

地震により損傷を受けた鉄筋コンクリート造耐震壁の残存耐震性能に関する研究

その1 実験計画と無損傷試験体の結果概要

正会員 ○細谷 典弘*1 同 小池 拓矢*1 同 鈴木 裕介*2
同 前田 匡樹*3 同 鶴飼 和也*4 同 尾形 芳博*5

残存耐震性能 せん断破壊 損傷度
耐震壁 壁筋比 剛性低下

1. はじめに

地震によって被災した鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン構造の残存耐震性能は、ひび割れ幅などの損傷から分類する損傷度に基づいて、既往の研究により定量的に評価する方法が提案されている¹⁾。しかし、耐震壁の残存耐震性能に関しては、損傷と性能低下に着目した実験データが少ないことから、柱の基準を準用しているのが現状で、評価精度が十分には検討されていない。一方で、原子力施設のRC造建屋の固有振動数が、東北地方太平洋沖地震により建屋の一部で発生した微小なひび割れの影響やそれ以前の中小地震の影響から低振動化した事象が報告されている²⁾。つまり弾性限度を超えた応答の経験とそれによる各性能に対する影響は不明な点も多い。本研究では、せん断破壊先行型の耐震壁について繰り返し静的漸増載荷実験を実施し、降伏前の小変形または、降伏変形を超えた大変形レベルを経験した際、各応答変形に対する損傷の大きさが、耐力や変形能力、エネルギー吸収能力といった各構造性能低下に及ぼす影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験計画

2.1 実験概要

表-1 に試験体諸元、及び試験体耐力の計算値を示す。試験体終局せん断力は、靱性保証型耐震設計指針³⁾のトラス・アーチ理論式（式（1））で求めた。試験体は、パラメータを「本加力」開始時における損傷の有無(及び大きさ)としたせん断破壊先行型の耐震壁とし、原子力施設の耐震壁も参考に試験体の計画を行った。試験体数は無損傷の試験体1体（S-D0）、及び損傷度I～IVとなるように、「事前加力」を加えた4体（S-D I～IV）の計5体とした。ただし、事前加力時に損傷度IVを与える試験体については、損傷度IIを与える試験体と兼用した。これは、損傷度II程度の変形を繰り返し経験させても、その後の構造性能にさほど影響がないと予測したためである。S-D I～IV試験体に対し、事前に与える損傷の大きさは、無損傷試験体 S-D0 の加力による実験結果から各損傷度時の変形を判定し、事前加力に与える変形の大きさを決めた。

$$V_u = t_w l_{wb} P_s \sigma_{sy} \cot \phi + \tan \theta (1 - \beta) t_w l_{wa} \nu \sigma_B / 2 \quad (1)$$

表-1 試験体諸元

部材	試験体名	S-D0	S-D I	S-D II	S-D III	S-D IV
比較項目	損傷度	0	I	II	III	IV
壁	壁高さ(mm)	1000				
	全長(mm)	1800				
	壁厚(mm)	120				
	壁配筋	D6@40(SD295) Double				
	壁筋比(%)	1.32				
	軸応力度(N/mm ²)	0.50				
	せん断スパン比(N/mm ²)	0.29				
柱	断面b×D(mm)	200×200				
	主筋	12-D16(SD345)				
	帯筋	2-D10(SD345)@60				
スタブ	断面b×D(mm)	400×400				
	主筋	10-D22(SD390)				
	あばら筋	2-D13(SD390)@100				
せん断ひび割れ強度(靱性指針)(kN)		357				
せん断終局強度(靱性指針)(kN)		1499				
せん断終局強度(修正荒川式)(kN)		1078				
曲げひび割れ強度(RC基準)(kN)		353				
曲げ終局強度(RC基準)(kN)		3769				

