

論文

[2095] RC耐震壁の開口補強法の開発に関する解析的研究

正会員 ○張 愛暉 (鹿島建設技術研究所)

同 野口 博 (千葉大学建築学科)

1 はじめに

日本建築学会の「鉄筋コンクリート構造規準・同解説」[1] (以下、RC規準と呼ぶ) では、開口壁のせん断耐力は無開口耐震壁のせん断耐力に、開口の面積あるいは幅によって決まる開口に対する低減率を乗じて求めている。また、開口周囲には開口補強筋を配筋して開口壁の脆性的破壊を防止している。しかし、これは弾性論に基づいて求めたものであり、ひび割れ後の塑性域での挙動や開口壁の終局強度に開口補強筋が寄与しているかどうかについては、検討の余地が残されている。本研究では、既往の実験における開口耐震壁4体を解析対象とし、無開口耐震壁、耐震壁の開口周辺の補強筋なし、RC規準による補強形式、RC規準による補強筋量と等量の補強筋を開口横にX型配置した試験体の解析を加え、RC規準による補強と開口横のX型筋補強筋量をパラメーターとした解析を行い、RC規準補強の効果および開口横のX型補強筋の挙動について検討することを目的とする。

2 解析対象とした試験体

解析対象として、全・青山らによって実験が行われた開口耐震壁試験体[2]W04AX-0、W04AX-1、W04AX-2、W04AX-3の4体を選んだ。試験体は、3～4階建物の最下層を取り出し、縮尺1/3とした1層1スパンで開口が壁板中央にある開口耐震壁である。3層建物の崩壊時の反曲点高さを模擬し、せん断スパン比を0.8としている。等価開口周比は0.4で、開口壁として扱うことのできる最大の開口の大きさをとっている。開口横にX型に配筋された斜め補強筋量をパラメーターにとっている。試験体形状と寸法を図-1に、各試験体の配筋図を図-2に示す。試験体概要を表-1に示す。

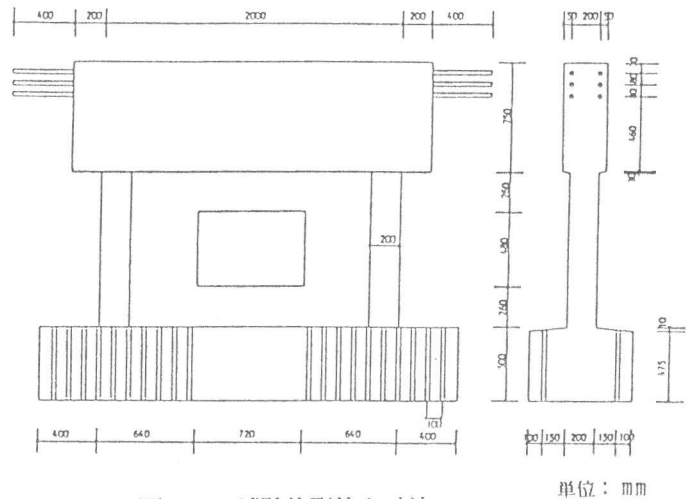


図-1 試験体形状と寸法

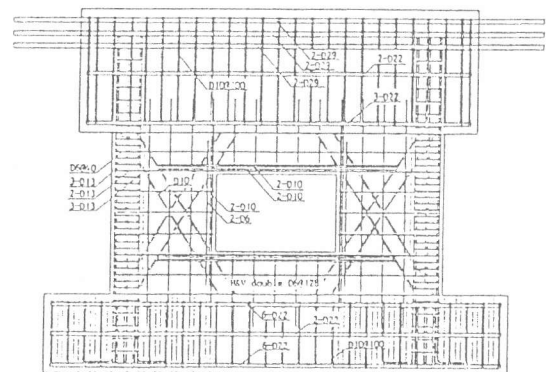


図-2 試験体配筋図

表-1 試験体概要

試験体名	開口 (開口周比)	側柱	壁板	補強筋	
				開口補強	X型補強
W04AX-0	72X48(0.4) (cm)	20X20 (cm) 主筋: 8-D13 帯筋: 2-D6@40	160X100 (cm) 06@128 5"X 壁厚: 10(cm)	縦: 2-D6 2-D10	-----
W04AX-1				横: 2-D10	4-D10
W04AX-2				横: 2-D10	8-D10
W04AX-3				横: 2-D10	12-D10

