

論文 既存 RC 建物における強度分布と各階耐震性能の関係

丸橋 奈々子・市之瀬 敏勝

要旨：我が国には耐震診断基準で示される構造耐震指標 I_s 値が 0.6 を下回り、層降伏するような建物が数多く残っている。本研究は最も危険な階を特定するために、 I_s 値が 0.6 以下である 4 階から 12 階までの層降伏型 RC 建物を対象に、 C_T 、 I_s 分布が各階の耐震性能に与える影響を検討した。結果として、 I_s 値が他階よりも低くとも、 C_T 値が高ければ倒壊しない場合が多く、建物の各階の倒壊しやすさを判断する材料としては、 C_T 値が有効であることがわかった。

キーワード：耐震診断、層降伏、構造耐震指標、強度指標、靱性指標、倒壊確率

1. はじめに

既存不適格建物の耐震化を進めることはわが国の最重要課題の一つである。しかし、公共建築物のみに限っても耐震診断基準¹⁾で示される構造耐震指標 I_s 値が 0.6 を下回り、層降伏するような建物が数多く残っている。特に公営住宅は、財政上の問題もさることながら、工事に伴う音や振動が避けがたいため、補強工事を行うのが非常に困難な場合が多い。そこで、最悪の可能性を少しでも減らすため、特に危険そうな階の住民に転居してもらおう、という方策もあり得る。その際、最も危険な建物と階を特定するために、 I_s 値だけを判断材料としてよいのかという疑問が生じる。

芳村・上野ら²⁾は、せん断柱からなる 3 階 RC 建物を対象として、崩壊変形が十分に大きければ、 I_s が 0.2 程度であっても必ずしも倒壊が生じないことを示した。また澤木ら³⁾は、全階の累積強度指標 C_T 値、靱性指標 F 値、 I_s 値が一定の建物で、強度・靱性のバランスが耐震性能に及ぼす影響について考察し、 I_s 値の妥当性を検討した。しかしながら、実際の建物は階ごとに C_T 値、 F 値、 I_s 値が異なっていることが多い。本研究はこれらの値をパラメータとし、4 階から 12 階までの層降伏型鉄筋コンクリート建物を対象

とした地震応答解析を行い、最も倒壊しやすい階を特定する方法を検討した。

2. 診断基準

本研究では耐震診断基準における第 2 次診断¹⁾を対象とした。また建物を構成する部材の変形能力が 1 種類である単純な建物を想定し、形状指標 S_D 値、経年指標 T 値を 1 として構造耐震指標 I_s 値を式 (1) より算定した。

$$I_s = C_T \times F \quad (1)$$

累積強度指標 C_T は、各層ごとの強度指標 C に、外力分布による補正係数を乗じたものである。 F は靱性指標である。

3. 解析条件

3.1 解析モデル

解析モデルはせん断多質点系を用いた。各階の重量 760kN、階高 3m とし、4 階、8 階、12 階鉄筋コンクリート建物を想定した。復元力特性は、 F 値が 1 を上回る場合は修正武田モデル、 F 値が 1 を下回る場合は原点指向モデルとした。建物の外力分布が C_T 値に影響を及ぼすため、 A_i 分布と逆三角形分布を用いて比較を行った。各階の降伏強度は式 (1) の C_T 値より定め、ひび割れ強度は降伏強度の 1/3 とした。降伏点割線剛

*1 名古屋工業大学 大学院工学研究科社会工学専攻大学院生 修士(工学) (正会員)

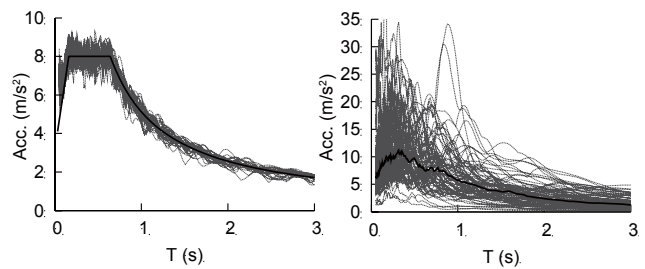
*2 名古屋工業大学 工学部社会工学科教授 工博 (正会員)

