

論文

[2169] 外ケーブルによるせん断補強効果に関する実験的研究

近藤 悦郎*¹ 睦好 宏史*² 高橋 博威*³ 佐野 正*⁴

1. はじめに

最近、コンクリート構造物の早期劣化による耐力低下や道路構造令の設計荷重変更などによって、既設コンクリート構造物の補強の必要性が増してきている。外ケーブル工法は、構造物の供用中にも施工することが可能であるなど、補強工法のひとつとして注目されている。これまでの研究をみると、曲げを受ける外ケーブルPC部材の力学的特性あるいは補強効果に関する研究が盛んに行われている[1][2]。外ケーブルによる補強は曲げだけでなくせん断に対しても効果を期待できると考えられ、せん断耐力がどの程度増大するのかを明確にしておく必要があると思われる。例えば、曲げ先行型で設計されたRCあるいはPC部材を外ケーブルによって補強する場合、曲げ補強が卓越すると、破壊形式がせん断破壊へ移行することが考えられる。しかし、外ケーブルによるせん断補強効果に関する研究は、ほとんど行われていないのが現状である。

本研究は、外ケーブル方式でプレストレスを導入した場合のせん断補強効果についての基礎資料を得ることを目的に、せん断補強筋量を少なくしたRCはり供試体を用いて実験的に検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体

供試体の形状寸法を図-1に示す。供試体は、せん断補強筋として、D6のスターラップを18cmあるいは4.5cm間隔で配置し、引張側にD19を4本配置した、T形断面をもつスパン2.7mのRCはりである。外ケーブルにはPC鋼より線SWPR7Bを用い、載荷点で曲げ上げ治具(以下デビエーターと呼ぶ)によって角度約7°で曲げ上げ配置し、供試体端部で定着した。コンクリートの平均圧縮強度は380 Kgf/cm²であった。使用鋼材の機械的性質を表-1に示す。

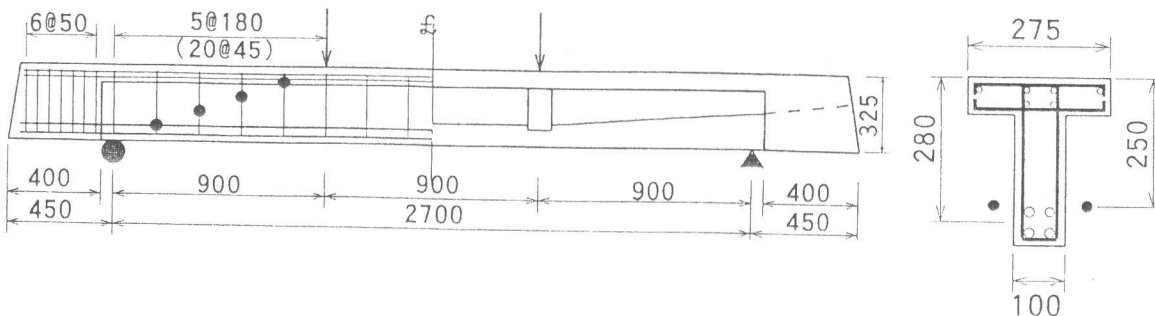


図-1 供試体形状寸法 [単位: mm]

注) ●: スターラップひずみ測定位置

- *1 ショーボンド建設(株) 土木研究所 工修(正会員)
- *2 埼玉大学助教授 工学部建設工学科 工博(正会員)
- *3 埼玉大学大学院 理工学研究科
- *4 ショーボンド建設(株) 土木研究所課長 工修(正会員)

表-1 使用鋼材の機械的性質

種類	直径 (mm)	断面積 (mm ²)	降伏強度 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)
D 6	6.35	31.67	40	57	1.83 × 10 ⁶
D 10	9.53	71.33	45	60	1.99 × 10 ⁶
D 19	19.1	286.5	44	59	1.93 × 10 ⁶
PC鋼より線	12.7	98.7	161	189	2.00 × 10 ⁶

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、計算上の曲げ耐力27.7tfに対して後述の計算で求めたせん断耐力は14.4tfで、せん断破壊が曲げ破壊に先行して生じるようにした。No.2は、No.1と同一要因で作製した供試体で、これに外ケーブルによりプレストレスを導入しPPCとした。No.3はNo.1と同タイプの供試体で、既設コンクリート構造物の補強を想定し、RCの状態でせん断ひび割れを発生させた後、外ケーブルによりプレストレスを導入しPPCとした。No.4はスターラップ間隔を密に配筋して、RCの状態でのせん断耐力を曲げ耐力の約1.26倍(34.9tf)とし、これに外ケーブルによりプレストレスを導入しPPCとした。外ケーブルによるプレストレスは、供試体上縁に曲げひび割れを生じないと考えられる限界値まで導入するものとし、本実験では14tfとした。

