

論文 耐力低下を考慮した鉄筋コンクリート建物の倒壊率

丸橋 奈々子^{*1}・高橋憲之^{*2}・市之瀬 敏勝^{*3}・梅村 恒^{*4}

要旨：耐力低下する1質点モデルを用い、地震入力エネルギーと建物の消費エネルギーの関係から倒壊率を検討した。修正武田モデル、原点指向モデルの降伏後剛性低下率、除荷時剛性低下指数、建物周期をパラメータとし、地震動の位相特性をばらつかせ地震応答解析を行った。履歴吸収エネルギーではなく、最大応答までの荷重変形包絡線の面積で定義されるエネルギーを用いることによって建物の倒壊確率が予測できることがわかった。

キーワード：耐力低下, 1質点モデル, エネルギー, 模擬地震動, 倒壊率, 累積分布関数

1. はじめに

コンクリートの圧縮破壊やP-Δ効果などの影響により降伏後負剛性となる復元力を持つ建物がある。このような建物は地震動などの大きな水平力を受けると、耐力が減少し倒壊に至ることがある。しかし、地震動のスペクトル特性、位相特性に応答が大きく左右され、ある地震強さを境に倒壊するか否かが画然とわかるわけではなく、現状では十分な予測がなされていない。

P-Δ効果によるバイリニアモデルの剛性低下を対象とした研究としては、代表的なものにBernal¹⁾の提案したP-Δ効果による等価ばねの剛性と構造物の弾性剛性の比である安定係数を用いた研究がある。しかし、これらの研究はP-Δ効果を対象としているため、降伏後剛性が急激に低下する建物は適用範囲外である。また、Miranda²⁾は、剛性低下を考慮したRC建物の倒壊を避けるために必要な強度の予測式を提案したが、応答のばらつきが非常に大きいため、不十分である。これに対し、桑村ら³⁾により地震動の強さと倒壊の関係の確率的検討が試みられているが、簡潔な評価に至っていない。

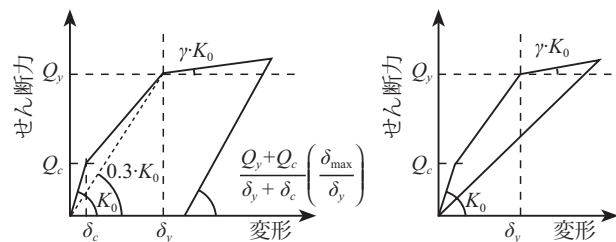
そこで、本論では降伏後負剛性となる1質点モデルを用い、地震入力エネルギーと建物の消

費エネルギーの関係から倒壊率を検討した。解析時には、降伏後の剛性低下率、除荷時剛性低下指数、建物周期をパラメータとし、応答のばらつきとしては地震動の位相特性を想定した。

2. 解析条件

2.1 解析モデル

解析モデルは1質点モデルを用いた。鉄筋コンクリート造建物を想定し、復元力特性は修正武田モデルと原点指向型の2種類とした。各復元力特性を図-1(a), (b)に示す。いずれのモデルも層せん断力係数0.2とし、降伏点割線剛性は初期剛性の0.3倍とし、減衰定数は0.05で剛性比例型とした。ひび割れ強度 Q_c は降伏強度 Q_y の1/3である。また、その他のモデルパラメータを表-1に示す。



(a) 修正武田モデル (b) 原点指向モデル
図-1 解析モデルの復元力特性

*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会工学 大学院生 (正会員)

*2 名古屋工業大学 工学部社会開発工学科 大学生 (会員外)

*3 名古屋工業大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

*4 名古屋工業大学大学院 工学研究科講師 博士(工学) (正会員)

表 - 1 解析モデルの各パラメータ

モデル	固有周期 T (sec)	降伏後剛性 低下率 γ	除荷時剛性 低下指数 α
修正武田	0.25, 0.5	0.01, -0.01,	0.4, 0.8
原点指向		-0.03, -0.05,	
		-0.07, -0.1	(原点指向)

