

論文 FEM 解析による RC 造壁の要素における圧縮歪み軟化特性のモデル化に関する考察

岩崎 恭平*1・松藤 洋明*1・大村 哲矢*2

要旨：集合住宅の桁行方向や事務所建築など、壁量が少ない骨組みでは地震時において塑性変形能力に依存する場合が多いため、鉄筋コンクリート造部材である耐力壁の靱性評価が重要となる。既往の研究において、壁筋を有する板状試験体を対象に一方向繰返しの圧縮力載荷試験を行い、コンクリートの圧縮歪み軟化特性について考察した。本研究では、2次元静的弾塑性 FEM を用いて解析を行い、付着特性およびひび割れ後の圧縮強度低減の検討を行い、圧縮破壊エネルギー、圧縮破壊領域長さ、有効な圧縮破壊領域幅の評価に関して考察した。

キーワード：RC 造壁、要素モデル、鉄筋付着、ひび割れ低減、圧縮破壊領域長さ、圧縮破壊エネルギー

1. はじめに

鉄筋コンクリート（以下、RC）造建物において、RC 造壁は建物の空間を構成するのみならず、耐震性能を向上させる。新耐震設計法が施行された 1981 年以前に設計された建物に対しては、耐震診断基準¹⁾に準拠して耐震性能を評価することが多く、同基準では耐力壁および非耐力壁は、構造の特性に応じて靱性を評価する。一方、1981 年以降に設計された建物に対しては、新耐震設計法に準拠し、耐力壁の構造の特性および各階における壁量に応じて、構造特性係数 D_s を用いて評価する。

前述の耐力壁の靱性評価方法は構造設計の実務において合理的であると考えられるが、耐力壁の靱性能を詳細に検討することはほとんどなく、耐力壁の靱性能に関する研究は少ない。

張間方向に耐力壁を十分に有している集合住宅などは保有水平耐力が高い傾向にある。しかし、集合住宅の桁行方向および事務所建築など、耐力壁の量が少ない骨組みの場合は、骨組みの塑性変形能力に依存する傾向にあるため、耐力壁の靱性評価が重要となる場合が多い。

既報²⁾にも述べたように、既往の研究^{例えは 3), 4)}では、無筋または帯筋を想定した補強筋を伴った円柱形状、または、長方形柱を有する試験体を対象とした研究により、圧縮歪み軟化特性および帯筋の拘束効果は示されている。

本論では、壁筋を有する RC 造壁を想定した板状の試験体を対象として、力学性状を把握し、強度と歪み軟化特性を評価するものとし、既報²⁾につづき、2次元静的弾塑性 FEM を用いて解析を行い、壁筋を有する板状の試験体における圧縮歪み軟化特性を既往の研究^{3), 4)}と同様に評価して考察する。

まず、実験結果²⁾と解析結果の適合性を確認し、圧縮

歪み軟化特性のモデル化に関する基礎データを得ることを目的とする。

2. 解析概要

2.1 解析対象試験体

Fig.1 に解析対象試験体の形状、**Table1** に試験体一覧を示す。**Table2** にコンクリートおよび鉄筋の材料特性を示す。本研究では、既報²⁾の RC 造板状試験体である No.1~3 の計 3 体をモデル化した。

2.2 解析モデル

解析は DIANA Ver. 10.3 を用いた。**Fig.2** に解析モデルを示す。コンクリートの要素については、4 節点 4 辺形アイソパラメトリック平面応力要素を使用し、25mm 四方の正方形になるように要素分割を行った。鉄筋要素は、埋め込み鉄筋要素を使用した。試験区間および余長部分の鉄筋は付着を考慮し、スタブ部分の鉄筋については完全付着とした。境界条件はスタブを十分に拘束した。

