和田 章
わ だ あきら
東京工業大学教授
建築物理研究センター長

制振構造の成立ち

1．はじめに

Sacrificeという単語がある。「生贄」という名詞であり、動詞でも使われる。昨年秋の ENR (Engineering News Records) の表紙に制振構造と数行の説明文が載せられたとき、使われていた単語である。制振ブレースの軸降伏によるエネルギー吸収が生贄となり、高層建築の構造体は大地震を受けても助かるという短文であった。

現行の耐震設計法は1981年６月に施行され、保有水平耐力の計算に関連して構造特性係数 D_s が決められた。耐震壁または筋違の多い建物ほど大きな D_s が課せられた。純ラーメン構造優遇策といってもよい。純ラーメン構造の場合に生贄となるのは鋼構造では梁端部のフランジ溶接部である。ノースリッジ地震でも兵庫県南部地震でも梁端部の塑性変形によるエネルギー吸収に過大な期待はできないことがはっきりした。仮に、この部分が期待通りに働いたとしても、梁は床荷重を支える重要な機能を持っており、その建物の地震後の再利用は保証されない。

学生時代に受けた講義では「マッチ箱は中箱を抜いたらグラグラになってしまう」と言われ、耐震壁の重要性が説かれた。井上一朗先生によると、兵庫県南部地震において梁端部に破断の生じた建物は40棟程度あり、ほとんどは筋違のない純ラーメン構造であったそうだ。鉄筋コンクリート構造の建物でも、耐震壁が大きな耐震効果を発揮したことが多く報告されている。明確な位置付けがされていたとはいえないが、筋違、耐震壁は耐震設計にとって一種の生贄である。

筋違の座屈による急激な耐力低下、耐震壁のせん断破壊が嫌われ、純ラーメン構造を優遇することになったといえる。1970年代の研究の流れがこの方向性を決めたのであろう。耐震性確保の面では有効な筋違や耐震壁も、地震後の建物の再利用という意味では、座屈、ひび割れが生じることで少々厄介な問題をもっている。やはり、ここで述べようとしているように、地震時のエネルギー吸収を目的とした明快な制振部材を適所に配置する方法が、これからの耐震設計の方向である。

2．歴史的背景

地震工学を専門として活躍している翠川三郎先生は良い研究仲間である。地震時に柱・梁などの主体構造は弾性範囲に保ち、座屈拘束されたブレースなどを早期に降伏させる構造法について、論文を発表したとき、「基本的に免震構造の考え方と同じですね」とコメントを受けた。最近のことであるが、寺田寅彦先生が昭和８年に東京工業大学の蔵前新聞に書かれた「鎖骨」という随筆を見つけ、コピーを送ってくれた。文章は「子供が階段から落ちてけがをした。」から始まり、人間の構造、仕組について書かれている。「鎖骨というものはこういう場合に折れるためにできているのだそうである。これが、いわば安全弁のような役目をして気持ち良く折れてくれるので、その身代わりのおかげで肋骨その他のもっとだいじなものが救われるという話である。」と書かれた後、「それで自分の素人考えでは、いっその事、どこか『家屋の鎖骨』を設計施工しておいて、大地震が来れば必ずそこが折れるようにしておく。しかしそのかわり他のだいじな致命的な部分はそのおかげで助かるというようにすることはできないものかと思う。こういう考えは以前から持っていた。時々その道の学者達に話してみたこともあるが、だれもいっこうに相手になってくれない。」と述べられている。これこそ損傷部位限定構造、Damage Tolerant Structures、制振構造である。

関東大震災10年目の同じ昭和８年に田邊平學先生は「耐震建築問答」を出版されている。この本は、土台と基礎を緊結しないほうが良いという免震構造の考え方が述べられていることで有名であるが、筋違の有用性についても書かれている。「真壁の場合、柱が壁の表面に現れていて筋違を用いると構造の上からも、外観の上からも洋風建築ほど自由ではないが」と、前置きをされ、「我国のような地震国では、寧ろ太い筋違をむき出しにして、壁が三角形に仕切られたままになっている方が自然なのであって、従来のような柱と梁の類ばかりで出来上がった四角形の骨組は、却って無理があって可笑しい。」と言われている。

設計の意図、研究の方針に関して勝手に位置付けをすることは許されないであろうが、高層建築の始まりといわれている霞が関ビルディングの400シリーズの広幅Hを柱として構

