

特集

P C 建 築

プレキャストプレストレストコンクリート造 ブレースによる耐震補強に関する実験報告

森山 毅子彦*1・小山内 裕*2・大島 幸*3・木村 義男*4

1. はじめに

最近の社会情勢では、公共建築物、特に学校関係などの耐震補強が盛んに行われている。その中で現在、さまざま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方法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(PCa PC)ブレースによる耐震補強方法を提案し、その補強効果の確認を目的として行った実験の結果について報告する。

2. PCa PCブレースによる耐震補強方法

2.1 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、ブレースのバランスがくずれすることで圧縮ブレースにより突上げ力が生じ、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ブレースの負担荷重が耐力を超えると、ブレースが破壊し急速に水平耐力が失われ脆性破壊となる、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、ブレースと梁の接合部(上部のみ)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。

2.2 補強方法

図-1にPCa PCブレースによる補強方法を示す。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、付着を持たせず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(圧着力×せん断力伝達係数)を超えた場合は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+(圧着力×せん断力伝達係数)となり、架構の変形能力は柱と同等と

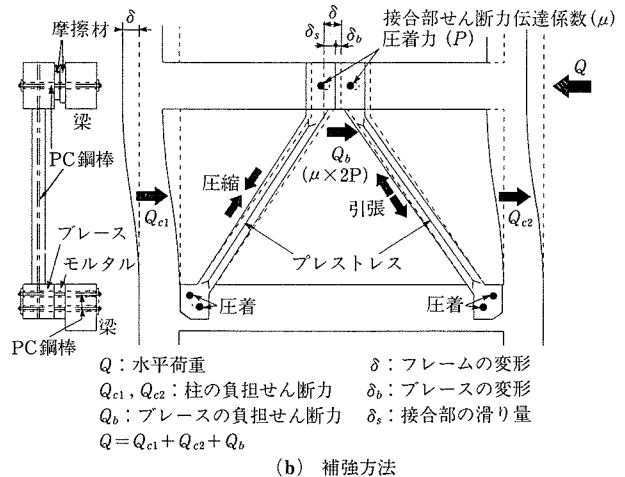
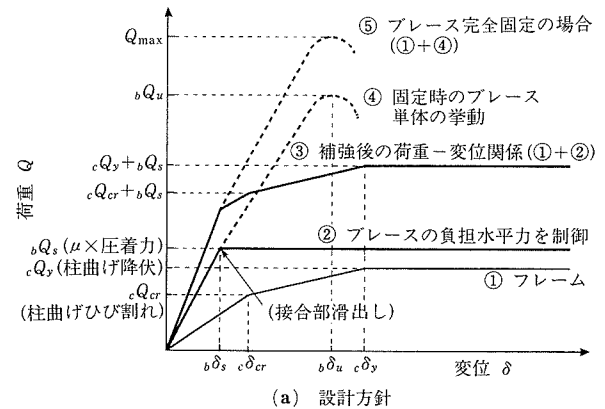
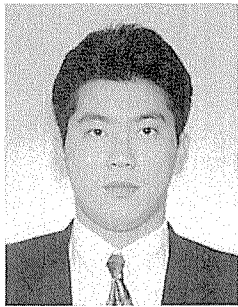


図-1 PCa PCブレースによる補強方法



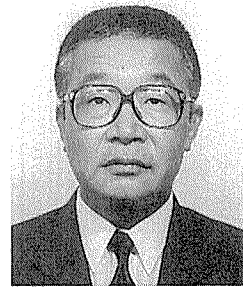
*1 Kishihiko MORIYAMA
オリエンタル建設(株)
技術部 研究員



*2 Yutaka OSANAI
オリエンタル建設(株)
技術部 主任研究員



*3 Miyuki OOSHIMA
オリエンタル建設(株)
建築支店 副支店長



*4 Yoshio KIMURA
オリエンタル建設(株)
建築支店 プレキャスト部 部長

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、既存梁にPCa部材のブレースを摩擦材またはモルタルを介してPC鋼棒により梁と圧着するので、既存フレームは上部梁中央、下部梁端部のみに削孔するのみとなり、施工は簡素化される。

