構造設計のための
メモランダム
1

耐震壁に生じる逆せん断力

■ 耐震壁の上部に生じる逆せん断力

ビル建築では，純ラーメン架構に耐震壁やブレースなどの耐震要素を組み込んだ構造形式が，多くの建物に採用されている。これは，地震時の耐力を確保するうえで，また層間変位を押えるうえで，耐震要素が大いに有効だからである。

このような建物に地震力が作用すると，**図1**のように，耐震要素の上部に，地震力の向きと反対のせん断力，つまり逆せん断力が生じることがある。このような現象は，純ラーメン架構の層間変位が上層部ほど少なくなるのに対して，曲げ変形の大きな耐震要素では上層部ほど層間変位が大きくなるので，ラーメン架構が耐震壁を引き戻そうとする結果生じる現象である。

耐震要素が曲がりにくい場合，すなわち耐震要素が幅広くずんぐりしている場合には，逆せん断力は生じないが，耐震要素が或る程度以上スレンダーになると逆せん断力が発生する。また，耐震要素の足元が回転しやすい場合，例えば，くいが長くて伸縮しやすい場合にも，**図2**のように逆せん断力が生じる。いずれにしても，どの程度の逆せん断力が生じるかは，ラーメン架構の剛性と足元の固定度も含めた耐震要素の剛性の比率やそれぞれの曲げ変形とせん断変形の比率によつて決まることになる。

