

論文 プレストレスを導入する道路橋床版の最小厚さに関する研究

横山 広^{*1}・堀川 都志雄^{*2}

要旨：床版の応力状態を厳密に評価できる厚板理論を用いて、パーシャルプレストレス状態とした応力計算を行い、コンクリート強度と床版支間を変数として最小版厚を算定した。単純版では、コンクリート強度が低い場合に道示式が危険側の値を示し、連続版では強度に関係なく道示式が安全側の値を示した。また、床版厚さを低減する際にはねじりに起因するせん断応力にも着目する必要があることを示した。計算結果を整理した床版厚の算定式より得られたグラフは、単純版では道示式とほぼ同じ勾配で、連続版では道示式に対して緩やかである。

キーワード：道路橋床版、床版厚さ、厚板理論、パーシャルプレストレス、曲げ応力度

1. はじめに

道路橋 RC 床版の陥没損傷が昭和 40 年代に顕在化し、その原因が過大な輪荷重作用や乾燥収縮を起因とする初期ひび割れの発生が進展した後に、破壊に至るという広義の疲労現象であることが各種機関の精力的な研究によって究明された。その後の道路橋示方書（以下、道示と称す。）では、床版厚さを大きくすることで疲労耐久性を向上させるように改訂が行われている¹⁾。疲労耐久性向上に有効な対策としては床版の厚さを大きくする以外にもプレストレスの導入が挙げられており、輪荷重走行試験によりその効果が確認されている²⁾。しかし、プレストレスを導入する床版では、引張縁の応力は改善されるものの圧縮側の縁応力が許容応力を超過するため、床版厚さを設定する場合に制約を受けることになるのは言うまでもない。その対策には導入プレストレス力を低減して床版の発生応力を制御するパーシャルプレストレスの概念を導入することが挙げられるが、現状ではプレストレスの導入レベルを適切に設定する方法は未だ確立されていない。

近年、コスト縮減化への動向を背景に高速道路建設を中心に少数主桁橋梁の施工実績が増加

しつつある。それらの新形式橋梁では床版支間が最大で $L=11.0\text{m}$ までのものが採用されており、有限要素法等の解析によって床版厚さを設定している。平成 14 年に改訂された道示³⁾ではプレストレスを導入する床版の規定が追加されているが、床版厚さの算定式は過去のを踏襲したままに留まっており、橋梁全体のコストに影響する床版厚さは過大な値に設定されている。

そこで、筆者らが検討を進めている厚板理論による解析を適用して、活荷重によって起こされる応力度に着目した計算を行い、最小版厚の評価手法をフルプレストレスおよびパーシャルプレストレスとする床版への適用を試みた。さらに計算で得られた最小版厚を床版支間で整理して、道示による床版厚さの算定式と比較し、パーシャルプレストレス床版の版厚算定式を提

表－1 CP110 の PC 部材の引張応力制限値

	許容ひび割れ幅 (mm)	コンクリートの等級に対する制限値 (N/mm ²)		
		30	40	50以上
プレテンション	0.10	—	4.1	4.8
	0.20	—	5.0	5.8
ボンド有りの ポストテンション	0.10	3.2	4.1	4.8
	0.20	3.8	5.0	5.8

表－2 部材高さに応じた修正係数

部材高さ(mm)	200以下	400	600	800	1000以上
修正係数	1.10	1.00	0.90	0.80	0.70

*1 ショーボンド建設（株） 北陸支店技術課長（正会員）

*2 大阪工業大学都市デザイン工学科教授 工博

案する。その際、曲げ引張応力度の制限値には British Code の CP110 を採用するものとする⁴⁾。この手法はコンクリートの全断面を有効として算出される断面引張縁の応力を制限することで、発生する曲げひび割れを制御する簡便な方法である（表－1）。

因みに、筆者らの検討で参照値として採用した過去の土木学会コンクリート標準示方書⁵⁾による曲げ強度の数値は、コンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ の場合には $fbk=4.91\text{N/mm}^2$ で、 $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$ の場合には $fbk=5.70\text{N/mm}^2$ であり、これらの値は CP110 の許容ひび割れ幅 0.2mm に相当する。一方、RC 床版の損傷判定ではひび割れ幅が 0.2mm に達すると補修・補強の対象として取扱われることを勘案して¹⁾、本研究では安全側の設定として許容ひび割れ幅を 0.1mm としている。

