

道路橋床版の最小版厚について

On Estimation of Minimum Depth in Road Bridge Deck Slab

横山 広*, 堀川都志雄**

Hiroshi YOKOYAMA and Toshio HORIKAWA

*ショーボンド建設(株)北陸支店技術部 (〒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)

Since examples of damaged slab due to cracks have widely reported, many investigators of road have powerfully inquired into causes to yield initial defect of damage by crack through some tests under wheel running machine. It is often said that a definition of minimum depth of slab is unreliable and a method to determine slab depth is not established as yet. In this paper, a propriety of the minimum depth recommended in actual specifications is discussed from viewpoint of mechanics through several examples about initial crack in ordinary RC slabs, i.e. maximum tensile stress on lower surface calculated by thick plate theory is compared with a material tensile strength of concrete. Extreme stresses of precast PC slabs supported across long length in transverse direction are computed under loading conditions subjected to several live loads and self-weights. In particularly, maximum value of local stress on upper surface under wheel loads is compared with an allowable compressive stress in the case that stress condition of PC slab prestressed in transverse direction reaches to full-prestressed field. Finally, a minimum depth of PC slab under full-prestressed field is proposed and compared with minimum depth corresponding to two boundary conditions by actual specification, respectively.

Key Words: minimum depth of deck slab, thick plate theory, tensile strength, initial crack, full-prestressed condition

1. はじめに

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版という)の初期ひび割れを引き起こす原因として、自動車荷重の増大、材料強度の不足、施工不良、床版厚さや鉄筋量の不足、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る。RC床版のひび割れ損傷はこれらのひび割れを引き金に、輪荷重の走行繰返し作用の影響を受けて、ひび割れが増加・拡大進展する進行性の疲労現象であると既往の研究で指摘されている。今日、自動車の走行状態を再現した輪荷重走行試験の成果によって、RC床版が崩壊に至るまでの劣化過程での挙動、例えば床版のたわみや鉄筋ひずみ、ひび割れ密度等の走行回数に伴う劣化現象の経時変化の割合から、RC床版の疲労寿命の推定が可能な域に到達しつつある。しかし、道路橋床版の耐久性を議論する時、床版に発生する初期ひび割れをいかに防止するかが肝要で、床版の性能照査型設計を行う上でも重要な項目となる。

本研究では、床版の初期ひび割れの発生が、自重や輪荷重等の外荷重による床版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} との大小関係から決定されるとの力学的観点から、厳密な応力や変形状態が解析できる厚板理論を用いて輪荷重作用点直下での局所応力を算出する。

初めに、アスファルト舗装の剛性を考慮した2層版を対象とする厚板理論と、現行道路橋示方書(以下、道示という)の輪荷重の荷重分散を考慮した薄板理論による計算値との比較から、輪荷重作用点直下の局所応力の差異を示す。厚板理論による数値解析の結果をもとに、道路橋示方書に規定されている最小版厚と支間長との関係に言及し、床版厚の差によるひび割れ発生の可能性の有無を明らかにする。

次に、少数主桁橋床版に採用されるPC床版を例に、床版厚の変化に伴う床版の上・下縁での橋軸直角方向および橋軸方向の応力と曲げ引張強度 f_{bk} との関係をもとに、橋軸直角方向の応力状態を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。さらに、支間長に伴う最小版厚を試算し、現行の道示に規定されている床版厚から推定される値と比較する。

