

プレキャスト床版を用いた合成桁の 耐荷性に関する実験的研究

Experimental Study on Strength of Composite Girder with Precast Concrete Slabs

*

**

中井 博 岸田 博夫 竹中 裕文

By Hiroshi NAKAI, Hiroo KISHIDA and Hirofumi TAKENAKA

This paper presents the experimental study on the strength of composite girder by using the precast prestressed concrete slabs so-referred to the PPCS method. the peculiarity of this PPCS method is characterized that the negative bending moment and the axial tensile force can be induced to a composite girder by releasing a part of prestress forces in the precast concrete slabs after being made composite with the steel girder. Then, it is possible not only to decrease the depth of web and the cross-sectional area of flange plates in steel girder but also to improve the serviceability of concrete slabs for cracking by the remaining prestress forces in the precast concrete slabs. From a series of model tests, it is clarified that the composite girders built by the PPCS method have sufficient strength and rigidity against static forces.

1. まえがき

プレキャスト床版を用いた合成桁に関する研究や実施例は、これまでも数多く発表されてきている。古くは、すでに1960年代にはSattlerの研究¹⁾があり、その後もプレキャスト床版と鋼桁との結合方法の研究²⁾や実施例³⁾が報告されており、最近でもRoikらの高力ボルトによるプレキャスト床版と鋼桁との結合法に関する研究⁴⁾があげられる。

わが国においても、橋らによるプレキャスト床版を用いた合成桁の実験的研究⁵⁾が行われており、1970年代には道路橋に使用された例^{6,7)}や鉄道橋の実施例^{8,9)}も報告されている。しかしながら、ヨーロッパ諸国、特に西ドイツ、スイスおよびフランスなどの国々における実施例^{8,10)}に比べると、わが国のプレキャスト床版を使用した合成桁はまだあまり普及していないといえよう。

ところで、近年、道路橋の鉄筋コンクリート床版（以下、RC床版という）の損傷が橋梁の維持管理上の大きな問題として取り上げられている。そして、床版の損傷を防止するための種々な試みがいくつか報告されている。たとえば、PC埋設型枠を用いたRC床版については文献11)に詳しく報告されており、鋼とコンクリートとの合成床版に関しても、これまでの研究成果が文献12)～14)にまとめられている。また、赤尾・栗田らはGRC型枠の特性とRC床版への応用例^{15,16)}について報告しており、このように床版の耐久性

* 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)

** (株)春本鐵工所 設計部次長 (〒 551 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

*** 工修 (株)春本鐵工所 設計部主事 (〒 551 大阪市大正区南恩加島 6-20-34)

を改善するための研究が活発に行われるようになってきた。

また、損傷をうけたRC床版の補修方法とその効果に関する研究¹⁷⁾や実施例^{18,19)}の報告がある。最近、米国ではプレキャスト床版による既設橋梁の床版の取替工事の急速施工例²⁰⁾が報告されている。この工事では、床版コンクリートに橋軸および橋軸直角2方向にプレストレスを導入し、コンクリートのひびわれを極力防止するようにしている。

本研究は、このようなRC床版のひびわれを防止するため、プレストレスを導入したプレキャスト床版と鋼桁を合成した活荷重合成桁を新しい試みを加えた工法（以下、PPCS工法=Precast Prestressed Concrete Slab Method という）で施工した合成桁の耐荷性について研究しようとするものである。すなわち、PPCS工法とは、合成桁の床版として工場で厳格な管理のもとで製作されたプレキャスト・コンクリート床版を用い、床版と鋼桁とを合成する前にプレキャスト床版をプレストレスする。つぎに、プレストレスされたプレキャスト床版と鋼桁とをジベルを通じて合成する。さらに、合成後、PC鋼線を緩めてプレストレス力を解放し、鋼桁には引張力と負の曲げモーメントを発生させる。そして、主桁に作用している死荷重による正の曲げモーメントとを軽減し経済性を図るとともに、床版コンクリートに残存する圧縮応力によるひびわれに対する供用性の向上を図ろうとする工法である。そこで、この工法の実用性を確かめるため、合成後、プレストレスの解放によって鋼桁に十分な応力が導入されるか、またPPCS工法によって製作された合成桁が十分な耐荷性を有しているかを調べるために、一連の実験を行った。本文はこれらの結果を報告するものである。

さらに、本工法を用いた合成桁における床版コンクリートのひびわれに対する供用性の向上について検討するとともに、主桁の断面積、桁高について従来の合成桁と比較し、実用性について検討するものである。

2. PPCS工法による合成桁の施工法およびプレストレスの導入と解放による応力・たわみ

(1) PPCS工法による合成桁の施工法

図-1はPPCS工法による合成桁の施工法を示したもので、以下、その施工順序に従って合成桁の製作法を説明する。

a) プレキャスト床版の敷設、継目の接着およびプレストレスの導入

鋼桁の架設完了後にプレキャスト床版を所定の位置に敷設する。床版の継目部分には接着剤あるいはセメント・モルタル等を注入し、プレキャスト床版の一体化を図る。しかる後、プレキャスト床版に橋軸方向のプレストレスを与える。プレストレスの導入は、プレキャスト床版にあらかじめ埋設したシース管内にPC鋼材を挿入し、床版端の定着部から油圧ジャッキで緊張するポストテンション方式で行う。

b) プレキャスト床版と鋼桁との合成

鋼桁上フランジのジベルに対応する位置に、あらかじめ孔または溝などをプレキャスト床版に設けておく。そして、上述のプレストレスの導入後、それらの孔または溝にコンクリートあるいはセメント・モルタルを充填し、プレキャスト床版と鋼桁とを合成する。

c) プレストレスの解放

上記のように合成桁を施工した後、プレキャスト床版に導入されているプレストレスを解放する。その際、油圧ジャッキでプレストレスの解放を行う。最後に、シース管内には、セメント・ペースト等をグラウトする。

(2) プレストレスの導入と解放による応力・たわみ

PPCS工法は、上述のように鋼桁との合成前にプレキャスト床版に導入したプレストレスの一部分を鋼桁との合成後に解放することによって、合成桁に引張力と負の曲げモーメントを発生させる点に特徴がある。これに伴う応力やたわみは、以下のように簡明に計算される。

