

論文 プレキャスト単独耐震壁のブレース置換による解析

星 聡美*¹・望月 重*²

要旨：プレキャスト単独耐震壁を接合部の挙動も考慮したブレース置換法により解析を行った。接合部のせん断摩擦抵抗は、荷重ステップ毎に変動する接合面に作用する垂直圧縮応力を考慮して、接合部を接合面に対して平行な接線バネと垂直な法線バネで表現した。特に接合部の滑り性状と解析モデルにおける接合部バネ要素の復元力特性との関係を明確にする為に、側柱の無い壁パネルのみの場合の実験値と比較して、バネ要素の滑り変位量の仮定値を検証した上で、架構付きプレキャスト単独耐震壁について解析を行い、本解析法の妥当性を示した。

キーワード：プレキャスト耐震壁，ブレース置換法，接合部，バネ剛性，滑り変位

1. はじめに

従来、プレキャスト（以下、P C a）耐震壁の場合、接合部の挙動を考慮した弾塑性解析は、殆どが有限要素法で行われており、接合部の挙動が実験結果と一致しているものは比較的少ない。

そこで本研究では、有限要素法に比べて、モデルの簡略化、解析に要する時間の短縮化を図り、接合部をバネ要素で置換し、摩擦抵抗を各荷重段階毎に評価したブレース置換法によるP C a単独耐震壁の弾塑性解析を行った。その結果、P C a耐震壁の全体挙動の把握には、実験結果との比較からブレース置換解析が十分役立つものであることが判った。

2. 解析方法

本研究で用いる解析は、剛性マトリックス法による弾塑性解析である。最大荷重までは荷重増分法で、最大荷重以後の解析も可能にするため変位増分法も併用した。荷重増分から変位増分への切り換えは、解析対象のコンクリート圧縮ブレースの歪みがコンクリート圧縮強度時の歪みを越えた時点とした。解析対象とする試験体は、ブレース置換の適用性を考慮して、P C a単独耐震壁とし、ひび割れ発生以降の壁パネルは、線材に置換したモデルとした。

2. 1 解析モデル

ひび割れ発生後のP C a耐震壁の解析モデル例を図-1に示す。壁パネルのせん断ひび割れは、水平軸に対して約45度（特殊な試験体を除いて）方向に発生すると仮定し、ひび割れ発生後の壁パネルを約45度方向のコンクリート圧縮ブレースと、水平・垂直方向の鉄筋引張ブレースに置換する。コンクリートブレースは、壁の幅高さ比が1に近い場合、対角ブレースに圧縮応力が集中することを防ぐために、対角には結ばずに柱幅の1/2の距

