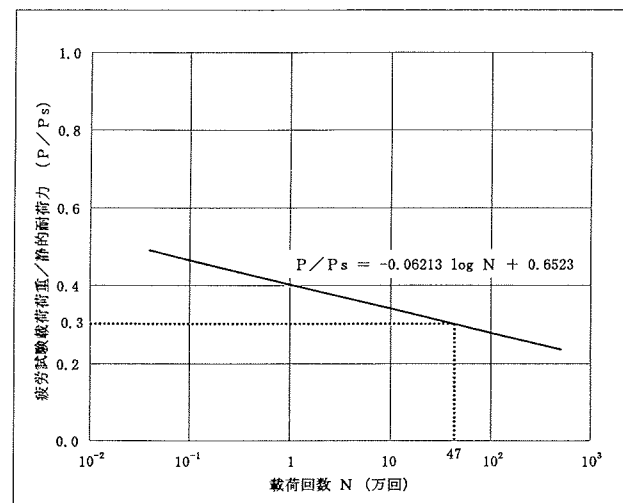


図-2.4 使用限界時の荷重比-荷重回数曲線

*参考文献6) 道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究, pp.149 図-64より抜粋

一方、活荷重たわみ量が引張側コンクリート無視の理論値に達する荷重回数は、供試体ではDR-1が約60万回、DR-5が約100万回であったが、この荷重回数は、荷重荷重Pと床版の有する静的押し抜きせん断耐力Psの比を荷重比(=P/Ps)と定義して無次元化すると、前述した供試体の場合、荷重比はP/Ps=0.275であり、想定する床版の荷重比がこれと異なる場合は、荷重比に応じた計算を行う必要がある。静的押し抜きせん断耐力Psが算出されている場合は、管理限界に達する荷重回数を推定する1つの方法として、既往の研究⁶⁾に図-2.4

の荷重比と荷重回数の関係式が示されている。この関係式を利用すると、例えば、荷重比P/Ps=0.30の床版の場合は約47万回の繰り返し荷重により管理限界のたわみ量に達すると予測することができる。

2.7 使用性に対する疲労耐久性照査

舗装ひび割れの抑制や利用者の体感性など、使用性確保の観点からも、疲労耐久性を照査し、床版のたわみの増分が所要の値以下であることを照査しなければならない。

主桁のたわみを橋梁支間に対して制限することで、床版他の構造物への付加応力を制限する手法は一般的である^{7)~9)}。また、鉄道橋や歩道橋では、列車の走行安全上や乗客・歩行者の体感性をもとにたわみの規定が設けられている^{10),11)}。しかしながら、道路橋でたわみの規定が床版支間に対して設けられている事例は少なく、道路橋示方書では、鋼床版に対しては、曲率半径を20m以上とすることで舗装のひび割れを防ぐことができるとされている程度であるが、この値はRC床版にとっては極めて大きなたわみ値となり、通常の供用状態では生じないと考えられる。このことから、一般的なRC床版は、使用性という観点ではたわみに対する疲労耐久性を有していると考えることができる。

2.8 まとめ

- 1) コンクリート標準示方書の押抜きせん断疲労耐久性評価式によれば、平成8年道示床版は、設計供用期間を100年とした場合、重交通路線においても、1.5以上の安全率を有していると考えられるが、安全率を鋼部材と同等の1.7とした場合には、PC床版や合成床版など、高い耐久性を有する床版の採用を検討する必要がある。
- 2) RC床版の活荷重たわみ量の管理限界は、引張側コンクリートを無視した場合の理論値に達する時と考えることができる。また、荷重荷重Pと床版の有する静的押し抜きせん断耐力Psの比(荷重比)より、管理限界の活荷重たわみ量に達する荷重回数を推定することができる。
- 3) 一般的なRC床版においては、たわみに関する疲労耐久性はあまり問題視されていない。しかしながら、合理化の観点から採用の増えている少数主桁では、床版の主桁に対する相対たわみの増加などが予想されるため、新しい形式の床版や特殊な荷重状態を想定する場合には、荷重回数とたわみの関係を表すδ-N曲線の検討や、床版の性能確保に必要なたわみの制限値を設定することによって、疲労耐久性をたわみで照査することが必要になってくると考えられる。

第3章 鋼床版の疲労損傷と疲労耐久性を考慮した構造詳細

第1編 II 1.2 疲労耐久性の中で述べたように、鋼床版の疲労設計は、疲労耐久性が疲労試験等により確認された構造詳細を用いることにより省略される。

ここでは、鋼床版において構造詳細による疲労設計が必要となったディテールの背景をまとめることが新しい構造を提案する際の参考資料になると考え、(社)日本道路協会の鋼道路橋の疲労設計指針¹⁾に示されているディテールを中心に文献調査を行った。そして、発生するき裂、疲労き裂の発生要因と防止対策、関連文献とその概要についてまとめ、次頁以降に示す資料集を作成した。なお、鋼床版の疲労損傷については多くの研究がなされており、関連文献は、損傷事例報告、製作・架設に関するもの、実験や解析による応力性状あるいは疲労強度の検討、疲労強度評価方法の提案や疲労設計手法の提案、補修・補強効果の確認等、多岐にわたるが、ここでは破壊メカニズムに関する検討、および疲労強度の改善される構造詳細が提案されている文献に焦点をあててまとめている。

本資料で着目したディテールは以下に示す9種類である。図-3.1に以下の番号に対応したディテールの図を示す。

- A. デッキプレートと縦リブの縦方向すみ肉溶接部
- B. デッキプレートの橋軸方向継手部の横リブ・横桁スカラップ部
- C. トラフリブの突き合わせ溶接部
- D. 縦リブの高力ボルト継手部
- E. 縦リブと横リブ・横桁の交差部-バルブプレートトリブ及び平板リブ
- F. 縦リブと横リブ・横桁の交差部-閉断面リブ
- G. 縦リブと端横リブまたは端横桁の交差部(縦リブを貫通させず横方向部材に全周溶接)
- H. デッキプレートと主桁垂直補剛材の溶接部
- I. 主桁ウェブのコーナプレート

資料の構成は(1)発生するき裂およびその防止対策案、(2)考えられる疲労き裂の発生要因、(3)参考文献、(4)検討概要となっており、(4)検討概要の内容は(3)の参考文献と丸囲みの番号で対応している。

本資料の作成にあたっては(社)日本橋梁建設協会 鋼床版検討特別委員会WG2が作成した鋼床版の損傷事例(案)をご提供頂き参考とさせて頂いた。ここに記して深謝する。

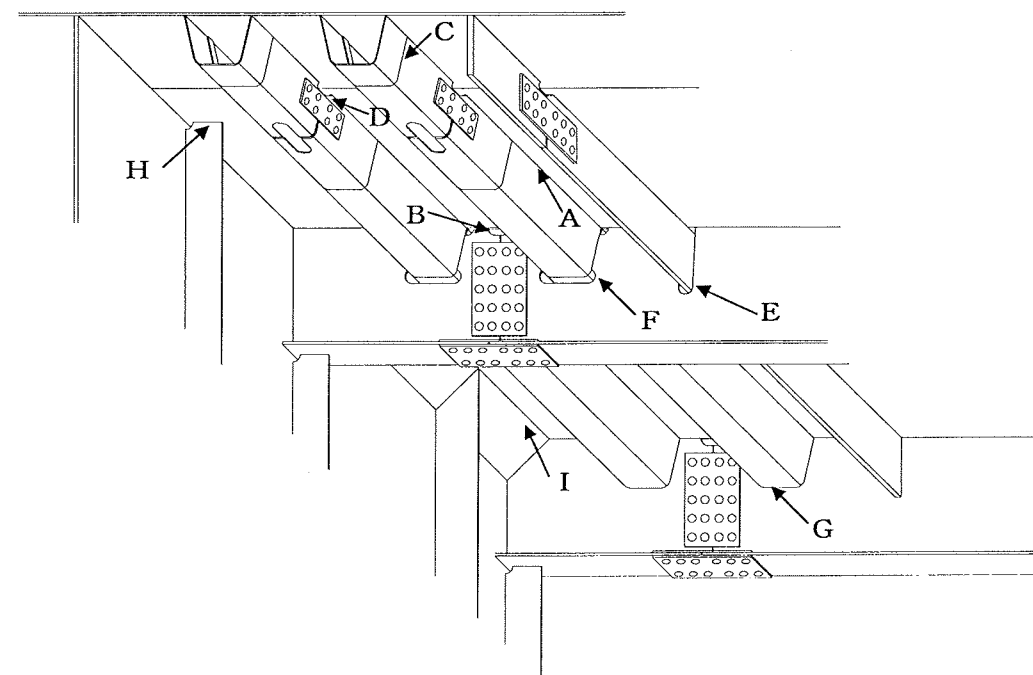
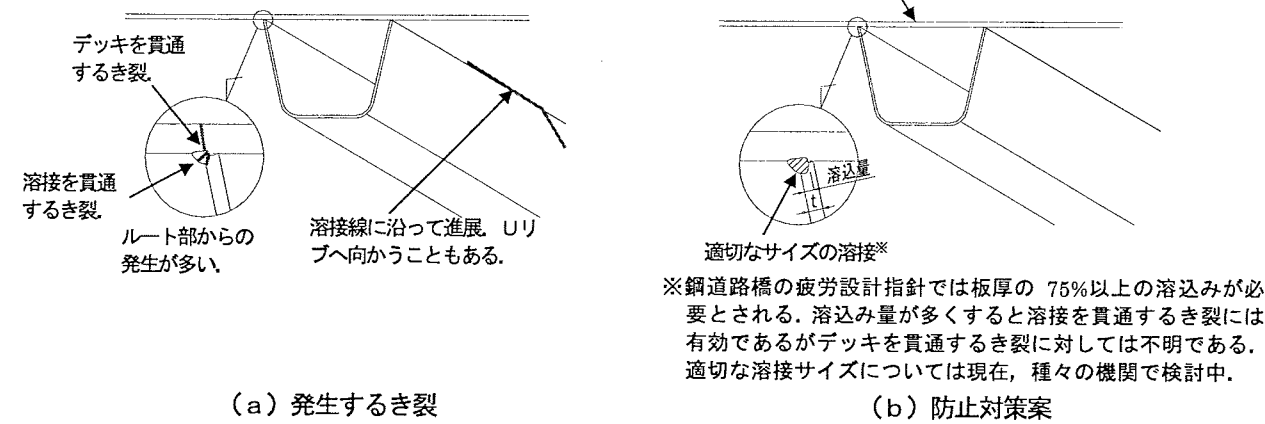


図-3.1 対象としたディテール

A. デッキプレートと縦リブの縦方向すみ肉溶接部

(1) 発生するき裂および対策



(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. デッキプレートの局部曲げ変形に伴う応力集中が生じる。
2. 片面すみ肉溶接継手であり、溶接ルート部に不溶着部が残る場合がある。
3. 縦リブとデッキプレートの密着性が悪い場合がある。

