

(22) 曲げ上げケーブルを有するプレストレスト コンクリートはりのせん断破壊試験と解析

東日本旅客鉄道株式会社 建設工事部 正会員 ○小林 薫
東日本旅客鉄道株式会社 東京工事事務所 正会員 川崎 徹

1. はじめに

現在、プレストレストコンクリートはり (以下「PCはり」という) のせん断耐力は、RC梁のせん断耐力式を基準とし、プレストレスの効果はデコンプレッションモーメントを考慮することで、その耐力を求めることにしている。

しかし、通常のPCはりでは、部材に発生する曲げモーメントの形状に合わせてPC鋼材が配置され、支点付近ではPC鋼材定着のため、PC鋼材が曲げ上げ配置となっている。このようなPCはりのせん断耐力の評価法に関しては、研究例も少なく、不明確な点も多い。

そこで、本研究では、せん断補強のない曲げ上げケーブルを有するPCはりの試験体によるせん断破壊試験を行い、せん断ひび割れ面でのひび割れ挙動の測定、非線形有限要素法による解析から、せん断補強のない曲げ上げケーブルを有するPCはりのせん断耐力について検討したものである。

2. 試験概要

2.1 試験体の概要

図-1に、試験体の一般図を示す。今回の試験に用いた試験体は8体で、断面形状は全て矩形断面とした。

試験体のPC鋼材は、PC鋼棒φ32 (SBPR930/1080) を用いた。PC鋼棒の配置は、1段配置と2段配置のものを製作した。PC鋼棒を1段配置とした試験体は、PC鋼棒の曲率半径をR1=8.66mとR2=3.66m

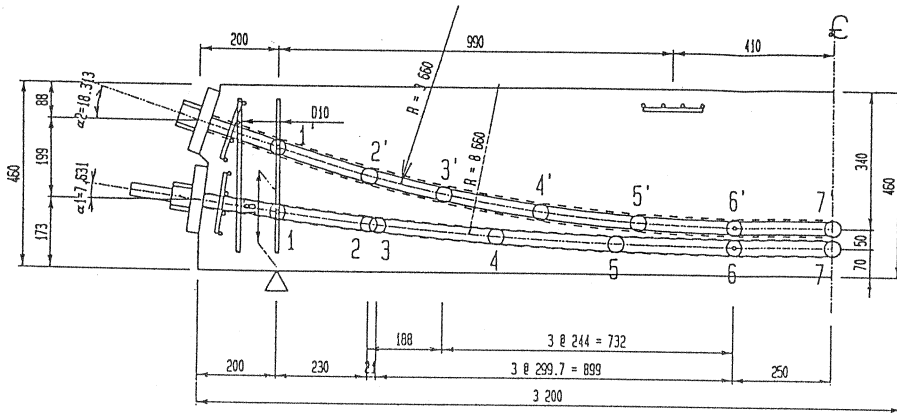


図-1 試験体一般図 (PC鋼棒2段配置の場合)

表-1 試験体諸元表

試験体No	断面形状 b × h (mm)	せん断 力/断面比 (a/h)	PC鋼材 (SBPR930/1080) Ap (cm ²)	軸方向鉄筋量 (SD345) As (cm ²)	せん断補強鉄筋 (SD345) Aw (cm ² /m)	ケーブル形状 (円曲線) 半径 R (cm)	プレスト レス力 Pe (tf)	コンクリート 圧縮強度 f _c (kgf/cm ²)
1	150 × 450	1.87	8.042 (φ32-1)	0	0	直線	0	438
2	170 × 460	1.83	8.042 (φ32-1)	0	0	直線	50	444
3	150 × 450	1.87	8.042 (φ32-1)	0	0	R1=866	0	396
4	170 × 460	1.83	8.042 (φ32-1)	0	0	R1=866	50	450
9	170 × 460	1.83	16.084 (φ32-2)	0	0	R1=866, R2=366	0	479
10	170 × 460	1.83	16.084 (φ32-2)	0	0	R1=866, R2=366	25 × 2本 = 50	411
11	170 × 460	1.83	8.042 (φ32-1)	0	0	R2=366	0	493
12	170 × 460	1.83	8.042 (φ32-1)	0	0	R2=366	50	467

の2種類とし、2段配置した試験体では曲率半径 R1 と R2 のPC鋼棒を配置した。また、PC鋼棒を曲線配置した試験体との比較のためPC鋼棒を直線配置した試験体も製作した。表-1に試験体の各諸元を示す。

