



## 技術解説

## 建物の耐震解析について

井 上 豊\*

## 1. まえがき

東海地方や十勝地方における来るべき大地震の話が取りざたされているが、もし、そのような大地震が起った場合、今度は建物にどのような被害が生じるだろうか。と云うのも、新潟地震（1964年）、えびの地震（1968年）、十勝沖地震（1968年）、伊豆地震（1974年）、大分地震（1975年）など、我が国の最近の地震によっても、それぞれ異った新しい被害の側面が現われている。勿論、建物の設計時においては、地震の作用に対応するような等価な外力（地震力）を定め、他の荷重と組み合わせた上で断面設計が行われている。しかし、建物の耐震設計における地震力は、設計後の建物の力学的特性によって大きく異るとともに、地震動の不規則性、非予測性、また、建物の力学的特性の終局時に至るまでに現われる大きな非線形性を考慮に含めた、広範な耐震解析の結果を一般化した極めて基本的なものである。したがって、具体的な建物の設計に際しては、設計用の地震力を用いるとしても、構造詳細の設計及び施工に至るまで、設計者の細心の配慮が必要なものと考えられる。そのような間隙を衝いて起るような地震被害の諸相をみる時、耐震解析について今一度考えることは、建物のより合理的な耐震設計のために重要なことであろう。

我が国における現行の建築物耐震規定として建築基準法に定められているのは、高さ45m以下の中低層建物に適用される水平震度を用いた地震力の算定法で、地震の作用と等価なものとして、建物各部の重量に水平震度を乗じた力を、その部分に水平に作用させて建物骨組の断面設計を行うこととしている。この水平震度の

値は0.2を基準値とし、地上高さ16m以上の部分では若干割増しをする他、建設地の地震活動度（全国を3段階に区分）、地盤の良否、材料あるいは構造強度の信頼度などによって低減率が与えられている。一方、この耐震規定の適用を受けない高層建築物においては、設計者が設計しようとする建物を振動系モデルに置換し、また、対象とする地震動を適当に仮定して地震時の挙動を計算し、得られた地震応答の最大値を目標として安全となるように建物を設計し、その結果が最初に仮定した振動系モデルの特性と良い一致を示すかを検討し、十分な精度を得るまでこの計算過程が繰返されることになる。

前者は、比較的低い建物を剛に設計することによって耐震性を持たせようとした古くからの考え方による簡便な設計手法であるが、近年、その数を増して来ている5～10階建程度で壁の少ない中高層建物には、必ずしも適当なものとは考えられていない。後者は、個々の高層建築物の固有性を考慮して、可成り詳細な動的解析に基づく検討が行われているが、内でも多数を占める高さが100m未満の建物については、概ね同程度の地震応答が得られている。このような現状から、特に高い建物や特殊な構造によるものを除き、両者を一つに合わせて動的効果を取り入れた設計法の提案もなされている。ここでは、その前提となる建物の耐震解析を眺めてみて、現在指摘されている幾つかの点についてふれてみたい。

## 2. 設計地震動について

まず対象となる地震動について考えてみる。地震の強さとしておなじみなのはマグニチュード(M)であろう。これは地震そのものの規模を表わすもので、気象庁で現在用いられているのは、浅い地震に対する次式の関係である。

\* 井上豊 (Yutaka INOUE), 大阪大学, 工学部, 建築工学科, 助教授, 工学博士, 耐震工学

$$M = 1.73 \log_{10} \Delta + \log_{10} A - 0.83 \quad (1)$$

ここに、 $\Delta$ は震央から観測点までの距離 (km),  $A$ は観測点での最大変位振幅 ( $\mu\text{m}$ ) を表わす。このマグニチュードは地震によって放出されるエネルギーと関係が深く、次式で表わされる。

$$\log_{10} E = 11.8 + 1.5M \quad (2)$$

したがって、例えば、 $M=7.5$  の地震のエネルギーは約  $10^{23}$  erg であり、震央距離 300 km の地点では、最大 1 cm 程度の地動変位が予想されることになる。しかし、(1)式を適用できるのは建物に被害の生じないような微小な地震に対し

