

◆ 報文 ◆

外ケーブルを適用したPCげたの曲げ・せん断挙動

西川和廣* 廣松 新** 伊藤公彦***

1. はじめに

外ケーブル工法は、部材の内部にPC鋼材を配置する内ケーブル工法に対し、PC鋼材を部材の外に配置する工法である。図-1に外ケーブル構造の概念図を示す。

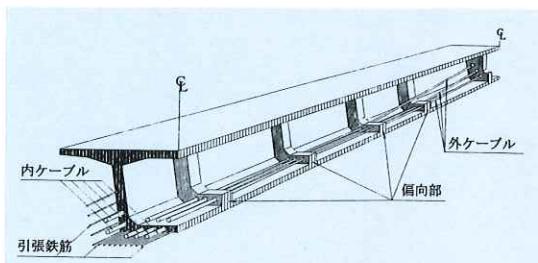


図-1 外ケーブル構造概念図

外ケーブル構造は、内ケーブル構造と比較して以下の利点がある。

- ・部材厚を薄くできることによる上部工の軽量化・部材内の鋼材が減ることによる施工性の改善
- ・PC鋼材を部材の外に配置するため、鋼・コンクリート複合構造等への適用が容易
- ・PC鋼材の点検が容易
- ・PC鋼材の取り換えや追加が可能 等

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。図-2に内ケーブルと外ケーブルの断面ひずみの比較を示す。

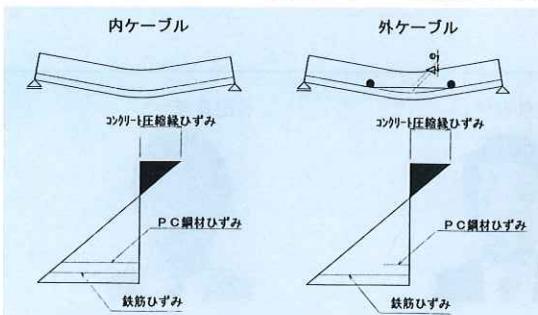


図-2 断面ひずみの比較

Bending and Shearing Test of Prestressed Concrete Beams with External Tendons.

図-2を見て分かるように外ケーブル構造は、内ケーブル構造に比べ断面のひずみ量に対するPC鋼材の增加ひずみ量が小さくなる。また、部材の変形に伴いPC鋼材の断面図心位置からの偏心距離が変化する。

しかし、これらが曲げやせん断性状に与える影響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、国土交通省土木研究所橋梁研究室と(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、外ケーブル工法に関する設計施工指針(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研究」をテーマとした共同研究を実施することとした。

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単純げたの曲げ破壊に至るまでの挙動を確認するため、供試体を8体製作し、曲げ破壊実験を実施した。

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。

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	3.0	4-D10	全内ケーブル
G4	100	0	3.0	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

①外ケーブル比率

外ケーブル構造の場合、終局時におけるPC鋼材の増加ひずみが内ケーブル構造に比べ小さくなるため、引張側の抵抗が少なくなり終局時の曲げ耐荷力は低下すると言われている。

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

偏向部は、外ケーブルを曲げる目的で配置されるものである。しかし、偏向部設置間隔を大きくした場合には、図-3に示すとおり、部材の変形に伴い断面団心位置からの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作製し、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、3m(S/L:偏向部設置間隔/支間長=0.4)としたS1と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、終局時の曲げ耐荷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:コンクリート断面積に対する引張鉄筋断面積の比率=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

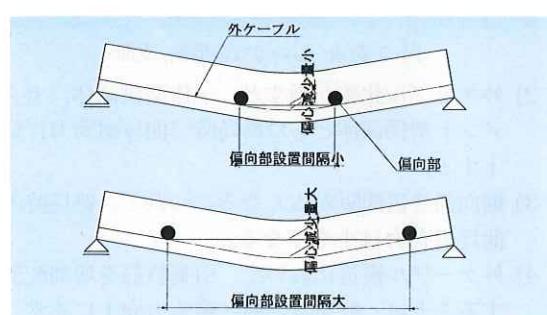


図-3 側向部設置間隔と偏心減少量の関係

は、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。セグメントの分割長は、0.5mを基本とし合計13ブロックに分割した。

2.3 供試体形状

図-4に供試体の形状寸法および配筋状態を示す。供試体は、けた高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、けた長を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 4600μ ($\sigma_p = 920N/mm^2$)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。

