構造設計のための
メモランダム
5

耐震壁の
モデル化の方法とその比較

RC造やSRC造の建物には，耐震性能の確保に有効であることから，耐震壁が採用されることが多い。また最近は，S造の高層ビルに，鋼板耐震壁がしばしば使われている。

このような耐震壁が組み込まれたラーメン架構――線材と面材を有する架構――の応力や変形を解析する場合には，その解析法として，面材を面材のまま扱う有限要素法のような解法を採用するのが，本来望ましいわけであるが，解析コストがかさむため，面材を線材にモデル化して解析しているのが一般的である。

今回は，いくつかの耐震壁のモデル化の方法をとりあげて，それらの解の精度を検討し，各方法の長所・短所を比較してみたい。ここでは，応力解析をコンピュータで行なうという前提で話を進めてゆく。

■ 耐震壁のモデル化の方法

図1に，代表的な耐震壁のモデル化の方法を示した。各方法の考え方を図の順に説明する。

壁のエレメント法：この方法は，「ビル建築構造計算システム BUILDING RC/SRC/S*」に採用されている方法で，壁を長方形断面の壁柱とし，その上下端に水平な剛域を4つ設けて，柱とはりの節点へピンで結合する。剛域を設けたことにより，耐震壁の平面保持の仮定がとり込まれるわけである。この場合，剛域の端部をピンにしたため，壁があることによる節点回転の拘束効果が無視されるので，壁内のはりの剛性を階高分の成を持つ壁ばりの剛性に引き上げることで，拘束効果が考慮される。この方法は，柱とはりで構成されるグリッドの中に新規の部材を追加する方法であるから，本来のグリッドを変更する必要がなく，実際の建物を階名と通り名で入出力できる利点がある。また，新規に追加される部材のモデル化もプログラムによつて自動的に行なえるので，コンピュータ向きの方法であるといえる。

線材置換法：耐震壁とその付帯柱を一体の柱と見なし，はりの端部に壁幅分の剛域を設けて耐震壁の平面保持の仮定をとり入れる方法である。先回とりあげた例題のモデル化はこの方法によつている。この方法は，考え方が明快で分りやすいが，耐震壁の軸心が柱とはりのグリッドからずれるため，架構が変わるたびにグリッドを変えねばならず，建物を全体として解析しようとする場合には，かなり面倒な準備作業が必要になる。プログラムによつてモデル化を自動的に行なうことは，この方法では期待できない。

