

[2067] 有開口高配筋耐震壁のせん断終局強度に関する研究

正会員 ○堤 英明(佐藤工業(株)中央技術研究所)

正会員 東浦 章(佐藤工業(株)中央技術研究所)

正会員 佐藤和英(佐藤工業(株)中央技術研究所)

正会員 近藤吾郎(京 都 大 学 工 学 部)

1 はじめに

高配筋耐震壁の弾塑性性状に及ぼす開口の影響については、一般的な配筋量の耐震壁に比べてその基本的な性状の把握が十分ではない。著者らは、これまで有開口耐震壁の開口の大きさ、個数、位置および形状をパラメータとする実験を実施し、それらが復元力特性や破壊性状に及ぼす影響について検討した。その結果、開口が偏在する場合の最大耐力は、既往の開口低減式では推定できないこと、また、破壊性状は開口の位置によって異なることなどが確認できた¹⁾。

本研究では、有限要素法によって有開口耐震壁の弾塑性解析を実施し、実験ではとらえにくい壁板内部の応力状態や開口の位置の違いによる応力の伝達状況を明らかにするとともに、開口と壁板のせん断終局強度との関係を推定した。

2 解析概要

2.1 解析モデルおよびパラメータ

本研究では表-1に示すように耐震壁の開口の大きさと位置をパラメータとして、合計11ケースの解析を行った。開口の大きさをパラメータとするモデルは、開口が壁中央に位置し、開口周比($\sqrt{\text{開口面積}/\text{フレームラインで囲まれた面積}}$)が0～0.5の範囲にある6ケースである。開口位置をパラメータとするモデルは、開口位置を壁の上下、左右に偏在させた6ケースとした。表中の●印はこれまでに加力実験を実施した試験体を示し、○印は解析を行ったモデルを表している。これらのうち、実験では無開口壁(WALL)のみが単調載荷で、有開口壁は、いずれも正負繰返し載荷が行われた。そこで、本解析ではWALLの実験結果を基に解析方法の妥当性を確認した。

解析モデルの基本形状は、図-1に示すように厚さ8cmの壁板の両側に30cm×30cmの断面の柱を有し、柱芯間の距離が200cm、シャースパン比が0.6、壁筋比が1.2%の耐震壁である。開口の周囲は、鉄筋コンクリート構造計算基準に準じて補強

表-1 解析モデル一覧

	形 状	開口の大きさ	開口の位置
WALL		●○	
SSC-1	⊗	●○	
SSC-2	⊗	●○	
SSC-3	⊗	●○	●○
SSC-4	⊗	●○	
SSC-5	⊗	●○	
SSL-3	⊗		●○
SSE-3L	⊗		●○
SSE-3R	⊗		●○
SSS-3L	⊗		●○
SSS-3R	⊗		●○

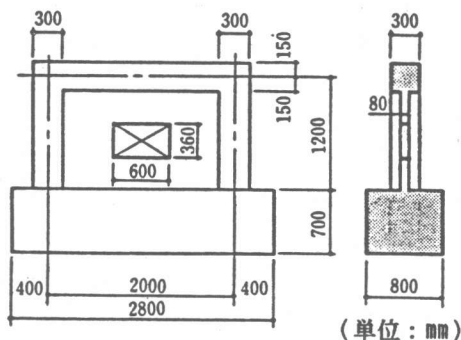


図-1 解析モデルの基本形状

されている。

解析で用いたコンクリートと鉄筋の材料特性を表-2および表-3に示す。コンクリートの圧縮強度は、実験に用いた試験体の平均値である260kg/cm²とし、ヤング係数は建築学会の提案式に基づいて算出した。また、コンクリートの圧縮強度時の歪および引張り強度は、材料試験結果の回帰式によって求めた。

