

外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁のせん断耐力に関する実験的研究

大塚 久哲 *1・矢葺 亘 *2・若狭 忠雄 *3・藤本 良雄 *4

1. ま え が き

PC 橋梁におけるプレキャストセグメント工法は、省力化・品質向上・熟練労働者不足への対応および工期短縮等で優れている工法である。

プレキャストセグメント工法は、1962年フランスの Jean Muller を中心に開発され、1964年にフランスで Choisy Le Roi 橋がカンチレバー工法で初めて施工されて以来、フランス国外での発展はめざましく、近年では外ケーブル技術の発展とともにセグメントと外ケーブルを組み合わせた形式が多く採用されている。

わが国ではカンチレバー工法によるセグメント工法が昭和42年に導入されて以来、丁度35年が経過するが、昭和40年代に十数橋が施工されたのみで、昭和50年代は斜材付きπ型ラーメン橋のセグメント工法を除きほとんど施工されなかった。

その後平成に入り、プレキャストセグメント工法は、日本道路公団を中心に急速施工および省力化の観点から大規模なプロジェクトにおいて、外ケーブルを併用したスパンバイスパン工法等で採用されてきている。このセグメント工法は、ある大きさの橋面積以上の大きなプロジェクトでは、経済性、急速施工等の面で優れた工法である。

一方、外ケーブル構造は、コンクリート部材内にシースを配置する必要がないためウェブ厚の低減、作業性の向上、工期短縮、品質向上、グラウト問題の改善等多くの利点を有しており、欧米を中心に多く採用されている。

外ケーブル構造は、1939年、Dischinger によって開発されて以来、PC 橋の初期段階では、Dischinger, Magnel, Lossier, Coignet 等によって推奨されてきたが、次の段階でドイツの Finsterwalder, Leonhardt 等によって付着のある内ケーブル構造が広められてきたため、永年そのアイデアは忘れられてきていた。

この外ケーブルを新設橋に応用したのがフランスの Jean Muller であり、1980年初期、アメリカの Eugene Figg と共同でフロリダの Long Key 橋で応用され、プレキャストセグメントによるスパンバイスパン工法で架設された。フランスでもほぼ同時期に異なった形式の橋梁で応用され始めた。

このように、プレキャストセグメント工法とともに外ケーブルを適用する事例は、とくにフランスとアメリカで急

速な発展を遂げた。アメリカでは American Segmental Bridge Institute (アメリカプレキャストセグメント橋協会) がこの工法に絶大な支援をしてきた。フランスでは、道路橋の80%以上にも及ぶ橋梁が外ケーブル構造で架設されている。

とくに fib 名誉会長の M. Virlogeux が SETRA (Service d'Etudes Techniques des Routes et Autoroutes : 高速道路局構造物技術センター) の責任者として、経済性と耐久性向上のため外ケーブルの応用拡大に努力したためである。

タイのバンコクの高速道路 Bangna 高架橋 (世界最長高架橋、総延長 55 km, 最多数のプレキャストセグメント・オペレーション, スパンバイスパン架設工法, マッチキャスト・セグメント工法, 外ケーブルと内ケーブル併用) が代表例である。

また、Second Severn 橋 (延長 5 km, プレキャストセグメント数 2 300 個, イギリス Laing 社とフランス Dumez-GTM の JV) がイギリスのプリストルで 1996年に完成し、1997年にはカナダの Confederation 橋 (延長 13 km, 水深 40 m, 流水の影響, Dumez-GTM 他 の JV) が完成した。これらの橋梁は、きわめて高度な設計・施工法のコンセプトにしたがって建設された事例である。

一方、わが国においては、外国にかなり遅れをとっていたが、外ケーブルとセグメント併用工法は、近年日本道路公団を中心に積極的に採用されてきている。

外ケーブル構造の課題としては、内ケーブルの場合と比較して終局曲げ耐力が低下することであるが、場所打ちコンクリートの場合は、近年、多くの実験が行われてデータも蓄積されてきている。

しかし、全外ケーブルを用いたセグメント工法におけるせん断実験例は少なく、とくに曲げとせん断が最大となる中間支点付近での実験例はほとんどない。この支点付近においては、垂直面せん断破壊が生じる恐れがあり、せん断耐力が大きく低下することが予想される。

本研究は、この点に着目してせん断実験を行い、その結果よりプレキャストセグメント工法に外ケーブルを採用した場合の設計・施工上の提案を行うものである。

2. 既往の研究

全外ケーブルのセグメント工法は、スパンバイスパン架設で、アメリカの Long Key 橋 (1981年, 3.70 km), Seven

*1 Hisanori OHTSUKA : 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 工博

*2 Wataru YABUKI : 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 助手

*3 Tadao WAKASA : 新構造技術(株)常務取締役 本社技術部 部長

*4 Yoshio FUJIMOTO : (株)富士ピー・エス 福岡支店 技術部長

Mile 橋 (1982 年 10.93 km), Mid Bay 橋 (1993 年 5.87 km) 等に採用されており, イギリスでは運輸省の内ケーブルの使用禁止の法令にしたがって施工された 1996 年完成の Second Severn 橋がある。Second Severn 橋では, 全外ケーブル構造としたため, 外ケーブルの定着間長さをスパンの 40% の長さで定着することで, 終局耐力の低減を少なくする手段がとられている。

一方, わが国におけるプレキャストセグメント桁に関するせん断耐力試験としては, 伊藤らによる文献^{2), 3)}に示されており, 実験供試体は T 型断面の単純桁で実験が行われている。この実験では, セグメント接合面にせん断キートをまったく設けないドライジョイントとしているが, プレキャストセグメント単純桁におけるせん断補強鉄筋 (腹鉄筋) は有効に機能することが確認されている。またこれによれば, ボンドとアンボンドの曲げひび割れ発生荷重には差がなく, 終局せん断荷重はボンド有りの方がわずかに大きくなっている。

このほか, セグメントの外ケーブルの実験的研究としては西川らの研究⁴⁾, 新津らの研究⁵⁾がある。西川らの研究では, 外ケーブルを使用した PC 単純桁において, 外ケーブル比率, 偏向部設置間隔, 引張鉄筋量, プレキャストセグメント等をパラメータとしてせん断実験を行っている。また, セグメントの供試体の継目部には多段キートが使用されている。同研究によれば, プレキャストセグメント工法の場合, 設計における曲げおよびせん断耐力は, 外ケーブル構造の桁でも内ケーブル構造と同様の設計が可能とされている。またケーブルの配置位置に関係なく, 道路橋示方書Ⅲ (平成 8 年 12 月) に基づくせん断耐力に比べ安全側の値となることも示されている。

新津らの研究では, 場所打ちコンクリートの外ケーブルによるせん断の影響をしらべるため, せん断補強鉄筋を用いない供試体を製作し, 実験を行っている。これは, 外ケーブルによるプレストレスを導入することにより, 終局せん断耐力は大幅に改善され, せん断スパン内でケーブルを軸方向に対し角度をつけて配置することでその補強効果はさらに増大することが示されている。

しかし, これらの実験は, 単純桁におけるものであり, 連続桁の中間支点付近においては, 最大曲げと最大せん断が同時に作用するため, 単純桁とは異なった挙動を示すと考えられる。

プレキャストセグメント工法のせん断力の問題について考察された文献としては, 池田哲夫氏他の文献⁶⁾があり, それにおいては「プレキャストブロック工法での連続桁支点におけるせん断破壊に対しては, プレストレスの量を調整することによって, 破壊耐力が増減する。連続桁の中間支点付近の曲げモーメントとせん断力がともに大きくなる断面や, 変曲点付近の曲げモーメントに比較しせん断力の大きい断面等では, 設計荷重作用時の合成応力度において, 圧縮力を残すような設計をすることによって, ブロック工法のせん断破壊に対する耐荷力を増すことが可能である。」と指摘している。

このほか, 国外における外ケーブルの実験としては, フ

ランスの Four'e Bernard による文献⁷⁾において, 張出し桁でせん断実験が実施されている。これはプレキャストセグメント工法でなく, 場所打ちコンクリートの張出し桁のせん断試験であり, 内外ケーブルの実験を実施している。パラメータとしては, 内外ケーブル, ウェブ厚さ, スターラップ, パフォーマンスコンクリート等が考慮されている。内・外ケーブルのせん断耐力の比較では, 外ケーブルの方が 10% 低下している。これは, 内・外ケーブルのコンクリートのせん断抵抗 S_c が, PC 鋼材の張力増加量に影響されるためである。

以上を考慮し, 外ケーブルを用いたセグメント工法のせん断耐力を把握するため, 内・外ケーブル, 場所打ちまたはセグメント, せん断キートの有無等をパラメータとして, 曲げ, せん断力が同時に最大となるように張出し桁を用い, せん断実験を実施した。

3. 実 験

3.1 供 試 体

本実験は, 九州大学土木災害実験棟にて実験された。全外ケーブルを使用したセグメント工法に対するせん断耐力の実験としては, 張出し桁を用いて実施した。また, PC ケーブルは, 内・外ケーブル共に直線配置とした。

