

[耐震性向上技術]

兵庫県南部地震被害を教訓とした 既存構造物の耐震診断システム

耐震診断システム開発グループ

吉岡 研三	高橋 泰彦
関 松太郎	谷田 雅広 (本社 設計本部設計第12部)
秋山 猛	橋本 康則 (本社 設計本部設計第13部)
(本社 設計本部設計第12部)	

1. はじめに

平成7年1月17日兵庫県南部地震は、近代的な建築物が立ち並ぶ神戸市およびその周辺地区に、甚大な人的、物的被害をもたらした。わが国の建築物の耐震設計法は、過去数度にわたる地震被害を教訓に組み立てられ、改訂されてきているが、現実には、木造家屋を含めて、過去のさまざまな工法、構造設計法によって設計され、建設されている。最新の研究成果に裏うちされた耐震設計法が用意されているにもかかわらず、現実には、新しい設計法で設計された建物は相対的に少なく、過去の設計法で建てられた耐震的に既存不適格の建物が大きな被害を被ることになった。この地震を契機にして、都市防災、人命保全、社会資本、個人財産の保全の観点から、この既存不適格建物に十分な補強を行い、耐震性を付与することの重要性が再認識されることになり、顧客からの多くの診断、補強の依頼を受けることになった。このような要望に応えるため、当社保有の技術を織り込んだ耐震診断、耐震補強システムを構築した。

なお、後述する本システムで設定した目標クライテリアの諸数値については現状の知見をもとに設定されたものであり、今後、必要に応じて修正、追加される予定である。

また、本システムは平成7年の兵庫県南部地震発生後約2カ月ほどでまとめたものである。その後、被災した建物の調査、分析が進み、日本建築センターの「建築物の構造規定」が補強され、新たに「耐震補強促進法」が施行されるに至っている。これらの新しい知見を含めて耐震補強設計のベースとすることによって、本システムは、既存不適格建築物に対して十分な耐震補強を行えるものと考えている。

2. 本システムの全体像

2.1 対象構造物

この耐震診断、耐震補強システムは、既存の鉄筋コンクリート(RC)造建物、鉄骨鉄筋コンクリート(SRC)造建物、鉄骨(S)造建物を対象として、構築したものである。建物高さ31m以下の中低層建物に限らず、60m以下の高層建物、60mを超える超高層建物も対象とし得るのである。下層が鉄骨鉄筋コンクリート構造、上層部が鉄筋コンクリート構造のように数種の構造が混在する場合も、耐震診断、耐震補強設計を行うことが可能である。

2.2 診断、補強設計手法

(1) 耐震診断手法による場合 既存建物の診断、補強設計手法として、高さ31m以下の建物を対象とした(財)建築防災協会の「既存建物鉄筋コンクリート造(鉄骨造)建物の耐震診断基準・改修設計指針」^{1)~3)}がある。本システムでは、特に鉄筋コンクリート建物に関して防災協会の指針に準拠するが、鉄骨造、および高層の建物でも診断・補強設計を行えるように、終局強度設計手法、動的解析に基づく設計法、および建物ごと免震構造とする手法を用意している。1次診断から、3次診断まですべてを行うのではなく、簡略的に1次診断を行い、その結果を判断基準として、別のルートに移行する場合もある。

(2) 保有耐力手法による場合 現行の新耐震設計法に準じた方法であるが、この場合は補強後の保有耐力を必ず計算することになる。保有耐力を計算しない方法は採用しない。

(3) 動的応答解析による方法による場合 主に高層建物、重要構造物などに適用する。この場合も、(2)で必要となる保有耐力は確保する。必要に応じて2方向入力、あるいは上下動の影響も考慮して補強設計を行う。

(4) 免震構造とする場合 歴史的建造物、外観を変えられない建造物などでは、既存の補強法を適用することが困難な場合がある。また博物館、美術館のように建物内の貴重な展示物を、地震時に建物の揺れを小さくして、転倒、落下から保護する必要がある場合もある。このような場合は建物ごと、免震構造とする方法を提案している。

