

## (9) プレキャストセグメント構造の終局せん断耐力について

西松建設(株)(横浜国立大学大学院) 正会員 ○伊藤忠彦  
 横浜国立大学工学部建設学科 正会員 山口隆裕  
 横浜国立大学工学部建設学科 正会員 池田尚治

### 1. はじめに

近年、建設工事の施工合理化(工期短縮、高品質化、生産性向上)や熟練労働者不足の対策などの目的から、プレキャストセグメント工法による橋梁建設が注目されている。我が国においては、1966年に首都高速道路公団の目黒高架橋で本工法が採用されて以来、現在まで25橋以上の施工実績<sup>1)</sup>があり、日本道路公団の重信川高架橋では外ケーブル併用方式で本工法が計画されている。

プレキャストセグメント構造は、セグメント接合面で部材内の軸方向鉄筋が不連続となるが、接合面が活荷重作用下でフルプレストレス状態、過載活荷重作用下でもコンクリートの許容曲げ引張応力度以下とすることで、一体打ち構造と同等の供用性を持つと評価されている。また、現行の設計基準等では、終局強度の算定は一体打ち構造の計算式をそのまま適用している。しかし、終局状態におけるプレキャストセグメント構造の一体性について報告された例は少なく、特に終局せん断耐力に着目した研究は極めて少ないのが現状である。本研究は、せん断補強筋の無いPCはりで曲げせん断実験を行い、合理的なせん断耐力の設計式を提案することを目的とする。

### 2. 実験のモデル化と実験概要

本実験に用いた供試体形状寸法を図-1に示す。実験はウェブ厚を10cmとしたスレンダーなT形断面はりで行い、載荷は一方向繰返し2点載荷とした。シリーズIは一体打ち構造の基準供試体、シリーズIIは厚さ2mmのアクリル板でコンクリートの初期欠陥(斜めひびわれ)をモデル化した供試体、シリーズIIIはプレキャストセグメント構造を6個のコンクリートブロックでモデル化した供試体である。実験パラメータは、各々PC緊張材に付着の有る場合(ボンド:B)と無い場合(アンボンド:UB)の2種類とし、合計6体の実験<sup>2)</sup>を行なった。

表-1 材料強度一覧 (kgf/cm<sup>2</sup>)

	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
コンクリート	423*	32.5	2.7*10 <sup>5</sup>
グラウト	582	—	—

\*)標準養生供試体  $f'_{28} = 411 \text{ kgf/cm}^2$

	降伏強度	引張強度	ヤング係数
鉄筋*	3910	5900	2.0*10 <sup>6</sup>
PC鋼棒**	11800	12970	2.0*10 <sup>6</sup>

\*)D13, SD345  
 \*\*)φ17, C種1号 (SBPR110/125)

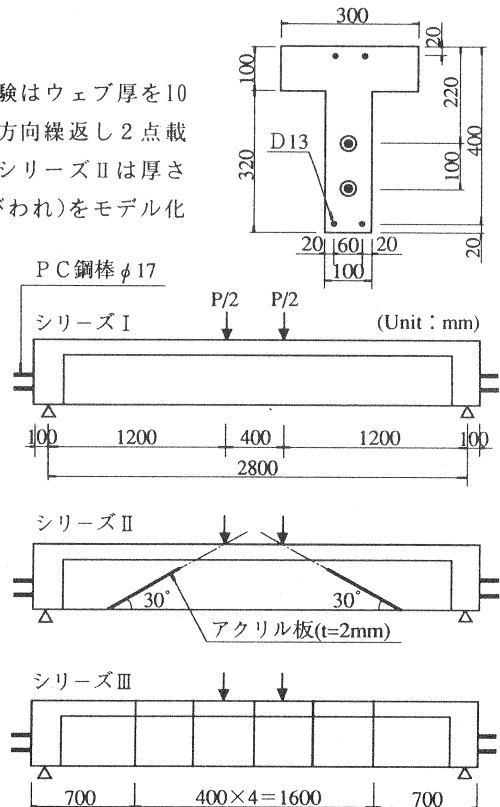


図-1 供試体形状図

一般に、プレキャストセグメント構造では接合面にせん断キーを設け接着剤処理されることが多いが、本研究では、これらの処理は行わないことにした。これは、危険側の接合条件での挙動を把握することで、プレキャストセグメントはりの一体性を評価するためである。ただし、セグメント接合面からのグラウト漏れを防ぐために、本実験ではシース孔周囲にシール材を塗布した。表-1に本実験に使用した材料強度を示す。なお、導入プレストレス力は実橋の設計例を参考に、断面下縁で約100kgf/cm<sup>2</sup>、上縁で約2kgf/cm<sup>2</sup>とし、全断面が圧縮応力状態となるようにした。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 破壊形態と終局耐力

