

道路橋床版の最小厚さに関する研究

Minimum thickness of RC and PC deck slabs in Highway Bridge

横山広※、堀川都志雄※※

Hiroshi YOKOYAMA, Toshio HORIKAWA

※ショーボンド建設株式会社, 北陸支店技術課(〒920-0362 金沢市古府 1-140)

※※工博, 大阪工業大学教授, 工学部土木工学科(〒535-0002 大阪市旭区大宮 5-16-1)

We studied the minimum slab thickness such that the calculated flexural stress at the mid-span and cantilever support sections of a highway bridge deck slab does not exceed the flexural tensile strength of the concrete, and therefore does not cause initial cracking. The flexural stress was calculated according to the thick plate theory, which allows the stress to be accurately calculated. As a result, when the relationship between flexural stress and flexural bending strength indicated that an initial crack triggering damage to the deck slab had occurred, the application of thick plate theory, which allows local stress to be accurately calculated, was found to be effective. When an extra coefficient for large vehicle traffic is taken into consideration, the calculation for deck slab thickness according to the Specifications for Highway Bridge was found to be on the safe side, for both mid-span and cantilever support sections. Furthermore, the study showed that the thickness of prestressed deck slab is governed by the specified standard design strength. However, the thickness of partially prestressed deck slabs, when the prestressing just balances the excess tensile strength, could be reduced more than that of fully prestressed slabs.

Keywords: thick plate theory, highway bridge deck slab, slab thickness, flexural stress, flexural tensile strength

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版と略す)の損傷過程が、初期ひび割れの発生から輪荷重の走行繰返し作用を受けて損傷が拡大し、最終段階では陥没崩壊に至るという進行性の疲労現象であることが、多くの研究機関の精力的な研究により明らかにされてきた。初期ひび割れの原因としては、自動車荷重の増大や材料強度の不足、施工不良、床版厚さの不足や鉄筋量の不足、鋼桁の拘束によるコンクリートの乾燥収縮等が挙げられ、それらが複合的に組合されて初期ひび割れの発生をもたらす場合もある。また、床版の耐久性に関しては、初期ひび割れの影響が大きく、それを防止することが性能照査型設計の観点からも重要と考えられる。これらの研究に貢献したのが輪荷重試験機であり、RC床版が崩壊に至るまでの挙動、例えばたわみ、鉄筋ひずみ、ひび割れの開閉量と段差量等の調査やひび割れ網の観察結果から、今日ではRC床版の疲労寿命の推定がほぼ可能になりつつある¹⁾。

本研究では、道路橋床版の支間部、張出床版支点上に

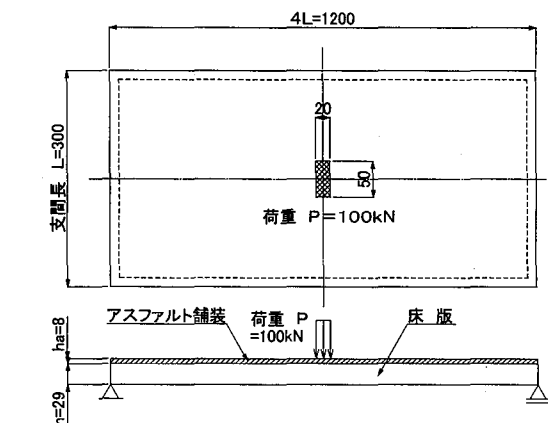
おける初期ひび割れの発生が、自重や輪荷重による床版上下縁の曲げ引張応力 σ_{bt} とコンクリートの曲げ引張強度 f_{bk} との大小関係により決定されるという力学的特性に着目する。具体的には、厳密な応力が解析できる厚板理論^{2, 3)}を用いて局所応力を算出し、普通強度、高強度コンクリートにおける曲げ引張強度とを比較する。なお、コンクリートのひび割れは、純引張強度を超えた時点で発生することも予想されるが、床版は曲げモーメントが支配的であるとの観点から、本研究では曲げ引張強度に着目する。

ここでいう厚板理論は 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 (プーシネスクの関数)に基づく厳密な理論で、直接応力や変位が算出できる。変位関数 f_3 と ϕ_3 の基礎微分方程式は次のように示される。

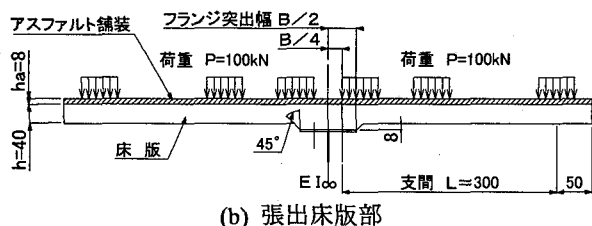
$$\Delta \Delta f_3 = 0 \quad , \quad \Delta \phi_3 = 0 \quad (1)$$

