論文 連層耐震壁の最大強度に基づいた単独耐震壁の最大強度の評価

兼平雄吉^{*1}·小野里憲一^{*2}·望月洵^{*3}

要旨:連層耐震壁と単独耐震壁は,形状・寸法,材料強度,および補強筋量が同じであって もその最大強度に有意な差が生じる。前者の最大強度の解析精度は高いが,後者の最大強度 の的確な評価には弾塑性解析が必須であり,また未決の問題が多い。このため,連層耐震壁 を想定した強度式が単独耐震壁にも用いられているのが現状である。この場合,危険側の評 価に結びつくことがある。本研究は,連層耐震壁モデルによる最大強度に柱と梁から決定さ れる強度低減係数を乗じることで,単独耐震壁の最大強度を評価する方法を提案し,さらに その妥当性を143 体のせん断破壊に終った耐震壁の試験体を通して検証したものである。 キーワード:連層耐震壁,単独耐震壁,せん断破壊,強度低減係数,最大強度

1. はじめに

耐震壁は図1に示すように壁板の配置計画に より連層耐震壁と単独耐震壁に分けられる。両 者は形状・寸法,材料強度,および補強筋量が 同じであっても配置の違いにより最大強度に違 いが生じる。しかし,耐震壁を構造設計する場 合,同じ強度式が用いられることが多い。これ は,連層耐震壁の降伏のメカニズムが単独耐震 壁に比較して単純なため,解析精度の高い最大 強度の評価が可能なのに対し,単独耐震壁の場 合,弾塑性解析を必要とし,的確な解析には未 決の問題が多いためである。耐震壁の設計式と して用いられる強度式の多くは連層耐震壁を想 定して誘導されている。このため,単独耐震壁 の設計に用いると危険側に評価する可能性が生 じる。



本研究は,連層耐震壁モデルの最大強度に強 度低減係数を乗じることで,単独耐震壁の最大 強度を評価する方法を提案し,我が国で行われ た143体の単独耐震壁の実験値と比較すること で,その妥当性の検証を目的としている。ただ し,143体はすべて柱の引張降伏以外の破壊形 式で終った試験体である。このため本研究はせ ん断破壊の耐震壁を対象としている。

2. 強度低減係数

2.1 強度低減係数の提案

筆者らは文献 1)で連層耐震壁の弾塑性解析モ デルを修正して単独耐震壁の解析を行い,その 解析方法の妥当性を示した。連層耐震壁と単独 耐震壁の弾塑性解析モデルの違いは,図2に示 すように,前者が上下梁を剛体として扱ってい るのに対し,後者は上下梁を要素分割して柱と 同様に強度と剛性を与えている点,および圧縮 ストラットの傾斜角が異なる点である。このと き,単独耐震壁の最大強度は上下梁の強度の低 下とともに低下する。この梁の強度低下の指標 として,式(1)の強度係数 bCを導入する。

- ${}_{b}C = {}_{b}M_{u}/{}_{b}M_{s} \qquad \cdot \cdot \cdot (1)$ ${}_{b}M_{u} = 0.9{}_{b}a_{g}/2 \cdot {}_{bg} \quad {}_{y} \cdot {}_{b}d$
- *1 システム計測(株) 技術部 (正会員)

*2 工学院大学 建築都市デザイン学科助教授 博士(工学) (正会員)

*3 工学院大学 名誉教授 工博 (正会員)

 $_{\rm b}M_{\rm s} = _{\rm b}W \cdot \lambda'^2/8$

 $_{b}w = (0.63 \quad _{B}/2 - p_{sv} \cdot _{sv} \quad _{y})t$

ここで, $_{b}M_{u}$:梁の曲げ強度, $_{b}M_{s}$:梁を等分布 荷重を受ける単純梁と扱ったときの最大曲げ応 力, $_{b}w$:梁に作用する圧縮ストラットの鉛直方 向力, $_{b}a_{g}$:梁主筋の全断面積, $_{bg}$ y:梁主筋の 降伏強度, $_{b}d$:梁の有効せい, p_{sv} :壁の縦補強 筋比, $_{sv}$ y:縦補強筋の降伏強度, λ ':壁の内 法長さ, $_{B}$:コンクリート強度,t:壁の厚さ である。

