

論文 制震化された RC 造建物の耐震性能評価法に関する研究

上田 英明*1・横内 基*1・北嶋 圭二*2

要旨：本研究は、完全弾塑性型の復元力特性を有する制震部材を用いて制震化された RC 造建物の耐震性能を明確に評価・表現することを目的に、地震リスクおよび耐震等級の評価手法の適用性について検討したものである。本論文では、まず、制震建物の地震応答値が限界耐力計算法により推定可能であることを示す。次に、入力地震動の大きさ毎の応答推定値を用いた地震リスク並びに耐震等級評価手法を適用した場合の評価結果について示す。

キーワード：耐震性能評価, 制震, 限界耐力計算, 地震リスク, 耐震等級

1. はじめに

近年、建物の耐震性能に対する要求が高まっており、これに応えるべく性能規定による耐震設計法が導入され、また、建物の耐震性能表示が積極的に行われている。

耐震性能表示方法としては、「住宅の品質確保の促進等に関する法律」における耐震等級¹⁾、「既存鉄筋コンクリート造建物の耐震診断基準」²⁾の I_s 値、JSCA 応答制御構造設計法³⁾で提案されている性能表示方法などが挙げられる。また、地震時の建物被害による損失を確率・統計論を用いて評価する地震リスク評価手法も、近年多く用いられている⁴⁾。これらの性能表示は、耐震構造による鉄筋コンクリート(以下、RC とする)造建物に対しては一般的に行われているが、制震化された RC 造建物に対しても適用可能と考えられる。ただし、制震建物の耐震性能評価には、地震応答解析による建物の応答値を用いるのが一般的であり、多くの労力を要する。したがって、限界耐力計算法などにより、制震建物の地震応答値を容易に推定することができれば、耐震性能を簡便に評価できると考える。

本研究は、完全弾塑性型の復元力特性を有する制震部材により制震化された RC 造建物を対象とし、その耐震性能を明確に表示する指標として、地震リスクおよび耐震等級評価手法の適用性について検討したものである。本論文では、

まず、制震建物の地震応答値が限界耐力計算法により推定可能であることを示す。次に、地震動の大きさ毎の応答推定値を用いて地震リスク並びに耐震等級を評価した結果について示す。

2. 制震建物に対する限界耐力計算法の適用検討

筆者らは、制震化された RC 造建物に対する限界耐力計算法の適用性について検討してきた⁵⁾。ここでは、文献 5)に示した建物を例として、限界耐力計算の適用性を示す。

2.1 建物概要

検討対象建物は、文献 6)に示される 6 階建ての RC 造事務所ビルを ORG 建物とし、これを制震化したものを EDS 建物とした。建物の概要と諸元を表 1 に、建物の略伏図と桁行方向の軸組図を図 1 に示す。EDS 建物の制震部材はブレース軸心に摩擦ダンパーを組込んだ制震ブレースとし、建物各層に配置した。EDS 建物の要求性能は、極めて稀に発生する地震に対して建物の最大層間変形角が 1/100 以下に収まることとし、各階設置容量は文献 7)に示す方法により

表 1 建物の概要と諸元

階	階高 h_i [m]	各階重量 W_i [kN]	総重量 $\sum W_i$ [kN]	制震ブレース設置容量		
				水平耐力 [kN]	水平剛性 [kN/cm]	スパン数
6	4	6246	6246	784	2940	1
5	4	6588	12834	1568	5880	2
4	4	6838	19672	2352	8820	3
3	4	6966	26638	3136	11760	4
2	4	7167	33805	3920	14700	5
1	4	7281	41086	3920	14700	5

*1 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 研究員 工修 (正会員)

*2 青木あすなろ建設(株) 技術研究所 建築研究室長 工博 (正会員)

求めた。表-1中に制震ブレースの設置容量を示す。なお、本研究では制震部材を設置した桁行方向を検討対象とした。

2.2 限界耐力計算法による応答推定

(1) 建物の1自由度への縮約

ORG建物およびEDS建物のフレーム系静的弾塑性解析結果を図-2に示す。本研究では、限界耐力計算で定義する損傷限界を柱、梁部材のどれか一部材が降伏した時とし、安全限界をどこかの層が層間変形角 1/50 を越えた時とした。図-2中に各建物の損傷および安全限界を示す。

