

# プレキャスト・プレストレスト合成床版に関する実験的研究(その1)

—曲げ加力実験および有効プレストレスト量確認実験—

小林 晋 爾  
立 部 正 則  
佐 藤 由 夫  
塩 屋 俊 幸

## § 1. はじめに

近年、鉄筋・型枠工の合理化の面より、プレキャスト・プレストレスト版(以下、PS単版)を現場打ちコンクリートの型枠兼用の構造部材として利用する「合成床版工法」が注目され、現在、国内各方面で研究開発が行なわれている。一方海外においては、量産住宅工法の一環として、より簡単な構造形態で積極的に取り入れられているのが実情であり、数多くの施工例が見られる。

本報告は、この「プレキャスト・プレストレスト合成床版(以下、PS合成床版)工法」に関して、設計手法の確認を行ない、同時に施工上の諸問題を明確にするために行なった実験について述べたものである。

なお、今回の実験的研究での試験体の試設計に当っては、American Concrete Institute Code (A.C.I. 基準)に準拠しているため、今後さらに他規準との対応についても検討しなければならない。特に、打継面での処理方法と許容せん断応力度との関係、部材間の接合部の検討は重要と思われる。

## § 2. 本工法の概要および問題点

PS合成床版工法の施工上の流れを模式的に示すと、図一1のようである。一方、これに対して設計に関するflowを、A.C.I.規準と対比させて示すと、図二のようである。

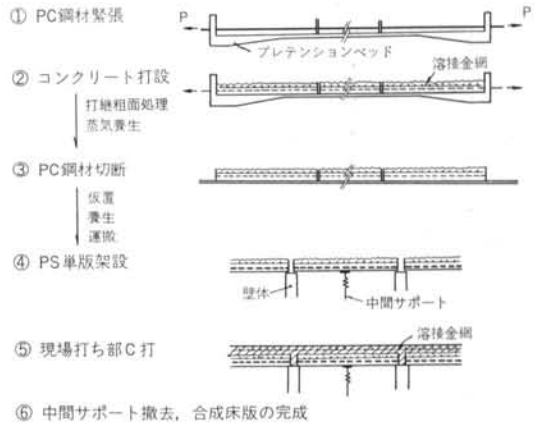
この流れの中での主要な問題点は、

- a) PS合成床版としての一体性の問題
- b) 合成床版の有効プレストレスト量に関する問題
- c) その他の設計条件の検討

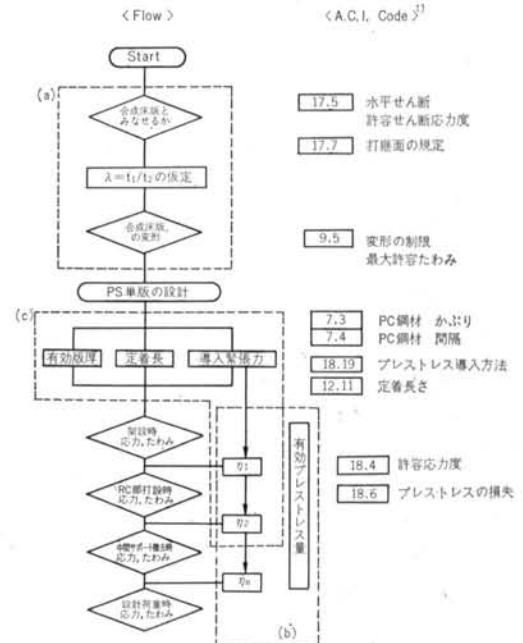
等である。これらの問題点について、実験データをもとに検討を行なったので、§3.以下に報告する。

ただし、PS合成床版の長期たわみについては、施工工程と密接に関係しており、重要な問題であるが本報告

では紙面の関係上割愛している。



図一1 PS合成床版工法の流れ図



図二 設計のflow

### § 3. 施工実験による設計条件の検討

#### 3.1 PS合成床版の概略設計

プレテンション方式により製作されたPS単版において、その緊張導入力を全長 $\ell$ にわたって $P_0$ とすると、PS単版完成時の応力、変形は任意の点 $x$ において、

$$M_x = \frac{1}{2}wx(\ell - x) - P_0 \cdot e_p \quad \dots\dots(1)$$

$$\delta_x = -\frac{1}{EcI_1} \left[ -\frac{1}{24}wx^4 + \frac{1}{12}w\ell x^3 - \frac{1}{2}P_0 \cdot e_p \cdot x^2 + \left( \frac{1}{2}P_0 \cdot e_p \cdot \ell - \frac{1}{24}wl^3 \right) x \right] \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 $\ell$  : PS単版長さ

$w$  : コンクリート単位重量

$e_p$  : PC鋼材偏心量

$E_c$  : コンクリートヤング係数

$P_0$  : 導入緊張力

$I_1$  : PS単版断面2次モーメント

である。

支間中央断面 ( $x = \ell/2$ ) にては、

$$M_c = \frac{1}{8}w\ell^2 - P_0 \cdot e_p \quad \dots\dots(3)$$

$$\delta_c = \frac{\ell^2}{384EcI_1} (5w\ell^2 - 48P_0 \cdot e_p) \quad \dots\dots(4)$$

となる。

次に、現場に架設し現場打ちコンクリートを打設する直前には、コンクリートのクリープ、乾燥収縮により緊張力が変化する。このときの緊張力有効率を $\eta_1$ とすると中央断面応力度は、

$$\left( \frac{\sigma_{pe}'}{\sigma_{pe}} \right) = \frac{\eta_1 P_0}{A} \pm \frac{1/8w\ell^2 - \eta_1 P_0 \cdot e_p}{Z_1} \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 $Z_1$  : PS単版断面係数

となる。

このときのPS単版のたわみはレベルにあるものとし中間サポートによる応力変化はないものとする。

次に、現場打ちコンクリート打設による増加応力度は中間サポート反力によって生じ、

$$\left( \frac{\sigma_a'}{\sigma_a} \right) = \mp \frac{1/8w'}{Z_1} \left( \frac{\ell}{2} \right)^2 \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 $w'$  : RC部コンクリート単位重量

で表わせる。

さらに、現場打ちコンクリート硬化後、合成断面として働らく状態で中間サポートを撤去すると、これによる増加応力度は、

$$\left. \begin{aligned} \sigma' &= \frac{1/8w}{Z_e'} \ell^2 \\ \sigma &= \frac{1/8w}{Z_e} \ell^2 \end{aligned} \right\} \dots\dots(7)$$

ここに、 $Z_e, Z_e'$  : 合成床版の断面係数で表わせる。

以上の応力状態変化を経過した後、コンクリートのクリープ、乾燥収縮が安定状態に達し、緊張力有効率が $\eta_m$ となった状態で、設計荷重が載荷されるものとする。

#### 3.2 施工実験による設計条件の検討

上述の概略設計の流れの中には、いくつかの設計上の仮定が含まれている。合成床版の曲げ性状、および有効プレストレス量については後に述べるので、ここでは施工実験を通じた設計条件の検討を行なう。

