

論文 圧縮抵抗型ブレースを用いるRC造ピロティ架構の部分架構の加力破壊実験

大川光雄^{*1}・塩屋晋一^{*2}・幸加木宏亮^{*3}・岡元夕弥^{*1}

要旨：既存RCピロティ架構のピロティ層に圧縮抵抗だけするブレースを設置して耐震補強を行う場合の補強効果を検証するために、ピロティ層の応力状態を模擬した部分架構の加力実験をこれまで行ってきた。今回、ブレースの圧縮降伏耐力の制御方法に関するブレースの圧縮実験と、その制御方法を用いてブレース接合部の支圧破壊を回避してブレースを圧縮降伏させる場合と、架構を全体曲げ降伏させる場合の部分架構の水平加力実験を行った。

キーワード：ピロティ架構，耐震補強，ブレース，部分架構実験，施工

1. はじめに

本研究は既存RC造ピロティ架構の耐震補強に関する研究である。補強方法は、図-1(a)に示すように壁と一体となった2階梁と、基礎フーチングと一体となった基礎梁を、圧縮抵抗型のブレースで連結することで、ピロティ層の水平剛性と耐力を増大させる。また、水平力に伴う柱の変動圧縮軸力をブレースに吸収させ、柱の高軸力状態を回避し、同時にその軸力を水平抵抗力に変換させる。ブレースを引張抵抗させないため接合部の詳細と工事が容易になる。

筆者ら¹⁾は、5階建てRC造ピロティ架構を想定した部分架構の加力実験を報告した。ブレース補強によりピロティ層の水平剛性が2.6倍、水平耐力が2.3倍まで増大することを確認した。しかし、最大耐力時に上下の梁とブレースの接合部に支圧破

壊が生じ、それ以降、耐力が低下した。

今回、ブレース接合部の支圧破壊を回避する目的で、ブレースの圧縮降伏耐力を制御する方法に関する実験を行い、これにより明らかになった制御法を用いたブレースを有する架構と、これまでのブレースを用いて全体曲げ降伏させる架構の加力破壊実験を行った。

本論文はこれらの実験概要と結果を述べる。

2. ブレースの圧縮降伏耐力の制御に関する実験

2.1 降伏耐力の制御方法と目的

ブレースには型枠の役割もする鋼管に高強度の無収縮モルタルを充填したものをを用いる。鋼管の力学的役割は、座屈耐力、軸圧縮耐力、最大耐力後の靱性を増大させることである。

ブレースが圧縮降伏する場合、斜めに切断される上下の接合面近傍では鋼管の拘束力が小さいため、その部分のモルタルが圧縮破壊する²⁾。その後、繰返し力が加わると、その部分モルタルは劣化して接合面が圧縮力を伝達できなくなる。これを防ぐため、接合面から離れた位置で局所的に圧縮降伏させることを検討した。

本研究では、図-1(c)に示すように基礎梁側の鋼管内部に、鋼管の横拘束力を減少させる区間(以下、制御部)を設け、その部分を圧縮降伏させる方法を用いた。これについては既に文献3)で、鋼管の内側の全周にゴムシートとクロロプレンゴムスポンジ(以後、CRスポン

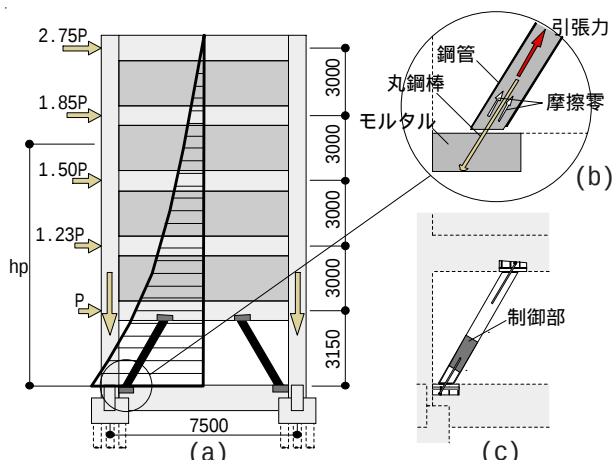


図-1 想定する架構の応力状態と降伏制御部位置

*1 鹿児島大学 大学院理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 鹿児島大学 工学部建築学科助教授 工博 (正会員)

