

論文 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

新津正義*1・睦好宏史*2・佐野正*3・殿川康一*4

要旨：外ケーブルによるせん断補強効果を明らかにするため、外ケーブル式PC梁のケーブルの配置角度を要因に載荷実験を行った。また外ケーブルによるプレストレスを外力としてモデル化を行い、二次元有限要素法により解析的にせん断補強効果を求め、実験値との比較から解析の妥当性について検討を行った。以上の結果をもとに、既往のせん断耐力算定式の外ケーブル式PCに対する適用性を確認した。

キーワード：外ケーブル, 補強, せん断耐力, ケーブル配置角度, 二次元有限要素法

1. はじめに

外ケーブルPC工法はPC鋼より線をコンクリート部材断面外に配置するため、内ケーブル式に比べ施工性の向上、ケーブルの維持管理が容易、構造物の軽量化等の利点が挙げられる。このため新設橋梁に採用されるほか、既設橋梁への補強工法としても用いられている。

しかしながら外ケーブル式PC構造物の力学的性状は未だ不明な点も多く、設計手法も十分に確立されていない。現在、外ケーブル構造の耐荷力に関する研究が進んではきたが、主に曲

げに関する研究に重点が置かれている。外ケーブルによりプレストレスを導入する事により部材のせん断耐力も増加することが知られているが、せん断補強を行った場合、どの程度のせん断耐力の向上が見込めるかなどは十分に明らかにされていない¹⁾²⁾³⁾。外ケーブルPC工法により補強を行う場合、曲げ耐力のみならずせん断耐力についても定量的にとらえておくことが重要である。

本研究では、ケーブルの配置角度を要因として、外ケーブルによりプレストレスを導入した

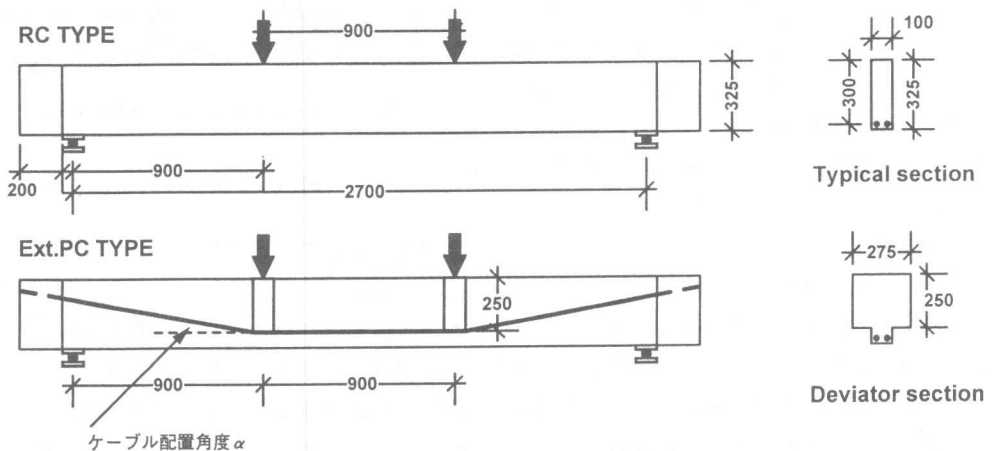


図-1 供試体の形状寸法(mm)

*1 東日本旅客鉄道(株) 工修(正会員)
 *2 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)
 *3 ショーボンド建設(株) 工(博)(正会員)
 *4 埼玉大学 工学部建設工学科

鉄筋コンクリート梁の荷重実験を行った。また二次元有限要素法解析を行い、せん断補強効果を明らかにした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体の形状寸法を図-1に示す。外ケーブルによるせん断補強効果を明らかにするためにせん断補強筋は用いていない。供試体は矩形断面を持つ支間長 270cm の鉄筋コンクリート梁で、主鉄筋として異形鉄筋 D22 を2本配置し、圧縮側に D10 を2本配置した。外ケーブルには SWPR7Aφ12.4 を2本用い、荷重位置断面でデビエーターにより曲げ上げ配置した。コンクリートの平均圧縮強度は 38.8MPa であった。使用鋼材の力学的性質を表-1に示す。

