

論文 完全スリット付実大現場打ち RC 造非構造壁の水平加力実験

大久保 香織^{*1}・塩原 等^{*2}・楠原 文雄^{*3}・陳 周熠^{*4}

要旨: 現場打ち RC 造非構造壁は、上面で構造骨組と一体打ちし、他の面で完全スリットと面外脱落防止程度の接合部を設け、構造骨組の耐震性能に対する悪影響を避ける場合が多い。構造物に必然的に多数存在する、このような接合部に着目し、構造部材よりも小さい変形からのエネルギー吸収を想定した、低降伏点丸鋼ダウエル鉄筋を接合部に用いた完全スリット付 RC 造非構造壁を対象とした実大の水平加力実験を行った。固定面において構造骨組と一体化していれば、非構造壁の水平せん断強度および履歴吸収エネルギー量は、水平スリット面に配置したダウエル鉄筋 1 本あたりの値の単純和となった。

キーワード: 非構造部材, ダボ作用, ダウエル鉄筋, 完全スリット, 耐震性能

1. はじめに

鉄筋コンクリート (以下 RC) 造壁のうち構造材として積極的に利用しない間仕切り壁などの非構造壁には、地震時の構造骨組に対する悪影響を避けるため、三辺に完全スリットを施し、面外脱落防止用のダウエル鉄筋で骨組に固定することがある。構造物に多数存在するこのような非構造壁を、小さい変形からエネルギー吸収を始める制震部材として積極的に活用するためのパイロット実験として、完全スリット付き非構造壁のせん断強度、変形能、破壊性状やエネルギー吸収量等の耐震性能に関する実大水平加力実験が筆者らにより行われている¹⁾。

本研究の目的は、これらの改良を行うため接合部に低降伏点丸鋼を用いた完全スリット付現場打ち RC 造非構造の実大の静的漸増振幅繰返し水平載荷実験を行い、地震時応答を把握するための実験資料を得ることである。

2. 水平加力実験の概要

2.1 実験変数と試験体諸元

実施設計された RC 造集合住宅の桁行き方向構面内に設けられる RC 造非構造壁を参考に、6 体の実大試験体を製作した (図-1)。試験体の諸元を表-1 に、使用材料の力学特性を表-2 と表-3 に示す。試験体は RC パネル 2 枚と両側をコンクリートに埋込まれたダウエル鉄筋、高さ調整の出来る長穴付鋼製プレートで構成される。大 RC パネルは非構造壁を、小 RC パネルは構造梁を、ダウエル鉄筋は接合部を、大小 RC パネルの間の隙間は完全スリットを模擬している。実験変数はパネル幅、スリット幅、ダウエル鉄筋の水平位置(端あき長 L_h : mm)と配置(面と数)である。RC パネルの全高さ 2000mm (大:1800mm, 小: 200mm), 厚さ 120mm, コンクリートの設計基準強度(24MPa)は共通である。エネルギー吸収能と変形能の

向上のため、下面の完全スリット (以下、水平スリット) または側面の完全スリット (以下、鉛直スリット) にはダウエル鉄筋として低降伏点丸鋼($\phi 14 \cdot \text{ELCH2}$)を用い、定着長と拘束筋は十分にとった。スリットが無く骨組に直接固定されている面 (以下、固定側) には、普通異形鉄筋(D16 \cdot SD345)を使用した。試験体は RC パネル幅が 1200mm の D シリーズの 4 体, 2000mm の E シリーズの 2 体に大別できる。試験体 D シリーズは、水平スリット面のダウエル鉄筋数が 2 本の試験体 D1 と D2, 4 本の試験体 D3 と D4 がある。このうち試験体 D2 は鉛直スリット面にもダウエル鉄筋 2 本を持つ。試験体 D3 と D4 は、固定側の鉄筋量が異なる。試験体 E1 は水平スリット面のダウエル鉄筋数が 3 本で、固定側の異形鉄筋は 5 本である。試験体 E2 は E1 とダウエル鉄筋数が天地逆の配置になっている。試験体 D1 と D2 だけは、水平スリット面の端あき長が 400mm だが、その他は 200mm である。

