

# 論文 高性能軽量コンクリートを用いた外ケーブルPCはり部材のせん断耐力実験

三田村 浩<sup>\*1</sup>・池田 憲二<sup>\*2</sup>・日紫喜 剛啓<sup>\*3</sup>・福田 一郎<sup>\*4</sup>

**要旨:** 高性能軽量コンクリートを用いた外ケーブルPCはり部材のせん断耐力について、プレストレスによる補強効果を明らかにするために、せん断補強筋のない矩形断面単純はりを用いて実験的検討を行った。プレストレス導入量を実験要因としてせん断耐力に与える効果を検討した。実験の結果、プレストレスを与えないRCはり部材では普通コンクリートに比べてせん断耐力が低下するが、プレストレスを導入してひび割れを制御することにより、せん断耐力は大幅に増加し、導入量を上げることでより改善される傾向にあることがわかった。

**キーワード:** 外ケーブル, 軽量コンクリート, せん断耐力, 非線形解析

## 1. はじめに

近年のPC橋梁の長大化に伴い上部工の軽量化が望まれている。上部工を軽量化することにより、地震時慣性力の低減、軟弱地盤への対応、下部構造の縮小化、支保工や建設機械の簡略化等による建設コストの削減が可能となる。

上部工の軽量化方法の1つとして、軽量コンクリートおよび外ケーブル構造の採用が考えられ、これら2つを組み合わせることにより、さらに上部工の軽量化が可能となる。

軽量コンクリートの従来型は、軽量骨材の吸水率が高いために、ポンプ圧送性の施工上の課題や凍結融解抵抗性などが問題となっていた。これに対し、近年真珠岩を原材料として吸水率が低くかつ高強度の独立空隙型軽量骨材<sup>1)</sup>が開発された。ここ数年、この独立空隙型軽量骨材を用いたいわゆる高性能軽量コンクリートに関する研究は活発に進んできたが、主に先に挙げたポンプ圧送性や凍結融解抵抗性等の材料・施工面からのアプローチ研究が多く<sup>2), 3)</sup>、構造部

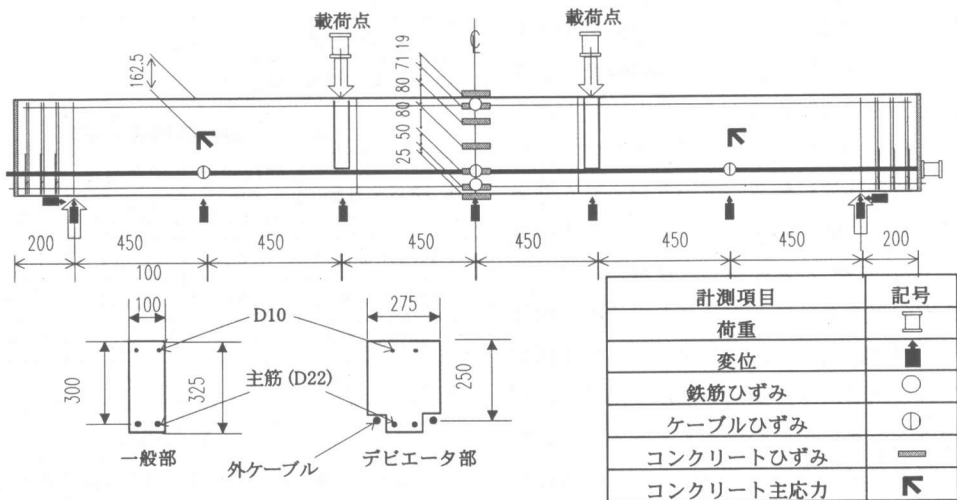


図-1 試験体の諸元, 荷重の載荷方法および計測方法 (単位: mm)

- \*1 国土交通省 北海道開発局 札幌開発建設部 係長 (正会員)
- \*2 独立行政法人 北海道開発土木研究所 構造研究室長 (正会員)
- \*3 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 上席研究員 (正会員)
- \*4 鹿島 技術研究所 土木技術研究部 材料・LCEグループ 研究員 (正会員)

