

論文 耐力壁に接続する直交部材の効果に関する非線形 FEM 解析

王 傑恵*1・楠 浩一*2・勅使川原 正臣*3・福山 洋*4

要旨：耐力壁の両端に直交壁が取り付く H 型耐力壁の繰り返し加力実験結果をもとに、直交壁縦筋の応力とひずみの挙動を把握し、直交壁の有効幅の検討を目的とした有限要素解析を行った。各部材のモデル化において、コンクリートは 2 次元の四辺形および 3 次元の六面体の 2 種類とし、直交壁縦筋はトラス要素、横筋およびスラブ筋は層状置換とする簡易なモデルを用いた。実験結果から、引張側直交壁の有効幅は水平変形の増大と共に大きくなる傾向にあり、その結果に対して、解析モデルとしては六面体解析の方が四辺形解析より実験結果の傾向を捉えることができていた。

キーワード：WRC 構造, FEM 解析, 直交壁, 有効幅

1. はじめに

壁式鉄筋コンクリート構造（以下、WRC 構造）は耐力壁、直交壁、壁梁、スラブで構成されている。現行の壁式鉄筋コンクリート造設計・計算規準・同解説¹⁾（以下、WRC 規準）によると、耐力壁の終局強度を算定する際に耐力壁の両端に直交壁が取り付く場合、直交壁の有効な範囲（以下、有効幅）を考慮する。その有効幅は、片側につき直交壁厚さの 6 倍または隣り合う耐力壁までの内法スパン長さの 1/4 および開口部端部までの長さのうち最小の数値とされている。

WRC 構造に関わる既往の研究は様々あり、耐力壁に接続する直交壁の変形、ひび割れや耐力壁の剛性および耐力に影響を及ぼす直交壁の特性などに着目されてきた。しかし、現行の WRC 規準では、終局に至る過程での変形と有効幅の関係までは明らかにされていない。

そこで本研究では、直交壁の効果を検討した壁式構造実験^{2),3)}に対して FEM 解析を行い、直交壁縦筋の応力とひずみの挙動を把握するとともに水平変形と有効幅の関係についての検討を行った。

2. 壁式構造実験の概要

2.1 試験体概要

試験体の鉄筋およびコンクリートの材料実験結果を表-1 および表-2 に示す。試験体諸元を表-3 に、配筋図を図-1 に示す。

表-1 コンクリートの材料実験結果

コンクリート	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	割裂強度 (N/mm ²)	材齢 (day)
-	27.0	2.52	2.19	46

表-2 鉄筋の材料実験結果

鉄筋種類	降伏耐力 σ_y (N/mm ²)	降伏ひずみ σ_y/E	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 E (×10 ⁵ N/mm ²)
D6	333	1850	492	1.82
D10	342	1795	495	1.91

表-3 試験体諸元

耐力壁	幅×長さ (mm)	80×1000
	縦筋	7-D6
直交壁	幅×長さ (mm)	80×710
	縦筋 (主筋)	7-D6
共通	横筋	1-D6@100
	端部補強筋	2-D10

(注) 試験体シアスパン：1119 mm

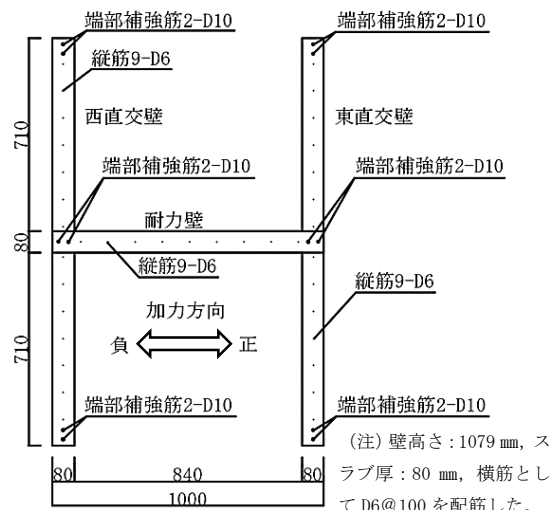


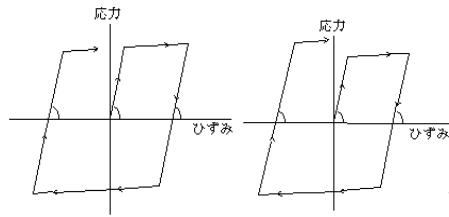
図-1 試験体配筋図

*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 東京大学 地震研究所准教授 (正会員)

*3 名古屋大学 環境学研究科都市環境学専攻建築学系教授 (正会員)

*4 国土交通省 国土技術政策総合研究所建築研究部長 (正会員)