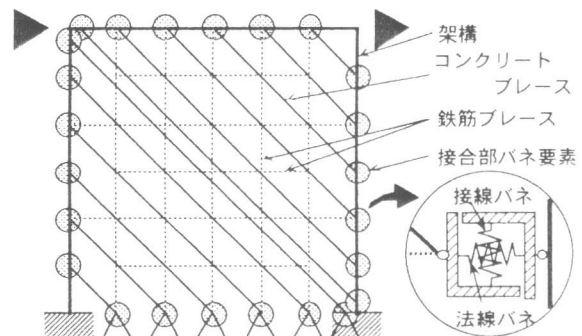


図-1 P C a耐震壁の解析モデル例

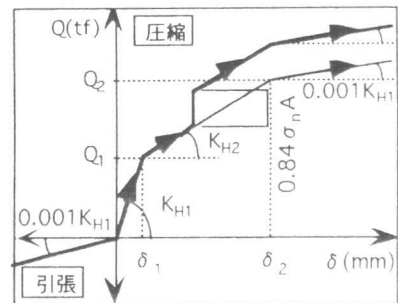
* 1 武蔵工業大学大学院 工学研究科建築学専攻（正会員）

* 2 武蔵工業大学教授 工学部建築学科、工博（正会員）

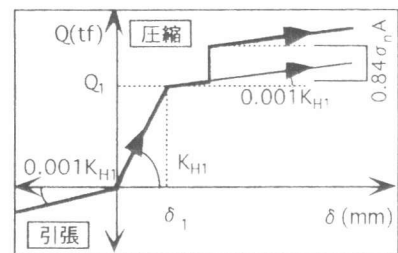
離分ずらして配置する。鉄筋ブレースは、壁筋が架構に達していない場合、若しくは接合部に接合筋が無い場合は、架構に最も近い直交する鉄筋ブレースに接続する。架構は曲げ、せん断、軸変形を考慮した線材に置換する。架構の復元力特性については、曲げモーメントはtri-linear型、せん断力は終局せん断強度後、初期剛性に低下率(-0.03)を乗じた負勾配とするbi-linear型、そして軸力は終局強度まで弾性とする。コンクリートブレースの応力-歪み関係は、コンクリート圧縮強度として一軸圧縮強度を低減した値を用いた白石等の提案した曲線[1]に基づき、鉄筋ブレースの応力-歪み関係はbi-linear型とする。壁パネルと架構との接合部は、節点での相対変位（滑り量及び目開き量）で表されると仮定し、接合部の挙動を接合面に対して平行な接線バネと、垂直な法線バネで表現する。

2.2 接合部バネモデル

接線バネは、コッターのせん断抵抗、接合筋の曲げせん断によるダウエル効果、接合筋の引張によるせん断摩擦効果、垂直圧縮応力によるせん断摩擦効果を考慮し、その復元力特性については、せん断力(Q)は筆者等の一人が既に提案しているせん断強度算定式[2]より定め、滑り量(δ)は文献[3]を参考にして定めた。この強度式では、接合面に生じる垂直圧縮応力(σ_n)による強度の上昇分を $0.84\sigma_n A$ (A:接合部節点負担面積)としており、本モデルにおいては接合面に圧縮応力(σ_n)が生じると、荷重ステップ毎にその時点でのせん断力を $0.84\sigma_n A$ だけ増加させ、初期に仮定した折れ線を、その増加分だけ平行移動させた折れ線を新たに辿るものとする。接合面に引張応力が作用した場合は、剛性をほぼ0となるように仮定する。図-2(a)に接合筋有り接線バネのQ- δ 関係を、図-2(b)に接合筋無し接線バネのQ- δ 関係を示す。表-1に接合方法の違いによるバネ要素の特性値を示す。表-1中のコッターの無い(2)、(4)の場合の第1項 $Q_1=0.01A \cdot f_c$ は敷モルタルのせん断摩擦効果又は、コンクリートの粘着力を考慮して仮定した。法線バネは、コンクリート圧縮ブレースの接合面に対する垂直方向力のみ抵抗するものとし、その復元力特性は図-3のようなbi-linear型に仮定する。



(a) 接合筋が有る場合



(b) 接合筋が無い場合

図-2 接線バネの復元力特性

注 図中の"圧縮(引張)"は、接合面の垂直応力が圧縮(引張)である場合を示す。

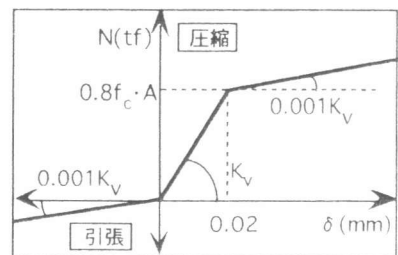


図-3 法線バネの復元力特性

表-1 接線バネ及び法線バネの特性値

	接合方法		接線バネの特性				法線バネの特性	
	コッター	接合筋	Q_1 (tf)	δ_1 (mm)	Q_2 (tf)	δ_2 (mm)	N(tf)	δ (mm)
(1)	○	○	$0.09A_c \cdot f_c$	0.05	$0.09A_c \cdot f_c + 1.28a_s \sqrt{f_c} \cdot \sigma_y + 0.54a_s \cdot \sigma_y$	2.0	$0.8f_c \cdot A$	0.02
(2)	×	○	$0.01A \cdot f_c$	0.05	$0.01A \cdot f_c + 1.28a_s \sqrt{f_c} \cdot \sigma_y + 0.54a_s \cdot \sigma_y$	2.5	$0.8f_c \cdot A$	0.02
(3)	○	×	$0.09A_c \cdot f_c$	0.05	—	—	$0.8f_c \cdot A$	0.02
(4)	×	×	$0.01A \cdot f_c$	0.05	—	—	$0.8f_c \cdot A$	0.02

