

論文

[2097] プレキャスト連層耐震壁の有限要素法による弾塑性解析

正会員 ○ 仲地 唯治 (榊間 組 技術研究所)
 正会員 長 稔 (榊間 組 技術研究所)
 正会員 戸田 哲雄 (榊間 組 技術研究所)
 正会員 望月 重 (武蔵工業大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート造プレキャスト (以下PCaと略す) 工法のひとつとして、耐震壁のパネル部材のPCa化があり、省力化や施工性の向上に有効であると考えられる。著者らは、先に曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型のPCa連層耐震壁に関する実験的研究において、PCa壁パネルの鉛直接合部コッター筋を省略してスラブ位置に集中配筋した場合の耐力、変形性能等について検討し、同工法の可能性を示した。¹⁾²⁾

本研究では、上記PCa連層耐震壁について有限要素法による非線形解析を行い、鉛直接合部における配筋方法が耐力、変形状等に及ぼす影響について検討した。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

解析対象とした試験体はRC高層壁式ラーメン構造のPCa連層耐震壁試験体で、PCa壁パネルと現場打ち壁柱の鉛直接合部配筋方法をパラメーターとし、曲げ破壊先行型3体、せん断破壊先行型3体、計6体である。図-1に試験体形状、配筋を、表-1に試験体諸元を、表-2に材料試験結果を示す。

曲げ破壊先行型試験体は、14階建物最下層を想定した1/3スケールの3層1スパン試験体である。B1、B2は鉛直接合部補強筋比がほぼ等しく、B1はスラブ位置に水平つなぎ筋として集中配筋し、B2は鉛直接合部に分散配置した。B3はB1に対し水平つなぎ筋量が1/3の試験体でB2のコッター筋を省いた配筋となっている。

せん断破壊先行型試験体は、14階建物中上層部を想定した1/5~1/6スケールの試験体で3層1スパンである。

表-1 試験体諸元

		B1	B2	B3	S1	S2	S3
柱	bxd 主筋 フープ	420 x 160 8-D13, pg=1.5% 2-D6@50, (1F拘束筋有り)	420 x 160 8-D13, pg=1.5% 2-D6@50, (1F拘束筋有り)	420 x 160 8-D13, pg=1.5% 2-D6@50, (1F拘束筋有り)	100 x 260 8-D13, pg=3.9% 2-U5.1#50, (1F拘束筋有り)	100 x 260 8-D13, pg=3.9% 2-U5.1#50, (1F拘束筋有り)	100 x 260 8-D13, pg=3.9% 2-U5.1#50, (1F拘束筋有り)
PCa壁 パネル	l' x h x t 縦横筋 コッター	1200 x 850 x 10 D6@150 x 75, ps=0.43% 75x75x65x65x10, 6F/層	1200 x 850 x 10 D6@150 x 75, ps=0.43% 75x75x65x65x10, 6F/層	1200 x 850 x 10 D6@150 x 75, ps=0.43% 75x75x65x65x10, 6F/層	1320 x 450 x 60 D6 @100, ps=0.53% 40x70x30x60x10, 4F/層	1320 x 450 x 60 D6 @100, ps=0.53% 40x70x30x60x10, 4F/層	1320 x 450 x 60 D6 @100, ps=0.53% 40x70x30x60x10, 4F/層
水平接合筋		4-D13+2-D13+4-D13	4-D13+2-D13+4-D13	4-D13+2-D13+4-D13	4-D13+13-D6+4-D13	4-D13+13-D6+4-D13	4-D13+13-D6+4-D13
鉛直接合筋 (*pv)		6-D10 0.40%	2-D10+10-D6 0.44%	2-D10 0.13%	3-D10+2-D6 0.69%	D10+7-D6 0.74%	3-D10+7-D6 1.09%

* Pv = (鉛直接合部補強筋量 / (スラブ断面積 + PCa壁パネル断面積))

