

論文 RC 造壁のコンクリート要素モデルにおける壁筋を考慮した一軸圧縮破壊特性に関する基礎実験 ($f'_c=32.1$ および 42.3N/mm^2 の場合)

尾野 淳一*1・甘利 友宏*2・大村 哲矢*3

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一軸圧縮破壊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, 一軸圧縮破壊特性

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が増加し、ピーク以降においても、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。一方、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、コンクリートの圧縮破壊特性、および、歪み軟化特性を高い精度で評価し、最終的には数値解析によって 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、実験では計測が困難である部分の解析データを検証し、パラメトリックに解析を行う解析を用いた検証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、圧縮破壊特性を考慮したコンクリートモデルについては、適切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。

Rots¹⁾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²⁾は、コンクリート強度 $25\sim 83\text{N/mm}^2$ 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, Park³⁾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, Nakamura⁴⁾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 $11\sim 52\text{N/mm}^2$ 、直径 $100\sim 150\text{mm}$ 、高さ $100\sim 600\text{mm}$ 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⁵⁾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 $26\sim 48\text{N/mm}^2$ 、直径 100mm 、高さ $200\sim 800\text{mm}$ 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⁶⁾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 $29\sim 36\text{N/mm}^2$ 、直径 $100\sim 200\text{mm}$ 、高さ $200\sim 600\text{mm}$ 、無筋コンクリートの円柱試験体の圧縮試験を行い、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

*1 東京都市大学 大学院 総合理工学研究科 建築・都市専攻 (学生会員)

*2 東京都市大学 大学院 総合理工学研究科 建築・都市専攻

*3 東京都市大学 建築都市デザイン学部 建築学科 准教授 (正会員)

が壁のよう板状の場合においても同様の性状を示すか検証する必要がある。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検証することが必要である。

上記の既往研究は文献 7) においても述べており、同文献では、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、コンクリートの歪み軟化特性を明らかにするための圧縮荷重実験を行った。コンクリート強度 20.7N/mm² では、既往の評価方法 6) に加え、壁厚、壁筋量を考慮する必要があることを示した。

本論文は文献 8) および 9) をまとめて加筆したものである。ここでは、岩崎ら 7) と同様の観点に基づき、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、圧縮力の荷重実験を行い、岩崎ら 7) の試験体よりもコンクリート強度が増加した場合の影響を考察するものとする。

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。共通要因は立面形状である。

変動要因はコンクリート強度(f'_c)、壁厚(t)、壁筋比(p_w) である。 t 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 0.24~1.11% 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~D16 とした。

表-1 試験体一覧

| # | Name | t (mm) | f'_c (N/mm ²) | p_w (%) | Rebar |
|---|------------|--------|-----------------------------|-----------|---------------|
| 1 | 150-32-024 | 150 | 32.1 | 0.24 | #3(D10)@200-S |
| 2 | 180-32-039 | 180 | | 0.39 | #3(D10)@200-D |
| 3 | 180-32-071 | | | 0.71 | #4(D13)@200-D |
| 4 | 180-42-111 | | 42.3 | 1.11 | #5(D16)@200-D |

