

# [2022] 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した型枠兼用プレキャスト板に関する実験的研究

正会員 鈴木計夫 (大阪大学工学部)  
 正会員 大野義照 ( " )  
 正会員 ○ 鳥居 洋 (東急建設(株)構造設計部)  
 白井敏彦 (株大林組)

## 1. はじめに

近年、工期短縮、品質確保、省力化を目的として床版の一部をプレキャスト化し（以下これをハーフスラブと呼ぶ）、これを型枠として上端配筋を行い、後打コンクリートを打設して一体化する合成スラブが普及してきている<sup>1)</sup>。本研究は、このようなハーフスラブに降伏点応力度が5000~6000kg/cm<sup>2</sup>の高強度鉄筋を引張して利用したものである。すなわち、高強度鉄筋は短期荷重に対してはその高強度性をフルに利用できるのに反し、長期荷重に対しては、ひびわれ幅やたわみ制限のために鉄筋応力は、2000(2200)kg/cm<sup>2</sup>以下に制限され、有効に利用することができない。そこで利用できない部分を緊張することによって長期荷重時に活用しようとするものである<sup>4)</sup>。このような高強度鉄筋の使用は、荷重載荷によって緊張鉄筋側コンクリートが引張応力あるいはひびわれ発生となるPRC部材においてその効果を発揮する。

本論文では、高強度鉄筋を用いてプレテンション方式によってプレストレスを導入したハーフスラブと、これを用いた合成スラブのひびわれやたわみ等の性状を調べ、その実用性を確認した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

コンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いた目標スランプ18cmのレディミクストコンクリートを使用した。設計基準強度F<sub>c</sub>はハーフスラブは270、後打コンクリートは210kg/cm<sup>2</sup>とした。その力学的性状を表1に示す。

表1 コンクリートの力学的性状

試験体	材令 (日)	圧縮強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	割裂強度 (kg/cm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )
A-1、B-1 のハーフスラブ	7 (導入時)	294	26.4	2.29×10 <sup>5</sup>
	27 (A-1 載荷時)	344	37.0	2.53×10 <sup>5</sup>
	56 (B-1 載荷時)	353	36.0	2.69×10 <sup>5</sup>
A-2、A-3 A-4	7 (導入時)	271	27.0	2.33×10 <sup>5</sup>
	23 (載荷時)	293	36.4	2.79×10 <sup>5</sup>
B-2、B-1の 後打コンクリート	20 (載荷時)	296	34.6	2.40×10 <sup>5</sup>

鉄筋は、ハーフスラブ主筋及び一体打

スラブ下端主筋にSD50のD13を、合成スラブ及び一体打スラブ端部上端筋にSD30のD13、D10を用いた。その力学的性質を表2に示す。

表2 鉄筋の力学的性質

鋼材種	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点 (kg/cm <sup>2</sup> )	引張強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
SD50 (D13)	1.29	6630	8430
SD30 (D13)	1.21	4150	5850
		(D10)	0.68

### 2.2 試験体の種類

試験体の種類を表3に、その形状を図1に示す。A-1、A-4の鉄筋本数は、プレストレ

表3 試験体の種類

シリーズ名	試験体名	スラブの種類	下端鉄筋 本数	鉄筋の目標引張 応力度 (kg/cm <sup>2</sup> )	備 考
Aシリーズ	A-1	ハーフスラブ	9 - D13	3000	9本緊張
	A-2	"	9 - D13	4500	6本のみ緊張
	A-3	"	9 - D13	0	RCスラブ
	A-4	"	7 - D13	3000	7本緊張、山形断面
Bシリーズ	B-1	合成スラブ	9 - D13	3000	A-1と同種のハーフスラブ使用
	B-2	一体打スラブ	9 - D13	0	RCスラブ

ス導入直後の引張応力度（表3に鉄筋の目標引張応力度として示す）を3000kg/cm<sup>2</sup>、コンクリートのクリープ、乾燥収縮による損失を考慮してプレストレス有効率を0.8とし、ハーフスラブ架設時設計荷重PD作用時に両端単純支持一方向スラブとして、表4に計算値を示すようにひびわれ幅が0.2mm以下、かつたわみが1/250以下になるように定めた。なお設計荷重PDは、ハーフスラブ自重+後打コンクリート自重+作業荷重（150 kg/m<sup>2</sup>）+衝撃荷重（後打コンクリート自重の20%）である。Aシリーズはハーフスラブ単体であり、鉄筋の引張応力度をパラメーターとしている。A-2はA-1と同じプレストレスを6本の鉄筋の引張で与えたものである。A-4は中央の厚さを大きくすることによって鉄筋量を減らした長手方向に山形のハーフスラブである（中央厚さ10cm、端部厚さ7cm）。

