

論文 リブ付中型コンクリートパネル造の静的非線形増分解析に関する研究

尾崎 純二^{*1}・倉本 洋^{*2}・河本 孝紀^{*3}・佐々木 隆博^{*4}

要旨：「リブ付中型コンクリートパネル造」の限界耐力計算への適用を目的として実施したリブ付壁板の単体壁及びT型直交壁の水平加力実験に関して、正負交番繰り返し載荷を考慮した静的非線形増分解析を実施した。その結果、壁板上下接合部をスリップ現象を考慮した弾塑性引張及び圧縮の軸バネに、床板を壁板との接合部における剛域を考慮した弾塑性曲げ材に置換することにより、実験結果を再現できる解析が可能であることを確認した。

キーワード：プレキャスト、リブ付壁、限界耐力計算法、静的非線形増分解析

1. はじめに

量産公営型住宅をベースとした2階建ての工業化住宅に用いられる「リブ付中型コンクリートパネル造」は、規格化されたリブ付プレキャスト鉄筋コンクリートパネルをボルト接合で組み立てる壁式構造である。

従来、この種の建築物は改正前建築基準法第38条の大臣認定の取得により建設が可能であったが、1998年6月の建築基準法改正に伴い壁板の厚み不足等の問題から限界耐力計算による適用を受けることとなった。従来の適用範囲内の住宅については限界耐力計算をベースとした型式適合認定を取得し建設が可能となった¹⁾が、その適用範囲を超えるディテールに関しては、実験研究データが不足し限界耐力計算を適用できない状況にある。

そこで筆者らは、限界耐力計算に用いる静的非線形増分解析に適用可能な部材モデルを構築することを念頭において、リブ付中型コンクリートパネル造の構造性能を把握するための実験的研究を行ってきている。本研究はその一環として実施したものであり、リブ付コンクリート壁板(以下「リブ付壁板」)で構成される架構の静的非線形増分解析に使用する部材モデルの検

討を目的としている。本論では、リブ付壁板の単体壁及びT型直交壁の構造実験^{2,3)}に関する部材モデルと解析結果の概要について示す。

2. 構造実験の概要

2.1 試験体と載荷方法

解析の対象とした構造実験の試験体概要図を図-1に示す。

試験に使用した壁板は、高さ2700mm、リブ厚120mm、シェル厚46mmで、壁長さは897mm(直交壁は687mm)とした。また、直交壁試験体は構面内壁に短辺がかかる状態を想定し、リブ付形状(リブ厚150mm、シェル厚46mm)の床板4枚を組み合わせる形とした。なお、単体壁試験体は床板の代わりに加力用スタブを設けた。

壁の配筋は縦リブ部主筋を2-D13(SD295A)、シェル部補強筋を2.9φ@60メッシュとし、床の配筋は壁上のリブ部主筋を2-D13(SD295A)、シェル部補強筋を2.9φ@100メッシュとした。接合部の詳細を表-1に示す。設計基準強度はコンクリートパネルを30N/mm²、充填モルタルを60N/mm²とした。試験時の材料特性を表-2及び表-3に、載荷装置の概要を図-2に示す。

試験体は反力フレーム内にPC鋼棒で固定さ

*1 ウベハウス(株) 営業本部技術部 (正会員)

*2 豊橋技術科学大学助教授 工学部建設工学系 博士(工学) (正会員)

*3 (株)宇部三菱セメント研究所 宇部センター (正会員)

*4 レスコハウス(株)技術開発チーム (非会員)