1) 有効版厚 $h_e$ について

PS単版はその打継面が凹凸面であるため、有効版厚 $h_e$ の決定が必要であった。

有効版厚の概略値は施工実験の1項目として、RC部コンクリート打設時のPS単版のたわみ測定結果から得た。このときのたわみは、

$$\delta_{cat} = \frac{5w'\ell_4}{384EcI_1} \quad \dots\dots(8)$$

$$\text{ここに、} I_1 = \frac{1}{12} b(h_e)^3$$

で表わされるが、 $h_e$ に $h_1$  (凸部までの版厚)、および $h_2$  (凹部までの版厚)を採用すると計算値は各々、 $\delta_{cat} = 17.3\text{mm}$ 、 $\delta_{cat} = 23.0\text{mm}$ となる。

一方、2体の試験体から得た実測値は、 $\delta = 16\text{mm}$ 、 $19\text{mm}$ であったので、概略値として $h_e = h_1$ を採用した。

さらに、後に述べる曲げ加力実験においても、換算断面算定式の妥当性が精度よく確認されたため、最終的に $h_e = h_1$ を採用することにした。

2) 定着長さ $\ell_t$ について

プレテンション部材では、その性質上、定着長さが問題となる。今回のような床版では、定着域でのせん断応力度の検討は重要な問題とはならないが、たわみ性状に及ぼす定着長さの影響は検討する必要がある。

定着長さの実測データは§5.に述べてあるが、

$$\ell_t \approx 80d \quad \dots\dots(9)$$

を得た。これをもとに、たわみに対する影響を検討すると以下ようになる。

プレテンション部材端部の定着長さを $\ell_t$ 、部材中央部緊張力を $P_t$ とし、定着域での緊張力分布を、

$$P_x = P_t \cdot \frac{x}{\ell_t} \left\{ 3 \left( 1 - \frac{x}{\ell_t} \right) + \left( \frac{x}{\ell_t} \right)^2 \right\} \quad 0 \leq x \leq \ell_t \quad \dots\dots(10)$$

と仮定すると、プレストレスによる中央断面のそりは、

$$\delta_c = \frac{P_0 \cdot e_p}{8EC \cdot I_1} \ell^2 \left\{ -1 + \frac{2}{5} \left( \frac{\ell_t}{\ell} \right)^2 \right\} \quad \dots\dots(11)$$

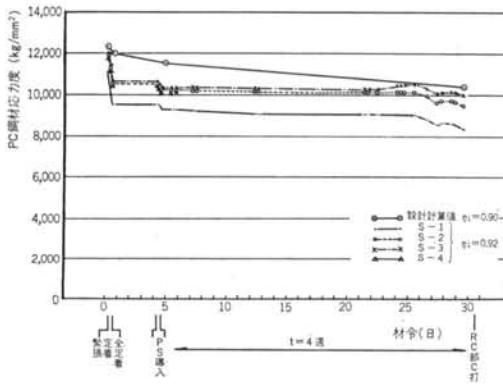


図-3 PC鋼材応力度 PS D-1

で表わされる。実測データによって、 $\delta_0$ への影響を求めると、定着長さを考慮した場合と考慮しない場合の誤差は、わずか0.9%であった。これより、たわみに関しては設計上、部材全長にわたり緊張力一定と仮定しても良いことが確認できた。

### 3) 緊張力有効率 $\eta_1$ について

PS合成床版製作上の重要な問題として、各施工段階における鋼材有効緊張力、およびコンクリート応力状態変化の把握がある。PC鋼より線の緊張力変化の実測値を図-3に示すが、RC部コンクリート打設時の有効率 $\eta_1$ について、今回の施工工程では設計上 $\eta_1=0.90$ を用いても良いことが施工実験の過程で実証された。

## § 4. PS合成床版の曲げ実験

### 4.1 実験の目的

PS合成床版の構造上の主要な問題は、①弾性領域の応力度、変形状が合成床版としての挙動を示すか、②曲げひびわれ発生荷重、③ひびわれ発生以後の曲げ性状、④打継面での一体性は確保されるか、⑤破壊荷重、等である。また、これらの性状が凹凸面形状の差異によってどのように影響されるかを検討し、設計手法に対す

る資料とする目的で実験を行なった。

### 4.2 試験体の種類

試験体の種類は、表-1に示すように、打継面の凹凸形状の差異によるもの4種類(タイプN, A, B, C)および溶接金網の寸法、位置の異なるもの1種類(タイプD)の5種類とし、それぞれ2体ずつ計10体の試験を行なった。

試験体寸法は、試設計実大スパンを再現するために、全長 $L=6.8m$ 、床版幅 $B=1.0m$ とした。代表的な試験体寸法、断面を図-4に示す。

### 4.3 試験体の製作

試験体の製作に当っては、今回の実験が施工実験としての要素も含んでいるため、試験体の応力、たわみに関して、製作開始時から完成に至るまでのデータを取得し、以後の検討資料とした。

#### 1) 使用材料

a) コンクリート：PS単版部、現場打ち部のコンクリート調査表を表-2に示す。

b) PC鋼材：ASTM A-416に準ずるPC鋼より線7本より12.7mm(スタビライズト)を用いた。

c) 一般の鋼材：PS単版部には、溶接金網 $3.2\phi-150 \times 150$ (タイプA, B, C)および $6\phi-150 \times 150$ (タイプD)を、また現場打ち部には $6\phi-150 \times 150$ を用いた。

#### 2) 試験体の応力状態

PS単版の製作は、コンクリート圧縮強度が $300kg/cm^2$ を上回ったことを確認した後、プレテンション方式によ

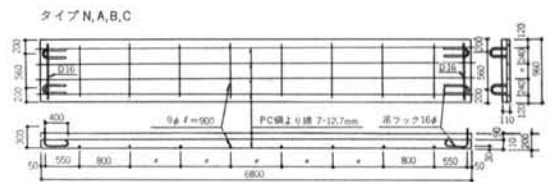


図-4 試験体寸法

	タイプN		タイプA		タイプB		タイプC		タイプD	
	N-1	N-2	A-1	A-2	B-1	B-2	C-1	C-2	D-1	D-2
打継面形状	木こて1面 3.2φ-150×150 溶接金網 12.7PC鋼より線 $F_0=350kg/cm^2$		50 10ミリ山 3.2φ-150×150 12.7PC鋼より線 $F_0=350kg/cm^2$		15ミリ山 3.2φ-150×150 12.7PC鋼より線 $F_0=350kg/cm^2$		20ミリ山 3.2φ-150×150 12.7PC鋼より線 $F_0=350kg/cm^2$		15ミリ山 溶接金網 6φ-200×200 12.7PC鋼より線 $F_0=350kg/cm^2$	
備考	木ゴテ仕上げ				機械仕上げ					