(3) 参考文献

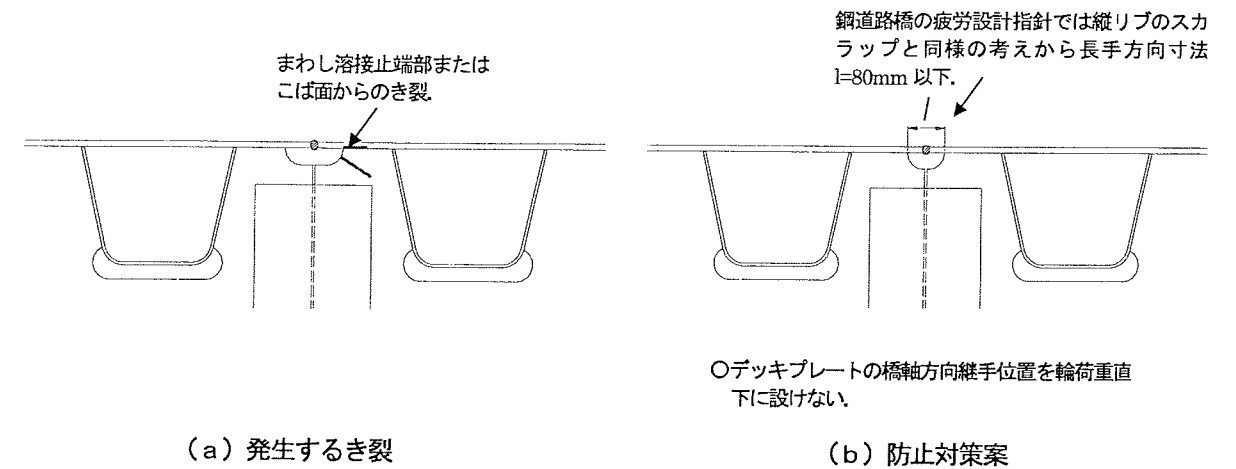
- ① 亀井, 山本, 鈴木, 神野藤, 山内: 鋼床版Uトラフの局部強度, 三菱重工技報, Vol.24, No.4, 1987.7
- ② 土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会: 鋼床版の疲労, 土木学会論文集 No410/I-12, 25-36, 1989.10
- ③ 大橋, 村瀬, 藤井: 鋼床版の疲労を考慮したディテールの改良, 橋梁と基礎, 31-36, 1997.4
- ④ 森: 片面すみ肉溶接継手の疲労強度に対する溶接溶け込み深さの影響, 鋼構造論文集, 第10巻第40号, 2003.12
- ⑤ 川畑, 江崎, 加藤, 杉村, 鈴木, 原, 矢ヶ部, 横山: 鋼床版の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, 2004.11

(4) 検討概要

- ① FEM解析と実橋計測より輪荷重による応力の影響線を求め、トラフリブ近傍には疲労上無視し得ない応力が発生していることを確認。また、デッキプレートとトラフリブの溶接について、片面からの溶接であること、目違い量によってトラフリブ内部の切り欠き形状が大きく変化すること、溶接姿勢により品質が左右されることを指摘。
- ② トラフリブとデッキの溶接部は自然開先（工場製作）が一般的であるが、不溶着を残さないこと、のど厚を確保することが重要であることを指摘。また、Severn橋でこのディテールにおける損傷が多発しており、日本でも注意が必要だが、トラフリブの寸法、間隔の違いにより、ただちに損傷が生じるとは考えにくいとしている。
- ③ 本四公団の鋼床版の一連の検討の中で疲労耐久性の向上を目的で変更した構造ディテールのまとめ。デッキプレートと縦リブの溶接は縦リブ・横リブ交差部において、ルート部の応力集中緩和を目的で採用した溶接量と同様、縦リブ板厚の75%の溶け込みを確保することとした。
- ④ トラフリブ・デッキプレート溶接接合部のデッキプレートに板曲げあるいは軸引張力が作用する場合を対象として、片面すみ肉溶接継手のモデル試験体の疲労試験を実施。また、溶接溶け込み深さをパラメータとしたFEM解析と疲労き裂進展解析を実施。溶接止端部と比較して溶接ルート部の応力集中が高く疲労き裂の起点となること、溶け込み深さを深くすると疲労強度が若干低下すること、溶接脚長を増加するとルート破壊に対する疲労強度改善がみられるという結果を得た。
- ⑤ トラフリブの内面側からデッキ上面に進展する疲労き裂について、実橋の損傷状況調査と応力測定結果を踏まえたFEM解析を実施し、き裂発生メカニズムを考察。デッキ貫通型の疲労き裂の予防策としてデッキ増厚等による輪荷重直下の板曲げ応力の緩和と鋼床版の床組の剛性向上による輪荷重通過前後の引張応力緩和を挙げている。

B. デッキプレートの橋軸方向継手部の横リブ・横桁スカラップ部

(1) 発生するき裂および対策



(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. スカラップ直上に輪荷重が載荷される可能性があり、スカラップによる断面欠損、形状変化に起因する局部応力が発生する。
2. デッキプレートと横リブ・横桁の溶接がショートビードとなる。

(3) 参考文献

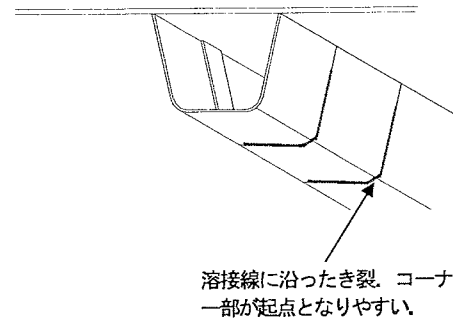
- ① 土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会: 鋼床版の疲労, 土木学会論文集 No410/I-12, 25-36, 1989.9
- ② 鈴木, 加賀山, 岩崎: 鋼床版における疲労損傷の防止検討, 日本道路会議論文集 (第18回), 200-202, 1989.10
- ③ 大橋, 藤井, 三木, 小野, 村越: 鋼床版継手近傍の局部応力と変形挙動, 土木学会論文集 No556/I-38, 65-76, 1997.1

(4) 検討概要

- ① 一般部のトラフリブ間のデッキプレートと横リブの溶接長さは340mm前後であるが、横リブにスカラップがある場合は短くなり、疲労強度上の弱点となることを指摘している。
- ② 横リブのスカラップによりデッキプレートと横リブの溶接長が短くなった箇所(80mm)を対象とし、FEM解析、応力測定試験、疲労試験を実施。高い応力集中と疲労き裂が確認されたことからスカラップ長を短くし、溶接長を長くすることを推奨。
- ③ 横リブ継手スカラップ部の実橋による応力測定を実施し、横リブ継手スカラップ部は輪荷重が直上に載荷された場合に大きな応力が発生することを確認している。

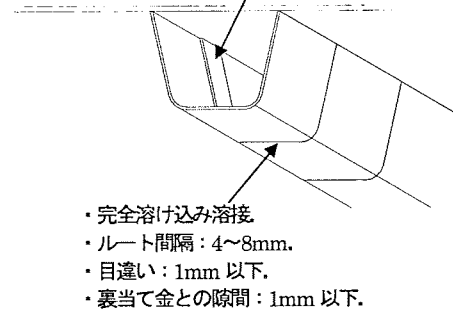
C. トラフリブの突き合わせ溶接部

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

- ・ダイヤフラム兼用でなく平板を使用。
- ・密着度には十分注意する。
- ・裏当て金の接合は突き合わせ溶接の開先内、突き合わせ部の逆側（リブの内部）のどちらでも良い。



○継手位置は縦リブ支間中央等、応力変動が大きいところには設けない。

○基本的には高力ボルト継手を用い、溶接継手は用いない。

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. 継手位置が床組系の応力範囲が大きい位置となっている。
2. 裏当て金とトラフリブの製作精度が悪く密着度が低い場合がある（特に局面コーナー部）。
3. 溶接部の適切なギャップ確保が困難である。
4. 作業空間が狭く、要求される溶接技量も高度（上向き姿勢、上下進）である。
5. 架設（地組）精度が悪いと溶接部に目違いが生じる場合がある。
6. 現場溶接時の変形拘束により引張残留応力が発生する。

(3) 参考文献

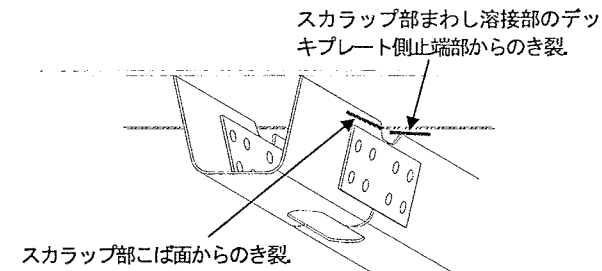
- ①佐伯，西川，滝沢，新田：鋼床版縦リブ現場溶接継手の施工条件と疲労強度，土木技術資料 23-8，9-14，1981。
- ②近藤，山田，青木，菊池：鋼床版の閉断面縦リブ現場溶接継手の疲労強度，土木学会論文集 No340，49-57，1983.12
- ③李，堀川：裏当て金を有する片面溶接継手の疲労強度，土木学会論文集 No362，81-86，1985.10
- ④藤井，松本，三木，小野：鋼床版縦リブ継手部の圧縮疲労強度，土木学会構造工学論文集，Vol.39A，999-1009，1993.3
- ⑤三木，ミューラ：鋼床版縦リブ現場継手部の疲労強度について，鋼構造論文集，第5巻第18号，1998.6

(4) 検討概要

- ① トラフリブの現場施工条件と継手品質の関係，および，各種溶接欠陥が継手の疲労強度に与える影響を明らかとする目的で縦桁近傍の縦リブ現場溶接継手をモデル化した施工試験と，施工試験後の試験体より取り出した試験片の疲労試験を実施。試験結果より縦桁-縦リブ間隔は 300mm 以上確保することが必要であること，目違い量が疲労強度に及ぼす影響は小さいこと，ルート部の溶け込みに注意した施工が重要であることを確認。
- ② 裏当て金部の目違いとルートギャップの条件を変化させて実物大モデルを用いた曲げ疲労試験を実施。ルートギャップを 0mm とすると不溶着が生じ，疲労強度が低下することがわかった。
- ③ トラフリブの裏当て金を有する現場溶接継手について，リブの横断面をスケールアップしたモデルを対象とした FEM 解析，応力測定試験，疲労試験を実施。ルート部の形状と応力集中係数，スケールアップ比などが疲労寿命やき裂の進展に及ぼす影響を調べ，この種の継手で目違いが存在してもルート部形状がなめらかになると，応力集中率は下がり，疲労寿命が大きく向上することを考察。
- ④ 斜張橋の鋼床版を対象。5 種類の縦リブ継手部をモデル化して圧縮応力場における疲労試験を実施。実験結果から，裏当て金を用いた現場溶接タイプは疲労上の弱点になることを明らかとし，ボルト継手において，ハンドホールやスカラップの断面欠損を考慮して U リブ厚を 6mm から 8mm へ増厚する際の板継溶接も疲労上の弱点と指摘。
- ⑤ 裏当て金をトラフリブの突き合わせ溶接の開先内で行った場合（英国方式）と開先でない側のトラフ上に取り付けた場合（日本方式）での疲労強度に大きな差がないことを確認。また，トラフリブと裏当て金間の隙間が大きくなるコーナー部の溶接での溶け込み量が重要であることを指摘。

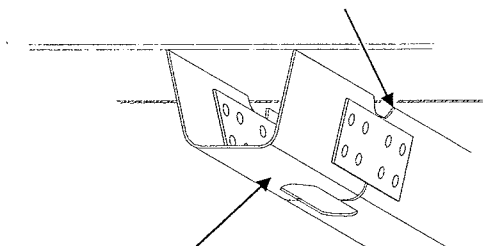
D. 縦リブの高力ボルト継手部

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

- ・スカラップの長手方向の寸法は 80mm 以下とする。
- ・必要に応じて溶接止端部の仕上げやデッキプレートの増厚を行う。



○継手位置は縦リブ支間中央等，応力変動が大きいところには設けない。

○継手位置は縦リブ支間中央等，応力変動が大きいところには設けない。

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. 継手位置が床組系の応力範囲が大きい位置となっている。
2. デッキプレート直下に設置されるスカラップ部において局部応力が発生する。
3. デッキプレート直下に設置されるスカラップ部における溶接不良。