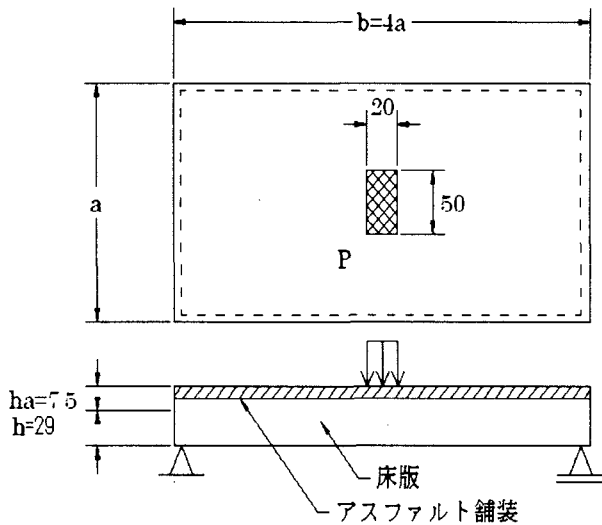
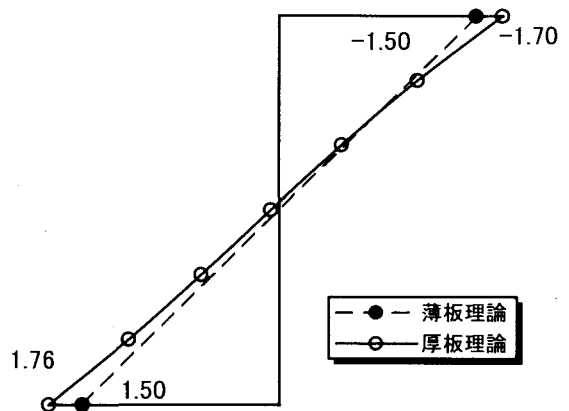


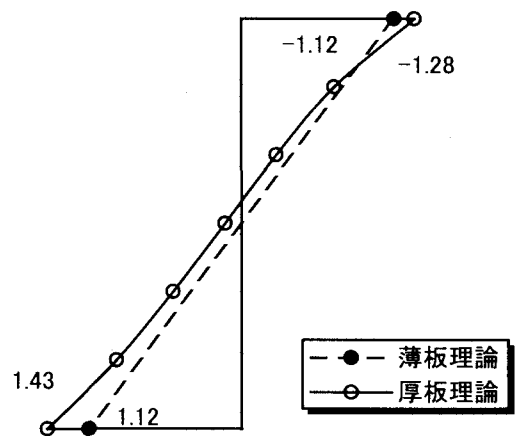
図-1 2層版の形状寸法 (単位: cm)

2. RC 床版の最小厚と支間長

道示による床版厚の算出は単純版で $4L+11$ 、連続版で $3L+11$ と規定され、さらに大型車の交通量を勘案した係数 $K1$ と付加曲げモーメントによる係数 $K2$ を乗じている¹⁾。本稿では前述したとおり力学的見地に立って、初期ひび割れは曲げ引張応力によって引き起こされると想定する。床版の最小版厚は床版の全厚と同じであり、引張応力の算定は全断面有効時の版の計算から求める。一般に、RC床版の上面にはアスファルト舗装が敷設されており、舗装を介して床版に伝達される輪荷重の分散効果は、床版内に発生する応力分布に大きく影響する。つまり曲げ引張応力の厳密な計算は、舗装と床版からなる2層版の解析によらねばならない(図-1)。図-2は床版上面にアスファルト舗装を介して輪荷重が作用する場合の計算結果で、輪荷重作用点直下における橋軸直角方向と橋軸方向の曲げ応力の分布を示している。薄板理論による計算値は道示と同様に輪荷重を床版の中央面まで 45° 分散させた結果である。厚板理論²⁾による版厚方向の応力分布は非線形な形状であり、薄板理論による値に比べて約17~28%程度の応力増加となる。したがって、床版に作用する曲げ引張応力の厳密な算定は厚板理論に依らねばならないことが理解できる。一般に、床版の引張応力は主として輪荷重の大きさ(衝撃係数 i を含む)や載荷位置に支配されることはもちろんであるが、舗装や床版の自重にも影響される。ここでは輪荷重値として $P(1+i)$ を採用し、荷重位置は図-3の状態を想定する。すなわち、床版に作用する外荷重はそれぞれの死荷重と橋軸直角方向の支間内に載荷可能で、一番不利な応力状態を生み出す輪荷重の組み合わせとの和で与えられる。床版のコンクリートの設計基準強度 f'_{ck} と材料