2.3 補強レベル

既存建物の耐震性をどのレベルまで引き上げるかは大きな問題である。このシステムでは原則として下記の2種類の補強レベルを設定する。

- (1) 現行の建築基準法レベル(レベル2)
- (2) 現行の外力の20~30%増の地震動レベル(レベル2A)。

これらの補強レベルは顧客の選択により設定する。本耐震診断システムでは、

① 今回の震災において、現行の建築基準法(新耐震設計法)によって建てられた建物は、損傷を受けたものもあるが、大被害を被った建物が比較的少なかったこと

② (財)建築防災協会の指針が新耐震設計法の耐震レベルを目安として構築されていること

を拠り所として、補強レベルを「新耐震設計法レベル」とすることを基本とした。

現行基準に準拠して建てられた建物も、構造計画に問題がある場合は被害を被った建物があるので、このような建物に対しては診断を行い、必要があれば補強を行うのは勿論である。

今回の兵庫県南部地震のように近距離で起きる直下型の強震時の振動に対して、建物の機能を保持しうる程度の被害に留めたいという要求もあるので、二番目の補強レベルとして、現行基準よりもやや大きめの外力レベルも用意した。

上記 (1), (2) の補強レベルは耐震診断手法、現行の保有耐力設計、および動的解析による3種類の診断・補強方法間で整合がとれるよう考慮しているが、詳細は後章にゆずる。

免震構造とする場合は、これまでの設計のなかでもレベル3に相当する検討がなされてきたので、これを踏襲し、本システムでもレベル2Aの代わりにレベル3でチェックする。ただし、免震構造の建物は、一般の建物とは周期性が異なるので、動的解析を行う場合の地震波は、これを考慮して設定される。

2.4 診断・補強設計のフロー

診断・補強設計のフローを Fig.1 に示す。顧客からの依

頼があった場合、鉄筋コンクリート構造であればまず、日本建築防災協会の診断指針の一次診断を実施する。この診断は、構造設計図、柱、壁などの設計図書があれば、容易に診断できるものである。鉄骨構造であれば、現行の建築基準法施行令の設計手法に基づいて簡便な診断を行う。RC造の場合も、S造の場合も、この診断に合格すれば現行の建築基準法を満足することになるので、これ以上の診断は不要で、補強も行わなくてよい。しかし、直下型の大きな地震動に対して不安が残る場合は、一次診断に不合格となった建物と同様、次の診断、補強設計に移行する。RC造で中低層の建物は耐震診断手法を、S造の建物、高層RC造の建物は保有耐力手法を適用する。超高層の建物、重要な建物は、動的解析手法を併用する。

