

[192] RC造多連耐震壁の各種剛性評価法の精度に関する考察

正会員 ○菊池健児（大分大学工学部）

正会員 吉村浩二（大分大学工学部）

1. まえがき

鉄筋コンクリート造耐震壁は、地震時にかなり大きな水平力を負担するとともに、地震時の有壁架構の応力状態および変形挙動に大きな影響を与えるため、その水平剛性評価法の精度が有壁架構全体の構造解析精度を左右することになる。筆者は中低層鉄筋コンクリート造架構内に配置された耐震壁の実用的水平剛性評価法について検討して来ており、非連層に配置された耐震壁についてはその水平剛性の性状およびD値の略算法を既に発表しているが¹⁾²⁾、建物の高さ方向に連続して配置される連層耐震壁や横方向に連なる連スパン耐震壁（本論ではこれらの耐震壁を多連耐震壁と総称する）については、特に検討は加えてなかった。ところがその後、富井博士・山川氏により多連耐震壁の剛性マトリックス³⁾⁴⁾が発表され、これを用いた解析結果を基準として各種剛性評価法の精度の検討が可能になった。そこで本論では、多連耐震壁の各種剛性評価法をとりあげ、これらを用いた有壁架構の構造解析の精度を比較検討する。本論で検討した剛性評価法は、富井博士・山川氏が求めた多連耐震壁および単独耐震壁の剛性マトリックスの他、ブレース置換法、線材置換法などの実用的剛性評価法である。

2. 多連耐震壁の剛性評価法

2-1 解析的手法により求められた剛性マトリックス

富井博士らが解析的手法により求めた耐震壁の剛性マトリックスは、従来単独耐震壁⁵⁾についてのみ求められていた。この剛性マトリックスを用いて多連耐震壁の剛性を評価する一手法として対応する節点で単純に重ね合せる方法が考えられるが、この手法では中間ばりで力と変形の連続条件が満足されない。その後、富井博士・山川氏により荷重項モデルを用いて多連耐震壁の剛性マトリックスを作成する方法が示された³⁾⁴⁾。ところで、筆者は有壁架構に剛床の仮定を適用するにあたり、同一層にある全節点の水平方向変位を等しくする操作を行って来た。床スラブの影響を無視した耐震壁の剛性マトリックス³⁾⁵⁾を用いた場合、この操作では耐震壁の左右節点間における付帯ばりの局所的な軸伸縮は可能である。一方、地震力の作用の仕方や床スラブの協力を考慮すると耐震壁の付帯ばりの軸伸縮を拘束した方が実状に近いと考えられる。本論では、以上のことより床スラブを考慮した場合の多連耐震壁の剛性マトリックス⁴⁾が本論でとりあげた各種評価法の中で最も精度の良い評価法と判断し、精度検討の基準として用いた。加えて、表-1に示すように単独耐震壁の剛性マトリックスを重ね合せる方法の精度や床スラブの影響を見るための計算も行った。なお、以下の文中や図表の中では、それぞれ表中に示す略号を用いる。

2-2 実用的剛性評価法

実際の構造計算においてしばしば用いられるブレース置換法および線材置換法を実用的剛性評価法としてとりあげる。これらの方法は、置換骨組の部材断面寸法が耐震壁の形状寸法を用いて簡単に決定できる利点を有する。ブレース置換法は、図-4に示すような耐震壁の1層1スパン分を図-1に示す筋かい入り骨組に置換する方法であり、耐震壁のせん断剛性をブレース材で評価し、曲げ剛性を柱材の断面積で評価する⁶⁾。また、慣用の方法でははりは剛とする（本論では、慣用ブレース置換法と称する）。ところが、この方法では境界ばりの部材応力などに大きな誤差が生じる場合があることが指摘されており、この欠点を補う方法として置換骨組のはりの曲げ剛性を評価する方法が、井上博士らにより改良ブレース置換法と称して提案されている⁷⁾。本論ではこれら慣用、改良の両方の検討を行っており、改良ブレース置換法のはりの曲げ剛性は、側ばりについ