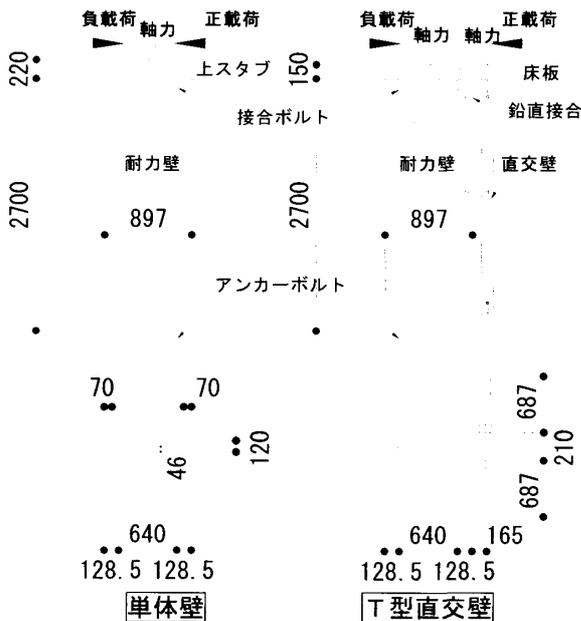


図-1 構造実験の試験体概要図

表-1 接合部仕様の一覧

部位	構面内壁	直交壁
基礎-壁	D19 (SD295A)+モルタル充填	
壁-床*	16φ (SS400) +モルタル充填	13φ (SS400) +モルタル充填
壁-柱-壁	13φ (SS400)	
床-床	13φ (SS400) +シアコッター(モルタル充填)	

*: 単体壁試験体では、壁-上スタブとの接合部を示す。

表-2 コンクリートの圧縮強度 単位: N/mm²

	設計基準	試験体	
		単体壁	T型直交
コンクリート	Fc30	46.47	52.67
充填モルタル	Fc60	82.17	72.56

表-3 鉄筋の降伏点引張強度 単位: N/mm²

	材質	試験体	
		単体壁	T型直交
アンカーボルト	SD295A	395	382
接合ボルト	16φ SS400	337	333
	13φ SS400	-	316
主筋 D13	SD295A	367	354

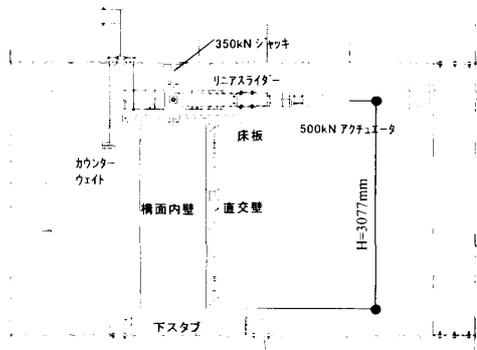


図-2 荷重装置の概要(T型直交壁)

