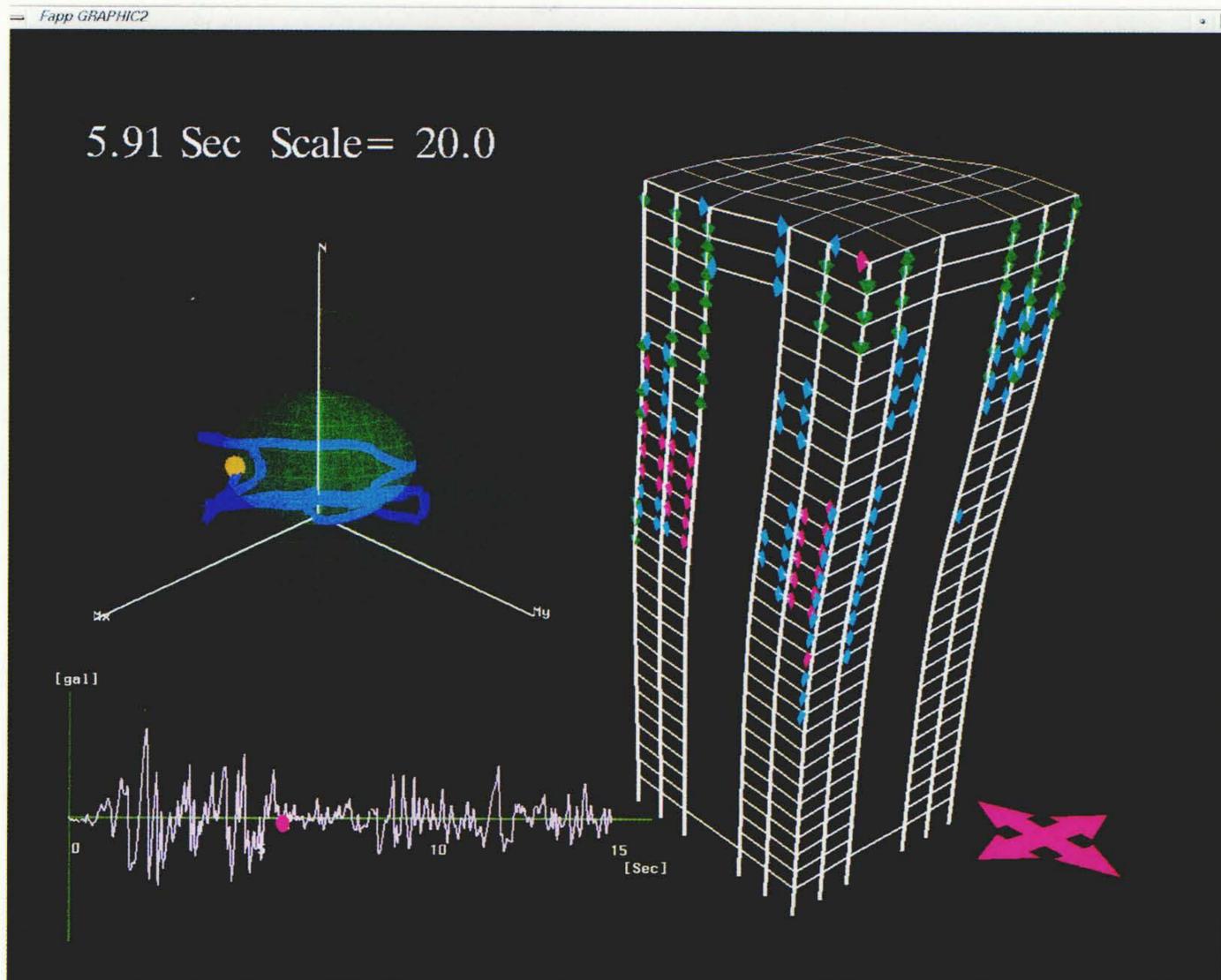


鉄筋コンクリート造超高層建物の耐震解析

Earthquake Response Analysis of Reinforced Concrete Frame

宮下 丘* Takashi Miyashita

高橋元美** Motomi Takahashi



大地震を受けたときの建物の解析結果の一例 建物の変形状況および柱・はり部材の塑性状況を示す。

わが国の超高層ビルの第1号である霞ヶ関ビルが完成してから約25年が経過した。その間、徐々に変化が起こっている一つには、最近の超高層ビルを見ればわかることであるが、建物の形が非常に個性に富んできたことがあげられる。一方、骨組の材料は最初のころはすべて鉄骨造であったが、最近ではRC造(鉄筋コンクリート造)の超高層集合住宅が出現してきた。

このような変化に伴い、解析法もレベルアップが図られてきた。特に、RC造の場合、大地震時にコンクリートのひび割れや鉄筋の降伏という現象が起こ

る。このため、鉄骨造よりもRC造の建物のほうが解析的には難しい問題を抱えている。また、形状の複雑さにより、各部材に発生する応力を正確に求めることが必要となってきた。

このため、鹿島建設株式会社では超高層鉄筋コンクリート建物の耐震解析プログラムを開発し、実建物の設計時に活用している。特に、スーパーコンピュータの導入により、45階建物でも、一つの大地震波に対して10時間以内で解析可能となり、設計時の強力なツールとなっている。

