

論文 外ケーブル配置コンクリート桁のせん断特性に関する基礎検討

小林 薫^{*1}・鈴木 雄大^{*2}

要旨：外ケーブル構造は、新設のみならず既設構造物の補強工法のひとつとして検討される場合がある。外ケーブルを配置したコンクリート桁のせん断耐荷特性に着目した。本検討では、模型試験体による解析手法（3次元有限要素法）の妥当性の確認、確認された解析手法を用いて、外ケーブルの配置角度、外ケーブルの緊張力、外ケーブルの断面積を変化させた解析を行った。本検討で用いたコンクリート桁の諸元からは、外ケーブルの配置角度が大きく、かつ、外ケーブル断面積が大きいほど、せん断耐荷性能が向上することを示した。主ひずみの考察から、プレストレスによってひび割れ性状に違いが現れることを示した。

キーワード：外ケーブル、せん断耐力、3次元有限要素法

1. はじめに

スパンが 25m 程度を超えるコンクリート桁では、プレストレスコンクリート（以下「PC」という）構造とする場合が多い。PC 構造では、PC ケーブルの配置を断面内に配置する内ケーブル方式と断面の外に配置する外ケーブル方式がある。この中で、特に外ケーブル方式の PC 構造は、断面の外に PC ケーブルを配置することから、施工性の向上、PC ケーブルの維持管理が容易になることや、断面を薄くできることから構造物の軽量化などの利点がある。また、プレキャストセグメント構造と組み合わせることでさらに高品質になるとともに、現場での施工を省力化することが可能となり、工期短縮等が期待できる構造である。

外ケーブル PC 構造は、主として新設橋梁に用いられているが、既設橋梁の補強工法のひとつとして検討されている場合もある。例えば、塩害による劣化が PC 鋼材まで達し、大規模な断面修復が必要となる場合の性能回復を目指した研究¹⁾、過大な載荷履歴によりたわみやひび割れ傷害を受けたスラブを外ケーブルにより補強し再生することを狙った研究²⁾ などである。参考文献¹⁾、²⁾ は外ケーブルを緊張し、プレストレスを作用させることで曲げ性能の回復を目的とした研究となっている。外ケーブルによるせん断補強効果に関しては、せん断耐力が向上することを示す実験結果³⁾、外ケーブルのプレストレスによるせん断耐力向上を簡易的に算定する手法も提案されている⁴⁾。参考文献³⁾ では、外ケーブル併用のセグメント構造について検討が行われ、せん断耐力の向上を実験的に確認している。参考文献⁴⁾ は、外ケーブルの配置角度を変化させた場合のせん断耐力への検討が行われ、簡易算定法と 2次元 FEM 解析で外ケーブルの作用力を外力として与えても比較的精度よく実験結果を評価できることが示されている。

外ケーブルに関する既往の研究は、外ケーブルを緊張し、プレストレスを導入した PC 構造で検討が行われている。

既設橋梁を外ケーブルを用いた補強を考えた場合、所要の PC 鋼材の設置だけで性能が満足できれば、プレストレス導入作業が省略でき、補強工事の簡素化に寄与できると考えられる。

本研究は、外ケーブルを配置した RC 桁のせん断耐荷特性に着目した。検討対象構造は、RC 桁に外ケーブルを配置しただけの RC 構造と外ケーブルに緊張力を付与した場合の PC 構造についてである。検討方法としては、RC 桁構造と RC 桁に外ケーブルを配置した模型試験体 2 体での載荷実験を行った。実験結果を 3次元有限要素法を用いて検討を行い、解析手法の妥当性を検証した。その後、検証した解析モデルを用いて、外ケーブルの緊張力、配置角度、外ケーブル断面積を変化させた解析から、外ケーブルを配置した RC 桁のせん断特性について検討を行った。

