

身近になったパッシブ制振構造

和田章

東京工業大学建築物物理研究センター長・教授

損傷制御構造の発想

地中海交易でベニスが永く繁栄したように、多くの人が集まり議論が盛んに行われ、過去や未来について語る場所に活気が生まれ、新しい学問が興るように思う。大学の役目はここにあり、その一人としてマサチューセッツ工科大学土木環境工学科のJerome J. Connor教授を思い出す。Connor教授は議論好きの素晴らしい先生で、研究室の前はいつも学生や訪問者で行列になっていた。

地震工学に関する民間コンサルタント：EQE Internationalの創始者のPeter Yanevはこの出身であり、サンフランシスコに大きな被害を起こしたロマプリエタ地震（1989年）の被害調査を行った。この報告のため恩師を訪ね、これからの地震防災は人命の確保、構造物の被害だけではなく、地震後の経済活動の低下による損失も考慮して進めるべきだと、重要な問題を投げかけた。

小生は文部省在外研究員として同教授のもとに1991年の春から夏にかけて滞在した。初めて研究室を訪ねた日に早速議論が始まり、わが国ではほぼ実用化されていた座屈補剛ブレースを紹介した。要するに軸降伏する心材が座屈しないように心材をジャケットで囲むのだね、とすぐにその仕組みに理解を示した。その後の議論で最も感動的だったのは、ロマプリエタ地震のあとサンフランシスコの技術者が、構造物の倒壊防止はもちろん、地震後の継続利用を目指すべきといているが、どう思うかと聞かれたことである。

後になってこの技術者がPeter Yanevだったことがわかったのだが、地震後の建物の継続利用を実現する方法に関して議論を続けた。高強度の鋼材を使って柱・梁をつくり、座屈補剛筋かいの心材に低降伏点鋼材を用い、両者を並列システムとすれば、地震入力エネルギーは筋かいの心材によって吸収され、柱・梁の骨組は弾性変形に収められ、健全なまま残すことができる考えに発展した。このとき、出された言葉がDamage Tolerant Structuresであり、あらかじめ壊れる部分を許容した構造を意味している。

その後、日本では、損傷部位特定構造、損傷制御構造

などの言葉が使われるようになった。今では、英文の場合、Damage Controlled Structuresの方が一般に理解されやすいため、これを用いている。パッシブ制振構造、Passive Controlled Structuresも使われ、ほとんど同じ意味であるが、これらには骨組本体の損傷を防ぐという積極的な意味は含んでいないように思う。

この議論の中で、骨組に高強度鋼材を用いるだけでなく、従来に比べ若干細い部材を用いれば、骨組の弾性変形領域は広げ得ることなどを議論した。

鋼材の多様化

これらの発想には、当時新日本製鐵の耐震制振技術をまとめていた岩田衛博士（現・神奈川大学教授）および佐伯英一郎博士との議論が基本にあった。低降伏点鋼の建築への応用、座屈補剛筋かいの発想は佐伯博士にあり、当時、高性能鋼として開発されていた高張力鋼を建築に用いる場合、従来鋼材のように塑性変形に期待するのではなく、弾性変形域を活用の方が合理的ではないかといっていたのは岩田博士である。

材料開発の側から見ると、従来に比べ2倍の強度の鋼材が開発されると、同じ構造物をつくるために必要な鋼材量は半分になると考えられがちである。構造物の各部材の断面寸法を同じにして、ウェブとフランジの板厚をすべて1/2にしてみる。結果として断面積、断面2次モーメントは1/2になるから、構造物全体の剛性は1/2になる。材料強度が2倍であるため、従来鋼の構造物と高張力鋼の構造物は同じ強さを発揮する。しかし、後者の剛性は1/2であるから、生じる変形は2倍になることがわかる。従来の鋼材を用いて降伏時の層間変形角が1/200程度の場合、後者の骨組の降伏時層間変形角は1/100になってしまう。高張力鋼の骨組にエネルギー吸収を期待して塑性変形を起こさせようとすると、1/50を超える過大な層間変形角を許容しなければならなくなる。従来の骨組のように1/200程度の層間変形角で降伏させるためには、初期剛性を高めるために部材のせいを大きくしなければならなくなる。もう一つ考えなければならぬことは、材料強度が高い場合、幅厚比の条件が厳しくなることがあり、薄い鋼板を用いて部材のせいを大きくすることに

合理性はなく、鋼材量の節約にもならない。

以上の考察から、高張力鋼は弾性設計に適しており、塑性変形能力はそれほど必要ないことがわかる。このような使い方であれば、鋼材の降伏比の条件を緩和することもでき、破断強度が同じであれば、降伏点は高いほどよいことになる。