○: 有り A_c : コッターの断面積、 f_c : コンクリート圧縮強度、 a_s : 接合筋断面積
 ×: 無し σ_y : 接合筋降伏強度、 σ_n : 垂直方向圧縮応力度、A: 接合面断面積

3. 接合部バネ復元力特性の検証

接合部のモデル化の妥当性を明確にするために、接合部の復元力特性が直接的に示されるといふ点で、側柱のない壁パネルのみの試験体について検証してみた。

解析対象とした試験体の諸元一覧を表-2に示す。試験体は、水平接合部の鉛直方向接合筋(以下、接合筋)比が実験パラメーターであるP C a壁パネル実験[4]3体(WH1,WH2,WH3)である。3体共に壁厚12.5cmの壁パネルで、水平接合部の接合筋比はそれぞれ0.64%、1.00%、1.31%である。壁パネルの形状及び配筋量、加力梁及び基礎梁の形状及び配筋は共通である。

各試験体の荷重-部材角関係を図-4に示すが、3体共に解析は初期剛性が若干高く示されたが、それ以後の非線形挙動は実験結果と解析結果で良く一致している。実験では接合筋量が多くなるに従って、最大耐力に向かって曲線の勾配が高くなっているが、解析でもその性状が示されている。最大耐力については実験ではWH1が82.1tf、WH2が93.0tf、WH3が100.3tfであるのに対し、解析では順に78.7tf、90.0tf、97.2tfで、その比(実験値/解析値)はそれぞれ1.04、1.03、1.03となり、良く対応している。

各試験体の水平接合部の滑り量変化を図-5に示す。実験結果と解析結果は概ね一致し、実験、解析結果ともに、3体を比べると部材角 10×10^{-3} rad以降の滑り量は殆ど変わらないが、それ以前の初期段階では接合筋量が多くなるに従って滑り量は少なくなることが示されている。

以上の検証結果から、側柱の影響の無いP C a壁パネルに対して、仮定した接合部バネ復元力特性のせん断耐力及び滑り量の仮定値は妥当であると判断した。

4. 架構付きP C a耐震壁の解析

3章に於いて、側柱のない壁パネルについて接合部バネ復元力特性を検証したので、本章では架構付き耐震壁について検討を行う。解析は、本研究室で行ったP C a壁パネルのひび割れ角度を変化させた特殊な試験体の場合と、より一般的な試験体の2種について試行する。共に接合部バネ復元力特性及びブレース置換解析法の検討であるが、前者の場合は、ひび割れ角度がP C a耐震壁の挙動へ及ぼす影響も検討した。

4. 1 ひび割れ角度の異なる架構付きP C a耐震壁の検討

表-2 検証試験体の諸元一覧

試験体名	WH1	WH2	WH3		
壁 パネル	壁厚,寸法 t=125mm,1750×1175mm ²				
	壁筋 縦横共 D6@53ダブル				
水平接合部接合筋 接合筋比	7-D16 0.64%	11-D16 1.00%	15-D16 1.37%		
軸力	27kgf/cm ²				
コンクリート	壁パネル	敷モルタル			
Fc(kgf/cm ²)	350	640			
Ec(×10 ⁶ kgf/cm ²)	2.45	—			
鉄筋	D6	D13	D16	D19	D25
σc(kgf/cm ²)	3600	3300	3600	3700	3900
Es(×10 ⁶ kgf/cm ²)	1.65	1.92	1.92	1.81	1.89

