

## [ 特別講演 ] 鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計の一方向

正会員 東京大学助教授 青山博之

### 1. 序

構造物の安全設計は、本来、構造物の破壊（鉄筋コンクリートの場合はひびわれなどの限界状態も含めて）がどのような条件のもとで起こるかを予見する破壊予測技術を前提としている筈である。耐震設計にこのことをあてはめるなら、我々は将来おこるべき地震動の概略が想定でき、その地震動による構造物の挙動がシミュレートでき、そして破壊がおこらないことを確認する、という技術がなければならぬことになる。個々の構造物の設計はもっと簡便な方法で実施するにしても、それはそのような技術によって確かめられた方法でなければならぬし、個々の構造物についても、その気になればシュミレーションで安全性が確認できるという準備があるのが当然である。

このような観点から、鉄筋コンクリート（RC）建物——我国では現在のところ中低層建物に限られている——の耐震設計法を眺めてみると、きわめて不十分、不完全であると言わざるを得ない。RC構造について多数のすぐれた実験的、理論的研究がありながら、それらを集大成して地震時の建物の挙動を予測する解析技術を開発し、その結果を設計法に反映させるという努力は、やっと最近はじまったばかりのように感じる。一方実務においては現在も静的設計震度にもとづく耐震設計が行われている。たとえ研究的には不十分であろうとも、動的な考慮を設計に反映させ、より確認された耐震安全性を持つ建物を設計する途を開くことは、研究者の義務であろうと思う。本稿はこのような問題意識に立って、筆者の身近な範囲での研究努力を概観したものである。

2章においては十勝沖地震以後、被害予測技術の急速な発展があったことを述べ、3章では上記に立脚して展開された耐震略設計の一方法の提案を説明し、4章では被害予測技術の最近の発展と設計への適用に際しての今後の一方向について述べる。

### 2. 十勝沖地震被害の解析

1923年の関東地震や1948年の福井地震などとは異なり、十勝沖地震のあとの研究では、超高層建築の耐震設計のために開発された動的地震応答解析の手法が、3～4階ぐらいの低いRC建物の研究に活用された。強震観測による地震波の測定、電子計算機を利用した地震応答解析、鉄筋コンクリートの部材や構造物の実験による非線形挙動の観測など、最近の研究成果を生かして、被害が計算によって定量的に説明出来るか、いわば被害を計算機により再現出来るかどうかを試みられたわけである。

ここでは3つの被害建物について行われた研究を例にとり上げ、方法論的にそれぞれの研究の特徴を要約してみよう。<sup>1)</sup>

八戸高専：被害建物の実物実験、実験室での実大実験により部材の破壊形式を分類する規範を作り、特にせん断でこわれる部材の復元力特性をモデル化する方法を開発した。建物の復元力は骨組の特性から塑性域では柱のみが変形する平面内のせん断系とした。地震入力としては強震記録の他強震計の計器特性、地盤特性を考慮して補正した波形を用い、建物の破壊過程を追跡した。

八戸図書館：建物を剛床が平面内で自由に運動する3自由度系にモデル化し、床を支持する各柱の

復元力を2方向の bi-linear に、壁は1方向の bi-linear に仮定した。地震入力を実際の強震記録の水平2方向成分を同時に用い破壊過程を検討した。

八戸市庁舎：建物全体としての解析は壁を含めて剛性マトリックス法により行い、一部の部材への応力集中を検討した。ペントハウスの解析にあたっては、ペントハウス基部のロッキングを考慮したせん断系立体弾塑性モデルを作り、これに建物頂部の応答波形から得られる水平方向およびねじれ成分を入力し最上部の倒壊を検討した。

これらの研究により地震被害はかなり良く説明され、地震入力との関連も議論された。また建物の構造を一部変更した場合の効果などについても、有益な知見が得られた。

低層RC建物の地震応答解析法には幾多の複雑な問題点があり、上記の諸研究はそれらの問題点を認識しつつも十分な説明は行えないままに、やや強引に結論を求めた傾向がないとはいえない。そのような欠点にもかかわらず、低層RC建物の被害予測のためには地震応答解析を現実のRC構造の特性に立脚して行うことが最善の方法であることは、十分に示されたと考えられる。

