

プレストレスを導入するプレキャスト床版の 継目部の連続性と耐力に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON CONTINUITY OF JUNCTION PARTS AND ULTIMATE STRENGTH OF PRESTRESSED PRECAST CONCRETE SLAB

* ** *** ****
松井繁之、中井 博、 袴田文雄、 竹中裕文

By Shigeyuki MATSUI, Hiroshi NAKAI, Fumio HAKAMADA and Hirofumi TAKENAKA

Recently, prestressed precast concrete slabs are widely applied to the decks of highway bridges for shortening the construction periods and preventing cracks in the concrete slabs. For such type of the precast concrete slabs, there are some problems for estimating the appropriate prestress forces, which keep the continuity of junction parts of the slab in the longitudinal direction, and for evaluating the ultimate strength of the precast concrete slabs themselves. A real size precast concrete slab was constructed and tested under static load to investigate the static behaviors and the ultimate strength of the junction parts of prestressed concrete slabs. This paper presents these static behaviors and ultimate strength of prestressed precast concrete slabs.

1. まえがき

鋼道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版という）の損傷、とくにひびわれによる供用性および耐力の低下が、橋梁の維持・管理上の問題の一つとして注目を集めてきた。ここ20数年の間に、RC床版の設計基準の改訂¹⁾、損傷を受けたRC床版の補強および取替工法の研究²⁻⁷⁾、および、ひびわれの入りにくいコンクリート床版の開発⁸⁻¹⁵⁾などが進められている。

これらのうち、プレストレスを導入したプレキャストコンクリート床版の移動活荷重のもとにおける耐久性については、文献11)に詳しく報告したように、2方向のプレストレスを $30\text{kgf/cm}^2(2.94\text{MPa})$ 以上導入するならば十分確保できることを確認している。しかし、静的な荷重に対する挙動および床版自身の耐力についても検討をしておく必要があると認識し、今回、基礎的な実験を行った。さて、文献10)～15)に示されているプレキャスト床版合成桁においては、プレキャスト床版パネル相互の橋軸直角方向に沿う継目部にまず無収縮セメントモルタルを充填し、しかるのちに橋軸方向のプレストレスを導入して連続性を確保することを原則としている。したがって、プレキャスト床版パネル間の継目部で橋軸方向の連続性を確保するために必要なプレストレス量に関する調査を行うとともに、プレキャスト床版パネルを接合して完成したプレ

* 工博 大阪大学助教授 工学部 土木工学科 (〒565 吹田市山田丘 2-1)

** 工博 大阪市立大学教授 工学部 土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*** 阪神高速道路公団 第1建設部 (〒559 大阪市住之江区北加賀屋 2-11-8)

**** 工修 大阪市立大学大学院研究生 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

で 59kgf/cm^2 (5.8Mpa)、下縁で 79kgf/cm^2 (7.7Mpa) のプレストレスを与えた。

図-1(c) には、継目部の詳細を示す。上述のプレキャストコンクリート板を鋼桁上に敷き並べた後、継目部にプレミックスタイプの無収縮セメントモルタルを充填した。その後、P C 鋼より線 ϕ -21.8mmを使用してポストテンション方式で橋軸方向のプレストレスを与えた。

なお、プレキャスト床版のコンクリートの圧縮強度および弾性係数は、それぞれ $\sigma_c = 576\text{kgf/cm}^2$ (56.45Mpa)、 $E_c = 3.3 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ($3.23 \times 10^4 \text{ Mpa}$)であった。

(2) プレキャスト床版の連続性に関する実験

本実験では、上述のようにして製作した供試体床版に、橋軸方向のプレストレス量を種々変化させて、弾性範囲における静的載荷実験を行った。すなわち、橋軸方向のプレストレス量は、コンクリートの圧縮応力で5 (0.49)、10 (0.98)、20 (1.96)、30 (2.94)、40 (3.92)、50 kgf/cm^2 (4.9Mpa) の6ケースとした。

