

## 論文

## 道路橋 RC 床版の最小版厚と曲げモーメントについての一考察

東山浩士\*, 久保圭吾\*\*, 大久保宣人\*\*\*, 桐川 潔\*\*\*\*

\*博 (工), 近畿大学教授, 理工学部社会環境工学科 (〒577-8502 東大阪市小若江 3-4-1)

\*\*博 (工), 宮地エンジニアリング, 技術本部技術開発部 (〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-2)

\*\*\*博 (工), 高田機工, 技術本部 (〒556-0011 大阪市浪速区難波中 2-10-70)

\*\*\*\*修 (工), ピーエス三菱, 技術本部技術部 (〒104-8215 東京都中央区晴海 2-5-24)

道路橋示方書・同解説に規定されている鉄筋コンクリート床版の最小版厚および設計曲げモーメントは限られた設計基準強度を基に検討されてきたようである。しかし、最小版厚を決定する際のコンクリートの曲げ引張強度には寸法効果による強度低下が考慮されていないこと、その設計基準強度と道路橋示方書・同解説に規定されている設計基準強度に差異のあること、さらに、曲げ引張強度の高いコンクリート系材料、鋼繊維や有機繊維により性能を向上させたコンクリートなどの使用を考えると、床版設計における合理化検討が必要である。そこで本稿では、設計基準強度をパラメータとした解析を行い、最小版厚および曲げモーメントについて考察した。

キーワード: 道路橋 RC 床版, 最小版厚, 曲げモーメント, コンクリート強度

## 1. はじめに

道路橋示方書・同解説<sup>1)</sup> (以下、道示と称す。)における鉄筋コンクリート (RC) 床版の最小版厚についての規定は、床版に使用されるコンクリート強度として設計基準強度  $27\text{N/mm}^2$  (当時の単位系では  $280\text{kgf/cm}^2$ ) を用いた解析的検討の結果に基づいている<sup>2)</sup>。文献2)によれば、RC 床版の最小版厚は、コンクリートの死荷重と活荷重 (衝撃を含む) による連続版の最大曲げモーメントから算出される床版の曲げ引張応力が当時の CEB 基準によるコンクリートの曲げ引張強度  $4.7\text{N/mm}^2$  (当時の単位系では  $48\text{kgf/cm}^2$ ) に相当するときの版厚を基にしている。その結果、現行の道示に至るまで、次式に示す最小版厚式 (ただし、 $160\text{mm}$  を下回ってはならない。) が規定されてきた。

単純版

$$t = 40L + 110 \quad (1)$$

連続版

$$t = 30L + 110 \quad (2)$$

ここに、 $t$  は版厚 (mm),  $L$  は床版の支間長 (m) である。

この版厚を有する連続版の活荷重 (衝撃を含む) による床版中央におけるたわみは床版の支間長に対して概ね  $1/5,000$  以下であることが示されている<sup>2)</sup>。ただし、この計算において用いられたコンクリートのヤング係数は、

$29.4\text{kN/mm}^2$  (当時の単位系では  $300,000\text{kgf/cm}^2$ ) のみである。また文献2)には、床版に有害なひび割れが発生する危険をできるだけ少なくするためには曲げ引張強度やたわみのある限界値以内に収めればよいが、具体的な値については分っていないと述べられている。

1980年 (昭和55年) 道示からは、床版の耐久性を確保するため、設計曲げモーメントの割増しがなされた。文献3)によれば、この設計曲げモーメントの増分に対して鉄筋量の増大のみで対処すれば、逆に床版の剛性不足による耐久性への悪影響を及ぼす恐れがあることから、上記の最小版厚に対して、大型自動車の交通量および補修作業の難易による係数と付加曲げモーメントによる係数が設定され、版厚の増大がなされている。

一方、道示の RC 床版に使用するコンクリートの設計基準強度は  $24\text{N/mm}^2$  以上、床版と鋼桁の合成作用を考慮して設計する場合は  $27\text{N/mm}^2$  以上とされていることから、最小版厚式の検討過程との整合が図られてきたのか疑問がある。また、コンクリートの曲げ引張強度は、供試体の高さによる寸法効果を有することが明らかとなっているが<sup>4)5)</sup>、当時の最小版厚の検討においては、寸法効果が考慮されていない。