実験結果を図-2および表-2に示す。最終的な破壊形態はシリーズIIのアンボンドはり(II-U B)が曲げ圧縮破壊となったが、他はすべてせん断破壊した。なお、P C緊張材は全供試体とも破壊時まで降伏しなかった。

各シリーズで付着の影響について考察すると、ボンドはりとはアンボンドはりとは、曲げひびわれ発生荷重に差は無く、破壊荷重は僅かにアンボンドはりの方が大きくなった。したがって、アンボンドはりの供用時の性能および終局せん断耐力は、ボンドはりとは比べ同等以上であることがわかった。ただし、アンボンドはりとは曲げひびわれ発生後の剛性低下がボンドはりより大きく、曲げひびわれ発生後のたわみ量が増大すると共に、圧縮コンクリートの応力負担が増加した(図-3)。特に、軸方向鉄筋が連続していないプレキャストセグメントはり(シリーズIII)では、この差が顕著であった。また、シリーズI、IIIのボンドはりとは、明確な斜めひびわれの発生が観察されたのに対し、アンボンドはりでは観察されず、付着による影響が明らかであった<sup>3)</sup>。

本実験では図-2に示したように、斜めひびわれ発生後の急激な荷重低下は見られなかった。これは、斜めひびわれ発生後はP Cはりとはタイドアーチ的機構によって外力に抵抗したためと思われる。シリーズIIではコンクリート初期欠陥(アクリル板)の影響で、このタイドアーチ的機構が載荷初期段階から形成されるため(曲げひびわれ発生前に先行斜めひびわれ部の開口が生じる)、アンボンドはりとは曲げ圧縮破壊に至ったものと思われる。

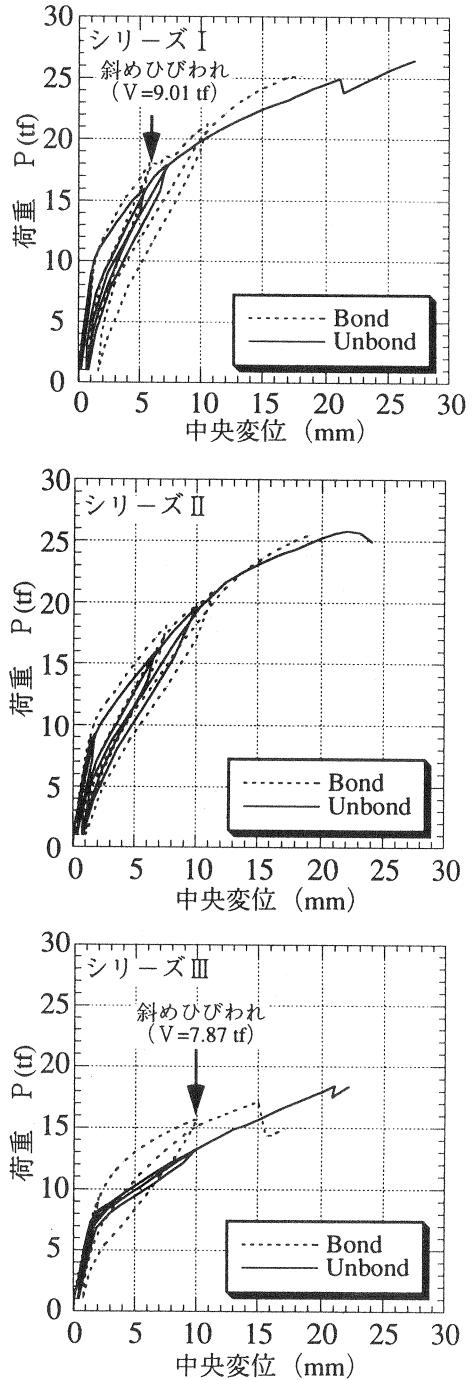


図-2 実験結果(荷重-変位)