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

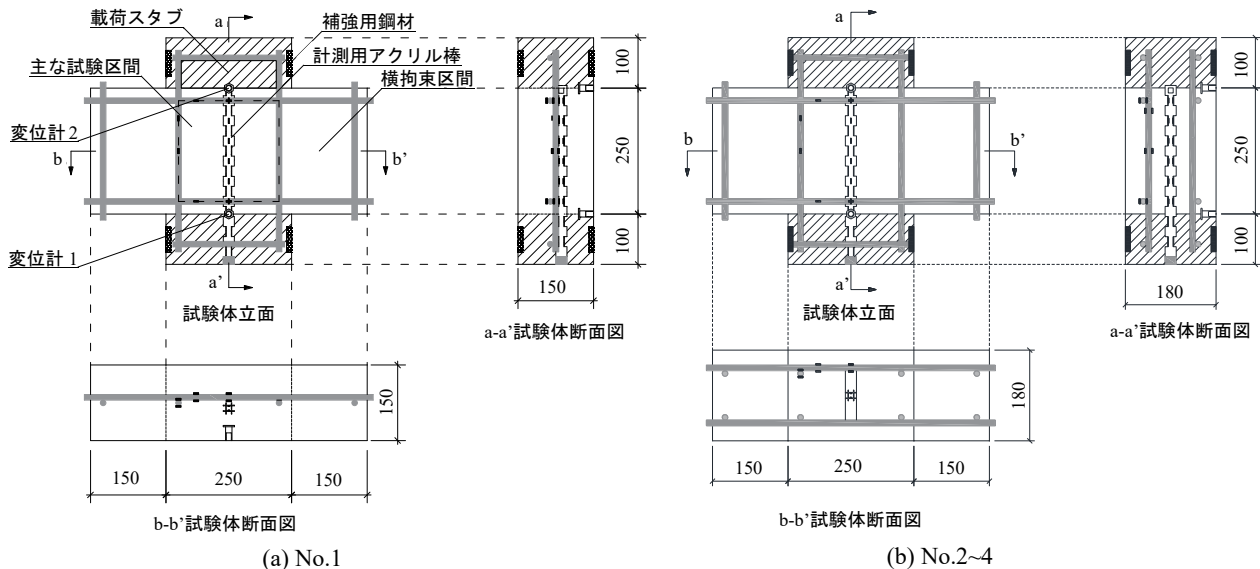


図-1 試験体形状

表-2 材料特性

a) コンクリート

b) 鉄筋

| # | Area | f'_c (N/mm ²) | strain at f'_c (%) | Young's modulus (kN/mm ²) | Rebar | Yield stress (N/mm ²) | Yield strain (%) | Young's modulus (kN/mm ²) | Tensile strength (N/mm ²) |
|-----|--------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------------|----------|-----------------------------------|------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| 1~3 | Focused area | 32.1 | 0.20 | 25.7 | #3 (D10) | 369 | 0.22 | 169 | 507 |
| 4 | | 42.3 | 0.21 | 36.7 | #4 (D13) | 346 | 0.25 | 175 | 489 |
| 1~4 | Stub | 55.3 | 0.21 | 35.1 | #5 (D16) | 335 | 0.19 | 181 | 476 |

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 $200 \times 200\text{mm}$ とし、壁の長さ方向に対して、 150mm の壁の余長を設け、壁の長さとは高さはそれぞれ 550 および 250mm とした。この壁を上下に挟むように $100 \times 250\text{mm}$ の載荷スタブを設けた。また載荷の際に試験区間まで荷重が均等に到達するよう、厚みが 10mm 、高さが 50mm の帯状の補強用鋼材を上下の載荷スタブに設置した。

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。

$\phi 100 \times 200\text{mm}$ のテストピースの圧縮強度は壁が No.1~3, No.4 においてそれぞれ $32.1, 42.3\text{N/mm}^2$ であり、スタブが 55.3N/mm^2 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 $335\sim 369\text{N/mm}^2$ であった。

2.3 載荷方法

$2,000\text{kN}$ 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。

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 $2/3 f'_c$ 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。

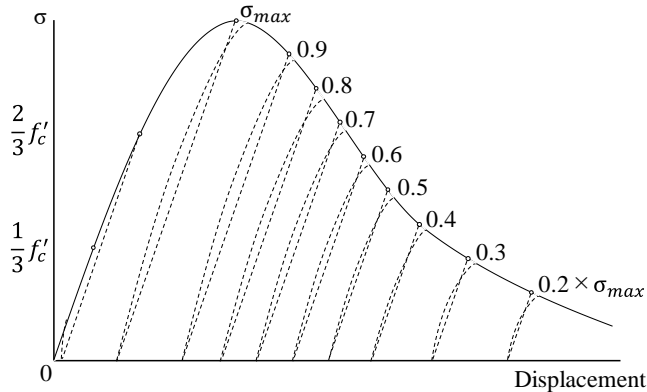
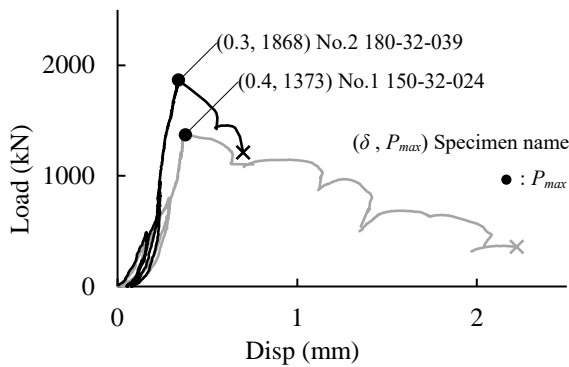