2.2 入力地震動

入力地震動は告示の工学的基盤スペクトルを目標として発生させた模擬地震動を用いた。加速度応答スペクトルが目標スペクトルに 10% 以内で一致し、位相特性のみ異なるよう wavelet 変換を用いて模擬地震動を作成した⁴⁾。位相特性のみが異なるよう、他の模擬地震動の作成方法（例えばフーリエ逆変換）を用いて発生させた模擬地震動を用いた場合にも、倒壊率に大きな影響を与えない。模擬地震動の継続時間 t は 60s または 30s とし、各々 100 波とした。また、模擬地震動の 5% 減衰の加速度応答スペクトルを図 - 2 に示す。図中の実線は目標となるスペクトル、灰色の破線は各模擬地震波のスペクトルである。

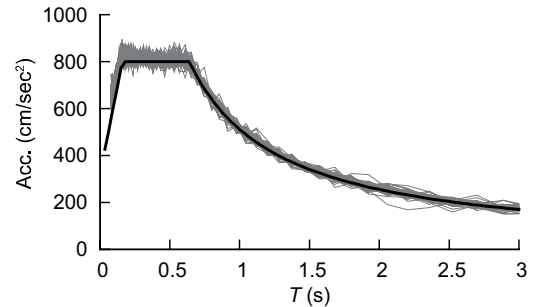


図 - 2 模擬地震動の加速度応答スペクトル

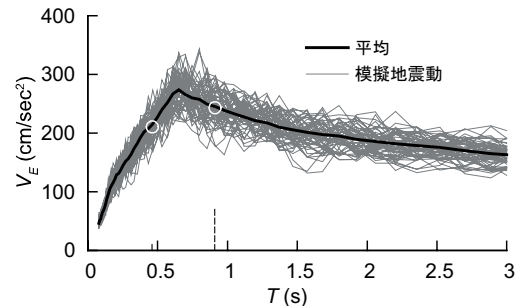


図 - 3 弾性エネルギースペクトル

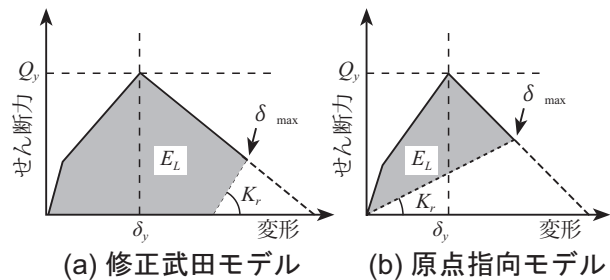


図 - 4 E_L の定義

3. 各種エネルギーの定義

地震時には構造物にエネルギーが時々刻々と入力している。振動方程式の両辺に ydt を乗じ継続時間 t で積分すると次式に示すエネルギー入力の釣り合い式が求まる。

$$\frac{1}{2} m \dot{y}^2 + \int_0^t c \dot{y}^2 dt + \int_0^t Q(y) y dt = \int_0^t (-m \ddot{y}_0) y dt \quad (1)$$

式 (1) の右辺を総エネルギー入力 E とした時、 E の速度換算値 V_E を次式に従って変換した。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{m}} \quad (2)$$

模擬地震動の減衰 5%、 $t = 60$ s の弾性 V_E スペクトルを図 - 3 に示す。灰色の破線は各模擬地震動の V_E スペクトルで、実線は平均である。本研究ではこの実線を用い、モデルの降伏点等価周期 ($T = 0.25$ s で 0.46s, $T = 0.5$ s で 0.91s) に対応する V_E を入力弾性エネルギーの速度換算値と定義し、地震動強さの指標とした。

左辺第 3 項を地震時に損傷に寄与するエネル

ギー E_D とした。また、図 - 4 に示すように、最大応答 δ_{\max} に対応するエネルギー E_L を図の網掛け部分の面積で定義する。 K_r は各モデルの δ_{\max} に対応する除荷時剛性である。本研究では、 E_D 、 E_L を式 (2) と同様に速度換算値 V_D 、 V_L と変換し、損傷評価に用いた。水平耐力が完全にゼロになると解が不安定になるので、本解析では水平耐力が Q_y の 1/100 になった時を倒壊と定義した。この時 E_L は最大値となる。 E_L の最大値はモデルの復元力特性によって決まり、モデルの限界性能を表す。

4. 各モデルの応答履歴

表 - 1 に示したモデルに模擬地震動 1 波を入力したときの応答履歴を図 - 5 に示す。(a)、(b) は修正武田モデルに 50kine で、(c) は原点指向モデルに 25kine で模擬地震動の最大速度を基準化して入力した結果である。また、倒壊したモ

