

論文

[2104] 変断面 PC コーベル部材のせん断耐力特性

正会員 村山八洲雄 (鹿島建設技術研究所)  
 徳山 清治 (鹿島建設技術研究所)  
 正会員 ○ 天野 玲子 (鹿島建設技術研究所)  
 正会員 山野辺慎一 (鹿島建設技術研究所)

1. はじめに

近年国内でも斜張橋の長大化が進んでいる。その場合、美観・経済性及び周囲の環境条件による制約などから、桁幅に対して橋脚の断面寸法を小さくし、タワーを橋脚から張出した受梁で支持する形式を用いることが良く行われる。受梁にはタワーの自重以外に桁自重、活荷重など大きなせん断力が作用するため、変断面のPCコーベルとして設計される。また、地震力などによるねじりモーメントも作用する。

更に周囲の環境条件による制約が大きい場合、受梁は橋軸直角方向に対して斜角を有することがあり、この場合はタワーの曲げ剛性が大きいと不静定ねじりモーメントが発生する。

本研究では以上を考慮し、変断面PCコーベルのせん断耐力に着目した模型実験を行い、プレストレスの効果、断面形状と斜角の影響、及びねじりの影響について調べた。

2. 実験概要

2.1 供試体

実験には、基本形の変断面PCコーベルのほか、プレストレス量、断面形状、斜角の有無を変えて、合計6体の供試体を用いた。供試体の主要な諸元と実験配列を表-1に、形状と配筋を図-1に示す。

表-1 供試体諸元

基本形 (No.1) は、せん断スパン比  $a/d$  を 0.9 として、荷重作用点での有効高さを柱前面の  $1/2$  に、また荷重作用点での幅を柱前面の  $1/1.4$  になるようにして柱前面からテーパ

供試体	想定破壊モード	形状			種類	PC鋼材比 (%)	PS導入量 (t)	せん断補強筋	用心鉄筋	
		断面	斜角の有無	ねじり回転					軸方向	軸直角方向
Na 1	せん断	変断面	無	-	PC	0.24	無	0.4A <sub>s</sub>	0.0016A <sub>c</sub>	
Na 2		変断面								
Na 3		等断面								
Na 4	せん断+ねじり	変断面	有	自由拘束						
Na 5	変断面									
Na 6	変断面									

状としたものである。PC鋼材比は 0.24 % としている。最小鉄筋比に相当する用心鉄筋を軸方向と軸直角方向に配置した。プレストレス量が上縁で  $-56\text{Kg}/\text{cm}^2$ 、下縁で  $25\text{Kg}/\text{cm}^2$  となるよう、緊張力 17.5t を導入した。

表-2 鉄筋・PC鋼材の材料試験結果

鉄筋・鋼材の種類	断面積 (cm <sup>2</sup> )	降伏点及び耐力 (kg/cm <sup>2</sup> )
異形 3mm	0.0724	3430
D 6	0.4816	4890
φ 5	0.1963	16500

No.2供試体の諸元はNo.1 (基本形) と同じであるが、No.1と対比させてプレストレスの影響を調べるため、ノンプレストレスとした。No.3は鋼材量とプレストレス量 (ノンプレストレス) はNo.2

表-3 モルタルの配合

フロー (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			air (%)
		W	C	S	
242	56	330	569	1211	2.0

と同じであるが、断面形状の影響を調べるため、有効高さと幅が柱前面から一定とした供試体である。No. 4はNo. 1と同一諸元のPC供試体であるが、ねじりモーメントの影響を調べるため、せん断力と同時にねじりモーメントも与えた供試体である。No. 5はNo. 1と形状が異なり斜角を有するもので、コーベル先端部でねじり回転を自由にしてせん断力を与えた供試体である。No. 6はNo. 5と供試体諸元並びに加力方法が同じであるが、支承条件が異なり、コーベル先端部でねじり回転を拘束した供試体である。

なお、PC供試体 (No. 1, 4, 5, 6) にはプレストレスをプレテンションで与えることとし、部材端からのプレストレスの不均一区間を短くするために、プレストレス導入時にPC鋼材を部材端で鋼板とグリップで定着した。ノンプレストレス供試体 (No. 2, 3) も同様の方法で定着した。