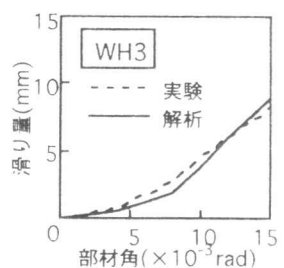
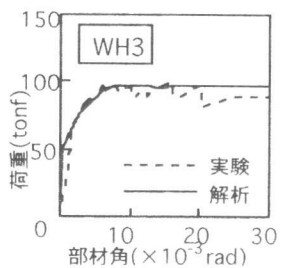
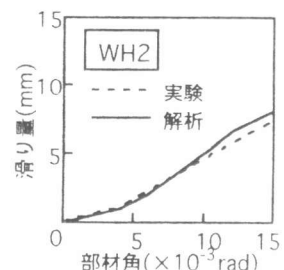
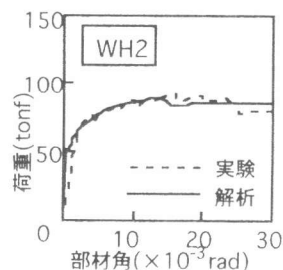
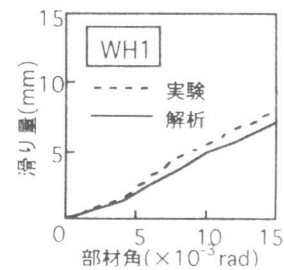
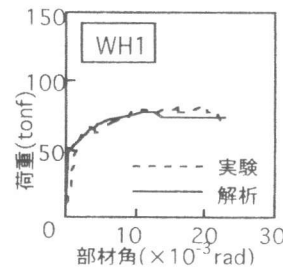


図-4 荷重-部材角関係

図-5 水平接合部の滑り量変化

試験体の諸元一覧を表-3に示す。試験体は、P C a壁パネルのせん断ひび割れ角度を実験パラメーターとした、P C a単独耐震壁3体[5]であり、ひび割れ角度を26.6度(試験体C30)、45.0度(C45)、63.4度(C60)と変化させている。各試験体とも鉛直接合部にコッター及びコッター筋、水平接合部に接合筋を有し、柱、梁、壁パネルの形状及び補強筋量は共通とする。壁パネルのせん断ひび割れを人為的に発生させる為に、ひび割れ位置を設定したコンクリート界面に、予めグリートを塗布したブリキ板を挿入している。

図-6に各試験体の最終ひび割れ状況と、解析モデルの最大荷重時近傍に於ける要素破壊状況及びコンクリートブレース圧縮応力分布を示す。

C30は引張側柱上部から圧縮側柱下部にかけて亀裂が集中し、柱がせん断破壊しているのに対し、C45は壁パネル対角部の破壊及び圧縮柱脚部のせん断破壊が顕著で、C60は加力梁のせん断破壊、壁パネル上部の圧壊が特徴的であり、ひび割れ角度による相違が明確に表れている。解析結果も架構のせん断破壊、壁パネルのコンクリートブレースが最大圧縮応力(0.8 f_c と仮定、 f_c :コンクリート圧縮強度)に達した箇所が、実験結果とほぼ同様の傾向を示している。

なお、実験のひび割れ発生状況からは、挿入したブリキ板による人為的なひび割れ線以外には顕著なひび割れは観察されなかった。

各試験体の荷重-部材角関係を図-7に示す。最大荷重の実験値と解析値の比はC30、C45、C60でそれぞれ0.96、0.98、1.08で10%以内に納まっており、良く対応している。最大荷重及び最大荷重前の剛性は実験、解析共にC45が最も高く、ついでC60、C30となる。C45は実験、解析共に最大荷重後急激な耐力低下を示しているが、解析に於けるコンクリートブレースの圧縮応力分布状況より、C30、C60は全域に渡り応力が分散しているため、 $R=15 \times 10^{-3}$ rad付近まで壁パネルに顕著な剥離やせん断破壊が観察されなかったのに対し、C45は壁パネル中央部に応力が集中しているため、 $R=10 \times$

表-3 試験体の諸元一覧

試験体名	C30	C45	C60
ひび割れ角度	26.6°	45.0°	63.4°
壁厚,寸法	t=30mm,510×555mm ²		
壁筋	縦横共 4.1mm鉄線 @55 (0.8%)		
水平接合部	コッター断面		
接合筋(比)	3-D6 (0.63%)		
鉛直接合部	コッター断面		
接合筋(比)	55×30×5コ		
軸力	4.1mm鉄筋 @55 (0.8%)		
	24.7kgf/cm ²		
コンクリート	壁板,加力梁	柱,基礎梁	敷モルタル
Fc (kgf/cm ²)	263	248	240
Ec (×10 ⁵ kgf/cm ²)	1.69	1.65	1.66
鉄筋	4.1mm鉄線	D6	D10
σ_c (kgf/cm ²)	1971	4511	3600

