

論文 外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動

伊藤忠彦*1・山口隆裕*2・池田尚治*3

要旨：本研究はプレキャストセグメント構造のせん断特性を明らかにするために、T形断面はりを用いて実験的検討を行ったものである。実験因子としては緊張材の付着の有無、導入プレストレス力の大きさ、および外ケーブルの適用を考えた。実験の結果、外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりは、曲げひびわれ(開口)発生後の変形が大きくなるが、導入プレストレス力を高めることで供用性能を改善することができた。また、外ケーブルの適用は、はりのせん断に対して極めて効果的であることがわかった。
 キーワード：プレキャストセグメント構造、せん断、付着、外ケーブル

1. はじめに

近年、建設工事における施工合理化や熟練労働者不足の対策のひとつとして、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。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、設計上の供用限界状態を曲げひびわれ発生限界とすることで、通常の一打打ちPC構造と同等の機能をもつと評価されている。しかし、終局限界状態に対する検討は十分でなく、特にプレキャストセグメントはりのせん断挙動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、導入プレストレス力の大きさ、およびケーブル配置の違いが、プレキャストセグメントはりのせん断挙動におよぼす影響を実験的に検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

本研究で考慮した供試体の種類と実験因子を表-1に示す。供試体はフランジ幅30cmウェブ厚10cmのT形断面はりとした。ただし、緊張材を外ケーブルとしたシリーズEXはウェブ厚を6cmとした。これは、外ケーブル方式を採用することで、一般にウェブを薄くできることを考慮したものである。その他のシリーズ

表-1 実験因子一覧

記号	構造	コンクリート強度 (kgf/cm ²)	緊張力 (tf)	導入応力度 (kgf/cm ²)	PC鋼材
I	B	400	上段 15.0	上縁 1.0	φ17 C種1号
	UB		下段 10.0	下縁 100	
II	B	700	上段 22.5	上縁 2.0	φ23 C種1号
	UB		下段 15.0	下縁 150	
EX	NS	400	上段 7.0*2	上縁 1.0	φ12.4 SWPR7A
			下段 2.0*2	下縁 100	
	HS	700	上段 10.5*2	上縁 2.0	φ12.7 SWPR7B
			下段 3.0*2	下縁 150	
III	B	400	上段 15.0	上縁 1.0	φ17 C種1号
	UB		下段 10.0	下縁 100	

*1 横浜国立大学大学院 計画建設学専攻(西松建設(株)技術研究所在籍)、正会員

*2 横浜国立大学助手 工学部建設学科、正会員

*3 横浜国立大学教授 工学部建設学科、正会員

I, II, IIIは、緊張材を内ケーブルとした供試体である。供試体の基本的な構造形式の違いは図-1に示すようにシリーズIが一体打ち構造のはりで、シリーズII, III, EXはプレキャストセグメント構造のはりである。ただし、シリーズIIIは比較のために既往の研究[1]より抜粋したものである。

本実験に用いたPC緊張材は、内ケーブルには $\phi 17$ または $\phi 23$ のPC鋼棒を使用し、外ケーブルには $\phi 12.4$ または $\phi 12.7$ のPC鋼より線を使用した。また、緊張材のスパン中央部における有効高さは全供試体で同一とし、緊張材の定着部はD6のメッシュ筋およびスパイラル筋で十分に補強した。内ケーブル方式の供試体は、緊張材に付着が有る供試体(記号: B)と付着が無い供試体(記号: UB)の2種類のはりを製作し、全てにグラウト注入を行った。プレキャストセグメント供試体は6個のコンクリートブロックで構成され、セグメント接合面はドライジョイントとした。また、危険側の接合条件を想定して接合面にせん断キーは設けなかった。外ケーブル供試体は載荷点位置にディビエータを設けて緊張材を 5.5° で曲上げ配置した。ディビエータはRC構造とし、供試体のウェブおよびフランジと一体構造とした。

2.2 実験因子および載荷方法

シリーズIは、軸方向引張鉄筋を配置しないで一体打ちはりとしたもので、シリーズIIIと比較するものである。シリーズIIは、プレキャストセグメントはりに高強度コンクリートを適用したもので、シリーズIIIの1.5倍のプレストレスを導入した。ただし、せん断補強筋の無いプレキャストセグメントはりのせん断破壊は極めて脆性的であることが確認されている[2]ので、シリーズIIではD6のスターラップを20cm間隔(せん断補強筋比0.32%)で配置することにした。