材としての研究は少ない。PC部材の研究についても、内ケーブルの研究は行われてきているが<sup>4)</sup>、外ケーブルの研究はまだ本格的に行われていないのが現状である。外ケーブルについては、コンクリートとの間に付着がないため、終局時においては平面保持の仮定が成立しない。そのため、終局時の挙動に関しては不明な点が多く、現在曲げに関する研究は進んできたが、せん断に関しては十分な設計手法が確立されていない。

以上のことから、高性能軽量コンクリートを外ケーブルに用いる場合、せん断耐力について定量的に把握しておく必要がある。そこで本実験では、外ケーブル構造の力学的性状の中でせん断耐力に着目した実験をせん断補強筋のない外ケーブルPCはり部材で行い、外ケーブルのプレストレスによるせん断耐力の向上効果を検討した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試験体概要

実験で使用した試験体の諸元・荷重の荷重方法および計測方法を図-1に示す。試験体は幅 (bw) 100mm, 高さ (h) 325mm の矩形断面で、主鉄筋有効高さ (d) を 300mm とし、支間長 (l) を 2,700mm とした。外ケーブルによるせん断耐力の向上効果を明らかにするためにせん断補強筋は配置していない。せん断破壊に先行して曲げ破壊が生じないよう主鉄筋としてD22を2本配置し、圧縮側にはD10を2本配置した。コンクリートの設計基準強度は 50N/mm<sup>2</sup> とした。コンクリートの仕様および各種試験結果を表-1に、使用した鋼材の機械的性質を表-2に示す。緊張力の管理は、緊張時は端部に配置したロードセルの値とし、実験時においては、試験体の変形が進むと摩擦によりケーブル中央と端部での張力が変わる影響を考慮し、ケーブル中央のひずみゲージの値を緊張時のロードセルの値を基

に補正して行った。

### 2.2 実験要因

実験要因を表-3に示す。No.1は外ケーブルを有しないRC試験体である。No.2, No.3については、No.1のRC試験体と同じ配筋とし、載荷位置にデビエータを設けて外ケーブルは直線配置とした。プレストレス導入量 (プレストレスの軸力/一般部断面積) は、No.2が 2.1N/mm<sup>2</sup>, No.3は2倍の 4.2N/mm<sup>2</sup>とし、プレストレス導入量の違いによるせん断耐力の向上効果の影響を確認した。緊張時のケーブル張力はどちらも 0.4Pu (Pu:ケーブルの引張強さ) となるように、No.2はSWPR7Aφ9.3を2本, No.3はSWPR7Aφ12.4を2本配置し、デビエータ部にはケーブルと試験体との摩擦を低減するためにテフロンシートを配置した。載荷方法は油圧ジャッキによる静的2点載荷とし、せん断スパンー主筋有効

表-1 コンクリートの仕様および試験結果

項目	仕様	試験結果
圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	50	57.2
ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	19	21.7
スランプフロー (mm)	550±50	550×545
空気量 (%)	7±1.5	7.4
単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	1,850	1,800

表-2 鋼材の機械的性質

鋼材の種類	降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強さ (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )
SWPR7Aφ12.4	1,636	1,851	1.92×10 <sup>5</sup>
SWPR7Aφ9.3	1,705	1,860	1.95×10 <sup>5</sup>
SD345 D10	384	548	1.83×10 <sup>5</sup>
SD345 D22	376	568	1.89×10 <sup>5</sup>

表-3 実験要因

試験体 No.	構造形式	プレストレス導入量 (N/mm <sup>2</sup> )	コンクリート強度 (N/mm <sup>2</sup> )
No.1	RC	—	56.8
No.2	外ケーブル	2.1	59.5
No.3	外ケーブル	4.2	55.3