a) プレキャスト床版へのプレストレスの導入（合成前）

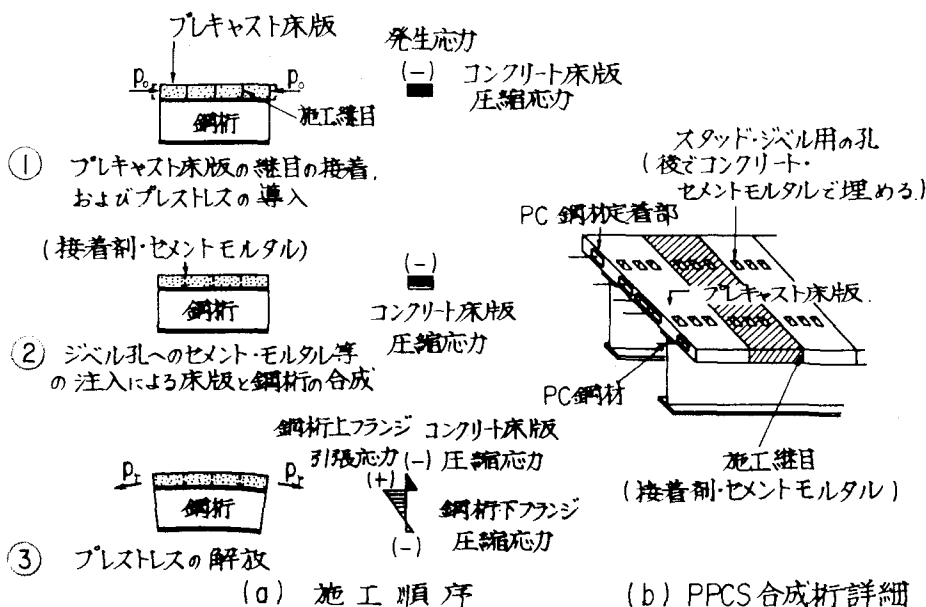


図-1 PPCS工法の概要

プレキャスト・コンクリート床版に所要のプレストレス力 P_o を与えると、軸方向圧縮応力度 σ_{co} および変位 U_o は、次式で与えられる。

$$\sigma_{co} = P_o / A_c \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$U_o = P_o \cdot l_o / (E_c \cdot A_c) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、

E_c : コンクリートのヤング係数

A_c : プレキャストコンクリート床版の断面積

l_o : 一体化されたプレキャスト床版の橋軸方向の長さ

b) プレキャスト床版内のプレストレスの一部分解放 (合成後)

解放するプレキャスト床版内のプレストレス力を P_r とすれば、これによって生ずる合成桁の断面力すなわち軸方向力 N_{pr} 、および曲げモーメント M_{pr} は、次式で与えられる。

$$N_{pr} = -P_r \quad , \quad (\text{引張力}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$M_{pr} = -P_r \cdot d_{vc} \quad , \quad (\text{負の曲げモーメント}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、

d_{vc} : 合成桁の図心からコンクリート床版図心までの距離 (図-2参照)

したがって、コンクリート床版上下縁の応力度 σ_{cu} 、 σ_{cl} 、および鋼桁の縁応力度 σ_{su} 、 σ_{sl} は、以下のよう表わせる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cu} &= N_{pr} / n \cdot A_v + (M_{pr} / n \cdot I_v) \cdot z_{vcu} && \text{, (圧縮を正)} \\ \sigma_{cl} &= N_{pr} / n \cdot A_v + (M_{pr} / n \cdot I_v) \cdot z_{vcl} && \text{, (圧縮を正)} \\ \sigma_{su} &= N_{pr} / A_v + (M_{pr} / I_v) \cdot z_{vsu} && \text{, (圧縮を正)} \\ \sigma_{sl} &= N_{pr} / A_v + (M_{pr} / I_v) \cdot z_{vsl} && \text{, (引張を正)} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)_{a \sim d}$$

ここに、図-2を参照して、

A_v : 合成桁の断面積 (鋼桁に換算)

I_v : 合成桁の中立軸に関する断面二次モーメント (鋼桁に換算)

- n : 鋼とコンクリートとのヤング係数比
- z_{vcu} : 合成桁の図心から床版上面に至る距離
- z_{vcl} : 合成桁の図心から床版下面に至る距離
- z_{vsu} : 合成桁の図心から鋼桁上縁に至る距離
- z_{vsl} : 合成桁の図心から鋼桁下縁に至る距離

一方、プレストレス解放による合成桁のたわみ w は、図-3に示すようになり、その最大値は、次式で与えられる。

$$w = \frac{M_{pr} \cdot \ell^2}{8E_s \cdot I_v} \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、

- ℓ : 単純合成桁のスパン
- E_s : 鋼材のヤング係数

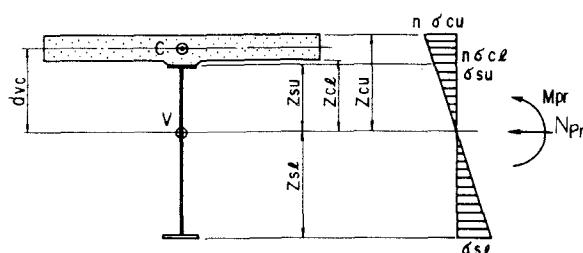


図-2 合成桁断面と作用断面と応力

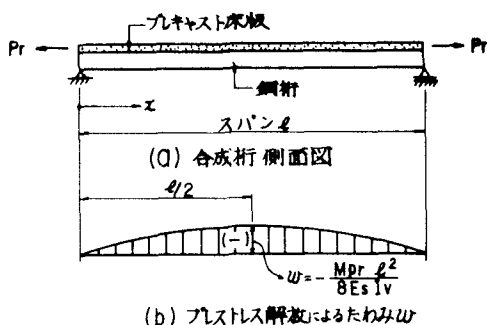


図-3 プレストレスの解放によるたわみ

3. PPCS工法による合成桁の模型実験

(1) 実験の目的

今回、とりあえず床版内のプレストレス力をすべて解放したPPCS工法による合成桁模型について、以下の一連の実験を行った。プレストレス力の一部を残存させたものについては別の機会に報告したい。

a) プレストレスの解放実験

PPCS工法は、床版のプレストレスを解放することによって合成桁に軸方向引張力と負の曲げモーメントを導入するものである。本実験では、この状況を模型桁によって調べ、上述の計算どおりの応力やたわみが発生するか否かを確認する。

b) 耐荷力実験

PPCS工法によって製作された合成桁が、合成桁として十分な耐荷性を有していることを調べるため、破壊実験を行う。この実験では、破壊に至るまでの模型桁各部に生じるひずみやたわみ特性を測定し、それらより耐荷力を知ることが目的としている。また、計算値との比較・検討も行う。

(2) 模型桁

模型桁は、図-4に示すように、プレキャスト床版を4枚敷設したTYPE-1と8枚敷設したTYPE-2との2種類とし、それぞれ2体ずつ製作した。模型桁の断面寸法は、載荷フレームの容量や製作性を考慮し、実橋の縮尺1/3～1/4を目標として決めた。

鋼桁は全ての模型桁において共通で、上フランジ100mm×6mm、ウェブ400mm×6mm、下フランジ130mm×12mmで、等断面とした。また、材質は全てSS41を用いた。材料試験結果を表-1に示す。ジベルは、13φ×80mmの頭付きスタッド2本1組を15cmピッチで溶植した。表-2は、これらスタッド・ジベルの材料試験結果を示す。

