

大偏心外ケーブル式 PC 桁のせん断性状に関する実験的研究

埼玉大学大学院 ○ 井上 智之

埼玉大学教授 正会員 睦好 宏史

ドービー建設工業(株)技術センター 正会員 T.Aravinthan

三井建設(株)土木本部 PC 技術部 正会員 渡辺 宗樹

1. 研究の背景と目的

近年、外ケーブル式 PC 構造が実構造物に適用されつつあり、また新しい PC 構造形式の開発も盛んに行われている。外ケーブル式 PC 構造は、内ケーブル式 PC 構造に比べ桁の軽量化、施工性の改善、維持管理が容易など多くの利点がある。しかしながらコンクリートとケーブルの間に付着が無いため、一般に終局時にケーブルが降伏することはなく、曲げ終局耐力が内ケーブル式に比べて小さくなるということが知られている。著者らはこれを改善してケーブルの高強度特性を有効に活用する構造として、ケーブルを桁高以上に偏心配置させた大偏心外ケーブル式 PC 桁の開発を行ってきた。この結果大偏心外ケーブル式 PC 桁の曲げ性状はほとんど明らかにされてきている。一方、外ケーブル式 PC 桁のせん断性状に関する研究例は少なく、特に大偏心外ケーブル式 PC 構造においては研究例がなく、ほとんど明らかにされていない。本研究では、外ケーブル断面積、偏心量、初期導入プレストレス量を実験要因とした大偏心外ケーブル式 PC 桁の静的せん断載荷実験を行い、そのせん断性状を明らかにした。また既往の PC 梁のせん断耐力算定式を用いて大偏心外ケーブル式 PC 桁への適用性を検討した。

2. 実験概要

実験に用いた供試体は計 4 体で、その形状寸法を図-1 に示す。全長 3.0m、支間長 2.5m の 1 径間単純支持とし、断面形状は幅 400mm、桁高 150mm の矩形断面とした。載荷スパンはすべての供試体で 1.5m とし、せん断スパンは 0.5m、偏向部はスパン中央に配置した。圧縮鉄筋には D6 (SD345) を 2 本配置し、引張鉄筋には A-1,A-2,A-3 供試体に対して D22 (SD345) を 4 本配置し (引張鉄筋断面積 $A_s=1548.0\text{mm}^2$)、A-4 供試体のみ異形 PC 鋼棒 4 本を使用した (引張鉄筋断面積 $A_s=1662.0\text{mm}^2$)。また全ての供試体で支間内にせ

