

論文 プレキャスト CES 造耐震壁の FEM 解析

藤井 崇嗣^{*1}・鈴木 卓^{*2}・松井 智哉^{*3}・倉本 洋^{*4}

要旨: 本研究では, CES 造周辺架構と壁板との定着を簡略化したコンクリート一体打ち壁試験体および壁板をプレキャスト化したプレキャスト壁試験体による CES 造耐震壁で非線形有限要素解析を実施した。本論では, 解析モデルの構築およびシミュレートを目標として, コンクリートひび割れ強度, コンクリート-鉄骨間の付着すべりの有無, プレキャスト接合部のモデル化方法などを解析変数として, 解析を実施し, 各変数が解析結果に及ぼす影響について検討を行った。

キーワード: CES 造耐震壁, FEM 解析, プレキャスト, 定着方法

1. はじめに

筆者らは, 鉄骨と繊維補強コンクリートのみから構成される CES (Concrete Encased Steel) 構造システムの実用化に向けて開発的研究を継続的に実施している。これまでの 2 層 2 スパンフレームを用いた構造実験などから, 本構造は優れた復元力特性および安定した履歴特性を示し, 高い耐震性能を有することを示してきた¹⁾。

一方, 建築物の主要耐震部材のひとつである耐震壁については, CES 構造においても剛性および強度を確保する上で有効である。しかし, 柱および梁に充腹形鉄骨が内蔵されている CES 構造では, SRC 構造と同様に, 壁筋の配筋が困難であることは想像に難くないことから, CES 造耐震壁の開発においても, 周辺架構と壁板との定着方法も含めた施工性の改善を課題の 1 つとしている。

そこで, 筆者等はこれまでに CES 造周辺架構と壁板との定着を簡略化した CES 造耐震壁の構造性能を明らかにするために静的加力実験^{2,3,4)}を実施し, 壁筋の定着が施してある試験体と比較して, 同等以上の耐力性能および変形性能を有することを示した。また, 耐震壁の更なる

施工性の改善を図り, 壁板をプレキャスト (以下, PCa) 化した CES 造耐震壁の構造性能を明らかにするために静的加力実験^{3,4)}を実施した。壁筋の定着が施してある試験体と比較して, 耐力の低下がみられ, 曲げ降伏型試験体については想定される破壊形式に至らなかった。そのため, PCa 壁について応力伝達機構を解明することが必要であり, その方法として非線形有限要素解析 (以下, FEM 解析) による解析的な検討が有効であると考えられる。

これまでに, 縦筋の定着が省略された CES 造耐震壁の解析的研究⁵⁾が実施され, 実験結果を概ね模擬可能であることを示した。そこで, 本論文では, 縦横筋の定着を省略した試験体および壁板を PCa 化した試験体^{3,4)}の解析モデルの構築を目的として, FEM 解析を実施し, 多種の検討を行ったうちの一部を示すとともに, 実験結果との整合性の検証を行う。