建物の縮約1自由度系の構造特性曲線(Sa-Sd曲線)は、図-2の静的弾塑性解析結果を用いて、文献8)に示される方法により求めた。各建物のSa-Sd曲線を図-3に示す。なお、図-3中にはEDS建物とORG建物のSa-Sd曲線の差を制震ブレースのSa-Sd曲線として描いている。

(2) 減衰補正係数(Fh)の評価

制震建物であるEDS建物の建物全体の減衰は、柱や梁などの主体構造と制震ブレースの履歴特性が異なるため、その評価方法が重要となる。一般的に、建物の減衰性能は、部材毎の塑性率

より求めた等価粘性減衰定数を用いる手法(手法1)、もしくは、縮約1自由度系のSa-Sd曲線の塑性率より求まる等価粘性減衰定数を用いる手法(手法2)で評価される⁸⁾。手法1をEDS建物に適用する場合、建物の各部材に加えて個々の制震ブレースの塑性率を求め、建物全体の減衰を評価することとなる。しかし、EDS建物のSa-Sd曲線を主体構造と制震ブレースに分離し、手法2を用いた減衰評価ができればより簡便となる。

ここでは、図-3に示したように、制震ブレースのSa-Sd曲線をEDS建物とORG建物の差として求め、手法2により減衰を評価し、手法1で求めた結果と比較してその適用性を検討する。ORG建物および制震ブレースのSa-Sd曲線より等価粘性減衰定数(h_{ORG} , h_{DEV})を式(1)、式(2)で求めた。建物全体の等価粘性減衰定数(h)を式(3)より評価し、減衰補正係数(Fh)は式(4)より求めた。手法1および2を用いて評価した建物全体の等価粘性減衰定数(h)と減衰補正係数(Fh)の推移を図-4に示す。両手法による減衰評価結果はよく一致おり、制震ブレースのSa-Sd曲線はEDS建物とORG建物の差として評価することができ、これを用いてEDS建物の減衰性能は手法2によって評価できることを確認した。

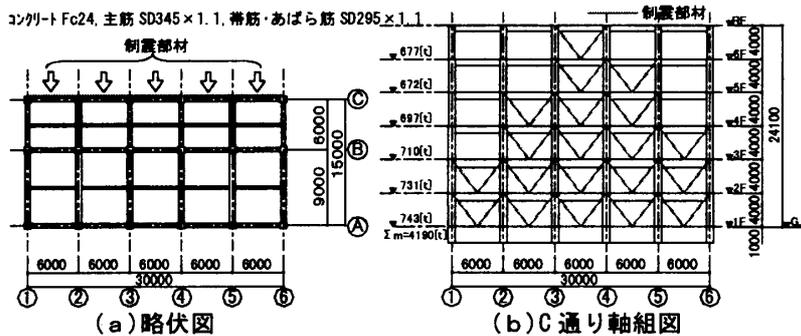


図-1 検討対象建物

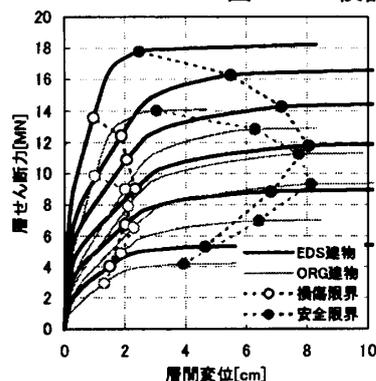


図-2 静的弾塑性解析結果

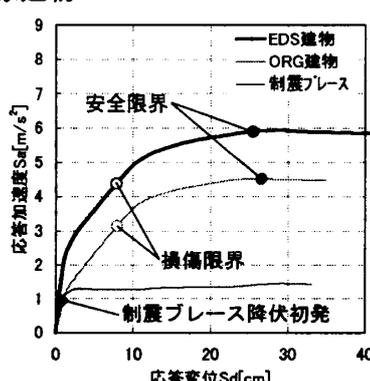
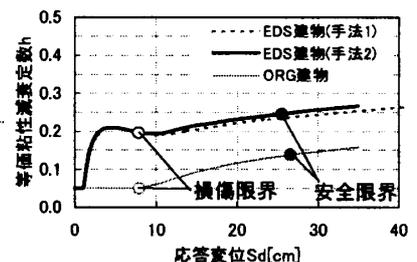
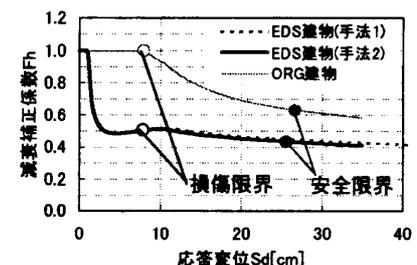