てであり、設計の対象となるような大振幅の地動については、この式から推定することは無理である。

地震の規模とは別に、地震による特定の地点の震動の強さについて、気象庁は表1のような震度階を用いて表わしている。前述の幾つかの地震における被害激甚地域では、いずれも震度階V (局所的には震度階VIを含む) と発表されている。なお、同表には目安となる加速度範囲が付記されているが、それによると、建物に被害の生じはじめるのは地動加速度 100 gal (=  $\text{cm/S}^2$ ) 程度以上と考えられる。

表1. 気象庁震度階 (1949年)

震度階	名称	地震の程度	加速度範囲
0	無感	人体に感じないで地震計に記録される程度	0.8 gal (= $\text{cm/S}^2$ ) 以下
I	微震	静止している人や、地震に特に敏感な人に感じる程度	0.8 ~ 2.5 gal
II	軽震	大ぜいの人が感じ、戸・障子がわずかに動く程度	2.5 ~ 8.0 gal
III	弱震	家屋がゆれ、戸・障子が鳴り、電灯などの吊り下げものが相当にゆれ、器内の水面が動くのがわかる程度	8.0 ~ 25.0 gal
IV	中震	家屋が激しくゆれ、座りの悪い器物が倒れ、器内の水があふれ出、歩いている人にも感じられ、大ぜいの人が戸外に飛び出す程度	25.0 ~ 80.0 gal
V	強震	壁に割れ目がはいり、墓石・石灯ろうなどが倒れ煙突・石垣などが破損する程度	80.0 ~ 250 gal
VI	烈震	30%以下の家屋が倒壊し、山崩れ、地割れが起こり、大ぜいの人が座っていることが出来ない程度	250 ~ 400 gal
VII	激震	30%以上の家屋が倒壊し、山崩れ・地割れ・断層などが起こり、地平線に波状の変化が見られる程度	400 gal 以上

表2. 強震計による最大加速度

発生年月日	地震名	観測地点	最大加速度
1940. 5. 18	Imperial Valley	El Centro	0.33 g
1962. 4. 23	広尾沖	釧路	0.38
1966. 4. 5	松代	保科	0.55
1968. 5. 16	十勝沖	八戸	0.23
1971. 2. 9	San Fernando	Pacoima Dam	1.25

このように有被害地震の特性を明らかにし、建物の耐震解析を具体的に行うためには、強震動の観測を行うことが極めて重要であり、米国では約50年前、我が国では25年位前から強震計による地震観測が開始された。その結果、地震動の最大加速度振幅は表2に示すように、年を追って記録が更新され、San Fernando 地震による Pacoima Dam Site においては、図1に示すように実に重力の加速度を超える記録が現われた。しかし、建物被害はこのような最大加速度値に比例する訳ではなく、広尾沖や松代の地震では建物は殆んど無被害であったのに対