(a) bilinear モデル (b) 硬化モデル
図-5 鉄筋繰返しの履歴特性

(2) コンクリート構成則

鉄筋降伏は平均ひずみから求めた応力判定方法を用いた。コンクリートのテンションスティフニング特性は長沼・山口のモデル⁵⁾を、コンクリートの応力-ひずみ曲線は修正 Ahmad モデル⁶⁾とし、圧縮破壊条件は2次元モデルが Kupfer-Gerstle の提案⁷⁾、3次元モデルが Ottosen の4パラメータモデル⁸⁾としている。ひび割れ後の圧縮強度低減方法には長沼の提案式⁹⁾を用いた。コンクリートの圧縮軟化域特性には、上述の修正 Ahmad モデル⁶⁾を用いている。コンクリートのひび割れ後のせん断伝達特性は長沼提案モデル⁸⁾である。なお、コンクリートの繰返し応力下の履歴特性は、正負繰返し载荷を行う場合、曲線モデルの方が実際の挙動に近くなるため、図-6 に示す曲線モデル⁹⁾を用いた。

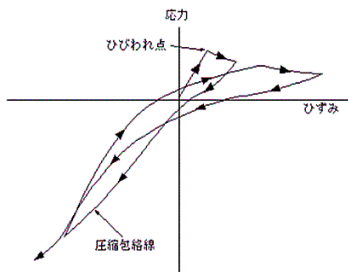


図-6 コンクリートの繰返し応力下の履歴特性⁹⁾

(3) 鉄筋とコンクリートの付着モデル

縦筋とコンクリートの付着応力とすべり量の関係は、四辺形解析では図-7 に示す Elmersi らのモデル¹⁰⁾を用い WRC 規準¹⁾により付着強度を算定し、六面体解析では完全付着を用いた（四辺形解析結果を見ると、付着作用の影響が小さいことから、六面体モデルでは解析を簡便化するために完全付着とした）。

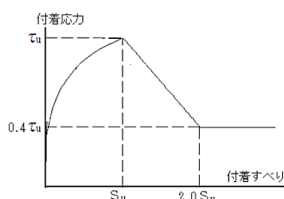


図-7 付着強度-すべり関係のモデル¹⁰⁾

3.4 解析結果

図-8 に、実験で得られた水平力-変形角関係と解析結果の比較を示す。図より、四辺形解析および六面体解析は、実験結果と概ね一致していることが分かった。

引張側の直交壁縦筋ひずみに関する実験値と解析値の比較結果について、図-9 に四辺形解析結果を、図-10 に六面体解析結果を示す。

図-9 および図-10 より、四辺形解析および六面体解析とで多少の違いはあるものの、概ね同じ傾向にあった。1/2000 rad 変形角の西直交壁と-1/2000 rad 変形角の東直交壁の結果より、直交壁では小さい変形でも広い範囲で応力を負担している。ただし、1/400 rad 程度以下の変形では、解析のひずみが実験値より小さい。これは、解析ではコンクリートの引張負担力が実験より大きくなったことと考えられる。一方、1/200 rad 程度以上では引張側のコンクリートの破壊が進展し応力を負担しなくなり、その結果、実験と解析結果は概ね一致する傾向になったことが考えられる。

これらの結果から、いずれの解析モデルにおいても、変形角が小さい時、引張側のコンクリートの影響により、引張側コンクリートがひび割れる前は、解析値は実験値に対して過小評価する傾向があるといえる。その要因としては、実験に比して解析時のコンクリートの方がより大きな応力を負担していたことが考えられる。変形角が大きくなると、直交壁脚部の付近のコンクリートがひび割れ、応力の全てを鉄筋が負担することで解析値と実験値が概ね一致する傾向になったと考えられる。また、いずれの解析においても、変形角 1/100rad 以降から変形角 1/67rad にかけては、実験値に対して解析値は過大評価する傾向があった。その要因としては、変形角が大きくなって解析より、実験時引張側のコンクリートは破壊したので、試験体全体は終局に近くなって、負担応力は小さくなったことが考えられる。