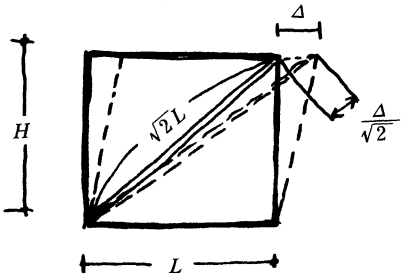

図1　骨組のせん断変形と筋違の変形（$L=H$の場合）

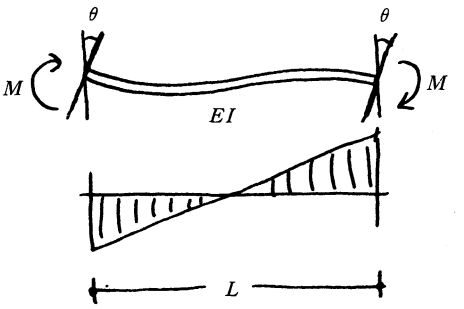

図2　剛接ラーメンの梁の変形角

成した柔らかいフレームにスリット耐震壁を組み合わせた構造、その少し前に建設されたプレキャスト壁の接合部分の塑性変形を利用してエネルギー吸収させたホテルニューオータニの構造は本格的な制振構造の始まりといえる。この考え方は高層建築だけでなく一般の構造にも応用することができる。秋山宏先生は「建築物の耐震極限設計」において柔剛混合構造の考え方を展開されている。

3．　構造力学的背景

多くの制振部材が開発されている。鋼材の弾塑性変形を応用したもの、粘性体、粘弾性体を用いたものなどがある。これらは、建物の層間変形に対して抵抗する形で骨組の中に組み込まれる。

ここで、柱梁で作られる骨組の中に45°の角度で配置された筋違を考える。骨組に生じるせん断変形量に比べ、筋違の伸縮は$1/\sqrt{2}$となる。筋違の長さは梁の長さの$\sqrt{2}$倍であるから、筋違に生じる軸歪は、骨組のせん断変形角の1/2となる。筋違端部の接合部分は剛性・耐力が高く塑性化しないことを考慮し、鋼材の降伏歪は0.1%強であることから換算すると、筋違が降伏に入るのは層間変形角が1/500前後の小さな変形角であることが分かる（図1）。

鋼板耐震壁の場合、降伏せん断応力度は軸方向の降伏応力度の$1/\sqrt{3}$であり、せん断弾性率はヤング係数の1/2.6であるから、せん断降伏歪は軸降伏歪の約1.5倍（$=2.6/1.732$）となる。これは層間変形角として1/600程度となり、筋違の場合とほぼ同様の小さな層間変形角で塑性化することが分かる。

筋違・鋼板壁について、使用する鋼材に極低降伏点鋼を用いる、または、塑性変形する部分を局所的に集中させるなどの方法により、塑性変形開始の層間変形角をさらに小さくすることも可能である。

柱と梁でできる剛節ラーメンの降伏変形角について考える。鋼構造骨組の場合、梁に生じる曲げ変形が構造物の変形の半分近くを占めるので、逆対称曲げモーメントを受ける梁の端部に生じる回転変形に注目して考察する。梁のスパン、成をそれぞれL、Dとし、梁の両端部のフランジの応力度が降伏点σ_yに達する変形角を求めると、$(\sigma_y/3E)\cdot(L/D)$で表せる。骨組のスパンLは決まっているとし、ヤング係数Eは一定値なので、降伏点σ_yの高い鋼材、従来より小さな成Dの部材を用いることにより、骨組の降伏時変形は自由に大きくできることが分かる（図2）。

以上述べてきたように、ラーメン骨組は材料と断面の選択で降伏変形を自由に決めることができるのに比べ、筋違・耐震壁などの制振部材は全体の形状と材料の選択で降伏変形は決まってしまい、板厚・部分的な形状の調節では降伏変形は動かせない。筋違の座屈問題、耐震壁のせん断破壊などの問題をそのままにして、ラーメン骨組と組み合わせた場合には、耐力が発揮される変形がラーメン骨組より早すぎ、その後に耐力劣化を起こすため、両者の抵抗力を合理的に加算することは難しい。

筋違については座屈拘束筋違の開発、鋼板耐震壁については座屈による耐力低下を防ぐためのリブの設置法の研究が行なわれ、早期に降伏する制振部材の変形能力を大きくすることができ、これらに地震時のエネルギー吸収を期待することが可能となった。さらに粘性体、粘弾性体を用いた制振部材の開発も盛んである。

この場合、ラーメン骨組も塑性化させる方法も採りうる。しかし、鋼材の選択と断面の選択を工夫することによって、ラーメン骨組は大地震時においても弾性に収める設計が可能である。塑性化は許容するとしても、地震時のエネルギー吸収は期待しないという考え方も採りうる。東京電力、新日本製鐵との共同研究により、エネルギー吸収は期待しない範囲で梁端に限定された塑性歪振幅が作用したときの疲労問題について研究を進めている

4．　静的解析と動的解析

構造設計を進めてゆくにあたり柱軸力の計算を行なう。普通の場合、拾いの軸力といって、柱の支配する床面積上にある荷重を上層部分から加算して求める。耐震壁が取り付く柱についても、耐震壁には鉛直荷重は負担させないのが長年用いられてきた方法である。しかし、最近では鉛直荷重時の応力計算にマトリックス変位法が使われる。立体解析を行なうと制振部材にも鉛直軸力が負担されてしまう。実際に大きな地震に見舞われたときには、制震部材は大きな繰り返し塑性