表-1

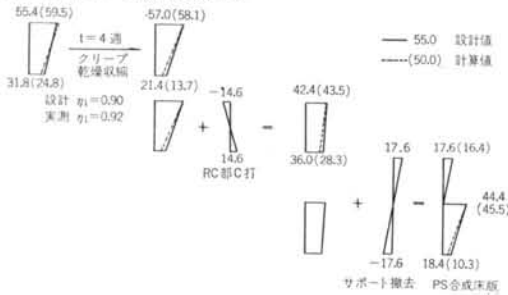
	セメント種類		粗骨材 最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (kg/m <sup>3</sup> )				
	早 強	早 強					W	C	S	G	混 和 剤
P S 単 版	早 強	早 強	25	6	43.0	35.2	137	319	671	1,235	プラスチック 3.51
現 場 打 ち	早 強	早 強	25	18	63.0	46.0	186	296	827	982	ビ ン ゾ ール 0.083

表一 2 コンクリート調査表

		コンクリート 圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		コンクリート 引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )		曲げひびわれ 発生荷重			せん断ひびわれ 発生荷重			最大 荷重 (ton)	破 壊 型 式
		P S 部	R C 部	P S 部	R C 部	計算値 (ton)	実験値 (ton)	実験値 計算値	計算値 (ton)	実験値 (ton)	実験値 計算値		
タ イ プ N	1	336	266	23.9	19.8	2.4	2.50	1.04	5.5	5.70	1.04	6.80	RC部斜引張破壊
	2	362	279	27.8	21.7	2.6	2.25	0.87	6.0	6.00	1.00	6.40	〃
タ イ プ A	1	343	326	25.2	23.8	2.3	2.25	0.98	6.6	5.70	0.86	6.15	〃
	2	368	293	28.3	21.3	2.4	2.25	0.94	5.9	5.75	0.97	6.25	曲げ破壊
タ イ プ B	1	350	341	26.5	24.1	2.6	2.50	0.96	6.7	—	—	6.50	RC部斜引張破壊
	2	368	275	28.5	21.8	2.7	2.50	0.93	6.0	6.30	1.05	6.70	〃
タ イ プ C	1	352	276	26.9	20.8	2.3	2.00	0.87	5.8	6.00	1.03	6.75	〃
	2	370	301	28.9	21.1	2.5	2.25	0.90	5.8	5.75	0.99	6.45	〃
タ イ プ D	1	355	278	27.4	21.0	2.4	1.75	0.73	5.8	5.25	0.90	5.65	〃
	2	370	286	28.9	22.7	2.5	1.75	0.70	6.3	5.50	0.87	5.70	〃

表一 3 実験結果の概要

導入プレストレス、有効プレストレス

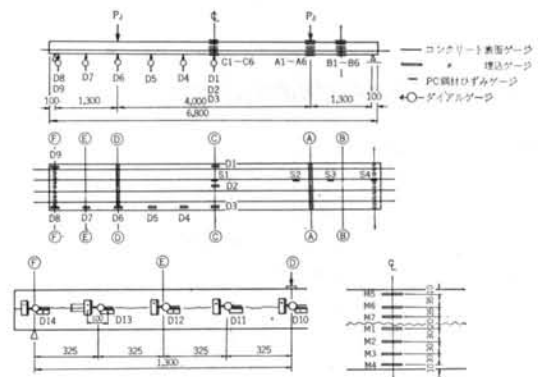


図一 5 コンクリート応力状態 (単位: kg/cm<sup>2</sup>)

りプレストレスを導入した。導入緊張力は平均  $P=10.3$  tonで、平均プレストレスは  $42\text{kg/cm}^2$  であった。

その後、両端支持の仮置状態に設置し、P S導入後27~29日材令でスパン中央に中間サポートを設けて現場打ちコンクリートを打設した。現場打ちコンクリート硬化後、中間サポートを撤去し、P S導入後40~52日材令で曲げ実験を実施した。

加力実験開始時におけるコンクリート応力状態を把握するため、有効緊張力の測定を行ない(図一 3)、この実測値をもとにコンクリート応力度の計算を行なった。



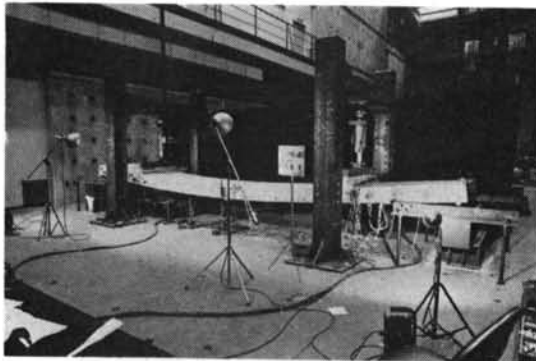
図一 6 載荷および測定方法

図一 5に、加力実験開始時までのコンクリート応力状態を示すが、実線は設計値を、破線はP C鋼材緊張力の実測値をもとにした計算値である。

ただし、R C部打設後の損失緊張力については計算上の簡略化のため、便宜上零とみなしている。

#### 4. 4 載荷および測定方法

載荷および測定方法を図一 6、写真一 1に示す。載荷



写真一 載荷状況

方法は試設計実大スパン ( $\ell=6.6\text{m}$ ) における2点集中荷重とし、載荷サイクルは第1, 第2サイクルを各々3 ton, 5 tonを最大荷重とした後、第3サイクルで破壊とした。測定項目は以下のようである。

- 1) 曲げ変形測定(1/100mmダイヤルゲージ) D1~D9
- 2) 水平せん断ずれ変形測定(1/1000mm同上) D10~D14
- 3) コンクリート表面ゲージ(G. L. = 60mm) a1~a6, b1~b6, c1~c6
- 4) コンクリート埋込ゲージ(G. L. = 60mm) M1~M7
- 5) PCストランドひずみゲージ(G. L. = 5mm) S1~S4

#### 4.5 実験結果および考察

実験結果の概要を表-3に示す。

##### 1) 弾性領域における挙動

支間中央断面でのコンクリート表面ひずみ(図-7)および、中央たわみ(図-8)について検討した結果、弾性領域において以下のことがいえる。

a) 支間中央断面におけるコンクリートひずみ度、および中央たわみ実測値はともに、弾性領域では計算値とよく一致する。合成床版としての換算断面算定式、および材料諸数の仮定が妥当であることがわかる。

b) PS合成スラブが弾性領域にあると見なし得るのは応力度、たわみともに、 $P=2.0\text{ton}$ 程度と考えてよく、これは曲げ設計荷重  $P_a=0.75\text{ton}$ の約2.7倍にあたる。

c) 曲げ設計荷重時における合成床版の中央たわみ平均値は、設計計算値  $\delta_{des}=2.8\text{mm}$  に対して実測値  $\delta_{exp}=2.9\text{mm}$  が得られた。PS合成床版完成時の初期たわみは  $\delta_{int}=2.9\text{mm}$  であり、合計たわみ量は  $\delta_t=5.8\text{mm}$  である。