本実験に用いた供試体は, I 型断面の PC 桁で, 曲げ破壊よりもせん断破壊が先行するよう断面を決定した。なお, 供試体の両端は外ケーブルを定着するため大きくし, 矩形断面とした。代表的な供試体の寸法を図 - 1 に示す。セグメント桁供試体の製作は, 両端のセグメントを先に製作し, それを型枠として中央のセグメントを製作するマッチキャストセグメント方式で行った。

3.2 使用材料

使用材料として, コンクリートは養生期間が十分に取れなかったため, 早強ポルトランドセメントを用いて配合した。設計基準強度は $\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ とした。緊張材は PC より線で, 外ケーブルには SEEE・F50 を, 内ケーブルには SEEE・PAC-7T13 を使用した。また, 鉄筋はすべて SD295 とし, 軸方向鉄筋およびせん断補強鉄筋ともに D10 を用いた。さらに, セグメント供試体継目部の接着剤として, 1 液エポキシ樹脂接着剤を用いた。各材料試験の結果を表 - 1, 2 に示す。

3.3 検討ケース

本実験では場所打ちまたは, セグメント, 内・外ケーブル, せん断キートをパラメータとし, 9 種類の供試体を製作

表 - 1 鉄筋の強度試験結果

鉄筋の種類	降伏点または 0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
SD295A D10	417	507	21

表 - 2 PC 鋼材の強度試験結果

PC 鋼材	断面積 (mm ²)	引張荷重 (kN)	0.2%永久伸び に対する荷重 (kN)	伸び率 (%)
SEEE F50(SWR7B)	277.1	542	488	5.4

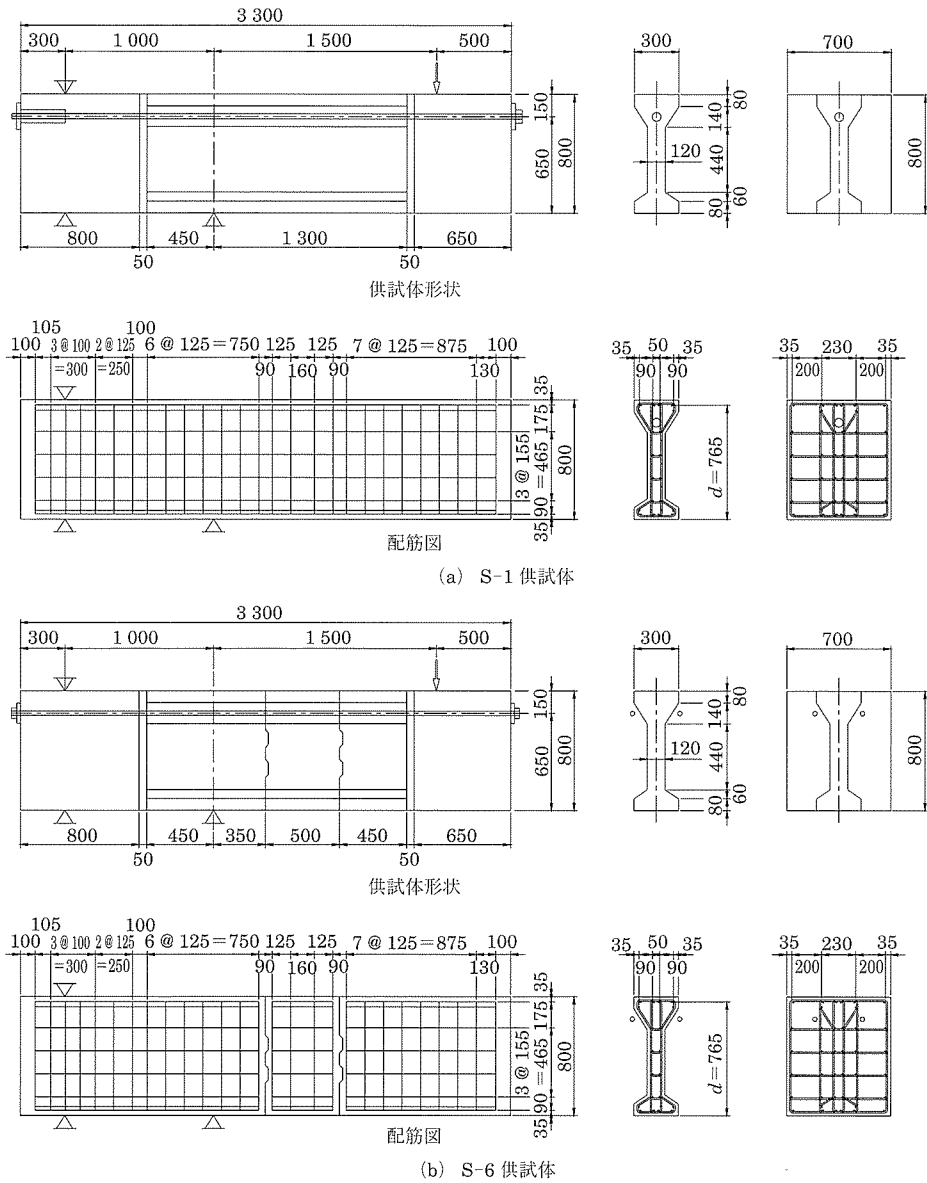


図 - 1 供試体形状および配筋図

表 - 3 実験供試体

供 試 体	製作方法		ケーブルの種類		せん断キー		備考
	場所打ち	セグメント	内ケーブル	外ケーブル	なし	あり	
S-1	○		○		—	—	
S-2	○			○	—	—	
S-3		○	○		○		
S-4		○		○	○		
S-5		○		○		○	せん断キー 3 個 せん断キー鉄筋補強有り 載荷スパン 2.0 m
S-6		○		○		○	
S-7		○		○		○	せん断キー 3 個
S-8		○		○		○	せん断キー 2 個鉄筋補強有り
S-9		○	○			○	

した。なお、せん断キーは多段型とした。検討ケースを表-3に示す。

3.4 載荷方法

載荷方法は、1点載荷方式として、斜めひび割れ発生ま

では荷重制御、それ以降は変位で制御を行い、供試体が破壊を起こし最大耐力が確認できるまで載荷を行った。載荷位置は、せん断破壊が先行するように載荷スパン長 1.5 m とした。ただし、S-5 だけは曲げの影響を調べるため、載

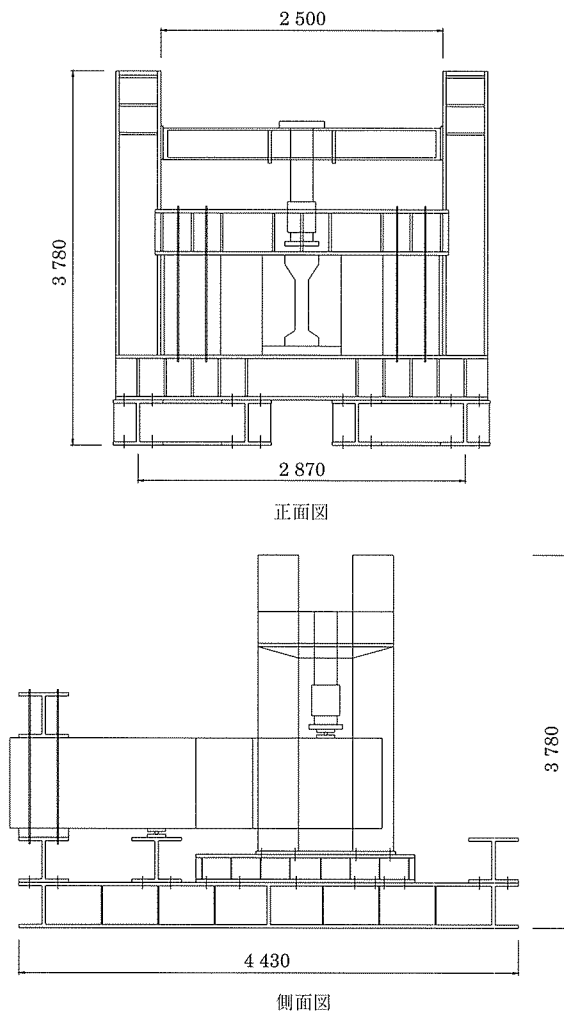


図 - 2 荷装置

荷スパン長を 2.0 m とした。

3.5 荷装置

本実験で用いた実験装置および供試体設置位置を図 - 2 に示す。単純片持ち梁の荷ができるように治具を製作し、荷装置に改良を加えた。

供試体は、一端から 300 mm の位置で固定し、そこから 1 000 mm の位置を中間支点としてヒンジ支承によって支持した。端部の上下の支承は PC 鋼棒 8 本で荷装置フレームと緊結した。

3.6 測定項目

(1) 変位の測定

供試体の鉛直変位および水平変位を測定するために、荷位置および中間支点付近、セグメント継目部等 15~29 個の変位計を設置した。

(2) 鋼材ひずみの測定

鉄筋および PC 鋼材 (内、外ケーブル) の測定にはストレイnageージ (1 ゲージ 3 線式) を貼付け、ひずみ量を測定した。鉄筋および PC 鋼材のひずみゲージ貼付位置を図 - 3 に示す。