*3 (株)竹中工務店 (元鹿児島大学 大学院理工学研究科建築学専攻 大学院生)

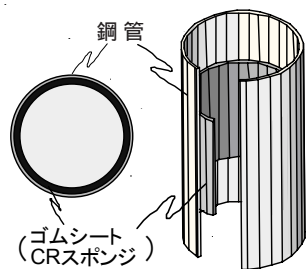


図-2 文献3)の試験体

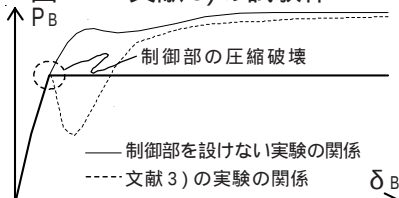


図-3 プレースの圧縮荷重 P_B - 圧縮変形 δ_B 関係

表-1 モルタルの力学的特性

	$m\sigma_B$ (N/mm^2)	$m\varepsilon_B$ (%)	E_m ($\times 10^4 N/mm^2$)
平均	92.7	0.418	69.12

$m\sigma_B$: モルタル圧縮応力,

$m\varepsilon_B$: 圧縮応力時のひずみ度, E_m : ヤング係数

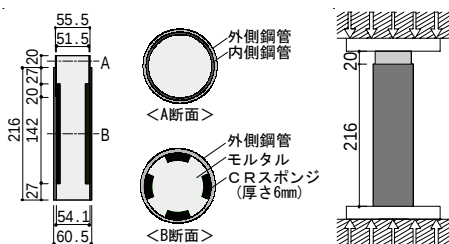


図-4 試験体の形状と寸法および加力状況

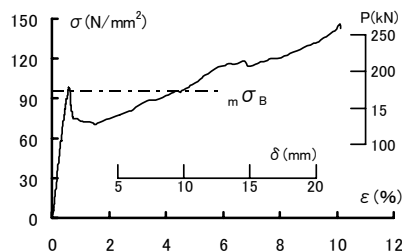


図-5 圧縮応力 - ひずみ関係

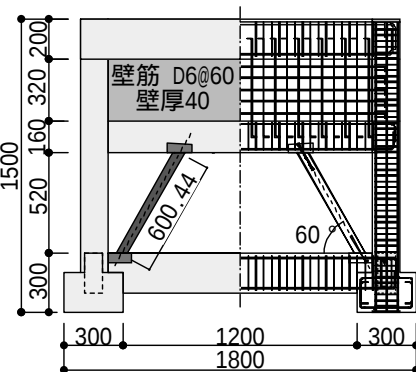


図-6 架構試験体の形状と配筋および寸法(単位: mm)

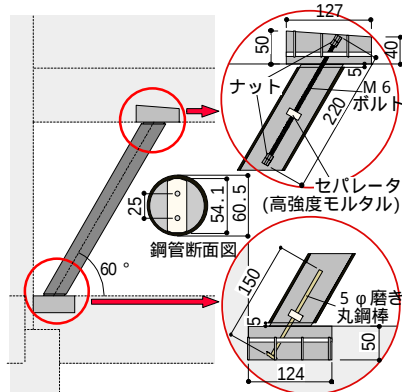


図-7 プレース接合部の詳細

ジ)を図-2のように貼り付ける方法を検討している。この方法を用いて耐力を制御しようとすると、図-3の破線で示すように急激な耐力低下が生じ、また僅かな軸変形で急激な耐力の再上昇が生じて本来の降伏耐力に戻る。

そこで、図-3に太実線で示すように圧縮降伏後の耐力をほぼ一定にする制御法を構築することを目的に、CRスポンジを用いたプレースの圧縮実験を行った。

2.2 試験体および加力方法

図-4に試験体の形状と寸法および加力状況を示す。加力は一軸載荷とした。プレースの圧縮耐力は、B断面で鋼管の内側断面積からCRスポンジの面積を除いたモルタルの耐力で制御する。圧縮降伏後の耐力低下は、鋼管の横拘束力で抑制する。上部は鋼管を二重にし、内側の鋼管モルタル部分が外側鋼管の内部に入り込む仕組みになっている。