荷重条件については、既報²⁾と同様にスタブを介して試験区間に圧縮力を加えるように変位制御とした。

2.3 材料特性

2.3.1 コンクリートモデル

Fig.3 にコンクリートの材料特性を示す。圧縮領域の応力度-歪み度関係には Feenstra の放物曲線⁵⁾を用いた。ひび割れ発生後の主応力面の回転を考慮した分散ひび割れモデルとし、Von Mises の破壊基準を仮定した。圧縮強度後の降下域における圧縮破壊エネルギー G_{fc} は、文献^{2), 3)}に基づいた。引張領域の応力度-歪み度関係には Hordijk らの非線形引張軟化曲線⁶⁾を用いた。割裂強度後の降下域における引張破壊エネルギー G_f は、大岡、橋高の式⁷⁾により、0.1N/mm とした。

*1 東京都市大学 総合理工学研究科 建築・都市専攻 建築学領域 (学生会員)

*2 東京都市大学 工学部建築学科准教授 博士(工学) (正会員)

2.3.2 鉄筋モデル

鉄筋は降伏後の歪み硬化を考慮しない完全弾塑性性を仮定したバイリニア型とし、応力については軸力のみを考慮した。降伏基準には Von Mises の降伏基準を用いた。

2.3.3 付着特性

Fig.4 にコンクリートと鉄筋の付着特性を示す。付着応力-すべり関係には完全付着モデル、または、FIB model⁸⁾

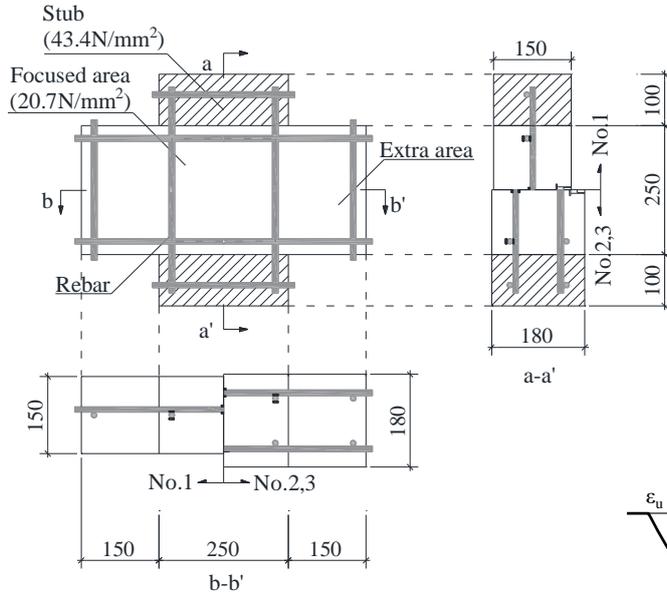


Fig.1 Test specimen

Table1 Specimen

| No. | Name | t (mm) | p_w (%) | Rebar | G_{fc} (N/mm ²) |
|-----|------------|--------|-----------|---------------|-------------------------------|
| 1 | 150-21-024 | 150 | 0.24 | #3(D10)@200-S | 107 |
| 2 | 180-21-039 | 180 | 0.39 | #3(D10)@200-D | 38 |
| 3 | 180-21-071 | 180 | 0.71 | #4(D13)@200-D | 73 |

p_w : Wall rebar ratio

G_{fc} : Compressive fracture energy²⁾

S or D indicate single or double rebar, respectively.

Table2 Material property

a) Concrete

| Concrete | f'_c (N/mm ²) | Strain at f'_c (%) | Young modulus (kN/mm ²) |
|----------|--------------------------------|-------------------------|--|
| Wall | 20.7 | 0.20 | 20.9 |
| Stub | 43.4 | 0.20 | 29.4 |

f'_c : Compressive strength

b) Rebar

| Rebar | Yield stress (N/mm ²) | Yield strain (%) | Young modulus (kN/mm ²) |
|----------|--------------------------------------|---------------------|--|
| #3 (D10) | 362 | 0.21 | 170 |
| #4 (D13) | 352 | 0.20 | 176 |

に基づく多線形モデル、または、初期剛性を 10kN/mm²/mm と仮定した弾性モデルを用いた。

2.3.4 ひび割れ後の圧縮強度低減

Fig.5 にコンクリートのひび割れ後の圧縮強度低減モデル(以下、 β_{cr})を示す。 β_{cr} は Collins model⁹⁾、または、直行方向の引張歪み度が 450 μ において圧縮強度が 0.67 倍になると仮定したモデル (以下、仮定モデル) を用いた。

