

# チャンネル形状プレキャストPC床版の力学的特性および設計手法に関する研究

真鍋英規<sup>1</sup>・松井繁之<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 株式会社富士ピー・エス 大阪支店技術部 (〒530-0012 大阪市北区芝田2-2-1)

<sup>2</sup>フェロー会員 工博 大阪大学大学院教授 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘2-1)

本研究は、チャンネル形状のプレキャストPC床版の力学的特性を実験及び解析的に明らかにしたものである。一連の静的載荷実験及び輪荷重走行による疲労実験の結果から、チャンネル形状プレキャストPC床版は大きな静的耐荷力を有するとともに、輪荷重走行に対する疲労耐久性も満足するものであることが確認できた。一方、チャンネル形状版はその断面形状に起因して活荷重曲げモーメントの分布が従来のRC床版形状のものとは異なり、道路橋示方書の活荷重による設計曲げモーメント式をそのまま適用することはできない。本研究では、チャンネル形状版に対し有限要素法による解析を行い、その結果から活荷重設計曲げモーメント式を提案し妥当性を検証した。併せてその設計の概要を示すものである。

**Key Words :** channel-shaped PC slab, durability, formulation of design bending moments

## 1. まえがき

橋梁構造物は、長期的な環境要因による材料の劣化を考慮に入れ、耐荷力や疲労という活荷重作用に対する抵抗を備え持つて、長期間の使用に耐えるように設計・施工されなければならない。しかし、近年、コンクリートの損傷・劣化が問題となり、構造物としての耐荷力をはじめとする諸性能は必ずしも満足のいくものではないことが指摘されている。道路橋鉄筋コンクリート床版（以下RC床版と称す）に関しても、損傷・劣化とその維持管理を含めた対策が道路管理者にとってまだ重要な課題の一つとなっている。RC床版の損傷の原因として、外的には交通量の急速な増大、車両の大型化・重量化が、内的には床版厚不足・配力鉄筋不足・コンクリートの品質不良・施工ミス等による耐力不足が指摘されている。さらに、疲労損傷には舗装から侵入した水が大きく影響し、損傷速度を加速している。

このような状況から、これまでに多数の調査・研究がなされ、それに基づき設計基準も段階的に改訂されてきた。しかしながら、それらの基準を用いて

設計された床版であっても、大型車の中に混入している過積載車や床版の構造特性により、損傷の発生する可能性を含んでいると言える。

一方、建設工事ではコスト縮減、周辺環境への配慮等の目的から、現場施工の省力化が強く望まれている。都市内の橋梁建設では、工場において橋梁部材を製作し、現場での作業を極力省くプレキャスト化による合理化工法が要求されることが多い。床版はプレキャスト化の好対象の部材であり、床版をプレキャスト化することにより現場工程の大幅な短縮が可能となる。また、コスト縮減の観点からは、プレキャストPC床版とすることによる鋼桁の少数主桁化と床版の軽量化が可能となる場合もあり、上・下部工まで含めた橋梁トータルコストの削減が望める。併せて製品管理が徹底される工場製のプレキャスト床版は高品質であり耐久性の向上にも繋がる。従って、床版のプレキャスト化は、維持管理まで含めた橋梁のライフサイクルコストの縮減を可能とするとと言える。

このように床版の耐久性を高め、現場施工の省力化が可能となるプレキャストPC床版工法は、近年

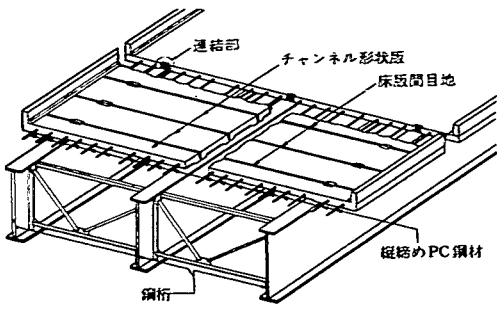


図-1 チャンネル形状版概念図

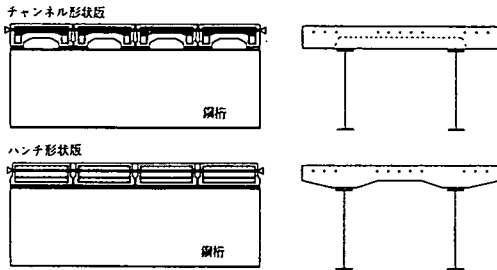


図-2 プレキャスト床版構造の比較

鋼橋建設において大幅に普及している。従来のプレキャストPC床版は場所打ち鉄筋コンクリート床版形状に近似したタイプのものが一般的であるが、筆者らは今回新たに従来の床版と比べ、力学的特性の改善が図れ、設計・施工上の利点を考えた新形式のチャンネル形状プレキャストPC床版（以下チャンネル形状版と称す、図-1）を考案した<sup>1), 2), 3)</sup>。

本研究では、チャンネル形状版に関する各種実験を行い、床版の静的耐荷特性および疲労特性を明らかにした。また、チャンネル形状版の設計手法に関して、有限要素法解析により活荷重応力の分布特性を明確にし、それに基づき活荷重に関する設計曲げモーメント式を提案した。その妥当性を検証するとともに、断面力の算定方法の基本を示した。

## 2. チャンネル形状版

チャンネル形状版は、床版にリブを設けて橋軸方向で変断面とし、全体として床版死荷重を軽減させたものである。チャンネル形状とするメリットは、耐久性の向上は第一であり、従来のプレキャストPC床版より軽量化が計れることと、導入するプレストレス量を減らすことが可能となることである。

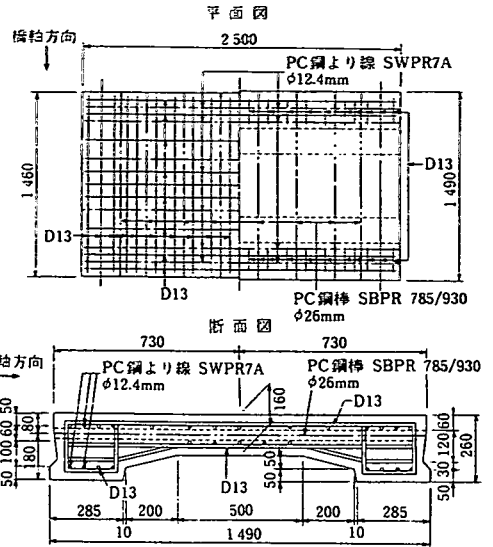


図-3 供試体パネル

また、チャンネル形状はリブとリブとの間の床版が薄くなる凹部があり、その部分へのスタッドの配置が可能となるため、PC鋼材の配置に制約を与えずに合成桁橋への適用が容易となる<sup>4)</sup>。施工面の特徴としては、チャンネル形状版ではリブ部のみ鋼桁と接触することになるが、従来版と比較して鋼桁とプレキャスト床版の連結部のモルタル打設量が減少できる。図-2にチャンネル形状版とハンチ形状版の床版構造の比較を示す（ハンチ形状版は縦締めPC鋼材を用いる例である）。変断面により活荷重による曲げモーメントは床版厚の厚いリブ部で大きく分担され、従来のRC床版に比べ橋軸方向の曲げモーメント分布がリブ部と床版部の配置間隔を検討することにより広がり、設計上の有利点を見いだせる。しかし活荷重により発生する曲げモーメント分布の違いにより、活荷重曲げモーメント式および設計手法の新たな検討の必要性が生じている。

## 3. 実験の概要

### (1) 実験の種類

実験はチャンネル形状版の床版特性の把握と安全性の評価を目的として静的載荷実験3シリーズ（Ⅰ. 単体パネルの曲げ実験、Ⅱ. 一体化版曲げ実験、Ⅲ. 縦締めプレストレス量検討実験）と動的疲労実験2シリーズ（Ⅳ. 一体化版疲労実験、Ⅴ. 単体パネルの疲労実験）の合計5シリーズを行った。

表-1 主方向プレストレス導入直後の応力

測点	ひずみ ( $\mu$ )	応力度 ( $\text{N}/\text{mm}^2$ )				
		実測値	設計値	比率		
コンクリート 上面	C-1	-76	-2.72	-2.56	1.07	
	C-3	-71	-2.55	-2.56	1.00	
	C-5	-73	-2.62	-2.56	1.02	
	C-7	-75	-2.70	-2.56	1.05	
	C-9	-80	-2.87	-2.56	1.12	
主筋 (D13)	① 上	-105	-108	-3.87	-3.55	1.09
	① 下	-111				
	② 上	-201	-195	-7.00	-6.73	1.04
	② 下	-189				
	③ 上	-96	-104	-3.73	-3.55	1.05
	③ 下	-112				
	④ 上	-135	-141	-5.06	-4.74	1.07
	④ 下	-147				
	⑤ 上	-105	-110	-3.95	-3.55	1.11
	⑤ 下	-115				
	⑥ 上	-193	-203	-7.28	-6.73	1.08
	⑥ 下	-213				

注) 符号(+)...引張  
符号(-)...圧縮

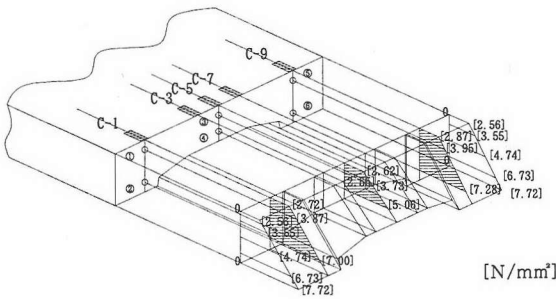


図-4 主方向プレストレス導入直後の応力分布

(2) 供試体

供試体(単体パネル)の形状寸法を図-3に示す。供試体は橋軸方向の版幅1490mmでリブ部の厚さは260mm、床版部の厚さは160mmとした。床版支間方向にプレテンション方式でパネル1枚当たり1617kNのプレストレスを導入した。緊張材はPC鋼より線SWPR7A 1T12.4mm(引張強度 $f_{pu}=160\text{kN}$ )を14本使用した。橋軸方向はPC鋼棒SBPR785/930 $\phi$ 26mm(引張強度 $f_{pu}=490\text{kN}$ )を用い、ポストテンション方式でプレストレスを導入した。コンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=50.0\text{N}/\text{mm}^2$ であるが、供試体における実測定値は、圧縮強度の平均で $\sigma_{c28}=60.0\text{N}/\text{mm}^2$ 以上、引張強度の平均は $\sigma_{t28}=3.53\text{N}/\text{mm}^2$ 、弾性係数は $3.28 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2 \sim 3.59 \times 10^4 \text{N}/\text{mm}^2$ であった。プレキャスト床版間の橋軸直角方向の目地は最大幅70mmであり、その目地にはプレキャスト床版コンクリートと同程度の強度を有する無収縮モルタルを打設した。縦締めPC鋼棒以外の鉄筋は目地部で不連続である。供試体は全てPC

