

論文 リブ付コンクリート壁板で構築された連続壁の構造性能に関する研究

小野川 章啓^{*1}・河本 孝紀^{*2}・尾崎 純二^{*3}・倉本 洋^{*4}

要旨：限界耐力計算の対象となる「リブ付コンクリートパネル造」における主要構造部材の1つである連続壁の構造性能を把握し、静的非線形増分解析に適用可能な復元力モデルを構築することを目的として水平加力実験を実施した。本論では、連続壁を形成することで構面内壁にそれぞれ反曲点が生じ、床リブに作用する押え軸力によって耐力上昇の効果があり、その曲げ降伏耐力は押え軸力を考慮することで既往の略算式により評価できること、また、連続壁の等価粘性減衰定数が7%程度であることなどを示す。

キーワード：リブ付，プレキャスト，耐力壁，限界耐力計算

1. はじめに

本研究で対象とする「リブ付コンクリートパネル造」(以下「リブ付パネル造」と略記)は、量産公営住宅をベースとした2階建低層コンクリート系工業化住宅に用いられる。この構造は、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立てる壁式構造である。

このリブ付パネル造はリブ付コンクリートパネルの平均壁厚さが12cm以下であり、建築基準法の仕様規定に抵触していたが、第38条により特殊構造物として建設が可能となっていた。しかし、1998年6月の基準法改正で第38条が削除されたことにより、2000年6月に施行された限界耐力計算による構造設計を余儀なくされた。従来建設されていた範囲の構造は、限界耐力計算により型式適合認定を取得することで建設が可能となっていたが、その範囲外の新しい構造については実験的研究データが不足しているため限界耐力計算が適用できない状況にある。

そこで、限界耐力計算に用いることができる静的非線形増分解析に適用可能な復元力モデルを構築するためには、リブ付パネル造における

主要構造部材の構造性能を把握することが必要である。本研究はその一環^{1) 2)}として実施したもので、リブ付パネル造における連続壁の構造性能を把握することを目的としている。

本論ではプレキャスト鉄筋コンクリート住宅から連続壁の部分を取り出した水平加力実験の概要および連続壁の耐力、変形性能、メカニズム、反曲点の有無および等価粘性減衰定数についての検討結果を示す。

2. 実験概要

2.1 試験体

各試験体の形状および使用した接合ボルトを表-1および図-1に、床板の配置を図-2および接合部詳細を図-3にそれぞれ示す。

試験体は2階建住宅における1階部分の連続壁を想定したものである。試験体に使用した耐力壁はリブ付コンクリートパネルで、幅897mm×厚さ120mm(シェル厚46mm)×高さ2700mmとした。試験体は2種類あり、壁板2枚を連続してボルト接合した試験体No.1と壁板3枚を連続してボルト接合した試験体No.2である。なお、図-2に示すように試験体No.1の床は構面内壁

*1 豊橋技術科学大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*2 榊宇部三菱セメント研究所 宇部センター (正会員)

*3 ウベハウス株式会社 営業本部 技術部 技術課 (正会員)

*4 豊橋技術科学大学 工学部建設工学系 助教授 博士(工学) (正会員)

に短辺架けとし、試験体 No. 2 の床を構面内壁に長辺架けとした。また、両試験体とも側面に座屈防止のためのたれ壁および腰壁を床板および基礎にそれぞれボルト接合している。

壁の配筋は縦リブ部主筋を 2-D13 (SD295A) およびシェル部補強筋を 2.9Φ@60 メッシュとし、床の配筋はリブ部主筋を 2-D13 (中央リブは 4-D13) およびシェル部補強筋を 2.9Φ@100 メッシュとしている。各部材間の接合部はそれぞれ壁-基礎を無収縮モルタル充填併用のアンカーボルト接合 (2-D19 (SD295A)), 壁-床を無収縮モルタル充填併用の縦縫いボルト接合 (2-16Φ (SS400)), 壁-壁を横つなぎボルト接合 (3-13Φ (SS400)), および床-床を横つなぎボルト接合+シャコッター接合 (13Φ) とした。なお、コンクリートおよび充填モルタルの設計基準強度は 30N/mm² とし、鉄筋およびコンクリートの材料試験結果を表-2 および 3 に示す。