表-2 各状態におけるせん断力の実験値と計算値

		実験値 (tf)				計算値 (tf)			
		曲げひびわれ V <sub>fc</sub>	斜めひびわれ V <sub>dc</sub>	鉄筋降伏 V <sub>sy</sub>	破壊 V <sub>u</sub>	式(1) V <sub>cal.1</sub>	式(2) V <sub>cal.2</sub>	式(3) V <sub>cal.3</sub>	式(4) V <sub>cal.4</sub>
I	B	4.60	9.01	10.6	12.6	6.01	7.03	8.56	8.97
	UB	4.57	-	8.9	13.2	6.01	7.03	8.59	8.94
II	B	4.56	(4.05)**	10.5	12.8	6.08	7.12	8.75	8.93
	UB	4.61	(4.13)**	9.8	>12.9	6.05	7.07	8.64	8.98
III	B	3.64*	7.87	-	8.6	5.04	5.63	7.01	7.01***
	UB	3.62*	-	-	9.2	5.01	5.60	6.99	6.99***

\*)セグメント接合面が開口 \*\*)曲げひびわれ発生前に先行斜めひびわれ部が開口  
 \*\*\*)シリーズIIIはドライジョイントのためM<sub>0</sub> = M<sub>c</sub>とした

シリーズIIIで曲げひびわれ発生荷重がシリーズIおよびIIよりも小さいのは、セグメント接合面をドライジョイントとしているためであって、接着剤処理されれば一体打ち構造と同等であると思われる。また、斜めひびわれ発生荷重および破壊荷重も同様に小さいが、これは軸方向鉄筋が連続していないためと考えられ、プレキャストセグメント構造と一体打ち構造の相違そのものによるとは思われない。後述するように、せん断耐力の計算上からも引張鉄筋の影響が、せん断耐力の相違に表されているからである。

3.2 一体性の評価

プレキャストセグメント接合面の相対的な鉛直変位(ズレ)は、図-4に示すようにボンドはりのの方が大きくなった。しかし、その量は破壊直前でも0.3mm程度であって、本実験では極めて小さかったのである。また、破壊面は写真-1に示すようにセグメント間で連続していたため、今回のような厳しい接合条件下であっても、一体性は終局状態まで十分保たれていたと思われる。なお、ボンドはりのズレがアンボンドはりより大きくなったのは、ボンドはりは付着の影響でセグメントの開口が各接合面に分散するのに対し、アンボンドはりではスパン中央に開口が集中するため、アンボンドはりはセグメント間のズレが生じ難かったものと思われる。

また、本実験においてセグメント接合面のズレは約8tf程度(V/b<sub>w</sub>h = 9.5kgf/cm<sup>2</sup>)で生じていたが、この結果からセグメント間の摩擦係数を計算するとμ = 0.2程度となる。一般に、セグメント接合面にせん

