

論文 ダウエル鉄筋で周辺骨組に接合されたプレキャストコンクリート非構造パネルの水平加力実験

大久保 香織^{*1}・Darama Hüseyin^{*1}・田村 和夫^{*2}・塩原 等^{*3}

要旨：ダウエル鉄筋により周囲の骨組と接合されるプレキャストコンクリート7体の非構造パネル試験体を作製した。実験変数は、接合部の位置や個数，スリット幅，鉄筋の種類，定着方法である。試験体を柱と梁に模擬し，それらの交差部をピンとした長方形加力フレーム中に設置して静的漸増振幅繰返し載荷実験を行った。これらの試験体の剛性，強度，変形能などの実験結果を報告すると共に，PCa 間仕切壁は中小地震に対しそのダウエル鉄筋によって一定のエネルギーを消費できることを確認した。その強度および変形能は実験変数を変えることにより変化させることが可能であった。

キーワード：プレキャストパネル，非構造壁，ダウエル鉄筋，接合部

1. はじめに

鉄筋コンクリートで作られる壁のうち構造部材として積極的に利用しない部分である間仕切り壁などの非構造壁は，構造計算で無視し構造解析に取り入れられない慣行が長い間行われてきた。

1) しかし実際には地震時に建物の構造性能に深く関わっていることが過去の地震被害や関連する研究により明らかになっている。2) 特に柱や梁と非構造壁が連続している場合には，柱や梁部材の短スパン化による脆性を誘発したり，建物の偏心や特定の層の剛性上昇を招いたりして，構造骨組の耐震性能の把握を困難にし，場合によっては悪影響も及ぼす。そこで最近では構造体と分離する完全スリット付の非構造壁が定着

しつつある。完全スリット付きの非構造壁は地震力などの面外方向力に対して脱落することのないよう，何らかの方法で固定しておく必要があるが，構造設計ではそれらの固定材料の剛性やエネルギー消費などの影響は考慮されていない。そこで本研究では，プレキャストコンクリート（以下 PCa）板と周囲の柱や梁を，ダウエル鉄筋を介して接合する工法を対象に，非構造壁が建物耐震性能に及ぼす影響を検討するための基礎的資料を得ることを目的として，非構造壁をモデル化した7体の実大の試験体を作製し，接合部の位置や個数，完全スリットの幅，鉄筋の定着方法を変数とした静的漸増振幅繰返し載荷実験を行い，それらの強度や復元力特性に関

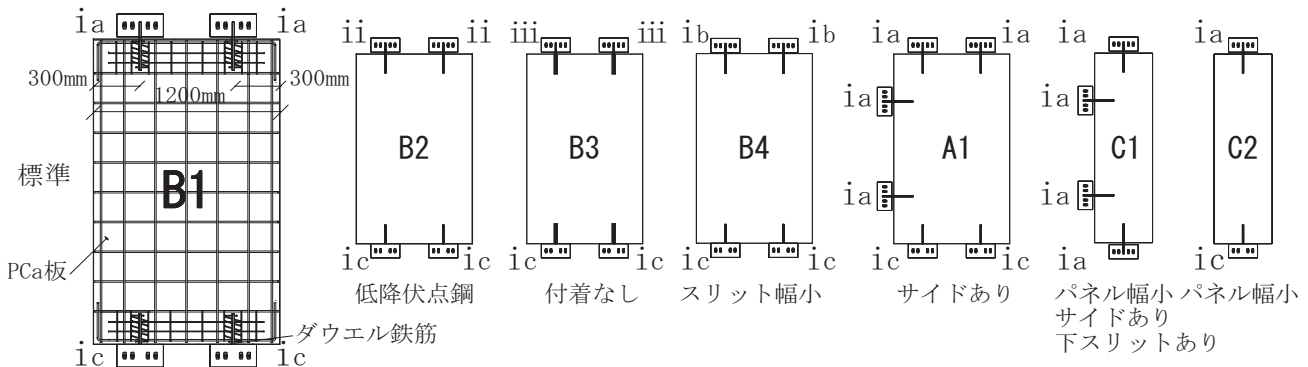


図 - 1 試験体諸元

接合部の詳細は図 - 2 に示す

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (正会員)