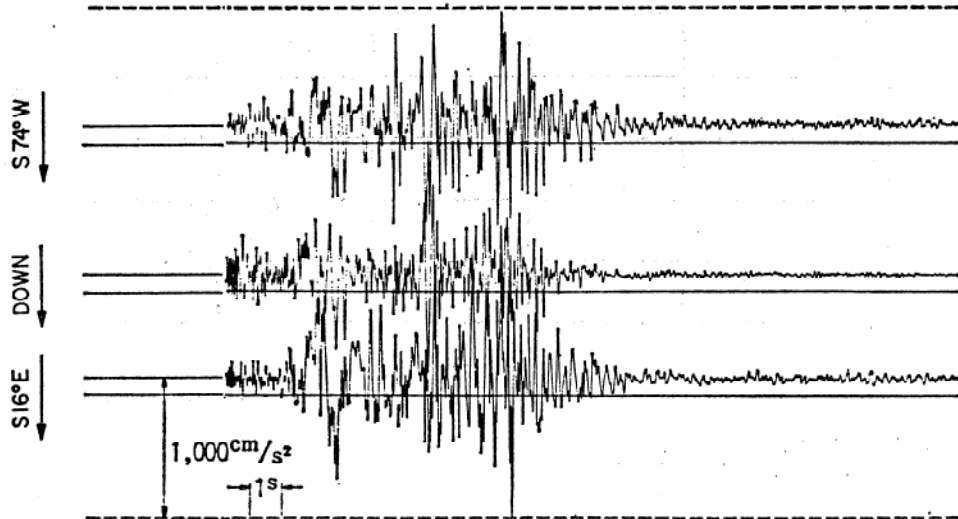


図1. Pacoima Dam の強震記録

し、十勝沖地震時の八戸では、鉄筋コンクリート建物数十棟に大被害が生じた。

強震記録波形は、このような震害状況の解析にも用いられるが、さらに複雑で不規則な波形の中から一般的な性質を明らかにして、建物の耐震解析のための入力を設定しなければならない。このような不規則波形の特性を量的に明らかにするには、スペクトルに関する解析が適当である。通常多く用いられるのは、これを1自由度系の入力とし、系の最大応答をその固有周期の関数として示す応答スペクトル法で、狭帯域フィルターを通すことに対応しよう。このような解析を多くの強震記録に適用した結果から、1自由度系の加速度応答が最大となる時の系の固有周期は、地震のマグニチュードが大きい程、震央距離が大きい程、また観測点の地盤が軟い程、長周期側に現われることが明らかとなって来た。これは複雑な地震波形の持つスペクトル特性が、これらの要因で変動することを意味しており、したがって、耐震解析において重要となる建物に対する最も不利な地震動は、その固有振動特性に関連づけて選ぶ必要のあることを示している。

ある建物の設計を意図して地震応答解析を行う際に、建設地に将来起りそうな地震を過去の震害記録から推定し、例えばマグニチュードや震央距離に関する資料から、最大加速度振幅や卓越する周期成分を定めて、類似の強震記録波形を選び出すか、あるいは、そのようなスペク

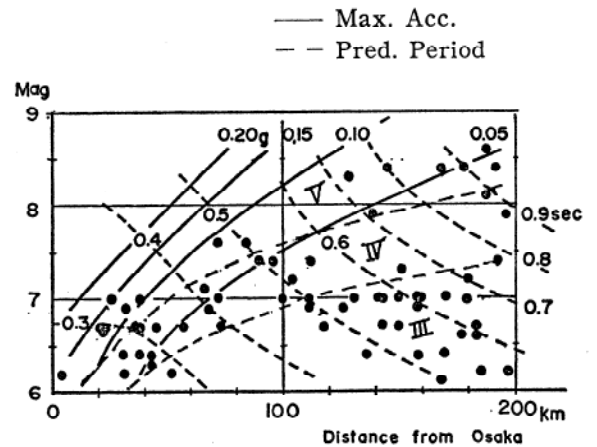


図2. 大阪を中心とした地震分布 (文献1)による)

トル特性を持つような模擬地震波を作製することが考えられている。1例として、大阪地方についての解析結果を図2に示す。図から、対象とすべき設計地震動として

M=7,	$\Delta=20\sim40$ km
7.5,	60~100 "
8.4,	120 "

が挙げられ、その最大加速度振幅と、卓越周期成分の組み合わせから得られる3種の地震動に対して、耐震解析を行うことが必要とされる。

### 3. 建物に関する解析パラメータについて

建物の地震応答解析において、設計地震動の特性とともに極めて重要な要素は、構造物から定められる振動系モデルの動力学的特性である。

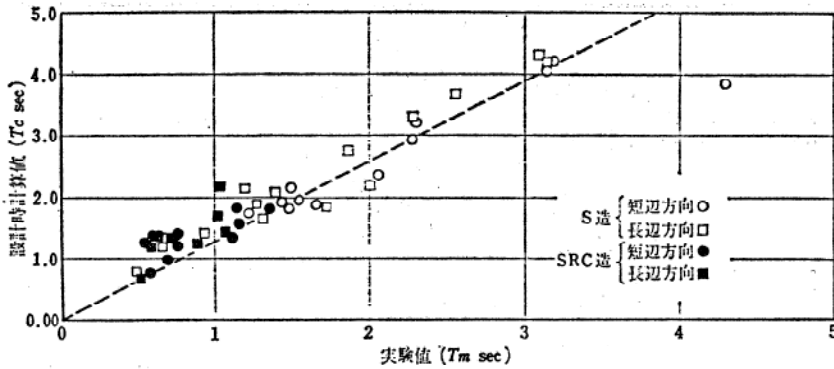


図3. 建物基本周期の実験値と設計時計算値の比較 (文献2) による)

