

(96) 外ケーブルを適用したPCげたのせん断挙動に関する実験

建設省 土木研究所 西川 和廣
 同上 正会員 廣松 新
 (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会 正会員 ○伊藤 公彦

1. はじめに

外ケーブル工法は、PC鋼材を部材の外に配置するため、部材を薄くできることによる上部工の軽量化やプレキャストセグメント工法との併用により、施工の省力化に有効な工法である。また、PC鋼材が外に出ているため維持管理が容易であり、設計段階での配慮でケーブルの交換も可能である。外ケーブル工法は、今後予想される維持管理費の増大に対しても有効な手段となり得ると考えられ、実績も増えてきている。

しかし、内ケーブル構造と違い平面保持の仮定が成立しないため、終局時の挙動については、不明な点が多い。そこで、建設省土木研究所と(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会は平成10年度から3年間の予定で外ケーブル工法設計施工指針(案)を作成することを目標とし、外ケーブルを適用したPC橋の合理化に関する共同研究に着手した。平成10年度は終局時の曲げ耐荷力を確認するために、モデル供試体により載荷試験を実施し、外ケーブル比率・偏向部間隔・引張鉄筋量・プレキャストセグメントが曲げ耐荷力に与える影響を確認した。¹⁾平成11年度には、外ケーブル方式PCげたのせん断破壊に至るまでの挙動とせん断耐力を確認することを目的とし、モデル供試体を製作し載荷試験を行った。本論文は、平成11年度に行った実験の結果の概要について述べるものである。

2. 実験概要

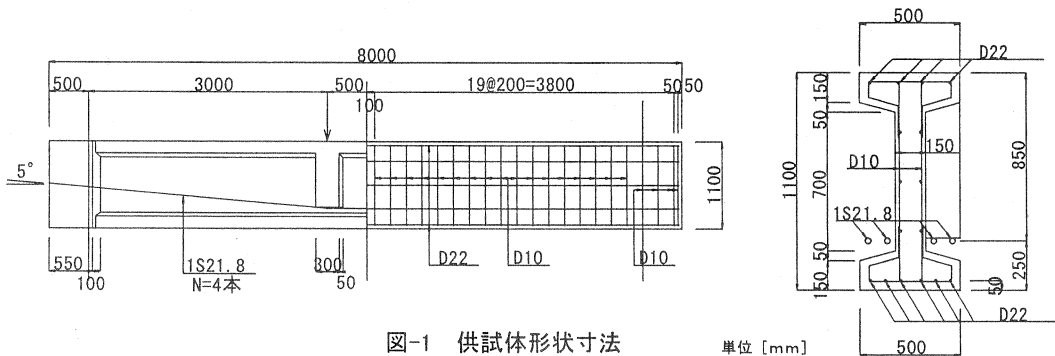


図-1 供試体形状寸法

単位 [mm]

供試体は、実験因子として

- ①ケーブル配置 (内ケーブルor外ケーブル)
- ②ケーブル角度
- ③スターラップの有無
- ④プレストレスの有無
- ⑤プレキャストセグメント

を考慮し、合計9体を製作した。

なお、今回の実験においては外ケーブル供試体と同条件の内ケーブル供試体を製作

し、各実験因子において内ケーブル構造との違いを確認することとした。供試体の形状および鋼材量は、内

表-1 供試体一覧

供試体	ケーブル配置		製作方法		ケーブル角度		スターラップ		プレストレス		備考
	内	外	一体	セグメント	0°	5°	基準	無	PC	RC	
S1	○	○				○	○		○		基準供試体
S2	○	○				○	○		○		基準供試体、内
S3		○	○		○		○		○		ケーブル角度0°
S4	○		○		○		○		○		ケーブル角度0° 内
S5		○	○			○		○	○		スターラップ無
S6	○		○			○		○	○		スターラップ無、内
S7	○		○		○		○			○	プレストレス無
S8		○		○		○	○		○		セグメント
S9	○			○		○	○		○		セグメント、内