次に、道示の活荷重による設計曲げモーメントについては、これまでに幾度の改訂がなされてきた<sup>6)7)</sup>。設計曲げモーメント式は、床版の支間長に比例して増大し、床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合に対して支間方向曲げモーメントの割増係数が設定されている。これ

表-1 設計基準強度とヤング係数

$f'_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	24	28	30	40	50
$E_c$ (kN/mm <sup>2</sup> )	25	27	28	31	33

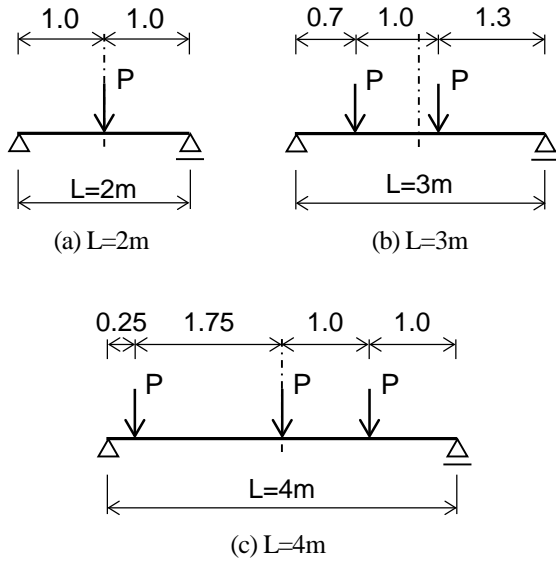


図-1 単純版における荷重載荷位置

はすでに述べた 1980 年道示の改訂内容である。また、床版の支持桁の不等沈下による付加曲げモーメントの影響を踏まえ、支持桁の曲げ剛性と床版の版剛性の比である相関剛比を取り入れた設計曲げモーメント式の構築の必要性についても以前から指摘されている<sup>8)~10)</sup>。

また、コンクリート強度の増大、鋼繊維や有機繊維を用いた通常のコンクリートよりも性能を向上させたコンクリートの使用が増加していることなどからして、これまでに比して版厚低減の可能性やそれに伴うたわみの増大など、床版設計における合理化検討が必要であると考えられる。

そこで本稿では、コンクリートの設計基準強度をパラメータとし、その範囲を拡張し、曲げ引張強度には寸法効果を考慮した版厚決定、ならびにそれらの版厚を有する RC 床版の曲げモーメントについて薄板理論に基づく FEM 解析による検討を行った。ただし、本稿での検討は、床版の支間方向が車両進行方向に直角な場合についてのみとし、相関剛比や付加曲げモーメントの影響については取り扱わない。

## 2. 解析方法

### 2.1 床版に使用するコンクリート

道示では床版に使用するコンクリートの設計基準強度 ( $f'_{ck}$ ) は 24N/mm<sup>2</sup> 以上とされていることから、本解析では、この値を最小値とし、50N/mm<sup>2</sup> までを検討範囲とした。設計基準強度とヤング係数 ( $E_c$ ) の関係<sup>11)</sup>は表-1 に示す値を用いた。また、コンクリートの曲げ引張強度 ( $f_{bk}$ ) と設計基準強度の関係は 1996 年制定のコンクリート標