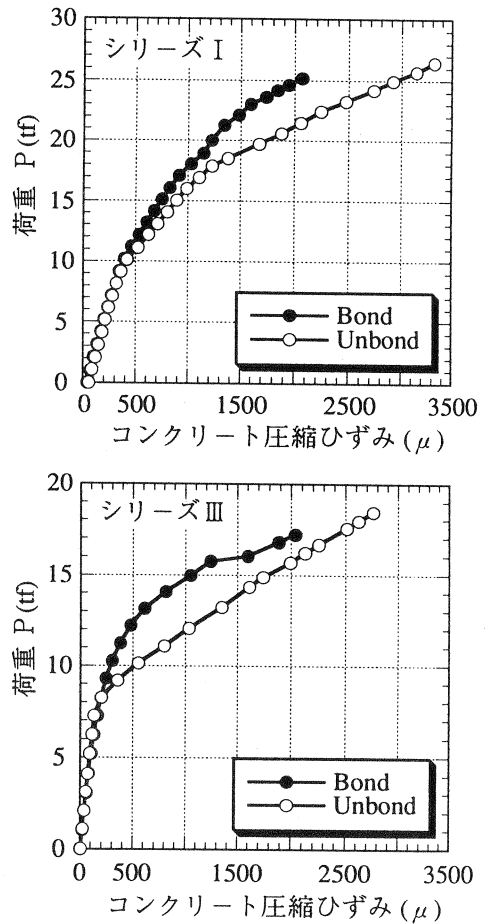


図-3 コンクリート圧縮ひずみの違い

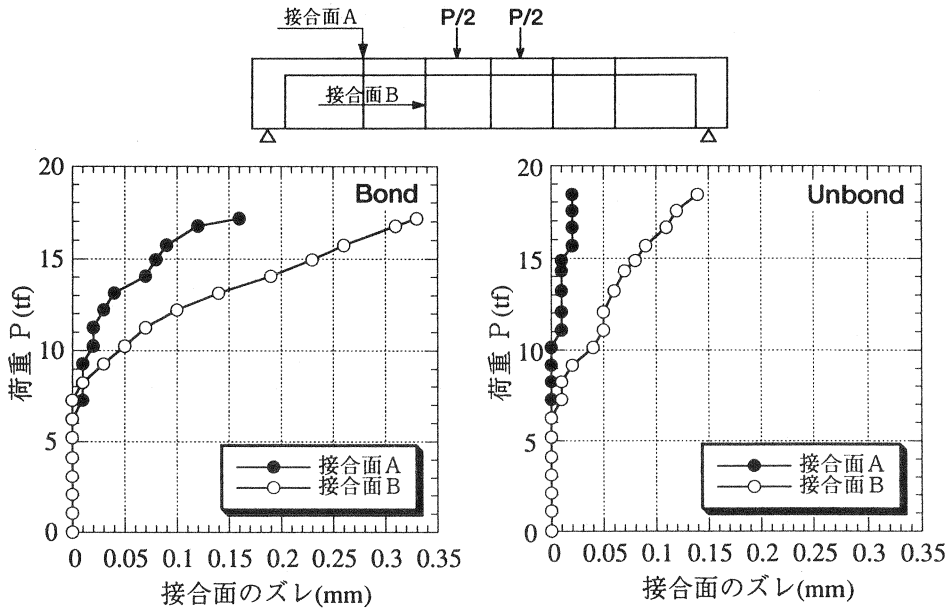


図-4 セグメント接合面の鉛直変位(ズレ変位)

断キーを設け接着処理されれば、摩擦係数は $\mu = 0.9$ 程度<sup>1)</sup>となるため、実際の構造物は安全側になっていると思われる。

### 3.3 セン断耐力の評価

本実験で得られた結果をもとに、終局せん断耐力の算定方法について検討する。一般に、プレストレスの与えられている部材は、斜めひびわれの発生が鉄筋コンクリート部材に比較して遅れるため、せん断に対しては有利な構造である。土木学会コンクリート標準示方書では、この有利な影響をデコンプレッションモーメント $M_0$ を使用した係数 $\beta_n$ で考慮することが規定されている。表-2に示したVcal.1は式(1)に示す示方書の式でせん断耐力を計算した結果である。

ただし、 $M_0$ は実験で断面下縁のコンクリートひずみがゼロとなった時の荷重から計算し、有効高さ $d$ はコンクリート圧縮縁から引張鋼材(シリーズI, IIは軸方向鉄筋とPC鋼材、シリーズIIIはPC鋼材のみ)の重心位置までの距離とした。また、シリーズIIIの計算では、 $\beta_p$ の算定において軸方向鉄筋量 $A_s$ はゼロとした。

$$V_{cal.1} = 0.9 \beta_d \beta_p \beta_n (f'c)^{1/3} \cdot b_w d \quad (1)$$

ここに、 $f'c$ :コンクリート圧縮強度(kgf/cm<sup>2</sup>)、

$b_w$ :ウェブ厚(cm)、 $d$ :有効高さ(cm)、

$$\beta_d = (100/d)^{1/4}, \beta_p = \{100(A_s + A_p)/b_w d\}^{1-3}, \beta_n = 1 + 2M_0/M_u$$

$$V_{cal.2} = 0.94 \beta_d \beta_p \beta_n (f'c)^{1/3} \left(0.75 + \frac{1.4}{a/d}\right) b_w d \quad (2)$$

ここに、 $a$ :せん断スパン長(cm)