正曲げ試験 No.1

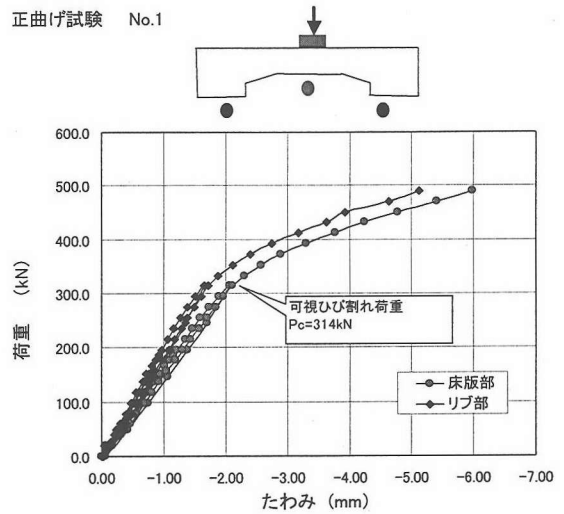


図-5 単体パネル曲げ試験 荷重-たわみ曲線

正曲げ試験 No.1

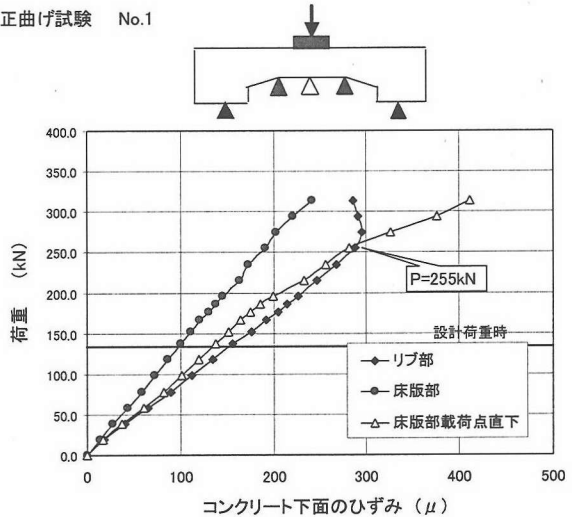


図-6 単体曲げ試験 荷重-ひずみ曲線(1)

工場のロングラインベンチで製作した。

各供試体の中央位置において、主方向プレストレスの導入量を、コンクリート表面のひずみゲージ及び、鉄筋ひずみゲージにより確認を行った。代表的な供試体の測定値を表-1に、また、図-4にプレストレス導入直後の応力分布をそれぞれ示す。プレストレス導入直後のコンクリート応力度は設計値に対して安全側となる1.05~1.10倍の値を示している。床版幅方向のプレストレス分布には偏りは認められず、高さ方向の応力分布では、上縁から下縁までほぼ直線で補間できる。このようにプレストレスが設計どおり断面に導入できることが確認できた。

表一 単体パネル曲げ実験設計値と実測値の比較

正曲げ面載荷 No.1 (N/mm <sup>2</sup> )	上縁		下縁		床版下縁	
	設計値	実測値	設計値	実測値	設計値	実測値
主桁自重	0.34	0.34	-0.48	-0.48	-0.17	-0.17
活荷重	5.05	4.91	-7.07	-5.10	-2.41	-4.60
直後プレストレス	2.56	2.69	7.72	8.12	5.73	6.03
有効プレストレス	2.15	2.27	6.50	6.84	4.83	5.08
導入直後合成応力度	2.90	3.03	7.24	7.64	5.57	5.86
許容応力度	-1.8< $\sigma$ <20.0		-1.8< $\sigma$ <20.0		-1.8< $\sigma$ <20.0	
静荷重時合成応力度	2.50	2.61	6.02	6.36	4.66	4.92
許容応力度	0.0< $\sigma$ <17.0		0.0< $\sigma$ <17.0		0.0< $\sigma$ <17.0	
設計荷重時合成応力度	7.54	7.52	-1.05	1.27	2.25	0.32
許容応力度	-1.8< $\sigma$ <17.0		-1.8< $\sigma$ <17.0		-1.8< $\sigma$ <17.0	

表一 単体パネル曲げ実験破壊荷重の比較

種別	供試体 No.	載荷種類	破壊荷重 (kN)			破壊形態
			実測値:A	理論値:B	A/B	
正曲げ	No.1	面 500×200	717	614	1.17	上縁圧壊
	No.7	面 500×200	666	614	1.09	上縁圧壊
	No.10	面 500×200	606	545	1.11	押抜せん断
	No.2	面 300×120	602	584	1.03	上縁圧壊
	No.8	線載荷	566	577	0.98	上縁圧壊

注) ・破壊荷重理論値: No.10供試体は押抜きせん断耐力, その他は曲げ耐力を示す

注) ・No.10供試体以外は縦締めプレストレス有り

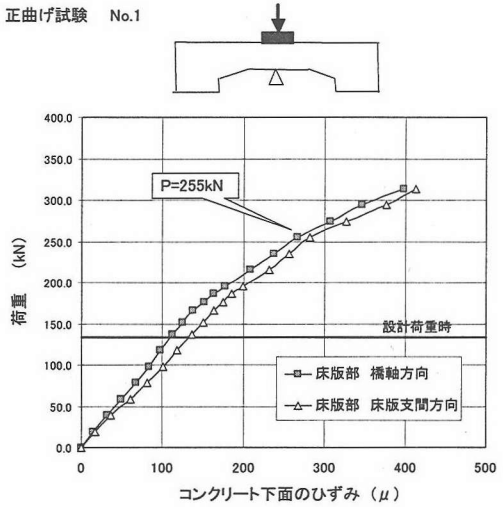
#### 4. 各種実験結果と考察

##### (1) 単体パネル曲げ実験

**実験概要:** チャンネル形状版単体パネルとしての耐荷特性を把握する目的から, 床版支間 2.2m の支間中央に載荷する単純曲げ実験を行った。荷重は輪荷重を想定した面積荷重 (500×200mm, または 300×120mm) をチャンネル版床版部に載荷するものと線荷重を載荷するものの2種類とした。なお, 本単体実験では, 実際の橋梁において橋軸方向のプレストレスを与えるので, 同様のプレストレス (床版部コンクリートにおける導入応力  $\sigma_e = 5.5 \text{ N/mm}^2$ ) を PC 鋼棒で与えた。比較のため, プレストレスしない供試体を用意した。

**実験結果:** 図一5に正曲げ面載荷試験の荷重とたわみの関係を示す。床版部に面載荷する場合, 面載荷部だけの局部曲げ変形が懸念されたが, 曲げ挙動は線載荷と同様, 床版部での卓越した局部変形は少なく, 床版幅 1.5m の全断面によるはりとしての挙動を示した。初期可視ひび割れは支間中央付近のリブ部下縁に生じ, 荷重は  $P_c = 314 \text{ kN}$  であった。荷重-たわみ曲線においてもその荷重付近で変曲点が現れており, ひび割れによる剛性の低下が生じていることが解る。図一6に可視ひび割れまでの荷重とコンクリート下面のひずみの関係を示す。床版部の載荷点直下では 200~250kN 付近, リブ部下縁では 255kN 付近で曲線の変曲点が現れている。目視では確認できなかったが, 全体の剛性に影響を及ぼさな

正曲げ試験 No.1



図一 単体曲げ試験 荷重-ひずみ曲線(2)

い極めて微小のひび割れが発生したと推測できる。グラフより推測したひび割れ荷重 ( $P_c = 255 \text{ kN}$ ) でのリブ下縁のひずみは  $295 \mu$  であるが, コンクリートの弾性係数  $E_c = 3.28 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$  で応力度に換算すると  $\sigma_c = -9.68 \text{ N/mm}^2$  となる。自重による引張応力度  $-0.17 \text{ N/mm}^2$ , コンクリートの引張強度  $\sigma_{ct} = -3.33 \text{ N/mm}^2$  とすると, 有効プレストレスによるコンクリート下縁の応力度は  $6.52 \text{ N/mm}^2$  と推定できる。設計値は  $6.50 \text{ N/mm}^2$  であるため, 材令 60 日の時点での評価であるがほぼ設計どおりのプレストレスが導入されていたと言える。

下面のひずみでは, リブ部, 床版部載荷点直下, 床版部, の順で同一荷重におけるひずみは小さくなる。これは, リブ部と床版部の差は中立軸からの距離の差によって生じるものである。また, 床版部載荷点直下のひずみは当然ながら載荷点以外の床版部のひずみより大きくなる。表一2に今回の設計値と実測値の合成応力度比較を示す。リブ部下縁では安全側となるが, 床版部載荷点直下では危険側と

表-4 押抜きせん断耐力の評価

	A:実験値	B:算定値	A/B
破壊面の傾き 主鉄筋方向	30° ~ 35°	34.1°	--
配力筋方向	30° ~ 35°	32.5°	--
押抜きせん断破壊耐力	1215kN	1193kN	1.018