逆せん断力が感覚的になじみにくいためか，逆せん断力が生じる上層の耐震壁を取り去つたらという話を耳にすることがあるが，動的にみると剛性急減のためにホイツピング現象

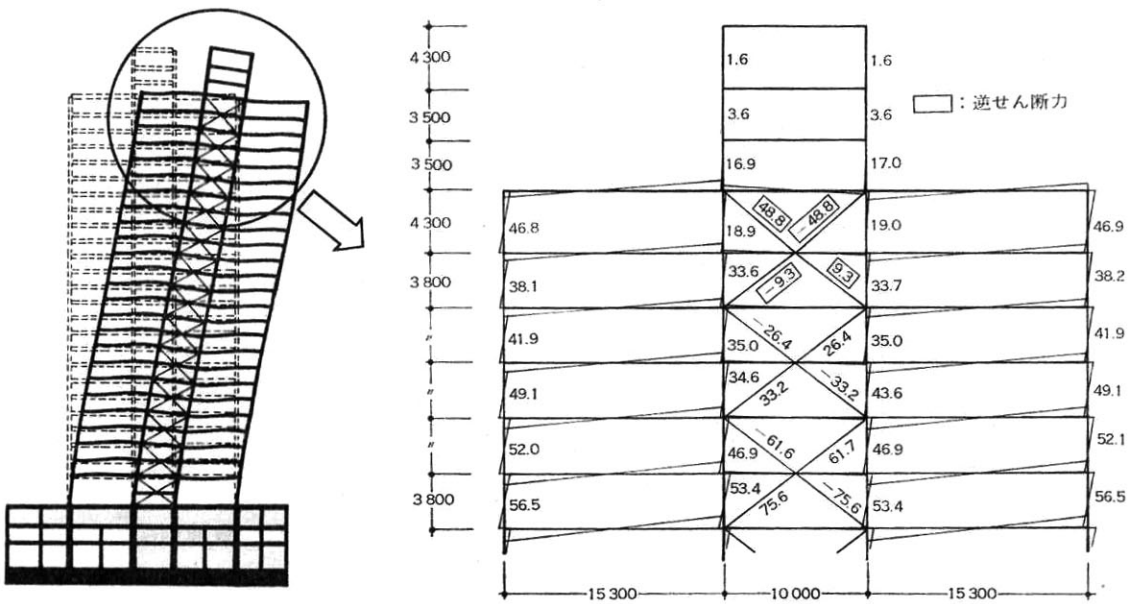

図1　耐震要素の上部に生じる逆せん断力（数字は柱のせん断力，ブレースの軸力を示す）

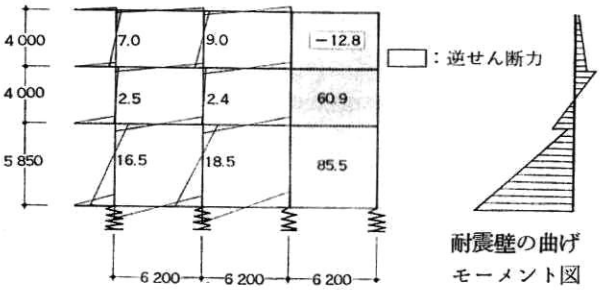

図 2　基礎が鉛直方向に伸縮しやすい場合に生じる耐震壁の逆せん断力の実例（数字は柱と耐震壁のせん断力を示す）

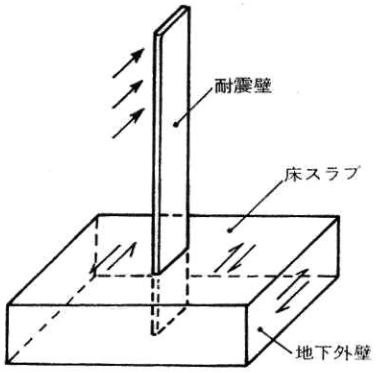

図 3　くぎ刺しタイプの耐震壁の例

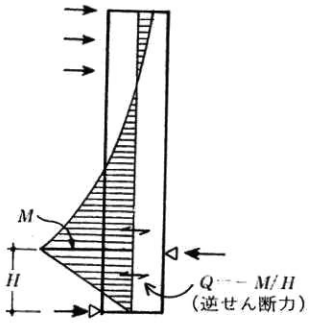

図 4　くぎ刺し耐震壁の応力（模式図）

（ムチ振り現象）を起こし，かえつて大きな水平力が作用することになつて，好ましくない結果を招くことになる。逆せん断力現象によつて上層の柱やはりが余分に負担した応力は，下層の柱・はりでは減つているはずで，けつして損することはない。むしろ，上層と下層の柱・はりの応力の差が少なくなつて部材設計がしやすくなり，高さ方向の剛性分布がなめらかになつて動的な応答性状を良くすることになる。

一般に，連層の耐震要素は，或る層に生じた挙動をその上下の層に分散するという心棒的な働きをする。設計外力以上の地震力が作用するような場合，心棒のない純ラーメン架構では特定の層の変形が特に進行することがあるが，心棒を持つ建物では特定の層に変形が集中する度合が薄くなる。これは，耐震要素の心棒的な働きによつて，上下層の部材が地震エネルギーの吸収に協力するためである。

■　耐震壁の下部に生じる逆せん断力

逆せん断力は，耐震要素の足元にも生じることがある。**図3**はその例で，連層の耐震壁が，床スラブと地下外壁で囲まれた箱の中へくぎ刺しになつており，地下外壁の剛性が大きいので上下のスラブはずれにくく，これが耐震壁の足元の回転を拘束することになる。

図4は，このときの応力状態を模式的に示したもので，上下のスラブがテコの支点として働き，耐震壁の地下部分に逆せん断力が生じる。この図では，上の支点の上下で耐震壁のモーメントが釣り合つているように画いてあるが，実際にはその左右の境界ばりのモーメントを含めて釣り合うことになるし，下の支点では境界ばりや基礎の鉛直バネの剛性に応じて耐震壁のモーメントは変動する。また，上のスラブの支点は現実には弾性支点で，その水平変位は，地下外壁の層間変位にスラブの面内力による変位を加えたものになる。

図5は，くぎ刺し耐震壁の足元周辺の応力を示したもので，実際の設計例である。

くぎ刺しタイプの耐震壁では，地下部分が逆せん断力に伴う曲げモーメントで曲がり，上のスラブが水平に変位するために，耐震壁の足元が回転し，地上の耐震壁のせん断力分担率が低下する。しかしながら，この分担率の低下はそれほど大きなものではなく，足元の固定度が充分な耐震壁では水平力が集中しすぎるのを適度に緩和してくれる程度である。

地下のある建物では，この例のようなくぎ刺しタイプの耐震壁がしばしば採用されている。この場合に注意すべき点は，逆せん断力が生じる地下の耐震壁の厚さと，箱を形成する床スラブの厚さである。