プレキャスト床版の詳細図を図-5に示す。プレキャスト床版の幅および厚さは、それぞれ160cm、10cmで、長さは75、95、150、170cmの4種とした。すなわち、供試体TYPE-1では床版長さ150、170cmのものを2枚ずつ組み合わせ、TYPE-2では長さ95cmを2枚、75cmを6枚組合せた。シース管としては内径30φのスパイラルシースを用い、20cm間隔で合計8本配置した。鉄筋は、橋軸方向にD13のものを15cmピッチに、また橋軸方向にはシース管相互間にD13を20cmピッチに配置した。そして、PC鋼材定着部およびジベル孔付近は、6φの鉄筋で補強した。

表-3は、プレキャスト床版に使用したコンクリートの示方配合を示す。また、床版へのプレストレス導入時、プレストレス解放時および耐荷力試験時のコンクリートの材料試験結果を表-4に示す。鋼桁との合成をするためにジベル孔へ充填した無収縮モルタルの材料試験結果を表-5に、継目の接着に用いた接着剤の特性を表-6に示す。また、PC鋼より線の材料試験結果を表-7に示す。

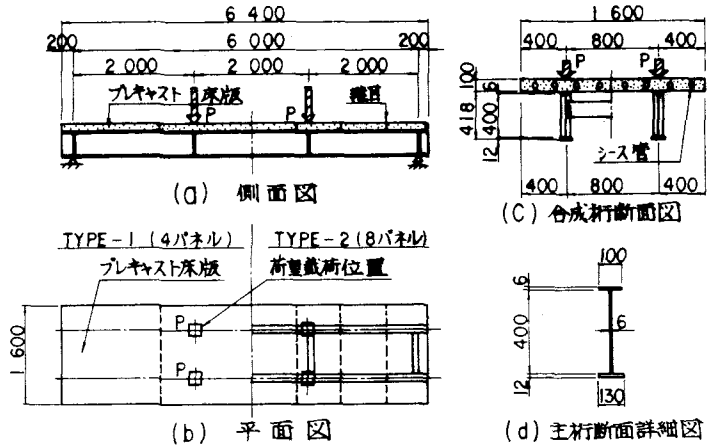


図-4 模型桁の一般図および荷重載荷位置

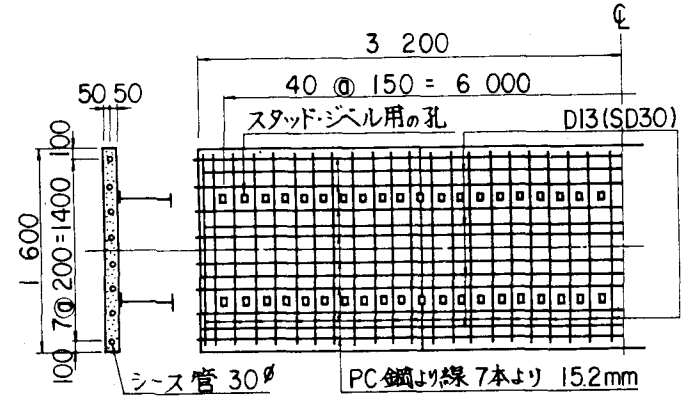


図-5 プレキャスト床版詳細

表-1 鋼材の材料試験結果

P L mm	引 張 試 験		
	降伏点 kgf/mm ²	引張強度 kgf/mm ²	伸率 %
12	30~31 (294~304MPa)	45 (441MPa)	26~28
6	35~37 (343~336MPa)	48~49 (470~480MPa)	25

表-2 スタッドジベルの材料試験結果

直 径	規 格	降伏点 kg/mm ²	引張強度 kgf/mm ²	伸率 %
φ-13	S041	35 (343MPa)	50 (490MPa)	35

表-3 コンクリートの示方配合

コンクリートの 配合強度 (kgf/cm ²)	粗骨材 最大 寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメ ント (W/C) (%)	細骨 材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
					水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
580 (57MPa)	20	5.5+1.5	32.9	43	148	450	755	1041	マイデー 1.2%

表－ 4 コンクリートの材料試験結果

プレキャスト 床版のタイプ	(a) プレストレス導入時		(b) 応力解放時および耐荷力試験時		
	圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
TYPE 1-1	518.5 (50.6MPa)	3.70×10 ⁵ (0.36×10 ⁵ MPa)	544.8 (53.4MPa)	48.1 (4.5MPa)	3.89×10 ⁵ (0.36×10 ⁵ MPa)
TYPE 1-2	486.5 (47.7MPa)	2.78×10 ⁵ (0.27×10 ⁵ MPa)	486.5 (47.7MPa)	46.7 (4.6MPa)	2.78×10 ⁵ (0.27×10 ⁵ MPa)
TYPE 2-1	487.9 (47.8MPa)	2.79×10 ⁵ (0.29×10 ⁵ MPa)	455.8 (44.7MPa)	41.3 (4.0MPa)	2.96×10 ⁵ (0.29×10 ⁵ MPa)
TYPE 2-2	388.3 (38.1MPa)	3.09×10 ⁵ (0.36×10 ⁵ MPa)	436.8 (42.8MPa)	34.3 (3.4MPa)	3.09×10 ⁵ (0.30×10 ⁵ MPa)

表－ 5 無収縮モルタルの材料試験結果

プレキャスト 床版のタイプ	圧縮強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
TYPE 1-1	340.6 (33.4MPa)	24.5 (2.4MPa)	2.24×10 ⁵ (0.22×10 ⁵ MPa)
TYPE 1-2	510.5 (50.0MPa)	36.9 (3.6MPa)	4.39×10 ⁵ (0.43×10 ⁵ MPa)
TYPE 2-1	353.9 (34.7MPa)	31.0 (3.0MPa)	4.41×10 ⁵ (0.43×10 ⁵ MPa)
TYPE 2-2	291.2 (28.5MPa)	35.6 (3.5MPa)	4.48×10 ⁵ (0.44×10 ⁵ MPa)

表－ 6 接着剤の特性

項 目	A 剤	B 剤
外 観	乳白色パテ状	乳白色パテ状
配合重量比	2	1
比 重	1.67	1.53
	混合物 : 1.62	
曲げ強度	317 kgf/cm ² (31.1MPa)	
圧縮強度	913 kgf/cm ² (89.5MPa)	
圧縮弾性率	41300 kgf/cm ² (4047MPa)	
引張強度	239 kgf/cm ² (23.4MPa)	

表－ 7 PC鋼より線の材料試験結果

規 格	直径 (D)mm	引張強度 (kgf/mm ²)	降伏点強度 (kgf/mm ²)	破断時伸び %
JIS G 3536	15.20	206 (2019MPa)	191 (1872MPa)	7.1