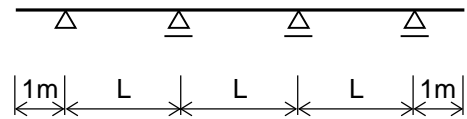


図-2 4本主桁を想定した連続版

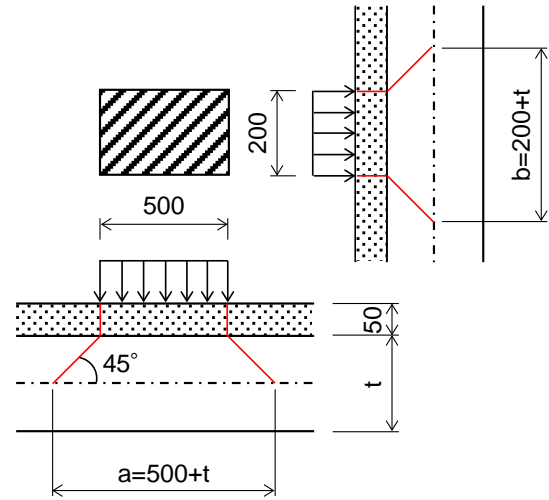


図-3 荷重の分布幅

準示方書<sup>12)</sup>に規定されていた次式を用いた。

$$f_{bk} = 0.42f'_{ck}{}^{2/3} \quad (3)$$

さらに、曲げ引張強度の寸法効果は、吉本ら<sup>9)</sup>が提案する次式を基に考慮することにした。

$$f_{bk,h} = 0.43 \left( 1 + \frac{7.04}{\sqrt[3]{h}} \right) f_{bk,h150} \quad (4)$$

ここに、式(3)より得られる曲げ引張強度は、高さ 100mm の供試体に対する値であると考え、式(4)は高さ 150mm の供試体を基準とした寸法効果式であるため、高さ 100mm を基準とするように変換が必要である。

### 2.2 荷重載荷位置

本解析では、単純版、連続版ともに床版の支間長は 2m、3m、4m の 3 種類とした。単純版における最大曲げモーメントが発生する荷重載荷位置を図-1 に示す。なお、前輪の影響は小さい<sup>9)</sup>ことから後輪 (100kN) のみを載荷することにした。また、連続版は図-2 に示す 4 本主桁 (張出し長: 1m) による支持を想定し、端支間および中間支間の両中央点において最大曲げモーメントが発生する載荷状態を事前に作成した影響線から求めた。なお、最大曲げモーメントは端支間側の床版で発生したことをここに述べておく。

### 2.3 荷重の分布幅

荷重の分布幅については、上置層に荷重分配作用を期待して荷重縁端部から版厚の 1/2 の位置まで 45° 方向に拡張してもよいとされている<sup>11)</sup>。しかし、アスファルト舗装を想定した場合、倉田ら<sup>13)</sup>が厚板理論に基づく解析

表-2 解析精度の確認

支間長	項目	$M_x$ (kN・m/m)	$M_y$ (kN・m/m)	$w$ (mm)
2m	解析値	28.220	22.115	0.988
	級数解	28.195	22.060	0.987
	比	1.001	1.002	1.001
3m	解析値	41.856	35.574	3.666
	級数解	41.319	35.501	3.669
	比	1.013	1.002	0.999
4m	解析値	51.029	44.619	7.605
	級数解	50.561	44.305	7.571
	比	1.009	1.007	1.005

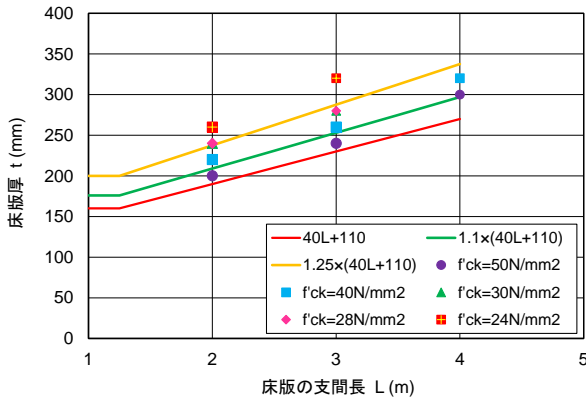


図-4 最小版厚と支間長の関係 (単純版)

により示しているように、荷重の分配作用は少ないことから、前田ら<sup>9)</sup>と同様に、荷重の分配は図-3に示す考えに基づくことにした。なお、本解析における版厚の範囲は160mmから280mm(必要に応じて340mmまで)とし、20mm間隔に増大させた。

## 2.4 解析精度の確認

本解析結果の精度を確認するため、版厚( $t$ )160mmの単純版の中央点における主鉄筋方向の曲げモーメント( $M_x$ )、配力鉄筋方向の曲げモーメント( $M_y$ )およびたわみ( $w$ )について、2辺単純1方向無限版の級数解<sup>14)</sup>と比較した結果を表-2に示す。なお、本解析モデルでは、橋軸方向の長さを床版の支間長の3倍とした。解析値は級数解に対して1%前後の差異であり、本解析は本稿の目的を遂行する上で十分な精度を有していると判断できる。