(3) コンクリートひずみの測定

コンクリートの表面にストレイnageージ (1 ゲージ 3 線式) を貼付け、コンクリート表面のひずみを測定した。

4. 実験結果

4.1 各材料試験の結果

各材料試験の結果を表 - 4 に示す。

4.2 ひび割れの測定

本実験の測定項目としては、ひび割れ状況が重要であるため、①中間支点上ひび割れ発生状況、②継目部開き開始

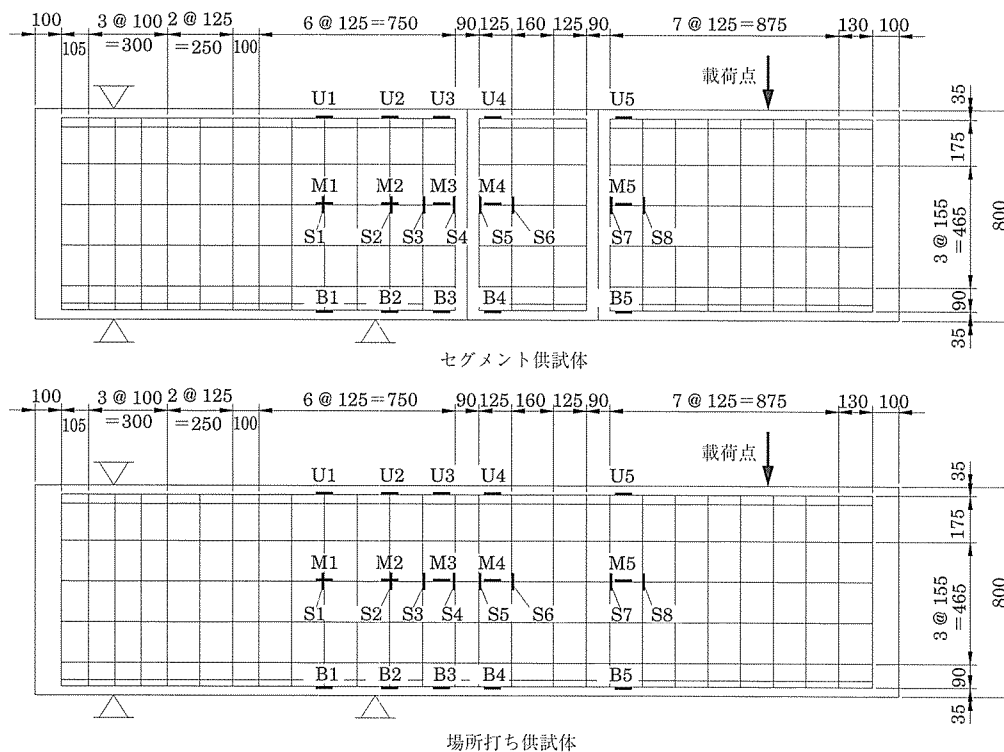


図 - 3 鉄筋のひずみゲージ位置図

表 - 4 供試体コンクリート強度

供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
S-1	47.5	3.87	3.37
S-2	43.3	2.76	3.27
S-3	47.4	4.20	3.17
S-4	45.8	3.13	3.23
S-5	53.2	4.67	3.58
S-6	48.4	4.24	3.48
S-7	47.6	4.36	3.08
S-8	53.7	4.05	3.05
S-9	52.6	4.29	3.38

荷重, ③斜めひび割れ発生荷重, ④セグメント鉛直ずれ開始荷重等に重点をおいた。

4.3 ひび割れ荷重およびせん断耐力

実験結果表を表 - 5 に示す。なお, 表中の①~⑧はせん断耐力の大きい順に並べたものであり, ⑨は載荷位置が 2.0m の供試体である。

代表的な実験状況写真を写真 - 1~3 に示す。また, 各供試体のひび割れ状況図を図 - 4~9 に示す。なお, 本実験はすべてせん断破壊の挙動であった。

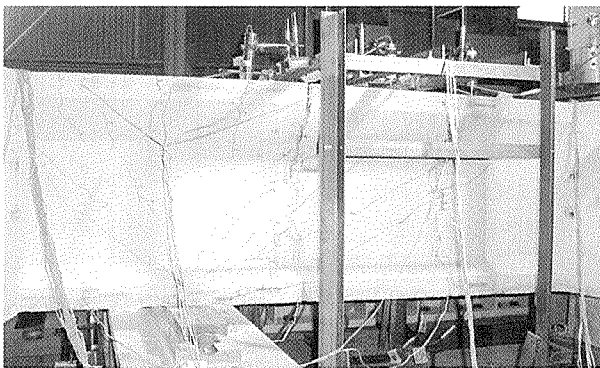
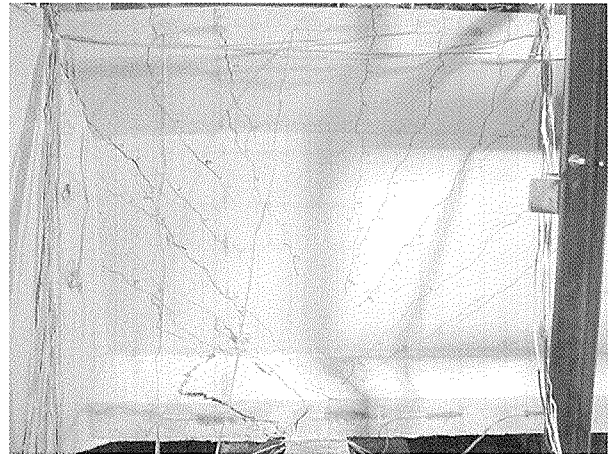
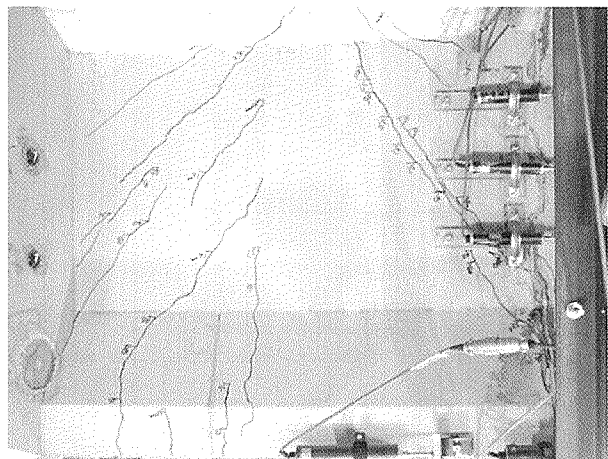


写真 - 1 載荷試験状況写真 (S-9)

- (1) S-1 (場所打ち, 内ケーブル) : $S_c = 333$ kN, せん断耐力 $P = 565$ kN
 - ① $P = 250$ kN で曲げひび割れが支点上に生じた。
 - ② $P = 333$ kN で曲げひび割れに引き続いて, 左右のウェブ中央に斜めひび割れが生じた。
 - ③ 次に斜めひび割れが数本入り, 支点に向かって進展



S-1 場所打ち, 内ケーブル, せん断破壊耐力 $P = 565$ kN



S-9 セグメント, 内ケーブル, せん断キー 2 個 (補強有り), せん断破壊耐力 $P = 518$ kN

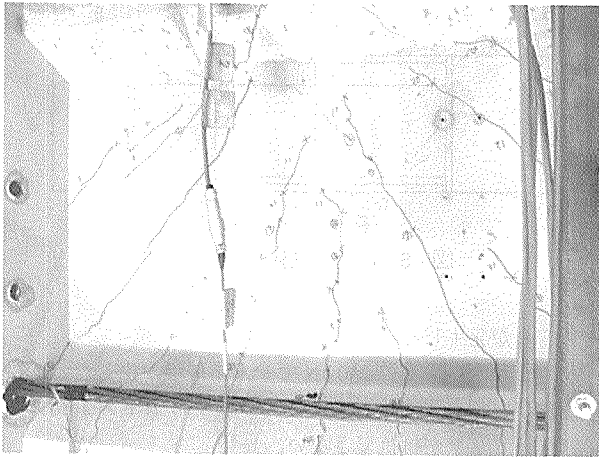
写真 - 2 場所打ち内ケーブルとセグメント内ケーブルの比較

した。場所打ちの場合, ひび割れ幅は大きく開かないため分散性がよく, せん断抵抗が大きくなった。

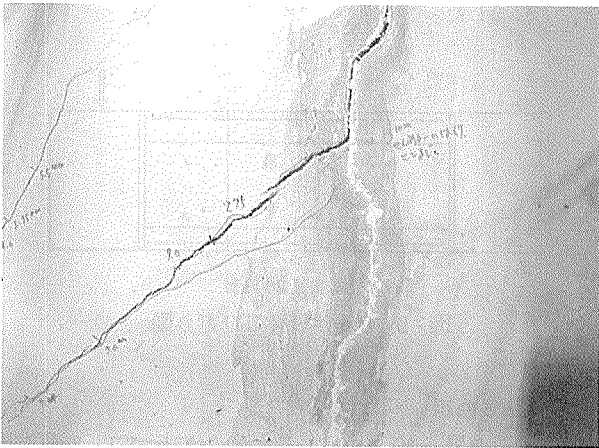
- ④ 565 kN 載荷後は荷重が伸びず, 変位のみが増大した。この荷重がほとんど伸びない状況を破壊荷重とした。
- (2) S-2 (場所打ち, 外ケーブル) : $S_c = 295$ kN, せん断耐力 $P = 500$ kN
 - ① $P = 260$ kN で支点上に曲げひび割れが発生した。
 - ② 次に斜めひび割れが 295 kN で左右のウェブに発生し