PC鋼材及び鉄筋の材料試験結果を表-2に示す。供試体に用いたモルタルの配合は表-3に示す通りであり、実験時の圧縮強度は348~441Kg/cm<sup>2</sup>であった。

## 2.2 荷重方法

せん断加力実験 (No. 1, 2, 3, 5, 6) では、図-2.1、2.3、2.4のように供試体を実部材の場合と逆にして設置し2tピッチで単調荷重した。支承条件としては、No. 1~3はコーベルの各先端部をスライド面支承とした。No. 5ではコーベルの先端部を各1個の球座で支持し、またNo. 6では各2個のロードセルで支持した。

ねじりモーメントを同時に与える実験 (No. 4) では、図-2.2に示す要領で、

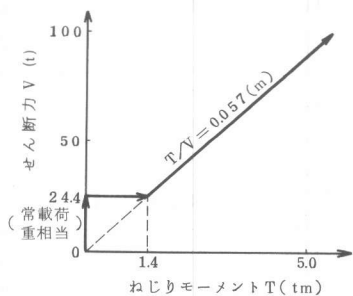


図-3 せん断とねじり荷重順序

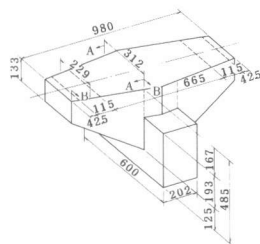


図-1-1 変断面供試体 (基本形)

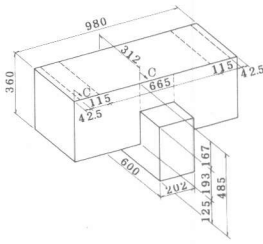


図-1-2 等断面供試体

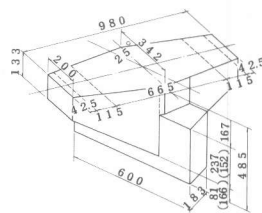


図-1-3 斜角供試体

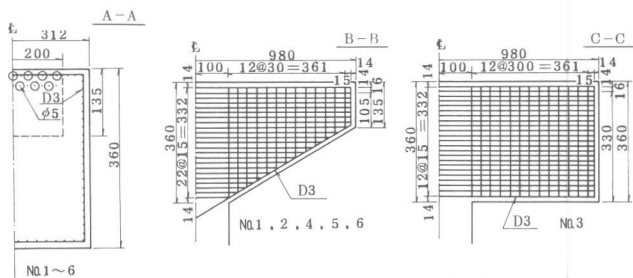


図-1-4 配筋図

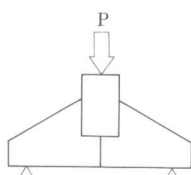


図-2-1せん断荷重

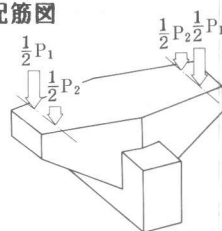


図-2-2せん断とねじり荷重

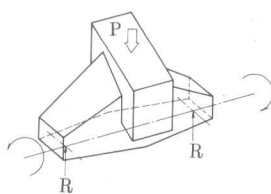


図-2-3ねじり回転自由荷重

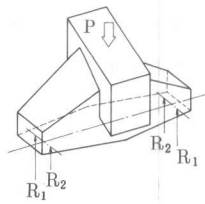


図-2-4ねじり回転拘束荷重

4本のジャッキを用いて載荷した。加力順序としては、予め均等加力により24.4 tの鉛直荷重を加えた後、図-3に示すようにねじりモーメント・せん断力比  $T/V$  を 5.7cmに保って荷重を増加させた。

### 3. 実験結果及び考察

実験結果を表-4に示す。ひびわれ状況を図-4に、荷重とたわみの関係を図-5に、柱前面中心位置での荷重とPC鋼材ひずみの関係を図-6に、荷重とねじりモーメントの関係を図-7に示す。

