

主桁近傍の床版最小厚さに関する研究

A study on the minimum thickness of deck slab near the main girder

横山広^{*}, 関口幹夫^{**}, 堀川都志雄^{***}

Hiroshi YOKOYAMA, Mikio SEKIGUCHI, Toshio HORIKAWA

^{*}ショーボンド建設(株)北陸支店技術課(〒920-0362 金沢市古府 1-140)^{**}東京都土木技術研究所技術部(〒136-0075 東京都江東区新砂 1-9-15)^{***}工博 大阪工業大学工学部 都市デザイン工学科(〒535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

In order to determine the minimum thickness of deck slab of a highway bridge near the main girder, stresses were calculated using a hybrid method expanded from the thick plate theory. As a result, it was found that the stress at the top surface of the slab was highest near the midpoint of the main girder when loading was applied at the edge of the curb. The bending moment at the time was different from the value obtained by the formula recommended in the Specifications for Highway Bridges. It was also found that increasing the concrete strength was effective for reducing the thickness of a RC slab and that the slab thickness could be reduced further by using a fully pre-stressed condition in design. Reduction in slab thickness causes shear stress to increase, so attention should also be paid to shear stress when reducing slab thickness.

Keywords: slab deck of a highway bridge, thick plate theory, bending stress, tensile strength

キーワード: 道路橋床版, 厚板理論, 曲げ応力, 引張強度

1. はじめに

近年, コスト縮減意識の高まりを受けて橋梁の建設分野では少数主桁橋梁が実績を伸ばしており, 今後もさらに増加する勢いである。それらの床版の設計実務では, 走行疲労試験の結果でその性能を把握してから断面構成を検討している例もあるが, その他のほとんどは平成 14 年の道路橋示方書¹⁾(以下, 道示と称す)を踏襲したものとなっており, コスト縮減の余地が残されている。

筆者らは過去に3次元弾性論による厚板理論を適用したコンクリート系床版の支間中央における最小版厚に関する解析的検討を行い, その中で道示による床版厚さの設定式は過大な値であることを指摘した^{2), 3)}。その際の最小厚さの定義は, 死荷重と活荷重作用による曲げひび割れが生じない厚さであり, コンクリート標準示方書に規定されている曲げ強度を荷重作用時の曲げ応力度が上回らないことで最小版厚の安全性を評価した。これは昭和 40 年代に発生した鉄筋コンクリート(以下, RC と称す)床版の陥没破壊が, 過大な活荷重作用やコンクリートの収縮等の初期ひび割れに起因する, 広義の疲労現象であることを考慮したものである。また, 合成床版についても同様の検討を行い, 鋼構造物設計指針 PART B⁴⁾の床版厚さ算定式による値よりさらに低減できることを示した⁵⁾。道路橋で床

版厚さが低減されることの効果は, 床版単体だけではなく, 橋梁の上下部工全体のコスト縮減に寄与することになり, 限られた建設投資の有効活用に繋がるものと推測される。

一方, 床版設計の実務では張出し床版を考慮した主桁近傍の応力状態も横断面構成の決定要因となることから, その状態の把握は意義のあることと考えられる。そこで本研究では, 支持桁近傍を対象として有害な曲げひび割れ発生の有無を解析的に吟味し, 床版厚さの低減の可能性を検討する。また, 床版支間を変数とした輪荷重作用時の応力状態を明らかにする。

2. 計算方法と計算モデル

本研究で採用した厚板理論は, 厳密な応力の算出を可能とするものの, 境界条件に制約を受けるため, 厚板理論を拡張した混合法を採用した。即ち, 厚板理論の全周単純支持の解を特解として用い, 境界条件を満足させる同次解に薄板理論を用いる手法である。ここで, 厚板理論とは Kirchhoff-Love の仮定から誘導される薄板理論とは異なり, 3 次元弾性論による変位関数 f_3 (ガラーキンベクトル) と ϕ_3 (プーシネスクの関数) に基づく厳密な理論であり, その基礎微分方程式は式(1)のように示される。実際の算定では, フーリエ級数展開して収束計算を行っている。