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

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



(a) 支間中央部



(b) 張出床版部

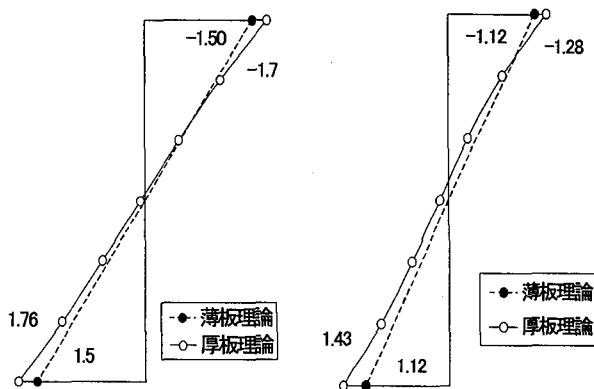
図-1 計算モデル (単位: cm)

ただし、張出床版支点上においては厚板理論のみでは計算上の制約を受けるため、厚板理論を拡張した混合法⁴⁾を用いている。すなわち、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ための同次解に薄板理論を用いる。

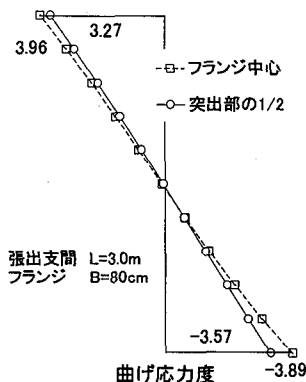
①初めに、厚板理論の特性を把握するために、アスファルト舗装の剛性を考慮した2層版における理論計算結果と現行の道路橋示方書^{5, 6)} (以下、道示と略す) に採用されている薄板理論による計算値とを比較し、局所曲げ応力に差があることを示す。また、張出床版の支点上にも着目し、道示によるフランジ突出幅 (フランジ幅: B) の 1/2 点とフランジ中心における発生応力についても考察する。

②次に、単純版や相対2辺が固定条件を持つ連続版を対象として、道示による最小床版厚さと支間長をもとに床版厚さに伴う曲げ応力を厚板理論によって算定し、引張強度との関係を明らかにする。③少数主桁橋梁の床版に採用されるPC床版を例に、橋軸直角方向の応力状態を道示で規定されている、引張応力の発生を許容しないフルプレストレスとする場合の支間長と床版厚の関係を示す。④さらに、支間長をパラメータとした最小版厚を算出し、道示に規定されている床版厚の値とを比較検討する。

⑤支間部から決定される版厚に比べて張出床版部の版



(a) 支間中央部の応力分布



(b) 張出床版支点上の応力分布
図-2 厚板計算による応力分布

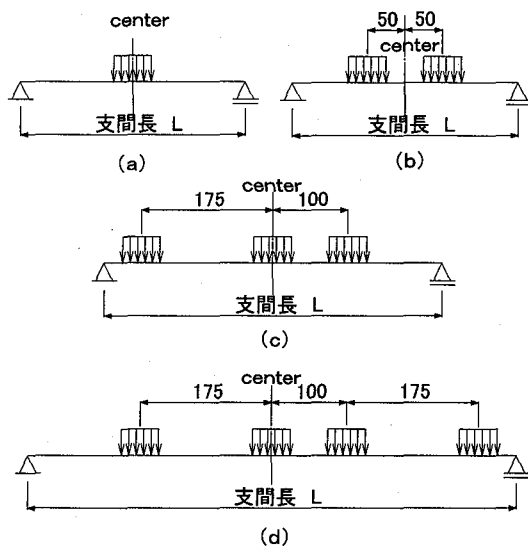
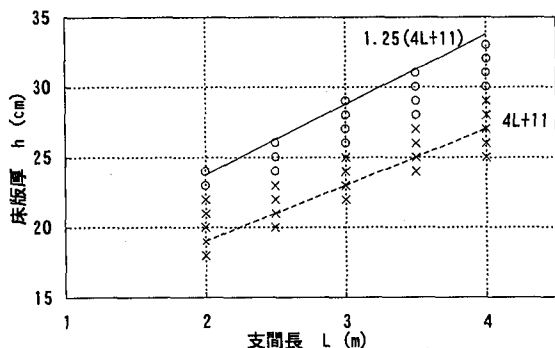
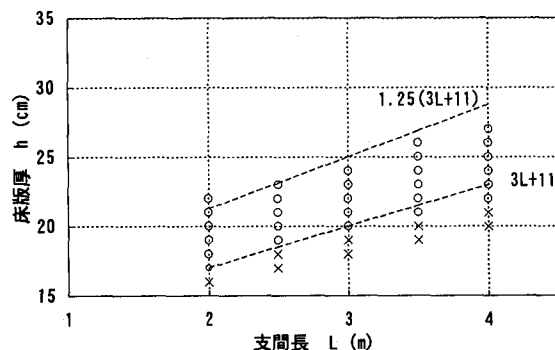


図-3 支間中央部の载荷状態 (単位: cm)

厚は過大に設定される傾向にあり、設計上の対策としてハンチ高さを大きくする、あるいはハンチの勾配を緩くすること、および張出部への輪荷重による負担を軽減するように桁配置を工夫する等の方法が採用されてきた。