## 3. 単純版の解析結果

### 3.1 最小版厚

最小版厚の求め方については、①RC床版は等方性版を仮定、②床版のコンクリートおよびアスファルト舗装(厚さ50mm)の死荷重と活荷重(衝撃を含む)を作用、③主鉄筋方向の最大曲げモーメントを用いて曲げ引張応力を算出、④コンクリートの曲げ引張強度は式(3)および式(4)を用いた寸法効果を考慮した強度により比較、⑤曲げ引張強度を満足する版厚を採用とした。

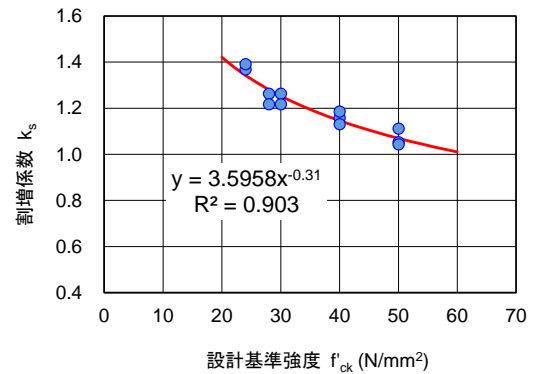


図-5 最小版厚の割増係数と設計基準強度の関係

得られた最小版厚と床版の支間長の関係を図-4に示す。それぞれの設計基準強度に対して、曲げ引張応力が曲げ引張強度を満足したときの版厚をプロットした。例えば、支間長2mにおいて、設計基準強度24N/mm<sup>2</sup>のコンクリートを使用した場合、版厚は260mm以上としなければ曲げ引張強度を満足しない。図-4には、道示の最小版厚および大型自動車の交通量による係数を考慮した版厚も併せて示してあるが、本解析結果は、曲げ引張強度に寸法効果を考慮し、1輪荷重を100kNとしているため、文献2)に示された最小版厚、あるいは厚板理論に基づく解析手法により最小版厚を検討した横山ら<sup>15)</sup>の結果より大きな版厚となっている。すなわち、道示の最小版厚と同等程度とするためには、コンクリートの設計基準強度をこれまで以上に増大させる必要があることを示唆するとともに、結果としてRC床版の耐疲労性をさらに向上させることに繋がるといえる。また、曲げ引張強度を満足した最小版厚について、式(1)を基準とした場合の割増係数( $k_s$ )を設計基準強度との関係で表すと図-5となる。この結果から、設計基準強度27N/mm<sup>2</sup>程度のときに割増係数は1.25に近く、大型自動車の交通量2,000台/日に対する道示の係数( $k_1$ )と同程度となる。

次に、上述した曲げ引張強度を満足した版厚を有する単純版について、活荷重(衝撃を含む)のみを作用させたときの床版の中央点におけるたわみ( $w$ )を解析により求め、床版の支間長との比( $L/w$ )を見てみると、図-6のとおり、たわみは概ね $L/5,000$ 以下であり、文献2)と同様の結果である。しかし、設計基準強度40N/mm<sup>2</sup>、あるいは50N/mm<sup>2</sup>の場合の一部にたわみが $L/5,000$ を上回り、 $L/3,500$ (緑線)程度まで大きくなるケースがある。すなわち、設計基準強度の大きなコンクリートや繊維補強により曲げ引張強度が通常のコンクリートよりも増大する材料などをRC床版に使用する場合には薄い版厚を設定できるが、たわみの増大による床版の使用性や鋼桁の疲労などへの配慮が必要となるかもしれない。