一般に，地下の逆せん断力は非常に大きくなるので，地下部分の耐震壁はそれなりの厚さを確保する必要がある。くぎ刺しタイプの耐震壁の足元に逆せん断力が生じることを忘れ，地下外壁の厚さが充分あれば安全であると考えるのはむしろ逆で，箱を剛くするほど逆せん断力は大きくなるから，地下のくぎ刺し耐震壁にとつては危険側になる。

くぎ刺しタイプの耐震壁を有効に活用しようとする場合は，地下の箱が壊れないことが前提であるから，上下のスラブはせん断力を伝えるのに充分な強さ（厚さ）が必要で，大型のビルでは，ときに厚さが30cmを超えることがある。

図6のように，耐震壁の足元が連続した壁で固められている

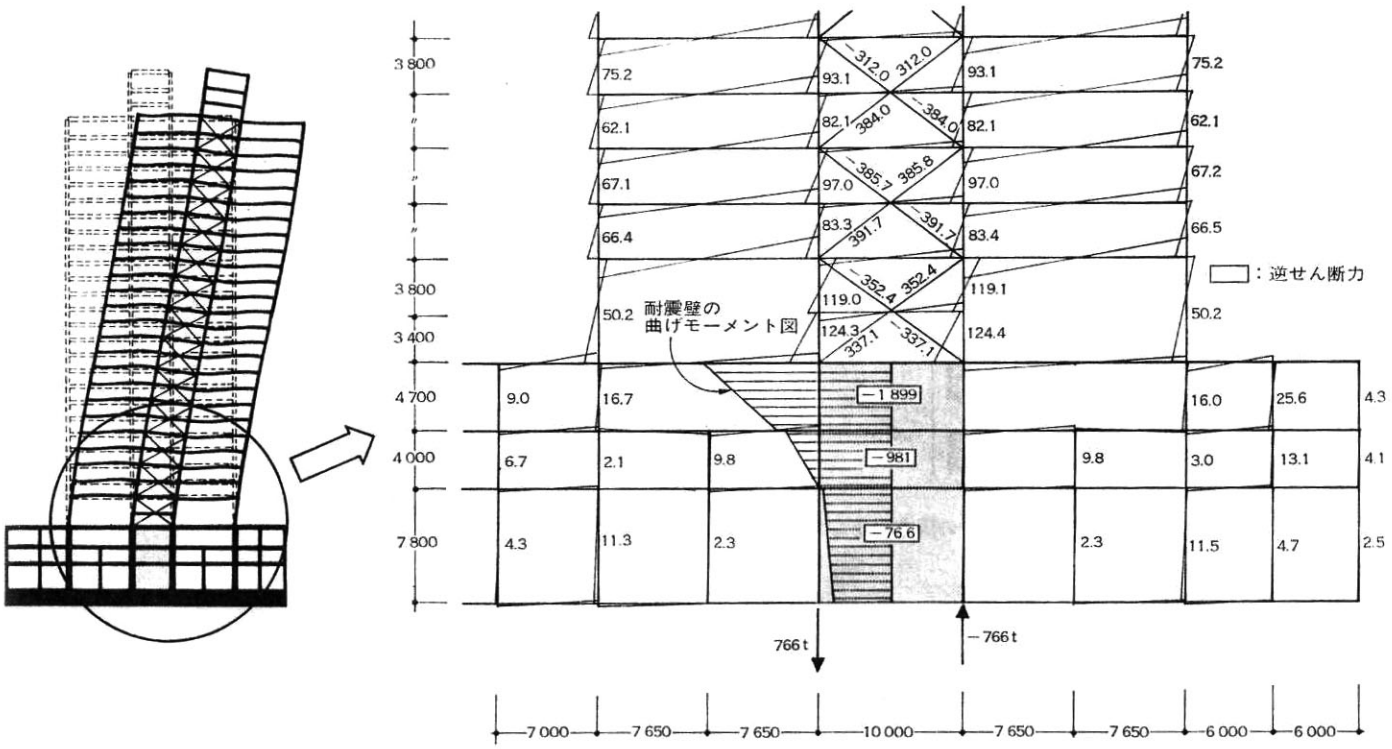

図 5　くぎ刺しタイプの耐震要素の足元に生じる逆せん断力（数字は柱のせん断力，ブレースの軸力，地下階耐震壁のせん断力を示す）

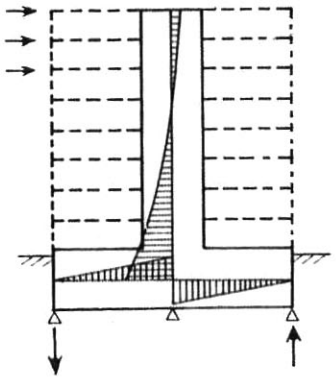

図 6　足元を壁で固めた耐震壁とその応力(模式図)

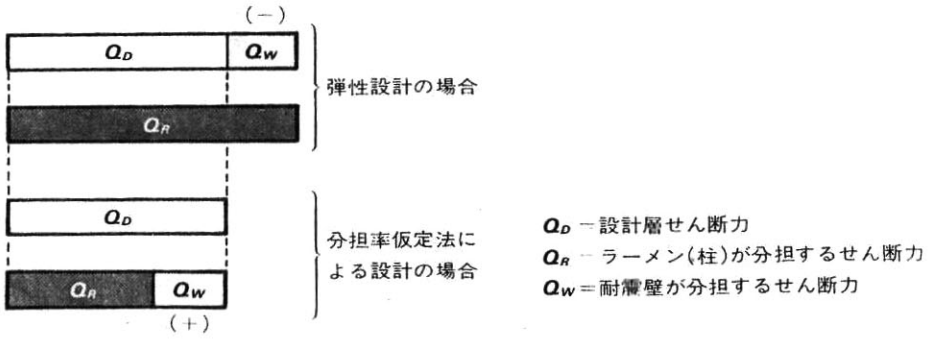