図-2 には、輪荷重の載荷位置を示す。載荷パネルは、図中の第7パネルで、載荷点はパネルの中央および継目部の近傍との2箇所である。載荷荷重は、10tonf (98 kN) および 20 tonf (196 kN) の2種類で、載荷板の寸法は、道路橋示方書に¹⁾従い $20\text{cm} \times 50\text{cm}$ とした。

写真-1 には、実験状況を示す。荷重は、橋軸方向に自旋式の載荷装置を用いて、油圧ジャッキにより載荷した。

床版パネルの上・下面のひずみを測定するためストレインゲージを貼付け、第5～9パネルの中央点でたわみを測定した。またパネル間の継目部の開口幅は、コンタクトゲージによって測定した。

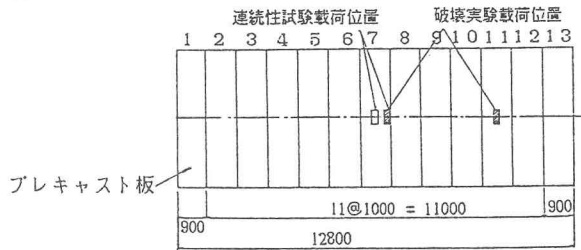


図-2 パネル番号と載荷位置

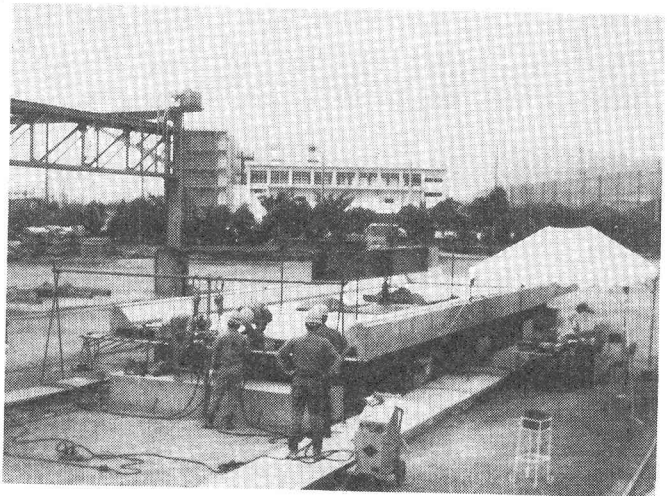


写真-1 供試体および実験状況

(3) プレキャスト床版の耐荷力に関する実験

上述の載荷実験ののち、橋軸方向に 40kgf/cm^2 (3.92Mpa)のプレストレス力を導入し、シース内にセメントペーストをグラウトした。そして、プレキャスト床版と鋼桁とは、プレキャスト床版にあらかじめ設けられているスタッド用の孔 ($10\text{cm} \times 20\text{cm}$, 中央に1箇所、したがって1mの間隔) の位置で鋼桁の上フランジに1.0mの間隔で ϕ -13mmのスタッドを2本ずつ溶植し、その後、無収縮モルタルを充填して接合した。したがって、両者の結合度は、スラブアンカー程度となっている。

輪荷重の載荷位置は、図-2中に示したように、第11パネルではプレキャスト床版自身の耐荷力を調べるためパネルの中央点とし、第7パネルでは継目部近傍に偏心させた。載荷板の寸法は、同様に $20\text{cm} \times 50\text{cm}$ とした。¹⁾

表-1 には、荷重の載荷ステップを示す。荷重は、2tonf (19.6kN) きざみに10 tonf (98kN)まで2回増減

を繰り返したのち、やはり、2tonf(19.6kN)きざみで増加させてゆき、20tonf(196kN)、40tonf(392kN) および 60tonf(588kN)に達すると、これらの荷重と 4tonf(39.2kN)との間を20回繰り返した。その際、プレストレスによる復元性および継目部の連続性に関するデータを得た。その後は、破壊に至るまで荷重を増大させた。

