

第5章 設計法

5.1 設計曲げモーメント

5.1.1 概要

(1) 既往の設計曲げモーメント算定式

合成床版には種々の形式があり、各々構造に合わせた設計法が検討¹⁾²⁾³⁾されている。

床版の弾性的な応力変形挙動に着目すると、鋼板・コンクリート合成床版の基本形式と考えられる底鋼板1枚のロビンソン型合成床版など、層状タイプの合成床版は等方性板として扱われる。また、剛性の大きい形鋼が埋め込まれているI形鋼格子床版のような場合は直交異方性板として扱われる。この2種については、鋼構造物設計指針 PART B⁴⁾（以下、設計指針と呼ぶ）において道路橋床版として用いる場合の設計法が特別に規定されている。

T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメントについて、床版支間が車両進行方向に直角な場合の算定式を表-5.1.1、表-5.1.2に示す。

鋼板・コンクリート合成床版については、T荷重配置の再現確率を考慮して等方性板解析で求めた支間曲げモーメントに対し余裕率（設計値/解析値-1）が支間2mで20%、支間12mで0%となるように算定式が設定されている。片持版についてはRC床版と同じ扱いである。

表-5.1.1 鋼板・コンクリート合成床版の
T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメント式

区分	種類	適用支間 (m)	設計算定式	
			橋軸直角方向	橋軸方向
単純版	支間曲げモーメント	0<L ≤8	+ (0.114 L +0.144) P	+ (0.095 L +0.098) P
		連続版	支間曲げモーメント	+ (単純版の 80%)
支点曲げモーメント	- (単純版の 80%)			-
片持版	支点	0<L ≤1.5	$\frac{-PL}{(1.30L+0.25)}$	-
		先端付近	-	+ (0.15 L +0.13) P

ここに、L：床版支間長 (m)

P：T荷重1輪の設計荷重 (100kN)

I形鋼格子床版については、鋼道路橋設計便覧⁵⁾における算定式を拡張しRC床版の設計曲げモーメント算定式に補正係数を乗じた形式となっている⁶⁾。なお、片持版の支点曲げモーメントについては、2輪の輪荷重が同時載荷される支間1.5mから2.5mの範囲において、支間1.5mにおける従来の設計値が解析値に対して有している

安全の余裕と同等の余裕を持つよう設計曲げモーメント算定式が誘導されている。また、広幅員2主桁橋などに適用する床版支間が車両進行方向に平行な場合の設計曲げモーメントについても設定⁷⁾されている。

表-5.1.2 I形鋼格子床版の
T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメント式

区分	種類	適用支間 (m)	設計算定式	
			主部材方向	配力筋方向
単純版	支間曲げモーメント	0<L ≤8	+1.2 (0.12 L +0.07) P	+0.9 (0.10 L +0.04) P
		連続版	支間曲げモーメント	+ (単純版の 80%)
支点曲げモーメント	- (単純版の 80%)			-
片持版	支点	0<L ≤1.5	$\frac{-1.2PL}{(1.30L+0.25)}$	-
		1.5<L ≤2.5	- (0.60 L -0.08) P	-
		先端付近	-	+0.9 (0.15 L +0.13) P

ここに、L：床版支間長 (m)

P：T荷重1輪の設計荷重 (100kN)

(2) 床版の異方性について

鋼板・コンクリート合成床版に形式分類される床版でもパネルの補剛・継手形式やずれ止め形式によっては異方性を有する場合があります。パネル材に異方性の高い複合材料を使う場合なども同様である。床版の異方性度は床版の発生断面力分布に影響⁸⁾⁹⁾するため、この影響を検討しておく必要があると考える。

床版の異方性度の指標として、主部材方向 (x方向) の断面と配力筋方向 (y方向) 断面の曲げ剛性の比 $\alpha = D_y/D_x$ を考えると、 α が小さくなるにつれて主部材方向の曲げモーメントは増加し、逆に配力筋方向の曲げモーメントは減少する。

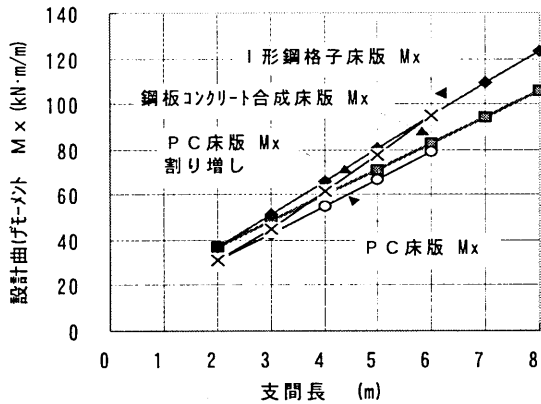
曲げ剛性比 α を引張側コンクリートを無視する条件で比較すると、ロビンソン型合成床版では1.0、I形鋼格子床版では0.4~0.5、RC床版では0.5~0.6である。鋼板・コンクリート合成床版では概ね0.9~1.0であるが、剛性の大きい補剛材を比較的狭い間隔で設ける場合などは0.8程度と考えられる。

道路橋T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメントについて、道路橋示方書のPC床版と設計指針に規定される鋼板・コンクリート合成床版およびI形鋼格子床版の算定式の比較を図-5.1.1に示す。同図は床版支間が車両進行方向に直角の場合の1方向単純版について示したものである。

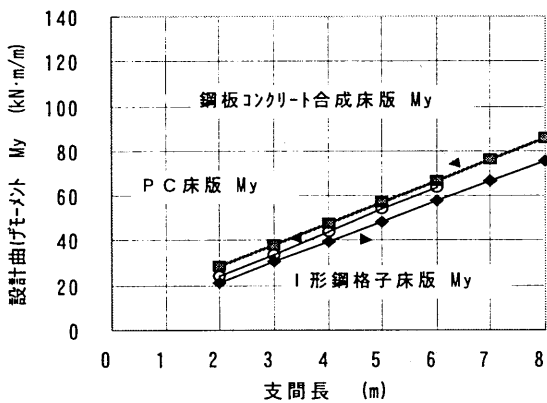
RC床版・PC床版は等方性板として設計基準が設定されているが、支間方向の曲げモーメントに対し割り増し係数を乗ずることで、安全となるように配慮されてい

る。

I形鋼格子床版については、主部材方向に $\alpha=0.4$ 、配筋方向に $\alpha=0.7$ として直交異方性板解析で求めた支間曲げモーメントに対する安全の余裕が確保されており、実設計では $\alpha \geq 0.4$ であることを照査することになっている。



(a) 橋軸直角方向M_x



(b) 橋軸方向M_y

図-5.1.1 T荷重（衝撃を含む）による設計曲げモーメント算定式（単純版）の比較

5.1.2 検討方法

(1) 対象とする床版

曲げ剛性比 α が層状タイプの合成床版とI形鋼格子床版の中間的な領域にある場合については現状設計曲げモーメント算定式がない。

そこで、今回合成床版の設計面の課題として異方性度に応じた設計断面力を取り上げ、設計曲げモーメント式について検討する。対象は、道路橋床版を想定し床版支間が車両進行方向に直角の場合の1方向単純版とした。