2.2 実験方法

載荷装置を図-4 に示す。試験体は反力床上に T 型の基礎を相対して設置し P C 鋼棒で固定している。

表-1 連続壁の構成

試験体	耐力壁の断面 (mm)	接合		
		アンカーボルト	縦縫いボルト	横つなぎボルト
No.1	幅897 ×厚120(シエル46) ×高さ2700	2-D19 (SD295A)	2-16φ (SS400)	3-13φ (SS400)
No.2				

表-2 鉄筋の材料特性

部位 仕様	アンカーボルト接合ボルト		主筋	せん断補強筋
	D19 SD295A	16φ SS400	D13 SD295A	2.9φ SWM-P
断面積	(mm ²) 286.5	201	127	6.6
降伏応力	(N/mm ²) 349	318	362	913*
降伏歪	(μ) 2697	1716	1936	3720*
破断強度	(N/mm ²) 510	369	520	965
伸び率	(%) 15.0	50.5	14.2	-
弾性係数	x10 ⁵ (N/mm ²) 1.81	1.84	1.9	1.46

* : 0.2% オフセット

表-3 コンクリートの材料特性

試験体名	コンクリート(PC部)		グラウト(接合部)	
	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm ²)	材齢(日)	圧縮強度 (N/mm ²)
No.1	30	33.55	6	60.59
No.2	30	38.19	3	56.26

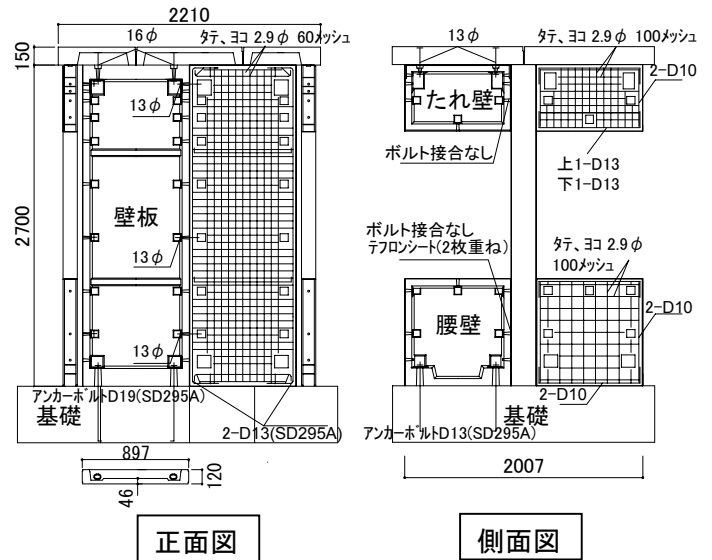
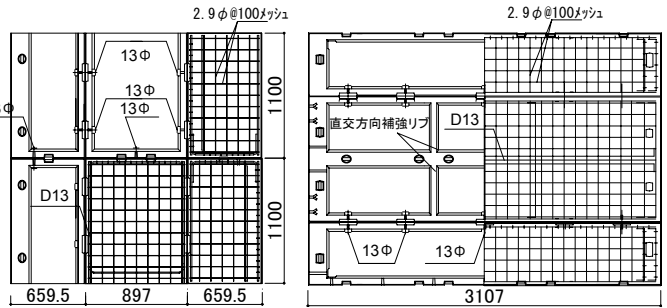


図-1 No. 1 試験体図



No. 1 (短辺架け)

No. 2 (長辺架け)