この設計荷重時における  $\delta_t/\ell$  は、 $\delta_t/\ell = \frac{5.8}{6,600} = \frac{1}{1,140}$  となり許容値  $\delta/\ell = \frac{1}{480}$  を満足する。また、許容たわみ

量に達するのは、設計荷重の約3.1倍である。

##### 2) 曲げひびわれ発生荷重

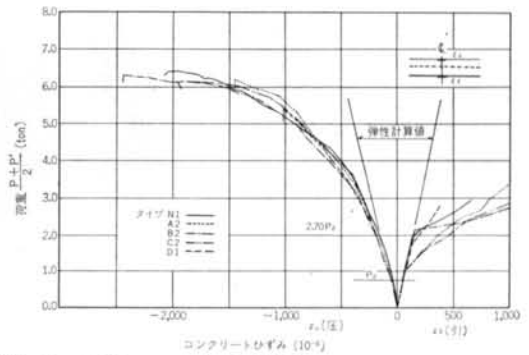


図-7 荷重~コンクリートひずみ

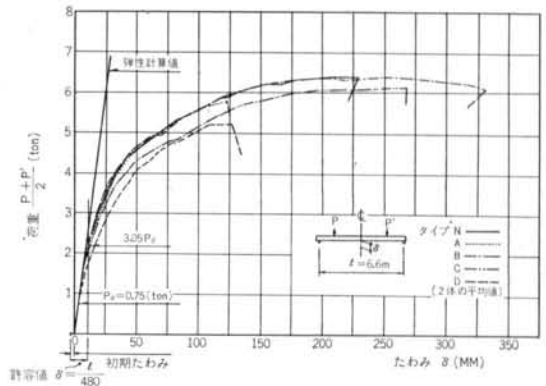


図-8 荷重~たわみ

曲げひびわれ発生荷重の実験値、計算値を表-3に示した。計算値算定式は略算法：

$$P_{cr}(\text{cal}) = \frac{I_e}{a \cdot y_e} \left( \frac{5}{3} \sigma_{tu} + \sigma_{ps} \right) \quad \dots\dots(12)$$

ここに、

$a$  : せん断スパン長さ、 $y_e$  : 引張縁と中立軸の距離、

$\sigma_{tu}$  : PS部引張強度、 $I_e$  : 断面二次モーメント、

$\sigma_{ps}$  : プレストレス導入応力度

を用いている。

曲げひびわれ荷重検討より以下のことがわかる。

a) 曲げひびわれ発生荷重は、タイプDを除いて近似弾性計算式では算定できる。これは、換算断面算定式の妥当性およびPS合成床版完成までの応力状態変化の仮定が妥当であったことを示している。曲げひびわれ発生に至る応力度変化の計算値を図-9に示す。

b) 曲げひびわれ発生荷重平均値(タイプDを除く)は

$$P_{cr}(\text{ave}) = 2.32(\text{ton})$$

で、これは曲げ設計荷重  $P_{des}=0.75\text{ton}$  の約3.1倍に相当する。

c) 打継面凹凸形状の差異による影響はないと考えられるが、タイプDのみが低い荷重で曲げひびわれを発生

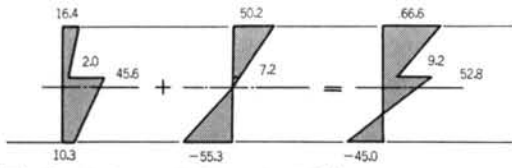


図-9 曲げひびわれ発生に至る応力度

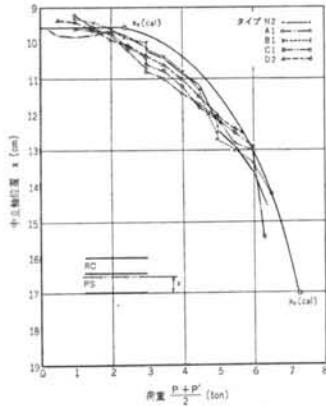


図-10 中立軸位置変化

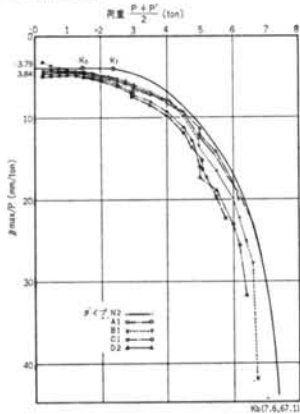


図-11 曲げ剛性の低下  
した。

溶接金網筋の寸法、位置が他のタイプに比べてP S 単版の中立軸位置に近い、クリープ性状に差異を生じたとも考えられるが、測定データは得られなかった。

### 3) 曲げひびわれ発生以後の挙動

曲げひびわれ発生以後の挙動を知るために、支間中央断面での中立軸位置の変化(図-10)、曲げ剛性低下率(図-11)について検討した結果、以下のことがわかる。

a) コンクリートひずみデータより求めた中立軸位置の変化、およびたわみ測定より求めた剛性低下率の変化からは、打継面凹凸形状による顕著な差異はない。

b) 曲げひびわれ発生後の中立軸の移動は、完全合成床版としての弾性理論計算値  $x_e(\text{cal})$  と、合成床版曲げ破

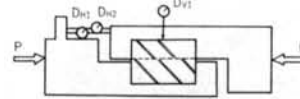


図-12 Push-off試験方法

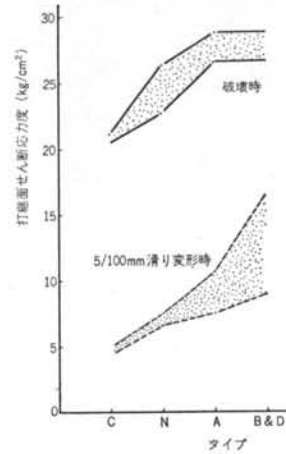


図-13 Push-off試験結果

壊時の計算値  $x_u(\text{cal})$  とを2次放物線で結んだものとしてとらえられる。また、曲げ剛性低下率の推定も、曲げひびわれ発生直前の剛性  $K_i$  と曲げ破壊時の剛性  $K_b$  とを2次放物線で結んだものとしてとらえられる。これらは合成床版の曲げ性状が曲げ降伏型であることを示しており、打継面でのせん断ずれ発生はないと考えられる。

