

道路橋の床版厚に関する検討

Study on Thickness of Floor Slabs for Highway Bridges

松井繁之*, 江頭慶三**

Shigeyuki MATSUI and Keizo EGASHIRA

*工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘 2-1)

** (株) 春本鐵工 本店設計部技術課 (〒551-0021 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

In designing a prestressed concrete floor slab of steel girder highway bridge in accordance with the current specification, rear wheel loads(100kN) of trucks must be placed simultaneously on the road surface as many as possible in the slab span so as to produce the maximum bending moment in the slab. If a prestressed concrete floor slab over 6-meter span length is designed by the specification, it may be too conservative, because the load situation such as many heavy trucks of the design loads array simultaneously in transverse direction of the bridge width will never occur in practice.

In this paper, the authors are discussing appropriate thickness design of prestressed concrete slabs over 6-meter span length, considering the appropriate number of trucks and the fatigue durability.

key words : prestressed concrete slab, slab thickness design, rear wheel loads, fatigue durability

1. まえがき

鋼道路橋に用いられる床版は、これまで鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版という）が一般的であった。しかし、昭和40年代前後の高度成長期に多量に建設されたものの中には、当初の想定を超える交通荷重の増加や過積載等により、床版は過酷な繰り返し荷重を受け、疲労損傷が生じている場合が少なくなく、RC床版に対する信頼性は十分と言えないようである。一方、主構造である鋼桁は、平成8年度に建設省から通達された「鋼道路橋設計ガイドライン（案）」に基づき、コスト縮減を主な目的とし、鋼材費の軽減よりも、溶接や部材数を少なくして、省力化・合理化することによって工場製作工数を減少することが求められている。この合理化案の代表的な構造として、主桁本数を従来より少なくした、いわゆる少数主桁構造も普及し始めている。

このような状況のなかで、床版には主構造の一部として、高い耐荷性能と疲労耐久性能が求められており、現在の設計基準で施工されるRC床版でさえおのずと限界があることが、輪荷重走行試験等により明らかにされている。そこで、より一層高性能な床版構造の一案として、プレストレストコンクリート床版（以下PC床版という）の採用が増加している。この構造は少数主桁橋の床版支間に対して十分な耐荷力を持つだけでなく、疲労耐久性にも優れていることが実験により明らかにされている²⁾。

道路橋示方書（以下、道示という）は、床版支間6mを最大として規定されているため、これ以上の支間を持つPC床版に準用する場合には限界があると考えられる。特に、2主桁の床版厚は図-1に示すように、道示の規定式では他国の例と比較しても非常に厚い構造になる。これは、幅員方向に輪荷重（100kN）を全載する条件としているためであり、床版支間が6mを超えるような場合には確率的に僅かである。本文では、このような床版に対し、活荷重載荷方法や床版の疲労耐久性に着目し、床版厚規定の検討を行うものである。

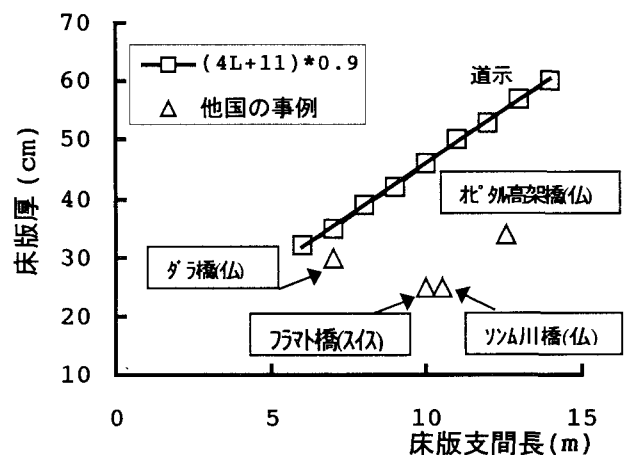


図-1 支間6m以上床版厚の比較

2. 床版支間と活荷重の載荷方法

本検討を行う床版の構造は、図-2に示すように、近年、施工性と経済性から実績の多い、橋軸方向に主桁で支持され、橋軸直角方向のみプレストレスを導入した床版とする。したがって、床版支間は主桁間隔として検討を行う。

