

論文 大偏心外ケーブル式 PC 桁のせん断性状に関する研究

原 健悟^{*1}・陸好 宏史^{*2}・Aravinthan, T^{*3}・篠崎 裕生^{*4}

要旨：本研究では、ケーブルの高強度特性を有効に活用する構造として、外ケーブルを桁外に配置し、偏心量を増加する大偏心外ケーブル式 PC 桁に関する静的せん断載荷試験を行い、そのせん断性状を比較検討した。実験に用いた要因としては、せん断スパン/有効高さ比、ケーブルの有効高さ、デビエータ数である。

本研究から大偏心外ケーブル式 PC 構造のせん断性状において、せん断スパン内での PC 鋼材の配置に影響していること、軸力が作用すると斜めひび割れ角度が小さくなる傾向にあることが明らかとなった。

キーワード：大偏心、外ケーブル PC、せん断耐力、ケーブル配置

1. 序論

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、コンクリートとケーブルとの間に付着がないため、曲げ終局耐力が内ケーブル方式に比べて小さくなるのが、一般によく知られている。特に桁スパン/高さの比が大きい場合には、終局時において外ケーブルの張力増分は小さくなり、一般に降伏に至ることはない。このことは、ケーブルの高強度特性を有効に活用していないことを示唆している。このようなことを改良するために、外ケーブルを桁外に配置して偏心量を増加する方法(以下、大偏心)が提案されており、大偏心外ケーブル式 PC 桁に関する曲げ性状はかなり明らかにされている^{1)・2)}。一方、外ケーブル式 PC 桁のせん断耐力は、RC 構造のせん断耐力の評価式に基づいて、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評価しているのが現状である。外ケーブル式 PC 桁のせん断性状において研究例は少なく、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、せん断スパン、外ケーブルの有効高さ、デビエータ数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試験を行い、そのせん断性状を明らかにした。

2. 実験概要

2.1 供試体概要

実験に用いた供試体の形状寸法を Fig.1 に示す。実験は計 4 体について行なった。また、比較のための RC 供試体については、既往の実験結果を用いた³⁾。供試体は全長 3.2m、支間長 2.7m の 1 スパン単純桁とし、断面形状は幅 100mm、桁高 325mm の矩形断面である。偏向部はスパン中央に配置し、B-4 供試体についてはスパンを 3 等分する位置に偏向部を配置している。デビエータはエポキシ樹脂とボルトを用

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専 (正会員)

*2 埼玉大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 ドーピー建設工業(株)技術センター 工博 (正会員)

*4 三井建設(株)技術研究所 (正会員)