2. 解析対象となる試験体および実験概要

解析対象である耐震壁試験体は, 文献 3,4) で実験を実施した中高層壁フレーム建築物における連層耐震壁の下

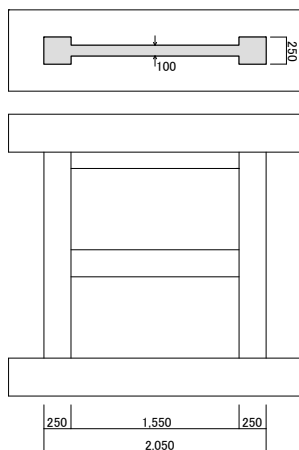


図-1 試験体形状

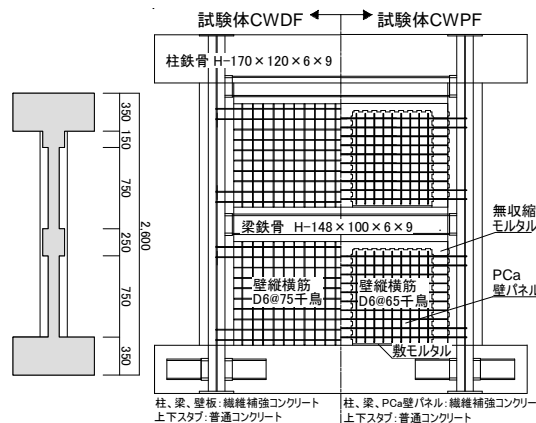


図-2 試験体配筋図

	CWDS/CWDF (一体打ち)	CWPS/CWPF (PCa)	
柱	B × D	250 × 250 (mm)	
	鉄骨	H-170 × 120 × 6 × 9 ($s_p=4.9\%$)	
梁	B × D	200 × 250 (mm)	
	鉄骨	H-148 × 100 × 6 × 9 ($s_p=5.2\%$)	
壁	壁厚	100 (mm)	
	縦筋	D6@75 千鳥 ($w_p=0.42\%$)	D6@65 千鳥 ($w_p=0.42\%$)
	横筋	D6@75 千鳥 ($w_p=0.42\%$)	D6@65 千鳥 ($w_p=0.42\%$)

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学専攻 (正会員)

*2 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 (正会員)

*3 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建築・都市システム学系 准教授 博士 (工学) (正会員)

*4 大阪大学大学院 工学研究科地球総合工学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

部2層を想定した実大の約1/3縮尺のもの4体であり、試験体CWDSおよびCWDFが一体打ち耐震壁、試験体CWPSおよびCWPFが各層の壁板を2分割したPCa耐震壁である。試験体の形状および配筋を図-1および図-2に示す。また、表-1には試験体の部材断面詳細を示す。耐震壁は壁階高さが1,000mm、柱中心間距離が1,800mm、壁厚が100mmであり、側柱断面が250mm角である。梁の幅およびせいはそれぞれ200mmおよび250mmである。

一体打ち試験体は、壁板の縦筋および横筋を周辺フレームに定着せず壁板内でフックを設けている。ただし、施工時に鉄筋を固定する必要があるため、壁横筋は各層の上下2本を側柱の内蔵鉄骨ウェブに溶接している。

PCa試験体は、CES造周辺架構を製作後、PCa壁を設置する。ここで左右に並ぶPCa壁の横筋は溶接し、壁横筋の上下2本を側柱の内蔵鉄骨ウェブに取り付けた鉄筋に溶接した。PCa壁パネルとCES造周辺架構の接合は無収縮モルタルによるウエットジョイントとし、パネル下側の水平接合部は敷モルタルを用いた。なお、PCa壁の周辺にはシアコッターを設けている。

せん断スパン比 ($M/(Q \cdot D)$, D : 壁の全せい) は試験体CWDSおよびCWPSがせん断破壊先行型となるように1.1とし、試験体CWDFおよびCWPFは曲げ降伏先行型

となるよう1.65とした。

載荷装置を図-3に示す。載荷は変位制御による水平力の正負繰り返し載荷とし、試験体頂部の水平変位 (δ) を計測位置の高さ ($H=2,050\text{mm}$) で除した相対部材角 $R=\delta/H$ を、 $R=0.0625$ および 0.125% を1サイクル、 $R=0.25, 0.5, 0.75, 1, 1.5$ および 2% を2サイクル計画で行った。軸力は2台の鉛直ジャッキにより、一定軸力 (柱軸力比 $N/N_0=0.2$, N_0 : 鉄骨を含む軸圧縮耐力、試験体CWDSおよびCWPSは1,086kN、試験体CWDFおよびCWPFは1,230kN) を試験体頂部に作用させると同時に、それぞれのせん断スパン比となるように作用せん断力に対応させて当該鉛直ジャッキを制御することによって試験体頂部に付加モーメントを作用させた。

表-2~4に試験体で使用した材料の特性をそれぞれ示す。FRCに使用した繊維は、直径0.66mm、長さ30mmのビニロンファイバー (RF4000) であり、体積混入量を1.0%とした。