(2) 検討方法

1) 直交異方性板解析

検討は、2辺単純支持板を対象として、輪荷重を橋軸方向には1組で、幅員方向には組数に制限なく載荷するモデルについて、有限要素法による直交異方性板解析を実施することにより行った。

なお、板剛性の算定についてはRC床版用に提案されたHuber式を適用した。一般に直交異方性板の挙動を表す微分方程式は以下で表される。

$$D_x \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + 2H \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + D_y \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} = q(x, y) \quad (5.1.1)$$

ここに、

$$H = D_1 + 2D_{xy}$$

$$D_x = \frac{Ec}{1-\nu_c^2} (I_{cx} + n I_{sx})$$

$$D_y = \frac{Ec}{1-\nu_c^2} (I_{cy} + n I_{sy})$$

$$D_1 = \nu_c \sqrt{D_x D_y}, \quad D_{xy} = \frac{1-\nu_c}{2} \sqrt{D_x D_y}$$

Ec : コンクリートの弾性係数, ν_c : コンクリートのポアソン比

n : 鋼材とコンクリートのヤング係数比

I_{cx} : 主部材断面の中立軸に関するコンクリートのみの断面二次モーメント

I_{sx} : 主部材断面の中立軸に関する鋼材のみの断面二次モーメント

I_{cy} : 配力筋断面の中立軸に関するコンクリートのみの断面二次モーメント

I_{sy} : 配力筋断面の中立軸に関する鋼材のみの断面二次モーメント

B : 板幅, h : 板厚

主部材(x方向), および配力筋(y方向)に直角な断面に作用する曲げモーメントはそれぞれ以下の式で求められる。

$$M_x = D_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \quad (5.1.2a)$$

$$M_y = D_y \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + D_1 \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \quad (5.1.2b)$$

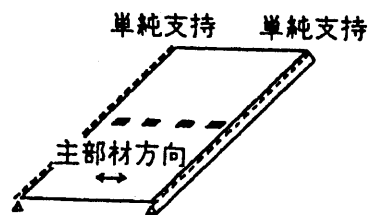


図-5.1.2 床版のモデル化（支持条件）

2) 解析範囲

曲げ剛性比 α を 0.7~1.0 まで 0.1 ピッチで変化させる。床版支間 L を 2.0~8.0 m まで 1.0 m ピッチで変化させ、10m, 12m についても検討する。

3) 考慮する荷重

輪荷重は、T 荷重が舗装を無視した床版上に長方形で等分布するものとし、床版全厚の 1/2 の面まで 45° 方向で拡大させた面に分布すると仮定する。

輪荷重の配置については、各支間の床版に対して輪荷重を幅員方向に制限なく载荷し、床版に最も不利となるようにする。衝撃の影響については衝撃係数 $i = 20 / (50 + L)$ を考慮する。更に、支間 5m 以上については前輪の影響を考慮することとした。

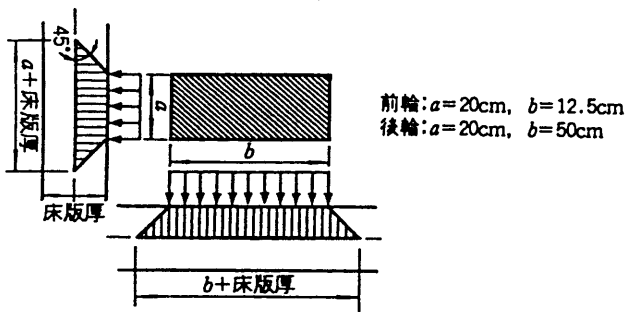


図-5.1.3 輪荷重分布の仮定

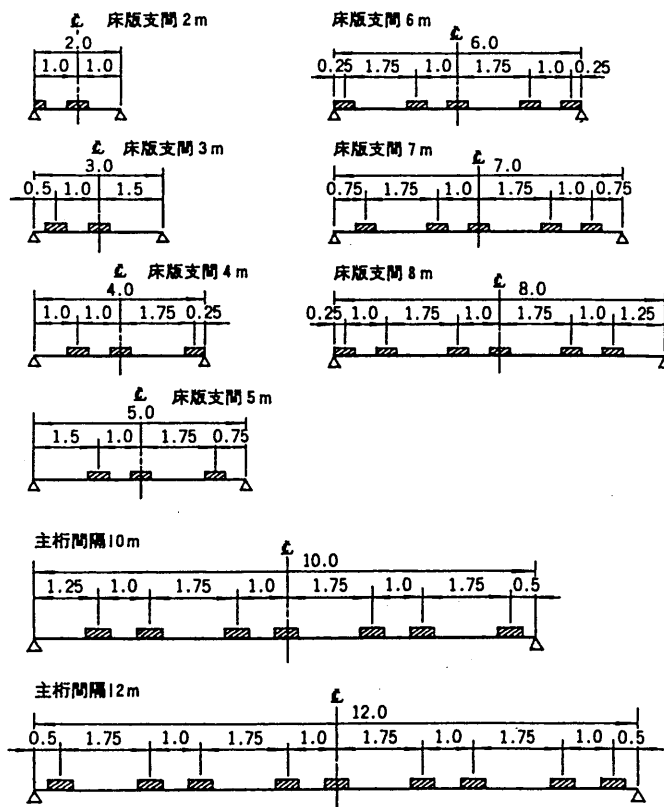
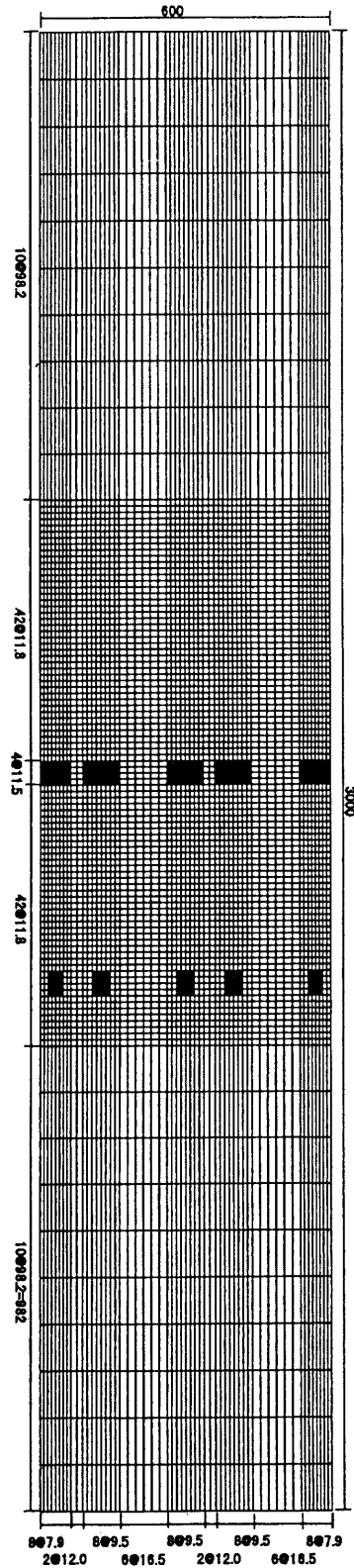


