

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

西川 和廣*1・廣松 新*2・鈴木 素彦*3・伊藤 公彦*4

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、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が可能な工法である。また、最近では完成後にPC鋼材の状態を目視で確認できること、および設計上の配慮によりPC鋼材の取替えや追加が可能であるなど、今話題となっている橋梁の維持管理面で注目を集め、実績も増えてきている。

しかし、外ケーブルはコンクリートとの間に付着がないため、内ケーブル構造の設計で使用されている平面保持の仮定は成立しない。このため、終局時の挙動に関しては不明な点が多く、設計法を確立するまでには至っていない。

そこで、建設省土木研究所橋梁研究室と(株)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、「外ケーブルを適用したPC橋の合理化に関する研究」をテーマとした共同研究を実施することとした。平成10年度は、外ケーブルを適用したPC桁の曲げ破壊に至るまでの挙動を確認するために、モデル供試体を用いた載荷実験を実施した。また、設計への適用性を検証するために、非線形解析プログラムを用いた解析を行った。平成11年度は、せん断破壊に至るまでの挙動とせん断耐力を確認するために、モデル供試体を用いた載荷実験を行った。平成12年度には、外ケーブルの定着部に関する研究と並行して「外ケーブル工法に関する設計施工指針(案)」を作成すべく研究を行っている。

本文は、平成10年度に行った曲げに関する載荷実験と平成11年度に行ったせん断に関する載荷実験の結果の概要報告と現在の設計方法との比較について述べるものである。

2. 曲げ破壊実験

2.1 実験概要

平成10年度は、外ケーブルを適用した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工法などの実験因子が、曲げ性状(終局耐力、ひび割れ発生状況、PC鋼材の増加ひずみ等)へ及ぼす影響を確認するため、供試体を8体製作し、曲げ載荷実験を実施した。

2.2 実験因子

表-1に供試体の種類と実験因子の対応表を示す。曲げ破壊実験では、次の4つの実験因子を設定した。

(1) 外ケーブル比率

外ケーブル構造の場合、内ケーブル構造に比べ終局時の

表-1 供試体一覧

供試体	PC鋼材比(%)		偏向部設置間隔 (m)	引張鉄筋量	備考
	内	外			
G1	0	100	3.0	4-D10	全外ケーブル
G2	50	50	3.0	4-D10	外ケーブル比50%
G3	100	0	—	4-D10	全内ケーブル
G4	100	0	—	4-D10	アンボンドケーブル
G5	0	100	5.0	4-D10	偏向部間隔延長
G6	0	100	3.0	4-D16	引張鉄筋量増
GS1	0	100	3.0	4-D10	プレキャストセグメント
GS2	50	50	3.0	4-D10	プレキャストセグメント

曲げ耐力は低下するとされている。これは、コンクリートとPC鋼材の間に付着がないため、平面保持の仮定が成立せず、終局状態においても外ケーブルが降伏しない可能性があるためと考えられる。

そこで、全ケーブルに対する外ケーブルの比率を変化させた供試体を製作し、その影響を確認することとした。ここで、外ケーブル比率は、一体型供試体(G1, G2, G3)ではそれぞれ100%, 50%, 0%とし、セグメント型供試体(GS1, GS2)ではそれぞれ100%, 50%とした。

(2) 偏向部設置間隔

外ケーブルは定着部以外は偏向部により支持されており、偏向部以外の部分は部材の変形に伴い断面図心位置からのPC鋼材の偏心距離が変化する。そこで、偏向部設置間隔を変えた供試体を製作し、その影響を確認することとした。

偏向部設置間隔については、文献¹⁾に示されている「標準的な構造」の範囲(S/L : 偏向部設置間隔/支間長 <0.67)内である3m($S/L=0.4$)としたG1と範囲外となる5m($S/L=0.67$)としたG5を設定した。また、偏向部設置間隔0となる供試体として、桁内にアンボンドケーブルを配置したG4を設定した。

(3) 引張鉄筋量

外ケーブルを用いた場合、終局時の曲げ耐力が低下することが予想され、引張鉄筋を増加配置して補強することが考えられる。そこで、引張鉄筋量を増加させたG6を製作し、その効果を確認することとした。

引張鉄筋量は基準供試体であるG1がD10を4本配置(引張鉄筋比0.15%)しているのに対し、G6ではD16を4本配置(引張鉄筋比0.41%)した。

(4) プレキャストセグメント

外ケーブル工法とプレキャストセグメント工法は相性が

*1 Kazuhiro NISHIKAWA: 建設省 土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室 室長

*2 Arata HIROMATSU: 建設省 土木研究所 構造橋梁部 橋梁研究室 研究員

*3 Motohiko SUZUKI: (株)プレストレスト・コンクリート建設業協会

*4 Kimihiko ITO: (株)プレストレスト・コンクリート建設業協会

良く、併用した場合には一体で製作した場合に比べ施工の省力化と工期の短縮が期待できる。したがって、一体型供試体との比較をするためにG1, G2をプレキャストセグメントで製作したGS1, GS2を設定した。

2.3 供試体形状

図-1に供試体の形状寸法および配筋状態を示す。

供試体は、桁高0.5m, ウェブ厚0.3m, 上フランジ幅0.6m, 厚さ0.15mのT形断面とし、桁長を8.1m, 支間長Lを7.5mとした。また、各供試体ともケーブルはPC鋼より線1S12.4 (SWPR7AL)を4本配置し、PC鋼材には実験前初期ひずみとして4600 μ ($\sigma_p=920\text{N/mm}^2$)程度を与えた。また、セグメント型供試体の継目部には、コンクリート多段キーを採用しエポキシ樹脂系接着剤にて一体化した。なお、セグメント型供試体の引張鉄筋は継目部で連続していない。

2.4 使用材料

コンクリートは、設計基準強度40 N/mm²のものを使用

し、鉄筋はSD295Bを使用した。また、PC鋼材にはPC鋼より線1S12.4 (SWPR7AL)を使用した。表-2に各供試体の実験時におけるコンクリート強度と実験で使用した各鋼材の試験結果を示す。

2.5 実験方法

実験は、供試体を支間長7.5m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、供試体が曲げ破壊を起こし最大耐荷力が確認されるまで行った。

2.6 実験結果と考察

(1) 実験結果の概要

図-2および図-3に各供試体の載荷荷重と支間中央変位との関係を示す。また、表-3に、各時点(ひび割れ発生時、鉄筋降伏時、コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時)でのPC鋼材の増加ひずみを示す。図-4には実験終了時における各供試体のひび割れ状況を示す。

図-2, 3より、曲げひび割れ発生時における載荷荷重お

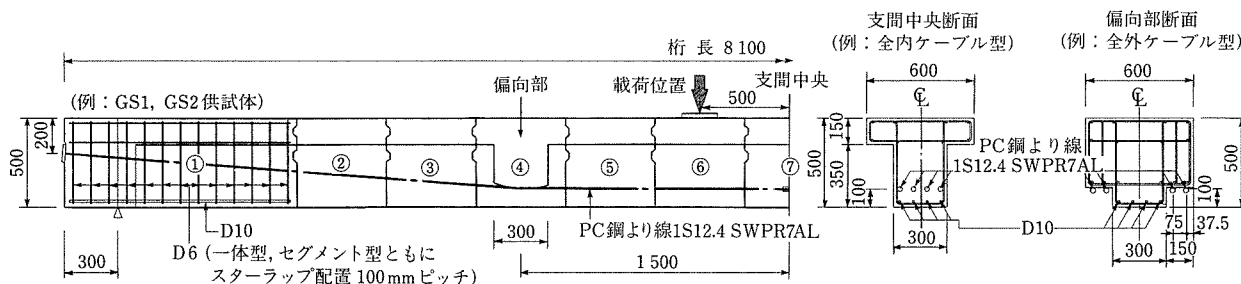


図-1 供試体形状寸法と配筋

表-2 使用材料の材料特性

硬化コンクリートの力学的性質					使用鋼材の材料特性				
供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	グラウト強度 (N/mm ²)	鋼材	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	
G1	55.7	4.54	32.34	—	鉄筋 SD295B	D6	—	561	197
G2	47.5	3.69	30.23	42.9		D10	344.6	506	193
G3	51.9	3.86	29.91	35.1		D16	343.5	509	193
G4	51.3	4.68	29.88	—	PC鋼材	1S12.4	1635	1773	202
G5	51.2	4.15	30.79	—					
G6	50.5	3.88	29.93	—					
GS1①	51.9	4.52	31.25	—					
GS1②	47.8	4.01	29.77	—					
GS2①	55.1	4.41	32.22	38.3					
GS2②	50.0	4.16	30.30	—					