骨組の塑性変形

1981年に新耐震設計法が施行されるまで、一般的な建築構造物の耐震設計は0.2の震度を用いて弾性設計・許容応力度設計が行われていた。1960年代から骨組の塑性変形を考慮した耐震設計が行われていたのは、高さが45mを越える超高層建築であった。初めて100mの高さを越えた超高層建築は三井霞が関ビルであり、次は浜松町の世界貿易センタービルである。

後者の構造設計をまとめていた日建設の須藤福三博士（東京電機大学名誉教授）と水津秀夫博士は、大地震動に対して骨組の塑性変形に期待する方法は理屈のうえではわかるが、大地震が来て大きく揺れても元の形に戻るのが本当の建築であるはずで、骨組の塑性変形を許してしまえば、大地震後に使えなくなってしまうといていた。これが社会の常識であり、人命さえ守れば建物は使えなくなっても構わないという考えは専門家の論理だったといえる。

霞が関ビルは400シリーズのH形鋼を柱に使い、外周架構には2段梁を使うなどしなやかな構造であり、これにスリット耐震壁を組み込んだ制振構造である。世界貿易センタービルの設計においても、可変剛性ブレース、プレストレストコンクリート耐震壁などの活用が考察され、やはり制振構造として設計が進められていた。

1968年には十勝沖地震、1978年には宮城県沖地震があり、多くの鉄筋コンクリート構造、鉄骨鉄筋コンクリート構造に被害が出た。これを反省して、建築構造の倒壊を防ぐ目的で、建築骨組に十分な塑性変形能力をもたせる研究が盛んになった。日本建築学会の論文集、大会梗概集には骨組の変形角が1/10まで耐力低下が起らないなどの報告がされ、変形能力向上の研究は行き過ぎるところまで来てしまった。専門家の論理は社会の常識からはずれ、内輪の常識になってしまった。

数年前からプレキャスト・プレストレストコンクリート構造を用いた制振構造の研究を進めているが、この研究のリーダーの中野清司博士（元建設省建築研究所長、東京電機大学名誉教授）は、長年行われてきた骨組の塑性変形能力向上およびエネルギー吸収能力を高めるための研究はそれなりに意義はあった。しかし、構造物が多くエネルギーを吸収したということは構造部材にダメ

ージが蓄積されたことと同じ意味であり、建築物の財産価値維持、再利用の可能性という観点では負の働きをするといっている。カリフォルニア大学のVitelmo V. Bertero教授も数年前の講演で、“Ductility is Damage”と従来の耐震設計法を批判した。

日本の伝統と自然な発想

鋼とコンクリートを用いてリジッドに構築する建築構造に関して議論してきたが、古くから地震に耐えてきた日本の木構造の伝統にも制振構造の考え方があったといわれる。

鈴木有博士（神戸大学名誉教授）は、コンサイス木材百科の中で伝統工法はねばり強い耐震機構をもつと、次のように述べている。「中程度の地震には『堅いが脆い土塗り壁』によって揺れを抑えて無被害に止める。大地震にはこの土壁を先に壊してエネルギーを吸収しつつ『立体格子状の木造軸組』で力を分散し、揺れるほどに『木を噛み合わせ堅木を叩き込んで固めた接合部』で、変形とエネルギーを吸収して耐える。そして、想定外の地震動に対しても、『柱直置き基礎』で上部構造を滑らせる一種の免震的工法によって揺れのエネルギーを遮断し、致命的な被害から逃れようという、多段階に備える耐震機構をもっている」。そして「この『自然体型』は材料と構造と工法の絶妙な経験的・口伝的バランスの上に成立し、地域の自然外力条件の下で長年にわたって確かめられてきたものではあるが、普遍化するには至っていない」とまとめている。

「災害は忘れた時分にやってくる」の言葉で有名な寺田寅彦博士は、昭和8年に書かれた随筆「鎖骨」で、耐震設計に人間の身体仕組み、骨の仕組みを取り入れることを提案している。人間の鎖骨は、車のバンパーのように肩の前の部分にあり、転んだときなどにこれが先に折れることによって、肋骨や内臓をまもる仕組みになっている。鎖骨は折れても普段の生活にはそれほど支障がなく、治りやすい骨である。この考えを建築構造に利用するという考えであり、損傷制御構造の考えを明確に述べたものといえる。この随筆は青空文庫のホームページ注を利用して読むことができる。

鎖骨だけに限らず、人間の身体、動物の身体、植物の構造などから私たちのつくる建築構造について取り入れるアイディアは多くある。大きな木の根の構造、高さ方向にスムーズに変化する幹の太さ、幹と枝の接合部などをよく観察すると、建築構造はかなり乱暴なつくり方をしていると反省される。兵庫県南部地震の後、鋼構造骨組の梁の端部に水平スチフナーをつけることが一般的になったが、幹と枝の接合部に似た、溶接部を塑性化させ