*2 清水建設(株) 技術研究所施設基盤技術センター長 (正会員)

*3 東京大学 工学系研究科建築学専攻 助教授 (正会員)

する比較検討を行ったのでここに報告する。

2. 実験計画

2.1 試験体概要と実験変数

都市整備公団の標準仕様書の PCa 間仕切り壁のディテールを参考に、試験体および実験装置を整えた。試験体は側面と上下面に計 3 対のダウエル鉄筋の接合部を有する A シリーズ 1 体 (A1), 上下面のみそれぞれ 1 対の接合部を有する B シリーズ 4 体 (B1, B2, B3, B4), 上下面に 1 つずつ接合部を有する C シリーズ 2 体 (C1, C2) の計 7 体である。実験の変数は、ダウエル鉄筋の数と位置、パネルの寸法、使用鉄筋の種類、付着の有無、および PCa パネル上端とダウエル鉄筋下端間の距離 (以下スリット幅) である。図 - 1 に試験体の諸元を、図 - 2 と図 - 3 にダウエル鉄筋の種類と詳細を示す。PCa パネルの高さ 2000mm, 厚さ 120mm は共通項目で、配筋は一般的なものとした。B シリーズでは標準となる異形鉄筋 D13 を用いた試験体 B1, 低降伏点鋼鉄筋を用いた試験体 B2, 鉄筋の付着をなくした試験体 B3, 上端スリット幅が試験体 B1 の半分である B4 で、ダウエル筋の種類の違いを検討する。試験体 A1 では B1 に側面接合部を追加した。試験体 C1 は下端にもスリットを入れてあり、試験体 C2 は B1 を二等分にしたものである。コンクリートの割裂破壊を回避するため、ダウエル鉄筋のかぶり厚さは鉄筋径の 6 倍以上とし、拘束のためのスパイラル筋を用いた。コンクリートの埋め込み深さ (200mm) は共通である。ただし、丸鋼を用いた試験体 B2 では端部にフックを設けた。試験体の材料特性を表 - 1 と表 - 2 に示す。

2.2 加力履歴と試験装置

加力には地震力を受けて生ずる層間変形を受けるラーメン構造の内側に配置された非構造壁を模擬するため、図 - 5 のような 4 つのピンと 4 つの剛強な鉄骨梁からなる機構を用いた。変位とフレームの変形概念図を図 - 6 に示す。上部の水平梁端を油圧ジャッキで加力して水平変位

を与えた。加力履歴を図 - 7 に示す。層間変形角は、加力梁の水平変位を試験体パネルの高さ (2000mm) で除した値とした。加力は、ダウエル鉄筋が降伏すると予想される層間変形角 0.1% までは荷重制御で、それ以降は変位制御で行い、中小地震を想定した層間変形角 0.10%, 0.25%, 0.50% の入力を間に挟みながら層間変形角を 0.25% ずつ増やす繰り返し履歴とした。

表 - 1 PCa コンクリートの材料特性

材齢	圧縮強度 N/mm ²	引張り強度 N/mm ²	ポアソン比
81 日	35.1	2.72	0.221

表 - 2 鉄筋の材料特性

材料	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	破断伸び %
SD295A (標準強度)	354	509	23.2
ELCH2 (低降伏点鋼)	193	307	31.0