表-1にモルタルの力学的特性を示す。モルタルには早強セメントと砂に無収縮剤を添加したものをを用いた。鋼管はSS400を使用した。

2.3 実験結果

図-5に圧縮応力-ひずみ関係を示す。図中に荷重と変形の目盛も示す。簡便に応力はB断面の



写真-1 二重鋼管



写真-2 スパイラル筋

モルタルの断面積で荷重を除いた値とした。制御部のモルタルが圧縮破壊して約27N/mm²ほど強度低下が生じたが、その後、鋼管による横拘束力を受けて強度は緩やかに増加した。同図にモルタルの圧縮強度を水平の一点鎖線で示す。圧縮降伏時の軸力は制御部のモルタルの実断面積と圧縮強度の積で評価できる。

3. 部分架構の加力試験

3.1 試験体

図-6に試験体の形状と配筋および寸法を示す。試験体は基礎フーチングから3階梁までの部分架構とした。試験体は、前章で述べた図-4の制御法を用いてプレースを圧縮降伏させる試験体(以後、PFB-CY)と、曲げ引張側の柱を引張降伏させて全体曲げ降伏させる試験体(以後、PFB-FY)の計2体とした。縮尺は実大寸法の1/5とした。

図-7にプレースの接合部の詳細を示す。この施工状況は文献1)を参照されたい。PFB-FY

表 - 2 部材断面および詳細 (長さの単位: mm)

部材	柱	基礎梁	基礎直交梁	2階梁	3階梁
主筋	10-D6 Pg=2.7%	3-D6 3-D6	3-D6 3-D6	3-D6 3-D6	3-D10 3-D10
せん断補強筋	2.5φ@30	2.5φ@40	2.5φ@40	2.5φ@40	2.5φ@40
Pw	0.19%	0.22%	0.22%	0.22%	
b×D	140×140	90×200	90×200	90×160	200×200
断面					

表 - 3 使用材料の力学的特性 (単位: N/mm²)

		$E_c (\times 10^4)$	$c \sigma_B$	$c \varepsilon_B (\%)$	$c \sigma_{SP}$
コンクリート	モルタル	2.35	30.8	0.27	3.11
		2.80	93.5	0.40	-
鉄筋	種別	$E_s (\times 10^5)$	$s \sigma_y$	$s \sigma_B$	
	2.5φ	1.93	318	423	
	D6	1.76	384	537	
	D10	1.66	343	480	

E_c : コンクリートのヤング係数, $c \sigma_B$: 圧縮応力, $c \sigma_B$: 圧縮強度時ひずみ度, $c \sigma_{SP}$: 割裂強度, E_s : 鉄筋のヤング係数, $s \sigma_y$: 降伏強度, $s \sigma_B$: 引張強度

のブレースの接合部は図 - 7 のとおりである。PFB-CYでは制御部を図 - 1 (c)に示す位置に設け、その鋼管の下端部を写真 - 1に示すように二重鋼管とした。今回は、ブレース接合部の支圧耐力を増加させるため、写真 - 2に示すようにD3のスパイラル筋を新たに配筋した。

表 - 2 に断面リストを、表 - 3 に使用材料の力学的特性を示す。

3.2 測定位置と加力方法

図 - 8 に加力状況と測定状況を示す。加力は左右の柱の断面中心に軸力比 $\eta = 0.13$ の 79.1kN の軸力を載荷し、繰り返しの水平加力を行った。水平荷重の重心高さを h_p とし、 h_p に反曲点が位置するように鉛直荷重を制御した。PFB-CY の h_p は昨年の実験と比較するため同じ 1926mm とした。PFB-FY は全体曲げ降伏させるため 2226mm と高く設定し、曲げ耐力を低下させた。

3.3 ひび割れ経過

図 - 9 に最終破壊状況を示す。ひび割れの経過は両試験体とも同様で、引張側柱の柱脚、柱頭、圧縮側柱の柱脚、柱頭、基礎梁の順で曲げひび割れが生じた。その後、引張側柱の中央高さに輪切り状のひび割れ、基礎梁側のブレース接合部でブレース軸延長線上にひび割れ、壁にせん断ひび割れが生じた。接合部のひび割れ、壁のせん断ひび割れはともに 0.15mm 以下と小さく、実験終了後は目視で確認されないものであった。