表-1 耐震壁の剛性マトリックスを用いる方法

	(A)	(B)
多連耐震壁の剛性マトリックスを用いる方法	多連A	多連B
単独耐震壁の剛性マトリックスを用いる方法	単独A	単独B

注. (A) 床スラブを考慮した剛性マトリックス
(B) 床スラブを無視した剛性マトリックス

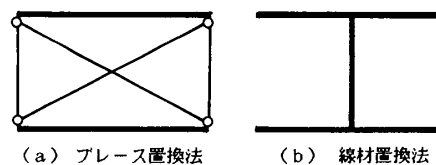


図-1 実用的剛性評価法

ては単独耐震壁の評価法により、中間ばりについては2連耐震壁の中間ばりの評価法⁷⁾による。一方、線材置換法は耐震壁を曲げ、せん断および軸方向変形を考慮した柱材に置換する方法である(図-1参照)。なお、線材置換法の柱の断面面積には、せん断変形に関するもの(壁板の柱心間の断面面積)と軸方向変形に関するもの(柱および壁板の全断面面積)の2種類を定義した。

3. 検討に用いた架構モデル

本論は中低層鉄筋コンクリート造の主に事務所建築を対象としており、解析モデルには、上層部、中層部および下層部を有するよう層数を6とし、少くとも外側および内側スパンを有する架構を設定するためスパン数を3として、6層3スパン平面架構を採用した。その軸組の略図および重量分布を図-2に示す。耐震壁の付帯ばりについてははり中間の質点は設けず、その重量は左右の柱・はり接合部節点に均等に振り分けた。架構の中に組み込まれる耐震壁の配置形式は図-3に示す10通りである。耐震壁の形状・寸法は日本建築学会「鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説」の設計例と同一である(図-4参照)。耐震壁が組み込まれていない部分の柱・はり断面寸法はこの耐震壁の付帯ラーメンの断面寸法と同一としたが、基礎ばりのせいに限り100cmとした。

4. 解析仮定および方法

本論では耐震壁の剛性評価に2で述べた各種方法を用い、図-3に示した架構モデルに対して固有値解析および水平荷重時の静的解析を行った。壁板がとりつかない柱・はりの変形は曲げ、せん断変形および柱・はり接合部の剛域を考慮し、柱部材についてはさらに軸方向変形も考慮する。これら柱・はり部材については、そのせん断変形に関して断面の形状に依存する係数 κ は1.2とする。また、剛床の仮定を取り入れ、同一層の全節点の水平方向変位は同一とした。柱・はりおよび耐震壁のヤング係数は一率に $E=2.1 \times 10^5 (\text{kg/cm}^2)$ 、ポアソン比は $\nu=1/6$ としている。ブレース置換法、線材置換法の場合、耐震壁のせん断変形に関して断面の形状に依存する係数 κ_w にはせん断ひずみエネルギーに基づく富井博士の $\kappa_w^{(8)}$ を用い、1スパン耐震壁の場合はその水平断面形状から $\kappa_w=0.977$ とした。また、線材置換法では3連スパン耐震壁は中間柱の突出部を無視して求め、 $\kappa_w=1.07$ とした。

固有値解析においては各質点に作用する慣性力のうち回転方向は無視し、水平・鉛直方向に関し、両方向を考慮した場合(Case HVとする)、水平方向のみ考慮した場合(Case H)の2ケースを設定した。一方、静的解析には逆三角形分布水平外力を用いた。

5. 解析結果および考察

5-1 1次固有周期

現行の耐震規準では建築構造物の設計用地震層せん断力を決定するに際し、その建物の1次固有周期を求める必要がある。有壁架構では壁配置形式により架構の水平剛性が大きく異なり、耐震壁の水平剛性評価法の精度が1次固有周期を大きく左右する。そこで、架構の1次固有周期の精度についてまず検討を行う。表-2は多連Aの場合の各架構の1次固有周期を示している。表より、鉛直方向慣性力を無視して求めた1次固有周期(Case H)は、水