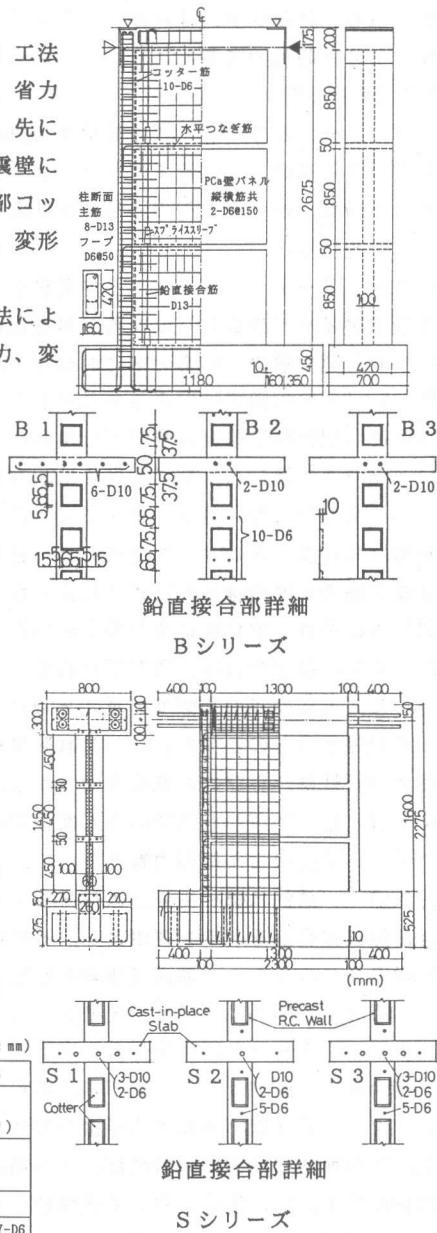


図-1 試験体形状および配筋

S 1、S 2 は鉛直接合部補強筋比がほぼ等しく、S 1 はスラブ位置に水平つなぎ筋として集中配筋し、S 2 は鉛直接合部に分散配置した。S 3 は S 1 におけるスラブ位置水平つなぎ筋と S 2 において鉛直接合部に分散配置した補強筋を合わせた配筋である。

加力は定軸力下 (B シリーズ 25 kgf/cm², S シリーズ 30 kgf/cm²) における正負交番の繰り返し水平加力を行なった。但し、B シリーズは片押し、S シリーズは 1/2 ずつの押し引き同時加力である。

2.2 解析モデル

B シリーズと S シリーズの試験体の要素分割図を図-2 及び図-3 に示す。コンクリート、鉄筋および鉛直、水平接合部の力学特性は以下のようにモデル化した。

1) コンクリート コンクリート要素としては 4 節点アイソパラメトリック膜要素を用いた。ひびわれ発生前の二軸応力下における非線形特性は Kupfer の実験式³⁾ によるものとした。圧縮および引張強度は材料試験結果を用いたが、P C a 壁パネル及びスラブについては、有効係数を曲げ破壊先行型の B シリーズでは 0.74¹⁾、せん断破壊先行型の S シリーズでは 0.45⁵⁾ とした。2 軸圧縮の破壊曲線は大沼式³⁾ によった。圧縮破壊後における軟化域は負勾配を直線とした (図-4)。ひびわれは分布ひびわれモデルを用い、最大主応力が引張強度を越えた時にひびわれが発生するものとした。ひびわれ発生後の残留応力特性は、ひびわれ直交方向では応力を同時解放とし、ひびわれ面でのせん断伝達についてはバイリニア型のせん断応力特性とした。

2) 鉄筋 鉄筋は壁柱主筋および B シリーズ水平接合部鉛直接合筋をトラス要素とし、その他の鉄筋は単軸剛性のみをもつ 4 節点膜要素としてモデル化した。応力-歪関係はバイリニア型とした (図-5)。鉄筋とコンクリートは完全付着とする。

3) 接合部 壁柱と P C a 壁パネルの鉛直接合部、スラブと P C a 壁パネルの水平接合部は、単軸剛性とせん断剛性をもつ 4 節点接合膜要素を用いた。接合面すべり方向の特性は、せん断剛性を 20000 kgf/cm² とし、最大せん断応力を越えた後の残留応力 τ_{rs} は、実験において接合部のすべりの測定位置で同時に測定した目開きがすべりの増大と共に増加したことを考慮して、接合部のせん断破壊後はせん断応力をほとんど伝達しないものと仮定し、 $\tau_{rs} \cong 0$ とした⁶⁾。軸破壊とせん断破壊は独立させ、軸破壊強度は P C a 壁パネル