図-2 載荷計画



(a) No.1, 2

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を用いて計測する。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。

3. 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。変位はスタブと試験区間の境界位置において測定した値から、試験区間の変位を算出した。

図-4(a) に No.1 および 2 の比較を示す。 f'_c は共通で 32.1N/mm^2 である。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_{max} ）時変位は大きくなった。試験体の等価断面積の増加は 1.22 倍であるのに対し、 P_{max} の増加は 1.36 倍であった。

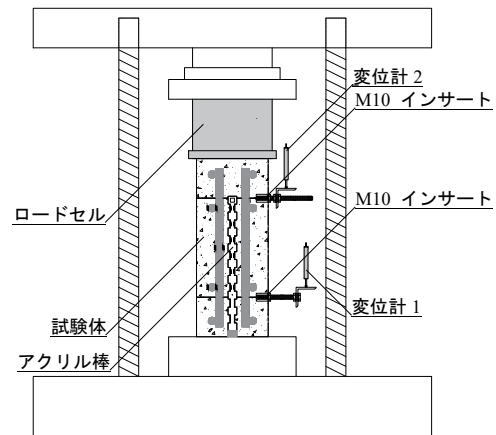
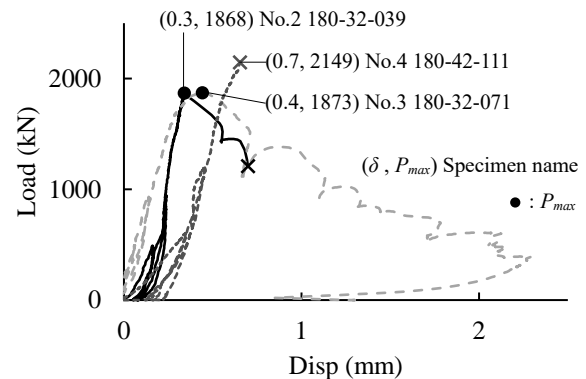


図-3 計測計画



(b) No.2~4

図-4 荷重と変位の関係

No.1, 2はそれぞれ、変位0.38mm, 0.35mmで P_{max} 1373kN, 1868kNに達し、変位2.2mm, 0.71mm, 荷重360kN, 1210kN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なり、No.1においては、脆性的な破壊性状を示した。

図-4(b)にNo.2~4の比較を示す。 f'_c はNo.2,3で32.1N/mm², No.4で42.3N/mm²である。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は、変位0.46mmで P_{max} 1873kNに達し、変位2.28mmにおいて P/P_{max} 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载荷を終えた。

No.4は、変位0.7mm, 荷重2149kN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载荷を終えた。

No.3では脆性的な破壊は見られず、大きな損傷の偏りはなかった。No.3は、No.2に対し p_w が1.8倍(0.71/0.39)増加しているが、 P_{max} は同等であった。 P_{max} 以降 p_w の増加に伴い、緩やかに損傷が進展した。

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、 cP)は、 P から鉄筋が負担する荷重(鉄筋中央部の表裏の平均値、以下、 sP)を減じた値とし、相対荷重は cP をその試験体の最大値(以下、 cP_{max})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 は降伏ひずみ度として算出した。グラフに示す黒丸は降伏変位とそのときの相対荷重の値である。すべての試験体で、 cP_{max} 前後において壁筋は縦横筋とも概ね降伏歪み度に達した。

本論における降伏変位は cP_{max} 時の変位、または、剛性が初期剛性(以下、 K_0)の0.01倍に達した時の変位(以下、 δ_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 cP と変位の関係は向上しない。

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_{max} 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。

P_{max} で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No.4では、変位0.7mm, 荷重2149kNとなった図-4(b)における×の点において、図-6(d)における楕円の範囲でひび割れや剥離が増大し、脆性的な性状を示した。