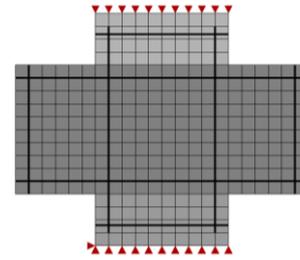


Fig.2 Meshed model

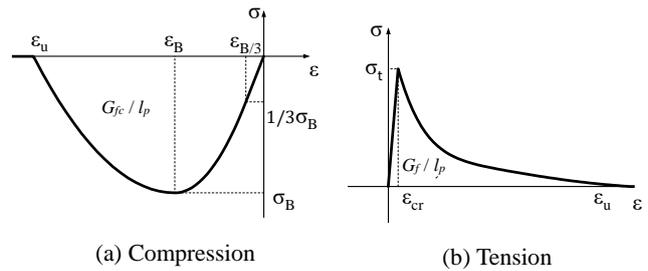


Fig.3 Concrete model

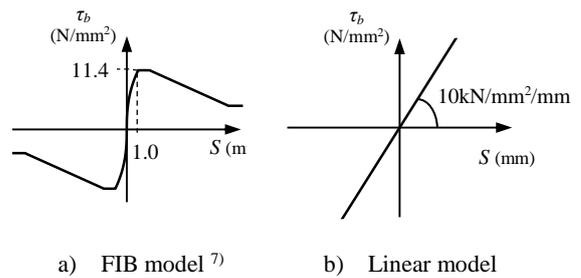


Fig.4 Bond slip model

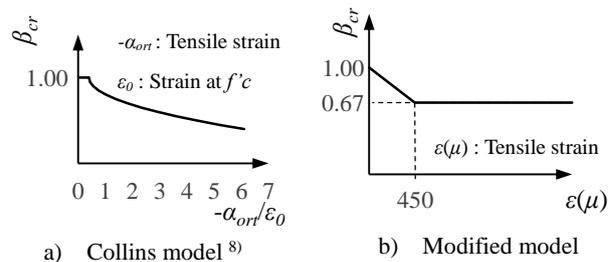


Fig.5 Reduction factor due to orthogonal cracking

3. 解析結果および検討

3.1 荷重と変位の関係

3.1.1 完全付着モデルを適用した場合

Fig.6 に荷重と変位の関係を示す。付着特性には全長にわたり完全付着モデルを適用し、 β_{cr} には Collins model を適用した。

No.1 は、実験結果における最大荷重(以下、 P_{max})が 833kN に対して、解析結果における最大荷重(以下、 $FE P_{max}$)は 809kN であった。 $FE P_{max} / P_{max}$ は、97%であった。解析結果は最大荷重付近までは良好な適合性を示したが、最大荷重以降は実験結果よりも急激に荷重が低下した。

実験結果が $0.5P_{max}$ 、まで低下した時の変位(8mm)において、実験結果における荷重(以下、 P)に対して、解析結果における荷重(以下、 P_{FE})は 30%となった。

No.2 は、 P_{max} が 924kN に対して、 $FE P_{max}$ は 1010kN であった。 $FE P_{max} / P_{max}$ は、109%であった。

No.3 は、 P_{max} が 965kN に対して、 $FE P_{max}$ は 1105kN であった。 $FE P_{max} / P_{max}$ は、114%であった。

最大荷重以降は、No.2 および No.3 は No.1 と同様の傾向を示した。

3.1.2 FIB モデルを用いた場合

Fig.7 に荷重と変位の関係を示す。付着特性には FIB model を適用し、 β_{cr} には Collins model を適用した。

No.1 は、 P_{max} が 833kN に対して、 $FE P_{max}$ は 778kN であった。 $FE P_{max} / P_{max}$ は、93%であった。最大荷重以降の