### 3. 耐震設計の基本方針と設計条件の分類

#### 3.1. 地震動と被害程度の想定

前述のような十勝沖地震の遺産の上に立って、動的地震応答解析によって安全であることが確かめられるような無被害建物を設計してみようという試みが行われた<sup>2)3)</sup>。ここではそのうちで、特に構造計画の段階で考慮される耐震略設計の方法について述べる(この部分は岡田恒男博士に負うところ大である)。

動的解析による地震被害予測を反映した設計法を考える際の前提として、第一に将来生じるであろう地震動をどのようなものと想定するか、第二にそれによる被害をどの程度まで認めるか、という2点が決められなければならない。ここでは議論を進めるための仮説として、以下のように考える。第一の地震動については通常超高層建物の動的耐震設計に用いられるような波形の地震動数種を用い、その入力震度(最大加速度を $g$ で除したもの)として $k_G=0.3$ および $0.45$ を想定する。第二の被害程度については、純ラーメン式および耐震壁を多用する形式の2種の建物を対象として、 $k_G=0.3$ の入力震度では純ラーメンは曲げ降伏に達する程度、耐震壁はせん断ひびわれが発生する程度とし、 $k_G=0.45$ の入力震度では純ラーメンは全体が崩壊しないこと、耐震壁は破壊に到らないことを目標とする。

これはあくまで当面の作業のための仮の考え方であって、数値そのものには格別の根拠はない。この点については多くの研究の蓄積と社会情勢の考慮の上で立って建築技術者の合意が成立する方向に向わねばならないと考える。

#### 3.2. 破壊形式と設計条件

中・低層RC造建物の耐震性能を、建物の水平力に対する強度と地震時の建物の応答量との関係により分類し、耐震設計として許容しうる建物の性質を調べてみる。

RC造建物に水平力が作用して終局状態に至るまでの破壊のパターンを大別すると、はりや柱の端部に曲げ降伏が生じて、いわゆる降伏ヒンジが形成される場合と、はり・柱あるいは耐震壁などにせん断ひびわれが発生し、それが進展して破壊に至る場合とがある。ある建物について、曲げ強度、すなわちその建物がせん断破壊しないとして求めた曲げ降伏時の水平力と、せん断強度、すなわちその

建物に曲げ降伏が生じないとして求めたせん断強度時の水平力を、ともに1階における層せん断力係数で表わし、たて軸にせん断強度CSを、横軸に曲げ強度CBをとると、建物が曲げ降伏形であるかせん断破壊形であるかは図-1の原点を通る45°線で行けることができる。

つぎに、建物の地震時の応答量を適当に想定した復元力特性に基づいて算定すれば、ある大きさの地震をうけるときに建物がその地震に強度で抵抗できるか(強度設計)、あるいは塑性範囲の変形を建物に許容しなければ耐震設計が行えないか(変形設計)の分類が、建物の強度と建物の1階の応答層せん断力係数CEとを比較することにより可能となる。CEを強度検定用層せん断力係数と呼ぶことにする。図-1において、建物の曲げ強度およびせん断強度がともにCE以上の範囲では強度設計が可能であり、耐震設計として許容しうる範囲となる。

これ以外の範囲は、いわゆる変形設計を行わねばならない場合であるが、せん断破壊はじん性かとほしいから耐震設計としては許容できない。また、変形設計では地震時に建物の変形が過大になってはいけなから、ある変形制限がされねばならない。後述のように建物の塑性範囲における応答変位は想定する地震の大きさに応じて建物の曲げ降伏強度をある程度以上大きくしておけば過大になることはないので、その限界強度を1階における層せん断力係数Ccrで表わし、Ccrを変形限界層せん断力係数と呼ぶ。このCcrを用いて、間接的に変形制限を設けると図-1において変形設計が可能となる範囲が決まる。

このようにして建物の性質を分類すると図-1にCase A、Case B、Case Cと記入した範囲のみが耐震設計として許容しうる範囲となる。図-1を用いることにより、設計しようとする建物の設計目標(どの範囲の建物を作るか)に応じて建物に必要な曲げ強度およびせん断強度を知ることができる。