ケーブル供試体の基準供試体であるS2供試体において、計算上曲げ終局耐力がせん断耐力を大きく上回るように設定した。図-1に供試体の形状寸法と配筋状態を、表-1に供試体一覧を示す。供試体は、断面をけた高1.1m、ウェブ厚15cm、上フランジ幅50cm・厚さ15cm、下フランジ幅50cm・厚さ15cmのI型形状とし、けた長を8.0mとした。各供試体ともケーブルはPC鋼より線1S21.8(SWPR7AL)を4本配置し、S7を除く各供試体のPC鋼材には初期緊張応力度として $\sigma_p=850\text{N/mm}^2$ を与えた。引張鉄筋は、下フランジにD22を6本配置した。ここで、セグメント供試体については継ぎ目部で鉄筋は連続しておらず、継ぎ目部にはコンクリート多段キーを採用し、接着剤にて一体化した。また、せん断支間部の継ぎ目の影響を確認するため、中央のセグメント長を3.2mとし、支間中央付近に継ぎ目を設けないこととした。写真-1にセグメントのせん断キーを示す。S5、S6を除く各供試体には、スターラップとしてD10を200mm間隔で配置した。

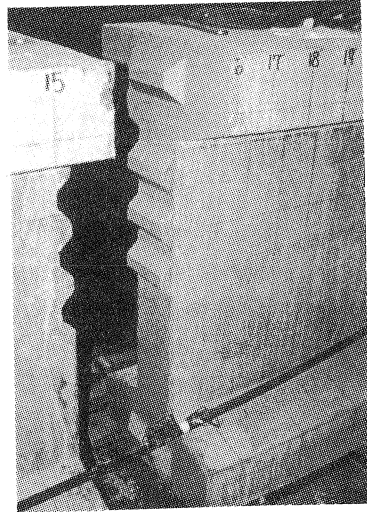


写真-1 せん断キー配置状況 (S8)

コンクリートの目標強度は 40N/mm^2 とし、鉄筋はSD345を使用した。表-2,3に材料試験結果を示す。

図-2に載荷試験図を示す。実験は、供試体を支間長7.0mで単純支持し、荷重を支間中央から左右0.5mの位置で静的に載荷する2点単調載荷方式として、供試体が曲げ破壊またはせん断破壊を起こし最大耐力が確認されるまで行った。写真-2に供試体の設置状況を示す。

表-2 硬化コンクリートの力学的性質

供試体	圧縮強度 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (KN/mm^2)	クラウト強度 (N/mm^2)
S1, S2	46.7	4.091	31.09	55.3
S3, S4	44.0	3.799	28.65	42.0
S5, S6	57.5	4.186	30.09	38.9
S7	53.4	4.097	28.77	42.6
S8, S9①	46.1	3.434	28.73	36.0
S8, S9②	41.6	3.585	28.09	—

表-3 使用鋼材の材料特性

鋼材		降伏点 (N/mm^2)	引張強度 (N/mm^2)	弾性係数 (KN/mm^2)
鉄筋	D10	382	542	188.1
	SD345	360	560	188.1
PC鋼材		1S21.8	1692	1801