2.2 実験要因

実験要因を表-2に示す。No.1 は外ケーブルを有しないRC供試体である。No.2~No.4の供試体については、No.1のRC供試体と同じ配筋とし、荷重位置にデビエーターを設けている。No.2は外ケーブルを直線配置しプレストレスを導入した。No.3,4の供試体は偏向部において、外ケーブルを曲げ上げ配置している。プレストレスの導入量はすべての外ケーブルにおいて一律、降伏強度の約50%となる137kNとした。荷重方法は油圧ジャッキによる静的2点荷重、せん断スパン-主鉄筋有効高さ比 (a/d) が3.0となるよう荷重スパンを90cmとした。

3. 実験結果

3.1 ひび割れ性状

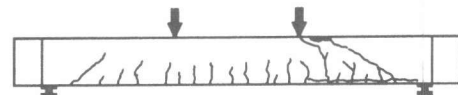
破壊時のひび割れ性状を図-2に示す。いずれの供試体もスパン中央付近に曲げひび割れが発生した後、せん断スパン内のウェブ中央付近から大きな斜めひび割れが発生し荷重が低下した。また、主鉄筋に沿って支点から斜めひび割れまで大きなひび割れが見られた。せん断スパン内のひび割れ分布はプレストレスを導入したことにより No.1 の供試体に比べ、No.2 の供試体のひび割れの分散が抑制されている。しかし、

表-1 鋼材の力学的性質

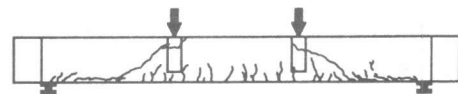
| 種類 | 降伏強度 (MPa) | 引張強度 (MPa) | 弾性係数 (MPa) |
|-------------|------------|------------|--------------------|
| D10 | 368 | 515 | 2.01×10^5 |
| D22 | 392 | 608 | 1.99×10^5 |
| SWPR7Aφ12.4 | 1610 | 1750 | 1.90×10^5 |

表-2 実験要因

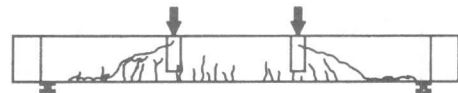
| No. | 構造形式 | 導入PS (kN) | ケーブル曲げ上げ角度 | コンクリート強度 (MPa) |
|------|--------|-----------|------------|----------------|
| No.1 | RC | - | - | 37.6 |
| No.2 | Ext.PC | 137 | 0 | 38.1 |
| No.3 | Ext.PC | 137 | 5 | 39.0 |
| No.4 | Ext.PC | 137 | 10 | 40.5 |



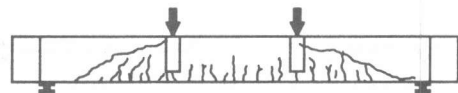
No.1 : RC 供試体



No.2 : 外ケーブル補強 (直線配置)



No.3 : 外ケーブル補強 (曲げ上げ角度5度)



No.4 : 外ケーブル補強 (曲げ上げ角度10度)

図-2 ひび割れ状況

曲げ上げ角度が大きくなるにつれ、ひび割れは広く分散している。スパン中央での曲げひび割れ発生荷重はプレストレスを導入することによりいずれの供試体でも著しく大きくなっている。曲げ上げ角度を変化させた場合、せん断ひび割れが発生するまではひび割れ性状に大きな違いは見られなかった。しかし、せん断ひび割れが生じる場合、ひび割れの角度に大きな違いが見られた。せん断ひび割れの到達点は荷重板の下部付近ですべての供試体において同様であったが、ケーブルの曲げ上げ角度が大きくなるにつ