ブレース置換法：耐震壁をそれと等価なせん断剛性を持つブ

* ㈱日建設計が開発したプログラムで，データセンター3社を通じて一般に公開されている。

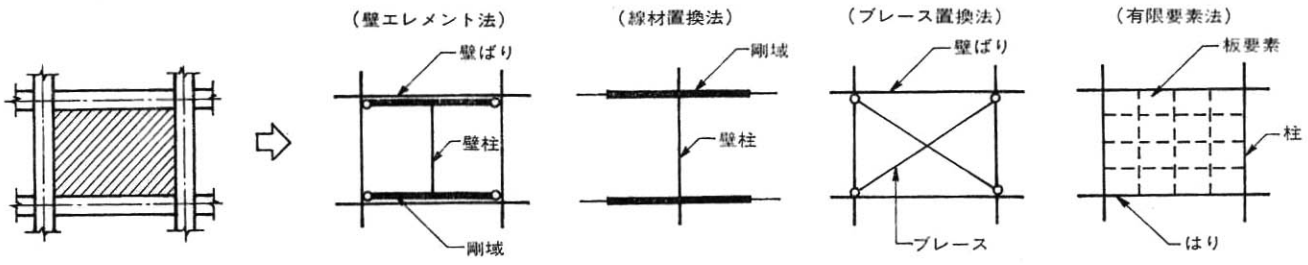


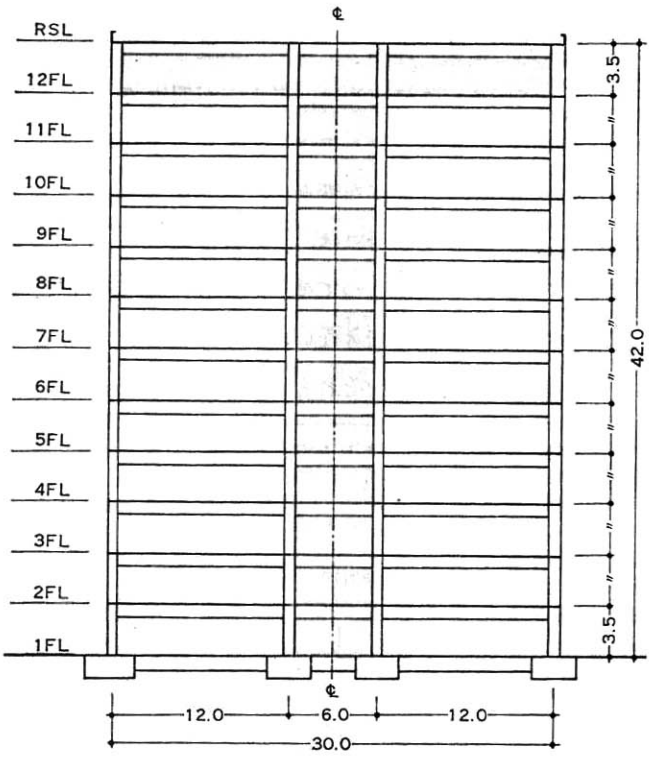
図 1　代表的な耐震壁のモデル化の方法

レースに置き換える方法である。この場合，耐震壁のウエブ部分（図の斜線部分）の曲げ剛性が無視されるので，ブレースの両側の柱の断面積を，等価な曲げ剛性となるように修正しなくてはならない。また，耐震壁の平面保持の仮定と，柱とはりの節点の回転が壁によつて拘束される効果が無視されるので，これを補正する意味で，はりの剛性を100倍程度に引き上げる。図中のモデルでは，柱頭と柱脚がピンとなつているが，剛接とすることもある。この方法も，壁エレメント法と同じ理由でコンピュータ向きの方法といえる。

有限要素法：壁を平面要素に分割し，耐震壁を連続体として扱う方法で，要素の分割数にもよるが，現状では最も精度の高い解が得られる。この方法による場合，柱とはりは線材として扱い，壁だけに有限要素法を適用する方法とすべてに有限要素法を適用する方法がある。後者のほうが精度がよいことはいうまでもないが，計算時間は長くなる。この方法は，入力方法や要素分割の自動化については，コンピュータ向きであるが，解が応力度で得られるので，これを現状の断面検討の体系とどう結びつけるかが大きな問題である。ここでは，他のモデル化の方法との精度比較のために，この方法を使うが，柱とはりは線材として扱う。