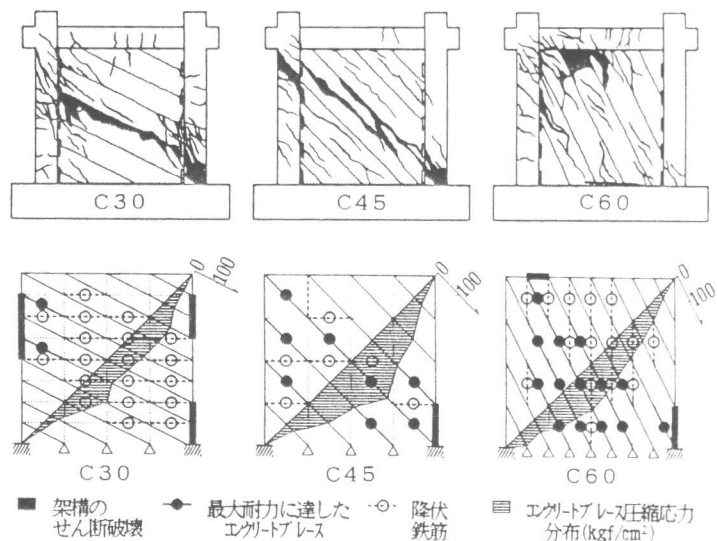


図-6 破壊状況(上:実験、下:解析モデル)

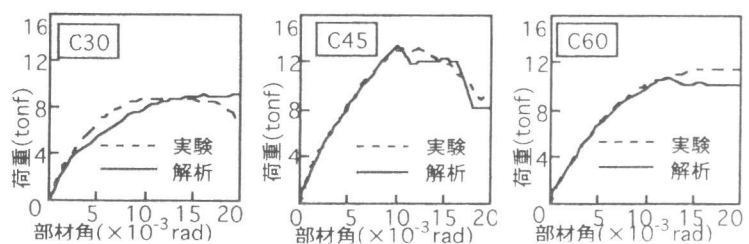


図-7 荷重-部材角関係

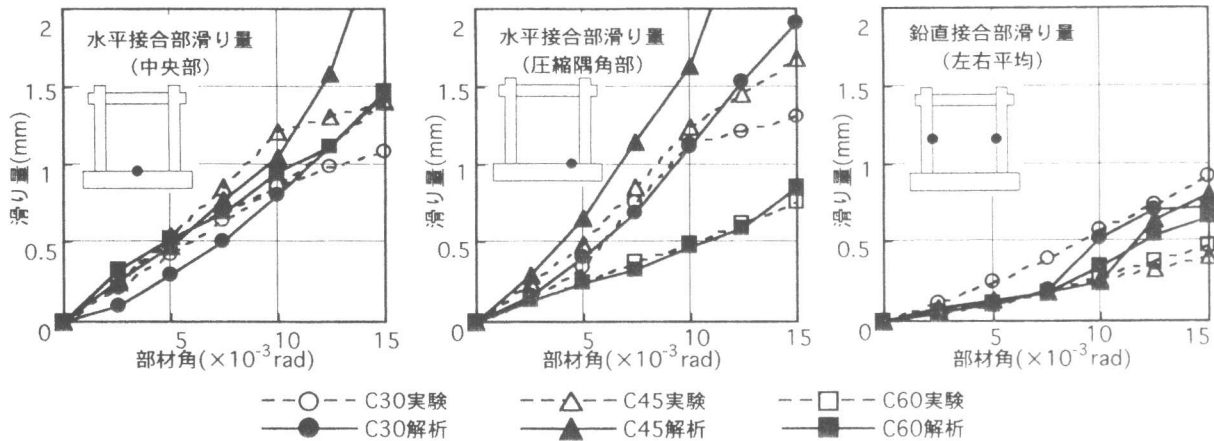


図-8 接合部の滑り量変化

10^{-3} rad付近で壁パネルが圧壊し、対角ストラットの抵抗が無くなったと判断できる。C30の解析では、 $R=4.0 \times 10^{-3}$ radで圧縮柱脚部がせん断破壊し、剛性が低く出ている。