一般に建物の概括的な振動特性を表わすモデルとしては、各階床位置に質量を集中させ、また、横力に対する架構の変形解析から各層の水平剛性を求め、これをバネ特性とした質点系が用いられている。このようにして定められた系の固有値解析から固有振動特性が得られるが、特に基本周期については、これが地震応答量を大きく左右する極めて重要な指標であり、計算値を確認するために、建物施工時に振動実験を行って理論値との比較がなされている。実験値は起振器を用いた定常加振による共振曲線から求めた場合や、常時微動波形のスペクトル解析から卓越振動数を求めた場合などで、理論解析時の振幅と実験時におけるものとは若干の差異があり、結果に影響を及ぼすと考えられるものの、高層建築物について両者の比較を文献2) によって示すと図3のようになる。最小自乗法を用いた直線式によって表わしたものが次式である。

$$T_c = 1.26 T_m \quad (\text{鉄骨造})$$

$$T_c = 1.56 T_m \quad (\text{鉄骨鉄筋コンクリート造})$$

ここに  $T_c$  は設計時計算値、 $T_m$  は実験値を表わす。すなわち、計算値は実験値の20~50%も大きい値を示しており、地震応答解析に用いるべき振動系モデルの基本周期は、不確定要素を考慮に入れて若干の変動幅を持たせる必要があると思われる。

同じく線形系の振動特性として重要な指標である基本振動の減衰比について、実験結果<sup>2)</sup>によると、鉄骨造で0.5~2%、鉄骨鉄筋コンクリート造で1~4%と得られている。コンクリートの非弾性挙動の影響などによって後者がや

や大きい値を示しているものの、同じ構造種別であっても4倍もの開きのある結果となっており、応答解析にあたっては減衰比の値にもある変動幅を考慮すべきであろう。さらに、減衰性に関しては、一般の耐震解析において、高次振動に対する減衰比が固有振動数に比例して増加する内部粘性型が多くの場合仮定されているが、実験結果によると、高次振動の振動数に比例して減衰比の増加する例は殆んど見られず、逆に、高次振動に対して減少する例も現われている<sup>2)</sup>。

以上、構造物の弾性域における地震応答解析上のパラメータ値の選び方について、実験結果との比較について述べて来たが、強震動を対象とする応答解析においては、構造物の終局状態に至るまでの非線形復元力特性に対して、応答性状を明らかにする必要がある。したがって、ここでは一般に耐震性の上から望ましい復元力特性として考えられている、靱性に富んだ bilinear 履歴形復元力特性を持つ10質点系を設定し、前述の基本固有周期、基本振動の減衰比、さらに、高次振動の減衰比について、解析パラメータを僅かに変動させた時に、各層間変位に関する弾塑性地震応答に、いかなる影響が現われるかを図4~6に示す。すなわち、図4には基本周期を20%の範囲で増減させた時に、設計時に重要となる最大応答は50%以上も変化することを示している。図5は同様に、基本振動の減衰比を1~4%の間で変化させた場合を示すが、最大応答値に2倍近い開きの生じる層が現われている。図6は、基本振動の減衰比を一定にして、高次振動の減衰比を振動数に比例し