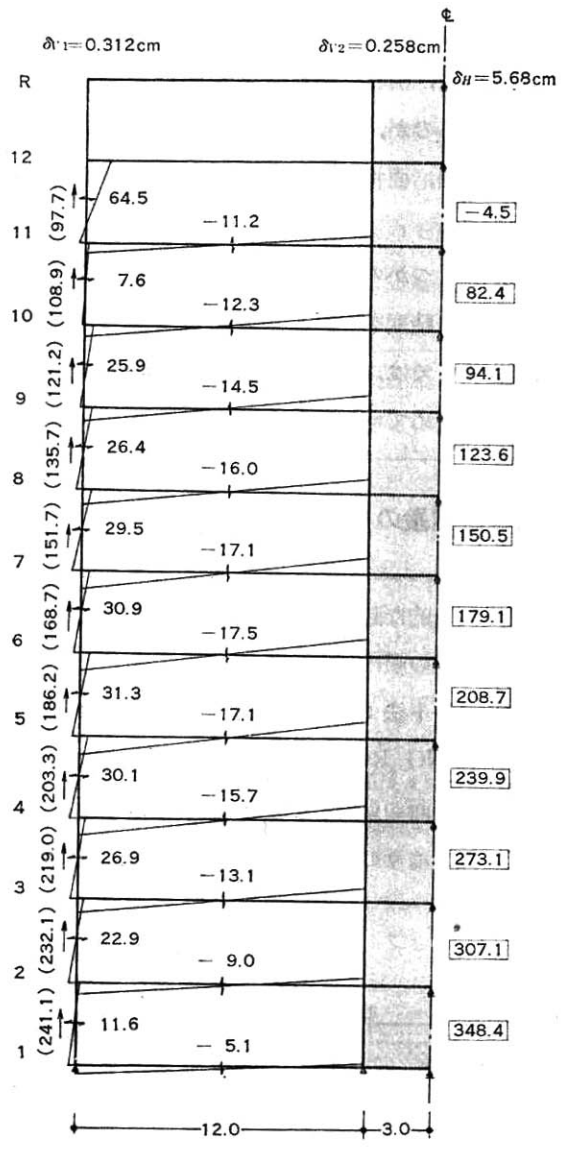
■ 例題による精度の比較

耐震壁のモデル化のための各方法について，解の精度を比較してみよう。図2は精度検討用の架構を示しており，左右対称なので，応力解析は左半分について行なう。各方法ごとの架構のモデル図は省略したが，図3以下の応力図から推察し



注）柱はすべて1m×1mの正方形断面
一般階のはりはすべて45cm×1mの直方形断面
基礎ばりは50cm×1.2mの直方形断面
耐震壁はすべて30cmの厚さとする。
荷重として各階に60t の水平力を与える。

図 2　解の精度検討用の架構



□ 内の数値は耐震壁のせん断力，カツコ内は柱軸力，その他の数値は柱・はりのせん断力を示す。
このモデルの未知数は79元である。

図 3　壁エレメント法による応力図

ていただきたい。

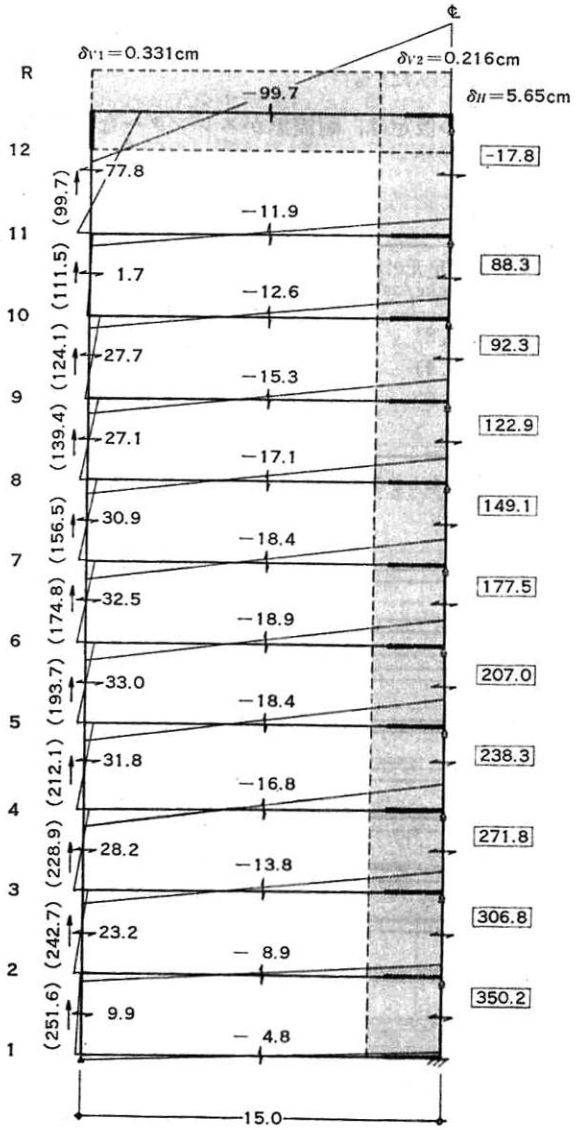
各方法による解析結果を図3～図6に示す。柱・はりの曲げモーメントの値は記入していないが，モーメント図は正確に表示してある。