解析結果は完全付着モデルと同様に、実験結果よりも急激に荷重が低下し、変位 8mm の P_{FE} / P が 20%となった。

No.2 は、 P_{max} が 924kN に対して、 $FE P_{max}$ は 969kN であり、 $FE P_{max} / P_{max}$ は、105%となり、No.3 は、 P_{max} と $FE P_{max}$ は同じ値で 965kN を示した。最大荷重以降は、No.2 および No.3 では、 P_{max} の 60%付近までは良好な適合性を示したが、以降、解析結果は急激に荷重が低下する傾向を示した。

3.1.3 弾性付着モデルを用いた場合

Fig.8 に荷重と変位の関係を示す。前節の付着モデルは、引張応力下における実験に基づいたものであるため、本節では、弾性付着モデルを適用し、 β_{cr} には Collins model を適用した。

No.1 は、 P_{max} が 833kN に対して、 $FE P_{max}$ は 807kN であった。 $FE P_{max} / P_{max}$ は、97%であった。最大荷重以降解析結果は、 P_{max} の 70%付近まで実験結果よりも急激に荷重が減少したが、以降、同様な傾きを示したが、変位 8mm の P_{FE} / P は 33%となった。

No.2 は、 P_{max} が 924kN に対して、 $FE P_{max}$ は 1018kN であり、 $FE P_{max} / P_{max}$ は、110%となり、No.3 は、 P_{max} が 965kN に対して、 $FE P_{max}$ は 1105kN であり、 $FE P_{max} / P_{max}$ は、115%となった。最大荷重以降解析結果は、FIB model および Collins model のモデルと同様に、No.2 および No.3 では、最大荷重の 60%付近までは良好な適合性を示したが、以降、解析結果は急激に荷重が減少する傾向を示した。

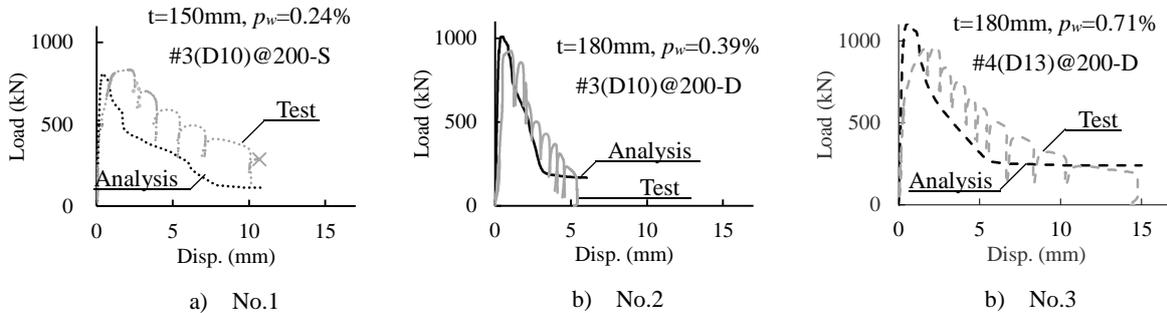


Fig.6 Load and Disp.(Perfect bonded and Collins model)

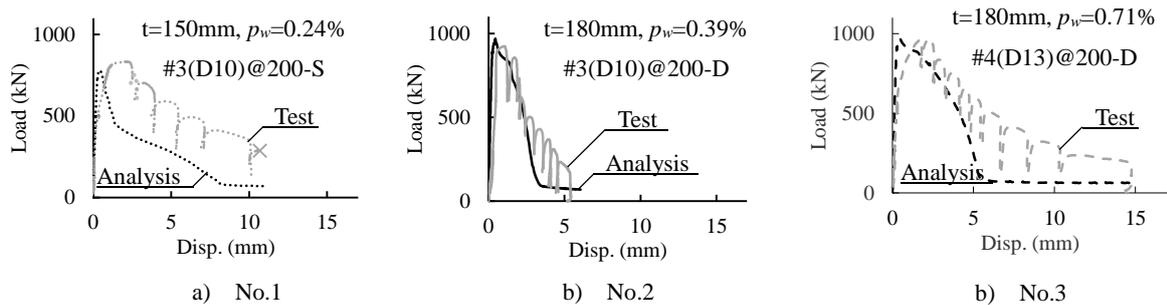


Fig.7 Load and Disp.(Fib bonded and Collins model)