道示では床版や床組を設計するための輪荷重は1輪100kNであり、幅1.75mの幅で2輪並列する。これを1mの車両間隔で配置することができるため、6mまでの床版支間では合計4輪配置することができる。このような活荷重の載荷状況は比較的实现する可能性が高いので、設計活荷重としては適切と考えられる。床版支間がこれを大きく超える場合には、図-3に示すように支間10m以上で4台の活荷重を載荷することになる。道示では床版支間6mまでを対象としているので、これを準用する場合には検討が必要と考えられる。

床版は橋軸直角方向にプレストレスが与えられているので、主鉄筋断面はプレストレス力の調整により設計されるが、配力鉄筋断面はRC構造であるので、これが制約となって、道示に準拠した設計を行うと床版厚は非常に厚くなる。しかし、3台以上の活荷重が作用するようなケースは希であると考えられる。そこで、図-3に示す活荷重配置によって得られた最大曲げモーメントと、図-4に示すように中央部の2台のみを配置し、他の活荷重を着目断面から1mづつ橋軸方向に移動させた場合の着目断面における曲げモーメントの低下率を計算した。この結果を図-5に示す。図中の上の値は着目断面に4台同時載荷し、支間中央部の2台は着目断面に残し、3台目と4台目を着目点から橋軸方向に1m~4mまで移動させた($b=12m$ の時のみ5mまで移動)場合の値を示す。下の値は3台同時載荷し、4台の時と同様に、残る1台を橋軸方向に移動させたものである。この図から、主鉄筋断面に作用する曲げモーメント(M_y)は5m以上、隣接する活荷重が橋軸方向にずれていても並列した載荷状況とほとんど変わらないことが分かる。逆に配力鉄筋断面曲げモーメント(M_x)は5m離れるとほとんど影響しない。

この結果から、3,4台目の影響は5mまでの範囲で影響を及ぼすと考えられる。したがって、8m以上の床版支間では M_y を算出するためには、4台同時に載荷しても問題はないが、 M_x 算出時には2台載荷でよいと考察される。

また、橋軸直角方向のみにプレストレスが導入されている場合は配力鉄筋断面の曲げひび割れにともなう直交異方性を考慮する必要があると考えられる³⁾。すなわち、全断面が有効な主鉄筋断面に作用する M_y の分担比率がより大きくなり、配力鉄筋断面に作用する M_x はこれにともない小さくなる。図-5の結果は等方性版による解析値であるが、直交異方性の影響を考慮すれば、 M_x は3,4台目の輪荷重の影響がさらに小さいものとなる。

