

論文 斜角を有する変断面 PC コーベルの耐荷力

横山雅臣^{*1}・閑上直浩^{*2}・村山八洲雄^{*3}

要旨：斜角を有する変断面 PC コーベルを想定した模型荷重実験を行った。曲げ耐力は斜角およびプレストレスの影響について調べ、せん断耐力は既に報告した斜角および変断面の影響に加え、プレストレスおよび模型寸法による影響を大型模型実験により調べた。その結果、曲げ耐力には斜角の影響が殆どなく、平面保持を仮定した RC 曲げ耐力計算法により推定が可能であること。せん断耐力に対するプレストレスの効果は、棒部材でのデコンプレッションモーメント (M_0) とせん断破壊時の曲げモーメント (M_u) の比で決まる $\beta_n = 1 + 1.25M_0/M_u$ に近似すること、また、寸法効果は $-1/4$ 乗則が成り立つ可能性が高いこと、が確認された。
キーワード：コーベル、曲げ、せん断、耐力、斜角、変断面、プレストレストコンクリート

1. はじめに

最近、斜張橋において美観と経済性の観点から桁幅に比べて橋脚の断面寸法を小さくし、橋脚から張り出した PC コーベルで塔を支持する形式の受梁が採用されてきている。また、車両走行性と地理的条件から斜角を有するコーベルが用いられることが多い。そのような背景からこれまで 1/28 縮尺試験体による実験的研究から、斜角を有する変断面 PC コーベルのせん断耐力の検討を行ってきた¹⁾。そして、コーベルのせん断耐力に対して、変断面では等断面に比べて耐力が低下すること、25° の斜角では斜角の影響は小さいこと、およびプレストレスの効果は棒部材のデコンプレッションモーメントによる算定値よりも小さいことを明らかにしてきた。

この実験シリーズの一環として今回、1/28 縮尺試験体による曲げ耐力に関する模型実験および 1/10、1/20 縮尺試験体によるせん断耐力に関する模型実験を行った。特にせん断耐力の実験は、配筋がより実構造物に近い大型試験体による実験を行ってプレストレスの効果と寸法効果について調

べたものである。本論文ではこれらの実験結果を基に、斜角を有する変断面 PC コーベルの曲げ耐力とせん断耐力について考察した。

2. 実験概要

2.1 実験配列

実験は、表-1 に示す 6 体の変断面試験体を用いて行った。試験体呼び名の第 1 文字は実験目的を表し F は曲げ (flexural)、S はせん断 (shear) を、第 2 文字は斜角の有無を表し T はなし (straight)、K はあり (skew) を、第 3 文字は

表-1 実験配列

試験体	主鋼材比 (%)	PS 導入量 (kN)	用心鉄筋比 (%)	
			軸方向	軸直角方向
FTP28	0.17	172	0.30	0.16
FTR28	0.67	0		
FKP28	0.17	172		
STP10	0.24	1,345		
STR10	0.24	0		
STR20	0.26	0		

ただし、せん断補強筋は配置していない

* 1 鹿島建設(株)新猪名川大橋工事事務所所長(正会員)

* 2 阪神高速道路公団大阪第二建設部設計課

* 3 鹿島建設(株)技術研究所第一研究部専門部長 工博 (正会員)

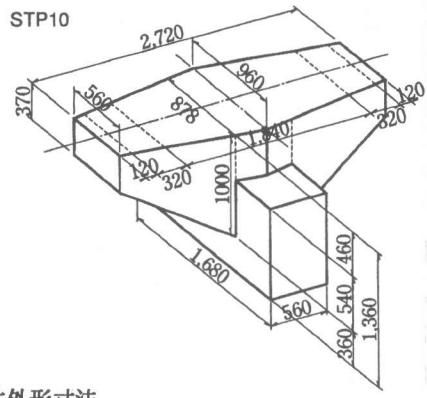
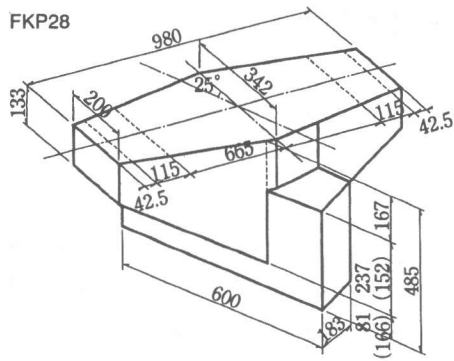