(3) 参考文献

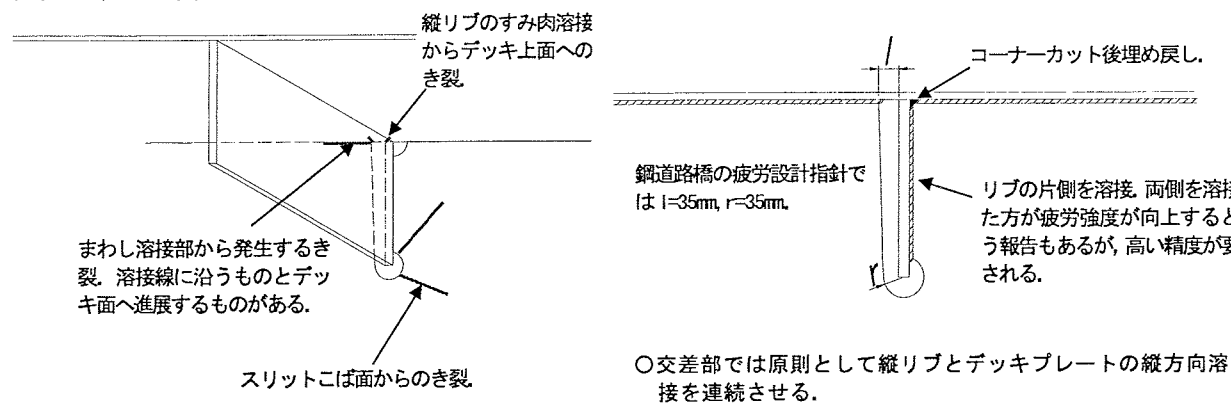
- ①金崎，伊藤，尾下，井上：鋼床版縦リブ継手部の耐荷力実験結果，土木学会第 49 回年次学術講演会 I-155，309-309，1994.9
- ②町田，吉岡，多田，三木，越後，吉家：鋼床版縦リブのスカラップの疲労強度について，土木学会第 50 回年次学術講演会 I-380，760-761，1995.9
- ③大橋，藤井，三木，小野，村越：鋼床版の現場継手部近傍の局部応力と変形挙動，土木学会論文集 No556，I-38，65-76，1997.1

(4) 検討概要

- ① U リブの高力ボルト継手部におけるハンドホールやスカラップの断面欠損を考慮した U リブの増厚（6mm から 8mm）について検討。FEM 解析，載荷試験により断面欠損による剛性低下は少なく，疲労上の弱点である板継ぎが必要となる増厚は好ましくないと指摘。
- ② U リブにあけたスカラップを模擬した試験体を用いた 4 点曲げの疲労試験を実施して，3 種類の形状のスカラップを比較。せん断力が作用する区間のスカラップの疲労強度は非常に小さくなること，スカラップを小さくすることによりその疲労強度が改善されることを明らかとした。
- ③ 実橋の計測およびモデル試験体の応力測定試験，FEM 解析により，スカラップ長 120mm の場合と実施工上最小の 75mm の場合を比較。スカラップを小さくすることが疲労上から有利であることを明らかにした。また，デッキ厚を 12mm から 18mm に厚くした場合の解析的検討により，デッキの増厚はスカラップ近傍の局部応力が大幅に減り疲労上の大きな改善ができることに加え，デッキの変形が減少することから舗装の耐久性も向上することを確認した。

E. 縦リブと横リブ・横桁の交差部—バルブプレートリブ及び平板リブ

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. 横リブ・横桁のせん断変形に伴う局部応力の発生。
2. スリット形状に起因する応力集中。

(3) 参考文献

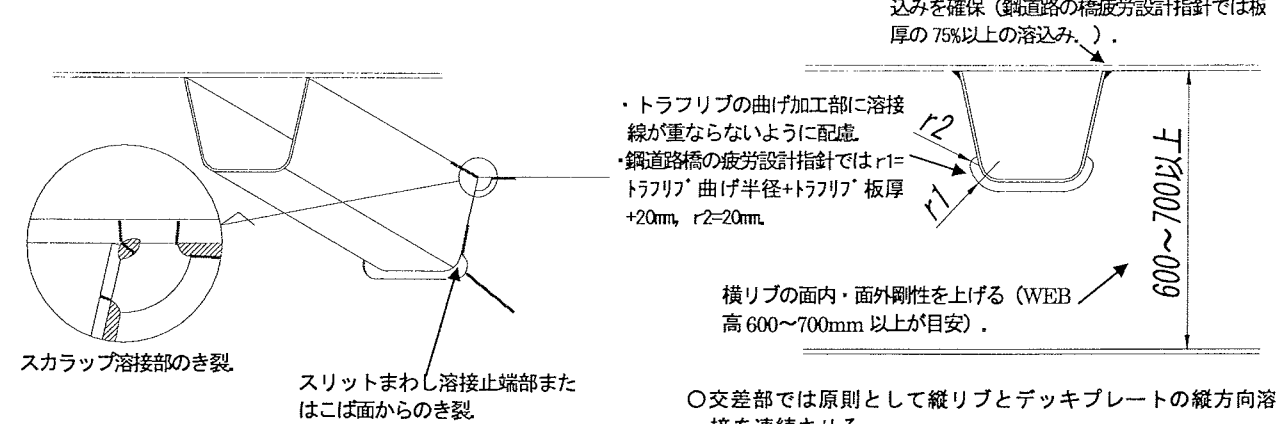
- ①三木, 館石, 高木: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析, 土木学会構造工学論文集, Vol. 37 A, 1163-1168, 1991. 3
- ②岩崎, 寺尾, 深沢: 開断面縦リブを使用した鋼床版横リブの疲労損傷防止検討, 土木学会構造工学論文集, Vol. 38A, 1021-1029, 1992. 3
- ③松本, 遠藤: 鋼床版の横リブ設計手法に関する調査研究, 本四技報, Vol. 17 No. 66, 20-32, 1993. 4

(4) 検討概要

- ① 縦リブ・横リブ交差部に発生する応力を把握する目的で実橋計測を実施。実測値より逆算した応力影響線と FEM 解析により横リブ・縦リブ交差部周辺に応力を生じさせる変形モードを明らかとした。横リブウェブに横リブが梁としてたわむことに起因する面内方向応力と同程度の面外曲げ応力が生じていること、バルブプレートではデッキプレートの鉛直軸回りの回転による面外曲げモーメントが比較的大きいことを確認した。
- ② 開断面縦リブ部と横リブ交差部を有するモデル試験体の疲労試験と横リブ部のスリット形状に関する解析的検討。疲労試験では横リブ WEB 高さを変化させた。疲労き裂の多くがスリット上縁部から発生し、デッキプレートへ進展した。また、形状の解析的検討ではスリット上縁のスカラップを無くすこと、縦リブの両側を溶接する形状とすること、スリット上縁の幅を低減することが望ましいとしている。なお、縦リブの両側を溶接する形状では高い精度が要求されること、スリット上縁の幅の低減では、まわし溶接が困難なため溶接に関して別途検討が必要であるとしている。
- ③ 開断面縦リブ部と横リブ交差部を有するモデル試験体の疲労試験を実施。②と同様に疲労き裂の多くがスリット上縁部から発生した。

F. 縦リブと横リブ・横桁の交差部—閉断面リブ

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. 横リブ・横桁の面内・面外変形によるコーナースカラップ部の応力集中。
2. スリット形状に起因する応力集中。

(3) 参考文献

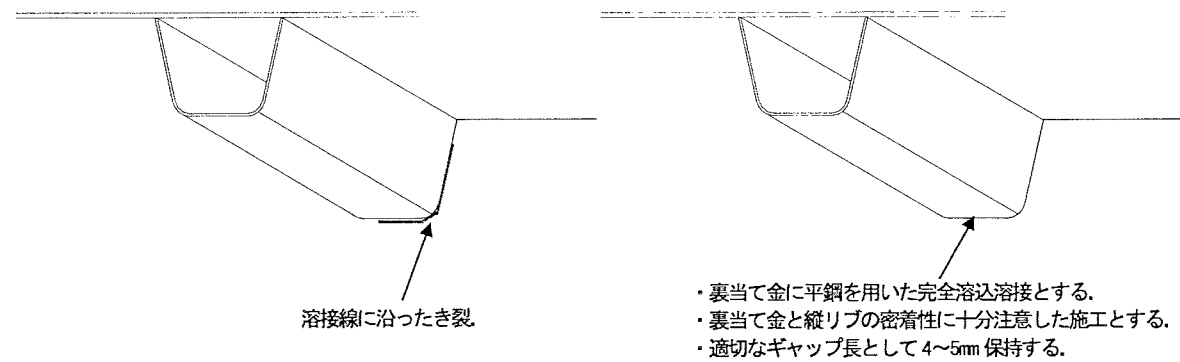
- ①藤原, 西川, 滝沢, 小田: 鋼床版横リブの疲労強度に関する実験的研究, 日本道路会議論文集(第17回), 784-785, 1987. 10
- ②北原, 桧垣, 和田, 渡辺: 鋼床版の横リブ設計法の研究(その1), 住友重機械技報 Vol. 36, 77-83, 1988. 4
- ③三木, 館石, 高木: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の応力実測とその分析, 土木学会構造工学論文集, Vol. 37 A, 1163-1168, 1991. 3
- ④松本, 遠藤: 鋼床版の横リブ設計手法に関する調査研究, 本四技報, Vol. 17 No. 66, 20-32, 1993. 4
- ⑤鈴木, 岩崎, 深沢: トラフリブ・横リブ交差部におけるスカラップ形状の検討, 土木学会第48回年次学術講演会 I-232, 612-613, 1993. 9
- ⑥三木, 館石, 奥川, 藤井: 鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度, 土木学会論文集 No. 519/I-32, 127-137, 1995. 7

(4) 検討概要

- ① トラフリブ貫通構造について横リブのウェブ高さに着目した応力測定試験と疲労試験を実施。ウェブ高さが大きいとスリット部の応力集中が軽減され、疲労寿命が長くなることを確認。
- ② スリット形状と横リブウェブ高さに着目し、実物大試験体の応力測定試験と FEM を用いた弾塑性解析を実施。スリット R 部の半径が 2 つのタイプは 1 つのタイプ ((1) 図 (b) で $r1=0\text{mm}$) と比較して応力集中が軽減されることを確認。また、横リブ腹板高を大きくすることは主応力軽減効果が大きく、設計上可能であればトラフ高さの 2 倍程度以上が望ましいとしている。
- ③ 縦リブ・横リブ交差部に発生する応力を把握する目的で実橋計測を実施。実測値より逆算した応力影響線と FEM 解析により横リブ・縦リブ交差部周辺に応力を生じさせる変形モードを明らかとした。横リブウェブに横リブが梁としてたわむことに起因する面内方向応力と同程度の面外曲げ応力が生じている。面外曲げ応力はデッキプレートの水平変位とそれに伴って生じる回転変形を U リブが拘束するために生じる。
- ④ スリット部の設計手法検討の一部で、既往の研究にあるスリット R 部の半径が 1 つのタイプの試験体を用いた疲労試験と試験条件を合わせ、スリット部の R 部の形状に 2 つの半径を組み合わせた本四タイプのスリットの疲労試験を実施。両者の疲労強度の差は小さいことが分かった。
- ⑤ 上側スカラップを設けスリット R 部の半径が 1 つのタイプと 2 つのタイプ、上側スカラップを省略スリット R 部の半径が 2 つのタイプの計 3 種類について、静的荷重試験と疲労試験を行い、その疲労耐久性を検証した。3 種類に顕著な差が見られなかったが、疲労上の弱点となる上側スカラップ省略を推奨。
- ⑥ 移動荷重による応力を再現できる荷重システムを構築し、静的荷重試験及び疲労試験を実施。縦リブ・横リブ交差部の疲労には横リブの面外変形よりも面内変形が支配的であり、その影響を大きく受ける上側スカラップ周辺が弱点となることを確認。スリット R 部の半径を 2 つとし上側スカラップの有無を比較した検討よりデッキプレートと U リブの溶接部を完全溶け込み溶接とし、上側スカラップを省略するディテールが疲労に対して最も抵抗力があるとしている。

G. 縦リブと端横リブまたは端横桁の交差部（縦リブを貫通させず横方向部材に全周溶接する箇所）

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

- 裏当て金の密着度が悪い場合がある。
- 溶接部のギャップ（適切なギャップ確保が困難）。
- 端横リブまたは端横桁の面内曲げによる応力と輪荷重の移動に伴って端横リブ、端横桁腹板に面外変形が生じ溶接部に応力集中が生じる。