表-2 コンクリート材料定数

鉄筋の種類	降伏点強度 (kg/cm ²)	降伏点歪度 $\times 10^{-3}$	弾性係数 (kg/cm ²) $\times 10^6$	最大強度 (kg/cm ²)
D6	4156	2.12	1.91	4979
D10	3757	2.05	1.81	5174
D13	3870	2.20	1.72	5399

表-3 鉄筋材料定数

試験体名	圧縮強度 (kg/cm ²)	圧縮強度時の歪度 $\times 10^{-3}$	弾性係数 (kg/cm ²) $\times 10^6$	割裂強度 (kg/cm ²)
W04AX-0	262	2.1	2.56	26
W04AX-1	262			
W04AX-2	258	2.5	2.37	26
W04AX-3	258			

試験体名称は、W04AX-1を例にとると、W0が開口壁、4が等価開口周比、AがRC規準による開口補強、XがX型の斜め補強筋、最後の1が斜め補強筋1列の本数を表す。コンクリート材料特性を表-2に、鉄筋材料特性を表-3に示す。

RC規準の開口補強法の有効性を検討するため、無開口、開口周囲に補強筋なし、RC規準による補強、開口横X型補強筋のみなどの試験体を想定してパラメーター解析を行った。

また、開口横のX型補強筋の効果を検討するため、実験試験体以外に、開口横のX型補強筋量を増やした試験体2体の解析も行った。

載荷方法を図-3に示す。水平力は、30tfの軸力を加えた後、基礎梁からの加力点高さを160cmにとり油圧ジャッキを用いて押し引きの正負繰り返し載荷によりで行われた。引張力は、加力梁に2本のPC鋼棒を油圧ジャッキで引張ることによって加えられた。

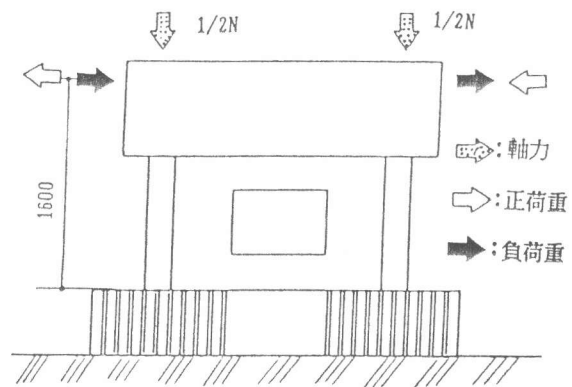


図-3 載荷方法

3 解析方法及び試験体のモデル化

本解析では、従来のRC部材のFEM平面応力解析プログラム[3]に、ひび割れたコンクリートの圧縮強度低下モデル[4]を導入した。また、収れん計算については、各要素の実際の応力を要素内で積分して等価節点力を求め、外力と等価節点力の差を残差力としてその時の荷重ステップ内で収れん計算させるように変更した。図-4にFEM解析における試験体の要素分割図を示す。力の流れを計算するため、加力スタブと壁体、壁体と基礎梁の間に離散型ひび割れリンク要素を設けた。要素分割を簡単にするために、開口部にも要素分割を行い、開口部のコンクリート要素の厚さとフープ要素の断面積を零に近い値とした。コンクリート要素の材料定数は材料試験値を適用した。試験体4体のコンクリートの圧縮強度が近い値であるので、4体の平均値をコンクリート要素の圧縮強度とした。コンクリート要素の引張強度は、耐震壁の壁板に近い平板実験におけるコンクリート強度 F_c とひび割れ発生応力度 σ_{cr} の関係式[5]($\sigma_{cr}=0.75\sqrt{F_c}$)から求めた。鉄筋(フープ)要素の材料定数は材料試験値を用いた。ボンド・リンク要素と離散ひび割れ要素の材料定数は、筆者らの既往のRC部材の解析での値[6,7]を使用した。