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

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

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

変位関数 u, v, w と変位関数の関係は以下のように示される。

$$2\mu u = -\partial x \partial z f_3 + \partial y \phi_3$$

$$2\mu v = -\partial y \partial z f_3 - \partial x \phi_3$$

$$2\mu w = \frac{\mu}{\lambda + \mu} \left[\partial^2 z + \frac{\lambda + 2\mu}{\mu} (\partial^2 x + \partial^2 y) \right] f_3$$

ここに, λ, μ : Lamé の定数

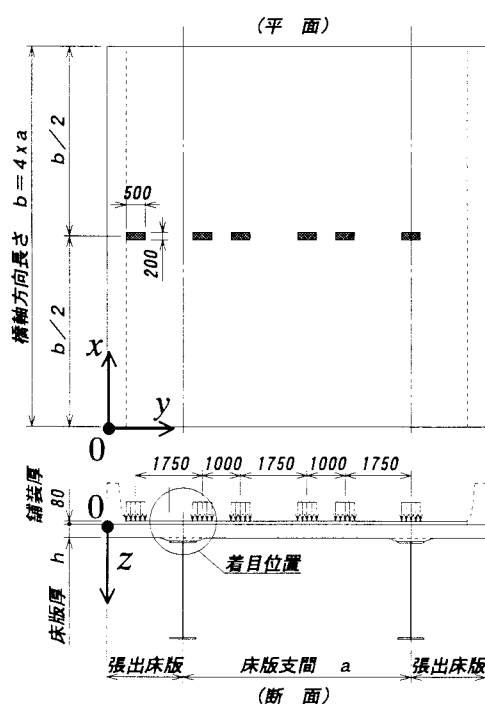


図-1 計算モデル

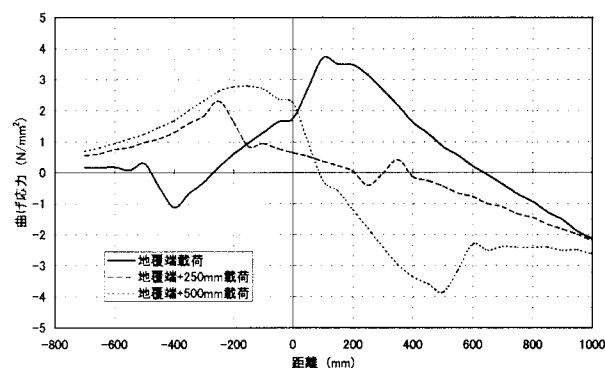
表-1 フランジ幅と断面二次モーメント

支間 (m)	フランジ幅 (mm)	断面二次モーメント (m ⁴)
3.0	600	0.04627
4.0	635	0.07285
5.0	670	0.09942
6.0	700	0.1260

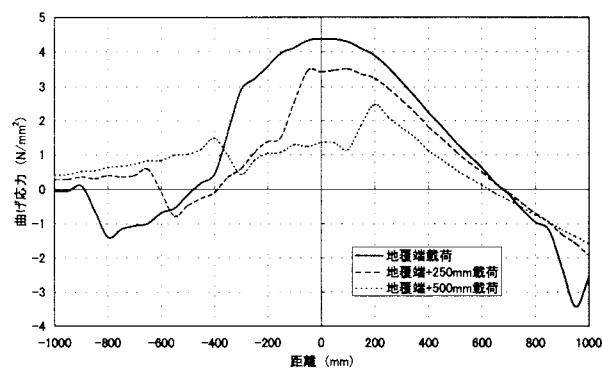
表-2 コンクリートのヤング係数

f_{ck} (N/mm ²)	30	40	50
E_c (kN/mm ²)	28	31	33

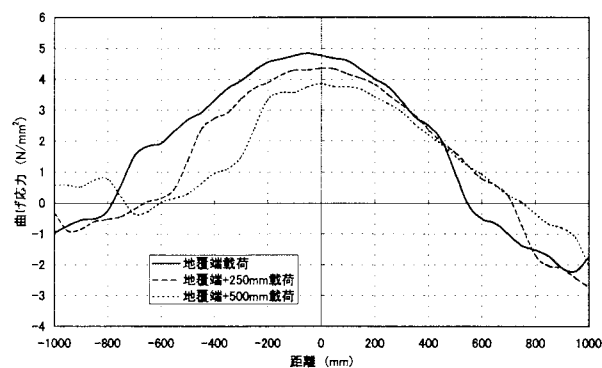
計算モデルは図-1 に示す通りで, 2 本の主桁上に床版があり, 中間床版と張出床版の支間長の比は 1:0.4 としている⁶⁾。載荷した荷重は道示の T 荷重に衝撃を考慮した荷重を, 着目する主桁上で曲げ応力が最大となるように壁式高欄 (幅 500mm) の内側端部から満載している。対象とした中間床版の支間長は $L=3.0\text{m}$ から 1.0m ピッチで 6.0m