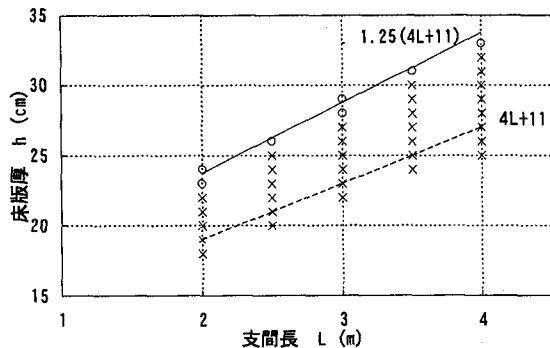


(a) 単純版

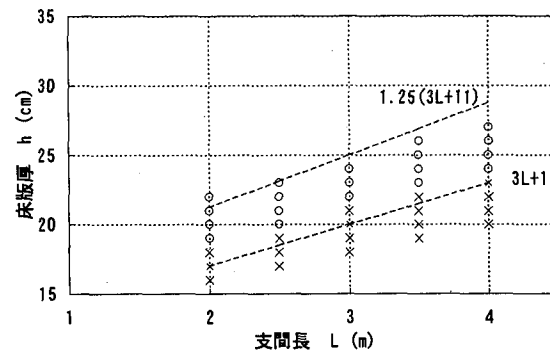


(b) 連続版

図-4 支間長と床版厚の関係 ($f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$)



(a) 単純版



(b) 連続版

図-5 支間長と床版厚の関係 ($f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$)

しかし、少数主桁橋梁では、張出部をより効果的に利用するために、支間長を大きくすることが要求されている。支間長を大きくする場合にはプレストレスの導入が効果的であると言われており、プレストレスを導入する場合の床版の版厚についても言及する。

2. RC床版の最小版厚と支間長の関係

2.1 床版の厚さ方向の応力分布

一般に、道路橋RC床版にはアスファルト舗装が敷設されているため、図-1(a)に示す橋軸直角方向の支間 L に対して橋軸方向の辺長を4倍とする1方向版モデルを用いてアスファルト舗装、RC床版の自重および輪荷重作用下での床版中央直下における橋軸直角方向、および橋軸方向の床版厚さ方向の曲げ応力度を算出する。図-2(a)は厚板理論による2層版の結果と道示に採用されている薄板理論による値を比較している。薄板理論での値は輪荷重を床版中央面まで 45° 分散させているが、厚板理論ではアスファルト舗装 ($h_a=8\text{cm}$) の弾性係数を夏期時の 0.5kN/mm^2 と想定し計算している。橋軸方向、橋軸直角方向の計算結果によれば、厚板理論による応力分布が非線形な形状を呈しており、上下縁における応力値も薄板理論による結果より約17~28%程度大きくなっている。

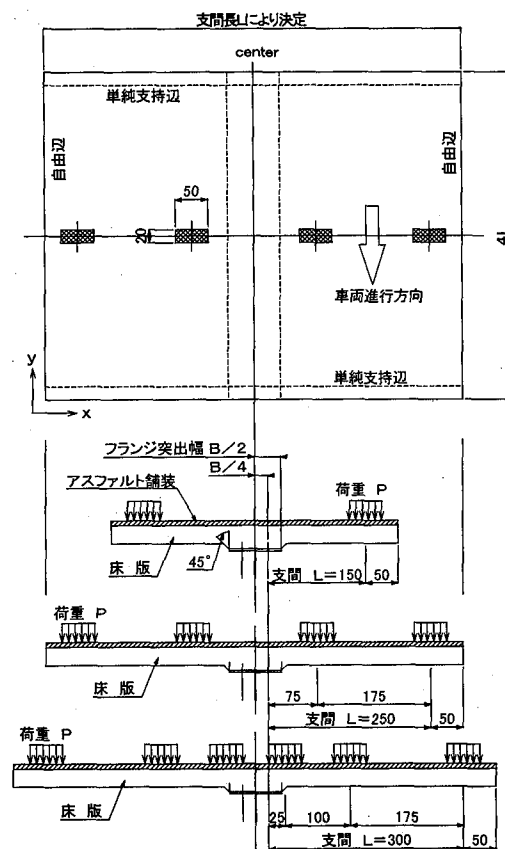


図-6 張出床版支点上の载荷状態 (単位: cm)

床版に発生する曲げ引張応力と曲げ引張強度との関係に着目する際には、厳密な値が得られる厚板理論の方が有効であると推察される。

図-2 (b)は厚板理論を用いた混合法を張出床版支点上に適用した場合の応力分布である。道示ではフランジ突出幅の $1/2 (=B/4)$ の位置に着目しているため、その位置とフランジ中心での結果を示している。計算モデルは、張出床版支間 $L=3.0\text{m}$ 、主桁上フランジ幅 B が 80cm であり、ハンチ部（厚さ： 8cm ）は厚さ方向に 45° 分布した幅で支持している。ハンチ下端の圧縮応力（主桁上フランジに接する位置）は等厚の床版として得られた値をハンチ厚さまで外挿するものとした。また、主桁の曲げ剛性は無限大としている。計算結果によれば、主桁中心上の応力は引張縁で突出幅の $1/2$ 点での応力と比べ、約 20% 程度大きい値となった。圧縮縁では引張縁よりも小さく 9% 程度であった。