れたプレキャストの下スタブにアンカーボルトで接合した後、接合部の空隙に無収縮モルタル

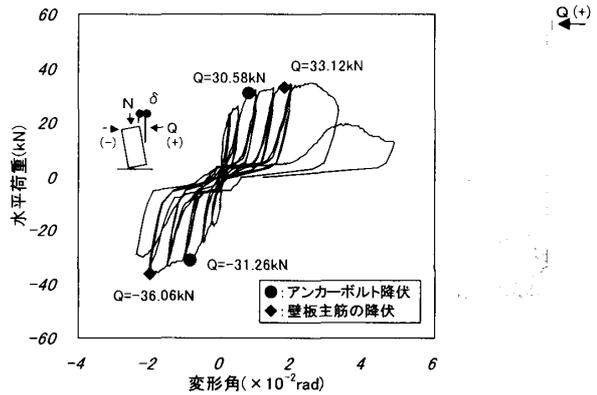


図-3 単体壁実験結果の概要

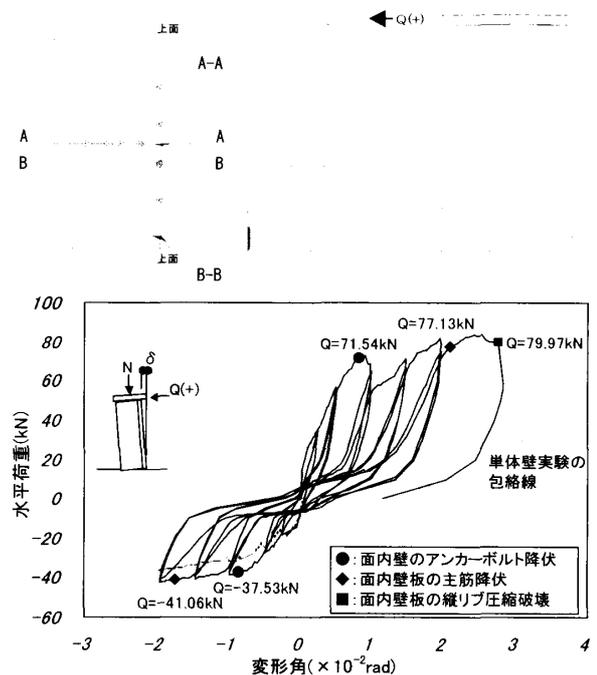


図-4 T型直交壁実験結果の概要

を充填して固定した。上スタブ又は床板を壁板と接合ボルトにより結合し、加力治具とボルト接合した。荷重は水平方向に取り付けた押し引き両用の 500kN アクチュエーターにより正負交番繰り返し荷重を行った。同時に鉛直方向に 350kN 油圧ジャッキで 2 階建ての 1 階壁を想定した長期軸力 29kN の一定軸力を荷重した。

2.2 実験結果

単体壁及びT型直交壁試験体の最終破壊状況と水平荷重-水平変位関係をそれぞれ図-3及び図-4に示す。なお、水平変位は壁頭側面(正加力側)の変位とした。図-4には参考として単体壁試験体における荷重-変位関係の包絡線を併記した。

単体壁試験体は、壁板の曲げひび割れ発生の後、壁脚部接合部のアンカーボルトが降伏し、その後、引張側壁主筋定着部の側方割裂破壊が発生して荷重低下を生じる破壊経過を示した。

T型直交壁試験体は、曲げひび割れの発生及びアンカーボルトの降伏までは単体壁と同様であるが、その後、床のせん断ひび割れにより一旦荷重が低下し、最終的に圧縮側縦リブ脚部に圧縮破壊が発生する破壊経過を示した。T直交壁試験体は単体壁試験体に比べて耐力が大幅に上昇する結果となった。

履歴性状は共にスリップ型の履歴性状を示しており、部材角 1/100 サイクルでアンカーボルトが降伏し、部材角 1/30 サイクルで破壊に至った。

3. 部材モデル

3.1 本構造の特徴と部材モデル

本実験に関しては、以下のような特徴が明らかにされている^{2,3)}。

- (1) 荷重-変位曲線の履歴はスリップ型であり、アンカーボルトの抜け出しがスリップを生じる一要因となっている。
- (2) 変形成分の割合は、回転変形角が70%程度を占め、回転変形による影響が大である。
- (3) 壁板のM-曲げ変形量の関係は、文献4)の剛性低下率を用いることにより評価できる。
- (4) 直交壁は構面内壁の回転で床が押し上げられて直交壁頭部の縦縫いボルトに引張力が生じ、その反力が構面内壁頂部の隅角部に軸力として作用することにより壁板の曲げ耐力が上昇する。
- (5) アンカーボルト降伏時の壁板の曲げ耐力については、壁板脚部接合部の応力中心間距離を用いた略算式により概ね評価できる。