(a) 橋軸直角方向



(b) 橋軸方向

図-2 版厚方向の応力分布

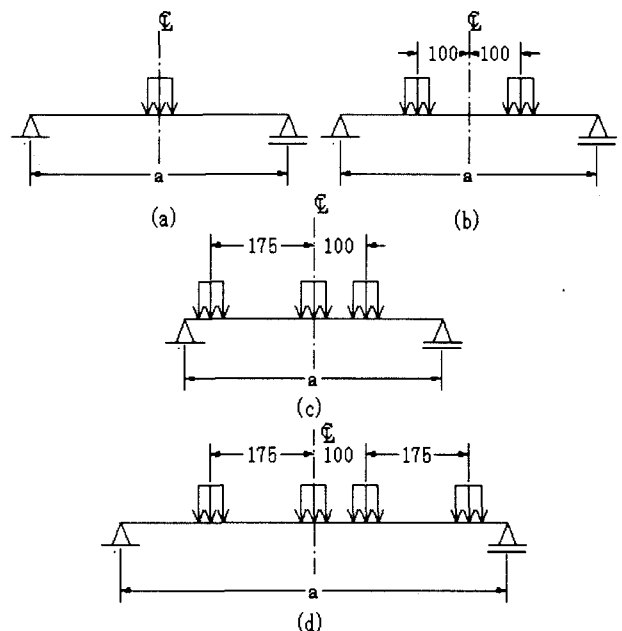
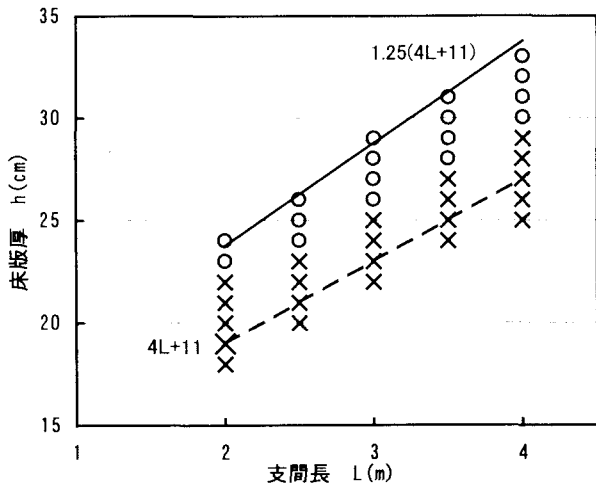
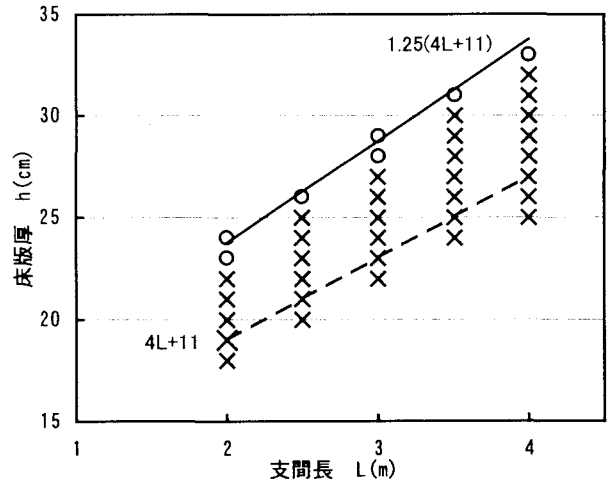