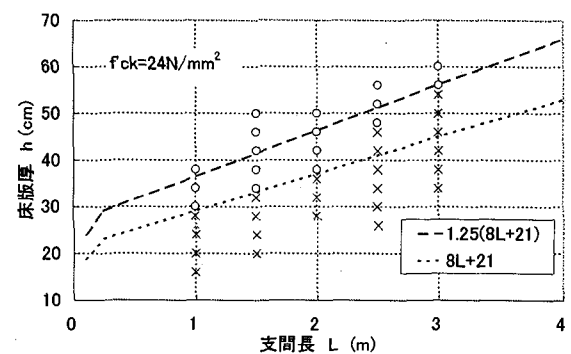
2.2 支間中央部

支間中央部の計算では、支間長に応じて最も不利な応力状態となるように道示による輪荷重の組み合わせから図-3 (a)～(d)の荷重載荷状態を考え、輪荷重値（ $P=100\text{kN}$ ）としては衝撃係数を考慮して $P(1+i)$ を採用する。使用するコンクリートの設計基準強度 f_{ck} を 30N/mm^2 とすれば、曲げ引張強度 f_{bk} は 4.1N/mm^2 、弾性係数は 25.2kN/mm^2 になる⁶⁾。アスファルト舗装は応力分布での計算と同様に、輪荷重の分散をもたらす効果を考慮して、舗装の弾性係数を 0.5kN/mm^2 とした。

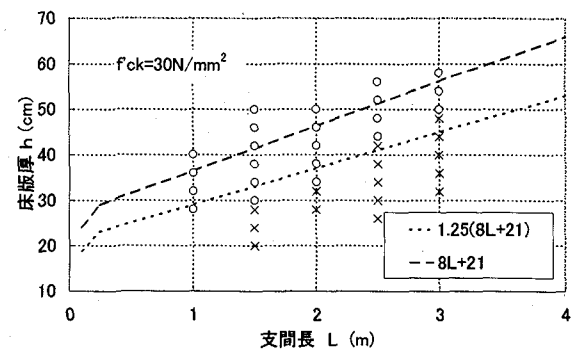
単純版と連続版を対象として支間長と床版厚さに着目した場合、曲げ引張応力 σ_{bt} と曲げ引張強度 f_{bk} との関係を図-4に示す。図中では曲げ引張応力 σ_{bt} が引張強度 f_{bk} を上回る場合には初期ひび割れ発生の危険があるとして×印を、引張強度の方が上回る場合には○印で表現している。図中には道示の床版厚さの算定式である単純版の $4L+11$ と連続版の $3L+11$ によるそれぞれの値と、大型交通量による割増し係数 k_1 を考慮した値も同時に示している。図-4 (a) によれば単純版において大型車交通量を考慮すれば、現行の道示による最小版厚は曲げ引張応力に対して安全側であること、および図-4 (b) からは係数 k_1 を考慮しなくても安全側であることが判る。図-5はコンクリートの設計基準強度 $f_{ck}=24\text{N/mm}^2$ の場合の結果を示しており、曲げ引張応力 σ_{bt} が引張強度 f_{bk} を上回る×印の領域が拡大している。特に単純版では×印箇所が係数 k_1 を考慮した領域に接近しているのが判る。

2.3 張出床版支点上

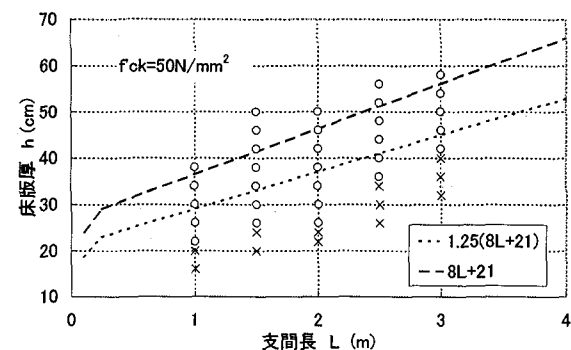
張出床版支点上での応力算定では図-6に示す載荷状態を採用する。すなわち、支間中央の計算と同様に支間長に応じて最も不利な応力状態となるように載荷するも



(a) 設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$



(b) 設計基準強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$



(c) 設計基準強度 $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$

図-7 張出床版支点上の支間長と床版厚さ

ので、主桁中心に対して左右対称の1方向版モデルとしている。なお、床版端部に設置される高欄や地覆の曲げ剛性は無視している。図-7 (a)～(c)は支間長と床版厚さの関係を示したもので、図-7 (a) はコンクリートの設計基準強度が $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ 、主桁上フランジ幅 B が 40cm のRC床版を想定した計算結果を示している。図には道路橋示方書による床版厚さの算定式による結果も示している。張出し長さ 2.0m の支間以上になると、道示の大型車交通量による割増しを考慮しない床版厚さでは危険側にあり、 3m 支間であれば割増し係数を考慮すべきであることが判る。図-7 (b) の $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の場合、支間長 $L=2.0\text{m}$ までは割増し係数を考慮しない場合でも安全側といえるが 2.5m 以上では危険側である。さらに、図-7 (c) の $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$ では、床版支間長 $L=3.0\text{m}$ まで割増