#### 3.1 せん断耐力に及ぼすプレストレスの影響

No.1とNo.2の供試体について比較する。

各供試体の初亀裂荷重はそれぞれ48t（斜めひびわれ）、16t（曲げひびわれ）であった。その後のひびわれは図-4に示すようであり、斜めひびわれの角度はNo.1の方が小さかった。

No.1,2とも斜めひびわれ発生後も耐力を保持した。破壊は2体ともPC鋼材のひずみが降伏ひずみ以下の状態で柱前面の圧縮域のコンクリートが圧壊することにより生じた。

破壊荷重（せん断耐力の2倍）はそれぞれ93t、75tであった。両者の圧縮強度を同一に換算して比べると、No.1のせん断耐力はNo.2の124%であり、この耐力増加はプレ

ストレスによるとみられる。ここで土木学会標準示方書<sup>1)</sup>のプレストレスの効果に関する算定式（ただし、棒部材に対するもの）を、この変断面PCコーベルに適用してみると  $\beta n = 1.45$ （145%）となり、プレ

表-4 実験結果及び計算結果

供試体	破壊モード	$f_c'$ (kg/cm <sup>2</sup> )	最大荷重 (t)	最大荷重時の ねじりモーメント (tm)	計算値	
					S1(t)	T1(tm)
No.1	アーチリブ 上部圧壊	372	93	—	101	—
No.2	アーチリブ 上部圧壊	370	75	—	101	—
No.3	アーチリブ 上部圧壊	348	82	—	97	—
No.4	アーチリブ 上部圧壊	441	61	1.74	113	1.13
No.5	アーチリブ 上部圧壊	371	94	—	101	—
No.6	アーチリブ 上部圧壊	382	95	0.16	103	1.13

S1：せん断補強筋のないRCコーベルのせん断耐力計算値  
T1：棒部材の立体トラス類似解析に基づくねじり耐力計算値

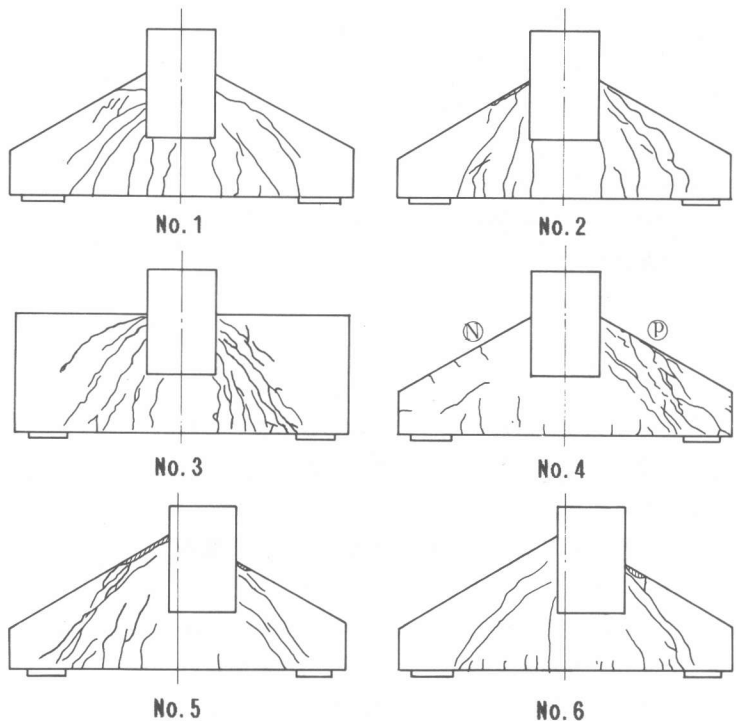


図-4 ひびわれ図

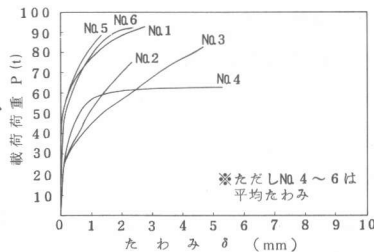


図-5 荷重-たわみ関係

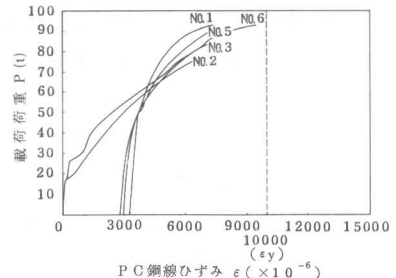


図-6 柱前面中心部での荷重-PC鋼材ひずみ関係

ストレスによる増加分については、実験値は計算値の1/2程度となっている。この相違は主としてa/dに起因するものと推定され、a/dが小さい場合はプレストレスの効果が棒部材の場合程大きくないことが示唆される。