※クラウト強度は内ケーブル供試体の値

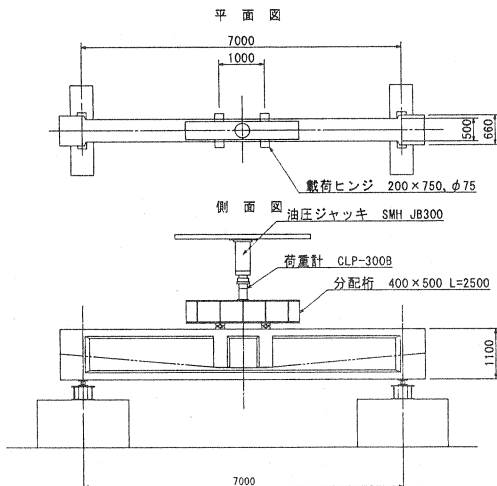


図-2 載荷試験図

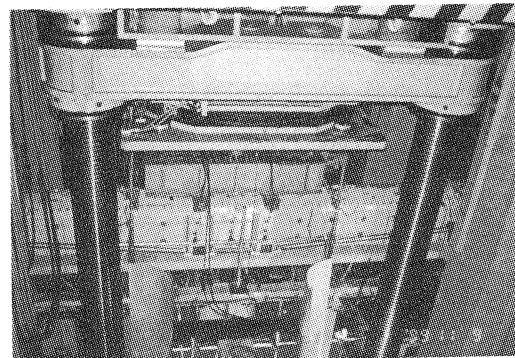


写真-2 供試体設置状況

3. 実験結果と考察

3.1 荷重-変位の関係と破壊性状

表-4に各段階での荷重と支間中央変位の値および最終的な破壊形態を示す。図-3, 4には荷重と支間中央変位の関係を、図-5には荷重と外ケーブルひずみの関係を示す。

(1) ケーブル配置の影響

一体型でスターラップの入っているS1とS2およびS3とS4

を比較すると、引張鉄筋降伏付近まではケーブル配置の違いによる顕著な差は現れなかった。しかし、引張鉄筋降伏後は外ケーブル供試体のせん断ひび割れの進展が鈍くなり、同荷重における変位が内ケーブル供試体に比べ大きくなった。最終的には、外ケーブル供試体であるS1とS3は支間中央上縁のコンクリートが圧壊し曲げ破壊した。写真-3にS1の実験終了時の破壊状況を示す。それに対して、内ケーブル供試体であるS2とS4は、引張鉄筋降伏後もせん断ひび割れが進展を続け、載荷点外側のコンクリート上縁が圧壊した。その後も荷重は降下せず最終的にはウェブのコンクリートが剥落し始め徐々に荷重が降下した。最大荷重については内ケーブル供試体の方がS2で4%、S4で14%大きくなった。ここで、外ケーブル供試体のS1とS3が曲げ破壊したのは、図-5に示すとおり引張鉄筋降伏後、供試体の変形に伴い外ケーブルの張力増加が大きくなり、支点部に近い部分のウェブの主応力が改善され、せん断ひび割れの進展を抑制したためと考えられる。

スターラップの入っていないS5とS6については、荷重-変位の関係において破壊に至るまでケーブル配置の違いによる顕著な差は現れなかった。最大荷重についてもほぼ同等の値となった。これは、スターラップが入っていないため、外ケーブルの張力増加が少ない段階で両供試体とも支承から載荷点に向かう致命的なせん断ひび割れが発生すると同時に荷重が降下し、そのまま破壊に至ったためと考えられる。

セグメント供試体であるS8とS9については、継ぎ目部に曲げひび割れが到達した後、外ケーブル供試体の方が同荷重における変位が大きくなり、荷重-変位曲線の傾きが緩くなった。最大荷重は内ケーブル供試体の方が12%大きくなった。

(2) ケーブル角度の影響

外ケーブル供試体であるS1とS3および内ケーブル供試体であるS2とS4を比較すると、荷重-変位の関係において顕著な差は現れなかった。また、破壊形態についてもケーブル角度による影響は、顕著には現れなかった。最大荷重については、外ケーブル供試体はS1の方がS3に比べ12%大きくなった。内ケーブル供試体はS2の方がS4に比べ2%大きくなった。