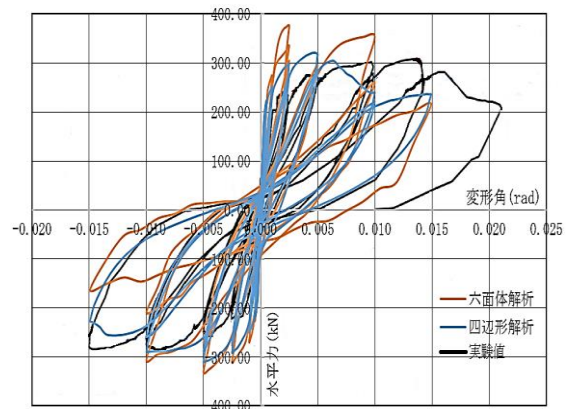


図-8 水平力-変形角関係

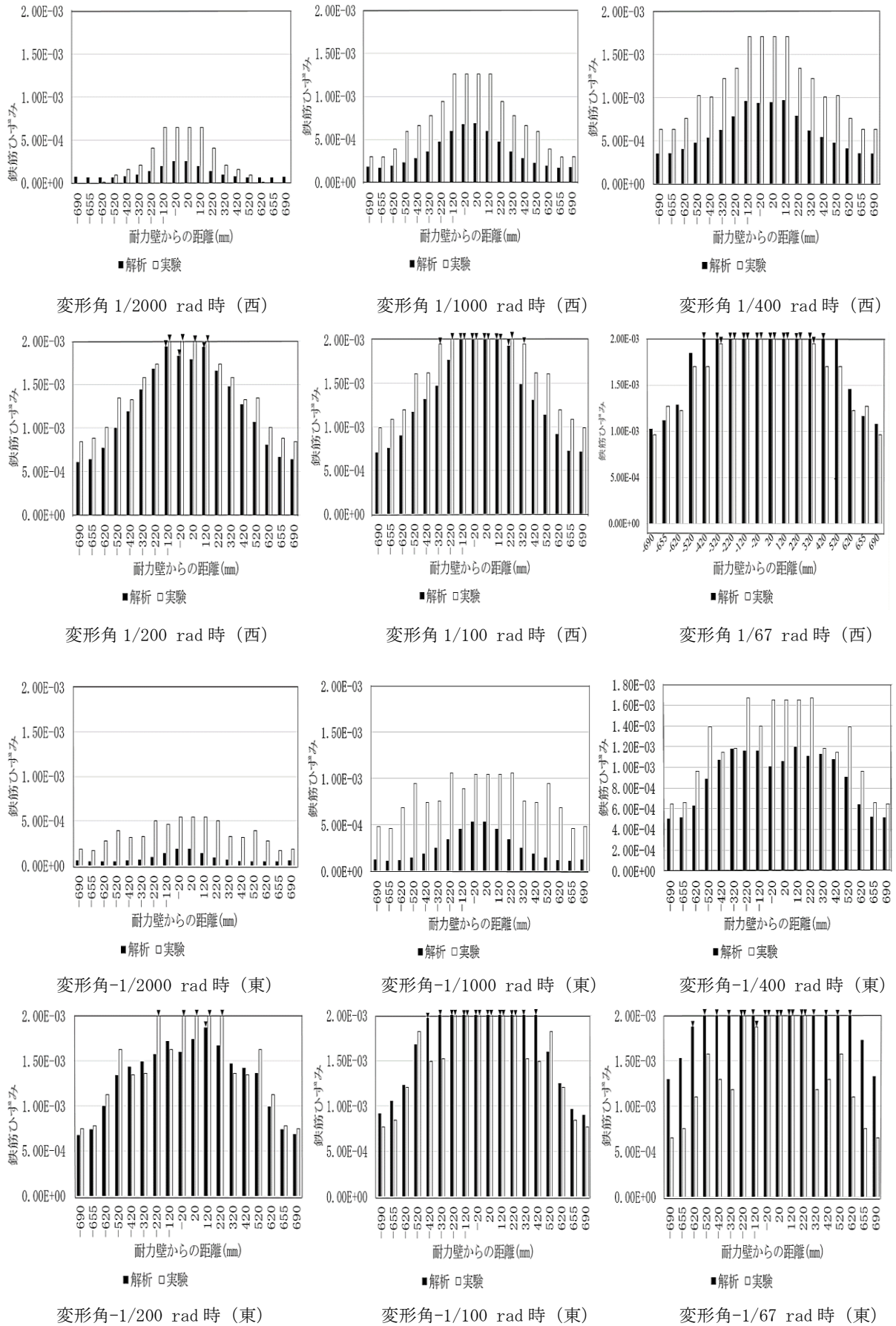


図-9 直交壁縦筋ひずみに対する実験値と解析値の比較(四辺形解析結果)

