

結語

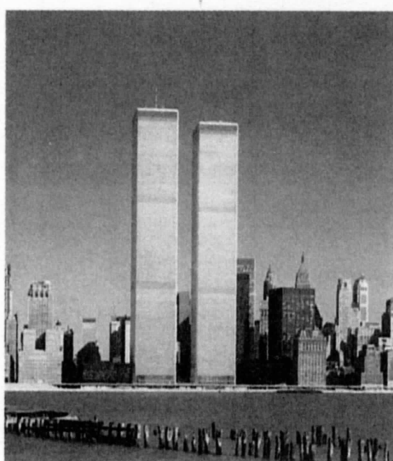
耐震設計、いつも真っ只中

和田章 ◆ 東京工業大学建築物理研究センター長・教授

アメリカの話

70 mm フィルムによるアメリカ映画が初めて日本に紹介されたのは「南太平洋」だったと思う。それまでのワイド画面の映画は3台の映写機を使って映すシネラマであったから、継目のない画面と音質のよい音楽に皆が感動した。その少し後であるが、「ウエストサイド物語」も素晴らしい70 mm 映画だった。始まりのシーンはニューヨークのマンハッタン島の南から近づくヘリコプターからの映写であり、その画面はウエストサイドのビルの谷間に向かって進んでいった。終戦から15年ほど過ぎていただろうか。ニューヨークにはそれより30年以上も前にエンパイアステートビルディングが建っていたから、映画を観て驚くことはないが、アメリカの凄さを感じた一瞬であった。

このマンハッタンの先端にエンパイアステートビルディングを超える世界一の高さの世界貿易センタービルディングの建設が始まったのは、それから10年も経っていなかった。マンハッタン島を南から映写すればその西岸にあり、必ず目にとまる美しいツイン・タワーである(写①)。建築家はミノル・ヤマザキ、構造設計者はシアトルに事務所を持って



① ワールドトレードセンター

た4人の構造設計者の仲間達で、その中の一人レスリー・ロバートソンが30代前半の若さでニューヨークに移り構造設計を完成させた。

ロバートソンは今でもお元気で、I.M. ペイらと、滋賀県信楽に2年前に完成したミホ・ミュージアムを設計している。導入部の吊橋は芸術品といえるほど美しい。4月中旬、ロバートソンに特別講演をお願いし、約80名の聴講者は“Post-tensioned Steel Structure”と題した素晴らしい話を聞き、美しいスライドを観た。ミホ・ミュージアムの設計の話の前に、溶接や高力ボルトで接合される鉄骨骨組構造に外からポスト・テンションを与えて構造物の形状を設計どおりの形に完成させ、その後のしっかりとした剛性を確保する方法について興味ある話が続いた。

両側のコアが100 mのスパンで開



② ミネアポリス連邦準備銀行

いており、そこにテンション構造でオフィスビルが載っている、アメリカ・ミネアポリスの連邦準備銀行の話(写②)、スペイン・マドリッドの大通りを挟んで始めから傾けて建設した2本の高層建築の話、オーバーハングしている観客席を持つ屋内競技場の話などである。

例えば、ミネアポリスの吊構造では、せいが1 mほどの大断面、しかしそれほど高強度でない鉄骨を用いてカテナリーを作り、そこにオフィスを載せるのだが、カテナリーの内部には鋼線を仕込み、これにポスト・テンションを与え、カテナリーの鉄骨に生じる引張応力をゼロにしている。これにより、剛性が高く信頼性の高い吊構造を完成させている。テンション構造の場合、強度だけを満足させたのでは剛性が不足することを配慮して取られた方法である。

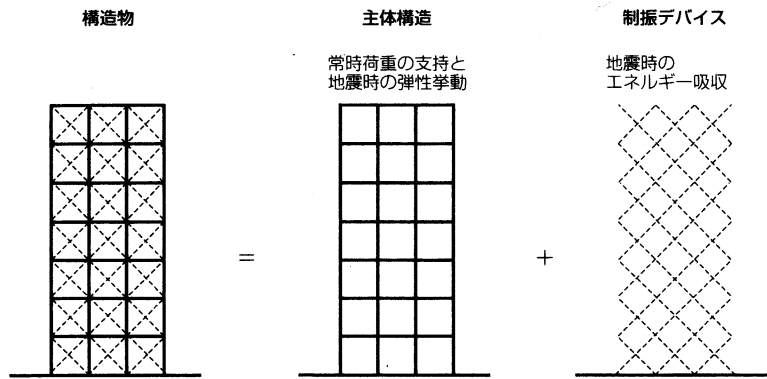
建築で重要なことは、建物の形がしっかりといつまでも変わらないことである。

日本の鉄筋コンクリート構造の向かう方向

昨年末、元建設省建築研究所長、東京電機大学名誉教授の中野清司先生からお誘いを受け、プレキャスト・プレストレスト・コンクリート構造の新しい耐震設計に関する会の仲間に入れていただいた。この新しい構造の主旨は、鋼構造骨組を対象として近年採用が増えている損傷制御設計の考え方を、鉄筋コンクリート構造に発展させようとするものである。