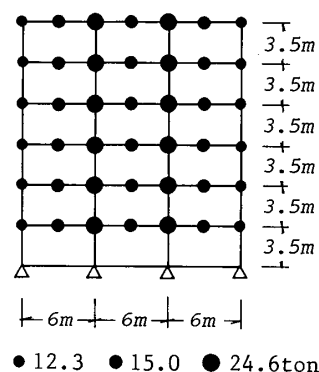


図-2 架構寸法・重量分布

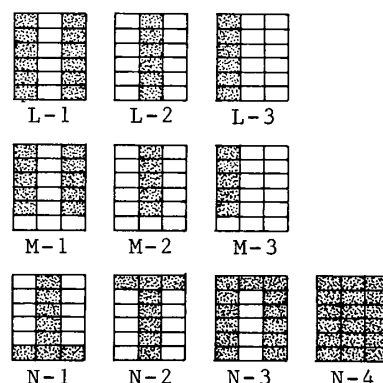


図-3 架構モデルの壁配置形式

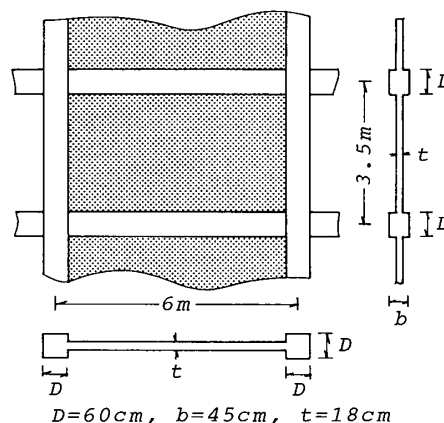


図-4 耐震壁の形状・寸法

表-2 1次固有周期(多連A)

架構モデル	Case HV (秒)	Case H (秒)	Case H Case HV
L-1	0.267	0.261	0.977
L-2	0.350	0.344	0.983
L-3	0.363	0.358	0.987
M-1	0.414	0.412	0.996
M-2	0.480	0.478	0.995
M-3	0.490	0.488	0.996
N-1	0.310	0.303	0.979
N-2	0.281	0.277	0.985
N-3	0.207	0.204	0.985
N-4	0.142	0.136	0.960

平・鉛直両方向の慣性力を考慮した場合（Case HV）に対し、1～4%過小評価になることがわかる。他の評価法の場合にも同程度の影響が現れていた。次に、Case HVにおける各評価法の1次固有周期（ T_{HV} ）の多連Aの1次固有周期（ T_{HV} ）に対する比を図-5に示す。図より、多連Bは多連Aとほぼ同じ値を示しており、また単独Aでは多連Aに対し-2%～+6%程度の変動が、単独Bでは+1%～+13%程度の変動が見られ、単独耐震壁を重ね合せて評価する方法は1次固有周期をやや長めに評価する傾向にあることが理解される。一方、ブレース置換法等の実用的剛性評価法でも、Type N-4を除き多連Aに対して1割以内の誤差で架構の1次固有周期を評価できることがわかる。

5-2 各耐震壁の水平剛性

架構内の個々の耐震壁の水平剛性がそれぞれ適確に評価されているかを検討するため、静的水平荷重時の耐震壁の層間変位と負担せん断力の関係から耐震壁のD値（常用値⁹⁾で表わし、標準剛度 $K = 1.0^3 \text{ cm}^3$ とする）を求め、その逆数（単位負担せん断力あたりの変形量を表わす）を1スパン耐震壁について比較検討した。図-6は各耐震壁の多連Aの場合のD値の逆数（ $1/D$ ）に対するその他の評価法の場合（ $1/D'$ ）の比の例を示している。図より、単独Bの場合に特に下層部の耐震壁の水平剛性が1～2割過小評価されていることがわかる。また、ブレース置換法や線材置換法では多連Aに対しほぼ2割以内の誤差範囲で水平剛性を評価できているが、Type N-3などの3連スパン耐震壁を含む架構においては慣用ブレース置換法や線材置換法では個々の耐震壁の水平剛性の精度は高さ方向にかなりばらつくことがわかる。Type L, M, Nの残りの架構はそれぞれType L-1, M-1, N-3とほぼ同様な傾向が見られた。図-6(a)には武藤博士の略算法¹⁰⁾の結果も合せて示しているが、上層の行くにつれ略算法の値が大きくなる傾向が見られる。これは壁に加わる外力の相違（略算法は等分布外力）によるもので、別に行った等分布外力による多連Aの結果との比較（図中の点線）では逆の傾向であった。