### 3.2 曲げモーメント

今回解析したすべての単純版に対して、活荷重(衝撃を含む)を作用させたときの主鉄筋方向の曲げモーメン

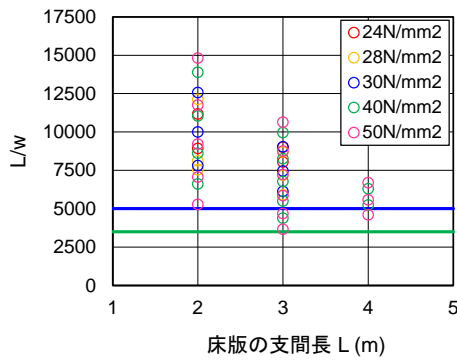
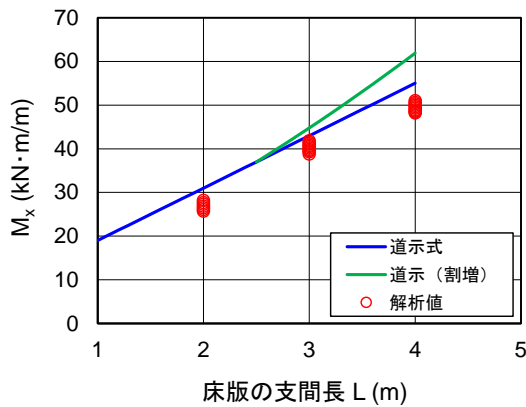
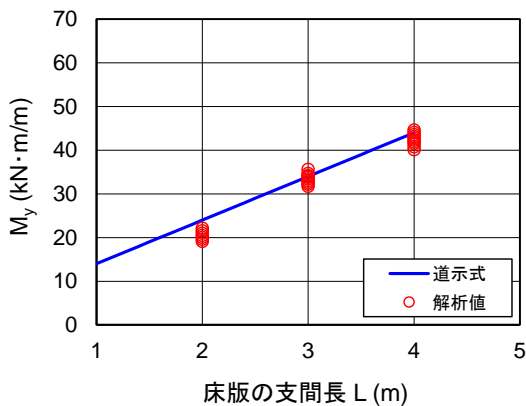


図-6 L/w と支間長の関係



(a) 主鉄筋方向の曲げモーメント



(b) 配力鉄筋方向の曲げモーメント

図-7 曲げモーメントと支間長の関係

ト ( $M_x$ ) および配力鉄筋方向の曲げモーメント ( $M_y$ ) を道示の設計曲げモーメントとともに図-7 に示す。ここで、解析結果には安全余裕を含めていない。版厚が大きくなると、荷重の分布幅が増大することから、同じ支間長であっても曲げモーメントは低下することになる。また、曲げモーメントと支間長の関係は線形に近い。このことから、本稿の範疇ではないが、道示に規定されている支間長 8m までの PC 床版や鋼コンクリート合成床版の曲げモーメントについても検討する必要があるといえる。主鉄筋方向の曲げモーメントは、道示の設計曲げモーメントを 10% 程度下回っている。道示の設計曲げモー

表-3 回帰式の係数

係数	単純版		連続版	
	$M_x$	$M_y$	$M_x$	$M_y$
a	-0.0204	-0.0264	0.0562	0.0353
b	0.0853	-0.0880	-0.1406	-0.1573
c	-0.0192	-0.0178	-0.0157	-0.0092
d	-0.1792	0.3671	0.7906	0.8208
e	0.1026	0.2028	-0.2916	-0.1567
f	0.2303	0.2148	0.1875	0.1458
g	-0.3236	-0.6305	-0.0208	-0.2499
h	-0.0700	-0.0897	-0.0162	0.0056

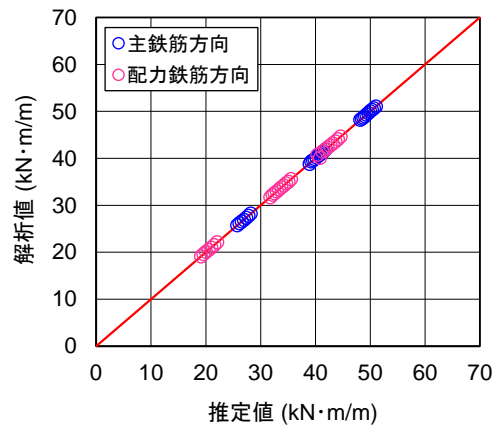


図-8 推定値の精度

メントには理論値との違い、床版厚や配筋などの施工誤差を考慮した安全余裕が 10%~20% 程度見込まれていることから<sup>10)</sup>、道示における荷重の分布幅の考え方との違いを考慮しても解析結果は妥当な値であるといえる。また、道示では床版の支間長が 2.5m 以上に対して主鉄筋方向の設計曲げモーメントの割増しを行うが、支間長 4m では解析値に対して約 20% 増となり、他の支間長に比べて、その差が大きくなっている。