表-2 実験要因

供試体 番号	種類	スターラップ 間隔 (cm)	引張 鉄筋比 (%)	せん断 補強筋比 (%)	導入プレ ストレス (tf)	導入応力 (kgf/cm ²)	
						上縁(引張)	下縁(圧縮)
No.1	RC	18.0	1.49	0.35	-----	-----	-----
No.2	PPC	18.0	1.49	0.35	14.0	-16.7	104.7
No.3	RC→PPC	18.0	1.49	0.35	14.0	-16.7	104.7
No.4	PPC	4.5	1.49	1.41	14.0	-16.7	104.7

2.3 載荷方法および測定項目

載荷は、せん断スパン有効高さ比(a/d)を約3程度とし3等分載荷にて行った。載荷方法を以下に述べる。供試体No.1およびNo.2はせん断ひび割れ幅が0.2mmとなるまで載荷した後除荷し、せん断ひび割れ箇所にπゲージを取付け、最終破壊まで載荷した。供試体No.3は、せん断ひび割れが0.2mmになるまで載荷を行い除荷した後、デビエーターをエポキシ樹脂およびボルトで設置し、外ケーブルによりプレストレスの導入後、最終破壊まで載荷した。No.4は、外ケーブルによりプレストレスを導入後、最終破壊まで載荷した。

測定項目は、荷重・変位・外ケーブル張力・スターラップひずみ・引張鉄筋ひずみ・コンクリートひずみであり、ひび割れの進展状況は目視観察およびπゲージにて測定した。

3. 実験結果および考察

3.1 破壊過程

破壊時のひび割れ状況および破壊箇所を図-2に示す。表-3に各供試体の実験結果を示す。

各供試体の荷重と変位との関係を図-3に、荷重とスターラップひずみとの関係を図-4示す。

いずれの供試体も最初にスパン中央付近に曲げひび割れが発生し、その後せん断スパン内のウェブ中央付近からせん断ひび割れが発生した。No.1およびNo.3は主鉄筋降伏後、直ちにせん断ひび割れがフランジまで達し、載荷点付近のコンクリートが圧壊した。ここで、No.1はRCのせん断耐力を求めるための供試体であったが、主鉄筋が降伏し、その後せん断破壊により耐力が急減した。このことから、曲げ降伏耐力とせん断耐力は、ほぼ等しい値であったと推察される。そこで、ここではとりあえずNo.1の耐力を、せん断耐力とみなすことにした。No.2は主鉄筋降伏前に、せん断ひび割れがフランジまで達し、載荷点付近のコンクリートが圧壊した。No.4は0.15mm程度のせん断ひび割れが生じたが、ひび割れはフランジにまで進行せず、主鉄筋降伏後、等モーメント区間の載荷点近傍でコンクリートが圧壊した。No.4の最大荷重は35.5tfであり、RCの曲げ耐力計算値の1.28倍であった。

