

表-1 試験体諸元

試験体	目標プレストレス量(N/mm ²)			α_c (°)	f'_{cd} (N/mm ²)	a (mm)	d_m (mm)	d_s (mm)	a/d_m	b_w (mm)	A_s (mm ²)
	平均 σ_{cgd}	上縁	下縁								
TB-0	-	-	-	7.13	55	1050	300	175	3.5	200	629.8
TB-1	1.0	-0.86	2.86								
TB-2	2.0	-1.73	5.73								
TB-3	3.0	-2.59	8.59								

α_c : 部材上縁のテーパ角度, f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度, a : せん断スパン, d_m : 最大断面における有効高さ, d_s : 支点部断面における有効高さ, b_w : ウェブ幅, A_s : PC鋼材の総断面積

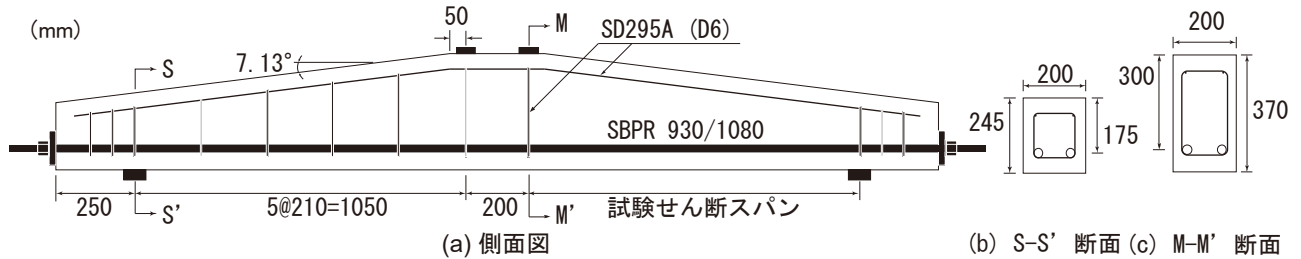


図-1 試験体概要図

を限定した (以下, 試験せん断スパン)。試験水準となる目標プレストレス量 σ_{cgd} は, 1, 2, 3N/mm² の3水準とし, ポストテンション方式によってプレストレスの導入およびグラウト材の注入を行った。なお, RC試験体TB-0ではPC鋼材を非緊張の状態で配置しグラウト材を注入している。プレストレス量は, 最大断面における断面高さの1/2における平均プレストレス (平均圧縮応力) とし, プレストレス導入時のPC鋼材のひずみによって制御した。

2. 2 使用材料

コンクリートは, 設計圧縮強度を 55N/mm²とし, 早強ポルトランドセメントを使用した水セメント比 38%, 単位水量 170kg/m³, 粗骨材の最大寸法 20mm の配合とした。PC 緊張材には, 公称直径 21mm, 公称断面積 346.4mm², 弾性係数 201kN/mm², 降伏強度 1030N/mm² (0.2%耐力) の PC 鋼棒 (丸鋼棒) を, 圧縮鉄筋およびせん断補強鉄筋には弾性係数 200kN/mm², 降伏強度 361N/mm²の異形鉄筋 D6 を使用した。また, シースは内径 28mm の溶融亜鉛メッキ鋼板製であり, グラウト材は無収縮モルタルとした。

2. 3 載荷方法と測定項目

載荷は, 油圧式 1000kN 万能試験機を用いて静的 4 点曲げ載荷とした。載荷点には幅 65mm の鋼板を, 支点には回転支承の上に幅 75mm の鋼板を設置した。支点の鋼板と試験体の間にはグリスを 2 枚のテフロンシートで挟んだ減摩パッドを設置して水平方向の摩擦を低減した。

測定項目は, 荷重, スパン中央におけるたわみ, PC 鋼材のひずみとした。荷重は万能試験機の電圧出力を, スパン中央のたわみは両支点およびスパン中央に設置した接触式ひずみ変換型変位計の出力を, PC 鋼棒のひずみはゲージ長さ 2mm のひずみゲージのひずみをデータロガーによって収録した。PC 鋼棒のひずみゲージは, スパン中央位置および両支点直上の位置に貼り付けた。