3.1.4 筆者らが提案するひび割れ後の圧縮強度低減に関するモデルを適用した場合

Fig.9 に荷重と変位の関係を示す。付着特性には弾性付着モデルを適用し、 β_{cr} には仮定モデルを適用した。

No.1 は、 P_{max} が 833kN に対して、 FEP_{max} は 764kN にであった。 FEP_{max}/P_{max} は、92%であった。最大荷重以降の解析結果においても、良好な適合性を示した。

No.2 は、 P_{max} が 924kN に対して、 FEP_{max} は 952kN であり、 FEP_{max}/P_{max} は、103%となり、No.3 は、 P_{max} が 965kN に対して、 FEP_{max} は 1036kN であり、 FEP_{max}/P_{max} は、107%となった。最大荷重以降の解析結果においても、良好な適合性を示した。

以上より、本研究では、弾性付着モデルを適用し、 β_{cr}

には仮定モデルを適用した解析結果が最も適合性が良好であった。

3.2 最大荷重および鉄筋降伏時の変位

Fig.9 に実験結果および解析結果において、縦筋が降伏したステップを示す。鉄筋の降伏した変位は実験結果と解析結果で概ね一致し、いずれも最大荷重付近であった。

Fig.10 に解析結果における鉄筋降伏時の鉄筋の応力度分布を示す。解析結果における鉄筋降伏の位置は、縦筋と横筋の交差部に集中する傾向を示した。

3.3 コンクリートの圧縮歪み度分布

Fig.11 に解析結果における FEP_{max} 時のコンクリートの最小主歪み度分布を示し、Fig.12 に実験結果における P_{max} 時のコンクリートの歪み度分布を示す。

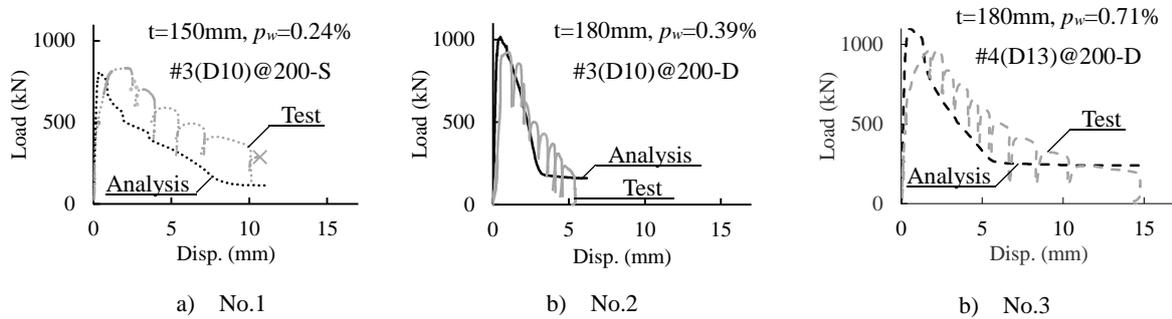


Fig.8 Load and Disp. (Modified bonded and Collins model)

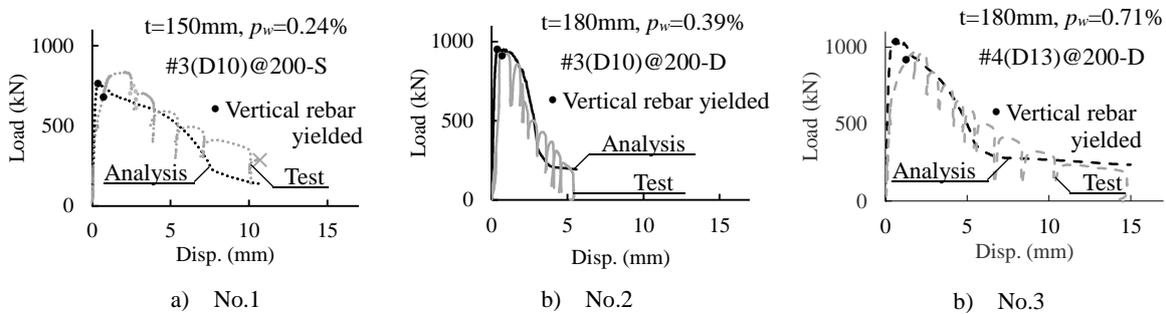


Fig.9 Load and Disp. (Modified bonded and modified model β_{cr})