3. FEM解析

3.1 解析概要

解析は市販のコンクリート構造非線形FEM解析ソフト「FINAL」を用い、平面応力場を仮定した2次元解析とした。また、下スタブ底面を完全固定とした。

図-4に要素分割図を示す。PCa試験体はCES造フレ

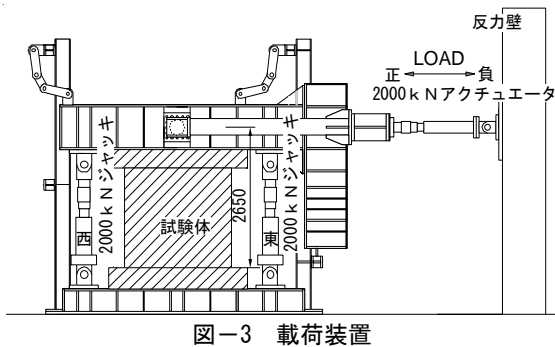


図-3 載荷装置

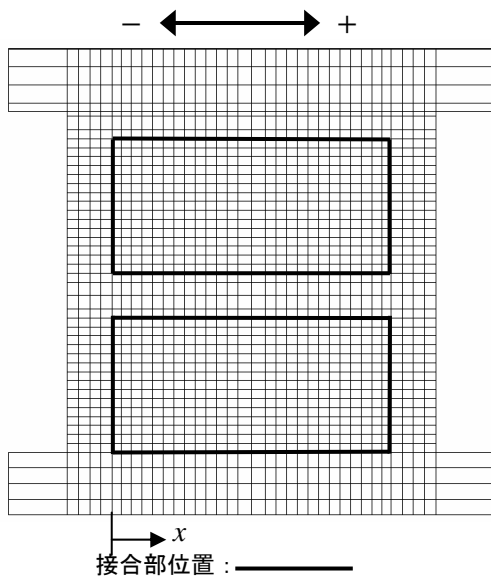


図-4 試験体配筋図

表-2 繊維補強コンクリートの材料強度

		圧縮強度	弾性係数	圧縮強度時
		(MPa)	(GPa)	ひずみ (μ)
CWDS	1層	30.3	22.1	2619
	2層	33.7	25.6	2337
CWDF	1層	35.1	24.8	2739
	2層	27.8	23.1	2419
CWPS	1層	29.0	23.0	2493
	2層	33.8	24.7	2506
CWPF	1層	35.1	26.3	2479
	2層	27.4	21.3	2432

表-3 無収縮モルタルの材料強度

	圧縮強度 (MPa)
CWPS	92.5
CWPF	77.4

表-4 鋼材の材料特性

	種別	使用箇所	降伏点 (MPa)	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)
CWDS CWPS	PL-6 (SS400)	ウェブ	300	197	422
	PL-9 (SS400)	フランジ	297	209	442
	D6 (SD295A)	壁筋	396	192	518
CWDF CWPF	PL-6 (SS400)	柱ウェブ	323	202	466
	PL-9 (SS400)	柱フランジ	326	197	425
	PL-6 (SS400)	梁ウェブ	349	191	465
	PL-9 (SS400)	梁フランジ	322	189	437
	D6 (SD295A)	壁筋	414	188	520

ームと壁板の境界 (図-4 太線) に、厚さを持たない接合要素を定義する。一体打ち試験体は、接合要素を剛接合にする。敷モルタルやコッターは要素分割が煩雑になるため定義せずに、接合要素として表現する。

本解析では実験と同様のせん断スパン比とするために、試験体スタブ上端から実験時における想定加力高さまで仮想スタブを弾性体で定義した。载荷は、仮想スタブ上端に一定軸力を等分布荷重で与えた後、仮想スタブ頂部に強制変位を与えた。なお、解析はすべて $R=1.5\%$ の第1サイクルまでとした。

解析で用いたコンクリートおよび鋼材の材料特性は、表-2~4の値を用いている。

3.2 材料構成則

図-5に材料構成則を示す。

コンクリートは4節点四辺形要素で定義し、等価一軸ひずみに基づく直交異方性モデルにより表現した。壁板の鉄筋は埋め込み鉄筋として要素内に層状で置換した。ひび割れは要素内に一様に分布し、多方向のひび割れが考慮できる非直交ひび割れモデルにより表現した。二軸応力下の破壊条件は Kupfer らの提案に従った。圧縮側の応力上昇域は修正 Ahmad モデルとし、軟化域はコンクリートの材料試験を参考に多折線でモデル化した (図-5(a))。引張側はひび割れ発生までを線形で仮定し、ひび割れ発生後の軟化域は出雲らの提案モデルを用いた。柱および梁要素ではひび割れ発生後に引張応力をほとんど負担しないものとし、鉄筋がある壁要素ではテンションスティフニングを考慮して、出雲らの提案モデルの係数 c を定めた (図-5(b))。コンクリートの繰返し応力下における履歴モデルは、除荷と再载荷過程における軟化挙動を考慮した曲線モデルを使用した (図-5(c))。ひび割れ後のせん断伝達モデルは Al-Mahaidi モデル ($\beta=1.0$ の場合) に対してせん断伝達剛性がわずかに大きくなるよう

