

## ひび割れ誘発材に異形鉄筋を用いた RC 造耐震壁に関する解析的研究

### その2 有限要素解析によるパラメトリックスタディ

正会員 ○河南孝典\*1 同 松井亮夫 \*2 同 濱田 真\*1

同 井戸裕勇樹\*2 同 秦野敦史\*3 同 谷 昌典\*4 同 西山峰広\*5

## 2. 構造—8. 鉄筋コンクリート構造—I. 耐震壁

### RC 壁, 乾燥収縮, 誘発目地, 誘発鉄筋, 有限要素解析

#### 1. はじめに

その1では、ひび割れ誘発材に異形鉄筋を用いた曲げ降伏先行型の RC 造連層耐震壁に関する実験計画を概説し、最大耐力および脚部鉛直変位の解析値と実験値の比較検討を行った。また、実験で確認出来なかった因子(パラメータ)について、脚部鉛直変位の解析的検討を行った。その2では、実験で確認できなかった因子および繰り返し解析の影響を述べる。

#### 2. パラメータ解析

実験の基準試験体は FWP63R20 である。パラメータ解析では、誘発材径を実験で設定した水準以外に3水準設定した。さらに、繰り返し解析(1回・2回)を行い、実験結果および実験試験体の単調載荷解析結果との比較を行った。

##### 2. 1 曲げ強度に対する誘発材径の影響

本節では、曲げ強度に対する誘発材径の影響について検討する。実験での誘発材は D6 と D16 を用いたが、材料強度が異なる。そこで、誘発材強度を D16 の材料強度に統一し、誘発材径を D6(FWP63R07\*), D10(FWP63R12\*), D13(FWP63R16\*)とした場合の解析を行った。なお、その1の3.4節で解析した D16(FWP63R20)の場合の解析結果も併せて示す。

表1に最大耐力時の解析値と計算値の比較を、図1に解析で得られた水平荷重-全体変形角関係を示す。同図より、最大耐力時の変形はほぼ同じであったが、誘発材径の増加、つまり、誘発材の断面積の増加につれて最大耐力が若干増加する傾向が認められた。ただし、曲げ終局耐力の計算値 609kN に対して、誘発材径 D6 試験体の最大耐力は+13%、D16 試験体は+15%であり、誘発材径を D6 から D16 に変化させても曲げ終局耐力の計算値に対して 2P の増加であり、

表1 最大耐力時の解析値と計算値(誘発材径)

解析モデル	解析値		実験値		曲げ終局耐力 cQmu (kN)	修正広沢 mean式 cQsu (kN)	比較値		せん断 余裕度 cQsu/ cQmu
	aQmax (kN)	aR (%)	eQmax (kN)	eR (%)			aQmax/ cQmu	eQmax/ cQmu	
FWP63R07*	688	0.89	732	1.50	609	1161	1.13	1.20	1.91
FWP63R12*	693	0.87	—	—	609	1161	1.14	—	1.91
FWP63R16*	701	0.89	—	—	609	1161	1.15	—	1.91
FWP63R20	710	0.87	727	0.98	609	1161	1.17	1.19	1.91

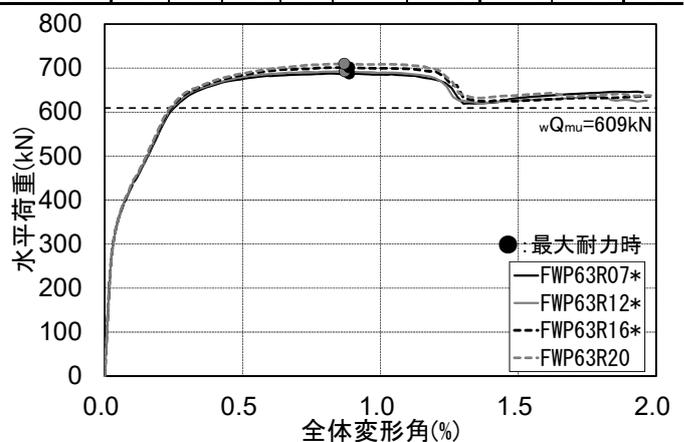


図1 水平荷重-全体変形角関係(誘発材径)

ほとんど変化がなかった。したがって、最大耐力が曲げで決まる場合は、誘発材径が最大耐力に与える影響はほぼ無視してもよいと考えられる。

##### 2. 2 曲げ強度に対する中間梁寸法の影響

本節では、曲げ強度に対する中間梁寸法の影響について検討する。実験では両試験体とも中間梁寸法は 200mm×300mm とした。ここでは、FWP63R20 をベースに、梁鉄筋位置を中央側に寄せて中間梁寸法を 100mm×300mm (FWP63R20(WG)\*)とした場合の解析を行った。なお、その1の3.4節で解析した中間梁寸法が 200mm×300mm(FWP63R20(G))の結果も併せて示す。