### 3.3. 具体例

入力震度0.3および0.45の場合について図-1に具体的な数値を代入して描き直すことを試みる。

強度検定用層せん断力係数(CE)：図-3(a)(b)は4種の地動に対して、耐震壁を想定した原点指向形の復元力特性(図-2)を用いて、1質点系の地震応答における塑性率(ひびわれに相当する第1折点を基準にとる)を計算したもので<sup>3)</sup>、(a)はひびわれ震度 $k_c$ が入力震度 $k_G$ の2倍、(b)は同じく3倍の場合である。これを見ると $k_c = 2 k_G$ とすると塑性率6以下で破壊強度(震度) $k_y$ 以下におさまり、 $k_c = 3 k_G$ とするとほとんどひびわれ以下におさまることがわかる。従って $k_G = 0.3$ に対し耐震壁にひびわれ発生程度、 $k_G = 0.45$ に対し破壊させないという条件を満足するには $CE = 0.9$ というひびわれ強度をとればよい。建物が曲げ降伏形の場合にも曲げ降伏強度を $CE = 0.9$ にとれば、 $k_G = 0.3$ に対し降伏せず、 $k_G = 0.45$ に対しても降伏前後にとどまる(後述のCcrに対する検討参照)。

変形限界層せん断力係数(Ccr)：図-6(a)(b)は4種の地動に対して、曲げ降伏する構造物を想定したD-TRI形の復元力特性<sup>4)</sup>(図-4)を用いて、1質点系の応答塑性率(降伏点を基準にとる)を計算したものである<sup>3)</sup>。D-TRI形の変位応答スペクトルは通常図-5のように、 $k_y$ が $k_G$ より小さいと短周期範囲で極端に大きく一定値になる傾向がある。図-6(a)は $k_y = k_G$ の場合で、短周期でも塑性率4程度以下におさまり、(b)は $k_y = 1.5 k_G$ の場合で、塑性率2以上になる。従って、 $k_G = 0.3$ に対し降伏前後、 $k_G = 0.45$ に対し崩壊させないためには、 $Ccr = 0.45$ という降伏強度が必要

になる。

以上の数値を用いて図-7を作成した。

同図には1968年十勝沖地震の際の被害および無被害建物の概略の位置をも同時に記入した。また、同図には1971年サンフェルナンド地震で被害を生じたオリビュー病院の特性も記入した<sup>5)</sup>。オリビュー病院の場合には入力震度がかかなり大きく、実効入力震度は0.6程度と推定されているので、図中では安全な範囲にかなり近いが、被害は小さくなかった。

以上のように、あらかじめ想定する入力震度の大きさに応じて図-7を作成しておけば、構造計画特に耐震略設計の段階において、設計目標に応じて建物にどの程度の強度を確保すればよいか、あるいは設計法として強度設計法を採用するか変形設計法を採用するかなどの選択を容易に行なうことができる。

#### 4. 耐震性の解析的検討

##### 4.1. 地震応答の精解析

建物の耐震性は、耐震設計の手順が完全に合理的かつ合目的であれば、設計が終った段階で自動的に満足すべき水準が実現されている筈である。しかし前章に示したものは耐震略設計用の一般的なguide lineにすぎないものであるから、設計の結果でき上がった計画建物の耐震性をあらためて検討することは、実際問題としてしばしば起ってくると考えられる。特に耐震設計立案の段階では多くの試設計について、その耐震性をできるだけ現実に則してチェックする必要にせまられる。

十勝沖地震直後の震害解析が契機となって、急速に発達した低層RC建物の非線形地震応答解析については2章に略述したが、その後残されていた多くの問題点を現時点で最善の形に解決した解析法が、滝沢春男博士により開発された。それは、構造物をはり、柱、接合部、耐震壁の各要素の集合体としてとらえ、おのおのの要素の復元力特性を実験データにもとづいてtri-linear型に理想化し、静的繰返し水平力に対して解析する筆者等の方法<sup>6) 7)</sup>に修正を加えて動的解析へ拡張したものである。すなわち各時間増分ごとに各要素の瞬間剛性を決定し、変位の適合条件により連結して構造物としての瞬間剛性を求め、弾塑性地震応答を逐一計算してゆく方法であって、以下精解析と呼ぶ。<sup>8) 9) 10)</sup>

この方法によって地震応答を解析すると、構造物全体の崩壊モードも正しく決定され、また各部材の応力と変形の履歴からその損傷の程度も推定できるので、耐震性の解析的検討のためには最良の武器である。しかし大容量の計算機と長い計算時間を要するので、いろいろな試設計に適用するのには実用上の困難がある場合が多い<sup>3)</sup>。