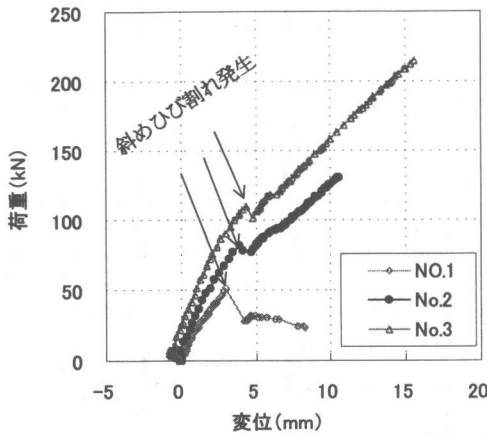


図-2 荷重-変位関係

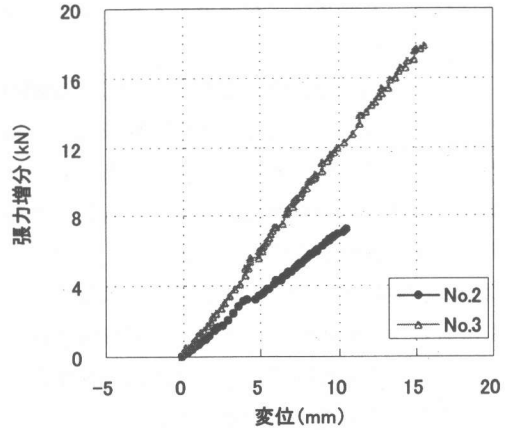


図-3 ケーブル張力増分-変位関係

表-4 実験結果

試験体 No.	曲げひび割れ発生荷重 (kN)	斜めひび割れ発生荷重 (kN)	破壊荷重 (kN)	緊張時ケーブルひずみ ( $\mu$ )	最大ケーブルひずみ ( $\mu$ )	初期張力 (kN)	張力増分 (kN)
No. 1	23.6	50.0	50.0	—	—	—	—
No. 2	47.1	82.0	130.0	3,476	4,199	34.3	7.3
No. 3	76.0	101.0	219.0	3,978	4,979	68.5	17.9

高さ比(a/d)が3.0となるようせん断スパン(a)を900mmとした。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 破壊性状

表-4に各試験体の実験結果を示す。プレストレスを導入していないNo.1は、斜めひび割れ発生と同時にせん断引張破壊した。これに対し、プレストレスを導入したNo.2, No.3については斜めひび割れ発生後も荷重が増加し、斜めひび割れ到達点近傍の主鉄筋が降伏すると同時に載荷点近傍のコンクリートがせん断圧縮破壊した。いずれの試験体もせん断補強筋を配置していないために、脆性的に破壊した。各試験体の荷重と鉛直中央変位(以下、変位)の関係を図-2に、ケーブル張力増分と変位の関係を図-3に示す。図-2のグラフの傾きから明らかなように、No.1の試験体と他の試験体を比べると、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。またNo.2とNo.3を比べると、プレストレス導入量を大きくすることによって、せん断耐力が増加していることがわかる。斜めひび割れ発生荷

重がNo.1に比べてNo.2で64%、No.3で100%増となり大幅な耐力の増加が得られた。表-4を見ると、ケーブルの張力増分はNo.2, No.3の試験体でそれぞれ荷重載荷前の約21%、26%増となり有意な差は認められなかった。既往の普通コンクリートを用いた外ケーブルPCはりのせん断試験結果に比べて変位が大きい<sup>5)</sup>、これは高性能軽量コンクリートのヤング係数が普通コンクリートに比べて小さいことが一因と思われる。

#### 3.2 ひび割れ性状

終局時のひび割れ性状を図-4に示す。今回の実験では、全ての試験体でスパン中央付近に曲げひび割れが発生した後、せん断スパン内に大きな斜めひび割れが発生した。また、主鉄筋に沿って支点から斜めひび割れまでのひび割れが見られた。No.1のRC試験体については、ひび割れが分散せずに載荷荷重50kN時にひび割れ観察中に脆性的に破壊した。No.2, No.3についてはせん断スパンの主鉄筋のかぶりコンクリートの一部が剥落し、破壊に至った。プレストレス導入により、曲げひび割れ発生荷重、斜め