(3) 実験方法

a) プレストレスの解放実験

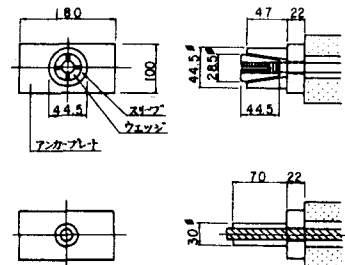
表-8に模型桁の製作手順を示す。まず、プレキャスト床版継目部のコンクリート表面のレイタンス、ほこり等を取除くため、ワイヤーブラシや刷毛で清掃した。次に、接着材の塗布は、接着材とコンクリートとのなじみをよくするため、まず、少量の接着剤をプレキャスト床版の両面にヘラで塗布し、その後、厚さ約1mmの接着剤をプレキャスト床版の両面に均一に塗布した。

床版の敷設完了後、ただちに、プレキャスト床版のシース管内にPC鋼より線15.2φ 8本を挿入し、1本当たり16tf (156.8kN)の張力を導入してプレキャスト床版の一体化を図った。このとき、コンクリート床版の軸方向圧縮応力度は、約80 kgf/cm² (7.8MPa)となる。プレストレスの導入はセンター・ホール・ジャッキで行い、導入張力はあらかじめキャリブレーションされたジャッキの荷重計によって確認しながら定着した。プレストレスの導入順序は、両主桁間の中央から桁に近い側へと進めていき、まず最終導入力の半分に相当する1本当たり8tf (78.9kN)のプレストレス力ですべてのPC鋼材を緊張して仮定着し、次に最終張力16tf (156.8kN)のプレストレス力を導入した。定着部は、図-6に示すように、アンカープレート、コンプレッショングリップ、ウェッジ、スリーブおよび板厚20mmのシムプレートから構成されている。

プレキャスト床版へのプレストレスの導入後、あらかじめ床版に設けられているジベル孔にプレミックスタイプの無収縮モルタルを打設し、4～5日間養生した。モルタル養生の後、再びジャッキを用いてPC鋼材のプレストレス力をすべて解放した。

b) 耐荷力実験

プレストレス解放後の模型桁に静的荷重を載荷し、各荷重にわたる桁各部のひずみやたわみ、プレキャスト床版と鋼桁との相対ずれを測定した。また、最終的な破壊荷重を調べた。その際、PC鋼材の有無は模型



図－ 6 PC鋼材定着部の詳細

表－ 8 模型桁の施工手順

(1) 継目部分の清掃→(2) 接着剤の塗布→(3) P C 鋼材の挿入→(4) プレストレスの導入→
(5) 無収縮モルタル打設→(6) 養生 (4～5 日間) →(7) プレストレスの解放

桁の終局荷重には影響を及ぼさないものと考えられるので、P C 鋼材は抜き取り、シース管内にはグラウトをせずに破壊実験を行った。

図－ 4 に示すように、模型桁の支間長は 6.0 m で、両端単純支持した。支間中央より両端部へ 1.0 m 離れた位置の主桁真上の 4 点に、荷重分配ジョイストを介して荷重を載荷した。載荷フレームとジョイストとの間にはロードセルを介して 200 ton 油圧ジャッキを設置し、それによって荷重を作用させた。模型桁の下フランジが許容応力度 $\sigma_{sa} = 1400 \text{ kgf/cm}^2$ (137.2 MPa) に達する荷重は、 $P_a = 27 \text{ tf}$ (264.6 kN) である。そこで、荷重は、3～5 tf (29.4～49 kN) ずつ 25 tf (245 kN) までの漸増減を 3 回繰返し、その後、同様な荷重ピッチで漸増させて破壊に至らせしめた。

(4) 計測方法

プレキャスト床版の上、下面および、鋼桁のひずみは、デジタル・ストレインメーターで測定した (ゲージの貼付位置は、後述の実験結果の図を参照されたい) 主桁のたわみは支点部に $200 \mu/\text{mm}$ 、ストローク 50 mm のストレインゲージ型の変位計 (支点沈下を計測) を、支間中央および支間 1/4 点には $100 \mu/\text{mm}$ 、ストローク 200 mm のストレインゲージ型の変位計を設置した。また、プレキャスト床版と鋼桁との相対ずれの測定は、 $500 \mu/\text{mm}$ 、ストローク 25 mm のストレインゲージ型の変位計によって行った。荷重の測定およびコントロールは、載荷フレームとジャッキとの間に設置したロードセルによって正確に行った。

4. プレストレスの導入・解放の実験結果とその考察

(1) 実験結果

図－ 7 は、プレキャスト床版にプレストレスを導入した直後のコンクリートのひずみ分布を示したものである。測定されたプレキャスト床版の圧縮ひずみは、ほぼ -130×10^{-6} ～ -290×10^{-6} の範囲にあり、かなりバラツキがあるが、これらのひずみの平均値はおよそ -210×10^{-6} で、コンクリートの弾性係数を材料試験結果に基づいて計算したひずみ -216×10^{-6} とほぼ一致している。また、ひずみの分布状態は、各断面とも橋軸中心線付近が小さく、両端部では大きいという傾向が多少みられるものの、ほぼ様な分布を呈している。床版上面のひずみと下面のひずみとを比較すると、約 40×10^{-6} ～ 100×10^{-6} の差があるが、これは P C 鋼材の偏心、プレキャスト床版継目の不整合、プレキャスト床版の重量による桁のたわみなどが起因したためであると思われる。なお、プレストレス導入時の橋軸直角方向の引張ひずみは、 40×10^{-6} ～ 50×10^{-6} 程度で、コンクリートにはもちろんひびわれは発生しなかった。

一方、図－ 8 は、プレストレス解放直後の桁のひずみ分布を示したものである。図中には実測値だけでなく、材料試験に基づく弾性係数を用いて計算したひずみも示してある。また、コンクリートのひずみは、図中×印で示した計測点におけるひずみを平均したものである。この図より、プレストレスの解放によって生じる鋼桁各断面のひずみは、合成断面に解放力が作用するものとして求めた計算値とほぼ一致しているといえよう。また、コンクリートのひずみは、プレキャスト床版継目部にあたる断面を除いて、ほぼ計算どおりのひずみが発生しているのに対し、継目部のコンクリートのひずみはやや大きかった。最後に、プレストレスの解放による模型桁の上方へのたわみは、図－ 9 に示すように、支間中央で 2.5 ～ 2.8 mm 程度であり、計算値 2.7 mm とよく一致していた。

(2) 実験結果の考察

プレストレスの導入ならびに解放に伴う応力やたわみは、ほぼ計算どおりであり、PPCS 工法の妥当性が実験によって確認された。なお、プレキャスト床版の継目部のひずみが実験では多少大きく現われた。