表2に最大耐力時の解析値と計算値の比較を、図2に解析で得られた水平荷重-全体変形角関係を示す。同図より、最大耐力および最大耐力時の変形はほぼ同様であり、中間梁寸法の影響は認められなかった。

表 2 最大耐力時の解析値と計算値(中間梁寸法)

解析モデル	解析値		実験値		曲げ終局耐力	修正広沢 mean式	比較値		せん断余裕度
	aQmax (kN)	aR (%)	eQmax (kN)	eR (%)	cQmu (kN)	cQsu (kN)	aQmax/cQmu	eQmax/cQmu	cQsu/cQmu
FWP63R20(G)	710	0.87	727	0.98	609	1161	1.17	1.19	1.91
FWP63R20(WG)*	710	0.85	—	—	609	1161	1.17	—	1.91

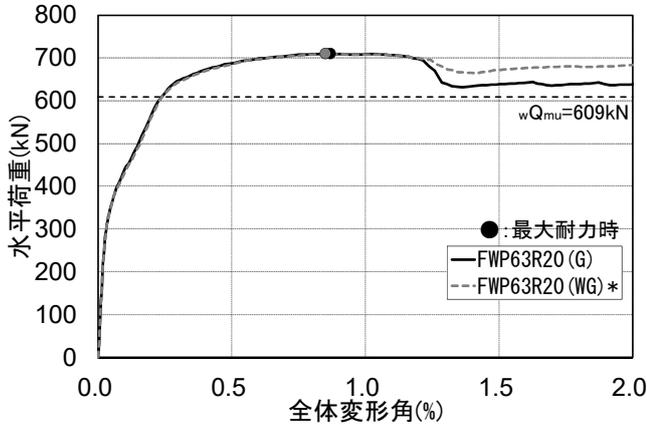


図 2 水平荷重-全体変形角関係(中間梁寸法)

表 3 最大耐力時の解析値と計算値(せん断スパン比)

解析モデル	解析値		実験値		曲げ終局モーメント	修正広沢 mean式時のモーメント	比較値		せん断余裕度
	aMmax (kN·m)	aR (%)	eMmax (kN·m)	eR (%)	cMu (kN·m)	cMsu (kN·m)	aMmax/cMu	eMmax/cMu	cMsu/cMu
FWP63R20(2.0)*	4228	0.79	—	—	3656	6101	1.16	—	1.67
FWP63R20(2.4)	4259	0.87	4360	0.98	3656	6966	1.17	1.19	1.91
FWP63R20(3.0)*	4300	1.06	—	—	3656	8207	1.18	—	2.25

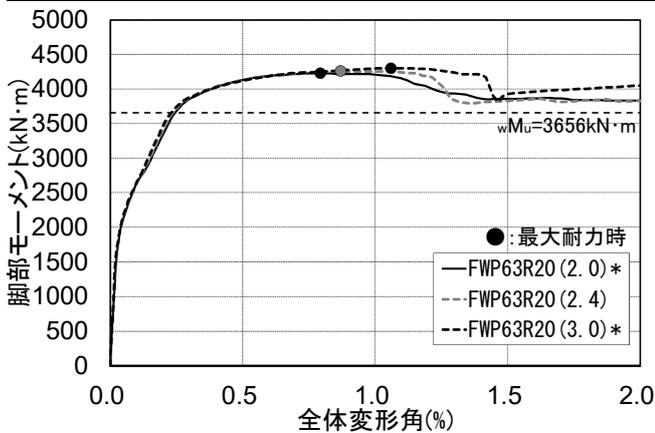


図 3 脚部モーメント-全体変形角関係(せん断スパン比)

### 2. 3 曲げ強度に対するせん断スパン比の影響

本節では、曲げ強度に対するせん断スパン比の影響について検討する。実験では両試験体ともせん断スパン比は 2.4 に固定した。ここでは、FWP63R20 をベースに、せん断スパン比を 2.0(FWP63R20(2.0)\*)、3.0(FWP63R20(3.0)\*)とした場合の解析を行った。なお、せん断スパン比の変更は、加力点の高さを変更することで、所定のせん断スパン比となるようにした。また、その 1 の 3.4 節で解析したせん断スパン比 2.4(FWP63R20(2.4))の結果も併せて示す。