表 - 5 実験結果表

	供試体	製作方法	ケーブルの種類	せん断キーの有無	ひび割れ荷重 (kN)		せん断耐力 (kN)
					曲げひび割れ	斜めひび割れ	
①	S-1	場所打ち	内ケーブル	—	250	333	565
②	S-9	セグメント	内ケーブル	キー 2 個	245	274	518
③	S-2	場所打ち	外ケーブル	—	260	295	500
④	S-6	セグメント	外ケーブル	キー 2 個	250	260	380
⑤	S-7	セグメント	外ケーブル	キー 3 個	250	250	340
⑥	S-3	セグメント	内ケーブル	キーなし	245	245	340
⑦	S-8	セグメント	外ケーブル	キー 2 個補強	244	244	308
⑧	S-4	セグメント	外ケーブル	キーなし	245	245	260
⑨	S-5	セグメント	外ケーブル	キー 3 個補強	176	186	(308)

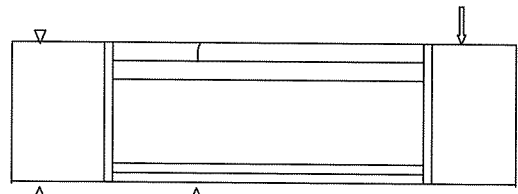


S-2 場所打ち, 外ケーブル, せん断破壊耐力 $P = 500 \text{ kN}$

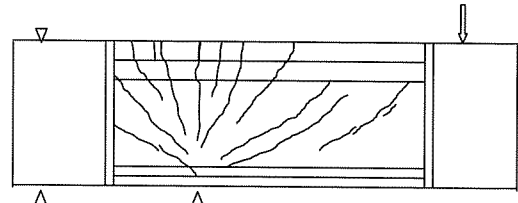


S-6 セグメント, 外ケーブル, せん断キ-2個 (補強なし), せん断破壊耐力 $P = 380 \text{ kN}$

写真 - 3 場所打ち外ケーブルとセグメント外ケーブルの比較



曲げひび割れ状況 260 kN

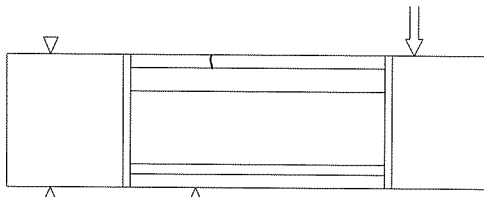


終局状況 500 kN

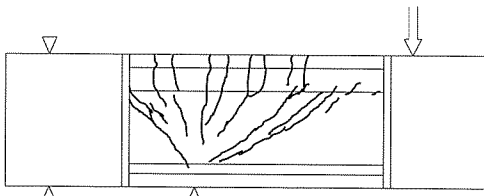
図 - 5 S-2 供試体ひび割れ図

た。

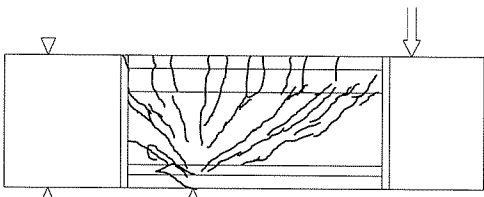
- ③ 斜めひび割れが支点に向かって進展し, 最後は載荷しても荷重が伸びず, 変位のみが増大する状況で, 500 kN で終局へ至っている。
- (3) S-9 (セグメント, 内ケーブル, キ-2 個) : $S_c = 274 \text{ kN}$, $P = 518 \text{ kN}$
- ① 最初のひび割れ荷重は 245 kN で支点上に生じた。内ケーブルの場合ケーブルに付着があるため, 目地部に曲げひび割れは生じていない。
- ② 斜めひび割れ荷重は 274 kN で目地部に生じた。
- ③ PC ケーブルに付着があり, 通常の場合打ちのせん断ひび割れに類似している。
- ④ 518 kN で荷重が増加しなくなった点をせん断破壊とした。



曲げひび割れ状況 250 kN

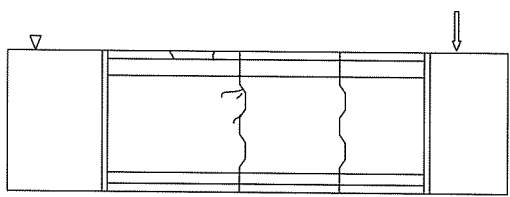


曲げおよび斜めひび割れ状況 432 kN

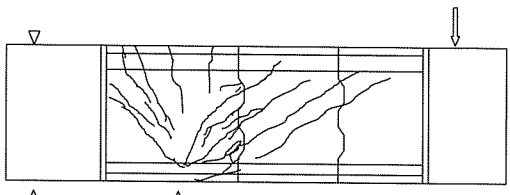


終局状況 565 kN

図 - 4 S-1 供試体ひび割れ図



曲げひび割れ状況 274 kN



終局状況 518 kN

図 - 6 S-9 供試体ひび割れ図

- (4) S-6 (セグメント, 外ケーブル, キ-2 個) : $S_c = 260 \text{ kN}$, $P = 380 \text{ kN}$
- ① 250 kN で曲げひび割れとほぼ同時に斜めひび割れが継目部のキ-位置に発生した。
- ② その後ひび割れ数はほとんど増加しない。
- ③ $P = 340 \text{ kN}$ で断面のほぼ中央のキ-位置に斜めひび

割れが生じた。

- ④ さらに、ひび割れが開き、下縁付近に斜めひび割れが生じた。この場合、上縁の目地の開き量はかなり広くなり、下縁がせん断破壊し、 $P = 380 \text{ kN}$ でせん断キーも同時に破壊した。

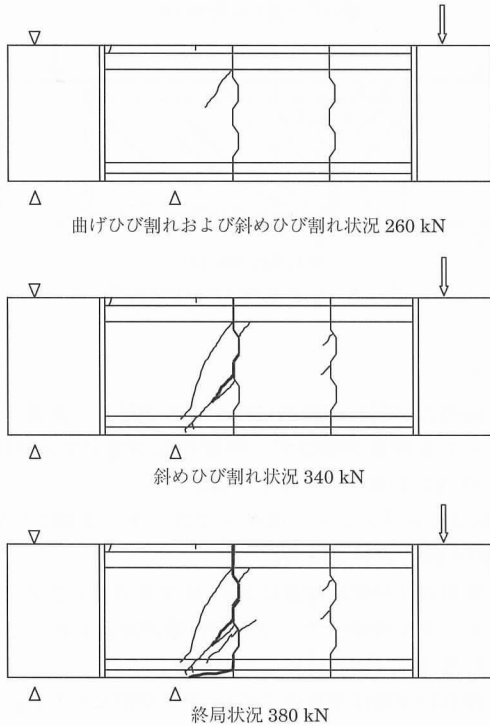


図 - 7 S-6 供試体ひび割れ図

- (5) S-3 (セグメント、内ケーブル、キーなし) : $Sc = 245 \text{ kN}$, $P = 340 \text{ kN}$
 - ① 245 kN で目地部に曲げひび割れ、同時に斜めひび割れが目地部に生じた。
 - ② 載荷点側継目部にひび割れが集中し、その位置でせん断破壊を生じた。
- (6) S-4 (セグメント、外ケーブル、キーなし) : $Sc = 245 \text{ kN}$, $P = 260 \text{ kN}$
 - ① 245 kN で目地部に曲げひび割れと同時に斜めひび割

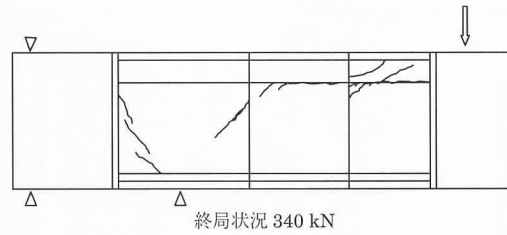


図 - 8 S-3 供試体ひび割れ図

れが発生した。

- ② それからすぐに 260 kN でせん断破壊が生じた。
- ③ ひび割れがすぐに関くためコンクリートおよびスターラップが抵抗できない。
- ④ せん断キーのない場合は、ひび割れが開くとすぐに破壊した。