2.2 加力方法

図-2 のように、4 端ピンの剛強な鋼製の加力骨組内に、スリット面が上になるように試験体を設置し、油圧ジャッキを用いて、北向き正の静的漸増振幅繰返し水平

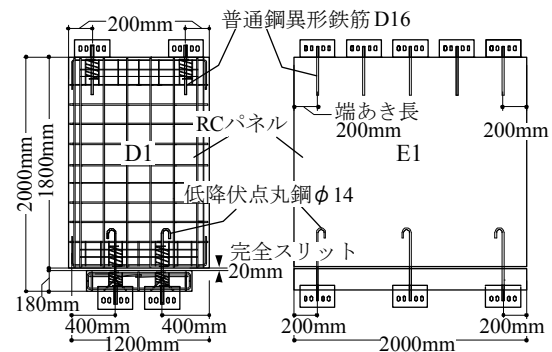


図-1 典型的な試験体 (D1, E1) の概要

*1 清水建設 (株) 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*2 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻准教授 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻助教 修士 (工学) (正会員)

*4 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 Ph. D.

載荷を行った。上梁の水平変位を試験体に与えた層間変形 D とみなして、変位制御の載荷を行った。層間変形角 R は、層間変形 D を全 RC パネルの高さ(2000mm)で除して求めた。加力履歴を図-3 に示す。各振幅の繰返し回数は 3 回で、初期振幅は $D=2.5\text{mm}(R=0.125\%)$ 、第 2 振幅は $D=5.0\text{mm}(R=0.25\%)$ とし、第 3 振幅以降は $5\text{mm}(R=0.25\%)$ ずつ漸増させた振幅を用いて、最後の 1 本のダウエル鉄筋の破断前まで載荷を行った。

2.3 測定方法

層間変形 D (単位: mm) は加力骨組下梁に固定したレーザー変位計で、載荷力 P (単位: kN) は油圧ジャッキに取り付けたロードセルによって測定した。RC パネルの各点における変位は、歪式変位計を用いて測定した。なお、層せん断力 V (V_p : 正加力時, V_n : 負加力時) は無負荷の状態に加力骨組の自重による P - δ 効果を計測しておき、この値を使って式(1)と式(2)により補正した値とした。

$$V_p = P + 7.94 \times 10^{-3} \cdot D + 0.105 \quad (1)$$

$$V_n = P + 8.34 \times 10^{-3} \cdot D - 0.134 \quad (2)$$

3. 実験結果

3.1 破壊過程と変形状

水平・鉛直スリット面を持つ試験体 D2 を除き、RC パネルの両面にひび割れは観察されず、試験体の損傷は接合部のダウエル鉄筋とその周辺コンクリートだけに集中した。図-4 にダウエル鉄筋のせん断抵抗と破壊性状の過程を示す。ダウエル鉄筋は、初めはダボ作用によるせん断抵抗を行い、ダウエル鉄筋は図中 b) のようにスリット中央を対称軸とする逆対称曲げを受けた形状をしていた。層間変形の増加につれ、ダウエル鉄筋の周囲のコンクリートが支圧破壊していくのが観察された。これに伴って履歴形状がスリップを伴うようになった。変形レベルが層間変形で 10mm から 15mm になると、ダウエル鉄筋は図中 c) のように直線的な変形に変化し、軸力の水平成分がせん断抵抗力となるキンキング作用が支配的になった。さらに繰返し載荷により、局所的にダウエル鉄筋の直径が小さくなって断面積が減少していき、破断して破壊に至った。