※グラウト強度は内ケーブル供試体の値

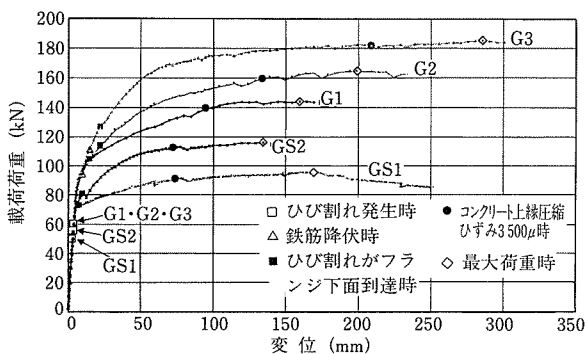


図-2 載荷荷重—支間中央変位 (G1~G3, GS1, GS2)

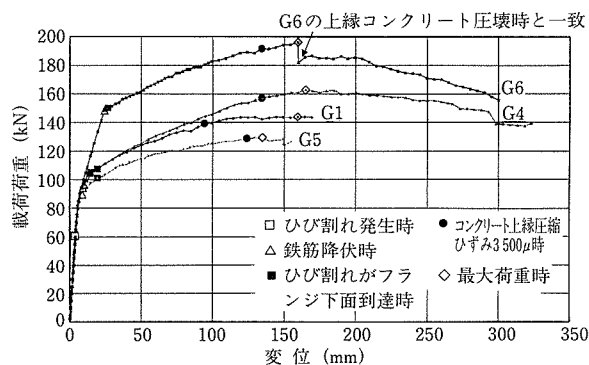


図-3 載荷荷重—支間中央変位 (G1, G4~G6)

表-3 荷重-PC鋼材増加ひずみ

供試体	ひび割れ発生時		鉄筋降伏時		コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時	
	載荷荷重 (kN)	PC鋼材ひずみ (μ)	載荷荷重 (kN)	PC鋼材ひずみ (μ)	載荷荷重 (kN)	PC鋼材増加ひずみ (μ)
G1	59.9	72	94.3	173	139.1	1977
G2	60.0	90	94.3	219	159.4	2863
G3	59.9	173	111.5	1030	182.0	測定不能
G4	60.5	72	96.7	167	157.3	2959
G5	60.0	73	89.7	165	128.5	2604
G6	60.0	80	148.6	492	191.9	2804
GS1	49.9	68			91.1	1512
GS2	55.0	88			112.3	1491

※G3, G4のPC鋼材ひずみは内ケーブルの値である。

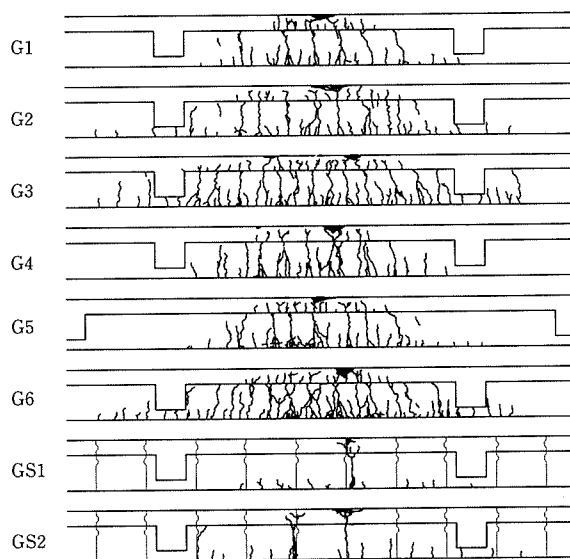


図-4 ひび割れ状況 (実験終了時)

よび変位は、一体型供試体であるG1~G6においてはほぼ等しいことが分かる。したがって、一体型供試体においては、曲げひび割れ発生時点までは、外ケーブル比率、偏向部設置間隔、および引張鉄筋量の影響は小さいものと考えられる。

コンクリート上縁圧縮ひずみ3500 μ 時 (以下、終局時) での載荷荷重は、G1の載荷荷重を1とした場合、G6 (1.38) が最大で、以下、G3 (1.31), G2 (1.15), G4 (1.13), G1 (1.00), G5 (0.92), GS2 (0.81), GS1 (0.66) の順であった。

次に、各供試体の破壊形態は、すべての供試体で引張鉄筋降伏後、支間中央のコンクリート上縁の圧縮破壊となった。PC鋼材は、実験前初期ひずみと増加ひずみの計測値から推測すると、終局時において内ケーブルはアンボンドケーブルを除きすべて降伏していたのに対し、外ケーブルはすべて降伏には至っていなかった。

以下に、終局時に至るまでの挙動を各実験因子ごとに比較する。

(2) 各実験因子による影響

① 外ケーブル比率の影響

図-5に外ケーブル比率と終局時における載荷荷重との関係を示す。これより、一体型供試体、セグメント型供試体ともに、外ケーブル比率が増えるとはほぼ同じ傾きで、終局

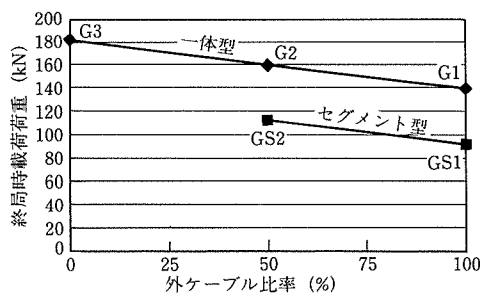


図-5 外ケーブル比率-終局時載荷荷重

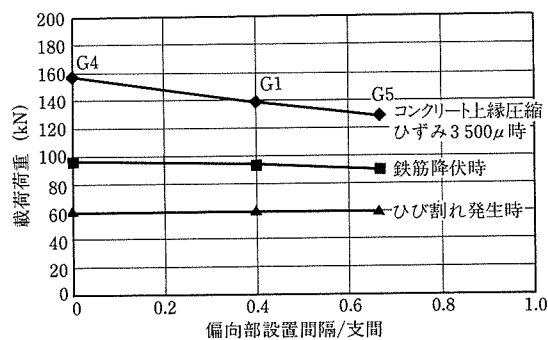


図-6 載荷荷重-偏向部設置間隔/支間

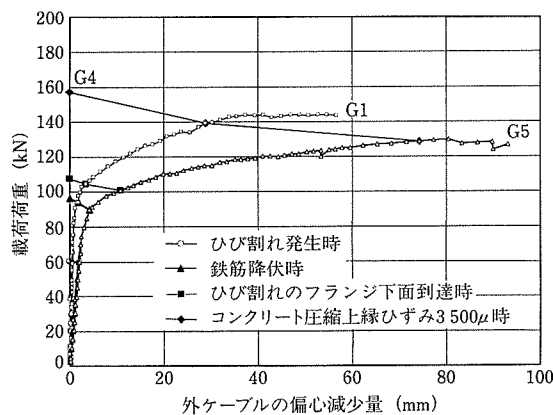


図-7 載荷荷重-外ケーブルの偏心減少量

時の載荷荷重が低下したことが分かる。また、図-2より一体型供試体では外ケーブル比率が大きくなるにつれて、終局時の変位が小さくなる傾向が見られたが、セグメント型供試体ではほぼ同等の値となった。