2.2 有限要素モデルおよび解析方法

解析モデルは、図-2に示すように4節点アイソパラメトリック要素とジョイント要素で構成し、コンクリートと鉄筋の力学性状は、次のようにモデル化した。

1)コンクリート 構成則は、2軸応力下のコンクリートの非線形挙動を良く表現できるとされているDarwin等による直交異方性モデルを用い、等価一軸歪として武藤博士等による有効歪を用いた。図-3に示すように主応力と有効歪の関係は、引張側ではひびわれ発生まで弾性とし、ひびわれ発生後は鉄筋との付着によるテンションスティフネス効果を考慮し、歪レベルに応じて徐々に応力を低減した(図-4参照)。また、圧縮側は、圧縮強度に至るまではSaenz式、それ以後の軟化域は、その負勾配を直線と仮定した。

ひびわれ面での骨材の噛み合いによるせん断伝達は、ひびわれ幅に応じてせん断剛性を低減させるCervenkaのモデルを用いた。

コンクリートの破壊条件は、図-5に示すようにKupfer等による破壊条件式を用いたが、ひびわれ発生後のコンクリートの圧縮強度は、Collins等の実験結果を考慮して、歪レベルに応じて劣化させた。

ひびわれは、分布ひびわれモデルで表現し、主応力が引張強度を越えた時点でこれと直交方向にひびわれが生じるものとした。

RC要素としてのコンクリートの特にひびわれ発生後の力学性状は、定量的に十分解明されておらず、種々のモデルが提案されている。本解析では、テンションスティフネス効

表-2 コンクリートの材料特性

ヤング係数 (kg/cm ²)	ポアソン 比	圧縮強度 (kg/cm ²)	圧縮強度時 歪(×10 ⁻⁶)	引張強度 (kg/cm ²)
2.55×10 ⁵	0.167	260	2100	24.4

表-3 鉄筋の材料特性

	ヤング係数 (kg/cm ²)	降伏強度 (kg/cm ²)	降伏強度時 歪(×10 ⁻⁶)
06	1.84×10 ⁵	4152	2258
010	1.95×10 ⁵	3967	2039
013	2.00×10 ⁵	4233	2199



図-2 有限要素モデル

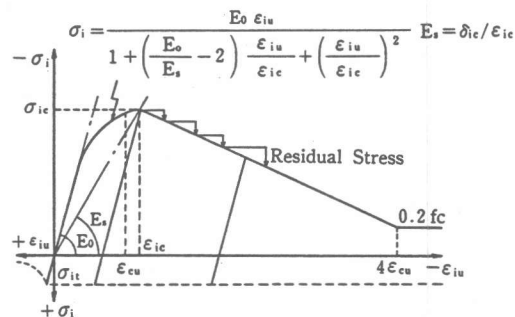


図-3 コンクリートの応力-有効歪関係

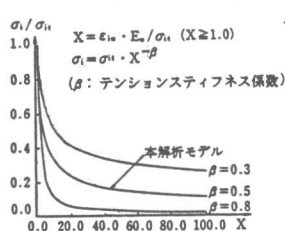


図-4 テンション
スティフネス特性

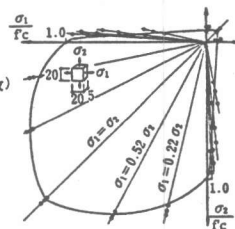


図-5 コンクリートの
破壊条件

果やひびわれ面でのせん断伝達に関するモデルを修正しながらWALLの解析を行ない、最終的にこの実験結果に良く適合するモデルを採用した。

2)鉄筋 鉄筋は、軸方向力のみを負担する板要素としてモデル化した。鉄筋の応力-歪関係は、バイリニア型とした(図-6参照)。

3)付着および定着 コンクリートと鉄筋は、全て完全付着と仮定した。鉄筋のスタブからの抜け出しおよびめり込みは、柱と壁の脚部に鉛直方向の定着バネを設けて評価した。図-7に示すように、鉄筋の抜け出しは非線形弾性モデル、めり込みは弾性モデルとした。

2.3 数値計算方法

解析は、単調載荷による荷重増分法で行い、実験に準じて水平力と軸方向力($\sigma_0 = 20\text{kg/cm}^2$)は、梁に対する分布加力とした(図-2参照)。各要素の応力は積分点で評価し、ひびわれの発生等によって生じる不釣合力は、等価節点力とし