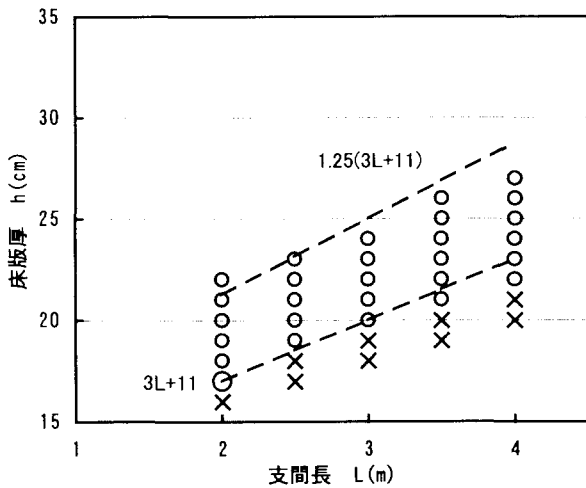
図-3 輪荷重位置



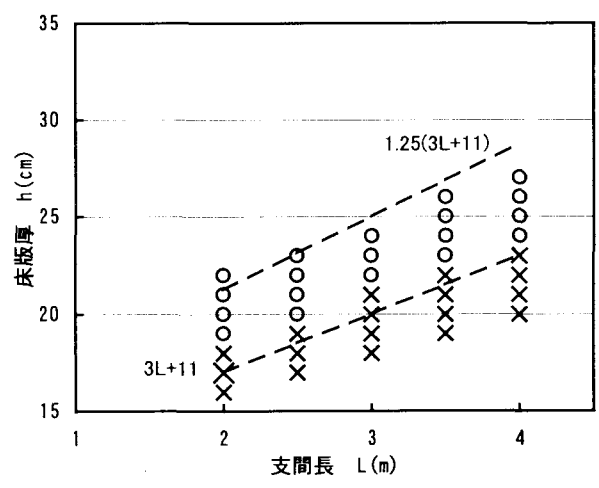
(a) 単純版



(a) 単純版



(b) 連続版



(b) 連続版

図-4 支間長と床版厚 ($f'_{ck}=29\text{N/mm}^2$)

図-5 支間長と床版厚 ($f'_{ck}=23.5\text{N/mm}^2$)

係数 γ_c より、設計圧縮強度 f'_{cd} は f'_{ck}/γ_c と得られる。因みに、材料係数は使用限界状態時で 1.0、疲労限界状態では 1.3 として考慮する³⁾。計算に採用するコンクリートの設計基準強度 f'_{ck} を 29N/mm^2 とすれば、床版の曲げ引張強度 f_{bk} は 4.0N/mm^2 、弾性係数は 25.2kN/mm^2 となる。冬期時でのアスファルト(舗装厚 7.5cm)の弾性係数の方が夏期時に比べて大きく、荷重分散の効果が望めるため安全側の値として 0.5kN/mm^2 を用いる。図-4 は単純版および連続版における支間長と各版厚で発生する床版下縁での曲げ引張応力と曲げ引張強度との関係を表している。外荷重による曲げ引張応力が曲げ引張強度 f_{bk} を上回る場合には×印を、 f_{bk} の値以下であれば○印を付けている。同様に図-4 (b)には連続版での結果を掲げている。さらに、設計基準強度 f'_{ck} が 23.5N/mm^2 の場合には図-5 のように示される。×印の付される領域は図-4 に比べ、拡大していることは容易に推定できる。現行道示の係数 k_1

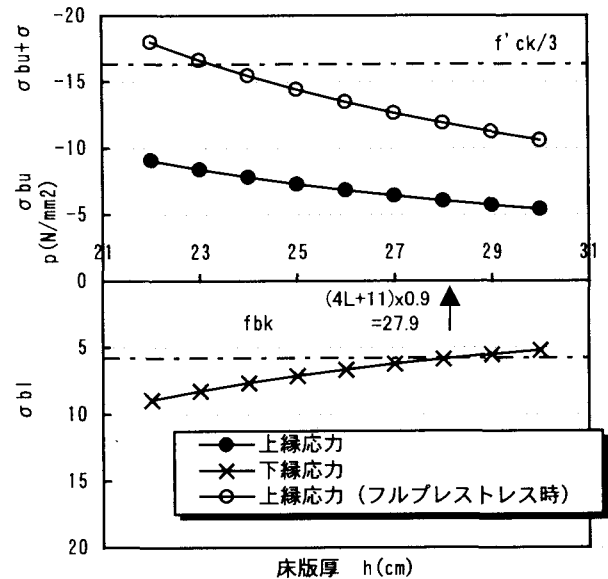


図-6 上・下縁の橋軸直角方向応力 ($L=5\text{m}$)

