

(27) PCaコンクリートブレースによる耐震補強 その1 構造概要および静的載荷試験結果

オリエンタル建設 (株) ○森山毅子彦  
 同 上 正会員 大島 幸  
 同 上 正会員 木村 義男  
 同 上 正会員 小山内 裕

1. はじめに

最近の社会情勢では、公共建物、特に学校関係の建物などの耐震補強が盛んに行われている。その中で現在、様々な耐震補強方法が提案されているが、既存建物のコンクリートブレースによる補強は一般的な方法としては確立されていない。そこで本報告では、摩擦制御型のプレキャストプレストレストコンクリート造(以下、PCaPC)ブレースによる耐震補強方法を提案し、その構造性能の確認を目的として行った静的載荷試験結果について報告する。

2. PCaPCブレースによる耐震補強方法

(1) 基本方針

コンクリートブレースによる耐震補強では大地震時に想定以上の水平力が作用した場合、①引張ブレースにひび割れが生じると、ブレースの剛性バランスが崩れることで圧縮ブレースにより突き上げ力が生じ、梁にせん断力、梁材端部に危険側のモーメントを与える、②負担荷重がブレースの耐力を越えると、ブレースが破壊し、脆性破壊となる、など問題となる面がある。そこで、ブレースには軸方向にプレストレスを導入しひび割れ耐力を向上させ、また、ブレースと梁の上部接合部を一定荷重以上で滑りを可能とした構造とすることによりブレースの負担する水平力を制御し、ブレースの脆性破壊を防ぐ構造とする。

(2) 補強方法

図1にPCaPCブレースの概念と補強方法を示す。ブレースはPCa部材とし、上部接合部は付着による一時的なせん断耐力の増加を避けるために付着を持たせずにフレーム側とブレース側の摩擦材を介してPC鋼棒により圧着する。下部接合部はモルタルを介して固定となるよう圧着する。上部接合部は大地震時などにブレースの負担水平力が接合部耐力(圧着力×せん断力伝達係数)を越えた場合、接合部の摩擦材に滑りが生じる。これによりブレースに伝達される水平力を制御し、滑り後は圧着力が変わらなければブレースの負担水平力は一定となり、架構の脆性破壊を防ぐことができる。架構の補強後の最大水平耐力はフレーム耐力+ブレースの負担水平力となり、架構の変形能力は柱と同等とすることができる。ブレースの滑り量は架構の全体変形量とブレースの変形量の差となる。

施工では既存梁とPCa部材をPC鋼棒により圧着するので、既存フレームの上梁中央、下梁端部を削孔するのみとなり簡素化される。

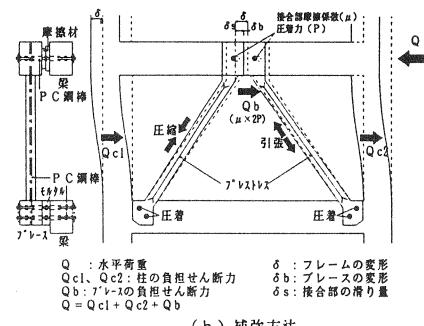
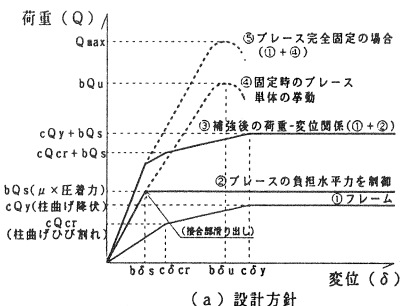


図1 PCaPCブレースによる補強

表1 コンクリートの材料試験結果

部材	柱,基礎梁		ブレース		基礎,加力スラブ	
	Fc kgf/cm <sup>2</sup>	Ec*10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	Fc kgf/cm <sup>2</sup>	Ec*10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	Fc kgf/cm <sup>2</sup>	Ec*10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>
ブレース緊張	—	—	537	3.40	—	—
BR2試験	363	2.57	566	3.56	545	3.62