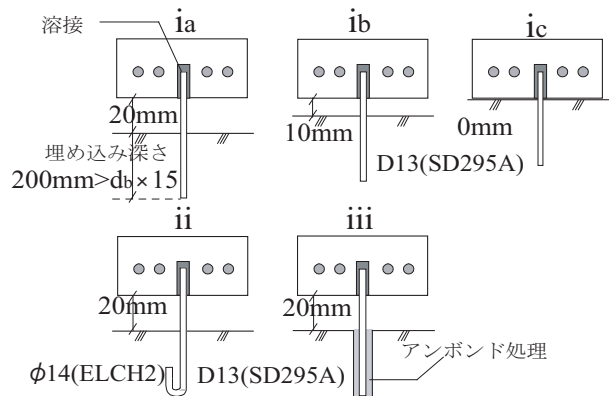


図 - 2 コネクタ種類

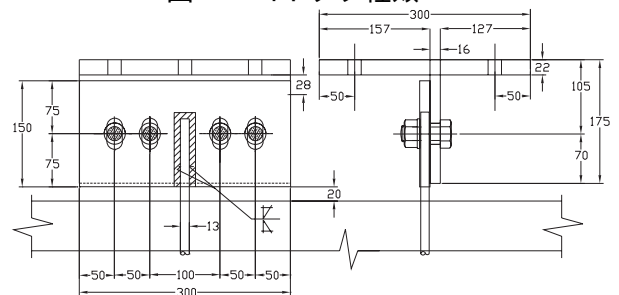


図 - 3 ダウエル鉄筋詳細



図 - 4 ダウエル鉄筋外観

2.3 計測方法

荷重は油圧ジャッキに内蔵されたロードセルによって、変形は変位計によって測定し、ダウエル鉄筋の歪は接合プレートの上端にロゼットゲージを貼り付けて測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

破壊モードにはダウエル鉄筋の降伏とコンクリートの割裂破壊がある。本実験ではどの試験体も、層間変形角が 0.10% (2mm) 前後で剛性が低下し、その後すぐに上端ダウエル鉄筋の鉄筋周りのコンクリートに局所的なひび割れが観察されたが、最終的には鉄筋の破断による破壊が観察された。このとき、どの試験体もパネルと水平梁の接触は観測されなかった。側面にもダウエル鉄筋がある場合には、上端のものより先に側面のダウエル鉄筋が破断する傾向があった。試験体の PCa 板には、曲げひび割れやせん断ひび割れは、実験終了まで生じず健全であった。破壊状況の一例を図 - 8 に示す。

3.2 層せん断力-層間変形関係

図 - 9 に各試験体の層せん断力と層間変形との関係を、表 - 3 に各時点での層せん断力および剛性の実験値を示す。表 - 3 では、層せん断力を Q 、層間変形角を R と表記した。また、番号でその位置と上部ダウエル鉄筋周りのコンクリートにひび割れが入り始めた位置も明示した。

耐力が最も高いのはダウエル接合筋数が多い試験体 A1 で、B1 や B2、B4 より約 15% から 20% 最大耐力が高く、履歴ループも最も大きく幅がある。試験体 B1、B4 は、大地震に対する設計限度と考えられる層間変形角 1.0% (20mm) に達する前に破壊が生じた。試験体 B2 は、他の B シリーズより 30% ほど変形能が大きいという、安定した耐力を示し、履歴曲線のループの面積も大きく、耐力は B1 と変わらなかった。試験体 B3 の耐力は、B1 や B2、B4 に比べると 30% ほど劣るが、2 倍ほどの変形能を持つ。試験体 C1 と C2 は、耐力が A、B シリーズの 4 分の 1 ほどだが、