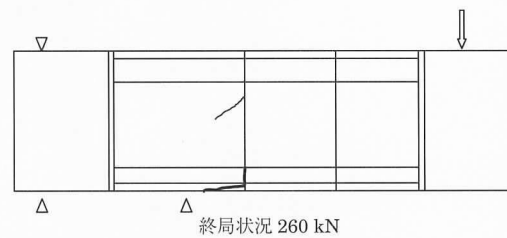


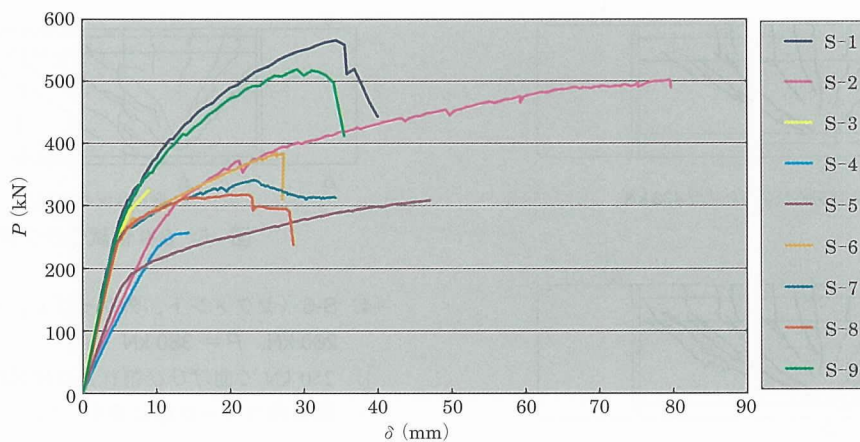
図 - 9 S-4 供試体ひび割れ図

4.4 P-δ 曲線

$P-\delta$ 曲線を図 - 10 に示す。最大荷重値は、S-1, S-9 は類似しており、最大荷重時の変位は 35 mm となっている。それ以降は急激に低下している。S-6, S-8 は最大荷重時の変位は 25 mm となっている。S-3, S-4 は最大荷重時の変位が 15 mm と小さく、急激なせん断破壊を示している。S-2 は、場所打ちの外ケーブルの場合であり、荷重の最大値は S-1 の 90% であるが、変位は非常によく伸びており、じん性があることがわかる。S-5 も下縁のせん断キーの部分を補強したため、変位がよく伸びていることがわかる。

4.5 PC 鋼材の応力

PC 鋼材の応力増加については、S-1 は、 0.3 kN/mm^2 と小



* δ は載荷点位置でのたわみを示す

図 - 10 $P-\delta$ 曲線

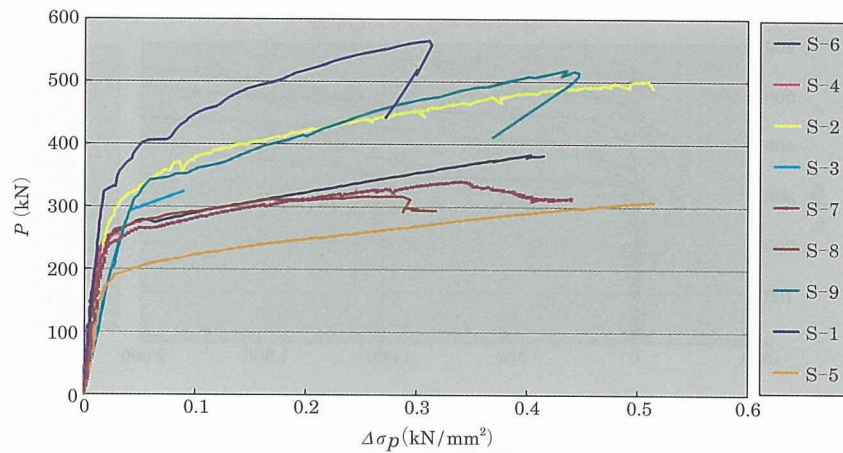


図 - 11 PC 鋼材増加応力

さいが内ケーブルのため、正しく測定できていない。外ケーブルの場合は、S-3, S-4 を除き、全体的に 0.30~0.50 kN/mm² となっている。とくに S-2, S-5 は 0.50 kN/mm² と大きく、S-3, S-4 は増加量が非常に小さいことがわかる。(図 - 11 参照)

4.6 鉄筋の応力

4.6.1 上縁引張鉄筋の応力

上縁の引張鉄筋の測定結果として代表的なひずみ図を図 - 12 に示す。

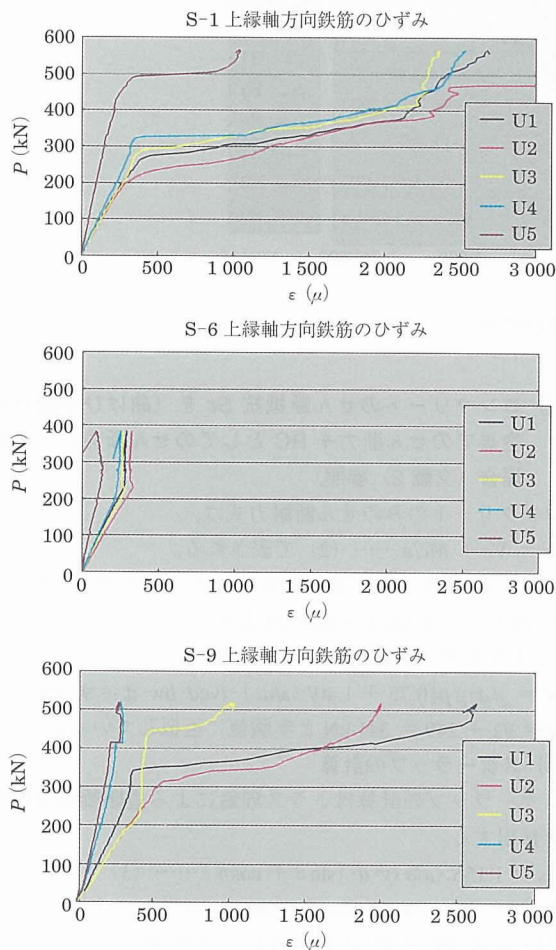


図 - 12 引張鉄筋ひずみ

場所打ちの S-1 は、上縁の U2 ゲージは曲げひび割れが生ずる 250 kN 付近までは緩やかに伸びるが、その後急激に伸びておりこの点がひび割れ時と考えられる。そしてゲージは U2, U1, U3, U4 の順に作用している。セグメント・内ケーブルの S-9 も S-1 と類似しているが、荷重が 300 kN になってから作用しており、またセグメントのため作用しているゲージが少ない。S-6 はセグメント (外ケーブル) のため、ゲージが 240 kN 以降はほとんど作用していないことがわかる。(ゲージ番号は図 - 3 参照)。

4.6.2 スターラップの応力

スターラップの応力状況として代表的な供試体を図 - 13 に示す。

スターラップはどの供試体も目地付近のゲージ S4, S5 のスターラップがよく作用している。そして斜めひび割れが発生すると同時に作用し始めている。S-1 は 300 kN 付近で 3 個のゲージ S4, S5, S6 が伸び、400 kN 付近で他のゲージ S1, S3, S7 が伸びている。S-9 はプレキャストでも、内ケーブルのためスターラップがよく抵抗している。S-6 は、260 kN で S3 ゲージが作用し始めて、380 kN で S6 ゲージが作用している。

5. 数値計算および実験結果との比較

5.1 数値計算

計算値は、基本的に場所打ち S-1 を対象としている。

5.1.1 曲げひび割れ荷重の計算

曲げひび割れは、合成曲げ応力 $\sigma < \text{曲げ引張応力}$ となることひび割れが生じる。

(1) 支点上のひび割れモーメントの計算

$\sigma_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ の場合、曲げ引張強度 = 4.91 N/mm^2 、プレストレス = 9.12 N/mm^2 であるから、ひび割れ発生までの応力度は、

$$\sigma_t = 4.91 + 9.12 = 14.03 \text{ N/mm}^2$$

ひび割れモーメントは、

$$14\,030 \text{ kN/m}^2 \times 0.02658 \text{ m}^3 \text{ (断面定数)} = 372.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$$