水平スリット面だけにダウエル鉄筋を持つ試験体 (D1, D3, D4, E1, E2) では、固定側での RC パネルと加力骨組とのずれはほとんど検出されなかった。したがって、水平スリット面の低降伏点丸鋼ダウエル鉄筋の変形が層間変形のほとんどを吸収していたと考えられる。

接合部が最初に破壊した層間変形は、試験体 D1 が 25mm (3 回目・サイクル番号#-18, $R=1.25\%$) であった。試験体 D4 と E1 では 30mm (2 回目・サイクル番号#+20,

$R=1.5\%$) の時、試験体 E2 では 30mm (1 回目・サイクル番号#+19, $R=1.5\%$) の時であった。一方、水平・鉛直スリットの 2 辺にダウエル鉄筋を持つ試験体 D2 では、層間変形が大きくなるにつれ RC パネルの回転変形が大きくなり、固定側の異形鉄筋が破断した。

表-1 試験体諸元

名称	幅 mm	ダウエル鉄筋				
		水平面		固定側		鉛直面
		数-種類	L_b	数-種類	L_b	数-種類
D1	1200	2- $\phi 14$	400	2-D16	200	—
D2	1200	2- $\phi 14$	400	2-D16	200	2- $\phi 14$
D3	1200	4- $\phi 14$	200	3-D16	200	—
D4	1200	4- $\phi 14$	200	5-D16	200	—
E1	2000	3- $\phi 14$	200	5-D16	200	—
E2	2000	5- $\phi 14$	200	3-D16	200	—

表-2 コンクリートの材料特性

材齢 日	強度		ヤング係数 N/mm ²
	圧縮 N/mm ²	引張 N/mm ²	
42	33.2	2.78	3.08×10^4
85	36.1	2.82	2.97×10^4

表-3 ダウエル鉄筋の材料特性

直径-材質	強度		ヤング 係数 N/mm ²	破断 伸び %
	降伏 N/mm ²	引張 N/mm ²		
D16-SD345	402	592	2.27×10^4	16.8
$\phi 14$ -ELCH2	197	301	3.18×10^4	31.2

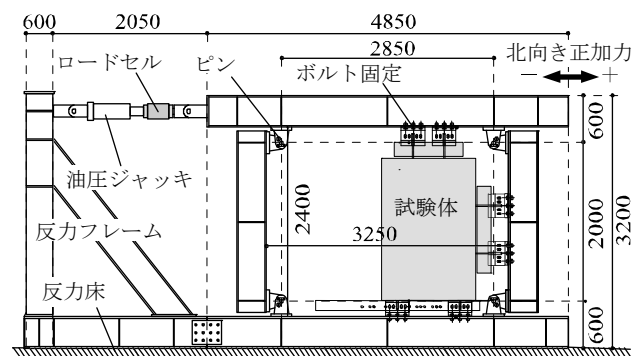


図-2 加力骨組と試験体設置方法 (東面)

3.2 層間変形と面外方向の変形

すべての試験体で RC パネルの面外方向の変位 (面外変形 D_{ex}) が観察された。これは、延性の高い低降伏点丸鋼ダウエル鉄筋の残留伸び歪によって生じる座屈変形と考えられる。同一サイクルにおいて、面外変形 D_{ex} の大きさはサイクルピーク点で最小となり、 $D=0\text{mm}$ の点に近づくにつれ増加し、その変動幅は面外変形の 50%

ほどだった。面外変形 D_{ex} の大きさは、 $D=10\text{mm}(R=0.50\%)$ では 1mm 程で、 $D=20\text{mm}(R=1.0\%)$ においても 2,3mm 程度と小さかった。 $D=25\text{mm}(R=1.25\%)$ 頃から急激に増加し始め、 $D=30\text{mm}(R=1.5\%)$ では 20mm 前後に達した。以下、面外変形の測定を行った試験体 D1, D2, D3, E1, E2 に関し比較を行う。