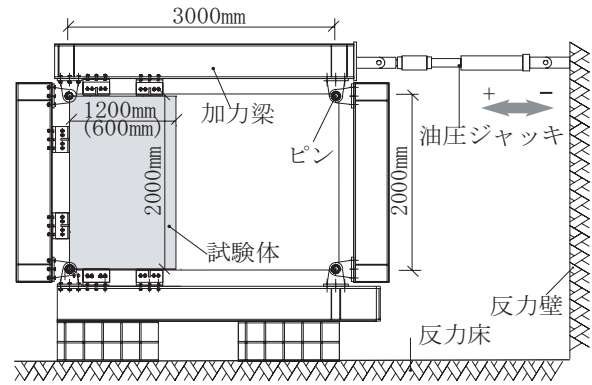


図 - 5 試験装置

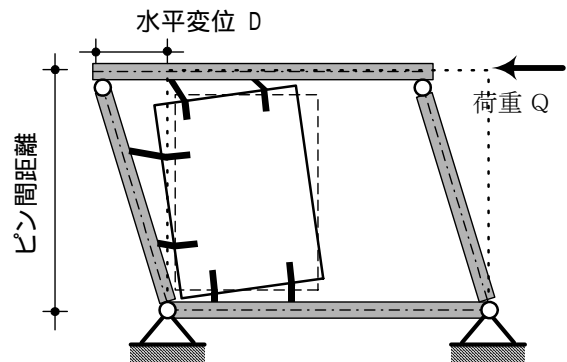


図 - 6 変形概念図

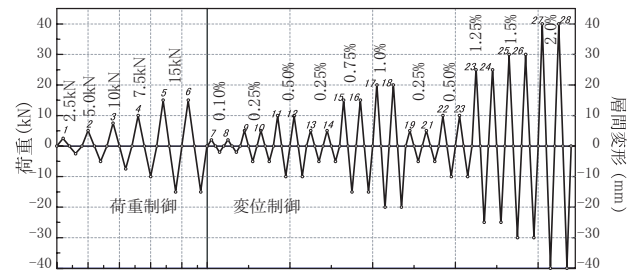
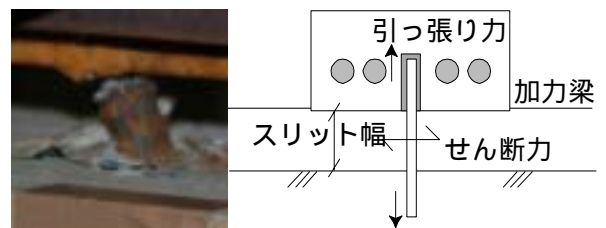