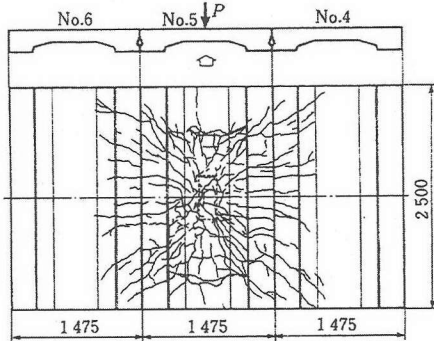


図-8 一体化版の曲げ実験 ひびわれ状況

なる。しかしながら、床版の設計ではリブ部上下縁の最大縁応力に着目して導入プレストレスを決定するため、床版部下縁での合成応力度はリブ部下縁に比べて支配的とはならない。

図-7に正曲げ試験面荷重供試体 No. 1 における床版部荷重点直下に発生する、床版支間方向ひずみと橋軸方向のひずみを示した。設計荷重  $P_d=134\text{kN}$  では、床版支間方向に  $\epsilon_{st}=137\mu$  (応力換算:  $4.59\text{N/mm}^2$ )、橋軸方向に  $\epsilon_{sl}=113\mu$  (応力換算:  $3.79\text{N/mm}^2$ ) 発生している。橋軸方向に発生する応力によって、縦締めプレストレスを与えない場合、床版支間方向のひび割れが発生する恐れがある。これは、縦締め無し供試体 No. 10 において、他の供試体より低い荷重  $P_c=235\text{kN}$  でひび割れが床版支間方向に発生していることから解る。チャンネル形状版は、その形状特性から縦締めプレストレスが必要であると言える。

表-3に破壊荷重の実験値と理論値の比較を示す。コンクリート上縁の圧壊による曲げ破壊した供試体では、全幅有効として算出したはり理論による破壊荷重値とほぼ一致していることがわかる。一方、縦締めプレストレスを導入しなかった供試体 No. 10 では、床版部での押抜きせん断破壊となり、耐力は曲げ破壊のより約1割低下した。No. 1 や7との比較から、チャンネル形状版単体パネルは縦締めプレストレスを導入することによって押抜きせん断破壊を抑制し、床版幅 1.5m 全幅有効なはりとして挙動することが解る。荷重面を  $300 \times 120\text{mm}$  の小さくした供試体 No. 2 も No. 1 と同様の

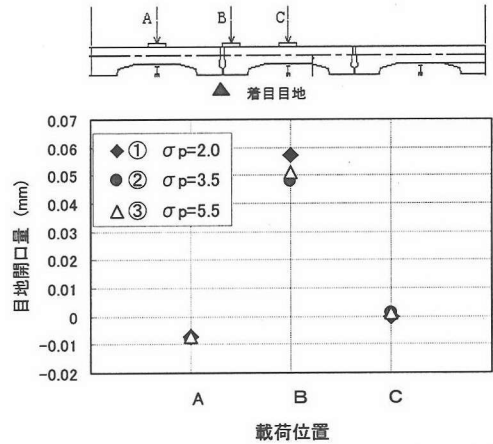


図-9 縦締めプレストレス量と目地開口量関係

曲げ破壊となった。理論値が若干小さいのはパネル軸方向の荷重幅 500mm から 300mm に減少したことによる。線荷重した No. 8 で実験値が理論値より小さくなったのは、荷重リブの剛性の影響でリブ部コンクリート上縁の局部圧壊が先行したためと思われる。

## (2) 一体化版曲げ実験

**実験概要:** チャンネル形状版は目地部施工後、縦締めプレストレスにより一体化した一方向版となる。一体化版としての挙動およびひび割れ耐力・静的破壊耐力を把握する目的から、単体パネル3体を縦締めにより一体化版とし、中央パネルの支間中央(床版支間 2.2m)に面荷重 ( $500 \times 200\text{mm}$ ) 実験を行った。縦締めプレストレス量は、床版部の応力度で  $\sigma_c=5.5\text{N/mm}^2$  とし、終局までの荷重を行った。

**実験結果:** 図-8に一体化版の曲げ試験における床版下面のひびわれ状況を示す。初期可視ひびわれは、道路橋示方書床版設計軸荷重  $P_d=100\text{kN}$  の約3.7倍の  $P_c=372\text{kN}$  で、荷重点直下の床版支間方向に発生した。その後、3枚の版にわたるひびわれ網が形成された。床版支間方向のコンクリートおよび鉄筋のひずみは供試体 No. 5 を中心にその両わきの供試体でほぼ対称のひずみ分布を示している。これは単体パネル3体が一体構造をなして抵抗したものと考えられる。

破壊形態は押し抜きせん断破壊であった(破壊荷重  $P_u=1215\text{kN}$ )。RC床版では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<sup>16)</sup>。チャンネル形状版についても、単体パネル3体に縦締めプレストレスを与え一体化版とすることによって、連続床版としての挙動を示し、破壊形態は押し抜きせん断破壊となった。

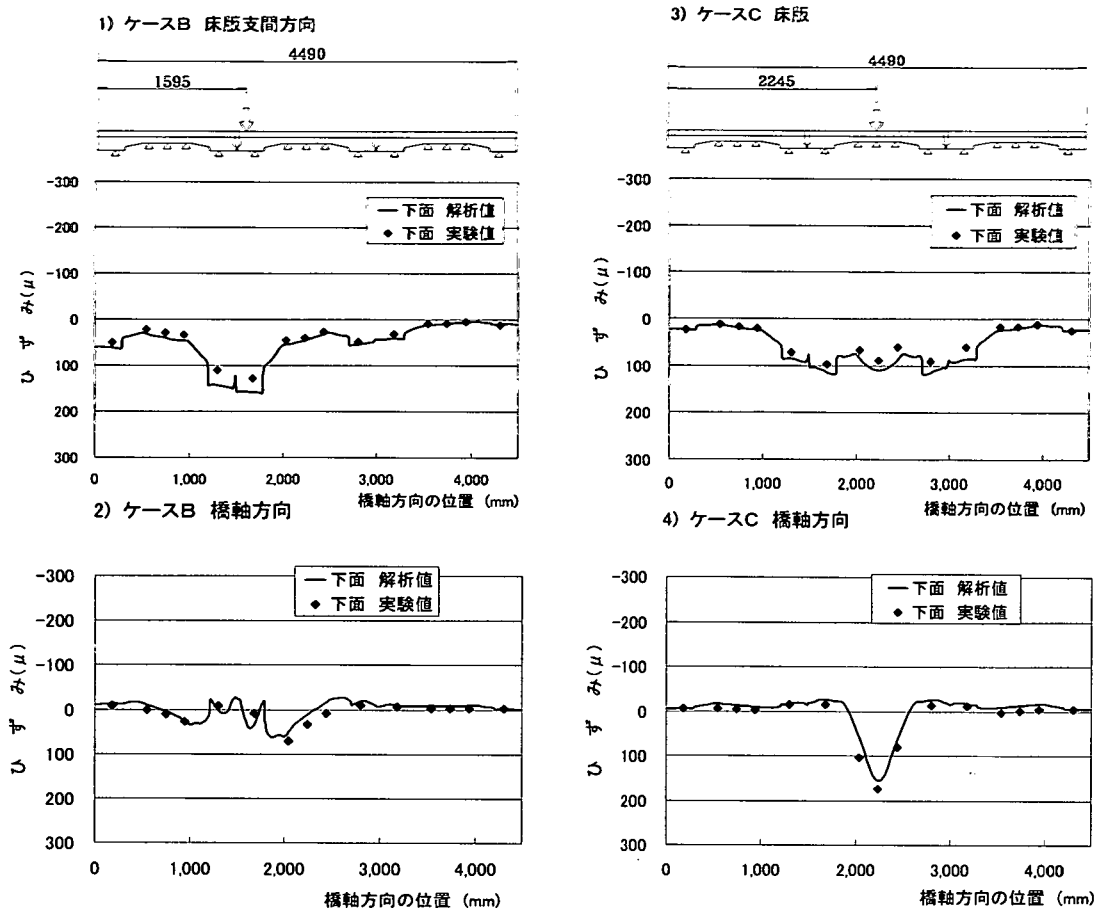


図-10 一体化版曲げ試験 ひずみ分布の比較

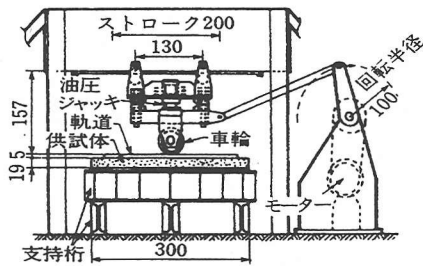
ひび割れ耐力、破壊耐力の双方が、はり挙動を示した単体パネルより大幅に上回ることが確認できた。

PC床版に対する押抜きせん断耐力の評価式の一つとして、東山・松井らの提案式がある<sup>6)</sup>。評価式をチャンネル形状版に適用すると、表-4の算定値となる。押抜きせん断破壊面の角度は、床版支間方向（主鉄筋方向）で  $34.1^\circ$ 、橋軸方向（配力鉄筋方向）では  $32.5^\circ$  となり、ほぼ実験供試体における実測値 ( $30^\circ \sim 35^\circ$ ) と一致する。また、そのプレストレスによる破壊角度を考慮した押抜きせん断破壊耐力は  $V_{cp} = 1193\text{kN}$  となり、実験値  $V_{cpe} = 1215\text{kN}$  とほとんど同値であった。供試体数一体での評価ではあるが、東山らの式を用いてプレストレスを導入したチャンネル形状版の押抜きせん断耐力を算定することが可能と考える。なお、この計算は輪荷重をパネル中央に載せた場合でリブの影響を無視できる。リブ上に載る場合はさらに大きな耐力となることは明らかである。プレストレスの影響を無視したRC床版としての押抜きせん断耐力の

算定値<sup>5)</sup>は  $V_{cpr} = 818\text{kN}$  となる。プレストレスの影響によって 1.45 倍に向上しており、2方向プレストレスを導入したチャンネル形状版の押抜きせん断耐力は大きく向上すると言える。