ここで対象としているPC圧着工法による構造は、柱と梁の主体構造はプレストレスト・プレキャストコンクリート部材によって組み立てられ、その接合部分に鋼線の強度に余裕を持たせてプレストレスを与え、骨組に一体性を持たせる構造法である。常時荷重下および中小地震時には、プレストレス力により与えたプレキャスト部材間の圧縮力が残存しているため、接合部は十分に剛となり、揺れの少ない安定した構造として働く。大地震時には、部材間の圧縮力を維持することはできず、内部の鋼線の弾性伸びにより接合部に回転が生じる。この場合でも、鋼線は十分に弾性範囲で挙動するため、地震後には構造物は元位置に復帰させることができる。

この性質は非線形弾性と呼ばれ、大地震時に過度の大きな力を負担しないように制御された中で、骨組にある量の変形を生じさせることのできる損失制御構造に向けた構造である。柱・梁骨組がある量の変形を生じることにより、地震時のエネルギー吸収を目的として設けるダンパーの効率を高めることができる。プレ



地震時の損傷を柱・梁などの主体構造に与えず、地震エネルギー吸収のために組み込んだ制振部材に集中的に負担させる構造

図1 損傷制御構造の構造システム（出典：建築物の損傷制御設計）

キャスト部材に過度の力を与えないため、部材そのものに損傷を与えないという大きな優位性も持つ。

ここでも、構造物本体を塑性化させる考えはなく、地震後に建物の形は元に戻らせることを第一に考えている。

100 mを超える超高層ビル

1960年代の後半に霞が関三井ビルが竣工した。その時代の日本の技術力を総合して設計され、建設された超高層建築の始まりである。

400 mm シリーズの広幅 H 形鋼を柱に用い、強軸をスパン方向に向け桁行方向は弱軸になるため、1層ごとに2段の梁を用い、柱に生じる応力を低減するとともに、骨組の剛性を高める工夫がなされた。それでも初期剛性が不足することがわかり、プレキャストコンクリート壁にあらかじめ縦スリットを入れ、急激な破壊を防いだ壁がコアまわりに設置された。

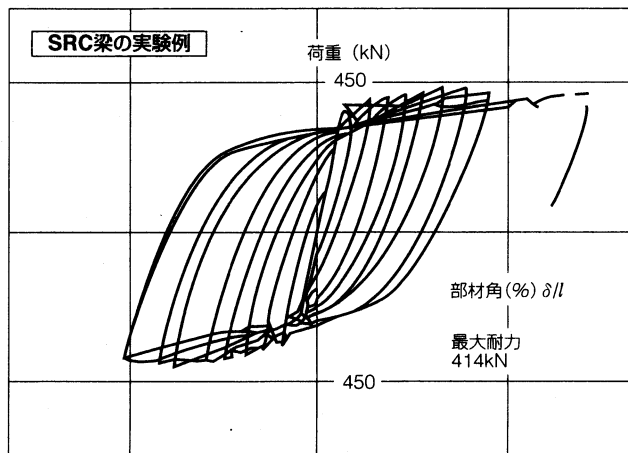
この建物が竣工する頃、(株)日建設計の構造設計グループは浜松町の世界貿易センタービルの設計を進めていた。大地震時に過大な地震力が建物に入るのを避け、地震後に建物が入るの形に戻る方法が研究された。今から34年前のことである。この方

法は可変剛性構造と呼ばれ、やはりプレストレス構造の考え方が応用されている。詳しい内容は、本誌「建築技術」1968年6～9月号に特集されている*。

興味深いことは、大きな地震を受けた後、建物に大きな塑性変形を生じさせて傾いたままになってもよいものか、たとえ大地震といえども、地震が去ったあとには元の形に戻るの望ましいものか、という最も基本的なことが、わが国の超高層の始まりの時期に議論されていたということである。

粘り強い骨組構造

過去40年の骨組構造に関する論文を振り返り、見ていただきたい。変形能力を高めるための研究、繰返し荷重下における荷重-変位曲線の囲む面積の大きさを大きくするための研究が非常に多い(図2)。中野清司先生は、「骨組に変形能力があり多くのエネルギー吸収能力を発揮させるということは、それだけ、柱梁に損傷を与えていることになる」、「わが国に限らず建築構造に関する多くの研究者、設計者はエネルギー吸収能力の高い骨組を追い求めてきたが、行き過ぎではなかったか」とおっしゃっている。