### 3.2 せん断耐力に及ぼす変断面形状の影響

#### a) 実験結果

No.2とNo.3(いずれもノンプレストレス)の供試体図-7 せん断カーねじりモーメント関係について比較する。

ひびわれ性状は、図-4に示すように、No.2とNo.3で同様であり、破壊モードも両者でほぼ同様であった。

破壊荷重はそれぞれ75t、82tであった。圧縮強度を同一に換算して比べると、No.2のせん断耐力はNo.3の89%の値となっている。両者のせん断耐力の相違は変断面と等断面の相違によるものとみなされる。この現象は池田(75~85%)<sup>3)</sup>、石橋(約90%)<sup>4)</sup>らの実験結果と同様であった。

No.2とNo.3はノンプレストレスであるので機能的にはRCコーベルと見なされる。そこでこれらのせん断耐力の実験値とRCコーベルのせん断耐力計算値<sup>2)</sup>とを比較すると(表-4)、No.2の実験値は計算値に対して74%であり、No.3は85%となった。

#### b) 弾塑性FEM解析による検討

せん断耐力に及ぼす変断面形状の影響を検討するため、図-8に示すように断面の高さと幅を変化させたディープビーム型の解析モデル(ノンプレストレスのPC鋼材配置)を用いて、二次元弾塑性FEM解析を行った。解析モデルの諸元を表-5に示す。

解析に用いたコンクリートの構成則は等方硬化の降伏関数を持つ弾塑性構成モデルを設定し、ひびわれについてはSmearredモデルを用いた。アーチリブ上部(FEM解析モデルでの荷重方法に関係づけて、以下、荷重板前面と呼ぶ。コーベルの柱前面に相当)での有効高さの10%のコンクリートが圧壊に至った時点部材の圧壊と見做した。解析結果を表-5に示す。

すべての解析ケースで、荷重板前面のコンクリートが圧壊した。表-5から破壊荷重に対する断面高さの変化による影響についてみると、断面の高さと幅が一定のモデル(caseA, B)に対して、

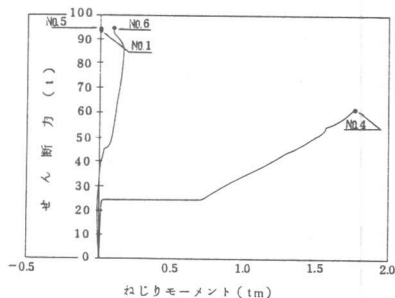


表-5 解析条件及び解析結果

部材	幅	形状	鋼材量	P.S量	破壊モード	$f'_c$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$f_t$ (kg/cm <sup>2</sup> )	計算値 S1(t)	破壊荷重 (t)
case A	31.2 cm 一定	①	φ5-13本 (0.24%)	0 t	アーチリブ 上部圧壊	370	37	89	94
case B	22.9 cm 一定	②			アーチリブ 下部圧壊			69	66
case C	31.2 cm 一定				アーチリブ 上部圧壊			89	72
case D	22.9 cm 一定	③			アーチリブ 上部圧壊			69	52
case E	31.2 cm 一定				アーチリブ 上部圧壊			89	90
case F	31.2→22.9cm	④			アーチリブ 上部圧壊			89	70