##### 4.2. 地震応答の略解析

上述の欠点を補うためには、精解析の精度を本質的にはそこなわないで建物の地震応答を推定できるような、簡略化されたモデルが必要となる。従来、いわゆるせん断系モデルがこの目的にしばしば使われてきた。せん断系モデルは各層ごとにせん断力と層間変位との間の復元力特性に独立の対応をつけるものであり、各時間増分ごとの瞬間剛性の決定を各層で直接行うことができるから、精解析とは比較にならないほど計算が簡略化される。

せん断系モデルを、建物の各部材の特性から構成する方法には、いわゆるD法(水平力分布係数法)のように各層の各柱を個別に取上げてゆく簡単な計算によるものから、構造物全体を漸増載荷または

漸増強制度形に対して精解析することによって求めるものまで、各種の方法が考えられ、現在4種類の方法がある。<sup>3) 8)~10)</sup>せん断系モデルの応答結果と精解析の結果を最大変位について比較した例を図-8に示す。図-8(a)は建築学会RC規準付録の設計例1の建物、(b)は例2の建物で、いずれもラーメン構造3階建(耐震壁なし)で、図はその桁行方向の場合である。地震入力は一戸N-S、500galとした。

各種のせん断系モデルの応答の間にはあまり大きな差異はなく、せん断系モデルであればどのような方法で作ったモデルでも応答解析結果は大してちがわないといえる。図-8(b)の場合は、精解析とも比較的良く一致している。しかし(a)の方では、1階と2階の変位の大小関係が異なり、せん断モデルの近似度は十分といえない。(b)の建物は外周ラーメンに壁ばり(wall girder)がついていて柱崩壊形の要素が強く、精解析での崩壊モードも柱崩壊形になっているのに対し、(a)の建物はふつうのラーメンで構成されていて柱にくらべてはりが弱く、精解析では1階と2階がはり崩壊形のメカニズムになっている。せん断系モデルは、柱崩壊形の構造物に対しては良い近似であるが、はり崩壊形のときには柱の層間連成効果を表現していないため精度が悪いのである。

精解析によって崩壊モードがわかっている時には、崩壊自由度数に等しい自由度を持つ系を作れば、良い近似を与える。連層耐震壁を含む骨組ではじめから自由度1のはり崩壊形になるとわかっている時も同様である。<sup>10)</sup>

ラーメン構造で崩壊モードが水平外力分布により変ったりして崩壊自由度が決定しにくい時、柱の層間連成効果を非線形復元力特性を持つバネ $K_B$ で表わして、図-9のようなモデル(仮に曲げせん断モデルと呼ぶ)を作ると、図-8(a)に示したようにかなり精解析に近い結果を得る。<sup>11)</sup>  $K_B$  バネの剛性または降伏強度を零にすればせん断系に一致するので、このモデルは柱崩壊形の場合も含め、一般の略解析に用いることができる。設計が一応完了した段階で耐震性を解析的に検討したいとき、精度について一応保証されるこのようなモデルを用いて地震応答解析を行うことが、今後の中低層RC建物の耐震設計の進むべき一つの方向と思われる。

## 5. 結び

1968年十勝沖地震で多数の低層RC建物が手痛い被害を受けて以来、RC構造の研究者と振動論の研究者が協力して、中低層RC建物の地震応答あるいは耐震設計について多くの研究成果が得られた。ここに収めたのはその一部にすぎず、山田稔博士、谷資信博士、柴田明德博士等の業績にふれることができなかつたのは残念である。ここに示した耐震設計の方向はまことに荒削りで未完成の考えを、大担に示したものであり、読者諸士の叱正を待ちたい。

## 参考文献

- 1) 梅村 魁, 青山博之, 「鉄筋コンクリート建物の地震被害の実例とその解析」, 関東大地震50周年論文集, 東大地震研, 1973.9, pp.369~389.
- 2) 「鉄筋コンクリート造校舎の耐震設計」, 学校建築計画, 日本建築学会, 1971.10, pp.511~650.
- 3) 梅村 魁編, 「鉄筋コンクリート建物の動的耐震設計法」, 技報堂, 1973.8, 442pp.
- 4) 深田泰夫, 「鉄筋コンクリート造建物の復元力特性に関する研究(その1)」, 建築学会関東支部研 40, 1969.11, pp.121~124.