に $\beta=0.8$ として、これより得られる曲線を多折線でモデル化した (図-5(d))。

無収縮モルタルは、コンクリートの構成則に従う。ただし、文献(6)を参考にし、圧縮側の軟化域は折線でモデル化し (図-5(e))、引張側はひび割れ発生までを線形で仮定しひび割れ発生後の軟化域は折線でモデル化した (図-5(f))。

柱鉄骨フランジおよび梁鉄骨ウェブは四辺形平面応力要素でモデル化し、柱鉄骨ウェブ梁鉄骨フランジはトラス要素で線材としてモデル化した。鉄骨および鉄筋の繰返し応力は Ciampi らの提案する修正 Menegotto-Pinto モデルとした (図-5(g))。

コンクリート - 鉄骨間を接合要素で定義し、付着応力 - すべり関係をモデル化した (図-5(h))。ここで、最大付着応力はコンクリート強度の $1/10$ とし、鋼材の軸方向にのみすべりが生じるようモデル化した。

なお、PCaの接合要素については後述する。

4. 一体打ち試験体検討結果

4.1 検討概要

表-5に示した項目について、解析結果に及ぼす影響を確認し、一体打ち試験体のモデルの確立を試みる。一つは実験試験体において、乾燥収縮あるいは試験体設置による初期ひび割れが確認されたため、文献(7)を参考にし、コンクリートのひび割れ強度を低減させたときの影響について検討する。もう一つは、鉄骨 - コンクリート間の付着要素の有無が耐力に与える影響について検討する。本論文では、基本モデルとした Type-A、Type-A よりひび割れ強度を低減させた Type-C および Type-C の付着要素無し (すべりなし) の Type-D の3タイプを示す。解析は実験と同じ正負繰返し载荷の2回载荷で実施した。