次に、PC鋼材の増加ひずみを比較すると、一体型供試体では外ケーブル比率が大きくなると終局時における外ケーブルPC鋼材の増加ひずみが小さくなる傾向が見られたが、セグメント型供試体ではその傾向は見られなかった。

外ケーブル比率に着目し、ひび割れ状況を比較すると、外ケーブル比率が大きくなるにつれて、ひび割れ分散性が悪くなった。これは、セグメント型供試体でも同様の傾向が見られた。

② 偏向部設置間隔の影響

図-6に各時点における偏向部設置間隔と載荷荷重との関係を、また、図-7に外ケーブルの偏心減少量と載荷荷重の関係を示す。これらより、曲げひび割れ発生時点における載荷荷重と偏心減少量については、偏向部設置間隔の影響はほとんど見られなかった。しかし、終局時には偏向部設

置間隔が広がるにつれて偏心減少量が大きくなり載荷荷重が低下したことが分かる。

次に、終局時におけるPC鋼材増加ひずみを比較すると、G4が最大で、以下、G5、G1の順であり、偏向部設置間隔の順とは一致しなかった。これより、偏向部設置間隔が広がるにつれて終局時の載荷荷重が低下した原因は、PC鋼材の増加ひずみよりもPC鋼材の偏心減少量の影響の方が大きいことが分かった。

偏向部設置間隔に着目し、ひび割れ状況を比較すると、ひび割れ分散性に関しては、偏向部設置間隔の影響は顕著には現れなかった。

③ 引張鉄筋量の影響

荷重-変位の関係を、G1とG6で比較すると、引張鉄筋を増加配置したG6の終局時における載荷荷重は、G1の値を約38%上回った。また、終局時における支間中央変位もG1の値を大きく上回った。

PC鋼材の増加ひずみは、終局時においてG6の値がG1の値を約42%上回った。

引張鉄筋量に着目し、ひび割れ状況を比較すると、引張鉄筋を増加配置したG6の方がG1に比べてひび割れが広く分散した。

これより、引張鉄筋の増加配置は、耐力以外に外ケーブルのひずみ増加量やひび割れ分散性が向上するなどの効果があることが分かった。

④ プレキャストセグメントの影響

荷重-変位の関係を一体型供試体と比較すると、セグメント型供試体は、一体型供試体に比べ早期に曲げひび割れが発生し、終局時における載荷荷重は一体型供試体に比べ小さくなった。ここで、外ケーブル比率が同じ一体型供試体と終局時における載荷荷重を比較すると、セグメント型供試体の載荷荷重は一体型供試体の65%~70%であった。また、終局時における変位も一体型供試体に比べ小さくなった。

PC鋼材の増加ひずみは、曲げひび割れ発生時点においては一体型供試体と大きな差異は見られなかったが、終局時の増加ひずみは一体型供試体に比べ小さくなった。

セグメント型供試体のひび割れ状況は、写真-1に示すように、支間中央に近いセグメント継目部付近にひび割れが

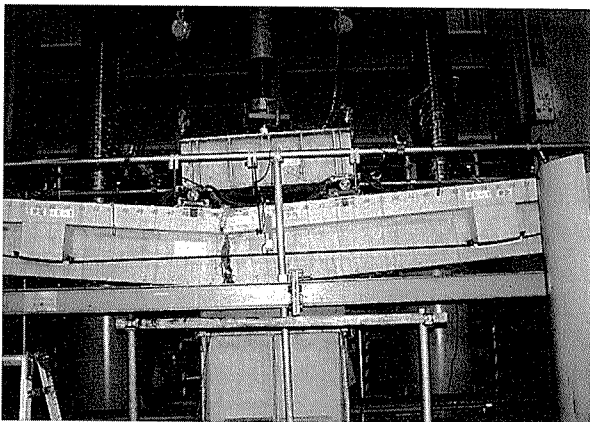


写真-1 供試体破壊状況 (GS1)

集中し、ひび割れの本数は一体型供試体に比べて極端に少なく、変位が増大するにつれてそのひび割れ幅が拡大していった。

2.7 曲げ破壊実験のまとめ

外ケーブルを適用した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を実験因子とした曲げ破壊実験を実施した。本実験により以下の知見が得られた。

- ① 一体型供試体においては、曲げひび割れ発生時点までは外ケーブル比率、偏向部設置間隔、引張鉄筋量の影響は小さい。
- ② 外ケーブル比率が増すと、一体型供試体、セグメント型供試体ともに終局時の曲げ耐力は低下し、ひび割れも狭い範囲に集中する。また、セグメント型供試体では、セグメント継目部付近にひび割れが集中する。
- ③ 偏向部設置間隔が増すにつれて、供試体の変形に伴うPC鋼材の偏心減少量が大きくなるため、終局時の曲げ耐力は小さくなる。
- ④ 引張鉄筋を増加配置することは、終局時の曲げ耐力向上はもとより、PC鋼材のひずみ量の増加とひび割れ分散性の向上も期待できる。

3. せん断破壊実験

3.1 実験概要

平成11年度は、外ケーブルを適用したPC単純桁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ために、供試体を9体製作し、載荷実験を行った。

3.2 実験因子

「道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編」³⁾(以下、道示Ⅲ)に基づくせん断耐力は、以下の式で算出され、計算上のせん断耐力が作用せん断力を上回るようにスターラップを配置させることとしている。

$$S = S_c + S_s + S_p$$

ここに

S : せん断耐力

S_c : コンクリートが負担できるせん断力

S_s : スターラップが負担できるせん断力

S_p : プレストレスのせん断力作用方向分力

これらを考慮し、ケーブル角度、スターラップの有無、プレストレスの有無、プレキャストセグメント工法を実験因子とし実験を行うこととした。また、内ケーブル構造との比較を行うために、外ケーブル供試体と同条件の内ケーブル供試体を設定した。表-4に供試体の種類と実験因子の対応表を示す。

(1) ケーブル角度

プレストレスによるせん断力作用方向分力の影響を確認するために、せん断支間部でケーブル角度を5度としたS1とケーブル角度を0度としたS3を設定した。S3は、ケーブル角度以外はS1と同条件とした。

(2) スターラップの有無

スターラップの受け持つせん断力を確認するために、せ

表-4 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度	5度	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度
S4	○		○		○		○		○		ケーブル角度0度, 内
S5		○	○			○		○	○		スターラップなし
S6	○		○			○		○	○		スターラップなし, 内
S7	○		○		○		○			○	プレストレストなし
S8		○		○		○	○		○		セグメント
S9	○			○		○	○		○		セグメント, 内

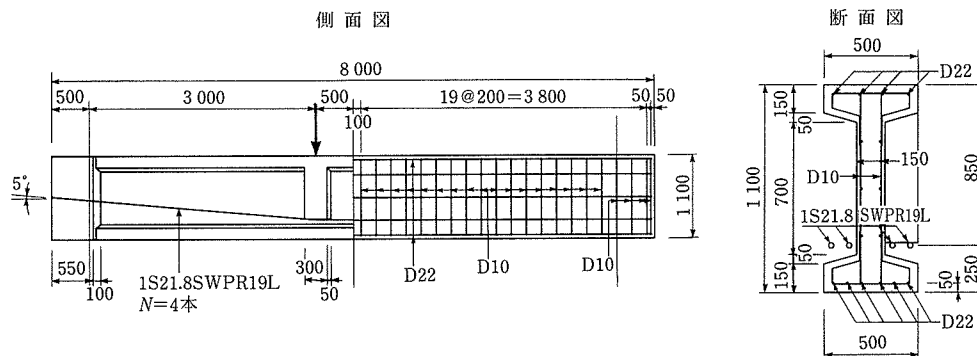


図-8 供試体形状寸法と配筋

表-5 使用材料の材料特性

硬化コンクリートの力学的性質					使用鋼材の材料特性			
供試体	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	グラウト強度 (N/mm ²)	鋼材	降伏点 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
S1, S2	46.7	4.091	31.09	55.3	鉄筋 D10	382	542	188.1
S3, S4	44.0	3.799	28.65	42.0	SD345 D22	360	560	188.1
S5, S6	57.5	4.186	30.09	38.9	PC鋼材 1S21.8	1 692	1 801	217
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	—				