5) H.Aoyama and M.A.Sozen, "Dynamic Response of a Reinforced Concrete Structure with "Tied" and "Spiral" Columns", 5 WCEE, Rome, Italy, 1973.

6) 青山, 菅野, 谷, 「鉄筋コンクリート骨組の弾塑性解析」第1報, 論報号外 1968.10; 第4報, 論報号外 1969.8.

7) H.Aoyama & T.Sugano, "A Generalized Inelastic Analysis of Reinforced Concrete Structure Based on Tests of Members", Recent Researches of Structural Mechanics—Contribution in Honor of 60-th Birthday of Prof.Y.Tsuboi, Uno Shoten, Tokyo, 1968.

8) H.Umemura, H.Aoyama & H.Takizawa, "Analysis of the Behavior of Reinforced Concrete Structures during Strong Earthquakes Based on the Empirical Estimation of Inelastic Restoring Force Characteristics of Members", 5 WCEE, Rome, Italy, 1973.

9) 滝沢春男, 「鉄筋コンクリート造建物の強震応答解析」, コンクリートジャーナル Vol.11, No.2, 1973.2, pp.10~21.

10) 滝沢春男, 向井良逸, 藤谷喜朗他, 「鉄筋コンクリート造骨組の強震応答解析(1~5)」, 建築学会大会, 1972.10, pp.621~624; 同関東支部 43, 1973.3, pp.105~112; 同大会, 1973.10, pp.791~792.

11) 向井良逸他, 「鉄筋コンクリート造骨組の強震応答解析(6~7)」, 建築学会大会, 1973.10, pp.41~44.

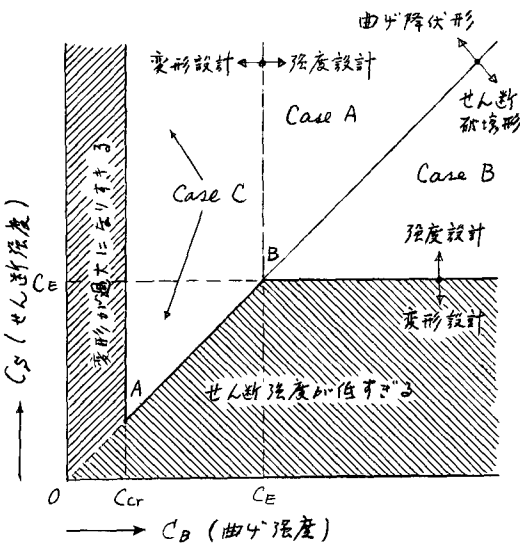


図1 耐震設計条件の分類

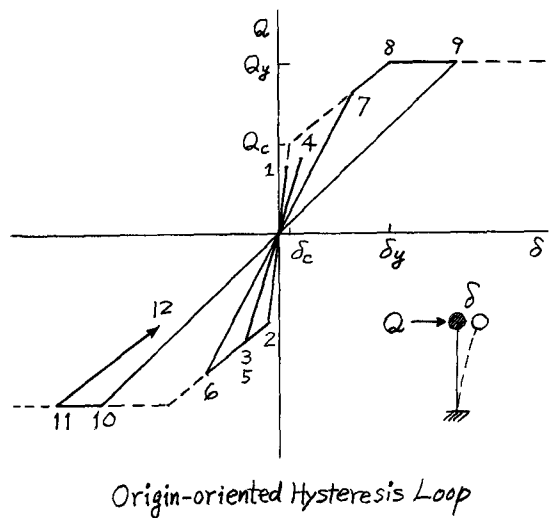
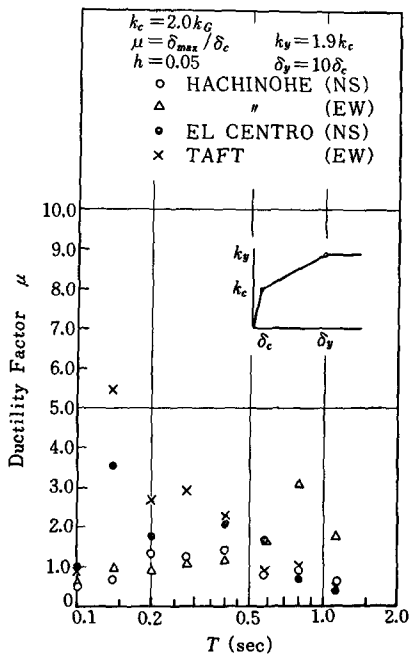
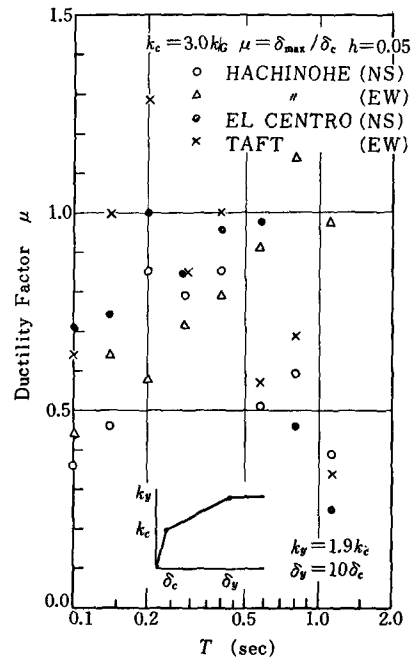