図 - 7 加力履歴



(a) 鉄筋の破断

(b) 発生応力



(c) 下部ダウエル鉄筋

(d) 上部ダウエル鉄筋

図 - 8 破壊状況と発生応力

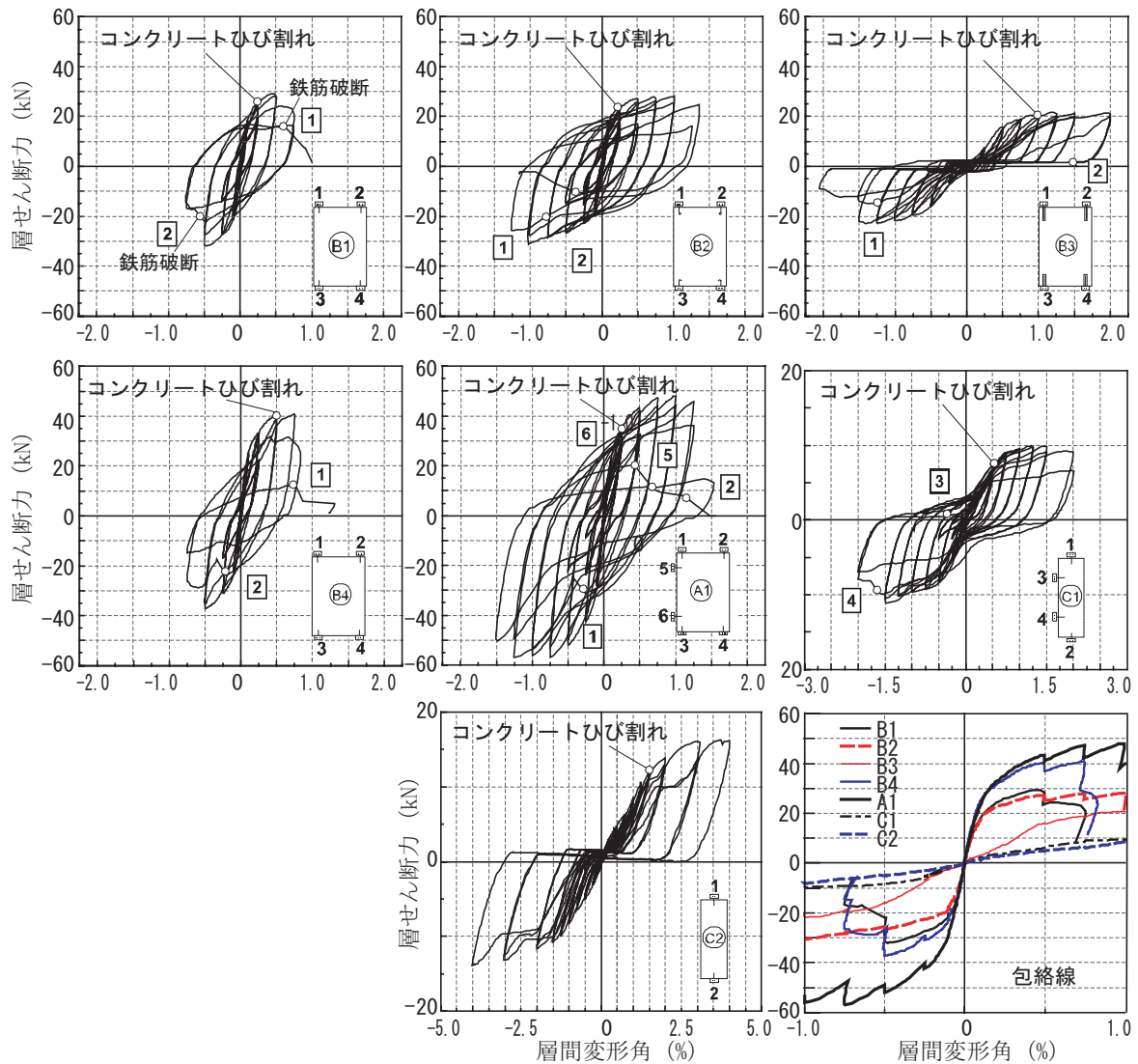


図 - 9 層せん断力-層間変形関係

大変形まで安定した性能を示し、A や B シリーズと異なる特有の履歴曲線を示した。これは、C シリーズでは上端ダウエル鉄筋が 1 つであることが理由と考えられる。

3.3 初期剛性

初期剛性は、鉄筋の付着がない試験体 B3，下端にもスリットが入った C1，ダウエル鉄筋数が半分の試験体 C2 で極めて小さく、B4 がやや高かった。試験体 B3 と C2 には履歴にスリップ形状が見られた。

試験体 B1 と B4 の結果より、スリット幅は変形能には影響しないが、小さいと初期剛性が高まり、最大耐力が上昇した。両者の履歴ループの太さはほぼ同じであり、試験体 B4 のほうが縦方向により長い。

3.4 破壊過程

試験体ごとにその破壊に至る過程で見られた特徴について検討する。試験体 B1 は、層間変形角が 1.0%に達する以前に、上端 2 つのダウエル鉄筋がパネルの溶接部で破断し、耐力が低下した。最大耐力は層間変形角が 0.50%の時に 30kN あったが、層間変形角 - 0.75%の 1 サイクル目におけるダウエル鉄筋 2 の破断で 20kN ほどに、層間変形角 1.0%の 1 サイクル目におけるダウエル鉄筋 1 の破断でほぼゼロになった。

試験体 B4 も層間変形角が 1.0%以前にダウエル鉄筋が破断した。しかし耐力の増加が層間変形角 0.75%まで続いた。最大耐力は、0.75%の時 40kN ほどだったが、層間変形角 - 0.75%の 2 サイクル目におけるダウエル鉄筋 2 の破壊でピー