表 3 に最大耐力時の解析値と計算値の比較を、図 3

に解析で得られた脚部モーメント-全体変形角関係を示す。同図より、せん断スパン比が最大曲げモーメントに与える影響はほとんど認められなかった。しかし、せん断スパン比の増加に伴い、最大曲げモーメント時の変形が大きくなる傾向が認められた。

### 2. 4 曲げ強度に対する繰り返し解析の影響

本節では、曲げ強度に対する繰り返し解析の影響について検討する。実験では両試験体とも各サイクル正負 2 回ずつの繰り返し载荷とした。ここでは、実験試験体 FWP63R07、FWP63R20 を対象に、単調载荷(FWP63R07(M)、FWP63R20(M))、正負 1 回の繰り返し载荷(FWP63R07(C1)、FWP63R20(C1))、さらに実験と同様に正負 2 回ずつの繰り返し载荷(FWP63R07(C2)、FWP63R20(C2))とした場合の解析を行った。なお、両試験体の実験値も併せて示す。

表 4 に最大耐力時の解析値と実験値の比較を、図 4 に解析で得られた水平荷重-全体変形角関係(単調と繰り返し 1 回)を、図 5 に水平荷重-全体変形角関係(単調と繰り返し 2 回)を示す。同図より、実験値と繰り返し解析の比較では、FWP63R07 は変形角 1.5%、FWP63R20 は変形角 1.0%までほぼ一致する傾向が認められた。ただし、FWP63R20 の実験値では変形角が 1.0%を超えると耐力の低下が認められたが、繰り返し解析では変形角が 1.5%まで耐力が上昇し続けており、実験と解析で若干異なる結果となった。また、繰り返し回数によらずループ形状がほぼ一致しており、回数の影響は見られなかった。一方、単調载荷の場合と比較すると、繰り返し载荷の場合の方が、最大耐力時の変形角が大きくなる傾向にあった。

繰り返し载荷時は、変形角が大きくなると引張降伏した鉄筋が除荷時および逆方向への载荷時の早い段階で圧縮応力を負担し始めるため、単調载荷時と比べて鉄筋の圧縮力の負担が増加する。そのため、コンクリートの圧縮力負担が軽減され、コンクリートの圧壊が遅延されたことにより、繰り返し载荷の最大耐力時の変形角が大きくなったと推察される。

### 2. 5 脚部鉛直変位に対する繰り返し解析の影響

本節では、脚部鉛直変位に対する繰り返し解析の影響について検討する。その 1 の 3.5 節で目地および誘発材有無に関する解析的検討を行ったが、ここではさらに繰り返し解析の影響について検討する。

表 4 最大耐力時の解析値と実験値の比較(繰り返し解析)

解析モデル	解析値						実験値		比較値					
	M		C1		C2		$eQ_{max}$	$eR$	M		C1		C2	
	$aQ_{max1}$	$aR1$	$aQ_{max2}$	$aR2$	$aQ_{max3}$	$aR3$			$eQ/aQ_{max1}$	$eR/aR1$	$eQ/aQ_{max2}$	$eR/aR2$	$eQ/aQ_{max3}$	$eR/aR3$
(kN)	(%)	(kN)	(%)	(kN)	(%)	(kN)	(%)							
FWP63R07	686	0.85	702	1.52	702	1.52	732	1.50	1.07	1.76	1.04	0.99	1.04	0.99
	-686	-0.85	-706	-1.52	-701	-1.54	-716	-1.49	1.04	1.74	1.01	0.97	1.02	0.96
FWP63R20	710	0.87	723	1.51	724	1.51	727	0.98	1.02	1.13	1.00	0.65	1.00	0.65
	-710	-0.87	-724	-1.54	-721	-1.52	-708	-1.01	1.00	1.16	0.98	0.65	0.98	0.66