2. 厚板計算とフルプレストレス床版の版厚

2.1 厚板理論による計算

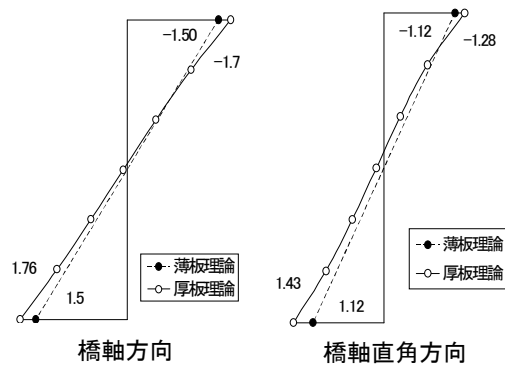
厚板理論計算は Kirchhoff-Love の仮定を用いて誘導される薄板理論とは異なり、3次元弾性論の変位関数 f_3 (ガラーキネクトル) と ϕ_3 (ブーシネスクの関数) に基づく厳密な理論で直接応力や変位が算出できるものである。変位関数の基礎微分方程式は次のように示される。

$$\Delta\Delta f_3 = 0 \quad , \quad \Delta\phi_3 = 0 \quad (1)$$

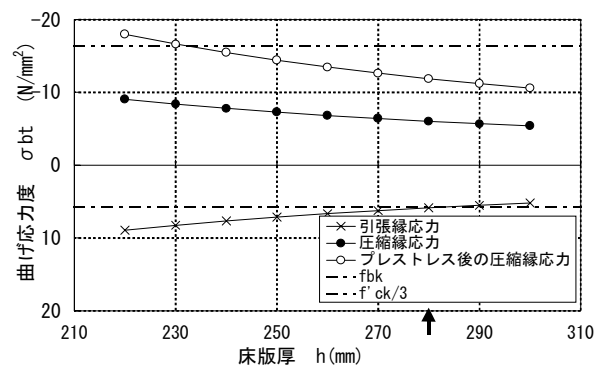
$$\text{ここに、} \Delta = \partial^2 x + \partial^2 y + \partial^2 z$$

$$\partial^2 x = \partial^2 / \partial x^2, \partial^2 y = \partial^2 / \partial y^2, \partial^2 z = \partial^2 / \partial z^2$$

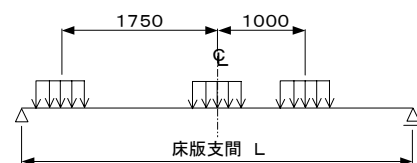
図－1 は橋軸直角方向の長さ(床版支間)×橋軸方向長さが $3.0 \times 12.0\text{m}$ の一方向版で、床版厚さが 290mm の単純支持版の中央に輪荷重 $P=100\text{kN}$ (載荷面形状 $500 \times 200\text{mm}$) を載荷したときの版厚方向の曲げ応力の分布を示している。図には薄板理論と厚板理論の両方の値を示しているが、局所的な応力を算出する厚板理論の計算値は非線形な分布を呈しており、床版下縁では薄板理論値よりも大きい値を示している。引張応力と引張強度との関係を吟味する場合、厳



図－1 厚板計算による応力分布 (N/mm^2)



図－2 単純支持 PC 床版の床版厚さと上下縁応力 ($L=5.0\text{m}$)



図－3 荷重載荷状態 (mm)

密な応力値を算出できる解析法が有効であることが判る。なお、以降の計算では床版上に厚さ 80mm の舗装と床版の自重を考慮し、舗装のヤング係数は夏場を想定した 0.5kN/mm^2 として完全合成された 2 層版で計算した。

2.2 フルプレストレス床版の最小版厚

筆者らは過去にフルプレストレスを導入する床版の最小版厚に関するパラメータ解析を行った⁶⁾。図－2 は支間 $L=5.0\text{m}$ における橋軸直角方向の曲げ応力と床版厚さの関係を示したもので、曲げ引張応力度に相当するプレストレスを導入