3. 実験結果と考察

3. 1 荷重-たわみ関係

図-2 に各試験体の荷重とたわみの関係を示す。なお, 図中には曲げひび割れおよび斜めひび割れの発生荷重位置も付記した。プレストレス量の増加にともなって曲げひび割れ発生荷重の増加が認められ, プレストレス量が大きいほど曲げひび割れが斜めひび割れへと進展し始める荷重についても増加する傾向が認められた。また, プレストレス量が大きくなるほど最大荷重は大きくなり, 目標プレ

ストレス量を 1, 2N/mm²とした TB-1, TB-2 では、RC 試験体の TB-0 と比べて、それぞれ 1.5 倍、2 倍程度となった。

RC 試験体の TB-0 および目標プレストレス量が 1N/mm²の TB-1 では、斜めひび割れの発生直後に一時的な荷重の低下が認められた。一方、プレストレス量の大きな TB-2, TB-3 では、斜めひび割れの発生に伴う荷重の低下は認められなかった。一般に、 a/d の小さな矩形はりでは、タイドアーチ的な耐荷機構の発現により、斜めひび割れ発生後さらに大きな荷重に抵抗することが知られている。本研究で対象とした変断面はり試験体においても、せん断補強鉄筋を配置していないにもかかわらず、斜めひび割れ発生後に荷重が増加する傾向が認められ、プレストレス量が大きな試験体ほど、斜めひび割れ発生後の荷重の増加は大きくなった。

3. 2 ひび割れ・破壊性状

各試験体の最大荷重直前のひび割れ性状を図-3に、最大荷重直後の試験せん断スパンの様子を写真-1に示す。なお、ひび割れ図では最大荷重時に最も開口した斜めひび割れを太線で示している。いずれの試験体においても、曲げひび割れのひとつが徐々に載荷点に向かって傾斜して斜めひび割れ