表-2 (a) コンクリート材料試験結果

部 位	圧縮強度 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (10 ⁶ kgf/cm ²)
B 1	Pca壁 ¹⁾ 299 柱,スラブ 198	26.0 18.3	2.56 2.36
B 2	Pca壁 ¹⁾ 297 柱,スラブ 301	23.7 27.3	2.41 2.49
B 3	Pca壁 ¹⁾ 285 柱,スラブ 233	25.1 22.7	2.46 2.24
S 1	Pca壁 ¹⁾ 289 柱,スラブ 269	19.5 21.7	2.52 2.19
S 2	Pca壁 ¹⁾ 288 柱,スラブ 280	19.6 19.6	2.53 2.20
S 3	Pca壁 ¹⁾ 265 柱,スラブ 254	21.0 22.0	2.59 2.35

(b) 鉄筋材料試験結果

鉄 筋	降伏強度 (kgf/cm ²)	引張強度 (kgf/cm ²)	ヤング係数 (10 ⁶ kgf/cm ²)	伸び率 (%)
B 1	D6 4300	5630	1.90	20
B 2	D10 3910	5500	1.93	25
B 3	D13 4030	5800	1.97	24
	D16 3950	5070	1.76	24
S 1	U5.1 14200	15100	2.13	9
S 2	D6 3670	5760	1.74	22
S 3	D10 3590	4950	1.80	18
	D13 4030	5890	1.86	20
	D16 3420	5850	1.55	20

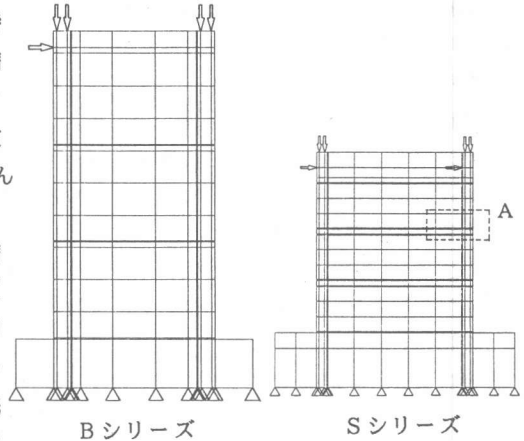


図-2 試験体要素分割図

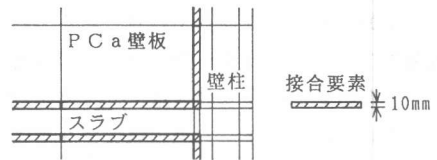


図-3 試験体要素分割図

(接合部詳細、図-2 中 A 部分)

コンクリートの材料試験結果の値とした。せん断破壊強度は、特に水平接合部において、水平力による曲げモーメントおよび軸力によって接合面直交方向応力が増大することを考慮し、接合面の直交方向応力に比例するものとした(図-6)。図-6中において、 σ_t はコンクリートの引張強度を、 τ_0 はコンクリートの短期許容せん断応力度を10 kgf/cm²と仮定し、直線勾配を与えた。

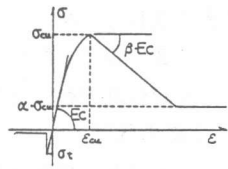


図-4 コンクリートの
応力-ひずみ関係

2.3 解析方法

加力は単調載荷とし変位増分法を用いた。

3. 解析結果

3.1 諸荷重

初期剛性、曲げひびわれ強度、せん断ひびわれ強度および最大耐力の実験値、解析値一覧を表-3に示す。初期剛性はB3とS2において解析値が実験値をかなり上まわっているがその他はほぼ一致している。ひびわれ強度はいずれも、解析値のほうがかなり小さな値となった。最大耐力はいずれも両者でほぼ一致している。

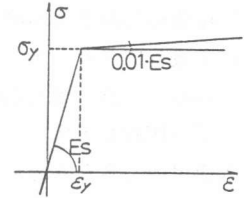


図-5 鉄筋の応力-ひずみ関係

3.2 荷重-変形関係

荷重-変形関係を図-7(a)、(b)に示す。解析結果は実験結果とほぼ一致している。但し、曲げ破壊先行型で水平つなぎ筋量がB1に比べて少ないB3においては、実験における最大耐力以降の耐力低下が、解析で