### (3) 縦締めプレストレス量検討実験

**実験概要：**橋軸方向縦締めプレストレス量の変化に対して、板構造としての一体性の検証を行った。一体化版曲げ実験と同様の供試体を用い床版支間 2.2m で載荷実験を行った。床版部コンクリートのプレストレス導入応力として次に示す3段階に変化させた。①  $\sigma_c = 5.5\text{N/mm}^2$ 、②  $\sigma_c = 3.5\text{N/mm}^2$ 、③  $\sigma_c = 2.0\text{N/mm}^2$ 。載荷は、面載荷 ( $500 \times 200\text{mm}$ ) とし、荷重の最大値  $P_{max} = 152\text{kN}$  とした。これは、実際通行荷重の実測輪荷重の最大値（接地面積  $500 \times 200\text{mm}$ ）<sup>15)</sup>である  $P = 137\text{kN}$  (14tf) を 10% 超えるものである。床版支間中央のラインにおいて図-9に示す3点の載荷位置を設定した。床版挙動および単体パネル間の目地開口量の比較を行った。



- 荷重能力 : 100~300kN
- 荷重移動範囲 : 床版中央より±100cm
- 荷重幅 : 12cm×30cm
- 走行速度 : 112m/min (28 往復/min)
- 車輪の径と幅 : 50cm, 30cm

図-11 輪荷重走行試験機

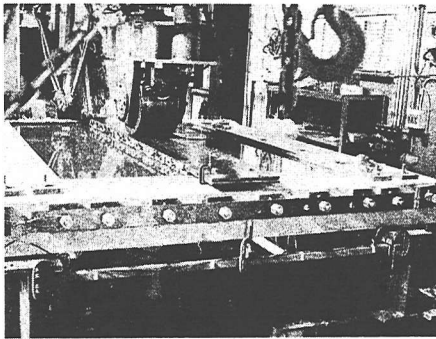


写真-1 連続版疲労試験 (水張り状態)

実験結果: 図-9に示すように、一体版として縦締めプレストレス量の違いによる目地部開口量の差異はなく、同様に、たわみ性状も差異は認められなかった。今回の実験で導入した3水準の縦締めプレストレス量 ( $\sigma_c=2.0, 3.5, 5.5 \text{ N/mm}^2$ ) では、一体版としての挙動に大きな影響は与えないことが解った。従って、橋軸方向の断面設計において決定される縦締めプレストレス量が多少変動しても設計荷重時において、チャンネル形状版は一体化した連続床版として挙動するものと推定できる。

一体化版としてのひずみ分布特性を検証する目的から、各荷荷位置 (荷重  $P=152\text{kN}$ ) におけるひずみ分布をFEM解析により求めた。実験値は  $\sigma_c=5.5 \text{ N/mm}^2$  のデータを用い解析値との比較を行った。図-10に下面のひずみ分布の比較を示すが、実験値と解析値は若干の違いはあるものの、分布形状はほぼ一致しており実験値を再現できている。床版支間方向のひずみは、リブ部載荷Bのほうが床版部載荷Cより大きな最大応力度を示す。したがって、床版支間方向の設計では、リブ部に輪荷重が載荷される

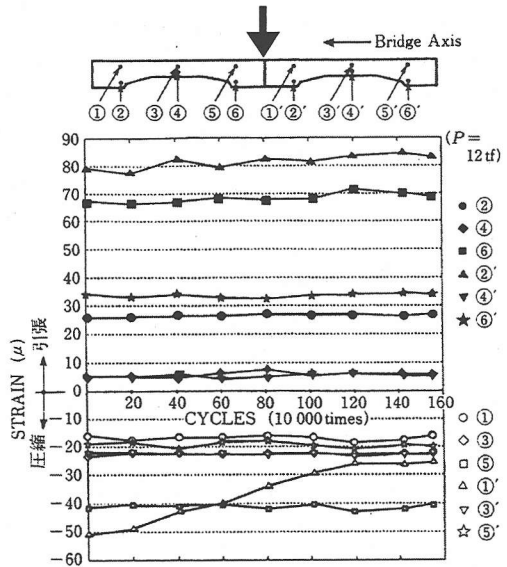


図-12 連続版疲労実験 サイクル-鉄筋ひずみ曲線

ケースの発生曲げモーメントを用いる必要がある。一方、橋軸方向のひずみは、床版部載荷Cの床版部で卓越した最大ひずみ値となるものの、リブ部にはほとんど発生せず、リブ部載荷Bでは載荷Cで発生する最大ひずみ値の1/2以下でしかない。つまり、橋軸方向の設計では床版部断面に発生する最大曲げモーメントを用いて床版部の薄い断面に着目して縦締めプレストレス量を決定する必要がある。

#### (4) 疲労実験

実験概要: プレキャスト床版は、単体パネル間の接合目地部が弱点となる可能性がある。接合目地部の疲労耐久性を検証する目的から、単体パネル2体を一体化版とし図-11の輪荷重走行試験機による疲労実験 (連続版疲労実験) を行った。更に、水張り載荷を行い (写真-1)、水に対する抵抗性を調べた<sup>7)</sup>。また、チャンネル形状版では床版部厚さを最小16cmとしているため、この部分の疲労耐久性の確保も重要となる。床版部の疲労強度を確認するため、チャンネル形状版の単体パネルを中央に置き、部材厚が薄い床版部分の橋軸に直角の断面に作用する交番せん断力によるせん断力振幅が最大になるようにして疲労実験 (単体版疲労実験) を実施した。左右75cm幅についてはリブ部の厚さと同厚のPC床版を使用した。両疲労実験の供試体は、単体パネル曲げ実験で用いたものと同様の寸法であり、床版支間2.2mの支間中央に移動載荷を行っ



た。なお、縦締めプレストレス量は床版部コンクリート応力で $\sigma_c=5.5\text{N}/\text{mm}^2$ を導入した。

実交通下での最大輪荷重は $P=137.2\text{kN}(14\text{tf})$ であり<sup>15)</sup>、接地面積は $500\times 200\text{mm}$ の面積上で作用する。輪荷重走行試験機では、接地面積を $300\times 120\text{mm}$ としているので、載荷板のエッジで発生する最大せん断力は、実タイヤによる接地面で発生するものの約1.2倍となる。そこで、疲労試験における載荷荷重は、実交通下での最大輪荷重による最大せん断力と同等なせん断力を発生する荷重とすることとし、 $P=117.6\text{kN}(14\text{tf}/1.2=11.6\text{tf}\approx 12\text{tf})$ とした。繰り返し回数は既往の輪荷重走行試験機による道路橋床版の疲労実験結果<sup>15)</sup>より、床版の疲労耐久性性能の評価が可能となる100万回を目標とした。100万回後において健全であったので、目地部の健全度をさらに確認するため、写真-1に示すよう、床版上面に面木で水張り用プール堰堤を作成し、その中に水深1cmの水を張り50万回の疲労試験を続行することにした。もし、目地部において、充填モルタルにひびわれや付着低下があれば、簡単に水が下面にしみ出ることが確認できるためである。

単体版疲労実験では、先の連続版で中央部には全く異常は発生しなかったもので、同じ載荷荷重( $P=117.6\text{kN}$ )で50万回まで疲労載荷することにした。

**実験結果：**連続版疲労実験では、乾燥状態における100万回の疲労試験終了時に至るまで、目視によるひびわれは全く発生しなかった。さらに、水張り状態での50万回の走行試験においても最後まで床版下面での漏水は見られなかった。無収縮モルタルによる目地充填は、特に問題は無いと言える。

図-12に鉄筋ひずみ-サイクル関係の結果を示す。コンクリートおよび鉄筋のひずみは、繰り返し回数を重ねてもほとんど変化がみられなかった。測定位置①'リブ部上縁鉄筋のひずみは他の測定位置とは明らかに違い、繰り返し回数を重ねるとひずみが減少している。原因は特定できていないものの、その他の測定点の挙動から判断して、疲労による損傷ではないと考える。

単体版疲労実験では、チャンネル形状版の床版部は16cmと薄い構造になっているが、活荷重振幅が最大となる中央部でも一体化版と同様にひびわれの発生はなく健全な状態であった。コンクリート表面ひずみ、鉄筋ひずみとも、載荷初期から載荷終了までほとんど変化は無く、疲労耐久性は充分あることが確認できた。

## (5) まとめ

チャンネル形状プレキャストPC床版の床版特性の把握と安全性・信頼性の評価を目的として、系統だった一連の各種実験を行った。結果として、静的には非常に大きな耐荷力を有するとともに、輪荷重走行に対する疲労耐久性も設計輪荷重に対して問題のないものであることが解った。

単体パネルは、1.5m幅全断面にプレストレスが一樣に導入でき、床版支間方向の曲げに対して一方方向はりとしての挙動を示す。床版支間方向では単体パネル幅1.5m全断面有効なはりとして応力計算を行い、導入プレストレスを決定する設計手法を提案できる。また、縦締めプレストレスにより一体化した床版では、ひび割れ耐力、破壊耐力とも単体パネルより大幅に上回ることが確認できた。

橋軸方向については、単体パネルでは床版部に面載荷する場合、載荷点直下に橋軸方向応力が発生するため、縦締めプレストレスを導入する必要がある。また、一体化した床版における橋軸方向の応力は、床版部載荷点直下で大きくなるものの、リブ部では支配的な応力は発生しないことが、実験値およびFEM解析により確認できた。橋軸方向の設計は、床版部の断面に着目して縦締めプレストレス量を決定する必要がある。

チャンネル形状版の設計を合理的に行うためには、支間長の変化に対応した、活荷重によって発生する曲げモーメントを正確に把握する必要がある。次章では、有限要素法解析により活荷重応力の分布特性を明確にし、それに基づき活荷重に関する設計曲げモーメント式を誘導する。