式(1)は斜めひびわれ発生時をせん断破壊と定義して安全側に導かれたものであるが、Vcal.1は実験で斜めひびわれ発生が観察された2ケース(I-B, III-B)に対し、十分安全側であった。そこで、実際の $a/d$ を考慮した<sup>4)</sup>式(2)を使用して計算した結果がVcal.2である。

Vcal.2はVcal.1の計算結果に比べ多少改善されたが、まだ実験値の方が大きいことがわかる。そこで、デコンプレッションモーメントの基本的な考え方に従い、プレストレス力による有利な影響を直接加算して評価する式(3)で計算した結果がVcal.3である。ただし、この場合の $V_c$ は式(2)で $\beta_n = 1$ として計算した。

$$V_{cal.3} = V_c + M_o/a \quad (3)$$

ここに、 $M_o/a$ は、はりの純曲げ区間が荷重ゼロからデコンプレッション状態になるまでの増加せん断力を意味している。つまり、式(3)はプレストレスが与えられていない鉄筋コンクリート部材のせん断耐力に、この増加せん断力分を加算したものである。同様に、Vcal.4は式(3)の $M_o$ に代えて、ひびわれ発生モーメント $M_c$ を使用して計算した結果である。

$$V_{cal.4} = V_c + M_c/a \quad (4)$$

ここに、 $M_c/a$ は荷重ゼロから曲げひびわれが発生するまでの増加せん断力を意味している。本実験結果では、斜めひびわれ発生時のせん断耐力を式(4)で評価することができた。ただし、シリーズIIIは接合面がドライジョイントであるため $M_o = M_c$ である。そのため、式(3)と式(4)の計算値は同じとなっている。また、実際の設計ではせん断スパン長 $a$ を特定できないため、有効高さ $d$ で示しておくのが便利である。今回の実験では、シリーズI, IIは $a = 3.8d$ 、シリーズIIIは引張鋼材をPC緊張材のみとしたため $a = 4.4d$ であった。

一般に、ウェブに斜めひびわれが発生するのは、ウェブの主引張り応力度がコンクリートの引張り強度に達したときである。しかし、曲げひびわれ発生後における主引張り応力度を正確に算定するにはFEM解析等の数値解析が必要であり、通常の設計計算では余りにも煩雑であると思われる。通常、単純はりの曲げ区間に曲げひびわれが発生する限界では、せん断区間の主引張り応力度はコンクリートの引張り強度以下であるため、式(4)でプレストレストコンクリートはりのせん断耐力を算定しても安全側であると思われる。

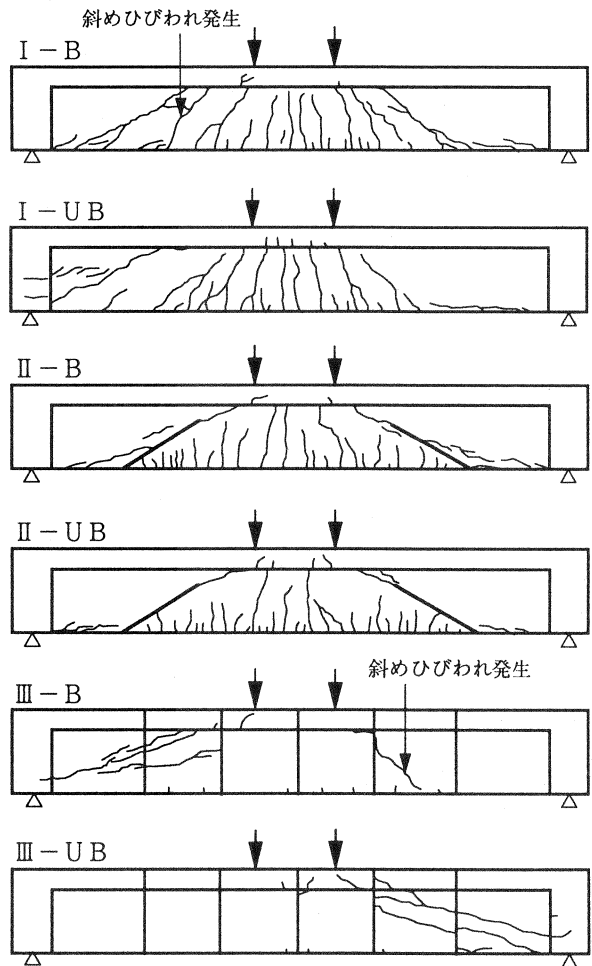


図-5 ひびわれ発生状況

## 5. まとめ

以下に本研究で得られた結果をまとめる。

①PC緊張材に付着が無い(アンボンドはり)場合の終局せん断耐力は、付着が有る場合(ボンドはり)に比べ、同等以上の耐力があることがわかった。ただし、曲げひびわれ発生後の挙動は付着の影響が顕著であった。