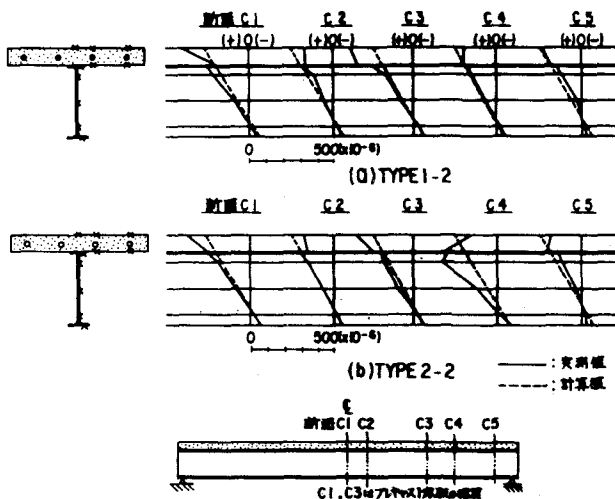
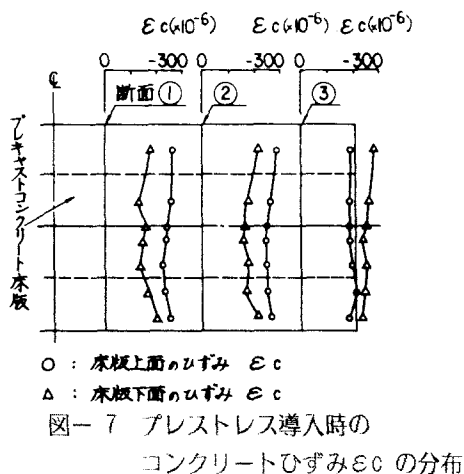


図-8 プレストレス解放時の桁のひずみ分布

これは、プレキャスト床版の接合に用いた接着剤の弾性係数が床版コンクリートのそれに比べて $1/7 \sim 1/10$ 程度と小さいためであると思われる。

5. PPCS工法による合成桁の耐荷力実験結果とその考察

(1) 実験結果

a) 模型桁のたわみ

図-10に荷重-たわみ曲線を示す。図中に点線で示すように、合成桁として計算した下フランジの降伏荷重(降伏点を 30 kgf/mm^2 (294 MPa) と仮定)約 60 tf (588 kN) で、この降伏荷重までの弾性範囲内における荷重とたわみとの関係は、ほぼ直線関係を保持しており、また計算値ともよく一致していた。荷重が 60 tf (588 kN) を越えると、たわみが徐々に大きくなり、 80 tf (784 kN) 付近からは急激にたわみが増大して破壊に至った。破壊荷重直前の模型桁支間中央のたわみは $80 \sim 120 \text{ mm}$ で、支間の $1/50 \sim 1/75$ 程度であった。

b) 桁各部のひずみ

図-11は、荷重-ひずみ曲線をプロットしたものである。下フランジの降伏荷重 60 tf (588 kN) に相当する模型桁下フランジの実測ひずみは、約 1500×10^{-6} で、この値も計算値とはほぼ一致していた。また、荷重が 70 tf (686 kN) 付近からは、中立軸が上方に移動しはじめ、 80 tf (784 kN) 付近で上フランジおよびコンクリート床版下縁は引張ひずみが生じるようになり、最終的には鋼桁全断面にわたって引張応力が作用していることがわかる。

図-11 (a) は、プレキャスト床版の継目位置における荷重-ひずみ曲線で、図-11 (b) の継目のない位置におけるものと同様の傾向にあるが、コンクリート床版の継目部におけるひずみはやや大きく現われる傾向にあった。

つぎに、図-12は代表的な荷重段階における模型桁各部のひずみ分布を示したもので、同図 (a) は支間中央のプレキャスト床版の継目位置におけるひずみ分布を、また (b) は支間中央より 37.5 cm 離れた位置におけるひずみ分布である。模型桁各部のひずみ分布状態は、荷重が 77 tf (754.6 kN) 付近まではほぼ直線的な分布をする。荷重が終局荷重に近づくにつれて、コンクリート床版下面の引張ひずみが急増し、鋼桁は全断面が引張応力状態となっている。

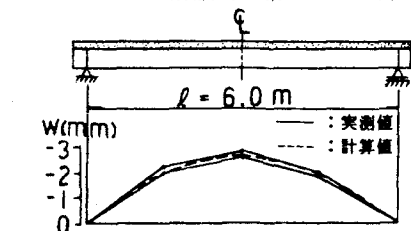


図-9 プレストレス解放時の桁のたわみ

また、継目位置とそうでない位置とでは、鋼桁のひずみにはほとんど差がないものの、コンクリート床版のひずみについては、継目位置の方がやや大きめの値を与えている。

c) プレキャスト床版と鋼桁との相対ずれ

図-13は荷重と床版と鋼桁との間の橋軸方向の相対ずれを荷重に応じてプロットし、また図-14は橋軸方向のずれの分布状態を示したものである。床版と鋼桁との間のずれは、荷重の増大に伴って徐々に増大しているが、その値は小さく、許容荷重27tf (264.6 kN) では最大でも 0.06mm、下フランジ降伏荷重 60 tf (588kN) で、0.2mm程度、破壊荷重付近で 0.8mm程度であった。また、破壊実験に先立って行った弾性範囲内の荷重27tf (264.6 kN) までの繰返し載荷による残留ずれは、最大でも 0.028mmという著しく小さい値であった。

つぎに、ずれの分布状態は、荷重の増大に伴って荷重載荷位置よりも支点側の位置におけるずれの増大が著しい。また、荷重載荷点のすぐ外側で最も大きくなる傾向にあり、模型桁端部に近づくにつれて漸減している。これらの結果は、従来の研究結果²¹⁾とほぼ一致した傾向にある。

d) 耐荷力

表-9に各模型桁の破壊荷重を示す。破壊荷重は 106~107tf (1,039~1,049kN) の範囲にあった。破壊パターンはコンクリート床版の圧潰で、いずれの模型桁においてもプレキャスト床版の継目で破壊することなく、その中間の位置で破壊した。破壊状況の一例を写真-1に示す。

(2) 実験結果の考察

a) 剛度

たわみの測定結果と計算値とがほぼ一致したことから、PPCS工法によって製作された模型桁は、従来の現場施工によるRC床版を有する合成桁とほとんど差異のない剛度を有していることがわかった。

PPCS工法では、プレキャスト床版と鋼桁との結合はジベル孔に充填材を打設することによって行うが、静的荷重の下ではプレキャスト床版と鋼桁とが十分有効に合成されており、桁としての剛度も通常の合成桁の計算