測定項目は、上述の連続性に関するものと同様であるが、継目部の挙動に対しては、3方向ひびわれ計を使用した。これは、一つの計器でひびわれの開口幅、段差および水平方向ずれが同時に測れるものである。

3. 実験結果とその考察

(1)プレキャスト床版の連続性に関する実験結果とその考察

a.プレキャスト床版のたわみとプレストレス量との関係

図-3には、載荷荷重 10tonf(98kN)における載荷パネル中央のたわみと橋軸方向のプレストレス量との関係を示す。プレストレス量が小さくなると、若干たわみが大きくなる傾向が伺われるものの、プレストレス量の変化に伴う差異は明瞭ではない。また、パネルの中央点に載荷した場合と継目部近傍に偏心させて載荷した場合との差異もほとんどみられない。したがって、設計荷重(9.6tonf(94.08kN))程度の荷重までは、プレストレス量の変化は、プレキャスト床版のたわみ挙動に対してあまり影響を及ぼさないものと考えられる。

b.継目の開き量とプレストレス量との関係

図-4には、載荷荷重 10tonf(98kN)における載荷パネルと隣接パネルとの間の継目の開き量とプレストレス量との関係を示す。プレストレス量が、20kgf/cm²(1.96Mpa)以下になると、継目の開き量が急激に大きくなる傾向がみられる。また、中央載荷と偏心載荷とでは、偏心載荷の場合の方が継目の開口幅が大きいが、これは曲げモーメントの大きさが異なり、コンタクトボール間(10cm)の曲げひずみ分が異なるためである。

c.ひずみ差とプレストレス量との関係

図-5には、継目部を挟む両パネル端部で測定した橋軸直角方向のひずみの差の変化を示す。プレストレス量が 20kgf/cm²(1.96Mpa)以下になると、ひずみ差が大きくなり、曲げモーメント、および、せん断力の伝達が若干低下することがわかる。

表-1 載荷ステップ

載荷番号	最小荷重 (tonf)	最大荷重 (tonf)	荷重ビッチ (tonf)	載荷回数 (回)
1~2	0	10	2	2
3~4	0	20	4	2
5~23	4	20	4	19
24	0	20	4	1
25~26	0	40	4	2
27~45	4	40	4	19
46	0	40	4	1
47~48	0	60	4	2
49~68	4	60	4	20
69	0	60	4	1
70	0	80	4	1
71	0	96	10(4)*	1
72	0	140	10(5)**	1

注) *: 80tonf以上のとき、**: 100tonf 以上のとき

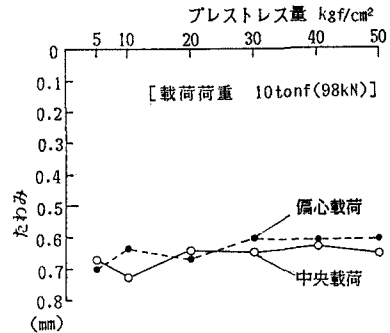


図-3 第7パネル中央のたわみとプレストレス量との関係

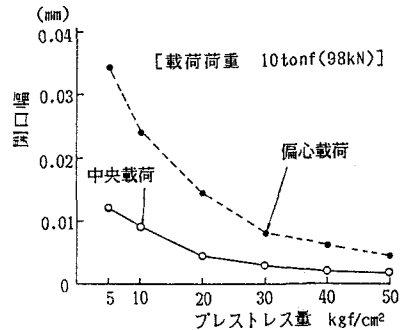


図-4 目地の開口幅とプレストレス量との関係

d. 橋軸方向のたわみ分布

図-6には、橋軸方向プレストレスがコンクリートの応力で 30kgf/cm^2 (2.94Mpa) のときの載荷荷重 10tonf (98kN) におけるたわみ分布の実験値と計算値とを示す。ここで、計算値は、コンクリートの全断面を有効とし1方向版の理論式¹⁷⁾で計算したものであるが、実験値とよく一致している。