以上のことから、 M_x 算出時には2台、 M_y を算出する際には4台の活荷重を載荷することを検討の条件とする。

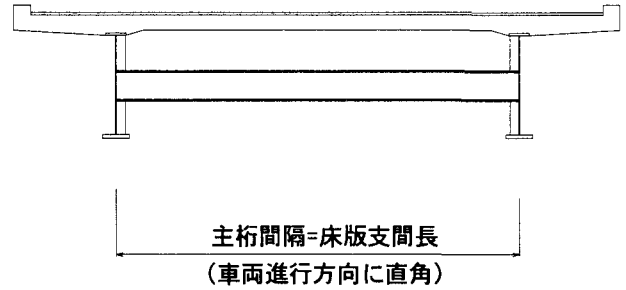


図-2 検討断面

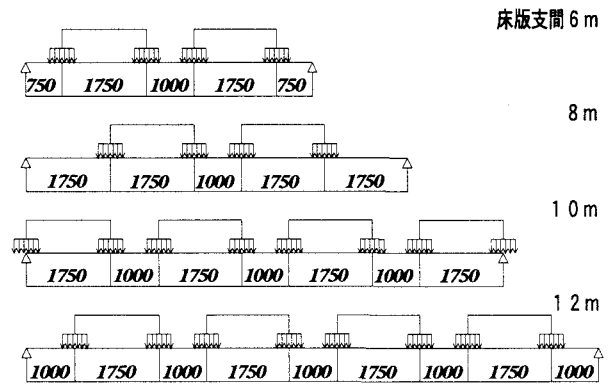


図-3 床版支間長と輪荷重配置

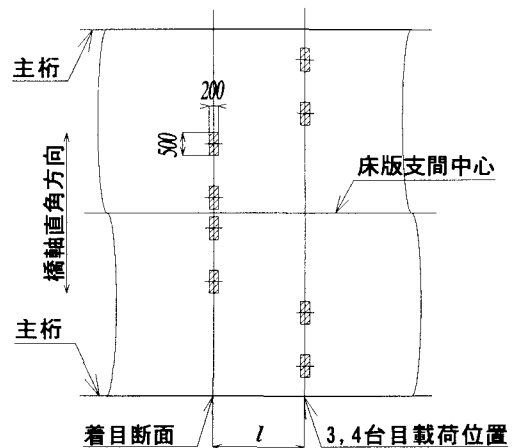
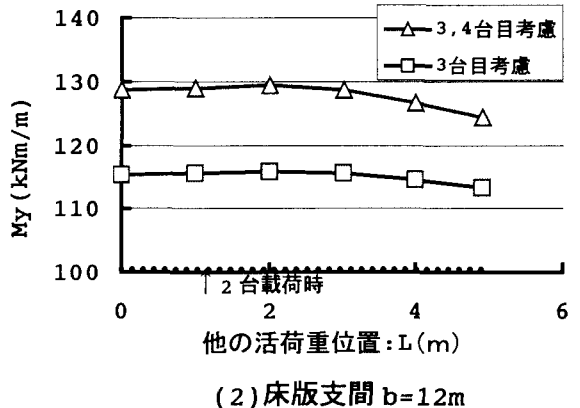
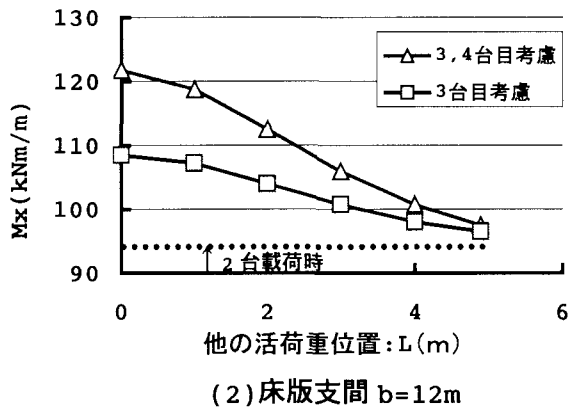
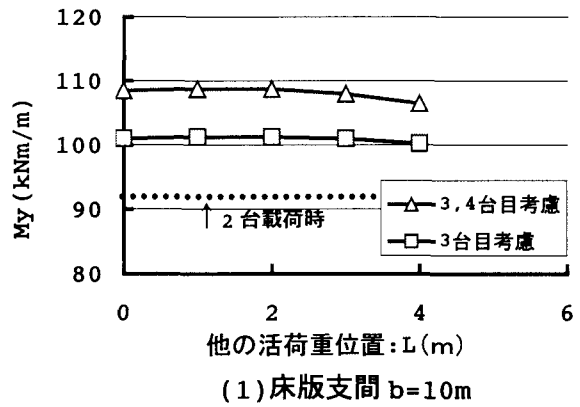
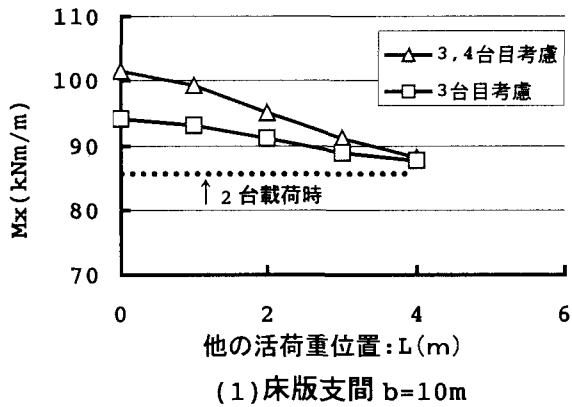


