# 論文 RC 造壁の要素モデルにおける圧縮歪み軟化特性に関する基礎実験

岩﨑 恭平\*1·大村 哲矢\*2

要旨:鉄筋コンクリート造部材における最大耐力および変形性能は、コンクリートの圧縮歪み軟化特性の影響を大きく受ける。既往の研究において、コンクリートの圧縮歪み軟化特性を評価するために、圧縮破壊エネルギーおよび圧縮破壊領域長さなどが示されているが、実験が行われた試験体形状は円形または長方形であるものが多い。本研究では、RC 造壁の最大耐力および変形性能を評価することを目的とし、縦横筋を有する壁要素モデルの板状試験体を製作し、圧縮力を載荷してコンクリートの歪み軟化特性を明らかにするための基礎実験を行った。損傷状況および壁筋の効果について基礎的なデータを示した。 キーワード:壁、要素モデル、壁筋、圧縮破壊エネルギー、圧縮破壊領域長さ

#### 1. はじめに

鉄筋コンクリート(以下, RC)造部材の最大耐力および 変形性能は、コンクリートの歪み軟化特性の影響を大き く受ける。鉄筋などによって十分に拘束されたコンクリ ートは最大圧縮強度以降においても、応力度の低下を抑 制することができることは周知の通りである。

鉄筋などによって十分に拘束された RC 造柱は,変形 性能に富み,大地震後においても軸力保持能力が確保さ れている傾向にある。十分な横補強筋を有する RC 造梁 においても同様に,最大耐力以降に急激な耐力低下が生 じない。上記の現象は,多くの実験によって確認されて おり, RC 造柱および梁の横補強筋量を設定するときの 根拠となっている。

一般的な鉛直部材である RC 造柱に比べて RC 造壁は 幅に対するせいの比が極めて大きい。よって, RC 造壁に おける最大耐力時に圧縮縁コンクリートの歪み度は非 常に大きくなり,最大耐力以降は過大な歪み度が生じる 範囲が大きくなる傾向にある。

よって,特に RC 造壁の最大耐力および変形性能を評価するためには,コンクリートの歪み軟化特性を高い精度でモデル化し,最終的には数値解析などによって RC 造壁が残存している水平および軸力方向耐力を評価することが望まれる。

地震時の荷重が作用したときの RC 造部材において実 験時挙動を解析によって再現して,実験では計測が困難 である部分のデータを検証し,パラメトリックに解析を 行う方法は効率的である。

解析に用いるモデルの設定は極めて重要であり,特に, 圧縮破壊エネルギーを考慮したコンクリートモデルに ついては,妥当な材料特性であることを十分に検証する 必要がある。

コンクリートの圧縮破壊基準に, Drucker-Prager 破壊

基準または Mohr-Coulomb 破壊基準を適用して最大圧縮 応力度を評価する方法はよく知られている。

Rots<sup>1)</sup>は, Effective band width を積分点が4の場合,要素面積の2倍の平方根とした。

西山,渡邊ら<sup>20</sup>は、コンクリート強度25~83N/mm<sup>2</sup>お よび横補強筋量をパラメーターとし、直径135mm、高さ 300mmのRC造円柱の中心圧縮試験を行い、応力とひず み関係および軸ひずみと横ひずみの関係を明らかにし た。

Priestley, Park<sup>3</sup>は、十分な拘束筋を有する円形および長 方形断面のコンクリートの一方向繰返し載荷実験を対 象とし、歪み軟化特性のモデル化を提案した。

Higai, Nakamura<sup>4</sup>は, 無筋コンクリートの円柱試験体を 対象として, コンクリート強度 11~52N/mm<sup>2</sup>, 直径 100 ~150mm, 高さ 100~600mm の実験結果に基づき, The compressive fracture zone length は 1,300 をコンクリート強 度の平方根で除したものとし, The compressive fracture energy はコンクリート強度の平方根を 8.8 倍とした。

二羽ら<sup>5</sup>は,無筋コンクリートの円柱試験体を対象と して、コンクリート強度 26~48N/mm<sup>2</sup>,直径 100mm,高 さ 200~800mm の実験結果に基づき、圧縮破壊の局所化 を考慮した実験破壊域長さおよび圧縮破壊エネルギー の計算式を提案した。

越川らのは, 試験体の寸法が圧縮軟化特性に影響する とし、コンクリート強度 29~36N/mm<sup>2</sup>, 直径 100~200 mm, 高さ 200~600 mm, 無筋コンクリートの円柱試験体 の圧縮実験を行い, 圧縮破壊領域長さおよび圧縮破壊エ ネルギーを示した。

前述の試験体形状は円柱または長方形柱であり,形状 が壁のよう板状の場合においても同様の性状を示すか 明らかではない。また,横補強筋を有する円形の試験体 は,帯筋またはスパイラル筋によってコンクリートが拘