し係数を無視しても、十分に安全側であることが推測できる。

ここで、床版支間 $L=3.0\text{m}$ に固定して道示の係数 k_1 を考慮した床版厚さと $\times$ 印の最大値との比(道示／理論値)をとれば、 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$ で 1.0 倍となり、 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$ では 1.1 倍、 $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$ が 1.4 倍と道示の床版厚さの方が大きい値となっている。

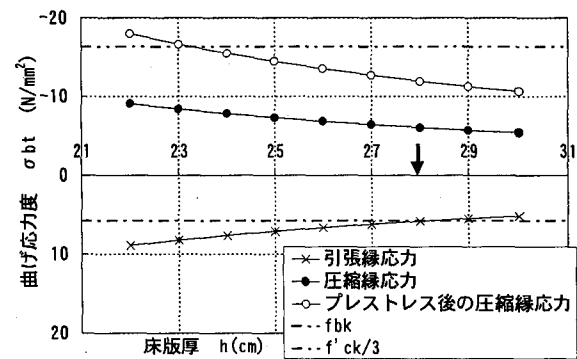
3. プレストレスを導入する床版

近年、注目されている長支間床版には疲労耐久性に優れている PC 床版や合成床版が有効であると指摘されている。しかし、床版厚さと支間長との関係は明らかにされておらず、設計では道示に準拠しているのが現状である。つまり、実際には必要以上の床版厚さが設定されている可能性がある。道路橋の設計法が性能照査型設計法に移行するなかで、床版厚さを最小にすること、すなわち床版厚を最適な設定にすることは重要な課題である。床版の最適厚さが合理的で、かつ軽減化されることになれば、主桁や下部構造等の橋梁全体にも好影響と経済性の向上をもたらすことになる。

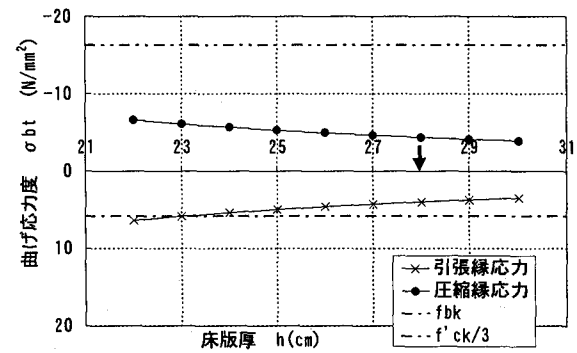
3.1 支間中央部 $L=5\text{m}$ における試算

図-8 (a)は支間 5m の単純版における床版厚さと橋軸直角方向の上下縁応力の計算結果である。計算の条件は設計基準強度 $f'_{ck}=50\text{ N/mm}^2$ 、曲げ引張強度 $f_{cd}=5.7\text{ N/mm}^2$ である。図に示すとおり、床版厚さが薄くなれば床版下縁での引張応力は大きくなり、その引張応力を打消し合う圧縮力(≒有効プレストレス)を導入すれば、床版はフルプレストレス状態に至る。さらに、コンクリートの許容圧縮応力度を設計基準強度 f'_{ck} の $1/3$ とすれば、フルプレストレス状態下での圧縮側コンクリートの圧壊を引き起こす応力状態を防止することにより、床版の最小版厚の決定が可能になる。この状態での最小値は 23cm 程度と得られるが、引張応力を許容するパーシャルプレストレスの設計とすれば、床版厚さを低減することができる。ここで道示のプレストレスを導入する床版厚さの計算式 $(4L+11) \times 0.9$ による床版厚さは 27.9cm となり、図中の矢印で示している。図-8 (b)は橋軸方向応力の床版厚による変化を示したものである。2次元の平面応力解析によれば、橋軸直角方向の有効プレストレスのみによる橋軸方向に発生する応力は小さいので、橋軸方向の応力はほぼ外荷重のみに支配される。引張応力が引張強度を超える版厚は 24cm 以上であれば安全側である。したがって、床版下縁の橋軸直角方向および橋軸方向の両応力が曲げ引張強度 f_{bk} よりも小さくなるには最小版厚が 24cm と決定される。

次に、連続版の計算例を以下に示す。図-9 は支間長 5m における床版厚と床版上下縁に生じる橋軸直角方向



(a) 橋軸直角方向



(b) 橋軸方向

図-8 単純版の床版厚さと上下縁応力 ($L=5\text{m}$)

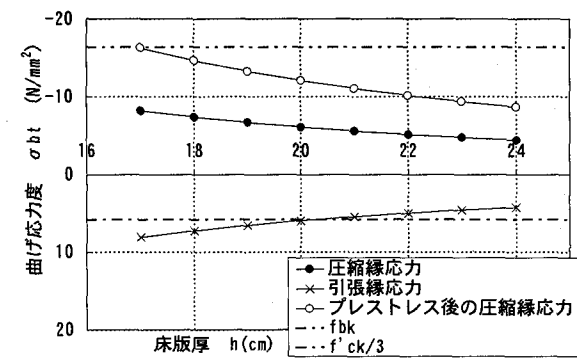


図-9 連続版における床版厚さと橋軸直角方向の上下縁応力($L=5\text{m}$)