2. 解析手法の妥当性確認実験の概要

本検討に用いる解析手法の妥当性について、模型試験体による載荷実験結果から検証を行う。実験概要、実験結果を以下に述べる。

2.1 試験体概要

図-1 (a) (b) に試験体の形状寸法を示す。また、試験体の諸元を表-1 に示す。実験に用いた試験体の断面は、桁端部の外ケーブル定着部を矩形断面、支点間は T 形断面とした。試験体の支間長は 4100mm とした。試験体の断面内には、曲げ耐力を増大させ、せん断破壊が生じるように、異形 PC 鋼棒 D25 を主鉄筋として試験体下縁から 50mm の位置に 1 本配置した。上フランジ部は、圧縮

*1 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 課長 博(工) (正会員)

*2 東日本旅客鉄道（株）JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主席 (正会員)

表－1 試験体諸元

試験体	スパン(mm)	桁高(mm)	フランジ幅(mm)	フランジ厚(mm)	ウェブ幅(mm)	外ケーブル有無	コンクリート強度(N/mm ²)	せん断補強鉄筋	フランジ軸方向鉄筋	プレストレス量(kN/本)
No2	4100	550	350	150	80	無	48.3	D6(SD295A)	D13(SD345)	—
No5	4100	550	350	150	80	有	47.7	D6(SD295A)	D13(SD345)	100

鉄筋として SD295A 異形鉄筋 D13 を 4 本配置した。

No2 試験体は、試験体の基本特性を確認するために RC 構造としたもので、外ケーブルは配置していない。主鉄筋を配置し、せん断破壊を誘導するせん断スパン側にせん断補強鉄筋は配置していない。

No5 試験体は、No2 試験体と同じ配筋とし、試験体中央位置付近において、試験体下縁から 50mm の位置に外ケーブルを配置した。荷重載荷点近傍に偏向部を設け曲げ上げ配置とした。外ケーブルの配置角度は 8.86° となっている。外ケーブルには、φ32mm の PC 鋼棒を使用した。PC 鋼棒の規格は、SBPR 930/1080B 種 1 号である。

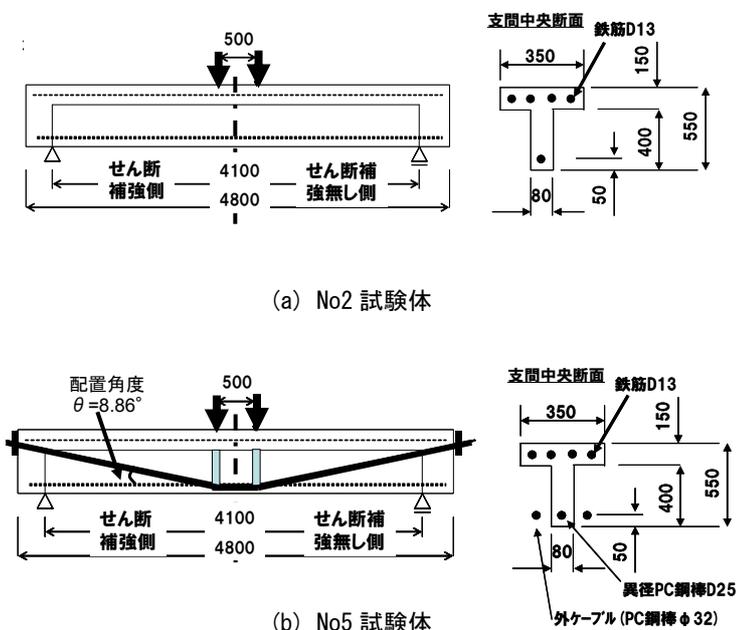
No5 試験体は外ケーブルに緊張力を与えた PC 構造として実験を行った。外ケーブルの緊張力は PC 鋼棒 1 本当たり 100 kN で、試験体には合計 200kN のプレストレスが導入されるようにした。

コンクリートについては、設計基準強度を 50N/mm² とした。また、試験体のせん断補強鉄筋は、試験体中央から固定側支点までをせん断補強鉄筋 D6 (SD295A) 2 本を 125mm ピッチで配置した補強側とし、試験体中央から可動側支点までをせん断補強鉄筋を配置しない無補強側とし、せん断破壊しやすいように考慮した。