\*1 東京都市大学 大学院 総合理工学研究科 建築・都市専攻 (正会員)

\*2 東京都市大学 工学部 建築学科 准教授 (正会員)

束されており,補強筋が壁のように閉鎖型ではない縦横筋(以下,壁筋)のみの場合においても同等の拘束効果を示すか明らかではない。

本研究では, RC 造壁を対象とした壁筋を有する壁要 素モデルの板状試験体を製作し, 圧縮力を載荷して, コ ンクリートの歪み軟化特性を明らかにするための基礎 実験を行う。

## 2. 実験概要

## 2.1 試験体

表-1に試験体一覧を示す。試験体は総数4体である。

共通要因はコンクリート材料と立面形状である。

変動要因は壁厚と壁筋比(以下,  $p_w$ )である。壁厚は 150 および 180mm の 2 種類とした。壁筋はシングルまたは ダブル配筋とし、 $p_w を 0.24 \sim 1.11$ %とした。シングルお よびダブル配筋の試験体において壁筋の径をそれぞれ、 D10 および D10  $\sim$  D16 とした。

図-1に試験体形状を示す。立面形状は,壁筋で囲まれ た寸法は 200×200mm とし,壁の長さ方向に対して, 150mm の壁の余長を設け,壁の長さと高さはそれぞれ 550 および 250mm とした。この壁を上下に挟むように 100×250mm の載荷スタブを設けた。打設方向は試験体

衣一I 武殿体一見						
Name	t (mm)	f'c (N/mm <sup>2</sup> )	р <sub>w</sub> (%)	Rebar		
150-21-024	150		0.24	#3(D10)@200-S		
180-21-039		20.7	0.39	#3(D10)@200-D		
180-21-071	180		0.71	#4(D13)@200-D		
180-21-111			1.11	#5(D16)@200-D		
	Name 150-21-024 180-21-039 180-21-071 180-21-111	Name     t (mm)       150-21-024     150       180-21-039     180       180-21-111     180	Xame         t (mm)         f'c (N/mm <sup>2</sup> )           150-21-024         150           180-21-039         20.7           180-21-071         180	X = 1 $X = 1$ <		

表-1 試験体一覧

Note : S and D indicate single and double rebar respectively. t : Thickness





図-1 試験体形状

表-2 材料特性

a) コンクリート

b) 鉄筋

	f' <sub>c</sub> (N/mm <sup>2</sup> )	Strain at f ' <sub>c</sub> (%)	Young modulas (kN/mm <sup>2</sup> )	Rebar	Yield stress (N/mm <sup>2</sup> )	Yield strain (%)	Young modulas (kN/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (N/mm <sup>2</sup> )
Wall	20.7	0.1055	20.0	#3 (D10)	362	0.2123	170	495
vv all	20.7	0.1955	20.9	.9 #4 (D13) 352	0.1998	176	481	
Stub	43.4	0.1982	29.4	#5 (D16)	351	0.2056	171	501

上部から、打継ぎ処理は金ゴテ押えとした。

## 2.2 材料特性

**表**-2 にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。  $\phi$ 100×200mm のテストピースの圧縮強度(以下, *f*'c)は 壁およびスタブにおいてそれぞれ 20.7, 43.4N/mm<sup>2</sup>であ った。鉄筋は鋼種が SD295A 材である普通鉄筋とし,降 伏応力度は 351~362N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 2.3 載荷方法

加力装置上部に球座を有する 2,000kN アムスラー試験 機を用いて一方向繰返し圧縮載荷とし、スタブを介して 試験体に圧縮力を与えた。加力冶具はスタブに対して十 分に大きく、スタブ上面を平滑に仕上げ、キャッピング は使用していない。

図-2 に載荷計画を示す。材料試験結果に基づき,1/3 f'cおよび 2/3f'cを目標値として繰り返したのち,最大圧 縮力を確認した。以降,最大圧縮力の 0.9 から 0.2 倍ま で,概ね 0.1 刻みの倍数を最大圧縮力に乗じた値を目標 値とし,変位を増大させた。

## 2.4 計測方法

図-3に計測方法を示す。荷重および中央の変位は、そ れぞれロードセルおよび変位計(試験体中央の1点)を 用いて計測した。試験体には平面上の中央に、歪みゲー ジを貼付したアクリルの中空四角柱(以下、アクリル柱) をコンクリートに埋め込んだ。圧縮力下においてアクリ ル柱とコンクリートは一体化するように,アクリル柱の 外形は凹凸の形状を有しており,アクリル柱の歪み度と コンクリートの歪み度は等しいものとして計測した。

#### 実験結果および考察

## 3.1 荷重と変位の関係

図-4 に荷重(以下, P)と変位の関係(包絡線)を示す。 変位は試験体高さ 1/2 の位置において測定した値を 2 倍 し, スタブの弾性変位を減じて, 試験区間の変位とした。