図-4 輪荷重配置

3. 床版の押し抜きせん断耐力と疲労寿命

従来のRC床版の疲労損傷機構は貫通ひび割れにともない、床版が主鉄筋方向にはり状化し、走行する輪荷重によって生じる交番せん断力の繰り返しの結果、コンクリートが摩耗し、強度を失って押し抜けるものである。このせん断疲労機構を定量的に示すものとして、S-N曲線⁴⁾が実験により求められている。疲労耐久性の向上には、はり状化したRC断面の押し抜きせん断耐力(P_{su})の向上が有効であり、そのためにプレストレスの導入が効果的であることが実験により確認されている⁵⁾。以下に式を示す。



L: 着目断面から橋軸方向に移動した3,4台目の活荷重載荷位置

図-5.1 配力鉄筋断面曲げモーメント(Mx)

図-5.2 主鉄筋断面曲げモーメント(My)

図-5 着目断面の曲げモーメントに寄与する隣接活荷重の影響

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.07835 \log N + \log 1.520 \quad (1)$$

ここに、 P : 作用荷重

P_{sx} : 移動輪荷重の繰り返しによりコンクリートのひび割れが進展し、主鉄筋方向にはり状化した時の押し抜きせん断耐力

プレストレスが導入された床版の場合の P_{sx} は式(2)によって算出される⁶⁾。

$$P_{sx} = 2 \tau_{smax} \cdot X_m \cdot \alpha_m \cdot B + 2 \sigma_{imax} \cdot C_m \cdot B \quad (2)$$

ここに、 B : はり状化した時のはり幅 ($=b+2d_d$) (cm)

b : 輪荷重の配力鉄筋方向の辺長 (cm)

τ_{smax} : コンクリートの最大せん断耐力
($=0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$) (kgf/cm²)

α_m : プレストレスによって変化する押し抜きせん断破壊面の寸法の補正係数 ($=1/\tan \theta_m$, θ_m : 主鉄筋断面のせん断破壊面の角度。以下により求める)

$$\theta_m = 1/2 \cdot \tan^{-1} (2 \tau_{cr} / \sigma_{pe})$$

なお、RC構造では $\theta_m = 45^\circ$ とする

τ_{cr} : せん断ひび割れ発生応力度

$$[=1.005(\sigma_{imax}^2 + \sigma_{imax} \sigma_{pe})^{1/2}] \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

σ_{imax} : コンクリートの最大引張応力度
($=0.538 \sigma_{ck}^{2/3}$) (kg/cm²)

σ_{pe} : 有効プレストレス (kgf/cm²)

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

X_m : 主鉄筋断面の引張側コンクリート無視の状態での床版上面から中立軸までの距離 (cm)

C_m : 主鉄筋のかぶり (cm)

d_d : 配力鉄筋断面の有効高 (cm)

式(1)を書き換えると以下のように表される。

$$N = (P_{sx} \cdot 1.520 / P)^{12.763} \quad (3)$$

この式から作用荷重 P に対して、はりの P_{sx} が増加すると疲労破壊回数 N は増加した比の 12.763 乗増加することになる。

次に RC 床版と PC 床版 (プレストレス量 $\sigma_{pe} = 2\text{N/mm}^2$ と 7N/mm^2 の 2 ケース) の押し抜きせん断耐力の比較と S-N 曲線から疲労破壊回数の算出を行う。表-1、および図-6 にこれを示す。S-N 曲線は実験サイズの床版と移動輪荷重により求められているため、直接実橋モデルに用いるためには換算が必要である。RC 床版に関しては、文献 7) で疲労