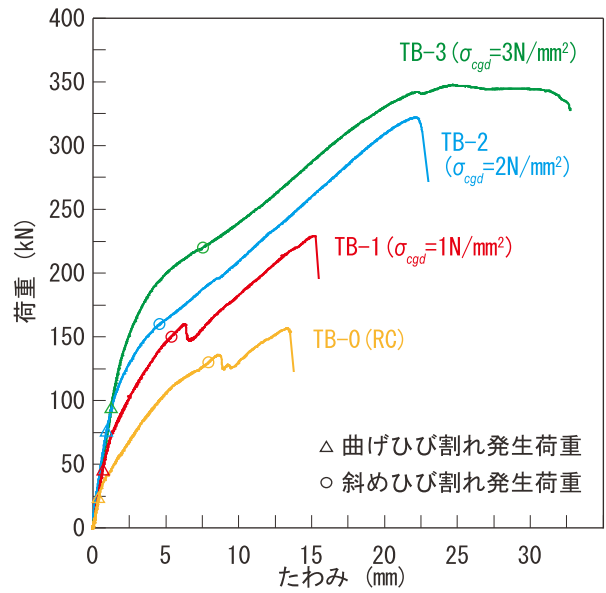


図-2 荷重-たわみ関係

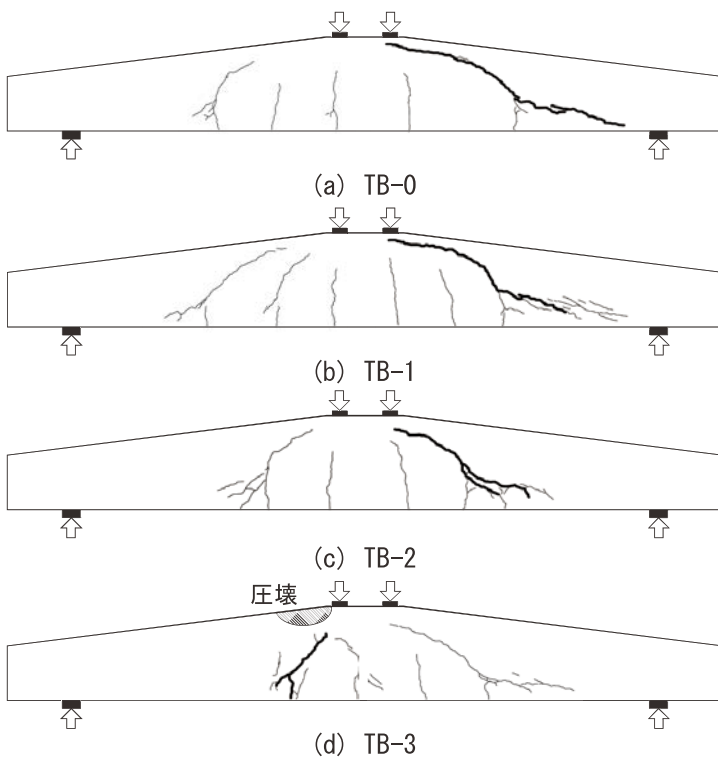


図-3 ひび割れ性状(最大荷重直前)

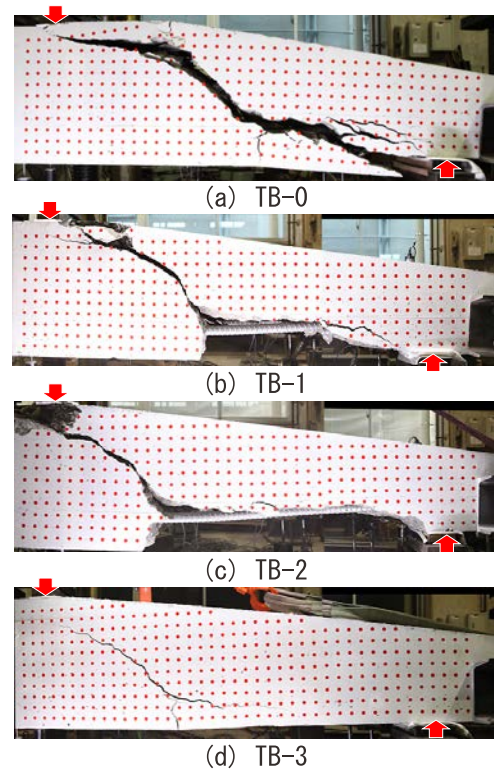


写真-1 ひび割れ性状(最大荷重直後)

となり、また、引張材に沿うように支点方向にもひび割れが進展した。なお、いずれの試験体においてもウェブせん断ひび割れは認められなかった。せん断破壊性状はTB-0, TB-1, TB-2 の3体でおよそ類似しており、引張材に沿って進展したひび割れが開口して鋼材の付着破壊によるコンクリートの割裂破壊が生じると同時に、斜めひび割れより上部のコンクリートへのひび割れの貫通 (写真-1 (a))、あるいは荷重点付近のコンクリートの圧壊 (写真-1 (b) (c)) によって荷重が低下した。特に、目標プレストレス量を 1, 2N/mm²とした TB-1, TB-2 では、かぶりコンクリートが剥落するような激しい破壊性状を示した。一方、プレストレス量の最も大きな TB-3 では、せん断補強鉄筋を配置した非試験せん断スパン側の荷重点付近のコンクリートの圧壊 (図-3 (d)) とともに荷重が低下し、試験せん断スパン側の斜めひび割れは最大荷重後には閉口していく挙動を示した。

また、斜めひび割れに進展する曲げひび割れの発生位置は、プレストレス量の増加に伴い荷重点に近くなる傾向が認められた。本研究においては、最大荷重直後の引張材に沿った付着・割裂破壊が顕著になっており、前述の斜めひび割れ発生後の荷重の増加は、斜めひび割れに進展する曲げひび割れの発生位置から支点までの距離にも関連していると推察される。