## 5. 設計曲げモーメント式

チャンネル形状版の活荷重による設計曲げモーメント式を導くために、二次元平面要素による弾性板解析を行った。以下に詳述する。

### (1) 単純版モーメント

#### a) 解析概要

2主鋼桁で支持された単純床版を変厚板としてモデル化し、直交異方性版理論に基づく弾性FEM解析を行った。荷重は道路橋示方書のB活荷重の片側輪荷重( $P=100\text{kN}$ )を載荷面積 $200\times 500\text{mm}$ の長方形等分布荷重とした。床版は張り出し床版部を設けず中床版部のみとし、T荷重の占有幅(後輪軸で、輪荷重の中心間隔が1750mm)と隣接する車両間隔( $250+500+250=1000\text{mm}$ )を考慮し、載荷可



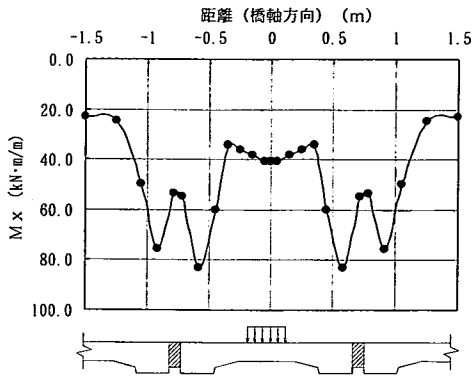


図-13  $M_x$  の橋軸方向分布 (支間 6m, 床版部載荷)

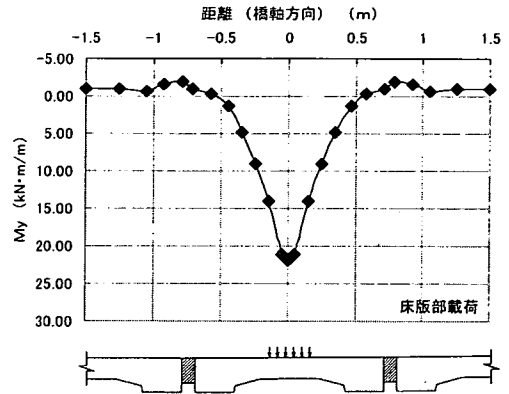


図-15  $M_y$  の橋軸方向分布 (支間 2m, 床版部載荷)

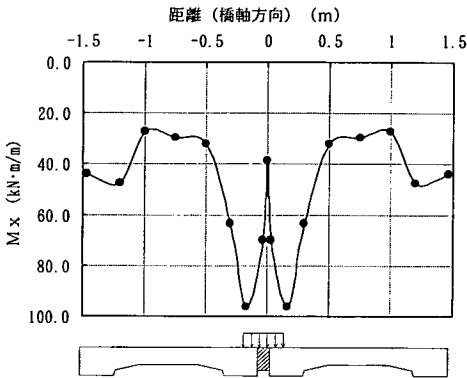


図-14  $M_x$  の橋軸方向分布 (支間 6m, リブ部載荷)

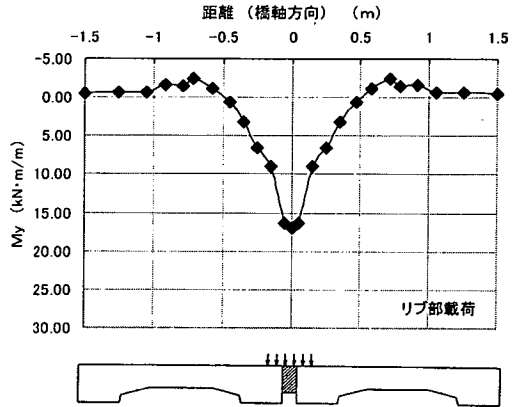


図-16  $M_y$  の橋軸方向分布 (支間 2m, リブ部載荷)

能なかぎりの輪荷重を満載し、着目点で発生する曲げモーメントが最大になる荷重位置を検討して最大曲げモーメントを求めた。床版支間は 2m, 3m, 4m, 5m, 6m の 5 ケースとした。なお、各床版支間長  $L$  に対する床版部の最小厚は  $t_s = 20 \times L + 120(\text{mm})$  により求めた値を基本とした。これは、床版部の押抜きせん断破壊耐力がチャンネル形状版 1.5m 全断面有効として算出した曲げ破壊耐力を上回るように定めた。床版部の幅は 900mm を基本として、リブ部との高さの急激な変化を緩和するために高さ 50mm、長さ 200mm のハンチを設けることとした。リブ部の厚さは  $t_r = t_s + 100(\text{mm})$  以上を基本とした。チャンネル形状版は床版厚が厚いリブ部へ輪荷重を載荷する場合と、床版厚が薄い床版部へ載荷する場合は、発生する曲げモーメントが異なるため、輪荷重の載荷位置はリブ部と床版部の 2 種類について解析を行った。橋軸方向の長さは、床版発生モーメントに影響を及ぼさない無限版として扱えるよう、床版支間の 4 倍の長さとした。床版と鋼桁はリブ部での結合とし、床版支間方向は回転は拘

表-5 単純版の  $M_y/M_x$  の値

床版支間 (m)	床版部厚 (mm)	リブ部厚 (mm)	版剛性比 $D_y/D_x$	床版部載荷 $M_{ys}/M_{xs}$	リブ部載荷 $M_{ys}/M_{xs}$
2.0	160	260	0.37	0.99	0.64
3.0	180	280	0.42	0.88	0.71
4.0	200	300	0.46	0.82	0.73
5.0	220	320	0.50	0.83	0.76
6.0	240	340	0.53	0.84	0.80

束せず、橋軸方向は回転を拘束した

b) チャンネル形状版の曲げモーメント分布

床版支間方向曲げモーメント  $M_x$

図-13に床版支間 6m、床版部載荷の場合の床版支間方向曲げモーメント  $M_x$  (床版支間中央) の橋軸方向の分布を示す。また、図-14に床版支間 6m、リブ部載荷の場合の床版支間方向曲げモーメント  $M_x$  (床版支間中央) の橋軸方向の分布を示す。床版支間方向曲げモーメント  $M_x$  の分布形状は支間 2m~6m において概ね図-13、図-14に示す傾向であり、代表例として床版支間 6m の図を掲載した。

床版部載荷の場合、床版支間方向の曲げモーメント  $M_x$  は載荷点直下の床版部で最大値を示して

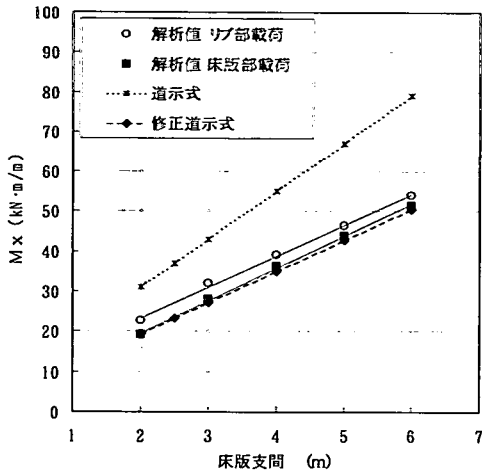


図-17 設計曲げモーメント式  $M_x$  の比較

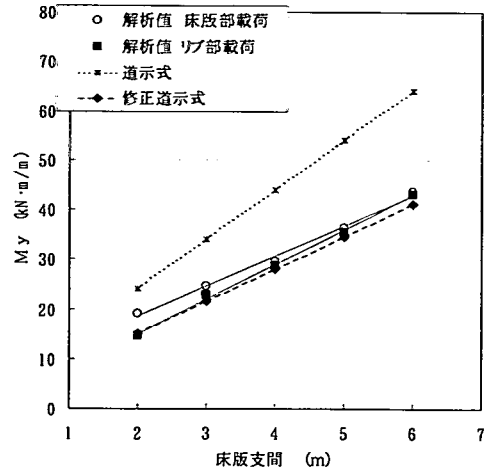


図-18 設計曲げモーメント式  $M_y$  の比較

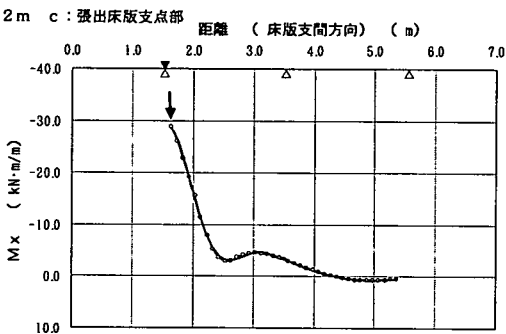
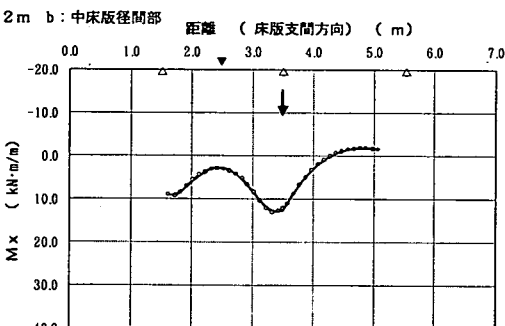
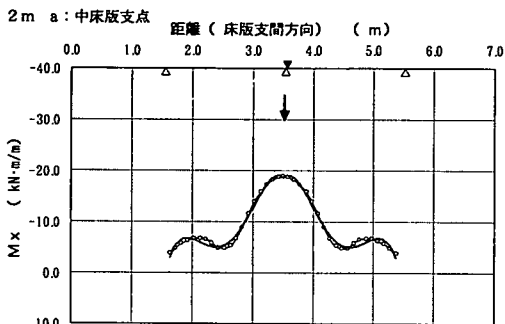


図-19 連続版  $M_x$  の影響線図 (支間2m)