図3は解析例の一つで,横軸は梁の強度係数 bCを,縦軸は連層耐震壁モデルの最大強度の解 析値mQcalに対する単独耐震壁モデルの最大強度の解析値iQcalの比iQcal/mQcalである。単独耐震 壁モデルの最大強度は梁の強度係数が大きくな ると連層耐震壁モデルの最大強度と同じになる。 文献1)では,限られた数の試験体を対象とした ため,梁の強度係数と最大強度の関係を定量的 に明確に定めるに至らなかった。しかし,その 結果は,単独耐震壁の最大強度の評価が連層耐 震壁モデルの最大強度に低減係数を乗じるとい う簡単な方法で可能であることを示唆している。

本研究では単独耐震壁の最大強度を連層耐震 壁モデルの最大強度で除した値を強度低減係数

と定義し,これを梁の強度係数_bCの関数とし て誘導する。単独耐震壁の最大強度_iQを連層耐 震壁モデルの最大強度_mQと強度低減係数の 積として式(2)のように表す。

 $_{i}Q = \cdot_{m}Q \qquad \cdot \cdot \cdot (2)$

2.2 強度低減係数の誘導

強度低減係数 の誘導にあたり,国内で行われた実験から柱と同じ程度の強度と剛性の梁を もつ試験体 88 体,柱に比べて剛強な梁をもつ試 験体 55 体の計 143 体を文献 2)~29)より収集し た。試験体は,対角圧縮力または対角圧縮力・ 引張力を受け,いずれもせん断破壊で終ってい る。図4はこれらの試験体について弾塑性解析 を行った結果である。解析にあたって最大強度 は,圧縮ストラットの傾斜角 を変化させて得 られた最も大きな値としている。これは,極限



図4 最大強度の実験値と解析値の関係

解析法の下界定理に基づいている。図 4(a)が連 層耐震壁モデルによる最大強度の解析値 mQcal と実験値 Qexpの比較,図 4(b)が単独耐震壁モデ ルによる最大強度の解析値 iQcal と実験値 Qexpの 比較である。単独耐震壁モデルは連層耐震壁モ デルに比較して解析精度が高く,連層耐震壁モ デルは最大強度を過大に捉えていることがわか る。

図 5 は 縦軸に $_{i}Q_{cal} \epsilon_{m}Q_{cal}$ で除した値(以降, これを弾塑性解析で得られた強度低減係数 $_{0}$ という),横軸に梁の強度係数 $_{b}C$ の値をとって 解析結果をまとめた関係である。図中の曲線は これらの分布の回帰曲線を示している。また, 平均,標準偏差,および変動係数はこの回帰曲 線に対する $_{0}$ の値である。この図から強度低減 係数 $_{0}$ は梁の強度係数 $_{b}C$ とともに低下する傾 向を示すが,そのばらつきはやや大きいことが わかる。これは強度低減係数 が梁の強度係数 $_{b}C$ だけの関数としたのでは十分な精度が得ら れないことを示している。

図 6 は,梁の強度係数_bC と同様の方法で柱の 強度係数_cC を式(3)により計算し,_cC の値によ り試験体を種類分けしたものである。

 ${}_{c}C = {}_{c}M_{u}/{}_{c}M_{s} \qquad \cdot \cdot \cdot (3)$ ${}_{c}M_{u} = 0.9{}_{c}a_{g}/2 \cdot {}_{cg} \quad {}_{y} \cdot {}_{c}d$ ${}_{c}M_{s} = {}_{c}w \cdot h'^{2}/8$