* 鹿島建設株式会社 情報システム部 工学博士 ** 鹿島建設株式会社 情報システム部

1 はじめに

わが国のような地震国に、霞ヶ関ビルをはじめとする超高層ビルの建設を可能にした一つの大きな要因として考えられるのが、大型コンピュータの出現であった。すなわち、大地震を受けたとき、建物がどのように変形し、どの程度の力を受けるかということは、コンピュータによる解析を通して初めて具体的数字としてわかってきた。

鹿島建設株式会社がコンピュータを導入したのは昭和38年にさかのぼり、以来、橋梁(りょう)、超高層ビル、原子力発電所建屋などの大型構造物の耐震解析や応力解析に活用してきた。解析精度の向上とともに使用されるコンピュータも、より高度なものへとリプレースされ、平成2年にスーパーコンピュータを導入した。

ここでは、鹿島建設株式会社での超高層ビルを中心としたコンピュータ利用の概要と、その具体例としてRC造(鉄筋コンクリート造)超高層ビルの耐震解析の現状について述べる。

2 大型構造物へのコンピュータの利用

大型構造物でのコンピュータの利用は今から30年前にさかのぼり、特に高い安全性が要求される原子力発電所建屋や超高層ビルの耐震解析とともに急速に発展した。

当初の超高層ビルは、力の流れが明快であるべきだとする原則に従い、建物の形も単純で安定感のある長方形であったが、霞ヶ関ビルの建設から25年を経過した現在、超高層ビルは非常に変化に富んだ複雑な形へと変わってきた。これらの変遷を可能にしたのは、設計者や研究者の技術開発に対する不断の努力によるものであるが、コンピュータの果たした役割も忘れてはならない。つまり、コンピュータによる解析結果と実建物の振動実験や地震時の観測結果とを比較検討することによって、解析法や解析モデルの妥当性を検証してきた結果のたまものと言える。

解析法は二次元平面解析から三次元立体解析へ、線形解析から非線形解析へと進展し、現在は複雑な平面形を持つ建物の柱・はり、接合部パネルなどの部材のまま解析に取り入れ、各部材が大地震時にどのような力を受けるかまで追跡可能となっている。当然、柱やはりにある程度以上の力が加われば、鉄骨造であれば塑性化という現象が起こるし、RC造であればコンクリートのひび割れや鉄筋の塑性化という現象が起こるわけであるが、これらの非線形の現象も解析では考慮されている。

今までのコンピュータでは、構造物をそのまま解析することには大きな制約があったが、スーパーコンピュータの出現によって、三次元(立体)の非線形解析がようやく実現可能となってきた感が強い。

3 RC造超高層ビルの耐震解析

超高層ビルは骨組を構成する材料により、S造(鉄骨造)、RC造および両者を併用したSRC造(鉄骨・鉄筋コンクリート造)の3種がある。

S造は主に事務所ビルに多く用いられ、鹿島建設株式会社でも200階の超々高層ビル(DIB-200)のフィジビリティスタディが終了し、いつでも建設が可能である。一方、RC造は居住性が優れているため、主に集合住宅に用いられ、従来のコンクリートよりも高強度のコンクリートを用いることにより、現在は50階ぐらいまでが建設可能