て各荷重ステップで解放して行くが、規定の反復回数を越えても収斂しない場合は、次の荷重ステップの外力項に加えた。

3 解析結果

3.1 諸荷重

初期剛性、せん断ひびわれ荷重、柱主筋降伏荷重、コンクリート圧壊時の荷重および最大耐力の解析値を実験結果と併

せて表-4に示す。解析で用いた材料定数は、実験における試験体の平均値を用いているため実験値と定量的な比較はできないが、開口の大きさや位置の違いによる各荷重値への影響は、定性的に一致している。

3.2 荷重-変形関係

荷重-変形関係を図-8(a)~(c)に示す。図-8(a)は、開口の大きさに着目したもので、開口の増大に伴ない最大耐力が減少する傾向が認められる。また、最大耐力時の変形は、荷重増

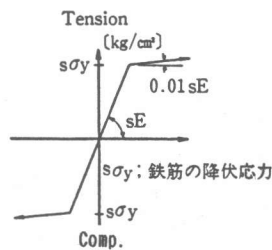


図-6 鉄筋の応力-歪関係

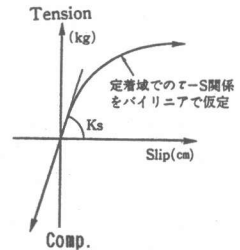


図-7 定着バネの特性

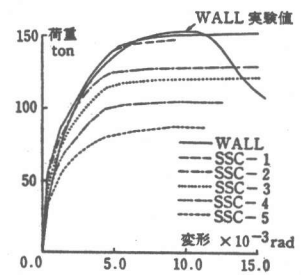


図-8(a) 荷重-変形関係

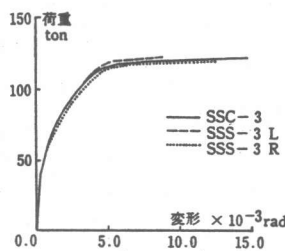


図-8(b) 荷重-変形関係

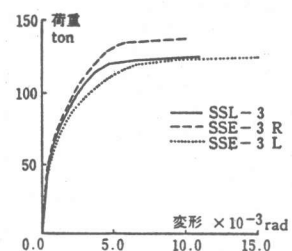


図-8(c) 荷重-変形関係

表-4 諸荷重一覧

	WALL		SSC-1		SSC-2		SSC-3		SSC-4		SSC-5		SSL-3		SSE-3L		SSE-3R		SSS-3L		SSS-3R	
試験体	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析	実験	解析
初期剛性 (tf/cm)	911	1762	—	1660	863	1544	519	1333	469	1101	—	875	732	1466	713	1481	713	1434	—	1347	—	1277
壁せん断ひびわれ (tf)	24.0	40.0	—	40.0	41.9	30.3	27.2	25.0	25.2	20.0	—	15.0	32.5	30.0	33.1	25.0	26.9	30.0	—	25.0	—	25.0
柱主筋降伏 (tf)	103.6	142.5	—	140.0	98.9	127.0	97.3	117.5	63.4	100.0	—	85.0	100.3	110.0	111.2	130.0	94.3	112.5	—	115.0	—	117.5
コンクリート圧壊 (tf)	144.2	135.0	—	135.0	107.8	115.0	105.7	125.0	76.6	100.0	—	77.5	119.6	115.0	120.5	125.0	108.0	100.0	—	110.0	—	102.5
最大耐力 (tf)	149.8	152.5	—	147.5	109.2	130.0	105.7	122.5	84.6	107.5	—	87.5	119.6	125.0	124.4	137.5	108.0	125.0	—	122.5	—	120.0

分法で計算しているため厳密には評価できないが、部材角 $4.8 \times 10^{-3} \text{ rad} \sim 9.5 \times 10^{-3} \text{ rad}$ (変形で $0.7 \sim 1.0 \text{ cm}$)の範囲にあり実験値と対応している。

図-8(b)、(c)は、開口の横方向の位置の違いによる影響について示したもので、(b)は、開口が下段にある場合、(c)は、中段にある場合である。最大耐力は、開口が圧縮側柱付近、特に、柱脚近傍にある場合に低下する傾向がある。