### 4) 打継面における水平せん断耐力

P S 合成床版打継面における水平せん断ずれを検討するために、曲げ実験終了後の試験体から健全な部分を切出し、Push-off試験を行なって確認データを得た。

Push-off試験方法を図-12に、試験結果を図-13に示す。これより、

a) 5/100mm滑り変形時のせん断応力度  $\tau$  は、いずれのタイプにおいても  $5.0 \text{ kg/cm}^2$  以上であり、設計荷重時の  $\tau_{\text{des}}$  に対して約10倍である。

b) 破壊時せん断応力度は各タイプにより異なるが、最低  $10 \text{ kg/cm}^2$  は確保されている。

c) 凹凸面の差異についてみると、5/100mm滑り変形時および破壊時のせん断応力度はタイプC, N, A, B, Dの順に大きくなっている。これは『打継面の付着抵抗は、水平接合部の面積によって受けもたれており、凹凸によるKeyは付着が健全である限りは有効に働かない』という、N. W. Hanson氏のPush-off試験結果<sup>2)</sup>とよく一致している。

d) Push-off試験結果からは、水平接合面積が大きいタイプAまたはBの採用が望ましいことがわかる。

次に、P S 合成床版打継面における水平せん断ずれ発

生を検討するために、せん断スパン内打継面近傍のコンクリートひずみ測定、ダイヤルゲージによる相対変位量の測定を行なった。その結果、以下のことがわかる。

a) 曲げひびわれ発生後、これが打継面高さまで達すると、局所的な剝離を生じ、コンクリートひずみは打継面を境に不連続分布となる。一方、曲げひびわれにはさまれた健全な断面でのひずみは、破壊に至るまで連続分布を示しており、局所的な水平せん断ずれは生じるものの、合成床版としての一体性は失なわれていないと判断される。

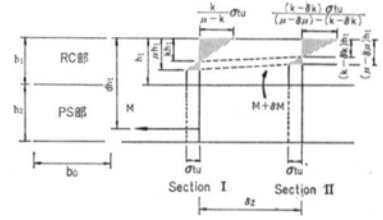


図-14 コンクリート応力分布の仮定

b) せん断設計荷重時に打継面に生ずるせん断応力度は  $\tau_{des} = \frac{S \cdot Q}{I \cdot b} = 0.44 \text{ kg/cm}^2$  で、破壊荷重時において上式より  $\tau_u$  を算定すると、公称最大せん断応力度  $\tau_u$  は  $\tau_u = 5.0 \sim 5.5 \text{ kg/cm}^2$  程度である。破壊時において Push-off 試験結果からわかるように、5/100mm 程度の局部滑りは生じていると思われるが、これは従来の研究<sup>3), 4)</sup>でも明らかのように、部材としての一体性が失われたことを示すものではない。

5) せん断ひびわれ強度および破壊

タイプ B I を除き、最も大きな曲げモーメントおよびせん断力を受ける荷重点断面ですべての試験体は破壊している。荷重点断面のコンクリート圧縮縁ひずみ、P C 鋼材ひずみはともに圧壊および降伏には達していない。一方、破壊近傍におけるコンクリート主引張ひずみ計算結果は、斜引張ひびわれをよく説明している。これらのことから、ひびわれ強度を“P S 部の曲げひびわれが打継面に達した後、さらに R C 部引張側コンクリートが塑性域に入った応力状態での R C 部せん断ひびわれ強度”と仮定して算定を試みた。

以下、せん断ひびわれ強度算定方法の概略を示す<sup>9)</sup>。

コンクリート応力分布を図-14のように仮定すると、中立軸から y なる距離におけるせん断応力度  $\tau_m$  は、

$$\tau_m = \frac{\frac{1}{2} \left( \frac{\partial \mu}{\partial z} - \frac{\partial k}{\partial z} \right) \left( k^2 - \frac{y^2}{h^2} \right) - (\mu - k) \left( k - \frac{y}{h} \right) \frac{\partial k}{\partial z}}{(\mu - k) \{ (\mu - \partial \mu) - (k - \partial k) \}} \cdot h \cdot \sigma_{tu} \quad \dots\dots(13)$$

で表わされる。

$$\tau = \lim_{\partial z \rightarrow 0} \tau_m = \frac{1}{2} \left\{ \frac{\frac{\partial \mu}{\partial z} - \frac{\partial k}{\partial z}}{(\mu - k)^2} \left( \frac{y}{h} \right)^2 - 2 \frac{\frac{\partial k}{\partial z}}{\mu - k} \left( \frac{y}{h} \right) + \frac{2 k \mu \frac{\partial k}{\partial z} - k^2 \left( \frac{\partial \mu}{\partial z} + \frac{\partial k}{\partial z} \right)}{(\mu - k)^2} \right\} \cdot h \cdot \sigma_{tu} \quad \dots\dots(14)$$

となり、上式中の未知数、 $\frac{\partial \mu}{\partial z}$ 、 $\frac{\partial k}{\partial z}$  は、力の釣合い、モーメントの釣合い式より、

$$\frac{\partial \mu}{\partial z} = \frac{3 S}{b h_1^2 \sigma_{tu}} \cdot \frac{1}{C_1 C_3 + C_2} \quad \dots\dots(15)$$

$$\frac{\partial k}{\partial z} = \frac{3 S}{b h_1^2 \sigma_{tu}} \cdot \frac{C_3}{C_1 C_3 + C_2} \quad \dots\dots(16)$$

ここに、

$$C_1 = \frac{k^2 (3 \mu - 2 k)}{(\mu - k)^2} + 2 k + \mu - 3 - f$$

$$C_2 = \frac{k^3}{(\mu - k)^2} + \mu - k$$

$$C_3 = \frac{(1 + f) - \mu}{1 + f} \quad f = \frac{A_p \cdot \sigma_p}{b h_1 \cdot \sigma_{tu}}$$

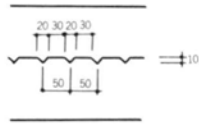
を得る。

以上より、

$$\tau = \frac{3 S}{2 b h} \left\{ \beta_1 \left( \frac{y}{h} \right)^2 + \beta_2 \left( \frac{y}{h} \right) + \beta_3 \right\} \quad \dots\dots(17)$$

ここに、
$$\beta_1 = \frac{1 - C_3}{(C_1 C_3 + C_2) (\mu - k)^2}$$

$$\beta_2 = \frac{-2 C_3}{(C_1 C_3 + C_2) (\mu - k)}$$



$$P_0 l = \frac{1}{8} W L^2 \quad \text{WHERE } l = 1.3 \text{ m}$$

$$P_0 = \frac{0.18 \times 6.6}{8 \times 1.3} \quad \text{W} = 0.18 \text{ t/m}^2$$