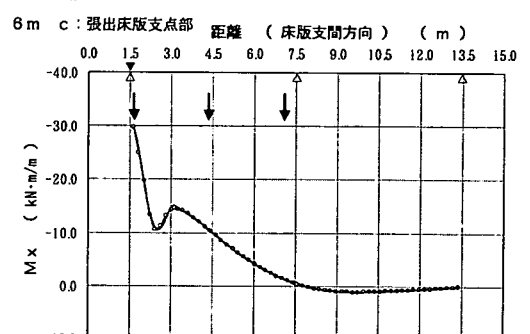
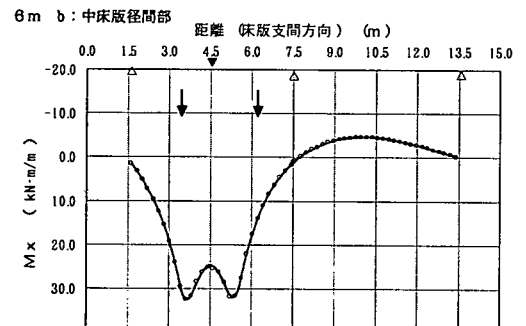
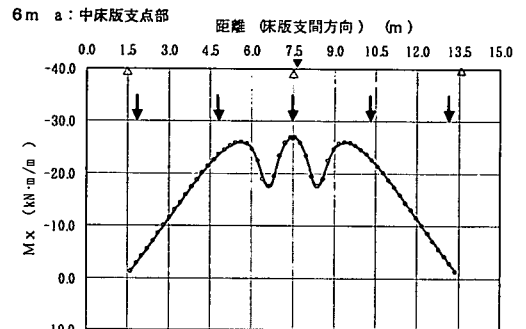


図-20 連続版  $M_x$  の影響線図 (支間6m)

表一六 連続版の床版支間方向曲げ  $M_x$  の各支間における最大値

		床版支間方向曲げモーメント $M_x$ (kN・m/m)					
床版支間 (m)	単純版 支間中央 $M_{xs}$	連 続 版					
		中間支点		支間中央		張出支点	
		$M_{xca}$	$ M_{xca}/M_{xs} $	$M_{xcb}$	$ M_{xcb}/M_{xs} $	$M_{xcc}$	$ M_{xcb}/M_{xs} $
2	22.25	-18.42	0.83	12.74	0.57	-27.83	1.25
3	32.14	-32.63	1.02	19.40	0.60	-30.58	0.95
4	38.32	-52.33	1.37	28.62	0.75	-34.89	0.91
5	45.57	-64.29	1.41	37.34	0.82	-39.30	0.86
6	52.82	-79.18	1.50	43.71	0.83	-41.26	0.78

表一七 連続版の橋軸方向曲げ  $M_y$  の各支間における最大値

		橋軸方向曲げモーメント $M_y$ (kN・m/m)					
支間(m)	床版部載荷			リブ部載荷			
	a: 中間支点	b: 支間中央	c: 張出支点	a: 中間支点	b: 支間中央	c: 張出支点	
	$M_{ya}$	$M_{yb}$	$M_{yc}$	$M_{ya}$	$M_{yb}$	$M_{yc}$	
2	-8.1	12.9	-10.0	-1.8	8.7	-0.6	
3	-8.6	19.5	-12.1	-2.0	15.9	-2.0	
4	-9.3	26.3	-13.9	-2.3	24.0	-4.7	
5	-9.5	32.6	-16.5	-2.6	31.6	-6.5	
6	-10.5	39.0	-18.9	-2.8	38.3	-9.7	

表一八 連続版の  $M_y/M_x$  の値

床版支間 (m)	版剛性比 $D_y/D_x$	床版部載荷	リブ部載荷
		$M_{yca}/M_{xca}$	$M_{ycb}/M_{xcb}$
2	0.37	1.12	0.67
3	0.42	1.15	0.80
4	0.46	0.95	0.82
5	0.50	0.93	0.83
6	0.53	0.94	0.86

らず、プレキャスト床版両端のリブ部で最大値を示しており、隣接する次のプレキャスト床版のリブ部にも床版部より大きな曲げが発生していることが解る。これは、床版部とリブ部の曲げ剛性の違いによるものである。剛性一定の在来の床版では、曲げモーメント  $M_x$  は載荷点直下でピーク値を示し、橋軸方向に載荷点から距離が遠ざかるに従って収束するので、チャンネル形状版の曲げ分布範囲は床版部とリブ部の配置間隔に影響を受けることになる。

リブ部載荷の場合は、載荷点であるリブ部において床版支間方向曲げモーメント  $M_x$  は最大値を示し、その値は床版部載荷の最大値より大きい。床版部に発生する  $M_x$  は床版部載荷の場合とほぼ同程度の値となっている。また、載荷されているリブの次のリブにおいても、床版部よりも大きな曲げモーメントの値となっている。床版単体パネルと一体化版の曲げ実験において、リブ部載荷の発生応力度は単体パネル幅全断面有効なはりとして計算した応力度と合致し<sup>1)</sup>、床版部載荷の場合では、リブ部載荷より発生応力度は小さくなり断面設計上支配的とならないことが確認できている（図-10 参照）。本解析においてもリブ部載荷の曲げモーメントが大きくなるため、床版支間方向の設計ではその曲げモーメントを用いて全断面有効なはりとしての設計を行えば良いと考える。

#### 橋軸方向曲げモーメント $M_y$

図-15に床版支間 2m、床版部載荷の場合の橋軸方向曲げモーメント  $M_y$  (床版支間中央) の橋軸方向の分布を示す。また、図-16に床版支間 2m、リ

ブ部載荷の場合の橋軸方向曲げモーメント  $M_y$  (床版支間中央) の橋軸方向の分布を示す。橋軸方向の曲げモーメント  $M_y$  に関しては、床版部に載荷した場合、その載荷横断面が支配的であり、リブ部下縁ではその断面剛性に相応する曲げ応力は発生しないことは、2(3)縦締めプレストレス量検討実験の結果において述べたとおりである。これは、床版部とプレキャスト床版間の目地部（無収縮モルタル充填施工）の高さが同じであり、リブ部の下縁付近には応力が伝わりにくくなっているためである。

本解析ではこの実験結果を踏まえて、橋軸方向の断面剛性を床版部の剛性  $D_{ys}$  一定とし解析を行った。橋軸方向曲げモーメント  $M_y$  の橋軸方向の分布は、在来の床版と同様、載荷点直下で最大値を示し載荷点から橋軸方向に距離が遠ざかるに従って収束する分布形状を示すものとなった。

#### 床版異方性の影響

表-5に版剛性比  $D_y/D_x$  ( $D_x$ : 床版支間方向チャンネル形状版1.5m幅の版剛性,  $D_y$ : 橋軸方向の床版部の断面1.5m幅の版剛性) と床版部載荷の場合およびリブ部載荷の場合の橋軸方向曲げモーメント

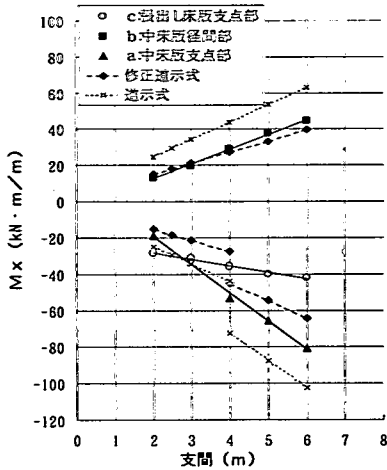


図-17 設計曲げモーメント式  $M_x$  の比較

に対する床版支間方向曲げモーメントの発生比率  $M_y/M_x$  を示す。床版部載荷の場合は、リブ部載荷の場合と比較して  $M_y$  の発生比率が大きくなるが、床版支間が長くなり版剛性比の異方性度が小さくなるにつれ、 $M_y/M_x$  は床版部載荷とリブ部載荷でほぼ同じ値 ( $M_y/M_x=0.8$ 程度) となる。リブ部載荷の場合は、床版の異方性の影響を受け、 $M_y$  の発生比率が小さくなる。

### c) 単純版の設計曲げモーメント式

弾性板解析で得られた各載荷ケースで最大曲げを示す位置において、直交方向の曲げモーメント分布を抽出し、 $M_x$  はプレキャスト床版幅 1.5m、 $M_y$  は 1m 幅で積分を行い、積分値が最大となるケースで 1m 当たりで修正しこれを各支間の代表値： $M_{x(L)}$ 、 $M_{y(L)}$  とした。 $M_{x(L)}$  と  $M_{y(L)}$  と床版支間  $L$  に対する関係を図-17 (床版支間方向曲げモーメント)、図-18 (橋軸方向曲げモーメント) に示す。 $M_{x(L)}$ 、 $M_{y(L)}$  を最小二乗法による直線近似を行い、床版支間  $L$  に関する一次式で表すと

$$M_{x(L)} = (0.007L + 0.080)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (1)$$

$$M_{y(L)} = (0.061L + 0.064)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (2)$$

ここに、

$P$  : T 荷重の片側荷重 (=100kN)

道示式に比較してチャンネル形状版の提案式は小さい設計曲げを示すことになるが、これは

①道示式には施工上の不確定要素を考慮して 10~20% 程度の余裕量を見込んでいる。

②道示  $M_x$  式は、衝撃係数分を含んでいる。

上記①、②の要素を除いた曲げモーメントを図中の修正道示式として表した。なお、①の要因は一律 15% を減じた。修正道示式とチャンネル形状版の発

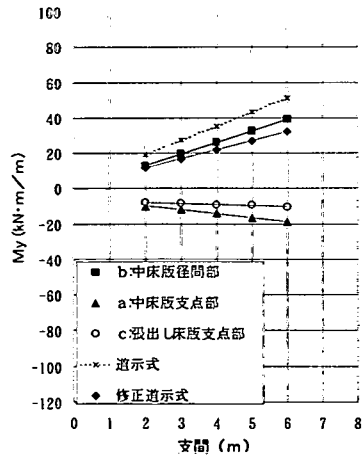


図-18 設計曲げモーメント式  $M_y$  の比較

生曲げを比較してみると、 $M_x$ 、 $M_y$  とも若干チャンネル形状版が大きいものの、ほぼ同様の値であると言える。チャンネル形状版の活荷重曲げモーメント式に対しても道示式と同様に①余裕量 15% 程度、②衝撃係数をそれぞれ見込み用いるのが妥当と考える。