 $_{c}w = (0.63 _{B}/2 - p_{sh} \cdot _{sh} _{y})t$

ここで,_cw:柱に作用する圧縮ストラットの水 平方向力,_cag:柱主筋の全断面積,_{cg}y:柱主 筋の降伏強度,_cd:柱の有効せい,_{psh}:壁の横 補強筋比,_{shy}:横補強筋の降伏強度,h':壁 の内法高さである。

耐震壁の最大強度時における壁板の負担力は, 図7に示すように最大強度時の壁板の降伏領域 の幅によって変化する。壁板の降伏領域は柱梁 フレームの拘束力が小さくなると狭くなり,壁 板の負担力が低下する。比較的柱の強度が小さ い連層耐震壁モデルの場合は,これにより壁板 の降伏領域が狭くなっているため,梁の強度の 低下による壁板の降伏領域の変化が起こりにく



いと考えられる。柱の強度係数。Cはこの考えに 基づいて導入したもので,図6からも梁の強度 係数。Cが同じ場合,柱の強度係数。Cが小さい ほど強度低減係数。の低下が小さいことがわ かる。これを考慮すると強度低減係数 は梁の 強度係数 _bC に加え,柱の強度係数 _cC を導入す ることで精度を高めることができるといえる。

式(4)は,強度低減係数 の回帰式を,梁の強 度係数_bC と柱の強度係数_cC の積の関数として 扱い,重回帰分析を行った結果である。誘導に あたり,強度低減係数 は計算上 1.0 以下であ るが右項は1.0を超える値を含む式であるため, 回帰式による計算値が 1.0 を超える試験体を逐 次除いて分析を繰り返し,収斂させた。

= min(1, 0.93_cC^{-0.12}・_bC^{0.16}) ・・・(4) 図 8 は回帰式(4)の の計算精度を示したもの





で,弾塑性解析から得られた強度低減係数 0 を回帰式(4)の で除した値を縦軸に,横軸を としている。 0/の平均,標準偏差,および 変動係数はそれぞれ0.997,0.066,および0.066 である。図9は実験値QexpとmQcalに を乗じ た値・mQcalの比較を示している。図4(b)の単 独耐震壁モデルの解析結果と比較して遜色ない ことがわかる。

3.単独耐震壁の最大強度の評価

3.1 強度低減係数の適用

筆者らは文献 30)で連層耐震壁の最大強度を 解析するためのマクロモデルを提案している。 マクロモデルは最大強度時のメカニズムをマク ロにモデル化し,これに降伏条件を設定して力 のつりあいから最大強度を求める極限解析の手 法に基づくもので,収斂計算を必要とする。図 10 はこのマクロモデルを用いて,143 体の試験 体の最大強度の計算値Q_{cal1}と実験値Q_{exp}を比較 したものである。図 10(a)はマクロモデルの計算 値と実験値の比較を示し,(b)はマクロモデルの



(a)Q_{exp}/Q_{cal}との関係





図 13 Q_{exp}/ Q_{cal}と の関係

計算値に式(4)の強度低減係数 を乗じた値と 実験値の比較である。図 11 は、このマクロモデ ルを単純化して収斂計算の必要のない簡略モデ ル 31)を解析に用いた場合である。図 10,11 と もに強度低減係数 を乗じた場合,乗じる前に 比較して平均値が 1.0 に近づき,変動係数が小 さくなり,計算値は実験値をよく捉えている。