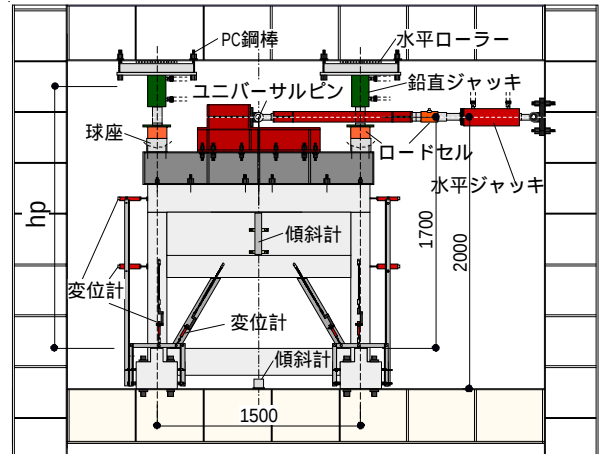


図 - 8 加力状況と測定状況

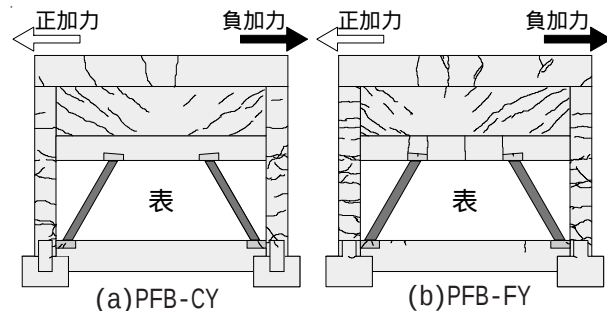


図 - 9 最終破壊状況



写真 - 3 実験終了後のブレース接合部状況



写真 - 4 実験終了後の柱脚の破壊状況

写真 - 3 に両試験体の実験終了後の接合部状況を示す。両試験体とも支圧破壊は発生せず、スパイラル筋の効果が確認された。写真 - 4 に実験終了後の柱脚の破壊状況を示す。PFB-CYでは、正負の最終サイクルのピーク近傍で、圧縮側柱柱脚の曲げせん断ひび割れが拡大し、耐力が低下した。これに対して全体曲げ降伏したPFB-FYでは、そのような破壊は生じなかった。

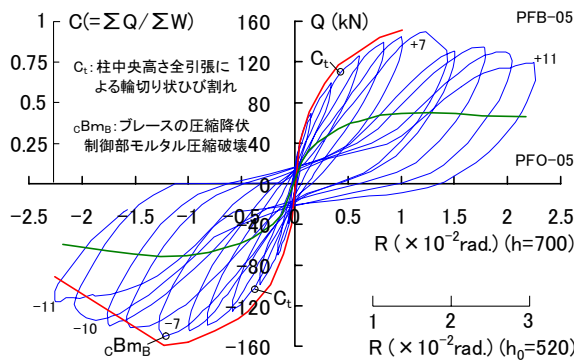


図 - 10 PFB-CY の層せん断力 - 層間変形角関係



(a) - 9 サイクル (b) + 10 サイクル
写真 - 5 プレースの基礎梁側の接合部

3.4 ブレースを圧縮降伏させた試験体 PFB-CY

3.4.1 層せん断力 - 層間変形角関係

図 - 10 に 1 階の層せん断力 - 層間変形角関係を示す。層間変形角 R は基礎梁と上梁の断面芯の間の構造階高 h ($=700\text{mm}$) で除した値とした。図中には柱の内法高さ h_0 ($=520\text{mm}$) で除した目盛りと、層せん断力を長期軸力の和で除した値、つまり強度指数 C の目盛りも示す。同図には昨年のピロティ架構の PFO-05 とブレースと梁の接合部で支圧破壊した PFB-05 の包絡線も示す。