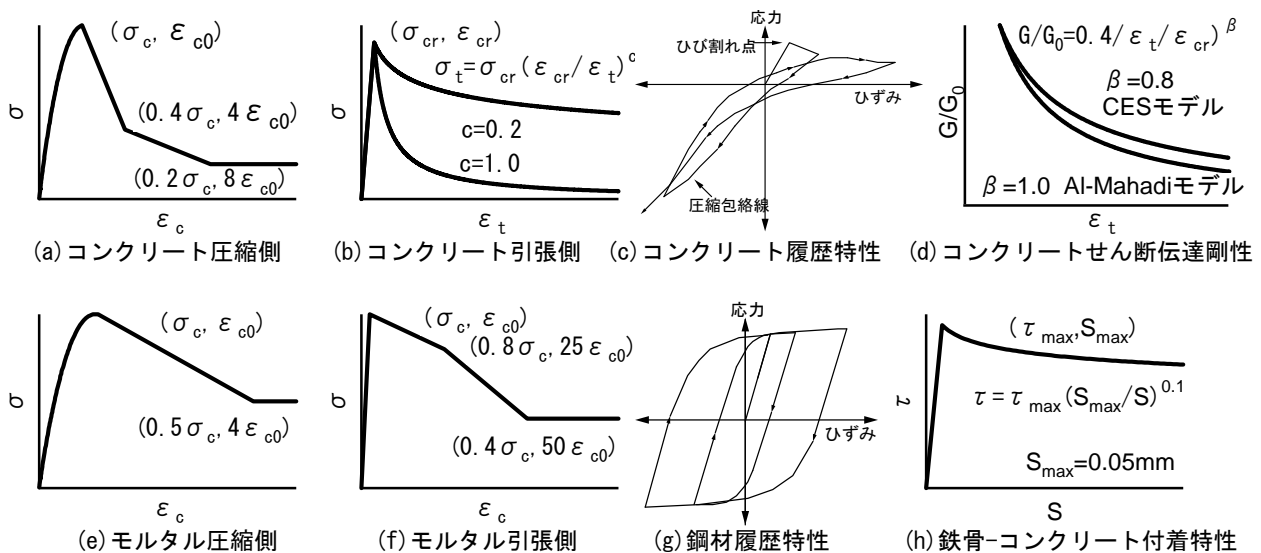


図-5 材料構成則

4.2 解析モデル検討結果

図-6 にせん断力-変形角関係の包絡線を示す。

せん断破壊先行型である試験体 CWDS は、すべての試験体で初期剛性が大きく表れた。それに伴い最大耐力値も実験より大きく表れている。

付着要素の有無 (Type-C, D) で見てみる。R=0.125% から Type-D のせん断力は Type-C のせん断力より大きくなり、最大耐力も若干大きい。Type-D は柱の鉄骨とコンクリートが一体となって挙動しており、より多くの力を負担したため耐力が大きく現れた。このことを紙面の都合上掲載していない破壊性状で見ると、変形が小さいときから柱コンクリートの損傷が大きくなり、Type-C より大きな力を負担していることが伺えた。そのため、最大耐力が早くに達し、その後の耐力低下が著しい。よって結果として、Type-C のほうが最大耐力値と最大耐力を発揮する変形角が実験結果に近い。

ひび割れ強度の大小 (Type-A, C) について、Type-A と Type-C では最大耐力は同程度であり、強度を低減することが耐力に与える影響は小さい。しかし、Type-C は早期に剛性低下が生じる点では Type-A よりも、実験結果に近い。

曲げ降伏先行型である試験体 CWDF は、応力上昇域では、試験体 CWDS と同様に解析結果が実験結果より全体的に大きい。付着要素の有無 (Type-C, D) の影響は小さいがひび割れ強度の低減を考慮すること (Type-C) で剛性が下がり、Type-C が最も実験結果と対応が良い。

以上のことより、剛性、最大耐力の観点から、ひび割

表-5 一体打ち試験体の検討項目

試験体 Type		ひび割れ強度 (N/mm ²)	
		柱梁・壁板とも 2.70	柱梁 0.75 壁板 0.37
鉄骨-コンクリート 付着要素	有	A	C
	無	B	D

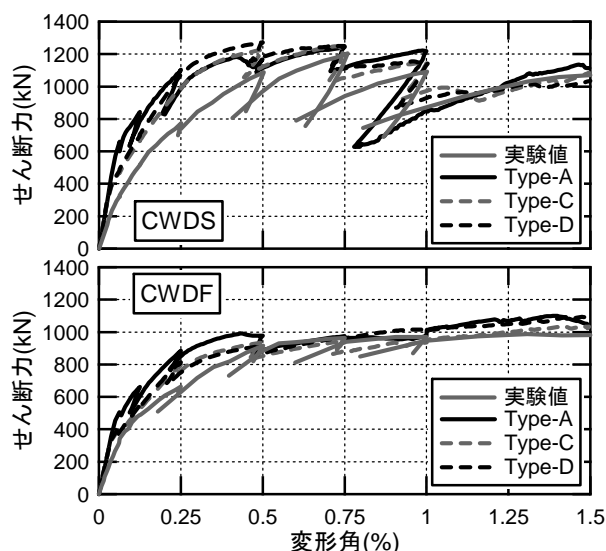


図-6 せん断力-変形角関係

れ強度は低減させ、鉄骨-コンクリート間の付着要素は有 (すべり考慮) である Type-C が試験体 CWDS および試験体 CWDF とともに、実験値に近似しているため、解析モデルとして適切といえる。

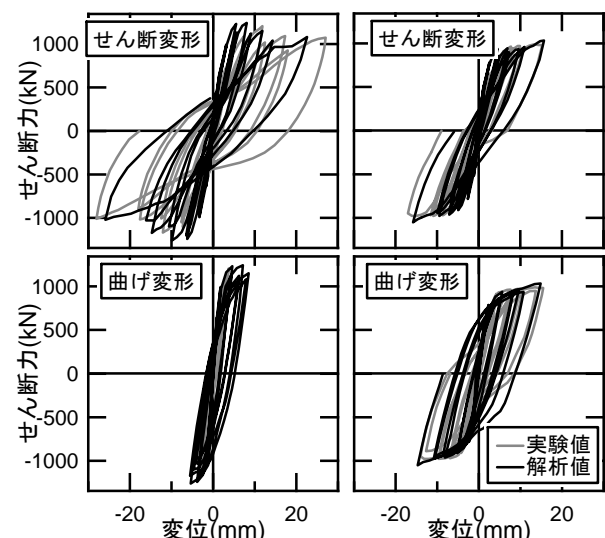
図-7 に解析 (Type-C) と実験におけるせん断力-せん断変形成分および曲げ変形成分の履歴を示す。曲げ変形は高さ方向に7分割して測定した側柱の軸方向変形量から求め、せん断変形は全体の変形から曲げ変形を引いて求めた。試験体 CWDS は、解析は実験よりせん断変形成分が小さく曲げ変形成分が大きくなった。試験体 CWDF は、せん断変形成分および曲げ変形成分ともに実験と同じである。縦横壁筋の定着を省略した場合でも、既往の解析モデル⁵⁾と同様の Type-C のモデルで実験を概ね模擬している。