図-3 各建物のSa-Sd曲線



(a) 等価粘性減衰定数



(b) 減衰補正係数

図-4 等価粘性減衰定数と減衰補正係数の推移

$$h_{ORG} = 0.25 \times (1 - 1/\sqrt{Df_{ORG}}) \quad (1)$$

$$h_{DEV} = \frac{1}{4\pi} \frac{\Delta W_{DEV}}{W_{DEV}} = \frac{2}{\pi} (1 - 1/Df_{DEV}) \quad (2)$$

$$h = \frac{h_{ORG} \cdot W_{ORG} + h_{DEV} \cdot W_{DEV}}{W_{ORG} + W_{DEV}} + 0.05 \quad (3)$$

$$Fh = 1.5 / (1 + 10 \cdot h) \quad (4)$$

ここで、 h_{ORG} ：ORG 建物の等価粘性減衰定数， Df_{ORG} ：ORG 建物の塑性率， h_{DEV} ：制震ブレースの等価粘性減衰定数， ΔW_{DEV} ， W_{DEV} ：制震ブレースの履歴消費エネルギー及びポテンシャルエネルギー， Df_{DEV} ：制震ブレースの塑性率， h ：EDS 建物の建物全体の等価粘性減衰定数， W_{ORG} ：ORG 建物のポテンシャルエネルギー， Fh ：減衰補正係数。

(3) 応答値の推定

建物の応答推定値は、縮約 1 自由度系の構造特性曲線(Sa-Sd 曲線)と減衰を考慮した要求スペクトルの交点として評価できる。本研究では建設地の対象地盤を第 2 種地盤と仮定し、地盤増幅係数 G_s を文献 8) に示される略算法で算出し、建物の減衰性能を考慮した要求スペクトルを設定した。図-5 に構造特性曲線と安全限界時の要求スペクトルを重ね合わせた結果を示す。EDS 建物の応答変位は目標変位以下に、また、ORG 建物の応答変位も安全限界変位内に収まる結果となっている。

2.3 限界耐力計算と時刻歴応答解析の比較

限界耐力計算による応答推定値とフレーム系時刻歴応答解析による応答値とを比較し、限界耐力計算の適用性を検討する。時刻歴応答解析に使用した入力地震動は、限界耐力計算での安全限界時の要求スペクトル(減衰 5%)にフィッティングさせた模擬地震動 10 波とした。各建物の層間変位の分布を図-6 に示す。なお、図-6 に示す限界耐力計算による層間変位の応答推定値は、縮約 1 自由度系の応答推定値に対応する荷重ステップの静的弾塑性解析結果である。図より、限界耐力計算法の応答推定値は、フレーム系応答解析結果の上限値にほぼ対応していること、また、各層の変形分布も概ねよく対応している結果となっていることがわかる。以上より、

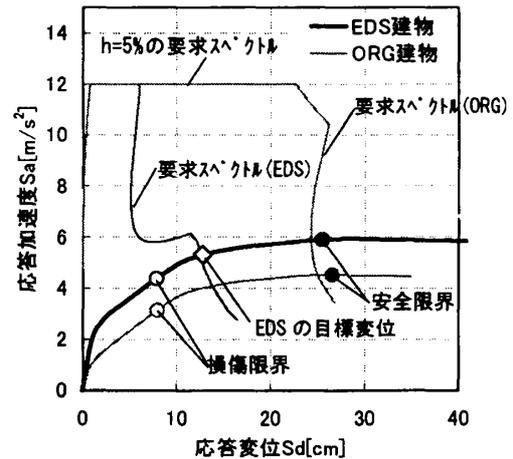


図-5 応答値の推定

●：限界耐力計算，○：応答解析結果(10 波平均)，
---：目標変位(層間変形角 EDS: 1/100, ORG: 1/50)