昭和 63 年に行った鉄骨鉄筋コンクリート造の片持梁の実験結果を示す。部材角が 1/20 を超えても耐力低下を起こさず、大きな変形能力を有している。過去 40 年間、このような実験結果を求めて、多くの研究が進められて来た。これらの研究は、建物の所有者、利用者の思いからは大きく遊離していた

図2 繰返し荷重下における荷重-変位曲線の一つ例

逆の言い方をすれば、「繰返し変形を起こしてもエネルギー吸収しない骨組は、損傷を受けないことになる」。例えば、弾性範囲を超えないで挙動する骨組、プレストレスト・コンクリート構造のように非線形弾性の性質を持つ骨組などである。

兵庫県南部地震では、骨組の塑性変形能力に期待して設計された建物がその意図どおりに挙動し、修復は可能であったがその費用が大きすぎることで、修復後の建物が地震前と同じ性能を持つようには思えないことが理由で、取り壊された例がある。この例は鉄筋コンクリート構造であるが、鉄骨構造では梁端部の塑性変形が考えていたようには発揮されなかったもの(図3)、発揮されたものの骨組の残留変形が大きすぎて問題となったものなどがあつた。

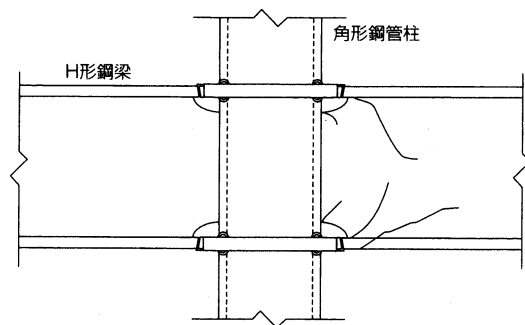
私達が追い求めていた骨組自身の塑性変形能力に期待する耐震設計法は、社会の望む答えにはなっていないことがはっきりしてきている。

損傷制御構造と免震構造

地震時の損傷を柱・梁などの主体

骨組には与えず、地震エネルギー吸収のために組み込んだ制振部材に集中的にそれを負担させ、地震後の建物の継続利用、場合によっては若干の修復ののちに再利用を目指す構造を、損傷制御構造または損失制御構造と呼んでいる。主体構造には鉄骨構造の場合、H形断面、鋼管またはコンクリート充填鋼管、梁には端部のフランジ幅を広げ、溶接部に塑性変形が生じないようにしたH形断面などが用いられる。高強度材料を用い梁せいの小さな梁を用いる方が、弾性限界変形が大きくなるのでさらに望ましい。鉄筋コンクリート骨組では、先に述べたプレストレスを応用したプレキャスト構造がこの構造法に適している。

免震構造は地震時の変形を免震層に集中させ、上部構造に生じる水平力を減らし、上部構造の骨組に地震時のエネルギー吸収の必要性をなくしたものであり、地震後も建物をそのまま使い続けたいという所有者、利用者の望みをそのまま解決する構造方法である。免震層の変形は認められているものの、上部構造に生じる変形は十分に小さく、建物そのものに



梁降伏によるエネルギー吸収はフレーム構造の設計において有効な手段であるが、実際の設計は難しい。ノースリッジ地震や兵庫県南部地震では柱梁接合部の梁端フランジ部が塑性破壊し、構造物の補修性、再使用性の面で大きな課題を残した

図3 兵庫県南部地震における鉄骨梁端の破壊例 (出典：建築物の損傷制御設計)

損傷を与えないという考えを貫いた構造といえる。

まとめ

1923年の関東大震災のあとに本格的な耐震工学が始まったと考えられ、霞が関ビルの設計時期の1960年代初期は、現在2001年とのちょうど中間に相当する。耐震工学は完成したものではなく、われわれが作っていくものと考えた方がよい。何事においても、仕事を選んだならば、それはその真っ只中に放り込まれることである。五線紙と音符で素晴らしい名曲が世界中に生まれ続けているように、何事もこれで終わりということはない。耐震構造の現在のゴールは免震構造であると思うが、これについても真っ只中、決まりごとにとらわれず、さらによりよいものを作っていかなければならない。

(わだ あきら)

※須藤福三、杉原健児、小林伸也、水津秀夫、寺本隆幸：“壁体を用いた超高層建家構造の計画—WTCビルの構造計画の推移”、建築技術、1968年6~9月号。世界貿易センタービル(WTCビル)の最終15次に及ぶ設計過程の全貌が詳細に紹介されている。“動的現象下に置かれている架構を一種の機械とみなし、メカニク的手法で被振体内に誘起される振力を減少し、かつ振動現象の終わった後は材が完全にもとに復する架構を作れないこともないはずである”とある。