図 7　耐震壁に逆せん断力が生じる層での，設計法によるラーメンの分担せん断力の違い

場合には，せん断力は壁を介して直接地盤へ流れ，転倒モーメントは連続壁の腕を介して軸力になつて基礎へ流れてゆく。つまり，耐震壁の応力は同じ平面内を伝わつてゆく。これに対し，くぎ刺しタイプの耐震壁では，別の平面にあるスラブと地下外壁を，回りまわつて応力が伝わつていくことになる。両者の力のメカニズムが基本的に違うという認識が必要であろう。

■ 逆せん断力による見かけの層せん断力の増加

耐震壁に逆せん断力が生じる層の層せん断力の分配について考えてみよう。

まず，マトリックス変位法などの弾性理論で得られた応力に基づいて設計する弾性設計の場合には，図7のようにラーメン（柱）が負担するせん断力と壁の逆せん断力の和は，設計層せん断力 Q_D に等しく，逆せん断力が負の値なので，ラーメンの負担するせん断力は設計層せん断力より大きくなる。つまり，ラーメンに注目する限りでは，耐震壁のない純ラーメンの場合より，ラーメンの応力が大きくなることになり，設計層せん断力が増すのと同様な結果になる。先の逆せん断力が生じる耐震壁を取り去る話はこの辺の事情からきているわけである。