図2 原点指向形復元力特性



( a )  $k_c = 2.0k_G$  の場合



( b )  $k_c = 3.0k_G$  の場合

図3 原点指向形応答塑性率 ( $\mu = \delta / \delta_c$ )

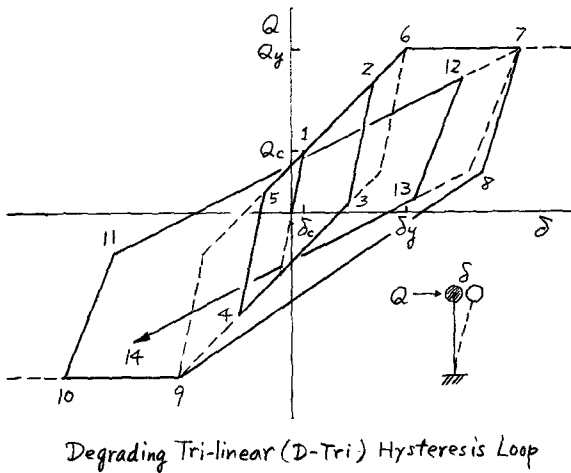


図4 D-TRI形復元力特性

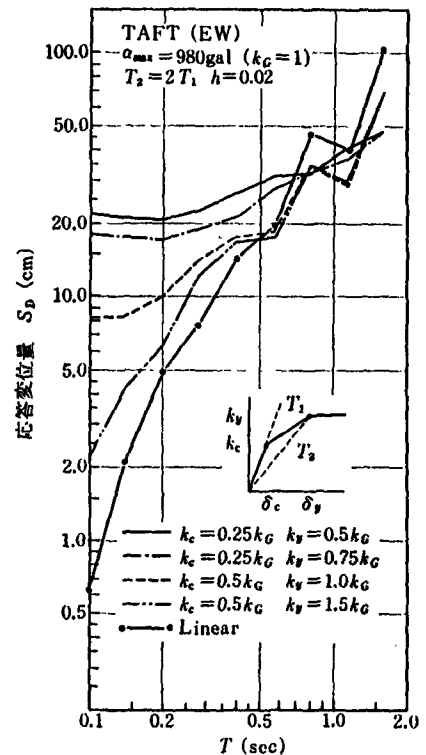
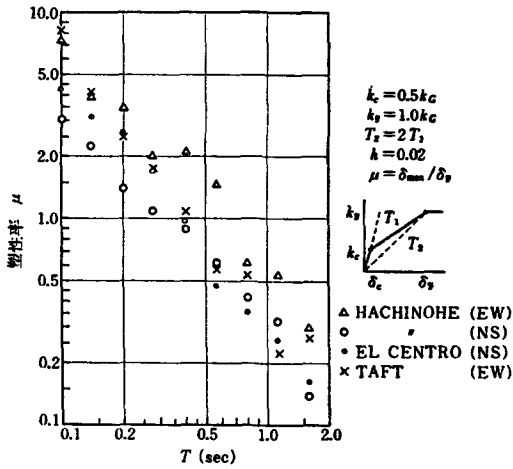
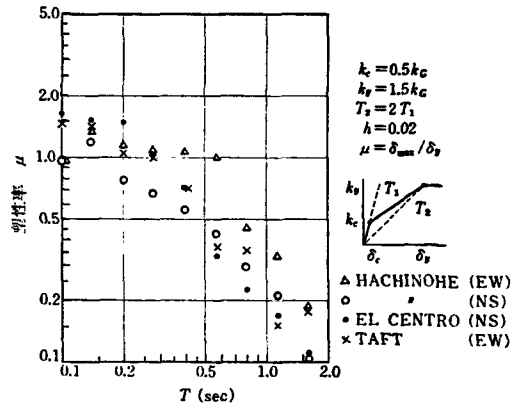