以上のような静的挙動の測定結果を総合すると、橋軸方向のプレストレス力としては、コンクリートの応力で 30kgf/cm^2 (2.94Mpa) 程度導入すれば、プレキャスト床版の連続性は確保されるものと判断される。

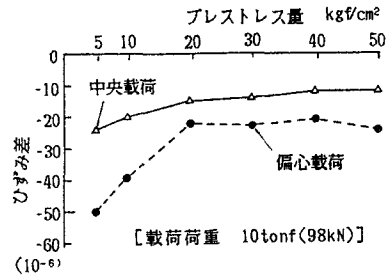


図-5 ひずみ差とプレストレス量との関係

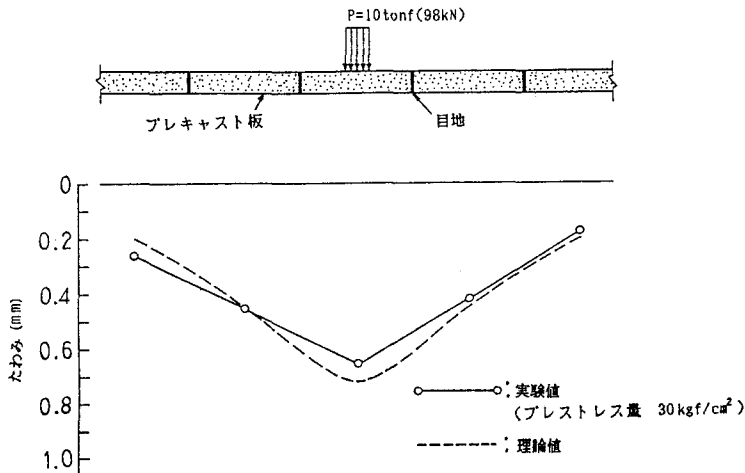


図-6 床版中央縦断面におけるたわみ分布

(2) プレキャスト床版の耐荷力に関する実験結果とその考察

a. ひびわれ発生荷重および状況

図-7～8には、プレキャスト床版下面のひびわれ発生状況を示す。これらの図より、載荷板を中心にして放射状にひびわれが発生し、プレキャスト床版の継目を越えて隣接するパネルに伝わっているのがわかる。また、同図中には、押抜きせん断によって破壊したコンクリートの剝離部分を点線で示す。コンクリートが剝離した部分の面積(剝離破壊面積)は、パネル7の偏心載荷のものとパネル11の中央載荷のものとで差異があまりみられない。

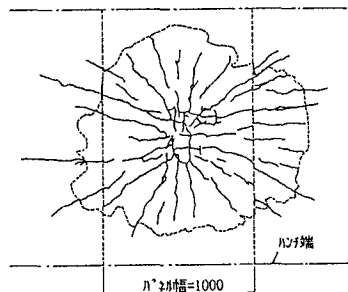
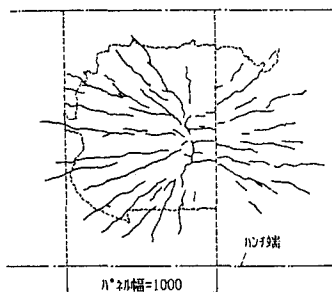


図-7 床版下面のひびわれ状況(第7パネル) 図-8 床版下面のひびわれ状況(第11パネル)

最初のひびわれは、載荷直下領域で橋軸方向に発生した。このひびわれ発生荷重は、パネル7の偏心載荷のものが約56tonf(548.8kN)で、パネル11の中央載荷のものが40tonf(392kN)であった。同じ厚さのRC床版に関する実験報告では、平均10tonf(98kN)程度と考えられるので、これと比較すると、プレキャスト床版の場合は、ひびわれ発生荷重がRC床版の約4～5倍になっている。これは、プレストレスが橋軸および橋軸直角の2方向に導入されているためで、それらの効果が大きいことを示している。

b. たわみと荷重との関係

図-9には、パネル7に載荷した場合の載荷点直下の荷重-たわみ曲線を示す。パネル11でもほとんど同じ結果であった。このことから、パネル7および11の両方とも、約80tonf(784kN)まではほぼ弾性的に挙動していることがわかる。また、荷重を除荷した場合、残留たわみはほとんどなくなり、プレストレスによる復元性が大きいことがわかる。このことから、仮にプレキャスト床版に過大な荷重が作用した場合でも、その荷重を除荷されれば、たわみが残留することなく回復し、ひびわれも閉じると考えられる。