図-4(a)に No.1 および 2 の比較を示す。壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2 よりも, 壁厚が 150mm でシン グル配筋である No.1 の最大荷重(以下, *P<sub>max</sub>*)時変位は大 きくなった。

No.1 は, 変位 2.1mm で *Pmax*833kN に達し, 変位 10.7mm, 荷重 286kN となった×の点において, ひび割れが過大と なり, 損傷の偏りが大きく脆性的な性状を示したため載 荷を終えた。

No.2 は、変位 1.0mm で  $P_{max}$ 924kN に達し、変位 5.4mm において最大荷重に対する荷重の比(以下,  $P/P_{max}$ )が 0.18 となり、十分に圧縮破壊がすすんだことを確認して載荷 を終えた。No.1 とは異なり、大きな損傷の偏りはなく、 No.1 よりも安定していた。



図-4(b)に No.2~4の比較を示す。 壁厚は 180mm でダ ブル配筋であり、 *p*wは 0.39~1.11%である。

No.3 および4は, それぞれ, 変位 1.7, 0.7 mm で *P<sub>max</sub>*965, 844 kN に達し, 変位 14.7, 17.5mm において *P*/*P<sub>max</sub>*が 0.2 以下となり, 十分に圧縮破壊がすすんだことを確認して 載荷を終えた。No.2~4 では大きな損傷の偏りはなかっ た。

図-5 にコンクリート負担分の相対荷重と変位の関係 (包絡線)を示す。コンクリートが負担する荷重(以下, *P*) は、*P*から鉄筋が負担する荷重(鉄筋中央部における表 裏の歪み度平均値から算出,以下, *sP*)を減じた値とし、 相対荷重は *P*をその試験体の最大値(以下, *cPmax*)で除 して基準化したものとする。鉄筋の降伏歪み度以降の *sP* は降伏応力度を用いて算出した。すべての試験体で、 *cPmax*前後において壁筋は縦横筋とも概ね降伏歪み度に 達し、座屈はしなかった。

緩やかに塑性化が進んだ後に、 $_cP_{max}$ に達する試験体も みられたため、本論においては、 $_cP_{max}$ 時の変位、または、 接線剛性が初期剛性(以下、 $K_0$ )に対して 1/100 になった ときの変位の小さい方を降伏変位(以下、 $\delta_y$ )と定義する。 鉄筋が負担する圧縮力を減じて評価した**図**-5 におい ても**図**-4と概ね同様の傾向がみられたため, $p_w$ が0.71% より大きくても  $_{e}P$  と変位の関係は向上しない。すなわ ち, $p_w$ が1.11%では,他の試験体よりも壁筋歪み度の増 加が緩やかになったため, $p_w$ が0.71%より大きくても壁 筋がコンクリートを拘束する効果はみられない。

## 3.2 損傷状況

図-6 に各試験体の最終損傷状況を示す。すべての試験体において、*P<sub>max</sub>付近*まで、ひび割れ幅 0.2mm 程度の 損傷がみうけられ、変位の増大にともない、ひび割れの 進展とひび割れ幅が増大するという性状がみられた。図 -1 におけるスタブには損傷がほとんどみられなかった。 壁余長部分にはほとんど損傷はみられず、概ねスタブ幅 の内側に損傷がみうけられた。

壁厚が 150mm でシングル配筋である No.1 では、変位 10.7mm、荷重 286kN となった図-4(a)における×の点 において、図-6(a)における楕円の範囲のひび割れ幅が 特に過大となり、左右の壁縦筋歪み度の偏り、および、 目視による損傷の偏りが生じ、脆性的な性状を示した。 壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2~4 では、pwの









図-6 コンクリートの最終損傷状況

変動にともなう損傷状況の大きな相違はみられない。

## 3.3 コンクリートの歪み度分布

図-7 にコンクリートの歪み度分布を示す。図-7(a) における C1~C6 の歪みゲージの位置は、図-6(b)にお ける C1~C6 の位置を示し、すべての試験体において 2% までは妥当な値を計測できたものと判断したため、2%を 超えた場合には、それ以上の歪み度が生じているとして 右矢印で示した。

壁の上部および下部よりも中央部の歪み度が大きくな る傾向がみられたことは,壁横筋の拘束効果に起因する。



Note:  $\times \rightarrow$  indicates 2% or more.