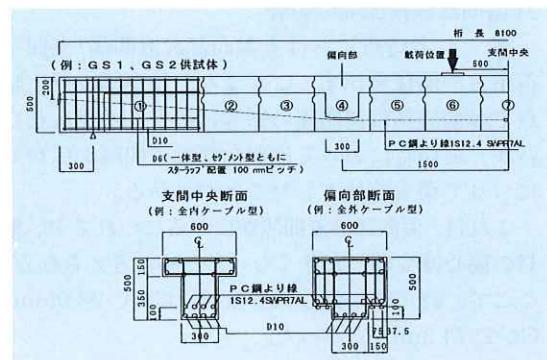


図-4 供試体形状寸法と配筋例 単位(mm)

2.4 使用材料

コンクリートは、設計基準強度 $40N/mm^2$ 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。

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、供試体がコンクリート上縁が圧縮破壊(以下曲げ破壊)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-5に各供試体の荷重と支間中央変位との関係を示す。図-5より、曲げひび割れ発生時における荷重および変位は、一体型供試体であるG1~G6においてほぼ等しいことがわかる。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、けたの挙動に対する外ケーブル比率、偏心部設置間隔、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 3500μ 時(以下終局時)での荷重は、G1の荷重を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。

以下に、終局時に至るまでの挙動を各実験因子毎に比較する。

(2) 各実験因子による影響

1) 外ケーブル比率の影響

図-6に終局時における外ケーブル比率と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につれて、終局時の荷重が低下したことがわかる。

2) 偏心部設置間隔の影響

図-7に各時点における偏心部設置間隔/支間と荷重との関係を示す。これより、ひび割れ発生時点では偏心部設置間隔の影響はほとんど見られないが、終局時においては偏心部設置間隔が広がるにつれて荷重が低下したことがわかる。

これは、偏心部設置間隔が広がるにつれてPC鋼材の偏心減少量が大きくなつたためと考えられる。ここで、終局時の偏心減少量は、G1で28.9mm、G5で74.3mmであった。

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の終局時における荷重は、G1の値を約38%上回った。

これより、引張鉄筋を増加配置する効果は、十分に確認された。

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、終局時における荷重は一体型供試体に比べ小さくなつた。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荷重を比較すると、セグメント型供試体の荷重は一体型供試体の65~70%であった。

2.7 曲げ破壊実験のまとめ

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、偏心部設置間隔、引張鉄筋量の影響は小さい。

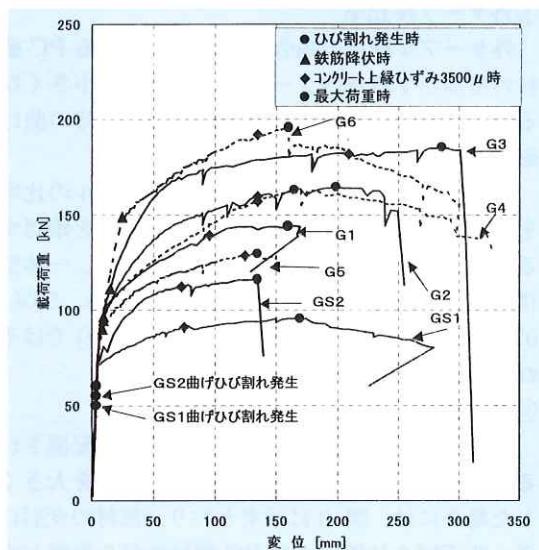


図-5 荷重-支間中央変位

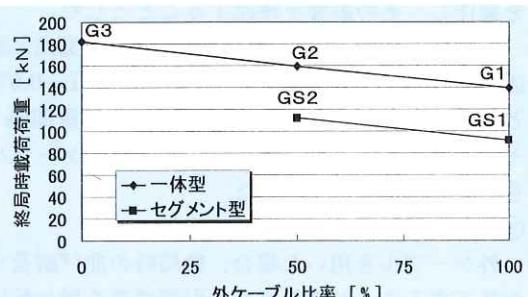


図-6 終局時載荷荷重-外ケーブル比率

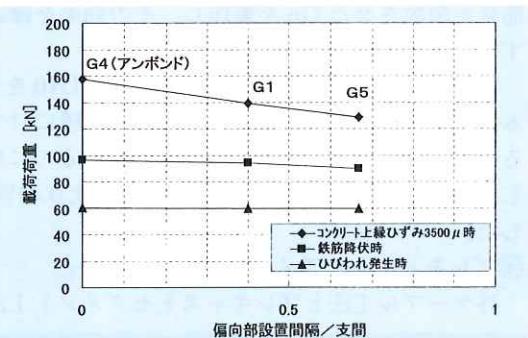


図-7 荷重-偏心部設置間隔/支間

- 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荷力は低下する。
- 3) 偏心部設置間隔が広くなるにつれて、終局時の曲げ耐荷力は小さくなる。
- 4) 外ケーブル構造において、引張鉄筋を増加配置することは、終局時の曲げ耐荷力向上に非常に有効であると考えられる。