図-1 試験体外形寸法

緊張力の有無を表し P はあり (prestress) を R はなし (reinforced) を, 後の数字は試験体の縮尺をそれぞれ表している。

すなわち, 曲げ試験体としては基本型の斜角なし PC コーベルの FTP28, 代替設計案である RC コーベルの FTR28, 25° の斜角を有する PC コーベルの FKP28 の 3 体である。

せん断耐力に対する斜角の影響は殆どないことが既に分かっているので¹⁾せん断試験体には斜角はなく, 基本型である RC コーベルの STR10, プレストレスの影響を調べる STP10 および寸法の違いによる影響を調べる STR20 の 3 体である。

2.2 試験体諸元

外形寸法: 曲げおよびせん断試験の各基本試験体の外形寸法を図-1に示す。ただし, 試験体は FKP28 を除いて, STP10 と相似である。せん断スパン(部材軸と橋脚面との交点から荷点中心までの距離)と断面の有効高さ(圧縮縁から引張鋼材心までの距離)の比は 0.86 である。

コンクリート: コンクリートにはいずれも最大骨材寸法 5mm のモルタルを用いた。各試験体の強度は実験結果(表-3・4)に併記する。

配筋とプレストレス: 試験体鋼材配置図を図-2に, 一例として STR10 の配筋状況を写真-1に示す。PC 鋼材の引張鋼材比は曲げ試験体ではプロトタイプを基に 0.17%(代替 RC コーベルの FTR28 では鉄筋比 0.67%), せん断試験体では曲げ耐力を増加させる目的で 0.24%にし

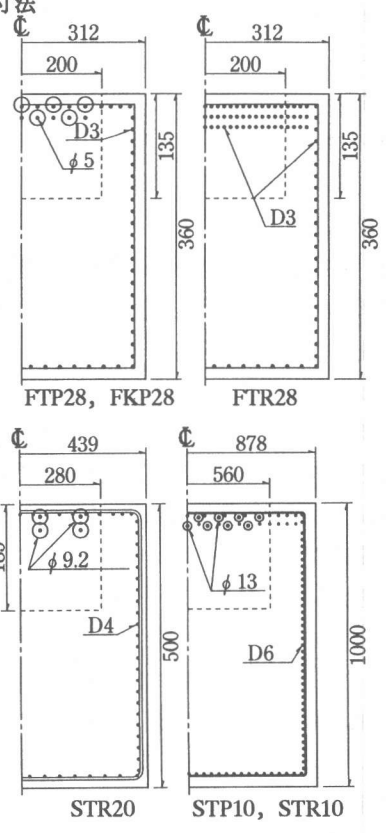


図-2 試験体鋼材配置図

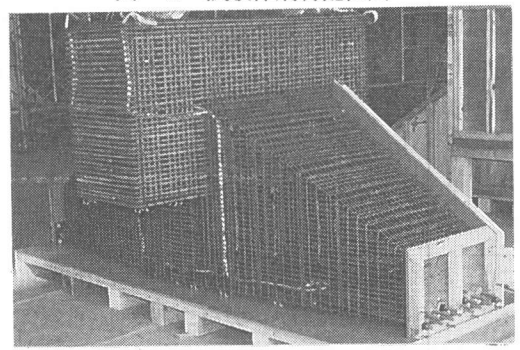


写真-1 試験体配筋状況(STR10)

ている。別途、用心鉄筋として断面周囲に、鉄筋比軸方向 0.30 %，軸直角方向 0.16 % をほぼ均等に配置している。

FTP28, FKP28 では $\phi 5$ mm インデント PC 鋼線と異形 3 mm 鉄筋を用いた。鋼線はプレテンション方式で 172kN 緊張し、定着ロスを低減するため端部をグリップ定着した。FTR28 では鋼線の代わりに異形 3 mm 鉄筋を用いている。