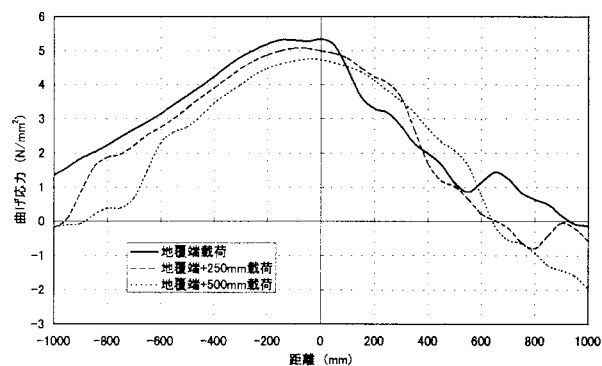
(a) $L=3.0\text{m}$



(b) $L=4.0\text{m}$



(c) $L=5.0\text{m}$



(d) $L=6.0\text{m}$

図-2 床版上縁の曲げ応力度の分布

までの 4 段階とした。計算上の主桁の断面二次モーメントは $L=3.0\text{m}$, 6.0m では過去の設計例から設定しており, $L=4.0\text{m}$, 5.0m ではそれらの値を線形補間した剛性を用いている (表-1)。本計算における床版厚さは中間床版の支間長に対する道示式で算出しており, ハンチ形状はその高

さを 80mm に固定し断面端部の勾配は 45° とした。ハンチの剛性は主桁に寄与するとして主桁断面に換算して評価した。なお、計算に用いたコンクリートのヤング係数は表-2 に示す通りで、ポアソン比は 0.167 とした。舗装による荷重分散は考慮していない。

本研究では、①主桁支点上の応力分布を計算することで引張縁応力が最大となる荷重載荷パターンを選定し、その載荷パターンで床版厚さをパラメータとした計算を行い、それぞれの版厚における曲げ応力度を算出する。次に②曲げ応力度と曲げ強度の大小関係から RC 構造としての最小厚さを設定する。その際の曲げ強度には筆者らの過去の研究結果と同様に、土木学会の平成 8 年版コンクリート標準示方書⁷⁾による数値により評価する⁵⁾。そして③床版厚さの低減に効果的なフルプレストレス状態とした場合の最小厚さも検討する。また、④PRC 構造とした場合の最小版厚を CP110⁸⁾を適用して設定し、フルプレストレス状態の床版厚さと比較する。最後に、⑤最小版厚における横せん断応力度の分布を算出して、床版厚さを低減する際のせん断応力に着目することの必要性を検討する。

3. 主桁近傍の曲げ応力度の分布と断面力

図-2(a)~(d)に主桁近傍の床版上縁に発生する曲げ応力度の分布を示す。図中の横軸における 0 点は主桁中心上を示している。荷重は道示に示されている地覆に接する地覆端載荷とその位置から橋軸直角方向に中央側へ+250mm と+500mm 移動させるものとした。いずれの床版支間でも地覆端載荷が最も大きい曲げ応力度となっており、荷重の中央側への移動によりその値も低下している。また、支間長に合わせて曲げ応力度のレベルも大きくなっている。最大値を示す位置は各支間で異なっているものの、主桁中心から±100mm の範囲にある。グラフの形状は荷重載荷位置の影響を受けて滑らかな曲線となっていない。

図-3 は曲げ応力度が最大となる載荷条件での曲げモーメントと道示の曲げモーメント式による値を示したものである。道示の張出床版支間長 L は計算モデルから設定した。図によれば本研究での曲げモーメントの計算値は線形に増加していることが判る。また、張出床版支間長 $L=0.3m$ 程度では道示が 2 倍以上大きな値を示しており、 $L=1.1m$ 程度までは道示の計算値が本研究よりも大きな値となっている。ただし、張出床版支間 $L=1.5m$ では逆転し道示式が 23%程度小さな値となっており、載荷条件によっては道示式が危険側となった。