5. プレキャスト試験体検討結果

5.1 解析概要

前章で検討した解析モデルをベースに、CES 造フレームと壁板の境界の接合要素にせん断すべりとせん断応力の関係を定義して、単調載荷で PCa 試験体の検討を行った。なお、PCa 試験体では最大耐力までのシミュレートを目的とすること、接合要素のモデル化の複雑化および計算の不安定化を避けることなどの理由により単調載荷で解析を行うこととした。

PCa 壁の接合面の構造特性については、水平接合部や鉛直接合部、耐震壁試験体や要素試験体、実験や解析など、数多くの論文が発表されており、今回の CES 造 PCa 試験体では、接合部の要素実験を実施していないため、既往の報告を参考にして、接合モデルを定義した。なお、試験体の水平接合部もしくは鉛直接合部を剛接合、もう一方を接合面において応力を全く伝達しない接合モデル (以下、無接合モデル) を定義して、水平接合部または



(a) 試験体 CWDS (b) 試験体 CWDF

図-7 変形成分

鉛直接合部のうちどちらの接合面が試験体の耐力に与える影響が大きいかわかった。その結果、水平接合部が無接合モデルの試験体のほうが、鉛直接合部が無接合モデルの試験体と比べて耐力低下が著しいため、水平接合部のせん断力の大小が荷重-変形関係に与える影響が大きいことが分かった。よって、PCa 試験体では水平接合部を変数にして検討を行った。

接合要素の特性は接合面のせん断応力-すべり関係で定義した。水平接合部および鉛直接合部ともに垂直方向のモデルは、圧縮方向の剛性を極めて大きく(100kN/mm³)し、引張方向のモデルは圧縮方向の1/10000の剛性とした。

図-8 に本論文で使用した接合要素のせん断方向のモデルを示す。鉛直接合部のせん断方向のモデルにおけるせん断応力 τ_{Vmax} はPCa規準式(1)⁸⁾により求め、各折れ点のすべり量は文献9)を参考にして定義した。なお、 τ_{Vmax} はコッターおよび水平接合筋の強度の和であり、 τ_{Vmax} はそれぞれ試験体CWPSが 1.83(N/mm²)、試験体CWPFが 2.10(N/mm²)である。水平接合部のせん断方向については、試験体にはコッターおよび鉛直接合筋がないため、試験体の軸方向圧縮力による摩擦力の影響が大きいと考え、2種類のモデルで検討する。Type-Aは式(2-1)および(2-2)¹⁰⁾によりせん断応力 τ_{Hmax} および τ_H を求めたモデルである。なお、圧縮応力 σ_N は試験体の初期軸力のコンクリート負担分を試験体全断面積で除して算出した。 τ_{Hmax} はそれぞれ試験体CWPSが 3.68(N/mm²)、試験体CWPFが 4.22(N/mm²)である。Type-Bは文献11)の付着力を参考にして $\tau_{Hmax} = 1.12$ (N/mm²)として、解析の計算過程で圧縮応力にもなる摩擦力によるせん断応力の増大を考慮したモデルである。なお、Type-Bの摩擦係数は文献11)を参考にして0.7とした。式を以下に示す。式(2-1)はすべり発生前の摩擦と付着、式(2-2)はすべり発生後の摩擦の式である。

$$\tau_{Vmax} = \{0.09F_c \cdot A_{sc} + (\sigma_y \sum a_v + N_v)\} / A \quad (1)$$

$$\tau_{Hmax} = 0.99\sigma_N + 1.12 \quad (2-1)$$

$$\tau_H = 0.73\sigma_N \quad (2-2)$$

5.2 解析結果

図-9 にせん断力-変形角関係を示す。すべての試験体で解析による初期剛性が高くなる点は、一体打ち試験体と同じである。Type-Aでは、試験体CWPSおよびCWPFともに実験と比べて耐力が若干高く現れたが、ほぼ実験を模擬しているといえる。試験体CWPFではType-Bのせん断力はType-Aとほぼ同じとなった。試験体CWPSのせん断力はR=0.25%まではType-Aとほぼ同じであるが、それ以降は大きくなった。