+49.2kN で引張側柱の柱脚に曲げひび割れが生じ、+110kN で引張側柱の中央高さに輪切り状のひび割れが生じた。これらの時点で剛性低下が大きくなった。±7 サイクルの ±1.24%rad. で圧縮ブレースの制御部のモルタルが圧縮破壊して最大耐力に達した。正負の最大耐力はほぼ等しくなった。最大耐力以降の耐力低下の程度は正加力時に比べ負加力時が小さくなった。最大耐力時に引張側柱の引張鉄筋、中段筋は引張降伏したが、圧縮主筋は引張降伏しておらず全引張降伏していなかった。最大耐力以降、±2.0%rad. のサイクルまでは耐力はほぼ一定となっており、制御部が圧縮降伏した後、ブレースの最大圧縮力はほぼ一定に維持されているものと判断できる。-10 サイクルではピークの直前に圧縮側柱柱脚の曲げせん断ひび割れが拡大して耐力低下が生じ、つぎの ±11 サイクルでせん断破壊し、層

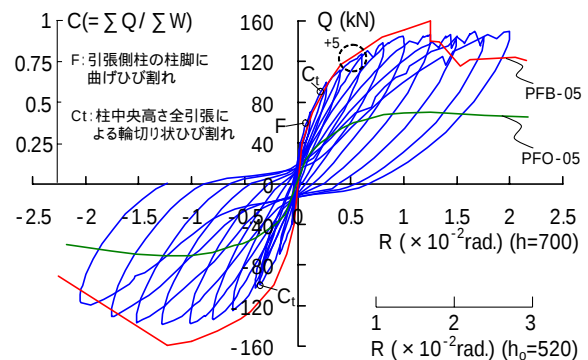


図 - 11 PFB-FY の層せん断力 - 層間変形角関係

せん断力が低下した。最終的に圧縮側柱が軸崩壊して限界変形に至った。

3.4.2 ブレースの端部の状況

引張力を受ける状態のブレース (以後、引張ブレース) では、±3 サイクルのピークで、二重鋼管の内側鋼管とその内部のモルタルがずれる状態で引張軸変形が生じた。この時、ブレース下端の縁切り区間 (5mm) には引張力による水平分離ひび割れが生じていなかったことから、制御部で引張ひび割れ (以後、引張分離面) が生じていたものと判断できる。ブレースが圧縮降伏した ±7 サイクル以降、縁切り区間に水平分離ひび割れが生じたが、そのひび割れ幅が拡大する現象はなかった。引張軸変形は、内側鋼管が外側鋼管から抜け出る状態で生じていた。

圧縮力を受ける状態では、引張分離面が完全に閉鎖し、圧縮力が伝達されていたと考えられる。

写真 - 5 にブレースの基礎梁側の状況を示す。

3.5 全体曲げ降伏させた試験体 PFB-FY

3.5.1 層せん断力 - 層間変形角関係

図 - 11 に 1 階の層せん断力 - 層間変形角関係を示す。表現は図 - 10 と同様である。

PFB-CY と同様に、引張側柱の柱脚の曲げひび割れと、中央高さに輪切り状のひび割れが発生した時点で剛性低下が大きくなった。+5 サイクルのピーク直前から引張ブレースで磨き丸鋼ですべる音が発生し、瞬間的な耐力低下が頻繁に生じた。負加力時ではこのような現象は全く生じなかった。この原因については次節で述べる。約 ±1.26%rad. で引張側柱の全主筋が引張降伏し、ブレースの接合部が支圧破壊する前にピロティ層が全体曲げ降伏した。正加力時の



(a) - 3サイクル (b) 最終 - 11サイクル
写真 - 6 プレースの基礎梁側の接合部



(a) 引張抵抗しなかった側の右ブレース



(b) 引張抵抗した側の左ブレース
写真 - 7 プレースの基礎梁側の丸鋼の軸

最大耐力は146.8kNで負加力時は138.9kNであった。前述の局所的な荷重の低下量は平均して約8kN程度で、これを正加力時の最大耐力から差し引くと、正負の最大耐力はほぼ同じとなる。

正加力側では+2.0%rad.の最終サイクルまでは曲げ降伏形の安定した履歴特性を示しており、+1.0%rad.以降の耐力はほぼ一定で靱性に富んでいる。これに対し、負加力時では全体曲げ降伏するものの、-8サイクルからループ形状が逆S形となり、これ以降のサイクルで耐力が低下している。そのため、正加力側の層せん断力 - 層間変形角関係が全体曲げ降伏する場合の履歴特性を表していると考えられる。