B-1は、A-1と同じハーフスラブを型枠として使用し、上端配筋ののち、後打コンクリートを打設して一体としたスラブである。上端鉄筋は両端固定状態における仕上・積載荷重を設計荷重PDとして算定した。B-2はB-1と同じ配筋の在来一体打スラブである。

載荷時期は、Aシリーズはコンクリート打設後約1ヵ月、Bシリーズは後打コンクリート打設後約1ヵ月とした。

### 2.3 試験体の製作

プレストレスの導入はプレテンション方式で、鉄骨で製作した反力フレーム内に型枠を組み、鉄筋を緊張した後コンクリートを打設した。鉄筋の初引張力は、プレストレス導入時におけるコンクリートの弾性変形の後で鉄筋の応力度が表3の目標値になるように20%程度割増した（表5参照）。

Aシリーズの試験体及びB-1のハーフスラブは、コンクリート打設後上面にシャーコッターを設けた。試験体はすべて屋外で製作し、コンク

リート打設後荷重までシート養生を行った。脱型は、Aシリーズは材令7日のプレストレス導入直前に行い、Bシリーズは材令14日に行った。プレストレス導入時におけるプレストレス力及び載荷までの鉄筋の引張力の損失は、ワイヤーストレインゲージによる鉄筋ひずみ測定値より算出した。なお、プレストレスを導入しないA-3においては検長30cmのコンタクトストレインゲージ（1目盛:10<sup>-3</sup>mm）にて上面と側面鉄筋位置のひずみを測定し、コンクリートの乾燥収縮によ

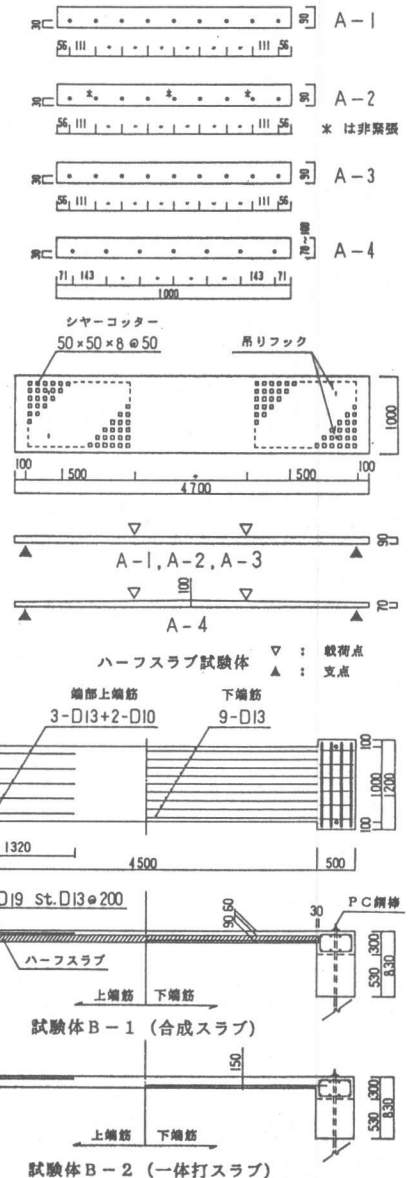


図1 試験体の形状

表4 ひびわれ幅及びたわみの設計値

試験体名	鉄筋断面積 (cm <sup>2</sup> )	引張力 (t)	ひびわれ幅 (mm)	たわみ (cm)
A-1	1.27	27.4	0.02	1.69 (1/266)
A-4	1.27	21.3	0.03	1.58 (1/285)

って生じる鉄筋の圧縮力

を算出した。コンクリートのクリープ及び乾燥収縮は試験体の一部を取り出した 9×10×50 (cm)

のコントロール試験体 (側面シール) にて測定した。

## 2. 4 実験方法

荷重は、等曲げスパン1.5mの3等分点荷重とした。スラブのたわみは変位計で、ひびわれ幅はスラブ下面に貼付

した検長6cmのコンタクトストレインゲージで、鉄筋ひずみは検長2mmのワイヤーストレインゲージで測定した。Bシリーズはさらに端部コンクリート上面でのひびわれ幅及び端部上端筋のひずみも測定した。また、B-1はせん断力の大きい端部において両コンクリート境界面のずれを測定した。