次に、配力鉄筋方向の曲げモーメントは、版厚が薄いケースにおいて道示の設計曲げモーメントを上回る場合が見られる。設計基準強度や曲げ引張強度の大きなコンクリート材料などを使用する場合には配力鉄筋方向の曲げモーメントの設定に留意が必要であるといえる。

本解析結果を踏まえ、曲げモーメントが床版の支間長および版厚により変動することから、合理的な設計曲げモーメントの設定を目的に、それぞれの方向に対する曲げモーメントについて重回帰分析を行った結果を次式およびそれらの回帰係数を表-3 に示す。ただし、現段階において、これらの結果は本検討の範囲内に限る。

$$\frac{M}{P} = aL^2t + bLt^2 + cL^2 + dt^2 + eLt + fL + gt + h \quad (5)$$

ここに、 $M$  は衝撃を含む曲げモーメント ( $\text{kN}\cdot\text{m/m}$ )、 $P$  は T 荷重 ( $=100\text{kN}$ )、 $L$  は床版の支間長 ( $\text{m}$ )、 $t$  は版厚

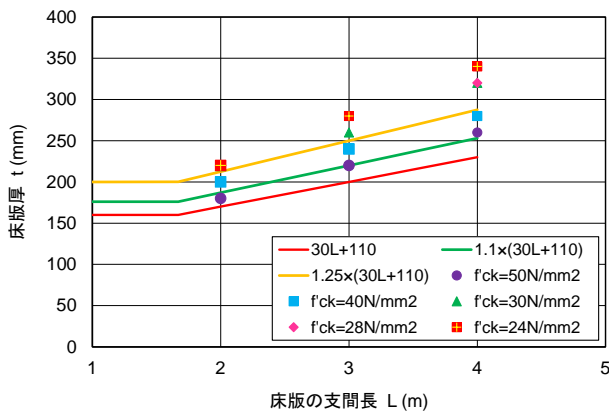


図-9 最小版厚と支間長の関係 (連続版)

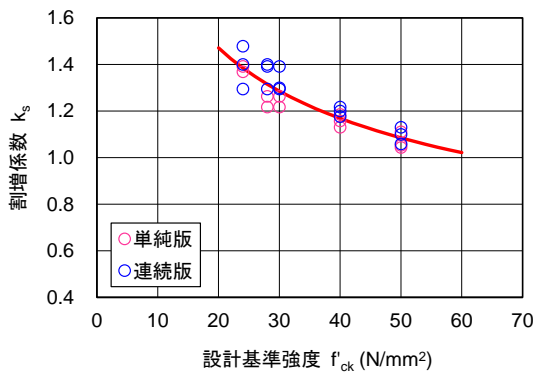


図-10 最小版厚の割増係数と設計基準強度の関係

(m),  $a \sim h$  は回帰係数である。なお、版厚 ( $t$ ) の単位は回帰係数の関係から“m”としたことに留意されたい。

解析値と式による推定値との比較を図-8 に示す。なお、これらの値には安全余裕を含めていない。両者には非常によい一致が見られ、版厚を考慮した曲げモーメントを求めることができる。

#### 4. 連続版の解析結果

##### 4.1 最小版厚

3.1 に述べた単純版と同様の求め方により得られた連続版 (4 本主桁を想定) の最小版厚と床版の支間長の関係を図-9 に示す。単純版の結果と同様に、曲げ引張強度に寸法効果を考慮しているため、設計基準強度が  $30\text{N/mm}^2$  以下の場合には、道示の最小版厚に大型自動車の交通量による係数 1.25 で割増した版厚以上が必要となるケースが見られる。曲げ引張強度を満足した版厚について、式(2)を基準とした場合の割増係数 ( $k_s$ ) を設計基準強度との関係で表すと、図-5 とほぼ同程度となったことから、単純版と連続版を重ねて示すと図-10 となり、両者の結果を近似すると次式となった。