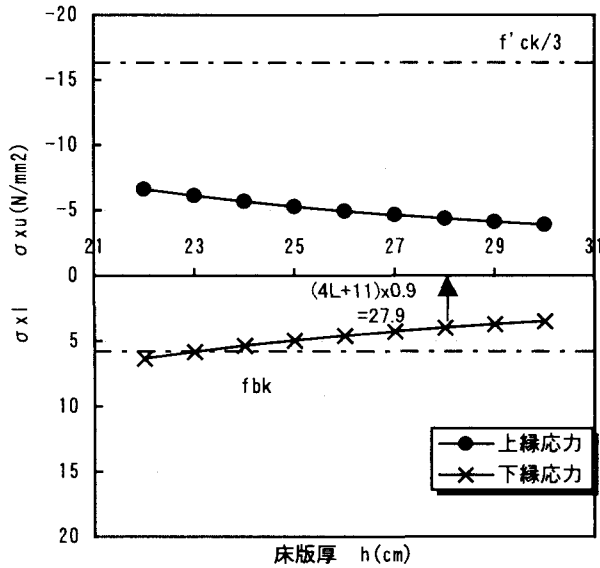


図-7 上・下縁の橋軸方向応力(L=5m)

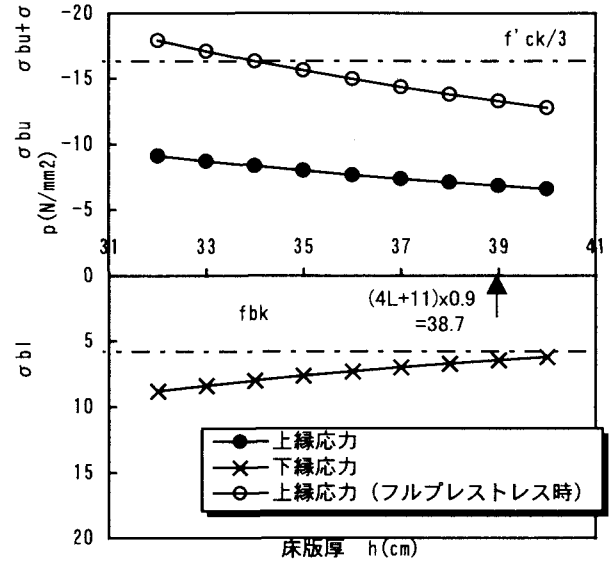


図-8 上・下縁の橋軸直角方向応力(L=8m)