これらの結果をまとめてみると，変形については（表1），頂部の水平変位は各方法ともほとんど同じであるが，耐震壁の付帯柱の頂部の鉛直変位は線材置換法の値が他の値より小さめになつている。

耐震壁のせん断力（応力図）は，水平力の大部分を耐震壁が受け持つためもあつてほとんど差がない。また耐震壁の転倒モーメントに相当する足元の柱軸方向応力度（表2）も，2％以下の誤差におさまつている。

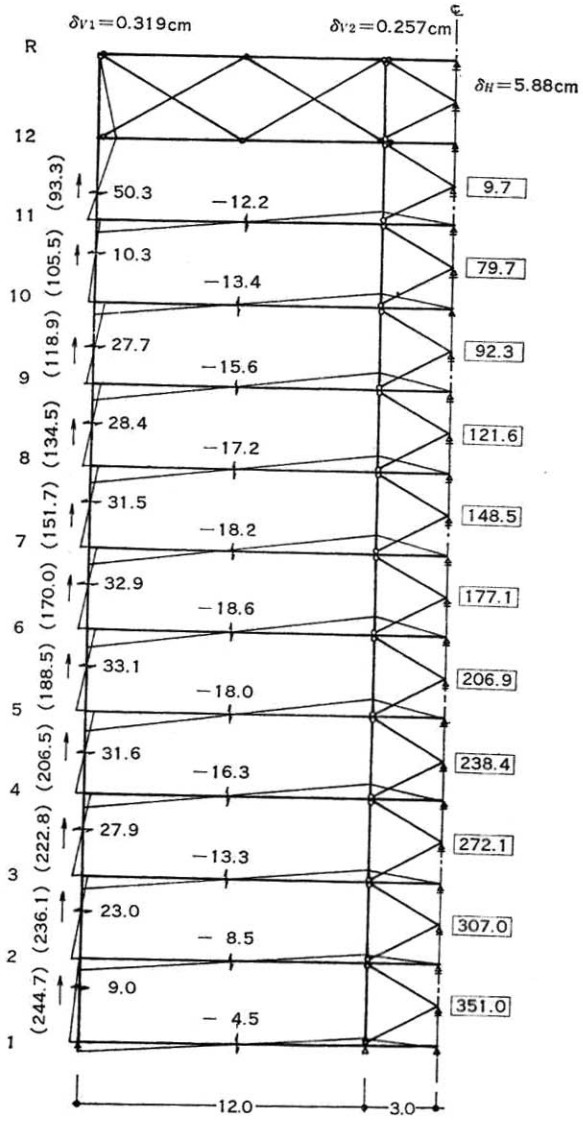
境界ばりのせん断力は，有限要素法の値に対して各方法とも10％内外にばらついているが，その合計値を示す外柱の1階の軸方向力(表2)を見ると，差は3％以下におさまつている。また，最上層の壁ばりのせん断力（表2）はブレース置換法で7％，他は3％以下と良い近似を与えている。