表 - 3 実験結果一覧

試験体		最大耐力時		最初のダウエル鉄筋		最大せん断力(kN)		初期剛性 kN/mm
		Q(kN)	R(%)	Q(kN)	R(%)	R=0.50%	R=1.0%	
A1	正	47.9	1.00	-53.8	-1.00	41.8	47.9	16.0
	負	-56.6	-0.75			-52.0	-56.1	16.5
B1	正	28.5	0.50	-15.0	-0.75	28.5	-	15.6
	負	-31.5	-0.50			-31.5	-	17.6
B2	正	28.2	1.00	24.7	1.25	27.0	28.2	15.9
	負	-31.4	-1.00			-26.5	-31.4	20.7
B3	正	21.0	1.25	-13.9	-1.50	15.7	20.6	1.5
	負	-22.5	-1.25			-16.0	-21.6	1.3
B4	正	40.4	0.75	-14.6	-0.75	40.1	-	23.8
	負	-36.9	-0.50			-36.9	-	22.1
C1	正	9.9	1.25	-7.0	-2.00	6.4	9.4	1.1
	負	-10.9	-1.50			-8.3	-9.6	0.9
C2	正	16.2	4.00	16.2	4.00	9.4	8.5	0.8
	負	-13.9	-4.00			-9.6	-8.2	0.8

クの復元力は 25kN ほどに減少した。ダウエル鉄筋 1 は、層間変形角 1.0%の 1 サイクル目で破断した。履歴ループはやや縦に長いものになった。

試験体 B2 は、層間変形角 1.0%までほぼ一定の耐力 25kN を保った。その後層間変形角 1.25%の 1 サイクル目におけるダウエル鉄筋 1 の破断で、次の 2 サイクル目において耐力が 15kN ほどに落ち込み、層間変形角 - 1.25%の 2 サイクル目においてダウエル鉄筋 2 が破断した。

試験体 B3 は、履歴ループにスリップ形状が現れた。最大耐力は 20kN と小さいが、大変形にも耐力を示し、またその間耐力はほぼ一定だった。結果的に、層間変形角 - 1.5%の 2 サイクル目にダウエル鉄筋 2 が破断した後の、2.0%の層間変形角まで耐力低下はなかった。ダウエル鉄筋 1 は層間変形角 - 2.0%の 2 サイクル目で破断した。コンクリートのひび割れが観察された層間変形角は 0.75%で、比較的遅かった。

試験体 A1 は、もっとも大きな耐力を示した。層間変形角 1.0%の時まで順調に耐力を伸ばし 50kN 近い耐力を示した。その後、層間変形角 - 1.0%の 2 サイクル目におけるダウエル鉄筋 1 の破断により 20kN ほどまで低下し、層間変形角 1.5%の 1 サイクル目におけるダウエル鉄筋 5 の

破断でピークの復元力は 10kN となり、層間変形角 1.5%の 2 サイクル目におけるダウエル鉄筋 6 とダウエル鉄筋 2 の破断で耐力がゼロになった。

試験体 C1 では、復元力は小さいものの大きな変形にも耐えた。最大耐力は 10kN ほどで、層間変形角 - 2.0%の 2 サイクル目でダウエル鉄筋 4 が破断するまではほぼ一定値を保った。続いてダウエル鉄筋 3 が破断したが、上端ダウエル鉄筋は損傷の様子すらなかった。試験体 C1 は、C2 と比較してダウエル鉄筋の数も多いのだが、下端にもスリットを有するためか、層間変形 1.0%あたりまでの耐力に大きな違いはなかった。これはパネル下端にもスリットがあることが一因と考えられる。