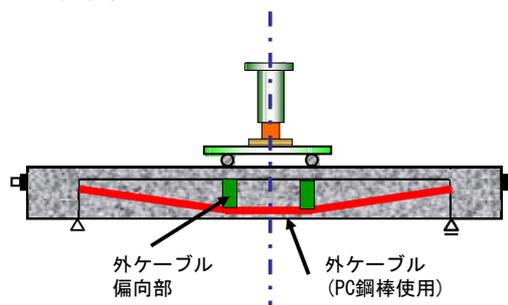
2.2 荷重方法

荷重状況の略図を図－2 に示す。外ケーブル PC 構造の No5 試験体の荷重手順は、試験体を試験装置にセット後、外ケーブルの緊張作業を行った。外ケーブルの緊張作業は、外ケーブルに貼り付けたひずみゲージのひずみ測定値を逐次確認しながら、所定の緊張力を導入した。外ケーブルの定着はナット定着となるので、緊張力開放後のプレストレスの減少分をあらかじめ考慮して初期導入力を決めた。プレストレス導入後、直ちに荷重板をセットし、試験体に荷重を載荷した。これは、荷重実験結果にプレストレス導入に伴うコンクリートのクリープや PC 鋼棒のリラクゼーションなどによる PC 鋼棒の応力変動を生じないようにするためである。

試験体への荷重は、油圧アクチュエータにより静的に



図－1 試験体形状寸法



図－2 荷重状況の略図

2点荷重を行った。荷重ステップは、曲げひび割れ発生が確認されるまでを 5kN ピッチとし、曲げひび割れ発生が確認された後、荷重を一旦 10kN 程度まで除荷し、その後 10kN ピッチで破壊まで荷重した。曲げひび割れ後、一旦荷重を低減させた目的は、荷重板や支点などのなじみと荷重板や支点などに異常がないかを確認するためである。

荷重実験時の試験体の支承構造は、鋼製ヒンジの上に幅 100mm、厚さ 20mm の鋼板を置き、鋼板上に試験体が載るようにした。なお、可動側の支点には試験体と支点用鋼板との間に厚さ 1mm のテフロン板を 2 枚挿入し、滑る構造とした。なお、2点荷重点内の等曲げモーメント区間を 500mm とし、荷重板には幅が 50mm、厚さが 50mm の鋼板を用いた。なお、実験では、荷重点の荷重、変位、主鉄筋ひずみ、外ケーブルひずみを計測した。

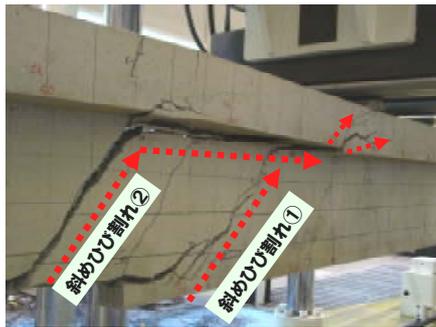


写真-1 No2 試験体の破壊状況



写真-2 No5 試験体の破壊状況

2.3 実験結果（破壊状況）

試験体の破壊状況について述べる。写真-1～2に、各試験体の破壊状況を示す。No2 試験体は、RC 構造とした基本の試験体である。載荷荷重が 28 kN において、支間中央付近に曲げひび割れが発生した。その後、曲げひび割れが 200mm 前後の間隔で発生した。載荷荷重が 70kN 時に、支間中央部付近の曲げひび割れが上フランジ下端付近まで進展した。載荷荷重が 80kN 時に、破壊側支点から 600mm 付近に発生し、支点から 800mm まで進展した斜めひび割れ幅が大きく開き載荷荷重が 50kN 付近まで低下した。さらに載荷を続けると荷重は増加した。載荷荷重が 112kN に到達後、急激な荷重低下となった。破壊状況としては、ウェブにふたつの大きな斜めひび割れが発生した。斜めひび割れ①は、支点から 1200mm 付近の曲げひび割れが斜めひび割れに進展し、支点から 1500mm の位置でフランジ下まで発生した。斜めひび割れ②は、支点から 800mm 付近から発生し、支点 1000mm 付近でフランジ下に到達した。その後、フランジ下を載荷点方向に進展した。支点から 1500mm 位置で斜めひび割れ①と②がフランジ下で合流した。破壊側載荷近傍のひび割れの状況は、フランジ内に発生したひび割れが載荷点方向に向かうひび割れとフランジ内を等曲げ区間方向に向かうひび割れに分かれた。載荷板までのせん断スパン内のひび割れ幅は大きく数 mm 程度のものがあった。載荷点を越え等曲げ区間に進展したひび割れ幅は、1mm 程度となっていた。また、支点近傍では主鉄筋に沿うようにひび割れが発生し、かぶりコンクリートの一部が剥落した。