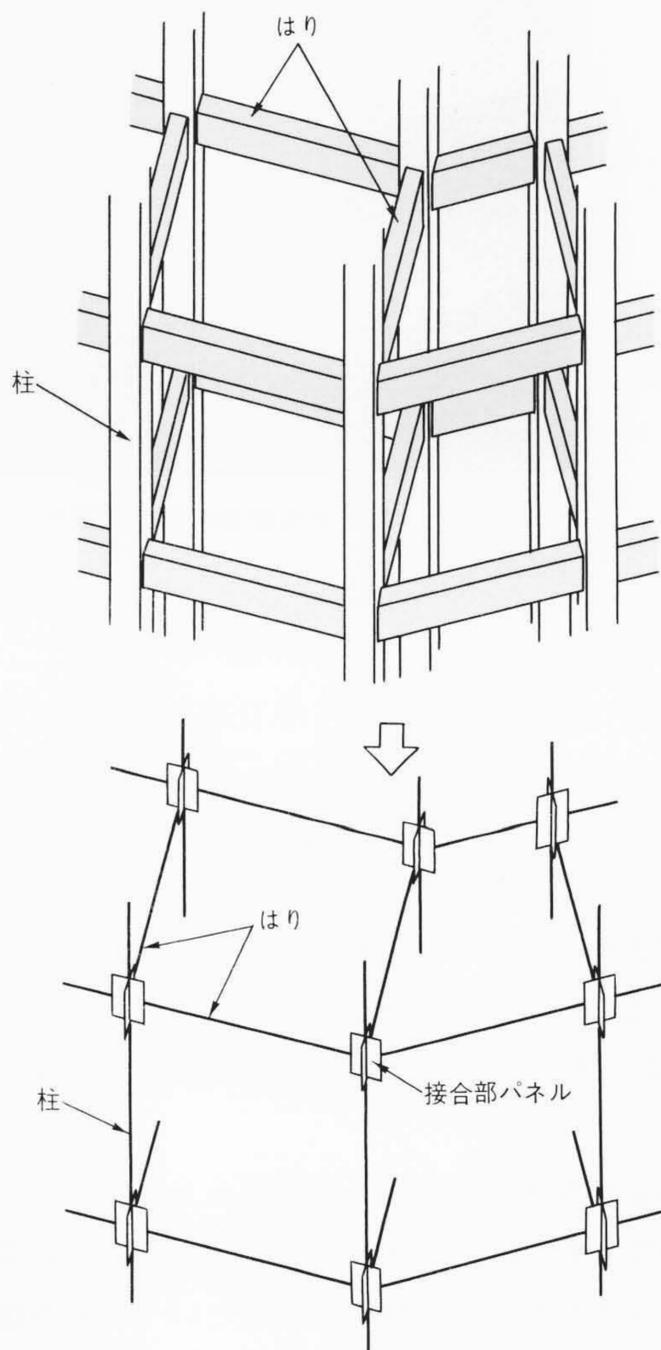


図1 立体骨組の構成部材要素への置換 立体骨組の構成部材要素を示す。

である。鹿島建設株式会社はわが国第1号の18階建のRC造集合住宅を昭和48年に完成させた後も、多くのRC造超高層集合住宅を建設してきた。特にコンクリートは圧縮強度に比べ引張強度が $\frac{1}{10}$ であり、解析的にはS造よりもRC造の建物のほうが難しい問題を抱えている。

耐震解析で主なものは地震応答解析であり、建物の基礎に地震波を入力し、建物に起こる力と変形を求めるものである。地震波としては、建設される地盤の性状に近い過去の大地震の波や、建設場所に起こると想定される波を人為的に作成する人工波が用いられる。

当然、大地震、例えば関東大地震程度の地震が建物を襲えば、一部の部材は塑性化が起り、地震のエネルギーを吸収し、建物の変形が大きくなるのを抑制する。したがって、解析ではこの現象を正確に取り入れることが必須(す)である。

解析を行ううえでいちばん重要なのは柱であり、特に低層部の柱は高軸力と2方向の曲げモーメントを受けるため、複雑な挙動を示す。柱は建物を支えている主要な部材のため、特に正確に解析を行う必要がある。鹿島建設株式会社でも数多くの柱やはり部材の実験を行うとともに、シミュレーション解析を通して精度の高い解析法を開発してきた。

3.1 解析方法

3.1.1 基本仮定

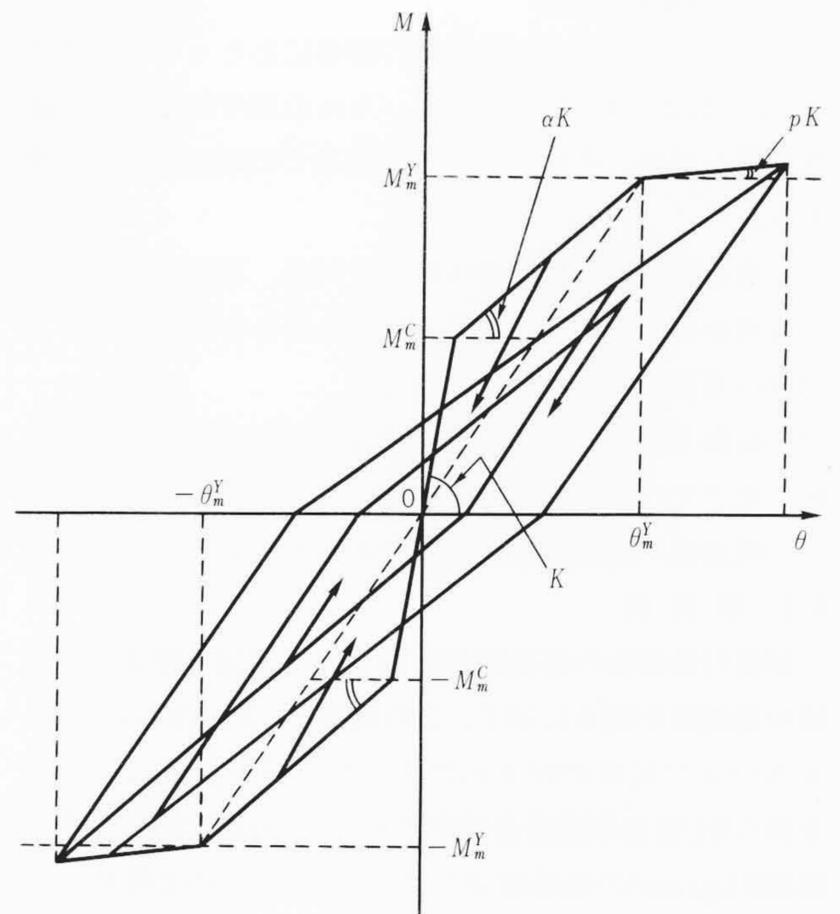
(1) 解析の対象とする立体骨組は、前ページの図1に示すように柱、はりおよび柱-はり接合部パネルで構成するものとする。柱は2方向の曲げおよび軸方向変形を、はりは曲げ変形に弾塑性特性を考慮する。なお、柱-はり接合部パネルのせん断変形については弾性とする。

(2) はりは、両端の曲げ変形に関して、鉛直面内回転自由度だけを考慮した分割はりモデルを用い、図2に示す武藤 清工学博士の剛性劣化三折線型履歴特性を持つものとする。