表2 鉄筋の機械的性質

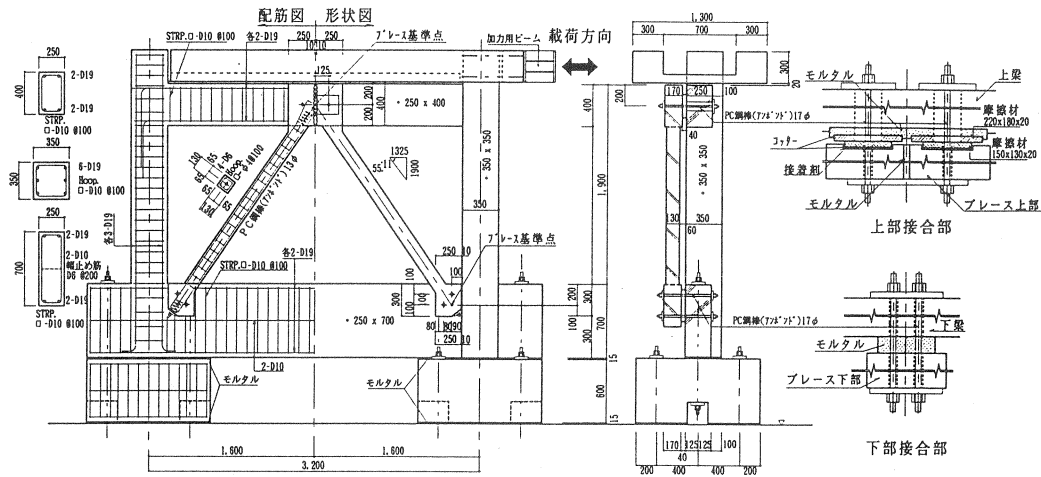
	公称断面積 cm <sup>2</sup>	ヤング係数 *10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	降伏点 kgf/cm <sup>2</sup>	引張強度 kgf/cm <sup>2</sup>
φ4	0.13	2.1	-	5745
D6	0.32	2.1	3714	5663
D1.0	0.71	2.1	3826	5306
D1.3	1.27	2.1	3775	5204
D1.6	1.99	2.1	3806	5306
D1.9	2.87	2.1	3938	5714

表3 PC鋼材の機械的性質

	公称断面積 cm <sup>2</sup>	ヤング係数 *10 <sup>4</sup> kgf/cm <sup>2</sup>	降伏点荷重 kgf	引張荷重 kgf
φ1.3	1.33	2.05	18571	19490
φ1.7	2.27	2.05	24490	26327
φ2.6	5.31	2.05	54898	60816

表4 緊張力(1本あたり)

	軸方向 緊張力 (tf)	接合部	
		上部 (tf)	下部 (tf)
BR2	6.0	7.3	8.0



(1) 試験体全体図 図2 試験体概要 (2) 接合部詳細図

### 3. 載荷試験概要

本試験に使用した材料の試験結果を表1~3に、プレースの軸方向緊張力、接合部緊張力を表4に、試験体概要および接合部詳細図を図-2に示す。試験は正負繰返し載荷とし、滑らせた場合のプレースの補強効果の確認を目的とした。試験体は想定構造物の1/2モデルとし、スパン3.2m、高さ1.9mとした。プレースは断面130×130(mm)とし、プレースの軸方向プレストレス導入用PC鋼材にはアンボンドPC鋼棒φ13mm、プレース圧着用PC鋼材にはPC鋼棒φ17mmを使用した。接合部の圧着力はプレースのひび割れ耐力より接合部耐力(圧着力×せん断力伝達係数)が小さくなるよう、14.6tfとした。また、接合部摩擦材(図2-(2))には御影石を使用し、滑り変形1/50(rad)以上を確保するためにフレームと摩擦材の圧着用削孔はルーズホールとした。摩擦材とフレーム、プレースへの取り付けは、摩擦面裏にせん断キーを設け、予め設けた凹面にプレースには接着剤、フレームにはモルタルにより埋め込み、固定した。

### 4. 接合部のせん断力伝達係数確認試験

接合部に使用する摩擦材のせん断力伝達係数を確認する為に、断面10cm×10cm、圧着面積200cm<sup>2</sup>の試験体を用い一方向正負繰返し載荷とした一軸二面せん断試験(以下、基礎試験という)を行った。

試験体5体(御影石、摩擦面仕上げ無し)の試験結果を表5に、荷重-滑り変位関係の一例を図3に示す。なお、摩擦材は入手し易いもの、変質しにくいものを条件とし、御影石、大理石、モルタルを検討したが、大理石、モルタルは試験時に表面剥離を起こしたので、本試験は御影石を使用した。ここには御影石の試験結果のみを示す。

正方向1回目の滑り出し時の平均値は荷重9.23tf、せん断力伝達係数 $\mu=0.45$ で、変位が進むと平均値は荷重15.11tf、せん断力伝達係数 $\mu=0.73$ と安定した。初滑り時の結果は試験体ごとにせん断力伝達係数 $\mu=0.34\sim0.64$ とばらつきが多少見られたが、滑りが進み荷重が安定した後は、試験体ごとの差も小さく、各試験体についての平均値はせん断力伝達係数で $\mu=0.7$ を下回る試験体はなかった。試験後の摩擦材は石の表面が削れており、白い微粉末が観察された。