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

表-2 に供試体の種類と実験因子の対応表を示す。

表-2 供試体一覧

供試体	ケーブル配置		制作方法		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

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る。

$$S = Sc + Ss + Sp \quad (1)$$

ここに、

S : せん断耐力

Sc : コンクリートが負担できるせん断力

Ss : スターラップが負担できるせん断力

Sp : プレストレスのせん断力作用方向分力

これらを考慮し、実験因子を決定した。なお、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。以下に各実験因子について説明する。

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。

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。

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。

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、けた高 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、けた長を 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 ($\sigma_p = 850 \text{ N/mm}^2$) 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。

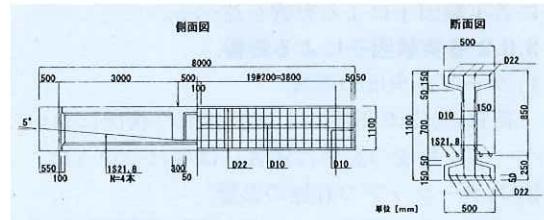


図-8 供試体形状寸法と配筋

3.4 使用材料

コンクリートの目標強度は 40N/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。

3.5 実験方法

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斜引張破壊・ウェブの圧縮破壊(以下せん断破壊)を起こし最大耐荷力が確認されるまで行った。

表-3 各時点での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		コンクリート上縁ひずみ3500μ時		最大荷重時		破壊形状
	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	変位 (mm)	荷重 (kN)	
S1	3.0	591	6.1	850	16.1	1,262	57.3	1,643	71.5	1,781	曲げ破壊
S2	2.8	551	6.4	849	17.4	1,350	50.3	1,831	55.4	1,850	せん断破壊
S3	3.1	578	5.8	806	14.6	1,163	51.7	1,594	51.7	1,594	曲げ破壊
S4	3.1	602	6.0	849	18.4	1,351	—	—	51.6	1,812	せん断破壊
S5	3.1	626	7.8	950	17.6	1,250	—	—	25.7	1,343	せん断破壊
S6	3.2	649	5.5	850	25.4	1,329	—	—	25.4	1,329	せん断破壊
S7	1.1	225	3.7	349	15.8	849	—	—	63.0	1,411	せん断破壊
S8	3.4	656	7.8	778	—	—	43.4	1,113	87.2	1,292	せん断破壊
S9	3.7	673	7.0	798	—	—	55.9	1,418	107.4	1,444	せん断破壊

3.6 実験結果と考察

3.6.1 実験結果の概要

表-3に各時点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-9、10には荷重と支間中央変位の関係を、図-11には荷重と外ケーブル增加ひずみの関係を示す。図-12には、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、一体型供試体においては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顕著な差は現れなかった。つぎに、各供試体での最大荷重は、S1の最大荷重を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。以下に各実験因子による影響を述べる。

3.6.2 各実験因子による影響

1) ケーブル角度の影響

荷重-変位の関係およびひび割れ状況においてケーブル角度の影響は顕著には現れなかった。

2) スターラップの有無の影響

スターラップの入ったS1が曲げ破壊したのに対し、スターラップの入っていないS5は、最外縁のせん断ひび割れが急速に進展し、斜引張破壊した。

S5の最大荷重は、S1に比べ25%小さくなかった。

3) プレストレスの有無の影響

プレストレスの入っていないS7の最大荷重は、S4に比べ小さくなり、最大荷重時における変位はS7の方が大きくなった。また、S7のせん断ひび割れは、45度に近い角度となりS4と比較して緩い角度となった。

4) プレキャストセグメントの影響

S8は、セグメント継目部に曲げひび割れが到達

した時点から以降、荷重-変位曲線の傾きが緩くなり変位が急激に増大した。また、ひび割れ本数が極端に少なく、最初に発生したせん断ひび割れのみが進展し破壊に至った。

S8の最大荷重は、S1に比べ28%小さくなかった。

5) ケーブル配置の影響

外ケーブル供試体のうちS1とS3は支間中央の曲げ破壊となった。しかし、それに対応する内ケーブル供試体であるS2、S4はせん断型の破壊となった。これは、引張鉄筋降伏後に外ケーブルひずみ増加量が大きくなり、せん断支間部分の曲げ応力が改善され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。