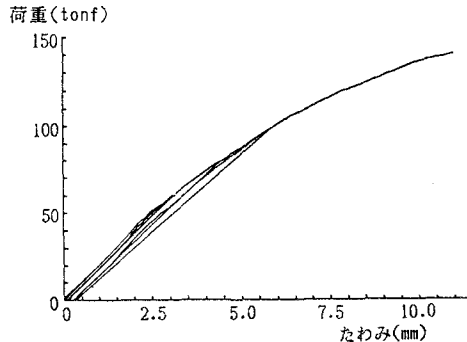


図-9 荷重-たわみ曲線(載荷点直下)

c. 継目部の挙動と荷重との関係

図-10および11には、それぞれ、継目部下縁における開き量と荷重との関係、および段差と荷重との関係を示す。継目部近傍に載荷した第7パネルでは、開き量および段差は、荷重の増大にともない徐々に大きくなっている。しかしながら、図-10に示すように、105tonf(1029kN)という大きな荷重を載荷しても、除荷の後は継目の開口幅はほぼ0に戻っている。また、設計荷重の約6倍の60tonf(588kN)までの荷重に対しては、完全に閉じており、弾的な挙動を呈している。継目部下縁における段差についても、設計荷重程度の輪荷重に対しては著しく小さく、また60tonf(588kN)までの荷重に対しては、荷重を除荷すると、完全に載荷前の状態に復元することが理解できる。

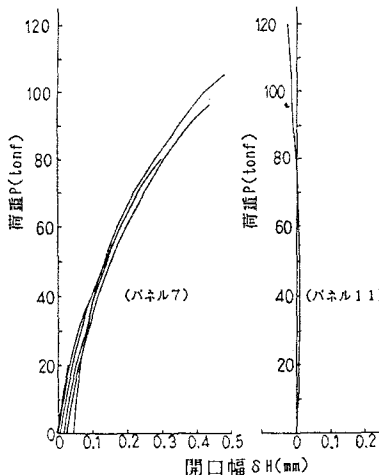


図-10 目地部下縁における
開口幅と荷重との関係

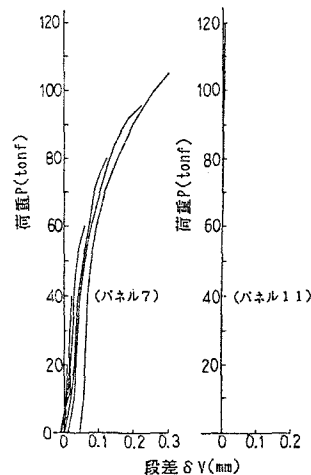


図-11 目地部下縁における
段差と荷重との関係

以上のことから、プレキャスト床版の継目部は、60tonf(588kN)までの載荷に対しては完全に弾性的に挙動することがわかった。したがって、橋軸方向のプレストレスを 40kgf/cm^2 (3.92Mpa)導入した本供試床版は、設計荷重の約6倍までの荷重に対し十分な復元性と連続性とを有し一体的に挙動しているといえる。

d. 耐力および破壊状況

最終的に、第7および11の両パネルともほとんど同じ荷重140tonf(1372kN)で押し抜きせん断破壊した。

実験終了後、第7パネルについては、載荷点中央を通る直交2方向に切断して、内部の破壊状況を詳細に観察した。写真-2～3には、継目を含む橋軸方向での切断面を示すが、押し抜きせん断破壊の状況は、継目部もプレキャストパネル部分もほとんど変化がないことがわかる。