3.2 既往の設計式に対する適用

図 12, 図 13 は耐震壁の設計式として一般的 に用いられる広沢式 32)と, 靭性指針式 33)を用 いて 143 体の試験体の最大強度を計算し,強度 低減係数 を乗じる前と乗じた後について比較 したものである。両式は,設計式であることか ら安全側の評価を与えるために,計算値が実験 値に対して低く計算される。しかし単独耐震壁 の最大強度をこれらの設計式で計算した場合, 図 12 に示すように実験値/計算値が 1.0 を下回る ものが数多くある。図 13 は強度低減係数 を乗 じた場合で,実験値/計算値が1.0を下回るもの は広沢式で37体から1体に,靭性指針式で12 体から0体に減少している。実験値/計算値の変 動係数も広沢式が0.306から0.204,靭性指針式 が0.307から0.213と向上している。強度低減係 数 を乗じない場合,広沢式で最大1.35倍,靭 性指針式で最大で1.30倍に最大強度を過大評価 しているが,強度低減係数 を乗じた場合それ ぞれ1.01倍と0.91倍でほぼ安全側の評価となっ ている。

4.まとめ

連層耐震壁モデルの最大強度に強度低減係数 を乗じて,単独耐震壁の最大強度を評価する方 法を提案した。強度低減係数は,柱と梁の強度 係数より計算される。せん断破壊した143体の 単独耐震壁について強度低減係数を用いた最大 強度の解析精度は,弾塑性解析と同じレベルを 示した。また既往の設計式では単独耐震壁の最 大強度を過大に評価するが,設計式に強度低減 係数を乗じることで適切な評価が可能であるこ とを示した。

参考文献

- 1) 兼平雄吉・小野里憲一・竹原雅夫・望月洵:単層耐震壁の最大強度 に及ぼす上下梁の拘束効果,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp.481~486,2002
- 2) 富井政英・大崎順彦:架構付無開口壁のせん断抵抗に関する研究(第 1報),日本建築学会論文報告集,第51号,pp.96~105,昭和30年 9月
- 3) 富井政英・大崎順彦:架構付無開口壁のせん断抵抗に関する研究(第2報),日本建築学会論文報告集,第52号,pp.68~78,昭和31年3月
- 4) 富井政英: ラーメン付壁板の対角線加力に関する研究(架構付無開 口壁のせん断抵抗に関する研究第3報),日本建築学会論文報告集, 第60号, pp.389~392,昭和33年10月
- 5) 富井政英・宮田滋:有開口耐震壁のせん断実験概要(有開口耐震壁のせん断抵抗に関する研究・第1報),日本建築学会論文報告集, 第66号,pp.301~304,昭和35年10月
- 6) 山田稔・河村廣・樫原健一:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(. 壁筋比が変化する場合),日本建築学会近畿支部研究報告集,pp.99~102,昭和46年5月
- 7) 山田稔・河村廣・土屋勝俊:定軸圧を受けるスラブ付き鉄筋コンク リート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(.一方向載荷の場合),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1623~1624,昭和52 年10月
- 4) 山田稔・河村廣・築谷朋也:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形性状に関する研究(.漸増変位振幅繰り返し実験-壁筋・壁厚の影響),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1627~1628,昭和 52年10月
- 9) 山田稔・河村廣・稲田明人:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形性状並び崩壊性状に及ぼす周辺架構の拘束効果に関する研究(周辺架構の曲げ剛性・耐力の影響),日本建築学会大会学術講演梗 概集,pp.1629~1630,昭和52年10月
- 山田稔・河村廣・稲田明人:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形性状並び崩壊性状に及ぼす周辺架構の拘束効果に関する研究(周辺架構のせん断耐力の影響),日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.125~128,昭和53年5月
- 山田稔・河村廣・納田安章:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形並びに崩壊性状に関する研究(梁が比較的剛な場合),日本建築学 会大会学術講演梗概集,pp.1659~1660,昭和53年9月
- 山田稔・河村廣・稲田明人:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形性状並び崩壊性状に及ぼす周辺架構の拘束効果に関する研究(マルチプレースエレメント法),日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.69~72,昭和54年6月
- 13) 山田稔・河村廣・稲田明人:鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性変 形性状並び崩壊性状に及ぼす周辺架構の拘束効果に関する研究(種々の周辺架構を有する場合),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1461~1462,昭和54年9月
- 14) 山田稔・河村廣・宮本欣明: 剛な梁を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(. 壁厚の影響),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1465~1466,昭和54年9月
- 15) 山田稔・河村廣・平山丈宣: 剛な梁を持つ鉄筋コンクリート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(... 柱材の効果), 日本建築学会大