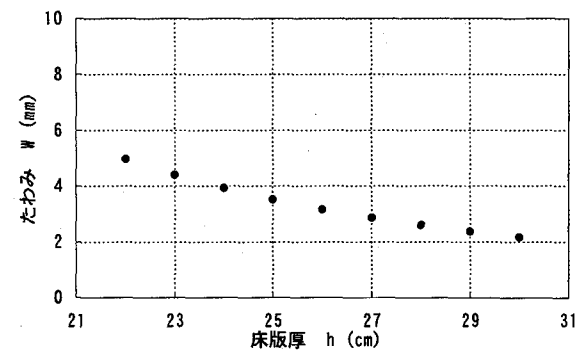


図-10 床版下面のたわみ ($L=5\text{m}$)

の曲げ応力の変化を示している。単純版と同様に床版厚が薄くなる程、引張応力は大きくなっている。床版をフルプレストレス状態にする時の上縁の圧縮応力(○印)は床版厚 17cm で約 16N/mm² に、床版厚 22cm で 10N/mm² と得られる。さらに許容圧縮強度を $f'_{ck}/3$ に設定すれば、フルプレストレス状態に至るためには床版厚は 17cm 以上が必要になる。

図-10 は単純版における床版厚さと最大たわみの関係を示したもので、最小版厚である 22cm を採用した場合のたわみは支間長の 1/1000 程度である。

3.2 支間中央部 L=8m における試算

支間長が 8m での橋軸直角方向の応力の計算結果を図-11 に示す。例えば版厚が 34cm の床版をフルプレストレス状態にする時の最大圧縮応力は 16.4N/mm² となり、ほぼ設計基準強度 f'_{ck} の 1/3 の値と同じになる。また 40cm の版厚では有効プレストレスが 6.2N/mm² 以上でフルプレストレス状態となる。この値以下ではパーシャルプレストレスでの設計が必要になり、床版下縁に発生すると予想されるひび割れに対する方策、例えばひび割れ幅の制御等を考慮することが肝要になる。ここで道示のプレストレスを導入する床版厚さの計算式 $(4L+11) \times 0.9$ による床版厚さは 38.7cm となる。

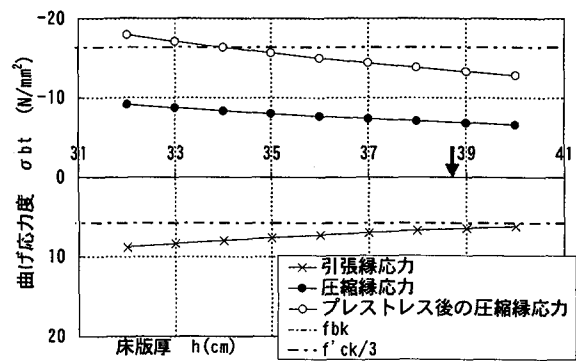
次に連続版の場合における橋軸直角方向の応力の計算結果を図-12 に示す。例えば厚さが 22cm の床版をフルプレストレス状態にする時の最大圧縮応力は 16.5N/mm² となり、 $f'_{ck}/3$ の値を少し超える。また 26cm の版厚では有効プレストレスが 6.5N/mm² 以上でフルプレストレス状態になる。

図-13 は単純版における床版厚さとたわみの関係を示したもので、最小版厚である 32cm を採用した場合のたわみは支間長の 1/850 程度である。

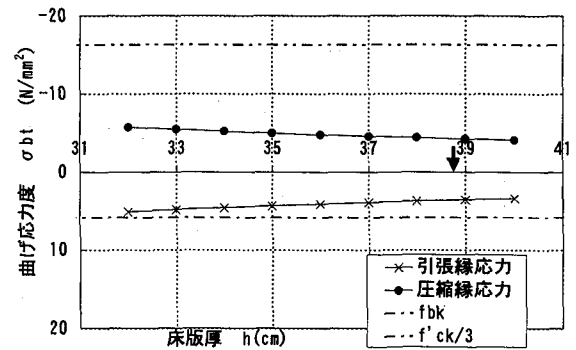
3.3 張出床版支点上による試算

張出部の支間長が大きくなればプレストレスの導入が効果的となる。図-14 (a)~(c) は張出床版の支間長を $L=1.5, 2.5, 3.0m$ と変化させた場合の床版厚さと上下縁応力の関係を示したものである。図-14(a)によれば、RC 床版として設定した支間長 $L=1.5m$, $f'_{ck}=24N/mm^2$ では、曲げ引張応力を曲げ引張強度に一致させるためには床版厚さが 32cm 以上必要となる。図-14(b)と(c)より、支間 $L=2.5m$, $f'_{ck}=30N/mm^2$ では RC 床版としての必要厚さが 44cm で、支間 $L=3.0m$, $f'_{ck}=50N/mm^2$ では 40cm 程度となる。

次にプレストレスを導入する場合の床版厚さを求める。有効プレストレス導入量としては引張応力を許容しないフルプレストレス状態を考える。コンクリートの許容圧縮強度を $f'_{ck}/3$ とすれば、支間 $L=2.5m$ では床版厚さ



(a) 橋軸直角方向



(b) 橋軸方向

図-11 単純版の床版厚さと上下縁応力 (L=8m)