試験体の製作に使用したコンクリートは、表-2に示す配合で、試験時の目標圧縮強度は、400kgf/cm²とした。なお、試験時材令におけるコンクリートの圧縮強度は、現場養生の標準供試体(円柱供試体φ=100mm)により確認することとし、実際には表-1に示す圧縮強度で試験を行った。

試験体へのプレストレス力の導入は、コンクリートの圧縮強度が350kgf/cm²以上となってから行うこととした。PC鋼棒の定着は、アンカープレートでナットで固定して行った。PC鋼棒の定着後、セメントグラウトを注入(シース径φ=45mm)した。なお、試験体には、せん断補強用の鋼材は配置していないが、PC鋼棒定着部の補強のために支点からPC鋼棒定着部付近にはスターラップを配置した。

表-2 コンクリート配合表

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 w/c (%)	細骨材率 S/A (%)	単 位 量 (kg/m ³)						設計基準強度 (kg/cm ²)
					水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤		
									MT	VS	
20	8±2.	2±1	42.0	42.0	158	380	766	1081	3.99		400

2.2 試験項目及び載荷方法

測定項目は、PC鋼材のひずみ、コンクリートの表面ひずみ、たわみ、ひび割れ状況及び載荷荷重とした。PC鋼棒およびコンクリートの表面のひずみ測定には、測長3mmと測長60mmのワイヤーストレインゲージをそれぞれ使用した。支点位置および支点からh/2(h:試験体のはり高さ)離れた位置の試験体中立軸位置のコンクリート表面のひずみ測定には、ワイヤーストレインゲージを直角三軸型の配置とし、断面に発生する主ひずみ、主応力角の測定を行った。

ひび割れ状況は、ひび割れ発生後載荷荷重毎にコンクリート表面のひび割れを記録した。このとき、試験体に発生したひび割れがせん断破壊面と想定される場合に、そのひび割れを跨ぐように2軸亀裂変位計を部材中立軸付近に貼り付けた。この2軸亀裂変位計では、コンクリート表面のひび割れ幅をX方向(部材軸方向)とY方向(部材はり方向)同時に測定を行うことができるもので、載荷荷重毎のひび割れ面における変位ベクトルの把握が可能となる。

載荷方法は、図-2に示すように2点集中載荷とし、試験は油圧ジャッキ(100tf用)にて0.5tfピッチで載荷し、曲げひび割れが発生した時点で一旦除荷し、その後破壊まで1.0tfピッチで載荷した。

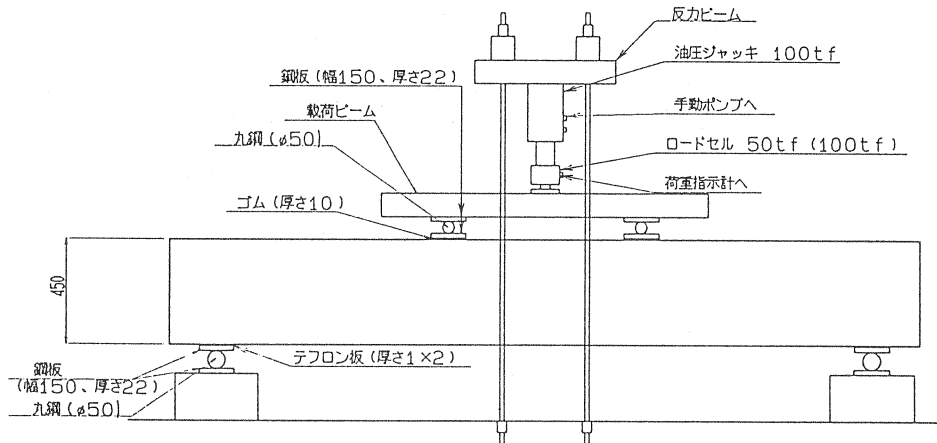


図-2 載荷試験状況

3. 試験結果および検討結果

3.1 破壊性状

表-3に、各試験体の破壊荷重を示す。図-3に、主な試験体の載荷試験後のひび割れ発生状況を示す。載荷試験状況および試験体の破壊状況から次のことが観察された。

(1) せん断破壊した試験体は、全て圧縮域のコンクリートの圧壊に起因するせん断圧縮破壊の破壊形態であった。

(2) PC鋼材を2段配置したNo9試験体では、荷重載荷点と支点を結ぶ線上にせん断破壊面が発生し、せん断ひび割れ幅は載荷荷重を保持している間で急激に進展した。

(3) プレストレスを導入した試験体でPC鋼棒が1段配置の試験体は、載荷点近傍の断面位置でせん断破壊した。PC鋼棒が2段配置となっているNo10試験体では、No9試験体が支点の極近傍まで斜めひび割れが進展したのに対して、支点からほぼh (h:試験体のはり高さ) 離れた位置にせん断ひび割れが進展して破壊となった。