全体として，図2のような整つた形状の連層耐震壁の場合には，どのようなモデル化によつても解の差は少なく，簡便な方法のほうが実際的であるといえよう。



□内の数値は耐震壁のせん断力，カツコ内は柱軸力，その他の数値は柱・はりのせん断力を示す。
このモデルの未知数は45元である。

図 4　線材置換法による応力図



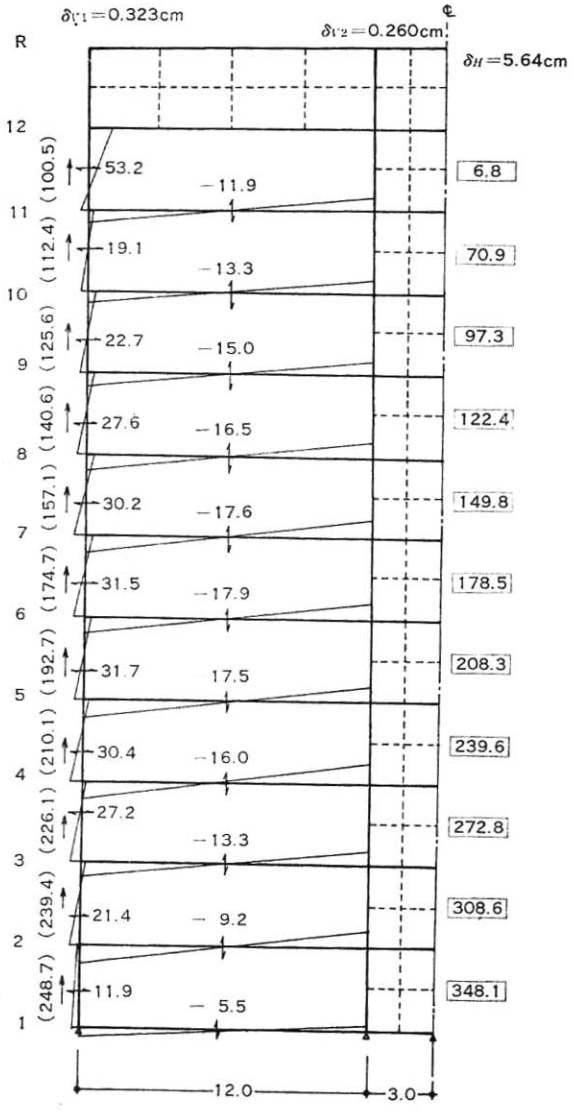
□内の数値は耐震壁のせん断力，カツコ内は柱・ブレースの軸力，その他の数値は柱・はりのせん断力を示す。
このモデルの未知数は84元である。

図 5　ブレース置換法による応力図

表 1：変形の比較

	頂部水平変位 δ_H(cm)	外柱頂部鉛直変位 δ_{V1}(cm)	壁側柱頂部鉛直変位 δ_{V2}(cm)
壁エレメント法	5.68 (100.7)	0.312 (96.6)	0.258 (99.2)
線材置換法	5.65 (100.2)	0.331 (102.5)	0.216 (83.1)
ブレース置換法	5.88 (104.3)	0.319 (98.8)	0.257 (98.8)
有限要素法	5.64 (100)	0.323 (100)	0.260 (100)

注）カッコ内は有限要素法を100としたときの比を示す。



□ 内の数値は耐震壁のせん断力，カッコ内は柱軸力，その他の数値は柱・はりのせん断力を示す。
このモデルの未知数は540元である。
この計算に用いる有限要素は四角形の各辺の中間にも節点を持つ高い精度の要素であり，一つの四角要素は通常の三角形要素8個分以上の性能をもつ。

図 6　有限要素法による応力図

■ 各方法の適用上の問題点

各方法を比較するためには，3つの視点――解の精度，データ入力の容易さ，アウトプットの使いやすさ――から検討する必要がある。

まず解の精度であるが，精度が確保できるか否かは実際の構造物に生じると考えられる変形状態を，そのモデル化によつて表わしうるかどうかによつて決まる。いいかえれば，うまく表わせないような架構に対しては，その方法の適用をあきらめるか，何らかの補正が必要になるわけである。ここで耐震壁に生じると考えられる変形状態に目を向けて，各方法の適用の仕方を考えてみたい。