STR20 では $\phi 9.2$ mm PC 鋼棒(シースは $t=0.4$ mm 銅管)と異形 4 mm 鉄筋を、STR10, STP10 では $\phi 13$ mm PC 鋼棒(シースは $t=0.6$ mm 銅管)と D6 鉄筋を用い、いずれも鋼棒はナット定着しシースにはエポキシ樹脂を注入した。特に STP10 では荷重しながらポストテンション方式により 1,345kN 緊張した。

材料試験結果： 使用した材料の試験結果を表-2に示す。

2. 3 荷重方法

荷重は、試験体を実構造物と天地を逆にして行った。すなわち、塔の取り付け部に対応する位置を剛な鋼板を介してスライド支持とし、橋脚中央部から 1 点荷重で単調増加させた。なお記述の変位は荷重点 (P) での値を示す。

支承幅は、1/28, 1/20, 1/10 縮尺試験体で相異にしそれぞれ 115 mm, 160 mm, 320 mm である。特にねじり回転の可能性のある FKP28 では、部材軸線上で支承に球座を併用した。

3. 実験結果と考察

3. 1 曲げ荷重実験

(1) プレストレスの影響

①ひび割れと破壊：いずれも斜角のない FTR28 と FTP28 を比較すると、FTR28 では先ず曲げひび割れ(340kN 以下)が発生し、ついで斜めひび割れが発生したが、FTP28 では斜めひび割れ(450kN)の後に曲げひび割れ(550kN)が発生するという相違があった。また、FTP28 は FTR28 に比べてひび割れの本数が少なかった (図-3)。しかしながら両試験体とも、荷重の増加に伴って引張鋼材が降伏し、延性的な荷重-変位性状を呈し

表-2 鉄筋・PC 鋼材の材料試験結果

種類		断面積 (mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)
鉄筋	異形 3 mm	7.24	336
	異形 4 mm	14.00	272
	D6	48.16	315
PC 鋼材	$\phi 5$	19.63	1,617
	$\phi 9.2$	66.44	1,339
	$\phi 13$	132.7	1,323

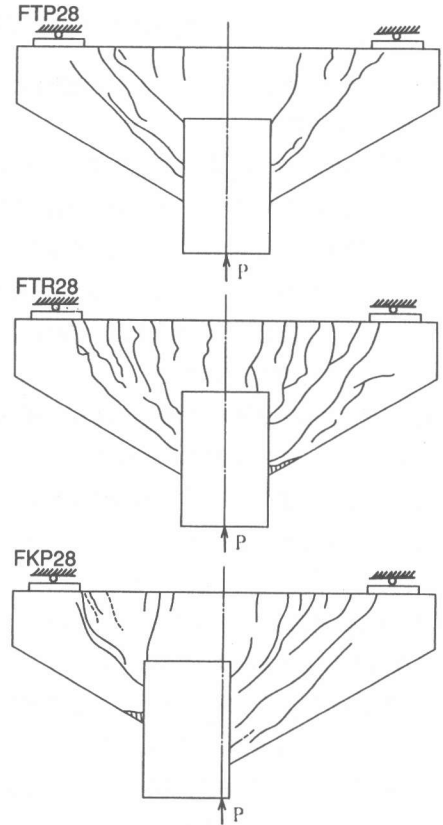


図-3 ひび割れ図

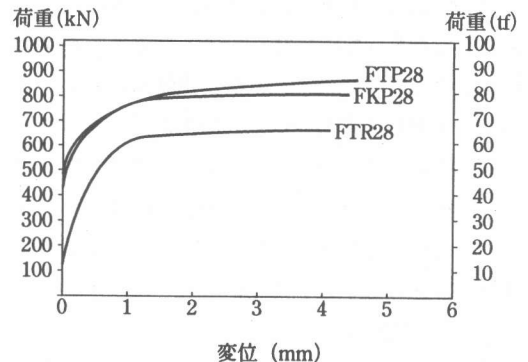


図-4 荷重-変位曲線

表-3 実験結果および計算値

試験体	f _c (N/mm ²)	実験値 (kN)			計算値 (kN)			計算値 /実験値
		ひびわれ発生		最大荷重	F 1	F 2	F 3	
		曲げ	せん断					
FTP28	35.4	550	450	834	676	793	695	0.95
FTR28	38.3	340 以下	340 以下	657	539	653	562	0.99
FKP28	36.0	370	450	804	676	793	695	0.99