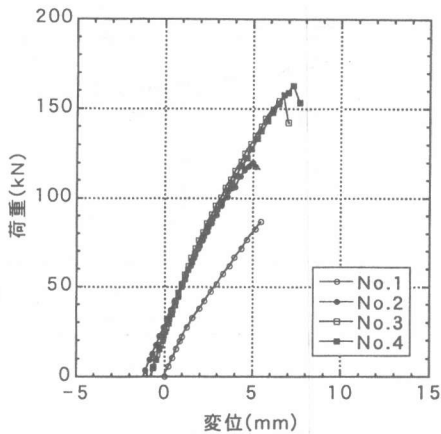


図-3 荷重-変位関係

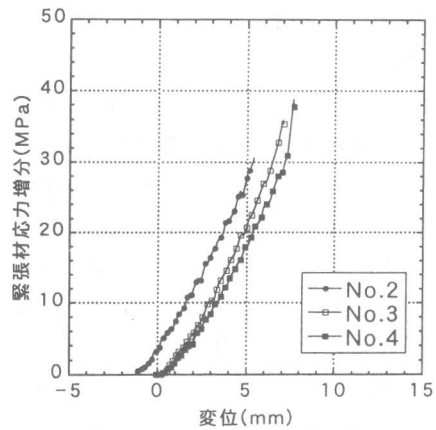


図-4 緊張材応力増分-変位関係

表-3 実験結果

| 供試体 No. | 曲げひび割れ発生荷重(kN) | 最大鉄筋ひずみ | 最大緊張材ひずみ | 緊張材応力増分(MPa) | せん断耐力(kN) |
|---------|----------------|---------|----------|--------------|-----------|
| No.1 | 24.5 | 1148 | - | - | 86.6 |
| No.2 | 63.8 | 855 | 3844 | 61.2 | 120.0 |
| No.3 | 58.9 | 1022 | 4096 | 70.7 | 156.1 |
| No.4 | 58.9 | 1197 | 4384 | 101.3 | 162.8 |

れ、斜めひび割れの発生箇所が支点に近くなり、さらにせん断ひび割れの角度が小さくなっている。これはケーブルに曲げ上げ角度をつけることによってコンクリートに作用する応力状態が変化することによるものと思われる。

3. 2 破壊性状

表-3に各供試体の実験結果を示す。いずれの供試体も主鉄筋の最大ひずみは1000 μ 程度かそれ以下で降伏はしていない。また破壊形式は、せん断ひび割れが急激に進展し、荷重点近傍のより上端部に達して、耐力が急落した。各供試体の荷重変位曲線を図-3に、図-4に緊張材の応力増分と変位の関係を示す。緊張材の応力増分は曲げ上げ角度の違いによって多少異なり、No.2,3,4の供試体でそれぞれプレストレス導入直後の緊張材応力の約8,10,11%増となった。しかしながら、No.2~No.4いずれの供試体においてもせん断破壊が生じたため、曲げ破壊をする場合に比べてに比べて部材の変形量が非常に少なく、応力の増分は非常に少ない。

3. 3 外ケーブルのせん断補強効果

外ケーブルによるプレストレスの導入がせん断耐力に及ぼす影響について、No.1の供試体と他の供試体を比較する。図-3からも明らか

のように、プレストレスを導入することによって剛性が大きくなり、せん断耐力は大幅に増加している。ケーブルの曲げ上げ角度の違いによる剛性の違いはほとんど認められない。ケーブルを直線配置をしたNo.2の場合では、終局変位はRC供試体とほぼ同じであった。またせん断スパン内でケーブルに曲げ上げ角度をつけることにより、終局変位が増大し、せん断耐力も上昇することが確認された。曲げ上げ角度が大きいほどせん断補強効果は大きくなると言える。これは、ケーブルに角度をつけたことにより生じる軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分がせん断力をうち消す働きをするからである。支間中央でのケーブル有効高さは各供試体とも同じであり、曲げ耐力に大きな相違はない。これらのことから、偏向部での摩擦やケーブルの定着に問題が生じない限り、ケーブルを曲げ上げて配置することがせん断補強に関しては効率が非常に高い。しかしながら、今回のようにa/dが3.0の梁では定着部が部材断面の上部になりすぎ、うまく定着ができないといった問題や、偏向部での摩擦が大きくなるといった問題から曲げ上げ角度が10度程度が限界であると考えられる。