3.5.2 プレースの端部の状況

引張ブレースでは±2サイクルのピークにブレース下端の縁切り区間(5mm)に引張による水平分離ひび割れが生じた。その後はそのひび割れ幅が拡大する状態でブレースの軸引張変形が生じた。+5サイクル付近から引張ブレースに丸鋼が滑る音と微振動が発生し、最大荷重を示した-8サイクル以降では負加力時に水平分離面にずれが生じ始めた。写真 - 6 (a)に-3サイクル時の圧縮抵抗するブレースの基礎梁側の接合部を示す。最終サイクルでは写真 - 6 (b)に示すように水平分離面がずれる現象が顕著になった。写真 - 7に実験終了後にブレースを取り外し、新たに5φ磨き丸鋼棒(以後、丸鋼)を挿し替えたブレース基礎梁側端部を示す。正加

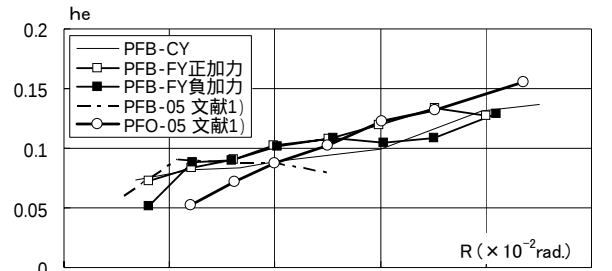
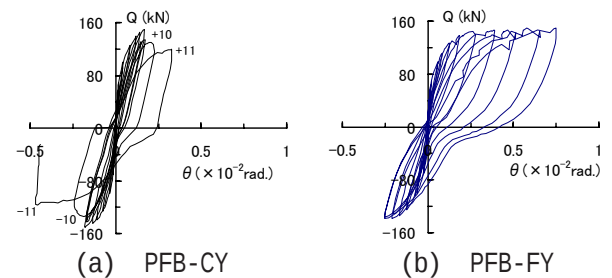


図 - 12 等価粘性減衰定数 - 層間変形角関係



(a) PFB-CY (b) PFB-FY
図 - 13 層せん断力 - 上階回転角関係

力時に引張抵抗していた側の右ブレースでは、丸鋼の軸とブレースの軸が平行ではない。これが原因で丸鋼に摩擦が生じ、ブレースが引張抵抗したと考えられる。

4. エネルギー吸収性能と変形状

4.1 等価粘性減衰定数

図 - 12に等価粘性減衰定数 - 層間変形角関係を示す。文献1)の2体の試験体も示している。全体曲げ降伏したPFB-FYでは正加力と負加力で分けて示している。PFB-CYで圧縮降伏したときの値を除くと、全体曲げ降伏したPFB-FYの正加力は1.8%rad.までは、無補強で柱の曲げ降伏により層降伏したPFO-05と同等以上である。これに対してPFB-CYで圧縮降伏した以降と、PFB-FYの負加力でブレースの接合部の水平分離面にずれが生じた+1.5%rad.以降ではPFO-05に対して約16%小さくなった。

4.2 上階の回転角

図 - 13に層せん断力 - 上階の回転角関係を示す。回転角は1階の左右の柱の軸変形の差から算出した。ブレースを圧縮降伏させたPFB-CYの回転角は、±9サイクルまでは約±0.2%rad.しか生じていないが、±10サイクルから増大している。これは圧縮側柱の軸変形が増大し、軸崩壊したことによる。