図-4 は中間床版の支間が $L=6.0m$ で床版厚さが 310mm での、曲げモーメントが最大となる載荷条件での荷重載荷位置における断面中央の主応力分布を示したものである。最大値は荷重載荷端付近の上縁で発生しており、その応力レベルからひび割れが発生する危険性が伺える。ただし、床版内部の応力レベルは小さいことから斜めひび割れの懸念はなく、上縁付近の曲げひび割れに着目することが初

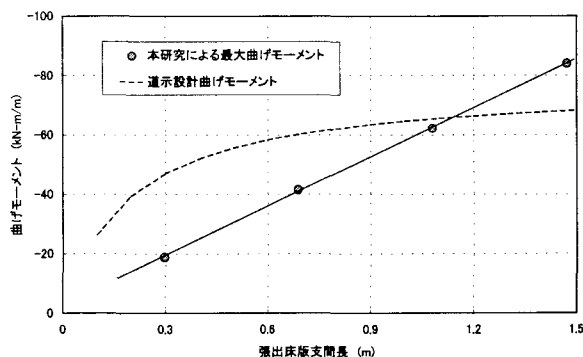


図-3 主桁近傍の最大曲げモーメント

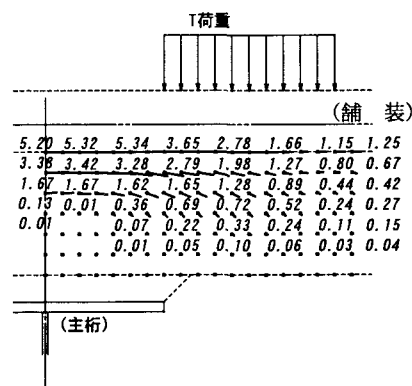


図-4 主応力分布 (N/mm²)

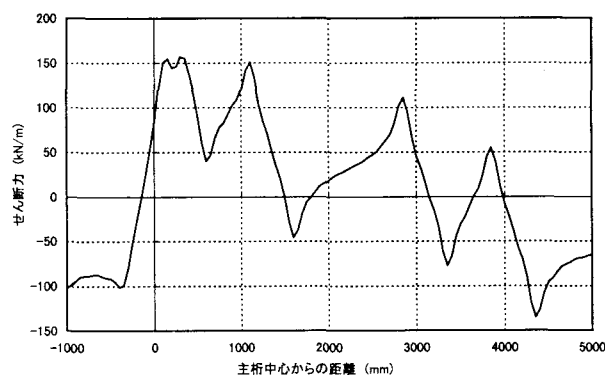


図-5 せん断力の分布

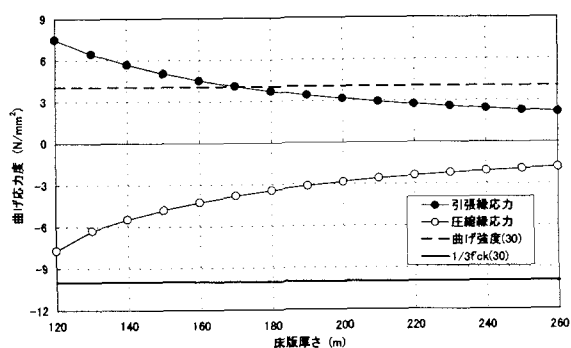
期ひび割れ制御に効果的であると考えられる。

図-5 では図-4 と同様の載荷条件、着目位置におけるせん断力の分布を示した。せん断力の最大値は主桁中心付近で発生しており最大値は 154.5kN/m である。グラフの形状は荷重載荷位置、分布幅の影響を受けて変化している。因みに土木学会による鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物で示されているずれ止めの設計に用いる版のせん断力は剛なずれ止めとする場合 79.7kN/m となることから、本計算のせん断力が 2 倍程度にも達していることが判る。