3. 載荷試験概要

載荷試験状況を写真-1に、本試験に使用した材料の試験結果を表-1～3に、ブレースの軸方向緊張力、接合部緊張力を表-4に、試験体(BR-2)形状図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、滑らせた場合のブ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。ブレースは断面130mm×130mmとし、ブ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、ブレース圧着用PC鋼材にはPC鋼棒φ17mmを使用した。接合部の圧着力はブレースのひび割れ耐力で滑りが生じるような圧着力とした。接合部摩擦材(図-2(b))には御影石を使用し、滑り変形1/50rad.以上を確保するために

表-1 コンクリートの材料試験結果

部 材	柱, 梁, 基礎梁		ブレース		基礎, 加力スラブ	
	Fc kgf/cm ²	Ec×10 ⁵ kgf/cm ²	Fc kgf/cm ²	Ec×10 ⁵ kgf/cm ²	Fc kgf/cm ²	Ec×10 ⁵ kgf/cm ²
ブレース緊張時強度	—	—	537	3.40	—	—
BR-2試験時強度	363	2.57	566	3.56	545	3.62

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、ブレースへの取付けは、摩擦面裏にせん断キーを設け、あらかじめ設けた凹面にブレースには接着剤、フレームにはモルタルにより埋め込み、固定した。

表-2 鉄筋の機械的性質

種類	公称断面積 cm ²	ヤング係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	降伏点 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²
φ4	0.13	2.1	—	5 745
D 6	0.32	2.1	3 714	5 663
D10	0.71	2.1	3 826	5 306
D13	1.27	2.1	3 775	5 204
D16	1.99	2.1	3 806	5 306
D19	2.87	2.1	3 938	5 714

表-3 PC鋼材の機械的性質

種類	公称断面積 cm ²	ヤング係数 ×10 ⁶ kgf/cm ²	降伏点荷重 kgf	引張荷重 kgf
φ13	1.33	2.05	18 571	19 490
φ17	2.27	2.05	24 490	26 327
φ26	5.31	2.05	54 898	60 816

表-4 緊張力(1本あたり)

	軸方向*1 緊張力(tf)		接合部					
			上部(tf)*2		下部(tf)*3			
	L	R	L	R	L1	L2	R1	R2
目標値	6.0		7.3		7.3			
実施値	6.38	6.24	7.40	7.37	8.10	8.15	8.13	8.10