No5 試験体は、No2 試験体と同じ配筋で外ケーブルを曲げ上げ配置とした PC 構造の試験体である。最初の曲げひび割れは、載荷荷重が 155kN 時に支間中央付近で発生した。斜めひび割れの発生は、載荷荷重が 200kN 程度となったとき、中央から支点方向に 700mm 付近に発生した曲げひび割れが桁下縁から 300mm 程度の高さのから載荷点方向に進展方向を変えた。載荷荷重が 240kN 時

に主鉄筋に沿ったひび割れが発生した。載荷荷重が 320kN 時には、主鉄筋に沿ったひび割れが支点付近まで進展した。載荷荷重が 440kN 時には、無補強側のせん断スパン中央付近から載荷点に向かう斜めひび割れ幅が大きくなった。さらに載荷を続けたところ、無補強側のウェブのひび割れが大きく開いてきたところ、突然、補強側にせん断スパン中央付近と載荷点を結ぶ斜めひび割れが発生し、載荷点付近のコンクリートが圧壊し、荷重が急激に低下し耐荷性能を失った。圧縮側コンクリートの圧壊とほぼ同時にせん断破壊となったことから、せん断圧縮破壊が生じたものと考えられる。

破壊直前まで、無補強側の斜めひび割れが大きく開き、破壊直前に補強側に破壊領域が移行した理由としては、無補強側の主鉄筋位置のコンクリートに主鉄筋に沿うように発生した割裂ひび割れにより、主鉄筋の付着力が低下しアンボンドに近い状態となったことで、ウェブコンクリートへの応力伝達が低下し、見掛け上せん断耐力が向上したためせん断補強鉄筋により付着の大きい補強側に破壊が移行したものと考えられる。

3. 確認実験結果を用いた解析手法の検証概要

3.1 適用解析手法の概要

外ケーブルが RC 桁のせん断特性に及ぼす影響について、解析的に検討を行うため、解析手法の適用性を実験結果と比較することで行う。適用した解析手法は、3次元の非線形有限要素法である。検討対象の構造は、RC 桁断面は T 形で、外ケーブルが配置されている。桁に荷重が載荷されると桁が変形し、発生応力は RC 桁部と外ケーブルが相互に影響を及ぼすことになる。このため、全体挙動を適切に評価するためには、構造全体をモデル化する必要があると考えられることから、3次元非線形有限要素法を用いることにした。解析に適用した構成則は、東京大学コンクリート研究室で開発された任意の載荷経路依存性を考慮した材料構成モデルに基づく RC 平面モデル⁵⁾を3次元に拡張したものである。本解析手

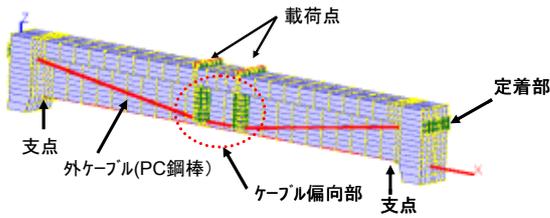


図-3 全体系解析モデル

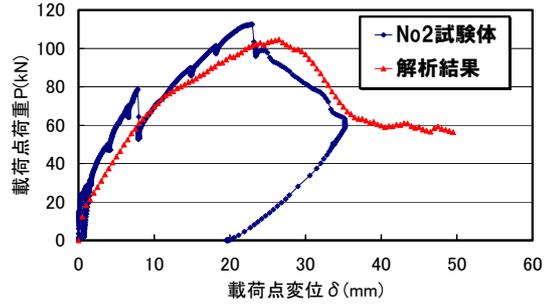
法には、多くの適用例があるが、代表例としては常時偏心軸力を受ける RC 柱の交番載荷実験での検証事例⁶⁾などがあげられる。