シリーズEXは、外ケーブルを用いてウェブを薄くしたプレキャストセグメントはりで、導入プレストレスの違いを実験因子とした。また、シリーズIIと同様にD6のスターラップを20cm間隔(せん断補強筋比0.53%)で配置した。導入応力度は、普通強度コンクリートのはりで $100\text{kgf}/\text{cm}^2$ 、高強度コンクリートのはりで $150\text{kgf}/\text{cm}^2$ とし、断面上縁には引張応力が発生しないように

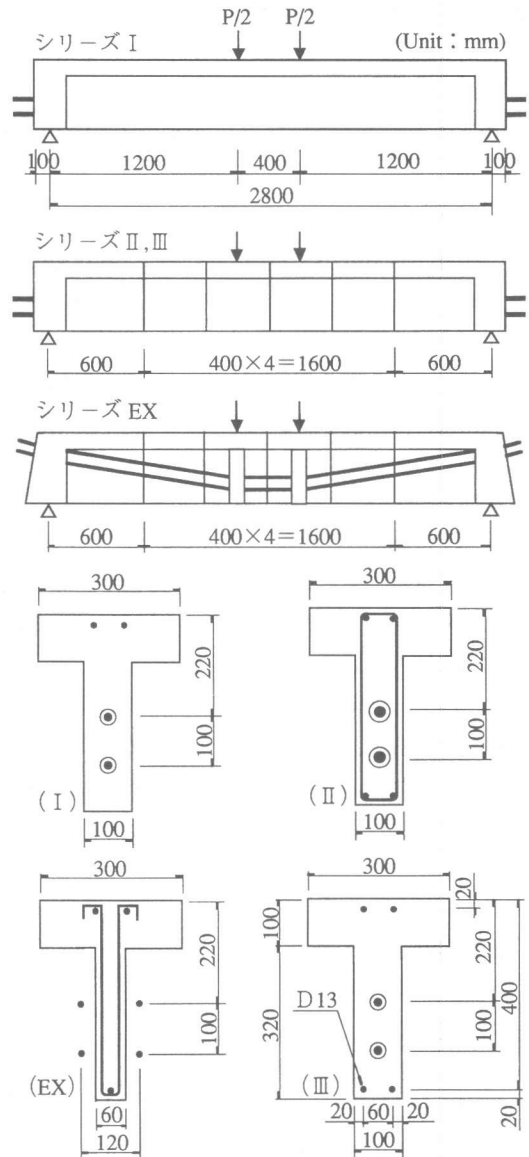


図-1 供試体形状寸法

表-2 材料特性一覧 (kgf/cm²)

記号	コンクリート			P C 鋼材			
	圧縮強度	引張強度	弾性係数	種類	降伏強度	引張強度	弾性係数
I-B, UB	476	31.4	2.7*10 ⁵	φ17	11900	13100	2.0*10 ⁶
II-B, UB	670	33.4	2.8*10 ⁵	φ23	12000	13100	2.0*10 ⁶
EX	NS	550	40.3	φ12.4	16600	18500	2.0*10 ⁶
	HS	728	44.8	φ12.7	17700	19400	2.0*10 ⁶
III-B, UB	423	32.5	2.7*10 ⁵	φ17	11800	13000	2.0*10 ⁶

緊張力を導入した。

載荷はスパン280cm、純曲げ区間40cmの1方向繰返し2点載荷とした。繰返し載荷の除荷点は、①ひびわれ(開口)発生荷重、②中央変位10mm(たわみ支間比1/280)の2点とした。

なお、シリーズEXの外ケーブルとディビエータの接触部には、φ42.7(STK400)の鋼管をR=500mmで曲げ加工したものを配置して、外ケーブルが局部的に折れ曲がらないようにした。また、上記の接触部にはテフロン板を挿入して、外ケーブルとディビエータとの摩擦抵抗を除去するようにした。表-2に本実験に用いたコンクリート強度およびP C鋼材の機械的性質を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 せん断挙動における軸方向引張鉄筋の影響