*1, 2は試験時, *3は導入時緊張力

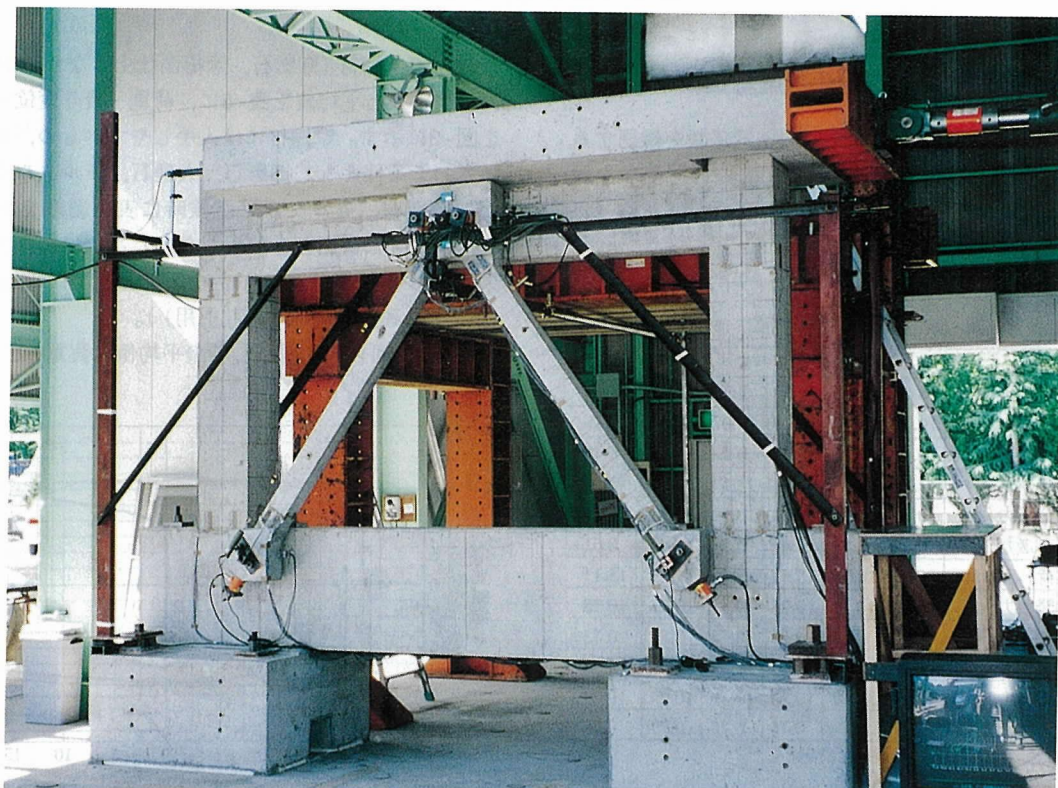


写真-1 載荷試験状況

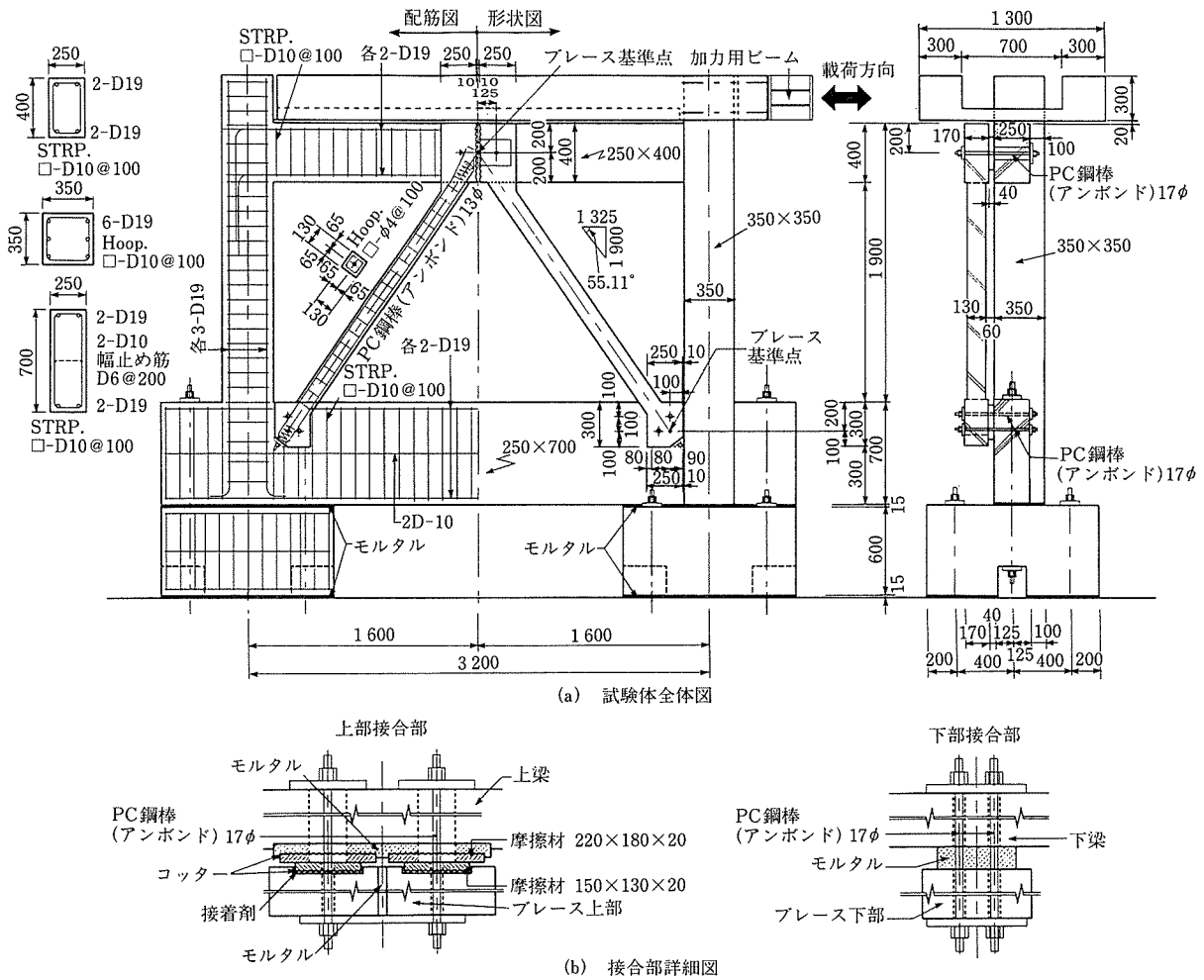


図-2 試験体 (BR-2) 形状図

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ために、断面10cm×10cm、圧着面積200cm²の試験体を用い一方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。

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*1 (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
	せん断力伝達係数	0.42	0.34	0.46	0.42	0.63	0.45
滑出し*1*2 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
	せん断力伝達係数	0.62	0.52	0.61	0.56	0.63	0.61
平均値*3	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
	せん断力伝達係数	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
	せん断力伝達係数	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。

接合部摩擦材（御影石、摩擦面仕上げなし）の試験体5体の試験結果と平均値を表-5に、荷重-滑り変位関係の一例を図-3に示す。摩擦材には入手しやすいもの、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（御影石の一般的な圧縮強度は1500kgf/cm²程度（浜田著「建築材科学」より引用））。

正方向1回目の初滑出し時の平均値は荷重9.23tf、せん断

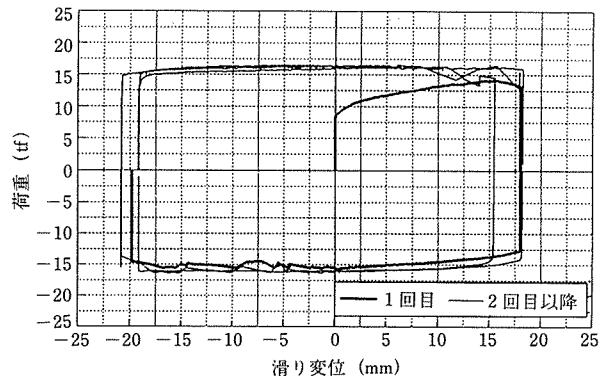


図-3 荷重-滑り変位関係 (K2試験体)

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 $\mu = 0.34 \sim 0.64$ 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、石の表面が割れており、白い微粉末が観察された。

5. 試験結果

5.1 解析方法

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。フレームは試験体の PCa PC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³⁾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×圧着力のみ負担するものとし、ブレース部材は弾性として計算した。また、接合部のせん断力伝達係数は基礎試験結果の最小値を用い、初滑り時せん断力伝達係数 $\mu = 0.34$, 滑りを繰り返した後はせん断力伝達係数 $\mu = 0.71$ とし、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。

5.2 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ためである。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。

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)	
BR2	接合部滑り	8.52	0.44	8.52	0.31
	柱ひび割れ	8.77	0.56	10.46	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	32.43	9.04
	最大荷重	39.15	38.10	-	-
BR0	柱ひび割れ	-	-	5.49	0.48
	柱鉄筋降伏	-	-	22.12	9.04
	最大荷重	25.38	38.03	-	-