3.2 実験結果の解析的検討

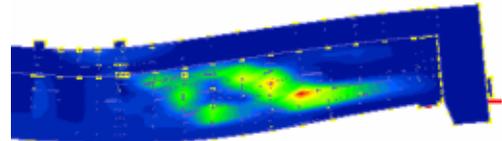
解析手法の適用性を検討するため、実験結果の解析的な評価を行った。外ケーブルを配置した No5 試験体に適用した解析モデルを図-3に示す。解析モデルは、試験体全体を 3次元で表現した。No5 試験体は、曲上げ配置した外ケーブルに緊張力を与えた PC 構造であるため、No5 試験体での解析は、実験手順を再現する解析ステップとした。No5 試験体の解析では、最初に数ステップの計算で外ケーブルに設定した緊張力を作用させ、RC 桁にプレストレスを導入した。プレストレス導入時点の RC 桁部の内部応力は載荷状態に引き継ぐようにし、載荷点に強制変位を与えることにより載荷した。実験結果と解析結果の比較として、載荷荷重と載荷点変位の関係と解析の主ひずみの分布を、図-4 (a) (b)に No2 試験体、図-5 (a) (b)に No5 試験体を示す。図-5 (a)の No5 試験体の解析結果には、試験体と同様にせん断補強鉄筋の有無による補強側と無補強側を設定した解析モデルと RC 桁部全長にせん断補強鉄筋を配置した解析モデルでの解析結果を示した。No5 試験体の実験が、補強側で破壊したため、解析結果も試験体全長にせん断補強鉄筋を配置した解析モデルの方が実験結果との整合性は良かった。No2 試験体の解析結果も実験値と良好な対応を示した。

以上の結果から、本解析手法は、本試験体の構造諸元のせん断破壊挙動を適切に評価できるものとする。よって、次章では、No5 試験体の解析モデルにおいて、外ケーブルの諸元を変化させた解析から、外ケーブルを配置した RC 桁のせん断特性に関する検討を行う。なお、パラメータ解析に用いる解析モデルでは、試験体と同様にせん断補強を配置した区間と配置していない区間を設定した。これは、破壊領域を特定し、破壊モードをせん断破壊とすることで外ケーブルの諸元によるせん断特性の影響をより鮮明にすることを狙ったためである。

4. 外ケーブルがせん断特性に及ぼす影響の検討

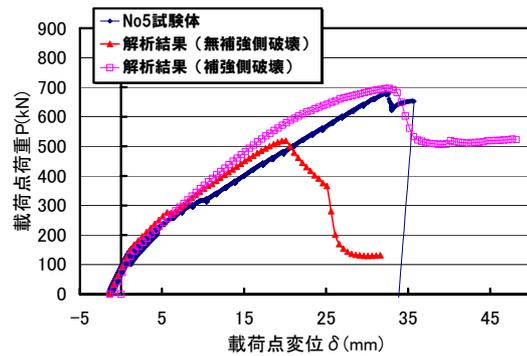


(a) 載荷点での荷重・変位関係

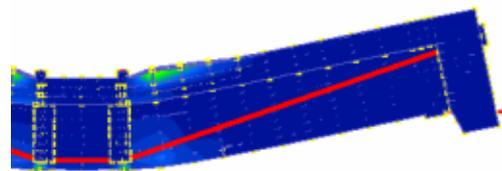


(b) 主ひずみ分布 (変形: 10 倍に拡大)

図-4 No2 試験体の解析結果



(a) 載荷点での荷重・変位関係



(b) 主ひずみ分布 (変形: 10 倍に拡大)