※グラウト強度は内ケーブル供試体の値

ん断支間部のウェブにスターラップを配置しないS5を設定した。それに対し、基準供試体であるS1は、スターラップとしてD10を200mm間隔で配置した。

(3) プレストレスの有無

プレストレスの影響を確認するために、PC鋼材は配置するが、プレストレスを導入しない供試体S7を設定した。この供試体は、内ケーブルとケーブル角度は0度とした。

(4) プレキャストセグメント

プレキャストセグメント工法とした場合の影響を確認するために、S1をプレキャストセグメント工法で製作したS8を設定した。

(5) ケーブル配置 (内ケーブル or 外ケーブル)

外ケーブル構造と内ケーブル構造との違いを確認するために、上記の実験因子により設定した外ケーブル供試体4体 (S1, S3, S5, S8) に対し、ケーブル配置以外同条件とした内ケーブル供試体をそれぞれ4体 (S2, S4, S6, S9) 設定した。

3.3 供試体形状

図-8に供試体の形状寸法と配筋状態を示す。供試体は、桁高1.1m、ウェブ厚0.15m、上フランジ幅0.5m・厚さ0.15m、下フランジ幅0.5m・厚さ0.15mのI形断面とし、桁長を

8.0m、支間長を7.0mとした。

各供試体ともケーブルはPC鋼より線1S21.8 (SWPR19L) を4本配置し、S7を除く各供試体のPC鋼材には実験前初期ひずみとして4250 μ ($\sigma_p=850$ N/mm²) 程度を与えた。引張鉄筋は、下フランジにD22を6本配置した。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。セグメント型供試体の継目部にはコンクリート多段キーを採用し、エポキシ樹脂系接着剤にて一体化した。また、中央のセグメント長を3.2mとし、支間中央付近には継目を設けないものとした。なお、セグメント型供試体については、継目部で鉄筋は連続していない。

供試体の形状および鋼材量は、内ケーブル供試体の基準供試体であるS2において、道示Ⅲに基づく計算上の曲げ終局耐力がせん断耐力の2倍程度となるように設定した。また、曲げ終局耐力に達した時点でウェブが圧縮破壊しないよう配慮した。

3.4 使用材料

コンクリートの目標強度は40 N/mm²とし、鉄筋はSD345を使用した。また、PC鋼材にはPC鋼より線1S21.8 (SWPR19L) を使用した。表-5に各供試体の実験時におけるコンクリート強度と実験で使用した各鋼材の試験結果を示す。

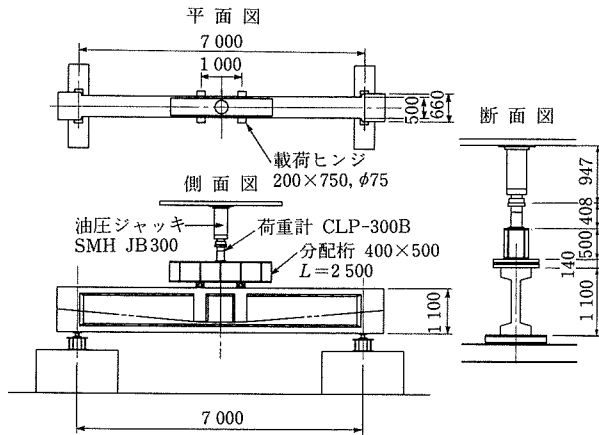


図-9 載荷試験図

3.5 実験方法

図-9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荷力が確認されるまで行った。

3.6 実験結果と考察

(1) 実験結果の概要

図-10、11に載荷荷重と支間中央変位の関係を、図-12には載荷荷重と外ケーブル増加ひずみの関係を示す。表-6には各時点での載荷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-13に各供試体の実験終了時におけるひび割れ状況を示す。

これらより、実験における最大荷重は、S1の載荷荷重を1とすると、S2 (1.04) が最大で、以下、S4 (1.02), S1 (1.00), S3 (0.90), S9 (0.81), S7 (0.79), S5 (0.75), S6 (0.75), S8 (0.72) の順であった。

次に、破壊形態については、S1とS3が支間中央上縁のコンクリートが圧壊し曲げ破壊したのに対し、その他の供試体は、せん断型の破壊であった。セグメント型供試体は、継目部付近から発生したせん断ひび割れ部分での破壊となった。

以下に各実験因子による影響を述べる。

(2) 各実験因子による影響

① ケーブル配置 (内ケーブル or 外ケーブル) の影響
荷重-変位の関係について、一体型供試体でスターラック

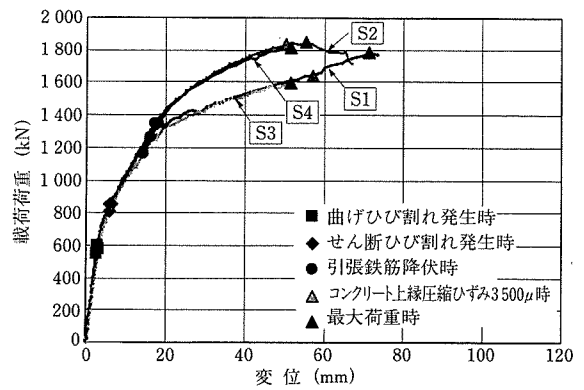


図-10 載荷荷重-支間中央変位 (S1~S4)

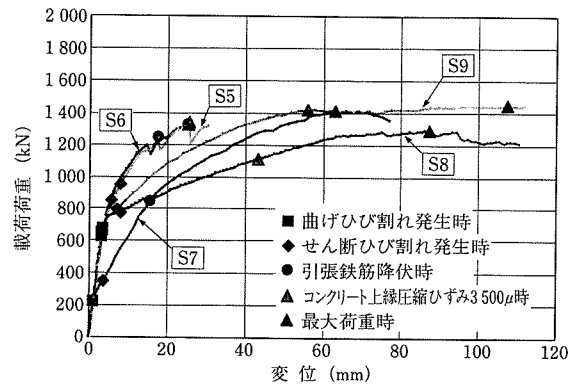


図-11 載荷荷重-支間中央変位 (S5~S9)

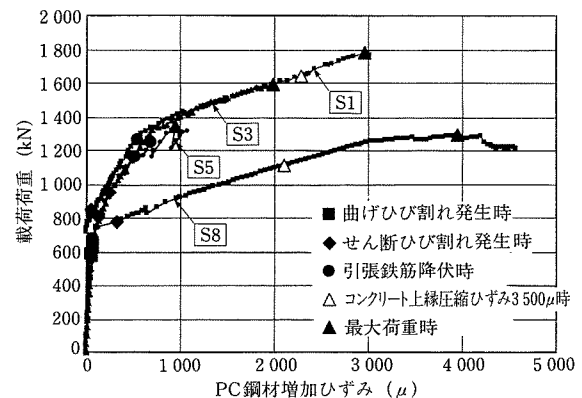


図-12 載荷荷重-外ケーブル増加ひずみ

表-6 各時点での載荷荷重と支間中央変位

供試体	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		コンクリート上縁圧縮ひずみ3500μ時		最大荷重時		破壊形態
	変位 (mm)	載荷荷重 (kN)	変位 (mm)	載荷荷重 (kN)	変位 (mm)	載荷荷重 (kN)	変位 (mm)	載荷荷重 (kN)	変位 (mm)	載荷荷重 (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