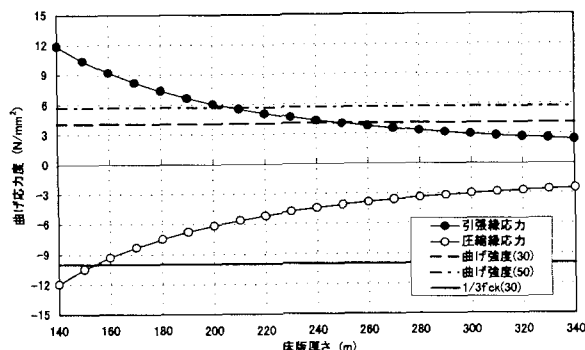
4. 主桁近傍の応力度に着目した最小版厚

4.1 RC 構造での最小版厚

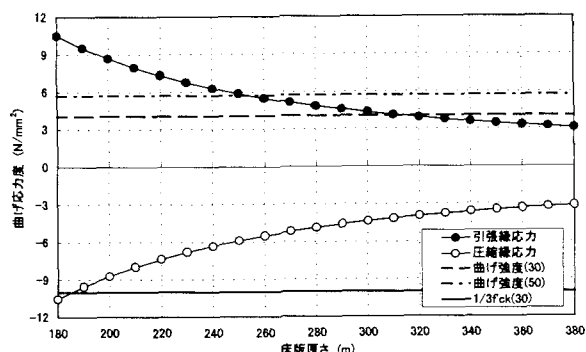
図-6(a)~(c)に中間床版の支間を $L=3.0m$, $4.0m$, $5.0m$



(a) $L=3.0\text{m}$



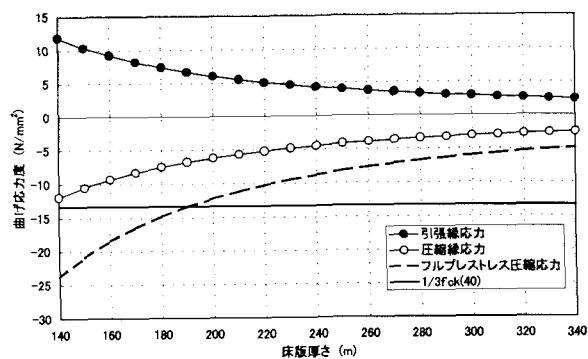
(b) $L=4.0\text{m}$



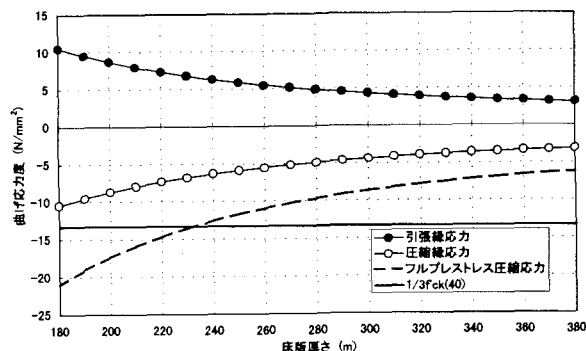
(c) $L=5.0\text{m}$

図-6 床版厚さと上下縁応力の関係 (RC 構造)

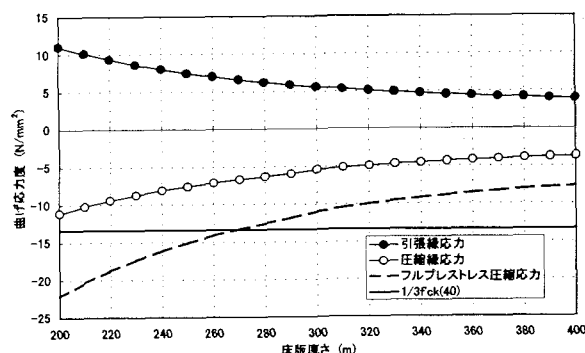
とした床版上縁の曲げ応力度 (●印) と床版厚さの関係を示す。載荷ケースは応力度分布の検討で最も大きくなるケースとし、着目位置は各ケースの最大値を示す位置とした。図-6(a)の中間床版支間 $L=3.0\text{m}$ では引張線の曲げ応力度が床版厚さが 170mm より薄くなった場合にコンクリートの設計基準強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ とした場合の曲げ強度を上回っており、ひび割れの生じない厚さを最小厚さと定義すれば RC 構造での最小厚さは 170mm となる。同様に図-6(b)の中間床版の支間 $L=4.0\text{m}$ ではコンクリート強度が 30N/mm^2 のとき床版厚さが 250mm となり、強度を 50N/mm^2 にすれば 210mm まで低減できることになる。道示の単純版での厚さは PC 床版で 240mm 程度であることから、RC 構造ではコンクリート強度を大きくすることが版厚の設定に効果的であることが判る。図-6(c)の支間 $L=5\text{m}$ ではコンクリート強度が 30N/mm^2 のとき床版厚さが