Aシリーズの荷重は、ハーフスラブ架設時における設計荷重PD、1.35PD、1.7PD、及び本研究では高強度鉄筋としてSD50を想定しているため、鉄筋の降伏点を5000kg/cm<sup>2</sup>とした場合の終局曲げモーメントに相当する荷重 (以下設計Pu\*と呼ぶ) において繰返し荷重を行い、その後曲げ破壊まで2~3回の繰返し荷重を行った。Bシリーズは、設計荷重PDの1.7倍、端部及び中央部設計Pu\*及びその中間において数回繰返し、曲げ破壊まで荷重した。

## 3. 実験結果及び考察

### 3. 1 ハーフスラブ (Aシリーズ)

#### (1) 有効プレストレス力

表5にAシリーズの荷重時における引張力の損失と有効率などを示す。荷重時引張力は、非緊張鉄筋を有する試験体においてはクリープと乾燥収縮によって生じた圧縮力を差し引いた純コンクリート断面に作用する力である。A-3の引張力の損失はコンクリートの乾燥収縮によって生じた鉄筋の圧縮力を意味している。引張力の損失の計算値はコントロール試験体のクリープ、乾燥収縮曲線を用いてクリープ速度法により求めた値である。計算値は実験値にはほぼ一致している。

#### (2) ひびわれ荷重Pcr、終局荷重Pu及び平均ひびわれ間隔lav

Pcr、Pu及びlavの実験値と計算値を表6に、ひびわれ状況を図2に示す。ひびわれモーメントの計算値は、RC規準解説の曲げ引張強度 $1.8\sqrt{f_c}$ を用いて算出し、終局曲げモーメント及び平均ひびわれ間隔はPRC指針解説の式によって求めた。計算値はいずれも表1、2の素材試験の結果を用いて算出したものである。設計荷重PD (1.82t) ではA-1とA-2試験体にはひびわれは発生しなかった。Pcr、Puの計算値は実験値とほぼ一致している。A-4は導入力が

表5 ハーフスラブの引張力の損失と有効率

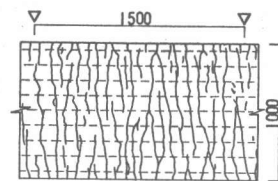
試験体名	初引張力(t)	導入直後引張力(t)	導入~荷重の期間(日)	荷重時引張力(t)	引張力の損失(t)		有効率
					測定値	計算値	
A-1	43.7	34.1	21	28.9	5.2	5.2	0.85(0.66)
A-2	39.6	32.9	18	30.0	2.9	3.1	0.91(0.76)
A-3	0	0	20	-1.8	1.8	1.1	--
A-4	31.8	27.2	22	24.8	2.4	2.2	0.91(0.78)

注：有効率は導入直後引張力に対する値であり、( ) 内数値は初引張力に対する値である

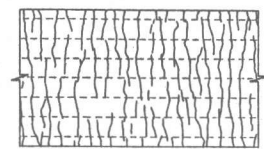
表6 AシリーズのPcr、Pu、lav

試験体名	ひびわれ荷重Pcr(t)		終局荷重Pu(t)		平均ひびわれ間隔lav(cm)	
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値
A-1	1.87	1.76	5.19	4.99	7.9	7.6
A-2	1.88	1.76	4.97	4.79	7.5	7.6
A-3	—	0.50	5.29	4.79	8.2	7.8
A-4	1.79	1.63	4.26	4.05	8.7	8.7

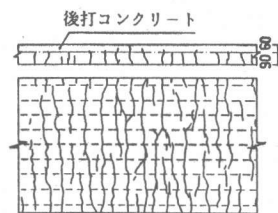
注：荷重にはハーフスラブ自重及び配力ばり自重を含む



A-1



A-4



B-1 ▽：荷重点  
破線は鉄筋位置を示す

図2 ひびわれ状況図

小さく鉄筋本数も少ないため $P_{cr}$ 、 $P_u$ とも他の試験体より小さい値となっている。

ひびわれ間隔についてA-1とA-3を比較すると、A-1の方がプレストレスの効果によって中立軸が下がり、コンクリートの引張域が狭くなる分、若干ひびわれ間隔が狭くなっている。A-1とA-4では、A-4は鉄筋が少ないのでひびわれ間隔は広がっているがその程度はわずかである。