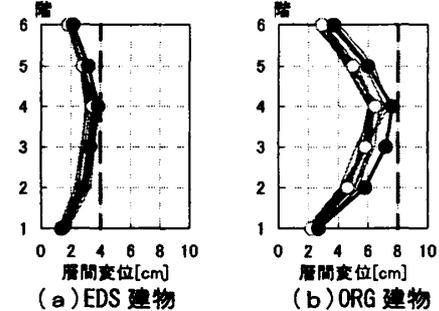


図-6 限界耐力計算結果とフレーム系地震応答解析結果の比較

本制震建物の性能評価法として限界耐力計算法が適用可能であることが確認された。

3. 制震建物の耐震性能表示

ここでは、限界耐力計算による応答推定値を用いて、制震建物の地震リスク評価および耐震等級評価を行った結果について示す。

3.1 地震リスク評価

(1) 地震ハザードの評価

建設地における地震の危険度を示すものとして、地震規模毎の年超過確率を示した地震ハザード曲線が用いられる。本研究では、建築物荷重指針・同解説⁹⁾に示される工学的基盤における最大加速度(a)とこれに対応する再現期間(年超過確率の逆数)を用いて、地震ハザード曲線を設定した。まず、文献 9) に示されるデータを用いて、建設地の再現期間 100 年および 500 年の工学的基盤における最大加速度(a_0 , a_{500})を求め、これらの点を式(5)、式(6)、式(7)で近似して任意

の最大加速度(a)に対する超過確率(P)を求めた。地震ハザード曲線を図-7に示す。

$$R = (a/a_0)^{(1/k)} \times 100 \quad (5)$$

$$P = 1/R \quad (6)$$

$$k = (\ln 500 - \ln 100) / (\ln a_{500} - \ln a_0) \quad (7)$$

ここで、 R ：再現期間[年]、 a ：工学的基盤における任意の最大加速度[m/s²]、 a_0 、 a_{500} ：工学的基盤における再現期間 100 年および 500 年に対する最大加速度[m/s²]、 k ：再現期間換算係数、 P ：年超過確率。

(2) 地震規模毎の建物応答値の推定

地震規模毎の建物の応答値は、加速度応答スペクトルを設定する際の工学的基盤における最大加速度(以下、基準加速度)を漸増させ、基準加速度毎に Sa-Sd 曲線との交点を求めることにより推定した。ただし、地震時の主体構造や仕上げの被害は層間変形角に依存すると考えられるため、建物の応答値を変形角として評価する必要がある。本研究では、地震リスクを簡便に評価できるように、層毎の層間変形角は一定で建物の全体変形角と等しいとみなし、Sa-Sd 曲線の横軸を建物の等価高さ(H)で除した変形角で評

価した。建物の応答値の推定を図-8に示す。なお、本来、要求スペクトルを算出する際に用いる地盤増幅係数は、地震動レベルが大きくなるに従って変化する(小さくなる)が、ここでは、略算法で求めた地盤増幅係数は変化しないものとして扱うこととした。

(3) 建物の被害率曲線の設定

地震時に建物が被害を受ける部位として、基礎、主体構造、設備、仕上げおよび収容物を対象とした。これらの被害は、地震時の地動加速度、建物の応答変形角、応答加速度に依存するものとして対数正規分布形で表すことができるとし、被害率曲線を文献(10)を参考に設定した。建物各部位の被害程度と各々の被害率曲線の諸元を表-2に、被害率曲線の例を図-9に示す。

(4) 被害コストの設定

建物の地震による被害コストは、建物を再度建設するために必要な費用(再調達価格)に基づいて評価される。ここでは、一般的な RC 造事務所ビルの再調達価格に対する建物各部位の占める割合と被害程度毎の損失率(被害コストの再調達価格に対する割合)を表-3のように設定した。