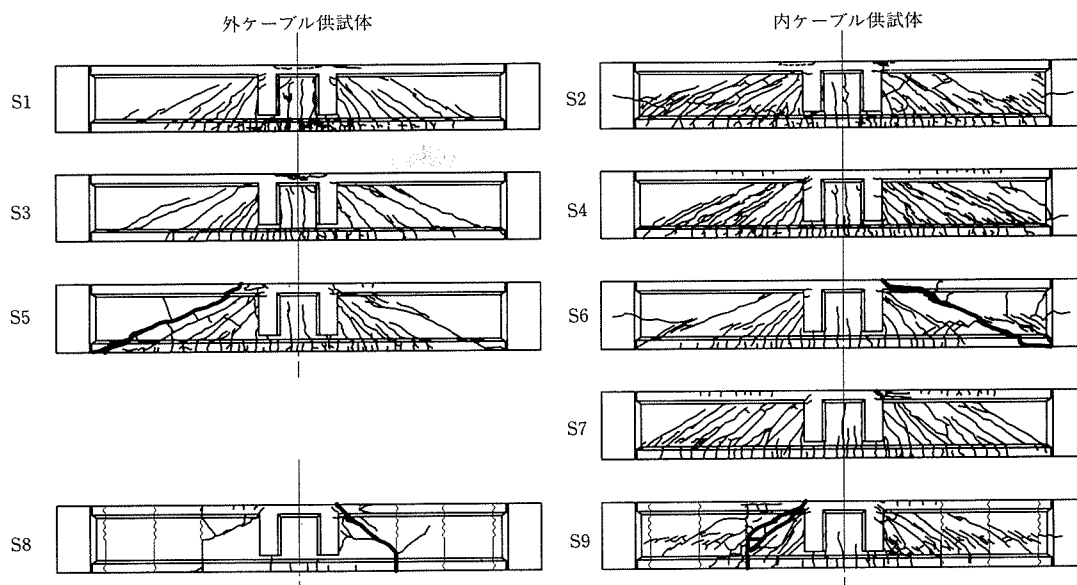


図-13 ひび割れ状況(実験終了時)

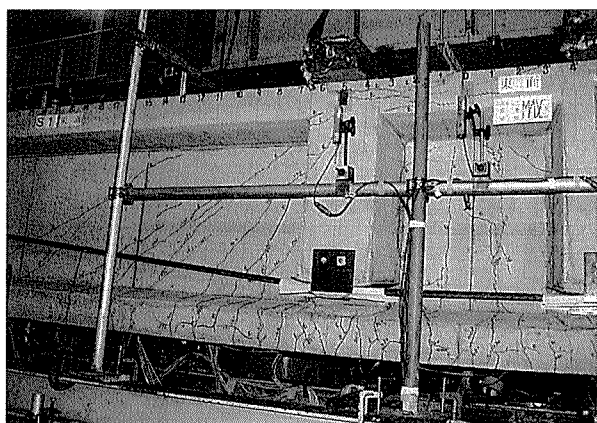


写真-2 供試体破壊状況(S1)

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、外ケーブル供試体において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。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、最終的にはウェブのコンクリートが剥落しはじめ徐々に荷重が降下し、せん断破壊した。写真-2にS1の実験終了時の破壊状況を示す。

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。

セグメント型供試体であるS8とS9については、継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大きくなっ

た。

ひび割れ状況は、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が多く、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PC鋼材の外側のコンクリートが剥落したのが確認された。

② ケーブル角度の影響

外ケーブルの配置角度が異なるS1とS3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。

ケーブル角度に着目し、ひび割れ状況を比較すると、S1とS3では、大きな差は見られなかった。

荷重-外ケーブル増加ひずみの履歴においてもケーブル角度の影響は顕著には現れなかった。

③ スターラップの有無の影響

荷重-変位の関係について、スターラップの配置量が異なるS1と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。これは、コンクリート強度が高かったためと推測され、荷重-変位の履歴については、載荷荷重が1200kN付近までは大きな差は現れなかった。しかし、1200kNを超えたあたりでスターラップを配置していない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。その後は、S1に比べ荷重-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。最大荷重をS1と比較すると、S1より25%小さくなった。写真-3にS5の実験終了時の破壊状況を示す。

スターラップの有無に着目し、S1とS5のひび割れ状況を比較すると、ひび割れの角度や本数はほぼ同じとなったが、支承部から載荷点に向かうひび割れ幅がS5の方が大きくなり、最終的にS5はそのひび割れ部分で脆性的に斜引張破壊した。

④ プレストレスの有無の影響

荷重-変位の関係についてプレストレスの有無の影響を比較すると、プレストレスの入っていないS7はプレストレスの入っているS4に比べ曲げひび割れ発生荷重が小さく、ひび割れ発生後は同荷重における変位が大きくなった。S7の最大荷重は、S4に比べ22%小さくなったが、最大荷重時における変位はS7の方が大きくなった。

ひび割れ状況は、プレストレスの入っていないS7のウェブのひび割れ角度は45度に近く、S4に比べ緩い角度となった。

⑤ プレキャストセグメントの影響

荷重-変位の関係において、セグメント型供試体であるS8と一体型供試体であるS1を比較すると、曲げひび割れ発生時点までは、S1とS8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目部に達した付近からS8の変位が急激に大きくなり履歴も大きく異なった。S8の最大荷重は、S1に比べ27%小さくなった。しかし、最大荷重時における変位はS8の方が大きくなった。

S8の外ケーブル増加ひずみは、曲げひび割れが継目部に達した付近からS1に比べ急激に増加した。

これらの原因は、セグメント型供試体は連続している鋼材がPC鋼材しかなく、ひび割れが継目部に達した時点から有効高が低くなり、付着のないPC鋼材のみが引張力を負担する状態となったためと考えられる。写真-4にS8の実験終了時の破壊状況を示す。

S8のひび割れ状況は、S1に比べひび割れ本数が極端に少なく、継目部付近から発生したせん断ひび割れのみが進展し破壊に至った。

(3) スターラップのひずみ分布による検証

本実験では、内ケーブル供試体であるS2とS4がせん断破壊したのに対し、外ケーブル供試体であるS1とS3が曲げ破壊した。この原因をスターラップひずみ分布に着目し検証を行った。また、スターラップのひずみ分布においてケーブル角度による影響を比較した。

図-14にスターラップのひずみゲージ配置図を、図-15、16にS1とS2の各時点でのスターラップのひずみ分布図を示す。

これらより、外ケーブル供試体であるS1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S2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 を超えていることが分かる。

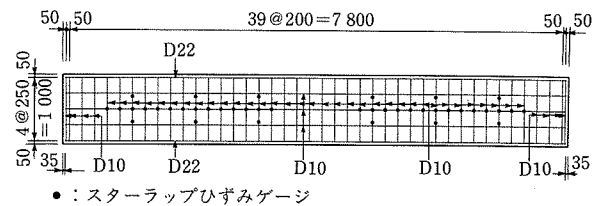


図-14 スターラップひずみゲージ配置図

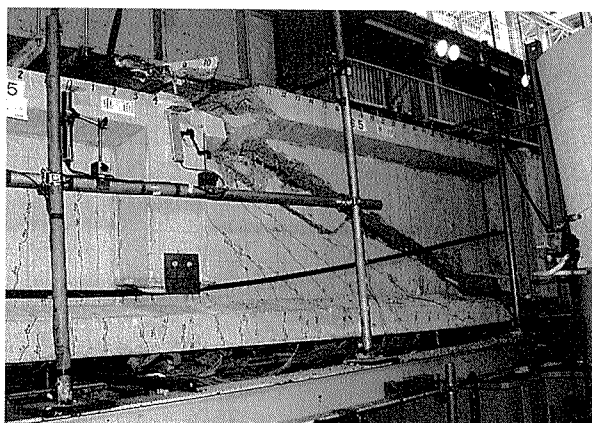


写真-3 供試体破壊状況 (S5)