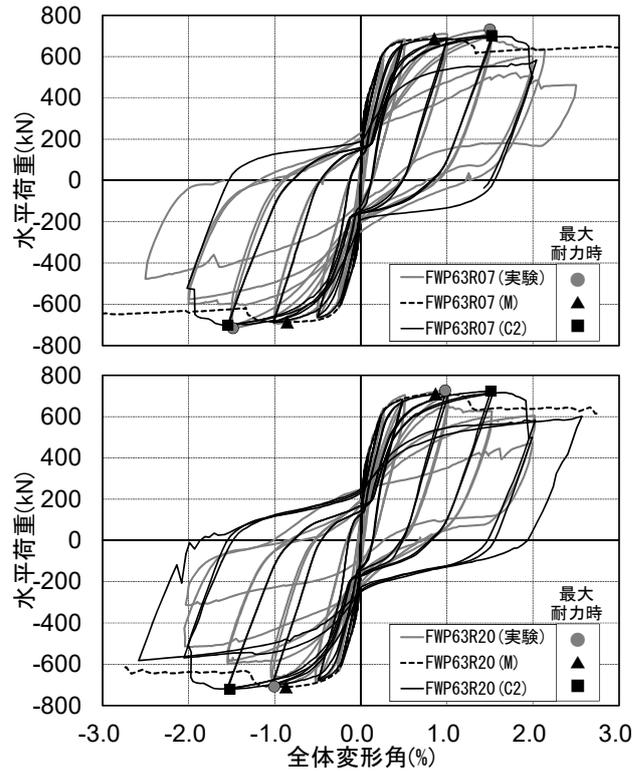
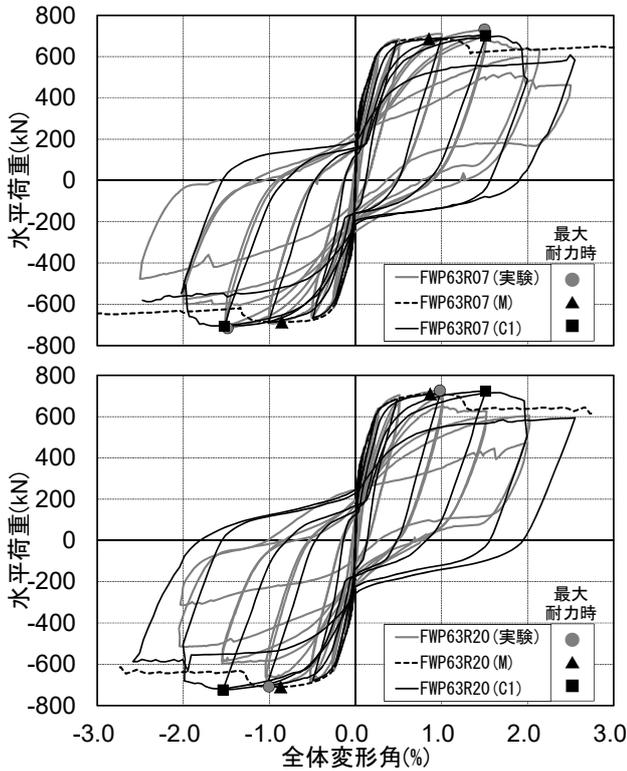


図 4 水平荷重-全体変形角関係(単調と繰り返し 1 回) 図 5 水平荷重-全体変形角関係(単調と繰り返し 2 回)

実験を行った試験体 FWP63R07, FWP63R20 を用いて, 単調荷重(FWP63R07(M), FWP63R20(M)), 正負 1 回ずつの繰り返し荷重(FWP63R07(C1), FWP63R20(C1))とした場合の解析を行った。

図 6 に脚部鉛直変位の解析結果(単調と繰り返し 1 回)を示す。なお, 脚部変位は対称面側の節点間距離とした。同図より, 単調と繰り返し 1 回解析の影響はほとんど見られなかった。ただし, FWP63R20 の結果では, 圧縮側の壁板部分の脚部鉛直変位について, 繰り返し 1 回解析では鉛直変位が生じているのに対して, 単調ではほぼ 0 の値を示している。これは, 単調荷重では脚部のひび割れが発生していないのに対し, 繰り返し 1 回解析では負側に荷重した際に脚部にひび割れが発生し, かつ, 水平変位を 0 に戻した時に残留変位が生じていることによる影響と推察される。

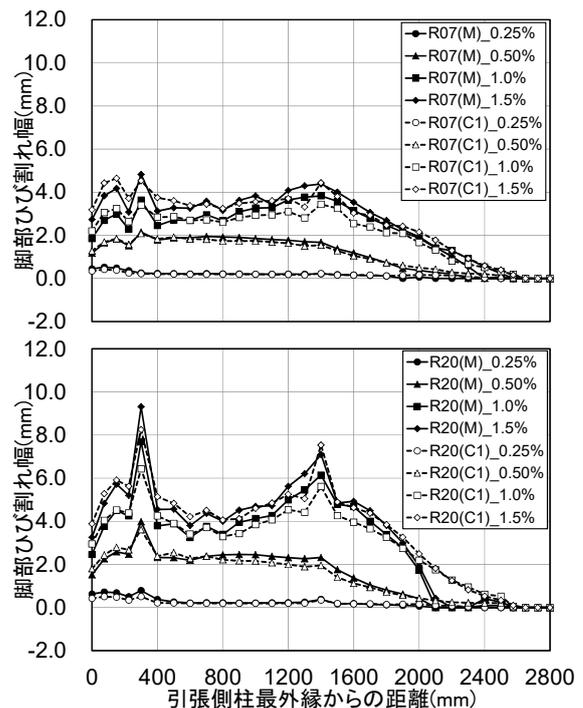


図 6 脚部鉛直変位の解析結果(単調と繰り返し 1 回)