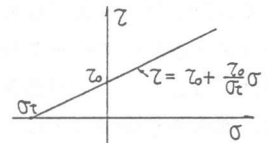
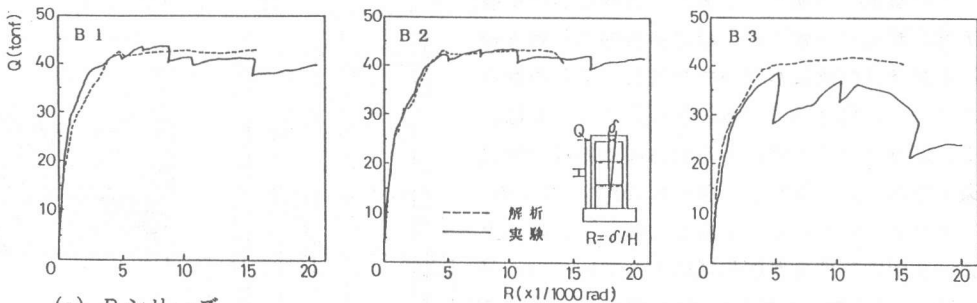


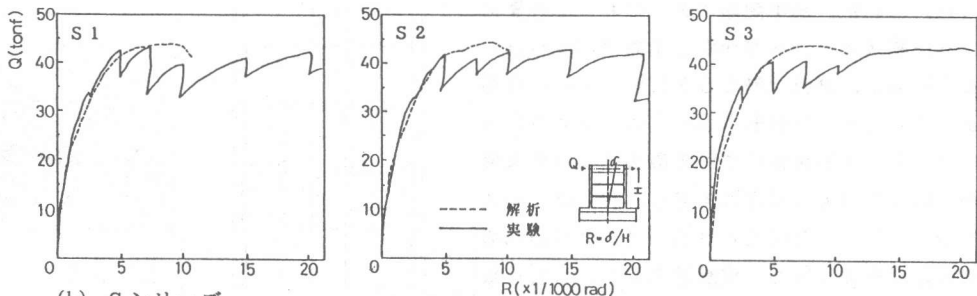
図-6
接合要素の
せん断破壊条件

表-3 諸強度一覧

	B 1		B 2		B 3		S 1		S 2		S 3	
	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析
初期剛性 (t f/mm)	17.6	16.4	14.6	16.5	10.8	17.2	18.3	18.3	14.0	18.3	18.9	18.8
曲げひびわれ強度 (t f)	22.1	11.8	25.0	12.0	16.0	11.3	15.0	11.0	17.8	11.1	18.0	11.4
せん断ひびわれ強度 (t f)	27.5	17.2	29.1	15.1	29.6	18.5	21.5	13.2	14.3	13.2	21.8	13.5
最大耐力 (t f)	42.0	42.9	43.6	43.4	38.8	42.1	43.5	44.0	42.8	44.7	44.8	43.9



(a) Bシリーズ



(b) Sシリーズ

図-7 荷重-変形関係

は顕著に表れていない。せん断破壊先行型 S 1、S 2、S 3 は解析においては部材角 $10/1000\text{rad}$ 付近で耐力低下を示した。

3.3 主応力状態

B 1 および S 1 の部材角 $5/1000\text{rad}$ におけるコンクリートの主応力図を図-8 (a)、(b) に示す。曲げ破壊先行型の B 1 は加力点と圧縮側柱脚部を結ぶ線上付近に応力が集中して流れており、アーチ作用の卓越を示している。一方、せん断破壊先行型の S 1 は B 1 に比較して応力が分散しており、トラス作用の割合が大きいと思われる。