図-2 床面図

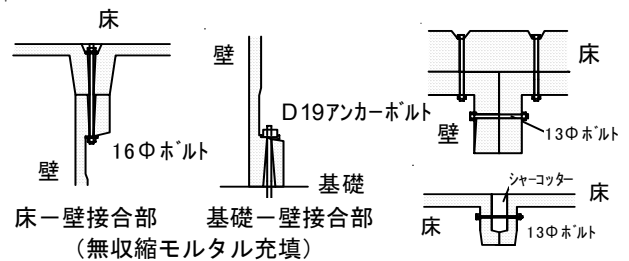


図-3 接合部詳細図

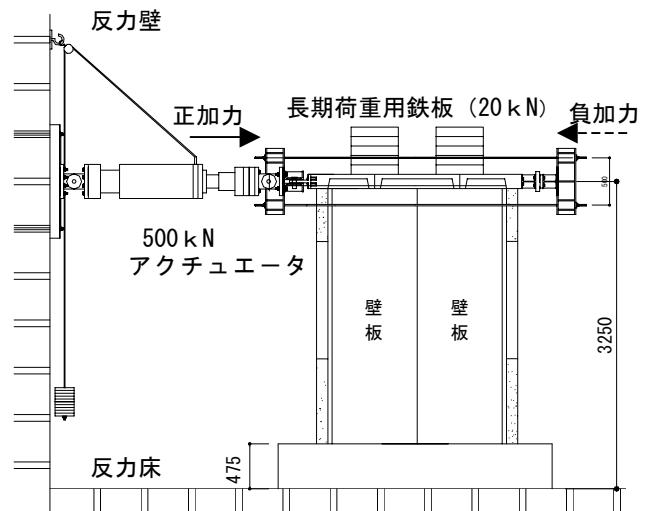


図-4 載荷装置図

加力はおもりにより長期負担軸力に相当する 20kN の一定軸力を負荷した後、500kN アクチュエータにより水平力を載荷した。なお、載荷は壁板上部変位測定点と基礎天端間の相対変位をその距離で除した値である相対部材角（以下、R と略記）で制御し、表-4 に示す載荷計画によった。

3. 実験結果

3.1 ひび割れおよび破壊性状

両試験体の最終破壊状況を図-5 にそれぞれ示す。変位振幅の増大に伴う破壊の進行状況は以下の通りである。また、実線を正加力時に発生するひび割れとし、点線を負加力時におけるひび割れとした。

最大変位振幅が 1/800rad. の載荷サイクルで右側柱脚部に曲げひび割れが発生した後、R=1/400 rad. のサイクルで左側柱脚部に曲げひび割れが発生した。

R=1/200 rad. のサイクルで、試験体 No. 1 は壁-壁接合部頭部の床リブに縦縫いボルトに沿った付着ひび割れ (47.2kN) が発生し、試験体 No. 2 は右側・中央側壁頂部に曲げひび割れ (103.4kN) が発生した。

R=1/100 rad. のサイクルで壁脚部から壁せい の 1/3 の範囲にわたり曲げひび割れが発生し、壁脚部に引張側アンカーボルトに沿った付着ひび割れ（試験体 No. 1 : 65.2kN, 試験体 No. 2 : 163.51kN）が発生した。また、試験体 No. 1 では壁-壁接合部頭部の床リブに、壁板の押し上げによるパンチング破壊が発生した。

R=1/67 rad. から R=1/50 rad. のサイクルで壁脚部に曲げせん断ひび割れおよびせん断ひび割れが発生した後、ひび割れは進展し、ひび割れ幅が R=1/50 rad. のピーク時に試験体 No. 1 で 0.15mm, 試験体 No. 2 で 0.35mm と拡大した。

両試験体ともに R=1/33rad. の負載荷サイクルで引張側主筋定着部コンクリートの側方割裂破壊により耐力が低下した（図-5 の○印部分）。

特徴として試験体 No. 1 は正負載荷ともに左右

の壁で同じようにひび割れが発生しているのに対して、試験体 No. 2 は中央壁にひび割れが集中して発生している。また、試験体 No. 2 は構面内壁の回転を縦縫いボルトが抑制することにより、曲げ戻しひび割れが発生したことから反曲点が生じていると考えられる。