表-4 各段階での荷重と支間中央変位

	曲げひび割れ発生時		せん断ひび割れ発生時		引張鉄筋降伏時		コンクリート上縁ひずみ3500μ時		最大荷重時		破壊形態
	たわみ [mm]	荷重 [KN]	たわみ [mm]	荷重 [KN]	たわみ [mm]	荷重 [KN]	たわみ [mm]	荷重 [KN]	たわみ [mm]	荷重 [KN]	
S1	3.0	591	6.1	850	16.1	1262	57.3	1643	71.5	1781	曲げ破壊
S2	2.8	551	6.4	849	17.4	1350	50.3	1831	55.4	1850	せん断破壊
S3	3.1	578	5.8	806	14.6	1163	51.7	1594	51.7	1594	曲げ破壊
S4	3.1	602	6.0	849	18.4	1351	-	-	51.6	1812	せん断破壊
S5	3.1	626	7.8	950	17.6	1250	-	-	25.7	1343	せん断破壊
S6	3.2	649	5.5	850	25.4	1329	-	-	25.4	1329	せん断破壊
S7	1.1	225	3.7	349	15.8	849	-	-	63.0	1411	せん断破壊
S8	3.4	656	7.8	778	-	-	43.4	1113	87.2	1292	せん断破壊
S9	3.7	673	7.0	798	-	-	55.9	1418	107.4	1444	せん断破壊

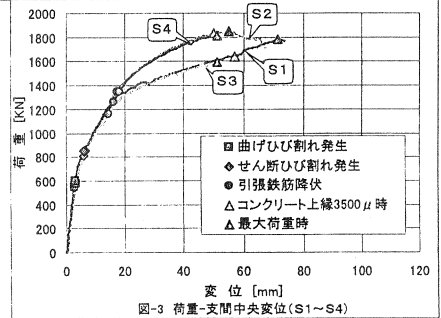


図-3 荷重-支間中央変位 (S1~S4)

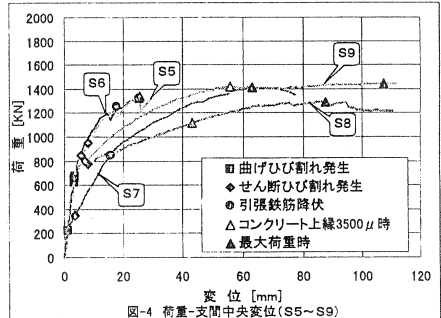


図-4 荷重-支間中央変位 (S5~S9)

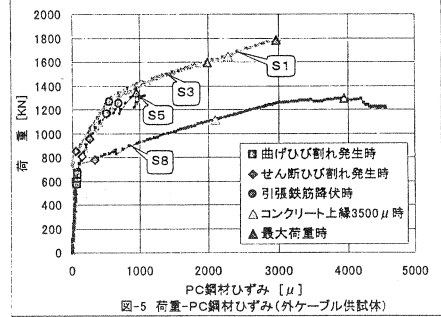


図-5 荷重-PC鋼材ひずみ (外ケーブル供試体)

(3) スターラップの有無の影響

基準供試体であるS1とスターラップの入っていないS5を比較すると、曲げひび割れ発生荷重およびせん断ひび割れ発生荷重はS5の方が大きくなったが、これは、コンクリート強度が高かった為と推測され、荷重-変位の履歴は、1200KN付近までは大きな差は現れなかった。しかし、S5に支承から載荷点に向かう大きなせん断ひび割れが発生し荷重が降下した後は、荷重-変位曲線の傾きが緩くなった。最終的にS5はひび割れの進展とともに何度か荷重の降下が見られた後、斜引張破壊し一気に荷重が降下した。最大荷重は、S1の方がスターラップの入っていないS5に比べ33%大きくなった。破壊形態は、スターラップの入っているS1は曲げ破壊となり、スターラップの入っていないS5はせん断破壊となった。写真-4にS5の実験終了時の破壊状況を示す。

(4) プレストレスの影響

プレストレスの入っていないS7とプレストレス量以外同条件のS4を比較すると、S7に曲げひび割れが入った後、S4に比べ同荷重における変位が大きくなった。最大荷重は、S4に比べ22%小さくなったが、最大荷重における変位はS7供試体の方が大きくなった。S7の破壊性状は、その他の供試体に比べ小さい荷重で曲げひび割れおよびせん断ひび割れが発生し、ウェブのひび割れは45度に近い角度で載荷点の外側に広がっていった。最終的には上フランジが圧壊すると同時にゆっくり斜引張破壊した。最終的な破壊形態では、S4と大きな違いは見られなかった。