以上の5項目を考慮し静的非線形増分解析に使用する部材モデルを検討した。図-5に単体壁及びT型直交壁試験体の部材モデルの概要を示す。

壁板と床板は部材の中心位置でそれぞれ鉛直方向及び水平方向の線材に置換した。壁板接合

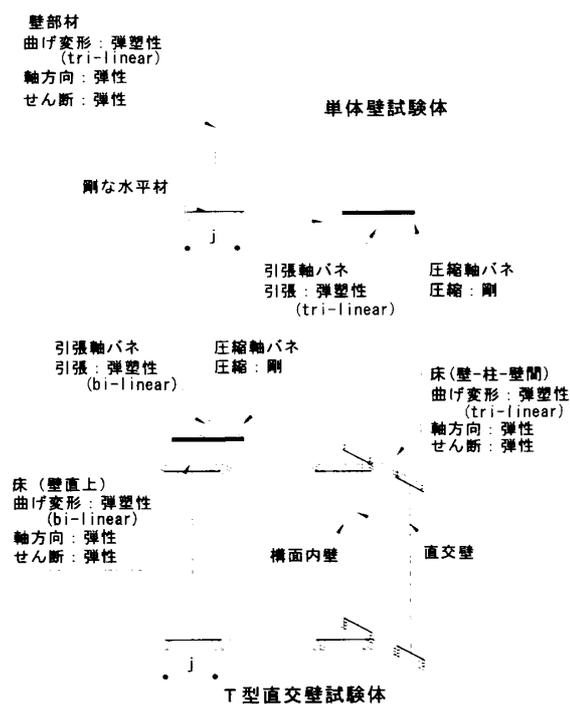


図-5 部材モデルの概要

部は壁部材の上下に剛な水平線材を設けるとともに、縦リブ中心位置及び接合ボルト位置にそれぞれ鉛直方向の軸バネと水平方向の剛なせん断バネを設置した。単体壁試験体は上スタブを無視した逆T型のモデル形状とした。

なお、T型直交壁の壁-柱-直交壁間の鉛直接合部は、相対ズレ量が約10mmになるまでボルトとパネルが接触しないディテールであり、部材角 1/50 まではせん断伝達に影響しないことが確認されている³⁾ため考慮していない。

3.2 壁上下接合部

壁上下接合部は、図-6に示すように、壁板の縦リブと接合ボルト(アンカーボルト)位置が約100mm偏心したディテールとなっており、圧縮側縦リブの中心と引張側接合ボルト位置までの応力中心間距離 j を用いることにより、アンカーボルト降伏時の曲げ耐力を評価できることが確認されている^{2,3)}。そこで、縦リブの中心位置に圧縮力のみを負担する剛な軸バネを、接合ボルト位置に引張力のみを負担する弾塑性の軸バネを設置した。

引張軸バネの復元力特性は、図-7に示す単体壁実験における壁脚部接合ボルト軸力-目開

き量の関係から決定した。壁脚部接合部は、図-6に示すようにボルト接合とモルタル充填を併用しており、軸力がアンカーボルトの降伏軸力の1/3程度に達するまではボルトとモルタルの付着が有効でパネルと基礎の境界面において三角形に近い応力分布となり高い剛性を示す。その後、付着切れを起こしアンカーボルトの抜け出しが生じるとともに、ボルトのネジ部や座金にも変形が生じ、剛性が1/15程度に小さくなる。そこで、アンカーボルト降伏軸力の1/3を第一折れ点とし、降伏軸力を第二折れ点とする tri-linear 型の弾塑性軸バネとした。初期剛性は図-6に示すボルトの応力分布を考慮した有効伸び長さを用いて式(1)により算定した。壁頭部接合部は、使用される接合ボルトが丸鋼で付着力が小さいことから、高い初期剛性を持たない bi-linear 型の弾塑性軸バネとした。復元力特性はともにスリップ型とした

$$Kl = E_B \cdot a_B / Le \quad \text{式(1)}$$

E_B : ボルトのヤング係数
 a_B : ボルトの断面積
 Le : ボルトの有効伸び長さ

なお、壁の水平すべり変形は変形全体の3%程度と小さいことが報告されている²⁾ため、水平方向の剛なせん断バネを接合部に設置しすべり変形は無視した。

3.3 部材の特性

壁部材は、T直交壁において床板の押さえによる軸力が付加軸力として作用し、壁板の変形に応じて軸力が変動することから、曲げ変形はM-N相関を考慮した弾塑性モデルとした。復元力特性は Takeda モデル⁵⁾とした。せん断変形については、T型直交壁試験体においてせん断ひび割れが発生しているが、アンカーボルト降伏後の部材角1/50サイクルにおけるひび割れであり、ヒンジ発生メカニズムに大きく影響しないと考えてせん断変形は弾性とした。軸変形についても弾性とした。壁板の断面性能は文献6)、曲げひび割れ強度及び曲げ剛性低下率は文献4)、曲げ降伏強度は文献5)における耐震壁の評価式を使用した。