シリーズIの実験結果を図-2に示す。シリーズIIIのプレキャストセグメントはりと比較すると、シリーズIはコンクリートの引張強度が有効に作用するため、ひびわれ発生荷重が大きくなった。また、最終破壊形態は緊張材に付着の有るボンドはりではスパン中央部のP C鋼材の降伏、緊張材に付着の無いアンボンドはりでは中央部圧縮縁コンクリートの圧壊となった。しかし、シリーズIIIはせん

断スパン内に発生した付着ひびわれおよび定着ひびわれが斜めひびわれに成長してせん断破壊した[2]のである。シリーズIがせん断破壊しなかった理由としては、シリーズIのコンクリート強度が若干高いことによる影響および定着部がシリーズIIIよりも十分に補強されていることに

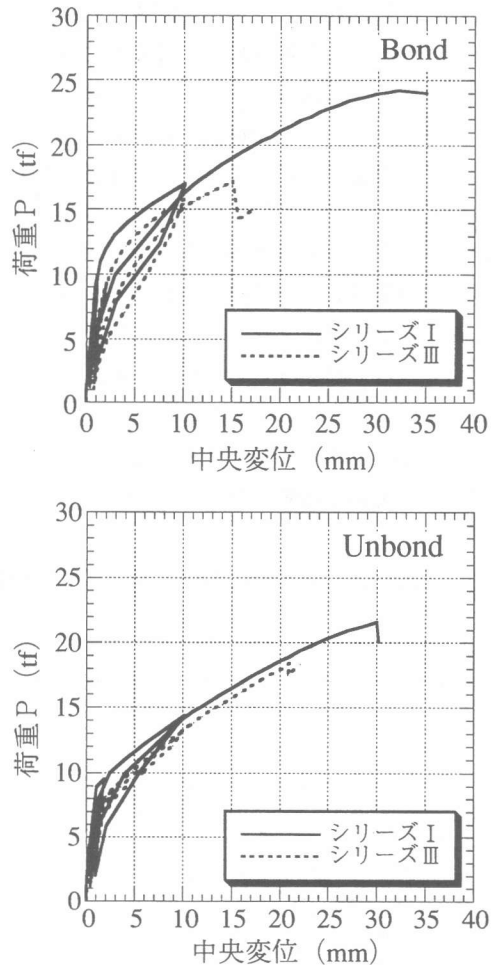


図-2 実験結果(シリーズI)

よる影響等が考えられる。しかし、Ⅲ-Bでは明確な斜めひびわれの発生が観察されたので、付着の有る軸方向引張鉄筋をセグメント内に配置することは、斜めひびわれを誘発する可能性も否定できないと思われる〔3〕。

3. 2 高強度コンクリートの適用性

シリーズⅡの実験結果を図-3に示す。ボンドはりでは、荷重18tf程度で付着ひびわれが発生し、21tf程度で斜めひびわれに成長した。しかし、スターラップを配置したため、直ちに崩壊することは無く、最終的にはスパン中央部の圧縮縁コンクリートが圧壊した。アンボンドはりでは、荷重21tf程度で付着ひびわれが緊張材に沿って斜め状に多数発生したが、ボンドはりと同様にスパン中央部の圧縮縁コンクリートが圧壊した。アンボンドはりの破壊荷重および終局変位は、ボンドはりと同様な破壊形態となったため、比較用のシリーズⅢほどの差は見られなかった。しかし、導入プレストレス力を大きくすることで、ひびわれ(開口)発生荷重を大きくできるため供用限界が大幅に改善できると思われる。

3. 3 せん断挙動における外ケーブルの効果

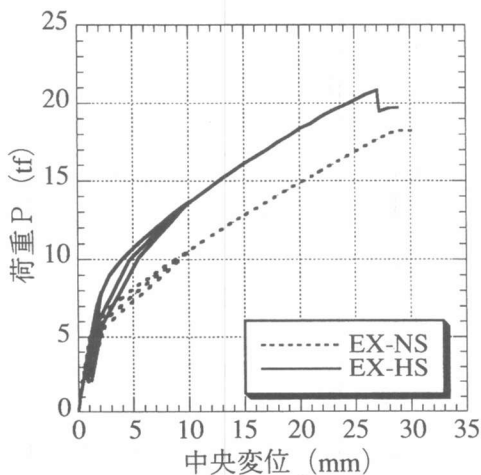


図-4 実験結果(シリーズEX)