3.3 主応力状態

部材角 $4.0 \times 10^{-3} \text{ rad}$ 付近におけるコンクリートの主応力状態を図-9(a)～(e)に示す。これらの図から、有開口壁では、開口周囲に応力レベルの極端に小さな場所があり、開口によって応力の伝達が妨げられる部分が生じることがわかる。特に、開口の大きなSSC-5では、開口上側と下側にこの領域が拡大しており、これが耐力低下の原因であると考えられる。無開口壁であるWALLでは、壁板全体にほぼ一様に応力が発生しているが、圧縮主応力は、特に、曲げモーメントが増大する圧縮側の壁脚部で大きくなっている。こうした圧縮主応力が大きな場所に開口があると、耐力の低下が大きく、この傾向は実験結果とも一致している。

3.4 コンクリートのひびわれと圧壊

最大耐力時のコンクリートのひびわれおよび圧壊状況を実験の破壊状況と合わせて図-10(a)～(d)に示す。解析による壁板のひびわれは、実験におけるひびわれ状況と良く対応している。圧壊の状況も、開口側部で水平方向に、柱際で上下方向に進展するという実験最終時の状況を良く表わしている。無開口壁のWALLでは、コンクリートの圧壊域が壁板全体に及んでいるのに対して、有開口壁では、圧壊域が開口側部に限られているのが大きな特徴である。

4 解析結果の検討

ここでは、先に示した解析結果並びに実験結果に基づいて、特に開口の大きさや位置が耐力に及ぼす影響について検討する。

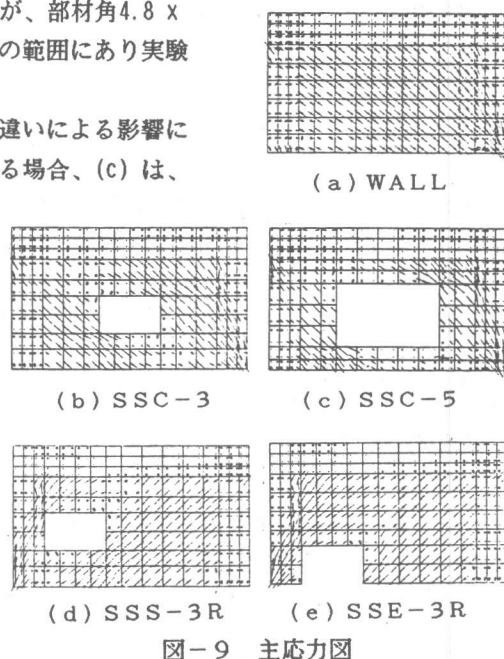


図-9 主応力図

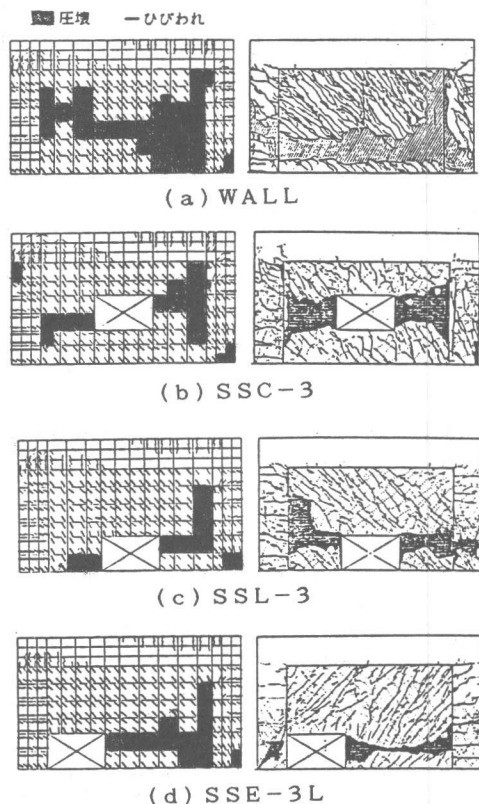


図-10 コンクリートのひびわれ及び圧壊状況

4.1 柱主筋の降伏荷重と曲げ耐力

解析による柱主筋降伏荷重と最大耐力および既往の提案式²⁾による曲げ降伏荷重と曲げ耐力の計算値を図-11に示す。同図において柱の曲げ降伏荷重は、開口の大きなSSC-5を除き、解析値と計算値が概ね一致している（解析値/計算値=0.88~1.15）。SSC-5で特に大きな差が生じた理由として、モデルがフレーム的な挙動を示し、提案式のように片持ち梁形式の壁として取り扱いえないためであると考えられる。