面外変形が急増する傾向にあった、層間変形が 25mm の時の D_{ex} の最大値を試験体別に表-4 に示す。水平スリット面のダウエル鉄筋数が 2 本、RC パネルの幅が 1200mm の試験体 D1 だけは $D_{ex}=1.2\text{mm}$ 程と小さかったが、水平スリット面のダウエル鉄筋数が同じで、鉛直スリット面にも 2 本のダウエル鉄筋を持つ試験体 D2 は、 $D_{ex}=6\text{mm}$ 程だった。一方、水平スリット面の端あき長が 200mm、ダウエル鉄筋数が 4 本の試験体 D3 は $D_{ex}=8\text{mm}$ 、パネルの幅が 2000mm で端あき長が 200mm、ダウエル鉄筋数が 3 本の試験体 E1 は $D_{ex}=10\text{mm}$ 、5 本の E2 は $D_{ex}=14\text{mm}$ 程度だった。

このように、パネル幅が同じならば、水平スリット面のダウエル鉄筋が多いほど、また鉛直スリット面にダウエル鉄筋がある方が D_{ex} は大きくなる。また、端あき長が同じ試験体 D3 と E1 を比較すると、パネル幅が大きい方が D_{ex} は大きく、必ずしもダウエル鉄筋数の影響を受けないことが分かった。

3.3 層せん断力-層間変形関係

履歴曲線を図-5 に、層間変形と層せん断力の対応を表-5 に示す。表と図中の安定限界とは図-6 (a) のように、試験体の履歴曲線がややスリップ形状を含む紡錘形から、スリップ範囲で負勾配を有する逆 S 字形に変化する直前の状態を指し、変化前最後のサイクルの振幅の大きさで呼ぶ。ダウエル鉄筋が普通鋼異形鉄筋で、コンクリートへの埋込みが片側だったため変形能が低かった 05 年度実験¹⁾では、この現象は見られなかった。

試験体 D1 の安定限界は 15mm (2 回目・サイクル番号 11・ $R=0.75\%$) だった。鉛直スリット面にもダウエル鉄筋を持つ試験体 D2 だけは安定限界を迎えずに、固定側の普通異形鉄筋が破断して破壊したが、その他の試験体の安定限界は 15mm であった。このように、RC パネルの回転変形が無ければ、安定限界はスリット面のダウエル鉄筋数の影響を受けない。

安定限界前の最大層せん断力が最大だったのは、水平スリット面のダウエル鉄筋数が 5 本の試験体 E2 で、正負両側で 58kN 前後であった。これは水平スリット面のダウエル鉄筋数が 2 本の試験体 D1 のほぼ 2.6 倍である。2 番目に大きかったのは試験体 D2 で、負側は試験体 D1 の 2.6 倍程の 59.1kN、正側はそれより 15%程小さい 51.0kN だった。なお、負加力時に鉛直スリット面のダウエル鉄筋の応力状態が圧縮になる。

このように、試験体 D3, D4, E1 の最大層せん断力は、試験体 D2 や E2 と同様、水平スリット面のダウエル鉄筋数にほぼ比例していた。

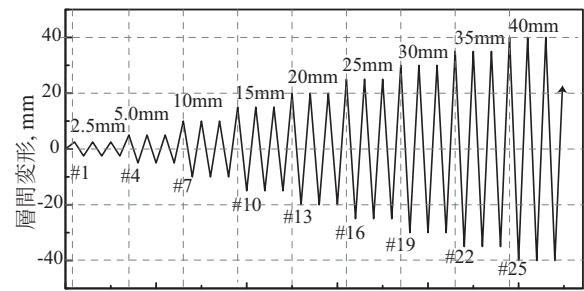


図-3 加力履歴

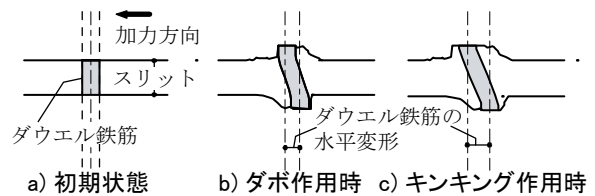


図-4 ダウエル鉄筋の破壊性状

表-4 層間変形 25mm 時の面外変形 D_{ex}

名称	幅	端あき長 L_h mm	スリット面の ダウエル鉄筋数	面外変形 D_{ex} mm
	mm		水平 (鉛直)	
D1	1200	400	2	-1.18
D2	1200	400	2(2)	5.69
D3	1200	200	4	-7.82
E1	2000	200	3	-9.80
E2	2000	200	5	-14.2