(3) 柱は、塑性論に基づき、その材端応力に関して、図3に示すように M_x - M_y - N (X, Y方向の曲げモーメントと軸方向力)の三次元応力空間で、互いに相似なひび割れと降伏の二つの曲面を設定する。

(4) 柱の弾塑性特性は、はりと同様に武藤 清博士の剛性劣化三折線型履歴特性を仮定する。

(5) 各階床板は、剛床を仮定する。この場合、床板各部の面内方向の動きは、その重心位置でのX, Y方向の水平変位と、ねじれ回転の3自由度で表現できる。



注：記号説明

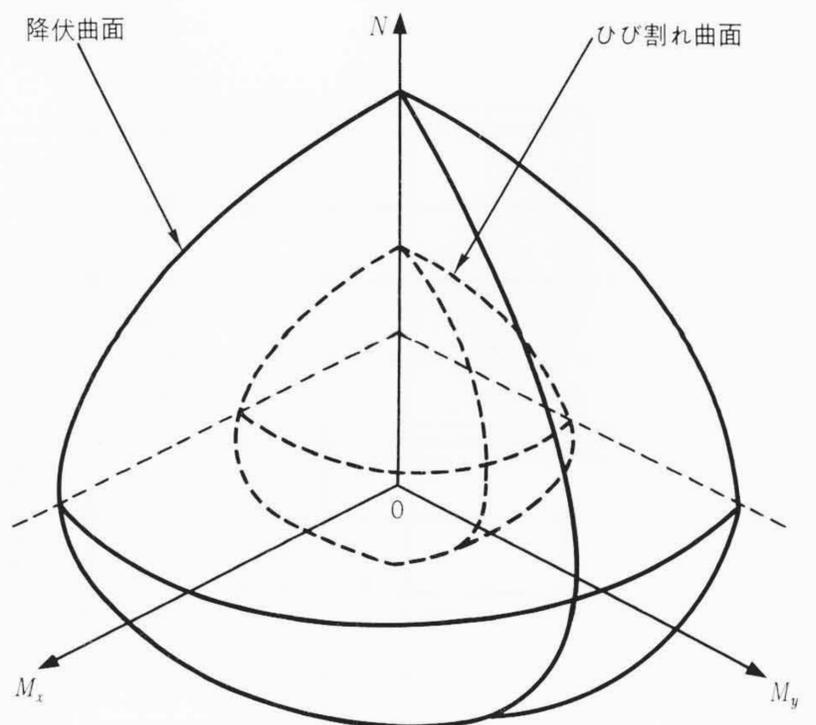
θ_m^Y (降伏時の材端回転角), M (曲げモーメント)

M_m^Y (降伏曲げモーメント), M_m^C (ひび割れ曲げモーメント)

αK [剛性(コンクリートのひび割れ発生後)], pK [剛性(降伏後)]

K [剛性(弾性時)], θ (材端回転角)

図2 材端曲げモーメントと材端回転角の関係 理想化されたはりの力と変形関係を示す。



注：記号説明 N (軸方向力), M_x (x方向の曲げモーメント)

M_y (y方向の曲げモーメント)

図3 柱のひび割れ曲面と降伏曲面 柱のひび割れと降伏が起こる曲面を示す。

3.1.2 地震応答解析

- (1) 立体骨組の釣合い方程式の誘導にあたっては、まず柱、はりおよび柱-はり接合部パネルの局所座標系での剛性行列を求め、それらを全体座標系での剛性行列に変換する。
- (2) 重心位置での骨組全体剛性行列は、前記(1)の全体剛性行列から、重心に作用する外力と重心の変位に関する釣合い方程式に縮約して求める。
- (3) 振動方程式は、床の重心位置での慣性力を考慮した形でたてて、Newmark- β 法($\beta = \frac{1}{4}$)で解く。
- (4) 減衰は、瞬間剛性比例型の内部粘性減衰とする。

3.2 解析例

解析対象建物の基準階平面および軸組図を図4に、骨組の鳥観図を図5に示す。この建物は、X、Y両方向とも6スパンで辺長が29.8mの正方形の辺中央部にへこみを持つRC造30階建集合住宅である。下層階に設計基準強度420 kg/cm²の高強度コンクリートと下層階外柱の断面中心に鉄筋を配置した心筋柱を用いているのが特徴である。