* 柱、ブレースの鉄筋降伏はいずれか1本が降伏したときの荷重とした。

試験体BR-2の実験値を計算値と比較すると、初滑り時はせん断力伝達係数 $\mu = 0.34$ として計算した値と一致したが、荷重25tf以降の変位はやや大きくなった。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、実験値のひび割れ荷重は計算値の84%であった。柱の鉄筋降伏時は荷重、変位ともに計算値に適合した。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。

5.3 荷重-変位関係

試験体BR-2の荷重-柱頭変位関係を図-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、柱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.を超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。履歴曲線はRC+摩擦減衰型の挙動を示した。また、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といえる。

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、耐力を超えると接合部に滑りが生じ、フレームの負担分+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。実験値は計算値より相対変位が小さいが、これは、下部接合部でも滑りを生じたためである。

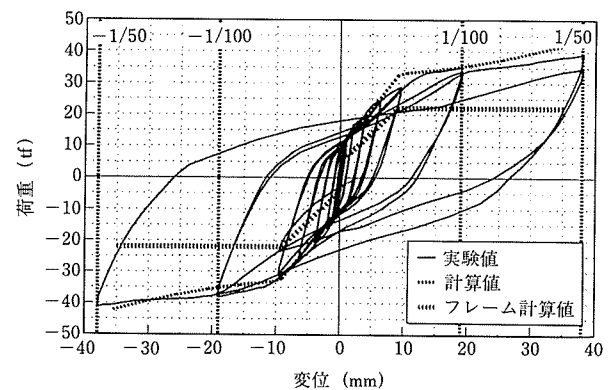


図-4 荷重-柱頭変位関係

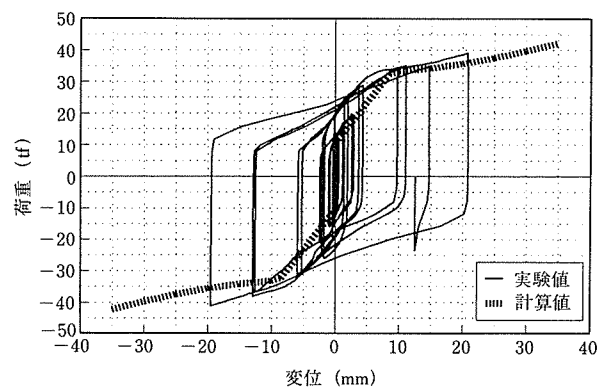


図-5 荷重-梁とブレースの相対変位関係

5.4 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、ブレースの曲げは無視した。ブレースの水平

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 1 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。

力の負担率の実験値は計算値とはほぼ一致している。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 $4.52 / (2 \times 7.3) = 0.31$ (圧着力は7.3tf)となり、基礎試験結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により接合部滑り時より増加していない。また、表-1より最大荷重時(39.15tf, 変位38mm)と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最小値よりやや小さい結果が得られた。

5.5 圧着接合部PC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、ブレース軸方向PC鋼材応力と梁とブレースの相対変位関係を各々図-6, 7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。BR-2では、相対変位が生じれば圧着用PC鋼棒の伸びにより圧着力が増加し、ブレースの負担水平力も増加する。そのため、