表5 試験体の平均値

項目	K-1	K-2	K-3	K-4	K-5	平均値	
初滑り時 <sup>*)1</sup> (正1回目)	荷重(tf)	8.58	6.96	9.32	8.38	12.90	9.23
	緊張力(tf)	10.29	10.17	10.33	10.07	10.26	10.16
	摩擦係数	0.42	0.34	0.46	0.42	0.63	0.45
滑り出し時 <sup>*)2</sup> 1回目以降	荷重(tf)	12.85	10.53	12.74	11.64	12.82	12.52
	緊張力(tf)	10.34	10.13	10.24	10.32	10.20	10.26
	摩擦係数	0.62	0.52	0.61	0.56	0.63	0.61
平均値 <sup>*)3</sup>	荷重(tf)	15.65	14.35	15.53	15.40	14.61	15.11
	緊張力(tf)	10.38	10.13	10.25	10.39	10.27	10.28
	摩擦係数	0.75	0.71	0.76	0.74	0.71	0.73
最大荷重時	荷重(tf)	15.99	14.97	16.16	16.13	15.87	15.83
	緊張力(tf)	10.37	10.12	10.24	10.39	10.24	10.27
	摩擦係数	0.77	0.74	0.76	0.78	0.77	0.77

\*1 母材との相対変位が0.1mmに達した荷重とした。  
 \*2 載荷方向を逆転した場合の初滑り時  
 \*3 滑りにより荷重の低下した値を取り除くために、全体の平均値を下回る値を除いた平均値とした。

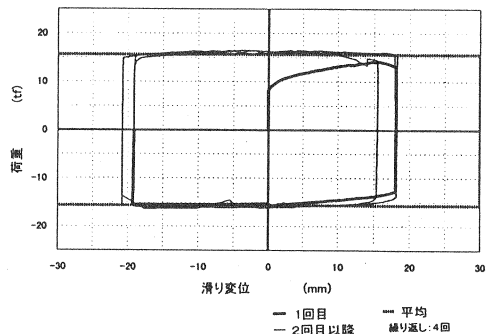


図3 荷重-滑り変位関係(K1試験体)

5. 試験結果

(1) 計算方法

解析では各耐力は純フレームの耐力とブレースの負担水平力としての圧着接合部の伝達せん断力の和とした。フレーム部は試験体のPCaPCブレースの構面外配置によるねじれは無視し、2次元モデルにより柱は曲げひび割れ、曲げ降伏による剛性低下を考慮した。ひび割れ後の柱の剛性低下率は文献\*1による。ブレースの負担水平力は接合部のせん断力伝達係数×圧着力とし、接合部のせん断力伝達係数は基礎試験結果の平均値を用い、初滑り時せん断力伝達係数 $\mu=0.46$ 、滑りを繰り返した後はせん断力伝達係数 $\mu=0.73$ とした。また、梁とブレースに相対変位が生じたことによる圧着力の増加を考慮した。

(2) 各耐力の実験値と計算値の比較

各耐力の実験値と計算値の比較を表6に示す。試験は変位-38mm(-1/50rad)の2回目の載荷途中で急激に荷重が低下したため載荷を終了した。荷重低下の原因は圧縮側ブレースの下部接合部のモルタルの剥落により圧着力が低下し、圧縮側ブレースの軸力負担が喪失した為である。BR-0はBR-2の載荷後にブレースを取り除いたフレームのみの試験体を変位38mm(1/50rad)まで載荷した結果である。

試験体BR-2の実験値を計算値と比較すると、初滑りはせん断力伝達係数 $\mu=0.46$ として計算した値よりやや小さく、荷重25tf以降の剛性はやや低くなった。柱の曲げひび割れは実験では接合部の滑りとほぼ同時に観察され、実験値は計算値の72%であった。柱の鉄筋降伏荷重は計算値に適合した。また、実験ではブレースにひび割れが生じ鉄筋が降伏した。これは曲げとブレースの面外配置によるねじりの影響と思われる。