### 3. 結論

目地部に異形鉄筋のひび割れ誘発材を用いた RC 造連層耐震壁の有限要素解析結果から、以下の知見が得られた。

- (1) 本解析モデルにより、実験を行った耐震壁試験体の最大耐力付近までの水平荷重-全体変形角関係、および壁縦筋破断開始までの脚部鉛直変位を概ね追跡することができた。
- (2) 無垢、誘発材のみ、目地のみの解析の影響について検討した結果、値に多少の違いはあるものの、いずれのモデルにおいても柱および壁脚部の挙動は、両試験体と同様の傾向を示すことが分かった。
- (3) 曲げ強度に対する誘発材径の影響は、ほとんど認められなかった。したがって、最大耐力が曲げで決まる場合は、誘発材径が最大耐力に与える影響はほぼ無視してもよいと考えられる。
- (4) 曲げ強度に対する中間梁寸法の影響は、認められなかった。
- (5) 曲げ強度に対するせん断スパン比の影響は、ほとんど認められなかったが、せん断スパン比の増加に伴い、最大曲げモーメント時の変形が大きくなる傾向が認められた。
- (6) 繰り返し解析の影響は、FWP63R07 は変形角 1.5%、FWP63R20 は変形角 1.0%までほぼ一致する傾向が認められた。ただし、FWP63R20 の実験時には変形角が 1.0%を超えると耐力の低下が認められたが、繰り返し解析では変形角が 1.5%まで上昇し続けており、若干異なる結果となった。また、繰り返し回数によらずループ形状がほぼ一致しており、回数の影響は見られなかった。一方、単調載荷の場合と比較すると、繰り返し載荷の場合の方が、最大耐力時の変形角が大きくなる傾向にあった。
- (7) 脚部鉛直変位の繰り返し解析では、単調と繰り返し 1 回解析の影響はほとんど見られなかった。

なお、今後の課題として、有限要素解析における鉄筋座屈および破断の考慮が挙げられる。

### 謝辞

本研究は、民間企業 11 社(浅沼組, 熊谷組, 西松建設, NIPPO, 東亜建設工業, 飛鳥建設, 大日本土木, 長谷工コーポレーション, 東急建設, 五洋建設, 共立建設)で実施した成果の一部をまとめたものである。試験体製作や解析協力をいただきました竹沢建設および JIP テクノサイエンスをはじめ、関係者の皆さまに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2006.2
- 2) 松井亮夫ほか：誘発材に異形鉄筋を用いた RC 造耐震壁に関する実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, C-2, pp.147-150, 2016.8
- 3) 国土政策技術総合研究所ほか監修：建築物の構造関係技術基準解説書, 2015.6
- 4) TNO DIANA BV. : DIANA -Finite Element Analysis- User's Manual, Release 9.6, 2015
- 5) H.Nakamura, T.Higai: Compressive Fracture Energy and Fracture Zone Length of Concrete, Modeling of Inelastic Behavior of RC Structures under Seismic Loads, ASCE, pp.471-487, 2001
- 6) Feenstra, P. H.: Computational Aspects of Biaxial Stress in Plain and reinforced Concrete. PhD thesis, Delft University of Technology, 1993
- 7) Hordijk, D. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete. PhD Delft University of Technology, 1991
- 8) AL-MAHAIDI, R. S. H.: Nonlinear Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Deep Members, Tech. Rep. 79-1, Department of Structural Engineering, Cornell University, Ithaca, New York, 1979
- 9) 島弘, 周礼良, 岡村甫：マッシブなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係, 土木学会論文集 (378), pp.165-174, 1987.2
- 10) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, 1999

\*1 熊谷組技術研究所構造研究グループ

\*2 京都大学大学院工学研究科博士後期課程

\*3 京都大学大学院工学研究科修士課程

\*4 京都大学大学院工学研究科准教授・博(工)

\*5 京都大学大学院工学研究科教授・博(工)

KUMAGAIGUMI CO.,LTD.

Ph.D Candidate, Dept. of Architecture and Architectural Eng. Kyoto Univ.

Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Eng. Kyoto Univ.

Assoc. Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng. Kyoto Univ.,Dr.Eng.

Professor, Dept. of Architecture and Architectural Eng. Kyoto Univ.,Dr.Eng.