3. 3 PC 鋼材のひずみ

曲げひび割れ発生時、斜めひび割れ発生時ならびに最大荷重時の PC 鋼材ひずみの軸方向分布を図-4 に示す。なお、図中横軸は非試験せん断スパン側の支点を原点とした部材軸上の位置を表している。また、TB-3 の試験せん断スパン側支点位置のひずみは、荷重中に計測不良となったことから最大荷重時の値は除外している。TB-1, TB-2, TB-3 の3体では、斜めひび割れ発生以後、PC 鋼材の支点直上におけるひずみが増加していることが確認できる。これは引張材に沿ったひび割れの進展によって、引張材とコンクリートの付着が低下したことが原因であると考えられる。最大荷重時には、支点部と試

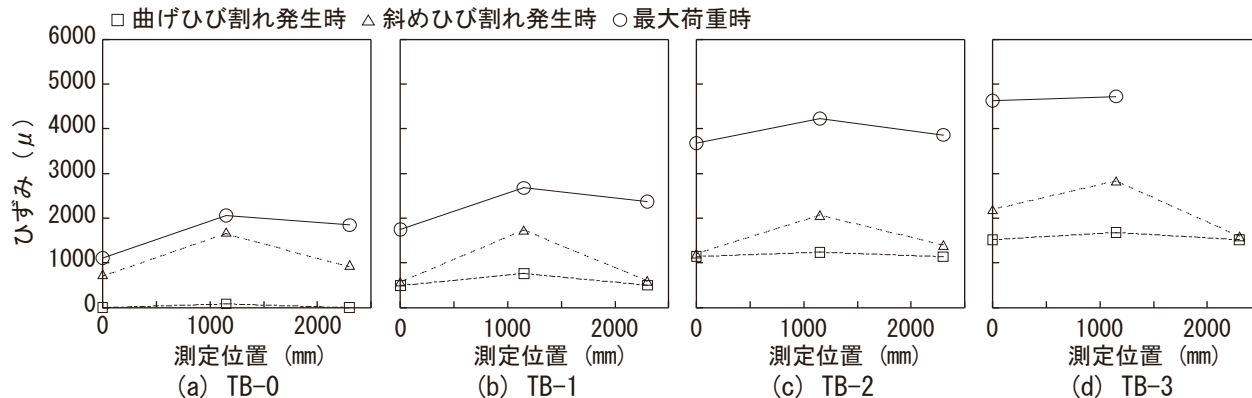


図-4 各荷重段階におけるPC鋼材ひずみの軸方向分布 (両支点直上およびスパン中央)