3.2 せん断力-水平変形関係

試験体 No. 1 および No. 2 の水平荷重と水平変形の関係を図-6 および 7 にそれぞれ示す。また、比較のため文献¹⁾ に示す実験から得られた壁板単体の耐力を 2 倍および 3 倍したものを灰色線で示している。

両試験体ともに R=1/800 rad. で初期剛性の低下がみられ、R=1/400 rad. から 1/200 rad. でひび割れを生じながら耐力が増加し、正負載荷ともに R=1/100 rad. でアンカーボルトが引張降伏した。その後、R=1/50 rad. (1 回目のサイクル) で最大耐力に達し、R=1/33 rad. で耐力は低下した。

壁単体試験体と比較すると、単体はアンカーボルトが降伏後に耐力の上昇がほとんどみられないのに対して、連続壁を形成した両試験体はアンカーボルトが降伏後も耐力が著しく上昇している。また、単体の耐力を枚数倍するより連続壁に形成したほうが耐力は大きいことがわかる。これらより連続壁を形成することで耐力上昇の効果があると考えられる。

表-4 載荷計画

サイクル(回)	1	1	2	2	2	2	1
部材角(rad.)	1/800	1/400	1/200	1/100	1/67	1/50	1/33

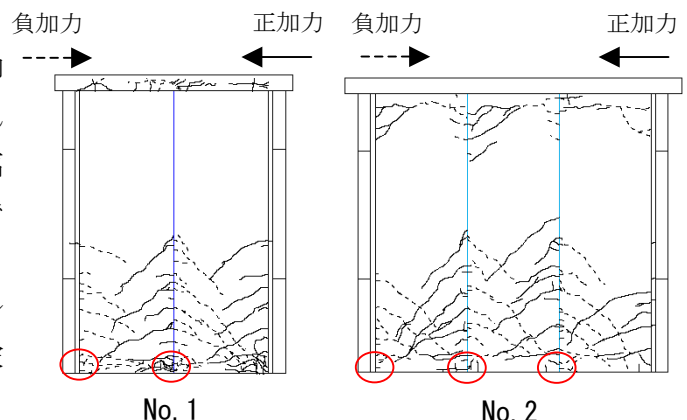


図-5 破壊状況図

3.3 等価粘性減衰定数

両試験体の履歴ループから得られた等価粘性減衰定数と相対部材角の関係を図-8に示す。同図は同一変位振幅における1回目と2回目のループから得られたものを示す。両試験体とも2回目のループから得られた等価粘性減衰定数が $R=1/100$ rad. 以降に7%程度の一定値を示すことから、限界耐力計算において採用する連続壁の等価粘性減衰定数としては7%程度が妥当であると考えられる。