耐震壁の平面保持の仮定は，耐震壁がスレンダーな場合には

表 2：柱・はりの応力の比較

	耐震壁の1階足元の柱軸方向応力度(kg/cm²)	最上階の壁ばりのせん断力(t)	1階の外柱の軸力(t)
壁エレメント法	127 (100.8)	97.7 (97.2)	241.1 (96.9)
線材置換法	124 (98.4)	99.7 (99.2)	251.6 (101.2)
ブレース置換法	128 (101.6)	93.3 (92.8)	244.7 (98.4)
有限要素法	126 (100)	100.5(100)	248.7 (100)

注）カッコ内は有限要素法を100としたときの比を示す。

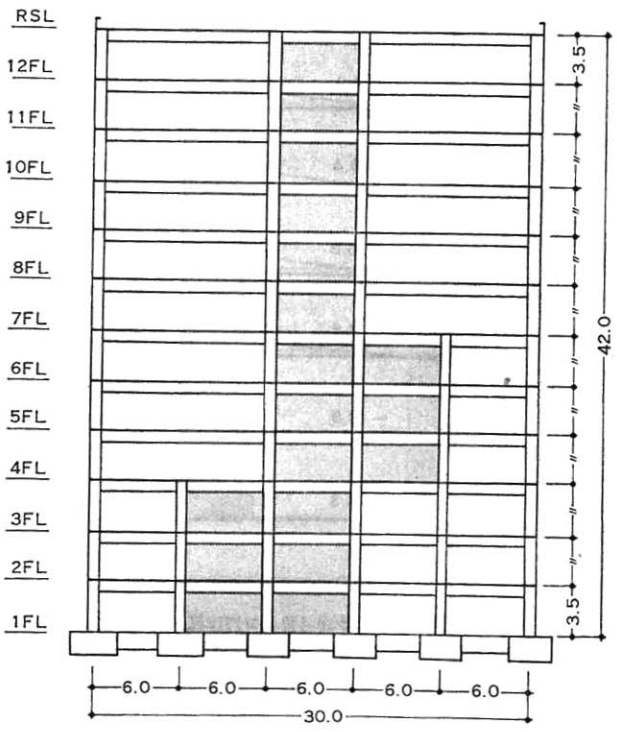
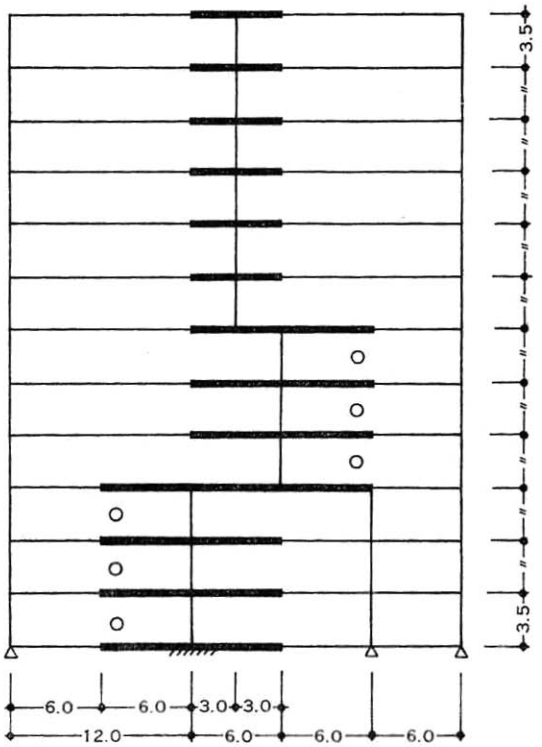