次に、各耐震壁の変形を文献1)に示した方法によ

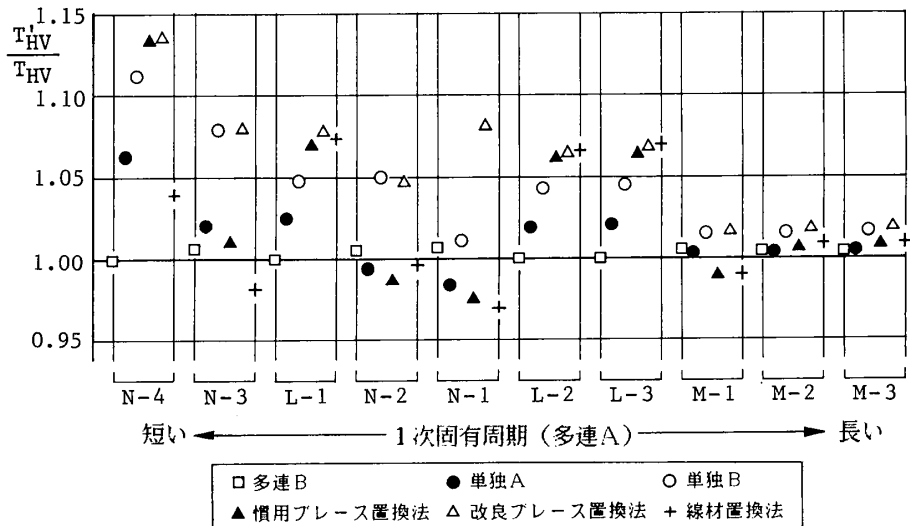


図-5 1次固有周期の比較 (Case HV)

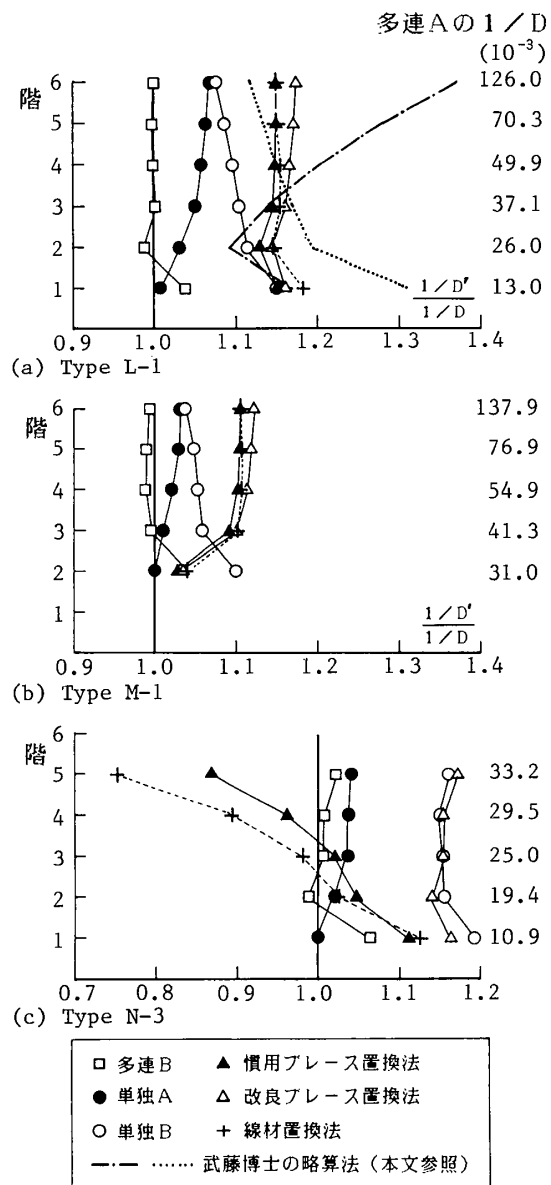


図-6 各階耐震壁の水平剛性の比較

り、せん断変形、曲げ変形および剛体回転（それぞれ添字 S, B, R を用いる）に分離して各変形による D 値を求め、各種剛性評価法の多連 A に対する誤差の割合をそれぞれの変形ごとに分離し、 ε_S , ε_B , ε_R とする。例えば、 ε_S は次式で表される。

$$\varepsilon_S = \frac{1/D_S - 1/D'_S}{1/D}$$

ここで、 D , D_S , D'_S = 多連 A の場合の耐震壁の全変形、せん断変形、およびその他の評価法の場合のせん断変形による D 値
これらの値を図-6 に示した 3 架構の実用的剛性評価法の場合について図-7 に示す。図より、下層部ではせん断変形の誤差が大きく上層部では剛体回転の誤差が大きいことがわかる。