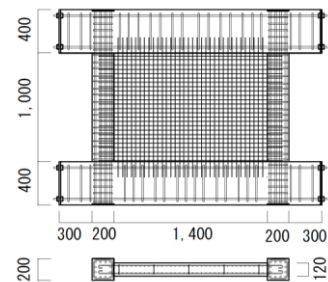


図-1 試験体配筋図（単位：mm）

$$\beta = \{ (1 + \cot^2 \phi) P_s \sigma_{sy} \} / \nu \sigma_B, \quad \tan \theta = \sqrt{ (h_w / l_{wa})^2 + 1 } - h_w / l_{wa}$$

t_w : 耐震壁の壁厚(mm), l_{wa} , l_{wb} : 等価壁長さ(mm)
 P_s : 壁板のせん断補強筋比, ν : 有効圧縮強度係数
 σ_{sy} : 壁板のせん断補強筋の強度(N/mm²)
 σ_B : コンクリートの圧縮強度(N/mm²)
 ϕ : トラス機構のコンクリート圧縮束の角度
 h_w : 耐震壁の高さ(mm)

2.2 試験体概要

図-1 に試験体配筋図を示す。試験体は、両側柱付きの耐震壁とし、壁全長 1800mm、壁内法高さ 1000mm、反極点高さは壁中央（せん断スパン比が 1/4 程度）となるような形状とした。壁の厚さは 120mm とし、壁筋を D6@40 ダブルで壁筋比が縦・横筋ともに 1.32% となるように配筋をした。

2.3 使用材料特性

コンクリートの圧縮・割裂試験結果を表-2、鉄筋の引張試験の結果を、表-3 に示す。コンクリートの設計基準強度は全試験体共通で $F_c = 27\text{N/mm}^2$ である。

2.4 加力計画

加力装置図を図-2、加力概念図を図-3に示す。2本の鉛直ジャッキにより試験体の壁と柱の全断面に対して、軸応力度 0.5N/mm^2 の一定軸力を加え、左右の2本の水平ジャッキで正負交番繰り返し静的漸増载荷を行った。なお、試験体の反曲点高さが壁高さの中央にくるように2本の水平ジャッキを設置した。加力は、地震を受けた後の耐震壁を再現するために試験体 S-D0 以外の試験体は事前加力を行い、その後本加力を行う(図-3)ことで地震後の損傷の大きさがその後の構造性能低下にどう影響するかを比較・検討する。事前加力は小さい層間変形角から繰り返し、各試験体の損傷度時の層間変形角を5回繰り返し、確実に各損傷度の損傷状態を再現した後、一旦除荷し、本加力を行う。試験体 S-D0 の加力スケジュールは表-4に示し、それ以外の試験体の加力スケジュールは、その2に示す。

3. 実験結果

図-4に無損傷試験体 S-D0 の荷重変形関係を示す。図-4には JEAC 式⁴⁾によるスケルトンカーブを併記する。また、図-5に最終破壊写真とそのひび割れ図を示す。試験体のひび割れ計測は試験体が左右対称であることから、ひび割れは東側のみ計測しており、ひび割れ図は壁半分を示している。ひび割れは、壁隅から発生し $2/1000\text{rad}$ 付近で壁全体にひび割れが生じた。その後は、 $6/1000\text{rad}$ サイクル時に壁中央部のひび割れに沿って細かな剥落が見られ、 $8/1000\text{rad}$ 付近で最大耐力を迎えるとともに、コンクリートが圧壊し急激に耐力が低下した。

4. まとめ

本編では、実験概要と実験結果のうち、試験体 S-D0 の荷重-変形関係および破壊経過について述べた。損傷の有無による構造性能低下に関する考察等は、その2に示す。また、参考文献はその2にまとめて示す。

表-2 コンクリート圧縮・割裂試験結果

	S-D0	S-D I	S-DIII	S-DII,IV
材齢(日)	61	79	87	107
圧縮強度(N/mm ²)	40.2	41.2	41.3	41.9
ヤング係数($\times 10^4\text{N/mm}^2$)	3.28	3.47	3.42	3.25
割裂引張強度(N/mm ²)	3.46	2.89	2.78	2.49