を乗じた $1.25(4L+11)$ の規定は、作用する引張応力よりも安全側に位置していることが判る。

3. PC床版の版厚と有効プレストレスの大きさ

長支間床版には疲労作用に対しても耐久性があると言われているPC床版や鋼・コンクリート合成床版が検討されているが、床版厚と支間長との関係は未だ確立されておらず、道示のコンクリート橋編の規定に準拠している⁴⁾。しかし、この規定を支間長6m以上の場合に適用すれば、最小版厚は必要以上に大きな値になると予想される。今日、鋼構造物設計の基本思想として、仕様照査型から性能照査型の設計に移行しつつあり、床版厚に対しても何らかの見直しが急務であると考えられる。床版厚の減少は床版自重の軽減化をもたらし、主桁や下部工への負担も少なくなり、これらの部材についても性能照査型設計の効果が得られるものと推測される。本節では前節と同様、舗装と床版の自重および輪荷重(衝撃係数を含む)を受けるPC床版(設計基準強度 $f'cd:49\text{N/mm}^2$ 、曲げ引張強度 $fcd:5.6\text{N/mm}^2$)の計算例を示す。図-6は単純版(支間長:5m)における版厚と床版上縁(●印)および下縁(×印)に生じる橋軸直角方向の曲げ応力との関係を示している。床版厚が薄くなる程、引張応力は大きくなっている。下縁に発生する曲げ引張応力と同値の有効プレストレスを橋軸直角方向のみに導入すれば、床版は下縁応力を零とするフルプレストレスの応力状態になる。この時の上縁の圧縮応力(○印)は床版厚23cmで約 16.5N/mm^2 に、床版厚28cmで 12.0N/mm^2 と得られる。さらに許容圧縮強度を $f'cd/3$ に設定すれば、フルプレ

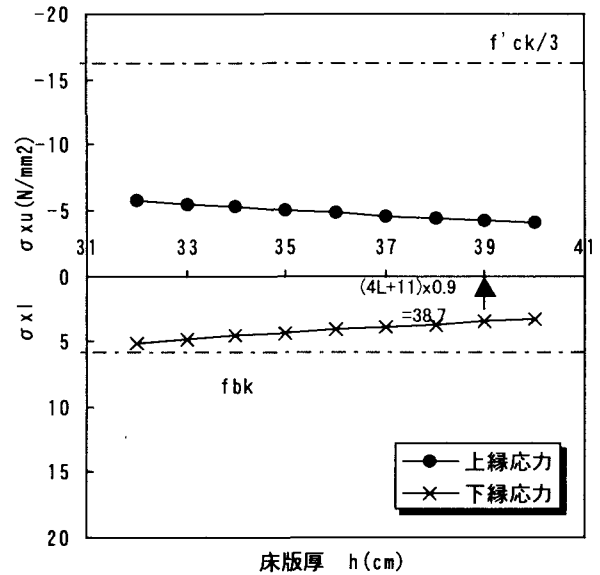


図-9 上・下縁の橋軸方向応力(L=8m)

ストレス状態に至るためには版厚は24cm以上が必要になる。一方、橋軸方向応力の床版厚による変化を図-7に示す。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による橋軸方向に発生する応力は小さく、橋軸方向の応力は外荷重のみに支配される。つまり、床版下縁の橋軸直角方向応力が曲げ引張強度 fbk よりも小さくなるには版厚が24cm以上となる。また支間長が8mでの橋軸直角方向応力の計算結果を図-8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/mm^2 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/mm^2 以上でフルプレストレス状態となり、この値以下では

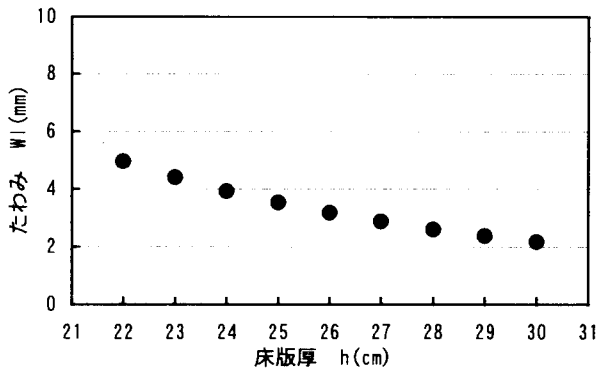


図-10 床版下面のたわみ (L=5m)