図-10 に1層梁下接合部のせん断応力分布を示す。横

軸の距離 x は引張側柱内側からの距離(図-4参照)を示しており、荷重方向は右方向としている。

R=0.25%のとき両試験体ともにType-AおよびType-Bのせん断応力は、大局的に見て同じ分布形状で、値も同程度である。せん断力が最大耐力に達するレベルになるR=0.75%時には、Type-Aではほぼ一定のせん断応力分布状態になっているのに対し、Type-Bではせん断応力は、接合部の圧縮側で大きく、引張側で小さくなっており、接合面の圧縮力に応じて摩擦力が増大している現象を表現できている。

前述したように、試験体CWPSではR=0.75%で、Type-Bのせん断力がType-Aを大きく上回っているが、摩擦力の増大により、より大きなせん断力が伝達されているためと考えられる。なお、このときの接合部全体のせん断力(各要素のせん断応力に断面積を乗じた値を足し合わせて算出)はType-Aは456kN、Type-Bは570kNである。

Type-Aの接合部のモデル化において、適切な接合面の強度を平均値として与えられれば、今回の解析結果のようにある程度復元力特性の包絡線を模擬できることが確認できた。摩擦力の増大を考慮したType-Bは、試験体CWPSの結果と一致しなかったが、今後、壁板の応力状態に着目して分析していくことを考えると、Type-Bのモデル化によって模擬できるようにさらに検討する必要がある。