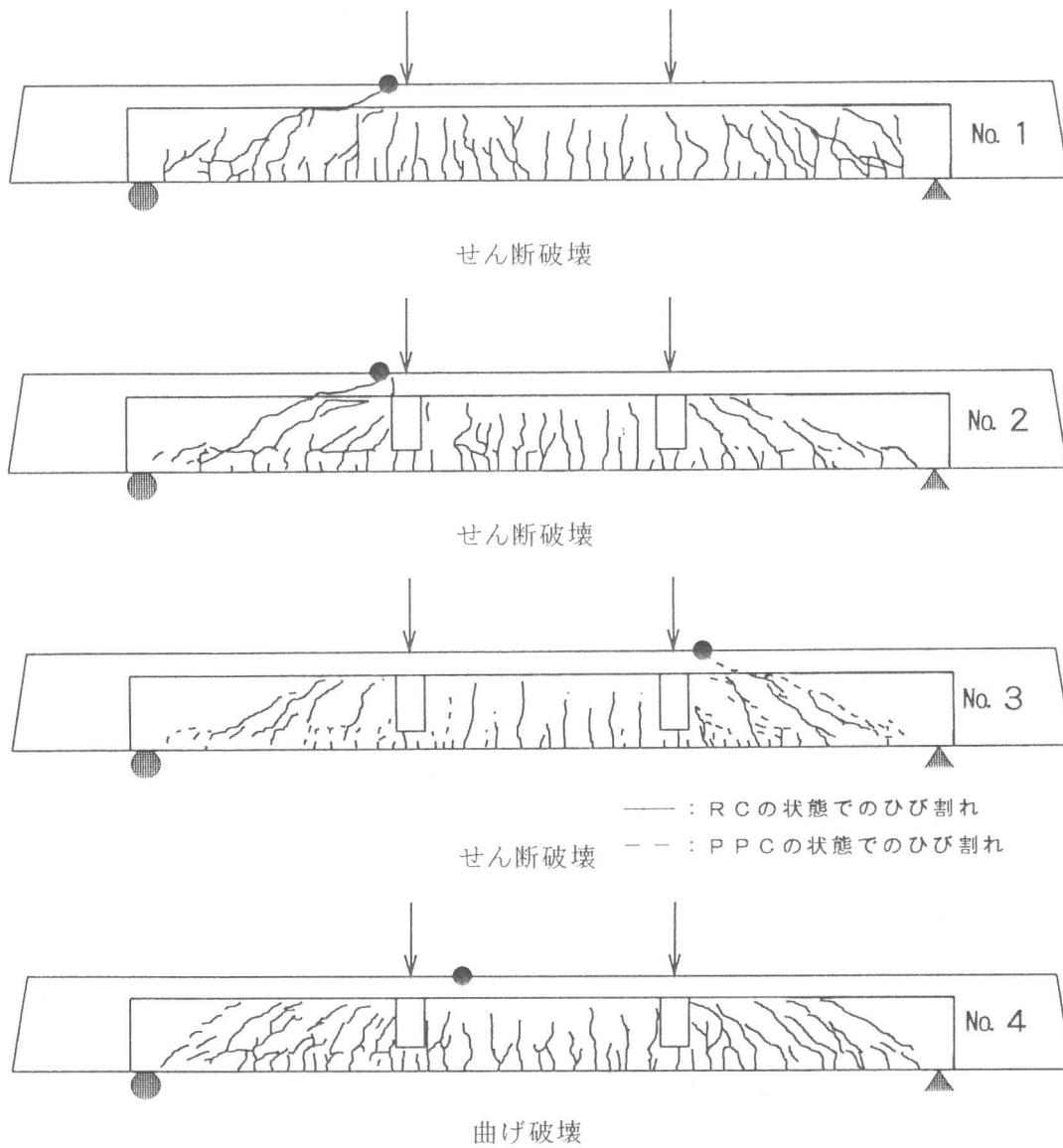


図-2 破壊時のひび割れ状況および破壊箇所
 注) ● : 破壊箇所

表-3 実験結果

供試体 番号	種 類	ひび割れ発生荷重 (tf)		除荷荷重 ²⁾ (tf)	スターラップ 降伏荷重 ³⁾ (tf)	最大耐力 (tf)
		曲 げ	せん断			
No. 1	R C	4.0	8.0	10.0	15.5	26.5
No. 2	P P C	7.5	13.5	15.0	15.0	30.0
No. 3	R C→P P C	8.5 ¹⁾	9.0 ¹⁾	15.5	20.0	37.0
No. 4	P P C	7.0	13.0	-----	25.0	35.5