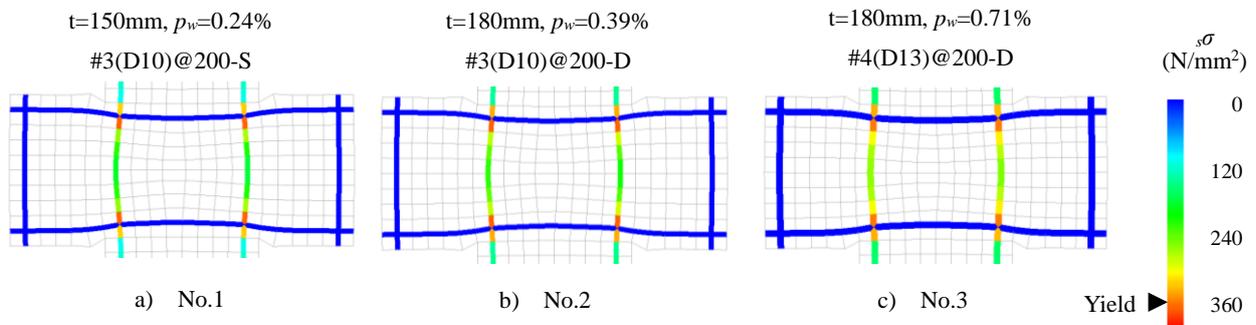


Fig.10 Vertical rebar stress

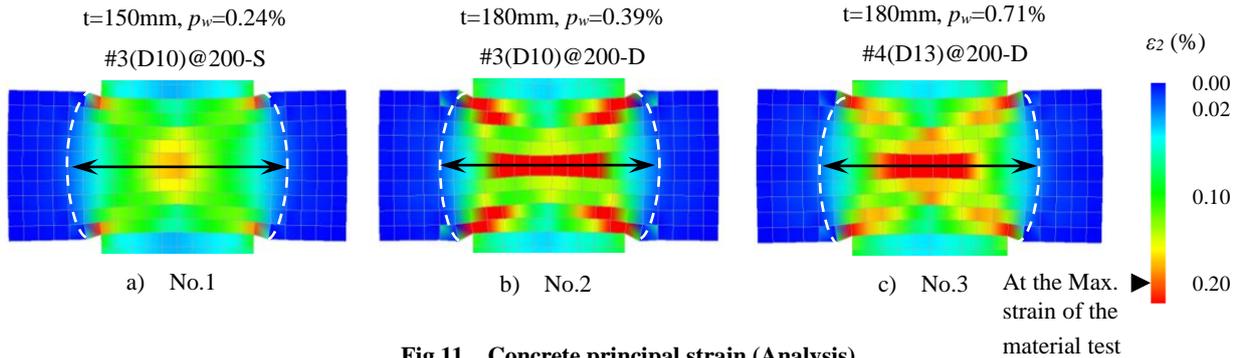


Fig.11 Concrete principal strain (Analysis)

解析結果においていずれの試験体も試験区間上下方向よりも中央部の歪み度が顕著に増加する傾向を示し、実験結果と同様な結果が見られた。

3.4 筆者らが評価した圧縮破壊領域長さ

Rots ら^{10), 5)}は圧縮破壊領域長さ(以下, l_p)を次式により, 正方形の要素における対角線の長さであるとして評価した。

$$l_p = \sqrt{2A} \quad (A: \text{Area of square}) \quad (1)$$

既往の研究^{3), 4)}では, 圧縮強度時の歪み度を上回った領域などとして評価したが, 筆者らは既報²⁾の実験結果に基づき, RC造壁要素試験体の試験区間全体において, 圧縮歪み度が0.2%を十分に超えていたため, 正方形の要素における一边を l_p として評価した。