表－3 計算に用いた物性値

コンクリート強度 (N/mm^2)	ヤング係数 (kN/mm^2)	ポアソン比
30	28	0.167
40	31	
50	33	

する床版では、床版厚さが道示式（図中矢印）³⁾よりも小さく設定できることを明らかにし、そのプレストレス量を低減することでさらに床版厚さが薄くできることを示した。本研究はその結果を踏まえて、パーシャルプレストレスとする場合の最小版厚の検討を行うものである。

3. パーシャルプレストレス床版に対する計算

3.1 単純版での計算結果

床版の支持条件を一方向の単純版として床版支間を $L=3.0\sim 11.0\text{m}$ まで 1.0m ピッチで変化させ、コンクリート強度を $30, 40, 50\text{N/mm}^2$ とする場合の床版下縁の応力を求めた。計算に用いたヤング係数とポアソン比は表-3 の通りである。載荷荷重は $P=100\text{kN}$ で道示による衝撃係数を考慮し、床版中央から幅員方向に 1000mm と 1750mm のピッチで満載した（図-3）。

図-4 の(a)～(d)に橋軸直角方向の曲げ応力度と床版厚さの関係を示す。図中には CP110 の制限値と、その制限値までの引張応力を考慮した場合の床版上縁のプレストレス導入後の応力（PC 導入応力）を示した。CP110 の制限値は部材高さに応じた修正を行っている。

図-4(a)の床版支間 $L=4.0\text{m}$ でのプレストレス導入後の圧縮縁応力が設計基準強度の $1/3$ を超えない限界を最小床版厚さとすれば、コンクリート強度 30N/mm^2 の対応する床版厚さが 260mm （図中の $\blacktriangledown$ 印）となり、強度 40N/mm^2 の最小厚さは 230mm （図中の $\Downarrow$ 印）、強度 50N/mm^2 は 200mm （図中の $\Uparrow$ 印）となる。この時の床版下面に発生するひび割れの幅は 0.1mm 程度と予測される。道示における支間 $L=4.0\text{m}$ の床版厚さは 240mm と得られ、強度 40N/mm^2 の結果と同等で、コンクリート強度を高くした場合の版厚の低減効果が反映されていないことになる。同様にして支間 $L=6.0\text{m}$ の道示式による床版厚さが 320mm であるから、コンクリート強度 30N/mm^2 と 40N/mm^2 のほぼ中間に位置する。次に、支間 $L=8.0\text{m}$ では道示式の床版厚さが 390mm であるから、強度 40N/mm^2 の 370mm に近い値となつて