また、解析における最大耐力は、いずれも提案式による曲げ耐力値を下回っており、曲げ耐力には至っていないと考えられる。しかし、開口がSSC-2より小さな試験体では、解析値と計算値が非常に接近しており、実験においてこれらの試験体の最大耐力時の破壊状況が曲げ破壊モードと良く似た性状を示したことに一致する。

4.2 最大せん断耐力

図-12は、開口の大きさ、位置および形状をパラメータとした実験¹⁾から得られた種々の開口を持つ壁板の平均最大せん断応力度と開口周比との関係を示している。同図より、同じ開口周比でも開口の位置や形状によって最大せん断応力度が大きくバラついており、開口周比のみでは、最大せん断応力度と開口との関係を表わせないことがわかる。

そこで、本研究では、開口の大きさに加えて開口の位置をパラメータとして考慮するために、次のような処理をして有開口壁のコンクリート負担せん断強度を推定した。すなわち、先に解析結果で示した壁板の主応力分布と既往の実験におけるひびわれ状況を基に、図-13のハッチ部のような耐力に寄与すると考えられる壁板部分を仮定し、これらの面積の和を高さ h で除した有効スパン長 l' を求める。ここで、ハッチ部の範囲は、柱、梁の交点から開口隅角部に引いた接線（傾きが 45° 以下になる場合は 45° とする）と柱、梁およびスタブに囲まれた部分とする。図-14は、 l' により求めたせん断スパン比 M/QL' と解析および実験から求めたコンクリートの負担せん断応力度 τ_c の関係を示している。ここで、 τ_c は次に示す無開口耐震壁のせん断終局強度 τ_u に関する千葉等の提案式³⁾から逆算する。

$$\tau_u = \tau_c + \tau_s + \tau_0 \quad (1)$$

$$\tau_s = P_w \sigma_y / 2 \quad (\text{壁筋による補強効果}), \quad \tau_0 = \sigma_0 \quad (\text{軸応力度による耐力上昇分})$$