(a) $L=4.0\text{m}$



(b) $L=5.0\text{m}$



(c) $L=6.0\text{m}$

図-7 床版厚さと上下縁応力の関係 (PC 構造)

320mm となり 50N/mm^2 にすれば 260mm となる。道示式の PC 床版厚さが 280mm 程度であることから、床版支間 $L=5.0\text{m}$ でもコンクリート強度を大きくすることで PC 構造と同等の厚さ設定が可能であると言える。

4.2 フルプレストレス構造での最小版厚

床版厚さの低減にはプレストレスの導入が効果的であるが、載荷荷重による曲げ圧縮応力にプレストレスが付加されることで、許容する圧縮強度が床版厚さの設定に対して支配的になる。

図-7(a)~(c)はフルプレストレス状態としたときの曲げ応力度と床版厚さとの関係を示したもので、支間 $L=4.0\text{m}$ の図-7(a)では、コンクリート強度を 40N/mm^2 に設定して、その $1/3f'_{ck}$ を圧縮応力の上限にすれば 190mm で超過することになり、その厚さが最小厚さとなる。同様に図-7(b)

表-3 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-4 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

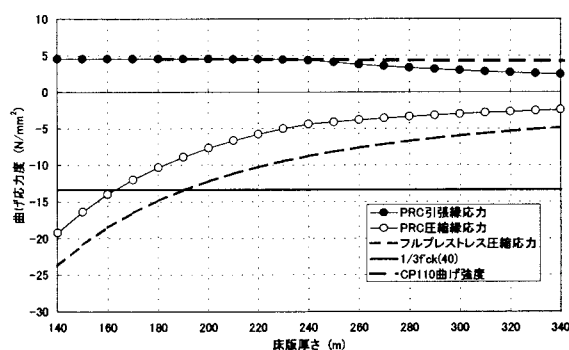
の中間床版の支間 $L=5.0\text{m}$ では 230mm で、図-7(c)の支間 $L=6.0\text{m}$ では 270mm となる。道示の床版厚さ算定式では、支間 $L=4.0\text{m}$ で床版厚さが 240mm 程度となり、 $L=5.0\text{m}$ では約 280mm 、 $L=6.0\text{m}$ が約 320mm であることから、本研究の計算結果が全ての支間で 50mm 程度低減できることになる。ただし、前述の通り本計算ではハンチを主桁断面に換算することで評価しており、ハンチ部分の床版に対する3次元的な応力の分散効果を考慮すれば圧縮応力は低下するものと考えられることから、床版厚さもさらに低減できる可能性がある。

4.3 PRC 構造での最小版厚

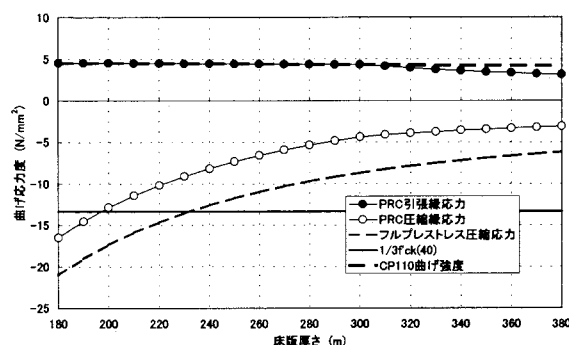
図-8 は導入するプレストレス量を制限して PRC 状態とした場合の曲げ応力度と床版厚さの関係を示したものである。PRC 状態とする場合の曲げ応力度の制限値に British code の CP110 を採用した(表-3, 4)。この手法はコンクリートの全断面を有効として算出される断面の引張縁応力を抑制することで、発生する曲げ応力度を制限する簡便な方法である。因みに過去の土木学会コンクリート標準示方書による曲げ強度の数値は、コンクリート強度 $f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ のときに $f_{bk}=4.91\text{N/mm}$ となることから CP110 の許容ひび割れ幅 0.2mm に相当する。ただし、 0.2mm のひび割れ幅では補修・補強の対象となることも多いと考えられることから、本研究では安全側の 0.1mm の値を PRC 状態の制限値とする。