②プレキャストセグメント構造の終局せん断耐力は、軸方向鉄筋が連続していないことを考慮することで、一体打ち構造の算定式を使用しても安全側に評価することができた。

③斜めひびわれ発生時をせん断破壊と見なすならば、現在のコンクリート標準示方書の規定は十分安全側であった。

④プレストレス力によるせん断耐力の増分は、係数 $\beta$ で割増すのではなく、曲げひびわれ発生時のせん断力分だけ加算して評価することができた。

⑤コンクリート初期欠陥(アクリル板による先行斜めひびわれ)の影響は、今回の実験ではタイドアーチ的機構によって外力に抵抗したため、破壊荷重に差は認められなかった。

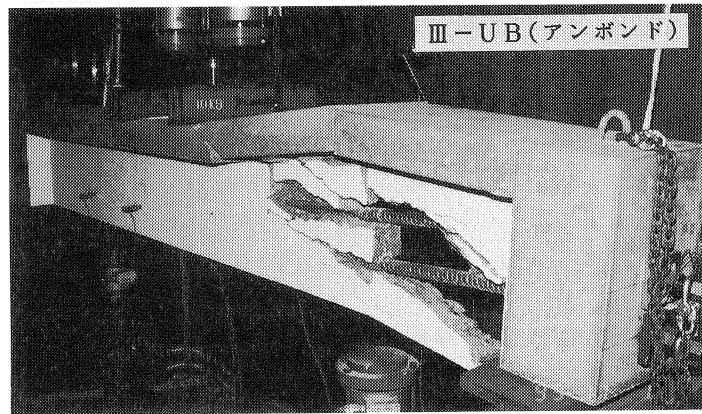
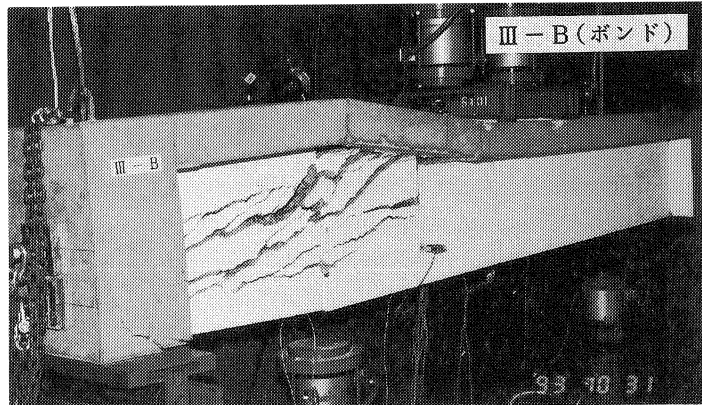


写真-1 プレキャストセグメントはりの破壊状況

## 〔謝辞〕

本研究を実施するにあたり、横浜国立大学技官の森下豊氏および大学院生の鈴木宣政君の多大な協力を得た。ここに感謝の意を表します。

## 〔参考文献〕

- 1)プレストレストコンクリート構造の現況と設計方法の動向, 土木学会コンクリート技術シリーズ, NO. 5, 1994
- 2)伊藤, 山口, 池田: プレキャストセグメントPCはりの曲げせん断挙動, コンクリート工学年次論文報告集, VOL. 16-2, 1994, PP. 967-972
- 3)池田, 宇治: 鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究, 土木学会論文報告集, 第293号, 1980, PP. 101-109
- 4)コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料, コンクリートライブラリー第61号, 1986
- 5)T. Ito, Y. Yamaguchi, S. Ikeda: Flexural Shear Behaviour of Prestressed Concrete Beams Fabricated by Precast Segmental Construction, The 3rd International KERENSKY Conference, 1994, PP. 241-248