表-3 試験及び計算結果

試験体 No	破壊荷重 P _{max} (tf)	せん断耐力式から V _{cal} (tf)	非線形FEM解析結果 V _{FEM} (tf)	P _{max} /V _{cal}	P _{max} /V _{FEM}	破壊形態
1	28.0	14.6	14.0	1.92	2.00	せん断破壊
2	43.8	43.0	28.0	1.02	1.56	"
3	27.5	14.1	16.0	1.95	1.72	曲げ破壊
4	39.9	44.2	30.0	0.90	1.33	せん断破壊
9	42.3	22.1	32.0	1.91	1.32	"
10	57.7	53.0	46.0	1.09	1.25	"
11	35.2	15.2	12.0	2.32	2.93	曲げ破壊
12	41.4	43.9	42.0	0.94	0.99	せん断破壊

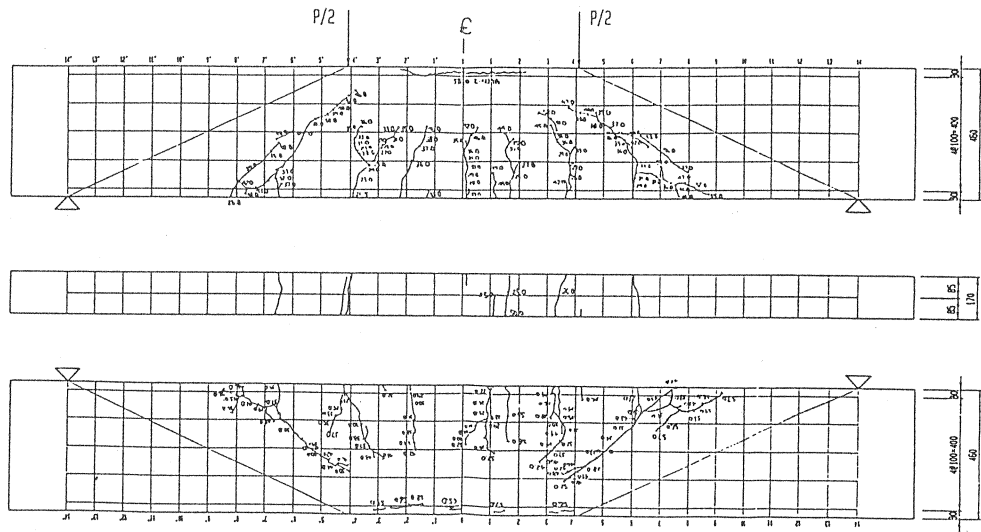


図-3 破壊試験後のひび割れ状況 (No10 試験体)

3. 2 せん断破壊面におけるひび割れ挙動の測定結果

図4、図5に、PC鋼棒が2段配置されているNo9およびNo10試験体で2軸亀裂変位計による測定結果を示す。測定は、せん断破壊側のコンクリート表面で行っており、表側をA面、その裏面をB面としている。

部材軸に対するひび割れ幅の進展方向は、部材軸に対する角度で表すこととし、各載荷荷重時のX方向変位量 (X)、Y方向の変位量 (Y) から、 $\theta = \tan^{-1} Y / X$ で求めている。検討結果を図6、図7に示す。

この結果から、プレストレスを導入していないNo9試験体のせん断破壊近傍の各載荷荷重では、部材軸に対して約70~80度の角度でせん断変形が進み破壊に到るのに対して、プレストレスを導入したNo10試験体では部材軸に対して約40~50度の角度で斜めにずれるように挙動して破壊に到ることがわかる。

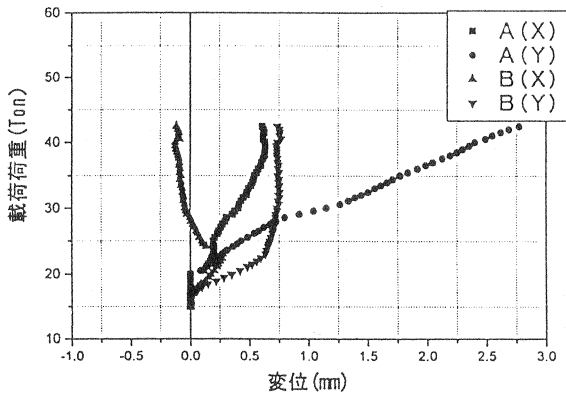


図-4 2軸亀裂変位計での測定結果(No9 試験体)