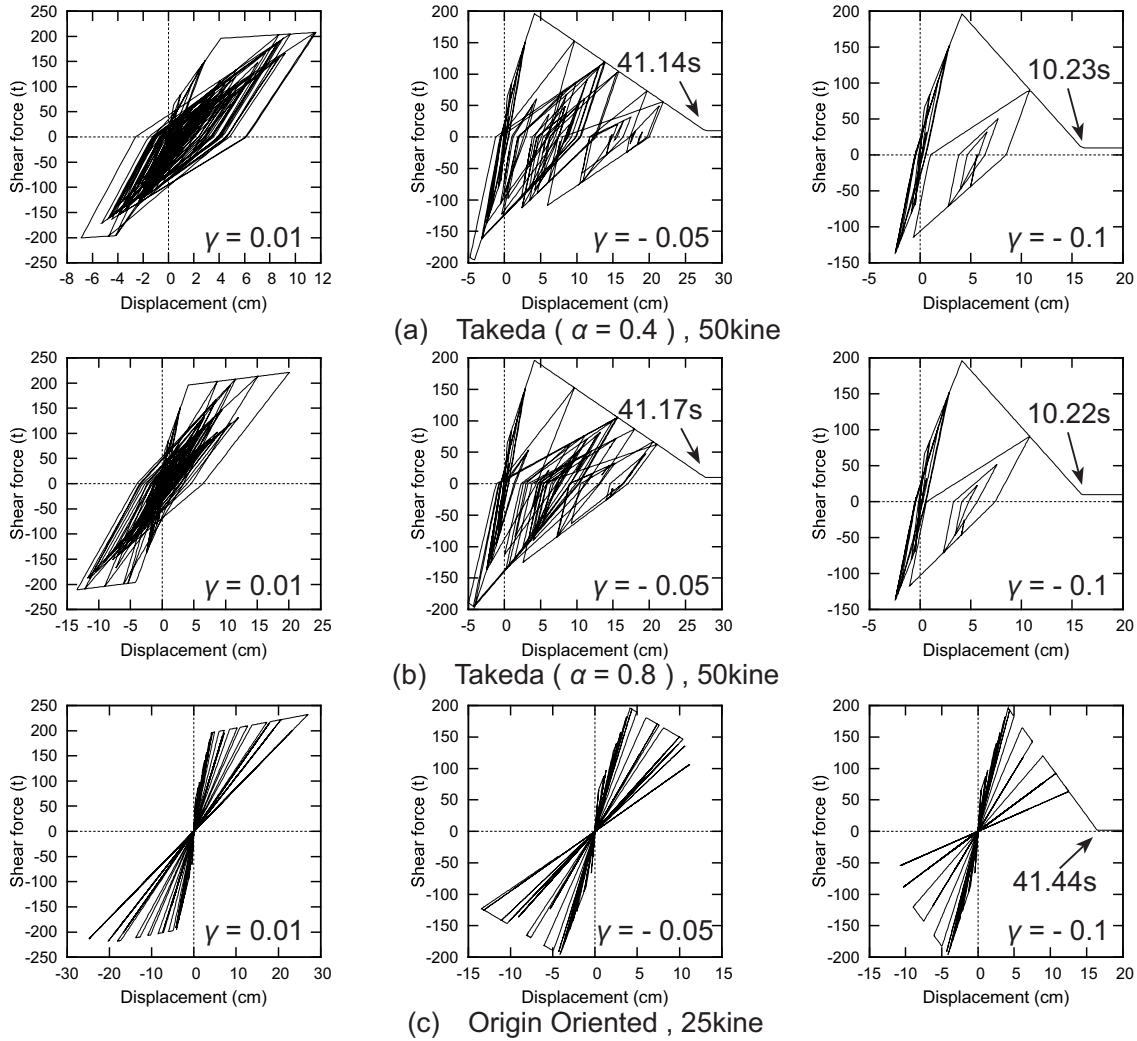


図 - 5 応答履歴 ($t = 60s$)