図-5.1.4 輪荷重の载荷状態

4) 解析要素分割

対象は相対する 2 辺で単純支持された辺長比 5 の矩形版とする。汎用性構造解析ソフト「MARC」を用い、四辺形平面シェル要素でモデル化する。図-5.1.5 に要素分割の一例を示す。



図中の単位 (cm)

図-5.1.5 要素分割例 (床版支間 6 m)

5) 床版厚

それぞれの支間に対応した床版厚については、鋼板・コンクリート合成床版（底鋼板1枚）を想定した床版厚とする。コンクリート厚さは次式による。

$$h_c = 2.5L + 10 \quad (5.1.3)$$

ここに、 h_c : コンクリート部の厚さ (cm)

L : 床版支間 (m)

6) 断面諸元

① $\alpha = 1$ の場合 (等方性板) について

設計指針の資料編では各床版支間毎にコンクリート最小厚 (h_c) と T 荷重 (衝撃を含まない) による床版たわみ量が全断面有効で算定した場合に許容値 (許容たわみ量は支間 (=L) の $1/2000$) 以内に収まるような底鋼板厚 (t_s) が求められている。このデータを用いて $\alpha = 1$ の場合の断面諸元を計算する。鋼とコンクリートのヤング係数比 n は $n = 10$ とし、コンクリートの引張側を無視する。

図-5.1.6 は解析に用いた等方性版の鋼板・コンクリート厚を示す。

また、許容たわみを満足する床版の剛性の目安として、図-5.1.7 に、全断面有効算定したコンクリート換算断面二次モーメントとたわみの関係を示す。

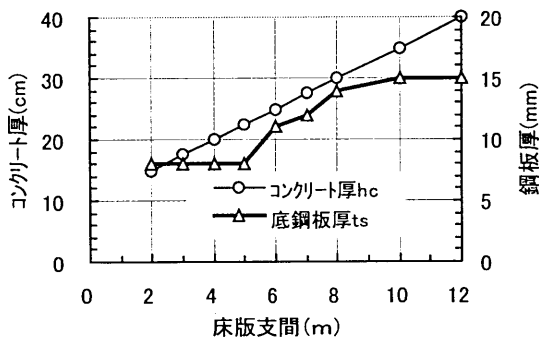


図-5.1.6 解析に用いた等方性版の鋼板・コンクリート厚

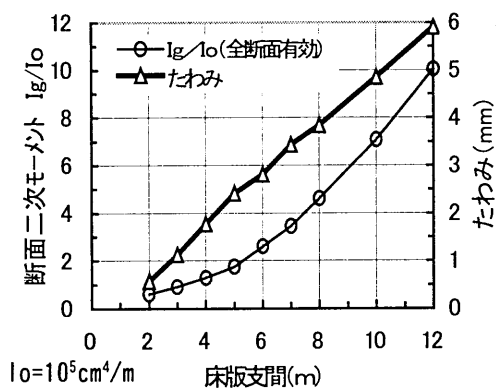


図-5.1.7 等方性板全断面有効時の換算断面二次モーメント

② $\alpha < 1$ の場合 (直交異方性板) について

コンクリート厚 (h_c) は①と同じとし、引張側コンクリートを無視した場合の活荷重たわみが等方性版の場合と同等になるように曲げ剛性 $D_x, D_y (= \alpha D_x)$ を調整する。解析に用いたコンクリート換算断面二次モーメントを図-5.1.8に示す。

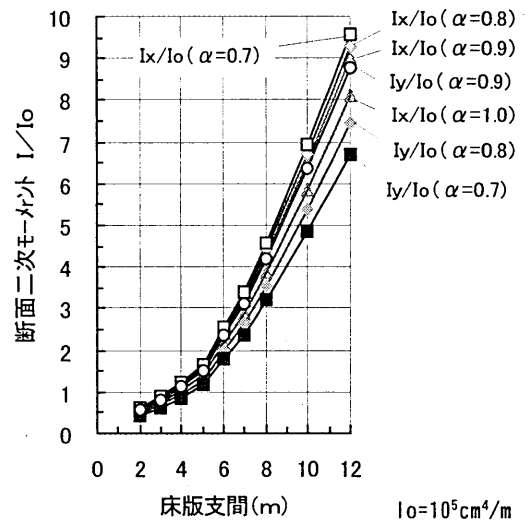


図-5.1.8 解析に用いた異方性版の断面二次モーメント

5.1.3 解析結果と考察

曲げ剛性比 α を変化させた版解析により得られた床版支間と曲げモーメント最大値との関係、および、鋼板・コンクリート合成床版の設計曲げモーメントに対する余裕率 (設計値/解析値-1) の関係を図-5.1.9~図-5.1.12に示す。

また、各床版支間における異方性版の曲げモーメント最大値に対する等方性版の曲げモーメント最大値の比を図-5.1.13に示す。同図には参考として $\alpha = 0.4 \sim 0.6$ の範囲で同様の解析を行った結果を追加している。

(1) 橋軸直角方向の曲げモーメント M_x

解析値に対する鋼板・コンクリート合成床版の設計式の余裕率は、曲げ剛性比 α が低下するほど、また、支間長が大きくなるほど小さくなる。特に、支間長が 5 m 以上において前輪の影響が大きくなる。

設計式の余裕率は支間 2 m で 20%、支間 12 m で 0% となるように設定してあるが、適用最大支間 8 m での余裕率は $\alpha = 1.0$ で 5.6%、 $\alpha = 0.9$ で 3.1%、 $\alpha = 0.8$ で 2.7%、 $\alpha = 0.7$ で -0.2% となる。換言すると安全率 (設計値/解析値) は $\alpha \geq 0.8$ であれば 1 以上を確保できる。

荷重として後輪のみを考慮する場合の余裕率は、適用最大支間 8 m において $\alpha \geq 0.8$ であれば余裕率は 10% 以上を確保できる。

(2) 橋軸方向曲げモーメント M_y

解析値に対する設計式の余裕率は支間長が大きくなるほど小さくなるが、曲げ剛性比 α が低下するほど逆に大きくなる。支間長が 5 m 以上において前輪の影響は M_x に比べて小さい。

適用最大支間 8 m での余裕率は $\alpha = 1.0$ で 5.3%、 $\alpha = 0.9$ で 8.6%、 $\alpha = 0.8$ で 12.4%、 $\alpha = 0.7$ で 16.8% となる。橋軸方向に関しては現行設計式は十分に安全側である。