図-8(a)の中間床版支間 $L=4.0\text{m}$ では PRC 圧縮縁応力がコンクリート強度 40N/mm^2 の $1/3$ を超える床版厚さが 170mm 程度となり、前述のフルプレストレス状態の最小値である 190mm よりも 20mm 低減されている。同様に支間 $L=5.0\text{m}$ ではフルプレストレス状態で 230mm の床版厚さが 30mm 低減され、 $L=6.0\text{m}$ では PRC 構造とすることで 40mm 低減されることになる。ただし、圧縮縁の応力に関してはフルプレストレスと同様にハンチの床版への寄与分を考慮していないので、さらに低減できる可能性がある。その際には、有限要素法による床版断面の応力分布を参照する必要がある。

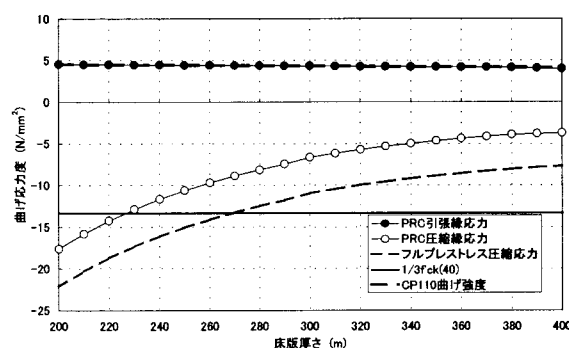
5. 横せん断応力の分布



(a) $L=4.0\text{m}$



(b) $L=5.0\text{m}$



(c) $L=6.0\text{m}$

図-8 床版厚さと上下縁応力の関係 (PRC 構造)

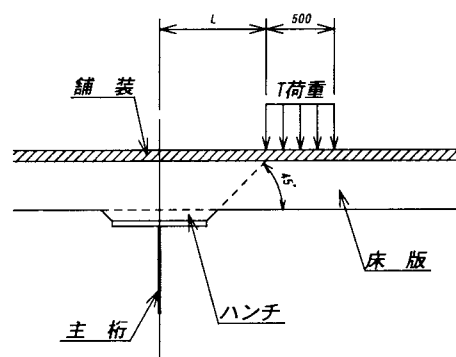


図-9 横せん断応力の計算モデル

床版厚さを低減すれば曲げ応力の他にもせん断応力も増加し、主桁近傍では放物線分布とは異なる分布形状が予想される。図-9 は版厚方向の横せん断応力を計算したモ

デルであり、ハンチ端から 45° で上縁に接する位置に載荷するものとした。プレストレスの効果は考慮していない。図-10(a)~(c)に計算結果による橋軸直角方向の横せん断応力の床版厚さ方向の分布を示す。図-10(a)の中間床版の支間を $L=4.0\text{m}$ とした際には、道示式による版厚 240mm のときの $\tau_{yz}=0.71\text{N/mm}^2$ がフルプレストレス状態の版厚 190mm では $\tau_{yz}=0.91\text{N/mm}^2$ となり、版厚を低減することで横せん断応力が約 1.3 倍に大きくなっている。同様に支間 $L=5.0\text{m}$ では道示の版厚に対して PRC 構造の版厚による横せん断応力は 1.4 倍程度に達しており、支間 $L=6.0\text{m}$ では 1.35 倍程度にまで増加している。よって、版厚を低減する際には斜めひび割れの発生による耐荷性低下を避けるため、せん断応力にも着目して安全性を確認する必要があると考える。