(3) 荷重-変位関係

試験体BR-2の荷重-変位関係を図4に示す。実験では架構の剛性は約9tfで低下した。これは柱のひび割れと接合部の滑り発生時に一致している。その後、荷重約33tfで、鉄筋が降伏したことにより、剛性の低下がみられる。しかし、変形が層間変位角1/100radを越えても荷重は増加傾向にあり、1/50radまで荷重は低下することはなかった。この荷重の増加は、滑りにより梁ブレースの接合部に相対変位が生じPC鋼棒が伸びたことによる圧着力の増加が原因である。また、履歴曲線はRC+摩擦減衰型の挙動を示した。計算値と比較すると計算値の最大荷重がやや大きい、計算による包絡線は実験の傾向をよく表している。

荷重と上部接合部の梁とブレースの相対変位関係を図5に示す。履歴曲線は摩擦減衰型であり、接合部のせん断耐力までは変位は生じず、せん断耐力を越えると接合部に滑りが生じ、滑り後はフレームの負担増分+PC鋼棒の応力増加による負担水平力の増加分だけ荷重は増加している。上部接合部の相対変位の実験値は計算値より小さいが、これは、下部接合部でも滑りを生じたためである。

(4) ブレース水平力負担割合

ブレースの水平力の負担割合を表7に示す。ブレースの負担水平力はブレースの鉄筋、コンクリートひずみの平均値、PC鋼材の応力増加により軸力を求め、水平力に換算したものとし、ブレースの曲げは無視した。表7よりブレースの水平力の負担率の実験値は計算値とほぼ一致している。接合部初滑り時のブレースの負担水平力は実験では4.52tfで、そのときのせん断力伝達係数は $4.52/(2*7.3) = 0.31$ (圧着力は7.3tf)となり、基礎試験結

表6 実験値と計算値の比較

項目	実験値		計算値		
	荷重 (tf)	変位 (mm)	荷重 (tf)	変位 (mm)	
BR-2	接合部滑り	8.52	0.44	11.52	0.31
	柱ひび割れ	8.77	0.56	12.15	0.48
	ブレースひび割れ	19.49	3.83	-	-
	ブレース鉄筋降伏	26.18	6.32	-	-
	柱鉄筋降伏	30.49	11.01	29.44	9.04
	最大荷重	39.15	38.10	-	-
BR-0	柱ひび割れ	-	-	5.49	0.48
	柱鉄筋降伏	-	-	18.94	9.04
	最大荷重	25.38	38.03	-	-

\*柱、ブレースの鉄筋降伏はいつれか1本が降伏したときの荷重とした。

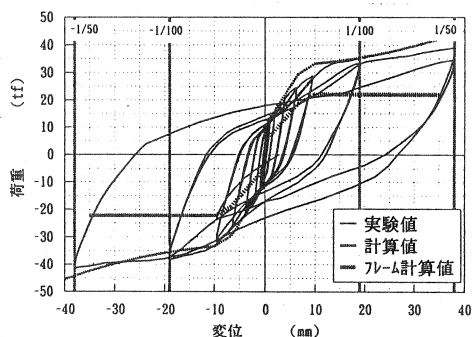


図4 荷重-柱頭変位関係

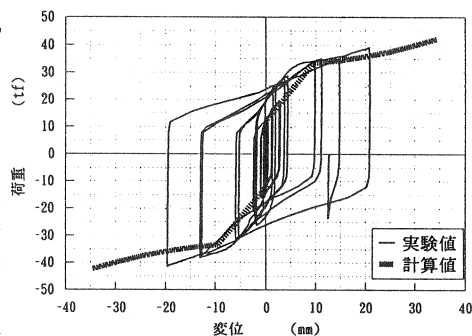


図5 荷重-梁とブレースの相対変位関係

果の最小値よりやや低い値となった。柱ひび割れ時の負担水平力は滑りが生じたことで接合部滑り時より増加していない。また、表6より最大荷重時(39.15tf、 $\delta=38\text{mm}$ )と

表7 ブレースの負担水平力

項目	実験値					計算値				
	荷重(tf)	ブレース軸力(tf) (圧縮、引張+)		ブレース負担水平力(tf)	ブレース負担割合(%)	荷重(tf)	ブレース軸力(tf) (圧縮、引張+)		ブレース負担水平力(tf)	ブレース負担割合(%)
		L	R				L	R		
B 弾性時	4.88	-2.47	2.27	2.71	55.5	5.00	-2.62	2.48	2.93	58.6
R 接合部滑り	-8.52	3.69	-4.21	-4.52	53.1	-8.52	4.46	-4.22	-4.99	58.6
2 柱ひび割れ	-8.77	3.38	-4.17	-4.32	49.3	-10.46	4.46	-4.22	-4.99	47.7