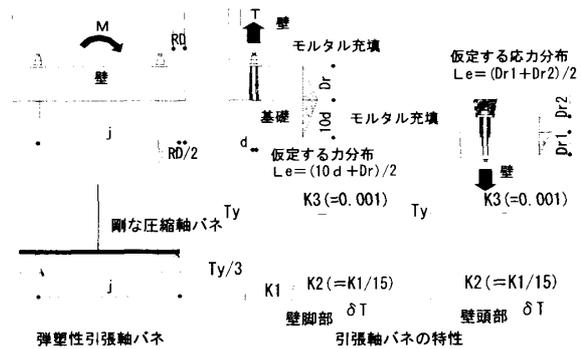


図-6 壁上下接合部の部材モデル

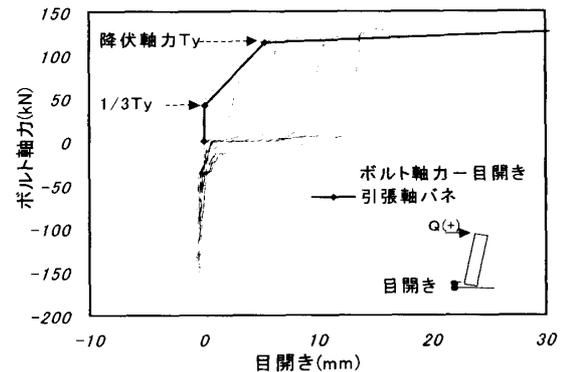


図-7 壁脚部接合ボルト軸力-目開き関係

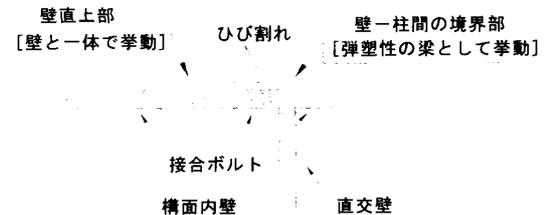


図-8 床部材の考え方

床部材は、図-8に示すように壁-柱間境界部の上部にのみひび割れが発生する。これは、境界部上部の床部材が壁板の回転による押し上げと押し下げを受け、曲げひび割れ及び曲げ降伏が発生する弾塑性の梁として挙動するのに対して、壁直上部の接合ボルトより内側の部分は、壁板が回転を生じても壁板と一体となるよう接合ボルトが変形を拘束してほとんど変形せず、RC造の部材接合部における剛域に近い挙動をするためである。

そこで、床部材の曲げ変形性能は、境界部の上部については tri-linear 型弾塑性、壁直上部については曲げひび割れのみ許容し曲げ降伏を起こさない bi-linear 型弾塑性とした。せん断変形及び軸変形はともに弾性とした。また、床部材はリブとシェルで構成されるT型断面であるため、

シェル部の協力幅を考慮した断面性能⁶⁾とした。曲げひび割れ強度及び剛性低下率は文献4)、曲げ降伏強度は文献5)により評価した。強度評価にあたっては、協力幅に配筋されたメッシュ筋も引張筋として考慮した。なお、加力時に床に作用する軸力による耐力は考慮していない。

3.4 解析方法

解析は静的非線形型解析プログラム「RESP-T for Windows (株)構造計画研究所」を使用し、床高さ位置(単体壁は壁頭位置)における変位増分による正負交番繰り返し解析を実施した。

4. 解析結果

4.1 単体壁試験体

単体壁試験体壁頂部の水平荷重—水平変位関係における実験と解析の比較を図-9に示す。図中の点線は実験結果、実線は解析結果を示す。

図中における○と●はそれぞれ実験と解析においてアンカーボルトの降伏を確認した点であるが、実験結果に近い変形及び耐力を示す解析結果となっており、接合部の付着が劣化したと想定される荷重(約15kN)を超えたあたりで若干差異を生じるものの、初期剛性からアンカーボルト降伏時の剛性まで概ね再現が可能である。また、◇と◆は同様に壁板の主筋降伏を確認した点であり、若干変形に差異があるものの実験で確認された破壊に至るメカニズムについても、同様に確認することができる。