ただし、計算値/実験値 の値は F 2 と最大荷重との比較である。

計算値における鋼材降伏強度は表-2による。

た(図-4)後、圧縮縁コンクリートが橋脚前面付近で圧壊して終局に至った。

ひび割れ発生状況の相違から、部材軸方向のプレストレスはその方向の引張応力度の低減に効果があったと認められる。PC コーベルの場合は同一基準で設計された RC コーベルに比べて引張鋼材比が小さくなるため、この影響でひび割れ本数が少なくなったと考えられる。

また、延性的な破壊性状から、斜めひび割れ発生後にタイドアーチ構造が形成されたといえる。

②曲げ耐力：実験で得られた最大荷重を下記の3種類の方法による計算値と比較して表-3に併記した。

イ)傾斜した圧縮材と水平引張材からなるトラス構造としての曲げ耐力 (F 1)

ロ)橋脚前面での軸方向鋼材の全てを考慮した棒部材としての曲げ耐力 (F 2)

ハ)橋脚前面での引張鋼材のみを考慮した棒部材としての曲げ耐力 (F 3)

表-3から分かるように、全試験体ともトラスモデルによる計算値が実験値の約 80 %となっているのに対し、軸方向鉄筋の全てを考慮した棒部材としての計算値 (F 2) は、実験値とほぼ一致した。すなわち斜めひび割れ発生に伴うモーメントシフトにより、曲げ耐力としては橋脚前面位置での鉄筋コンクリートとしての力の釣り合いを考え、その際平面保持の仮定を用いても計算結果に大きな誤差はないといえる。

(2) 斜角の有無

①ひび割れと破壊：斜角のない FTP28 とある FKP28 を比較すると、前述のように FTP28 では

斜めひび割れが先に発生したのに対し、FKP28 では長手面で曲げひび割れ(370kN)次いで斜めひび割れ(450kN)が、その後短手面で曲げひび割れ(470kN)と斜めひび割れ(530kN)が発生するという相違があった。FTP28 ではひび割れの先端は橋脚面に達したが、FKP28 では短手面で達したものの長手面では終局状態まで橋脚面に達しなかった。しかしながら両試験体とも、荷重の増加に伴って引張鋼材が降伏し、延性的な荷重-変位性状を呈した(図-4)後、圧縮縁コンクリートが橋脚前面付近で圧壊して終局に至った。

別途行った FKP28 の 3次元弾性 FEM 解析の結果、鉛直荷重による引張縁応力度は両側面ではほぼ同じであったが、プレストレスによる圧縮縁応力度は長手面では短手面の約 7割と小さくなった。

このことから、斜角の有無によるひび割れ性状の相違は、主としてプレストレスの不均一によるものと考えられる。斜角を有する PC コーベルの設計においては、このプレストレスの分布に注意が必要であるといえる。

②曲げ耐力：FKP28 はせん断スパン長が場所により異なり部材軸上での寸法に対して長手面で 1.13 倍、短手面で 0.83 倍となっているが、最大荷重の大きさは FTP28 と殆ど差がなかった(表-3)。すなわち斜角を有するコーベルにおいては部材軸上のせん断スパンに着目した場合、曲げ耐力に対して斜角の影響は殆どないといえる。これは、引張鋼材の降伏に伴い短手側と長手側の間で断面内に応力の再分配が起こるためと考えられる。