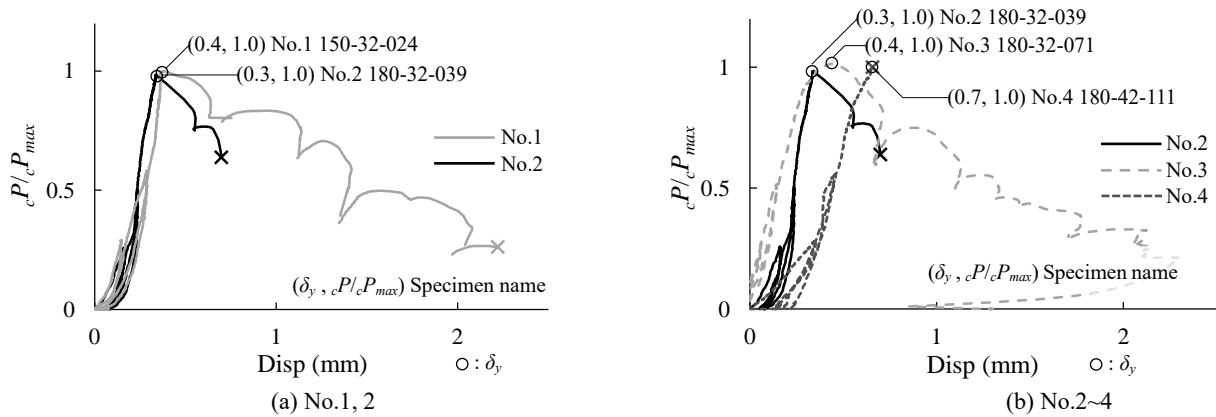
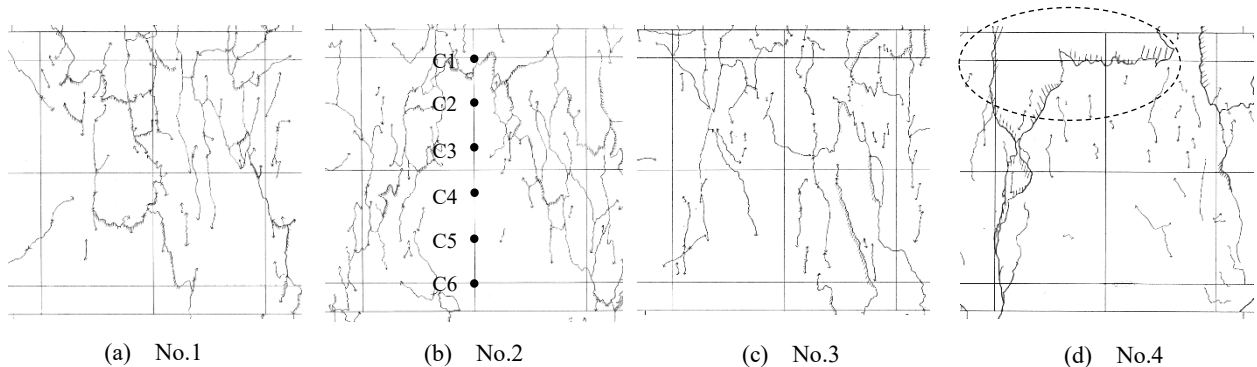


図-5 コンクリート負担分の相対荷重と変位の関係



Note: C1~C6 indicate the gauge location.