### (3) ひびわれ幅 $w_{av}$

図3に荷重 $P$ と平均ひびわれ幅 $w_{av}$ の関係を示す。図における荷重 $P$ にはスラブ自重及び配力ばり自重は含まれていない(以下同様)。プレストレスを導入したA-1、A-2及びA-4は導入していないA-3と比較して大幅にひびわれ幅が制御されている。A-1とA-2は緊張鉄筋の本数及び鉄筋1本当たりの緊張力は異なるが、鉄筋の総緊張力は等しいのでひびわれ幅はほぼ同じである。A-4はA-1、A-2に比べひびわれ幅の増加割合が大きいが、これは鉄筋量が少ないためひびわれ後の鉄筋ひずみが多いことによる。また、A-3は計算で予測された通り載荷用の配力ばりをセットした時点においてすでにひびわれが発生しているが、その増大傾向は鉄筋量が等しいA-1及びA-2のひびわれ発生後の傾向にはほぼ一致している。

### (4) たわみ性状

図4に荷重 $P$ と中央たわみ $\delta$ の関係を包絡線で示す。設計荷重におけるたわみはA-1 : 1.11 cm(1/405)、A-2 : 0.92 cm(1/489)、A-3 : 4.74 cm(1/95)、A-4 : 0.99 cm(1/455)で、 $P-\delta$ 関係においてもプレストレス力によりたわみが大幅に制御されている。A-1とA-2は設計 $P_u^*$ までは同じ性状を示しているが、その後、A-2はA-1より鉄筋1本当たりの緊張力が大きいので緊張した鉄筋が先に降伏し剛性が低下している。A-4はA-1より鉄筋量が約20%少ないが、長手方向の形状が山形で中央部では有効せいが大きくなるので、鉄筋の降伏まではA-1とほぼ