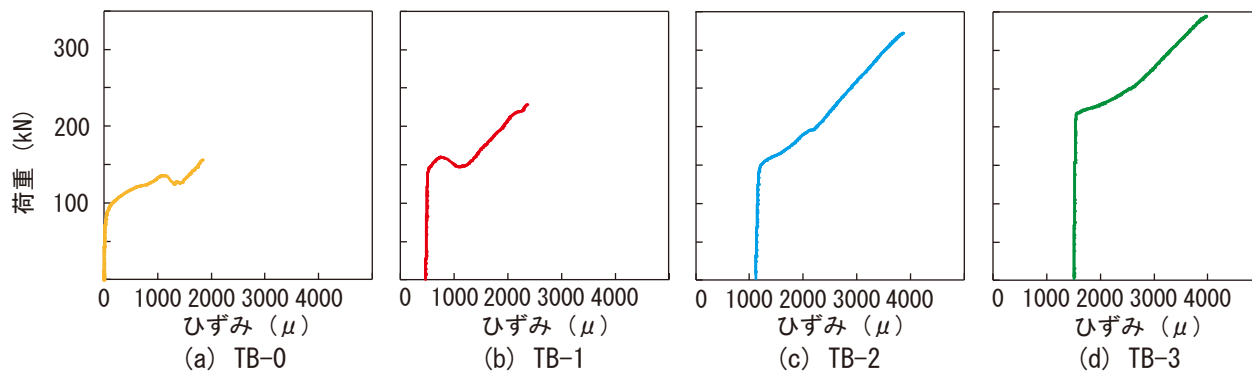


図-5 試験せん断スパン側の支点直上におけるPC鋼材ひずみと荷重の関係

験体中央部のひずみは同程度となり、部材軸方向に一樣に近いひずみ分布を示した。これは、タイドアーチ的な耐荷機構の発現を示唆するものと考えられる。

次に、支点直上における PC 鋼材のひずみと荷重の関係を図-5に示す。いずれの試験体においても、ある荷重を境に PC 鋼材のひずみが増加し始めることが確認できる。表-2に後述する有効プレストレスを横軸として、支点部のひずみが急増する荷重、斜めひび割れが観察された荷重、最大荷重を図-6に示す。なお、支点部のひずみが急増する荷重は、5kN ごとのひずみの増加率を基に決定している。これによると、支点部ひずみが急増する荷重は、斜めひび割れが観察された荷重とおおむね一致することがわかる。また、いずれの試験体でも、斜めひび割れ発生以後も耐荷力を失わず荷重の増加に抵抗しており、プレストレス量が大きな試験体ほど斜めひび割れ発生以後の荷重の増加が大きくなっていることがわかる。

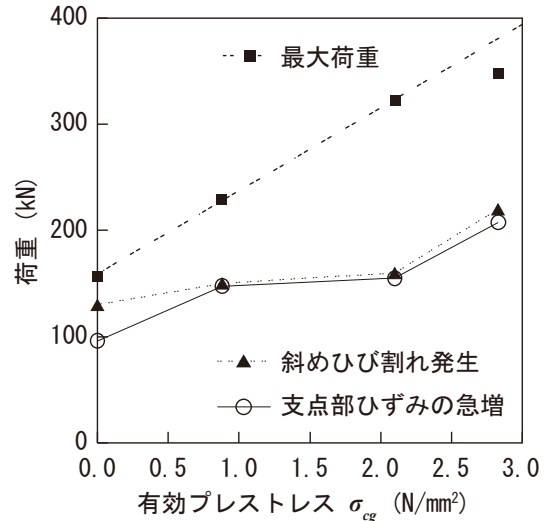


図-6 各荷重とプレストレスの関係

4. プレストレスの効果を表す係数に関する検討

表-2に、試験開始時の有効プレストレス σ_{cg} とせん断耐力の実験値 V_{exp} 、また式(3.1)、式(3.2)より得られるせん断耐力の計算値を示す。なお、変断面はりでは、せん断スパン内で有効高さが変化するため、照査断面によってせん断耐力の計算値が異なる。ここでは、一つの基準として、せん断耐力の計算値が最大となる最大断面の有効高さをを用いた場合の計算値を示している。

$$V_{c_cal} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{vc} \cdot b_w \cdot d \quad (3.1)$$

$$\beta_{n_cal} = \sqrt{1 + \sigma_{cg} / f_{vt}} \quad (\leq 2) \quad (3.2)$$

ここに、 $f_{vc} = 0.20\sqrt[3]{f'_c}$ 、 $\beta_d = \sqrt[3]{1000/d}$ (≤ 1.5)、 $\beta_p = \sqrt[3]{100p_v}$ (≤ 1.5)、 $p_v = 100A_s / (b_w d)$ 、 $f_{vt} = 0.23f'_c{}^{2/3}$ とした。

すべての試験体において、実験値は最大断面を用いた計算をも上回る結果となった。RC 試験体 TB-0 の計算値に対する実験値の比は 1.2 と小さい一方、PC 試験体では 1.5~1.9 となりせん断耐力を過小評価する傾向が認められた。なお、破壊形態の異なる TB-3 のせん断耐力については、直接的な比較は難しいため参考値として示した。

次に、プレストレスの効果を表す係数である β_n と有効プレストレスの関係を図-7に示す。なお、

表-2 せん断耐力の計算値と実験値の比較

試験体	f'_c (N/mm ²)	σ_{cg} (N/mm ²)	β_{n_cal}	V_{c_cal} (kN)	V_{exp} (kN)	β_{n_exp}	V_{exp} / V_{c_cal}
TB-0	56.3	-	1.00	130.4	156.9	1.00	1.20
TB-1	56.6	0.88	1.12	146.6	229.2	1.46	1.56
TB-2	52.6	2.10	1.28	163.7	322.0	2.05	1.97
TB-3	57.3	2.83	1.35	177.4	(347.7)*	(2.22)*	(1.96)*