(3) 参考文献

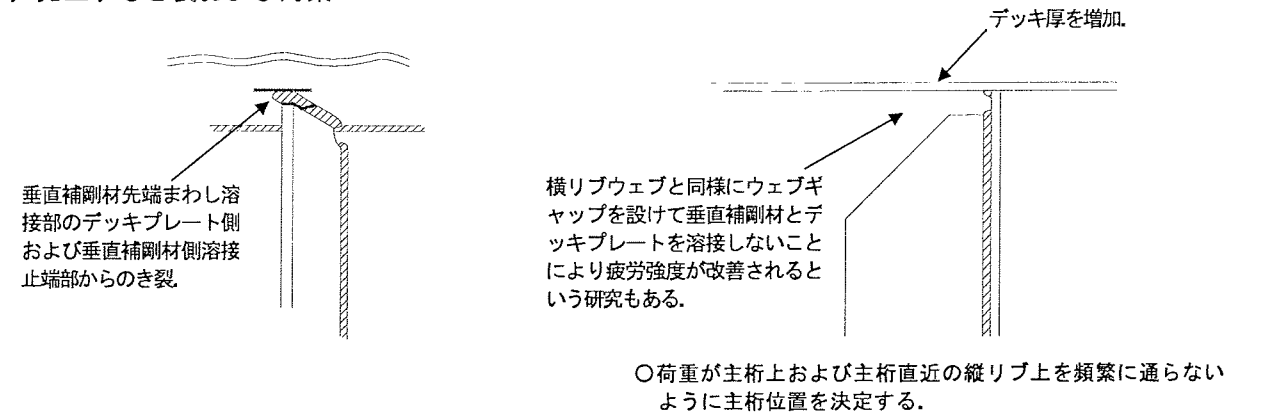
- ①土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集 No410/I-12, 25-36, 1989.10
- ②三木，館石，奥川，藤井：鋼床版縦リブ・横リブ交差部の局部応力と疲労強度，土木学会論文集 No519/I-32, 127-137, 1995.7

(4) 検討概要

- ① トラフリブ端部のすみ肉溶接で荷重を伝達させる構造であること，溶接部の裏側に板がないために面外変形が生じやすいこと等を指摘。その他リブ配置の都合上，トラフリブから板リブに変化する場合の板リブ割込み部の溶接欠陥も疲労強度上の弱点と指摘。
- ② 交差部の疲労強度は横リブの面外曲げより面内曲げによる影響が大きい。交差部の縦リブとデッキは完全溶け込みが望ましい。

H. デッキプレートと主桁垂直補剛材の溶接部

(1) 発生するき裂および対策



(a) 発生するき裂

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. 輪荷重によるデッキプレートのたわみ変形を垂直補剛材が拘束することに起因する垂直補剛材のデッキプレート溶接部先端の応力集中。

(3) 参考文献

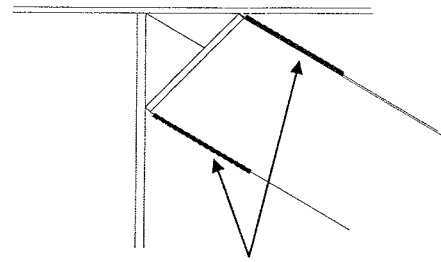
- ①岩崎，狩生，西：実橋計測による鋼床版主桁ウェブ垂直補剛材上端部の疲労検討，土木学会第43回年次学術講演会，I-139, 332-333, 1988.10
- ②鈴木，加賀山，岩崎：鋼床版における疲労損傷の防止検討，日本道路会議論文集（第18回），200-202, 1989.10
- ③藤井，西川，村越，田中：鋼床版デッキプレートとスティフナの溶接部の疲労試験，土木学会第47回年次学術講演会，I-129, 434-435, 1992.9
- ④程，西川，村越，福地，大橋：鋼床版デッキプレートと主桁垂直補剛材の溶接部の疲労に関する検討，土木学会第52回年次学術講演会，I-A252, 502-503, 1997.9

(4) 検討概要

- ① 実橋を対象とした載荷試験を実施。垂直補剛材がデッキプレートのたわみを拘束し，垂直補剛材先端で大きな応力が生じていることを確認。
- ② 垂直補剛材の幅と縦リブ間隔を変化させた場合について FEM 解析と実物大供試体の応力測定を実施。また，改良案として補剛材の上端部に 30mm のウェブギャップを設けたケース，補剛材を縦リブに溶接したケース，コーナープレートを添加したケースについて実物大供試体の応力測定を行い，コーナープレート添加の有無を比較する疲労試験を実施。コーナープレート添加により疲労強度が改善されることを確認した。
- ③ 垂直補剛材とデッキプレートの溶接部に着目し，モデル試験体の応力測定試験と疲労試験を実施した。直近する縦リブ直上に荷重された場合に最大ひずみが発生することを確認。疲労試験では荷重を大きめに設定してき裂発生後の進展挙動を確認。垂直補剛材側から発生したき裂はデッキまで進展した。これらの検討結果より荷重が主桁上および主桁直近の縦リブ上を主桁位置を決めることを推奨。
- ④ デッキ厚 12mm あるいは 24mm の実物大の試験体を作成。載荷試験を行いデッキプレートと垂直補剛材を溶接する場合，メタルタッチ，35mm 隙間，70mm 隙間の場合についてホットスポット応力を求めて疲労強度を評価。デッキプレートを増厚させること，上端部に隙間をあけることが，疲労強度改善につながることを示した。

1. 主桁ウェブのコーナープレート

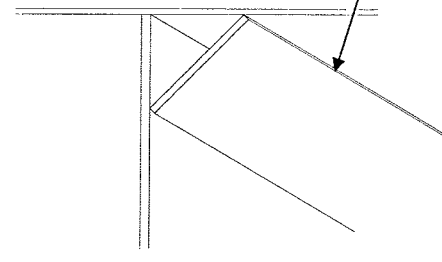
(1) 発生するき裂および対策



溶接線に沿ったき裂

(a) 発生するき裂

鋼道路橋の疲労設計指針では75%以上の溶込みが必要とされるが、トラフリブの溶接と同様の注意が必要と考えられる。



- デッキプレートの増厚を含めて、リブ間隔・配置を検討することによりコーナープレートの採用を避ける。
- 主桁ウェブとデッキプレートの溶接部が隠れ、維持管理上好ましくないことからコーナープレートは極力設けない。

(b) 防止対策案

(2) 考えられる疲労き裂の発生要因

1. デッキプレート、主桁ウェブの平坦度の確保が困難（溶接部の密着性が確保しにくい）。
2. ビード不整を生じやすく、所要のど厚が確保されない場合がある。

(3) 参考文献

- ①土木学会鋼構造委員会 鋼床版の疲労小委員会：鋼床版の疲労，土木学会論文集 No410/I-12, 25-36, 1989.10

(4) 検討概要

- ① 構造上組立部のギャップが大きくなること、特に現場継手部近傍の現場溶接部では精度確保が難しいことを指摘。

第4章 材料の耐久性に関する既存資料の調査

4.1 はじめに

鋼材料ならびにコンクリート材料の耐久性の観点から既存資料の調査を試みた。調査の対象は、鋼橋あるいはコンクリート橋に関する耐用年数とした。床版材料の耐久性を考える上で、床版は平面的広がりがあり、橋梁（桁構造）の屋根の役割を果たすため、雨水や直射日光の当り方などわずかに使用環境の違いはあるが、橋梁に関する既存資料は床版の材料耐久性の参考になると考え、調査を行った。

4.2 鋼材料に関する資料調査^{1)~3)}

橋梁に用いられる鋼材は主として塗膜や亜鉛めっきによってその耐久性を確保してきた。したがって、鋼材の材料としての耐久性は塗膜や亜鉛めっきの耐久性そのものとして捉えることができる。

塗膜の耐久性は使用する塗膜の種類や環境条件によって異なる。表-4.1 に示す各種塗装系の期待耐用年数¹⁾は、使用する環境ごとに、塗膜の劣化が見られるまでの期待耐用年数を示している。塗替えを適切に実施し、それを繰り返すことで鋼材はその耐久性を確保することができる。

表-4.1によると、一般環境（山間部）においてはA塗装系²⁾が用いられ、初期耐用年数は標準のA-1塗装で15年であるが、これにC塗装系（海上などの厳しい腐食環境において用いる塗装系）のフッ素系塗装（C-4）を用いると、塗りかえずに60年の耐用が可能としている。塗り替えた場合、1回の塗り替えてA-1塗装では12年、C-4塗装では45年の耐久性があるとされている。

やや厳しい環境（市街地域）の場合、B塗装系（やや厳しい環境に用いる標準的な塗装）の標準塗装（B-1）では15年、C塗装系のフッ素系塗装を用いた場合、45年の耐久性としている。

厳しい環境（海岸部）では、C系塗装のフッ素系で、30年の耐久性があるとされており、塗り替え1回ごとに、25年の耐用年数としている。

また、亜鉛めっきの耐用年数³⁾も供用される環境条件によってまとめられている。橋梁部材では、基準亜鉛付着量を600g/m²以上とし、最低50g/m²以上の残存亜鉛（主構造部で安全を見て40μm程度亜鉛が残存する状態を耐用年数の目安としている）を見て、その耐用年数は亜鉛の年間腐食減量で除して求めることができる。表-4.2には、その年間腐食減量の代表値（頻発度と称し

ている）を各環境条件ごとに記している。すなわち、亜鉛めっきを用いた場合、その耐用年数は、

耐用年数 = (600-50) / 頻発度 = 550 / 頻発度で示す事が出来る³⁾。

すなわち、山間・田園部では、頻発度に5g/m²/年を代入し、耐用年数110年、人口稠密及び工業地域では、頻発度に8~10g/m²/年を代入し、耐用年数は55~68年、海岸地域の海水飛沫を受ける海岸地域では、11年の耐用年数という計算となる。

表-4.1 各種防食法の期待耐用年数¹⁾

防食系		期待耐用年数	
		初期	塗替え
従来型	長油性フタル酸樹脂塗装（A-1）	15年	12年
提案型（1）	ポリウレタン樹脂塗装（薄膜形重防食）	30年	25年
参考 C塗装系	ポリウレタン樹脂塗装（C-2）	40年	30年
	ふっ素樹脂塗装（C-4）	60年	45年
提案型（2）	耐候性鋼（裸仕様）	100年	-

一般環境（山間部）の場合

防食系		期待耐用年数	
		初期	塗替え
従来型	塩化ゴム系樹脂塗装（B-1）	15年	12年
提案型（1）	ポリウレタン樹脂塗装（C-2）	30年	25年
参考 C塗装系	ポリウレタン樹脂塗装（薄膜形防食）	20年	15年
	ふっ素樹脂塗装（C-4）	45年	35年
提案型（2）	溶融亜鉛めっき（塗替ポリウレタン）	60年	25年

やや厳しい環境（市街地）の場合

防食系		期待耐用年数	
		初期	塗替え
従来型	ポリウレタン樹脂塗装（C-1）	20年	15年
提案型（1）	ふっ素樹脂塗装（C-4）	30年	25年
提案型（2）	常温溶射（塗替ふっ素塗装）	45年	25年

厳しい環境（海岸部）の場合

注1. 参考用として、C塗装系でも比較検討した。
注2. 期待耐用年数については初期（新設）100%とした場合、塗替え（2種ケレン）を80%に設定した。

表-4.2 使用環境とめっき皮膜の年間腐食減量²⁾

環境区分	年間腐食減量 (g/m ² /年)	頻発度 (g/m ² /年)	
		頻発度	頻発度
大気汚染の少ない山間、田園地域	5~10	5	
人口稠密地域及び工業地域	7~20	都市部	8
		工業地域	10
海岸地域	10~30	一般の海岸で海岸より0.5~2kmの地域	10
		その他上記より厳しい所	20
風害に海水飛沫をうける海岸地域	30~200	非常に過酷な腐食性地域	50