履歴特性については、実験結果に比べて履歴ループにおけるふくらみが若干小さくなる結果となったが、本構造の特徴であるスリップ型の履歴特性を概ね再現している。

図-9のA領域は、壁板の主筋が曲げ降伏した後の履歴において、壁板脚部で抜け出したアンカーボルトがスリップして元の位置に戻るのに対して、壁板の残留変形により壁頭部変位にも残留が生じることを示しており、それまでの履歴特性と異なる挙動を示す領域である。単体壁試験体において特に顕著な現象であるが、解析においてもこの挙動を再現している。

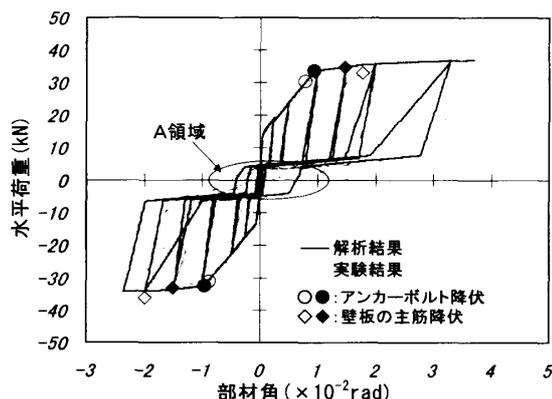


図-9 単体壁試験体の解析結果

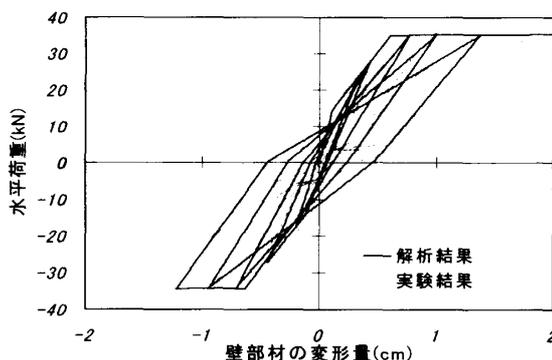


図-10 水平荷重—壁部材の変形量関係

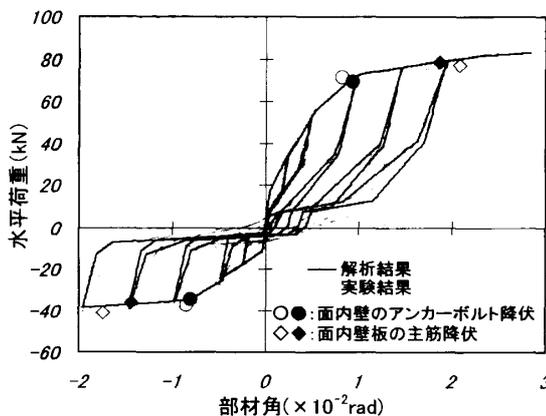


図-11 T型直交壁試験体の解析結果

図-10は、水平荷重と壁部材の変形量の関係を表したものである。実験では除荷時の低荷重域において若干のスリップ現象を示し、差異は生じているが、実験に近い解析結果となっており、復元力特性を Takeda モデル⁵⁾とした壁部材の曲げ変形特性が概ね妥当であることを確認した。なお、壁部材の変形量は、壁頭部の水平変位から壁脚部における回転変形による変位相当分をマイナスすることにより求めた。