図-5 No5 試験体の解析結果

表-2 解析モデルに設定したパラメーター範囲

外ケーブル配置角度 θ (°)	プレストレス量 (PC鋼棒緊張力) (kN/本)	外ケーブル断面積 A_p (mm ²)
0.0	0.0	132.7 ($\phi 13$)
1.31	50.0	415.5 ($\phi 23$)
5.24	100.0	804.2 ($\phi 32$)
8.86	150.0	
	200.0	

3次元有限要素解析を用いて、基本 RC 桁に外ケーブルを設置した場合のせん断特性に及ぼす影響の検討を行った。解析的に設定したパラメーターは、外ケーブルの配置角度、外ケーブルに導入する緊張力(プレストレス量)、

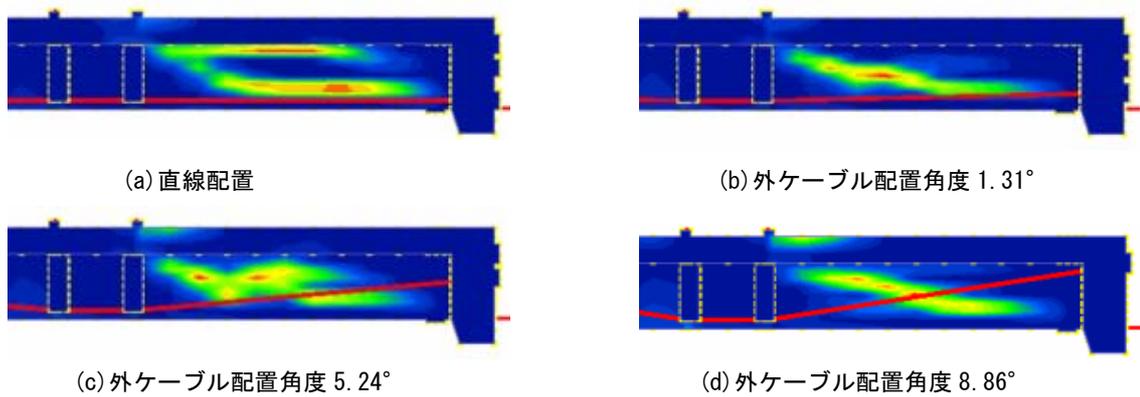


図-6 外ケーブルφ32配置(プレストレスなし)RC桁のせん断耐力時点の主ひずみ状況(せん断補強なし側)

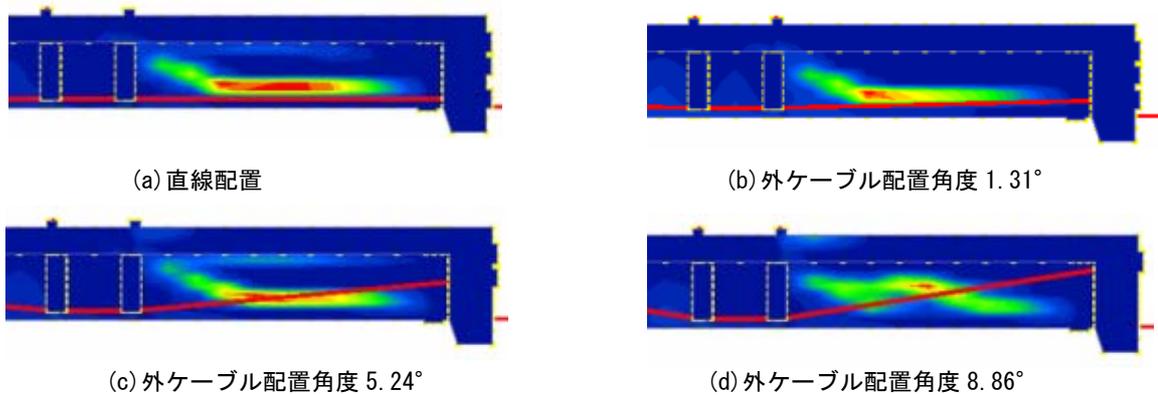


図-7 外ケーブルφ32配置(プレストレス PC 鋼棒 100kN/本) PC 桁のせん断耐力時点の主ひずみ状況(せん断補強なし側)