3. 目標耐震性能の設定

3.1 入力地震動および地震動

3.1.1 基本方針 ここではサイト周辺の地震環境およびサイト地盤の振動特性から推定される最強の地震動を設定する。

3.2~3.5節の目標耐震性能を設定する入力地震動の大き

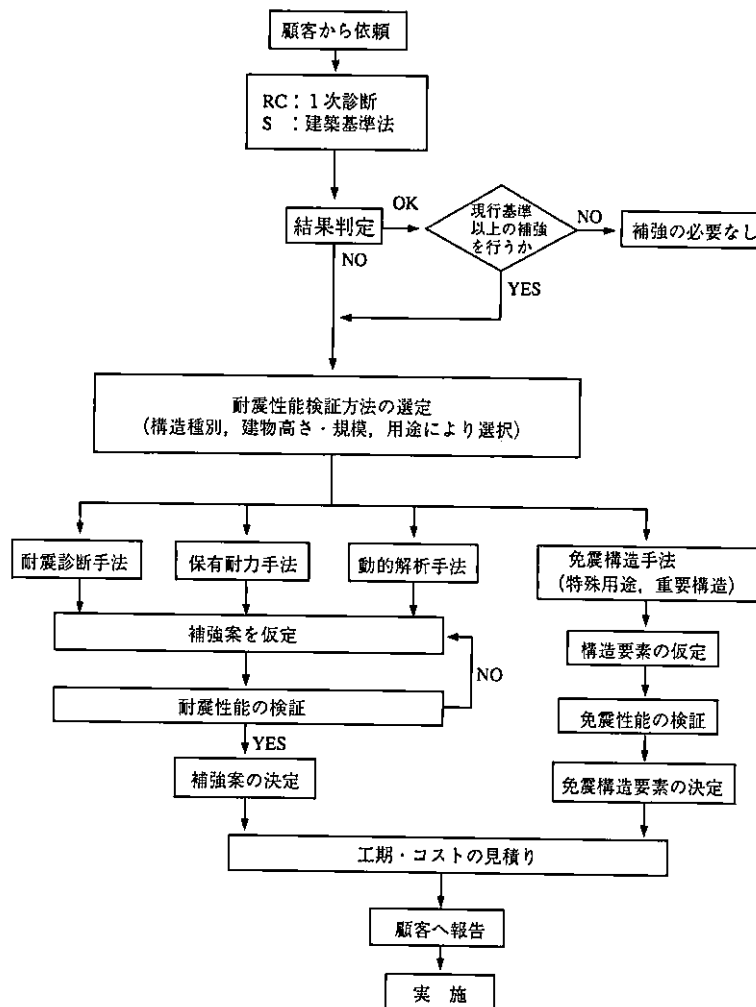


Fig. 1 補強計画のフロー
Flow Diagram of Retrofitting Procedure

さとしては、各手法によって若干の差はあるとしても、レベル2ではおおむね現行の建築基準法並のものが用いられている。また、レベル2Aでは、レベル2の入力にある割増し係数を考慮したものが用いられている。

3.1.2 入力地動震度 サイトに被害を及ぼす可能性があると考えられる歴史地震および活断層を選定し、サイトと震源(断層面)までの最短距離から水平方向の入力地動震度を決定する。代表的なマグニチュードに対する1種地盤における地動最大加速度の距離減衰特性をFig. 2に示した。これは既往の複数の研究結果等を総合的に判断して決定したものである。2種および3種地盤に対しては、Table 1⁴⁾の値を用いて入力地動震度を修正する。活断層により生じる地震の最大マグニチュードは、活断層の長さ、あるいは、地体構造区分等⁵⁾を参考に設定する。なお、自治体等から地表加速度分布図が公表されている場合は、その値を用いるものとする。

3.1.3 水平動 動的応答解析に用いる加速度応答スペクトルおよび時刻歴波形は、以下に示す二つの手法のいずれかにより設定する。

(1) 入力地動震度を用いる場合 想定された地震による建物サイトの加速度応答スペクトルは、Fig. 3⁴⁾に示す地盤種別ごとの基準化加速度応答スペクトル⁵⁾を入力地動震度を乗じて算定する。このスペクトルは減衰定数 $h = 5\%$ のときの応答量であるため、異なる減衰定数に対するスペクトルについては適宜補正^{1), 5)}して使用する。

時間領域の波形については、加速度応答スペクトルに合うように模擬地震動を作成し、応答計算用の時刻歴波形とする。その際、位相特性による応答のバラツキおよび波形形状が破壊に及ぼす影響を考慮して、以下に示す複数の実地震動の位相特性を用いる。マグニチュード8クラスの地震に対してはHACHINOHE1968EW およびTAFT1952EWの記録の、またマグニチュード7クラスの地震に対しては1995年兵庫県南部地震における神戸海洋気象台NSおよびELCENTRO1940NSの記録の位相特性をそれぞれ用いる。

(2) 断層モデルを用いる場合 種々の断層パラメータが特定され、かつ敷地表層地盤の動的物性および基盤までの深層地下構造が分かっている場合あるいは、中小地震の記録から大地震の地動を推定することが可能な場合は、断層モデル等から直接敷地建物に対する入力地動を計算することができる。

3.1.4 上下動 特に上下方向の検討が必要なときに用いるものである。上下動スペクトルは水平動スペクトルにFig. 4に示す地盤種別ごとの変換係数スペクトルをかけて求めるものとする^{6), 7)}。時刻歴波形は水平動に用いた各地震動の上下動の位相特性を用いて作成する。

3.2 耐震診断手法における目標耐震性能の設定

3.2.1 基本方針

(1) 耐震診断基準¹⁾には、下記の3段階の診断法が述べられている。いずれもその基本的な考え方は同じであるが、計算の難易度に差があり、次数が上がるほど計算が

詳しくなってくる。

- ① 第1次診断：壁および柱の断面積のみを用いて強度を計算する。
- ② 第2次診断：柱・壁の終局強度の計算を行う。
- ③ 第3次診断：柱・壁に加えて梁の終局強度の計算を