図-8に各試験体の水平接合部及び鉛直接合部に於けるP C a壁パネルの滑り変位一部材角関係を示す。計測は水平接合部壁パネル脚部中央及び壁パネル圧縮隅角部、鉛直接合部引張側中央と圧縮側中央2箇所の平均である。水平接合部中央、圧縮隅角部の滑りは3体共、 $R=10 \times 10^{-3}$ radまでは実験とほぼ一致している。鉛直接合部の滑りは、C30の解析値が $R=8.0 \times 10^{-3}$ rad付近まで実験値を下回っている。これは、実験では圧縮側柱のせん断破壊により柱中央でずれ変形が起こり、接合部の滑りも増加したのに対し、解析では柱のせん断破壊は示されているが、柱の線材要素間には滑りは考慮していないためであると考えられる。いずれの箇所の滑りも、解析は $R=10 \times 10^{-3}$ rad以後、即ち最大荷重以後に、滑り量が増大する傾向がある。ひび割れ角度の違いにより、接合部での滑りは概して加力点より形成される圧縮ストラットが架構に交差する位置で大きくなることが実験と解析より示された。

表-4 試験体の諸元一覧

試験体名		No.4	No.5	
壁	壁厚,寸法	t=60mm,1320×1500mm ²		
パネル	壁筋(比)	縦横共 D6 @100 (0.53%)		
水平	コッター断面	—		
接合部	接合筋(比)	13-D6 @100 (0.53%)		
鉛直	コッター断面	70×40×12コ		
接合部	接合筋(比)	15-D6 (0.53%)	6-D10 (0.47%)	
軸力		30kgf/cm ²		
コンクリート		No. 4	No. 5	
	P C a壁 柱・梁		P C a壁 柱・梁	
	Fc (kgf/cm ²)	342	306	349
	Ec (×10 ⁶ kgf/cm ²)	2.62	2.09	2.63
	鉄筋	U5.1	D6	D10
	σc (kgf/cm ²)	14200	3590	3970
	Es (×10 ⁶ kgf/cm ²)	2.13	1.79	1.98

4. 2 一般的な架構付きP C a耐震壁の検討
解析対象とした試験体の諸元を表-4に示す。試験体はP C a単独耐震壁2体[6]で、No.4は鉛直接合部コッター筋が分散配筋、No.5は3箇所集中配筋である。

図-9に荷重一部材角関係を示す。コッター筋分散配筋のNo.4は、実験で最大荷重以後P C a壁パネル圧縮コーナー域の圧壊の影響により、部材角 $R=7.5 \times 10^{-3}$ rad付近で急激な耐力低下が起こったが、解析でも壁パネル圧縮ストラットが最大耐力に達し耐力低下が示されている。それに対し、コッター筋集中配筋のNo.5は、No.4に比べて靱性のある挙動を示して、実験とほぼ一致する事が出来た。

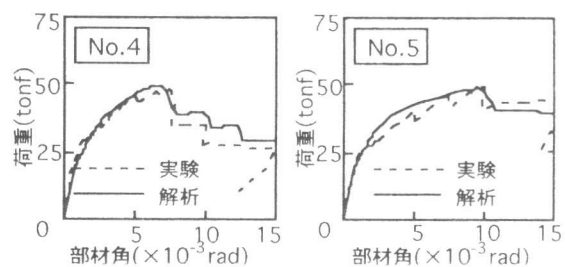


図-9 荷重一部材角関係

図-10(a)に水平接合部の滑り量変化、図-10(b)に鉛直接合部の滑り量、図-10(c)に鉛直接合部の目開き量変化を示す。No.4については、最大荷重時 $R=7.5 \times 10^{-3}$ rad付近までは水平・鉛直接合部の滑り及び目開き共に極めて良く一致している。No.5については、部材角 $R=4.0 \times 10^{-3}$ rad付近までは解析は実験に概ね一致している。それ以降では実験で壁パネルの圧縮ストラットに働く圧縮力により柱脚が押し出され、柱が壁パネルの水平変形を拘束できなくなり水平接合部の滑り及び鉛直接合部の目開きが増大したのに対し、解析では、柱脚の移動を抑えるモデルであるために実験と解析との差が表れている。