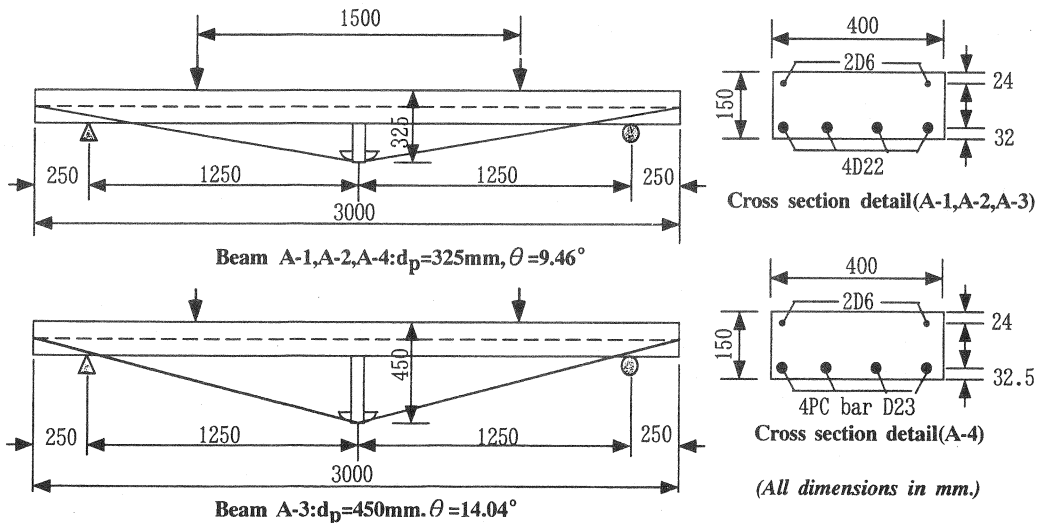


図-1 供試体の形状寸法

表-1 実験要因

No.	fc' (N/mm ²)	主鉄筋		外ケーブル (SWPR7A-type)			パラメーター
		圧縮側	引張側	ケーブル径 (mm)	偏心量 (mm)	導入プレ ストレス量 (kN)	
A-1	37.8	2D6	4D22	1T9.3	250	10	基準供試体
A-2	38.9	2D6	4D22	1T12.4	250	10	外ケーブル径
A-3	38.7	2D6	4D22	1T9.3	375	7	ケーブル偏心量
A-4	39.2	2D6	4PC bar φ 23 mm	1T12.4	250	25	導入プレストレス量 主鉄筋(PC鋼材)

表-2 PC 鋼材および鉄筋の機械的特性

No.	耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
SWPR7A φ9.3mm	1686.0	1860.0	192.3
SWPR7A φ12.4mm	1712.0	1873.0	192.3
D10(SD345)	416.0	577.0	150.0
D22(SD345)	392.0	518.0	194.0

せん断補強筋は配置していない。

実験要因を表-1 に、本研究で使用した鋼材の機械的特性を表-2 にそれぞれ示す。A-1 供試体が基準供試体で、ケーブル偏心量を 250mm (ケーブル曲げ上げ角度 $\theta = 9.46$ 度) とし、外ケーブルに SWPR7A φ9.3mm (断面積 51.61mm²) を用いた。A-2 供試体では外ケーブルに SWPR7A φ12.4mm (断面積 92.3mm²) を用いている。A-3 供試体ではケーブル偏心量を 375mm (ケーブル曲げ上げ角度 $\theta = 14.04$ 度) と大きくし、そのためプレストレス導入時にコンクリート上縁にひび割れが生じないよう外ケーブルへの導入プレストレス量を 7kN と小さくした。A-4 供試体も A-2 供試体と同様に外ケーブルに SWPR7A φ12.4mm を用い、導入プレストレスを 25kN とした。これにより A-4 供試体ではせん断耐力が大きくなり、曲げ破壊に至る可能性があると考えられたため、引張鉄筋にほぼ同等の断面積となる異形 PC 鋼棒 φ23mm を用いせん断破壊に至るようにした。

プレストレスの導入は油圧ジャッキによる片引きで行い、はり両端のケーブル定着部に設置したロードセルで測定した。またケーブルとデビエータとの接触部にはテフロンシートを 2 枚挟み、摩擦の影響を軽減させた。載荷は静的 2 点載荷とし、すべての供試体で破壊に至るまで載荷を行った。

3. 実験結果

3.1 破壊性状

表-3 に実験結果をまとめて示す。表-3 にあるように斜めひび割れ発生時の外ケーブル張力が大きいほど斜めひび割れ発生荷重が大きくなる傾向を示した。

図-2 にひび割れ図を示す。全ての供試体で荷重 35kN 前後にて等曲げ区間において初期ひび割れが発生し、ついでせん断スパンにも発生した。A-1、A-3 供試体ではせん断スパン内の曲げひび割れから斜めひび割れが発生し、載荷点付近に進展したと同時に耐力を失い斜め引張破壊に至った。A-2、A-4 でも同様に斜めひび割れが発生し、一旦荷重が低下したが、図-4 に示した荷重 - 変位関係にあるように、その後も荷重が増