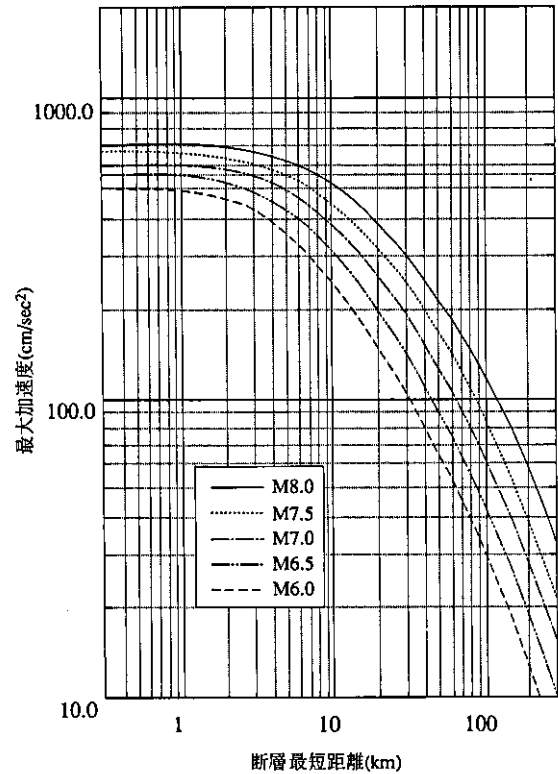


Fig. 2 1種地盤における最大加速度の距離減衰特性
Maximum Acceleration from Earthquake Fault for No.1 Ground Type

Table 1 地盤種別による最大加速度の比率
Maximum Acceleration Amplification Ratio for Various Ground Type

地盤種別	G_A
第I種：標準地盤（堅固な地盤）	1.0
第II種：緩い洪積地盤または締った沖積地盤	1.2
第III種：軟弱地盤	1.2

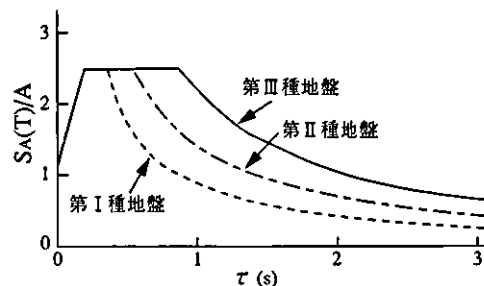


Fig. 3 地盤種別ごとの水平動基準化加速度応答スペクトル
Maximum Response Acceleration Spectrum to Horizontal Ground Motion

行う。構造物の全体的な終局状態を判断する知識が必要である。

(2) 本マニュアルでは、原則として第1次診断から第3次診断まで実施することとする。ただし、第2次診断でその建物の耐震性が決まる場合は、第2次診断まででよいとする。

3.2.2 目標耐震性能の設定 鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準に準じて当社の目標耐震性能を設定する。

(1) 耐震構造判定指標: Iso 既存建物の構造耐震指標 Is は、耐震構造判定指標 Iso 以上であることとし、Iso は、(1) 式で与えられる。

$$Iso = Es \times U \times G \quad \dots (1)$$

ここで、Es: 耐震判定基本指標

U: 重要度係数

G: 地形指標

① 鉄筋コンクリート造の第1次診断用の Es 指標は 0.8 とする。本手法では、原則として2次診断以上を行うことを推奨する。

② 鉄骨鉄筋コンクリート造構造の第1次～第3次診断の Es 指標は、鉄筋コンクリート構造の指標と同じにする。

(2) 各指標の設定

① 耐震判定基本指標: Es

重要度係数を考慮しなくてもよい標準的な一般建物を対象として設定し、本診断法ではレベル2以上を推奨としているので、レベル2およびレベル2Aに対してTable2のように Es 指標を設定する。

② 重要度係数: U

建物を用途別に分類し、地震時の建物の変形を小さくして高い機能維持を確保するためにTable3のように重要度係数を設定する。

③ 地形指標: G

建物が建っている敷地の地形によって地形指標 G を文献9) 用いて Table 4 のように設定する。

(3) 耐震構造判定指標 Iso の値 Es 指標, U 指標および G 指標を考慮した具体的な Iso 指標を Table 5 に示す。

3.3 保有耐力手法における目標耐震性能の設定

3.3.1 基本方針 補強性能は現行の建築基準法(1981年)をクリアーすることを最低条件とする。すなわち、各階の必要保有水平耐力 Qun と保有水平耐力 Qu を比較することによりチェックする。