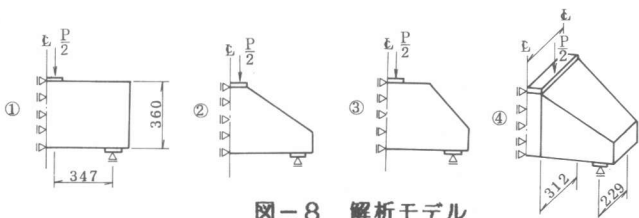


図-8 解析モデル

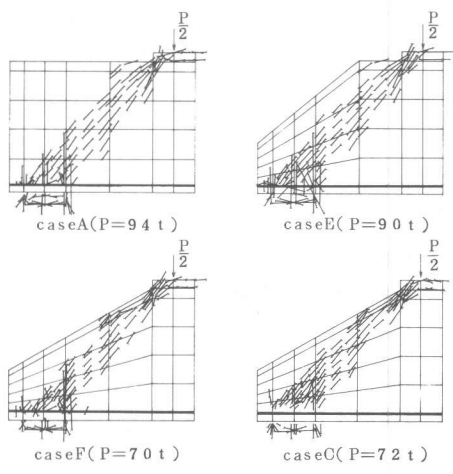


図-9 主圧縮応力分布

高さを載荷板前面からテーパ状にする(caseC, D)と耐力は約80%に低下したが、せん断スパン中央からテーパ状にする(caseE)と96%となった。一方、高さを載荷板前面からテーパ状として幅の影響に着目すると、幅が一定のモデル(caseC)に対して、幅を載荷板前面からテーパ状にする(caseF, caseCと載荷板前面の幅が共通)と97%となった。

以上より、今回の実験で生じたアーチリブ上部(載荷板前面)のコンクリートが圧壊するような場合、破壊荷重の低下は載荷板前面の断面の高さの減少による断面欠損が主な理由であり、幅の影響は少ないと考えられる。これは、図-9の荷重が最大値を示す直前の主応力分布状況にみられるように、断面の高さが載荷板前面からテーパ状になっていると(caseC, D, F)、そうでない場合(caseA, B, E)に比べて載荷板前面で圧縮応力度の集中が著しくなるためと考えられる。

### 3. 3 せん断耐力に及ぼすねじり載荷の影響

#### a) せん断耐力について

同一諸元の供試体で載荷方法の異なるNo.1(せん断載荷)とNo.4(ねじりとせん断載荷)について比較する。

ひびわれは、No.1では側面の表裏ほぼ同時に斜めひびわれが発生したのに対し、No.4では、ねじりとせん断によるそれぞれの斜め引張り応力が同符号になる面(P面)で斜めひびわれが先に発生した。斜めひびわれ発生後も耐力を保持したが、破壊は斜めひびわれが伸展してアーチリブの上面に達して生じた。最終状態でたわみはNo.1の2倍程度となった。

No.1とNo.4の破壊荷重はそれぞれ93t、61tであった。両者の圧縮強度を同一に換算して比べると、No.4のせん断耐力値は、No.1の表-6 ねじりに関する実験値と弾性計算値の比較59%でありこの耐力低下はねじり載荷の影響によるものとみなされる。

#### b) ねじり耐力について

No.4のP面を対象として、最大主応

力度説から求めた斜めひびわれ発生荷重と斜めひびわれ発生前のねじり剛性を表-6で実験値と比較した。この表で実験値を柱前面とせん断スパン中央の断面での計算値と比較した結果、後者の方が実験値との対応が良いため、変断面PCコーベルのねじり耐力の検討にあたっては、せん断スパン中央の断面を検討断面にすることとした。

No.4のたわみ性状から考えてPC鋼材が降伏していると考えられたため、棒部材の立体トラス類似解析によってねじり耐力を計算値し、最終状態でのねじりモーメントの実験値と比較した(表-4)。No.4のねじり耐力は計算値の150%となっており、棒部材での考え方をコーベルに適用すると計算値はかなり安全側の評価になるようである。

### 3. 4 せん断耐力に及ぼす斜角の影響

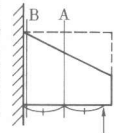
#### a) コーベル先端部のねじり回転を自由にした場合

斜角を有し、ねじりモーメントを発生させないようねじり回転を自由にしてせん断載荷したNo.5供試体とNo.1(基本形、せん断載荷)と比較する。

No.5では、斜めひびわれが短手部で柱前面まで到達して曲率半径の小さい明確なアーチを形成していたのに対し、長手部では曲率半径が大きくひびわれは終局直前まで柱前面に達しなかった。斜めひびわれ発生後も耐力を保持し、破壊は、PC鋼材のひずみは降伏ひずみ以下の状態で、柱前面圧縮側のコンクリートが長手部と短手部でほぼ同時に圧壊することにより生じた。