表-1 各床版の疲労破壊回数の比較

床版厚 (cm)	疲労破壊回数 N_0	疲労破壊回数 N_1	疲労破壊回数 N_2	N_1/N_0	N_2/N_0
	P_{sx0} (RC)	P_{sx1} ($\sigma_{pe}=20$)	P_{sx2} ($\sigma_{pe}=70$)		
17	2.08E+08	3.73E+08	1.14E+09	1.793	5.502
21	3.32E+09	6.31E+09	2.14E+10	1.899	6.453
24	2.02E+10	3.97E+10	1.44E+11	1.967	7.121
28	1.72E+11	3.52E+11	1.37E+12	2.051	7.989
32	1.14E+12	2.42E+12	1.00E+13	2.125	8.801
35	4.16E+12	9.06E+12	3.91E+13	2.177	9.403
39	2.04E+13	4.57E+13	2.08E+14	2.242	10.184
42	6.11E+13	1.40E+14	6.56E+14	2.287	10.740
46	2.37E+14	5.56E+14	2.72E+15	2.342	11.455
50	8.39E+14	2.01E+15	1.02E+16	2.394	12.155

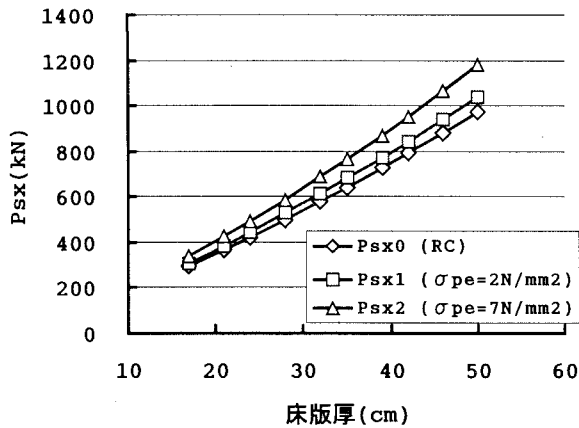


図-6.1 P_{sx} の算定

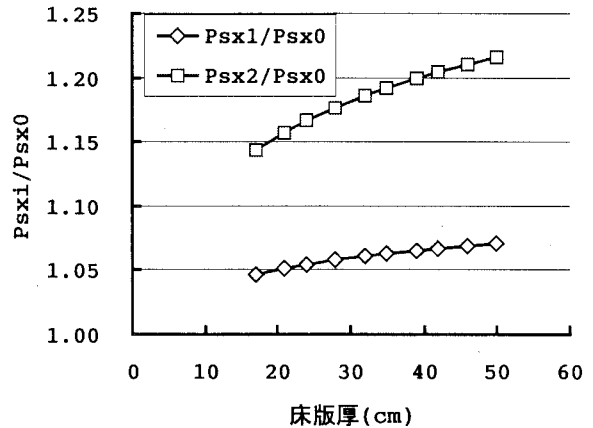


図-6.2 RC 床版に対する PC 床版の P_{sx} の比

図-6 P_{sx} の比較

用活荷重 (B 活荷重 1.5 台分) に対しての疲労破壊寿命を算出しており、これを基本として PC 床版の疲労寿命の相対比較を行う。この文献において、臨海工業地帯における重交通路線での実測結果を用いた RC 床版のせん断疲労破壊寿命は、床版支間長 6m の場合において床版厚 27cm あれば、コンクリートのばらつきや水の影響を考慮に入れても 50 年以上の耐久性があることが計算により求められている (ただし、RC 構造のため、主鉄筋がコンクリートより先に疲労破壊する可能性が考えられ、必要床版厚は 29cm としている)。

図-6 から、PC 床版の押し抜きせん断耐力はプレストレスの導入量の差により、RC 床版と比較して約 5%~15% 以上耐力が向上している。プレストレスによって飛躍的に耐力が向上することはないが、式 (3) で示したように 5% 程度の耐力向上でも疲労寿命は $1.05^{12.763} = 1.86$ 倍に達する。一般的にはプレストレスの導入量は 2N/mm^2 以上あるのでひび割れが生じて引張鉄筋や PC 鋼材の応力増加が無い限り、最低でも 2 倍以上の寿命 (100 年) が期待できる。

また、表-1 で算出される疲労破壊回数は補正しなければならぬため、そのまま使用することはできないが、相対的に 28cm と 32cm の PC 床版を比較すれば、7 倍程度の寿命増加であり、39cm と比較すれば 130 倍~150 倍程度にな