注1) ひびわれ再開荷重。
 注2) せん断ひび割れが0.2mmとなった時の荷重。
 注3) 降伏荷重はひずみが約2200 μ となった時の荷重。

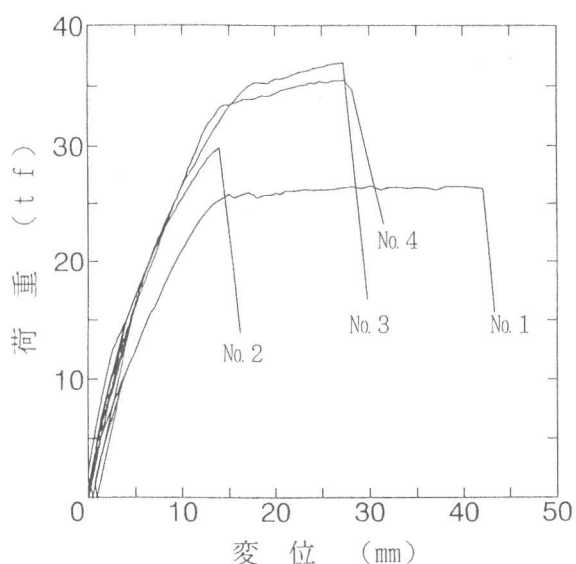


図-3 荷重と変位との関係

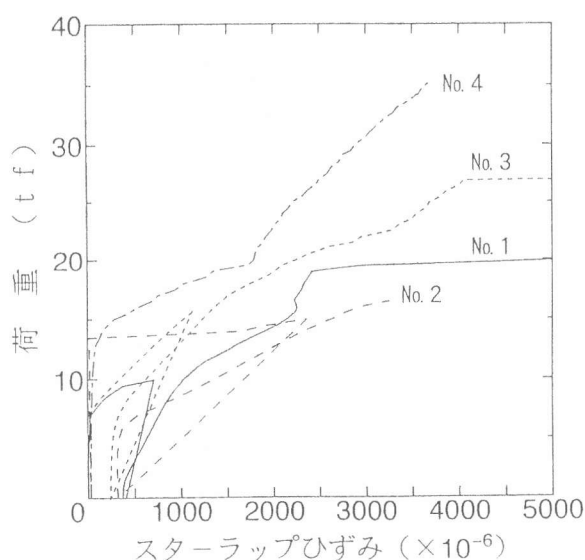


図-4 荷重とスターラップひずみとの関係

3. 2 プレストレス導入によるせん断補強効果

外ケーブルによるプレストレス導入がせん断耐力に及ぼす効果を、RC供試体No. 1とPPC供試体No. 2とで比較する。表-3より、せん断ひび割れ発生荷重は、外ケーブルによりプレストレスを導入したNo. 2が約68%増加した。せん断ひび割れが0.2 mmとなった荷重(除荷荷重)は、No. 2が50%大きくなった。また、最大耐力もNo. 2はNo. 1よりも約13%増加した。図-2より、せん断ひび割れの角度が、No. 1よりもNo. 2の方が小さくなっており、外ケーブルでプレストレスを導入したことにより、主応力の作用方向が変化したものと思われる、このことが上記の荷重増加をもたらした一因と考えられる。

No. 1とNo. 2のスターラップの降伏荷重はほぼ同じであったが、図-4に示すように降伏に至るまでの過程が異なっており、No. 2のせん断ひび割れ近傍のスターラップの引張ひずみは、せん断ひび割れ発生直前には10 μ 程度であったものが、せん断ひび割れ発生直後に1600 μ 程度にまで急激に増加した。これは、外ケーブルによりプレストレスを導入しPPCとした場合、せん断ひび割れ発生荷重がNo. 1より大きくなったことからわかるように、コンクリートが負担する力がRCの場合よりも大きくなり、せん断ひび割れ発生直後に急激にスターラップへ力が伝わったため

と考えられる。ただし、スターラップを密に配筋した供試体No. 4では、図-4に示すようにせん断ひび割れ近傍のスターラップが、急激なひずみ増加を生じることにはなかった。

既設コンクリート構造物の補強を考える場合、せん断ひび割れの生じている状態で施工されることを想定する必要があると思われる。そこで、RCの状態でせん断ひび割れを発生させた後、外ケーブルによりプレストレスを導入したNo. 3とRC供試体No. 1との比較により、せん断補強効果の程度を検討する。表-3より、No. 3はせん断ひび割れは9.0tfで再開し、その後せん断ひび割れが0.2mmとなった荷重は15.5tfであった。No. 1のせん断ひび割れが0.2mmとなった荷重は10.0tfであり、補強を行うことにより55%増加した。最大耐力で比較すると、供試体No. 3は、No. 1よりも約40%増加し、せん断ひび割れを発生させた状態でも、外ケーブルによりプレストレスを導入することによって、十分なせん断補強効果が期待できるとと思われる。

次に、No. 3とひび割れのない状態で外ケーブルによりプレストレスを導入したNo. 2との比較を行う。表-3より、No. 3供試体のせん断ひび割れが0.2mmとなった荷重は、No. 2と同程度であった。最大耐力を比較すると、No. 3はNo. 2に対して約23%増加した。破壊形態も既述したようにNo. 2が主鉄筋の降伏前にせん断破壊したのに対して、No. 3は主鉄筋が降伏後にせん断破壊した。また、図-4をみるとNo. 3ではNo. 2のようにせん断ひび割れの発生直後の急激なスターラップのひずみ増加は認められなかった。

このような差異を生じた一因として、No. 3はプレストレス導入時点でせん断ひび割れを生じており、プレストレスを導入しPPCすることで主応力の作用方向が変化した。主応力の作用方向とRCの状態が発生したせん断ひび割れの方向とが一致しないために、PPCの状態でのせん断ひび割れの発生および進展が阻害されたことが考えられる。このことは、プレストレス導入時のせん断ひび割れの有無が、せん断耐力に影響を与えることを示唆するものであるが、今回の実験の範囲では必ずしも明確にすることができず、今後さらに検討する必要がある。