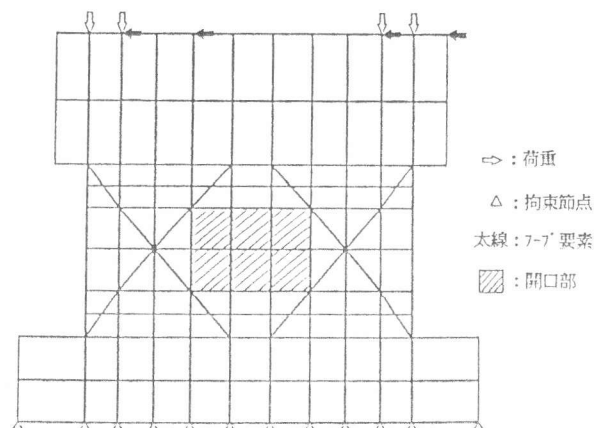


図-4 要素分割図

4 有限要素解析結果と考察

解析では、開口隅角部と引張側壁板上部にひび割れが同時に発生し、その後、実験とほぼ同様の破壊経過をたどった。破壊モードは、実験、解析ともに4体とも開口横の圧縮側壁板のせん断圧縮破壊となった。図-5に各試験体の実験と解析による荷重-変形曲線を示す。W04AX-0試験体の解析では、初期剛性は実験値よりやや大きい、最大耐力および最大耐力

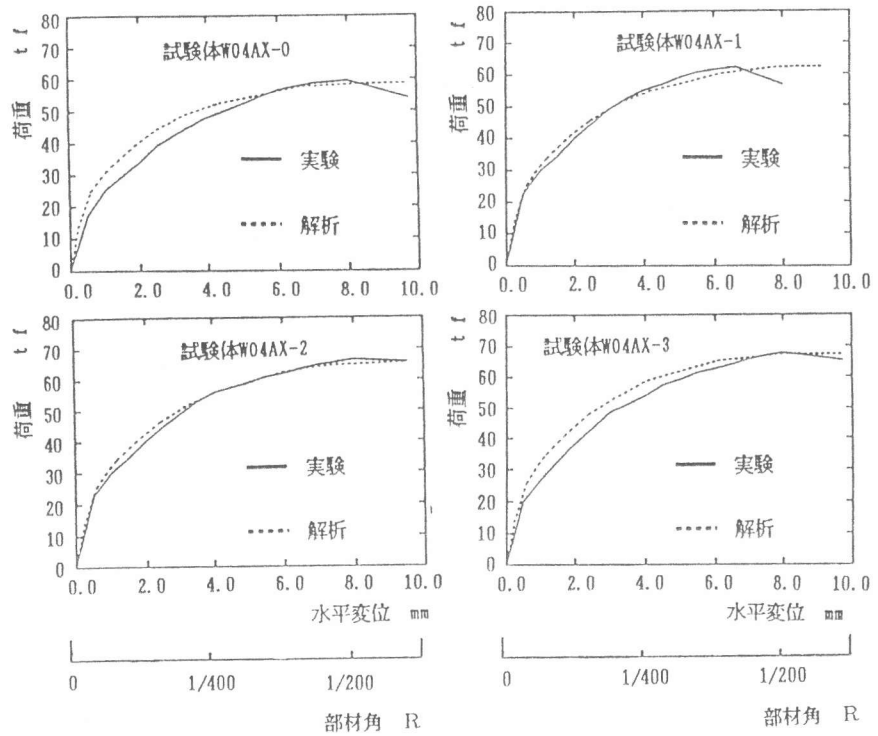


図-5 荷重-変形曲線

時の変形は解析値が実験値とほぼ一致している。W04AX-3試験体の解析では、最大耐力以前では、解析の方が実験よりやや変形が小さめであるが、これはこの試験体の実験でのせん断ひび割れ強度が低めになったためと考えられる。その他の解析では、実験とほぼ一致している。

表-4に、各試験体の初期剛性、せん断ひび割れ強度、コンクリート圧壊発生荷重およびせん断終局強度の実験値、計算値とFEM解析値を示す。初期剛性の解析値では、W04AX-0以外解析値が実験値とほぼ一致している。初期剛性計算値は、実験値と解析値より大きい。これは、壁のせん断変形による水平剛性を求めるときに開口低減率という経験値を使用したからと考えられる。