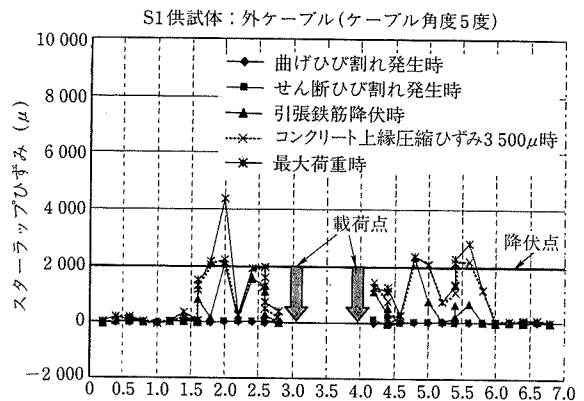


図-15 スターラップひずみ分布図 (S1供試体)

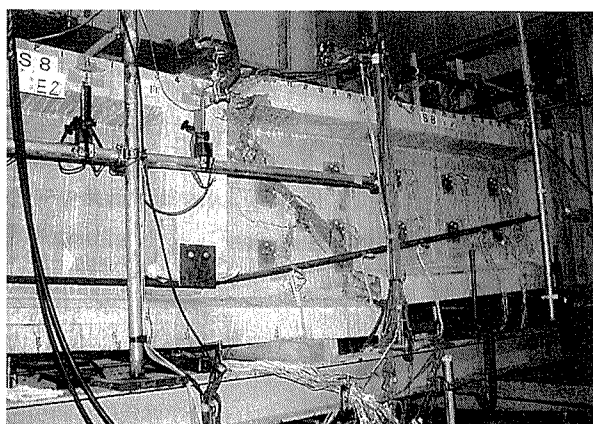


写真-4 供試体破壊状況 (S8)

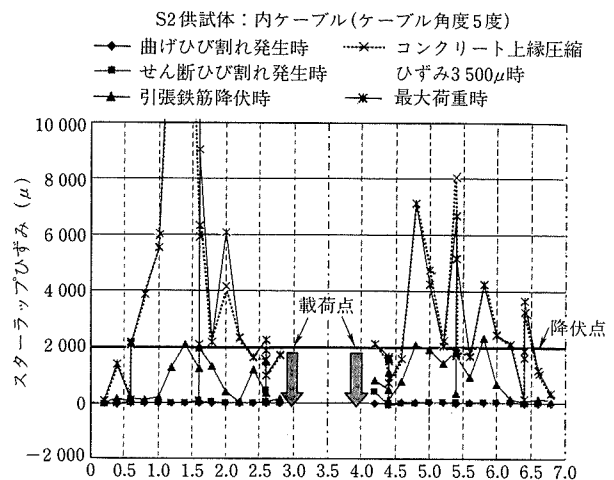


図-16 スターラップひずみ分布図 (S2供試体)

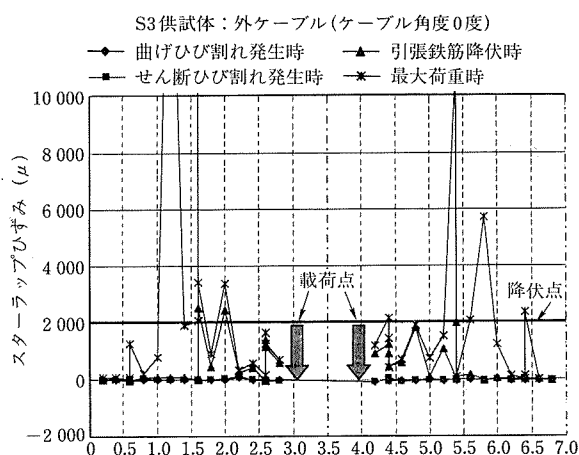


図-17 スターラップひずみ分布図(S3供試体)

このデータから、S1においては、引張鉄筋の降伏後ウェブのひずみが抑制されていることが分かる。これは、引張鉄筋降伏後に外ケーブルの増加ひずみが大きくなり、ウェブの主応力を改善したことが原因であると考えられる。

次にケーブル角度による影響を比較する。図-17にケーブル角度が0度であるS3の各時点でのスターラップひずみ分布図を示す。この図とケーブル角度が5度であるS1のスターラップひずみ分布を比較すると、引張鉄筋降伏付近まではケーブル角度による影響はほとんど見られないが、最大荷重時には、支点に近い部分のスターラップひずみがS1に比べS3の方が大きくなっていることが分かる。これより、スターラップのひずみ分布についてはケーブル角度の影響が現れた。

3.7 セン断破壊実験のまとめ

外ケーブルを適用したPC単純桁のせん断挙動とせん断耐力を確認するための載荷実験を行った。実験結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 外ケーブル供試体でスターラップの入ったS1, S3は、同条件の内ケーブル供試体がせん断破壊したのに対し、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との差はほとんど見られなかった。
- 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と考えられる。
- ④ セグメント型供試体は、ひび割れが継目部に到達した時点から、PC鋼材のみが引張力を負担する状態となり、一体型供試体に比べ、最大荷重が低下し変位およびPC鋼材の増加ひずみが急激に増加した。

4. 道路橋示方書に基づく設計と実験値との比較

道示Ⅲには「16.5 外ケーブル構造」が示されている。こ

れに従い設計を行った場合の計算値と実験値との比較を行い、道示Ⅲによる設計の検討を行った。

4.1 設計荷重作用時における設計

(1) 曲げに関する設計

道示Ⅲでは、外ケーブルを内ケーブルと見なして設計を行う場合には、「付着のあるPC鋼材が配置された内ケーブル構造と同様に行う」とある。平成10年度に行った単純桁での載荷実験では、曲げひび割れ発生時点までは、PC鋼材の増加ひずみおよびPC鋼材の偏心減少量は小さく、外ケーブル比率、偏向部設置間隔、引張鉄筋量等の影響はほとんど見られなかった。したがって、設計荷重作用時の設計においては内ケーブルと同様の設計法を用いてもよいと考えられる。

(2) セン断力に対する照査

道示Ⅲでは、外ケーブル構造のせん断力に対する照査は内ケーブル構造と同様に行ってよいとしている。平成11年度に行った単純桁における載荷実験では、せん断ひび割れ発生時点までは、PC鋼材の増加ひずみは小さく、ケーブル角度、スターラップの有無等を変化させた供試体において、内ケーブル構造と外ケーブル構造で顕著な差は現れなかった。したがって、設計荷重作用時におけるせん断力に対する照査は、内ケーブルと同様の設計法を用いてもよいと考えられる。

4.2 終局荷重作用時における照査

(1) 破壊抵抗曲げモーメントの算出

(a) 道示Ⅲの破壊抵抗曲げモーメント式を用いた手法

道示Ⅲでは、外ケーブルを内ケーブルと見なして設計を行う場合の破壊抵抗曲げモーメントの算出方法を2つ示している。この2つを要約すると、次のようである。

① 外ケーブルの増加応力度を見込まない。または、載荷試験の結果などを参考に増加量を仮定する。

② 外ケーブルを付着のないPC鋼材と見なして、破壊抵抗曲げモーメントは付着がある場合の70%とする。

いずれの設計法においても、一般的には外ケーブルの偏心量が増加する影響は無視した設計法が用いられている。

それぞれの考え方に従って各供試体の破壊抵抗曲げモーメントを算出し、実験値との比較を行った結果を以下に示す。

図-18に実験における終局時の載荷荷重値と計算により算出された破壊抵抗曲げモーメントを載荷荷重に換算した値との比較を示す。

①に対しては、増加応力度を見込まない場合と載荷試験により得られた増加応力度をそのまま代入した場合の2種類について計算を行った。また、それぞれの計算値に対し、偏心減少量の影響を考慮した場合と考慮しない場合の破壊抵抗曲げモーメントを計算した。それぞれの計算値は図中に計算値①として示した。