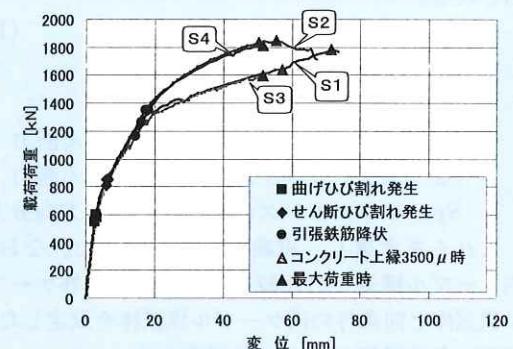


図-9 荷重-支間中央変位 (S1～S4)

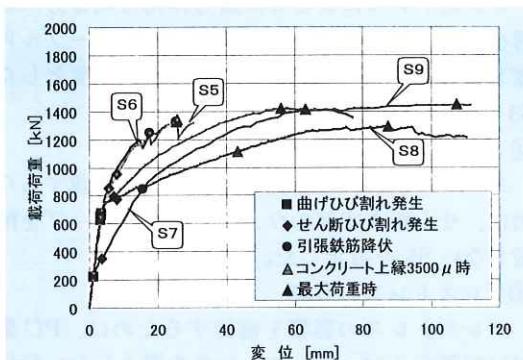


図-10 荷重-支間中央変位 (S5～S9)

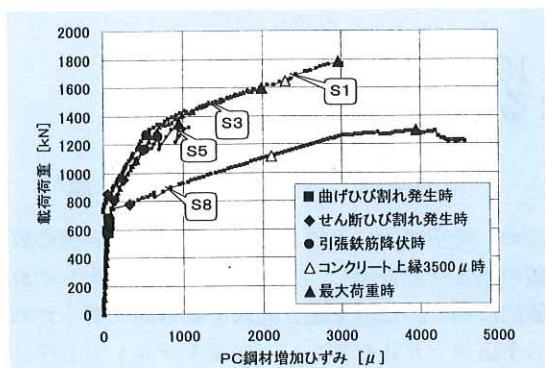


図-11 荷重-外ケーブル増加ひずみ

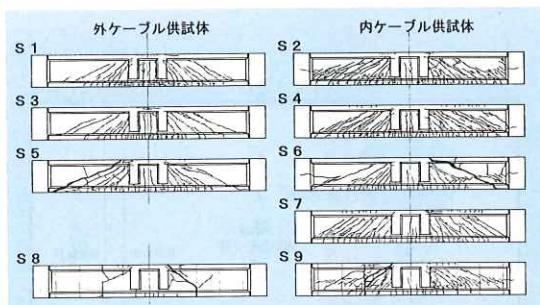


図-12 ひび割れ状況(実験終了時)

最大荷重も同等の値となった。これは、外ケーブルの増加ひずみが少ない段階で破壊したためと考えられる。

セグメント型供試体の最大荷重および最大荷重時における変位は内ケーブル供試体の方が大きくなつた。また、せん断ひび割れの分布に大きな差が出た。

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。

3.7 せん断破壊実験のまとめ

今回の実験により以下の知見が得られた。

- 1) 一体型供試体の場合、せん断ひび割れ発生時点までは、PC鋼材の増加ひずみの影響は小さく内ケーブル供試体と外ケーブル供試体と

の差はほとんどみられなかった。

- 2) 外ケーブル構造は、スターラップが適切に配置されていれば、外ケーブルの増加ひずみがせん断ひび割れの進展を抑制し、内ケーブル構造に比べせん断破壊しにくい構造であることが分かった。
- 3) 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. おわりに

外ケーブルを用いたPCげた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について、ケーブル配置、偏向部設置間隔、配筋量、製作方法などの影響を確認することが出来た。今後は、これらの実験結果を設計施工指針(案)に反映させていきたいと考えている。

最後に、平成12年度は、外ケーブル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おり、他の構造細目についても検討を行っている。

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), 1996.2
- 2) 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、第9回プレストレス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

西川和廣*



国土交通省国土技術政策総合研究所企画部評価研究官
Kazuhiro NISHIKAWA

廣松 新**



同道研究部橋梁研究室
研究官
Arata HIROMATSU

伊藤公彦***



(前) 国土交通省土木研究所構造
橋梁部橋梁研究室交流研究員
Kimihiko ITO