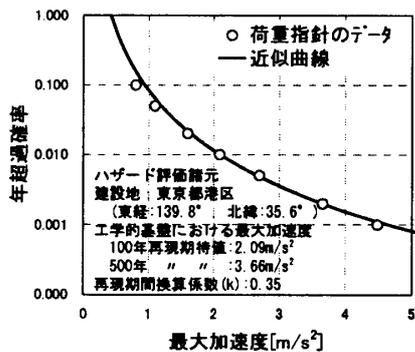


図-7 地震ハザード曲線

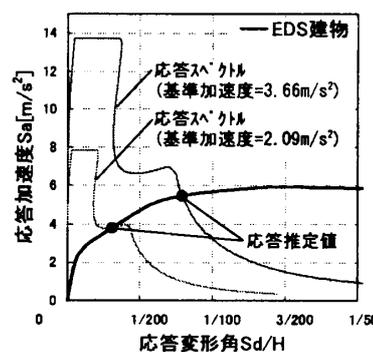
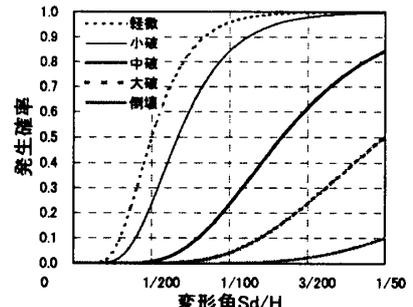
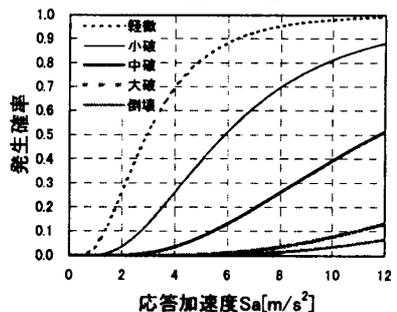


図-8 応答値の推定



(a) 主体構造



(b) 設備

図-9 被害率曲線

表-2 建物部位毎の被害と被害率曲線の諸元

対象部位	被害の依存性	被害程度毎の中央値					対数標準偏差
		軽微	小破	中破	大破	倒壊	
基礎	地動加速度[m/s ²]	4.90(被害ありの場合のみ)					0.6
主体構造	層間変形角[rad]	1/200	1/150	1/75	1/50	1/30	0.4
設備	応答加速度[m/s ²]	2.94	5.88	11.76	23.52	29.40	0.6
仕上げ	層間変形角[rad]	1/250	1/200	1/150	1/100	1/50	0.5
収容物	応答加速度[m/s ²]	2.94	5.88	11.76	23.52	29.40	0.6

表-3 被害コストの設定

対象部位	再調達価格に対する割合	被害程度に対するコストの割合				
		軽微	小破	中破	大破	倒壊
基礎	0.10	1.0				
躯体	0.20	0.1	0.1	0.5	1.0	1.0
設備	0.35	0.1	0.1	0.5	1.0	1.0
仕上げ	0.20	0.1	0.1	0.5	1.0	1.0
その他	0.15	0.1	0.1	0.5	1.0	1.0

(5) 地震リスク評価結果

地震リスク評価を行うに際し、建物の各部位の被害の組合わせをイベントツリー解析により評価した。イベントツリーの概念を図-10に示す。図に示したイベントツリーは建物の各部位の被害を有無のみで評価した例である。本研究での地震リスク評価には、建物の被害パターンとして表-2に示した各部位毎の被害程度で考えられるすべての被害パターン(基礎2通り、主体構造、設備、仕上、収容物6通り、計2592通り)を想定して、各被害パターン毎の損失率を求めた。イベントツリーの各分岐点の発生確率は、地震規模毎に推定した建物の応答値(層間変形角、応答加速度)や地動加速度に対応する建物各部位の被害程度毎の値(図-9)とした。

任意の地震規模毎に推定した建物応答値と被害確率を用いて、イベントツリー解析を行い、被害パターン毎の発生確率(P_j)と損失率(c_j)を乗じた値をすべての被害パターンについて総和をとったものが地震時の損失率の平均値(図-10中右下のCave)となる。また、任意の地震規模に

対する損失率の90%非超過値は、損失率(c_j)毎の発生確率(P_j)を対数正規分布で近似することにより求めた。図-11に地震時の損失率の90%非超過値の求め方の例を示す。

任意の地震規模に対する損失を横軸に、地震ハザード曲線より求まる地震規模毎の超過確率を縦軸にとり、損失毎の超過確率を示した曲線をリスクカーブという。各建物のリスクカーブを図-12に示す。図中には、地震リスク評価で用いられる指標のひとつである最大予想損失(PML:50年間に10%の超過確率(年超過確率0.21%))で発生する地震時に予想される損失の90%非超過値を示す。図より求まる最大予想損失は、ORG建物で30%、EDS建物で19%であり、建物を制震化することにより地震時に被る最大の損失は約6割に低減される結果となっている。