（備考）頻発度：長期に耐用した場合の年間腐食減量のそれぞれの地域での代表値

亜鉛めっき橋梁が上記の耐用年数を迎えた場合、その後さらに耐久性を確保する場合は、めっきの上に塗膜を上塗りすることで耐久性を確保することができる。

4.3 コンクリート材料に関する資料調査

鋼橋の鋼材料に比較し、コンクリート橋（硬化したコンクリート材料）を対象とし、その耐用年数を総括的に示した例は見当たらなかった。鋼材の塗膜や亜鉛めっきの耐久性が、いずれも鋼材の材料特性に影響せず、塗膜そのものの耐候性能、亜鉛めっきの犠牲防食効果によって担われており、また、多くの暴露試験等のデータが得られているのに比べ、コンクリート材料は材料劣化の原因として複数の要因が考えられるためと考えられる。すなわち、コンクリート材料がセメント、水セメント比、骨材の種類、混和材などによって影響されるだけでなく、その施工方法によっても材料の性質などが異なり、複雑な環境作用を受けるなかで、その耐久性を一律に論じることが極めて難しいためと考えられる。

コンクリート材料の劣化要因として代表的に取り上げられるのは、①凍害（凍結融解）、②中性化（炭酸化）、③化学作用（塩化物の影響、対海水、対硫酸塩性など）④アルカリ骨材反応 ⑤水密性、⑥耐火性 ⑦対すりへり性 といった項目である。ここで、橋梁床版に関する劣化要因に限れば、①凍害 ②中性化による鉄筋腐食 ③塩化物の影響（塩害）④アルカリ骨材反応が挙げられる。各々の劣化要因について、その耐久性、あるいは、耐用年数がどう論じられているかを調査した。

(1) 凍害^{4)~6)}

凍害とは、コンクリート中の水が氷となる際の膨張圧によって主としてコンクリートペーストにひび割れが生じ、凍結融解の繰り返しで表面近くのコンクリートが徐々に破壊して行く現象である。

したがって、コンクリートの凍害に対する抵抗性は、セメントペーストの飽水の程度と空隙の大きさによって大きく影響され、この他にセメントペーストの強度、コンクリートの伸び能力やクリープなどとも関係がある。凍害抵抗性の指標としては、コンクリート中に平均してどのくらいの間隔で気泡が存在するかを表す気泡間隔係数が用いられ、その値が200~250 μ m以下ならば凍害の影響が少ないとされている^{4)~6)}。また、骨材については細骨材よりも粗骨材の品質が影響し、吸水率の小さなものを使用することが必要で、土木学会標準示方書「施工編」⁶⁾ではJIS A 1122の「硫酸ナトリウムによる骨材の安定性試験方法」における損失係数が12%

以下の粗骨材を使用することとされている⁵⁾。

このように室内ではある程度の知見が得られてきているが、凍害と耐用年数が関連付けられるまでには至っておらず、耐用年数を示した資料は見あたらなかった。

凍害は、凍結融解の繰り返しが多い環境下で劣化進行が早くなる。最低気温が低いだけでなく、飽水や日射によって融解が生じる環境となるかどうか劣化の進行に影響する。そのため、北面より南面のコンクリートに凍害が生じやすい⁵⁾など、極めて局所的な条件によって耐用年数が変わることになり、凍害による耐久性を論じることが極めて難しいといえる。

したがって、現状としては、初期のコンクリートに凍結融解作用に対する適切な抵抗性を与えることで、凍害に対する耐久性を確保している。具体的には、相対動弾性係数の最小限界値⁶⁾を確保することにより、十分な耐凍害性を有するとしている。

(2) 中性化による鉄筋腐食

中性化とは、コンクリート中の水酸化カルシウムが大気中の炭酸ガスと反応して水酸化カルシウムに変化することによって、コンクリート中のアルカリ度が低下することを言う。中性化によってコンクリート材料が強度的な劣化を引き起こすことはない。しかし、コンクリート中の鉄筋は強アルカリ中では表面に不動態膜が形成されて、そのため錆の発生はないが、中性化が進むとこの膜が破壊され、結果として鉄筋に錆が生じるようになる。したがって、コンクリートの中性化だけが問題となることはなく、次項の塩害との関連で論議されることが多い。

中性化はコンクリート表面から進行するとされており、その中性化深さ y は経過時間の関数で、一般に以下のように表される。

$$y = K \cdot \sqrt{t}$$

すなわち、中性化深さは経過時間の平方根に比例し、その比例定数 K は、水セメント比、セメントの種類、使用する骨材、使用する表面活性剤や、施工の良否、温度や湿度などの環境因子などで決まる関数である。

この式は中性化速度式とよばれ、文献 7) には実用的な式の代表として、浜田の式、岸谷の式、白山の式、依田の式が掲載されている。

ただし、文献 6) には、普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比が50%以上、30mm以上の被りがある場合には、中性化に関する照査を行わなくてよい旨の記述があり、床版はこれに該当すると考えられる。

また、中性化そのものは耐久性に直接関係する現象ではなく、次項の塩害など、鉄筋の錆との関係でその耐久性が論じられることになる。

(3) 塩害（特に鉄筋の腐食）

鉄筋が腐食する条件は Cl^- の存在だけではなく、中性化によるコンクリートのアルカリ度の低下と水 (H_2O) ならびに溶存酸素 (O_2) の存在が必要である。床版は一般に雨水によって水分が供給され、飛来塩分や凍結防止材中に存在する塩化物イオンが鉄筋の不動態皮膜を破壊するため、中性化していなくても腐食が起こるケースがある。そのため、塩害に関しては塩化物イオン濃度の値が注目されることが多い。

鉄筋の発錆に及ぼす塩化物の量の影響については、いくつかの研究結果があり、表-4.3にこれを示す。これによると Cl^- の限界値、すなわち塩化物イオンの腐食発生限界濃度は 0.5~2.5 (kg/m³) の範囲にわたっている。土木学会のコンクリート標準示方書⁶⁾では、この値を 1.2 (kg/m³) としている。

表-4.3 鉄筋の発錆に及ぼす塩化物イオン量⁷⁾

国名	規格	規 則 値	Cl^- 限界値 (kg/m ³)
イギリス	BS 8110(1985)	1) PCでは、 Cl^- に換算してセメント量の0.1%以下 2) RCでは、 Cl^- に換算してセメント量の0.4%以下	0.45 1.20
フランス	Document Technique Unif. N° 21.4 (1979 部分改訂) (建築科学技術本部)	RCでは、 Cl^- に換算してセメント量の0.65%以下	1.95
アメリカ	ACI 222R(1985) (ACI318 ^{*)})	1) PCでは、 Cl^- に換算してセメント量の0.08%以下 2) RCでは、 Cl^- に換算してセメント量の0.20%以下	0.36 0.60
西ドイツ	DIN 426(1981)	骨材中の水溶性塩化物量は、 (1) プレテンション方式のPCでは、 Cl^- に換算して0.02%以下 (2) RCおよびポストテンション方式のPCでは、 Cl^- に換算して0.04%以下	0.17 [†] PC-0.50 0.28 [†] RC-0.64
	DIN 1164(1978)	セメント中の塩化物は、 Cl^- に換算して、セメント量の0.1%以下	
新しい土木学会示方書		1) PCなど、厳しい条件の場合 2) 一般のRCなどの場合	0.30 0.60

* RCではC=200kg/m³、S=850kg/m³、PCではC=450kg/m³、S=700kg/m³と仮定し、1m³当たりのコンクリートに含まれる塩化物イオン濃度に換算した値

† ACI318では、規程値は改訂していないが、ACI222のレポートによるのがよいと述べている

* 骨材以外の材料からの塩化物の量を0とした値

主な国々におけるコンクリート中の塩化物含有量規制値を表-4.4に示す。これによると、セメント中の塩化物含有量で規定している国が多いが、わが国では骨材や水に含まれる塩化物イオンの総量が練り混ぜ時コンクリート中で、0.3kg/m³以下⁶⁾とされており、この表を見る限りはもっとも厳しいものの1つとなっている。

塩害は寒冷地において融雪材、凍結防止剤として撒布される塩化カルシウムなどによって生じることも多く、アメリカのペンシルバニア州における、橋梁の各部位の計画耐用年数を表-4.5に示す。これによると、床版の耐用年数としては塗装鉄筋を使っていない場合に、25年、塗装鉄筋を用いた場合でも40年となっている。

表-4.4 主な国々の塩化物含有量規制値⁷⁾

研究者	供試体、配合、鉄筋、ほか	暴露条件	研究結果	Cl^- の限界値 (kg/m ³)
大野ら ⁸⁾	・モルタルA(4×4×16cm) ・F/C: 0.40~0.65(6段階) ・水: 水浸水、高水(1/2~4倍)(6段階) ・鉄筋: 径10mm(かぶり1.5cm)	材齢1年まで曝露発生または海水養生 (分極電位を利用)	・ Cl^- でモルタル量の0.05%以下では必ず不動態がある ・この値は、コンクリート中の Cl^- に換算すると約0.75kg/m ³	0.75
佐伯ら ⁹⁾	・モルタルC(4×7.4×20cm) ・F/C: 0.45~0.60(4段階) ・ K_2CO_3 : 0~1.0% (6段階) ・鉄筋: 3035-113(かぶり0.8cm) ・鉄筋露出: 0, 1000, 2000kgf/cm ²	25℃、80% R.H.に1週間 (発せい面積を測定)	・ K_2CO_3 で、セメント量の0.28%が鉄筋の発せいの限界値 ・この値は、0.350kg/m ³ のコンクリート中の Cl^- に換算すると、0.50kg/m ³	0.50
川口、宮川ら ¹⁰⁾	・コンクリート(5×5×40cm) ・F/C: 0.50、0.30kg/m ³ ・水: 海水(4~1倍)(4段階) ・鉄筋: 3035-113(かぶり0.8cm) ・ひびわれ幅: 0, 0.01, 0.05mm	・湿度: 70, 40, 60% ・湿度: 90%以上 ・期間: 20℃~3年まで 40, 60℃~1, 2か月 (発せい面積を測定)	鉄筋の発せいの限界塩分量 Cl^- で、1.2~2.5kg/m ³ の間に存在	1.2~2.5
大和ら ¹¹⁾	・コンクリート(15×15×120cm) ・F/C: 0.55, 0.6%, 0.12kg/m ³ ・ K_2CO_3 : 0~1.0% (4段階) ・鉄筋: 3035-113(かぶり1.5~5.5cm)	内照露 6年 (発せい面積を測定)	・ K_2CO_3 が骨材の0.1%までは発せいは比較的少ない ・コンクリート中の鉄筋の発せいの限界塩分量は、 Cl^- で、0.8~2.3kg/m ³ の間に存在	0.8~2.3

* 文献中の値にセメントから供給された塩化物イオンを加えて換算した値

日本でも凍結防止剤撒布による床版の打替え事例が報告されている⁸⁾が、この例では供用24年で床版の全面打替えを行っている。凍結防止剤の撒布状況や鉄筋破りの値など、その耐久性を論じるためのデータが入手できず、たまたまである可能性はあるが、結果のみを見れば表-4.5のペンシルバニア州の耐用年数25年ときわめてよく一致している。

表-4.5 ペンシルバニア州の橋梁部位の耐用年数⁷⁾

部 位	計画耐用年数
デッキスラブ (被覆鉄筋不使用)	25年
デッキスラブ (被覆鉄筋使用)	40年
上部工	75年
下部工	100年
メタルカルバート	40年
コンクリートカルバート	80年

凍結防止材による塩害が注目される欧米とはちがって、日本では飛来塩分による塩害が注目されることが多く、とくに北海道や東北地方の日本海側における塩害が話題になることも多い。表-4.6は1999年に管内の17橋を架け替える計画を発表した建設省酒田工事事務所(当時)の橋梁(1橋は鋼橋)である⁹⁾。これによれば、劣化したコンクリートをはつって、表面塗装等で補修してきたにもかかわらず、平均30年程度で架け替えが決定したという計算になる。鋼橋ではRCの床版、コンクリートでは主として桁の塩害劣化と考えられる。