No.1とNo.5の破壊荷重はそれぞれ93t、94tであった。両者の圧縮強度を同一に換算して比べ

供試体	斜めひびわれ発生荷重		斜めひびわれ発生前のねじり剛性	
	実験値 (t)	計算値(t)	実験値 ( $\text{tm}^2/\text{deg}$ )	計算値
No.4	34	29	43	9.0
				断面A 13.0
				断面B 29.2



ると、No.5のせん断耐力はNo.1の101%であり、両者のせん断耐力はほぼ同じであった。ひびわれ状況からは、橋脚を挟んではすかいの短手部に明確なタイドアーチが形成され、長手部よりも大きな力が受持たれたと推定されるが、破壊荷重付近では、ひずみゲージの測定結果によると両者で同程度の値となっており、応力の再配分により斜角の影響が緩和されたと考えられる。

#### b) コーベル先端部のねじり回転を拘束した場合

斜角を有し、不静定ねじりモーメントの発生を許すようねじり回転を拘束してせん断載荷したNo.6供試体を、せん断耐力についてはNo.1(基本形、せん断載荷)と、またねじり耐力についてはNo.4(基本形、ねじりとせん断載荷)と比較する。

No.6のひびわれ発生状況と破壊モードは、No.5と同様であった。

No.1とNo.6の破壊荷重はそれぞれ93t、95tであった。両者の圧縮強度を同一に換算して比べると、No.6のせん断耐力値はNo.1の100%であり、両者のせん断耐力は同じであった。また、No.4とNo.6のねじり耐力はそれぞれ1.74tm、0.16tmであって、後者は前者の9%であった。更に、No.6のねじり耐力は棒部材の立体トラス類似解析による純ねじり耐力値の14%であり、今回対象とした斜角の大きさ(25度)では不静定力として発生するねじりモーメントは小さく、そのため、せん断耐力に影響を与えなかったようである。これは、棒部材のせん断力-ねじりモーメント相関関係において、ねじりモーメントが純ねじり耐力の0.2倍より小さい時はせん断耐力に対するねじりモーメントの影響はないとされていることに対応している。

#### 4. まとめ

本研究で対象とした変断面PCコーベルのせん断耐力について以下の知見が得られた。

- ①プレストレス(上縁で $-56\text{Kg}/\text{cm}$ 、下縁で $25\text{Kg}/\text{cm}$ )により耐力は増大したが、その効果は棒部材で考えられているプレストレスの効果の1/2程度であった。
- ②コーベルの高さが柱前面から線形に減少して載荷点で1/2になる場合、その変断面効果により耐力は等断面の場合より10%程低下した。
- ③ねじりモーメント・せん断力比 $T/V$ を5.7cmに保って加力した場合、せん断耐力はねじり載荷しない場合の60%程度に低減したが、ねじり耐力としてみると棒部材の立体トラス類似解析(スパン中央断面)の計算値の150%と大きい値であった。
- ④部材軸に対し25度の斜角を与えた場合、コーベル先端部でのねじり回転の拘束条件に拘らず、せん断耐力に及ぼす斜角の影響は殆んど認められなかった。

#### 参考文献

- 1)昭和61年制定土木学会コンクリート標準示方書設計編
- 2)コンクリート・ライブラリー第61号、コンクリート標準示方書(昭和61年制定)改訂資料
- 3)池田；鉄筋コンクリートティープビームの力学的特性と設計法、コンクリート工学、Vol.14、No.4、1976
- 4)石橋 他；有効高さの変化する鉄筋コンクリートはりのせん断耐力について、コンクリート工学年次論文報告集、第9巻、第2号
- 5)村山 他；変断面PCコーベルの耐力算定法について、昭和61年度鹿島建設技術研究所年報、Vol.35、1987
- 6)村山 他；斜角を有する変断面PCコーベルの耐力算定法について、昭和62年度鹿島建設技術研究所年報、Vol.36、1988(予定)