## (2) 連続版のモーメント

### a) 解析概要

①3 主桁で支持された連続床版を対象とした。主桁間隔は等しく、その床版支間  $b$  は単純版の解析と同様 2m、3m、4m、5m、6m の 5 ケースとした。解析モデルはすべて 1.5m の張出し床版を設けた。橋軸方向の長さは単純版と同様に中床版支間長の 4 倍の長さとした

②荷重は B 活荷重の T 荷重 1 組を用い、張出し床版端部から 0.75m (地覆幅は 0.5m と仮定) の位置に載荷を行い、0.1m 間隔をもって T 荷重 1 組を幅員方向に移動させ曲げモーメントの影響線を作成した。影響線の着目は a. 中床版支点部、b. 中床版径間部、c. 張出し床版支点部の 3 断面とした。張出し床版支点部断面は片持ち部を 1.5m と一定にしているが、これは中床版側の支間と載荷の状態に影響されるものであるため、トラックの実両車輪の同時載荷を考えない道路橋示方書の片持版の曲げモーメントとは比較できない。

③支間ケースについて影響線図の作成を行ない影響線図の同一符号の領域に載せ得るかぎりの T 荷重の正数組を載荷し最大モーメントを算出した。

### b) 解析結果と考察

#### 床版支間方向曲げモーメント $M_x$

図-19、20 に床版支間方向曲げモーメント  $M_x$  の各着目点の影響線図 (代表支間として 2m と 6m を掲載) を示すが、T 荷重 1 組の中心位置で表した。

表一〇 プレキャスト床版の試設計による計算結果の比較

床版厚 (cm)	単位重量 (kN/m <sup>2</sup> )	M1 <sup>*</sup> (kN・m)	曲げ応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		PC鋼材 (本/m)	プレ応力度 (N/mm <sup>2</sup> )		合成応力度 (N/mm <sup>2</sup> )	
			上縁	下縁		上縁	下縁	上縁	下縁
ハンチ形状版		(床版幅100cmで設計)			※PC鋼材種類は1S15.2mmB種			許容値 0<σ<17	
30	7.35	99.87	8.86	-8.86	17	7.33	9.33	16.19	0.47
31	7.64	99.87	8.37	-8.37	16	6.66	8.51	15.03	0.14
32	7.84	99.87	7.92	-7.92	16	6.44	8.26	14.36	0.34
チャンネル形状版		(床版幅150cmで設計)			※PC鋼材種類は1S15.2mmB種			許容値 0<σ<17	
31-21	5.98	126.87	9.24	-12.36	16	7.36	12.58	16.6	0.22
32-22	6.27	126.87	8.72	-11.58	16	7.05	12.13	15.77	0.55
33-23	6.47	126.87	8.25	-10.89	16	6.94	11.48	15.19	0.59

注) \*活荷重による曲げモーメント

これらの影響線図から最大曲げモーメントを算出した結果を表一六に示す。床版支間長が長くなる影響は中間支点部の負曲げモーメントに現れることが判る。床版支間6mでは最大5組のT荷重が載荷でき、そのうち3組が中間支点部に大きな影響を与えている。

連続版の床版支間方向曲げモーメントは全てのケースにおいて、リブ部載荷の方が床版部載荷のケースより大きなモーメント値を示した。これは後述する橋軸方向の曲げモーメント  $M_y$  の傾向とは逆となっている。表一八に  $M_y/M_x$  値を示すが、単純版と同様に、リブ部載荷では床版部載荷より  $M_y/M_x$  が小さく、リブの荷重分担が大きくなって  $M_x$  が大きくなるためである。

表一六の単純版支間中央の  $M_{xs}$  に対する連続版  $M_{xc}$  の比から判るように、中間支点aのモーメント  $M_{xca}$  は床版支間が大きくなるほどその比率も大きくなり支間6mでは  $M_{xs}$  の1.5倍の値となった。これは、連続床版では床版支間が長くなれば中間支点に影響を与える荷重の組数が多くなるためである。床版支間2mの場合、単純版で支間中央に影響を与えるT荷重は1組であり、連続版でも中間支点に影響を与えるT荷重は1組となるが、床版支間6mの場合には、単純版のT荷重2組に対して、連続版ではT荷重5組となる。一方、支間中央bのモーメント  $M_{xcb}$  では  $M_{xs}$  に対して0.57~0.83倍の値となった。これは支間6mの影響線図b：中床版径間部でも解るとおり、連続床版において着目する床版支間中央の影響範囲は着目径間のみとなり、載荷できるT荷重の組数は単純版と同様で、連続版構造の特性によるモーメントは減少する。本解析では支持桁の不等沈下の影響は現行道路橋示方書と同様に考慮していないが、通常のRC床版形状における連続床版の鋼桁不等沈下の影響は、不等沈下を考えない解析で求めた曲げモーメントに対して、支間中央部モーメントは50~80%増加し、また中間支点部モーメント

は25~30%減少することが報告されている<sup>10)</sup>。従って、提案するチャンネル形状版の連続床版に対する設計曲げモーメント式とは別途支持桁の不等沈下の影響を考慮する必要がある。

#### 橋軸方向曲げモーメント $M_y$

表一七に橋軸方向曲げモーメント  $M_y$  の各支間における最大値を床版部載荷とリブ部載荷について示す。 $M_y$  では  $M_x$  とは異なり、床版部載荷のケースが各支間の各着目点において最大値を示した。

従来形状の床版では、片持ち床版を除けば、橋軸方向曲げモーメントは支間中央断面の正曲げモーメントに着目しているが、チャンネル形状版では、床版は鋼桁上でリブ部のみで断続的に支持されているため、支点上で橋軸方向に負の曲げが、また、支点上床版部に輪荷重が載荷された場合は床版部に正の曲げが発生する。曲げの値は中床版中央部の方が卓越しているため橋軸方向の設計は、この部位の方が支配的となる。しかし、中間支点上は負の曲げが発生するため、PC鋼材の配置を行う等、従来の床版形状とは異なる留意が必要となる。

#### c) 連続版の設計曲げモーメント式

各床版支間の各着目断面の影響線図から得られた最大(最小)モーメント値を縦軸に、床版支間  $L$  を横軸にとりグラフ化したものを図一21(床版支間方向曲げモーメント)、図一22(橋軸方向曲げモーメント)に示す。単純版と同、 $M_x(L)$ 、 $M_y(L)$  を最小二乗法による直線近似を行い、床版支間  $L$  に関する一次式で表すと、

床版支間方向設計曲げモーメント式

a. 中床版支点部

$$M_{xca} = -(0.156L - 0.121)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (3)$$

b. 中床版径間部

$$M_{xcb} = +(0.082L - 0.037)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (4)$$

c. 張出し床版支点部

$$M_{xcc} = -(0.036L + 0.210)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (5)$$

橋軸方向設計曲げモーメント式

a. 中床版支点部

$$M_{yca} = -(0.022L + 0.054)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (6)$$

b. 中床版中央部

$$M_{ycb} = +(0.065L - 0.001)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (7)$$

c. 張出し床版支点部

$$M_{ycc} = -(0.006L + 0.069)P \quad (\text{kNm/m}) \quad (8)$$

図-21、22中に示す修正道示式は単純版と同様に余裕量15%と衝撃係数分を除いたものである。

チャンネル形状版の連続床版に関する曲げモーメントの提案式は道示式で示されるような、単純版の曲げモーメント式を一定の割合を以て表すことは難しいと考え(表-8に  $M_x$  の連続版の単純版に対する比率を示す)、単純版とは別に連続版としての支間長に関する一次式で表した。チャンネル形状版の中床版径間部の提案式では、 $M_x$ 、 $M_y$ とも修正道示式と比較してほぼ同様の値をとる。一方、中床版支点部の提案式では、修正道示式より大きな値をとる。チャンネル形状版では、橋軸方向曲げモーメント  $M_y$  の支点部の負曲げに対して新たに式を設けた。本提案式はチャンネル形状版の断面形状を予備検討により仮定して解析を行ったが、チャンネル形状版の断面形状の寸法が多少異なったとしても提案式の値と差異がないことを確認している。

## 6. チャンネル形状版の設計概要

チャンネル形状版の設計の概要を以下に示す。

### ① 活荷重による設計曲げモーメント

本稿に示す設計曲げモーメント式を基本として用い、余裕量と衝撃を考慮し算出する。

床版支間方向は単体パネル幅1.5mを基本として設計を行うため、活荷重による曲げモーメントは提案式を1.5倍して用いる。

道路橋示方書では、「設計曲げモーメント式には、理論式を導いたときの仮定と実際の構造との違いや、床版を施工するときを生じる床版厚や配筋の誤差などを考慮して、通常よく用いられる床版支間範囲内で、理論値に対して10~20%の安全をみた式となっている。」としているが、当然、チャンネル形状版にも同様の安全率を見込む必要があると考ええる。ただし、連続版の解析結果と考察で述べたように、床版支間が長くなると、実際ではまれにしか起こらない載荷状態で最大曲げモーメントの理論値が決定されることになり、一方、床版支間2mでは常に理論値に対応する載荷状態となっていることが予想できる。従って、チャンネル形状を適用する最大床版支間を6mと想定し余裕量を10%見込み、床

版支間2mでは20%見込むものとし、一次補間で6m~2mの床版支間に適用するのが適当と考える。また、衝撃に関しては現行の示方書に規定されている衝撃係数を用いることが妥当と考える。

連続版は鋼桁の支持条件を考慮し不等沈下による曲げモーメントを別途考慮する必要がある。

### ② 床版支間方向

床版支間方向の設計断面は、単純版では、正曲げに対して：床版支間中央部、負曲げに対して：片持ち部支点部とし、連続版では、正曲げに対して：b. 中床版径間部、負曲げに対して：a. 中床版支点部、c. 張り出し床版支点部(或いは片持ち部支点部)とする。なお、今回の検討では風荷重や衝突荷重が支配的となる片持ち部支点部については検討を行っていない。