ひび割れ発生荷重はプレストレス導入量に応じて増加していた。

### 3.3 プレストレス導入によるタイドアーチ機構

プレストレスを導入した No. 2, No. 3 では、斜めひび割れ発生後に荷重が一旦落ちるものの、斜めひび割れ幅が徐々に広がるとともに、再び荷重-変位曲線が直線的に増加した。これは、斜めひび割れ発生後に、プレストレスによりせん断スパンに斜め圧縮ストラットが形成されるタイドアーチ的な機構となったためと推察され、このことについて以下に考察する。

図-5 に、各試験体のせん断スパンにおいて、斜めひび割れが発生した位置の外側(端支点側)におけるコンクリートの主圧縮応力度と載荷荷重の関係を示す。なお、主圧縮応力度は試験体表面に貼付した 3 軸ゲージの値から算出した。

図-5 より、No. 2, No. 3 では、載荷点と端支点を結ぶ対角線近傍で、斜めひび割れ発生以降に主圧縮応力度が大きく増加しており、斜めひび割れに沿ってコンクリートに斜め圧縮ストラットが形成されていることがわかる。

これに対して No. 1 では、斜めひび割れ発生近辺のコンクリートの主圧縮応力度が大きく増加することなく、斜めひび割れ発生直後に斜め引張破壊に至っている。

以上から、プレストレスを導入してひび割れを制御した No. 2, No. 3 では、斜めひび割れ発生以降においてタイドアーチが形成され、構造系全体としての耐荷機構へ以降し、耐力が増加したものと考えられる。

### 3.4 解析による検討

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捉えるために、材料の力学的非線形と部材の幾何学的非線形を考慮できる複合非線形解析プログラムを用いて解析を行った。RC はりと外ケーブルは別の部材としてモデル化し、デビエータと外ケーブルはバネ要素を用いて結合した。コンクリートおよび部材内に配置されている鋼材は

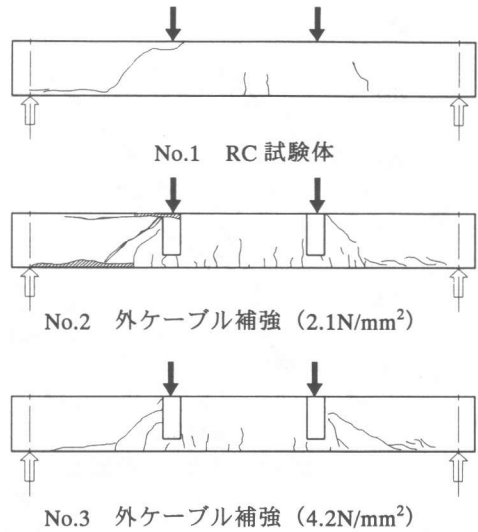


図-4 終局時のひび割れ性状

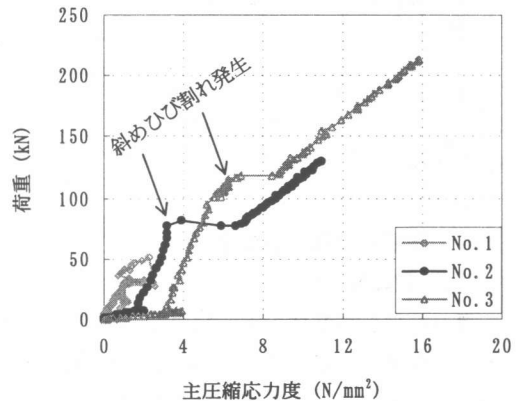


図-5 斜めひび割れ近傍の主圧縮応力度

断面をファイバー状にモデル化し、PC鋼材の有効プレストレス力は初期ひずみとして与えた。

解析結果を、プレストレス導入量が多い試験体 No. 3 について、荷重-変位関係を図-6 に、ケーブル張力増分-変位関係を図-7 に示す。

図-6 より、本解析結果では斜めひび割れ発生後に実験値と解析値がかい離するが、斜めひび割れ発生前の挙動はよく表現できていると思われる。これは、実験では斜めひび割れ発生後に試験体の剛性が低下している影響が解析では考慮できていないためである。なお、本稿には掲載していないが、著者らが行った高性能軽量コンクリートを用いた外ケーブルPCはり部材の