これより、増加応力度と偏心減少量を考慮しない場合には実験値に対しかなり安全側の値となった。これに対し、増加応力度のみを考慮した場合には、偏向部設置間隔が長く偏心減少量が多いG5供試体において、計算値が実験値を上回り危険側の値となった。増加応力度と偏心減少量の両方を考慮した場合には、実験値と計算値は同様の傾向を

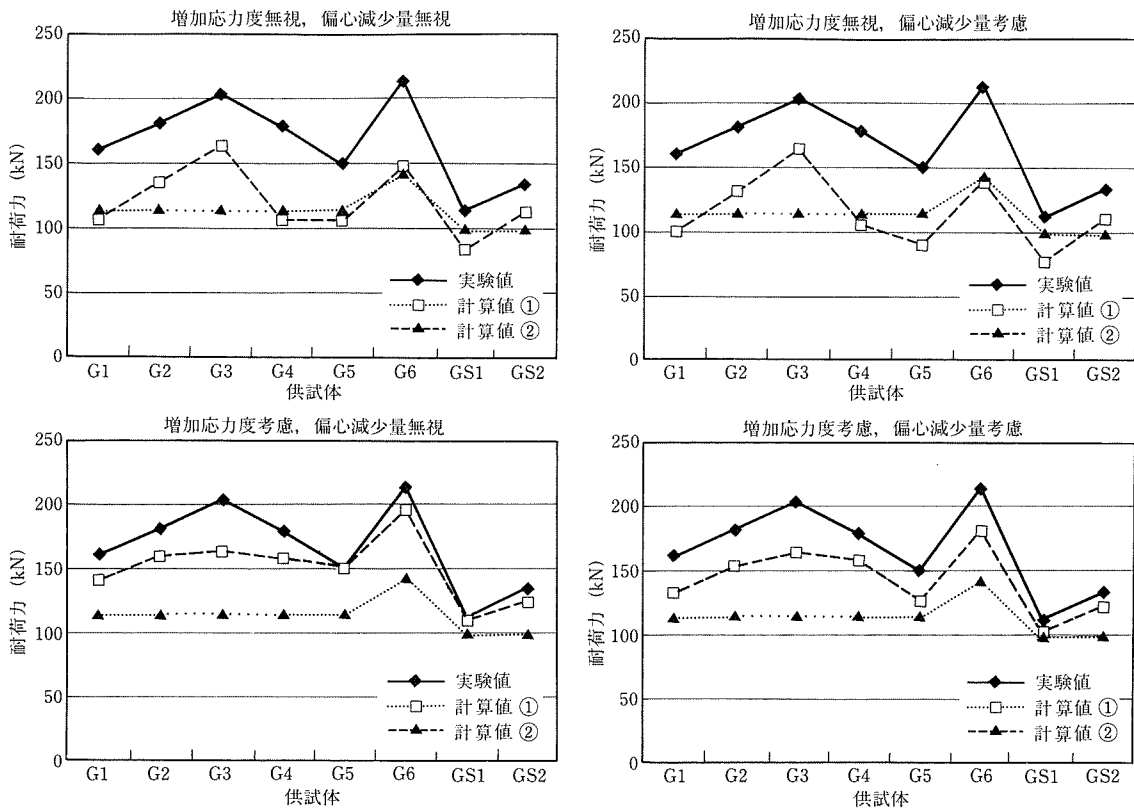


図-18 道示Ⅲによる計算値と実験値との比較（終局時載荷荷重）

示し、すべて安全側の値となった。

これより、増加応力度のみ考慮する場合には、偏向部の配置によっては危険側の値が算出される可能性がある。したがって、偏向部を配置するにあたっては、部材の変形を考慮し偏心減少量が少なくなるように偏向部の位置や間隔を決定する必要があると考えられる。また、増加応力度を載荷試験等で仮定する場合には、載荷試験等で得られた値に対し少なめの値を使用するのが妥当であると考えられる。

次に、②の方法で破壊抵抗曲げモーメントを算出した。計算結果は、図-18中に計算値②として示した。

これより、②の方法で計算した値は、すべての供試体において実験値に対しかなり安全側の値となった。これは、外ケーブル比率などが考慮されないためであり、外ケーブル比率が小さい場合などはかなり安全側に計算される。

これらより、外ケーブルの増加応力度を適切に評価することができれば、①の方法で外ケーブル構造の破壊抵抗曲げモーメントを精度よく算出できることが分かった。

(b) 非線形解析を用いた手法

PC鋼材の増加ひずみと偏心減少量を評価する手法として、材料非線形性と幾何非線形性の両者を考慮できる非線形解析プログラムを用いる方法が実際の設計で使われはじめている。そこで、非線形解析の適用性を検討するため、2種類の非線形解析プログラムを使用し、実験のシミュレーションを行った。解析プログラムは以下に示す2種類とした。

解析法 1 有限要素法の変位法に鉄筋コンクリートの非線形構成則が適用されたプログラム

解析法 2 ファイバー要素を用いた非線形骨組解析プログラム

いずれのプログラムも材料非線形性と幾何非線形性の両方を考慮できるプログラムである。

なお、解析条件は以下の2種類とし、すべての供試体について解析を行った。

事前解析 道示Ⅲに基づく材料曲線を使用し、実際の設計をイメージしたもの

事後解析 実験結果と解析結果との整合性を検証するため、材料試験結果をできる限り反映させたもの
以下に解析結果を述べる。

表-7、8に解析で得られた終局時の載荷荷重と変位および外ケーブルの増加応力度の値を実験値と比較したものを示す。また、図-19には終局時の載荷荷重を実験値と比較したものを示す。これらより、両解析ともに事前解析における終局時の載荷荷重は、実験値に対しセグメント型供試体を除きほぼ安全側の値を得た。また、事後解析における終局時の載荷荷重は実験値と比較的よく一致した。しかし、PC鋼材の増加応力度は実験値より大きめとなる傾向となった。したがって、PC鋼材の増加応力度を解析を用いて仮定する場合には、解析値に対し少なめの値を用いるのが妥当であると考えられる。

(2) せん断力に対する照査

道示Ⅲでは、「外ケーブル構造のせん断力やねじりモーメントに関する照査は、内ケーブル構造と同様にしてよい」とある。そこで、道示Ⅲに基づきせん断耐力を算出し、実験値と比較したものを表-9に示す。なお、外ケーブル供試体

表-7 終局時における実験値と解析値との比較(事前解析)