表-3 鉄筋材料引張試験結果

	降伏強度(N/mm ²)	引張強度(N/mm ²)	降伏歪(μ)	ヤング係数($\times 10^4\text{N/mm}^2$)
D6(SD295)	362	518	2160	17.2
D10(SD345)	364	572	2023	18.1
D16(SD345)	393	574	2060	19.1

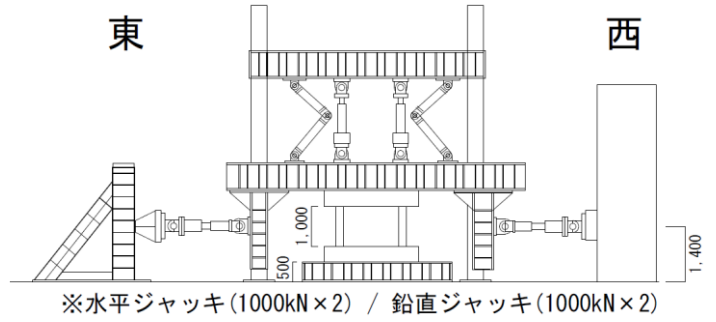


図-2 加力装置図

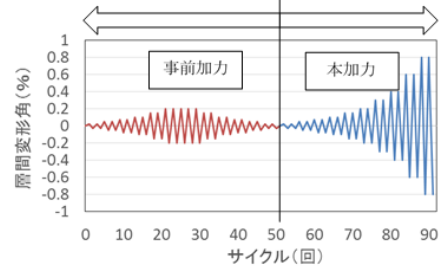


図-3 加力概念図

表-4 加力スケジュール(試験体 S-D0)

事前加力	
試験体	目標部材角R(/1000rad)とサイクル数(回)
S-D0	なし

本加力	
試験体	目標部材角R(/1000rad)とサイクル数(回)
S-D0	±0.25 2, ±0.5 2, ±0.75 2, ±1 2, ±1.5 2, ±2 2, ±2.5 2, ±3 2, ±4 2, ±6 2, ±7 2, 8

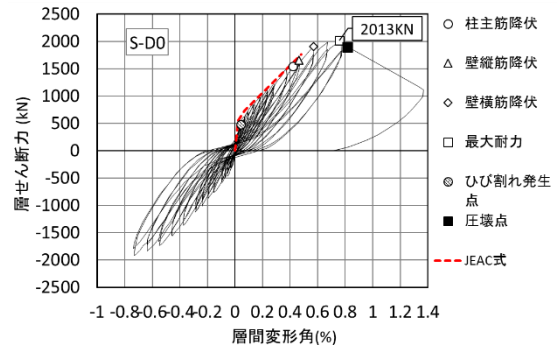


図-4 荷重変形関係(S-D0)

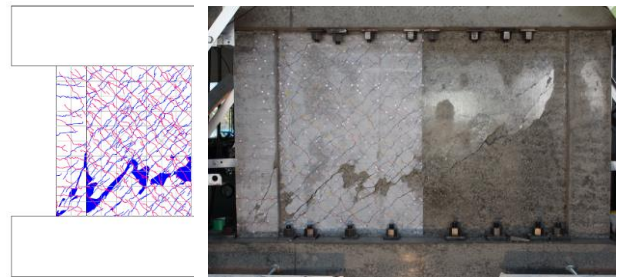


図-5 最終破壊写真とひび割れ図(S-D0)

*1 東北大学大学院工学研究科 博士前期課程

*2 大阪市立大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

*3 東北大学大学院研究科 教授・博士(工学)

*4 東北電力(株)

*5 東北電力(株)・博士(工学)

*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Tohoku University

*2 Assistant Professor, Graduate School of Eng., Osaka City Univ., Dr. Eng.

*3 Professor, Graduate School of Eng., Tohoku University, Dr. Eng.

*4 Tohoku Electric Power Co., Inc.

*5 Tohoku Electric Power Co., Inc., Dr. Eng.