(注) ▼：一度降伏歪みを超えた鉄筋を示す

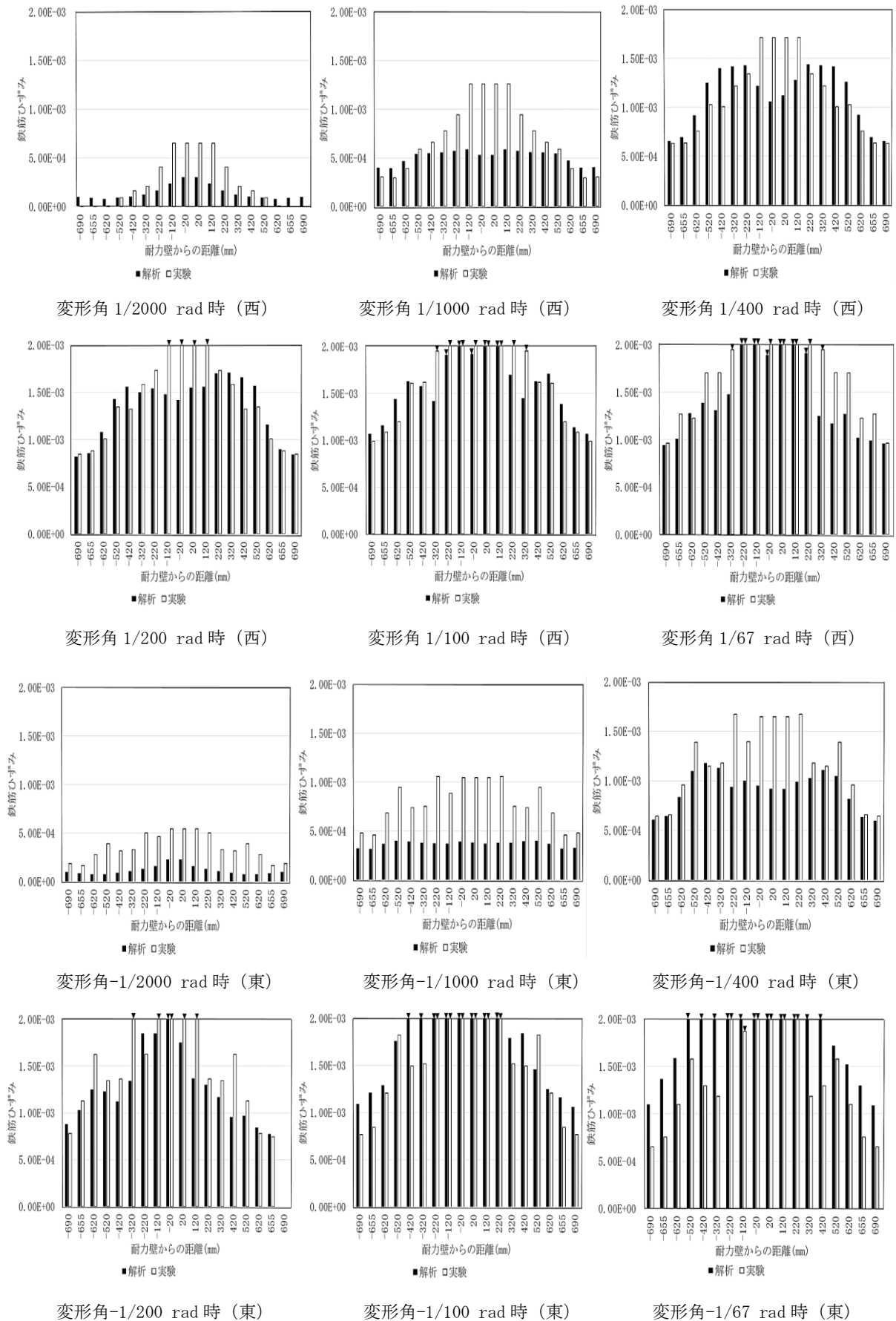
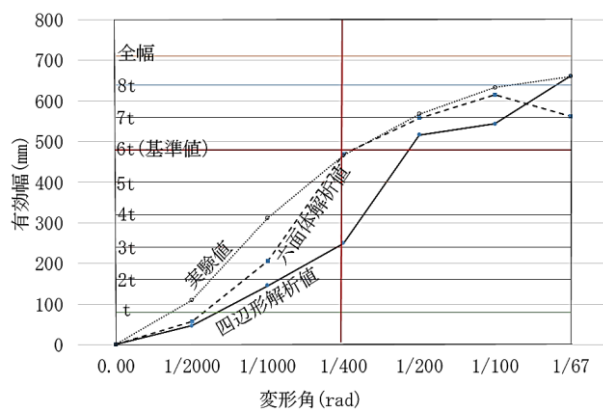


図-10 直交壁縦筋ひずみに対する実験値と解析値の比較(六面体解析結果)