骨組の設計にあたっては、外力に対してはり曲げ降伏先行を想定しており、柱の曲げおよびせん断終局耐力がはりの曲げ降伏時の終局耐力の1.25倍以上あるように断

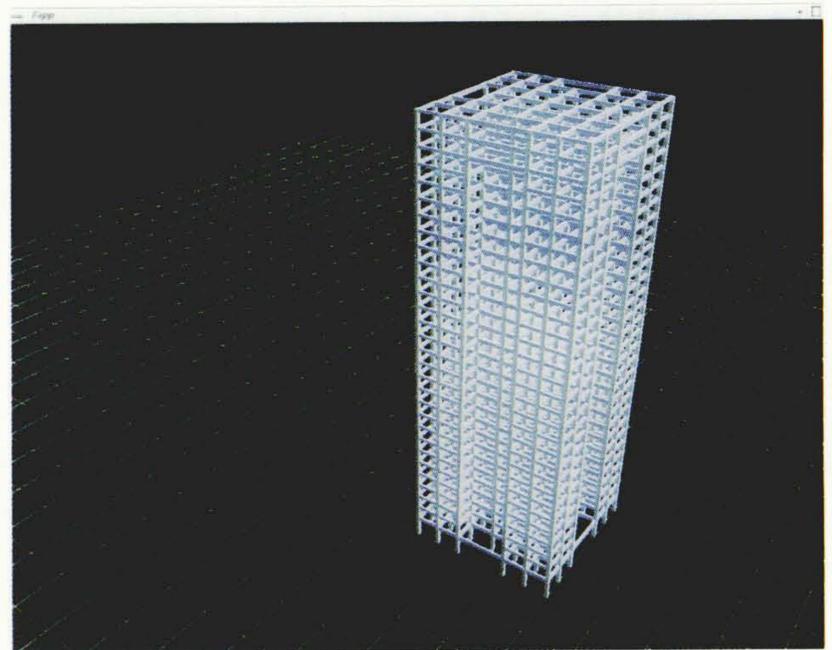
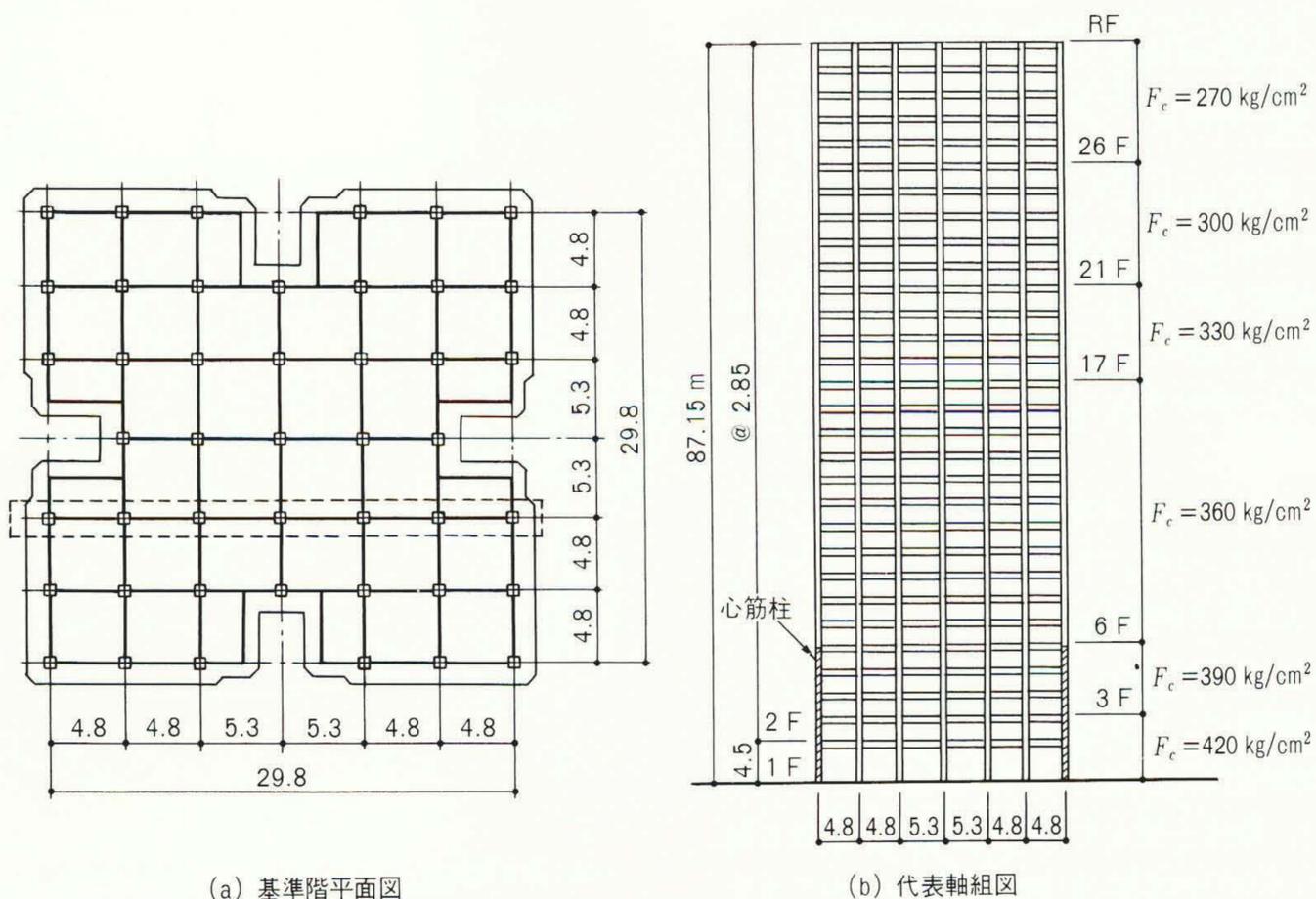


図5 骨組の鳥観図 解析対象建物の骨組の鳥観図を示す。

面を設定している。

解析に用いた地震波は3波(エルセントロ波、タフト波、八戸波)であり、最大地震を想定して各地震波の速度が50 cm/sとなるよう規準化した波を用いる。解析は建物に地震波が1方向から入力する場合と、2方向同時に入力する場合の2ケースを行う。