3. 3 せん断耐力の推定

ここでは以下に示す土木学会コンクリート標準示方書[3]のせん断耐力式に準じてせん断耐力の推定を行い、実験値と比較する。

$$V = V_c + V_s + V_p \quad (1)$$

$$V_c = 0.9 (f_c)^{1/3} \cdot (100/d)^{1/4} \cdot (100p_w)^{1/3} \cdot (1 + 2M_o/M_u) b_w \cdot d \quad (2)$$

$$V_s = (A_w f_{wy} d / 1.15) / s \quad (3)$$

$$V_p = P \sin \alpha \quad (4)$$

ここに、 V ；せん断耐力、 f_c ；コンクリートの圧縮強度、 d ；有効高さ、 p_w ；引張鉄筋比、 M_o ；デコンプレッションモーメント、 M_u ；スパン中央断面の曲げ破壊モーメント、 b_w ；ウェブ幅、 A_w ；スターラップの断面積、 f_{wy} ；スターラップの降伏強度、 s ；スターラップ間隔、 P ；導入プレストレス、 α ；外ケーブル曲げ上げ角度。

表-4に実験値と計算値の比較を示す。また、荷重と外ケーブル張力との関係を図-5に示す。

表-4 実験値と計算値の比較

供試体 番 号	種 類	せん断ひび割れ発生荷重			耐 力		
		実験値 (t f)	計算値 (t f)	実験値 計算値	実験値 (t f)	計算値 (t f)	実験値 計算値
No.1	R C	8.0	7.5	1.07	26.5	14.4	1.84
No.2	P P C	13.5	10.9	1.24	30.0	21.2	1.42
No.3	R C→P P C	---	---	---	37.0	21.2	1.75
No.4	P P C	13.0	10.9	1.19	35.5	33.5	1.06

注1) No.4は曲げ破壊であり、その耐力算定には
文献[1]の精算法を用いている。

せん断ひび割れ発生荷重は式(2)より算定した結果であるが、実験値と概ね一致している。一方、せん断耐力は実験値が計算値を上まわっている。この理由として、式(1)では、フランジ張出し部のコンクリートが負担するせん断耐力を考慮していないこと、せん断ひび割れ発生角度を 45° としていることに加え、図-5に示すような荷重の増加にともなう外ケーブルの張力増加を考慮していないこと等が考えられる。これらについては今後さらに検討を加える必要がある。

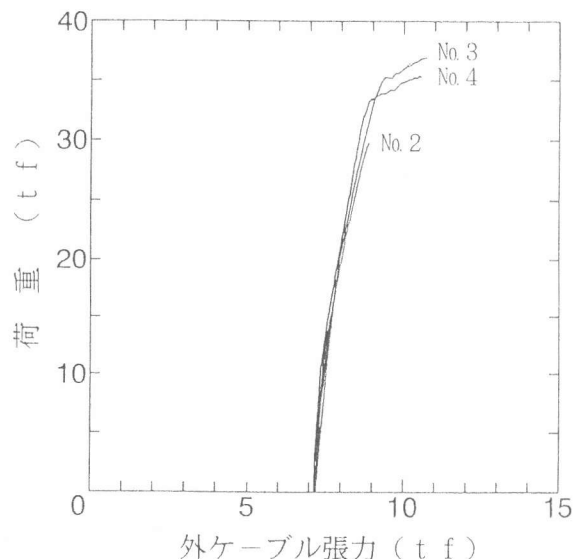


図-5 荷重と外ケーブル張力との関係

4. まとめ

今回の実験的研究により得られた結果をまとめると以下のとおりである。

- 1) プレストレスを導入することによって、せん断ひび割れの発生荷重が約68%大きくなった。
- 2) プレストレスを導入することによって、曲げ耐力が約28%増加し、せん断耐力が約13%増加した。
- 3) R Cの状態であらかじめせん断ひび割れが発生している供試体にプレストレスを導入するような場合でも、補強効果が期待できる。

以上、スターラップ量を少なくしたR C供試体に対して、外ケーブル方式でプレストレスを導入してせん断補強効果を検討したが、実構造物への適用にあたっては設計方法の確立が重要であり、今後さらに研究を進める予定である。

参考文献

- [1] 睦好宏史・町田篤彦・佐野 正：FRPを外ケーブルに用いたプレストレスコンクリートはりに関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 13, No.2, pp. 755-758, 1991.6
- [2] 佐野 正・村上忠彦・丸山久一・睦好宏史：外ケーブルによるP C桁の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. 15, No.2, pp. 807-812, 1993.6
- [3] 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年度版）設計編，pp. 57-61, 1991.9