供試体名	項目	載荷荷重 (kN)	支間中央変位 (mm)	PC鋼材増加応力度 (N/mm ²)
G1	実験値	139.1 (1.00)	94.7 (1.00)	399.4 (1.00)
	解析法1	138.0 (0.99)	232.4 (2.45)	521.6 (1.31)
	解析法2	119.3 (0.86)	140.4 (1.48)	531.5 (1.33)
G2	実験値	159.4 (1.00)	134.3 (1.00)	578.3 (1.00)
	解析法1	149.0 (0.93)	245.2 (1.83)	521.6 (0.90)
	解析法2	132.6 (0.83)	162.2 (1.21)	545.3 (0.94)
G3	実験値	181.8 (1.00)	209.0 (1.00)	—
	解析法1	158.0 (0.87)	207.7 (0.99)	—
	解析法2	146.1 (0.80)	204.4 (0.98)	—
G4	実験値	157.3 (1.00)	134.9 (1.00)	597.7 (1.00)
	解析法1	159.0 (1.01)	260.3 (1.93)	615.4 (1.03)
	解析法2	135.1 (0.86)	179.6 (1.33)	555.7 (0.93)
G5	実験値	128.5 (1.00)	124.7 (1.00)	526.0 (1.00)
	解析法1	125.0 (0.97)	211.1 (1.69)	482.0 (0.92)
	解析法2	107.4 (0.84)	140.9 (1.13)	530.8 (1.01)
G6	実験値	191.9 (1.00)	134.6 (1.00)	566.4 (1.00)
	解析法1	176.0 (0.92)	139.0 (1.03)	481.6 (0.85)
	解析法2	159.7 (0.83)	127.3 (0.95)	517.7 (0.91)
GS1	実験値	91.1 (1.00)	74.5 (1.00)	305.4 (1.00)
	解析法1	109.0 (1.20)	114.7 (1.54)	469.3 (1.54)
	解析法2	81.8 (0.90)	64.4 (0.86)	300.4 (0.98)
GS2	実験値	112.3 (1.00)	72.2 (1.00)	301.2 (1.00)
	解析法1	125.0 (1.11)	120.2 (1.67)	470.3 (1.56)
	解析法2	102.0 (0.91)	69.9 (0.96)	321.2 (1.07)

※ ()内に示した値は、実験値を1.00とした場合の値である。

表-8 終局時における実験値と解析値との比較(事後解析)

供試体名	項目	載荷荷重 (kN)	支間中央変位 (mm)	PC鋼材増加応力度 (N/mm ²)
G1	実験値	139.1 (1.00)	94.7 (1.00)	399.4 (1.00)
	解析法1	146.0 (1.05)	212.7 (2.25)	609.9 (1.53)
	解析法2	134.1 (0.96)	209.4 (2.21)	656.8 (1.64)
G2	実験値	159.4 (1.00)	134.3 (1.00)	578.3 (1.00)
	解析法1	163.0 (1.02)	242.7 (1.81)	636.7 (1.10)
	解析法2	170.1 (1.07)	258.9 (1.93)	701.2 (1.21)
G3	実験値	181.8 (1.00)	209.0 (1.00)	—
	解析法1	177.0 (0.97)	244.8 (1.17)	—
	解析法2	175.5 (0.97)	224.5 (1.07)	—
G4	実験値	157.3 (1.00)	134.9 (1.00)	597.7 (1.00)
	解析法1	174.0 (1.11)	271.2 (2.01)	670.0 (1.12)
	解析法2	160.8 (1.02)	234.0 (1.73)	701.8 (1.17)
G5	実験値	128.5 (1.00)	124.7 (1.00)	526.0 (1.00)
	解析法1	128.5 (1.00)	283.8 (2.28)	573.6 (1.09)
	解析法2	115.1 (0.90)	208.9 (1.68)	638.6 (1.21)
G6	実験値	191.9 (1.00)	134.6 (1.00)	566.4 (1.00)
	解析法1	192.0 (1.00)	185.7 (1.38)	579.3 (1.02)
	解析法2	189.3 (0.99)	188.2 (1.40)	617.0 (1.09)
GS1	実験値	91.1 (1.00)	74.5 (1.00)	305.4 (1.00)
	解析法1	113.0 (1.24)	138.9 (1.86)	538.3 (1.76)
	解析法2	84.9 (0.93)	76.0 (1.02)	343.9 (1.13)
GS2	実験値	112.3 (1.00)	72.2 (1.00)	301.2 (1.00)
	解析法1	137.0 (1.22)	159.0 (2.20)	562.5 (1.87)
	解析法2	113.1 (1.01)	83.7 (1.16)	394.2 (1.31)

※ ()内に示した値は、実験値を1.00とした場合の値である。

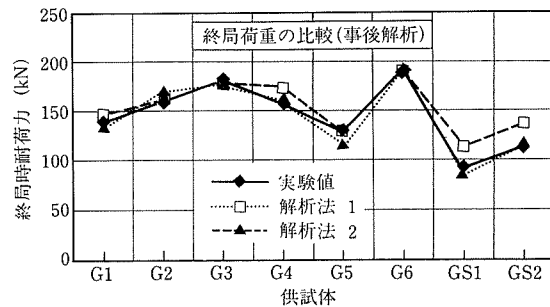
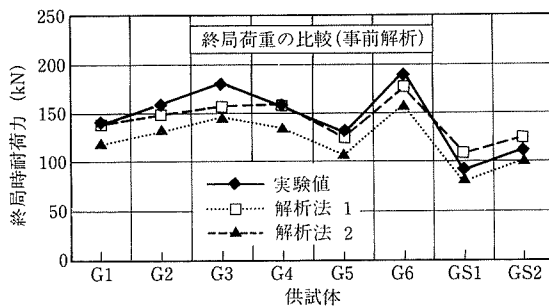


図-19 非線形解析結果と実験値との比較(終局時載荷荷重)

表-9 道示Ⅲ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力	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。

の計算上のせん断耐力は内ケーブル供試体と同じ値とした。また、コンクリートが負担できる平均せん断応力度の割増し係数 k 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示Ⅲ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。セグメント型供試体は、一体型供試体に比べ実験値と計算値との比率が小さくなった。

今回の実験では、外ケーブル供試体においても道示Ⅲ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。ただし、連続桁やラーメン橋などにおいても同様の傾

向を示すかどうかは実験的に確認しておらず、今後検討が必要であると考えられる。

4.3 設計に関するまとめ

平成10年度から2年間にわたり外ケーブルを適用したPC単純桁の載荷実験を実施し、それらの結果と道示Ⅲにより設計を行った場合との比較を行った。その結果をまとめると以下のとおりである。

- ① 設計荷重作用時の設計における、曲げおよびせん断に対する検討は、内ケーブル構造と同様の設計が可能であると考えられる。
- ② PC鋼材の増加応力度を載荷試験や非線形解析を用いて仮定する場合には、実験値や解析値に対し少なめの数値を用いるのが妥当であると考えられる。
- ③ 偏心減少量の影響を無視して破壊抵抗曲げモーメントを計算する場合、偏向部の配置は、部材の変形を考慮しPC鋼材の偏心減少量が少なくなるよう、適切な位置に適切な間隔で配置する必要がある。
- ④ 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示Ⅲに基づくせん断耐力に比べかなり安全側の値となった。

5. おわりに

外ケーブルを用いたPC桁の終局時に至るまでの挙動を確認するために、曲げとせん断に関する載荷実験を行った。その結果、外ケーブル構造の終局時の挙動は、ケーブル配置、偏向部設置間隔、配筋量などに大きく影響されること

が分かった。したがって、設計するにはこれらの影響を十分考慮する必要があると考えられる。

なお、平成12年度では、研究課題を決定するにあたり、外ケーブル橋の設計および施工実績のある各社にご協力いただきアンケートを実施した。その結果、設計施工上の課題の主な意見は以下の項目であった。

- 横桁、定着突起部、偏向部の設計方法および補強方法の確立
- 終局時の設計方法
- 外ケーブルの防食 等

この中では、外ケーブルの定着部の設計方法および補強方法の確立についての要望が最も多いものとなった。これを踏まえ平成12年度は、外ケーブルの定着部に関する研究を行うことに決定した。具体的には、定着部の設計方法や補強方法を決定するためのモデル供試体による実験やFEM解析による検証を行っている。また、その他の意見についてはできる限り検討を行い、「外ケーブル工法に関する設計施工指針(案)」に反映させていきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 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
- 2) 西川，内田，廣松，管谷：外ケーブル方式PCげたの曲げ載荷実験，第9回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp.553～558，1999
- 3) 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，1996.12
- 4) 首都高速道路公団，プレストレスト・コンクリート建設業協会：外ケーブルPC橋の設計手法に関する検討，1996.2

【2000年8月21日受付】