* TB-3 試験体については、破壊形態が異なるため、参考値として示す。

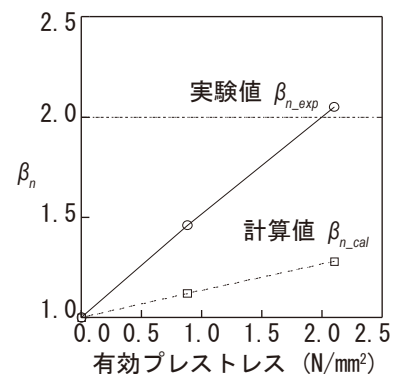


図-7 β_n の比較

$$\beta_{n_exp} = V_{exp_TB-n} / V_{exp_TB-0} \quad (3.3)$$

図中の実験値は、各試験体の最大荷重 V_{exp_TB-n} ($n = 1, 2, 3$) と RC 試験体の最大荷重 V_{exp_TB-0} を用いて式 (3.3) より算出した。有効プレストレスが大きくなるほど式 (3.2) から求められる計算値 β_{n_cal} と実験値 β_{n_exp} の差が大きくなり、プレストレス量 2N/mm^2 の TB-2 では、実験値は計算値の 2 倍以上となっている。

以上の結果より、せん断補強鉄筋のない変断面 PC はりのせん断耐力は、現行の設計式を活用することによって安全側に評価できることが明らかになった。しかしながら、プレストレス量が増えるほど変断面 PC はりのせん断耐力を過小評価する傾向が認められ、今後、変断面 PC はりのせん断耐力を評価する際には、プレストレスの効果 β_n についても有効高さが変化する影響を考慮する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、プレストレスがせん断補強鉄筋のない変断面 PC はりのせん断耐力に及ぼす影響を検討するために、プレストレス量を試験水準とした 4 体の変断面はり ($a/d = 3.5$) の静的載荷試験を行った。本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断補強鉄筋のない変断面はりでは、プレストレス量の増加にともなって曲げひび割れ発生荷重、斜めひび割れ発生荷重、最大荷重が大きくなった。
- (2) プレストレスの増加に伴い、斜めひび割れへ進展する曲げせん断ひび割れの発生位置が載荷点に近づいていくことが認められた。
- (3) 支点部のひずみが急増する荷重は、斜めひび割れが観察された荷重とおおむね一致した。また、いずれの試験体でも、斜めひび割れ発生以後も耐荷力を失わず荷重の増加に抵抗しており、プレストレス量が大きな試験体ほど斜めひび割れ発生以後の荷重の増加が大きくなった。
- (4) せん断補強鉄筋のない変断面 PC はりのせん断耐力は、現行の設計式を活用することによって安全側に評価できるものの、プレストレス量が増えるほどせん断耐力を過小評価する傾向が明らかになった。

謝辞

本研究の一部は、一般財団法人 橋梁調査会の平成 28 年度 橋梁技術に関する研究開発助成を得て実施したものである。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) Chenwei HOU, Koji MATSUMOTO, Takayuki IWANAGA, Junichiro NIWA: SHEAR BEHAVIOR OF TAPERED RC BEAMS WITH STIRRUPS, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No.2, pp. 61-66, 2015
- 2) Chenwei HOU, Takuro NAKAMURA, Takayuki IWANAGA, Junichiro NIWA: SHEAR BEHAVIOR OF REINFORCED CONCRETE AND PRESTRESSED CONCRETE TAPERED BEAMS WITHOUT STIRRUPS, Journal of JSCE., Vol. 5, No. 1, pp. 170-189, 2017.3
- 3) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書 設計編, 2013
- 4) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料 基本原則編・設計編・施工編, コンクリートライブラリー138, pp. 122-127, 2013.3
- 5) 三方康弘, 井上晋, 小林和夫, 仁枝保: PC はり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果, 土木学会論文集, No. 669/V-50, pp. 149-159, 2001.2