また、すでに図-7～8に床版下面でのコンクリートの剝離破壊範囲を示したように、供試床版の下面の破壊状況は、偏心載荷のものと中央載荷のものとでほとんど差異がなかった。

以上のことから、プレキャスト床版の耐力および破壊パターンに関しては、継目の影響はないものといえよう。

e. 押し抜きせん断耐力の考察

コンクリート系の床版の終局状態は、ほとんどの場合、押し抜きせん断破壊を呈することが明らかにされている。RC床版の押し抜きせん断耐力の評価式¹⁸⁾としては、次式を用いることができる。

$$P_{ult} = \tau_{s,max} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + x_d)x_m \} + \sigma_{t,max} \{ 2(a + 2d_m)C_d + 2(b + d_d + 4C_d)C_m \}$$

ここに、

a, b : それぞれ載荷板の主鉄筋方向および配力鉄筋方向の辺長 (cm)

x_m, x_d : それぞれ主鉄筋および配力鉄筋に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立軸距離 (cm) で、これらは断面の配筋とヤング係数比を用いて弾性計算で求める。

d_m, d_d : それぞれ主鉄筋および配力鉄筋の有効高さ (cm)

C_m, C_d : それぞれ引張側主鉄筋および引張側配力鉄筋の中心とコンクリート下表面との距離、すなわち、かぶり (cm)

$\tau_{s,max}$: $0.252 \sigma_{ck} - 0.000246 \sigma_{ck}^2$

$\sigma_{t,max}$: $0.583 (\sigma_{ck})^{2/3}$

E_c : $210000 + 900 (\sigma_{ck} - 300)$ または実測値

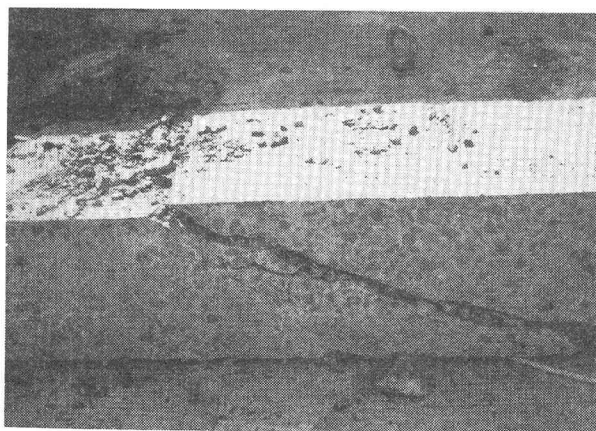


写真-2 橋軸方向の切断面（第7パネル）

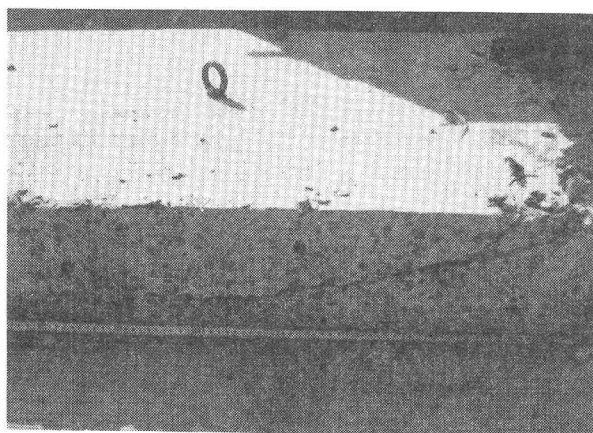


写真-3 橋軸方向の切断面（第11パネル）

しかしながら、橋軸方向にプレストレスを導入したプレキャスト床版では、鉄筋の他にPC鋼線が配置されているため、上式をそのまま適用できないものと思われる。したがって、ここでは、プレキャスト床版の破壊状況から種々の破壊パターンを想定し、若干の修正を加えて押し抜きせん断耐荷力の評価を試みた。