Fig.13に荷重と変位の関係を示す。実験結果を薄灰色線で示し, Rotsおよび筆者らが評価した l_p を用いた解析結果をそれぞれ濃灰色線および黒線で示す。

Rotsらモデルより筆者らが評価した l_p を用いた解析結果の方が実験結果との適合性が良い傾向を示した。

3.5 圧縮破壊エネルギー

文献³⁾では, 圧縮破壊エネルギー(以下, G_{fc})は最大圧縮応力度(以下, σ_{max})の20%に圧縮応力度が低下するまでの圧縮応力度と変位の関係における面積として評価する。本論では, σ_{max} が60%または80%に低下するまでの G_{fc} も評価パターンとして加え, 荷重変位関係に与える影響を検討する。

Fig.14に圧縮応力度と変位の解析結果を示す。既報²⁾により, G_{fc} は応力と変位の関係に基づいて評価しているので, Y軸は荷重から鉄筋負担分を減じ, (壁厚×250)で除したものとした。実験結果を一点鎖線で示し, σ_{max} が20%, 60%, および, 80%まで低下するまでを G_{fc} の評価対象としたモデルをそれぞれ黒線, 濃灰色線および薄灰色線で示す。

0.2 σ_{max} としたモデルが最も実験結果との適合性が良い傾向を示した。よって本論では, G_{fc} は σ_{max} 以降0.2 σ_{max} までを評価対象とすることが妥当である。

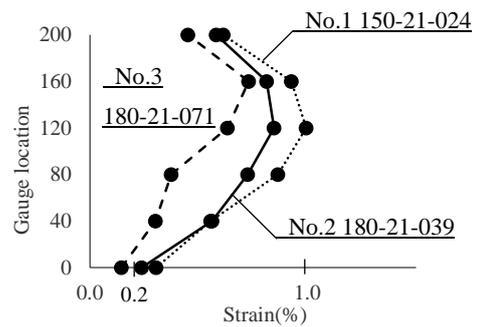


Fig.12 Concrete principal strain (Test)

3.6 有効な圧縮破壊領域幅

Fig.11における破線および矢印は有効な圧縮破壊領域幅を示している。

既報²⁾の材料試験における最大圧縮応力度時の歪み度であった0.2%の1/10である0.02%に達した要素までをX方向の歪みを拘束する効果があるものとして仮定し, 有効な圧縮破壊領域幅とした。

いずれの試験体も, 試験区間である壁縦筋の芯の位置から75mmまで歪み度0.02%に達しており, 壁縦筋間隔200mmの壁に対して, 左右それぞれ壁縦筋間隔の37.5%の有効幅が生じていることを確認した。

4. 結論

2次元静的弾塑性FEMを用いて, RC造壁の圧縮歪み軟化特性の評価に関する考察を行い, 以下の知見を得た。

- (1) 完全付着モデル, および, FIBモデルを適用した解析結果と実験結果における荷重と変位の関係についての適合性が低かったが, 仮定した弾性付着モデルの解析結果は適合性が向上した。コンクリートまたは鉄筋が負担する圧縮荷重の割合は付着特性に依存することに起因する。
- (2) ひび割れ後の圧縮強度低減に関するCollinsらのモデルを適用した解析結果と実験結果における荷重と変位の関係について, FEP_{max} 後の荷重低下が著しかった。ひび割れ後の圧縮強度低減に関する仮定モ

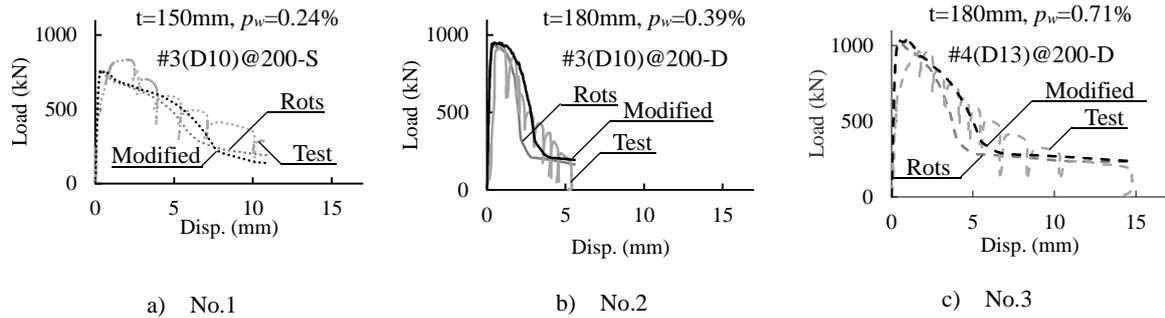


Fig.13 Load and Disp.