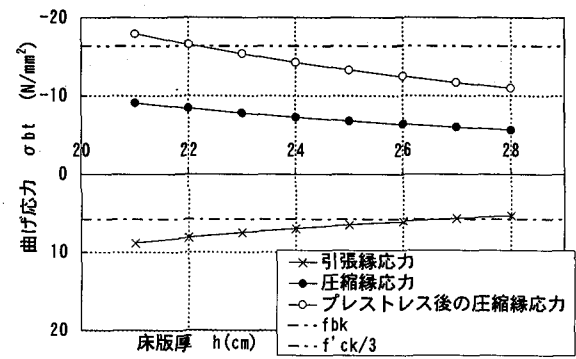


図-12 連続版における床版厚さと橋軸直角方向の上下縁応力(L=8m)

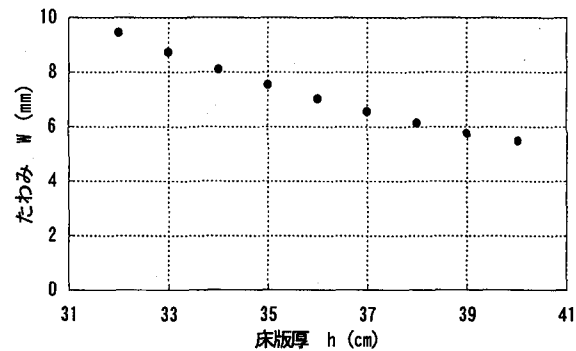
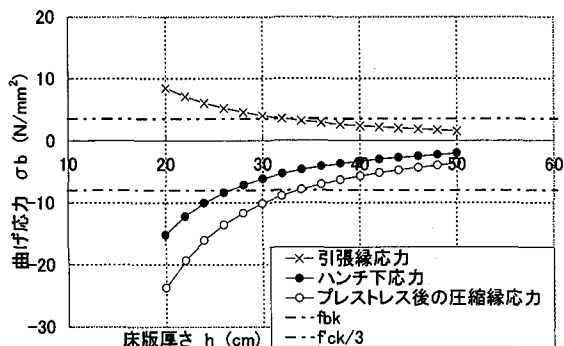
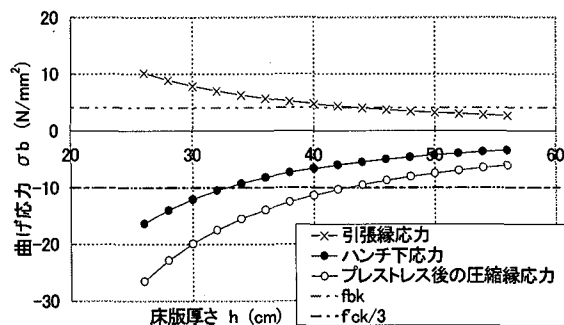


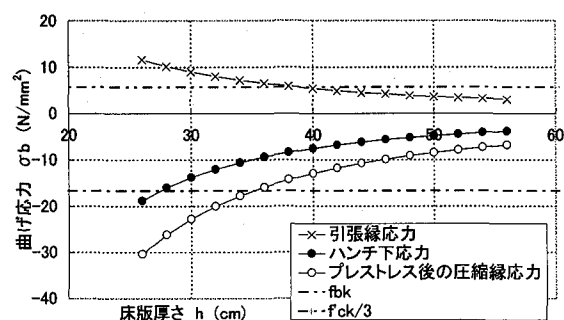
図-13 床版下面のたわみ (L=8m)



(a) 設計基準強度 $f'_{ck}=24\text{N/mm}^2$



(b) 設計基準強度 $f'_{ck}=30\text{N/mm}^2$



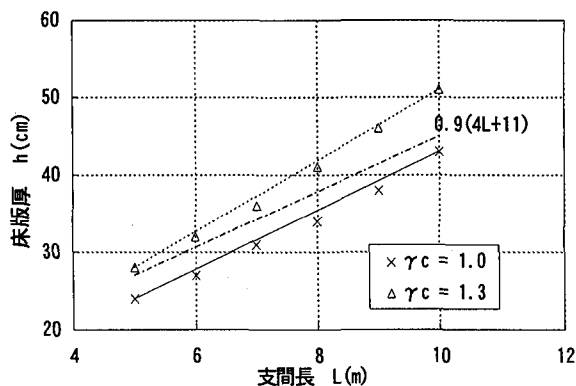
(c) 設計基準強度 $f'_{ck}=50\text{N/mm}^2$

図-14 張出床版の床版厚さと橋軸直角方向の上下縁応力

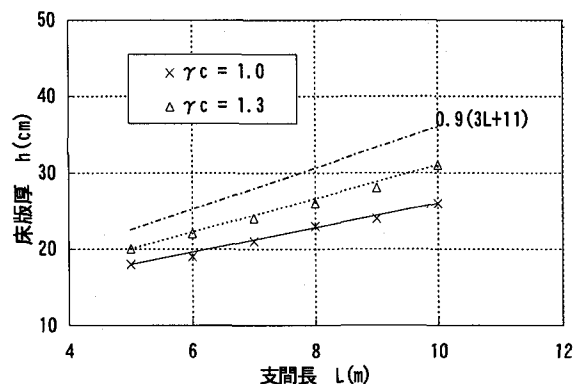
$h=43\text{cm}$ (RC床版厚の98%)程度と低減効果が少ないものの、支間 $L=3.0\text{m}$ では、 $h=35\text{cm}$ (RC床版の88%)まで床版厚さを低減できる。床版厚さを低減するためには、コンクリート強度を大きくする必要のあることが計算上から裏付けられる。また、有効プレストレスと曲げ圧縮応力の合算した値が圧縮側の上限値を超過しないように、引張強度の超過量分に見合ったプレストレスを導入するならば、床版はパーシャルプレストレス状態に至り、さらに床版厚さを低減することが可能であると推量される。