図5 D-TRI形応答スペクトルの一例



( a )  $k_y = 1.0k_C$  の場合



( b )  $k_y = 1.5k_C$  の場合

図 6 D-TRI 形応答塑性率 ( $\mu = \delta / \delta_C$ )

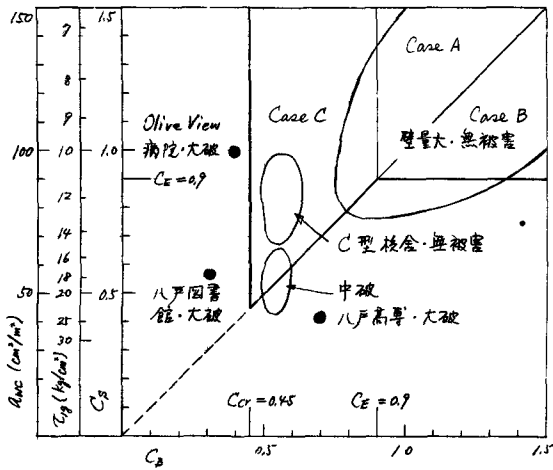


図 7 耐震設計条件の分類 (具体例)

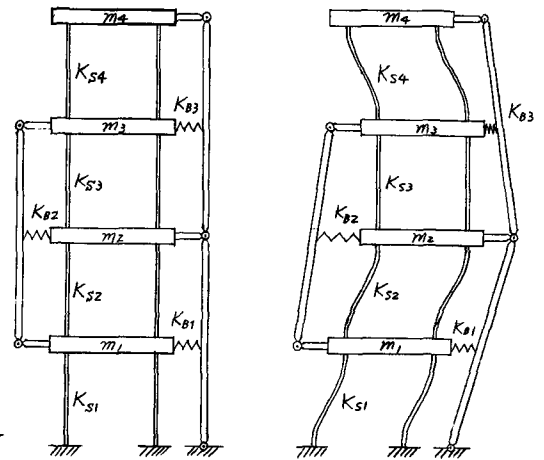
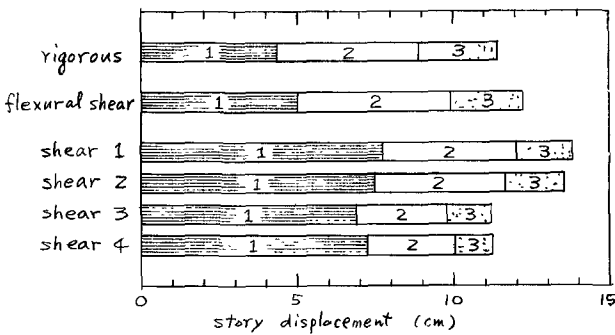
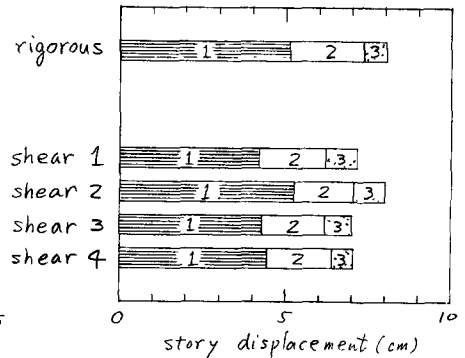


図 9 曲げせん断形モデル



( a ) RC 規準付録設計例 1 (桁行方向)



( b ) RC 規準付録設計例 2 (桁行方向)

図 8 精解析と略解析による応答変位の比較