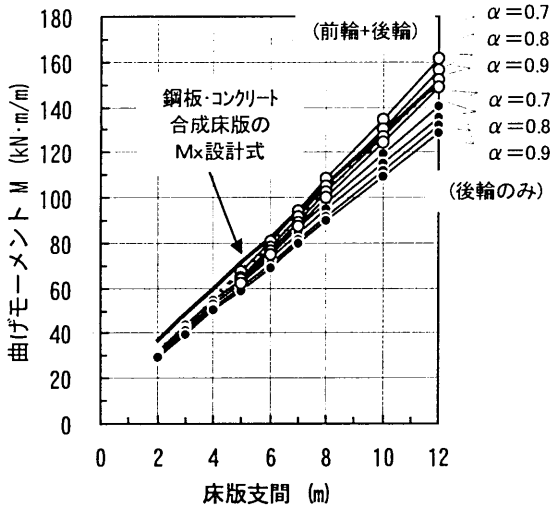


図-5.1.9 床版支間とT荷重（衝撃含む）による橋軸直角方向曲げモーメント M_x 最大値の関係

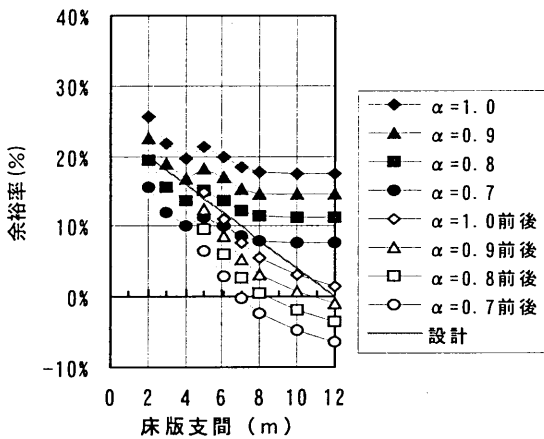


図-5.1.10 床版支間と設計指針 M_x 余裕率の関係

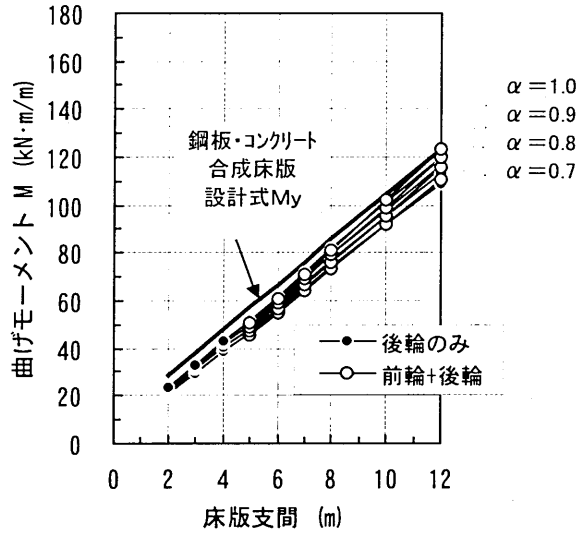


図-5.1.11 床版支間とT荷重（衝撃含む）による橋軸方向曲げモーメント M_y 最大値の関係

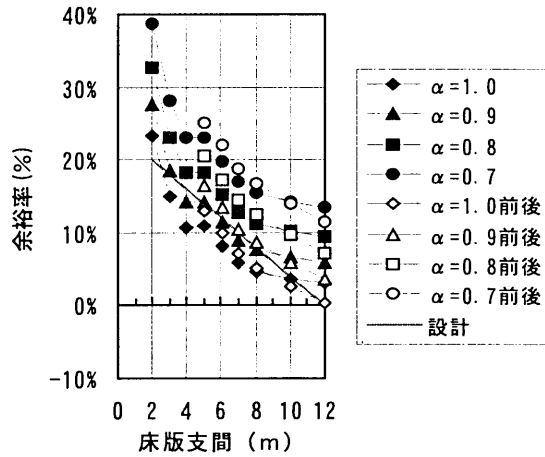


図-5.1.12 床版支間と設計指針 M_y 余裕率の関係

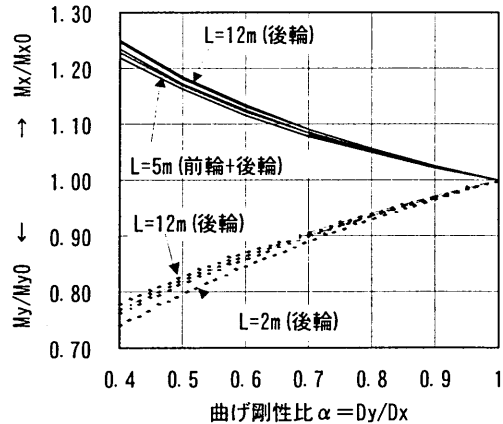


図-5.1.13 直交異方性板の曲げモーメント M と等方性板の曲げモーメント M_0 との比較

(3) 床版の異方性を考慮した設計式の検討

試みとして、現行設計式における余裕率設定の考え方を踏襲して、曲げ剛性比に対応した設計式を検討した結果を表-5.1.3、図-5.1.14、図-5.1.15に示す。

適用最大支間長 8 mでの橋軸直角方向の設計曲げモーメント M_x を計算すると、現行設計値 (105.6 kN・m/m) に対する比は、 $\alpha=0.9$ で 1.026、 $\alpha=0.8$ で 1.053、 $\alpha=0.7$ で 1.081 である。

適用最大支間長 8 mでの橋軸方向の設計曲げモーメント M_y を計算すると、現行設計値 (85.8 kN・m/m) に対する比は、 $\alpha=0.9$ で 0.968、 $\alpha=0.8$ で 0.935、 $\alpha=0.7$ で 0.902 である。現行設計式には余裕がありそのまま適用可能であるが、 $\alpha=0.7$ では低減の余地が大きい。

以上から、 $\alpha=0.7$ 程度の異方性を有する床版では新たに設計式を設定することが必要と考える。

今回は、床版の異方性度に対応した設計曲げモーメント算定式を検討したが、設計断面力に関する課題として以下の事項についても今後検討が必要と考える。

- ①片持ち部の適用支間長拡大とこれに伴う設計断面力の設定
- ②本体部と比べて剛性が大きく異なる継手部を用いる場合の設計方法

表-5.1.3 T荷重（衝撃を含む）による床版の異方性度に応じた設計曲げモーメント式

床版区分	適用支間 (m)	曲げ剛性比 α	設計曲げモーメント式	
			橋軸直角方向 M_x	橋軸方向 M_y
単純版	$0 < L \leq 8$	1.0	$(0.114 L + 0.144) P$	$(0.095 L + 0.098) P$
		0.9	$(0.117 L + 0.147) P$	$(0.092 L + 0.095) P$
		0.8	$(0.120 L + 0.152) P$	$(0.089 L + 0.090) P$
		0.7	$(0.123 L + 0.158) P$	$(0.086 L + 0.086) P$
I形鋼格子床版の場合	4.4	4.4	$1.2(0.12 L + 0.07) P$	
		(0.7)		$0.9(0.10 L + 0.04) P$