3.2 せん断載荷実験

表-4 実験結果および計算値

試験体	f _c (N/mm ²)	実験値 (kN)			計算値 (kN)			計算値 /実験値	
		ひびわれ発生		最大荷重	曲げ	せん断			
		曲げ	せん断			V _c	V _s		V _{c+Vs}
STP10	39.7	1,470	3,140	6,970	7,910	6,220	716	6,940	1.00
STR10	39.6	392	1,570	6,160	7,910	5,400	716	6,120	0.99
STR20	37.8	343	441	1,820	1,960	1,620	157	1,780	0.98

ただし、計算値/実験値 の値は V_c + V_s と最大荷重との比較である。

(1)各試験体の破壊に至る挙動

試験体に発生したひび割れの様子と荷重-変位曲線をまとめて、図-5および図-6に示す。

STP10 では曲げひび割れがまず発生(1,470kN)し、その後これとは別に斜めひび割れが発生(3,140kN)した。荷重-変位曲線において勾配が緩慢になった段階で圧縮縁コンクリートが圧壊(6,970kN)して終局に至った。

STR10 は曲げひび割れ発生(392kN)の後、これが斜めひび割れに変化(1,570kN)した。荷重-変位曲線において荷重増加の途中で圧縮縁コンクリートが圧壊(6,160kN)して終局に至った。

STR20 では STR10 と同様に曲げひび割れ(343kN)が先行して斜めひび割れに変化(441kN)し、荷重増加の途中で圧縮縁コンクリートが圧壊(1,820kN)して終局に至った。

測定された範囲での終局時の鋼棒ひずみは、STR10 では鋼棒の降伏前であったが、STP10 と STR20 では降伏ひずみを 3,000 ~ 4,000 × 10⁻⁶ 超過した段階であり、鉛直鉄筋は全ての試験体で降伏した。

実験結果をまとめて表-4に示す。いずれの試験体も曲げ耐力計算値よりかなり小さい荷重で終局に至っている。

(2)プレストレスの効果

STP10 では破壊モードに曲げ性的性状も現れたようであるが、鋼棒のひずみにおける降伏ひずみからの超過量はさほど大きくはなかった。そのため、そのせん断耐力は終局荷重と同等かこれを幾分超えるのもであったといえる。

STP10 の最大荷重は STR10 に対して 13 % 増になっている。用心鉄筋のせん断負担分をコンク

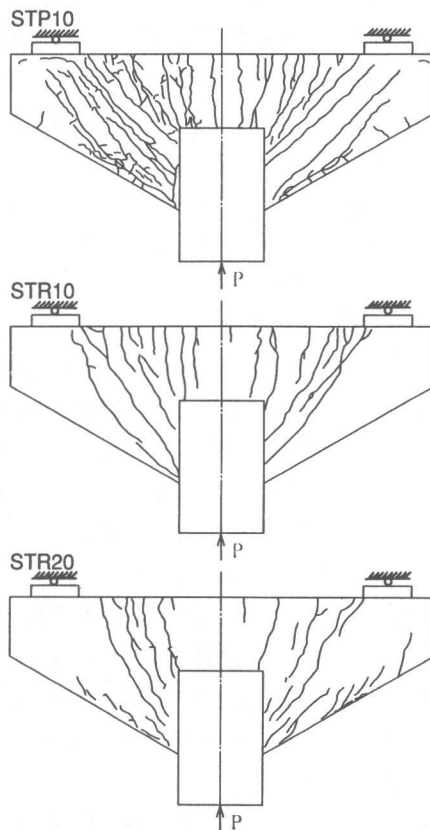


図-5 ひび割れ図

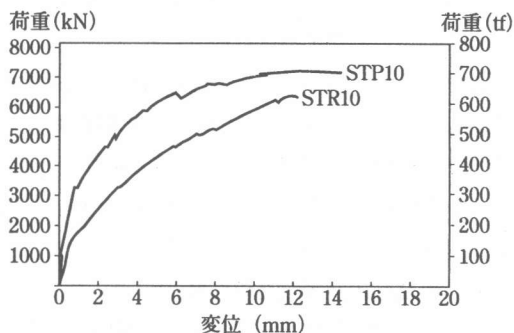


図-6 荷重-変位曲線

リート標準示方書に示すトラス理論に基づいて除去した後の値では 15 %増であり、これがプレストレスの効果とみなされる。すなわちせん断耐力に対するプレストレス効果は、引張鋼材の降伏による破壊モードであったことを考慮すると、15 %以上と考えられる。