図-6 コンクリートの最終損傷状況

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た。

壁の下部よりも上部の歪み度が大きくなる傾向がみられたことは、骨材の沈降などにより材料特性が均一でないことに起因する。

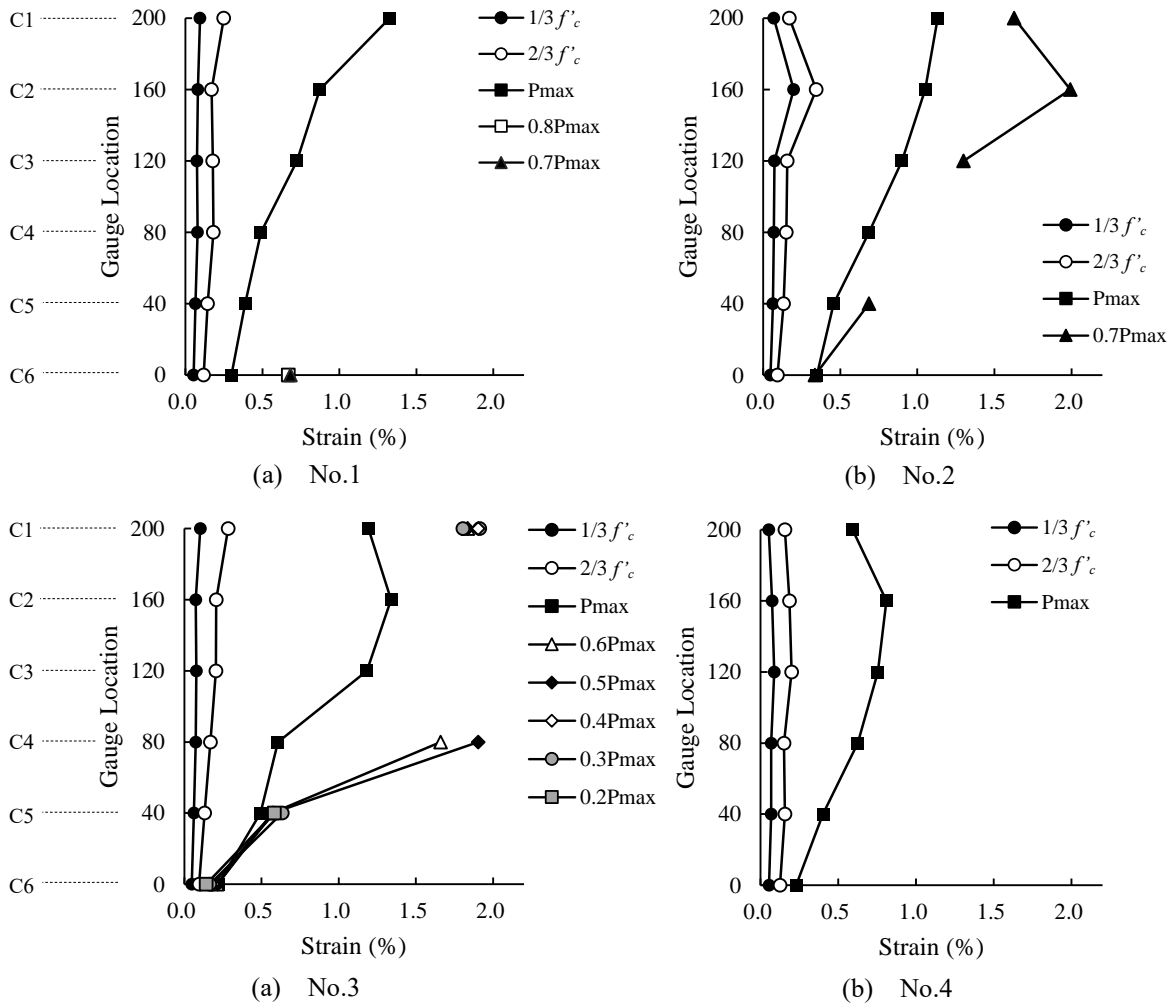


図-7 コンクリートの歪み度分布

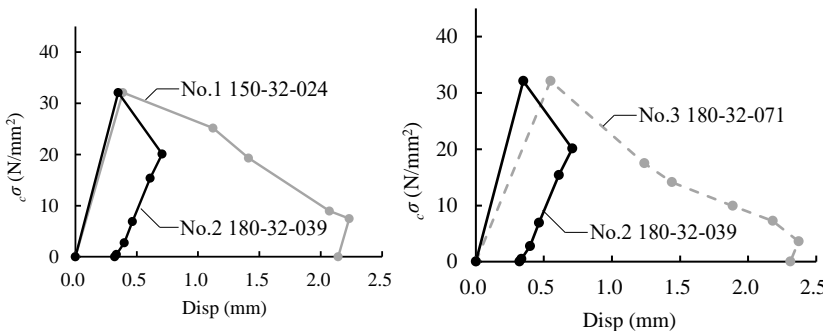


図-8 応力度と変位の関係

3.4 圧縮破壊領域長さ

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、 P_{max} 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 σ_c を壁厚と載荷幅 250mm で除し(以下、 σ)、各サイクルのピーク時を直線で結び、文献⁶⁾を参考に 0.2σ までを示