塩害による鉄筋腐食の検討では、一般に、表面に付着した塩化物がコンクリート内に拡散し、鉄筋表面に達したときに錆が発生するとして計算されることが多い。

表-4.6 塩害で架け替えられる17橋⁹⁾

橋梁名	施工年	橋長(m)	型式
三瀬橋	1963	34.7	2径間単純PCポステン桁
三瀬陸橋	1964	70.6	2
小波渡陸橋	1964	86.8	3
堅苔沢3号橋	1965	220.0	11径間単純RCホ-
堅苔沢2号橋	1965	45.0	2径間RCホ-PCプレテンI桁
堅苔沢1号橋	1965	20.0	単純RCホ-
新五十川橋	1982	45.1	単純PCポステン桁
鈴跨線橋	1968	21.7	単純非合成 鋼板桁
暮坪橋	1965	144.0	5径間単純PCポステン桁
米子陸橋	1965	35.7	単純PCポステン桁
温福陸橋	1971	156.7	6径間単純PCポステン桁
大島陸橋	1971	43.6	3径間単純プレテンホ-スラブ
温海川橋	1971	69.9	3径間単純PCポステン桁
港橋	1966	117.5	4径間
岩川大橋	1966	336.9	9径間
小岩川陸橋	1965	235.9	9径間
早田陸橋	1962	99.2	3径間連続PC桁

しかし、床版とくにRC床版においては、輪荷重によって生じた鉄筋に達するひび割れが鉄筋腐食にどう関係するかが、明確になっていない。とくに、連続桁中間支点上のひび割れや床版を貫通したひび割れが生じた場合、防水層施工の良否によっては、床版上面が滞水状態で輪荷重の通過に伴って塩分を含む水がひび割れを通して鉄筋に達する可能性があり、鉄筋腐食がより進行することも考えられる。これらに対してはまだ明確な報告がなされていない。

(4) アルカリ骨材反応

アルカリ骨材反応とは、セメント中のアルカリがセメントペースト中のポア（空隙）に溶出した高アルカリ性のポア溶液と、骨材中に含まれるアルカリに反応する鉱物が化学反応（わが国ではアルカリ炭酸塩反応は確かめられておらず、アルカリシリカ反応とされている）を起こし、結果としてコンクリートが過度に膨張し、コンクリートにひび割れ、粉状化、破壊が誘発される現象を言う⁵⁾。

反応には、①ある程度以上のアルカリ量、②反応性骨材③十分な水の3つの条件が必要で、上記のいずれかが欠けると反応は生じない。アルカリ量としては等価Na₂Oと膨張量との相関がよいとされている。

対策としては、

- ① アルカリ総量の規制
- ② 抑制効果のある混合セメントなどの使用
- ③ 安全と認められる骨材の使用
- ④ 低アルカリセメントの使用
- ⑤ 撥水材などの表面塗布

などが考えられる。このうち、最近土木構造物に対しては、上記①、②を優先する考え方が主流となってきている¹⁰⁾。

アルカリ骨材反応による耐久性、耐用年数の具体的な資料は見当たらなかったが、以上のように、初期のコンクリートに対する対策をすることによって、アルカリ骨材反応を原因とした材料劣化は生じないものとされている。

4.4 まとめ

鋼材料及びコンクリート材料に対し、その耐久性について既存資料によって調査を行った結果、以下のことがわかった。

- 1) 鋼材料については、特定の塗料、亜鉛めっきに対して耐用年数を示した既存資料（表-4.1、表-4.2）があり、大まかではあるが、その耐久性に関する情報を得ることができる。
- 2) コンクリート材料の凍害に関しては、室内試験ではその現象の把握は一定のレベルには達しているものの、一般供用条件下においては、供用環境に関しての局所的な条件の影響も大きく、その耐用年数に関して一般的に論じた資料は見つからなかった。実態としては、新設時に相対動弾性係数が定められた条件⁹⁾を満たすコンクリートを使用することで、凍害に対する耐久性を確保できるとされている。
- 3) 床版コンクリートの中酸化については、一般的な床版への適用方法（水セメント比50%以下）では耐久性照査を行わなくてよいとできる。
- 4) 塩害については、表-4.5や表-4.6が、大まかではあるが、耐用年数や耐久性の目安となると考えられる。
- 5) アルカリ骨材反応を原因としたコンクリート材料の劣化については、その耐用年数に関して一般的に論じた資料は見つからなかった。実態としては、凍害と同様、新設時にアルカリ骨材反応が生じないコンクリートを使用することで、耐久性の問題はないとされている

第5章 RC床版の維持管理計画

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。

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¹¹⁾によれば、以下のように表現される。（図-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>




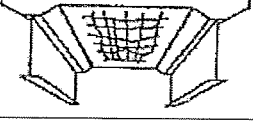
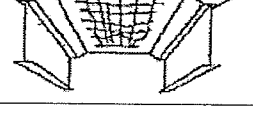
- ① 版として挙動する初期段階
- ② 乾燥収縮クラックの発生による並列梁状の段階
- ③ 活荷重により縦横の曲げクラックが交互に発生し、格子状に至るまでの段階
- ④ 下面から発生した格子状の曲げクラックが移動荷重の影響で上面まで貫通する段階
- ⑤ 貫通したクラックの破面同士が摺り磨き作用により平滑化されてせん断力を失う段階
- ⑥ 低下した押し抜きせん断強度を超える輪荷重により抜け落ちを生じる段階

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。

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-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 ¹⁾		ひび割れによる評価・判定 ³⁾	たわみによる損傷度判定 ²⁾	対策工法 ⁴⁾		
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）	$\delta = \delta_0$ (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	$\delta_0 < \delta \leq \delta_c$ (0 < D ≤ 1)		
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		↓	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)
	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	床版打ち換え		
劣化期	⑥ 抜け落ち発生					

δ : 床版支間中央に発生するたわみ
 δ_0 : 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 = $(\delta - \delta_0) / (\delta_c - \delta_0)$

表-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-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-5.2 点検計画^{1),2)}

	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。おおよ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。		

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²⁾。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³⁾、ここでは、ひび割れに関する損傷区分を元に、表-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。

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-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。

5.5 ライフサイクルコストと維持管理計画

5.2 に示す維持管理計画をどのように捕らえるかによって、床版のライフサイクルコストに大きな影響を与える。

例えば、橋梁の設計供用期間 100 年に対し、床版の押し抜きせん断疲労耐久性（状態⑤）の耐用年数を 100 年として設計すると、橋梁の供用期間にわたって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、床版の押し抜きせん断疲労耐久性（状態⑤）の耐用年数を 70 年として 1 回の打ち換えを想定する場合と、格子

状クラック発生時点（状態③）で曲げ補強を実施し、延命措置をはかる場合では、補強の実施回数も考慮の上、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、床版の押し抜きせん断疲労耐久性の耐用年数を 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。（第 6 章参照）

従って、維持管理計画の策定にあたっては、リスクコストを含めた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る。

第6章 ライフサイクルコストとリスクマネジメント

6.1 性能照査型設計とライフサイクルコスト

性能照査型設計にあたっては要求以上の性能を満たすことが求められるが、高い性能をもたせることにより、一般に必要なコストが上昇する。従って、ただ高い性能を与えるのではなく、構造物の供用期間全体にわたって適正な性能に要するライフサイクルコストの見極めが重要になる。

このことは、従来の仕様規定型設計では重要視されておらず、近年、提案されている種々の性能照査型設計指針でも、あまり具体的には触れられていない。しかしながら、道路橋床版においては時間の経過による損傷が顕著であり、取替えや補修補強が全体のコストに与える影響が大きいため、適正なライフサイクルコストの把握は特に重要である。

一般にライフサイクルコストは次式で与えられる。

$$LCC = C_I + C_M + C_R + C_F \quad (6.1)$$

C_I , C_M , C_R , C_F はそれぞれ初期建設コスト、維持管理コスト、更新廃棄コスト、リスクコストである。

初期建設コストは時間の経過にかかわらず一定である。維持管理コストのうち、点検や運用にかかるコストは一般には床版形式による差はあまりなく、全ライフサイクルコストに占める割合は大きくない。また、更新廃棄コストも、初期建設コストと同様に、通常は時間の経過にかかわらず一定である。

一方、床版は時間が経つほど損傷が大きくなることから、劣化・損傷に対する補修のための維持管理コストは時間と共に大きくなる。図-6.1¹⁾はコンクリート構造物の使用時間と性能低下の関係を示しており、時間の経過により、急激に劣化が進行する時点があることがわかる。つまり、劣化が加速期に入ってから補修を行う場合、補修のための維持管理コストも急激に上昇する可能性がある。これを防ぐために、設計段階における適正な維持管理計画の策定で点検および補修を考慮することとなるが、劣化が時間軸上のどの地点で発生するかを正確に予測することは困難であり、ライフサイクルコストを算出するためには想定通りの劣化状態となるかどうかを含めた確率論的な処理が必要となる。

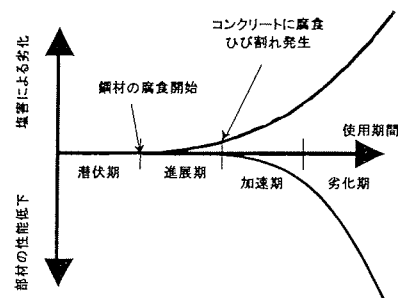


図-6.1 RC 構造物の使用期間と性能低下¹⁾

また、大規模な地震による被害や機能変更の必要性に対しては、これらの事象が発生するかどうかは設計時点において定かではなく、コスト把握にあたっては再現期間などでとらえざるを得ない。

ここでは、これらの供用期間中に稀に発生する可能性のある事象に起因するコストをリスクコストとして検討する。ここで、リスクコスト C_F は、ハザード（予期できない荷重の発生、機能変更、地震などの突発的な事象）が発生した場合の所定の被害に伴う損失復旧額 C_f に対し、ハザードが発生する確率 $ph(t)$ とハザードが発生した時に所要の被害が発生する破壊確率 $pf(t)$ との積を合わせて式(6.2)のように表される。

$$C_F = ph(t) \times pf(t) \times C_f \quad (6.2)$$

リスクコスト C_F が時間の関数でないときは、初期建設コストをわずかに増大させて破壊に至る確率 ($ph \cdot pf$) を小さくすることでリスクコストは急激に減少するので、トータルコストの最小点を見つけることは比較的容易である。しかし、設計供用期間が長い場合などにおいては、ハザード発生の確率は時間の関数となり、損傷に至る可能性はかなり高くなる。さらに、リスクコストには人命や社会的機能の損失によるコストも含まれるため、社会・経済の変化も考慮し、時間と共にハザードの可能性を高く見る必要がある。

6.2 リスクコストの算出

リスクを生じさせるハザードには、大きく分けて以下の2種類がある。

- (1) 突発的な自然災害等、想定外の荷重を生じさせる事象（例えば、想定以上の大規模地震、補修が必要な火災等）
- (2) 材料劣化や疲労などの経年変化が、耐荷力を失う損傷に至る事象

これらのハザードはいずれも、いつ、その現象が発生するかを正確に予測することは容易でない。そのため、これらに対するライフサイクルコストを把握するためには、破壊確率を用いたリスクコストの概念が必要である。

(1) 突発的な自然災害

大規模地震や火災等の想定外の荷重による損傷は、一般には床版単体だけに生じる可能性は少なく、橋梁全体への影響を評価することが妥当であるが、床版の損傷が道路交通機能の阻害に与える影響度が大きいことを考えると、床版におけるリスクとして捉えることも重要であるといえる。

災害等の発生確率は、床版の性能には直接影響を受けない。従って、これらのハザードに対するリス

クコストは、式(6.3)のようにハザードの再現確率を用いたコストの期待値として表される。

$$\sum_i ph_i \times pf_i \times C_{fi} \quad (6.3)$$

ここで、
 i : ハザードの種類
 ph : ハザードの発生確率。
 再現期間を t とした場合 $ph=1/t$
 pf : ハザードが発生した場合に所定の損傷が発生する確率
 C_f : 所定の損傷から機能を復旧するためにかかるコスト