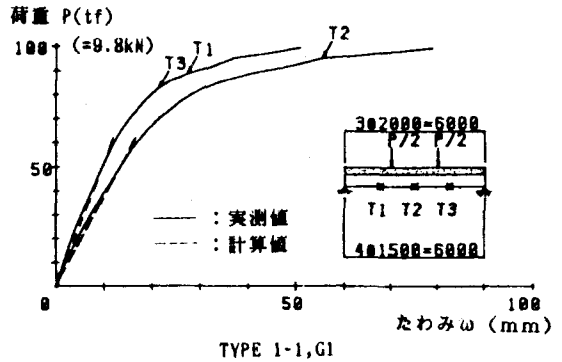


図-10 荷重-たわみ曲線

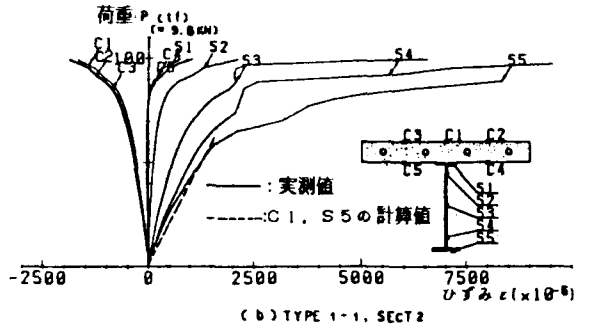
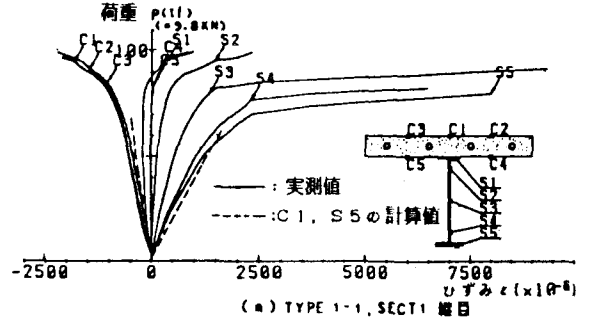


図-11 荷重-ひずみ曲線

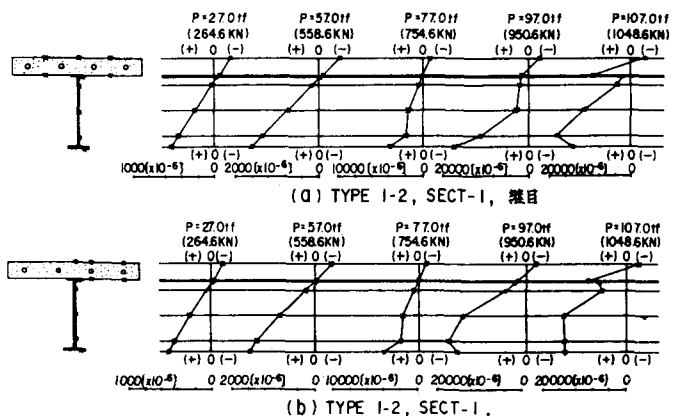


図-12 代表的な荷重段階におけるひずみ分布

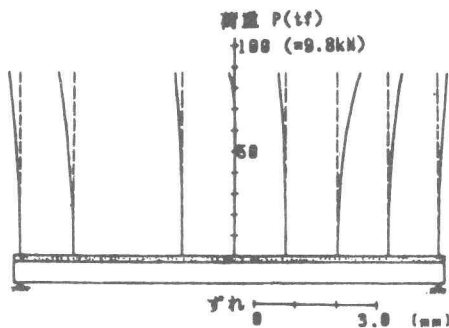


図-13 荷重-ずれ曲線

表-9 模型桁の耐荷力

項目 供試体	測定値 (tf)	計算値 (tf)	測定値 計算値
TYPE 1-1	106 (1039kN)	100 (970kN)	1.06
TYPE 1-2	107 (1049kN)	99 (970kN)	1.08
TYPE 2-1	106 (1039kN)	99 (970kN)	1.07
TYPE 2-2	106 (1039kN)	99 (970kN)	1.07

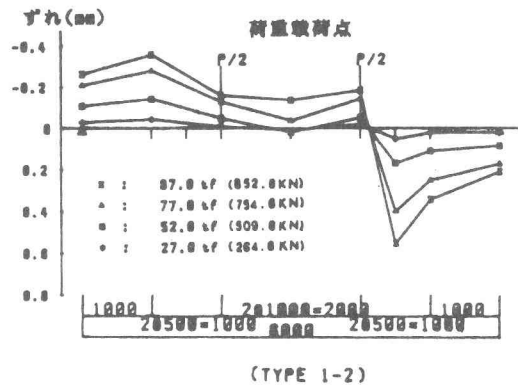


図-14 スパン方向のずれの分布

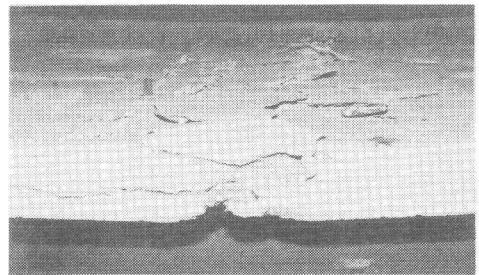


写真-1 コンクリート床版の破壊状況

方法によって評価できるものと考えられる。

b) 応力度

ひずみの測定結果と計算値とがほぼ一致したこと、また降伏荷重までは平面保持の仮定に従うことから、PPCS工法によって製作された桁は、初等ばり理論によって応力計算をしてもよいと思われる。また、プレキャスト床版継目部と中間部におけるコンクリート床版の応力度には多少の差異がみとめられたが、これはプレキャスト床版の継目の接合に用いた接着剤の弾性係数がコンクリートのそれに比べるとかなり小さいためと考えらる。

c) プレキャスト床版と鋼桁との相対ずれ

許容荷重内の繰返し载荷による残留ずれは最大でも 0.028mm で、プレキャスト床版と鋼桁とは十分有効に合成されているものと考えられる。

d) 耐荷力の検討

合成桁の破壊モーメント M_u は、文献22) および23) によれば、鋼桁の強度 T 、コンクリートの強度 C_{max} 、ジベルの強度 Σq_u をもとにし、以下の 3つの場合に分けて計算される。すなわち、

① Case I ; $\Sigma q_u > T$ かつ $c_{max} > T$ のとき :

$$M_u = T \cdot e \quad \dots \dots \dots (7)$$

② Case II ; $c_{max} < T$ のとき :

$$M_u = C \cdot e + C' \cdot e' \quad \dots \dots \dots (8)$$

③ Case III ; $\Sigma q_u < c_{max}$ のとき

$$C = \Sigma q_u \quad \dots \dots \dots (9)$$

$$M_u = C \cdot e + C' \cdot e' \quad \dots \dots \dots (10)$$

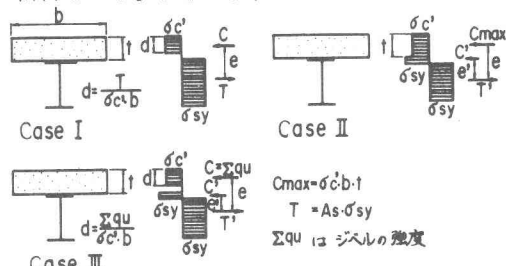


図-15 破壊パターン

ここに、

$$C_{max} = \sigma_c \cdot b \cdot t \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$T = A_s \cdot \sigma_{sy} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$\Sigma q_u = q_u \cdot n \quad \dots\dots\dots (13)$$

e, e' : それぞれ図-15に示す T, C
および T', C' との距離

b, t : コンクリート床版のそれぞれ
幅および厚さ

σ_c : コンクリートの圧縮強度

A_s : 鋼桁の断面積

σ_{sy} : 鋼桁の降伏応力度

$$q_u = 87.5d \sqrt{\sigma_c} \quad \dots\dots\dots (14)$$

: ジベルの強度 (1本当たり)

n : 桁半分のジベル本数

d : スタッディジベルの直径

表-10は、模型桁の T, C_{max} および Σq_u の計算値を示す。この表によれば、 $\Sigma q_u < C_{max}$ であるので、Case IIIの破壊パターンとなり、ジベルが破壊するはずである。しかしながら、耐荷力実験の結果は、コンクリート床版が圧潰し、ジベルは破壊しなかった。したがって、破壊モーメントは、Case Iによって計算することにした。表-9に破壊荷重の実測値と計算値とを比較したものを示す。実際の破壊荷重は、計算値よりも6～8%ほど大きく安全側で、PPCS工法による合成桁は十分な耐荷力を保持していると考えられる。また、文献12)によっても同様な計算結果が得られた。