全体曲げ降伏したPFB-FYの正加力の最大回

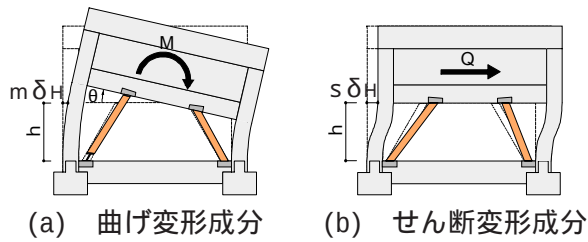


図 - 14 ピロティ階の変形成分

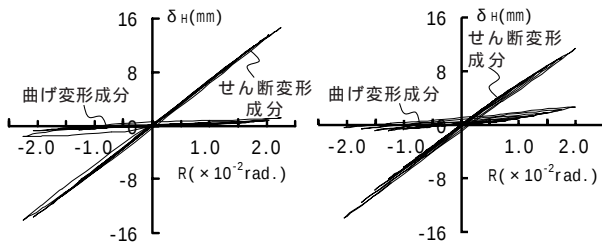


図 - 15 変形成分 - 層間変形角関係

転角は $+0.75\%$ rad.まで増大するが、負加力の場合は -0.25% rad.までしか増大していない。このことから負加力側では、ブレースの接面で滑りが生じていたことが確認できる。

4.3 曲げ変形成分とせん断変形成分

図 - 14に1階の曲げ変形成分とせん断変形成分を模式的に示す。柱の軸変形が柱全長 h において一様であるとする、前述の回転角 θ を用いて1階の層間水平成分は $0.5 \cdot \theta \cdot h$ となる。これを1階の曲げ変形成分とした。1階の層間変形から1階の曲げ変形成分を差し引いた成分を1階のせん断変形成分とした。図 - 15にこれらの変形成分と層間変形角の関係を示す。

また、これらの成分にそれぞれ1階の層のモーメントとせん断力を乗じて求められる吸収エネルギーの変化を図 - 16に示す。全体曲げ降伏したPFB-FYの正加力側の曲げ変形のエネルギーが、極めて大きくなっている。この曲げ変形エネルギーにより、ピロティ層で吸収できるエネルギーが倍増した。

5. まとめ

ブレースの圧縮耐力の制御法、ブレースを圧縮降伏させる架構試験体と、全体曲げ降伏させる架構試験体の実験概要と実験結果を述べた。以下にそれらの結果をまとめる。

- (1) ブレースに圧縮降伏させる制御部を設けることによりブレースの最大軸圧縮力を制御し、

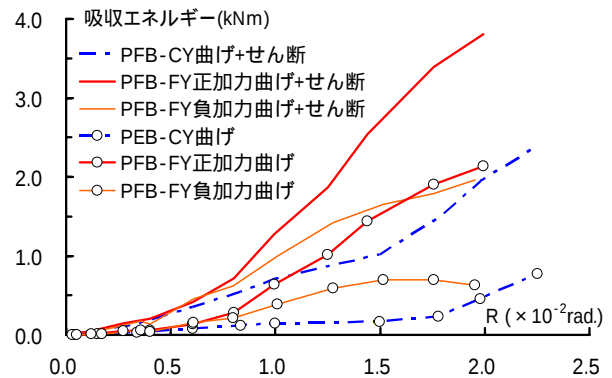


図 - 16 吸収エネルギー - 層間変形角関係

上梁、基礎梁との接合部の圧縮破壊を回避できた。 2.0% rad.まで耐力はほとんど低下しなかった。しかし、最終的には圧縮側柱が軸崩壊して限界変形に至った。

- (2) ブレースを圧縮降伏させて耐力を保持させるディテールは図 - 4で示したものが有効であった。
- (3) ブレースを設置して全体曲げ降伏させると、圧縮側の柱の軸崩壊を防ぎ、靱性とエネルギー吸収に富んだ破壊形式となる。
- (4) 全体曲げ降伏させると曲げ変形成分とせん断変形成分によるエネルギー吸収量が同等となり、ピロティ層で吸収できるエネルギーが倍増した。
- (5) ブレースに引張力を生じさせないように処理する方法については、従来の方法では施工誤差が生じやすく、今後改良が必要である。

参考文献

- 1) 幸加木宏亮，塩屋晋一ほか：5階建て既存RCピロティ架構の耐震補強を想定した部分架構の加力破壊実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.28,No.2,pp.1231-1236,2006.7
- 2) 塩屋晋一ほか：圧縮抵抗型ブレースを用いるRC造ピロティ架構の耐震補強，コンクリート工学年次論文集，Vol.25,No.2,pp.1561-1566,2003.7
- 3) 増田祐一郎，塩屋晋一ほか：圧縮抵抗型ブレースを用いるRC造ピロティ架構の耐震補強におけるブレースの座屈耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.27,No.2,pp.1111-1116,2005.6