デルは倒壊点での時間を示した。

図 - 5(a), (b) より、修正武田モデルは γ が -0.05 , -0.1 と大きくなると、変形が片側に偏り、同じ地震動の大きさで倒壊に至っている。特に、 -0.1 では正負に変形をわずかに繰り返すのみで倒壊に至っており、あまりエネルギーを消費していないことがわかる。(a), (b) を比較すると、 $\gamma > 0$ では $\alpha = 0.8$ の方が変形が大きいが、 $\gamma < 0$ となると倒壊する時の時間が同じであることから、変形はほぼ変わらず、 α の違いにあまり依存しないようである。図 - 5(c) の原点指向モデルでは、 γ が -0.05 になると 0.01 と比べて変形は小さくなっている。この現象は他のモデルにも希にみられ、地震動の位相特性の影響により、負勾配が大きくなることで必ずしも変形が増加するとはいえない。また、原点指向モデルでは

除荷時に残留変形が生じないため変形の偏りはほとんどみられない。

5. 損傷に寄与するエネルギー V_D の分布

地震動の強さとエネルギーの関係を検討した。模擬地震動の入力倍率を変化させ表 - 1 に示したモデルを用いて解析を行った結果として、地震動強さの指標である V_E と損傷に寄与するエネルギーの速度換算値 V_D の関係を図 - 6 に示す。降伏後剛性低下率 γ は -0.05 で、 $T = 0.5s$, $t = 60s$ のモデルである。(a), (b) は修正武田モデルでそれぞれ $\alpha = 0.4, 0.8$, (c) は原点指向モデルである。図中の黒い○は倒壊していない結果、灰色の□は倒壊した結果、実線は平均、 σ は標準偏差である。

修正武田モデルでは、倒壊すると V_E の増加に

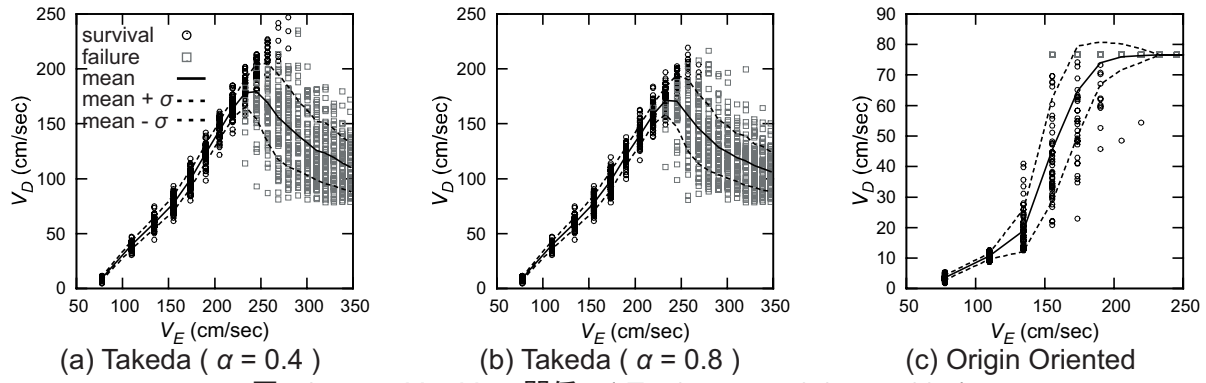


図 - 6 $V_E - V_D$ の関係 ($T = 0.5s, \gamma = -0.05, t = 60s$)

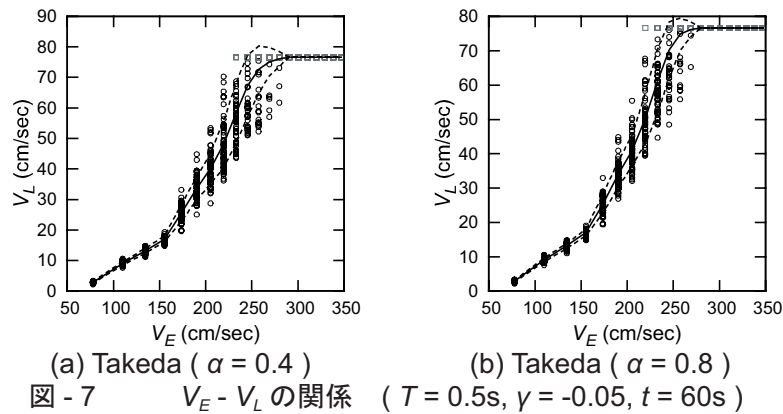


図 - 7 $V_E - V_L$ の関係 ($T = 0.5s, \gamma = -0.05, t = 60s$)