図 7　壁の配置が乱れた架構A

成立すると考えて良いと思われるが，数スパンにわたつて水平に連続するような耐震壁では成立しないと考えるほうが妥当である。図7のような架構を図8のように線材置換法でモデル化した場合の誤差は，有限要素法に比べて，頂部の水平変位で−27%，境界ばりのせん断力では+30〜−50%にも達したという検討例がある。この誤差は，左右に張り出した壁がせん断変形するはずなのに，剛域であると考え，剛性を高く評価しすぎたために生じたものである。同じ架構を解析した場合，どの壁もせん断変形する壁エレメント法とブレース置換法では，有限要素法の解の10%以下の値におさまつており，図2の例も合わせて考えると，耐震壁の平面保持の仮定に関しては，かなり複雑な架構でも問題はなさそうである。壁による節点の回転の拘束効果については，線材置換法が最も現実に近いモデル化であろう。壁エレメント法とブレース置換法は，この点に関しては，はりの剛性の倍率に明快な根拠がないという意味で，若干のいい加減さを残しているが，現実には耐震壁が境界ばりの曲げモーメントによつて「こじられる」ので完全に剛ではないことと，誤差の検討結果から判断すれば，妥当性を持つた方法だといえよう。



（○印の部分の壁のせん断変形が剛域によつて無視されるため，解の誤差が非常に大きい）

図 8　架構Aの線材置換法による解析モデル

耐震壁そのものの剛性の表わし方についてはどうだろうか。耐震壁の剛性には，曲げ剛性・せん断剛性・軸方向剛性があるから，耐震壁のモデル化にさいしては，それらが正しく表わされなければならない。線材置換法と壁エレメント法は，この点については問題がない。しかし，ブレース置換法の場合は，せん断剛性と曲げ剛性は表現できるが軸方向の剛性を表わすことができない。できないという意味は，ブレースはせん断剛性を，柱は曲げ剛性を表わすために使われるので，軸方向剛性を補正する手だてがないということである。図2の例のように，左右対称の架構の中央に耐震壁があり，耐震壁自身には軸力が生じない場合や，柱とブレースの軸方向に関する剛性の和がもとの耐震壁のそれとたまたま一致する場合は問題ないが，図9のように耐震壁が軸力によつて伸縮する架構については，柱とブレースからなる軸方向の剛性が適正な値となつているかどうか，また解の精度への影響についての検討が必要になる。

次に，データ入力の容易さであるが，ビル建築の場合は構造体の節点が実際の設計図に表示されている階名と通り名で入力でき，柱やはりはその寸法で，壁はその厚さで入力できることが望ましい。また，部材の剛性の算出や耐震壁のモデル化がプログラムによつて自動的に行なわれれば，入力データの作成に要するエネルギーが大幅に短縮される。このような理由から，壁エレメント法とブレース置換法は優れた方法であり，線材置換法につきものの節点番号という架空の概念から解放される。

（境界ばりのせん断力が耐震壁の軸力になり，下層へゆくほど軸力が大きくなる。
耐震壁の軸力による伸縮を無視すると，考慮した場合に比べて，境界ばりの応力が大きくなる。この傾向は耐震壁の鉛直変位量の大きな上層ほど顕著になる。）

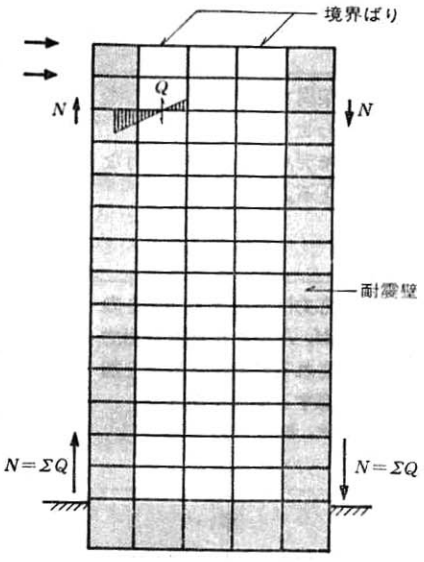


図 9　耐震壁に大きな軸力が生じる架構の例

最後に，アウトプットは見やすく，現状の断面検討の体系とつながつた形，つまり応力度でなく応力（N, M, Q）で表示されるほうが便利である。この点で有限要素法は問題があるといえる。