\*初滑りが負方向の荷重で起こったため、負方向の結果とした。

また実験値はひずみより換算したためブレースの弾性範囲内とした。

ブレースを取り除いた BR-0(25.38tf)の差分をブレース負担分であると考え、そのときのせん断力伝達係数は $\mu=0.68$ (差分=13.77tf、圧着力=20.30tf)となり、基礎試験の滑り後の平均値よりやや小さい結果となった。

(5) 圧着接合部 P C 鋼棒の滑りによる応力変化

BR-2 試験体の上部接合部の PC 鋼棒の応力変化、右側ブレース軸方向 P C 鋼材応力と梁とブレースの相対変位関係を各々図 7,8 に示す。圧着用 PC 鋼棒の応力は梁ブレースの相対変位が大きくなるほど 2 次曲線状に増加している。これは相対変位が生じたことで P C 鋼棒に伸びが生じたことによる。この現象によるブレースの負担水平力の増加により、ブレースの軸力も増え、軸方向 P C 鋼材も応力が引張時には増加していることがわかる。この滑りによる P C 鋼棒の応力増分は計算で推定でき、設計時にはこの応力増分による伝達せん断力の増加を考慮する。

(6) ひび割れ状況

試験体のひび割れ図を図 8 に示す。滑り出しとほぼ同時(荷重 8.77tf)に柱に曲げひび割れが生じ、荷重 19.49tf でブレースにひび割れが生じた。ブレースのひび割れはブレース正面側にはあまりは見られず、背面のフレーム側にひび割れが数本見られた。また、上部接合部のブレースのつなぎ面で圧縮側と引張側のブレース間で伝達されるせん断力により鉛直方向にひび割れが生じた。下部接合部モルタルは滑りが生じたこと、補強筋がなかったことなどにより、モルタルにひび割れが入った後に徐々に剥落した。

6. まとめ

本実験の範囲内で以下の知見が得られた。

- 1) 接合部摩擦材のせん断力伝達係数確認試験では初滑り時にはばらつきが見られたが、繰り返し後は安定し、せん断力伝達係数 $\mu=0.7$ を下回るものはなかった。載荷試験では滑り変位が小さいときには、せん断力伝達係数 $\mu=0.3$ 程度で滑り出したが、最大耐力時はせん断力伝達係数 $\mu=0.68$ であった。
- 2) 試験体の荷重-変位曲線は、下部接合部のモルタルが破壊するまでは層間変位角 1/50(rad)まで載荷しても荷重の低下はなく、RC+摩擦減衰型の履歴特性となった。
- 3) ブレースの負担水平力は計算値とほぼ一致し、ブレースで補強することにより、既存フレームの曲げひび割れ荷重、柱曲げ降伏荷重を向上させることができた。
- 4) 梁とブレースの相対変位による P C 鋼材の圧着力の増加分によりブレースへの伝達せん断力が大きくなった。
- 5) P C 鋼棒により圧着した摩擦制御型の接合部とすることでブレースの負担水平力を制御することができた。

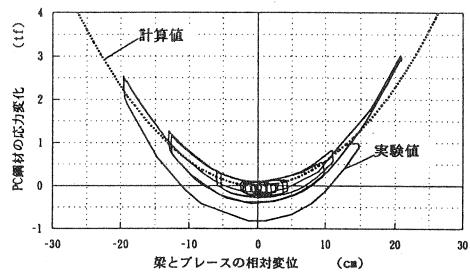


図6 圧着接合用 PC 鋼材応力変化  
-梁とブレースの相対変位関係

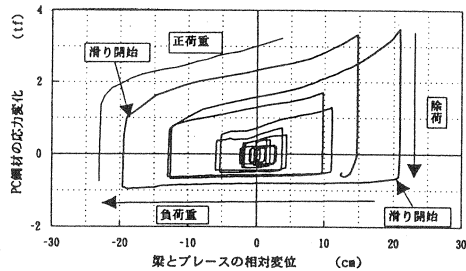


図7 ブレース軸方向 PC 鋼材応力変化  
-梁とブレースの相対変位関係

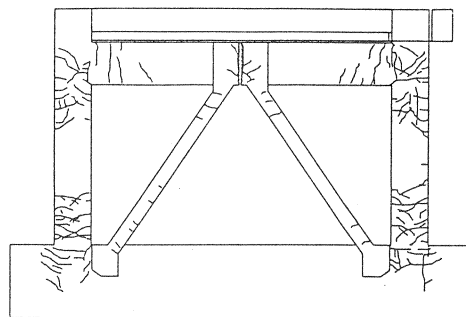


図8 試験体ひび割れ図