3.3.2 目標性能設定

(1) レベル2の基本性能指標は基準法の Ds 値とする。

(2) レベル2Aは直下型地震などを想定した場合とし、基本性能指標は基準法の Ds 値の1.25倍程度とする。

(3) いずれのレベルにおいても必要があれば、建物の経年指標 T や形状指標 SD を考慮して Ds 値を補正する。

3.3.3 保有水平耐力 Qu の確認 保有水平耐力 Qu を下記のいずれかの方法で算定し、必要保有水平耐力 Qun を上回ることを確認する。

(1) 地震外力分布は Ai 分布とする。

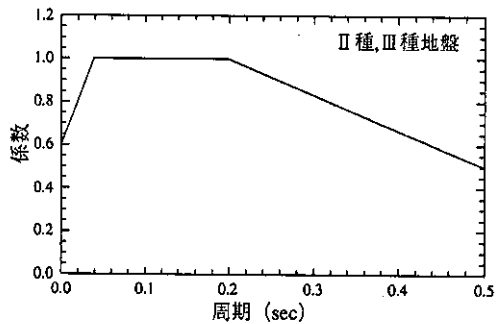
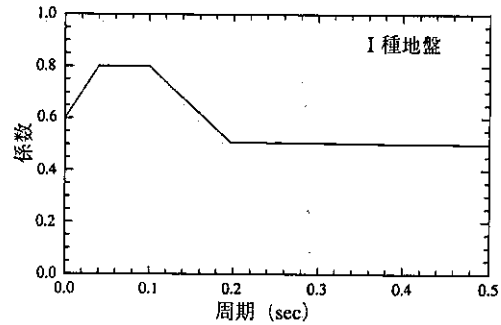


Fig. 4 上下動変換係数スペクトル
Maximum Response Acceleration
Spectrum to Vertical Ground Motion

(2) 算定法は補強目的、グレードなどを勘案し、平面フレームを対象とした節点振り分け法、仮想仕事法、精算解析および、立体フレームを対象とした精算解析の方法のいずれかによるものとする。

漸増解析による場合は層間変形角 R が 1/50 の時の層せん断力を水平保有耐力とする。

3.4 動的解析手法における目標耐震性能の設定

3.4.1 基本方針 特殊な形状、大規模な建物、厳密な耐震性能を調べる場合などに実施する。建物の力学特性をモデル化し、想定する地震動に対する挙動を応答解析によって求める。

3.4.2 目標耐震性能の設定

(1) レベル2の基本性能指標は建築基準法並し入力地震動は水平力のみとする。

(2) レベル2Aは直下型地震を想定した場合とし、入力地震動は水平力および必要に応じて上下動を考慮する。

(3) 補強性能評価のクライテリアは将来受ける可能性のある最強の地震動に対して建物が崩壊しないことを目標として、層および部材の変形に対して設定する。Table 6にクライテリアを示すが、耐震診断手法との整合性を考慮して設定したものであるためレベル2は従来のクライテリアより大きな損傷を許容することになっている。

3.4.3 動的解析による確認

(1) 入力地震動の設定

① レベル2の入力地震動は、基本的には建築センターの高層建物に対する指針と同等に設定する。

② レベル2Aの入力地震動は、3.1節により設定する。

(2) 弾塑性地震応答解析におけるモデル化

Table 2 耐震判定基本指標 Es (第2次, 3次診断用)
Basic Seismic Judgement Index (Es) for 2nd and 3rd Screening

	断層がわかっている場合		断層がわかっていない場合
地表加速度分布図がある場合	②	②と③の大きい方の値	③
地表加速度分布図がない場合	②	断層からの距離とマグニチュードから求まる最大加速度が, 400 gal 以上: Es=0.75 300 gal 以下: Es=0.6 中間値は直線補間する	④ Es=0.6

脚注:

(1) 対象とする耐震性の検討レベルは, Es=0.6 はレベル2に, Es=0.75 はレベル2Aに相当する。なお, これらのレベルは耐震診断基準²⁾に従い, 累積強度指標 C_T と形状指標 S₀ の積が0.3以上であることを条件とする。