耐震壁のモデル化の方法とそれらを適用するさいの問題点について述べてきたが，架構の解析にあたつては，与えられた方法をうのみにせず，表3に示した各種のモデル化の持つている長所・短所と実際の建物が持つている性質とを照らし合わせて，適切なモデル化の方法を選ぶべきであろう。

（筆者の方々・㈱日建設計構造設計主管　堀井昌博，同技術主査　和田　章）

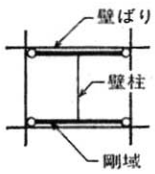
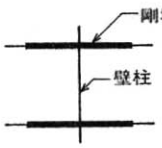
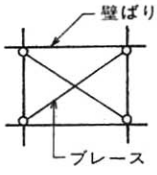
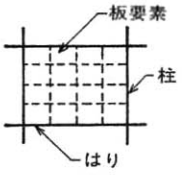
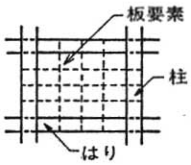
参考文献

1）I.A. Maclecod, H.M. Hosny ; "FRAME ANALYSIS OF SHEAR WALL CORES", ASCE. OCT. (1977)

2）須藤，青柳，堀井，和田，小山；"ビル構造処理システム BUILDING RC/SRC/S（その2耐震壁のモデル化)"，日本建築学会昭和51年大会号

3）須藤福三；"汎用骨組構造解析システム用耐震壁モデルについて—長方形壁の剛性マトリックス誘導と検討—"，日本建築学会電算シンポジウム第2回（1980. 3）

表3：耐震壁のモデル化のための各種の方法の比較

	壁エレメント法	線材置換法	ブレース置換法	有限要素法1	有限要素法2
モデル化の方法と考え方	 耐震壁を壁柱に置換し，その上下端に剛域を設けて柱・はりの節点へピンで結合する。	 耐震壁とその付帯柱を一体の柱とみなし，はりの端部に壁幅分の剛域を設ける。	 耐震壁をせん断剛性が等価なブレースに置換する。曲げ剛性は柱の断面積で調整する。	 耐震壁を板要素に分割し，連続体として扱う。柱とはりは線材として扱う。	 柱・はり・耐震壁をすべて有限要素法で扱う。
精度と適用範囲	有限要素法1に近い精度が得られる。	**耐震壁が不規則に配置されるとき，剛域の考え方が難しく，精度が悪い。**	精度は壁エレメント法と同等。 **耐震壁に軸力が発生するような架構の場合は精度の検討が必要。**	分割数を増すことにより精解が得られる。	有限要素法1より精度が高い。
インプット	架構を通り名と階名で表わせる。 モデル化が自動的に行なえる。	**架構を通り名，階名で表わせない。** **モデル化と断面性能の計算の自動化は無理**	架構を通り名と階名で表わせる。 架構によつてはモデル化の自動化は可能であるが原則として手計算によつて求め，インプットする。	架構を通り名と階名で表わせる。 有限要素の分割法を固定すればモデル化の自動化は可能。	架構を通り名と階名で表わせる。モデル化の自動化については有限要素法1と同じであるが，**壁がない部分の柱・はりも分割する必要がある。**
アウトプット	**応力は壁柱と付帯柱の M, N, Q が別々に出力されるので，これらを加算する必要がある。**	応力は壁と付帯柱を一体とした M, N, Q によつて得られ，架構の性質をつかみやすい。	応力はブレースと柱の軸力で得られる。これらの**軸力から耐震壁の M, N, Q を求める必要がある。**	壁の応力は σ_x, σ_y, τ_{xy} で得られ，柱・はりの応力は M, N, Q で得られる。**耐震壁については現行の断面検討の体系と合わない。**	応力はすべて σ_x, σ_y, τ_{xy} で得られる。 これらの応力は**現行の断面検討の体系と合わない。**
計算時間	早い	非常に早い	早い	遅い	非常に遅い