外ケーブルの断面積(PC鋼棒の直径を変化)である。表-2に、解析モデルに設定したパラメータを示す。解析モデルの諸元については、No5試験体の解析モデルにおいて、外ケーブルだけを上記のパラメータ毎に変更し、解析を実施した。以下に検討結果を述べる。

4.1 破壊性状(ウェブのせん断ひび割れ状況)

最大荷重時の主ひずみの発生状況から、外ケーブルを配置したRC桁のせん断耐力時点でのウェブひび割れ発生状況を考察する。図-6(a)~(d)は、外ケーブルを配置し、プレストレスを導入していない場合である。図-7(a)~(d)は、外ケーブルに1本あたり100kNの緊張力を導入した場合である。

外ケーブルの緊張力によるウェブのせん断ひび割れは、直線配置している場合に顕著な違いが見られた。緊張力を導入していない場合(図-6(a))は、荷重点から45°方向のひび割れが主鉄筋に沿うひび割れとフランジ下を支点方向に伸びるひび割れの発生が見られる。プレストレスを導入した場合(図-7(a))では、フランジ下のひび割れが抑制されている。

4.2 外ケーブルの配置角度と外ケーブル断面積(PC鋼棒

直径)がせん断耐荷特性に与える影響の検討

図-8(a)~(c)に、外ケーブルを配置し、プレストレスを導入していない場合の荷重点の荷重と変位の関係を示す。外ケーブルにPC鋼棒φ13を使用した場合(図-8(a))は、RC桁よりはせん断耐力の向上が見られるものの顕著な効果は見られない。一方、外ケーブルにPC鋼棒φ32を使用した場合(図-8(c))は、配置角度が大きくなるとせん断耐力の向上効果が顕著に現れており、本検討の試験体レベルの桁諸元において配置角度(θ)を8.86°とした場合は、基本のRC桁の2.5倍程度までせん断耐力が向上している。

図-9は、外ケーブルにPC鋼棒φ32、外ケーブルに1本あたり100kNの緊張力を導入した場合の荷重点の荷重と変位の関係を示したものである。外ケーブルを配置しプレストレスを与えた構造の初期曲げ剛性はほぼ同じで、基本のRC桁構造よりは向上している。外ケーブルにPC鋼棒φ32、外ケーブル配置角度が8.86°の場合、プレストレスを導入していない場合に対して(図-8(c))、外ケーブル1本あたり100kN緊張した場合を比較すると、せん断耐力の増加は微増であった。

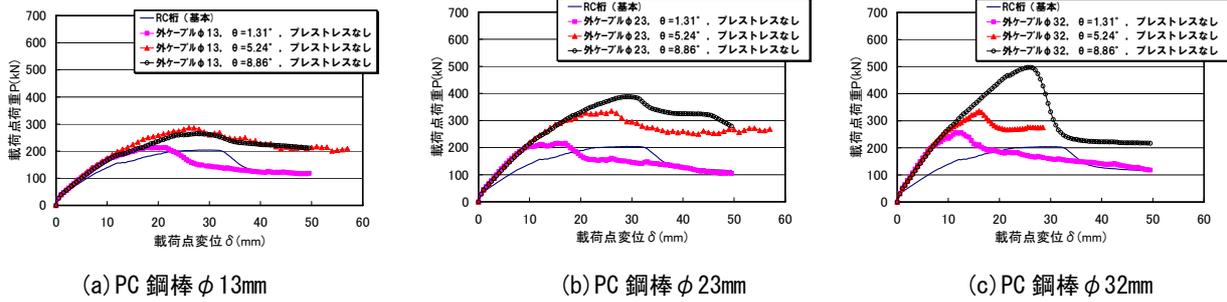


図-8 外ケーブル(プレストレスなし)配置時のRC桁の外ケーブル径による荷重・変位関係

外ケーブルの緊張力を1本あたり100kNとし、外ケーブルの配置角度を 1.31° 、 5.24° 、 8.86° 、外ケーブルの断面積を変化させるため、PC鋼棒の直径を $\phi 13$ 、 $\phi 23$ 、 $\phi 32$ とした場合の検討を行った。検討結果を図-10に示す。図-10のX軸はPC鋼棒の直径(mm)、Y軸はせん断耐力である。