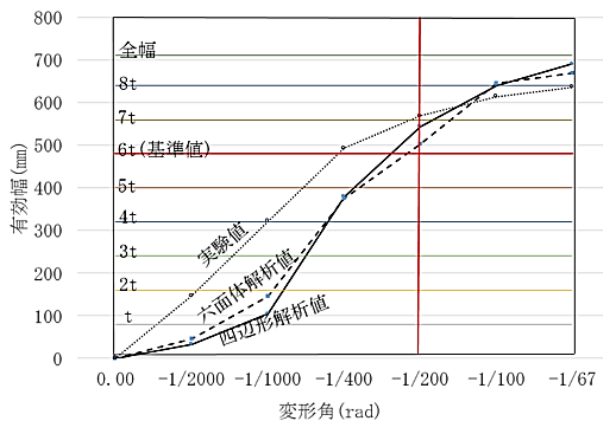
(注) ▼：一度降伏歪みを超えた鉄筋を示す

4. 解析結果の考察

図-11に四辺形解析、六面体解析および実験から得た直交壁の有効幅と変形角の関係を示す。図より、解析結果は実験結果の傾向を概ね捉えることができている。変形の増大とともに直交壁の有効幅が増大することが明らかとなった。その際、本研究の範囲内では解析モデルとして、2次元の四辺形解析より3次元の六面体解析の方が実験結果と一致する傾向にあった。このことから、直交壁の影響は、単に鉄筋のみならず、コンクリートの特に引張側の挙動と直交壁の面外方向の挙動が影響を与えている可能性が高いことが解析から分かった。



(a) 西直交壁



(b) 東直交壁

図-11 有効幅と変形角の関係

5. まとめ

- (1) 六面体モデル解析から得た直交壁の有効幅と変形角の関係が四辺形モデル解析よりも実験結果と一致する傾向にある。このことから、直交壁の寄与においては、直交壁の面外方向の挙動も影響している可能性がある。
- (2) 実験では、1/400 rad で標準の 6t、1/67 rad で全幅有効になった。
- (3) 一方、六面体要素モデルでは、西直交壁では 1/400

rad、東直交壁では 1/200rad 程度で、標準の 6t、1/67 rad で、全幅有効になっており、解析に対応している。

- (4) 1/400 rad の水平変形より小さい範囲では、解析の有効幅は実験値より小さく、これは解析ではコンクリートの引張応力負担が実験より大きくなったためと考えられる。

参考文献

- 1) 日本建築学会：壁式鉄筋コンクリート造設計・計算規準・同解説，pp.287,2015.12
- 2) 勅使川原正臣，竹内馨一，神谷隆，太田勤，楠浩一，稲井栄一，村聡宏，向井智久，福山洋：壁式 RC 構造の耐震損傷制御に関する研究 (その 1) 直交壁の効果に関する実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.845-846,2017.7
- 3) 野村翔舞，勅使川原正臣，神谷隆，高橋愛，楠浩一，稲井栄一，中村聡宏，向井智久，福山洋：壁式 RC 構造の耐震損傷制御に関する研究 (その 2) 直交壁の効果に関する実験結果，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 IV，pp.847-848,2017.7
- 4) 平石久廣，稲井栄一：鉄筋コンクリート造柱の曲げ降伏後の靱性に関する解析的研究，日本建築学会構造系論文報告集，Vol.408，pp. 21-30,1990.2
- 5) 長沼一洋，山口恒雄：面内せん断応力下におけるテンションスティフニング特性のモデル化，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 II，pp.649-650,1990.10
- 6) 長沼一洋：三軸圧縮下のコンクリートの応力～ひずみ関係，日本建築学会構造系論文集，第 474 号，pp.163-170,1995.8
- 7) Kupfer,H.B. and Gerstle,K.H.: Behavior of Concrete under Biaxial Stress, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.99, No.EM4, pp.853-866, Aug., 1973
- 8) 長沼一洋：鉄筋コンクリート壁状構造物の非線形解析手法に関する研究 (その 1)，日本建築学会構造系論文報告集,第 421 号, pp.39-48,1991.3
- 9) 長沼一洋，大久保 雅章：繰返し応力下における鉄筋コンクリート板の解析モデル，日本建築学会構造系論文報告集,第 536 号, pp.135-142,2000.10
- 10) Elmorsi,M., Kianoush,M.R. and Tso,W.K. : Modeling bond-slip deformations in reinforced concrete beam-column joints, Canadian Journal of Civil Engineering, Vol.27, pp.490-505, 2000

謝辞：本研究は国土交通省平成 28 年度建築基準整備促進事業(調査番号 M4 研究代表者：勅使川原 正臣 名古屋大学教授)の一環として実施した。関係者各位に謝意を表します。