表-3 実験結果

No.	ひび割れ荷重 (kN)		終局荷重 (kN)	変位(mm)		外ケーブル張力 F_{ps} (kN)			外ケーブル応力 f_{ps} (N/mm ²)			破壊形式
	曲げ	せん断		初期	終局時	初期	終局時	ΔF_{ps}	初期	終局時	Δf_{ps}	
A-1	36.8	171.7	193.3	-0.34	21.7	9.5	33.3	23.5	184.1	639.4	455.3	斜め引張破壊
A-2	34.3	186.4	(200.6) 229.7	-0.42	(20.4) 27.1	10.3	(42.3) 61.3	(32.0) 51.0	110.9	(455.3) 659.8	(344.5) 549.0	せん断圧縮破壊
A-3	34.3	186.4	189.3	-0.54	18.3	6.8	34.8	28.0	73.2	674.3	542.5	斜め引張破壊
A-4	34.3	181.5	(209.9) 249.0	-0.86	(18.1) 24.7	24.8	(57.5) 73.5	(32.7) 48.7	267	(618.9) 791.2	(352.0) 524.2	せん断圧縮破壊

注) ()内は斜めひび割れ発生時

加し載荷点内側のコンクリート圧壊によりせん断圧縮破壊に至った。なお全ての供試体で終局時における引張鉄筋のひずみは 2000 μ 以下であり降伏に至っていない。

3.2 偏心量の影響

図-3 に偏心量のみが異なる 2 体の荷重-変位関係を、図-5 に変位 - 外ケーブル応力増分関係を示す。ケーブル配置が等しい A-1、A-2、A-4 供試体では、ケーブル断面積、初期導入プレストレス量が異なるにも関わらずケーブル応力増分が等しくなっている。これはケーブル応力増加割合が梁の幾何学的特徴のみにより決定することを示している。一方偏心量の大きい A-3 供試体では、他の供試体に比べケーブルの応力増分、張力増分ともに大きくなり、図-3 のように桁の剛性も A-1 に比べ高くなっている。また A-3 供試体では偏心量が大きい為に導入プレストレス量を 7kN と小さくしているが、終局時の外ケーブル張力は導入プレストレス量 10kN の A-1 と同程度の値となり、終局荷重もほぼ同等の結果を示した。このことから偏心量が大きいほどせん断耐力が増加すると考えられる。