ひび割れ荷重は、 $P_c = 372.9/1.5 = 249 \text{ kN}$ となる。

(2) 目地部に生じる曲げひび割れの計算

目地部のひび割れは、モルタル部に生じることを考慮し、モルタル部強度を $\sigma_c = 20 \text{ N/mm}^2$ と仮定する。引張強度は

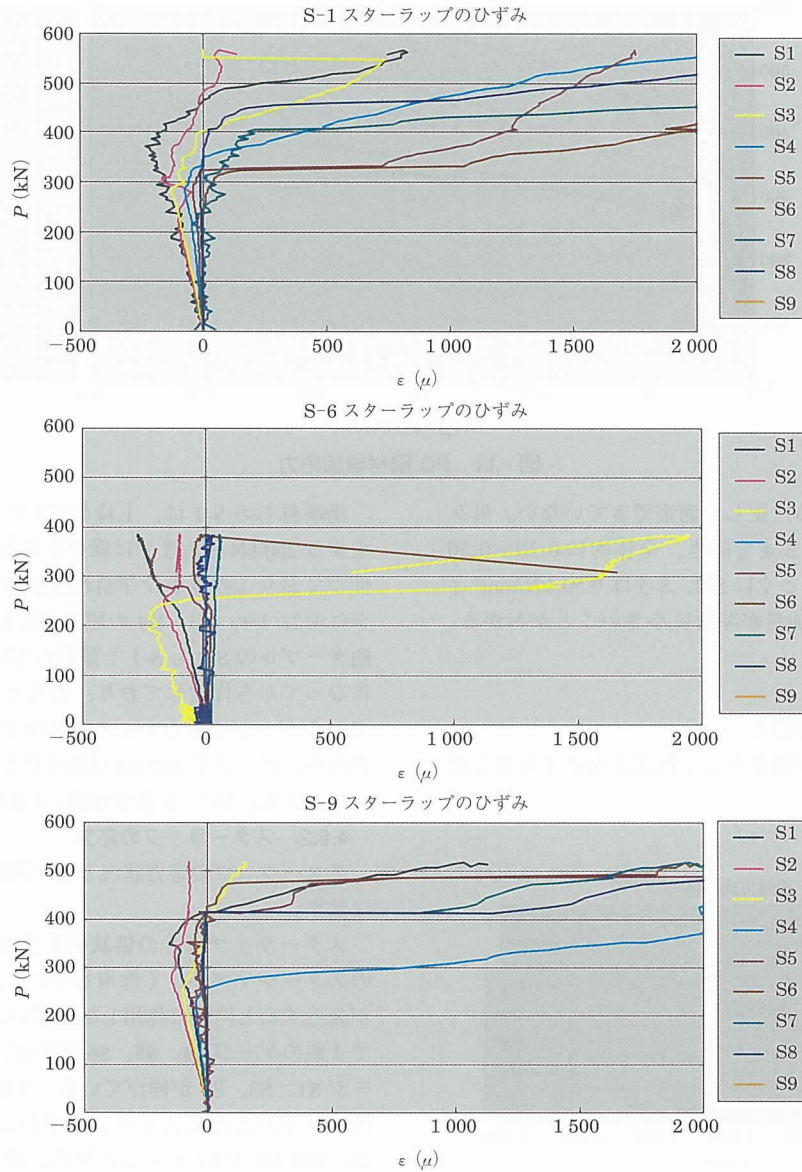


図 - 13 スターラップひずみ

コンクリート標準示方書（平成 8 年版）より， $\sigma_{ck} = 20 \text{ N/mm}^2$ の時， $f_{ck} = 0.23 f'_{ck}{}^{2/3} = 1.69 \text{ N/mm}^2$ であるから，ひび割れ発生までの応力度は $\sigma_t = 1.69 + 9.12 = 10.81 \text{ N/mm}^2$ となり，ひび割れモーメントは， $10.81 \text{ N/mm}^2 \times 0.02658 \text{ m}^3 = 287.3 \text{ kN}\cdot\text{m}$ ，ひび割れ荷重は， $287.3/1.15 = 250 \text{ kN}$ となる。

5.1.2 コンクリートのみのせん断耐力の計算

(1) コンクリート標準示方書のデコンプレッションを考慮したコンクリートのせん断耐力の計算

コンクリートのせん断耐力はコンクリート標準示方書より， $V_{cd} = \beta d \cdot \beta_p \cdot \beta_n [0.75 + 1.40/(a/d)] \cdot f_{ved} \cdot b_w \cdot d \dots (1)$ で表され，ここに， $f_{ved} = 0.20$ (f_{cd}) $1/3$ であり， $[0.75 + 1.40/(a/d)]$ はせん断スパンを考慮している。

$\beta d = 1.07$ ， $\beta_p = 0.92$ ， $\beta_n = 1.7$ ， $P_w = 0.0078$ ， $[0.75 + 1.40/(a/d)] = 1.46$ ， $b_w = 120$ ， $d = 765$ より， $V_{cd} = 157 \text{ kN}$ となり，実験値 333 kN に対してかなり安全を考慮した値となっている。

(2) コンクリートのせん断抵抗 S_c を（曲げひび割れ発生までのせん断力 + RC としてのせん断力）とした場合（文献 2）参照

コンクリートのみのせん断耐力式は，

$$S_r = V_c + M_c/a \dots (2)$$

ここに， $V_c = 0$ ， M_c ：ひび割れモーメント = $372.9 \text{ kN}\cdot\text{m}$

$$S_r = M_c/a = 372.9/1.5 = 249 \text{ kN}$$

RC としてのせん断耐力は，

$$V_{cd}' = \beta d \cdot \beta_p [0.75 + 1.40/(a/d)] \cdot f_{ved} \cdot b_w \cdot d = 92 \text{ kN}$$

$$V_{cd} = 92 + 249 = 341 \text{ kN}$$

と実験値に近似している。

(3) スターラップの計算

スターラップの計算はトラス理論による道路橋示方書の式を採用する。

$$A_s = 1.15 S_s \cdot a / \sigma_{sy} \cdot d \cdot (\sin \theta + \cos \theta) \dots (3)$$

$$\text{より } S_s = A_s \cdot \sigma_{sy} \cdot d \cdot (\sin \theta + \cos \theta) / 1.15 a$$

$$= 142.66 \times 360 \times 765 / 1.15 \times 125 = 274 \text{ kN}$$

(4) 合計せん断力

本考察では、コンクリートの抵抗せん断力として、(曲げひび割れ発生までのせん断力+RCとしてのせん断力)とした場合に、理論が明解で実験値にも近似しているため、コンクリートの抵抗せん断力の計算値として採用する。

全せん断力は $S = 341 + 274 = 615$ kN となる。

5.1.3 場所打ちにおける内外ケーブルの場合のコンクリートのみのせん断抵抗値 Sc

場所打ちにおける内・外ケーブルの場合のコンクリートのみのせん断抵抗値 Sc は、文献7)より、PC鋼材の張力増加比 $\delta = \Delta P_{ext}/\Delta P_{int}$ に影響する。すなわち、

$$Sc = V_{uo} = k(\rho L) 1/3 \cdot (fc) 1/2 \dots\dots (4)$$

において、 ρL は内外ケーブル鋼材比を表し、 fc :コンクリート強度、 k :定数

内ケーブルの場合: $\rho L = (As + Ap_{int})/(bo \cdot d)$

外ケーブルの場合: $\rho L = (As + \delta \cdot Ap_{ext})/(bo \cdot d)$

で表され、ここに、 As :合計鉄筋断面積、 Ap :内または外ケーブルの断面積、 bo :ウェブ幅、 d :有効高であり、本実験の場合、内外ケーブルの増加張力応力度の計算値は、それぞれ 500 N/mm²、 740 N/mm² であるから、

$$\delta = \Delta P_{ext}/\Delta P_{int} = 500/740 = 0.68$$

で表される。すなわち、内・外ケーブルの Sc の比率の計算値は、

$$\text{外ケーブル/内ケーブル} = \rho (0.0088)^{1/3} / \rho (0.0117)^{1/3} = 0.90 \text{ となり、外ケーブルの } Sc \text{ は内ケーブルの } 90\% \text{ となる。}$$

5.1.4 継目部を考慮したせん断キーによるせん断耐力計算

セグメント供試体におけるせん断キーによるせん断耐力計算については、「外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準(案):平成8年3月,(財)プレストレストコンクリート技術協会」によりせん断(伝達)耐力評価を行う。

同規準(案)によると、せん断キーのある場合は、軸力による摩擦力に加え、せん断キーの耐力も考慮する必要がある。同規準(案)では、(5)式で表されている。

$$V = (\tau_c \cdot Ac + Vk) / \gamma b \dots\dots (5)$$

ここで、

$$\tau_c = -\mu \cdot f_{cd}^{1/2} \cdot (\sigma_{nd})^{1/2}$$

σ_{nd} :せん断面に垂直に作用する平均応力度

圧縮の場合 $\sigma_{nd} = -\sigma_{nd}'/2$

σ_{nd}' :平均圧縮応力度

f_{cd} :設計圧縮強度

μ :摩擦係数 = 0.45

$Vk = 0.1 \cdot Ak \cdot f_{cd}$:せん断キーによるせん断力

Ak :せん断キーの断面積

Ac :せん断面の断面積

一方、摩擦による簡単な式として、せん断キーの無い場合は、軸力による摩擦力のみによってせん断耐力が評価され、(6)式で表される。

$$V = \mu \cdot Np \dots\dots (6)$$

μ :摩擦係数

Np :プレストレスによる軸方向力

したがって、せん断キーのある場合は(7)式で表される。

$$V = \mu \cdot Np + 0.1 \cdot Ak \cdot f_{cd} \dots\dots (7)$$

上記の3つの式を用いて、セグメント供試体のせん断キーを考慮したせん断耐力の算出を行う。

1) (5)式による摩擦力およびせん断キーの耐力計算(載荷重 $P = 300$ kN の場合)

$P = 300$ kN の場合の平均圧縮応力度 σ_{nd}' は、 8.62 N/mm² であり、

$\sigma_{nd} = -\sigma_{nd}'/2 = 4.31$ N/mm² で、 $f_{cd} = 40$ N/mm² であるから、

$$\tau_c = 0.45 \times (40)^{1/2} \times (4.31)^{1/2} = 5.92 \text{ N/mm}^2$$

$Ac = 85800$ mm²、 $Ak = 28800$ mm² であるから

$$V = (\tau_c \cdot Ac + Vk) = (5.92 \times 85800 + 0.1 \times 28800 \times 40) = 623 \text{ kN となり、大きな値となる。}$$