(5) プレキャストセグメントの影響

プレキャストセグメントであるS8およびS9と一体型であるS1およびS2と比較すると曲げひび割れ発生時点までは、一体型とセグメント型で顕著な差は現れなかった。しかし、曲げひび割れがセグメント継ぎ目部に達した付近からセグメント型の変位が急激に大きくなり履歴も大きく異なった。最大荷重はセグメント型の方がS8で27%、S9で22%小さくなった。ただし、最大荷重時における変位はS8で22%、S9で94%大きくなった。この原因として考えられるのは、セグメント型は連続している鋼材がPC鋼材ではなくひび割れが継ぎ目に達した時点から有効高が低くなり一体型とは異なる挙動を示したものと考えられる。セグメント型の破壊性状は、曲げひび割れが支間中央に発生した後、載荷点に近い継ぎ目部から載荷点に向かうせん断ひび割れが発生し、S8はそのひび割れのみが荷重の増加とともにひび割れ幅が大きくなり、ひび割れを通過するスターラップが破断した後、脆性的に破壊した。S9はS8と同様のせん断ひび割れが発生したが、せん断ひび割れは外側に広がりながら進展を続け、最終的にはS8と同様の位置で脆性的に破壊した。写真-5にS8の実験終了時の破壊状況を示す。

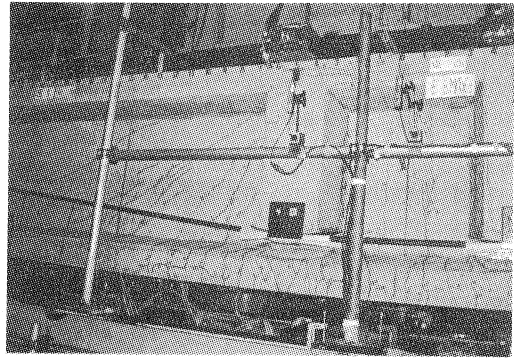


写真-3 供試体破壊状況 (S1)

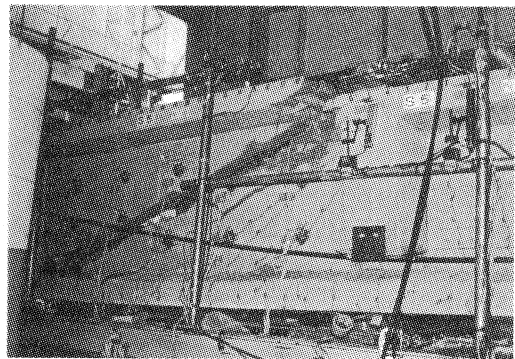


写真-4 供試体破壊状況 (S5)

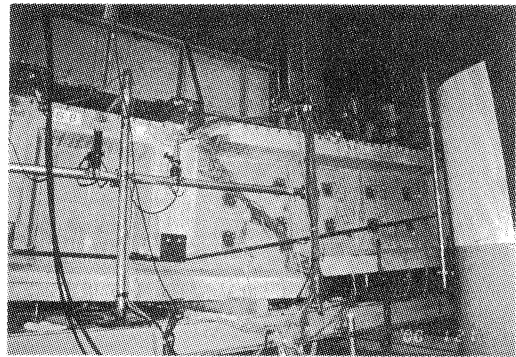


写真-5 供試体破壊状況 (S8)

3.2 ひび割れ性状

図-6に各供試体の実験終了時におけるひび割れ状況を示す。

スターラップのない供試体を除いては、内ケーブル供試体の方がひび割れ本数も多く、ウェブ全体にせん断ひび割れが広く分布した。また、内ケーブル供試体については、内ケーブルに沿った短いひび割れが発生し、試験終了時にはP C鋼材の外側のコンクリートが剥落したのが確認された。

つぎにケーブル角度による影響を比較すると、支承部から載荷点に向かうひび割れがS 1に比べS 3の方が若干大きくなっているが、大きな差はみられなかった。

スターラップの有無についてS 1とS 5を比較すると、ひび割れの角度はほぼ同じであるが、支承部から載荷点に向かうひび割れ幅がS 5の方が大きくなり、最終的にS 5はそのひび割れ部分で脆性的に斜引張破壊した。