表-5 試験体別の層せん断力

試験体	最初の接合部破壊前		安定範囲内	
	最大 D	V kN	安定限界	最大 V kN
D1	+	25mm	15mm(2 回目) #11	22.1
	-	#-18		-22.7
D2	+	25mm	-	51.0
	-	#+18		-59.1
D3	+	35mm	15mm(3 回目) #12	43.3
	-	#+22		-41.7
D4	+	35mm	15mm(3 回目) #12	42.3
	-	#+22		-46.3
E1	+	30mm	15mm(3 回目) #12	36.4
	-	#+21		-33.2
E2	+	-30mm	15mm(3 回目) #12	57.6
	-	#-20		-58.7

※表中、# : サイクル番号、 D : 層間変形、 V : 層せん断力。

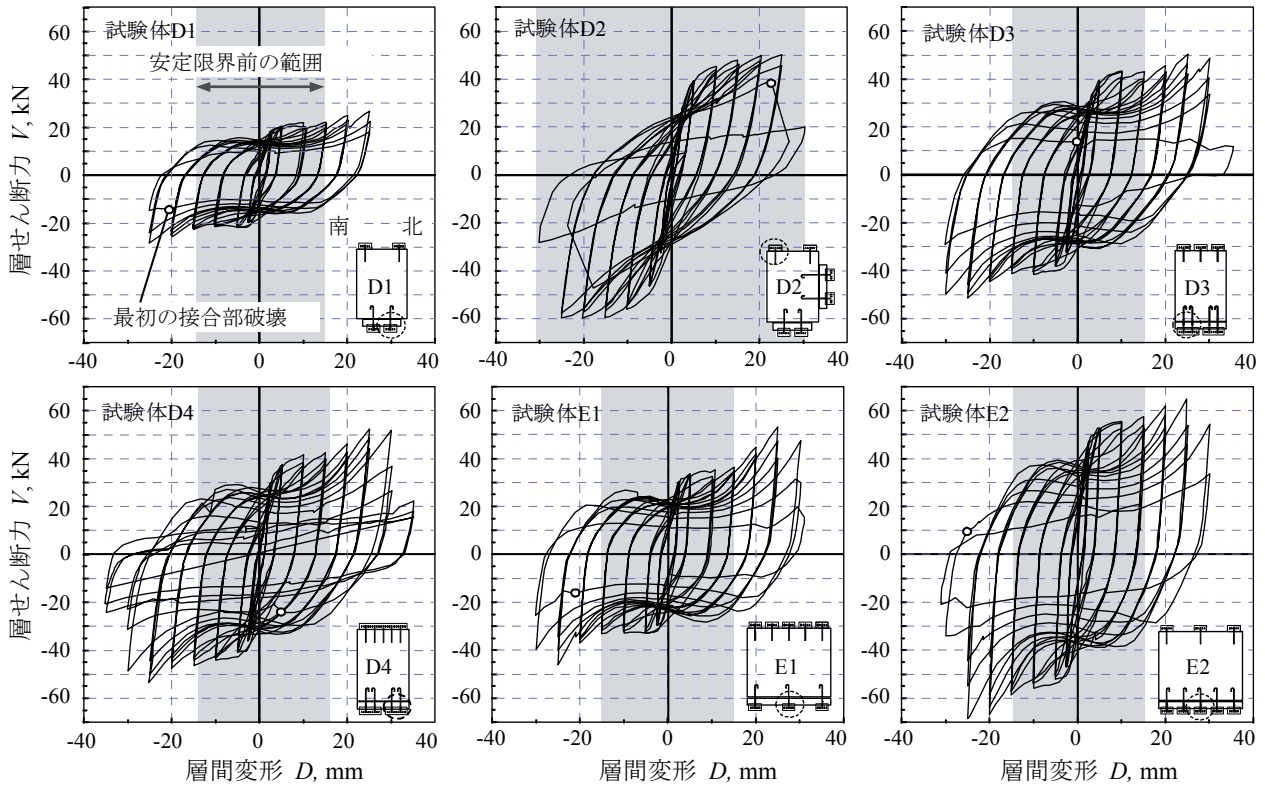


図-5 層せん断力-層間変形関係

3.4 履歴吸収エネルギー

図-7に履歴吸収エネルギー E を示す。図-6(b)のように、ある振幅のエネルギー量は繰返し载荷の2・3回目の履歴曲線のループ面積の平均とした。水平スリット面のダウエル鉄筋数が2本の試験体D1は、 $D=20\text{mm}$ の振幅で $E=947\text{ kN}\cdot\text{mm}$ だった。水平スリット面のダウエル鉄筋数が3本の試験体E1は試験体D1の約1.7倍、4本の試験体D3とD4は約1.9倍、5本の試験体E2は約2.7倍であることから、履歴吸収エネルギー E も層せん断力の場合と同様、水平スリット面のダウエル鉄筋数にほぼ比例するといえる。また、水平・鉛直スリット面に2本ずつダウエル鉄筋を持つ試験体D2の E は試験体D1の1.6倍だった。履歴エネルギー吸収量の増加率は、安定限界の15mmを過ぎた直後の $D=20\text{mm}$ ではいずれの試験体でも維持されたが、 $D=25\text{mm}$ には試験体D1, E1, E2で低下した。ただし、最初の接合部破壊以後は、エネルギー吸収量は前回振幅に比べ、微増または低下した。