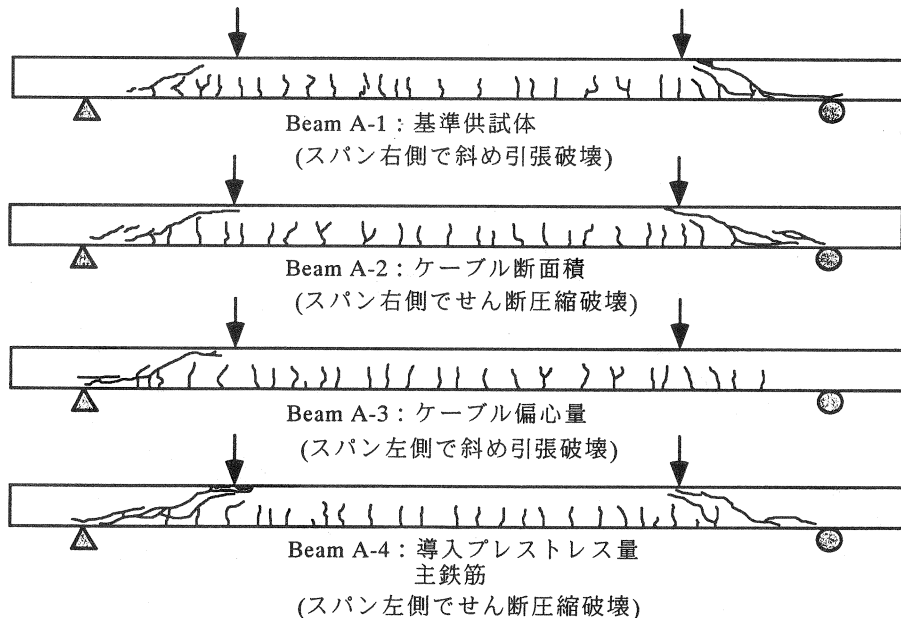


図-2 ひび割れ図

3.3 ケーブル断面積による影響

図-6 に外ケーブル張力増分-変位関係を示す。この図と表-3 に示すように外ケーブルの断面積が大きい A-2、A-4 供試体で張力増分が大きくなり、特に斜めひび割れ荷重時には A-1、A-3 よりも大きな値となっている。結果としてこの 2 体では桁の剛性が上り、斜めひび割れ発生荷重も A-1 供試体に比べて増加している。また、斜めひび割れ角度が約 25 度と、A-1、A-3 供試体の約 30 度と比べて小さくなり、載荷プレートの下を通り載荷点内側へと斜めひび割れが進展した。これは軸力が作用すると斜めひび割れ角度が押さえられるとした既往の研究報告⁷⁾⁸⁾とも一致している。そして、載荷点外側のコンクリートの耐荷力によりタイドアーチ的な耐荷機構が形成され、せん断圧縮破壊に至ったと考えられる。このことから大きな断面のケーブルを用いるなどして、斜めひび割れ発生時の梁により大きなケーブル張力が作用する場合には、破壊形式がせん断引張破壊からせん断圧縮破壊へと変化する可能性があるといえる。

3.4 導入プレストレスの影響

図-4 に示すように、導入プレストレスが 25kN である A-4 供試体では、ケーブル偏心量および断面積が等しく、導入プレストレス量が 10kN である A-2 供試体と比較して桁の剛性が高くなり、斜めひび割れ発生荷重、終局荷重ともに増加している。すなわち大偏心外ケーブル PC 桁において、初期導入プレ

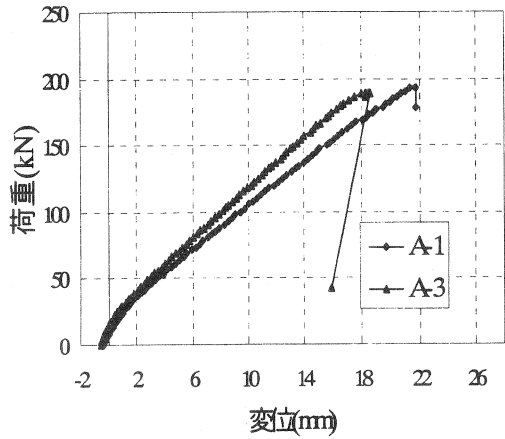


図-3 荷重-変位関係 (偏心量による比較)

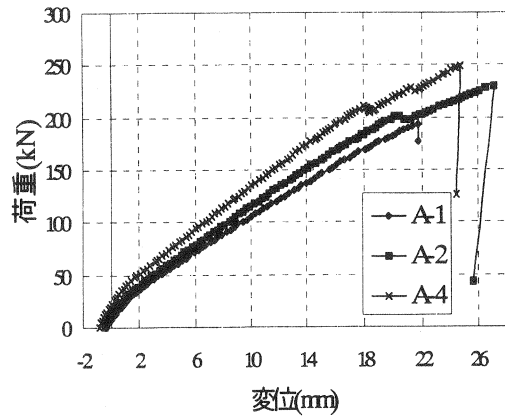


図-4 荷重-変位関係 (ケーブル断面積による比較)