図-10からは、外ケーブルの配置角度が 1.31° と小さい場合、設定した外ケーブルの断面積(PC鋼棒の直径)ではせん断耐力にほとんど影響がない。外ケーブルの配置角度を 8.86° の場合、PC鋼棒が $\phi 13\text{mm}$ の場合のせん断耐力の向上効果は小さい。 $\phi 23\text{mm}$ の場合、配置角度 5.24° と 8.86° とはほぼ同じせん断耐力となり、 $\phi 32\text{mm}$ の場合には外ケーブルの配置角度が大きくなるにつれせん断耐力の増加が顕著に現れていた。

5. まとめ

外ケーブルを配置したRC桁のせん断特性について、3次元有限要素解析からの検討結果を以下に示す。

- (1) 解析手法(3次元有限要素法)の検証を2体の模形試験体の実験結果から行った。その結果、外ケーブルを配置し、外ケーブルに緊張力を与えた場合、T形断面のRC桁のせん断耐力を適切に評価していた。
- (2) 外ケーブルを直線配置しプレストレスが導入されていない場合、ウェブ下にせん断ひび割れの発生が見られるが、プレストレスを導入するとウェブ下のせん断ひび割れの発生が抑制された。
- (3) 本試験体レベルの形状寸法となるRC桁に外ケーブルを配置する場合、外ケーブルの断面寸法、外ケーブルの配置角度、外ケーブルの導入緊張力によって、せん断耐力は影響を受ける。

参考文献

- 1) 三加崇, 渡辺博志, 中村定明, 中田順憲: 断面修復および外ケーブル補強を実施したPC桁に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.29, No.3, pp.1555-1560, 2007.7
- 2) 森廣和幸, 上田正生, 越川武晃, 菊池優: PC外ケー

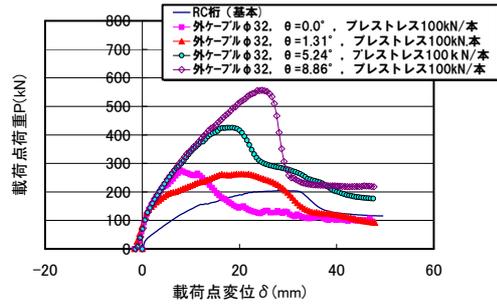


図-9 外ケーブル配置(プレストレス PC 鋼棒 100kN/本)PC桁の荷重・変位関係

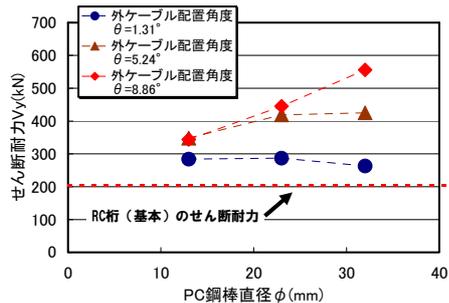


図-10 外ケーブル配置(プレストレス PC 鋼棒 100kN/本)PC桁のケーブル径とせん断耐力の関係

ブルによる既存RCスラブの補強工法について、コンクリート工学年次論文, Vol.28, No.2, pp.493-498, 2006.7

- 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, pp.83-96, 1997.1
- 4) 新津正義, 睦好宏史, 佐野正, 殿川康一: 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, pp.949-954, 1999.7
- 5) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5
- 6) 土屋智, 津野和宏, 前川宏一: 常時偏心軸力と交番ねじり・曲げ/せん断力を複合荷重したRC柱の非線形三次元有限要素立体解析, 土木学会論文集, No.683, V-52, pp.131-143, 2001.8