プレストレスの入っていないS 7のウェブのひび割れ角度は45度に近くS 4に比べ緩い角度となった。

セグメントによる影響は、外ケーブル供試体であるS 8は、S 1に比べひび割れ本数は極端に少なく、継ぎ目部付近に発生したひび割れのみが進展し破壊に至った。内ケーブル供試体であるS 9は、S 2に比べひび割れ本数が少なく、せん断ひび割れとウェブ内のP C鋼材に沿ったひび割れが外側に進展していくと同時に、継ぎ目部付近に発生したひび割れ幅が徐々に大きくなり破壊に至った。

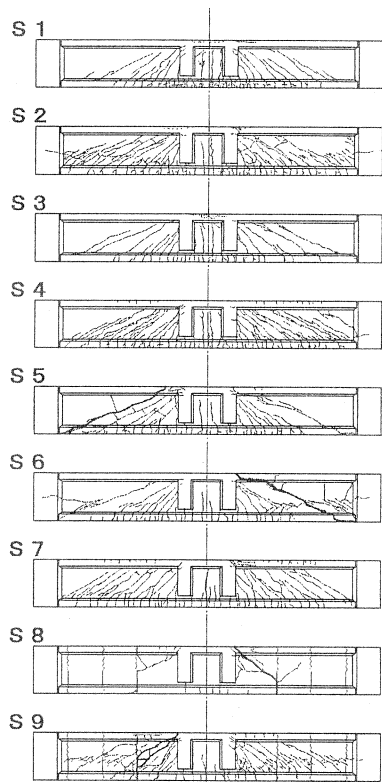


図-6 ひび割れ状況（実験終了時）

3.3 スターラップのひずみ分布

図-7にスターラップのひずみゲージ配置図を、図-8,9にS 1とS 2のスターラップのひずみ分布図を示す。これを見て分かるように、外ケーブル供試体であるS 1は、引張鉄筋降伏後スターラップのひずみがあまり伸びていないのに対し、内ケーブル供試体であるS 2は、引張鉄筋降伏後スターラップのひずみが急激に増加し、ほとんどのスターラップが降伏ひずみである2000 μ を越えていることが分かる。

このデータから曲げ破壊した外ケーブル供試体S 1においては、引張鉄筋の降伏後、外ケーブルの張力増加の影響により、ウェブのひずみが抑制されていることが分かる。

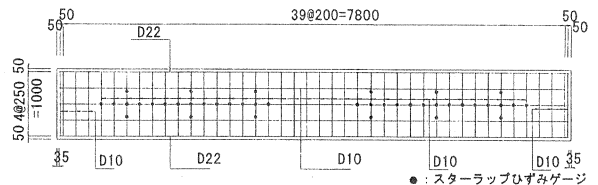


図-7 スターラップひずみゲージ配置図 単位[mm]