表-4 各試験体の諸強度

	試験体	実験値	計算値	解析値
初期剛性 (tf/cm)	W04AX-0	348.	556.	418.
	W04AX-1	453.	556.	431.
	W04AX-2	454.	509.	437.
	W04AX-3	400.	509.	440.
せん断ひび割れ強度 (tf)	W04AX-0	25.2	22.3	13.8
	W04AX-1	28.8	22.3	13.9
	W04AX-2	23.3	22.2	14.0
	W04AX-3	16.3	22.2	14.1
コンクリート 圧壊発生荷重 (tf)	W04AX-0	59.2	—	48.8
	W04AX-1	50.6	—	50.6
	W04AX-2	60.0	—	51.8
	W04AX-3	56.0	—	52.7
せん断 終局強度 (tf)	W04AX-0	59.4	48.0	58.4
	W04AX-1	62.3	51.2	62.2
	W04AX-2	66.5	53.3	64.7
	W04AX-3	67.9	56.0	67.3

*初期剛性：弾性論
せん断ひび割れ強度：荒川式

せん断終局強度の計算値は、修正荒川式[8]により求められた。修正荒川式は斜め補強筋を考慮していないので、引張力を受ける斜め筋が降伏するときのせん断耐力を計算し、修正荒川式のせん断終局強度に累加した。修正荒川式は開口低減率という経験値を使用したため、せん断終局強度を過小評価する結果となったと考えられる。せん断終局強度の解析値は実験値とほぼ一致している。

図-6にFEM解析におけるW04AX-0試験体の最大耐力時の変形、ひび割れ状況、主応力分布および実験の終局時のひび割れ状況を示す。この試験体の解析では、ひび割れが開口隅角部、引張側壁板上部、引張側柱、圧縮側壁板、開口上下壁板、圧縮側柱脚の順に発生する。その後、開口

隅角部、圧縮側壁板脚部、引張側開口横の壁板の順にコンクリート圧縮ひずみ軟化が発生する。破壊モードでは、開口隅角部の圧壊と圧縮側壁板脚部の圧壊が連結したせん断圧縮破壊であり、実験の破壊モードとほぼ対応している。その他の試験体もほぼ同様の破壊モードであった。

5 RC規準による補強筋の効果

RC規準の開口低減率および開口に対する補強効果を検討するために、無開口、開口周囲の補強筋なし、RC規準による補強、RC規準による補強筋量と等量補強筋を開口横にX型配置した試験体（以下、X型補強筋のみ試験体と呼ぶ）4体の解析が行われた。

無開口耐震壁、開口補強筋なし、開口耐震壁のRC規準による補強、開口横のX型補強筋のみ試験体に関する解析結果の荷重-水平変位曲線を図-7に示す。無開口試験体の終局強度は78.5tfである。開口補強筋なしの試験体のせん断終局強度は53.5tfであり、無開口試験体の終局強度に対する低減率は0.68であり、RC規準の低減率($r=0.6$)をやや上回った。RC規準による補強が行われた試験体では、せん断耐力は58.4tfであり、強度低減率は0.74であり、開口補強筋なしの試験体の強度低減率より大きい。開口横のX型補強筋のみの試験体のせん断終局強度は62.0tfであり、RC規準による補強試験体のせん断耐力より大きい。

以上の解析結果から、開口補強筋なしの試験体では、開口隅角部の圧壊が顕著であり、無開口試験体に対する強度低減率は、学会式の低減率をわずかに上回った。RC規準による補強が行われた試験体では、開口隅角部と開口横引張側壁板の圧壊箇所が減少し、強度低減率が学会式の低減率より大きく、RC規準による開口補強はせん断終局強度に対してもある程度の効果があることが認められた。RC規準による補強と等量の補強筋を開口横にX型配筋とした試験体では、最大せん断耐力がRC規準試験体より上回った。