(2) 断層からの距離から地震動の最大加速度を求める手順を以下に述べる。

① 断層の位置は文献(7)の活断層図もしくはこれに準ずるものから求める。

② 断層面が垂直の場合断層からの距離 d は

$$d = \sqrt{(\text{水平距離})^2 + (\text{堆積層の厚さ})^2}$$

より求める。

ただし, 堆積層の厚さが不明の場合は 1 km とする。

③ 活断層により生じる地震のマグニチュードは下式²⁾から求める。ただし, 断層が連続し極めて長い場合, あるいは複数の活断層から構成される広域の断層系が推定される場合はマグニチュードの上限を文献(4)等により設定する。

$$M = 2(\text{Log}L + 1.9), \text{ここで } L: \text{断層の長さ (km)}$$

④ 地震動の最大加速度は, 断層からの距離とマグニチュードから Table 2 によって求める。

(3) 地表加速度分布は, 国や地方自治体等で作成されたものがある場合はそれらを使用する。

(4) 耐震診断に用いる新耐震設計レベルの加速度としては耐震診断との整合性を考慮して 300 gal 程度とする。

① 上部構造物には, 多質点系モデル (層モデル), および, 精算解析モデル (部材モデル) を用いる。

② 基礎・地盤部には, 基礎固定モデル, 簡略地盤連成モデル, および, 精算地盤連成モデルを用いる。

③ 上部構造物の曲げせん断型質点系への弾塑性解析のモデル化では, 各層のせん断変形成分のみを弾塑性とし, 曲げ変形成分は常に弾性として扱う。

(3) 多質点系モデルによるレベル2Aの弾塑性解析法を以下に示す。

① 地震応答解析は水平動のみに対して行う。

② 各層の復元特性の設定は, 必要に応じて上下動による柱, 耐震壁の軸力の変動を考慮して行う。

③ 上下動による軸力変動は, 上下動を入力とする弾性地震応答解析 (多質点系モデル) を行って定める。簡便的には, 軸力変動分を最下層で長期軸力の 0.30 倍, 最上層で 0.45 倍とし, 中間層を直線補間して定めても良い。

(4) 復元力特性の設定

① 補強によりメカニズムが変化する場合がある。従来の建物と補強材との変形能の不一致などによる影響を考慮し, 層および部材の復元力特性の第 1, 第 2 折点や変

Table 3 重要度係数 U
Important Factor (U)

建物分類	建物	建物例	目標とする機能維持	U
A	防災拠点	消防署, 医療施設 放送局, 金融機関 電話局, 警察署 病院	・設備機器機能 ・非構造部材が落下しない	1.25
		危険物収蔵施設 (ガス, 石油, 危険物)		1.25
C	C1	避難拠点	学校, 公民館 行政庁	・設備機器機能 1.25
	C2	一般建物(A)		・設備機器機能 1.25
	C3	一般建物(B)		・人命の確保 1.0
D	倉庫・仮設建築物等		・収納物の保護 0.8	

Table 4 地形指標 G
Ground Amplification Factor (G)

一般	崖地	地層の不整合地 (切土, 盛土等)	局所的な高台
1.0	1.25	1.25	1.25

Table 5 耐震構造判定指標 Iso
Seismic Judgement Index (Es) for 2nd and 3rd Screening

建物分類	建物用途	レベル2	レベル2 A
A	防災拠点	0.75	0.94
B	危険物収蔵施設 (ガス, 石油, 危険物)	0.75	0.94
C	C1	0.75	0.94
	C2	0.75	0.94
	C3	0.6	0.75
D	倉庫・仮設建築物等	0.48	0.6

注)・地形指標(G)は1.0とした値である。

形能の変化の評価を適切に行う。

② 建物自体の経年変化や補強工事に伴う既存部分の劣化, 工事の難しさによる施工精度のバラツキなどによる影響を考慮した復元力特性を設定する。

③ 可能ならば材料強度のバラツキに基づく上限と下限の2種類の復元力特性を設定して, 特性に幅を持たせた応答計算を行う。

(5) 補強性能のクライテリアとの比較・検討 層間変形角, 層の塑性率および精算解析を用いた場合の部材の塑性率については, 解析結果から直接にクライテリアとの比較・検討を行う。

多質点系モデルでは部材の応答が求まらないため, 静的弾塑性解析結果を参照しながら, 地震応答解析結果の最大層間変位が対応する増分ステップ時の値から部材の塑性率を推定して, クライテリアと比較・検討する。