なお、模型桁は強度パラメーター T, C_{max} 、および Σq_u を実橋の範囲内に入るように設計している。図-16は無次元パラメーター C_{max}/T と $\Sigma q_u/T$ との関係を建設省標準設計より求めて図示したものである(主桁支間25、35、40mm、主桁間隔 2.2、2.4、2.6、2.8、3.0mの合計20ケースについて調べた)。この図より C_{max}/T はほぼ1.0～2.1の範囲にあり、 $\Sigma q_u/T$ は0.7～0.9の範囲にあることがわかる。また、 $C_{max} > \Sigma q_u$ であるので、破壊パターンはCase IIIとなる。図中、斜線部分は模型桁の設計に際して目標とした C_{max}/T 値と $\Sigma q_u/T$ 値とを示し、実橋のそれとさほど差がなく、破壊パターンはCase IIIとなる。今回の模型桁のジベルは最終耐荷力に至っても破壊しなかったが、これは模型桁に使用したスタッド・ジベルが実橋どおりの縮尺になっていず、実橋のジベルの強度計算式をそのまま適用することに無理があったと判断している。

6. PPCS工法の単純合成桁への応用

(1) ひびわれに対する供用性の向上

実験では全てのプレストレスを解放したが、PPCS工法は橋軸方向(配力鉄筋方向)に所要量の圧縮応力を残しておくことも可能である。ここでは、連続版の配力鉄筋方向のコンクリートの応力度に着目して試算設計を試みた。

床版の厚さおよび設計曲げモーメントは、道路橋示方書(昭和55年2月)によって決定した(大型車輛等による割増しは行っていない)。また、コンクリートの応力度は、次式より求めるものとした。²⁴⁾

表-10 供試体の $T, C_{max}, \Sigma q_u$ の計算値

強度 供試体	T (tf)	C_{max} (tf)	Σq_u (tf)
TYPE 1-1	154.8 (1517kN)	435.8 (4272kN)	141.5 (1387kN)
TYPE 1-2	154.8 (1517kN)	389.2 (3816kN)	133.7 (1310kN)
TYPE 2-1	154.8 (1517kN)	364.6 (3576kN)	129.4 (1269kN)
TYPE 2-2	154.8 (1517kN)	349.3 (3424kN)	126.7 (1242kN)

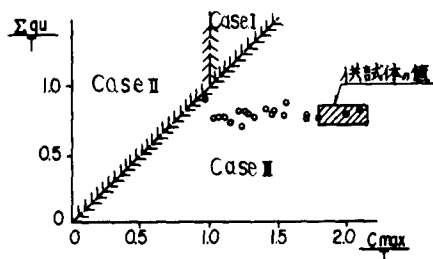


図-16 C_{max}/T と $\Sigma q_u/T$ との関係

$$\sigma = \pm M_{1+i} / (d^2 / 6) \quad \dots\dots\dots (15)$$

ここに、 M_{1+i} : 道路橋示方書 6.1.4 による配力鉄筋方向の設計曲げモーメント (kg・m / m)

$$M_{1+i} = (0.10L + 0.04) \times P \times 0.8 \quad \dots\dots\dots (16)$$

L : 床版の支間 (m)

P = 8,000 kgf (78,400N) : T荷重による後輪荷重

d : 床版厚 (m)

上記に従う計算の結果、コンクリート全断面を有効として求めたコンクリートの引張応力度は、28～33 kgf / cm² (2.74 ～ 3.23 MPa) の範囲にあった (床版支間は 1.6～ 3.0m とした)。したがって、床版コンクリートに引張応力度を発生させないという条件に対しては、コンクリート応力にして28～33 kgf / cm² (2.74 ～ 3.23 MPa) の有効プレストレスを残留させればよいことになる。また、コンクリートの引張応力度を許容値以下に押さえるという条件のものでは、所要残留プレストレスの大きさは、当然、小さくできる。

このように、床版コンクリートに導入したプレストレスの一部を残留プレストレスとして残しておくことは、橋軸直角方向のひびわれの防止に大きい役立つものと思われる。

なお、プレキャスト床版を工場で製作する際、橋軸直角方向 (主鉄筋方向) にも、たとえばプレテンション方式でプレストレスを導入すれば、床版コンクリートのひびわれに対する供用性は著しく向上するものと考えられる。

(2) 主桁の断面積・桁高の検討

試算設計は、建設省でまとめられている土木構造物標準設計第23～28巻、数値表 (全日本建設技術協会、昭和54年 3月) に基づいて行った。

ここで抽出した橋梁の主要諸元は、次のとおりである。

- ① 橋格・幅員 : 1等橋 (T-20、L-20)、9m
- ② 支 間 : 25m、30m、35m、40m、44m、の5種類
- ③ プレキャスト床版コンクリートの設計基準強度: 500kgf / cm²

図-17は、本工法を適用した場合の主桁断面積と従来工法を適用した場合の主桁断面積とを比較したものである。プレストレスの解放量は、コンクリートの応力に換算して60 kgf / cm² (5.88MPa)、および120kgf / cm² の (11.8MPa) 2ケースについて試算した。その際、コンクリート床版にはコンクリートのひびわれ供用性向上のために、40 kgf / cm² の圧縮応力度を残存させ、またこの残存応力と活荷重による圧縮応力との合計が版のコンクリートの許容圧縮応力度以下であることを確認した。この図より、本工法を単純合成桁に適用することによって、主桁の断面積を10～13%程度小さくできることがわかる。

一方、図-18は、主桁高と支間中央の主桁断面積との関係を、支間40mの単純合成桁橋を対象として従来工法および本工法を適用した場合について比較したものである。従来工法と本工法の主桁断面積とが等しくなるような桁高を選定すると、たとえば従来工法の桁高2,000mm に対して本工法では1,600mm となり、桁高の著しい低減が図れるものと考えられる。