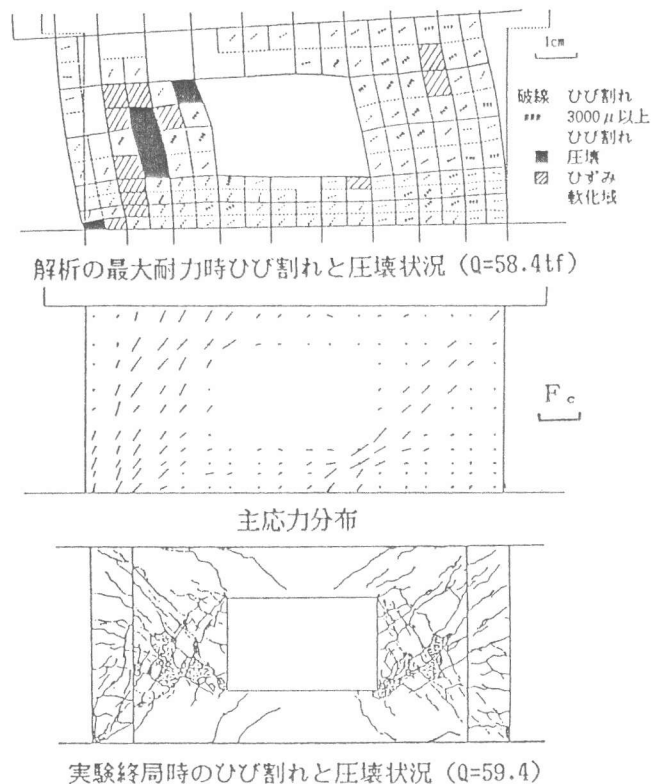


図-6 W04AX-0試験体終局状態

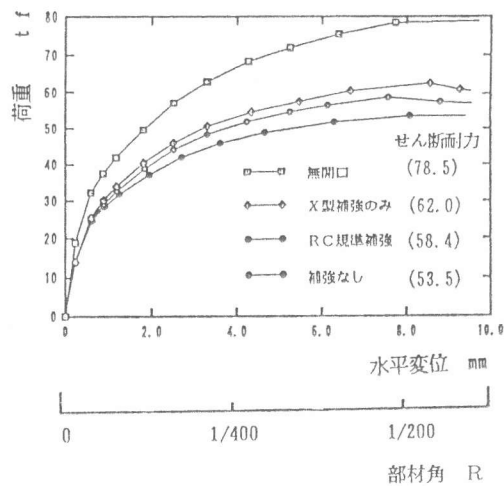


図-7 開口補強パラメーター解析の荷重-変形関係

6 X型補強筋の効果

X型補強筋量をパラメーターとして解析を行った結果の荷重-水平変位曲線を図-8に示す。X型補強筋量の増加に伴い、試験体の最大耐力時の変形がわずかながら小さくなっている。X型補強筋が3本までは補強筋量による耐力の増加がほぼ線形であるが、4本以上では、X型補強筋による耐力の増加分は減少している。

試験体の最大耐力時のひび割れと圧壊状況を図-9に示す。X型補強筋が1列に3本までは、補強筋量の増加に伴い、コンクリートの圧壊箇所が減少する。これは、X型補強筋によるせん断耐力の負担分が増加しているためと考えられる。補強筋が1列4本以上では、コンクリートひび割れと圧壊状況がほとんど変化がない。これは、試験体に補強筋量が多い場合、試験体開口横の圧縮側コンクリートの圧壊が先行することにより、耐力が決まるためと考えられる。

W04AX-1、W04AX-2及びW04AX-3試験体の引張力を受ける斜め筋と圧縮力を受ける斜め筋の負担せん断力と試験体の水平変位の関係を実験結果と比較して図-10に示す。引張力を受けるX型補強筋の応力は、変形が約0.6cm(部材角R=1/270)のときに降伏し、圧縮力を受けるX