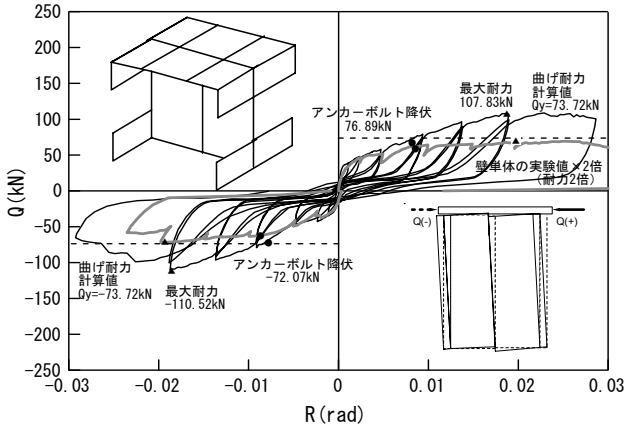


図-6 No. 1 Q-R 曲線

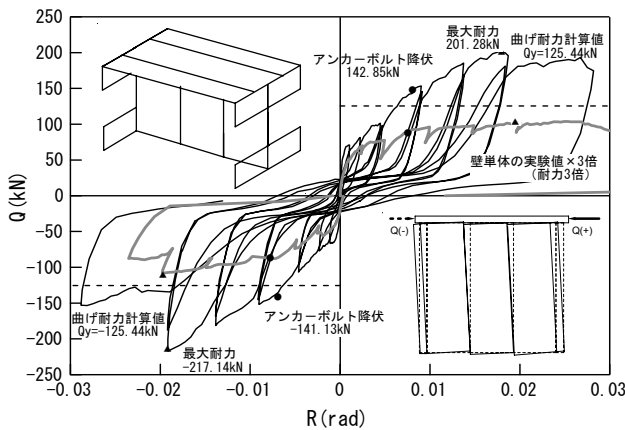


図-7 No. 2 Q-R 曲線

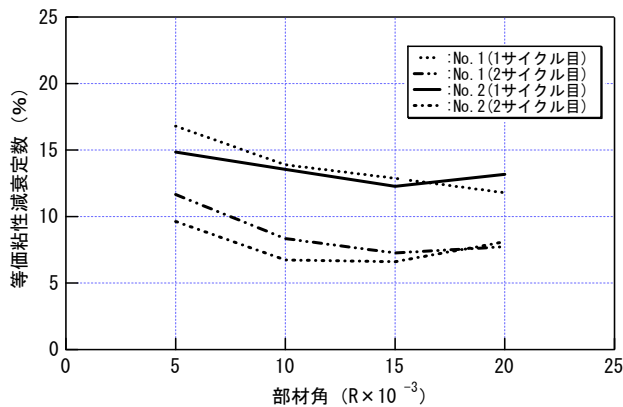


図-8 等価粘性減衰定数

4. 連続壁の考察

4.1 連続壁による耐力上昇のメカニズム

実験結果に基づいて推定した、連続壁による耐力上昇メカニズムの概念図を図-9に示す。同図は、耐力壁Bの頂部で引張力を受ける側に耐力壁Aが存在する場合、耐力壁Bが回転すると生じる縦縫いボルトの引張力 (N_t) により、床リブに耐力壁Aの浮き上り力 (N_u) を拘束する押え軸力 (T_j) が発生し、この押え軸力が耐力壁Aの浮き上りを拘束することにより壁全体の耐力が上昇すると仮定したものである。

各試験体の構面内壁の回転により生じる耐力壁B 頂部縦縫いボルトの引張力 (N_t) と耐力壁Aの基礎からの浮き上り ($\Delta\delta$) の関係を図-10および11にそれぞれ示す。

図-10および11より各試験体ともに $\Delta\delta$ が大きくなるにつれて、 N_t も大きくなっている。これは、構面内壁が回転すると同時に床を押し上げ、その反力として耐力壁頂部縦縫いボルトに引張力が生じていると仮定している上記の考え方を裏付けるものである。

また、図-10より試験体No. 1で $R=1/200$ rad. (2回目のサイクル) 以降に N_t が上昇していない。これは図-5の破壊状況図より、試験体No. 1の壁-壁接合部頭部の床リブにせん断ひび割れ、パンチング破壊が発生していることから、床リブが破壊されたことにより壁板頂部縦縫