同じ性状を示している。

### (5) 繰返し

繰返し載荷時の挙動

図5に繰返し載

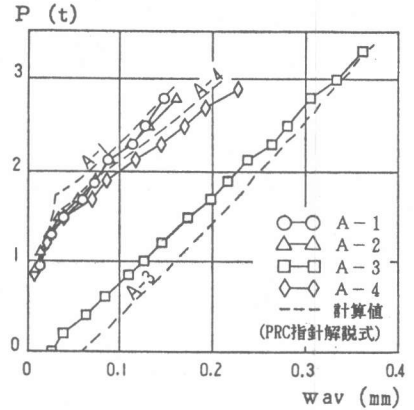


図3 荷重と平均ひびわれ幅の関係

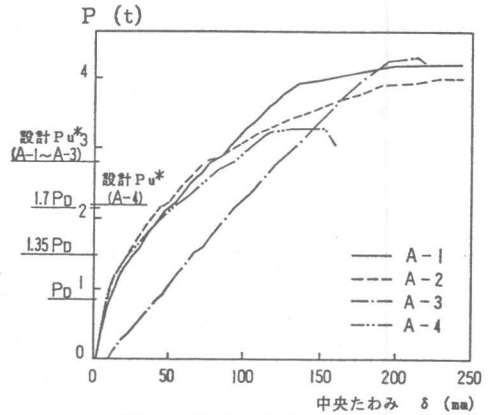


図4 荷重と中央たわみの関係

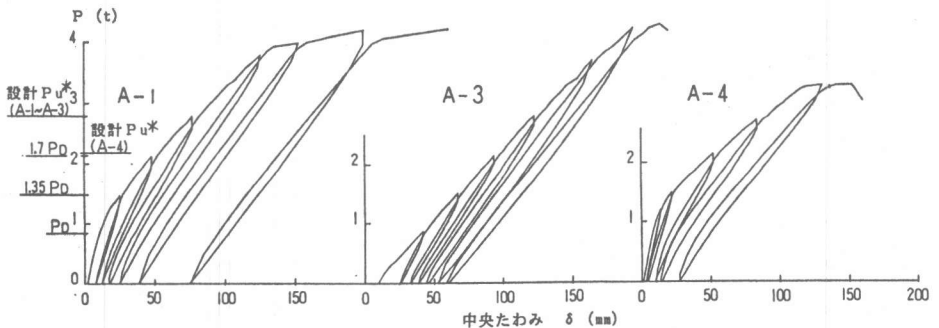


図5 繰返し載荷時の荷重と中央たわみの関係

荷時の荷重Pと中央たわみ $\delta$ の関係を示す。荷重が1.35PDまで超過して作用した場合でもプレストレスを導入した試験体は設計荷重PDにおいてたわみはA-1:1.98cm(1/227)、A-2:1.56cm(1/288)、A-4:1.70cm(1/265)で、ACI標準の規定値である1/180以内に収まっている。図6に、残留たわみを減力開始時たわみで除した残留変形率を残留開始荷重1.35PD、1.7PD及び設計Pu\*について示す。いずれの荷重の残留変形率においてもプレストレスの効果が明瞭に認められる。図7に繰返し載荷時の荷重Pと最大ひびわれ幅

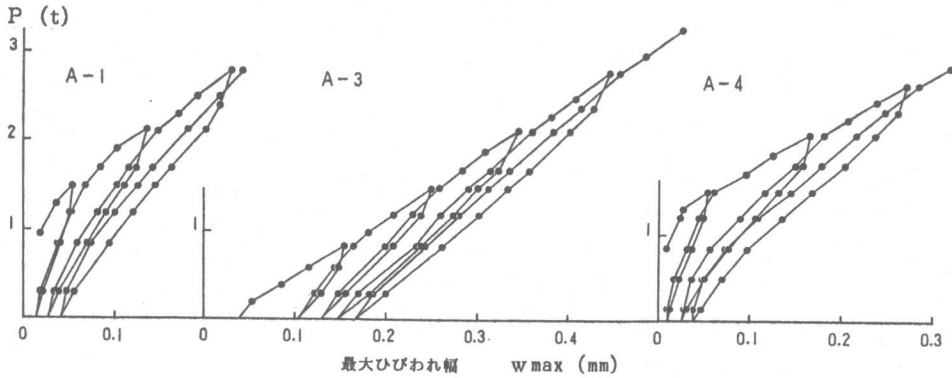
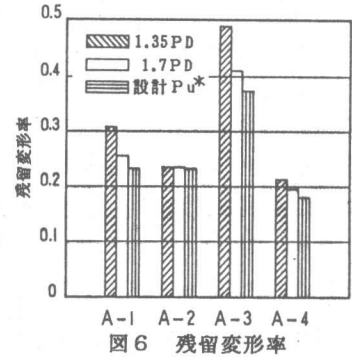


図7 繰返し載荷時の荷重と最大ひびわれ幅の関係

wavの関係を、図8にひびわれ幅残留率を示す。いずれにおいてもプレストレスの効果が示されている。

### 3. 2 合成スラブと一体打スラブ (Bシリーズ)

#### (1) ひびわれ荷重Pcr、終局荷重Pu及び平均ひびわれ間隔lav

Pcr、Pu及びlavの実験値と計算値を表7に示す。B-1の合成スラブではハーフスラブが後打コンクリート重量を支持しているため、端部のひびわれ荷重、終局荷重ともB-2を上回っている。またひびわれ間隔は、BシリーズはAシリーズに比べスラブが厚いため、間隔が広がっている<sup>2)</sup>。B-1のひびわれ状況を前掲図2に示す。B-1の側面におけるひびわれがハーフスラブと後打コンクリートとの境界面において連続していることより、両者が一体として挙動していることがわかる。

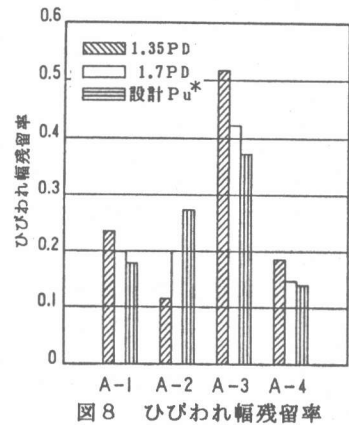


表7 BシリーズのPcr、Pu、lav

試験体名	ひびわれ荷重 Pcr(t)		終局荷重 Pu(t)		平均ひびわれ間隔 lav(cm)					
	端部	中央	端部	中央	端部	中央				
	実験値	計算値	実験値	計算値	実験値	計算値				
B-1	2.06	2.32	2.44	4.10	—	4.80	16.14	14.16	9.2	9.4
B-2	1.24	1.10	2.00	3.44	5.11	3.56	14.64	12.93	9.0	9.4