4.2 T直交壁試験体

T直交壁試験体壁頂部の水平荷重—水平変位

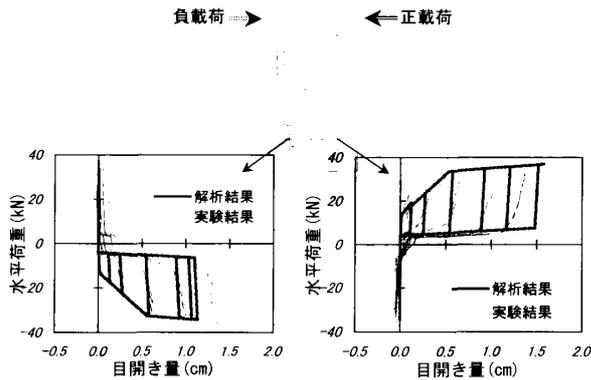


図-12 単体壁試験体接合部の挙動

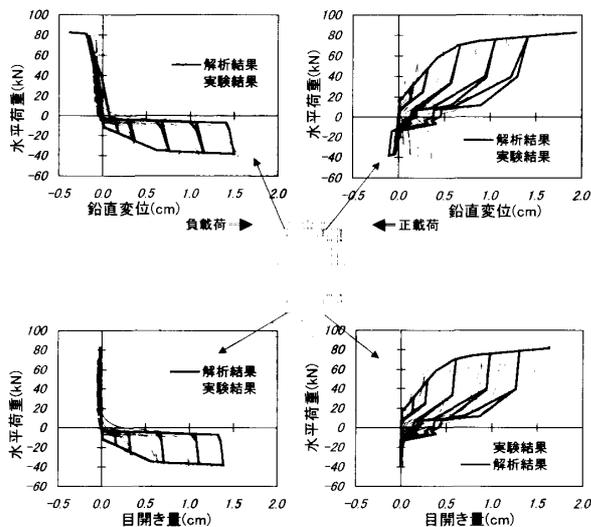


図-13 T型直交壁試験体接合部の挙動

関係における実験と解析の比較を図-11に示す。図中の表記は図-9と同様である。単体壁と同様に包絡線における剛性、降伏に至るメカニズム及びスリップ型履歴特性を解析により概ね再現が可能である。

T直交壁試験体においては、直交壁効果による耐力上昇が特徴である。直交壁における耐力上昇は、構面内壁の回転で床が押し上げられることにより直交壁の頭部縦縫いボルトに引張力が生じ、その反力が構面内壁頂部の隅角部に軸力として作用することによって壁板の曲げ耐力が上昇すること³⁾が確認されている。部材モデルは、壁板頭部接合部において縦リブの中心位置に圧縮軸バネを設置し、構面内壁の回転による床の押し上げを考慮している。その結果、アンカーボルト降伏時における変形・耐力ともに実験に近い結果となり、直交壁効果による耐力上

昇を再現している。

4.3 接合部の挙動について

単体壁及びT型直交壁試験体の壁板接合部の水平荷重-目開き量(鉛直変位)関係における実験と解析の比較をそれぞれ図-12及び図-13に示す。

ともに、部材角1/100サイクルあたりまでの荷重-変位関係においてほぼ実験結果と同様な挙動を示しており、接合部の挙動についても解析により概ね把握可能であることを確認した。

5. まとめ

単体壁及びT型直交壁試験体に関する静的非線形増分解析により以下のことを確認した。

- (1) 単体壁及びT型直交壁ともに実験の耐力及び変形を再現できる。
- (2) 実験におけるアンカーボルト及び壁板主筋の降伏に至るメカニズムを再現できる。
- (3) 壁板接合部にスリップ型履歴特性を持つ弾塑性引張軸バネと圧縮軸バネを用いることにより、スリップ型の履歴特性を再現できる。
- (4) 壁板接合部についても、実験結果に近い挙動を表すことができる。

以上より、本研究における部材モデルはリブ付壁板の単体壁及びT型直交壁の構造特性を概ね再現できることが確認できた。

参考文献

- 1) 型式適合認定「ウベハウスA H13.11.30」設計図書
- 2) 河本孝紀, 倉本洋ほか: リブ付コンクリート壁板の構造性能に関する実験研究, コンクリート工学年次論文集 Vol.25, No.2, pp.811-816, 2003.7
- 3) 河本孝紀, 倉本洋ほか: リブ付コンクリート壁板で構築されたT型直交壁の構造性能に関する実験研究, 構造工学論文集 Vol.50B, No.12, pp.97-104, 2004.3
- 4) 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説(1999)
- 5) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)
- 6) プレハブ建築協会: 低層コンクリート系住宅限界耐力計算法検討委員会最終報告書, pp.5-7, 2003.3