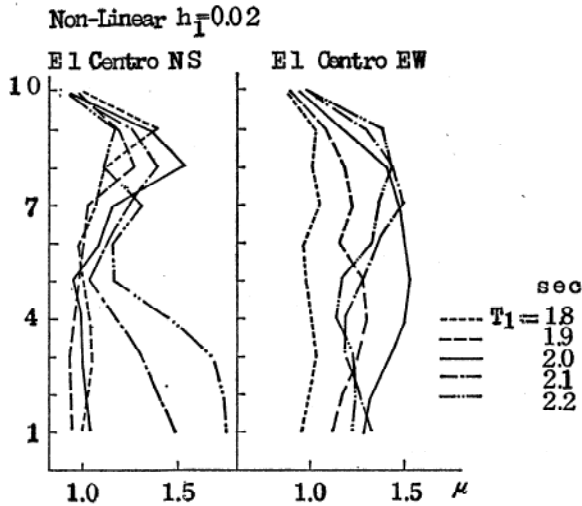


図4. 基本周期の微小な相違に対する応答の比較

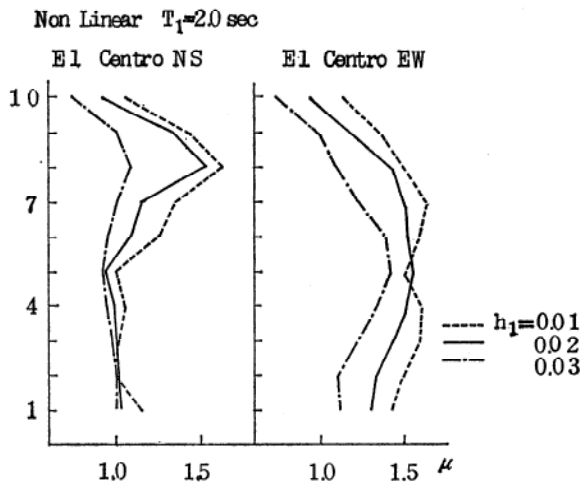


図5. 基本振動減衰比の微小な相違に対する応答の比較

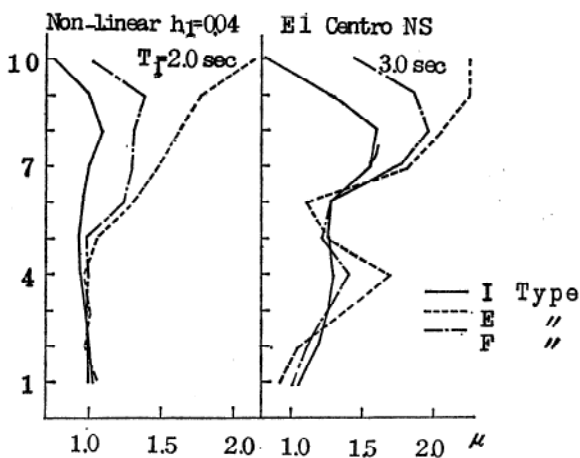


図6. 高次振動の減衰比の相違に対する応答の比較

て増加させた場合を I type, 逆に, 振動数に逆比例して減少させた場合を E type, さらに基本振動と同じ減衰比を高次振動にも与えた場合を F type として応答の比較を示したもので, 建物頂部付近での応答値の開きが大きく, 2倍以上となって現われている。

このように, 建物をモデル化して設定した振動系に与えるべき解析パラメータとして, 計算値の不確かさや実験結果のバラツキを考慮するものとする, 弾塑性応答は可成りの変動幅を有することとなる。したがって, 狭いパラメータ域での耐震解析結果に基づいて建物を設計する場合には, 応答値の変動を前提として安全性検討を行う必要がある。

#### 4. 地盤—構造物の相互作用について

建物の地震時の挙動を的確に明らかにするためには, さらに, 建物の支持地盤あるいは周辺地表層地盤の動的特性, そして周辺地盤によって定まる建物の基礎構造の特性を動的モデルに含めて考えねばならない。すなわち, 建物周辺の地盤の動的性質は, 建物へ作用する地震動のスペクトル特性に変化を与えると同時に, 地震時の建物の振動性状に大きい影響を及ぼすことが知られている。

このような地盤と建物との動的相互作用を明らかにするために, 幾つかの動的モデルが提案されて来た。それらの解析結果が示すところによると, 建物周辺地盤は建物に対して複素バネ作用を示し, 連成系の基本周期を大きく伸ばすことによって地震動とのスペクトル関係を変化させ, また, 建物の振動エネルギーが地盤に波動エネルギーとして伝えられ, これが3次元的に地中に伝播することによるエネルギー減衰効果を示す。