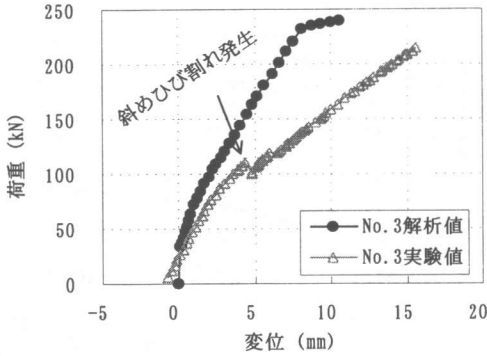


図-6 荷重-変位関係 (解析値)

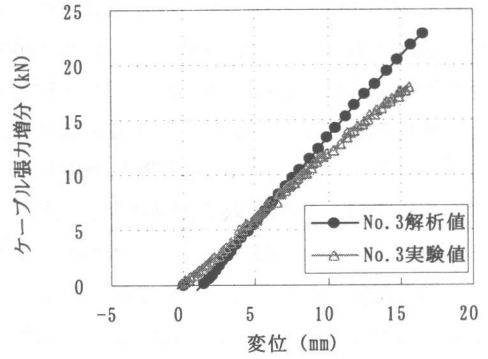


図-7 ケーブル張力増分-変位関係 (解析値)

表-5 計算結果

試験体	実験値 (kN)		計算値 (kN)		実験値/計算値			
	Vc. exp	Vc. max	Vc1	Vc2	Vc. exp/Vc1	Vc. max/Vc1	Vc. exp/Vc2	Vc. max/Vc2
No. 1	25.0	25.0	40.0	—	0.63	0.63	—	—
No. 2	41.0	65.0	45.6	64.4	0.90	1.43	0.64	1.01
No. 3	50.5	110.0	49.1	76.5	1.03	2.24	0.66	1.44

曲げ破壊する試験体については、本解析手法で終局時まで解析可能であった。

図-7を見ると、ケーブル張力増分-変位関係については斜めひび割れによる剛性低下が外ケーブル張力増加にあまり影響を及ぼさないことを示している。

#### 4. セン断耐力の検討

外ケーブルにより補強した高性能軽量コンクリートのせん断耐力を既往の算定式を用いて計算し、その適用性について検討した。表-5に計算結果を示す。算定式は式(1)に示す土木学会コンクリート標準示方書(以下、示方書)で規定されているものを用いた<sup>6)</sup>。材料強度については実験値を、 $\beta_n$ に関しては、ファイバーモデルを用いて行った非線形解析結果から $M_o$ および $M_d$ を用いて求めた。材料係数や部材係数等の安全係数は1.0として計算した。また、既往の研究<sup>4)</sup>を参考に、PCはり部材については、せん断耐力を式(2)でも計算した。式(2)は、プレストレスにより曲げひび割れモーメントが増加することに着目し、曲げひび割れが発生する

$$Vc_1 = \beta_d \beta_p \beta_n f_{vcd} b_w d \quad (1)$$

$$\beta_d = d^{-1/4}, \quad \beta_p = p_w^{1/3}$$

$$\beta_n = 1 + M_o / M_d$$

$M_o$  : デコンプレッションモーメント

$M_d$  : 設計曲げモーメント

$$f_{vcd} = 0.2 f'_c{}^{1/3}$$

$f'_c$  : コンクリートの圧縮強度

$$Vc_2 = Vc_1 + M_c / a \quad (2)$$

$M_c$  : ひび割れ発生モーメント,  $\beta_n = 1$

$a$  : セン断スパン

までのせん断力の増加量( $M_c/a$ )を、式(1)で $\beta_n = 1$ として計算した結果に直接加算する方法である。ここで $M_c$ は解析結果と実験値が概ね一致していたので解析値を用いた。図-8に、斜めひび割れ発生荷重( $Vc. exp$ )および最大荷重( $Vc. max$ )に対する各計算値の比とプレストレス導入量の関係を示す。