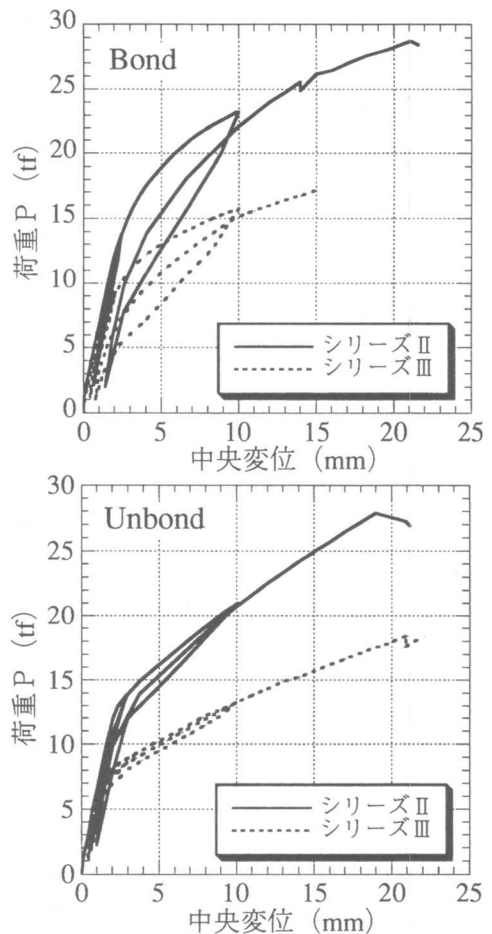


図-3 実験結果(シリーズⅡ)

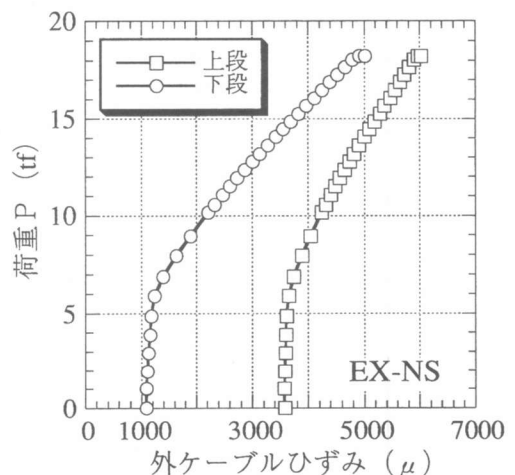


図-5 外ケーブルひずみの例

シリーズEXの実験結果を図-4および図-5に示す。本供試体は外ケーブル構造の利点を考慮して、ウェブ厚を内ケーブル供試体より40%薄くしたものであるが、せん断スパンに斜めひびわれは全く観察されず、EX-NS、EX-HS共にスパン中央部の圧縮縁コンクリートが圧壊した。高強度コンクリートを使用して、導入プレストレス力を大きくしたEX-HSは、シリーズIIの結果と同様に供用性能の向上が見られた。また、斜めひびわれが発生しなかった理由は、外ケーブルの曲上げ配置によって発生する逆向きのせん断力が、はりの変形と共に増加し、はりのせん断に対して安全側の効果を与えたためと思われる。図-6は荷重せん断力と作用せん断力の関係を示したものである。ここに、 ΔT はせん断スパン位置における外ケーブルの張力増加量を示し、 α は外ケーブルの曲上げ角度を示す。図-6によると、作用せん断力は曲げひびわれ(開口)発生後から徐々に減少し、終局荷重付近では80%程度まで減少したのである。

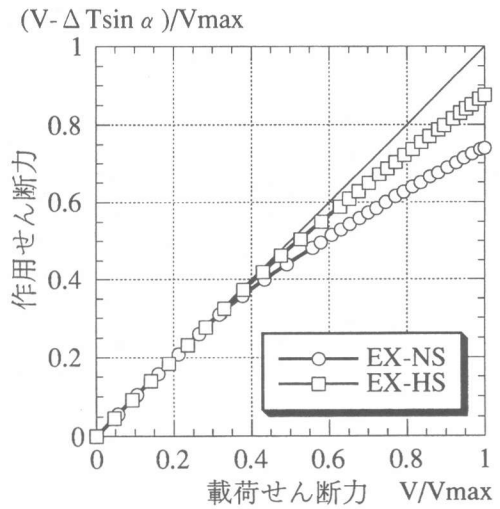


図-6 作用せん断力の変化

4. せん断耐力の検討

せん断耐力の計算結果を表-3に示す。本計算値は式(1)~(3)に示す土木学会コンクリート標準示方書で規定されている算定式で計算したものである。ただし、材料強度およびデコンプレッションモーメント M_0 は実験値を使用し、有効高さ d はコンクリートの圧縮縁から緊張材の重心位置までの距離とした。