試験体 C2 の履歴ループの形状は、B3 と似た曲線を描いた。層間変形角が 1.0%までは直線的に耐力を伸ばし、その大きさは 1.0%で 10kN ほどであった。それ以降はピーク直前、履歴曲線にスリップが見られるようになった。パネル下端は支持プレートと激しく接触し、コンクリートにひび割れも観察された。層間変形角 4.0%の 1 サイクル目において下部のダウエル鉄筋 2 が崩壊し、直後の層間変形角 - 4.0%の 1 サイクル目でダウエル鉄筋 1 が破断した。

4. 実験結果の考察

これらの実験結果から考えると、スリットに設けられたダウエル鉄筋は中小地震時に予想される程度の小さな変形から塑性化が始まり、中小地震時のエネルギー消費が起こり、複数回の繰り返しにより破断が生ずる恐れがあることが分かった。そこで、接合部の設計を変化させることにより間仕切り壁の性能を操作することが可能になると予想される。まず、従来の設計のように構造体との縁を切り、骨組に与える影響を小さく抑えるには、剛性を小さくするためにスリット幅を増大させることや、引張力を小さくし変形能を高めるために鉄筋の付着を無くすることが有効である。また、上端ダウエル鉄筋はエネルギーを消費し、側面ダウエル鉄筋は変形能と強度に貢献する傾向があることから、上端ダウエル鉄筋数を減らすことも挙げられる。

逆に中小地震時のエネルギー消費効果を得るには、スリット幅を減らして剛性を高める、低降伏点鋼鉄筋を用いて変形能を高め、履歴ループを太くする、側面のダウエル鉄筋数を増やすなどの措置が考えられる。

このほかに、ダウエル鉄筋の径、数や材料強度を変えると、剛性や降伏変位が変わると予想される。つまり、適切な設計変数とすることによりエネルギー消費量や強度を調節できる。このダウエル鉄筋とパネルによる機構は今後、新たなパッシブ制振手法として、実際の建築物に組み込まれることが期待できる。

5. 結論

本研究ではフレーム中に設置した非構造壁の静的漸増振幅繰り返し載荷実験を行い、以下の知見を得た。

- (1) すべての試験体の破壊形式は上端接合部のダウエル鉄筋の破断となった。
- (2) 試験体 B1, B4 には大地震に対する設計限度である層間変形角 1.0%(20mm)までの変形能はなかった。
- (3) 低降伏点鋼を用いた試験体 B2 は層間変形

角 1.0%(20mm)に達した後も破壊せず、また比較的高い耐力を示した。

(4) 鉄筋の付着を無くした試験体 B3 は、耐力は小さくなったが変形能が高かった。

(5) 試験体 B1 と B4 の結果より、スリット幅は変形能には影響しないが、小さいと初期剛性が高まり、最大耐力が上昇した。

(6) 側面のダウエル鉄筋はだば機構に寄与しないので、その設置は耐力と変形能を向上させた。

(7) 試験体 C1 の側面のダウエル鉄筋は破断したが、上端および下端ダウエル鉄筋は破断を免れた。下端に入れたスリットにより、大きなせん断力を受けずに大変形に対応したと推測される。

(8) 試験体 C1 や C2 のように上端ダウエル鉄筋数を 2 本ではなく 1 本にしたものは、パネルがモーメントによる抵抗をしないため、耐力が小さかった。また剛性が低いので大きな変形に追従できる。

(9) PCa 間仕切り壁は中小地震に対して、ダウエル鉄筋によって一定のエネルギーを消費できることが確認された。その強度および変形能は実験変数を変えることにより変化させることが可能であった。

謝辞

本実験の実施にあたり、清水建設(株)技術研究所 寺田岳彦氏、金子美香氏および技術者の方々の協力をいただきました。また実験の一部は、日本学術振興会科学研究費補助金基盤 A(代表者：渡辺忠夫)および基盤研究 B(代表者：田中仁史)によって行われました。

参考文献

- 1) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領，2003
- 2) 日本建築学会：阪神・淡路大震災と今後の RC 構造設計，1998