3.2 耐震等級の評価

「住宅の品質確保の促進等に関する法律」における耐震等級の基本的な考え方は、極めて稀に発生する地震に対し建物が倒壊・崩壊しないことを検証した場合を等級1とし、1.25倍の地震

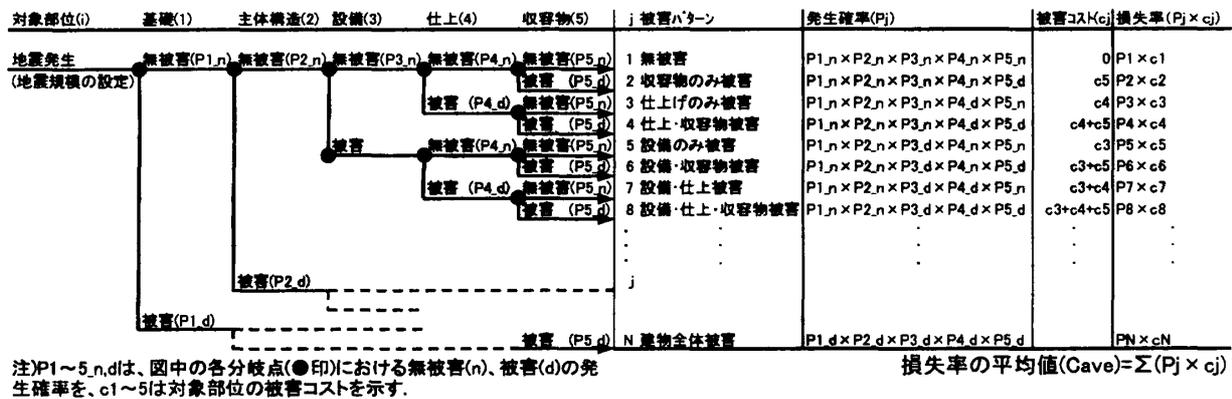


図-10 イベントツリーの概念

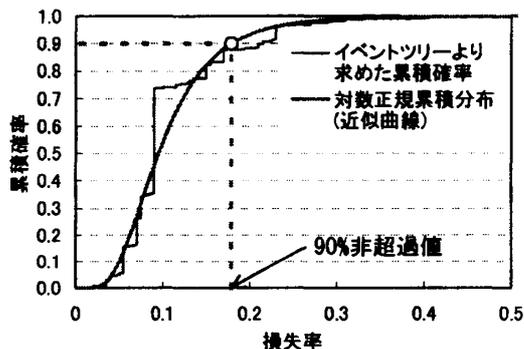


図-11 損失率の90%非超過値の求め方の例

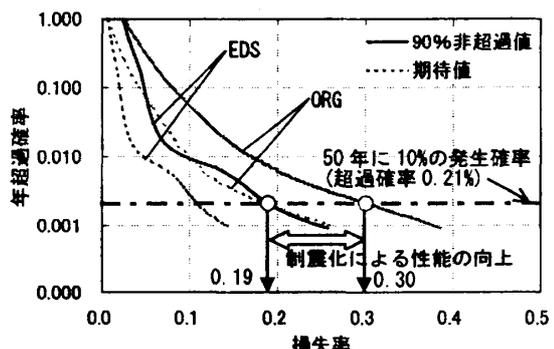


図-12 リスクカーブ

力に対し検証した場合を等級 2, 1.50 倍の場合を等級 3 と定めるといものである。すなわち, 大地震動時の 1.25 倍ないしは 1.50 倍の地震動に対する応答値が安全限界を上回らなければ, 耐震等級が 2 ないし 3 と判定される。限界耐力計算法により応答値を求める場合(図-5)では, 要求スペクトルの大きさを 1.25 倍ないしは 1.50 倍した場合の応答推定値が安全限界変位以下に収まっていることを確認すればよいこととなる。