4. 解析による検討

4.1 解析概要

外ケーブルによりプレストレスを導入したことによるせん断補強効果の変化を解析的にとらえるために、8節点アイソパラメトリック要素を用いた二次元有限要素解析により検討を行った⁴⁾。本解析手法を外ケーブル式PC梁部材に用いるために、外ケーブルによるプレストレスはすべて外力として扱い、定着部、偏向部の位置に当たる節点に外的荷重として与えている。外ケーブルを曲げ上げ配置した事による斜め方向のプレストレスは、各節点で部材軸に対し鉛直方向成分、水平方向成分に分解して梁に作用させることにより表している。(図-5参照)

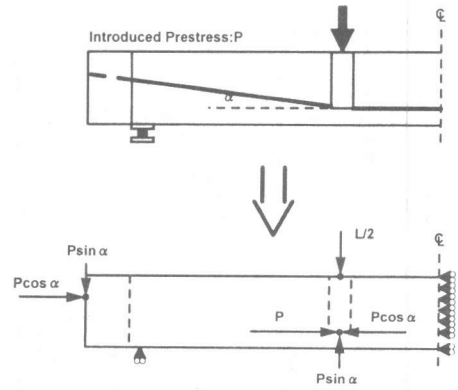


図-5 解析モデル

また、載荷荷重とともに上昇する外ケーブルの張力増分も解析では考慮している。なお偏向部

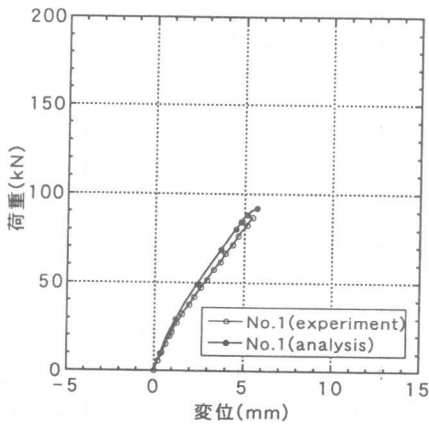


図-6 荷重-変位関係 (解析値)

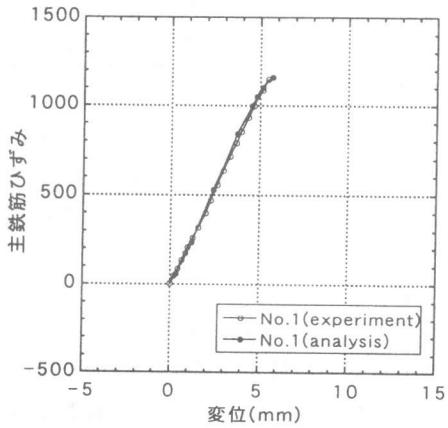


図-8 主鉄筋ひずみ (解析値)

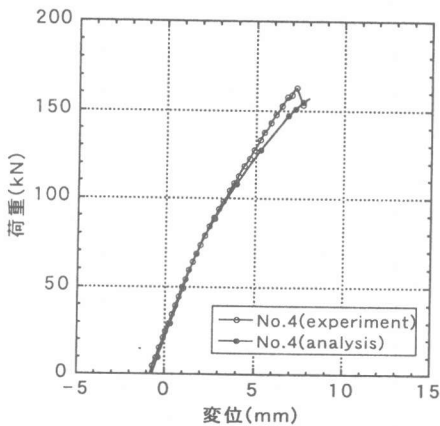


図-7 荷重-変位関係 (解析値)