式(1)の算定結果は、No. 1の計算値が実験値を下回っている。示方書では、軽量コンクリートはり部材のせん断耐力は、式(1)の70%とす

る規定がなされており、RCはり部材では、現行の設計基準による評価が妥当であることが確認された。これに対し、No. 2, No. 3の実験値と計算値の比率は、プレストレス導入量に応じて大きくなっており、斜めひび割れ発生荷重に対する比率が1.0前後、最大荷重に対しては1.4を上回る結果となった。従って、外ケーブル方式の高性能軽量コンクリートPCはり部材のせん断耐力を式(1)の70%まで低減することは、部材の耐力を過小評価していると考えられる。

式(2)より得られる計算値は、プレストレス導入による斜めひび割れ発生荷重の増加を定量的に評価しており、本研究の範囲では、65%の係数を用いることで計算値は実験値とほぼ一致した。最大荷重は、式(1)と同様に、プレストレス導入量に応じてどちらの試験体も1.0を上回る結果となった。

## 5. まとめ

今回の実験により得られた結果をまとめると以下の通りである。

①既往の研究結果と同様に高性能軽量コンクリートを用いたRCはり部材のせん断耐力は普通コンクリートに比べて低下するが、プレストレスを導入してひび割れを制御することにより、せん断耐力は大幅に増加する。

②プレストレス導入量を増加することで、高性能軽量コンクリートを用いた外ケーブルPCはり部材のせん断耐力は、より改善される傾向にある。

③プレストレスを導入した場合に、斜めひび割れ発生以降も耐力が増加したのは、タイドアーチが形成され、構造系全体としての耐荷機構へ移行したためと考えられる。

本実験は、プレストレス導入量をパラメータとして行ったが、試験体の数が少ないために定量的な把握が得られるまでには至っていない。また、パラメータはプレストレス導入量のみであり、せん断スパンー主筋有効高さ比、引張鉄

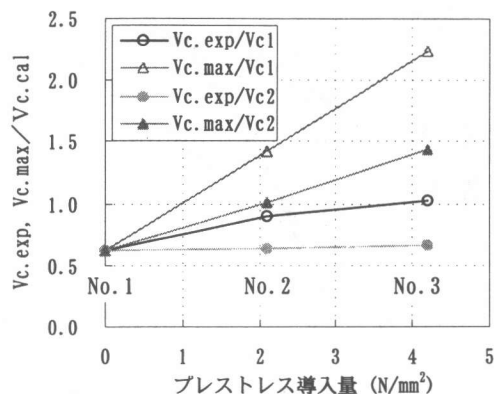


図-8 Vc.exp/Vc.cal-プレストレス導入量関係

筋比、ケーブルの配置角度、試験体の断面形状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。今後合理的なせん断の設計手法を確立するために、これらの要因についても実験を行い、算定式の適用性を含めてさらなる検討を行う必要がある。

## 参考文献

- 1) 岡本享久ほか：超軽量コンクリート，コンクリート工学，Vol. 36，No. 1，pp. 48-52，1998. 1
- 2) 柳井修司ほか：高性能軽量コンクリートの配合がポンプ圧送性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol. 22，No. 2，pp. 1405-1410，2000. 7
- 3) 田村一美ほか：高強度軽量コンクリートの凍害機構に関する一考察，コンクリート工学論文集，Vol. 6，No. 2，pp. 77-83，1995. 7
- 4) 濱田譲ほか：高性能軽量コンクリートを用いたPCはり部材のせん断耐力，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，Vol. 9，pp. 739-744
- 5) 新津正義ほか：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. 3，1999，pp. 949-954
- 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