2) (6)式によるせん断キーのない場合のせん断耐力の計算

$V = \mu \cdot Np$ より、

$\mu = 0.45$ 、 $Pe = 600$ kN を代入すると、

$$V = 0.45 \times 600 = 270 \text{ kN となる。}$$

実験による S-4 供試体のせん断耐力は、 260 kN であり、実験値に近い値となっている。

3) (7)式によるせん断キーのある場合のせん断耐力の計算

$V = \mu \cdot Np + 0.1 \cdot Ak \cdot f_{cd}$ において

$\mu = 0.45$ 、 $Np = 600$ kN、 $Ak = 28800$ mm²、 $f_{cd} = 40$ N/mm² であるから、

$$V = 0.45 \times 600 + 0.1 \times 28800 \times 40 = 270 + 115 = 385 \text{ kN となる。}$$

この計算結果は供試体 S-6 の値によく一致しているが、他のセグメント供試体は、これより小さくなっている。これは摩擦係数の選定が重要となると考えられる。

5.2 実験値と理論値の比較

5.2.1 せん断力分担量

コンクリートとスターラップの分担および供試体 S-1 に対する比率を表-6に示す。

① 表-6より、セグメントの外ケーブル(せん断キーあり)の場合のせん断耐力は、S-1の55~67%と小さくなっている。

② せん断キーなしの場合は、せん断耐力が非常に低下するため、せん断キーは不可欠である。

③ セグメントの内・外ケーブルのせん断耐力の比率(S-6)/(S-9)は、 $380/518 = 0.73$ となり、すなわち、外ケーブルの方が30%低下している。終局曲げモーメントについての内・外ケーブルの比率は、文献1)より、20%となっている。通常、曲げとせん断に対して同様な安全率で設計されていることを考慮すると、せん断破壊が先行することも考えられる。したがって、せん断破壊が曲げ破壊より先行させないためには、内外併用ケーブル構造を採用することが重要であると考えられる。

5.2.2 各供試体の比較

(1) S-1 供試体

① 曲げひび割れ荷重は 250 kN で計算値 249 kN、斜めひび割れ荷重は 333 kN で計算値 341 kN とほぼ一致している。せん断耐力は、 565 kN で計算値 615 kN

表-6 セン断力分担表

	供試体	製作方法	ケーブルの種類	せん断キーの有無	せん断力分担 (kN)		耐荷力 (kN)
					Sc	Ss	Su
①	S-1	場所打ち	内ケーブル	—	333 (1.00)	232 (1.00)	565 (1.00)
②	S-9	セグメント	内ケーブル	キー 2 個	274 (0.82)	244 (1.05)	518 (0.92)
③	S-2	場所打ち	外ケーブル	—	295 (0.89)	205 (0.88)	500 (0.88)
④	S-6	セグメント	外ケーブル	キー 2 個	260 (0.78)	120 (0.52)	380 (0.67)
⑤	S-7	セグメント	外ケーブル	キー 3 個	250 (0.75)	90 (0.39)	340 (0.60)
⑥	S-3	セグメント	内ケーブル	キーなし	245 (0.74)	95 (0.41)	340 (0.60)
⑦	S-8	セグメント	外ケーブル	キー 2 個 補強あり	244 (0.73)	64 (0.28)	308 (0.55)
⑧	S-4	セグメント	外ケーブル	キーなし	245 (0.74)	15 (0.06)	260 (0.46)
⑨	S-5	セグメント	外ケーブル	キー 3 個 補強あり	186 (0.56)	122 (0.53)	(308) (0.55)

*Ssは耐荷力 Su-Sc により算出した *() 内は S-1 に対する比率

の 92 % と少し小さくなった。

- ② 斜めひび割れ範囲内のスターラップの抵抗は $S_s = S_u - S_c$ で表され、すなわち $565 - 333 = 232$ kN となる。ひび割れ内のスターラップ本数は、ひび割れ区より判断すると $750 \text{ mm} / 125 \text{ mm} = 6$ 本となり、 $S_s = A_s \cdot \sigma_{sy} \cdot d \cdot (\sin \theta + \cos \theta) / 1.15a$ の式より $71.33 \times 2 \times 6 \times 360 / 1.15 = 267\,900 \text{ N} = 268 \text{ kN} > 232 \text{ kN}$ であり、6 本全部が有効には作用していないことがわかる。

(2) S-2 供試体

- ① 曲げひび割れ荷重は 260 kN で計算値 249 kN とほぼ等しいが、斜めひび割れ荷重は 295 kN で、計算値 341 kN の 87 % と小さくなっており、外ケーブルの場合は、内ケーブルの場合の 90 % となっている。これは文献 7) より、PC 鋼材の張力増加量に影響する式 (4) にほぼ一致している。
- ② 実験値のせん断耐力 (場所打ち) に関しても外ケーブルの場合は内ケーブルの場合の約 90 % となっている。

(3) S-9 供試体

- ① 曲げひび割れは支点上に 245 kN で発生し、計算値とほぼ一致している。斜めひび割れ荷重 274 kN は、セグメントのため場所打ちの内ケーブルの 82 % となっている。
- ② 終局荷重は 518 kN であり、場所打ちの外ケーブル S-2 供試体より 3.6 % 大きくなっている。これは PC ケーブルの付着があるため、通常の場合打ちのせん断破壊に類似している。
- ③ 実験のスターラップの抵抗は $S_s = S_u - S_c = 518 - 274 = 244$ kN となり、セグメントの内ケーブルのため斜めひび割れ長が長く、スターラップの抵抗が大きくなっていると推定される。

(4) S-3 供試体

- ① 曲げひび割れは 245 kN と計算値とほぼ同じであるが、斜めひび割れもせん断キーがないため曲げひび割れと同時に 245 kN で生じた。
- ② せん断キーがなく目地が開くため、スターラップが有効に抵抗していないと考えられる。
- ③ 破壊は曲げ最大付近ではなく、載荷点付近で PC 鋼材に沿った割裂的なせん断破壊をした。これは特殊な破壊形態であると思われる。

(5) S-4 供試体

- ① 曲げひび割れ荷重は 245 kN と計算値とほぼ同じであるが、せん断キーがないため斜めひび割れ直後の 260 kN でせん断破壊が生じた。これは、せん断キーのない場合のせん断耐力計算値 270 kN とほぼ一致している。
- ② 目地部がすぐに開く結果となりスターラップは抵抗しないと考えられる。

(6) S-6 供試体

- ① 曲げひび割れは目地部に 250 kN で発生、計算値とほぼ等しい。
- ② 斜めひび割れは 260 kN でせん断キー部に生じた。セグメントの外ケーブルの場合、斜めひび割れは曲げひび割れとほとんど同時に生じるため、コンクリートのせん断抵抗が小さい。
- ③ せん断耐力は 380 kN で S-1 の 67 % と小さくなった。これはひび割れ長さが小となり、ひび割れ区間にある抵抗するスターラップの数は 3 本と場所打ちの場合の半分と推定される。
- ④ せん断耐力の 380 kN は (7) 式とよく一致しているが、摩擦係数の選定が重要である。

(7) S-7 供試体

- ① 曲げひび割れ荷重は 250 kN と計算値とほぼ同じであ

り、斜めひび割れも 250 kN で早く生じた。

- ② せん断キーが 3 個であるが下縁部のキーの補強が不十分なため、下縁付近に水平に近い斜めひび割れが発生し、剥離して破壊した。
 - ③ ひび割れ区間にあるスターラップの本数は 3 本であるが、剥離が先行し、S-6 より早く破壊した。
- (8) S-8 供試体
- ① 曲げひび割れ荷重は 244 kN と計算値とほぼ同じであるが、斜めひび割れも 244 kN で早く生じた。
 - ② せん断キーを補強したがこの供試体も下縁のキーを十分補強していなかったため、せん断耐力は小さかった。
- (9) S-5 供試体
- ① 載荷位置を長くし ($a = 2.0$ m)、曲げの影響を大きくしたが、破壊形態はせん断破壊であった。
 - ② 曲げひび割れ荷重は 176 kN と計算値とほぼ同じであり、斜めひび割れ荷重は 186 kN で曲げひび割れとほとんど同時に生じた。
 - ③ 下縁のキーを補強したため、下縁部にはひび割れが生じていない。
 - ④ 曲げひび割れは、載荷長を長くしたため、186 kN と早く生じたが、破壊についてはせん断破壊であるため、308 kN と S-8 に近い値で終局に至った。