4. 支間長に伴うPC床版支間中央部における最小版厚

アスファルト舗装やコンクリート床版の自重および複



(a) 単純版



(b) 連続版

図-15 PC床版の最小版厚

数台の輪荷重下において、a)支間中央部および張出床版支点上の橋軸直角方向の曲げ引張応力を許容しないフルプレストレス状態で、b)上縁応力が設計基準強度 f'_{ck} の1/3を超えず、かつc)橋軸方向の応力が曲げ引張強度 f_{bk} 以下となる床版厚を本論文での最小版厚と定義する。現行の道示に規定されている最小版厚 $0.9(4L+11)$ と、コンクリートの設計基準強度を 50N/mm^2 とした場合の本手法による計算値を図-15 (a), (b)に示す。(a)は単純版での比較で、(b)は連続版での結果を表している。図中の材料係数 $\gamma_c=1.0$ は使用限界状態で、 $\gamma_c=1.3$ は疲労限界状態として考慮されるパラメータ⁷⁾である。連続版の場合、使用限界状態および疲労限界状態のいずれも、現行道示による規定の方が最小版厚は大きくなっているが、単純版では疲労限界状態の値よりも小さくなっている。この理由は疲労という問題を考慮せずに床版の最小厚さが決定されたためであると考えられる。よって、床版の耐久性向上の観点から、道示の規定を見直す必要があると推察される。

張出床版支点上での計算結果より、張出床版支間 $L=3.0\text{m}$ で主桁フランジ幅 $B=80\text{cm}$ 、ハンチ高さを 8cm の条件におけるプレストレスを導入する床版では、 35cm 程度の厚さとなり、同じ版厚を持つ単純版の使用限界状態では支間 $L=8.0\text{m}$ が対応することになる。そこで、2主桁

を有する少数主桁橋梁を想定すれば、有効幅員が 14m 程度に設定できる。ただし、材料係数を疲労限界状態として考慮すれば有効幅員は狭くなる。

5. まとめ

本研究では、着目点の厳密な応力算定が可能な厚板理論を用いることにより、道路橋床版の支間中央部と張出床版支点上における曲げ応力度を算出し、その数値がコンクリートの曲げ引張強度を上回らない、すなわち、初期ひび割れを生じさせない最小版厚を検討した。また、近年注目されている小数主桁橋梁のプレストレスを導入する床版に着目し、床版厚さに対するプレストレスの効果もあわせて検討した。以下に結果をまとめる。

- (1) 床版損傷の引き金となる初期ひび割れの発生の原因として、曲げ応力と曲げ引張強度との大小関係に着目する場合には、厳密な局所応力が算出できる厚板理論が有効である。
- (2) 現行の道路橋示方書における床版厚さの算出式に、さらに、大型車交通量の割増係数を考慮する場合、支間中央部、および張出床版支点上の何れも安全側の版厚となる。
- (3) プレストレスを導入する床版の厚さは、設計基準強度に支配されるが、曲げ引張応力の曲げ引張強度に対する超過量分に相当するプレストレスを導入する場合床版はパーシャルプレストレス状態となり、フルプレストレス状態に比べて床版厚が低減できる。
- (4) プレストレスを導入する床版の最小版厚は、疲労限界状態を考慮する場合には、単純版では現行の道路橋示方書の床版厚さの算定式による値は本手法の値よりも小さくなるが、連続版では安全側の値となる。これは、疲労の観点から最小厚さが規定されていないためであり見直しが必要である。

今後は、厚板理論を拡張した混合法の適用範囲の検討を含めて鋼・コンクリートからなる合成床版やハーフプレキャスト合成床版を対象として、床版支間長をパラメータとした床版厚さとの関係を追求め、少数主桁橋梁における床版厚さの最適化を検討する予定である。

参考文献

- 1) (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, 2000.10.
- 2) 加藤暢彦, 堀川都志雄, 園田恵一郎:各種工法で補強された損傷床版の輪荷重点近傍の局所応力の解析, 第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集, pp.61-66, 1999.11.
- 3) 堀川都志雄:直交異方性厚板の弾性理論とその応用に関する研究, 大阪市立大学学位請求論文, 1984.5.
- 4) 千川達也, 松尾和政, 堀川都志雄, 藤田琢也:主桁と結合された床版の輪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, pp.55-60, 1999.11.
- 5) (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編, 平成8年.
- 6) (社)日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅲ コンクリート橋編, 平成8年.
- 7) (社)土木学会, コンクリート標準示方書[平成8年制定], 設計編.
- 8) 横山広, 堀川都志雄:道路橋床版の最小版厚について, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.173-178, 2000.10.

(2001年9月14日受付)