に伴い V_D は減少する。(a), (b) を比較すると, α の値の増加により V_D の値は小さくなるが, 分布のばらつき方はほぼ同じであった。また, V_D は α, t の値に関わらず, 倒壊していないプロットはばらつきが小さいが, 倒壊したプロットはばらつきが大きいことがわかった。原点指向モデルでは, 修正武田モデルと比べエネルギー吸収能力が低いので, 地震動の位相特性の影響を受けやすく, 倒壊以前の V_D はばらつきが大きい, 倒壊すると V_D の値は一定値になる。

次に, 地震動強さの指標である V_E と最大応答に対応するエネルギーの速度換算値 V_L の関係を図 - 7 に示す。いずれの図においても, 倒壊したプロットは V_L の値が一定値になる。この一定値はモデルの限界性能であり, 値はモデルによって定まるものである。このため, 建物の評価する指標としては V_L の方が適当である。また, 原点指向モデルでは $V_E - V_L$ 分布と $V_E - V_D$ 分布は同じになった。これは原点指向モデルが図 - 5(c) のような履歴を示すため, V_D は V_L と等しくなるからである。

全体の傾向として, V_E の増加に対してモデル

が倒壊し始める付近では, 倒壊したものとしていないものが混在している。このため V_E の値だけでは, 建物が倒壊するか否かを判断することはできない。

6. 降伏後剛性低下率の違いによる比較

降伏後剛性低下率 γ をパラメータとした時の V_E と変形の平均値の関係を図 - 8 に示す。(a) は修正武田モデル, (b) は原点指向モデルで, $T = 0.5s, t = 60s$ のモデルである。図の破線の直線は降伏変形 (4.14cm), \circ は各モデルの倒壊時の変形である。

両モデルとも, V_E の増加に対し降伏変形を過ぎるまでは, γ の値に関わらず一定の経路をたどる。降伏以後は負剛性となる建物は倒壊すると急激に変形が増加するため, 建物が倒壊し始める付近の V_E の時に変形の平均値も急激に増加する。 γ が小さくなるにつれ, 降伏点以後の傾きが大きくなり, 変形が増加する。原点指向モデルの場合, 降伏変形となる V_E を超えるとすぐに倒壊するモデルがあるため, 降伏変形付近から変形の平均値が増加する。

V_E と V_L の平均値の関係を図 - 9 に示す。修正武田モデルの場合、 V_E の増加に対し降伏点 V_L までは変形と同様に γ の値に関わらず一定である。降伏点 V_L を超えると、 γ の減少に伴い傾きが大きくなる。原点指向モデルの場合は、 $\gamma < 0$ となると降伏点 V_L 以前から V_L の平均値は $\gamma = 0.01$ の値より大きくなる。また、以後の傾きは γ の減少に伴い大きくなる。いずれのモデルにおいても V_L は倒壊するとモデルの限界性能である一定値となる。

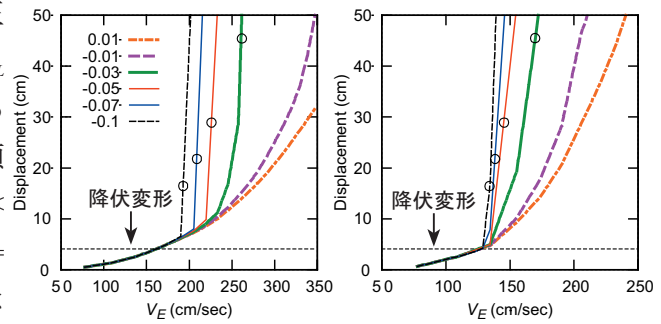
7. 倒壊時の地震の強さと倒壊率

降伏後剛性低下率 γ が負となる建物は、ある一定の V_E の値で倒壊するか否かがはっきりとわかるわけではない。そこで本論文では、ある建物に位相特性の異なる模擬地震動を入力した場合に倒壊が生じる確率を「倒壊率」とした。

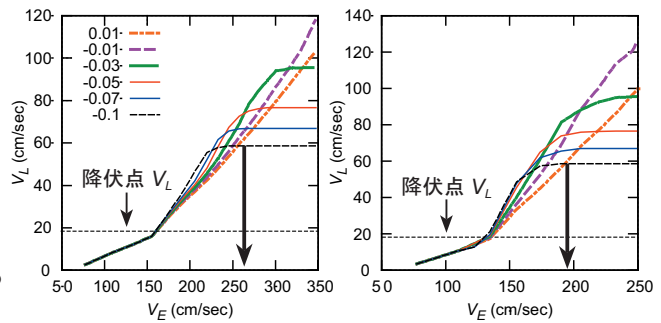
地震動強さを表す V_E に対する倒壊率の関係を図 - 10 に示す。(a) は修正武田モデル、(b) は原点指向モデルで、 $T = 0.5s$ 、 $t = 60s$ のモデルである。 $\gamma = -0.01$ のモデルについては倒壊する時の変形が過大となるため結果を示していない。