6. 考 察

6.1 各項目の特徴

実験結果を各項目について考察すると以下のとおりである

- (1) コンクリートのせん断抵抗 Sc
- ① 斜めひび割れ発生荷重は、コンクリートの抵抗 Sc であると考えられる。
 - ② 外ケーブル使用のセグメントの場合は、曲げひび割れは目地部に生じ、そのまません断キー付近で斜めひび割れに進展する。すなわち、曲げひび割れ＝斜めひび割れとなり、 Sc が小さくなる。
 - ③ 場所打ちの内外ケーブルの Sc の比較では、外ケーブルの場合の Sc は内ケーブルの 90 % となっている。これは、文献 6) より Sc は PC 鋼材の張力増加比に影響していると考えられる。
- (2) デコンプレッションを考慮した式
- ① コンクリート標準示方書 (平成 8 年版) のデコンプレッションを考慮した式は、上縁応力 $\sigma = 0$ が生じるまでを Sc に対する増加係数として表わしており、かなり安全を考慮した式であると考えられる。
 - ② 支点付近におけるコンクリートの抵抗 Sc の計算法については、(曲げひび割れ発生までのせん断力 + RC としてのせん断力) とした場合の計算値が、実験値とよく一致する。
- (3) 外ケーブルの影響
- ① 本実験では、外ケーブル長は $L = 4.0$ m と短いと張力増加量は大きくなると思われるが、曲げ終局時の張力増加量は $\Delta\sigma p = 0.3 \sim 0.5$ kN/mm² と比較的少

ない。これは、集中荷重を載荷した場合、三角形のモーメント分布となるためである。

- ② 場所打ちで外ケーブルの場合のせん断耐力は内ケーブルより 10 % 下がった。これは、PC 鋼材の張力増加量に影響する文献 6) の式とよく一致する。
 - ③ セグメントの内外ケーブルのせん断耐力の比率は、外ケーブルの方が 30 % 低下している。曲げモーメントにおいては、外ケーブルの低下率は 20 % であり、せん断破壊が先行すると考えられる。したがって、せん断破壊を先行させないためにも、内外併用ケーブル構造を採用する必要がある。
- (4) 内ケーブルの影響
- ① セグメントの場合でも内ケーブルの場合はせん断耐力が大きい。これは、PC 鋼材に付着があり、曲げひびわれ幅が小さく、目地が大きく開かないためと考えられる。
 - ② 目地が開かないと、目地の両側に斜めひび割れが貫通して長く生じるため、スターラップの負担が大きくなると考えられる。
- (5) プレキャストセグメント
- ① 外ケーブルのセグメントの場合、曲げひび割れと同時にせん断キー位置に斜めひび割れが生じる。このため、場所打ちの内ケーブルに比べ、セグメントの外ケーブルの斜めひび割れ荷重は 73 % ~ 78 % 程度と小さくなる。
 - ② 外ケーブルのセグメントの場合、せん断耐力は場所打ちの内ケーブルの場合の 55 ~ 67 % と小さくなる。
 - ③ 外ケーブルのセグメントの場合、斜めひび割れが 1 ~ 2 箇所 (キー位置) に集中して開き安くなる。
- (6) スターラップの影響
- ① 外ケーブルのセグメントの場合、斜めひび割れは、目地から支点側のみに入り、載荷側セグメントには入らない。これは目地が載荷とともに開くため、これにより外側セグメントのスターラップは抵抗しなくなる。このため、スターラップが有効に作用せず、場所打ちの場合の 1/2 以下となる。
 - ② ひび割れ区間のスターラップが抵抗すると仮定した場合、スターラップのせん断抵抗値は実験値とよく一致する。
- (7) 目地部下縁の摩擦の影響
- ① 下縁部のせん断キーを補強すると終局時に十分な摩擦抵抗がある。
 - ② 下縁の軸力による摩擦によるせん断抵抗は、(7) 式によるものすなわち、プレストレスの軸力による摩擦力およびキーのせん断耐力を加えた場合がよく一致している。
- (8) せん断キーの影響
- ① セグメントの場合、せん断キーの設置は不可欠であり、外ケーブルのせん断キーなしの場合、コンクリートの曲げひび割れ抵抗時のせん断耐力がそのまません断耐力となる。
 - ② 支点付近の目地部には、断面下縁にせん断キーが必

要であり、補強が必要である。下縁のせん断キートを補強した場合、下縁部にはひび割れが生じにくく、せん断耐力が増加する。同時に、下縁部のスターラップで補強することも重要である。

- ③ 今回供試体 S-8 のせん断キートの補強した桁では、下部にせん断キートがなかったため、せん断耐力は上がらなかった。

6.2 提案事項

本実験結果をもとにセグメント工法に対する提案を以下に示す。

- ① 連続桁の外ケーブルを使用したプレキャストセグメントの設計で、通常、せん断力については場所打ちと同様の設計を行っている。本実験では、全外ケーブルを使用したプレキャストセグメント（せん断キート使用）の場合、せん断耐力が場所打ち内ケーブルの 55～67% と小さくなることがわかった。また、内ケーブルのセグメント工法に対しても 30% 低下しており、曲げよりもせん断破壊が先行することが考えられる。したがって、外ケーブル構造の押し出し工法や、外ケーブル構造のカンチレバー工法では、中間支点上で外ケーブルを使用する場合があるが、せん断破壊を先行させないためにも、内外併用ケーブル構造とする必要がある。
- ② 通常、地震時、ラーメン構造においては主桁支点付近に大きなせん断力が作用する。したがって、全外ケーブルのプレキャスト工法では、支点付近でせん断破壊するおそれがある。したがって、中間支点付近では内外ケーブルの併用が望ましい。
- ③ 全外ケーブルを使用する場合には、場所打ち方式（工法）が望ましい。この場合のせん断耐力は内ケーブルの 90% 程度に減少するが、最大耐力に至るまでの変位量が大きく、粘りのある挙動をする。
- ④ セグメント工法でのせん断力に対しては、せん断キートは不可欠であり、多段式とする必要がある。せん断キートは補強が重要であり、また下縁側の補強がもっとも重要である。
- ⑤ 目地位置は中間支点より部材高 d 以上離す必要がある。目地位置が近いと、斜めひび割れは支点に向かって生じるため、抵抗すべきスターラップが少なくなりせん断抵抗が小さくなる。スパンバイスパンやカンチレバーによるセグメント工法等では、支点付近に短いセグメントを設置する場合があるが、目地位置は d 以上離す必要がある。 d 以上離すと斜めひび割れが長くなり、スターラップが有効に抵抗する。
- ⑥ 場所打ちの場合、支点付近におけるコンクリートの抵抗 S_c 値は、（曲げひび割れ発生までのせん断力 + RC としてのせん断力）とした場合の計算値が、実験値によく一致する。
- ⑦ 場所打ちの場合、外ケーブルと内ケーブルとの S_c の

比較は、Four'e Bernard による文献 6) の式が実験値とよく一致する。この場合外ケーブルと内ケーブルの S_c の比率は 0.90 である。

7. おわりに

本研究は、外ケーブルを用いたプレキャストセグメント桁の連続桁支点付近におけるせん断耐力を明らかにするため載荷試験を行い、この工法の特徴および提案について報告したが、本研究を行うにあたり、fib 名誉会長 M. Virlogeux 博士および(株)エスイー森元峯夫博士には貴重な御助言を賜り、深く感謝の意を表します。

また、供試体製作、実験にあたって、協力を頂きました九州大学大学院工学部山崎智彦氏、同大学院工学部修土課程高原達男氏、藤井義法氏、工学部 4 年石塚卓也氏他、(株)富士ピー・エスの奥畑賢治氏、下山強美氏、および(株)エスイーの平山晃氏には深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 森元峯夫：PC 橋の形式と構造特性・耐久性の向上について、土木構造・材料論文集第 16 号、2000 年 12 月
- 2) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：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、プレストレストコンクリート技術協会第 4 回シンポジウム論文集、1994 年 10 月
- 3) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：プレキャストセグメントはりの曲げせん断特性に関する実験的研究、プレストレストコンクリート、Vol. 39, No. 1, Jan. 1997
- 4) 西川和廣・廣松新・鈴木素彦・伊藤忠彦：外ケーブルを適用した PC 桁の曲げ・せん断挙動に関する研究、プレストレストコンクリート、Vol. 42, No. 5, Sep. 2000
- 5) 新津正義・睦好宏史・佐野正・殿川康：外ケーブルを用いた RC 梁のせん断補強効果に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 21, No. 3, 1999
- 6) 池田哲夫監修：プレキャストブロック工法、日刊工業新聞社、昭和 44 年 9 月
- 7) Four'e Bernard : Shear strength of externally prestressed beams, Workshop-Seminaire, Behaviour of external prestressing in structures, June 1993
- 8) 幸左賢二・藤井学・小林和夫・栗根聡：内外併用ケーブル構造 PC 橋の終局挙動に関する研究、土木学会論文集、No. 571/Vo-36, pp. 79-89, 1997. 8
- 9) 栗根聡・幸左賢二・若狭忠雄・谷口和良：内外併用ケーブル構造 PC 梁の耐荷力解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 18, No. 2, 1996
- 10) プレストレストコンクリート技術協会：外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法設計施工規準（案）、1996. 3
- 11) 阪神高速道路公団、外ケーブル構造の終局挙動に関する検討、平成 8 年 1 月
- 12) 財団法人プレストレスト・コンクリート建設業協会、米国における PC プレキャストセグメント橋の現況、平成 5 年 3 月
- 13) 日本道路協会、道路橋示方書「コンクリート橋編」、1996. 3
- 14) 土木学会、コンクリート標準示方書・設計編、平成 8 年制定
- 15) 日本道路協会、コンクリート道路橋設計便覧、平成 6 年 2 月

【2003 年 2 月 6 日受付】