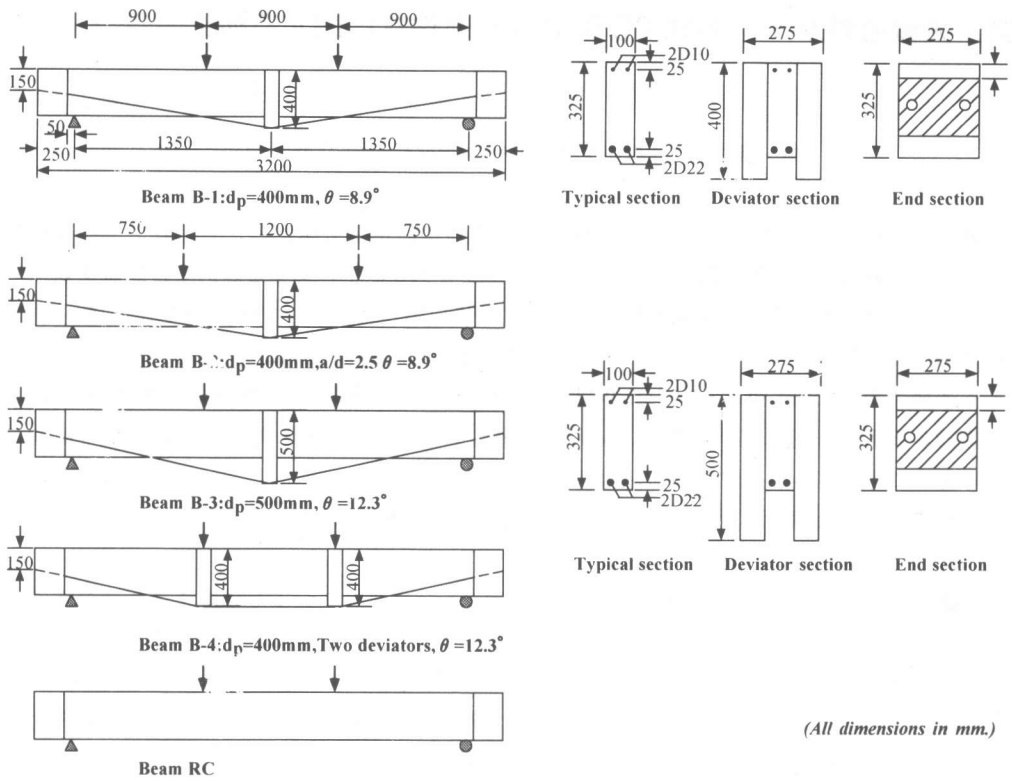


Fig.1 Details of Specimen

いて後付けとした。

圧縮鉄筋には D10SD345 を 2 本配置し、引張鉄筋には D22SD345 を 2 本配置した (引張鉄筋比鉄筋比=約 2.6%)。また、せん断スパン内

にはせん断補強筋を配置していない。外ケーブルの定着部には、プレストレス導入時にひび割れが生じないように、D6SD345 を 40mm 間隔で配置している。また、外ケーブルには SWPR7A ϕ 9.3mm を 2 本使用している。使用した鋼材の材料特性を Table.1 に示す。

2. 2 実験要因

実験要因を Table.2 に示す。ケーブルの有効高さ 400mm (ケーブルの曲げ上げ角度は $\theta=8.9$

Table.1 Material Property

No.	Yield Stress (MPa)	Breaking Stress (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
SWPR7A ϕ 9.3 mm	1686	1860	192.30
SD345D10	416	577	201.00
SD345D22	407	557	199.00

Table.2 Test Variables

No.	Tendon's depth(mm)	Shear span (mm)	fc' (Mpa)	Main reinforcement		Initial Prestressing Force	Parameters
				Top	Bottom		
B-1	400	900 (a/d = 3.0)	40.4	2D10	2D22(2.6%)	16 kN (9.2% fpy) SWPR7A - 2T9.3 mm	Reference beam
B-2		750 (a/d = 2.5)	39.3				Shear-span/depth ratio
B-3	900 (a/d = 3.0)	39.3	Tendon's eccentricity				
B-4	900 (a/d = 3.0)	38.7	Two deviators				
RC	-	900 (a/d = 3.0)	37.6				-

Table.3 Summary of Test results

No.	Cracking Load (kN)	Ultimate Load (kN)	Ultimate Deflection(mm)	Prestressing Force(kN)		Mode of Failure
				Initial	Ultimate	
B-1	39.24	98.10	5.49	15.45	24.92	Diagonal Tension
B-2	44.14	161.70(99.10)	10.41(4.86)	14.71	34.41(23.86)	Shear Compression
B-3	39.24	100.38	5.25	14.79	27.05	Diagonal Tension
B-4	39.24	98.14	5.06	15.28	26.73	Diagonal Tension
RC	24.50	86.60	5.49	-	-	Diagonal Tension

* ()は斜めひび割れ発生荷重時

度), せん断スパン 900mm ($a/d=3.0$) の B-1 供試体を基準とし, B-2 供試体ではせん断スパン 750mm ($a/d=2.5$), B-3 供試体ではケーブルの有効高さ 500mm (ケーブルの曲げ上げ角度は $\theta=12.3$ 度), B-4 供試体では 2 デビエータ (ケーブルの曲げ上げ角度は $\theta=12.3$) を実験要因とした載荷試験を行った。なお, 導入プレストレス量は供試体上縁にひび割れが生じないように, すべての供試体で 16kN (降伏強度に対するプレストレス導入率約 9.2%) とした。

2. 3 実験方法

プレストレスの導入は供試体を載荷位置にセットした後に油圧ジャッキにより片引きで行ない, 導入量はケーブルの両端に設置したセンターホール型ロードセルにより測定した。偏向部での摩擦を軽減するためにケーブルと偏向部との間にテフロンシートを挿入している。桁端部での定着はシングルストランド用の楔式定着具により行なった。載荷方法は静的 2 点載荷とし, 各供試体とも破壊に至るまで載荷を行なった。