以上より、本解析モデル及び解析方法は一般的な架構付きのP C a単独耐震壁の全体挙動の追跡に、概ね適応できることが示された。

5. 結論

本研究では、接合部の挙動も考慮したブレース置換法によりP C a単独耐震壁の解析を行った。以下に得られた結論を示す。

- 1)本解析法で、接合筋量が多くなるに従って、荷重-部材角関係に於いてひび割れ後の剛性が高くなる傾向が示された。
- 2)壁パネルのひび割れ角度が45度でない場合についても、本解析方法によりP C a耐震壁の耐力及び破壊・変形性状を概ね評価できることが示された。ひび割れ角度が30度では側柱に、45度は壁パネル対角部に、60度では梁に応力が集中し、接合部の滑りは、加力点近傍から形成されるコンクリート圧縮ブレースが架構に交差する位置で多くなることが実験及び解析で示された。
- 3)接合部の挙動をバネ要素に置換し、バネモデルの滑り剛性を接合方法の違いにより、4種に場合分けした復元力特性、及びそれに基づいた解析法が妥当であることが検証された。

【謝辞】 本論文中で、実験結果を引用させて頂いた文献[3],[4]の筆者の皆様に謝意を表します。

【参考文献】

- [1]白石一郎、中村善郎、狩野芳一：鉄筋コンクリート造耐震壁の最大耐力への壁筋の効果、日本建築学会構造系論文報告集、第392号、pp.34-45、1985.10
- [2]望月重、楨谷栄次、永坂具也：壁式プレキャスト構造鉛直接合部のせん断耐力（ダウエル効果及び圧縮力を考慮した場合）、日本建築学会構造系論文報告集、第424号、pp.11-22、1991.6
- [3]日本建築学会：壁式プレキャスト構造の鉛直接合部の挙動と設計法、1989.4
- [4]田中材幸、吉崎征二、吉田宏、浅川敏雄：鉛直接合部を有する壁式プレキャスト構造の水平加力実験（その4）水平接合部のすべり実験、（その5）水平接合部のすべり挙動、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.855-858、1992.8
- [5]星聡美、望月重、岡田利里：プレキャスト耐震壁のブレース置換による解析（その3）ひび割れ角度に関する実験、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.209-210、1995.8
- [6]戸田哲雄、長 稔、松浦恒久：プレキャスト耐震壁のせん断挙動に関する実験的研究（その1）実験概要および破壊性状、（その2）局所性状、日本建築学会学術講演梗概集、pp.455-458、1990.10

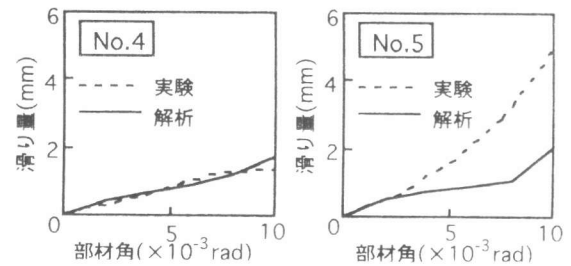


図-10(a) 水平接合部の滑り量変化

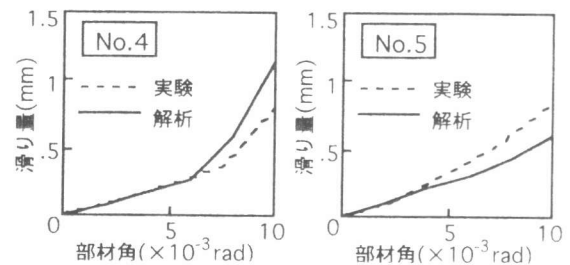


図-10(b) 鉛直接合部の滑り量変化

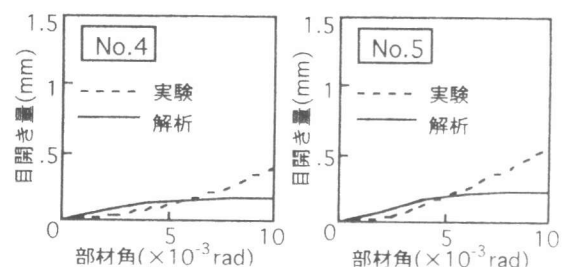


図-10(c) 鉛直接合部の目開き量変化