ここに、L：床版支間長(m)、車両進行方向に直角
P：T荷重1輪の設計荷重

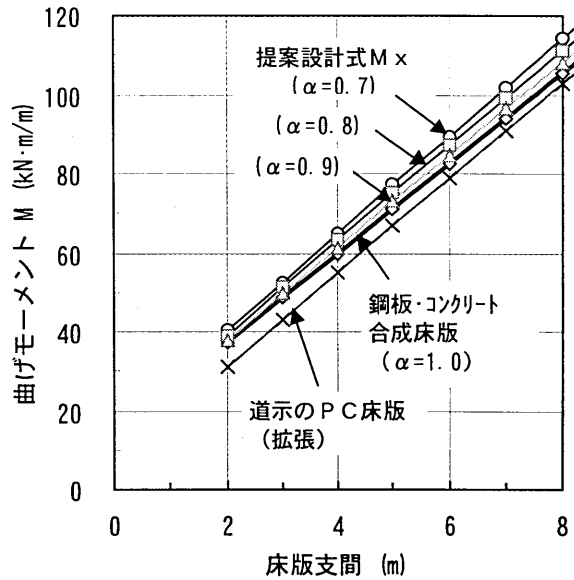


図-5.1.14 T荷重（衝撃を含む）による橋軸直角方向設計曲げモーメント M_x 提案式の対比

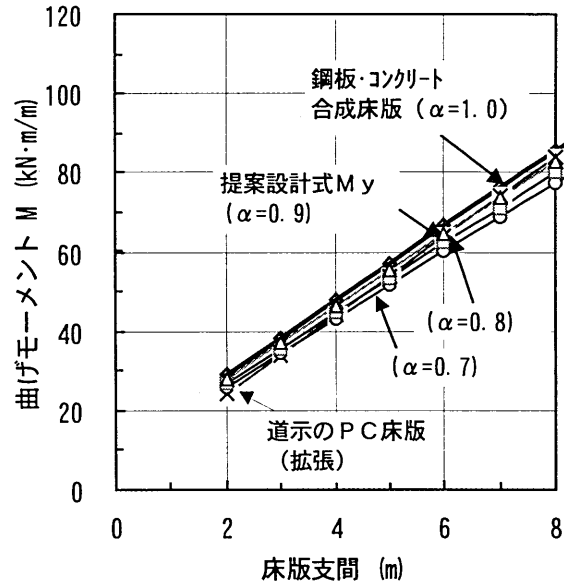


図-5.1.15 T荷重（衝撃を含む）による橋軸方向設計曲げモーメント M_y 提案式の対比

5.2 疲労設計

5.2.1 概要

ずれ止め形式や底鋼板の形状、さらに鋼材の代わりにFRP等の新素材を適用するなど構造が様々であるため、合成床版の疲労設計の方法も各形式ごとに異なるものとなる。また、合成床版は、床版の長支間化対応および施工性の改善を目的に最近開発されたものが多く、供用時の疲労耐久性を実現的に捉えるには歴史が浅い。さらに、輪荷重走行試験機による疲労実験のデータもRC床版と比べると極めて少ないのが現状である。

これらのことから、合成床版の疲労現象は十分に解明されてはならず、疲労設計を行うに当たり議論すべき点が多い。そのいくつかを以下に示す。

- ① 疲労限界状態の定義が不明確である。
- ② 疲労照査位置が明らかにされていないものが多い。
- ③ 累積損傷度則の適用性が明らかにされていないものが多い。
- ④ 雨水浸透による疲労耐久性への影響が明らかにされていないものが多い。

上記①については、疲労により鋼材の一部に亀裂が発生しても、それが急速に進展し疲労劣化につながるようなものでなければ床版構造として機能上の問題はないと考えられる。よって、鋼材の一部の疲労亀裂をもって疲労限界状態と定義する際、その亀裂が床版の疲労劣化に与える影響を把握する必要がある。一方では、供用時限界状態と考え、走行性や舗装に影響を与える床版のたわみ量やたわみ分布の連続性で限界状態を定義する考え方もある。さらにはコンクリートの耐久性に影響を与える有害なひび割れが発生していないか、または、疲労劣化を受けた床版の残留耐荷力によって限界状態を定義する方法も考えられる。どれを用いるかは、対象としている合成床版の疲労特性、合成床版が適用される状況ならびに環境等を考慮し決定する必要がある。

②については、床版構造が多岐に渡るため、疲労破壊の形態が鋼材疲労かコンクリート疲労か、また、鋼材疲労であれば、どこにどのような応力変動により生じるのかを明確にする必要がある。しかし、実験データ等の不足により明らかにされていないものが多い。

③についても実験データの不足によるものである。疲労設計において累積損傷度則が一般に用いられているが、その適用に当たっては疲労実験によりS-N曲線を定義する必要がある。RC床版の場合は押し抜きせん断に至るS-N曲線の傾きの逆数 m として12程度¹⁰⁾であることが多くの疲労実験から提案されている。合成床版についても、鋼材による疲労破壊の場合は累積損傷度則を用いて疲労設計を行っているものもある。

④については、RC床版の場合、輪荷重走行試験機の結果から水などの湿潤状況下において、疲労寿命が乾燥状

況下と比べて1/20から1/100に低下するとの報告¹⁰⁾がある。合成床版の場合にも水の浸透により疲労寿命が低下することが考えられる。しかし、水の影響を考慮した疲労実験のデータは少なく、その影響は十分に明らかにされていない。

5.2.2 輪荷重走行実験の重要性²⁾

5.2.1で述べた通り、合成床版の疲労設計は十分確立されてはいない。しかし、合成床版を設計するに当たり、その構造に関わらず疲労挙動の把握および疲労耐久性の確保は必要不可欠である。

これまで床版の疲労実験は、図-5.2.1に示すように、床版上の1点またはいくつかの定点に繰返し荷重を与えるいわゆる定点載荷疲労実験(図-5.2.1(a))と、床版上を車輪が走行移動することにより荷重を与える輪荷重走行実験(図-5.2.1(b))の2種類が実施されてきた。この内、道路橋床版については自動車の走り抜けがその疲労破壊性状を特徴付けることから、後者の実験方法が重要である。

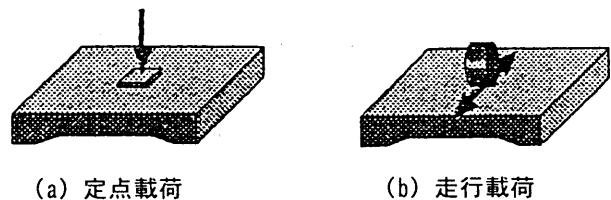


図-5.2.1 床版の疲労実験方法²⁾

例えば頭付きスタッドジベルをずれ止めとして用いた鋼板コンクリート合成床版の場合、定点載荷疲労実験を実施すると、図-5.2.2(a)に示すように、底鋼板側のスタッドジベルの溶接止端から疲労亀裂が発生し、底鋼板が疲労破断する現象が生じる。これは、合成床版としての底鋼板の曲げに伴う引張応力とスタッドジベルに作用するせん断力によるスタッドジベル基部の局部せん断応力の同時発生によるものである。このときの疲労寿命は、複合加力試験によりスタッドジベル付き鋼板の疲労強度を調査した研究に基づき、適切に評価できることが示されている¹¹⁾。