る。荷重の増加はそれ以下であるので、最終的には本検討で対象としている PC 床版の構造では押し抜きせん断破壊は起こり得ないと予想される。

4. 床版厚の設定と配力鉄筋の疲労照査

橋軸直角方向にのみプレストレスを導入した床版の最低厚は図-1 で示したように $t_s=0.9(4L+11)$ 、L:床版支間長(m) で与えられるが、長支間の床版には適用の限界があると考えられる。6m 以下の支間の床版では、この式は妥当と考えられているが、これ以上の支間長を有する床版では現実的でない場合がある。そこで図-5 の結果から、設計活荷重の載荷台数を設計断面に応じて使い分けることを提案する。すなわち、主鉄筋断面には断面方向に載荷可能な台数を考慮することにし、配力鉄筋断面には最大 2 台載荷とする。この方法によって得られた断面力に対し床版を設計する。なお、上述したとおり、橋軸方向の断面は RC 構造であり、直交異方性の影響を考慮する必要が生じる。表-2 に示す M_x 、 M_y は、各支間毎に等方性の一方向単純版モデルを作成して求めたものである。したがって、直交異方性により PC 構造である主鉄筋断面の曲げモーメントが増大するので、文献 3) により等方性版との比率を求め、これに乗

表-2 設計断面力と床版厚

(1) 配力鉄筋断面曲げモーメントと床版厚の計算結果

床版支間長 (m)	床版厚 (cm)	Mdx (kNm/m)	Mlx (kNm/m)	Σ Mx=Mdx+Mlx (kNm/m)	Mlx/Σ Mx	σc N/mm2	σs N/mm2	配筋
6	28	6.4	59.6	66.0	0.903	6.1	118.2	D22@130
8	31	12.4	74.4	86.8	0.857	6.0	115.5	D22@110
10	36	21.9	85.2	107.1	0.796	5.4	117.1	D22@110
12	39	33.7	93.7	127.4	0.735	5.2	114.8	D22@100

(2) 主鉄筋断面の計算結果

床版支間長 (m)	床版厚 (cm)	Mdy (kNm/m)	Mly (kNm/m)	Σ Mx=Mdy+αo*Mly (kNm/m)	αo	使用PC鋼材	PC鋼材 間隔(mm)
6	28	30.8	80.2	111.0	1.478	19本より28.6mm	380
8	31	59.4	97.5	156.9	1.478		320
10	36	105.1	126.4	231.4	1.478		310
12	39	161.9	146.5	308.4	1.478		300

ここに、 Mdx, Mdy:それぞれ配力鉄筋断面、主鉄筋断面に作用する死荷重曲げモーメント
 Mlx, Mly:FEM解析によって算出した活荷重曲げモーメント
 なお、Mlyには支間6mの時に12%の割り増し、支間12mで割り増し0%になるように
 比例配分で割り増しを行った。(解析誤差等に対する余裕量)
 αo:文献8)によって得られた直交異方性を配慮した割り増し係数

じた。配力鉄筋断面は逆に曲げモーメントが減少することになるが、安全側の設計を意図して表-2の値をそのまま使用する。ここで、場所打ちコンクリート床版の場合、注意しなければならないのは、6m以下の床版やプレキャスト床版等では一般に考慮していなかった橋軸方向(配力鉄筋断面方向)の死荷重曲げモーメントが無視できなくなることである。一方向版の場合、死荷重のような等分布の全載荷重に対してはMdyのポアソン比(Mdx=Mdy/6)が理論的に発生する。活荷重が全載されるような状況では無視しても影響は小さいが、今回の最大2台の載荷状態では表-2に示されるように全曲げモーメントの内、死荷重が占める割合が25%程度にも及ぶ。よって配力鉄筋断面の死荷重曲げモーメントMdxを断面照査に加える必要がある。

床版厚は支配的となる配力鉄筋断面から先に決定し、その厚さで主鉄筋断面の照査を行った。この結果、支間12mの単純版で39cm(道示に準じると53cmであり、その73%に相当)の床版厚となった。この厚さであればコンクリートのせん断疲労に対する安全は確保されていると考えられる。逆に配力鉄筋は応力振幅のほとんどが活荷重であり、かつ再現確率の高い載荷状況であるため、疲労照査を行う必要がある。照査はコンクリート標準示方書に準じて行う。照査式を(4)に示す。

$$\sigma_{srd} = 190 \times 10^3 / N^k \cdot (1 - \sigma_{sp} / \sigma_{ud}) \quad (4)$$