$$L = 6.6 \text{ m}$$

Type A-2  
 $P_U = 6.30 \text{ ton}$   
 $P_D = 0.75 \text{ ton}$

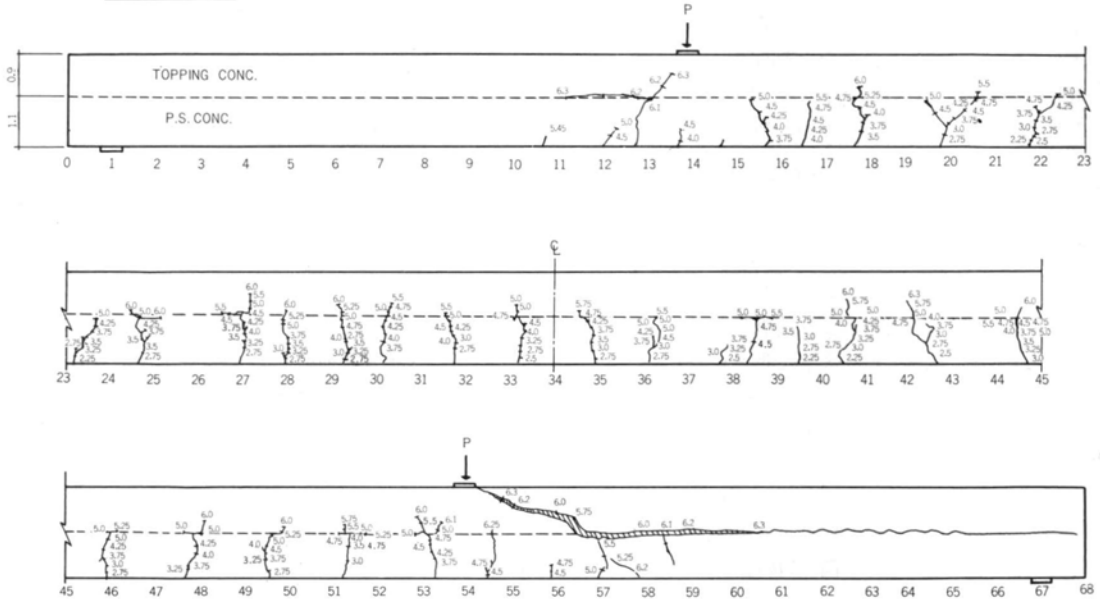


図-16 ひびわれ発生状況

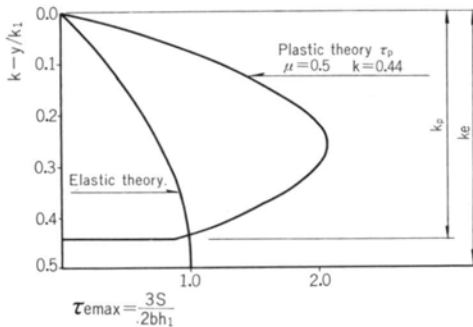


図-15 せん断応力度の分布

$$\beta_8 = \frac{2k\mu C_3 - k^2(1+C_3)}{(C_1 C_3 + C_2)(\mu - k)^2}$$

次に、 $\mu$ と $k$ との関係式は、

$$k = \frac{2(1+f)\mu - \mu^2}{2(1+f)} \quad \dots\dots(18)$$

であり、 $\mu$ を仮定することによりすべての未知数は決定される。従来の研究<sup>9)</sup>より $\mu=0.5$ と仮定し、その他の定数を用いて、 $\mu$ の分布を得ることができる(図-15)。

これより、 $\tau_{pmax} = 2.08\tau_{emax}$   $\dots\dots(19)$

なる関係式を得る。次に、簡易化するため、

$$\sigma_1 = -\tau_{pmax} = \sigma_{tu} \quad \dots\dots(20)$$

なるせん断ひびわれ条件を適用して、ひびわれ荷重を算

定する。

以上が算定方法の概略であるが、算定結果は、表-3に示すように、実験値と計算値とは、ほぼ精度良く一致し、破壊に至る過程をよく説明していると考えられる。ひびわれ発生状況の一例を図-16に示すが、ひびわれ状況等も含めてせん断ひびわれ強度および破壊について以下のことがいえる。

a) 本実験の破壊に至る状況は次のように考えられる。「P.S部に生じた曲げひびわれが打継面に達すると、その近傍では局部的な剝離を生じる。増加する荷重に対して、この断面ではRC部のみが単版として抵抗し、引張側コンクリートが塑性域に入った後、RC部中立軸位置近くに大きなせん断応力度を生じる結果となる。このせん断応力度がRC部の引張強度に達すると、破壊を導くせん断ひびわれを発生する。」

b) 上記のように、破壊直前には局部的なせん断ずれを生じてはいるが、たわみ性状等から明らかなように、部材としての一体性は失われていないと考えられる。

また最大荷重時、せん断ひびわれ発生位置から支点に向かって、打継面に剝離を生じる試験体もあったが、これは破壊に伴う二次的なひびわれと思われる。



c) P S 合成床版の破壊強度は、曲げモーメントとせん断力との比率によって当然かわってくるが、本実験のような荷重条件においては、その破壊せん断力  $S_n$  は、設計せん断力  $S_{des}$  に対していずれのタイプも 9.0倍以上の安全度をもつ。

## § 5. 有効プレストレス量 (有効率: $\eta$ ) 確認実験

### 5.1 実験の目的

床版のように版厚が薄く、材長の長い部材にプレストレスを導入する場合、コンクリートの硬化に伴ってプレストレス量の著しい減少が懸念されたので、実験によってこれを確認した。

### 5.2 試験体

試験体の種類および形状を表-4に示す。試験体は実際の施工段階を考慮して、P S 単版 (P S O と略す)、P S 合成床版 (P S U と略す)、P S 合成床版に積載荷重を載荷したもの (P S L と略す) の3種類とし、それぞれ2体ずつ計6体製作した。試験体形状は、定着長さを考慮して長さを3mとした。幅は48cm、版厚は11cmと20cmとした。

使用材料は、コンクリートを除いて§4.に述べたものと同一のものとした。コンクリートの調合を表-5に示す。調合が異なったのは12時間の蒸気養生後のコンクリート圧縮強度 ( $\sigma_c$ ) を300kg/cm<sup>2</sup>以上とするためである。P S 緊張後、 $\sigma_c=312\text{kg/cm}^2$ を得てプレストレスを導入した。各P C 鋼より線の導入緊張力は平均9.0tonであり、平均プレストレスは32kg/cm<sup>2</sup>であった。実大寸法に比して試験体が小さいため、各々の値は小さくなっている。P S 導入後、10日目に現場打ちコンクリートを打設し、20日目にサポート撤去、28日目に積載荷重を載荷した。

試験体名称	数量	試験体形状および荷重方法	備考
P S O	2		プレストレストプレキャスト版の自重のみ
P S U	2		P S 合成床版の自重のみ
P S L	2		P S 合成床版の自重と積載荷重

表-4 試験体の種類および荷重方法

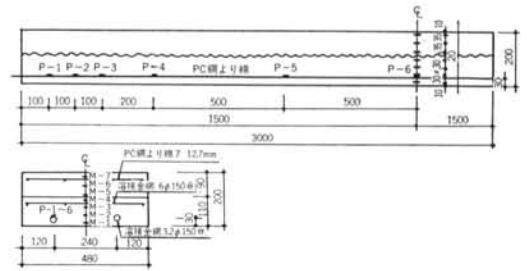


図-17 ひずみゲージの配置

### 5.3 荷重および測定方法

荷重方法は、表-4に示すように単純支持とし、特にP S Lでは実大部材 ( $\ell=6.6\text{m}$ ) での積載荷重180kg/m<sup>2</sup>による部材中央曲げモーメントと等しくなるよう1960kg/m<sup>2</sup>の等分布荷重とした。荷重にはカウンターウェイトを使用した。