注：記号説明 F_c (コンクリートの圧縮強度)

図4 解析対象建物 解析対象建物の基準階平面および軸組図を示す。

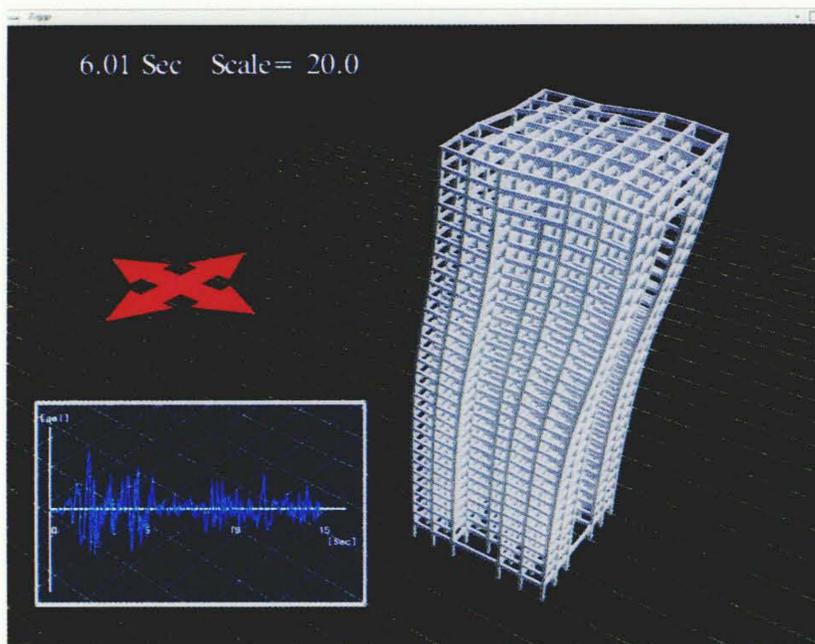


図6 地震時の建物の変形状況 エルセントロ波を2方向から入力したときの、地震発生後約6秒後の建物の変形を20倍に拡大した状況を示す。

エルセントロ波を、2方向から入力したときの地震発生後約6秒後の建物の変形を、20倍に拡大した状況を図6に示す。同図は時々刻々の建物の変形状態の動画の一部であるが、動画を作成することによって地震時の建物の各部の動きがよく理解できる。地震時の層間変形角の最大値と部材の許容層間変形角(0.01 rad)を図7に示す。同図で実線は1方向入力、点線は2方向入力のケースを示すものであるが、いずれの場合も許容層間変位よりも小さい値となっている。地震の応答最大層せん断力と建物の保有耐力とを合わせて図8に示す。いずれのケースも、地震時に発生する層せん断力は保有耐力までには達していないので、建物が地震を受けても安全であることがわかる。