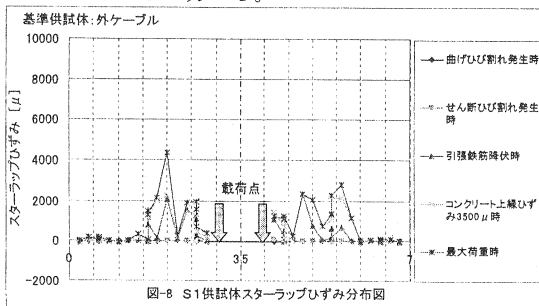


図-8 S1供試体スターラップひずみ分布図

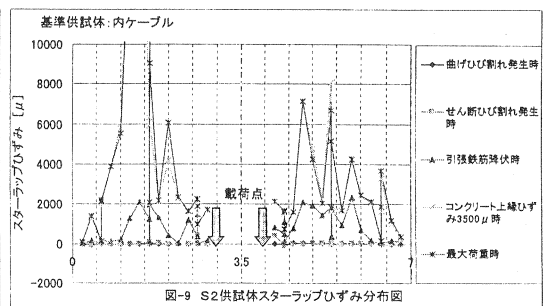


図-9 S2供試体スターラップひずみ分布図

3.4 計算値との比較

表-5 道路橋示方書に基づくせん断耐力と実験値との比較

	単位	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
コンクリートが負担できるせん断耐力 S_c	KN	173	173	173	173	173	173	87	140	140
スターラップが負担できるせん断耐力 S_s	KN	225	225	225	225	0	0	225	182	182
PC鋼材のせん断耐力作用方向分 S_p	KN	93	93	0	0	93	93	0	93	93
道路橋示方書によるせん断耐力 ΣS	KN	491	491	398	398	266	266	311	415	415
最大荷重時におけるせん断耐力	KN	891	925	797	906	672	665	706	646	722
実験値/計算値		1.8	1.9	2.0	2.3	2.5	2.5	2.3	1.6	1.7
最大荷重時における平均せん断応力度	N/mm ²	5.65	5.87	5.06	5.75	4.26	4.22	4.48	5.07	5.66

・S1とS3の最大荷重は曲げ破壊時の荷重である。

・外ケーブルの張力増加は考慮していない。

また、コンクリートが負担できる平均せん断応力度の割り増し係数は、PCの供試体をk=2、RCの供試体をk=1とし計算を行った。

これより、実験で得られた最大荷重は、内ケーブル供試体および外ケーブル供試体ともに道路橋示方書に基づくせん断耐力に対し1.6倍から2.5倍の大きな値となった。セグメント供試体は、一体型に比べ実験値と計算値との比率が小さくなった。また、最大荷重時における平均せん断応力度は、道路橋示方書で規定している平均せん断応力度の最大値の5.3N/mm²（設計基準強度40N/mm²）を超えているS2、S4、S9ではウェブコンクリートの剥落が見られたが、外ケーブル供試体であるS1には見られなかった。

これより、今回の実験では外ケーブル供試体においても道路橋示方書のせん断耐力式を用いることにより、安全側の値が得られた。

4. おわりに

本研究では、外ケーブルを適用したPCげたのせん断挙動を確認するための載荷実験を行い、以下の知見が得られた。

- 1) 外ケーブル供試体でスターラップの入ったS1、S3供試体は、支間中央の曲げ破壊となった。これは、引張鉄筋降伏後、外ケーブルの張力増加が大きくなり、せん断支間部のウェブの主応力が改善され、せん断ひび割れの進展を抑制したためと考えられる。
- 2) 一体型供試体の場合、せん断ひび割れ発生時点までは、内ケーブル供試体と外ケーブル供試体でケーブルの配置の違いによる影響はあまり見られなかった。
- 3) スターラップのない供試体では内ケーブル供試体と外ケーブル供試体で、破壊に至るまでせん断挙動に差が出なかった。これは、外ケーブルの張力増加が少ない段階で破壊に至ったため、内ケーブル供試体と外ケーブル供試体の差が出なかったのではないかと考えられる。
- 4) セグメント供試体は、一体型供試体に比べ最大荷重が低下した。これは、下フランジの鉄筋が連続していないため、ひび割れが継ぎ目に到達した時点から、引張弦材がPC鋼材のみとなり有効高が一体型に比べて小さくなったためと考えられる。
- 5) 外ケーブル供試体に比べ内ケーブル供試体の方がひび割れがウェブ全体に広く分布した。
- 6) 終局時のせん断耐力は内ケーブル供試体、外ケーブル供試体ともに道路橋示方書に基づくせん断耐力に比べかなり安全側の値となった。

最後に、平成12年度は外ケーブルの定着部の試験を予定しており、3年間の成果をもとに設計施工指針（案）に反映させるつもりである。

<参考文献>

- 1) 西川和廣、内田賢一、廣松新、管谷晃彦：外ケーブル方式PCげたの曲げ載荷実験、プレストレストコンクリート技術協会第9回シンポジウム論文集、pp. 553-558、1999
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説、I 共通編、III コンクリート橋編 平成8年12月