3. 実験結果

3. 1 ひび割れ性状および破壊性状

実験結果を Table.3 に示す。ひび割れ発生荷重, 終局荷重ともに RC 供試体よりも大きくなっている。ケーブルの有効高さが最も大きい B-3 供試体の斜めひび割れ発生荷重がもっとも大きくなっている。

Fig.2 に終局時におけるひび割れ性状を示す。すべての供試体において, 等曲げ区間に初期ひび割れが発生し, ついでせん断スパン内にも曲げひび割れが発生した。その後, 曲げひび割れから斜めひび割れが発生し, B-1, B-3, B-4 供試体では左スパンに急激に斜めひび割れが載荷点近傍まで進展し, 耐力も急激に低下し, せん断破壊に至った。しかしながら, B-2 供試体においては, その後も耐力が増加し, 右スパンの載荷点近傍のコンクリートが圧壊し, せん断圧縮破壊した。せん断スパン/有効高さ比が小さい場合には, タイドアーチ的な耐荷機構に発展しやすいと考えられる。

また, 既往の研究報告^{4), 5)}で述べられてい

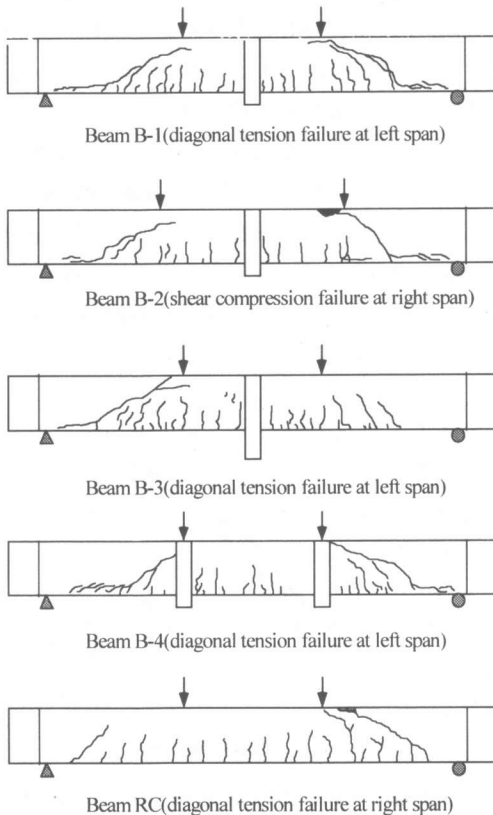


Fig.2 Crack Pattern(at failure)

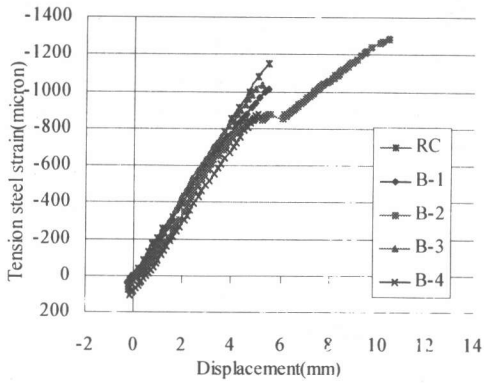


Fig.3 Tension Steel Strain-Displacement Relationship

るように斜めひび割れ角度は、すべての供試体において、RC 供試体よりも小さくなる傾向が見られた。

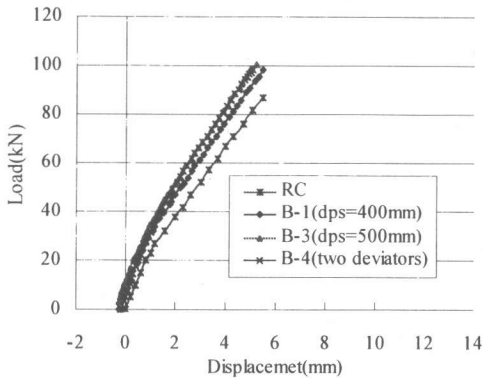


Fig.4a) Load-Displacement Relationship

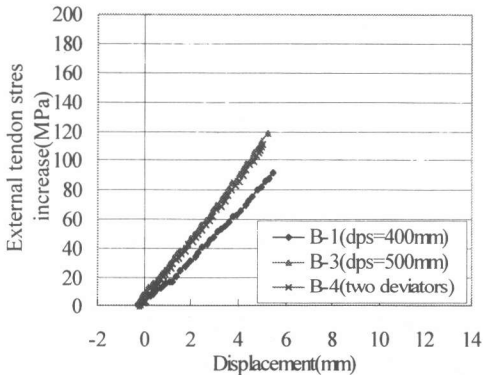


Fig.4b) External Tendon Stress Increase - Displacement Relationship

Fig.3 に引張鉄筋歪一変位関係を示す。すべての供試体において、引張鉄筋の歪の増加率はほぼ等しく、終局時における引張鉄筋の歪は1100 μ 前後であり降伏に至っていない。