文献²⁾では、せん断耐力に対するプレストレスの効果は棒部材におけるデコンプレッションモーメント (M_0) とせん断破壊時の曲げモーメント (M_u) の比で決まる $(1+1.25 M_0/M_u)$ で表されることが示されている。本実験の STP10 に適用すると、プレストレス効果は 18 %となり、実験結果とよい近似を示す。

この結果は、コンクリート標準示方書に示されている棒部材のデコンプレッションモーメント効果に比べ小さいものとなる。

(3) 試験体寸法の影響

STR10 と STR20 に着目すると、前者のせん断耐力は後者の 3.38 (1.83²) 倍で、通常の相似則による 4 (2²) 倍よりも小さくなっている。コンクリート圧縮強度の相違による影響を 2/3 乗で評価し、単位面積当たりの値で比較すると 0.82 倍となり、寸法比の - 1/4 乗に近いものであった。

すなわち、コーベルの場合はアーチアクションの関係でコンクリートには圧縮応力が卓越しているので、薄い棒部材ほどの寸法効果はないという考え方もあるが、本実験の範囲では棒部材と同程度の寸法効果が現れている。

以上のことから、一般の棒部材に比べてせん断スパン比が著しく小さい RC コーベルの場合でも、せん断耐力に対する寸法効果は - 1/4 乗則が成り立つ可能性が確認された。

ただし、本試験体に少量ではあるが用心鉄筋を配置している。これらの鉄筋による影響を加味すると、寸法の影響は幾分大きくなると考えられる。今回、試験体 2 体の比較によったが、今後、実験データを蓄積していく必要があろう。

(4) 既往耐力評価式との比較

各試験体の実験値を、次の方法で求めた計算値と比較して表-4に併記した。

二羽らの式³⁾を用い、 V_c 値に前報¹⁾による変断面の効果(0.9倍)および本実験によるプレストレスの効果(1.15倍)を考慮する。また、二羽らの式³⁾が 1/28 縮尺試験体相当の断面形状の試験体を用いていることを考慮し、1/28 縮尺試験体を基本に寸法比の 4 乗根で低減する。ただし、 V_s はコンクリート標準示方書から得られる鉛直鉄筋が受持つせん断耐力計算値である。

以上の結果より本計算値は実験値とよい一致を示し、この手順はほぼ妥当なものと評価できる。

4. まとめ

斜角を有するせん断スパン比 0.86 の PC コーベルの曲げ耐力とせん断耐力に関する模型実験を行った。その結果、以下のことが結論づけられる。

曲げ耐力に対して斜角 (25°) の影響は殆どなく、その耐力は柱前面の断面における RC 曲げ耐力計算法により推定できる。

せん断耐力に関して、部材軸方向プレストレスにより耐力を向上させることができる。ただし、その向上度は棒部材におけるデコンプレッションモーメント効果程大きくない。また、せん断耐力に対する寸法効果は、棒部材の場合と同程度の、- 1/4 乗則が成り立つ可能性が高い。

最後に、本研究をまとめるにあたり大阪大学工学部土木工学科松井繁之教授に貴重なご意見、ご指導を賜りました。記して感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 村山八洲雄・徳山清治・天野玲子・山野辺慎一：変断面 PC コーベル部材のせん断耐力特性、コンクリート工学年次講演論文報告集、Vol.10, No.3, pp.583-588, 1988.6
- 2) Walraven, J.C.: Shear in Prestressed Concrete Members, a State-of-the-Art Report, CEB Bulletin D'Information, No.180, April, 1987
- 3) 二羽淳一郎・前田照一・岡村甫：ディーブビーム的な RC 部材の設計方法に関する提案、コンクリート工学年次講演論文報告集, Vol.5, pp.357-360, 1983.6