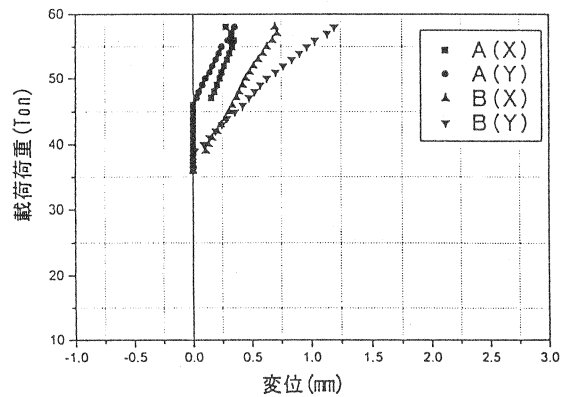


図-5 2軸亀裂変位計での測定結果(No10 試験体)

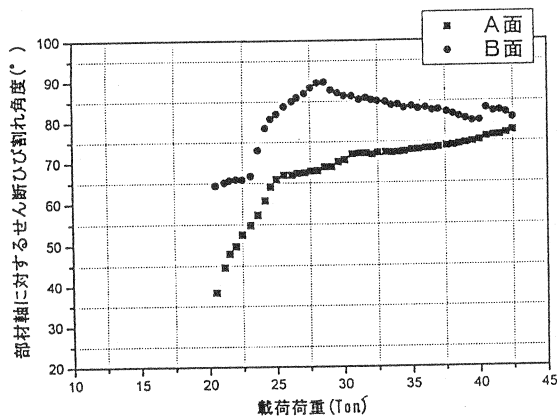


図-6 ひび割れ面で部材軸に対するひび割れ角度の推移(No9 試験体)

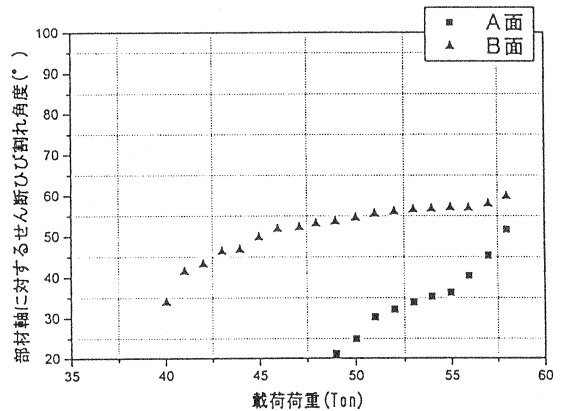


図-7 ひび割れ面で部材軸に対するひび割れ角度の推移(No10 試験体)

3. 3 既往のせん断耐力式による検討

既往のせん断耐力算定式を用いて曲げ上げケーブルを有するPC部材のせん断耐力の算定を試みた。式(1)に、検討に用いたせん断耐力算定式を示す。

$$V = V_c + V_p + V_{pe} \quad (1)$$

ここに、 V はせん断耐力、 V_c はコンクリートが負担するせん断耐力、 V_p はプレストレスの効果、 V_{pe} はPC鋼材の曲げ上げ効果を表す。ここで用いた V_c の算定は土木学会コンクリート標準示方書斜めひび割れ耐力算定式の基礎¹⁾となる式(2)を用いた。また、 V_p の算定では鳥取らの提案²⁾による式(3)を用いた。PC鋼材の曲げ上げ効果 V_{pe} については、部材係数 γ を1.0とした土木学会コンクリート標準示方書設計編³⁾の式(4)を用いた。

$$V_c = 0.94(f'cPw)^{1/3}(100/d)^{1/4}\{0.75 + 1.4(d/a)\}bd \quad (2)$$

ここに、 $f'c$ はコンクリート圧縮強度 (kgf/cm^2)、 P_w は引張鋼材比 (%) でPC鋼棒が2段配置されている場合は最下段のPC鋼棒位置に2段目のPC鋼棒断面積を補正して加えたPC鋼棒断面積から P_w を求めている。2段目のPC鋼棒断面積は、1段目と2段目のPC鋼棒の上縁からの高さの比から補正を行った。 d は有効高さ (cm) でせん断破壊位置での値を用いた。 a はせん断スパン (cm) で荷重の載荷版前面から支承用鋼版前面までの距離とした。 b ははり幅 (cm) である。