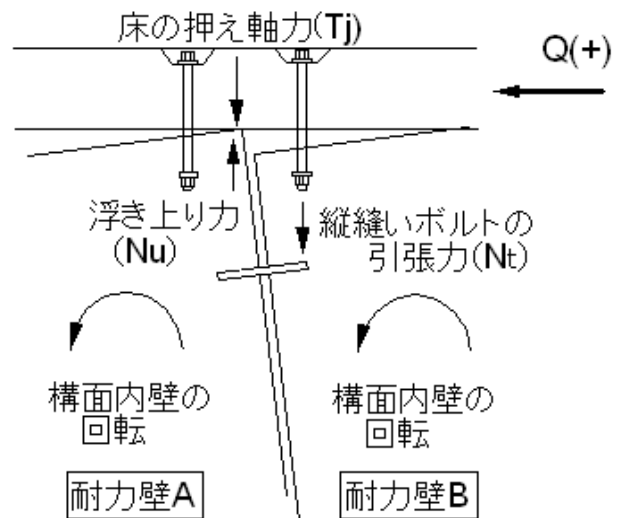


図-9 連続壁効果による耐力上昇の概念図

いボルトの引張力が床リブに伝達していないものと推察される。したがって、試験体 No. 1 のように床リブがせん断破壊する場合には、連続壁効果による耐力の上昇があまり期待できない。なお、図-11 より試験体 No. 2 では、耐力壁が浮き上るにつれ N_t も $R=1/67rad.$ まで上昇し降伏していることが確認される。

以上より連続壁効果の押え軸力による耐力上昇メカニズムは、床リブのパンチングシア耐力と縦縫いボルトの引張耐力の小さい方で決定されると考えられる。

4.2 挙動の違いについて

試験体 No. 2 の正加力時における各壁の水平力に対する抵抗力を表す概念図を図-12 に、試験体 No. 2 における壁-壁鉛直接合部の壁同士のずれ量と水平力の関係を図-13 に示す。

図-12 の概念図では試験体 No. 2 のひび割れ発生状況から各壁が負担する水平力に差がみられると仮定して、各壁に作用する抵抗力をそれぞれ想定した。

中央壁および左側壁においては、既往の鉛直接合部の実験³⁾により、壁相互のずれが 10mm 以上になると横つなぎボルトが効き始めるという結果に基づくと、図-13 に示すように、壁-壁間の横つなぎボルトのずれ量が 10mm 以上に相当する $R=1/67rad.$ から抵抗しはじめ、床の押え軸力に当該ボルトによる押え力 (N_{yd}) が付加されたものと考えられる。しかし、右側壁では柱型が脚部で固定されておらず柱型が浮き上り、押え力が働かないと考えられる。

次に、図-5 の試験体 No. 2 における各壁頭部左側の曲げ戻しのひび割れ発生状況から、右側および中央壁は構面内壁の回転により、縦縫いボルトが $R=1/200rad.$ で効き始め、さらに図-13 より $R=1/67rad.$ で横つなぎボルトが効き始めたことで浮き上り力 (N_{yu}) が生じたと推察される。また、左側壁では $R=1/67rad.$ で縦縫いボルトが効き始めると推察される。