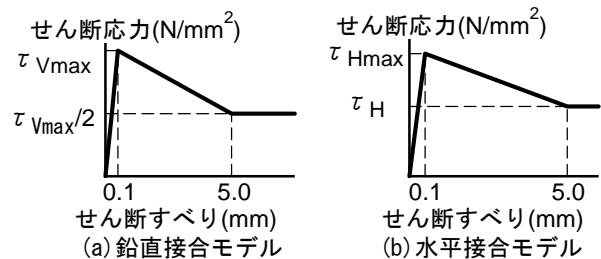


図-8 接合モデル

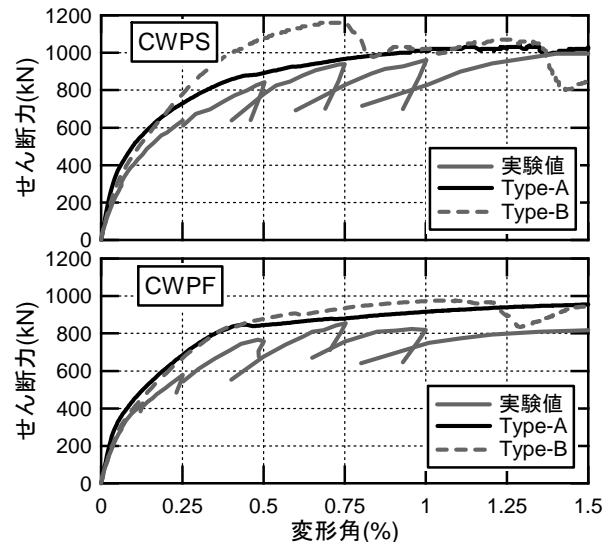


図-9 せん断力-変形角関係

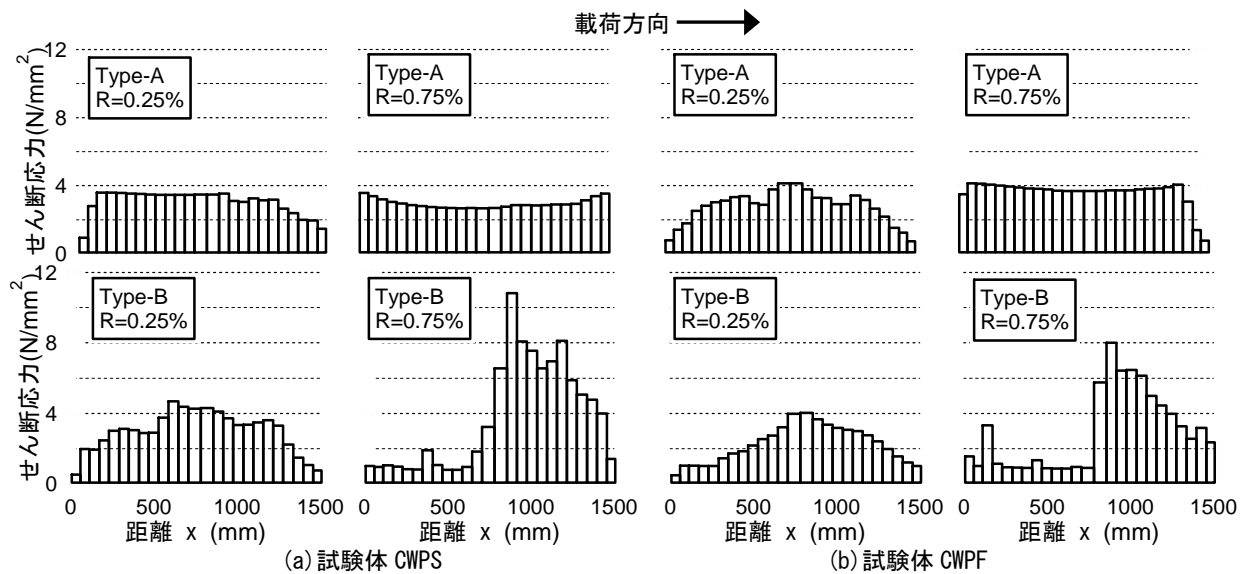


図-10 接合部せん断応力分布

6. まとめと今後の課題

本研究では、CES造周辺架構と壁板との定着を簡略化したCES造耐震壁の非線形有限要素解析モデルの構築を目的として、各種検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- 1) 一体打ち試験体で、コンクリートのひび割れ強度の低減および鉄骨-コンクリート間の付着要素の有無について検討を行った結果、コンクリートのひび割れ強度は低減させ、鉄骨-コンクリート間の付着すべり有りの解析モデルが最も実験を模擬できた。
- 2) コンクリートのひび割れ強度を低減することにより、剛性は低下するが、最大耐力に与える影響は小さい。
- 3) PCa試験体において水平接合部に接合要素を用いたモデルにより、復元力特性を概ね模擬できた。
- 4) PCa試験体の水平接合部に圧縮力による摩擦力の増大を考慮したモデルでは、実験によるせん断力を上回る結果が見られた。これは、接合部の摩擦力を過大評価したことが要因である。

なお、今回の多種の検討により、一体打ちCES造耐震壁の解析モデルの構築がなされた。プレキャスト壁については、モデル化手法の構築には至らなかった。今後は、試験体の内部応力状態を検討することを想定して、圧縮応力によるせん断応力の増大を考慮したモデル化についてさらに検討を進める。

参考文献

- 1) 倉本洋, 松井智哉, 今村岳大, 田口孝: CES合成構造平面架構の構造性能, 日本建築学会構造系論文集, No.629, pp1103-1110, 2008.7
- 2) 鈴木卓, 松井智哉, 倉本洋: CES造耐震壁の構造特

- 性に及ぼす壁筋の定着状態の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.2, pp1189-1194, 2010.7
- 3) 岐津幸大, 鈴木卓, 松井智哉, 倉本洋: プレキャスト化したCES造耐震壁の構造性能に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp415-420, 2011.7
 - 4) 藤井崇嗣, 岐津幸大, 松井智哉, 倉本洋: 曲げ降伏型CES造耐震壁の構造性能, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp355-360, 2012.7
 - 5) 鈴木卓, 松井智哉, 倉本洋: 壁縦筋の定着方法の異なるCES造連層耐震壁の非線形FEM解析, 日本建築学会構造系論文集, 第76巻, 第666号, pp.1533-1540, 2011.8
 - 6) 諏訪田晴彦, 野口博, 柏崎隆志, 福山洋, 佐藤幸博: 高靱性セメント材料の構造物への利用に関する基礎研究(その4 有限要素法による解析的検討), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.937-938, 1998.9
 - 7) 井本勝慶, 米澤健次, 加藤朝郎, 川里健: 1/4PCCVの耐圧限界挙動に関するラウンドロビン解析, コンクリート工学, Vol.41, pp.153-157, 2003.1
 - 8) 日本建築学会: 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説, 1982
 - 9) 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
 - 10) 黒田洋子, 八木敏行, 飯塚正義: すべり発生前後におけるプレキャスト部材圧着接合面の摩擦に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.20, No.3, 1998
 - 11) 日本建築学会: プレキャスト鉄筋コンクリート連層耐震壁の水平せん断力の評価法と設計例, 2002