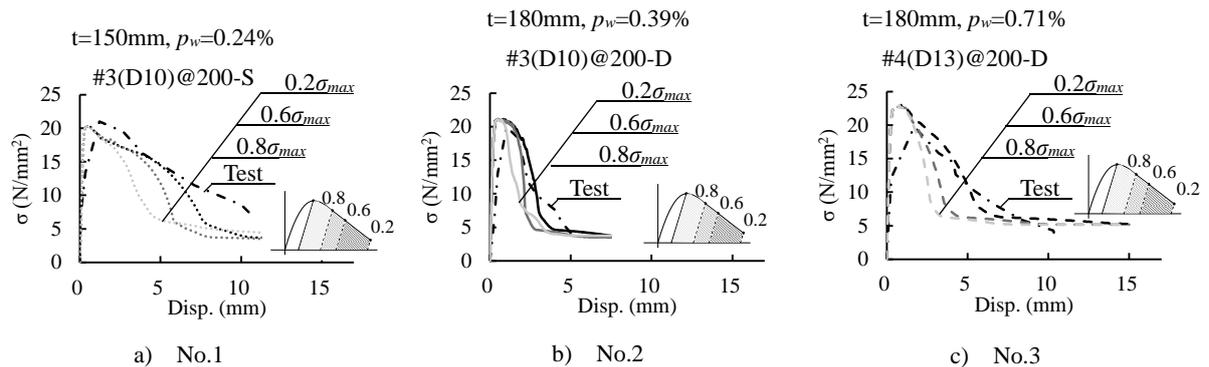


Fig.14 Concrete stress and Disp.

デルを適用した解析結果の適合性は向上した。

- (3) 圧縮破壊領域長さに関して Rots ら、または、筆者らが評価した l_p を適用した解析結果と実験結果における荷重と変位の関係を比較し、後者のほうが適合性は良好であった。実験結果を直接的に評価したことに起因する。
- (4) 弾性付着モデル、ひび割れ後の圧縮強度低減に関する仮定モデル、筆者らが評価した圧縮破壊領域長さに関する評価を適用した解析結果と実験結果における荷重と変位の関係は、最も適合性が良好であった。
- (5) 圧縮破壊エネルギーは、圧縮応力度が最大圧縮応力度の 20%に低下するまでの面積を評価することが妥当であると考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：2017年改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準準解説，2017
- 2) 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，コンクリート工学年次大会梗概集，41巻2号，pp451-456，2019
- 3) 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

- 4) 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
- 5) Feenstra, P.H.: Computational Aspects of Biaxial stress in Plain and Reinforced Concrete, Ph.D Thesis, Delft University of Technology, 1993
- 6) Cornelissen, H.A.W., Hordijk, D.A. and Reinhardt, H.W.: Experimental Determination of Crack Softening Characteristics of Normal Weight and Light Weight Concrete, Heron 31, 2, 1986
- 7) 大岡督尚，橘高義典：コンクリートの破壊パラメータに及ぼす短繊維混入および材齢の影響，日本建築学会構造系論文集，第529号，pp1-6，2003.3
- 8) Fib CEB-FIP: Fib model code 2010, Final draft-Vol.1, 2012
- 9) Vecchio, F.J., and Collins, M.P.: Compression response of cracked reinforced concrete. J. Str. Eng., ASCE 119, pp3590-3610, 1993
- 10) ROTS, J. G. : Computational Modeling of Concrete Fracture, Ph.D thesis, Delft University of Technology, 1988