変形を起こし、そのうちに鉛直軸力を負担することはできなくなり、両側の柱にその鉛直荷重は再配分されてしまう。このことは、再配分された軸方向力も負担できるだけの能力を柱に持たせる必要があることを示している。要するに耐震壁には鉛直軸力を負担させない昔からの方法が良いことになる。

建設の過程で制振部材にも鉛直荷重が受け持たされてしまう。このことを気にして、制振部材の接合部のボルト締めを上層部の工事が進むまで行なわない方法もとられる。制振部材にはいろいろな種類があるので、このような方法が必要な場合もあるが、塑性論の「下界の定理」に基づき考察すると、締めつける時期はいつでもよいことになる。先にも述べたように、制振部材が大きな塑性変形を受けると鉛直荷重は両側の柱に再配分されてしまうからである。

制振部材を取り込んだ骨組の設計は従来の静的計算による許容応力度設計法となじまない点がある。すべての場合に必要とは考えないが、動的解析を用いてその性状を把握しながら設計を進めることになろう。これには等価せん断モデルがよく使われるが、高層建築では等価曲げせん断棒モデルが有効であろう。制振部材が局所的に配置されるとき、その周辺の梁、柱に生じる変形は制振効果を鈍らせることになる。これらを正しく評価するためには立体骨組モデルに制振部材を組み込んだ動的解析が必要になる。

柱、梁などの部材を弾性にとどめる設計が行なわれている場合には、地震応答解析のさい、制振部材の抵抗力を時々刻々の変形、相対速度、温度などから陽に求め、振動方程式の右辺に移項し、骨組の全体剛性マトリックスは初期のものを最後まで使い続ける解析法が考えられる。設計の考え方が明快なため、それに合わせた解析法も単純明快にすることができる。

制振部材の安全性の確認については、一般の部材のように発生応力、塑性率などだけでなく、塑性変形の疲労つまり累積損傷に対する確認が必要になる。これについても多くの研究が発表されている。

5. 審査システム

わが国に限らず、建築を建てる場合には行政の審査を受けなければならない。ここで述べてきたような制振構造は耐震性能のうえでも、構造にかける費用の面でも従来から用いられている一般的な構造形式に比べ、大きな合理性を有している。免震構造の場合も同様であるが、もっとも合理的であるはずの構造形式が現状の法規の中に記述されていないことが理由で、特殊な構造として扱われてしまうことは残念である。制振構造の場合、制振部材に特殊な鋼材・粘弾性体などが使われること、基準法施行令で決められている1次設計において、鋼構造建築は許容応力度設計が要求されているのに対し、制振ダンパーはこのレベルの地震力に対しても降伏するなどの点が問題となる。

建築基準法が改正されようとしているので自由度が高まることと思うが、このような制振構造・免震構造が間違いなく普及できるような環境が望まれる。この場合、審査側にもある程度高い技術力が必要になる。審査を民間にも開放するといわれているので期待できる。

6. おわりに

地球環境問題に関連して建築の寿命が注目されている。竣工直後の時点で最適な状態を作り上げることに注目して設計は行なわれがちである。数十年から数百年の長い期間にわたって使用可能な建築を考えるとき、竣工時点の最適解がLife Cycleとしての最適解にはなりえない。内装の寿命、空調などの設備機器など個々の部位の寿命の違いを考え、部分的に更新することのできる設計が必要になる。このような点に早くから気付き、スケルトンとインフィルを分離した設計、設備の配管と構造の占める空間を明確に分けた設計がすでに行なわれている。耐震設計にもこの考え方を取り入れる必要がある。従来の構造は、鉛直荷重の支持のために設けられた柱、梁に地震荷重も受け持たせ、塑性変形能力を付加しようとした考えである。ノースリッジ地震、兵庫県南部地震の鋼構造純ラーメン骨組の被害はこの方法のもつ問題点を顕在化させた。制振構造の理想は、鉛直荷重を支持する骨組は地震時においても弾性挙動を保証し、制振部材のみに地震時のエネルギー吸収を期待する方法である。要求および機能の異なる鉛直荷重支持機構と、地震エネルギー吸収機構を明快に分離することにこの設計法の特長がある。結果として、更新性の問題にも対応できることになる。

建築を志した人が一度は好きになるミース・ファン・デルローエ設計のバルセロナ万博のドイツパビリオンが、再建されている。非常に細い十字型断面の8本の柱と何枚かの直交する大理石の独立壁が組み合わされた平屋の建築である。篠原一男先生はちょうど再建の時に訪ねられたとのことで、大理石の壁の中に上記の材より立派な鉄骨の平面格子が組まれていることを教えてくれた。あの美しい建築もここで考えている構造と基本的には同じ考え方でできているのかと嬉しくなる。制振構造を実際のプロジェクトに適用するためには、建物の中に制振部材を組み込む壁状の空間を確保しなければならない。床と柱と窓だけでは建築はできず、壁は必ず必要になるから、建築家の方々も理解してくれるに違いない。