また、既往の研究[2]を参考にコンクリートの分担するせん断耐力を式(4)で計算した結果も示した。 V_{c2} は式(2)で $\beta_n=1$ として計算した結果に、 M_c/a を直接加算したものである。ここに、 M_c/a は、はりの純曲げ区間が荷重ゼロから曲げひびわれ(開口)が発生するまでの増加せん断力を意味している。

$$V = V_c + V_s + V_p \quad (1)$$

$$V_{c1} = 0.9 \beta_d \beta_p \beta_n (f'_c)^{1/3} \cdot b_w d \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_w / s \cdot d / 1.15, \quad V_p = P_p \cdot \sin \alpha \quad (3)$$

$$V_{c2} = V_{c1} (\beta_n = 1) + M_c / a \quad (4)$$

ここに、 f'_c : コンクリート圧縮強度(kgf/cm²)、 b_w : ウェブ厚(cm)、 d : 有効高(cm)

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

A_w : スターラップ断面積(cm²)、 f_w : スターラップ降伏強度(kgf/cm²)

s : スターラップ間隔(cm)、 P_p : 導入プレストレス力(kgf)、 α : 外ケーブル曲上げ角度

M_c : ひびわれ発生モーメント(kgf·cm)、 a : せん断スパン長(cm)

表-3 実験値とせん断耐力の計算値

記号	実験値 (tf)			計算値 (tf)							
	曲げひびわれ V_{fc}	斜めひびわれ V_c^*	破壊 V_u	(示方書) V_{c1}	V_c/V_{c1}	(式4) V_{c2}	V_c/V_{c2}	(示方書) V_s	(示方書) V_p	合計 $V_{c2}+V_s+V_p$	
I	B	4.97	発生せず	12.1	5.24	—	8.10	—	0	0	8.10
	UB	4.78	発生せず	10.8	5.14	—	7.91	—	0	0	7.91
II	B	6.91	10.6	14.2	7.25	1.46	11.2	0.95	3.45	0	14.7
	UB	6.43	10.5	13.9	7.04	1.49	10.7	0.98	3.45	0	14.2
EX	NS	2.94	発生せず	9.12	3.20	—	5.13	—	3.45	1.67	10.3
	HS	3.96	発生せず	10.4	3.84	—	6.42	—	3.45	2.35	12.2

*) 付着ひびわれから斜めひびわれが発生した値

本実験で斜めひびわれが発生したシリーズⅢで、コンクリートが分担するせん断耐力の実験値と計算値を比較すると、示方書では安全側の値を示したが、式(4)ではほぼ妥当な評価を与えたと思われる。

5. まとめ

以下に本実験で得られた結果をまとめる。

- ①プレキャストセグメント構造と外ケーブルの組み合わせは、施工合理化だけでなく、はりのせん断耐力も合理的に向上できる利点があることが明らかとなった。
- ②外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりは、ひびわれ(開口)発生後の変形が大きくなるが、導入プレストレス力を大きくすることで、供用性能を改善することができた。
- ③プレキャストセグメントはりのコンクリートが分担するせん断耐力は、ひびわれ(開口)発生モーメントを用いて評価するのが適当と思われた。

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、大学院生の鈴木宣政君、4年生の飯島基裕君の多大な協力を頂いた。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 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, PP.967-972, 1994
- [2] 伊藤,山口,池田: プレキャストセグメント構造のせん断耐力について,プレストレスコンクリート技術協会第4回シンポジウム論文集, PP.45-50, 1994
- [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, PP.101-109, 1980
- [4] T.Ito,T.Yamaguchi and S.Ikeda: Flexural Shear Behaviour of Prestressed Concrete Beams Fabricated by Precast Segmental Construction, Proc. The 3rd International KERENSKY Conference, PP.241-248, 1994, Singapore