EDS 建物の耐震等級の評価法を図-13 に示す。限界耐力計算法が等価線形化法であることより, 3.1 節と同様に地盤増幅係数が変化しないと仮定すれば, 縮約 1 自由度系上での安全限界耐力と必要安全限界耐力の比(以下, 耐力比)が, 応答値と安全限界値が一致する地震力倍率 α となるであろう。すなわち, 図-13 における安全限界時の S_a (◆印)と, 安全限界固有周期の直線と減衰を考慮した要求スペクトルの交点(○印)の S_a の比が地震力倍率 α となる。EDS 建物では, 安全限界時 S_a が $5.90[m/s^2]$, 必要安全限界時 S_a が $3.55[m/s^2]$ であることより, 地震力倍率 α は 1.66 となり, 耐震等級は 3 と判定されることになる。

3.3 各性能評価手法の結果

表-4 に限界耐力計算の極稀地震時の応答推定値, 地震リスク評価の最大予想損失(PML)と耐震等級の評価結果を示す。建物の耐震性能は,

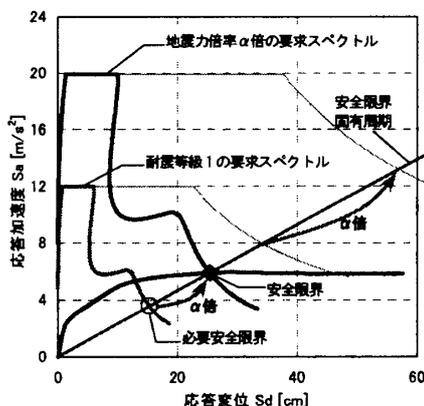


図-13 耐震等級判定のための地震力倍率の概念図

表-4 各評価手法による耐震性能

	限界耐力計算		地震リスク	耐震等級	
	極稀地震時応答			PML	地震力倍率
	Sd[cm]	Sa[m/s ²]			
非制震建物(ORG)	25.0	4.51	30%	1.00	1
制震建物(EDS)	12.5	5.28	19%	1.66	3

地震リスク評価では地震時の損失で, また, 耐震等級では建物が耐えられる地震力に基づく等級で評価され, 制震化された建物の優位性を明確に表現することができる。これらの評価結果を用いることにより, 構造技術者ではない建物のオーナーやユーザーに対する耐震性能の説明や理解が容易になると考える。

4. まとめ

以上, 完全弾塑性型の復元力特性を有する制震部材を用いて制震化した RC 造建物を対象とし, 建物の耐震性能を明確に表示するため, 地震リスクおよび耐震等級による評価を行った。本研究のまとめを以下に示す。

- ・制震建物の耐震性は限界耐力計算法によって評価可能であることを示した。
- ・限界耐力計算法に示される応答推定手法を用いて, 制震建物の地震リスクおよび耐震等級の評価が可能であることを示した。
- ・地震リスクや耐震等級の評価結果は, 一般の建物オーナーやユーザーに対して, 制震建物の優位性を明確に表示できる有効な手段であると考えられる。

参考文献

- 1)建設省住宅局住宅生産課監修:「住宅性能表示 評価方法基準・技術解説」, 2000.7
- 2)日本建築防災協会:「改訂版 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説」, 1990.12
- 3)日本建築構造技術者協会(JSCA)編:「応答制御構造設計法」(I編 応答制御構造設計指針(案)), 2000.12
- 4)星谷勝, 中村孝明著:「構造物の地震リスクマネジメント」, 山海堂, 2002.4
- 5)日本コンクリート工学協会:「コンクリート構造物の応答制御技術研究委員会」報告書・論文集(第4編 建築物のパンプ制震技術), 2002.6
- 6)建築研究振興協会編:「鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン(第II編 性能評価指針のRC構造への適用例)」, 2000.8
- 7)北嶋圭二, 長岡徹, 渡辺一弘:中高層集合住宅を対象とした制震改修法に関する一連の研究(その4. CB-SDスペクトルを用いた等価1質点系モデルの制震機構容量算定方法), 日本建築学会大会学術講演梗概集C-2, pp.155-156, 1999.9
- 8)国土交通省住宅局建築指導課他編:「2001年版 建築物の構造関係技術基準解説書」及び「2001年版 限界耐力計算法の計算例とその解説」, 2001.3
- 9)日本建築学会:建築物荷重指針・同解説 2004, 2004.9
- 10)Federal Emergency Management Agency (FEMA): HAZUS99 Service Release 1(SR1) Technical Manual and User's Manual, 1999