各モデルとも γ の値に関わらず倒壊率の増加の傾きはほぼ同じとなっている。また、図 - 9 において、 γ が 0.01 のモデルの V_L と負剛性の各モデルの V_L が交わる付近での V_E の時、図 - 10 では倒壊率が 1 となっている。そこで、図 - 4 に示す E_L の最大値（倒壊点の E_L ）を速度換算した値を V_{L0} とすると、図 - 9 の矢印で示すように、 $\gamma = 0.01$ の建物の V_L が、 $\gamma < 0$ の建物の限界性能である V_{L0} となる時の V_E を倒壊基準値 V_{E0} とする。

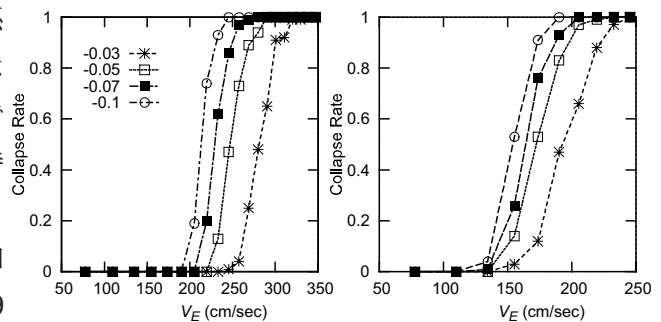
各モデル、 γ より算出される V_{E0} で V_E を基準化した値 V_E/V_{E0} と倒壊率の関係を図 - 11 に示す。(a) は $T = 0.5s$ 、(b) は $T = 0.25s$ である。 γ の値を区別せずにプロットした。いずれのモデルも V_E/V_{E0} の増加に対し、倒壊率が緩やかに増加している。ここで、倒壊率の分布は正規分布の累積分布関数に類似しており、得られるデータが倒壊するか否かの二値データであることから、



(a) Takeda ($\alpha = 0.4$) (b) Origin Oriented
図 - 8 V_E - 変形分布の平均値 ($T = 0.5s$, $t = 60s$)



(a) Takeda ($\alpha = 0.4$) (b) Origin Oriented
図 - 9 V_E - V_L 分布の平均値 ($T = 0.5s$, $t = 60s$)



(a) Takeda ($\alpha = 0.4$) (b) Origin Oriented
図 - 10 V_E - 倒壊率の関係 ($T = 0.5s$, $t = 60s$)

プロットをプロビット・モデルに回帰させ、各々の関数を図に示した。

いずれのプロットもプロビットモデルによく一致しており、 V_E/V_{E0} に対して倒壊率は降伏後剛性低下率の値に関わらず同じ値が得られる。(a), (b) ともに関数の傾斜は修正武田モデルよりも原点指向モデルの方が緩やかである。これは原点指向型は修正武田モデルよりも V_D のばらつきが大きいためである。また、修正武田モデルでは、関数は α の違いよりも t の違いによる差のほうが大きい。

$V_E/V_{E0} = 1$ 、倒壊率 5% となる値をそれぞれ赤、青の破線で図 - 11 に示す。どちらのモデルも 95% の時 V_E/V_{E0} は 1 を下回っているので、地

震動強さが V_{E0} である時、95% 以上の確率で建物は倒壊するといえる。同様に V_E が修正武田モデルでは V_{E0} の 77%，原点指向モデルでは V_{E0} の 67% を超えると、倒壊する確率が 5% となる。

次に、図 - 11 の各累積分布関数の元となる正規分布を図 - 12 に示す。この図は V_E/V_{E0} に対する倒壊開始点の分布を表す図となる。いいかえれば、建物に入力する V_E の許容値を表しており、 V_E の許容値は正規分布に従うと仮定したことになる。分布の広がり方は修正武田モデル、原点指向モデルで大きく異なっており、 T, t, α による違いは小さい。