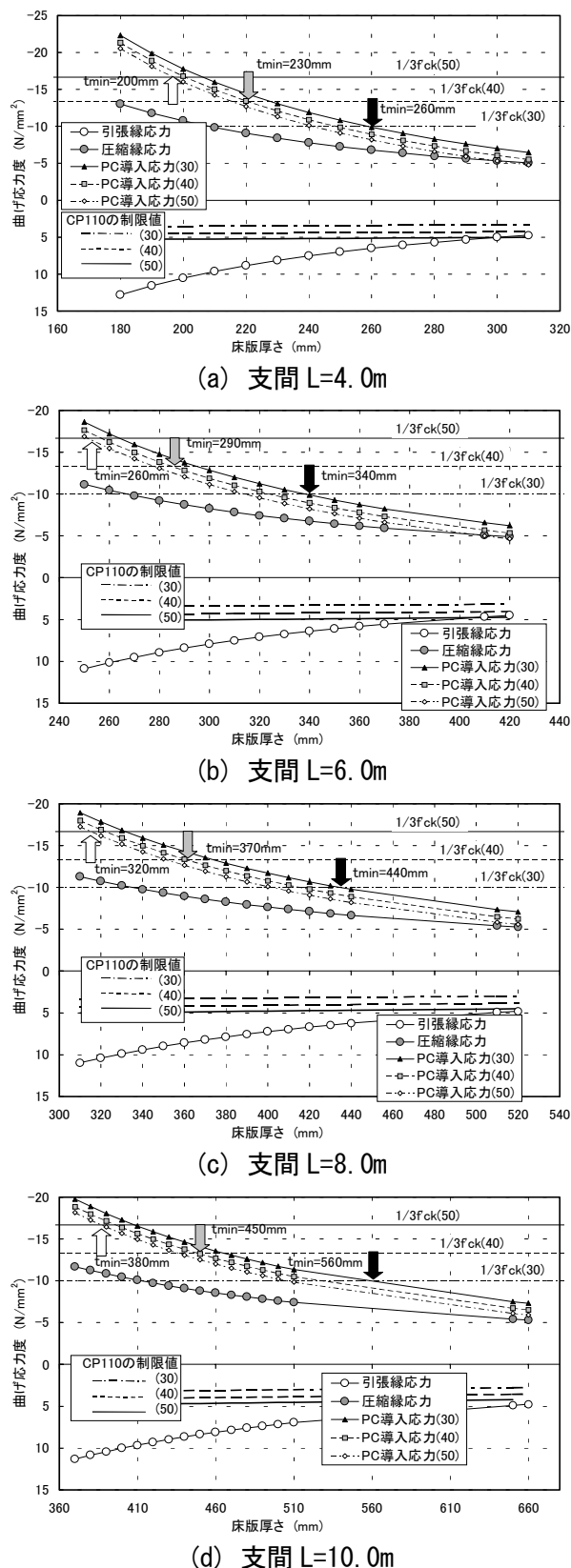


図-4 単純版の曲げ応力度と床版厚さの関係

いる。床版支間 $L=10.0\text{m}$ ではコンクリート強度 $30, 40, 50\text{N/mm}^2$ のそれぞれに対応する最小床版厚さが $560, 450, 380\text{mm}$ となり、道示式による 460mm はコンクリート強度 40N/mm^2 に対応し

ている。

以上の結果より，本研究による曲げ応力度に着目した範囲では，道示による床版厚さ算定式はコンクリート強度 40N/mm^2 にほぼ対応しており，これよりも小さなコンクリート強度を採用する場合には危険側となる。反対にコンクリート強度を大きくすることで床版厚さを低減することも可能であると推察できる。

3.2 連続版での計算結果

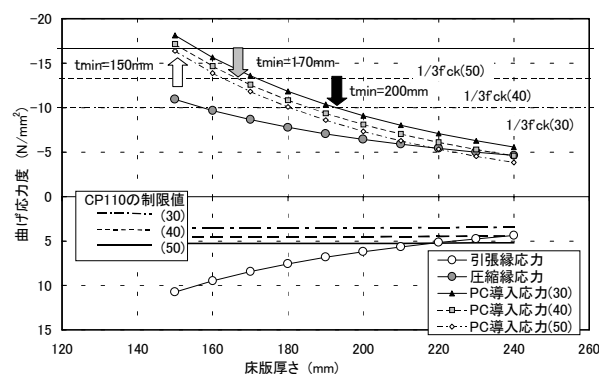
連続版においても単純版と同様に床版支間，コンクリート強度を変化させて算定し，その結果を図-5の(a)～(d)に示す。

図-5(a)の支間 $L=4.0\text{m}$ では，コンクリート強度 30N/mm^2 が対応する床版厚さは 200mm (図中の $\downarrow$ 印) であり，強度 $40, 50\text{N/mm}^2$ はそれぞれ 170mm (図中の $\Downarrow$ 印)， 150mm (図中の $\Uparrow$ 印) となる。支間 $L=4.0\text{m}$ における道示式の床版厚さは 210mm であることから，強度 30N/mm^2 よりも厚い設定となる。道示式による床版厚さは支間 $L=6.0\text{m}$ で 260mm ， $L=8.0\text{m}$ で 320mm ， $L=10.0\text{m}$ では 370mm となり，何れの支間においても強度 30N/mm^2 の時よりも厚く，支間長が大きくなるとその差も大きくなる傾向が伺える。また，コンクリート強度を 50N/mm^2 とした場合には道示の床版厚さに対して，全ての支間長で約 70% にまで低減できる。すなわち，道示の床版厚さ算定式は連続版の場合には単純版と異なり，安全側の床版厚さを与えていることになる。