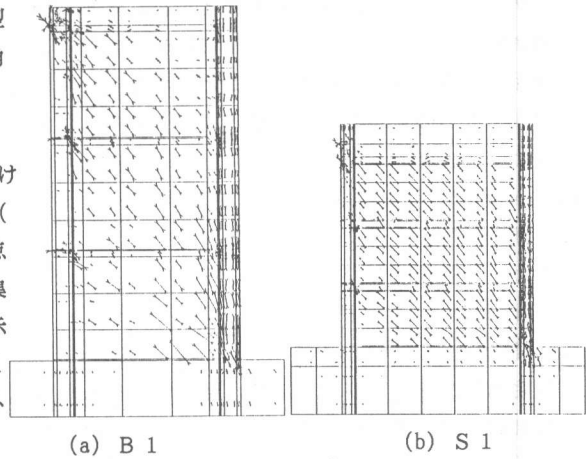


図-8 主応力図

3.4 破壊状況

B 1、S 1 および S 2 の部材角 $5/1000\text{rad}$ におけるコンクリートのひびわれ状況を実験の最終破壊状況と合わせて図-9 (a)~(c) に示す。図中・印は、コンクリートが軟化域に入ったことを示す。曲げ破壊先行型の B 1 は、圧縮側柱脚付近の P C a 壁パネルおよび 2 階、3 階スラブ右端が軟化域に入っており実験の最終破壊状況における破壊部分と対応している。ひびわれの分布およびその方向はおおむね実験と一致している。せん断破壊先行型の S 1、S 2 は、B 1 に比較して、軟化域に入っている部分が拡がっており、実験における破壊状況の傾向と一致する。鉛直接合部における接合筋をスラブ位置に水平つなぎ筋として集中配筋した S 1 と、接合部に分散配筋した S 2 とでは、S 1 のほうが P C a 壁パネル隅角部における軟化が顕著である。すなわち、図-9 (b) 中、S 1 の P C a 壁パネルにおいて、1 階左上部分、2 階左上部分、3 階右下部分が軟化域に入っているのに対し、図-9 (c) の S 2 においては、軟化域に入っていない。これは、集中配筋の S 1 において各層における圧縮ストラットがかなり明確に形成されているのに対し、分散配筋の S 2 においては接合筋によって応力がより分散されるものと考えられる。P C a パネルの隅角部における破壊は実験の最終破壊状況においても示されており、解析はこの傾向を表わしていると考えられる。またひびわれの分布およびその方向も、実験結果とおおむね一致している。

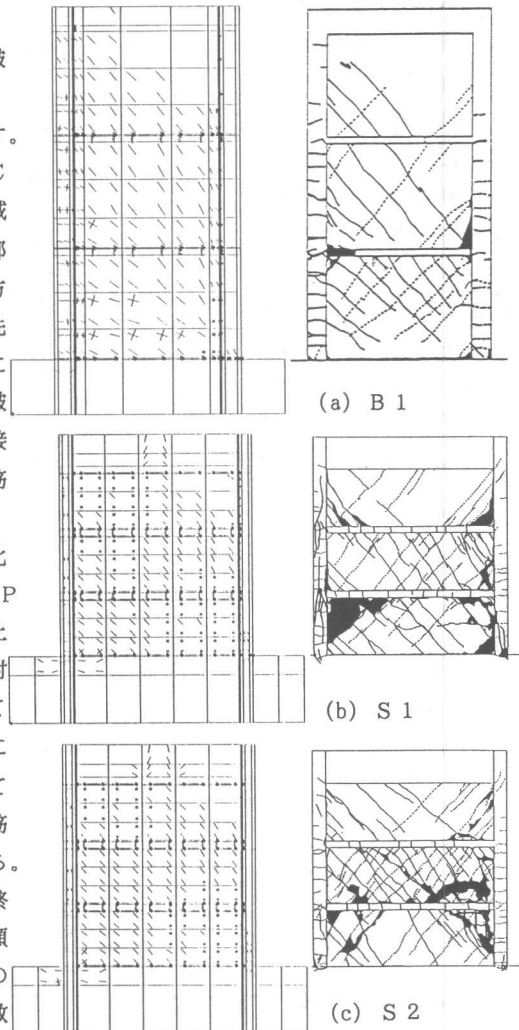
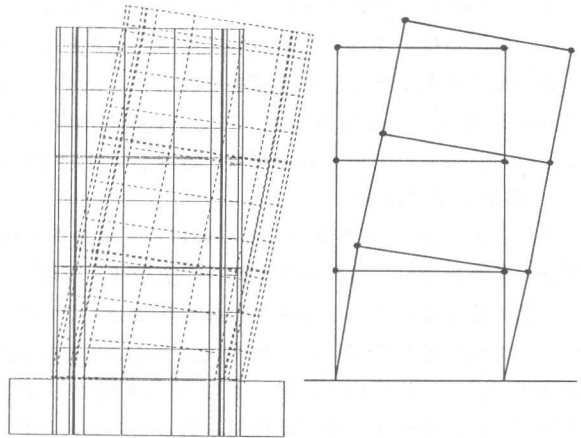