測定方法は、P C 鋼より線・コンクリートのひずみをP S 緊張、コンクリート打設時から、デジタルひずみ測定器を用いて実施した。ひずみゲージの配置を図-17に示す。また、別途にダミーゲージ用試験体を準備した。

変形の測定は、試験体製作後レベルにセットした状態で、試験体中央下端にダイヤルゲージを設置して実施した。測定は研究所内の敷地に仮設上屋を設け、自然環境条件の中で約400日間実施した。温度変化によるひずみ

コンクリート種類	セメント種類	粗骨材最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	W/C (%)	S/a (%)	単位重量 (kg/m <sup>3</sup> )				
						W	C	S	G	混和剤
P S 単版	普通ポ	25	6	29.3	38.7	125	427	粗 531 細 205	1214	マイティ 150 3,416
現場打ち	普通ポ	25	18	53.0	42.6	179	338	758	1036	ビンゾール 101.4(cc/m <sup>3</sup> )

表-5 コンクリート調合表

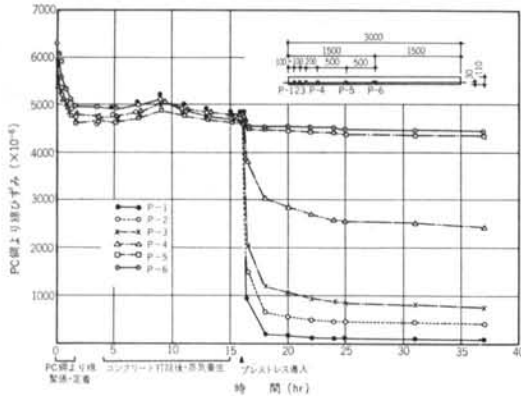


図-18 PCより線のPS導入時のひずみ分布(PSU-2)

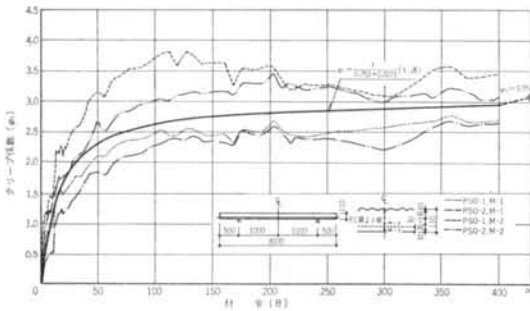


図-19 コンクリートのクリープ係数 (PSO)

変化は、ダミーゲージで補正している。いずれの試験体も試験体小口部からの水分の逸散を防止するため、小口全面に液状ゴム (polybd) を塗布した。

測定終了後、同一試験体の曲げ実験を行なってプレストレス有効力を再確認した。

#### 5.4 実験結果および考察

##### (1) PC鋼より線の定着長さ ( $l_i$ )

PS導入時のPC鋼より線のひずみ分布の例を図-18に示す、この結果からPC鋼より線の定着長さは  $l_i = 80d$  ( $d = \text{PC鋼より線の直径}$ ) が確認できた。

##### (2) コンクリートのクリープ係数 ( $\varphi_t$ )

ここでは、コンクリートのクリープ係数 ( $\varphi_t$ ) をPSOより求め、他の試験体も同一コンクリートを使用しているため  $\varphi_t$  は不変であるとしている。したがって、合成床版となることによる  $\varphi_t$  の変化、および載荷することによる応力変化に伴う  $\varphi_t$  の変化は考慮していない。

PS単版に使用したコンクリートのクリープ係数をひずみ実測値 (ダミーゲージによる温度変化、乾燥収縮ひずみを差し引いた値) によって求めた。その結果を図-19に示す。最小二乗法によって  $\varphi_t$  を算出し、クリープ

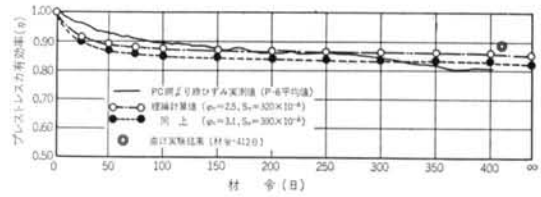


図-20 プレストレス力有効率の経時変化(PSO)

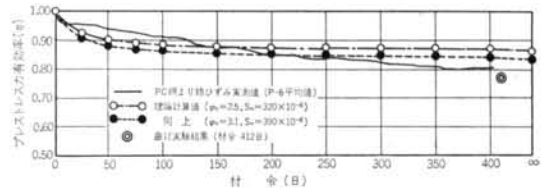


図-21 プレストレス力有効率の経時変化(PSU)

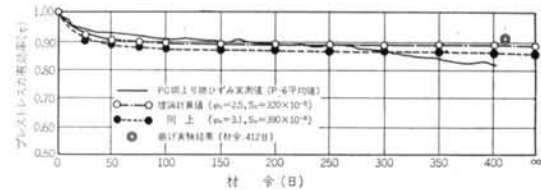


図-22 プレストレス力有効率の経時変化(PSL)

係数最終値 ( $\varphi_n$ ) を求めると、 $\varphi_n = 3.05$  となった。また、PC鋼より線のひずみ測定結果による計算値より、 $\varphi_n = 2.5$  と考えられる。蒸気養生を行なって早期材令時にPS導入を行なったコンクリートのクリープ係数最終値として、 $\varphi_n = 2.5 \sim 3.1$  は従来の研究<sup>6),7)</sup> から妥当な値といえる。

施工段階におけるクリープ係数として、今回の実験結果では、PS合成床版のサポート撤去後のクリープ係数最終値は、 $\varphi_{n1} = 1.1 \sim 1.4$ 、積荷重載荷後のクリープ係数最終値は  $\varphi_{n2} = 0.9 \sim 1.2$  となった。これらの値は、 $\varphi_n = 3.05$  の算定式より求めた値とよく一致し、前述の仮定条件の妥当性が確認できた。

##### (3) コンクリートの乾燥収縮ひずみ ( $S_n$ )

実測による値が得られなかったため、コンクリートのクリープ係数の進行過程の相似性<sup>9)</sup> を利用して、クリープ係数から  $S_n$  を求めた。その結果、 $S_n = 320 \sim 390 \times 10^{-6}$  と推定される。