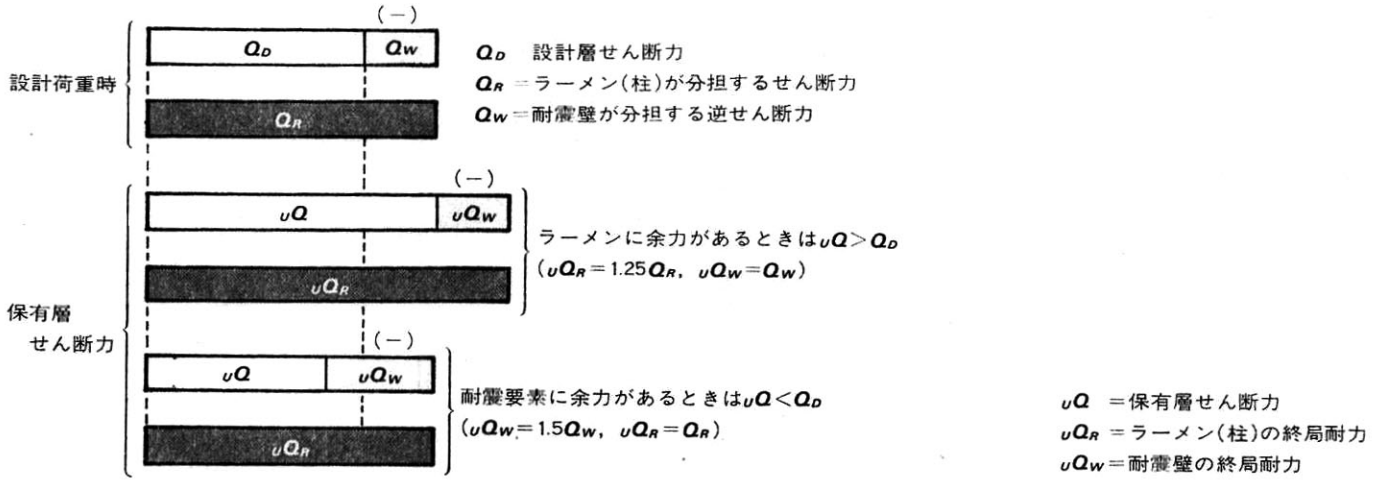

図 8　耐震壁に逆せん断力が生じる層での保有層せん断力の矛盾（耐震要素に余力があると保有層せん断力は設計層せん断力より小さくなる？）

次に，一般的に行なわれている仮定法，つまり柱や耐震壁のせん断力の分担率を適当に決める方法で設計する場合である。一般の分担率仮定法では，耐震壁に逆せん断力が考慮されることはまずないといつてよく，分担係数はすべて正の値である。この場合は，図7のようにラーメンが負担するせん断力は設計せん断力より小さくなる。弾性設計用の応力が実際に生じる応力に近いものとすれば，分担率仮定法によるラーメンのせん断力はかなり小さく評価されることになり，柱・はりは危険側に設計されることになる。

逆せん断力が発生する上層にかぎらず，下層についても一般的な仮定法による設計では注意が必要である。全せん断力の30％以上の耐力をラーメンに持たせるという行政指導があるためか，柱の分担せん断力を全せん断力の30％以上になるように耐震壁の分担率を割り振る仮定法がしばしば行なわれている。この方法では，足元の固定度が充分な耐震壁のせん断力を過小評価しがちである。いずれにしても，一般的な分担率仮定法で設計するさいには，幅を持つた設計が必要といえる。

■　逆せん断力が生じる場合の保有層せん断力

ここで，逆せん断力が発生する場合の，保有層せん断力の求め方について考えてみたい。

弾性設計により逆せん断力を考慮する場合で，耐震要素に余力がなくラーメンに余力があるときは，図8のように保有層せん断力が設計せん断力より大きくなるが，ラーメンに余力がなく耐震要素に余力があるときには，単純に逆せん断力を終局耐力に置き換えると，保有層せん断力が設計せん断力より小さくなるというおかしな結果になる。これは，設計荷重時の応力を単純に延長したためで，実際には部材が降伏して架構のモデルが変化しているので，応力も変化してしまつている。

耐震要素がある建物では，心棒の働きで上下層の影響度が大きく，外力分布によつて応力が変動しやすいので，外力分布を不動のものとすれば保有層せん断力を求めることはできるが，それは普遍的な唯一無二の解ではない。逆せん断力が生じる層の保有せん断力として，少なくともラーメンの終局耐力を用いても良いと考えられるが，耐震要素も含めた保有層せん断力については，建物のプロポーション，静的な応力分布，耐力性状などをながめつつ計算せざるを得ないのが現状であろう。

ラーメンと耐震要素の終局耐力の絶対値を単純に加えて保有層せん断力とする方法は，最終的な状態を想定し，或る層だけに着目するときには，無理がなさそうであるが，全層が同時に保有層せん断力になる状態を仮定すると，適用に二の足を踏まざるを得ない。

逆せん断力が生じる場合の保有層せん断力の計算方法は今後の課題の1つといえよう。

（筆者の方々・㈱日建設計構造設計主管　堀井昌博，同コンピューター部　和田　章）