図-9 ひびわれ状況

3.5 変形状

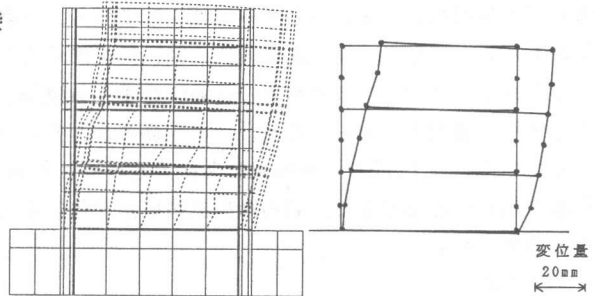
B 1 および S 1 の部材角 $10/1000\text{rad}$ における変形を図 10 (a)、(b)に実験結果とあわせて示す。実験結果は、図中・印における各変位量をもとに描いた変形図である。曲げ破壊先行型の B 1 は、曲げ変形モードが、せん断破壊先行型の S 1 はせん断変形モードがそれぞれ卓越しており、実験結果とよく対応している。なお、全体変形としては、B 2、B 3 は B 1 と、S 2、S 3 は S 1 とほぼ同様の変形状を示した。



(a) B 1

3.6 鉛直接合部におけるすべり性状

図-10 (b)の S 1 における 2 階鉛直接合部付近の拡大図を図-11 に示す。図中、P C a 壁パネルと壁柱の鉛直接合部におけるすべりが認められる。鉛直接合部のすべり量 S と部材角 R の関係を図-12 (a)~(c)に示す。図-12 (a)は S 2 の 2 階鉛直接合部押し側と引き側のそれぞれについて、実験結果とあわせて示したものである。解析結果はおおむね実験



(b) S 1

図-10 変形図

結果と一致しており、引き側接合部のすべり量は押し側を上まわっている。この傾向は他のいずれの試験体においても認められた。図-12 (b)は引き側接合部のすべり量を S 1 と S 2 で比較したものである。解析と実験はほぼ一致しており、S 1 と S 2 のすべり量は同じ程度である。すなわち、鉛直接合部接合筋を集中配筋としても、その配筋量が十分であれば、ある部材角までは分散配筋の場合と同程度のすべり量とすることができると考えられる。なお、実験結果によると $15/1000\text{rad}$ 付近から S 1 の方が上まわり、その差は部材角の増大と共にひろがった。図-12 (c)は曲げ破壊先行型の B 1 と B 2 について鉛直接合部のすべり量を比較したものである。実験結果によると B シリーズについては 2 階に比べて 1 階の鉛直接

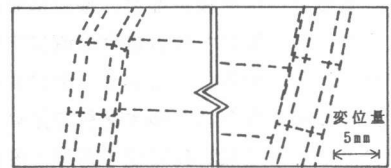
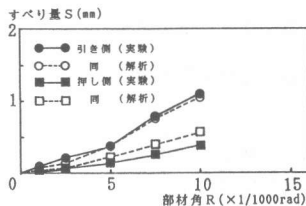
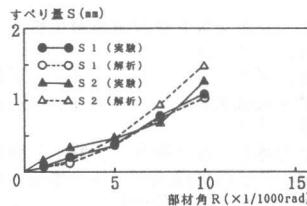


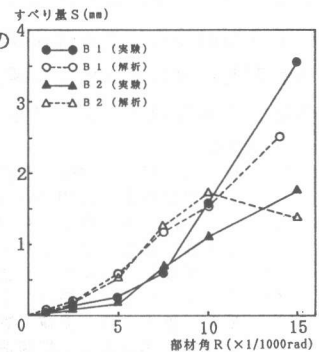
図-11 変形図 (鉛直接合部詳細)