会学術講演梗概集, pp.1467~1468, 昭和 54 年 9 月

- 16) 山田稔・河村廣・土屋勝俊:定軸圧を受けるスラブ付き鉄筋コンク リート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(.無開口壁厚系列, 及び有開口系列の総括),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1469~1470,昭和54年9月
- 17) 山田稔・河村廣・平戸達朗: 定軸圧を受けるスラブ付き鉄筋コンク リート耐震壁の弾塑性変形性状に関する研究(. 漸増変位角振幅 交番繰返し載荷の場合),日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1611~1612,昭和55年9月
- 18) 望月重・松尾繁:正負交番繰返し純せん断を受ける周辺架構付壁体 の実験(その1 壁筋比の異なる場合について),日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.1637~1638,昭和53年9月
- 19) 望月重・川辺祥一:正負交番繰返し純せん断を受ける周辺架構付壁 体の実験(その2 辺比の異なる場合について),日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.1459~1460,昭和54年9月
- 20) 望月重・保坂裕司:純せん断力を受ける鉄筋コンクリート耐震壁の 復元力特性に関する実験(その1) 定軸圧を受け壁筋比の異なる場合),日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.1473~1474,昭和54 年9月
- 21) 望月重:鉄筋コンクリート壁体のひび割れ後の周辺架構の応力に関する研究(壁筋比の異なる場合),日本建築学会論文報告集,第 291
 号,pp.1~10,昭和 55 年 5 月
- 22) 望月重・松本智夫:鉄筋コンクリート壁板のスリップ破壊に関する 研究(その3付帯ラーメンを有する壁体の場合),日本建築学会大会 学術講演梗概集,pp.1591~1592,昭和56年9月
- 23) 望月重:純せん断繰り返し荷重を受ける鉄筋コンクリート耐震壁の 実験(壁筋比・柱軸力・辺長比が変形性状に及ぼす影響),日本建築 学会論文報告集,第331号,pp.27~37,昭和58年9月
- 24) 望月重・細野啓治:鉄筋コンクリート壁板のスリップ破壊に関する 研究(その 5 壁板の付帯ラーメンが異なる場合の実験),日本建築 学会大会学術講演梗概集,pp.1811~1812,昭和 59 年 10 月
- 25) 望月重・松本智夫:SFRC部材のせん断挙動に関する研究(その8 壁 筋比の異なる純せん断単独耐震壁の実験),日本建築学会大会学術 講演梗概集,pp.2087~2088,昭和 59 年 10 月
- 26) 望月洵・竹原雅夫:スリップ破壊する連層耐震壁のせん断強度の実験式,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.235~236,昭和 61 年8月
- 27) 望月洵・片桐徹・梅田正芳: 連層耐震壁のせん断破に及ぼす柱の拘 束効果について,日本建築学会大会学術講演梗概集,pp.391~392, 昭和 62 年 10 月
- 28) 望月洵・片桐徹・梅田正芳:連層耐震壁の破壊制御と靭性について, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.393~394,昭和62年10月
- 29) 望月洵・竹原雅夫・小野里憲一:連層耐震壁のスリップ破壊せん断 強度式とその妥当性について,日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.565~566,昭和63年10月
- 30) 望月洵・小野里憲一:連層耐震壁のマクロモデルとその解析法,コンクリート工学論文集, Vol.1, No.1, pp.121~132, 1990.1
- 31)小野里憲一・兼平雄吉・望月洵:RC 耐震壁の限界変形角の評価,
 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸),pp.487~488,2002 年 8
 月
- 32) 日本建築学会:建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990)
- 33)日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の靭性保証型耐震設計指 針・同解説,1999