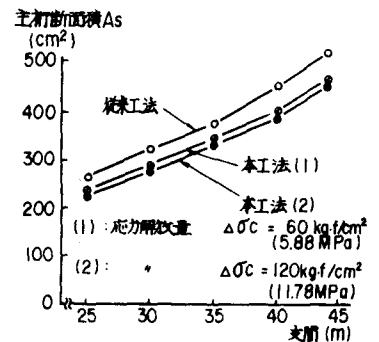


図-17 主桁断面積の比較

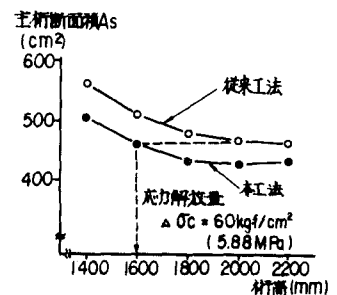


図-18 桁高の比較

7. ま と め

本研究で得られた結論を要約すると、次のとおりである。

- (1) PPCS工法によって製作された桁では、プレストレスの解放によって、ほぼ計算どおりの応力を合成桁に発生できることが確認された。
- (2) そして、従来のRC床版を有する合成桁と比べても、ほとんど差異のない剛度を有していることがわかった。
- (3) また、平面保持の法則に従う拳動をし、初等ばり理論によって応力計算ができることが明らかにできた。
- (4) 接着剤によって接合したプレキャスト床版の継目部に若干の応力集中がおこる傾向にあるが、鋼桁の応力は良好な性状を呈していた。
- (5) プレキャスト床版と鋼桁とは、ジベル孔へ無収縮モルタルを打設して断続的に結合されているが、鋼桁と床版との相対ずれは小さく、破壊のパターンもコンクリート床版の圧潰であったことから、鋼桁と床版とは十分有効に合成されていることがわかった。
- (6) PPCS工法によって製作された桁は、合成桁として十分な耐荷力を有していることも確かめられた。
- (7) 本工法を単純合成桁へ適用した場合、およそ10～13%の主桁断面積の低減、あるいは20%程度桁高を低くすることが可能である。
- (8) プレキャスト床版へ導入したプレストレスの一部分を残すことによって、床版コンクリートのひびわれに対する供用性が向上するか否かについて今後検討したい。
- (9) 一方、継目部・桁と床版との結合法などの施工上の問題やプレストレスに伴うクリープなどの設計計算上の問題、また、PPCS工法で施工されたプレキャスト床版の疲労の問題などが残されており、今後、鋭意検討を加えたいと考えている。

謝辞：実験を実施するに当り、大阪市立大学の大型構造物実験室を使用し、大阪市立大学助手酒造敏廣氏、同真嶋光保氏のご協力のもとに実験を行った。また、模型桁の製作に際してご協力を得た富士ビー、エス・コンクリート（株）の牧 豊氏、神鋼鋼線工業（株）の増田洋児氏、（株）ニッタの吉田典生氏、および、実験を手伝っていただいた（株）春本鐵工所の関係各位に厚く感謝する。

参 考 文 献

- 1) Sattler, K. : Betrachtungen über die Verwendung hochzugfester Schrauben bei Stahlträger—Verbundkonstruktionen, Vorbericht I VBlI, 1960, s.330～350
- 2) Beck, H. und Heunisch, M : Zum Reibungsverbund zwischen Stahl und Betonfertigte—ilen bei dübellosen Verbundkonstruktionen, Der Stahlbau, Heft 2, Feb. 1972, s.40～45
- 3) Aschenberg, H. und Reimers, K : Brücken in dübellosem Verbund—Bewährung beim Bau von Überführungen über in Betrieb befindlichen Autobahnen, Der Stahlbau, Heft 7, Juli : 1968, s.215～221
- 4) Roik, K. und Hanswille, G. : Beitrag zur Ermittlung der Tragfähigkeit von Reib—Abscherverdübelungen bei Stahlverbund trägerkonstruktionen, Der Stahlbau, Heft 2, Feb. 1984, s.41～48
- 5) 橘 善雄・近藤和夫・岩永安正・足立善雄：プレキャスト床版合成桁—その実験的研究—土木学会誌 Vol.49 , 昭和39年 8月 , pp.78 ～83

- 6) 角田安一・山寺徳明・関沢 進・北島彰夫：首都高速道路 5号線に採用したプレキャスト床版、橋梁と基礎，Vol.5，昭和46年 3月，pp.34～42
- 7) 栗崎敏夫・石井久善・中井 智：PC縦締めを用いたプレハブ床版の設計と施工，土木技術，Vol.29，昭和49年 5月，pp.57～67
- 8) 土木学会構造工学委員会鋼・コンクリート合成構造小委員会：鋼とコンクリートの合成構造に関する調査研究報告書，土木学会，昭和58年 3月，pp.43～47
- 9) 中野昭郎・大槻正幸・渡辺正武・社方一馬：プレキャストスラブ合成桁、構造物設計資料，（社）日本鉄道施設協会、No.40，昭和49年12月，pp.2～7
- 10) 関 淳：ヨーロッパの橋を訪ねて，思考社，昭和57年 6月
- 11) 阪神高速道路公団・日本材料学会：PC埋設型枠床版の耐荷性状に関する調査研究報告書，昭和57年 3月
- 12) Stahlbau Handbuch, Für Studium und Praxis, Band1, in zwei Bänden, Stahlbau-Verlags-GmbH・Köln, 1982
- 13) British Standards Institution: BS 5400 Part 5. Code of Practice for design of composite bridges, 1979
- 14) 土木学会関西支部：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ー共同研究グループ報告書，昭和59年 5月
- 15) 赤尾親助・栗田章光・中村義郎・菊井 薫：GRC型枠の特性とその実用例，セメントコンクリート No.396，昭和55年 2月，pp.20～28
- 16) 赤尾親助・栗田章光・平城弘一・白井康之：GRC永久型枠の道路橋RC床版への応用，第4回コンクリート工学年次講演会講演論文集、1982, pp.145～148
- 17) 鯨井裕嗣：増設桁による床版補強の載荷実験，橋梁と基礎，Vol.17，昭和58年 8月，pp.121～128
- 18) 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
- 19) 樋川 篤：I形鋼格子床版による床版の打換え，橋梁と基礎，Vol.17，昭和58年 8月，pp.134～138
- 20) Luts, J. G. and Scalia, D. J. : Deck Widening and Replacement of Woodrow Wilson Memorial Bridge, PCI Journal, Vol.29, May-June 1984, pp.74～93
- 21) 大阪市土木局・関西道路橋調査研究委員会：旧神崎橋の耐荷力に関する研究報告書，昭和58年 3月
- 22) Slutter, R. G. and Driscoll, G. C. : Flexural Strength of Steel-Concrete Composite Beams, Proc. of ASCE, ST4, April 1965, pp.71～99
- 23) 橋 善雄・中井 博・千葉静雄・田井戸米好・長崎光男：軽量コンクリートを用いた合成桁の実験，土木学会誌Vol.51，昭和41年11月，pp.43～50
- 24) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，昭和55年 2月