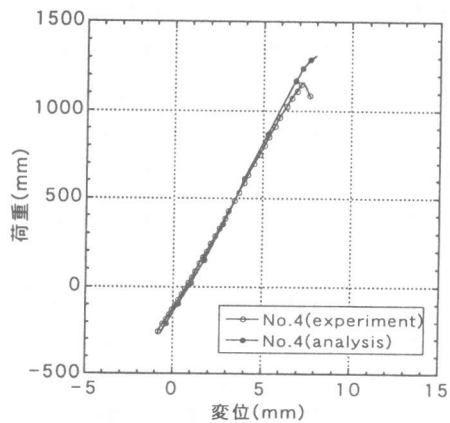


図-9 主鉄筋ひずみ (解析値)

表-4 解析結果

| 供試体 No. | 主鉄筋ひずみ (実験値) | 主鉄筋ひずみ (解析値) | せん断耐力(kN) (実験値) | せん断耐力(kN) (解析値) | 解析値/計算値 |
|------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|---------|
| No.1 | 1148 | 1160 | 86.6 | 91.9 | 1.06 |
| No.2 | 855 | 776 | 120.0 | 119.6 | 1.00 |
| No.3 | 1022 | 1210 | 156.1 | 151.0 | 0.97 |
| No.4 | 1197 | 1159 | 162.8 | 157.0 | 0.96 |

での摩擦による緊張材応力への影響は無視し、ケーブル全長で一様の伸びをするものとしている。解析による実験結果推定の指標として、終局荷重、荷重-変位曲線、支間中央部の主鉄筋位置でのコンクリートひずみの3点に着目した。

4. 2 解析結果

各ケースにおける解析結果を表-4に示す。またRC供試体 No.1 とケーブル曲げ上げ角度が最も大きい No.4 の供試体について、荷重-変位関係、主鉄筋ひずみ-変位関係を図-6, 7, 図-8, 9にそれぞれ示す。表-4より実験結果と解析結果を比較すると、せん断耐力、主鉄筋の終局ひずみのいずれも精度良く推定できている。荷重-変位関係、ひずみ-変位関係も図-6, 7, 8, 9から明らかな通り、解析値と実験値は良く合致している。他のケーブル曲げ上げ角度を変えた2体の供試体に関してもほぼ同程度の精度でせん断性状を解析できている。この結果から本解析手法により、外ケーブルによるせん断補強効果を解析的に求めることが可能であると言える。

5. せん断力の算定

5. 1 せん断耐力算定式

外ケーブルにより補強した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力を既往の算定式^{5) 6)}を用いて計算し、その適用性について検討した。用いた算定式を(1)式に示す。本算定式は軸力を受ける鉄筋コンクリート梁のせん断耐力算定式で、示方書式に、せん断スパンを考慮に入れた算定式である。(1)式を適用するに当たって、ケーブルを曲げ上げた事による影響は、軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分として考えて計算を行った。またその際、有効引張

力は終局時の変形が小さく緊張材の応力増分も小さいことから終局時の緊張材引張力ではなく導入プレストレスの値を用いている。今回の実験ではせん断補強筋を用いていないことから、本実験の鉄筋コンクリート梁のせん断耐力はコンクリートの受け持つせん断耐力と軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分の和として計算した。また β_n に関しては、精算法による曲げ解析から終局曲げ耐力を計算し、その値 M_u を用いて求めた。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped} \quad (1)$$

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n [0.75 + 1.40/(a/d)] f_{cd} b_w d$$

$$V_{sd} = A_w f_{wyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s d / 1.15$$

$$V_{ped} = P_p \sin \alpha$$

$$\beta_d = d^{-1/4}$$

$$\beta_p = p_w^{1/3}$$

$$\beta_n = 1 + 2M_0/M_u$$

$$f_{cd} = 0.20(f_{cd}')^{1/3} \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$p_w = A_s / (b_w d)$$

A_s : 主鉄筋断面積 (cm²)