4. 非構造壁の地震時水平抵抗形式

4.1 水平抵抗モードと破壊モード

実験結果を検討した結果、破壊時の性状は(a)スウェイモードと(b)ロッキングモードの2つに分類することができた。図-8はこれらの違いを説明している。

(a)スウェイモード

スリットの無い面における構造骨組と非構造壁の相

対変位はまったく無い。非構造壁の水平変形は、すべて水平スリット面のダウエル鉄筋の水平変形 d_{sw} (スウェイ成分)となる。

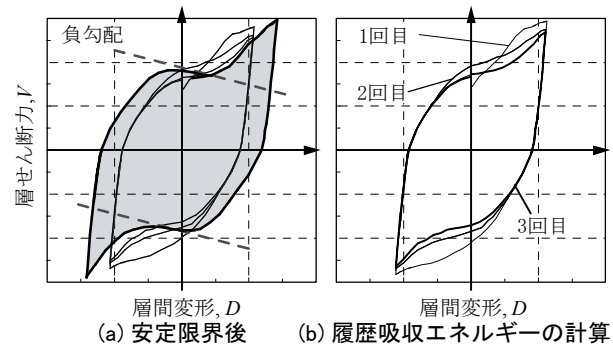


図-6 安定限界と履歴吸収エネルギーの計算

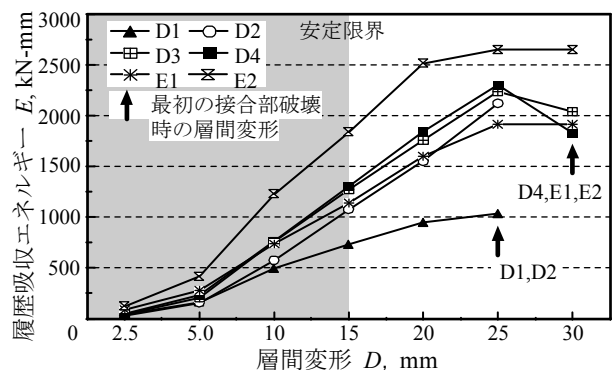


図-7 履歴吸収エネルギー

(b) ロッキングモード

スリットの無い面（固定側）の接合筋の固定力が弱く、接合筋の抜け出しが発生することで、構造骨組と非構造壁の固定面が局部的に接触し、そこを回転中心として角度 θ_{rc} の回転が起こるうえ、構造骨組と非構造壁の間に水平方向の相対変位（以下、すべり変形 d_{sl} ）が生じる。非構造壁の水平変形は、水平スリット面で換算した回転による水平変形 d_{rcH} と、すべり変形 d_{sl} の和 d_{rc} （ロッキング成分）となる。

実際非構造壁の応答変形は、この2つのモードの重ねあわせと考えられるが、破壊時には、いずれかのモードが卓越した状態となるものと考えられる。そこで、スウェイモードが卓越した破壊を水平変形破壊、ロッキングモードが卓越した場合は回転変形破壊と呼ぶ。

地震力によって非構造壁に生じる層間変形 D は、非構造壁の水平変形のスウェイ成分 d_{sw} とロッキング成分 d_{rc} の和となる。

4.2 実験結果との比較考察

図-9に試験体の層間変形 D に対する非構造壁の水平変形のスウェイ成分とロッキング成分を、加力方向別に示す。鉛直スリット面にもダウエル鉄筋を持つ試験体D2は、いずれの変形レベルにおいても層間変形に占めるスウェイ成分の割合よりもロッキング成分の割合の方が高く、常にロッキング成分が50%以上を占めていた。特に負加力のときに両者の差が大きかった。その他の試験体では、層間変形はほぼ100%スウェイ成分であった。

したがって、試験体D2の破壊は回転変形破壊だが、そのほかの試験体は水平変形破壊と判断される。破壊性状と比較すると、試験体D2だけが、構造骨組との連続性を模擬しているはずの固定側の普通異形鉄筋が破断したことと一致している。

4.3 非構造壁の望ましい仕様

完全スリット付非構造壁の破壊形式が水平変形破壊となるような設計を行えば、その水平せん断強度やエネルギー吸収量の推定がより簡便になる。

そのためには次のような設計を行えばよい。水平スリット面にのみ n 本のダウエル鉄筋を配置すれば、ダウエル鉄筋1本あたりの水平せん断力 V_d を用いて非構造壁のせん断力 V が式(3)のように単純に求まる。

$$V = n \times V_d \quad (3)$$

また、ある変形レベルでの履歴エネルギー吸収量 E_i は、ダウエル鉄筋1本あたりの履歴エネルギー吸収量 E_{di} を用いて式(4)のように求められる。

$$E_i = n \times E_{di} \quad (4)$$

さらに、水平抵抗モードがスウェイモードになることを保障するために、固定側に生じる曲げモーメントとせん断力に対して十分な普通異形鉄筋量を配置する。

なお、回転変形破壊の性能推定には、試験体D2と違ってスリット面のダウエル鉄筋が破壊する設計の試験体例が必要であった。このようにまだ実験データが不十分であるので、本項では扱わない。