以上より、中央壁→左側壁→右側壁の順に抵抗力が多く作用することに伴いひび割れも多

く発生していることから、作用する抵抗力の状態で負担水平力に差が生じるという考え方が妥当であると考えられる。

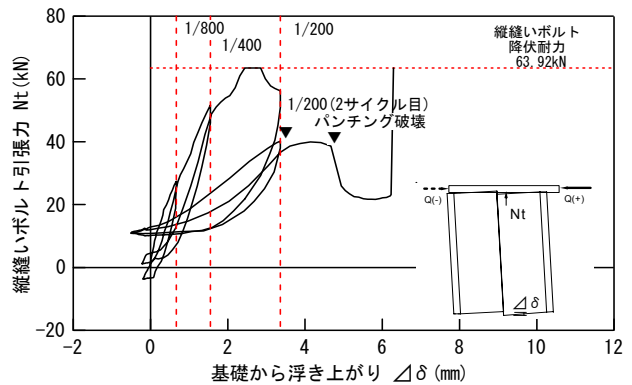


図-10 No. 1 縦縫いボルト引張力-壁脚部浮上り

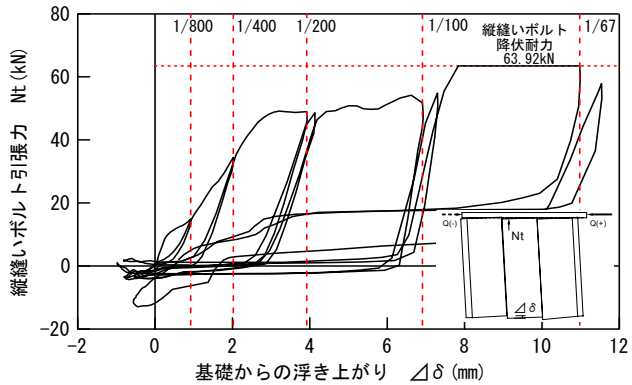


図-11 No. 2 縦縫いボルト引張力-壁脚部浮上り

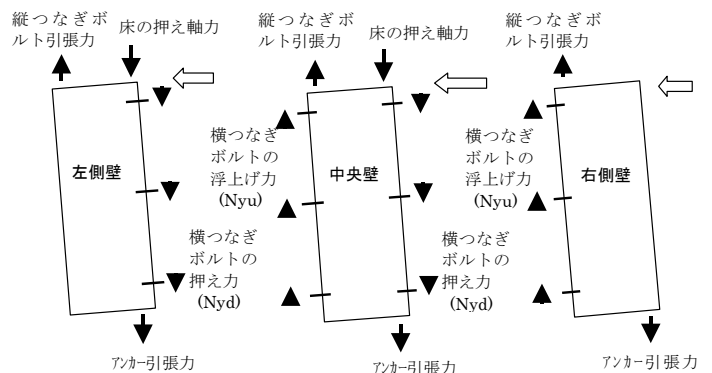


図-12 No. 2 各壁に作用する抵抗力の概念図

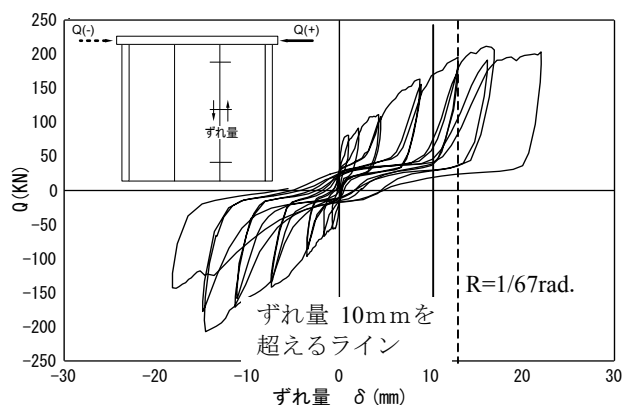


図-13 No. 2 壁-壁鉛直接合部のずれ量

4.3 曲げ降伏耐力について

押え軸力を考慮した壁板単体の精算（軸力を変動因子とし、平面保持の仮定による曲げ解析）による壁板脚部の降伏モーメント（Mu）に、壁板頭部の押え軸力による曲げ戻しモーメント（Mr）を考慮して算出したせん断力（Q）と変動軸力（N）の相関関係を図-14 に示し、右上に応力図をあわせて示している。なお、比較のため図中に連続壁で押え軸力が作用している壁板単体のせん断力を実験計算値としてプロットしている。また、アンカーボルト降伏時の水平荷重を実験値（eQy）とし、連続壁による反曲点および押え軸力を考慮して算出した略算値（cQy）との比較を表-5 に示す。

図-14 より両試験体ともに実験計算値が精算曲線に概ね対応しており、また、表-5 より略算値と実験値が概ね対応している結果となった。以上より床のパンチングシア耐力と縦縫いボルトの引張耐力を考慮することで概ね連続壁の曲げ降伏耐力を評価できると考えられる。