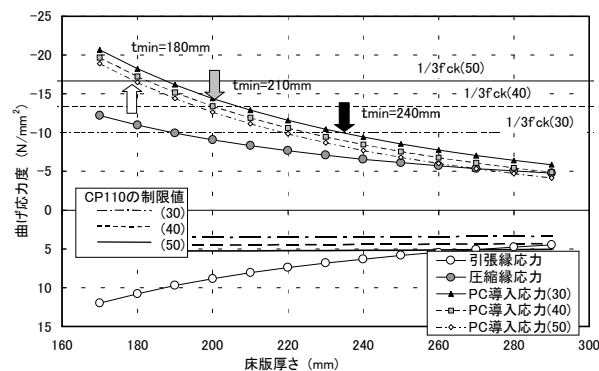
計算結果によれば，コンクリート強度を大きくすることで上部工の大幅な軽量化を可能とし，その効果は下部工を含めたコスト縮減化に寄与することになる。よって，床版厚さの設定にはコンクリート強度を考慮することが望まれる。

3.3 ねじり作用によるせん断応力の計算

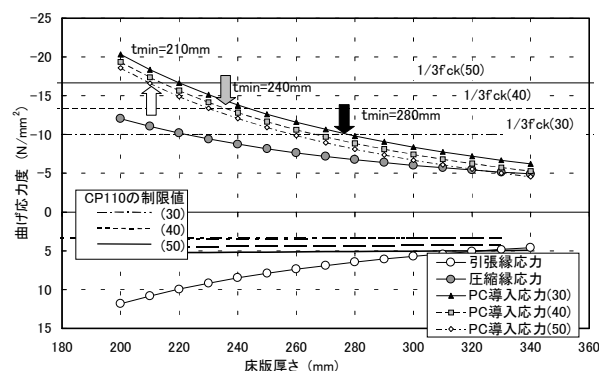
床版厚を低減することで各種の応力，例えばねじりに起因するせん断応力も増加することになる。ねじり応力に起因するひび割れは床版上面に発生し，貫通ひび割れの要因にも繋がる指摘もあるため¹⁾，床版設計においては注意を払う必要がある。図-6は床版支間×橋軸方向の長



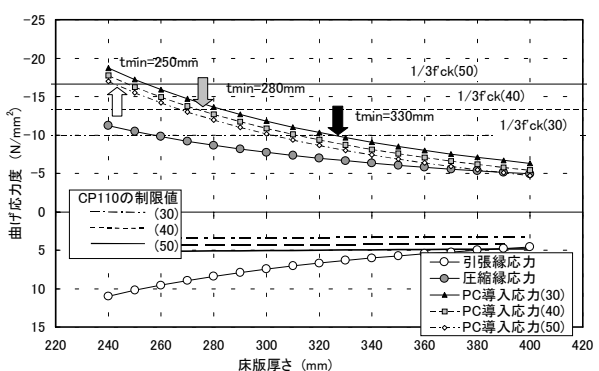
(a) 支間 $L=4.0\text{m}$



(b) 支間 $L=6.0\text{m}$



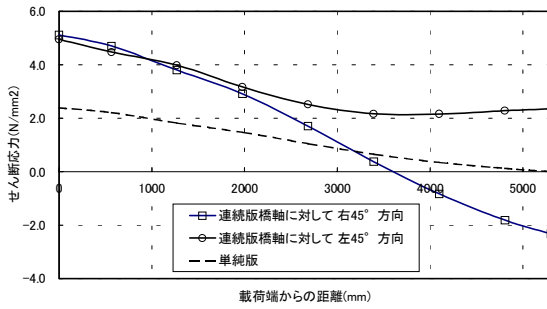
(c) 支間 $L=8.0\text{m}$



(d) 支間 $L=10.0\text{m}$

図-5 連続版の曲げ応力度と床版厚さの関係

さを $8.0 \times 24.0\text{m}$ ，床版厚さを 250mm として荷重を満載した場合の一方版を対象に，せん断応力と載荷端から 45° 方向に測った距離の関係を示したものである。単純版と連続版とでは連続