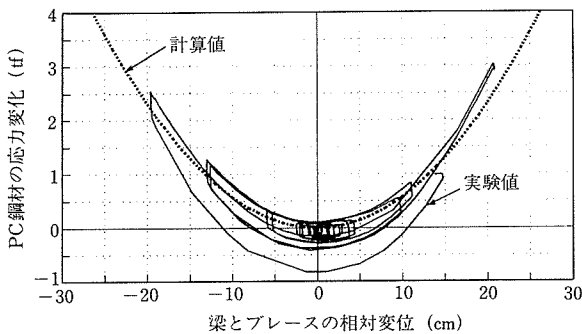


図-6 圧着接合用PC鋼棒応力変化 — 梁とブレースの相対変位関係

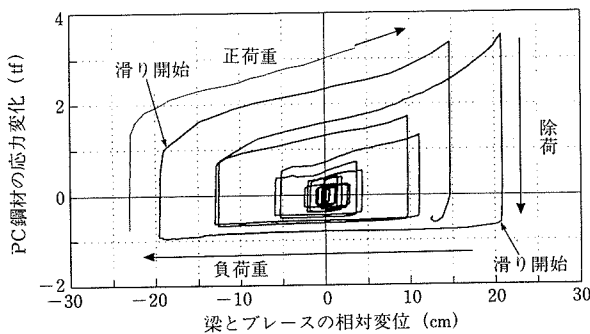


図-7 ブレース軸方向PC鋼材応力変化 — 梁とブレースの相対変位関係

ブレースの軸力も増え、軸方向PC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PC鋼棒の応力増分は計算により推定でき、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必要がある。

5.6 ひび割れ状況

試験体のひび割れを図-8に示す。滑出しとほぼ同時(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。これは曲げの影響と思われる。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。

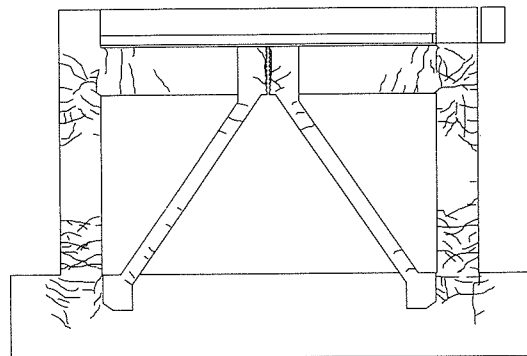


図-8 試験体ひび割れ図

5.7 試験後の接合部摩擦材の状態

試験後のBR-2の接合部摩擦材の状態を写真-2に示す。滑りが生じたことにより表面が白くなり、完全な平滑面ではないため、削り取られたような部分もあった。しかし、偶

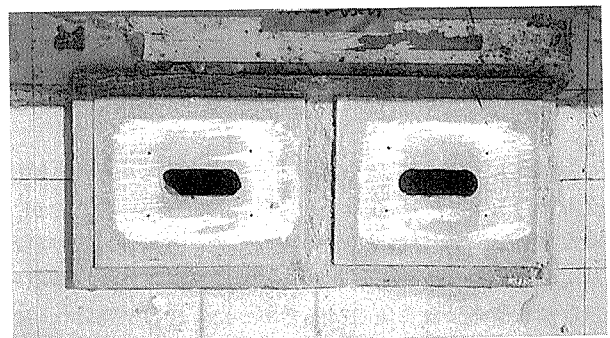


写真-2 接合部摩擦材(試験後)

角部が多少削られていたほかには、摩擦材、周辺のコルタルともに重大な損傷はなく、健全な状態であった。

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、下部接合部のコ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PC鋼材の圧着力の増加分のみブレースへの伝達せん断力が大きくなった。
- ⑤ PC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。

謝 辞

本実験では、(社)建築振興協会に設置された「PC耐震壁性能検討委員会(委員長:渡邊史夫京都大学教授)」の方々により、さまざまな助言を受けました。また、現在継続中の実験では高周波熱錬(株)の溝口氏にPC鋼材を提供していただきました。ここに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 日本建築学会:プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説, 1987
- 2) 日本建築学会:鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説, 1988
- 3) 日本建築学会:鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料, 1987
- 4) 特集既存建物の耐震診断と耐震改修, 建築技術, No.571, pp.88~197, 1997.10

【1998年4月20日受付】

◀刊行物案内▶

PC橋の耐久性向上のための 設計・施工マニュアル

(平成9年3月)

頒布価格: 3 000円(送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会
PC技術規準研究委員会
耐久性向上分科会

◀刊行物案内▶

PPC構造設計規準(案)

外ケーブル構造・プレキャストセグメント工法 設計施工規準(案)

プレストレストコンクリート橋の耐久性向上 のための設計・施工マニュアル(案)ー抜粋ー

(平成8年3月)

頒布価格: 3点セット 5 000円(送料500円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会