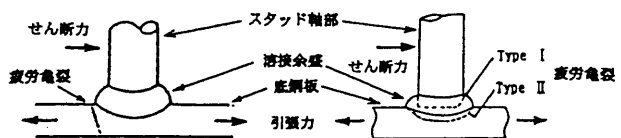


図-5.2.2 鋼板コンクリート合成床版の疲労破壊モードの違い²⁾

一方、同様の合成床版に対して輪荷重走行実験を実施すると、走行軌道直下のスタッドジベルはほぼ健全であ

ったのに比べ、走行軌道外のスタッドジベルの多くが図-5.2.2(b)に示す Type I, Type II のような溶接余盛付近でのせん断破壊となった。これは、載荷荷重の走行移動に伴いスタッドジベルに作用するせん断力の大きさと方向が変化する回転せん断力によるものであり、通常の一方向押抜きせん断に比べてスタッドジベルのせん断疲労強度が著しく低下する¹²⁾。

このように、疲労実験方法の違いにより破壊形式が異なったり疲労寿命に大きな差異が生じることを考えると、道路橋に適用する合成床版の疲労挙動を解明する場合、荷重の走り抜きを表現できる輪荷重走行実験が妥当と思われる。

なお、輪荷重走行実験を行うにあたり、以下の点に留意すべきである。

- ① 輪荷重によって疲労上問題となる部分にどの程度の応力変動が生じているのかを把握した上で実施する。
- ② 促進実験として荷重レベルを上げた場合、疲労上問題となる鋼材部分の発生応力が降伏点を超えないようにする（実験結果の評価として累積損傷度則を適用する場合）。また、実際より大きな荷重が載荷されて実橋では起こらない現象が生じないように配慮する。
- ③ 促進実験として荷重レベルを上げ、累積損傷度則を用いた等価換算回数で評価する場合、S-N 曲線の m 値の与え方に留意する。

前記①については、例えばスタッドジベルをずれ止めを用いた鋼板コンクリート合成床版の場合、スタッドジベルの溶接余盛付近でのせん断破壊が疲労上問題となるが、この部分に作用するせん断力は、輪荷重を床版支間中央に走行させるよりも主桁に近い側を走行させた方が大きい。このように、輪荷重により生じる疲労対象部への応力変動を考えて、走行位置、輪荷重および走行回数を決める必要がある。また、疲労対象部での応力変動レベルが把握できれば、試験機の制約によって限られた床版支間や走行位置とならざるを得ない場合にも適切な疲労評価が可能となる。

前記②については、促進実験との位置付けから荷重レベルを上げていく場合、疲労対象部となる鋼材部分の発生応力が降伏点を超えると一般的に用いられている累積損傷度則を用いた疲労設計¹³⁾が適用できなくなる。やむを得ず超える場合には、この現象が疲労挙動に与える影響について事前に検討しておく必要がある。また、実際よりも大きな荷重が作用することで、実橋では生じないような疲労損傷が生じる可能性がある。このようなことが生じないような配慮も必要である。

前記③については、等価換算回数を算定する際、S-N 曲線の傾きの逆数である m に適切な値を与えないと実態と異なった評価となる。なお、合成床版の等価換算回数を評価する場合の m の値は、RC 床版での $m=12$ ¹⁰⁾ と鋼材

疲労を対象とする $m=3$ ¹³⁾ の間と考えられ、破壊形態がコンクリート疲労の場合は $m=12$ に近く、鋼材疲労の場合は $m=3$ に近くなるものと予想できる。しかし、適切な値を設定するには疲労実験データの蓄積が望まれる。

5.2.3 疲労設計の基本的な考え方

(1) 床版への要求項目

疲労設計をする上で必要なことは、床版にどのようなことが要求されるのかを明確にすることである。しかし、この要求性能は、疲労限界状態の考え方が種々存在する中で、設計対象となる合成床版の構造や疲労特性、設置される環境等が異なるため明確にすることは難しい。

ここでは、要求項目として一般的に考えられるものを表-5.2.1に記載した。

表-5.2.1 疲労に対して床版に要求される項目

	要求される項目	内容
①	必要な耐荷力の保持	・曲げ耐荷力の確保 ・せん断耐荷力の確保 ・押し抜き耐荷力の確保
②	疲労亀裂破壊の防止	・床版、構造部材および継手部に疲労亀裂が発生、進展して床版が破壊しないこと
③	有害なコンクリートひび割れの防止	・雨水浸透等によりコンクリートが劣化しないこと ・鋼材腐食につながる貫通ひび割れが発生しないこと ・上面のひび割れにより鋼材が腐食しないこと
④	必要な剛性の確保	・支障あるいは不快感を与える振動やたわみが生じないこと

(2) 疲労照査方法

表-5.2.1に上げた要求項目の内、②の疲労亀裂破壊の防止については、累積損傷度則により疲労照査を行う方法が考えられる。例えば、疲労照査位置に直応力またはせん断応力が支配的に繰返し作用する場合には、鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾により照査することが可能である。

また、疲労照査の着目点が鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾に記載されている強度等級にあてはまらない場合には、個別に疲労寿命曲線を提示して照査している場合がある。例えば、鋼板コンクリート合成床版の底鋼板に取り付けたスタッドジベルの溶接部については、鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾に一方せん断力を受ける継手として S 等級の記載があるものの、実現象としては回転せん断力が作用するため危険側に評価される。このため、鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 合成床版編⁴⁾では、数多くの疲労実験結果から求められた S-N 線をもとに独自に疲労強度を規定している。

一方、表-5.2.1の①、③、④については、直接的に疲労照査をすることは難しい。それは、どのような疲労履歴を受けたときにどのような挙動を示すのかが、設計を

行えるレベルまで十分に解明されていないことによる。

この場合は、実際の疲労破壊メカニズムが再現できる疲労実験（輪荷重走行実験など）を実施し、同一実験を行った疲労寿命がある程度明らかになっている既往床版（RC床版など）と相対比較することにより、疲労評価を行う方法が考えられる。