3. 2 外ケーブル配置による影響

外ケーブル配置がせん断性状に及ぼす影響を比較するために B-1, B-3, B-4 供試体の荷重一変位関係を Fig.4a)示す。また、外ケーブル張力増分一変位関係を Fig.4b)に示す。せん断スパン内での曲げ上げ角度の等しい B-3, B-4 供試体では、荷重一変位、張力増分一変位関係ともにほぼ同じ挙動を示し、せん断破壊に至っている。せん断スパン内での PC 鋼材の配置が同じであればほぼ同じ挙動を示すことが言える。また、外ケーブルの有効高さの小さい B-1 供試体では、B-3 供試体と比較して張力増分が小さいため、桁の剛性が低下し終局変位がやや大きくなり、終局荷重も小さくなっている。このことから大偏心外ケーブル式 PC 構造のせん断性状は、PC 鋼材の有効高さ及びせん断スパン内での PC 鋼材の曲げ上げ角度に影響を受ける。

3. 3 せん断スパンの影響

せん断スパンの影響を見るために B-1, B-2, RC 供試体の荷重一変位関係を Fig.5a)に示す。また、外ケーブル張力増分一変位関係を Fig.5b)に示す。せん断スパンが異なるため、載荷点におけるモーメント一変位関係を Fig.5c)に示す。

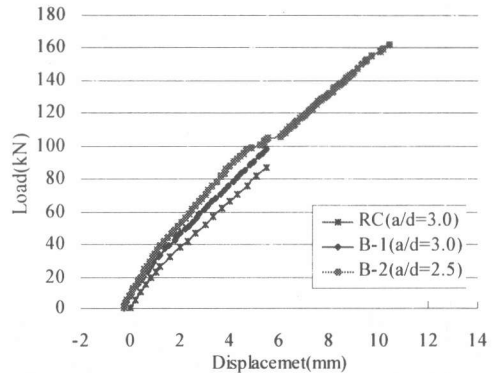


Fig.5a) Load-Displacement Relationship

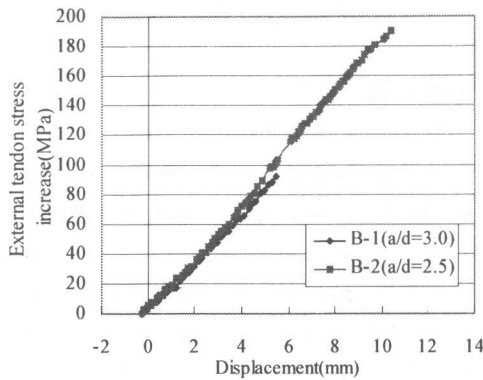


Fig.5b) External Tendon Stress Increase - Displacement Relationship

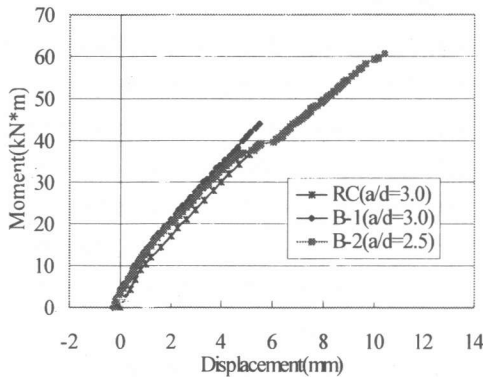


Fig.5c) Moment-Displacement Relationship

モーメント-変位関係より解かるように B-1, B-2, RC 供試体は, 斜めひび割れ発生まではほぼ同じ挙動を示し, B-2 供試体では, 斜めひび割れ発生後も荷重が増加しせん断圧縮破壊に至った。せん断スパン/有効高さ比が小さい場合には, 通常の PC 桁と同様タイドアーチ的な耐荷機構に発展しやすいと考えられる。