$$k_s = 3.977f_{ck}^{-0.332} \quad (6)$$

また、曲げ引張強度を満足した版厚を有する連続版に

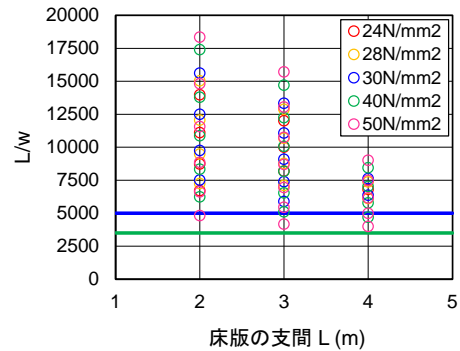


図-11  $L/w$  と支間長の関係

ついて、活荷重 (衝撃を含む) のみを作用させたときの床版のたわみ ( $w$ ) とそれぞれの床版の支間長との比 ( $L/w$ ) を見てみると、図-11 となり、支間長 4m において設計基準強度が  $40\text{N/mm}^2$ 、あるいは  $50\text{N/mm}^2$  の場合の一部に  $L/5,000$  を上回るたわみが見られるが、概ね  $L/5,000$  を下回る結果となっている。

##### 4.2 曲げモーメント

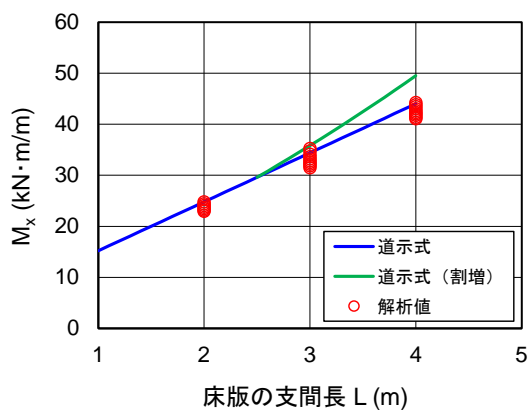
活荷重 (衝撃を含む) を作用させたときの主鉄筋方向の曲げモーメント ( $M_x$ ) および配力鉄筋方向の曲げモーメント ( $M_y$ ) を道示の設計曲げモーメントとともに図-12 に示す。単純版と同様のことがいえ、主鉄筋方向、配力鉄筋方向ともに、曲げモーメントは版厚が薄いケースにおいて道示の設計曲げモーメントを上回っている。解析結果には安全余裕を含めていないことからすると、設計曲げモーメントはさらに大きくなる。

それぞれの方向に対する曲げモーメントについて重回帰分析を行い、式(5)を用いて得られた回帰係数を表-3 に示す。紙面の関係でここには解析値と式(5)による推定値との比較を示さないが、単純版と同様に、両者には非常によい一致が見られた。

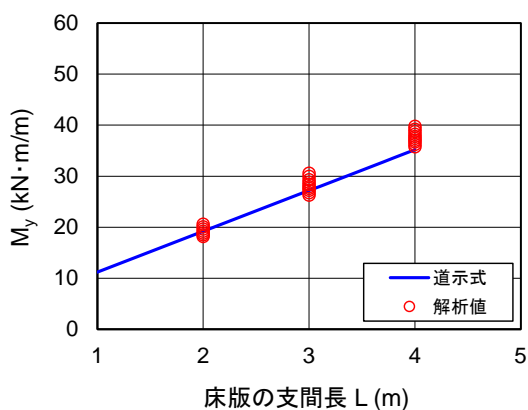
次に、道示において、連続版の支間曲げモーメントは単純版のその 80% に低減して規定されている。一方、国広ら<sup>16)</sup>の検討では、中間支間に対して 80%、端支間に対して 90% に低減する設計曲げモーメントが提案されている。本解析結果である連続版の端支間曲げモーメントと単純版の曲げモーメントを比較すると、図-13 に示すように、曲げモーメント比は、80%~95% となっており、いずれにおいても配力鉄筋方向の比が大きくなっている。国広ら<sup>16)</sup>の端支間に対する 90% に減じる提案の方が道示の 80% 低減より安全側であるといえる。今後は床版の支間長をさらに拡張した検討を行い比較することにする。