表-2には、想定したプレキャスト床版の破壊パターン、および、それらを考慮して求めた押し抜きせん断耐荷力の計算値を示す。これらの計算の過程をしめすと、まず上式に必要な直交2断面の中立軸は、鉄筋とPC鋼線を考慮して求める。つぎに、破壊パターンとしては、以下のように仮定した。

計算値(1)では、まずコンクリートの斜め破壊角度を 45° とした。そして、主鉄筋方向のかぶり破壊位置を引張側主鉄筋の位置とし、配力鉄筋方向のかぶり破壊位置を橋軸方向のPC鋼線の位置とした。

一方、計算値(2)では、上述の写真-2および3に示す切断面の観察結果から、破壊線の傾きを 26.6° とし、配力鉄筋方向のかぶり破壊位置を橋軸方向のPC鋼線と引張側配力鉄筋との平均の位置とした。

結果として計算値(2)が、ほぼ実験値に一致した。破壊線の傾きが小さくなるのは、プレストレスによる直応力の影響と考えられるが、厳密に評価するのは困難であろう。また、プレストレス力は、限界せん断応力に直接的に影響を及ぼし、さらに、中立軸の変動に対して間接的な影響を与えるものと思われる。しかしながら、プレキャスト床版の押し抜きせん断耐荷力は、近似的に表-2の計算値(2)に示す破壊パターンを仮定して評価することができよう。

本供試体床版の押し抜きせん断耐荷力は、 $140\text{tonf}(1372\text{kN})$ で、通常のRC床版の約2倍にもなり、プレストレスの効果は非常に大きいといえよう。この静的耐荷力の増大、および上述したようなひびわれ発生荷重の増大は、プレキャスト床版の疲労強度の向上をもたらし、プレストレスの導入が疲労耐久性にも大きな効果を発揮するものと考えられる。

4. まとめ

本文では、実物大のプレキャスト床版を製作して静的荷重に対する種々な挙動を調査し、プレキャスト床版の連続性を確保するための橋軸方向のプレストレス量に関して考察した。また、ひびわれ発生荷重および押し抜きせん断耐荷力についても、プレキャスト床版の特性を明らかにした。今回の一連の実験的研究により得られた結論をまとめると、以下のとおりである。

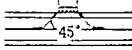
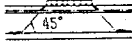
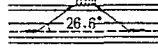
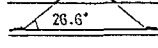
(1) プレキャスト床版の橋軸方向の連続性を確保するには、適切なプレストレスを導入する必要がある。

実験結果から、橋軸方向のプレストレス力としては、コンクリートの応力で約 $30\text{kgf/cm}^2(2.94\text{Mpa})$ が必要と推定される。

(2) 供試体床版のひびわれ発生荷重は、同じ床版厚のRC床版の4~5倍もあり、プレストレスの導入によってひびわれ発生荷重を増大させることができる。

(3) また、プレキャスト床版のたわみおよび継目部の開口幅および段差の挙動については、復元性が高く、

表-2 押し抜きせん断耐荷力の評価結果

計算結果	計算値(1)	計算値(2)
	$P_{ult} = 127\text{tonf}$ ($= 1245\text{kN}$)	$P_{ult} = 138\text{tonf}$ ($= 1352\text{kN}$)
破壊状況の仮定	橋軸方向 (配力鉄筋方向) $b=20\text{cm}$  橋軸直角方向 (主鉄筋方向) $a=50\text{cm}$ 	橋軸方向 (配力鉄筋方向) $b=20\text{cm}$  橋軸直角方向 (主鉄筋方向) $a=50\text{cm}$ 

プレストレス力が 40kgf/cm^2 (3.92MPa)の場合、設計荷重の6倍程度まで十分な復元性が確保されていることがわかった。

- (4) 2方向にプレストレスを与えたプレキャスト床版の耐力は、同じ厚さのRC床版の耐力の約2倍であった。この耐力は、押し抜きせん断破壊耐力であり、破壊線の傾きを若干安全側に 30° と仮定して文献18)の式で良好に推定できると思われる。
- (5) 文献11)の疲労実験から、プレストレス量 30kgf/cm^2 (2.94MPa)で非常に高い疲労耐久性のあることがわかっている。よって、最終的に橋軸方向のプレストレス量として 30kgf/cm^2 (2.94MPa)以上あればよいといえるであろう。