図-7 コンクリートの歪み度分布



### 3.4 圧縮破壊領域長さ

前述の通り、本論の試験体は壁筋の効果によって、損 傷が壁高さ方向において大きく偏ることがなく、*Pmax*時 には壁高さ方向に渡り、概ね*f'c*時の歪み度を超えていた ため本論におけるすべての試験体の圧縮破壊領域長さは、 200mmであるとする。

## 3.5 圧縮破壊エネルギー

図-8に応力度と変位の関係を示す。同図は、図-5の *cP*を壁厚と載荷幅 250mm で除し、各サイクルのピーク 時を直線で結んだものである。図の頂点は *δ*,のときの値 とした。このグラフで囲まれた面積を用いて *G*<sub>fc</sub>を評価の する。

図-9に圧縮破壊エネルギー(以下,  $G_{fc}$ )と壁厚および $p_w$ の関係を示す。変位は試験区間の高さに対するものであるため、壁高さ方向の鉄筋間隔 200mm を試験区間の高さ 250mm で除した値 0.8 を前述の面積に乗じたものを 壁筋によって囲まれたコンクリートの  $G_{fc}$ とした。

壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2 から 4 におい て、 $p_w$ の増加にともない壁筋の拘束効果が増すので、 $G_{fc}$ が増加する傾向が見られたが、 $p_w$ が 0.71%を超えると他 の試験体よりも壁筋歪み度の増加が緩やかになったため  $G_{fc}$ は同程度となった。

壁厚が 150mm でシングル配筋である No.1 は前述の通り脆性的であったが、*G<sub>fc</sub>の値は、壁厚が 180mm でダブ*ル配筋である No.2~4 より大きい値を示した。

## 3.6 等価な圧縮破壊領域幅

**表**-3に実験結果をまとめた。等価な圧縮領域幅(以下,  $_{ebp}$ )は、 $P_{max} \approx f'_{c}$ と壁厚で除したものと定義する。

 $p_w$ の増加にともない  $_{sP}$ が増加するため  $_{eP}$ が減少する。 すなわち, No.1 から 4 において,  $p_w$ の増加にともない  $_{ebp}$ は減少した。

### 4. 結論

RC 造壁の最大耐力と変形性能を精度よく評価することを目的とし,壁筋を有する壁要素モデルの板状試験体を製作し,圧縮力を載荷してコンクリートの歪み軟化特性を明らかにするための基礎実験を行い,以下の知見を得た。

- すべての試験体における高さ方向の歪み度分布は、 壁の上部および下部よりも中央部の歪み度が大きく なる傾向がみられた。
- 3) すべての試験体における圧縮破壊領域長さは 200mm であった。

表-3 実験結果

#	$P_{max}$ (kN)	$_{c}P_{max}$ (kN)	$\delta \operatorname{at}_{c} P_{max}$	$\delta_y$ (mm)	A' (cm <sup>2</sup> )	$_{e}b_{p}$
	· · ·		. /	× /	(0)	× /
No.1	833	807	2.1	1.2	389	260
No.2	924	898	1.0		433	241
No.3	965	889	1.7		429	238
No.4	844	747	0.7	0.6	361	200

Note: *P<sub>max</sub>* : Maximum load

 $_{c}P_{max}$  : Maximum load of concrete

 $\delta$  : Displacement

 $\delta_{v}$  : Displacement at Minimum ( $P_{max}$  or  $0.01 \cdot K_0$ )

A' :  ${}_{c}P_{max}$  divided by  $f'_{c}$ 

 $_{e}b_{p}$  : A' divided by thickness

- G<sub>fc</sub>は壁厚および配筋を考慮して評価できるように今後の検討が必要である。
- 5) 本論の試験体では,壁の余長を十分に確保したため, *ebp* は鉄筋間隔を超えて増加した。両側柱付き壁など はこれに相当するが,圧縮縁に位置する袖壁など,*ebp* を確保できない場合は、コンクリートの歪み軟化特 性を十分に検討する必要がある。

## 参考文献

- ROTS, J. G. : Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD thesis, Delft University of Technology, 1988
- 高森直樹, Benny Benni Assa, 西山峰広, 渡邊史夫: 横拘束コンクリートの応力度-ひずみ度関係定式 化に関する基礎的実験研究, 日本コンクリート工学 会年次論文集, Vol.18, No.3, pp.395-400, 1996
- J. B. Mander, M. J. N. Priestley, R. Park, Fellow, ASCE : Theoretical Stress-strain Model for Confined Concrete, J. Struct. Eng, Vol.114, Issue.8, pp 1804-1826, Sep.1998
- Hikaku Nakamura, Takeshi Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E Seminor on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.259-272, 1999.10
- 渡辺健、二羽淳一郎、横田弘、岩波光保: 圧縮破壊の局所化を考慮したコンクリートの応力-ひずみ関係の定式化, 土木学会論文集, Vol.58, No.725, pp 197-211, 2003.2
- 村松慎也,越川武晃,齊藤隆典,長谷川拓哉:コン クリートの一軸圧縮軟化性状の定量化に関する検 討,日本建築学会北海道支部研究報告集,No.83, pp.81-84,2010