図－6 ねじりによるせん断応力の分布

版の方が大きく、応力値が最も大きい位置は荷重端であることが判る。また、その最大値である 5.11N/mm^2 は荷重載荷点直下の曲げ引張応力値 11.66N/mm^2 の約 45% 程度の値であることから、床版の耐久性に影響を及ぼすことも推察される。ここで、プレストレスがねじりに与える効果の評価として Hsu は式(2)⁴⁾ を提案している。

$$M_{tpu} = M_{tcu} \cdot \gamma \quad (2)$$

ここに、

M_{tpu} : PC 部材の捻りひび割れ発生モーメント

M_{tcu} : 無筋コンクリートのひび割れ発生

曲げモーメント

γ : プレストレス係数 $= \sqrt{1 + 10 \cdot \sigma_{pe} / \sigma_{cu}}$

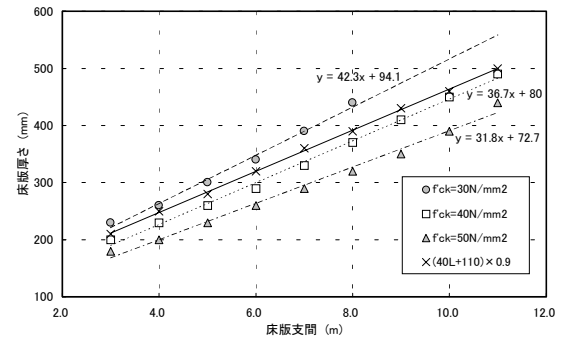
σ_{pe} : PC 鋼材の引張応力

σ_{cu} : コンクリートの圧縮強度

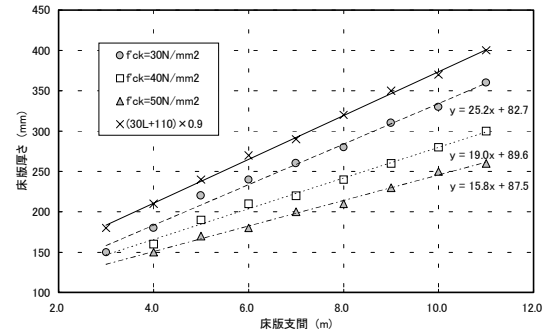
本研究における諸数値による計算から、その結果は無筋コンクリートに対してプレストレスを導入する場合のひび割れ発生時の曲げモーメントが約 2 倍に至ることから、プレストレス導入によりねじりに起因するひび割れ発生に対する危険性は低下するが、床版厚さを低減するに当たって耐久性の観点からねじりの影響にも着目する必要があることは明らかである。また、ねじりひび割れ発生後には耐荷力が低下するので、プレストレスを導入する場合でも RC 構造と同様に十分な配筋が必要である。