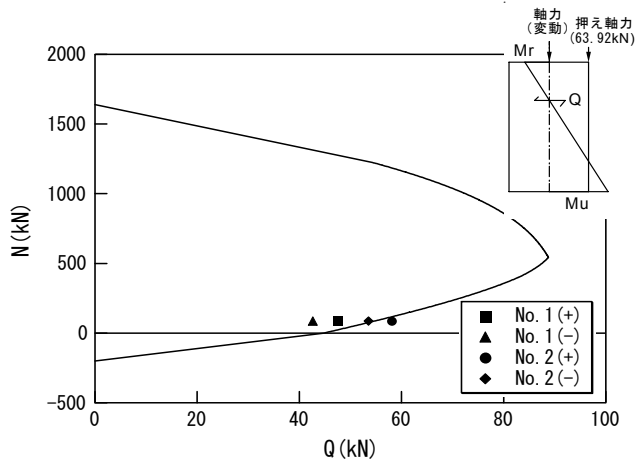


図-14 壁単体 N-Q 相関図

表-5 曲げ降伏耐力の比較

試験体	方向	実験値 eQy(kN)	略算値 cQy*(kN)	比較 eQy/cQy
No.1	+	76.89	73.72	1.04
	-	-72.07	-73.72	0.98
No.2	+	142.85	125.4	1.14
	-	-141.18	-125.4	1.13

*：略算値 cQy は式 (1) による。

$$cQy = (\sum cMya + \sum cMyb) / h \quad (1)$$

$$cMya = at \cdot \sigma_y \cdot j + 0.5 \cdot N \cdot j + 0.9 \cdot N_{T1} \cdot D \quad (2)$$

$$cMyb = at \cdot \sigma_y \cdot j + 0.5 \cdot N \cdot j \quad (3)$$

at : アンカーボルトの断面積 287(mm²)
 σ_y : アンカーボルトの降伏応力 349(N/mm²)
j : 応力中心間距離 0.74(m)
N : 一定軸力 20,000(N)
D : 壁の圧縮縁から床押え軸力作用位置までの距離(m)
N_{T1} : min (N_{St}, N_{Bt}) : No.1 の場合
N_{St} : 床リブのパンチングシア耐力 52.68 (kN)

$$N_{St} = \kappa_{av} \cdot \tau_0 \cdot b_0 \cdot D$$

N_{Bt} : 縦縫いボルトの引張耐力 63.92(kN)
備考) No.2 は N_{Bt} で N_{T1} が決定される。
h : 載荷点高さ 2,775(mm)

ここで、押え軸力の効果を受ける壁の曲げ耐力は cMya の式 (2) で、押え軸力の効果を受けない壁の曲げ耐力は cMyb の式 (3) で算出する。

5. まとめ

連続壁の効果을把握することを目的とした構造実験に基づいて検証を行った結果より、以下の知見を得た。

- 1) 連続壁が実験の範囲内では部材角 1/50 程度の変形に耐えることを確認した。
- 2) 限界耐力計算において採用する連続壁の等価粘性減衰定数は 7% 程度が妥当である。
- 3) 連続壁を形成することにより反曲点が生じ、床リブに押え軸力が発生することで壁の曲げ降伏耐力が上昇する。その押え軸力は床リブのパンチングシア耐力と縦縫いボルトの引張耐力の小さい方で決定される。
- 4) 連続壁では押え軸力の効果と横つなぎボルトおよび縦縫いボルトの効きによりそれぞれの壁が負担するせん断力が異なる。
- 5) 連続壁の曲げ降伏耐力は押え軸力を考慮することで式 (1) により評価できる。

参考文献

- 1) 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 Vol25, No.2, 2003
- 2) 河本孝紀, 倉本洋ほか: リブ付コンクリート壁板で構成された T 型直交壁の構造性能に関する実験研究, 日本建築学会構造工学論文集 Vol.5
- 3) 河本孝紀, 倉本洋ほか: リブ付コンクリートパネル工法の鉛直接合部せん断実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集 C-2 構造IV, pp.657-658, 2002