(a) S 2



(b) S 1 および S 2



(c) B 1 および B 2

図-12 鉛直接合部のすべり

合部の方がすべり量は大きく、ここでは1階鉛直接合部での値を比較した。解析値は各部材角において実験値を上まわっているが、接合筋が集中配筋であるB1と分散配筋であるB2のすべり量が7.5~10/100radに至るまではほぼ同程度で、それ以降はB1の方が上まわっているという点においては、その傾向が実験と一致している。

3.7 鉄筋のひずみ変化

図-13(a)にS1およびS2における2階スラブ位置の水平つなぎ筋の鉛直接合部におけるひずみ変化を示す。解析値は全般に実験値より低い値となっているが水平つなぎ筋量の少ないS2が5/1000rad付近で降伏しているのに対し集中配筋のS1では降伏しておらず、実験と傾向が一致している。図-13(b)に2階PCa壁パネルの横筋のひずみ変化を示す。ひずみは左右および中央の平均値である。解析では5/1000rad付近までS1とS2の値が同程度で、それ以降はS2のひずみが増加し、S1のひずみは減少しており、実験結果と同様の傾向を示した。水平つなぎ筋の降伏以降、鉛直接合部の配筋を分散配筋としたS2ではPCa壁パネル横筋のひずみも増加しており、横筋の応力負担増加が認められるが、集中配筋のS1では逆にひずみが減少している。S1が5/1000rad以降も耐力を維持しており、先に述べた破壊状況も考慮すると、せん断抵抗機構が変化しているのではないかと考えられる。

4. まとめ

有限要素法によるPCa連層耐震壁の非線形解析を行い、以下のことが明らかになった。

- 1) 鉛直および水平接合部を、接合部せん断破壊後の残留応力、およびせん断破壊強度における接合面直交方向応力の影響を考慮して接合要素でモデル化することにより、そのすべり性状を表わすことができる。
- 2) 上記接合要素をはじめ本解析で用いたモデルにより、曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型の荷重-変形関係が実験結果とよい対応を示した。
- 3) 鉛直接合部におけるコッター筋を省略してそれと同量の水平つなぎ筋をスラブ位置に集中配筋した場合、同等の耐力を有する。
- 4) せん断破壊先行型のせん断抵抗機構においては、コッター筋による分散配筋に対してスラブ位置集中配筋の方が、PCa壁パネルによる各層対角線方向圧縮ストラットの作用がより大きくなると考えられる。

参考文献

- 1) 長 稔、戸田 哲雄、望月 重：プレキャスト連層耐震壁の構造性能、コンクリート工学年次論文報告集、1989, Vol. 11, No. 1, pp. 561~566
- 2) 長 稔、仲地 唯治、戸田 哲雄、望月 重：プレキャスト連層耐震壁のせん断挙動に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、1990, Vol. 12, 投稿中
- 3) 土木学会編：新体系土木工学 29、1981
- 4) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の終局強度型耐震設計指針(案)・同解説、1988
- 5) 松戸 正士、張 愛暉、野口 博：RC高層壁式ラーメン構造の壁柱の非線形解析(その1) 日本建築学会大会学術講演梗概集、1989, pp. 847~848
- 6) 望月 重、石川 康之：プレキャスト連層耐震壁の抵抗破壊機構に関する研究(その2 有限要素法による弾塑性解析)、日本建築学会大会学術講演梗概集、1986, pp. 325~326

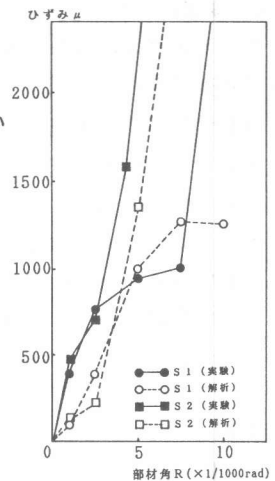


図-13(a)
水平つなぎ筋のひずみ

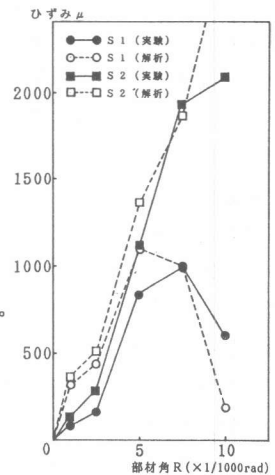


図-13(b)
PCa壁横筋のひずみ