なお、輪荷重走行実験を用いて基準床版との相対比較により疲労評価する場合、必要な計測項目とその内容を表-5.2.2に示す。

表-5.2.2 輪荷重走行実験における計測項目一覧

要求される項目	計測項目	内容
① 必要な耐荷力の保持	載荷した輪荷重と載荷回数の履歴 たわみの時系列変化	・疲労破壊するまでの載荷履歴について基準床版と対比 ・載荷時たわみと除荷時たわみを基準床版と対比 ・たわみの実測値と計算値との比較から、たわみによる劣化度を求め、これより床版の劣化状況を推定
	ひずみの時系列変化	・構造部材および継手部のひずみが設計荷重作用時に弾性範囲にあるのかを確認
	たわみ分布の連続性	・橋軸直角方向と橋軸方向のたわみ分布について基準床版と対比 ・設計荷重作用時において不連続部分がないかの確認
	継手部の目開き量	・設計荷重作用時において許容範囲にあるかの確認
	コンクリートのひび割れ発生状況	・設計荷重作用時において有害なひび割れが発生していないかの確認
② 疲労亀裂破壊の防止	ひずみの時系列変化	・着目点でのひずみの急変の有無およびその時の荷重レベルの確認
	着目点での亀裂の有無	・実験終了後コンクリートのはつりを行い内部の構造部材および溶接部の亀裂の有無を確認
③ 有害なコンクリートひび割れの防止	実験中でのひび割れ発生状況	・設計荷重作用時において上面に有害なひび割れが発生していないかの確認
	実験後の内部のひび割れ発生状況	・貫通ひび割れの有無の確認 ・底板を剥がした場合は下面に有害なひび割れが発生していないかの確認
④ 必要な剛性の確保	使用荷重レベルでの活荷重たわみ	・設計荷重作用時において許容範囲にあるかの確認
	たわみ分布の連続性	・橋軸直角方向と橋軸方向のたわみ分布について基準床版と対比 ・設計荷重作用時において不連続部分がないかの確認
	継手部の目開き量	・設計荷重作用時において許容範囲にあるかの確認

5.2.4 疲労設計の方法

合成床版の疲労照査方法として、ここでは、鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾に準じた累積損傷度則による疲労照査、ならびに、個別に疲労寿命曲線を提示して疲労照査している例として鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物 合成

床版編⁹⁾に記載されている鋼板コンクリート合成床版の底鋼板に取り付けたスタッドジベルの溶接部に対する疲労照査の以上2例について、その方法を示す。

なお、ここで示した方法はあくまでも疲労照査の一例であり、照査方法を限定するものではない。合成床版には様々な構造形式があり、その疲労特性を適切に表現できる照査方法を採用すべきである。

(1) 鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾に準じた累積損傷度則により疲労設計する場合

疲労照査位置に直応力またはせん断応力が支配的に繰返し作用する場合には、鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾により照査することが可能である。

この場合の疲労照査フローの一例を図-5.2.3に示す。照査方法としては、最大応力範囲と疲労限による第一段階照査、および、等価応力範囲と時間強度による第二段階照査の2段階があり、第一段階照査でO.K.であれば第二段階の照査は必要ない。

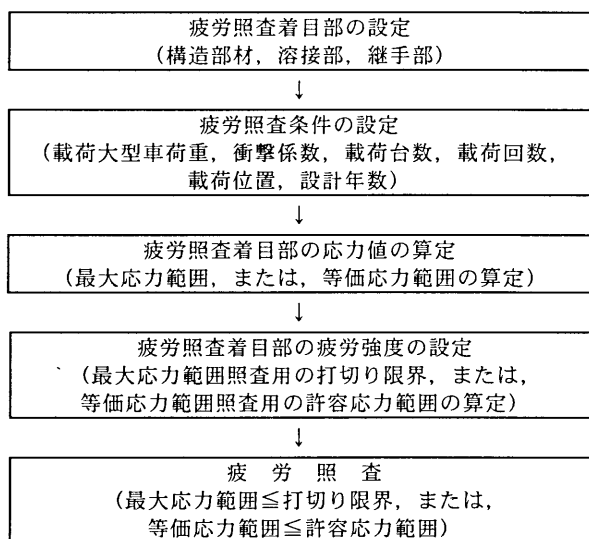


図-5.2.3 鋼構造物の疲労設計指針¹³⁾に準じた累積損傷度則による疲労照査フロー

図-5.2.3に示す疲労照査条件の設定において必要となる各設定値の参考例を以下に示す。なお、この値はあくまでも一例であり、実際にどのような値を設定するかは設計対象である合成床版に与えられた種々の条件を考慮して適切な値を用いる必要がある。

① 載荷大型車荷重

- ・最大応力範囲照査用：設計寿命中の疲労照査着目部に最大の応力範囲を生じさせると予想される荷重とする。
- ・等価応力範囲照査用：現状交通の最大値¹⁴⁾を参考に道路橋示方書¹⁵⁾記載のT荷重を与える設計自動車荷重（車両重量245kN）とする。

②衝撃係数

- ・最大応力範囲照査用：考慮する必要なし。
- ・等価応力範囲照査用：実測値の平均値¹⁴⁾を参考に道路橋示方書¹⁵⁾記載の衝撃係数の1/2とする。

③載荷台数

- ・最大応力範囲照査用：1台とする。
- ・等価応力範囲照査用：1台とする。

④載荷回数

- ・最大応力範囲照査用：疲労照査において必要なし。
- ・等価応力範囲照査用：対象路線交通量により異なるが一般的に100～10,000台¹⁴⁾の範囲で設定する。

⑤載荷位置

- ・最大応力範囲照査用：疲労照査着目部に最も大きな応力変動が作用する位置とする。
- ・等価応力範囲照査用：疲労照査着目部に最も大きな応力変動が作用する位置とする。

⑥設計年数

- ・最大応力範囲照査用：疲労照査において必要なし。
- ・等価応力範囲照査用：一般的に50年～300年の範囲で設定する。

また、疲労照査着目部の応力値、すなわち、最大応力範囲または等価応力範囲の算定は、一般的にFEM解析等の計算により求める。なお、この計算の際、輪荷重走行実験の結果等を参考に適切な応力範囲が算出されるように配慮する。例えば、輪荷重走行実験で供試体に生じたたわみ値やひずみ値から床版の挙動が全断面有効状態と判断できる場合には、応力範囲の算定を全断面有効計算で行うべきであり、このとき曲げ引張側のコンクリートを無視して計算することは過剰に安全側の構造を与えることになる。

また、床版に作用する曲げに対して、床版本体や継手部による異方性を考慮するのがよい。継手部による異方性に関しては、継手の曲げ剛性により以下のように考えてよい。

- ① 底鋼板を添接ボルト接合する場合：
異方性は考えなくてよい。
- ② 底鋼板を引張ボルト接合する場合：
異方性を考慮するのがよい。
- ③ 鉄筋重ね継手により接合する場合：
状況により異方性を考慮するのがよい。

上記②については、継手部の異方性により、継手断面に作用する橋軸方向の曲げモーメントが50%以下に低下するとの報告¹⁶⁾もある。

疲労照査は、最大応力範囲照査の場合、式(5.2.1)により行い、等価応力範囲照査の場合、式(5.2.2)により行う。

$$\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i \cdot \Delta \sigma_{\max} \leq \Delta \sigma_{ce} \cdot CR \cdot Ct \quad (5.2.1)$$

ここに、

$\Delta \sigma_{\max}$ ：疲労照査着目位置において、設計寿命期間中に予想される最大応力範囲

$\Delta \sigma_{ce}$ ：一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界（疲労限）

γ_b ：冗長度係数であり、疲労照査着目位置での疲労損傷が床版全体の強度あるいは機能に及ぼす影響により設定（全体崩壊を引き起こす場合 1.10, 通常部材 1.00～1.10, 影響が小さい場合 0.80）