ただし、ここで用いる壁筋比 P_w は、開口補強筋を考慮した値であり、軸応力度 σ_0 は、軸方向力を開口部を除いた柱、壁の面積の和で除した値である。

図-14の実験値を用いて $\tau_c / \sqrt{F_c}$ と M/QL' について次のような回帰式が得られる。

$$\tau_c / \sqrt{F_c} = 4.87 - 3.18 M/QL' \quad (2)$$

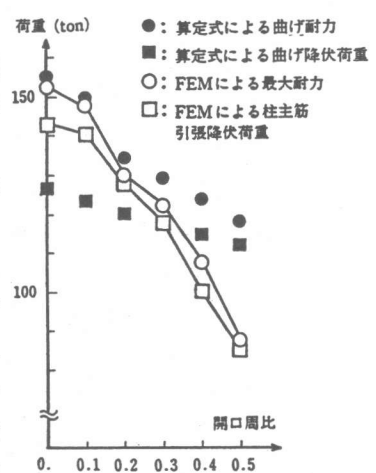


図-1.1 開口周比と曲げ耐力及び曲げ降伏荷重の関係

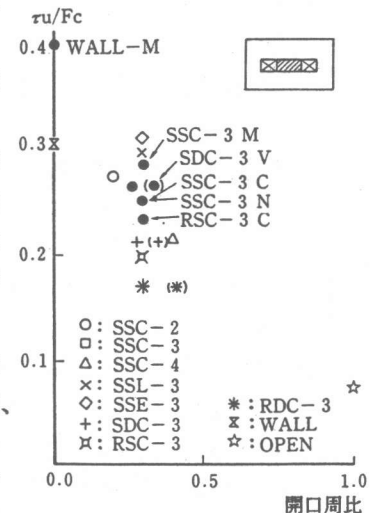


図-1.2 開口周比と F_c で無次元化した最大せん断応力度の関係

この式は、実験値のみならず、解析値とも良く適合しており、有効スパン長の考え方が、有開口壁の応力の伝達機構を適切に評価していることがわかる。

図-15は、既往の有開口耐震壁の実験と本解析で得られた最大せん断応力度 $e\tau_u$ と(1)式において τ_c を(2)式で評価して得られた最大せん断応力度 $c\tau_u$ との相関を示したものである。同図からも本式が、開口の影響に対して適合性が良いことがわかる。

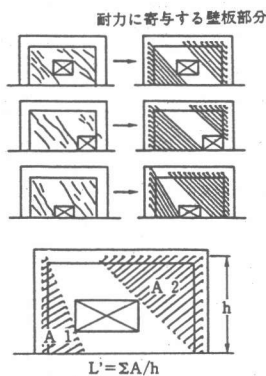


図-13 有効スパン長

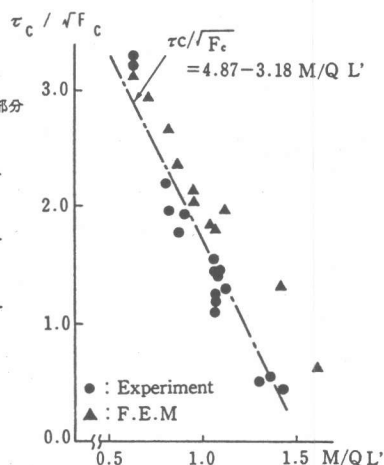


図-14 コンクリートの負担せん断応力度と有効スパン長によるシャースパン比の関係

5. まとめ

有開口高配筋耐震壁の弾塑性有

限要素解析を行い、これまでの実験結果と合わせてその基本性状を検討した結果、以下のことが明らかになった。

- 1) 有開口耐震壁では、開口周囲に応力の伝達がなされず、壁板の耐力に寄与しない部分が生じる。特に、開口が圧縮応力の大きくなる部分にある場合、この影響による耐力の低下が大きい。
- 2) 有開口耐震壁の最大せん断応力度は、開口の大きさおよび位置の影響を考慮し、応力の伝達に有効な壁板部分の和である有効面積を求めて、コンクリートの負担せん断強度を評価することにより推定することができる。

6. 謝辞

尚、本研究は、(社)建築振興協会の「建屋の復元力特性に関する委員会」により佐藤工業、戸田建設、フジタ工業、西松建設、熊谷組、間組、前田建設工業の7社の共同研究として実施された。

また、本研究の実施に当たり、千葉大学 野口 博助教授に貴重な御指導をいただきました。ここに記して深甚の謝意を表します。

7. 参考文献

- 1) 高田誠一、東浦 章、佐藤和英、渡部 丹、久保哲夫：建屋の復元力特性に関する研究(その23)、(その24)、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)、昭和59年10月、pp.2379-2382
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート終局強度設計に関する資料(シリーズ22)、建築雑誌、Vol. 96, No. 1176
- 3) 千葉 脩、福沢六郎、羽鳥利明、柳下和雄、金子 治、渡壁守正：建屋の復元力特性に関する研究(その41)、日本建築学会大会学術講演梗概集(東海)、昭和60年、10月、pp855-856

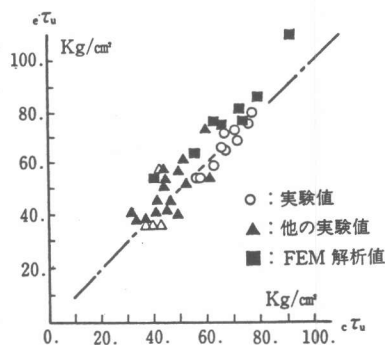


図-15 既往の実験値及び解析値と本提案式による最大せん断応力度との関係