ここで仮に、ある路線において、床版の補修が必要となる大規模火災が t_1 年に1回発生し(このとき、 $ph_1=1/t_1$)、対象とする橋梁が火災の被害を受ける可能性を路線延長や橋梁の立地条件などから判断した値を pf_1 とすると、想定した補修にかかる補修コスト C_{r1} に対し、大規模火災(ハザード $i=1$)の1年間のリスクコストの期待値は式(6.4)のように算出できる。

$$1/t_1 \times pf_1 \times C_{r1} \quad (6.4)$$

設計供用期間が100年の場合、最終的なリスクコストはこの100倍となる。年間の防火管理対策にかかる予算や、初期建設時において防火構造とする場合の増加コストと比較し、リスクコストが小さい場合、このハザードによるリスクは保有すべきリスクであると考えられることができるが、リスクコストの方が大きい場合、予め何らかの防火対策を講じることがトータルコストの低減につながる可能性が高い。

なお、本来リスクコストは、交通規制等にかかる社会的損失(=機会損失コスト)や経済的変動(減価償却による現在価値や物価変動)による評価の影響も考慮する必要がある。

(2) 経年変化に伴う損傷

材料劣化や疲労の蓄積が、実際にいつ、床版の機能に影響を及ぼす耐荷力の低下を発現するかを設計時点において正確に予測することは容易でない。

そのため、材料強度や施工精度、評価式の不確実性が極めて大きい場合の疲労耐久性の低下をリスクコストとして算出する手法についての研究もなされているが^{3),4)}、疲労耐久性の低下によるリスクは、維持管理計画において、十分な予防保全措置を行うことにより、潜在的なリスクコストではなく、顕在化した維持管理コストとして扱うことも可能である。

6.3 維持管理コストとリスクコスト

前節で述べたとおり、維持管理計画に基づき損傷する前に補修する「予防保全」を実行することで、

潜在的なリスクコストを、顕在化した維持管理コストに置き換えることが可能である。

ここで仮に、設計供用期間 Y 年の床版に対し、 Y 年間の維持管理コストとリスクコストを以下の3ケースについて比較すると、表-6.1のような概念で表される。なお、この時の破壊確率の概念を図-6.2に示す。

- ① 点検の上、残存耐力が充分あるうちに補修を実施 (N 回/ Y 年)
- ② 点検の結果、必要なら補修を実施
- ③ Y 年間健全であることを想定し、点検・補修とも実施しない計画。

表-6.1 維持管理コストとリスクコストの概念

管理計画	維持管理コスト C_m	リスクコスト $ph \cdot pf \cdot C_f$
①点検+予防保全(必ず補修実施)	$C_{m1} \times Y$ 年 + $C_{m2} \times N$ 回	$ph \times pf \times C_{f1}$ (≈ 0)
②点検のみ(補修の可能性有)	$C_{m1} \times Y$ 年	$ph \times pf \times C_{f1}$ + $ph' \times C_{f2}$
③点検・補修とも実施せず	---	$ph \times C_{f1}$

ここで、 Y : 設計供用期間 (仮に100年とする)
 N : 補修回数 (仮に1回/50年とする)
 C_{m1} : 1年あたりの点検コスト
 C_{m2} : 50年目の補修コスト
 C_{f1} : 破壊した場合の復旧にかかるコスト
 C_{f2} : 管理限界に達した場合の復旧コスト
 ph : 破壊確率 (時間の関数. 図-6.2参照)
 ph' : 要補修の管理限界に達する確率
 pf : 点検時の見落とし等により、補修の必要性や破壊を予測できない確率 (仮に10%とする)

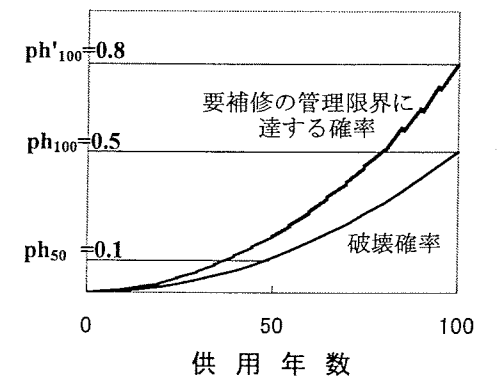


図-6.2 破壊確率の時間変化の例

設計供用期間を100年、補修を50年目に実施とした場合を例にとると、図-6.2のように、補修予定の50年目の破壊確率 ph_{50} が極めて小さい場合、①のように補修を計画することによって破壊のリスクコス

トをゼロに近づけることができるが、その分、点検や補修に対する維持管理コストを見込む必要がある。一方③のように、100年間特別なメンテナンスをせずに使用できると計画する場合、維持管理コストはゼロに近づくが、100年目の破壊確率 ph_{100} に対して復旧に必要なコストをリスクコストに加算することとなる。

さらに、②のように点検の結果で破壊が発生する前に補修を実施することを計画した場合は、破壊に対するリスクコストは、補修すべき管理限界を見落として損傷した場合の復旧コスト Cf_1 を考えればよいが、①の場合よりもその値は大きくなる。一方、管理限界に達したことが点検で確認されて補修が必要となるリスクコスト Cf_2 は、床版が補修を必要とする状態になる確率（通常は破壊確率より大きな値となる）によって算出されるが、①の維持管理における補修コスト Cm_2 と比べて低い値となる可能性もある。

これらを、図-6.2に示した概念例の値を用いて整理すると、表-6.2のようになる。

表-6.2 発生確率とコストの試算

管理計画	維持管理コスト C_m	リスクコスト $ph \cdot pf \cdot Cf$
①	$Cm_1 \times 100 + Cm_2$ $= 100Cm_1 + Cm_2$	$ph_{50} \times pf \times Cf_1$ $= 0.1 \times 0.1 \times Cf_1$
②	$Cm_1 \times 100 = 100Cm_1$	$ph_{100} \times pf \times Cf_1$ $+ ph_{100}' \times Cf_2$ $= 0.5 \times 0.1 \times Cf_1$ $+ 0.8Cf_2$
③	---	$ph_{100} \times Cf_1$ $= 0.5 \times Cf_1$

実際には、各々の発生確率 (ph , pf) や管理コスト (Cm_1 , Cm_2)、復旧にかかるコスト (Cf_1 , Cf_2) を具体的に算出し、コストの総和が最小となる管理手法を選択することが、ライフサイクルコストの最適化となるが、これらの値は現段階では具体的な数値によって把握するまでに至っておらず、今後の課題である。

6.4 まとめ

顕在化していないリスクコストを明らかにすることにより、トータルのライフサイクルコストは極めて膨大な値になる。しかしながら、適切な維持管理計画による予防保全を行うことで、経年劣化による損傷に対するリスクコストを低減することが可能となる場合もある。また、想定外の荷重（大規模地震や火災等）に対するリスクコストも、その値の大きさによっては、別途対策を講じることが、全体としての経済的合理性につながることもある。

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、風荷重や衝突荷重など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、などでリスク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、既存構造と比べてリスク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、リスクコストにも注意を払って比較検討を行う必要がある。

第7章 床版の環境負荷評価 (LCA) 試算例

7.1 算出における前提条件

一般には、設計時点における床版の環境負荷評価 (LCA: ライフサイクルアセスメント) を実施することは少ない。従って、現段階では、床版が環境に与える影響の大きさに関する定量的な評価は困難であると言えるが、環境負荷、特に二酸化炭素排出量の算出は、様々な分野で研究がなされている。

ここでは、諸条件を仮定した上で、環境負荷を床版形式ごとに試算し、今度の環境負荷評価手法への足がかりとする。

(1) ライフサイクルの段階

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¹⁾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。

①初期建設：材料調達、輸送、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

なお、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。

(2) 評価項目

照査指標としては、環境影響の評価項目として一般に用いられる二酸化炭素排出量を用いる。二酸化

表-7.1 床版諸元

構造形式	RC床版	鋼コンクリート合成床版	PC+RC合成床版	プレキャストPC床版	鋼床版
橋長	120 m	120 m	144 m	170 m	618 m
幅員	11 m	11 m	10 m	16 m	11 m
橋面積	1338 m	1338 m	1426 m	2635 m	6640 m

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、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」が簡易評価法としてよく用いられている²⁾。

なお、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。

7.2 二酸化炭素排出量の算出

表-7.1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。以下にその結果を示す。

原単位は土木学会 LCA 小委員会の値³⁾を使用する。

(1) 初期建設

1) 材料調達

材料調達における二酸化炭素排出量を比較すると、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場合には、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-7.2 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、型鋼、鋼型枠

表-7.3 材料調達における負荷 (単位: kgC/m³)

床版形式	コンクリート/鋼材	合計
RC床版	21.53/7.14	28.38
鋼コンクリート合成床版	19.95/38.34	58.29
PC+RC合成床版	21.96/16.16	38.12
プレキャストPC床版	25.24/1.75	26.99
鋼床版	0.00/103.51	103.51

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り扱い業者を想定し、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した。表-7.5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。

表-7.4 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

表 7-5 建設時輸送における負荷

床版形式	単位 : kgC/m ²
RC 床版	1.07
鋼コンクリート合成床版	4.34
PC+RC 合成床版	10.44
プレキャスト PC 床版	18.49
鋼床版	7.03

3) 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や機械の磨耗に対して算出する必要があるが、詳細な施工重機の資料状況を把握することが困難であるため、ここでは、既往の研究結果⁴⁾の平均的な値として、単位橋面積あたり 5.0kgC/m²と仮定する。なお、この値は RC 床版および鋼コンクリート合成床版を想定して算出した値であり、製作施工の工程が異なる PC 床版や鋼床版に対しては、実際には別途、見積もる必要があると考えられる。特に鋼床版については、現場工期が短いなど、施工に起因する負荷は他より少なくなることが予想される。

(2) 維持管理

7.1 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、床版の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

更新・廃棄にかかる二酸化炭素排出量を表 6-4 に示す。なお、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。

表-7.4 廃棄更新における負荷 (単位 : kgC/m²)

床版形式	取壊し/輸送 リサイクル	合計
RC 床版	6.00/3.03 -3.32	5.71
鋼コンクリート 合成床版	6.00/3.34 -8.60	0.74
PC+RC 合成床版	6.00/3.29 -6.33	2.96
プレキャスト PC 床版	6.00/3.31 -0.81	8.50
鋼床版	6.00/1.17 -16.12	-8.95

1) 取壊し工

ここでは、一般のコンクリート工事における建設と取壊しの機械損料の比率等から、取壊しにかかる環境負荷は初期建設時の施工の 2 割増し程度と考え、単位橋面積あたり 6.0kgC/m²と仮定する。

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 程度のところに処分場が存在すると仮定して算出する。

3) 廃棄・リサイクル

床版に使用する材料はコンクリート、鉄鋼などのリサイクルが可能なものや安定型産業廃棄物であるため、最終処分にかかる費用は計上しない。

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砕石等に利用されるが、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、その重量の半分程度の電炉材製造負荷を低減できると仮定する。

7.3 床版形式による環境負荷の比較

表-7.5 および図-7.1 に二酸化炭素排出量の集計結果を示す。

表-7.5 床版の LCA (合計)

床版形式	単位 : kgC/m ²
RC 床版	40.45
鋼コンクリート 合成床版	68.37
PC+RC 合成床版	56.51
プレキャスト PC 床版	58.98
鋼床版	106.59