5-3 部材応力

静的水平荷重時の柱・はりおよび耐震壁の部材応力について検討した結果、耐震壁の剛性マトリックスを用いる場合にはどの方法も大差なかった。また、慣用ブレース置換法や線材置換法でも概ね良い精度で部材応力が求められていたが、連スパン耐震壁を含む架構などで一部精度の低下が見られた。また改良ブレース置換法では、Type L, M で改良の効果が見られたが、Type N では 3 連スパン耐震壁近辺の柱・はり部材の応力に最大約 2 倍の誤差見られた。これは外側スパンの耐震壁の外力状態が改良ブレース置換法の置換骨組のはりの曲げ剛性を決定する際に用いた逆対称な外力と大きく異なるためであろう。

6. まとめ

鉄筋コンクリート造架構内に配置された連層連スパン耐震壁の各種剛性評価法の精度を 6 層架構をモデルとして検討した結果をまとめると、

(1) 単独耐震壁の剛性マトリックスを重ね合せて多連耐震壁の剛性を評価した場合には、架構の水平剛性をやや過小評価することになる。(2) ブレース置換法や線材置換法などの実用的剛性評価法では架構の 1 次固有周期はほぼ 1 割以内の誤差で評価できるが、個々の耐震壁の水平剛性の精度は特に連スパン耐震壁を含む架構で高さ方向にばらつきが見られる。

謝辞：耐震壁の剛性マトリックスに関して九州大学教授富井政英博士および山川哲雄助手に御教示いただきました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 吉村, 菊池: 「中低層 RC 架構に組み込まれた非連層耐震壁の実用的剛性評価法に関する基礎的研究」日本建築学会論文報告集, 第 317 号, 昭 57. 7
- 2) 菊池, 吉村: 「RC 造架構に組み込まれた耐震壁のせん断力分布係数の実用算定法に関する研究 (その 3)」日本建築学会中国・九州支部合同研究報告集, 第 6 号, 昭 59. 3
- 3) 富井, 山川: 「多連耐震壁の剛性マトリックス」日本鋼構造協会第 17 回大会マトリックス解析法研究発表論文集, 昭 58. 7
- 4) 山川, 富井: 「耐震壁の剛性マトリックス (続) - 床スラブを考慮した場合 その 1, その 2 -」日本建築学会中国・九州支部合同研究報告集, 第 6 号, 昭 59. 3
- 5) 富井, 山川: "Relations between the Nodal External Forces and the Nodal Displacements on the Boundary Frames of Rectangular Elastic Framed Shear Walls," Parts I~V, 日本建築学会論文報告集, 第 237 ~ 241 号, 昭 50. 11 ~ 51. 3
- 6) 成岡, 服部他: 「骨組構造解析」コンピュータによる構造工学講座 II-1-B, 培風館, 昭 46. 6, PP. 101 ~ 109
- 7) 井上, 富井: 「慣用ブレース置換法の改良に関する研究」日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭 57. 10
- 8) 富井: 「鉄筋コンクリート板のせん断抵抗に関する研究」東京大学生産技術研究所報告, 第 6 巻, 第 3 号, 昭 32. 1
- 9) 武藤: 「耐震計算法」丸善, 第 2 版, 昭 49. 2, P. 281
- 10) 武藤: 「耐震計算法」丸善, 第 2 版, 昭 49. 2, PP. 241 ~ 248

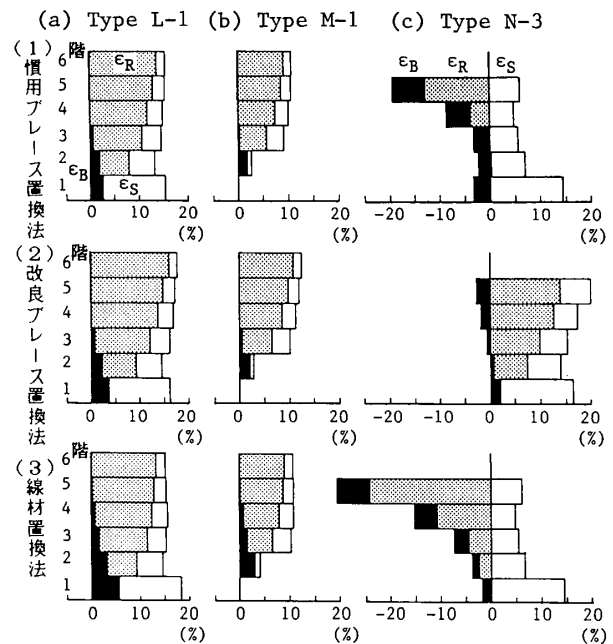


図-7 せん断、曲げ変形および剛体回転に対する剛性評価の誤差