注：荷重には配力ばり自重を含む

#### (2) ひびわれ幅wav

中央部下縁のひびわれ幅を図9に示す。B-1はB-2に比べひびわれ幅が約2分の1に制御されていることがわかる。

#### (3) たわみ性状

図10に繰返し載荷時の荷重Pと中央たわみ $\delta$ の関係を、図11に荷重Pと最大ひびわれ幅 $w_{max}$ の関係を示す。B-2のP- $\delta$ は減力開始からほぼ直線的に戻るのに対してB-1はPC特有の復元性を示し残留たわみも小さい。両者ともまず端部にひびわれが発生し、中央部ひびわれ、端部上端筋降伏、中央部下端筋降伏の後、圧壊という経過をたどった。B-1の合成スラブは中央部後打コンクリートの圧壊であり、その範囲はハーフスラブまでは及んでおらず打継面におけるはく離は見られなかった。また、せん断力が最大である端部においてハーフスラブと後打コンクリートとのずれも認められず、両者の一体性が保たれていた。

#### 4. まとめ

高強度鉄筋の緊張本数やコンクリートの断面形状を変えたハーフスラブ及び合成スラブの曲げ載荷実験を行った結果をまとめると、次の通りである。

(1) ハーフスラブにおいてひびわれ幅やたわみの制御に対して鉄筋の緊張によるプレストレスの効果が確認できた(図3,4)。

(2) プレストレスを導入したハーフスラブを用いた合成スラブは、一体打スラブに比べひびわれ幅、たわみとも制御され復元性もすぐれていた。又、耐力は同等であった(図10,11)。

以上より、高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したハーフスラブはたわみ・ひびわれ性状及び復元性においてすぐれており、実用に供し得るものと判断される。

#### 謝辞

本研究は、(株)鴻池組、住友金属工業(株)との共同研究の一環として行ったものであり、御指導、御助言をいただきました。また、公益信託斎藤記念プレレストレストコンクリート技術研究奨励基金の助成を得たことに対し、ここに厚くお礼申し上げます。

#### (参考文献)

- 1) 中山康志：最近の床構法とその性能；建築技術 1987.3 No.427
- 2) プレストレスト鉄筋コンクリート(Ⅲ種PC)構造設計・施工指針・同解説；日本建築学会
- 3) 鈴木、大野、白井：普通鉄筋にてプレストレスを導入したはりの曲げ性状について；日本建築学会大会講演梗概集 昭和61年8月 pp.27~28
- 4) 鈴木、大野、白井：高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入したPRCはりの曲げ性状；コンクリート工学年次論文報告集 第9巻 第2号 pp.489~494

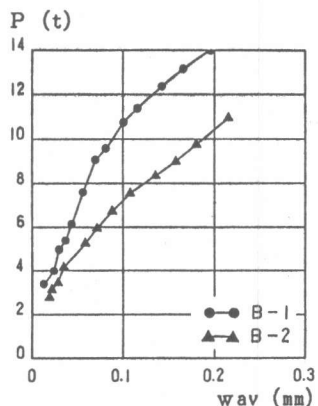


図9 荷重と平均ひびわれ幅の関係(中央部下縁)

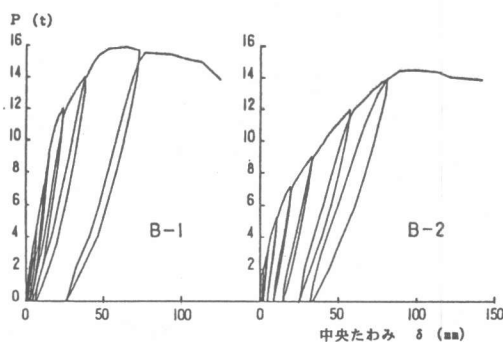


図10 繰返し載荷時の荷重と中央たわみの関係

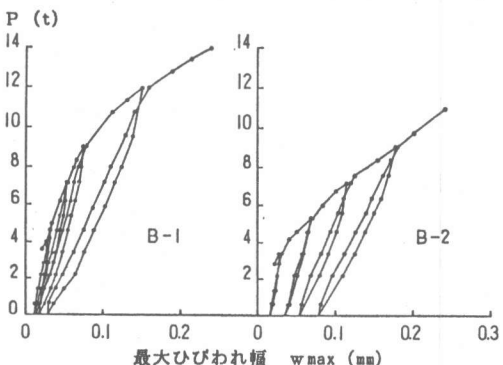


図11 繰返し載荷時の荷重と最大ひびわれ幅の関係