4. パーシャルプレストレス床版厚さの算定式

単純版と連続版の最小版厚の結果を床版支間に関して整理したものを図－7(a) と (b) に示す。

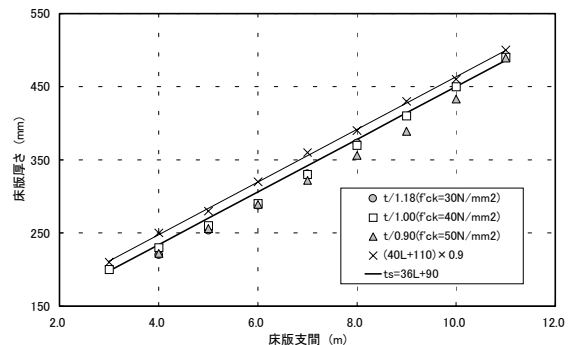


(a) 単純版

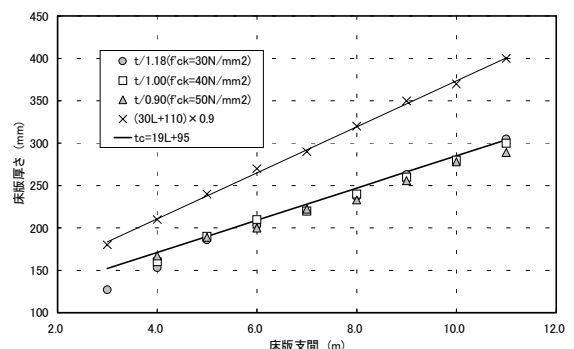


(b) 連続版

図－7 床版支間と床版厚の関係



(a) 単純版



(b) 連続版

図－8 床版厚と床版支間の関係（提案式）

図－7(a) の単純版では、道式（図中の×印）はコンクリート強度 30N/mm^2 と 40N/mm^2 の間に位置し、図－7(b) の連続版ではコンクリート強

度 30N/mm^2 よりも版厚が大きくなる範囲に位置する。因みに、既往の研究による 2 主鈑桁橋の設計例 (W橋) ⁷⁾ では、床版支間 $L=11.0\text{m}$ で床版厚さ 360mm が採用されており、連続版のコンクリート強度 30N/mm^2 が対応する。2 主鈑桁橋では張出床版長が大きくなることから単純版よりも連続版に近い挙動を示すことが推察されるため、床版厚さの設定では張出長も考慮する必要性が伺える。

図-8 の (a) と (b) は図-7 の各計算結果に対して、コンクリート強度による補正係数 ρ を新たに導入して整理したものである。図中には計算値よりも安全側となるような床版厚さの一次関数による曲線を示しており、それらは単純版と連続版でそれぞれ式(3)、および式(4)となる。また、コンクリート強度による補正係数 ρ は表-4 に示す通りである。

単純版

$$t_s = (36 \cdot L + 90) \cdot \rho \quad (\text{mm}) \quad (3)$$

連続版

$$t_c = (19 \cdot L + 95) \cdot \rho \quad (\text{mm}) \quad (4)$$

ここに、 L : 床版支間 (m)

単純版の床版厚さ算定の提案式のグラフは道示式のそれとほぼ同等の傾き (支間長に関わる数値) となっているが、連続版では提案式の勾配が道示式に対して緩やかである。

5. まとめ

本研究では、厚板理論による厳密な応力計算から床版の支間方向にパーシャルプレストレス状態とする場合の最小版厚を検討した。曲げ引張応力度の制限値としては CP110 の規定を採用している。以下に得られた結果を列挙する。

- (1) 単純版の計算では、道示式による床版厚さはコンクリート強度 30N/mm^2 と 40N/mm^2 の間に位置しており、コンクリート強度によっては道示式が危険側の値を与える。
- (2) 連続版では、道示式は計算値よりも上方に

表-4 コンクリート強度による版厚補正係数

コンクリート強度 (N/mm^2)	30	40	50
床版厚補正係数 ρ	1.18	1.00	0.90

位置しており、コスト縮減に寄与する軽量化が可能であることが示された。

- (3) 床版厚さの算定に当たってはコンクリート強度に留意する必要がある。
- (4) 床版厚さを低減することで、捻りによるせん断応力が増加することになるので、初期ひび割れの要因となる危険性があり、せん断応力にも着目することが望ましい。
- (4) 曲げ応力度に着目して、CP110 の規定を制限値とする床版厚さの算定式は、単純版よりも連続版の方が道示式に対して低減効果が大きい。

参考文献

- 1) 土木学会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000.
- 2) 横山，栗原，加藤，松井：プレストレスにより連続化された RC プレキャスト床版の疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.46A，pp.1443-1448，2003.
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編，2002.
- 4) BSI：The Structural Use of Concrete, CP110-1972, 1972.
- 5) 土木学会：コンクリート標準示方書，pp.19-22, 1998.
- 6) 横山，堀川：道路橋床版の最小厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol.48A，pp.1169-1176, 2002.
- 7) 猪熊，本間，丸山，河西：長支間場所打ち PC 床版の設計と施工計画 (第二東名高速道路藁科川橋)，第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集，pp.1-6，2000.1