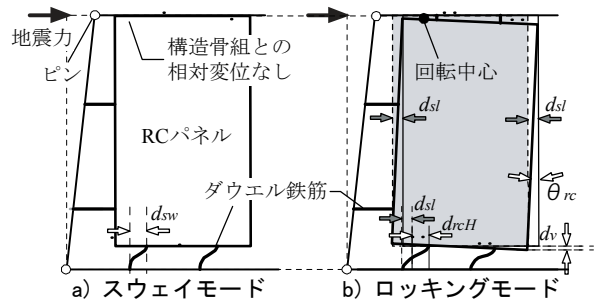


図-8 水平抵抗モード

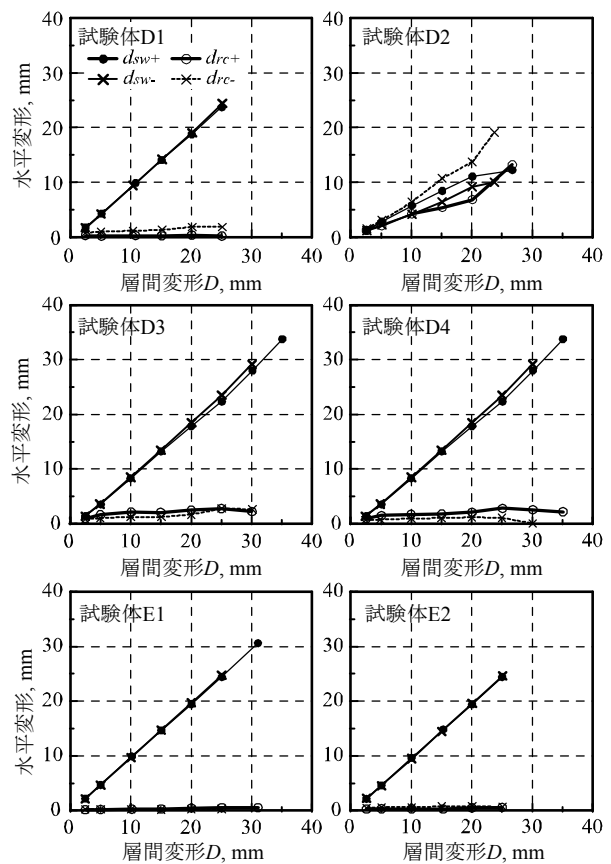


図-9 スウェイ・ロッキング成分の割合

5. まとめ

低降伏点丸鋼を接合部のダウエル鉄筋に用いた、完全スリット付実大現場打ちRC造非構造壁の静的漸増振幅繰返し水平載荷実験を行った。実験結果より、非構造壁の地震時応答に関する以下の知見を得た。

- (1) 回転変形を起こした非構造壁は、RCパネルの固定側の接合部に破壊が起こったが、水平変形破壊を起こした非構造壁の損傷は、スリットのダウエル鉄筋の周辺に集中した。

- (2) 非構造壁の履歴曲線の形状は、スリップ形状の特徴を持った紡錘形をしており、層間変形が 15mm (層間変形角 $R=0.75\%$ 程度) を超えるとスリップ最中の剛性が負になった逆 S 字の形状に変化した。
- (3) 水平スリット面にのみダウエル鉄筋を持つ試験体は、スウェイ変形が卓越し、その最大層せん断力と履歴吸収エネルギーは、水平スリット面のダウエル鉄筋数にほぼ比例していた。
- (4) ダウエル鉄筋が破断する前であれば、ダウエル鉄筋の断面が繰り返し载荷により減少するにも関わらず、1 サイクルあたりの履歴吸収エネルギーは、層間変形の増加に伴ってほぼ一定の上昇率で単調増加した。
- (5) ダウエル鉄筋の残留伸び変位が増加するにつれて、座屈現象による非構造壁の面外へのはらみ出しが見られ、層間変形が 25mm($R=1.25\%$)を越えると、面外

変位の大きさは、層間変形の 50%から 80%程度に達するほど顕著になった。

謝辞

本実験は平成 18・19 年度国土交通省建設技術開発助成「制震機能内蔵型の次世代非構造部材の開発 (研究代表者: 塩原等)」により実施された。また、試験体の低降伏点丸鋼には、株式会社神戸製鋼所のサンプル提供を受けた。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 大久保 香織, Huseyin DARAMA, 田村 和夫, 塩原 等: 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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 2, pp. 925-930, 2006. 7