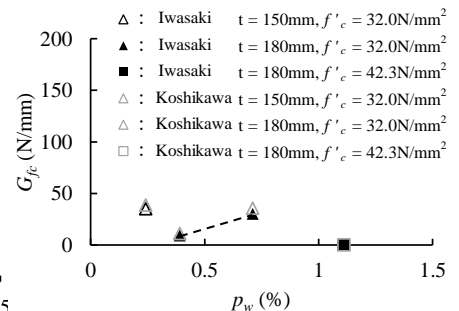


図-9 圧縮破壊エネルギーと p_w の関係

した。図の頂点は P_{max} 時の値とした。No.4 は最大荷重に達するとともに脆性破壊したため、圧縮破壊エネルギー(以下、 G_{fc})は 0 とした。図-9 に G_{fc} と p_w の関係における筆者らと越川ら⁹⁾の評価の比較を示す。 p_w の増加に伴い、歪み軟化特性は同様の傾向を示した。No.1~3 では、越川らの評価による G_{fc} の方が増加した。

変位は試験区間の高さに対するものであるため、壁筋によって囲まれたコンクリートの変位は、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 を乗じた値として、 G_{fc} を算出した。

壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2, 3 において、 p_w の増加に伴い G_{fc} が増加する傾向が見られた。

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_{fc} の値は、壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2, 3 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、 $e b_p$) は、 P_{max} を f'_c と壁厚で除したものと定義する。

壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2 および No.3 において、 p_w の増加に伴い $e b_p$ は減少した。壁厚が 150mm でシングル配筋である No.1 の値は壁厚が 180mm でダブル配筋である No.2 より小さい値を示した。

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。

- 1) 壁厚が 150mm から 180mm に増加すると最大荷重は増加する。壁厚 180mm ダブル配筋で壁筋が D10 から D13 に増加しても、最大荷重はほとんど変化しないが、コンクリート強度が 42.3N/mm² に増加し、壁筋が D16 に増加すると、最大荷重は増加する。
- 2) 全ての試験体において最大荷重前後で概ね降伏ひずみ度に達した。
- 3) コンクリート強度が、32.1 および 42.3N/mm² の試験体における圧縮破壊領域長さは 200mm であった。
- 4) G_{fc} はコンクリート強度に加えて、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) コンクリート強度が、32.1 および 42.3N/mm² の試験体では、壁の余長を十分に確保したため、 $e b_p$ 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、 $e b_p$ 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。

表-3 実験結果

| # | P_{max} (kN) | $c P_{max}$ (kN) | δ at $c P_{max}$ (mm) | δ_y (mm) | A' (cm ²) | $e b_p$ (mm) |
|---|-------------------|---------------------|---------------------------------|--------------------|----------------------------|-----------------|
| 1 | 1373 | 1320 | 0.391 | 0.388 | 411 | 274 |
| 2 | 1868 | 1764 | 0.340 | 0.338 | 550 | 305 |
| 3 | 1873 | 1697 | 0.470 | | 529 | 294 |
| 4 | 2149 | 2082 | 0.468 | | 493 | 274 |

Note: P_{max} : Maximum load
 $c P_{max}$: Maximum load of concrete
 δ : Displacement
 δ_y : 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

参考文献

- 1) ROTS, J. G. : Computational Modeling of Concrete Fracture, PhD thesis, Delft University of Technology, Sep.1988
- 2) 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, 1996.6
- 3) 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.1988
- 4) Hikaku Nakamura, Takeshi Higai : Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, JCI-C51E Seminar on Post-Peak Behavior of RC Structures Subjected to Seismic Loads, Vol.2, pp.259-272, Oct.1999
- 5) 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
- 6) 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, 2010.7
- 7) 岩崎恭平, 大村哲矢 : 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, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.41, No.2, pp.451-456, 2019.6
- 8) 山口智実, 岩崎恭平, 山田星奈, 大村哲矢 : 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 その 3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.51-52, 2020.9
- 9) 山田星奈, 岩崎恭平, 山口智実, 大村哲矢 : 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 その 4, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.53-54, 2020.9