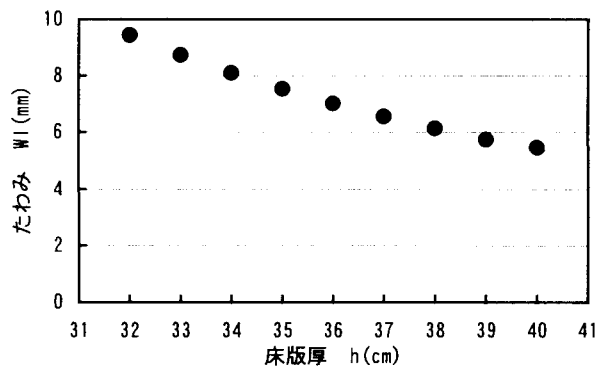


図-11 床版下面のたわみ (L=8m)

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。また橋軸方向の応力は何れの床版厚においても曲げ引張強度 fbk を下回っている(図-9)。さらに、支間長が 5m と 8m における床版の最大たわみの変化をそれぞれ図-10 と図-11 に示す。最小版厚を用いる場合での床版のたわみと支間長の比は $1/1250$ と $1/1000$ に留まる。

次に、連続版の計算例を以下に示す。図-12 は支間長 5m における床版厚と床版上縁および下縁に生じる橋軸直角方向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/mm^2 に、床版厚 22cm で 10N/mm^2 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 18cm 以上が必要になる。支間長が 8m の場合での橋軸直角方向応力の結果を図-13 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/mm^2 となり、設計基準強度 $f'ck$ の $1/3$ の値を少し越える。また 26cm の版厚

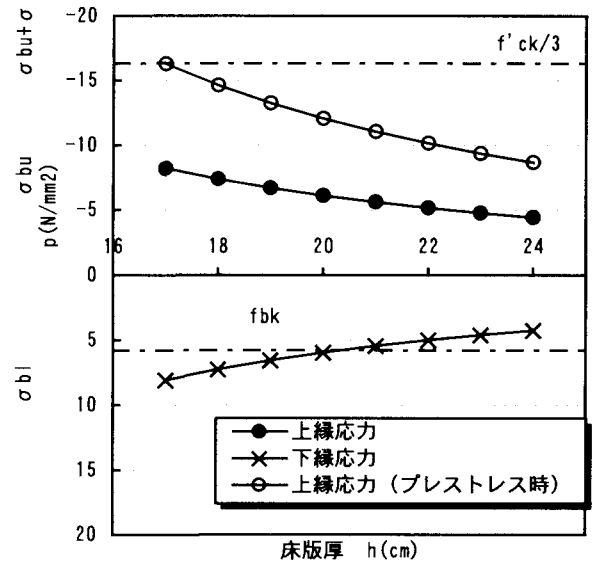


図-12 上・下縁の橋軸直角方向応力 (L=5m)

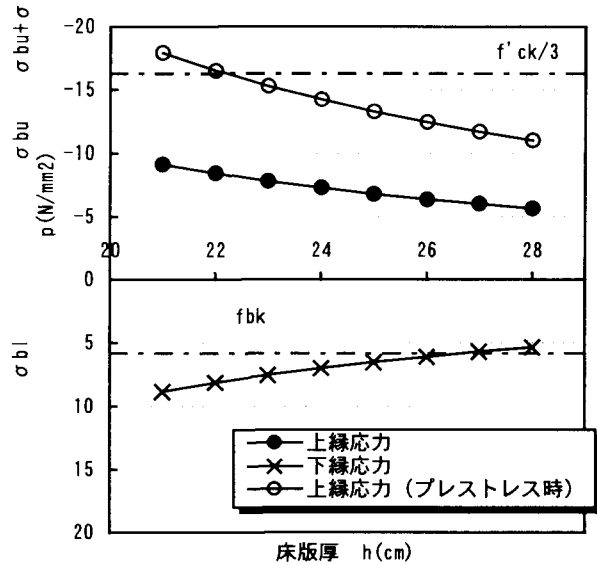


図-13 上・下縁の橋軸直角方向応力 (L=8m)