γ_w ：重要度係数であり、床版が疲労限界状態に達したときの社会的影響により設定（構造物の重要度により 0.80～1.10）

γ_i ：検査係数であり、床版が疲労限界状態に至る前に損傷を発見する可能性により設定（検査を行う 0.90～1.00, 検査できない 1.10）

CR：平均応力（応力比）の影響

Ct：板厚の影響

$$\gamma_b \cdot \gamma_w \cdot \gamma_i \cdot \Delta \sigma_{eq} \leq \{C_0 / (365 \cdot ADTT \cdot L)\}^{1/m} \cdot CR \cdot Ct \quad (5.2.2)$$

ここに、

$\Delta \sigma_{eq}$ ：疲労照査着目位置において、等価大型車により発生する応力範囲

C_0 ：疲労設計曲線の定数であり、 $2 \times 10^6 \cdot \Delta \sigma^m$ で与えられる

$\Delta \sigma_f$ ： 2×10^6 回基本許容応力範囲

m：疲労設計曲線の傾き

ADTT：1車線あたりの日平均大型車交通量

L：設計寿命年数

$\gamma_b, \gamma_w, \gamma_i, CR, Ct$ ：式(5.2.1)参照

(2) 鋼構造物設計指針 PARTB⁴⁾に準じた個別の疲労寿命曲線により疲労設計する場合

鋼構造物設計指針 PARTB⁴⁾に記載されている鋼板コンクリート合成床版の底鋼板に取り付けたスタッドジベルの溶接部に対する疲労照査例を述べる。

この場合の疲労照査フローを図-5.2.4に示す。

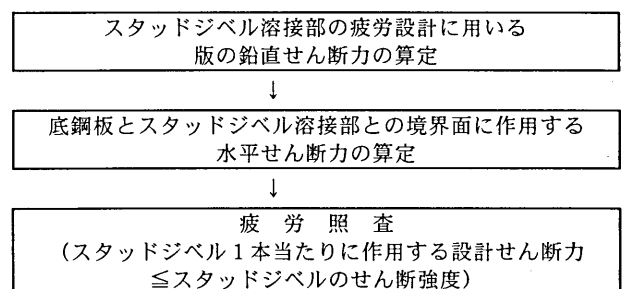


図-5.2.4 底鋼板に取り付けたスタッドジベルの溶接部に対する疲労照査フロー

版に作用する鉛直せん断力は、鋼構造物設計指針 PARTB⁴⁾より式(5.2.3)で与えられる。

$$Vd = k (0.011L + 0.747) P \quad (5.2.3)$$

ここに、

Vd：単位幅 1m 当たりの版に作用する鉛直せん断力 (N)

k：ずれ止めの形式によって決定される荷重作用の分担率 (=0.5)

L：床版支間 (m)

P：T 荷重の 1 輪分の荷重 (=100kN)

底鋼板とスタッドジベル溶接部との境界面に作用する水平せん断応力は、式(5.2.4)で与えられる。

$$\tau = (Vd \cdot Qs) / (Is \cdot b) \quad (5.2.4)$$

ここに、

τ ：底鋼板とスタッドジベル溶接部との境界面に作用する水平せん断応力 (N/mm²)

Vd：単位幅 1m 当たりの版に作用する鉛直せん断力 (N)

Qs：中立軸に関する単位幅 1m 当たりの鋼板の断面 1 次モーメント (mm³)

Is：中立軸に関する単位幅 1m 当たりの床版の鋼材換算断面 2 次モーメント (mm⁴)

b：床版の単位幅 (=1m=1,000mm)

なお、上記 Qs, Is を算定する際に必要となる中立軸は、輪荷重走行実験の結果等を参考に適切な中立軸位置が算定されるように配慮する。また、鋼材とコンクリートとの弾性係数比 n は 10⁴⁾として算定してよい。

次に、スタッドジベル 1 本当たりの溶接部に作用する設計せん断力は、式(5.2.5)で与えられる。

$$S = \tau \times As \quad (5.2.5)$$

ここに、

S：スタッドジベル 1 本当たりに作用する設計せん断力 (N)

τ ：底鋼板とスタッドジベル溶接部との境界面に作用する水平せん断応力 (N/mm²)

As：スタッドジベル 1 本当たりに受け持つ底鋼板とスタッドジベル溶接部との境界面の面積 (mm²)

スタッドジベル 1 本当たりの溶接部のせん断強度は、式(5.2.6)で与えられる。

$$Sf = \phi \cdot Ad \cdot \tau f \quad (5.2.6)$$

ここに、

Sf：スタッドジベル 1 本当たりの溶接部のせん断強度 (N)

ϕ ：スタッドジベルの疲労せん断破壊に対する部材強度係数 (=1.0)

Ad：スタッドジベルの幹部の断面積 (mm²)

τf ：スタッドジベルの疲労強度 (=50N/mm²)

疲労照査は、式(5.2.5)と式(5.2.6)とを比較し、 $S \leq Sf$ であれば O.K. と判定される。

参考文献

- 1) 土木学会：鋼・コンクリート合成構造の設計ガイドライン 第 5 章 合成構造部材とその設計，1989. 3.
- 2) 土木学会：鋼・コンクリート複合構造の理論と設計 (1) 基礎編：理論編，第 8 章 合成版，1999. 4.
- 3) NCB 研究会編：新しい合成構造と橋，山海堂，1996. 1.
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，第 3 編 合成床版編，1997.
- 5) 日本道路協会：鋼道路橋設計便覧，丸善，1979. 2.
- 6) 佐伯彰一：I 形鋼格子床版の設計，土木技術資料，Vol. 17-7，1975. 7.
- 7) 大田孝二・高木優任・森寛司・松井繁之：鋼少数主桁橋に適用する I 形鋼格子床版の設計法に関する考察，橋梁と基礎，Vol. 31 No. 2，1997.
- 8) 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，大阪大学学位論文，1984. 11.
- 9) 高尾孝二：鋼道路橋鉄筋コンクリート床版の曲げモーメント設計法，橋梁と基礎，85-3，1985. 3.
- 10) 松井繁之：合成桁橋の復権と合成構造の開発と研究，鋼構造論文集，第 1 巻 第 2 号，pp. 1-9，1994.
- 11) 前田幸雄・松井繁之・梶川靖治・川井豊：繰り返し荷重をうける橋梁構造部材安全性の現象論的考察，第 19 回橋梁・構造工学研究発表会，pp. 79-88，1972.
- 12) Matsui,S., Moon,T., Fukumoto,Y., Watanabe,H. and Kajikawa,Y. : Fatigue Strength of Steel Plate-Concrete Composite Deck, IABSE Symposium, Lisbon, pp. 191-196, 1990.
- 13) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説，1993.
- 14) 土木学会鋼構造委員会新技術小委員会設計法ワーキンググループ：ロングライフブリッジへの道 (上)，橋梁と基礎，97-7，pp. 23-31，1997. 7.
- 15) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，1996.
- 16) 阿部幸夫・柳本泰伴・井澤衛：サンドイッチ型複合床版の継手部に関する研究，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp. 241-246，1998. 11.