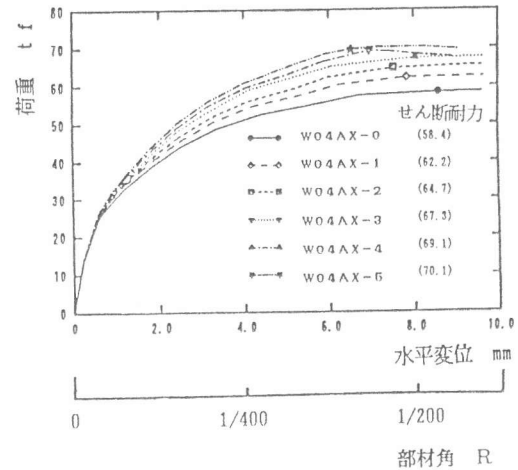


図-8 X型補強筋量パラメーター解析の荷重-変形関係

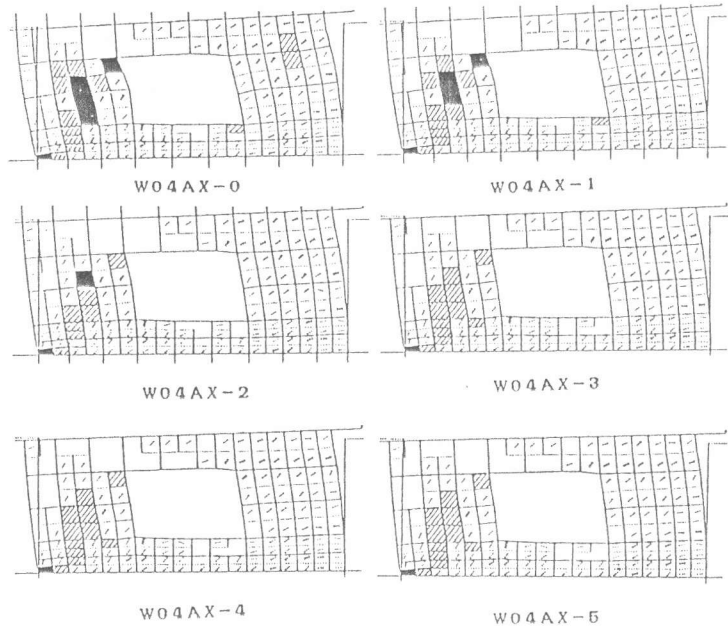


図-9 X型補強筋量パラメーター解析の最終破壊状況の比較

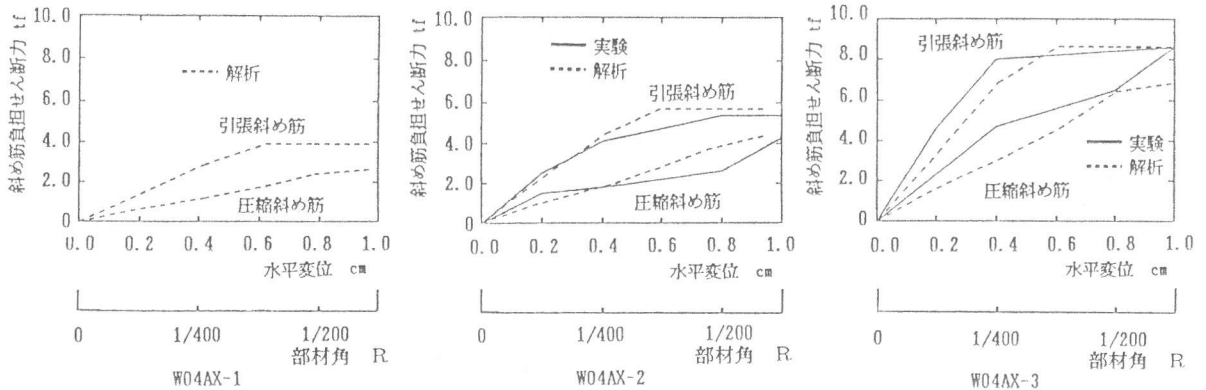


図-10 X型補強筋負担するせん断力

型補強筋の応力は、最大耐力時にほぼ降伏に達し、斜め筋応力の解析値が実験値とほぼ一致している。

試験体の最大耐力と引張力を受ける斜め鉄筋有効断面積の関係を図-11に示す。有効断面積は、引張力を負担する補強筋断面積に、斜め筋の水平面に対する角度 θ の余弦を乗じたものである。斜め筋