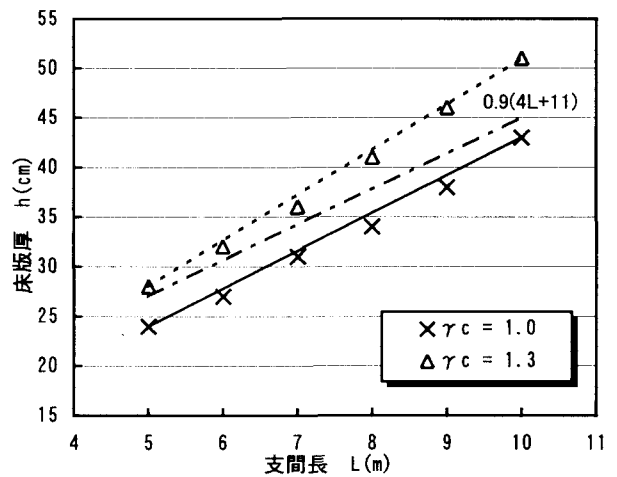


図-14 フルプレストレス時での最小版厚 (単純版)

では有効プレストレスが 6.5N/mm^2 以上でフルプレストレス状態になり、この時の橋軸方向の応力は 5N/mm^2 と算出され曲げ引張強度 f_{bk} よりも小さい。

4. PC 床版の最小版厚の試算

アスファルト舗装やコンクリート床版の自重および複数台の輪荷重下において、橋軸直角方向の床版下縁応力を零とするフルプレストレス状態で、上縁応力が許容圧縮強度 f'_{ck} の $1/3$ を超えず、かつ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 $0.9(4L+11)$ と本手法による計算値とを図-14 と図-15 に示す。図-14 は単純版での比較で、図-15 は連続版での結果を表している。図中、材料係数 $\gamma_c=1$ 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。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) アスファルト舗装による輪荷重の荷重分散を考慮でき、厳密な応力計算が可能な厚板理論を適用することによって、現行道路橋示方書の最小版厚の規定(係数 k_1 を含む)は、床版下縁での曲げ引張応力に起因するひび割れの発生を防止できる算定式であることが示された。
- 2) 長支間用のPC床版を対象として、フルプレストレス状態を保持するための有効プレストレスと版厚との関係を求めた結果、PC床版の性能照査型設計を行う際には、輪荷重直下に発生する床版下縁での局所的な曲げ引張応力と版厚が床版の耐久性を検討する上で重要なファクターになることが判った。
- 3) 現行の道路橋示方書コンクリート橋編の最小版厚は、連続版に関しては使用限界状態および疲労限界状態の何れについても大きな値となっているが、単純版については疲労限界状態よりも低い値である。

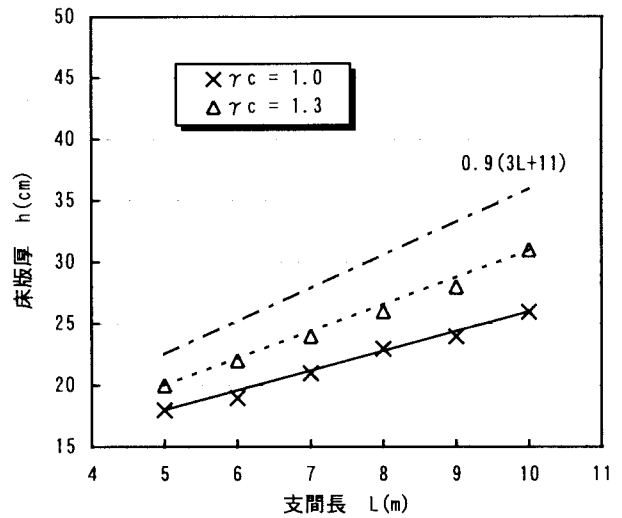


図-15 フルプレストレス時での最小版厚 (連続版)

参考文献

- 1) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅱ 鋼橋編, 平成8年.
- 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) 土木学会, コンクリート標準示方書[平成3年制定], 設計編.
- 4) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説Ⅱ コンクリート橋編, 平成8年.