##### (4) 有効プレストレス量 (有効率: $\eta$ )

有効プレストレス量については、A. C. I に規定がないので以下に示す方法で、プレストレス力有効率 ( $\eta$ ) を求めて検討した。

試験体			プレストレス力有効率( $\eta$ )		理論計算式*による有効率(1)材令400日			曲げ実験による有効率( $\eta$ )	
			ひずみ実測値による有効率( $\eta$ ) 材令400日		$\varphi_n=2.5, S_n=320 \times 10^{-6}$			材令412日	
			$\eta_t(\%)$	$\eta_t/\eta_{call}(\%)$	$\eta_{call}(\%)$	$\eta_{call}/\eta_{ca12}$	$\eta_{ca12}(\%)$	$\eta_{ca12}/\eta_{call}$	$\eta_b(\%)$
P S O	1	81.3	0.951	85.5	1.000	82.4	0.964	91.3	1.068
	2	80.0	0.932	85.8	1.000	82.8	0.965	86.2	1.005
	平均値	80.7	0.942	85.7	1.000	82.6	0.964	88.7	1.035
P S U	1	81.0	0.934	86.7	1.000	83.9	0.968	78.8	0.909
	2	79.7	0.918	86.8	1.000	84.0	0.968	73.7	0.849
	平均値	80.4	0.926	86.8	1.000	84.0	0.968	76.3	0.879
P S L	1	82.7	0.936	88.4	1.000	85.9	0.972	86.5	0.979
	2	—	—	87.8	1.000	85.3	0.972	96.0	1.093
	平均値	—	—	88.1	1.000	85.6	0.972	91.0	1.036

\*「坂, 岡田, 六車らによる理論計算式」<sup>9)</sup>

$$\eta = \frac{P_n}{P} \quad (\text{プレストレス力有効率})$$

$$P_t = P' - r \left\{ P' + \frac{1-r}{r} \left( D_s \frac{S_n}{\varphi_n} + \frac{dS_n}{\varphi_n h} \right) \right\} (\varphi_t - \varphi_{t1})$$

$$P_t = P - r \left\{ F'(P) + \frac{1-r}{r} \left( \frac{S_n}{\varphi_n} D_s + \frac{dS_n}{\varphi_n h} \frac{K_t}{e} \right) \right\} (\varphi_t - \varphi_{t1})$$

$$F'(P) = P - \frac{1-r}{r} \left( \frac{\alpha}{1-\alpha} P' + \frac{\beta}{1-\beta} \frac{M'}{e} \right) + \frac{1-r}{r} (\alpha N_1 + \frac{\beta M_1}{e}) \left. \begin{array}{l} \varphi_t - \varphi_{t2} \\ \varphi_t - \varphi_{t1} \end{array} \right\} \quad (\text{PSL})$$

表-6 プレストレス力有効率( $\eta$ )

- a) PC鋼より線のひずみ実測値
- b) コンクリートのクリープ係数および乾燥収縮ひずみなどを用いた, 坂・岡田・六車らの理論計算式<sup>9)</sup>
- c) ひずみ測定終了後の曲げ実験結果

a), b), c)より求めた結果を図-20~22, 表-6に示す。これらの結果から, ひずみゲージの長期使用における安定性, 試験体のばらつきなどを考慮して検討すると, 理論計算式を用いて有効率を求めてもよいことが確認できた。したがって, 理論計算式を用いて最終有効率( $\eta$ )を算定するとPSO;  $\eta=0.81$ , PSU;  $\eta=0.83$ , PSL;  $\eta=0.84$ となり, PS合成床版におけるプレストレス力最終有効率の設計値として,  $\eta=0.80$ の採用は妥当であると判断される。

## § 6. 結論

PS床版の製作から完成に至る施工実験, 曲げ加力実験, Push-off実験, 有効プレストレス量確認実験を通してPS合成床版の設計手法に関する検討を行なった結果, 以下のことが明らかになった。

1) 施工実験の各施工段階を通して, PS単版の有効版

厚 $h_e$ , 定着長さ $l_t$ , 緊張力有効率 $\eta_1$ 等の設計上の仮定について, その妥当性が確認された。

2) 曲げ加力実験結果より, 曲げ設計荷重の約2.7倍までは応力度, たわみとも完全合成床版として弾性挙動を示し, 約3.1倍で曲げひびわれを発生, このとき総たわみ量は設計許容値に達することがわかった。また, 曲げひびわれ発生に至る応力状態変化の仮定が妥当であったことや, ひびわれ発生以後, 中立軸の移動および剛性低下等曲げ性状が徐々に劣化し, 打継面での急激な水平せん断ずれの発生はないことが確認された。さらに, せん断ひびわれ強度算定式の妥当性によって, 破壊に至る過程が明らかになり, 破壊に至るまでPS合成床版としての一体性は確保されていたこと, および設計せん断荷重に対して, いずれのタイプも9.0倍以上の安全度をもつことが確認された。

3) Push-off試験結果より, いずれのタイプもせん断応力度は, 5/100mm滑り変形時で5.0kg/cm<sup>2</sup>以上, 破壊時で10.0kg/cm<sup>2</sup>以上確保されており, PS合成床版の一体性は確保されていることが確認された。また, 最適な凹凸面形状は, 水平接合面積の大きいタイプAまたはBと考えられる。

4) 有効プレストレス量確認実験結果より, PS合成床

版のコンクリートのクリープ係数は $\varphi_n=2.5\sim 3.1$ の値が得られた。また、PC鋼より線のひずみ実測値、測定終了後の曲げ実験結果などから、最終有効プレストレス量の算定式は、理論計算式を用いてよいことが判明した。

この結果より、PS合成床版の最終有効率は、安全側を考慮しても $\eta_n=0.83$ となり、設計値 $\eta_n=0.80$ を満足する値であることが確認できた。

## § 7. おわりに

PS合成床版の設計手法に関する検討を行ない、試設

計に対する実験的な確認データを得ることができた。今後の課題としては、端部固定度の影響、打継面での収縮差応力、施工工程と設計とのかかわり等が挙げられる。

また、今回の実験的研究での試設計に当っては、A. C. I. 規準に準拠しているため、今後、さらに他規準との対応についても検討して行くつもりである。

この実験的研究は、当社技術開発本部、外国部、建築設計本部の「PS合成床版プロジェクト」チームの工法開発の一環として行なわれたもので、ご指導、ご協力いただいた関係各位に深く謝意を表します。

また、本実験遂行にあたり協力してくれた研究所李功轍君に感謝致します。

### <参考文献>

- 1) "ACI Standard: Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-71)" ACI Committee 318
- 2) N.W.Hanson: "Precast-prestressed Concrete Bridges" Journal of PCI (1960.5)
- 3) R.H.Evans: "Behavior of Prestressed Concrete Composite Beams" Journal of ACI (1955.3)
- 4) 大浜文彦, 小林和夫: "コンクリート合成はりの打継面の付着特性について" 第16回セメント技術年報
- 5) 神山一: "プレストレストコンクリートのせん断強度" 材料実験 Vol.8
- 6) J.J.Shideler (ACI Committee 517): "Low Pressure Steam Curing" Journal of ACI Vol.60, No.8(Aug. 1963)
- 7) CEB/FIP: "コンクリート構造物設計施工国際指針" (1970)
- 8) 日本建築学会: "プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説"
- 9) 坂静雄, 岡田清, 六車照: "プレストレストコンクリート" 朝倉書店