#### 5. まとめ

本稿では、設計基準強度をパラメータとした解析により、RC 床版の最小版厚および曲げモーメントについて、現行の道示との比較検討から考察を行った。以下に得ら



(a) 主鉄筋方向の曲げモーメント



(b) 配力鉄筋方向の曲げモーメント

図-12 曲げモーメントと支間長の関係

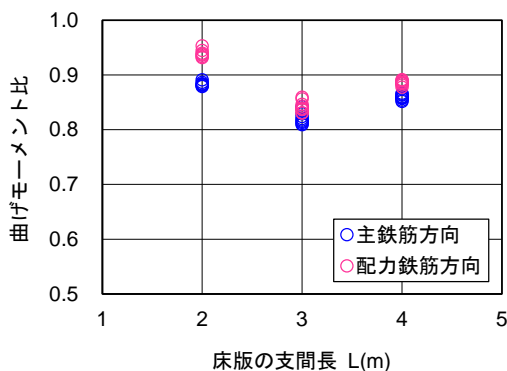


図-13 単純版に対する連続版の曲げモーメントの比

れた知見をまとめる。

- (1) コンクリートの曲げ引張強度に寸法効果を考慮して版厚を決定すると、道示の最小版厚を割増した値を超えるケースが発生したことから、設計基準強度を増大させる必要があることを示した。
- (2) 一方で、設計基準強度の増大による版厚の減少が活荷重（衝撃を含む）たわみの増大に繋がることも懸念され、床版のみならず、鋼桁の疲労への配慮が必要となる可能性がある。
- (3) 版厚の違いによる荷重の分布幅を考慮していることから、曲げモーメントの大きさは版厚および床版の支

間長との関係で変動する結果となった。これを踏まえ、版厚と床版の支間長を説明変数とした曲げモーメント式を重回帰分析から得た。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編，2017。
- 2) 日本道路協会 橋梁委員会：鋼道路橋の設計に関する暫定基準（案）および施工に関する注意事項，道路，pp.51-55，Vol.10，1968。
- 3) 鋼橋示方書小委員会・コンクリート橋示方書小委員会：道路橋鉄筋コンクリート床版の設計・施工指針・同解説（上），道路，pp.49-54，Vol.5，1984。
- 4) 内田裕市，六郷恵哲，小柳 洽：コンクリートの曲げ強度の寸法効果に関する破壊力学的検討，土木学会論文集，No.442/V-16，pp.101-107，1992。
- 5) 吉本 徹，亀田昭一，佐藤良一：舗装用コンクリートの寸法効果を考慮した設計曲げ疲労曲線の提案，土木学会論文集 E1（舗装工学），Vol.72，No.1，pp.18-35，2020。
- 6) 河西龍彦，小林 朗：RC 床版の設計法の変遷と今後の課題，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文，pp.1-4，1998。
- 7) 松井繁之編著：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007。
- 8) 佐藤 進，成岡昌夫：支持桁のたわみを考慮した鋼道路橋の鉄筋コンクリートの床版の曲げモーメントについて，土木学会論文集，第 175 号，pp.1-13，1970。
- 9) 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察，土木学会論文報告集，第 252 号，pp.11-22，1976。
- 10) 松井繁之，江頭慶三：横桁支持された長支間床版設計曲げモーメント式について，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文，pp.83-88，1998。
- 11) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】2017 年制定，2017。
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書【設計編】平成 8 年制定，1996。
- 13) 倉田宗章，園田恵一郎，堀川都志雄：道路橋床版の輪荷重点下の応力の評価，第 30 回土木学会年次学術講演会概要集，pp.213-215，1975。
- 14) 土木学会構造工学委員会編集：構造力学公式集，技報堂，1986。
- 15) 横山 広，堀川都志雄：道路橋床版の最小版厚について，第二回鋼橋床版シンポジウム講演論文，pp.173-178，2000。
- 16) 国広哲男，藤原 稔，井刈治久，堂垣内光弘：鋼道路橋鉄筋コンクリート床版の設計活荷重モーメント，土木技術資料，12(6)，pp.283-289，1970。

(2022 年 7 月 8 日受付)

(2022 年 9 月 9 日受理)