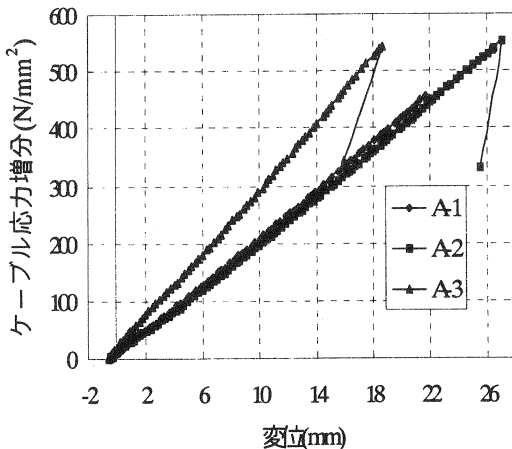


図-5 外ケーブル応力増分-変位関係

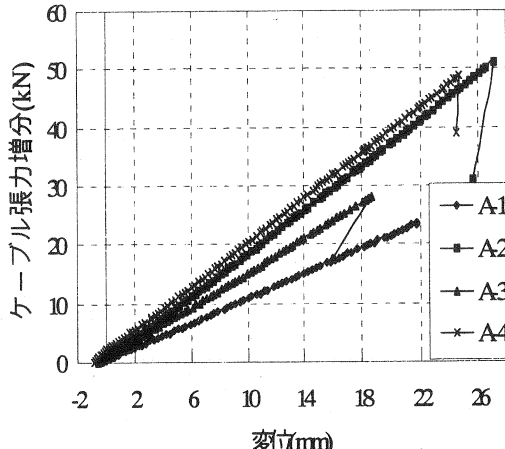


図-6 外ケーブル張力増分-変位関係

表-4 セン断耐力算定式結果

No.	実験値 (kN)	張力増分無		張力増分考慮		曲げ解析より求めた 張力増分考慮	
		計算値 (kN)	計算値/ 実験値	計算値 (kN)	計算値/ 実験値	計算値 (kN)	計算値/ 実験値
A-1	193.3	183.6	0.950	191.4	0.990	191.3	0.990
A-2	(200.6) 229.7	186.1	(0.928) 0.810	(196.7)	(0.981)	(199.2)	(0.993)
A-3	189.3	185.1	0.978	198.7	1.050	199.4	1.053
A-4	(209.9) 249.0	203.3	(0.969) 0.817	(214.1)	(1.020)	(216.1)	(1.030)

注) ()内は斜めひび割れ発生荷重

ストレス量が多いほどせん断耐力は向上するといえる。なお A-4 でのみ引張鉄筋に異形 PC 鋼棒φ23mm を使用しており、異形鉄筋 D22 を用いた他の供試体より鉄筋断面積が若干大きくなっているため、それによる剛性や耐力の向上の影響も多少含まれると考えられる

4. セン断耐力算定式による評価

4.1 既往のせん断耐力算定式

本研究で用いたせん断耐力算定式は、せん断スパンを考慮した二羽・岡村らの式⁵⁾に、軸力の影響を土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾に示される、デコンプレッションモーメントで評価した式である。ここで M_0 および M_u は既往の精算法による曲げ解析プログラムより求めた結果を用いた。以下にその算定式を示す。

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

$$V_{cd} = \beta_d \beta_p \beta_n [0.75 + 1.40/(a/d)] f_{cd} b_w d \quad (2)$$

$$V_{ped} = P_{cd} \sin \theta$$

$$f_{cd} = 0.20 f_{cd}^{1/3}$$

$$\beta_d = (1000/d)^{1/4}$$

$$\beta_p = (100 p_w)^{1/3}$$

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

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

A_s : 引張鉄筋断面積(mm²)

b_w : ウェブ厚(mm)

d : 主鉄筋有効高さ(mm)

f_{cd} : コンクリート設計圧縮強度(MPa)

P_{cd} : 緊張材の有効引張力

(有効プレストレス) (N)