各設計断面における応力計算は、チャンネル形状断面を床版単体パネル幅1.5mの全断面を有効として取り扱い、床版縁応力(床版上縁とリブ部下縁)に着目して導入プレストレス量を決定する。その際、PC鋼材配置は、プレストレス応力が断面に均一に導入されるよう考慮する。

### ③ 橋軸方向

橋軸方向の設計断面は、単純版では、正曲げに対して：b. 中床版径間部、片持ち部先端、負曲げに対して：c. 張り出し床版支点部とし、連続版では、正曲げに対して：b. 中床版径間部、片持ち部先端、負曲げに対して：a. 中床版支点部、c. 張り出し床版支点部とする。片持ち部先端についても今回の検討では対象外としている。

各設計断面における応力計算は、床版厚の薄い床版部断面に着目して鋼材配置を決定する。

### ④ 床版形状

単体パネル幅は制作の合理化と一般道での運搬を考え1.5mを基本とし、橋梁全幅を一体製作する。

### ⑤ 使用材料

コンクリートの設計基準強度：50N/mm<sup>2</sup>

主方向PC鋼材：1S15.2mmB種

縦締めPC鋼材：シングルストランドシステムの  
Φ19.3mm以上

床版間目地：無収縮モルタル(設計基準強度  
50N/mm<sup>2</sup>)

支間6m単純版の場合のチャンネル版とハンチ版の床版支間方向断面の設計を行った結果を表-9に示す。表中の計算応力度は支間中央断面のものである。チャンネル版の設計曲げモーメント式には道示式と同様に、施工上の余裕量を15%見込み、衝撃を

考慮した。ハンチ形状版の活荷重曲げモーメントの算出には道示式を用いた。負の曲げモーメントは正の曲げモーメントの80%を考慮し、フルプレストレスの設計を行った。

道示による最小床版厚は単純版のPC床版では、 $t_{min} = (4L+11) \times 0.9$ としており、支間6mでは最小床版厚 $t_{min}=31.5\text{cm}$ となるが、計算結果によれば、ハンチ形状版では床版厚30cm以上で許容値を満足し、チャンネル形状版では床版部21cmリブ部31cmの形状以上で許容値を満足する結果となった。単位面積 $1\text{m}^2$ 当たりの重量では、チャンネル版はハンチ版の約80%の重量となり、橋梁全体の設計として有利となる。また、チャンネル形状版の使用PC鋼材量は、床版支間方向では僅かながら少なくなるが、橋軸方向縦締めPC鋼材が必要となることに留意する必要がある。

## 7. まとめ

チャンネル形状プレキャストPC床版の床版特性の把握と安全性・信頼性の評価を目的として、系統だった一連の各種実験を行った。併せて、設計手法を確立するために、有限要素法解析を行い設計曲げモーメント式を提案した。本研究で得られた結果を以下に示す。

- (1) チャンネル形状版単体パネルはプレテンション方式により、主方向断面にプレストレスが一樣に導入できる。単体パネル幅1.5mを全断面有効として計算した上下縁の応力と一致する。
- (2) 単体版パネルは床版部に輪荷重を載荷する場合、載荷点直下で橋軸方向に曲げモーメントが生じる。床版部下縁のひび割れを防止するために、縦締めPC鋼材を配置する必要がある。縦締めプレストレスを導入することによって、橋軸方向曲げと押抜きせん断に対し有効に抵抗し、単体パネル幅1.5m全幅有効なはりとして挙動する。
- (3) チャンネル形状版は目地部施工後、縦締めプレストレスにより一体化した一方向版となる。一体化版とすることによって、ひび割れ耐力、破壊耐力の双方が、単体版パネルより大幅に上回る。このことにより、単体版パネルとして曲げに対する設計を行えば、床版の安全性は十分確保できる。
- (4) 一体化したチャンネル形状版の押し抜きせん断耐力は、導入プレストレスの影響を考慮した東山らの式で精度よく算定できた。チャンネル形

状版は2方向プレストレスを導入することによって押抜きせん断耐力が向上する。

- (5) 一体版として縦締めプレストレス量の違いによる目地部開口量、たわみ性状等の挙動の差異はなく、今回の実験で導入した縦締めプレストレス量の違いでは(床版部コンクリート応力として $\sigma_c=2.0\text{N}/\text{mm}^2 \sim \sigma_c=5.5\text{N}/\text{mm}^2$ )、一体版としての挙動に大きな影響は与え無い。従って、橋軸方向の断面設計において決定される縦締めプレストレス量の大小により、チャンネル形状版の一体化版としての性能は左右されないとと言える。
- (6) 単体パネル間の接合目地部の疲労耐久性を検証する目的から、単体パネル2体を一体化版として輪荷重走行試験機による疲労実験を行った。乾燥状態で100万回、更に、床版上面に水を張った状態で50万回走行を行ったが、ひび割れ、漏水等は認められず健全であった。
- (7) チャンネル形状版では設計条件により床版部厚さを最小16cmとしているため、この部分の疲労耐久性の確保も重要となる。単体版疲労実験では、活荷重振幅が最大となる中央部でも一体化版と同様にひび割れの発生はなく健全な状態であった。コンクリート表面ひずみ、鉄筋ひずみとも、載荷初期から載荷終了までほとんど変化は無く、疲労耐久性は充分であることが確認できた。
- (8) チャンネル形状版はその断面形状に起因して活荷重曲げモーメントの分布が従来のRC床版形状のものとは異なり、道路橋示方書の活荷重による設計曲げモーメント式をそのまま適用することはできない。そこで、チャンネル形状版に対し有限要素法による解析を行い、その結果から活荷重設計曲げモーメント式を誘導した。床版支間2m~6mに対応し、単純版と連続版について、それぞれ床版支間方向と橋軸方向の曲げモーメント式の提案を行った。
- (9) チャンネル形状版の設計手法として、床版支間方向は、チャンネル形状断面を床版単体パネル幅1.5mの全断面を有効として取り扱い、床版縁応力(床版上縁とリブ部下縁)に着目して導入プレストレス量を決定すること、橋軸方向は、床版厚の薄い床版部断面に着目して正負曲げモーメントに対し鋼材配置を決定する。

謝辞：本研究を実施するにあたり、大阪大学大学院工学研究科土木工学専攻社会基盤設計学領域研究室の皆様には多大なる協力を頂きました。また林功治



氏には当初から貴重なご意見を頂くと共に適切なご指導を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 関西国際空港線末広高架橋(鋼上部工)工事PCプレキャスト床版実験報告書,日本道路公団大阪建局,1993.
- 2) 真鍋英規,林功治,松井繁之:チャンネル形状プレキャストPC床版の開発,プレストレストコンクリート, Vol20, No.2, pp.36-44, 1998.3.
- 3) Matsui, S., Soda, N., Terada, K., Manabe, H.: Application of Channel-Shaped PC Precast Slabs on Steel Bridges, Developments in Short and Medium Span Bridge Engineering '94, Harifax, pp.699-709, 1994.8.
- 4) 堤忠彦,日野伸一,村山隆之,山口浩平,真鍋英規:リブ付プレキャストPC床版(CPC床版)を用いた鋼合成桁橋に関する研究,第4回複合構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, pp.65-68, 1999.11.
- 5) 前田幸雄, 松井繁之:鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式,土木学会論文集,第348号/V-1, pp.221-224, 1984.
- 6) 東山浩士, 松井繁之, 水越睦視:PC床版の押し抜きせん断耐力算定式に関する検討,構造工学論文集, Vol. 47A, pp.1347~1354, 2001.3.
- 7) 松井繁之:移動荷重を受ける道路橋RC床版の疲労強度と水の影響について,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, 1987.
- 8) PC床版の設計曲げモーメント式に関する一考察,プレストレストコンクリート技術協会,第4回シンポジウム論文集, pp.169~172, 1996.10.
- 9) 松井繁之:プレストレスングによる道路橋床版の耐久性向上について,プレストレストコンクリート技術協会,第6回シンポジウム論文集, pp.163~168, 1996.10.
- 10) 前田幸雄, 松井繁之:道路橋RC床版の設計曲げモーメント式に関する一考察,土木学会論文報告集,第252号, pp.11-21, 1976.8.
- 11) 道路橋示方書・同解説:日本道路協会,平成14年3月.
- 12) 篠原貴,岩本久信,真鍋英規,堤忠彦:チャンネル型プレキャストPC床版の輪荷重走行試験機による疲労実験,プレストレストコンクリート技術協会,第9回シンポジウム論文集, pp.381~386, 1999.10.
- 13) 寺田光太郎,曾田信雄,伊藤正人,真鍋英規:チャンネル形状プレキャストPC床版の鋼橋への適用,プレストレストコンクリート技術協会,第4回シンポジウム論文集, pp.171~176, 1994.10.
- 14) 松井繁之,太田孝二,西川和廣:プレキャスト床版,橋梁と基礎, pp.36-41, 1998.9.
- 15) 阪神高速道路公団,阪神高速道路管理技術センター:道路橋RC床版のひびわれ損傷と耐久性, 1991.12.
- 16) 中井博:プレキャスト床版合成桁橋の設計・施工,森北出版, pp.75, 1988.5.

(2002. 11. 29受付)

## A STUDY ON MECHANICAL PROPERTIES AND DESIGN METHOD OF CHANNEL-SHAPED PRECAST PC SLABS

Hideki MANABE and Shigeyuki MATSUI

This study shows mechanical properties of Channel-Shaped precast PC slabs (CPC slabs) by experiments and analysis. It clearly indicates that CPC slabs have a large load carrying capacity and high durability against the traffic load through a series of systematic experiments, static and fatigue tests. On the other side, bending moment distribution of CPC slabs using wheel live loads is different from ordinary flat RC slab, due to its channel shape. Therefore, we cannot use the bending moment calculation formulae of slab design using live wheel load that defined in the Japanese specifications for high way bridge. So, FEM analysis for CPC slab was carried out to provide the original bending moment calculation formula. And the design method of CPC slabs is shown in this paper.