ここに、 σsrd:設計疲労強度(N/mm²)
 α=k₀(0.81-0.003φ)
 k=0.12, k₀=1.0, φ:鉄筋直径(mm)
 σsp:死荷重曲げモーメントによる応力度(N/mm²)
 σud:鉄筋の引張強度(N/mm²)

N:疲労破壊回数

この式からD22の鉄筋の疲労強度を算出すると5000万回の繰返しに対してσsrd=125.1N/mm²となる。重交通路線において、マイナー則にしたがって、100年間の交通荷重を設計活荷重(輪荷重:P=100kN)に等価換算した場合で3320万回程度であり⁷⁾、表-2の配力鉄筋の応力は活荷重2台に対するものである。100年の期間においてこれだけの繰返し載荷は起こらないと考えられる。以上のことから、鉄筋の疲労に対しても十分安全であると考えられる。またひび割れ幅の照査についても問題のないことが確認された。これを表-3に示す。

表-3 ひび割れ幅の照査結果

床版厚(cm)	28	31	36	39
ひび割れ幅(cm)	0.0218	0.0204	0.0206	0.0198
許容ひび割れ幅	0.0288	0.0288	0.0288	0.0288

算定はコンクリート標準示方書(土木学会)による許容ひび割れ幅は0.005c(一般の環境)により算出

5. 結論

活荷重の載荷台数を床版構造の応力状態を考慮して、配力鉄筋断面に最大2台、主鉄筋断面には可能な限り載荷する方法を提案した。これにより、床版厚は約70%程度まで低減しても応力度と耐久性の面から問題が無いことが計算により確認できた。主構造部材の一部を担うPC床版は100年以上の耐久性が求められるが、必要以上に過剰に設計されては経済性に支障が生じる。特に6m以上の支間長を有する床版は実績が少なく、今後もより一層の検討が必要であると考えられる。今回はTT-43等の特殊荷重は考慮していないので、今後の検討課題と考えている。但し、直

交異方性を考慮した活荷重曲げモーメントを考慮しているので、大きな隔たりはないと考えている。

また、死荷重曲げモーメントは床版張り出し部の影響を大きく受けるため、床版厚の設定には幅員構成全体のバランスを考慮して決定しなければならない⁸⁾。本文では 6m～12m の単純版の計算を行うに留まったが、今後は幅員構成を考慮した床版厚の算定式および設計曲げモーメント式の提案に拡張する考えである。

[参考文献]

- 1) 八部・川畑・佐々木・内田・宮崎・西川：パーシャルプレストレスを導入した PC 床版の輪荷重走行実験，第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集，pp43-48,1998.10
- 2) 中須・安松・長谷：鋼少数主桁橋の長支間 PC 床版の移動輪荷重疲労試験について，土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集 I -A17，1997.9
- 3) 松井・江頭・石崎：長支間床版の設計曲げモーメント式に関する 2,3 の考察，鋼構造年次論文報告集第 3 巻，pp.215-220, 1995
- 4) 松井・園田：道路橋 RC 床版のひび割れ損傷と耐久性，阪神高速道路公団・阪神高速道路管理技術センター，1991
- 5) 長谷・上東・泰・安松：長支間 PC 床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価，日本道路公団試験研究所報告 Vol.36，1999.11
- 6) 東山・松井：プレストレスしたコンクリート床版の押抜きせん断耐力，土木学会構造工学論文集 Vol.44A，1998,3
- 7) 松井・江頭・桐川：長支間 RC 床版の疲労設計法に関する一考察，土木学会構造工学論文集 Vol.44A，1998,3
- 8) 猪熊・本間・杉崎・丸山：長支間場所打ち PC 床版鋼 2 主桁橋（藁科川橋）の計画，土木学会第 54 回年次学術講演会 CS-142，1999,9