6. おわりに

本研究では、厳密な応力状態の把握を目的に 3 次元弾性論の厚板理論を拡張した混合法による主桁近傍に着目して計算を行った。以下に計算の結果から得られた知見を示す。

- (1) 主桁近傍の曲げ応力が最大となる載荷ケースはいずれの支間長でも地覆端載荷からのパターンであり、最大値を示す位置は各支間で異なったが、主桁中心から $\pm 100\text{mm}$ の範囲にあった。曲げモーメントの計算結果によれば、その値は線形で増加しており、張出床版支間長が $L=0.3\text{m}$ 程度では道示式が 2 倍以上大きく安全側で、逆に $L=1.5\text{m}$ では道示式が 23% 程度小さな値で危険側となることが判った。
- (2) RC 構造で曲げ応力度と曲げ強度の大小関係で初期ひび割れの有無を評価した最小版厚を設定する際にはコンクリート強度を大きくすることが版厚低減に対して効果的であることが判った。
- (3) フルプレストレスとした場合には、道示床版に対して全ての床版支間で 50mm 程度は低減できる。ただし、ハンチの応力分散効果を評価すれば、さらに低減できる可能性がある。
- (4) British code の CP110 による許容ひび割れ幅を 0.1mm とした PRC 構造の計算結果では、フルプレストレス状態よりもさらに床版厚さが低減できることが示された。
- (5) 横せん断応力の計算結果では、版厚を低減することでせん断応力の値が 1.3~1.4 倍程度となり、本研究のように版厚の低減を検討する際にはせん断応力にも着目し、かつ斜めひび割れを誘発する斜引張主応力についても安全性を確認する必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ，鋼橋編，2002

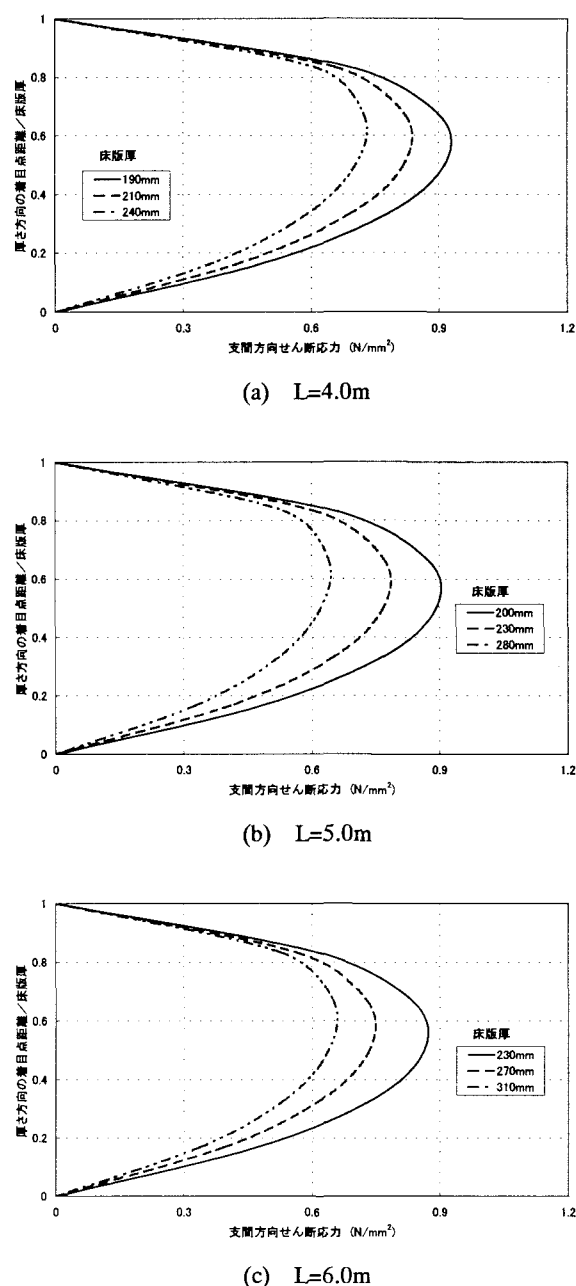


図-10 横せん断応力の分布

- 2) 横山広，堀川都志雄：道路橋床版の最小厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol48A，pp.1169-1176，2002.3.
- 3) 横山広，堀川都志雄：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，コンクリート工学年次論文報告集，2004.7.
- 4) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物，1997
- 5) 横山広，堀川都志雄：道路橋合成床版の床版厚さに関する研究，構造工学論文集，Vol49A，pp.1107-1113，2003.3
- 6) (社)土木学会鋼構造物委員会鋼橋床版の調査研究小委員会：道路橋床版の新技术と性能照査型設計，2000.10.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，1996.
- 8) BSI：The Structural Use of Concrete，CP110-1972，1972

(2004 年 9 月 17 日受付)