8. まとめ

モデルの降伏後剛性低下率，除荷時剛性低下指数，固有周期周期をパラメータとし，地震動の位相特性をばらつかせ地震応答解析を行った結果，以下のことがわかった。

- (1) 修正武田モデルの場合，建物の損傷に寄与するエネルギーは，倒壊が生じるまではばらつきが小さいが，倒壊時はばらつきが大きい。原点指向型の場合は，倒壊が生じるまではばらつきが大きいが，倒壊時は一定値となる。
- (2) 耐力低下しない建物のエネルギーが耐力低下する建物の限界性能のエネルギーと等しくなる時の地震動の強さを基準とした場合，地震動の弾性入力エネルギーと倒壊率の関係は，降伏後剛性低下率，除荷時剛性低下指数，地震動の継続時間に依存せず一様で，修正武田モデルと原点指向モデルによって異なる。
- (3)(2) で基準とした強さで地震動を耐力低下する建物に入力した時，95% 以上の確率で建物は倒壊する。
- (4) 耐力低下する建物に地震動を修正武田モデルは (2) で基準とした強さの 77%，原点指向モデルは 67% の強さで入力した時，5% の確率で倒壊する。

以上の結論は，入力地震動が図 - 2 に示すような滑らかな加速度応答スペクトルの時のみ適用できる。

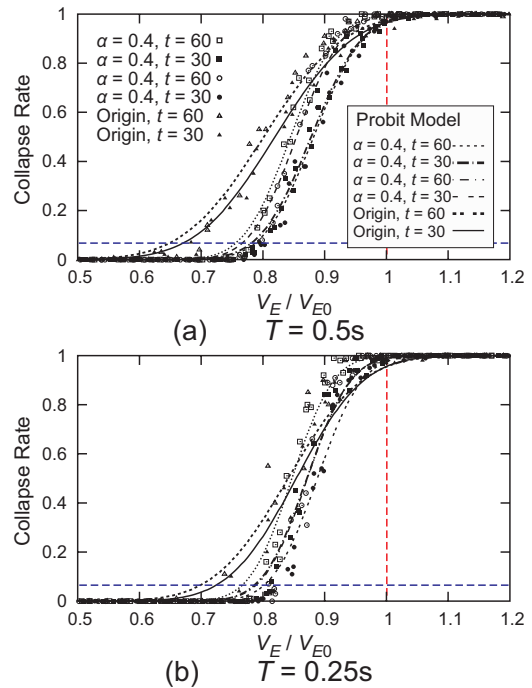


図 - 11 倒壊率

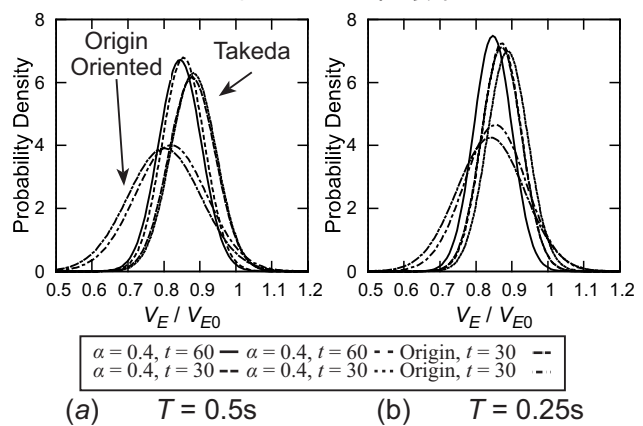


図 - 12 倒壊の確率密度分布

参考文献

- 1) Dionisio Bernal : Amplification Factors for Inelastic Dynamic P- Δ Effects in Earthquake Analysis, Earthquake Engineering And Structural Dynamics, Vol.15, pp.635-651, 1987
- 2) Eduardo Miranda, M.ASCE, and Sinan D. Akkar : Dynamic Instability of Simple Structural Systems, Journal of Structural Engineering ASCE, Dec.2003
- 3) 桑村仁，竹田拓也，佐藤義也：地震動の破壊力指標としてのエネルギー入力率，日本建築学会構造系論文集，No.491，pp.29-36，1997.6
- 4) 梅村恒，市之瀬敏勝：鉄筋コンクリート建物の耐震診断について（その2）スペクトル振幅及び包絡形状の等しい模擬地震動，東海支部研究報告集，pp.161-164，2001.2