ないこのような工法は是非普及させるべきである、過去に建設してきた多くの建物の改良が必要になるようにも思う。

確かな解析モデル

構造設計へのコンピュータの利用が一般的になり、鉛直荷重時の応力解析にもマトリックス法が使われ、立体解析が行われることもある。この場合、制振部材を組み込んだ立体モデルを用いると制振部材も鉛直荷重を負担してしまい、周辺の柱の軸力が過小評価されてしまう。建物の竣工後、大きな地震を受ける前の応力状態はこの解析結果に近いのであろうが、制振部材は地震時のエネルギー吸収を目的に設置され、鉛直荷重を負担するものではないから、制振部材が鉛直荷重を負担しないような解析を行う必要がある。これには、柱の軸変形を拘束して解く方法が簡単であるが、制振部材をすべて取り除いた立体モデルを用いる方法が確かである。

施工順序により異なるが、実際の工事においても制振部材に鉛直荷重が流れてしまうことがある。これを問題として、制振部材の接合を建物の上層部が完成するまで遅らせる方法が用いられる。これには、竣工後の建物の状態を計算の条件と一致させる意味はあるが、この施工法を採らずに、下から順に施工してしまっても大きな問題はない。この建物が一度大きな地震を受け、制振部材に繰返し塑性変形が与えられると、制振部材が負担していた鉛直荷重は周辺の骨組に自動的に再配分されるからである。

応答解析モデルをつくる場合にも工夫が必要である。早期に降伏する制振部材の初期剛性を含んだ剛性マトリックスを用いて減衰マトリックスをつくと、制振部材のエネルギー吸収を二重に評価してしまう。減衰マトリックスをつくる場合にも制振部材の初期剛性の寄与は無視した方が安全側の評価である。

有頂天にならず、身を引き締めて

制振構造、免震構造の中には、設計の時点で考えていた規模の地震動、強風を受けるものが現れて来た。大局的に見れば、それぞれ役割を果たしたといえるが、トラブルが生じていないわけではない。これらの情報を秘密にするのではなく、共有化する必要がある。

制振部材、免震部材の実験は、鉄骨でつくられた剛な実験装置に組み込んで行われているが、面外方向に柔な鉄骨フレームまたは鉄筋コンクリート造に接続されることもあり、実験の状況とは一致していない。接合部まわりを含めた確認実験がぜひ必要である。

各種のダンパーが開発され使われているが、長時間大振幅に耐えられるだけの熱的容量の確認されていないダ

ンパーがあり、巨大台風、継続時間の長い地震動を受けたとき、設計どおりの性能が発揮できないことがあり得る。ダンパーに期待している吸収エネルギーの総計を装置の比熱と質量で除して、温度上昇が計算できる。このような簡単な確認がぜひ必要である。

構造設計は能動的かつ意図的に

建築の設計に限らず、設計活動は能動的かつ意図的に進めなければ面白くない。制振構造の設計においても同じである。想像力をたくましくして、設計している建物が大地震を受けるときの挙動を考え抜き、意図どおりに挙動するように設計を進める。制振構造の設計における基本は、①制振部材を取り除いた柱・梁による骨組が平面的および高さ方向に釣り合いよく構成され、設計で考えている変形振幅まで弾性的に挙動し得ること、②設計上考えている変形振幅の範囲内で、制振部材が十分にその力を発揮すること、③建物の各階について層せん断力と制振部材の負担する層せん断力の割合が適切であることである。

構造設計を考えると、建築関係の多くの学生、研究者、設計者に影響を与えた坪井善勝先生を忘れることはできない。日本建築学会のシェル構造の委員会には必ず出席され、そのたびに委員会のテーマとは別の有益なお話しをしてくれた。宮城県沖地震（1978年）の後だったと思うが、「地震災害で人が亡くなったり、怪我をするのは建物に働く水平動のためではなく、重力の影響で傾いた建物が倒れたり、押しつぶされたりするからである。耐震設計という、応答層せん断力・層間変形など、研究者や設計者は水平方向の力や動きのことを問題にするが、無重力の宇宙船に地震があっても構造体は倒壊しない。地上の建築物はまず重力に対して壊れないことを考えるべきである」といわれた。損傷制御構造の場合、損傷を受け地震時のエネルギー吸収を担うのは各種のダンパーであり、柱と梁は地震時にも弾性範囲で挙動し、構造物の重量を支持することに専念する。免震構造の積層ゴムも同様の働きをもち、地震時に大きく揺れても鉛直荷重支持能力を維持できる。両者は坪井先生の指摘した問題を解決できる構造である。わが国はもちろん、世界にも免震構造、制振構造の技術が普及することを願う。

(わだ あきら)

【注】 http://www.aozora.gr.jp/cards/000042/files/2475_11315.html