$$V_p = (2M_o/a)(1.4 - 0.6\sqrt{(\sigma I/fct) + (\sigma'c/f'c)}) \quad (3)$$

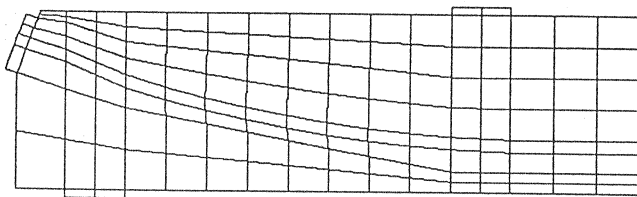
ここに、 M_o は $a/2$ 位置でデコンプレッション状態となるとき曲げモーメント、 σI および $\sigma'c$ は $a/2$ 断面がデコンプレッション状態時の斜め引張応力度、等曲げスパン内のコンクリートの縁圧縮応力度を表す。

$$V_{pe} = P_e \cdot \sin \alpha_p \quad (4)$$

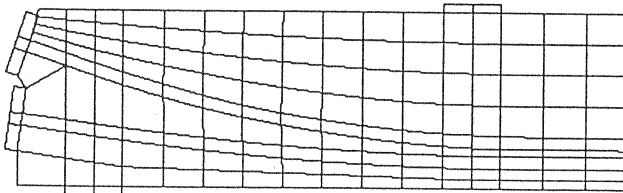
ここに、 P_e はプレストレス力、 α_p はPC鋼材が部材軸となす角度を表す。検討結果を表-3に示す。プレストレスを導入した試験体については、式(1)で比較的精度良く (V_{test}/V_{cal} の平均値0.99、変動係数7.1%) 試験体の破壊荷重を推定していた。

4. 非線形有限要素法による解析結果

非線形有限要素法による解析から、せん断補強のない曲げ上げケーブルを有するPCはりの破壊荷重の算定を試みた。図-8に、解析モデルの例として、PC鋼棒を1段配置した試験体と2段配置した試験体の解析モデル図を示す。解析モデルに用いたコンクリートの材料構成則は、圧縮破壊後のひずみ軟化特性を考慮し、破壊基準はKupferらの包絡線を多点折れ線近似したものをを用いた⁹⁾。また、ひび割れモデルについては、分布ひび割れモデルを用いている。解析結果を表-3に示す。図-9に、図-8の解析モデルにおける破壊荷重時のひび割れ図を示す。プレストレスを導入した試験体の非線形有限要素での解析結果は、既往のせん断耐力式より精度は劣る (V_{test}/V_{FEM} の平均値1.28、変動係数15.9%) もの曲げ上げケーブルを有するPCはりのせん断耐力を安全側に評価している。

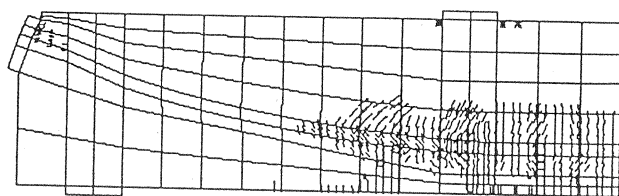


(a) PC鋼棒1段配置の場合 (No12 試験体)

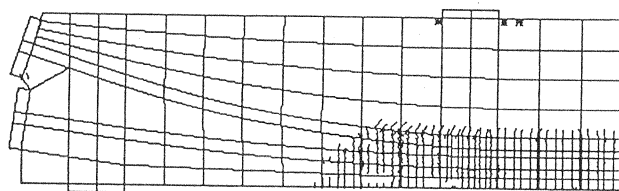


(a) PC鋼棒2段配置の場合 (No10 試験体)

図-8 非線形FEM解析モデル



(a) PC鋼棒1段配置の場合 (No.12 試験体)



(b) PC鋼棒2段配置の場合 (No.10 試験体)

図-9 非線形FEM解析結果 (ひび割れ図)

5. まとめ

今回の載荷試験および解析から明らかになった点を下記にまとめる。

- (1) PC鋼材が2段配置されている試験体のせん断ひび割れ挙動は、プレストレス力が導入されている場合は部材軸に対して約40～50度の角度でせん断破壊面ですれるように変形し破壊に至る。
- (2) プレストレスが導入されていないPCはりでは、部材軸に対して約70～80度と鉛直に近い角度でせん断破壊面ですれるように変形して破壊に至る。
- (3) 式(1)は、プレストレスを導入した曲げ上げケーブルを有するPCはりのせん断耐力の平均値を比較的精度良く推定した。
- (4) 非線形有限要素法による解析結果は、曲げ上げケーブルを有するPCはりのせん断耐力を安全側に評価する。

【参考文献】

- 1) 二羽、山田、横沢、岡村：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、土木学会論文報告集第372号、1986
- 2) 鳥取、涌井：プレストレストコンクリートはりのせん断耐力、プレストレストコンクリート技術協会第3回シンポジウム論文集、1992
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成8年版)設計編、土木学会、1996
- 4) ADINA理論とモデル化の手引き、構造計画研究所