A_w : せん断補強鉄筋断面積 (cm²)

b_w : ウェブ厚 (cm) d : 主鉄筋有効高さ (cm)

f_{cd}' : コンクリート設計圧縮強度 (MPa)

f_{wyd} : せん断補強鉄筋降伏強度 (MPa)

α_s : せん断補強筋が部材軸となす角度

s_s : せん断補強鉄筋の配置間隔 (cm)

P_p : 軸方向緊張材の有効引張力 (kN)

α : 軸方向緊張材と部材軸のなす角度

M_0 : ディコンプレッションモーメント

M_u : 精算法解析プログラムにより求めた曲

げモーメント

N_d : 設計軸方向圧縮力

表-5 計算結果

| 供試体 No. | せん断耐力(kN) 実験値 | せん断耐力(kN) 式(1)による値 | 計算値/実験値 | せん断耐力(kN) 実験値 | せん断耐力(kN) 応力増分考慮 | 計算値/実験値 応力増分考慮 |
|------------|------------------|-----------------------|---------|------------------|---------------------|-------------------|
| No.1 | 86.6 | 88.3 | 1.02 | 86.6 | 88.3 | 1.02 |
| No.2 | 120 | 127.5 | 1.06 | 120 | 127.5 | 1.06 |
| No.3 | 156.1 | 151.1 | 0.97 | 156.1 | 154.1 | 0.99 |
| No.4 | 162.8 | 175.6 | 1.08 | 162.8 | 180.5 | 1.11 |

5. 2算定式の適用性について

表-5 に実験値、解析値と算定式(1)によるせん断耐力の計算値の比較を示す。計算値は実験値、解析値に比べほぼ同様の値をとっている。このことから既往のせん断耐力算定式で、せん断補強効果を概ね評価できると考えられる。実験値による緊張材の応力増分を考慮した計算結果も表-5 に示した。しかし、今回の実験では終局時の緊張材の応力増分が非常に小さいことから、応力増分がせん断耐力に及ぼす影響はわずかであった。

本研究において行った実験に関しては、既往のせん断耐力評価式で補強後のせん断耐力を評価できるといえる。しかしながら有効高さが1mを越えるような場合やきわめて低鉄筋比の場合などの場合については、さらに検討が必要である。

6. まとめ

今回の研究により得られた結果をまとめると以下の通りである。

- ①外ケーブルにより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る。
- ②せん断スパン内でケーブルに軸方向に対し角度をつけることでせん断補強効果は増大する。
- ③外ケーブルによるプレストレスを外力として扱うことで既存の鉄筋コンクリート二次元有限要素法でせん断補強効果を解析的に求めることができる。
- ④本実験に関しては、外ケーブルの持つせん断補強効果は既往の軸力を受ける鉄筋コンクリート棒部材のせん断耐力算定式によって評価することができる。

本研究で行った実験はケーブル配置角度のみ

を変えて行い、せん断スパン有効高さ比、引張鉄筋比、導入プレストレス量、供試体の断面寸法などは変えていない。これらの要因もせん断耐力に大きく寄与することが知られている。今回の実験では非常に良い精度で計算値から終局時のせん断補強効果を求められたが、以上のような要因を変えてさらに実験を行い、算定式の適用性についてさらに検討を行うことが今後必要である。

参考文献

- 1) 近藤悦郎・睦好宏史・高橋博威・佐野正：外ケーブルによるせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16, No.2, pp1015-1020, 1994
- 2) 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，プレレストコンクリート，Vol.39, No.1, pp83-96, Jan, 1997
- 3) 伊藤忠彦・山口隆裕・池田尚治：外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17, No.2, pp773-778, 1995
- 4) 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) 二羽淳一郎・山田一字・横沢和夫・岡村甫：せん断補強鉄筋を用いないRCはりのせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372, V-5, pp167-176, 1986
- 6) コンクリート標準示方書（平成8年版）設計編，土木学会，1996