次に、特に高い力を受ける柱の解析結果について述べる。

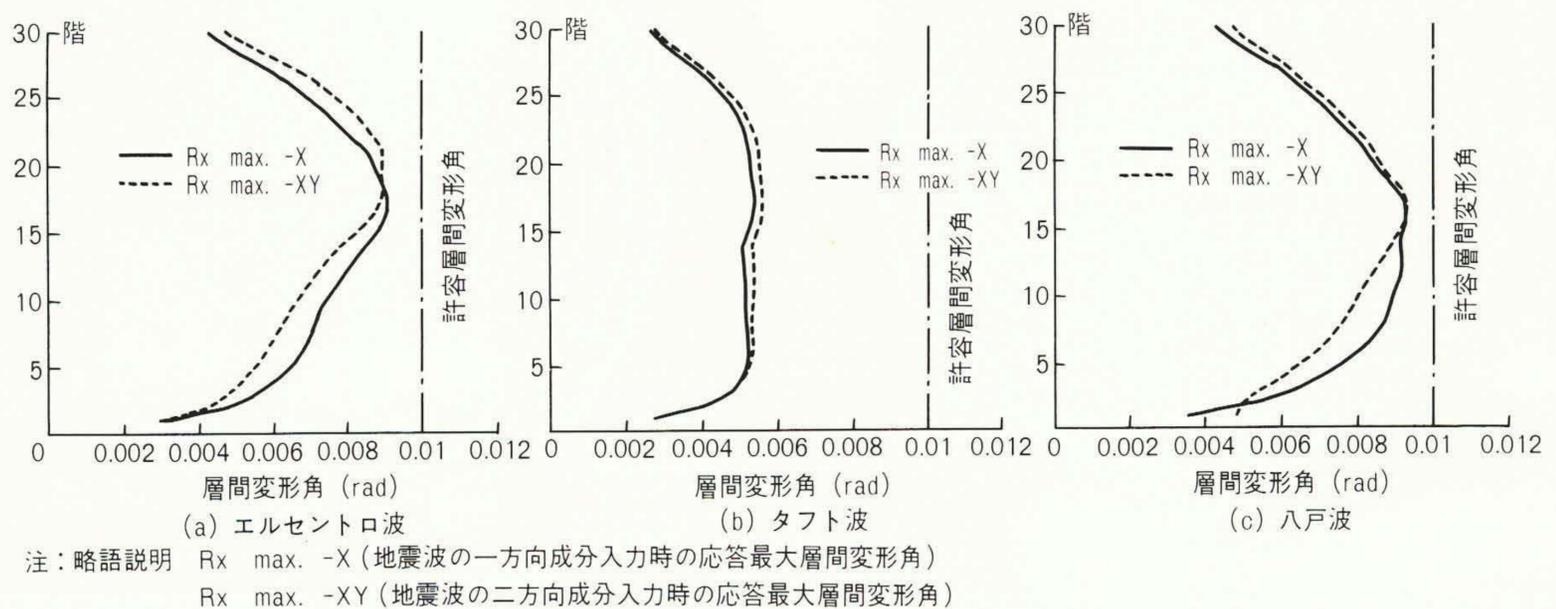


図7 応答最大層間変形角 地震時の層間変形角の最大値と部材の許容層間変形角を示す。

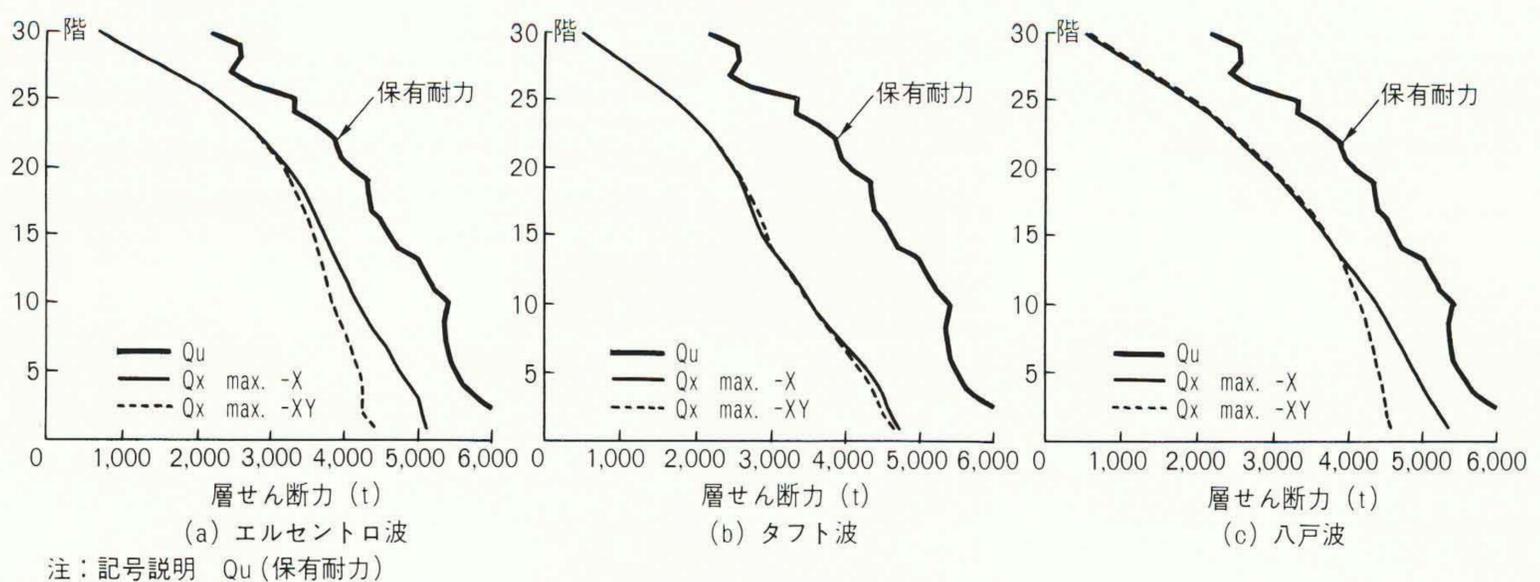


図8 応答最大層せん断力 地震時の応答最大層せん断力と建物の保有耐力を示す。

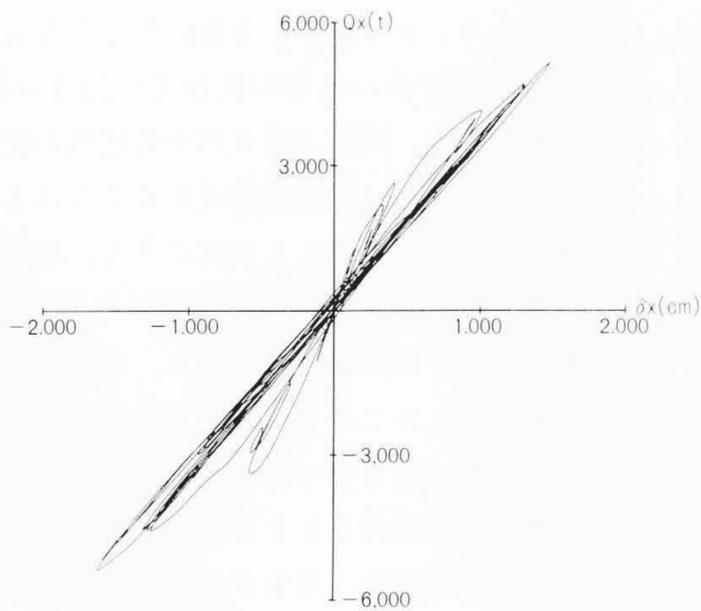


図9 層せん断力-変形の関係(1階)
特に高い力を受ける柱の解析結果の中で、1階の層せん断力と層間変形の関係を示す。

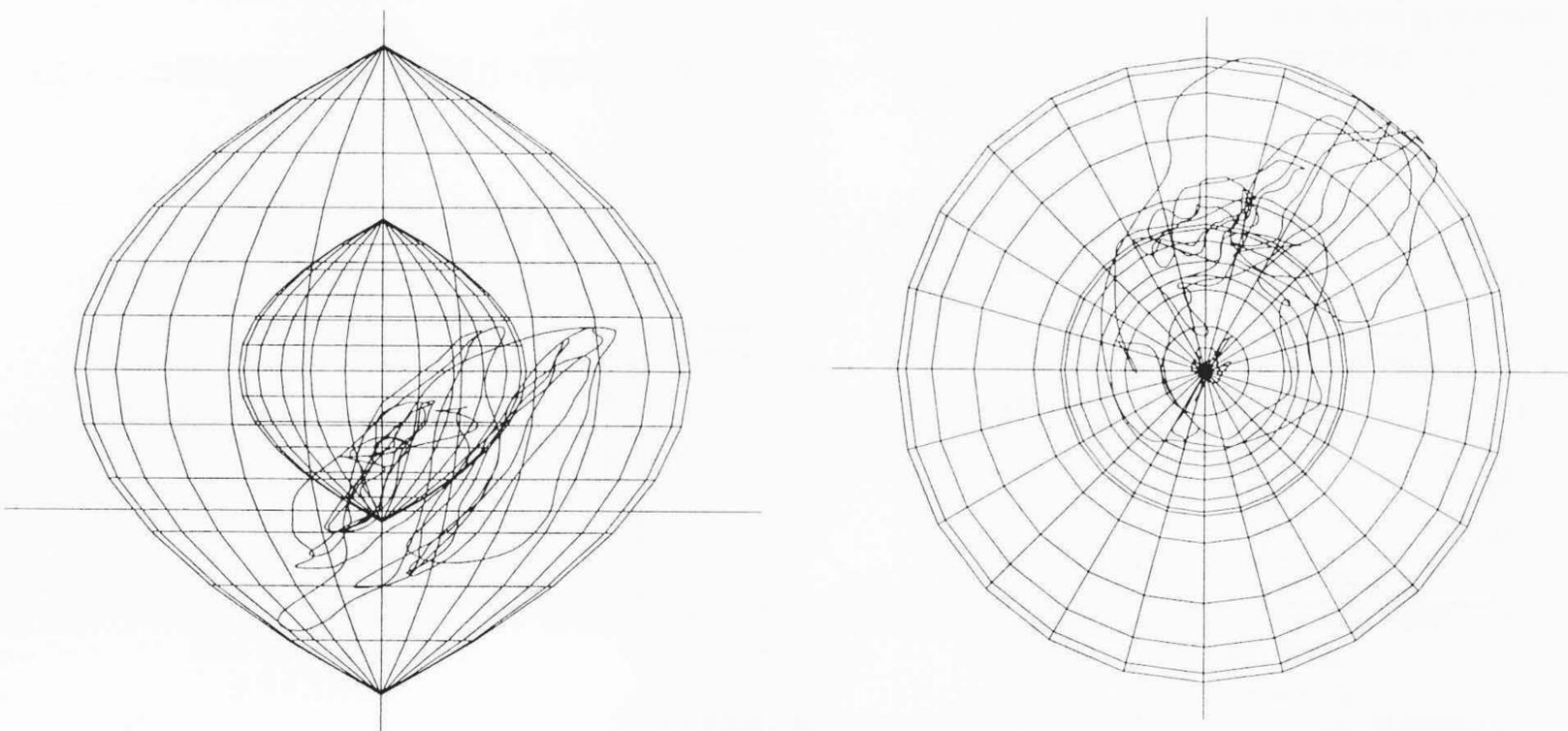


図10 柱が受ける力の軌跡 1階柱のエルセントロ波2方向入力の場合の、地震時に発生する力(M_x , M_y , N)の軌跡を示す。

1階の層せん断力と層間変形を図9に示す。これによると、層全体の変形は許容層間変位(4.5 cm)の半分以下であり、ほとんど残留変形もないことがわかる。1階柱のエルセントロ波2方向入力の場合の地震時に発生する力(M_x , M_y , N)の軌跡を図10に示す。同図から柱が受ける力の詳細が確認できる。

4 おわりに

超高層建物の耐震解析はスーパーコンピュータの出現によって建物をそのままモデル化し、各部材の応力状態を考慮した精算解析が可能となった。最近ますます増えつつある複雑な平面や立体形状を持つ高層建物の設計にあたっては、この種の解析法が非常に有効なツールとなるものと思われる。

参考文献

- 1) 武藤：耐震設計シリーズ/応用編 構造物の動的設計，丸善株式会社(昭和52年)
- 2) 高橋，外：柱の変動軸力と2軸曲げモーメントを考慮した

RC造立体骨組の弾塑性地震応答解析，日本建築学会，第14回情報システム利用技術シンポジウム，61～66(1991-12)