このような連成効果を量的に明らかにするために, 次のようなモデルを想定する。まず, 半無限あるいは成層をなした3次元地盤上の基礎を加振した時, 基礎変位を弾性波動論に基づいて解き, 地盤—基礎系の力—変位伝達特性を求める。これは基礎変位の複素周波数応答を示すもので, 基礎のダイナミック・コンプライアンスと呼ばれている。その実数部は主として系の

バネ作用と、虚数部は減衰作用と対応づけられる。このコンプライアンスは、地盤の3次元的拡がりを考慮して得たものであり、バネあるいは減衰作用の周波数依存性が正当に評価されている。したがって、この下部構造に建物を接続することによって、地盤—構造物連成系の振動特性の解析が可能となる。

また、地震時において構造物周辺地盤には局部的に強い非線形化が生じることが予想され、したがって、建物に対する地震外乱の緩衝作用、地震動スペクトル特性に対するローパスフィルター効果、非線形履歴に伴う系の減衰作用の増加など、地盤—建物連成系の地震応答性状に複雑な影響を及ぼすと考えられる。これらの影響を評価するために、基礎に接した地盤の薄層を考え、これを非線形化する境界層地盤として設定することによって、地盤連成効果の非線形域における考察も可能となる。

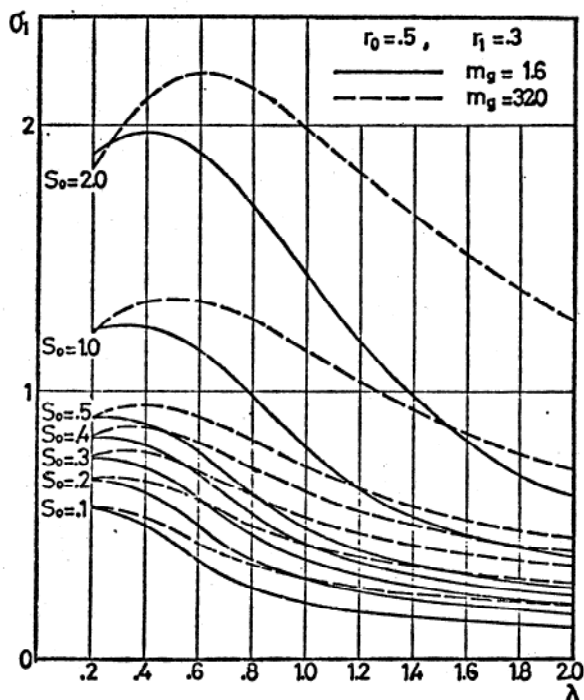


図7. 下部構造の連成度に対する上部構造弾塑性応答の変化

以上のような弾性地盤—弾塑性境界層地盤—弾塑性質点系上部構造からなる連成系の、ランダム性外乱に対する動的応答を、非線形復元力特性に確率統計的な等価線形化法を適用して求め、一例を図7に示す。図の横軸は上部構造に対する下部構造の連成度を表わし、 $\lambda$ の値が増加するにつれて連成度が増すことを示している。また、パラメータは外乱強度を表わしている。建物の弾性域における応答は、地盤の連成に伴う減衰性などで減少し、連成効果は有利に作用するが、弾塑性域における応答は、下部構造系のローパスフィルター特性によって増幅される場合があり、連成作用は必ずしも有利とはなっていない。

### 5. ま と め

建物の耐震性を明らかにして合理的な耐震設計を行うためには、建物を振動系モデルに抽象し、適当に地盤連成作用を考慮した上で、対象とすべき地震動に対する地震応答解析を実施する必要がある。この地震応答解析を構成する重要な要素である設計用の地震動特性、モデル化された建物の動的特性を表わすパラメータ、また、地震動及び建物の特性に大きい影響を及ぼす建物周辺地盤の効果について、最近の研究成果などを反映させながら問題とすべき点について述べて来た。そして、これらは互に有機的な関連を有しており、個々の具体的な地震動・地盤・建物を対象として耐震解析を行う時には、ある程度明確に規定することができよう。

### 参 考 文 献

- 1) 吉川宗治：関西地方における史料からみた震災の可能性，建築と社会，第52輯，第9号，(1971)。
- 2) 建築物の耐震設計資料44，実在建築構造物の振動特性（その1），建築雑誌，昭和47年10月号。