4. 既往の算定式による評価

4.1 算定式

用いた算定式は, せん断スパンを考慮に入れた二羽・岡村⁷⁾の式に, 土木学会コンクリート標準示方書⁶⁾による軸力の影響をデコンプレッションモーメントで表した式である。今回の実験ではスパン内にせん断補強筋を配置していないので, せん断耐力は RC 部材の受け持つ

せん断耐力と軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分の和となる。また, M_u は既往の材料の非線形性を考慮したファイバーモデルの曲げ解析プログラムによる解析結果を用いた⁸⁾。以下に算定式を示す。

$$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} + V_{ped}$$

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

$$V_{sd} = A_v f_{wy} j d (\sin \alpha + \cos \alpha) / s$$

ここで $j=1.15$

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

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

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

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

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

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

A_s : 引張鉄筋断面積(mm²)

A_w : せん断補強鉄筋断面積(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)

f_{wy} : せん断補強鉄筋降伏強度(MPa)

α : せん断補強筋が部材軸となす角度

s : せん断補強鉄筋の配置間隔(mm)

P : 軸方向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

N_d : 設計軸方向圧縮力

4.2 実験値との比較

算定式によるせん断耐力と実験値との比較を Table.4 に示す。B-2 供試体については斜めひび割れの発生により一旦荷重が低下した値を

Table.4 Summary of Shear Strength

No.	exp	Vu	flexure	exp/Vu
RC	86.60	90.652	176.71	0.955
B-1	98.10	104.60	199.73	0.938
B-2	99.10	110.72	236.72	0.895
B-3	100.38	107.21	214.84	0.936
B-4	98.14	105.81	200.12	0.927

用いた。また、曲げ解析による計算値も併記する。二羽・岡村式にデコンプレッションモーメントを用いた式では、実験結果をやや過大評価しているが、実験値との整合性は良いと言える。適切な安全率を用いることで、大偏心外ケーブル式 PC 桁のせん断耐力をある程度評価できると言えるが、更なる検討を要すると考えられる。

せん断スパン/有効高さ比が小さい B-2 供試体では、B-1 供試体に比べ、せん断耐力より曲げ耐力が大きくなりせん断破壊しやすい傾向にある。しかしながら、せん断スパン/有効高さ比が小さい場合、タイドアーチ的な耐荷機構に発展しやすいことから、一概にせん断に対して危険であるとは言えない。また、B-3、B-4 供試体ではせん断スパン内の曲げ上げ角度が等しく、そのせん断性状もほぼ同じであるが、2 デビエータを用いた B-4 供試体では、スパン中央でケーブルの有効高さが減少し、それに伴い曲げ耐力が低下する。設計に際しては注意を要する。

5. まとめ

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 構造のせん断性状において、PC 鋼材の有効高さ及びせん断スパン内での PC 鋼材の曲げ上げ角度に影響を受ける。
- ②軸力が作用すると斜めひび割れ角度が小さくなる傾向にある。
- ③せん断スパン/有効高さ比が小さい場合には、タイドアーチ的な耐荷機構に発展しやすい。
- ④せん断スパン/有効高さ比、デコンプレッションモーメントを考慮に入れた算定式を用いた大偏心外ケーブル式 PC 桁のせん断耐力をある程度評価できると言える。しかしながら、更なる検討が必要であると考えられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、埼玉大学大学院生の Eakarar, W 氏、井上智之氏、当時卒研生の池田圭吾氏の多大なるご協力を頂いた。ここ

に深く感謝の意を表する。

参考文献

- 1)Aravinthan, T, 睦好宏史, 濱田 譲, 渡辺宗樹: Experimental Investigation on the Flexural Behavior of Two Span Continuous Beams with Large Eccentricities, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.21, No.3, pp.961-966, 1999
- 2)原 健悟, 睦好宏史, Aravinthan, T, 渡辺宗樹: 大偏心外ケーブルを用いたプレキャストセグメント PC 桁の曲げ性状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.22, No.3, pp.823-828, 2000
- 3)新津正義, 睦好宏史, 佐野正, 殿川康一: 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)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
- 5)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
- 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)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/ -5, pp.167-176, 1986-8
- 8)Eakarar, W, 睦好宏史, Aravinthan, T, 渡辺宗樹: Analysis of the Flexural Behavior of Externally Prestressed Concrete Beams with Large Eccentricities, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.22, No.3, pp.817-822, 2000