θ : 曲げ上げによる部材軸と

外ケーブルのなす角度

M_0 : デコンプレッションモーメント

M_u : 曲げ解析による終局曲げモーメント

(1)(2)式により求めた解析結果を表-4 に示す。この算定式は本来斜めひび割れ発生荷重を算定するものであり、せん断圧縮破壊した PC 梁の評価式ではないことから、せん断圧縮破壊した A-2, A-4 の 2 体の終局耐力についてはかなりの安全側を与えている。この 2 体に関しては斜めひび割れの発生により一旦荷重が低下した時点での検討も同様に行った。斜めひび割れ発生荷重については全ての供試体で実験値と計算値の誤差は 1 割未満となり、全体としてやや安全側の結果となったが概ね実験値と同様の値を得ることができた。

ここで算定式がやや安全側の結果を与えた原因のひとつとして外ケーブルの張力増分による影響が考えられ、それについての検討も行った。大偏心外ケーブル式 PC の場合、梁の変形に伴うケーブル張力増分が大きく、特に曲げ耐力を求める際にはその影響が最も重要とされている。そこで実験および曲げ解析により求めた斜め引張破壊時の外ケーブル張力の値を用いて、それぞれ再度せん断耐力算定式による評価を行った。

その結果を同様に表-4 に示す。どちらの場合にも A-3,A-4 供試体では実験値と計算値の比率が 1.0 を上回り若干危険側の値を与えているものの、4 体の供試体を比較しても計算値と実験値のばらつきは小さく、張力増分を考慮しない場合より精度のよい結果を得ることができた。

これらのことから本研究で用いた大偏心外ケーブル式 PC 梁の斜めひび割れ発生荷重は、既往のデコンプレッションモーメントを用いたせん断耐力算定方法により評価でき、更にケーブル張力増分を考慮することで精度良く算定できることが明らかになった。しかしながらせん断圧縮破壊に至った場合の終局耐力については今後の検討が必要である。

5. 結論

本研究の範囲から以下のことが言える。

- 1) 大偏心外ケーブル式 PC 梁のせん断性状において、外ケーブル断面積、偏心量および初期導入プレストレスはそのせん断耐力に影響を与え、それぞれ大きくなるほどせん断耐力は上昇する。
- 2) 断面積の大きなケーブルを使うなどして、外ケーブルに作用する張力が大きくなるケースでは、斜めひび割れ角度が抑えられ、タイドアーチ的な耐荷機構に発展しせん断圧縮破壊へと破壊形式が変化する可能性がある。
- 3) 本研究で用いた大偏心外ケーブル式 PC では、既往のデコンプレッションモーメントを用いたせん断耐力算定方法により斜めひび割れ発生荷重を安全側に評価でき、更にケーブルの張力増分を考慮することで精度良く算定できる。

6. 謝辞

本研究を行うにあたり、当時埼玉大学大学院生の W.Eakarath 氏、原健悟氏、卒研究生の池田圭吾氏の多大なる御協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 濱田 譲 他：PC ケーブルトラス桁の曲げ性状に関する研究、プレストレストコンクリート技術協会第7回シンポジウム論文集、pp.437-442, 1997
- 2) T.Aravinthan 他：Flexural Behavior of Externally Prestressed Beams with Large Eccentricities、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.3, pp.673-678, 1998
- 3) 新津 正義 他：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, pp.949-954, 1999
- 4) 原 健悟 他：大偏心外ケーブル式 PC 桁のせん断性状に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.23, No.3, pp.661-666, 2001
- 5) 二羽淳一郎、山田一字、横沢和夫、岡村甫：せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価、土木学会論文集、第372号/v-5, pp.167-176, 1986-8
- 6) 土木学会コンクリート標準示方書(平成8年度版)設計編、土木学会、1996
- 7) 高木康宏、梅津健司、平喜彦、水野克彦：内・外ケーブル方式 PC 単純はりのせん断耐荷特性、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.3, pp.685-690, 2000
- 8) 鄭慶玉、深尾篤、森田嘉満、松井繁之：軸力を導入した鉄筋コンクリート梁のせん断耐力向上についての実験と解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.22, No.3, pp.853-858, 2000