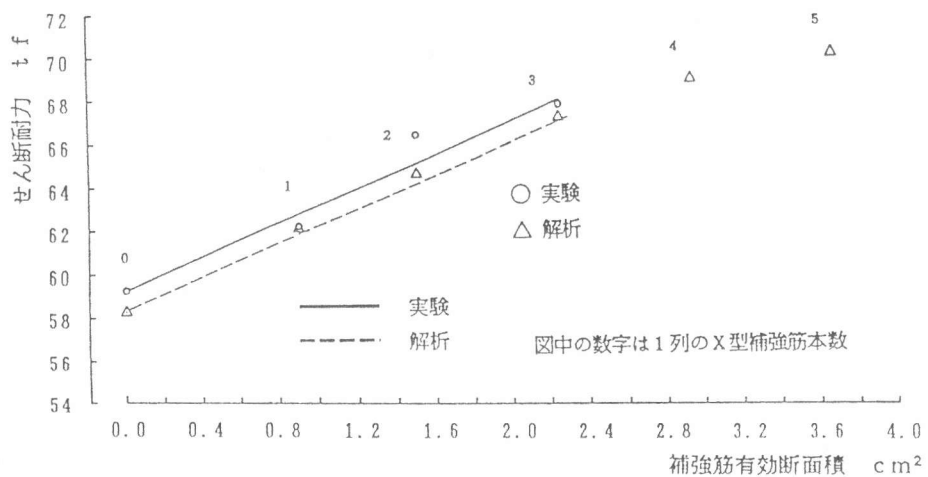


図-11 X型補強筋有効断面積と最大せん断耐力との関係

が配筋されていない試験体の最大耐力を規準にすると、解析では実験と同様に、引張力を受ける補強筋量にほぼ比例して最大耐力が増加し、X型筋4本から耐力が頭打ちとなることがわかる。

7 まとめ

無開口耐震壁、開口補強筋なし、RC規準による開口補強、開口横のX型補強筋のみの開口耐震壁試験体を想定して解析を行い、比較検討した結果、開口補強筋なしの試験体では、開口隅角部の圧壊が顕著であり、無開口試験体に対する強度低減率は、学会式の開口低減率をやや上回った。RC規準により開口補強された試験体では、開口隅角部と開口横引張側壁板の圧壊箇所が減少し、強度低減率が学会式の低減率より大きく、RC規準による開口補強はせん断終局強度にもある程度効果があると認められた。また、開口横のX型補強筋量をパラメーターとして解析を行った結果、1) 開口耐震壁の開口横のX型補強筋のうち、引張力を受ける斜め筋は、開口の両側で(引張側、圧縮側ともに)ひび割れが開口するのを抑え、せん断耐力の上昇に寄与すること、2) X型補強筋量が少ない場合、X型補強筋による開口耐震壁の耐力上昇分は、引張力を受ける補強筋の有効断面積にほぼ比例していること、3) X型補強筋による開口耐震壁のせん断耐力上昇には頭打ち傾向があることがわかった。

謝辞 本研究は、科研費・試験研究[1](研究代表者・青山博之東大教授)の分担研究である。本解析を行うに当たり、実験データを使用させて頂いた東京大学工学部建築学科青山・小谷研究室の方々に感謝致します。

□参考文献□

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説、pp. 207-208、1988
- 2) 全 大幹、細川洋治ほか：鉄筋コンクリート耐震壁の補強方法、日本建築学会学術講演梗概集、pp. 577-578、1986. 10
- 3) 野口 博、長沼一洋：繰返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル 第2回 RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集、JCI-C5、日本コンクリート工学協会、pp. 97-104、1981. 10
- 4) 大久保 雅章、濱田 聡、野口 博：地震時のひび割れコンクリートの圧縮特性の劣化に関する基礎実験、第11回コンクリート工学年次論文報告集 11-1、pp. 323-326、1989
- 5) 薬研地 彰、角 一行ほか：鉄筋コンクリート平板におけるコンクリートの力学的特性(その1：テンション・スティフニング)、日本建築学会大会学術講演梗概集C、pp. 365-366、1987. 10
- 6) 野口 博、丸田 誠：鉄筋コンクリート耐震壁のJCI選定試験体の有限要素解析 第6回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 741-744、1984
- 7) 野口 博、鶴田 正一：地震力を受けるRC耐震壁の開口補強に関する解析的研究 第8回コンクリート工学年次講演会論文集、pp. 697-700、1986
- 8) 広沢 雅也：既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料とその解析、建築研究資料 No. 6、pp. 42、March 1975