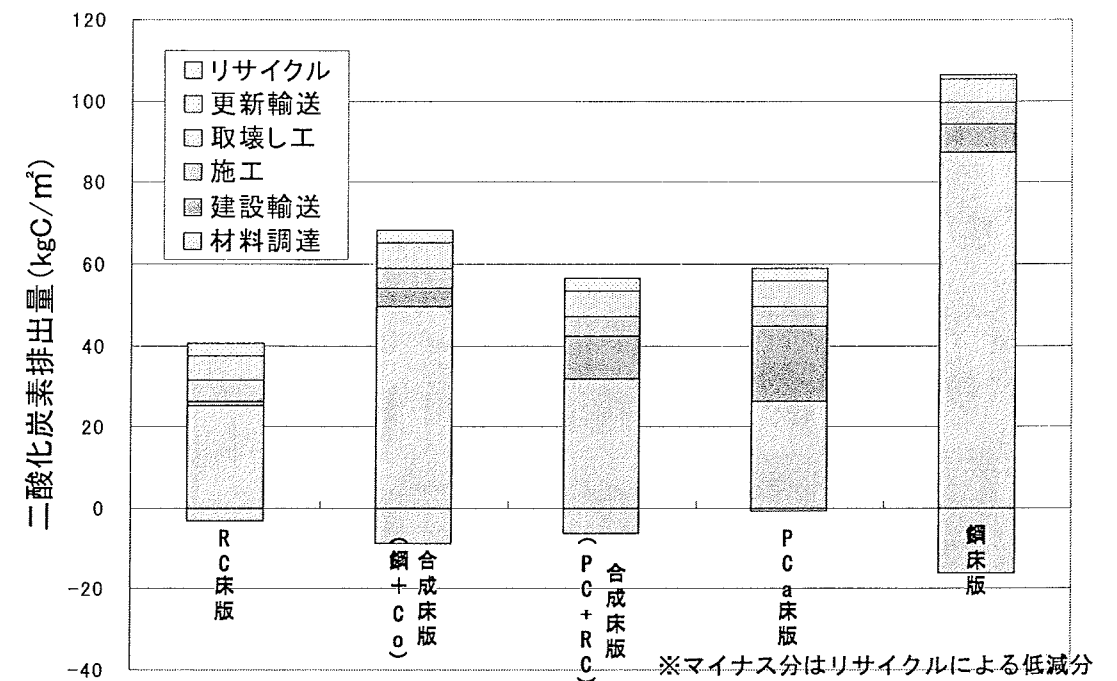


図-7.1 床版に着目した LCA (桁・下部工に起因する分は含まない)

ここでの比較検討は、橋梁支間や床版支間、上下部工の構造など、設計条件のこと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。特に、鋼床版については、橋梁の支間が長く、条件が厳しいこと、床版部材を主桁の一部として用いており、床版としての機能以外も有していること、施工や取壊しにかかる環境負荷は、コンクリート構造に比べ、少ないと予想されること、などから、実際よりも厳しい結果となっていると考えられる。

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。

- ・ 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⁴⁾。

7.4 LCA 算出原単位の比較

LCA に使用する二酸化炭素排出量原単位は、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 LCA 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、表 7-6 に示す原単位表をもとに、①土木学会・LCA 小委員会推奨値、②日本建築学会・地球環境建築特別研究委員会報告、③国土開発技術センター・建築委員会報告書における値の比較を行った。結果を表 7-7 および図 7-2 に示す。

表-7.6 原単位の比較

分類項目	土木学会	日本建築学会	国土開発技術セツク
生コンクリート kgC/m ³	84.9	60.4	60.4
高炉製鋼材 kgC/kg	0.411	0.355	0.436
電炉製型鋼 kgC/kg	0.128	0.254	0.189
輸送 kgC/t・km	0.093	0.093	0.093

※斜体字部は該当する原単位が存在しないため、他の値を準用 (出典 : 参考文献 2) および 3) より)

表-7.7 原単位ごとのLCA (単位: kgC/m²)

	RC床版	鋼コン 合成床版	RC+PC 合成床版	プレキャスト PC床版	鋼床版
土木学会	40.45	68.37	56.51	58.98	106.59
建築学会	38.00	64.25	54.16	52.41	76.62
国土開発	36.06	66.53	52.75	52.07	105.20

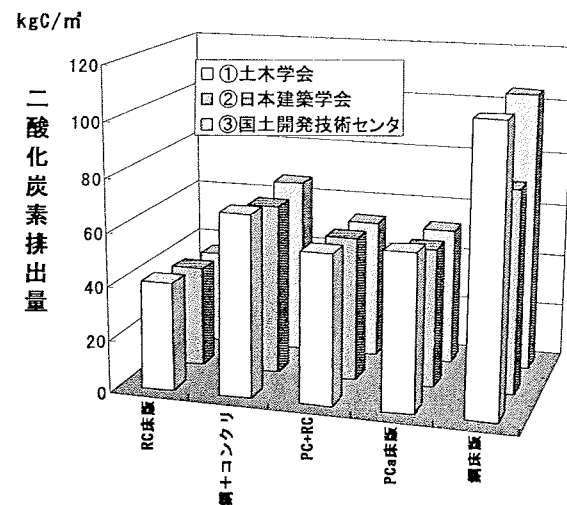


図-7.2 各種LCAの比較 (桁・下部工は含まず)

図-7.2より、原単位の算出方法によって数値間に差はあるが、床版形式ごとの相対的な大小関係にはあまり影響しない。

従って現時点では、これらのLCA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ことが妥当であると考えられる。

7.5 まとめ

二酸化炭素排出量を試算された原単位により推定する方法は、産業連関表などの利用により、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。例えば鋼床版においては、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、鋼床版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、ライフサイクルと通しての環境負荷が小さくなる可能性がある。この点にも注意が必要である。

あとがき

道路橋床版に関する道路橋示方書の条文は、損傷の報告とともに改定が重ねられ、RC床版については十分な疲労耐久性を有するよう床版厚や鉄筋量が定められている。しかしながら、合理的な橋梁構造の追及の過程で床版支間を大きく取る必要が生じ、PC床版や合成床版といった新しい床版構造の導入が進んでいる。このような新しい構造の床版では、長年の経験により得られたRC床版の条文は参考とはなるものの、そのまま用いることには限界がある。そこで道路橋床版の設計を、性能の観点から見直し、要求される性能を明確にしようとする試みが鋼橋床版の調査研究委員会(平成9年～平成12年松井繁之委員長)にて始まり、「鋼橋床版の性能照査型設計指針(試案)」としてまとめられた。その後、平成13年度より新たに構成された今回の道路橋床版の調査研究委員会(平成13年～平成16年堀川都志雄委員長)の第2分科会では、前委員会の指針(試案)をベースに、学会の他の委員会等で提案されている性能設計指針との整合性にも留意しつつ、道路橋床版に対する要求性能を再整理し「道路橋床版の性能照査型設計指針(案)」としてまとめることができた。今委員会でもまとめた指針(案)の基本的な骨子については前委員会の指針(試案)を踏襲するものであるが、使用性や社会環境適合性など、従来の床版設計ではあまりなじみが無いもの今後各種材料や構造が採用される場合には、非常に重要な要求性能となる可能性のある内容について充実をはかることができた。特に社会環境適合性の中ではLCCに加えてLCAの概念を導入するなど、近年の社会的要請に合致した内容となっている。また、性能照査の具体的手法として、床版に要求するレベルを作用レベルと状態レベルといった両面から規定することで、床版の使用される路線の大型車交通量や路線の重要度などを考慮した床版設計が可能となる。

指針(案)に関する理解を助けるため、第2編として性能照査型資料をまとめた。まず、現行道路橋示方書の保有性能に関して、前委員会の報告書では、主に現行道路橋示方書で設計されたRC床版の安全性に関する性能を議論したが、今回の資料では供用性能やLCA、材料耐久性などの面か

らRC床版とPC床版を比較することとした。

また、床版の疲労設計に関して、従来より版厚のわずかな違いが大きな疲労寿命の差として表現されるため、安全率という概念の適用が困難であったS-N曲線による押し抜きせん断疲労照査に対して、床版の設計供用期間中に疲労が生じる荷重と供用期間中に作用する荷重の比率を安全率として評価する方法を提案した。

さらに、指針(案)を適用する上で、比較的理解や照査手法が明確でないものとして、床版の使用性に位置づけられる維持管理性について、RC床版を例題として維持管理計画の例を提示した。また、社会環境適合性の中に位置づけられる経済的合理性についてはLCCによる評価と維持管理と関係づけられるリスクコストについての考え方を示し、環境適合性に関してはLCAによるRC床版、PC床版、合成床版、鋼床版の比較事例を示した。

このほか、近年疲労損傷が報告されつつある鋼床版の疲労部位と構造詳細における対策の資料、コンクリートの材料耐久性を評価判断する上での参考資料についてもとりまとめることができた。

以上のように、今回の報告書はこれまで性能照査型設計において、設計者がなじみが無く十分な理解が困難であった使用性や社会環境適合性などに対して分科会として積極的に取り組み、その考え方の骨子を構築できたことは非常に大きな成果であったと考えている。

今後、要求レベルに関する具体的水準の設定、性能評価試験の開発および性能評価手法の認定機関の確立などが早急に行われることにより道路橋床版の性能照査型設計が幅広く用いられることになる。これにより構造のアカウンタビリティが確保され、構造合理化による工費の縮減や耐久性の向上などが図られるものと期待している。

第2分科会
主査 川畑篤敬

参考文献（第2編）

第1章

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編，平成14年3月
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書 II 鋼橋編，平成14年3月
- 3) (社)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
- 4) 秋元，川畑，大田，中原，内田，田中，浜田：性能照査型設計の現状分析と道路橋床版への応用に関する考察，第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp25-32，平成15年6月
- 5) (社)土木学会：構造工学公式集昭和61年版，pp371-373
- 6) 山田ら，橋梁振動の低減に関する考察，騒音振動，VOL2，NO5，pp22-25，1978
- 7) 清水ら，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 Vol45，No4，pp37-42，2003
- 9) 村井逸朗，道路事業と低周波音，騒音制御，Vol23，No5，pp319-323，1999
- 10) 内田英夫ら，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，Vol1，pp80-91，1979
- 11) 石井ら，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—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) (社)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，平成8年
- 14) (社)土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編]，2002
- 15) (社)土木学会：2002年版コンクリート標準示方書改訂資料，2002
- 16) 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，昭和63年11月
- 17) (社)土木学会鋼構造委員会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，pp74-77，平成12年10月

第2章

- 1) 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
- 2) 中村俊行，桐山孝晴，西尾隆：車両重量調査結果の解

- 析(その4)，土木研究所資料第3321号，1995.2
- 3) 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
- 4) (社)土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，pp.117-118，2002
- 5) 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
- 6) 松井繁之：道路橋コンクリート系床版の疲労と設計法に関する研究，学位論文，1984.11
- 7) 例えば，(社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説II 鋼橋編，平成14年3月
- 8) 例えば，AASHTO：AASHTO LRFD bridge design specification，2002
- 9) 例えば，Eurocode3：Design of steel structures Part 2；Steel bridges，1997
- 10) (社)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計基準・解説，2000
- 11) (社)日本道路協会：立体横断施設技術基準・同解説，1979
- 12) (財)日本鋼構造協会：鋼橋の LCC 評価と防食設計，2002.9

第3章

- 1) (社)日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3

第4章

- 2) (社)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，p.68，2000.3
- 3) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧，平成2年6月
- 4) (社)日本橋梁建設協会，(社)日本溶融亜鉛鍍金協会：溶融亜鉛めっき橋ガイドブック，1998.2
- 5) 朝倉書店：岡田清，コンクリートの耐久性，1986
- 6) (株)セメント新聞社：コンクリート診断士・試験合格の手引き，2004
- 7) (社)土木学会：【2002年制定】コンクリート標準示方書[施工編]，2002年3月
- 8) (社)土木学会鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，p.77，平成12年10月
- 9) 笹井，松本他：中央自動車道古河渡橋に於ける床版取換え，橋梁と基礎1994，10
- 10) 日経コンストラクション：2010年のコンクリートを守れ—深刻化する塩害に対抗する，1999.10.22
- 11) 国土交通省：アルカリ骨材反応抑制対策（土木・建築共通），平成14年8月1日改定

第5章

- 1) 松井，大田，西川：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
- 2) (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
- 3) 国土交通省：橋梁点検要領(案)，2003年4月
- 4) (社)土木学会鋼構造委員会 鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計，第一分科会報告書，pp54，2000年10月

第6章

- 1) (財)道路保全技術センター：橋梁点検・補修の手引き，平成13年7月
- 2) (社)日本鋼構造協会：土木鋼構造物の性能設計ガイドライン，平成13年10月
- 3) 伊庭，松島，関，川田：塩害を受けるRC構造物のライフサイクルコスト算定手法に関する基礎的研究，土木学会論文集NO.704/V-55，pp1-11，2002.5
- 4) 藤岡靖：疲労荷重を受ける道路橋RC床版のリスクコスト算出方法に関する研究，山口大学大学院博士論文，2004.5

第7章

- 1) 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
- 2) 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
- 3) (社)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，平成8年
- 4) 森口，近藤，清水，石谷：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