謝辞：本実験を実施するにあたり、土木学会関西支部のプレキャスト床版合成桁橋研究委員会（昭和61年6月～62年3月）をはじめ、関係各位の絶大な御協力を賜ったことに深謝する。

参 考 文 献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編およびⅡ鋼橋編、丸善、昭和55年2月。
- 2) 土木学会鋼構造委員会・鋼構造進歩調査小委員会：鋼道路橋コンクリート床版の現況と動向、土木学会誌、Vol.72、No.2、昭和60年2月、pp.57-64。
- 3) (財)首都高速道路協会：床版補強の設計施工に関する調査研究(その1)報告書、昭和55年3月。
- 4) 土木学会関西支部共同研究グループ：道路橋鋼およびコンクリート合成床版の設計法に関する研究、報告書、昭和59年5月。
- 5) 園田歳文：鉄筋コンクリート床版の補修・補強、橋梁と基礎、Vol.17、昭和58年8月、pp.129-133。
- 6) Luts, J. G. and Scalia, D. J. :Deck Widening and Replacement of Woodrow Wilson Memorial Bridge, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.29, May-June 1984, pp.74-93。
- 7) Slavis, C. :Precast Concrete Deck Modules for Bridge Deck Reconstruction, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.28, Sept.-Oct 1983,pp.120-135。
- 8) PCI Bridge Committee :Tentative Design and Construction Specifications for Bridge Deck Panels, Journal of the Prestressed Concrete Institute, Vol.23, Jan.-Feb. 1978,pp.32-39。
- 9) 阪神高速道路公団・PC構造物検討委員会：PC埋設型枠を用いた鋼道路橋床版の設計施工、橋梁と基礎、Vol.20、No.5、昭和61年5月、pp.1-7。
- 10) Takenaka, H., Kishida, H. and Nakai, H. :A Study on New Composite Girder using Prestressed Precast Concrete Slab by PPCS Method, Der Stahlbau, 55 Jahrgang, Heft6, 1986, s.165-174。
- 11) 中井博・竹中裕文・喜田浩：プレキャスト床版を用いた合成桁の自動車走行のもとにおける耐久性の実験的研究、土木学会構造工学論文集、Vol.32A、土木学会、昭和61年3月、pp.81-92。
- 12) 中井博・渡辺英一・林圭一・竹中裕文：プレキャストコンクリート床版合成桁のクリープ・リラクセーションに関する基礎的考察、土木学会構造工学論文集、Vol.33A、昭和62年3月、pp.285-298。
- 13) 中井博・藤井学・渡辺英一・竹中裕文：プレキャスト床版を用いた合成桁のクリープ現象に関する実験的研究、土木学会構造工学論文集、Vol.33A、昭和62年3月、pp.275-284。
- 14) 土木学会関西支部共同研究グループ：プレキャスト床版を用いた合成桁橋の耐荷性と実用化に関する研究、報告書(1)および(2)、昭和60年6月および昭和61年6月。
- 15) 土木学会関西支部・プレキャスト床版合成桁橋研究委員会：プレキャスト床版合成桁橋の設計と施工、土木学会関西支部昭和62年度講習会テキスト、昭和62年5月。

- 16) 袴田文雄・藤井学・宮本文穂：プレキャスト高欄の衝撃破壊挙動実験、昭和62年土木学会年次学術講演会講演概要集、昭和62年 9月、V-246.
- 17) Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S.:Theory of Plates and Shells, McGraw-Hill, 1959.
- 18) 前田幸雄・松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力の評価式、土木学会論文報告集、v-1、昭和59年 2月、pp.133-141.

(1987年10月16日)