3.5 免震構造における目標耐震性能の設定

3.5.1 基本方針 基礎と上部構造との間に免震装置を設置する免震構造を既存建物の耐震補強として用いる。建物全体を長周期化することにより大きな地震入力の低

Table 6 動的解析手法における補強性能のクライテリア
Retrofit Criteria on the Dynamic Response Analysis

入力地震動レベル		ク ラ イ テ リ ア	
レ ベ ル 2	設定理念	過去および将来受ける可能性のある最強の地震動 (新耐震設計法レベル)	
	入力	再現期間	1,000年
		地動震度	震度：VI
	判定	目 標	危険度 ≤ 要注意 被災度区分 ≤ 中破 部材損傷度 ≤ IV
変 形*		層：R ≤ 1/50, μ ≤ 4 部材：梁 μ ≤ 6 柱・耐震壁 μ ≤ 2 (0.4Nu ≤ N の場合) μ ≤ 3 (0 ≤ N < 0.4Nu の場合) μ ≤ 4 (N < 0 の場合)	
レ ベ ル 2A	設定理念	過去および将来受ける可能性のある最強の地震動 (直下型地震動レベル：断層に近い地域)	
	入力	再現期間	1,000年
		地動震度	震度：VII
	判定	目 標	危険度 ≤ 要注意 被災度区分 ≤ 中破 部材損傷度 ≤ IV
変 形*		層：R ≤ 1/50, μ ≤ 4 部材：梁 μ ≤ 6 柱・耐震壁 μ ≤ 2 (0.4Nu ≤ N の場合) μ ≤ 3 (0 ≤ N < 0.4Nu の場合) μ ≤ 4 (N < 0 の場合)	

* 層、部材の塑性率は、降伏部材が靱性部材の場合の値

減が図れる。

3.5.2 目標耐震性能の設定

(1) 上部構造と免震装置を代表する積層ゴムの目標耐震性能を Table 7 に示す。

(2) 免震装置を設計する上で特に留意すべき項目を以下に示す。

- ① 免震装置の適切な水平および鉛直方向の周期
- ② 上部構造の保有耐力が想定する地震時の免震装置の応答せん断力より大きいことの確認
- ③ 積層ゴムに引っ張り力を生じないことの確認
- ④ 積層ゴムの高軸力による座屈の検討

3.5.3 動的解析による確認

(1) 入力地震動の設定

① 採用地震波(水平動)としては、標準的な特定地震波、長周期波成分が比較的卓越する地震波、サイト特性を考慮した人工地震波または、観測地震波とする。

② 地震入力レベルとしては、東京近郊において、従来のレベル1, 2のほかにレベル3として60~75 cm/secの過大入力を考える。

Table 7 免震構造の目標耐震性能
Seismic Criteria for Base Isolated Building

レベル	最大入力速度 (cm/s)	上部構造	積層ゴム
1	25	設計せん断力以下 (部材は全て短期許容応力度以内)	応答せん断ひずみは、 破断ひずみの1/4以下
2	50	層として降伏しない。	応答せん断ひずみは破 断ひずみの1/2以下
3	60~75	層として降伏しない。	応答せん断ひずみは破 断ひずみの1/4以下

(注) (1) 積層ゴムの破断ひずみは、過去の実験データから400%以上あるのが一般的であるが、最終的には採用する積層ゴムの破断ひずみが確認できたものをしようするものとする。
(2) 減衰装置(ダンパー)を用いる場合は、レベル2, 3においても所期の減衰性能が確保できるものとする。

このレベル3は、他の節のレベル2A(直下型地震を想定)とは異なり、免震構造の特徴を考慮して、現在観測されている地震波よりさらに長周期波成分を含む大きな地震波等に対する安全性を確認するために設定したものである。

(2) 免震構造の場合レベル2の地震に対して上下動の影響も考慮して積層ゴムに引き抜き力を発生させないよう設計する。

参考文献

- 1) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート建造物の耐震診断基準・同解説，(1977)
- 2) 日本建築防災協会：既存鉄骨建造物の耐震診断基準・耐震改修設計指針，(1978)
- 3) 日本建築防災協会：既存鉄骨造建築物の耐震診断基準，(1966)
- 4) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説，(1993)
- 5) 萩原尊禮：日本列島の地震—地震工学と地震地体構造—：鹿島出版会，(1991)
- 6) 若松邦夫，他：仙台高密度観測記録にみられる地震動上下動成分に関する研究，日本建築学会大会学術講演会梗概集，(1992)
- 7) 建設省建築研究所，日本建築センター：設計用入力地震動研究委員会平成3年度成果報告書，(1992)
- 8) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層—分布と資料—，東京大学出版会，(1991)
- 9) 宇津徳治：地震学，共立全書，(1985)
- 10) 村上雅也：耐震判定指標値(ET)とその考え方，鉄筋コンクリート建造物の耐震性と耐震診断，静岡県都市住宅部，(1979)