性は初期剛性の0.3倍とした。降伏変形角 R_y は1/150とし、モデルの終局変形角 R_u と F 値は、基準の付録¹⁾より、次式に従うものとした。

$$R_u < 150 \text{ では } F = 1.27 \times \sqrt{150 \times R_u} \quad (2)$$

$R_u \geq 150$ では

$$F = \frac{\sqrt{300 \times R_u - 1}}{0.75 \times (1 + 7.5 \times R_u)} \quad (3)$$



(a) 模擬地震動 (b) 実地震動
図 - 1 加速度応答スペクトル (減衰 5%)

3.2 入力地震動

国土交通省告示 1461 号に示される安全限界検証用の工学的基盤スペクトルを目標として、位相特性のみ異なるようフーリエ変換を用いて発生させた模擬地震動 100 波 (継続時間 40 秒) を用いた。本研究では、告示に示されるような、平滑なスペクトルの地震動を入力したときの階の危険性を検討するため、地盤条件は無視し、基盤スペクトルを用いている。模擬地震動の 5% 減衰の加速度応答スペクトルを図 - 1(a) に示す。図中の実線は目標スペクトル、灰色の破線は各模擬地震動のスペクトルである。

また、工学的基盤スペクトルと大きく異なる加速度応答スペクトルを持つ地震動や、特定階に大きく損傷が集中するような性質を持つ地震動においても検討するため、表 - 1 に示す実地震動 83 波を用いた。各地震動の最大加速度は $PGA > 300 \text{ cm/s}^2$ 、最大速度は $30 \text{ cm/s} < PGV < 150 \text{ cm/s}$ である。5% 減衰の加速度応答スペクトルを図 - 1(b) に示す。図中の灰色の破線は各地震動のスペクトル、実線は中央値である。

表 - 1 解析に用いた実地震動

日時	地震	数
1996/06/28	Parkfield	1
1979/08/06	Coyote Lake	1
1979/10/15	Imperial Valley	10
1980/06/09	Victoria, Mexico	1
1981/04/26	Westmorland	1
1986/07/08	N. Palm Springs	3
1987/11/24	Superstitt Hills	3
1989/10/18	Loma Prieta	6
1992/03/13	Erzincan, Turkey	1
1992/04/25	Cape Mendocino	4
1992/06/28	Landers	3
1994/01/17	Northridge	22
1995/01/16	Kobe	1
1999/08/17	Kocaeli, Turkey	3
1999/09/20	Chi-Chi, Taiwan	21
1999/11/12	Duzce, Turkey	2

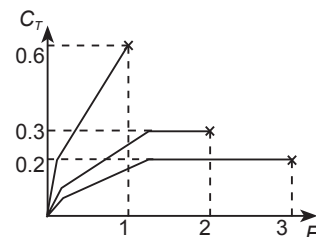


図 - 2 $C_T - F$ 関係 ($I_s = 0.6$ で一定)

4. 全階 I_s 値, C_T 値, F 値一定の建物

全階の I_s 値, C_T 値, F 値が一定である建物に、 C_T 値, F 値をパラメータとしたときに、どの階が倒壊しやすいかを検討した。モデルの I_s 値は 0.6 とした。各階の $C_T - F$ 関係は図 - 2 のようになり、図中の × で階は倒壊する。 F 値は 1 (強度抵抗型), 2 または 3 (靱性抵抗型) の 3 種とした。

4.1 模擬地震動入力時の各階倒壊確率

模擬地震動を入力した時の、各階の倒壊確率 (全地震動のうちモデルが倒壊した地震動の割合) を図 - 3 に示す。ただし、倒壊が生じない

場合については、倒壊するまで地震動を増幅した。(a) ~ (c) は、4, 8, 12 階モデルの結果であり、図の左部は (i) 逆三角形分布、右部は (ii) A_i 分布を用いて降伏強度を決定した。

(i) の逆三角形分布の場合、 F 値の増加に伴い、最上階が倒壊しやすくなった。また、4 階モデルは 4 階、1 階が倒壊しやすく、階数が多くなるにつれて、最上階が倒壊しやすくなった。12 階では、ほぼ全ての地震動で最上階が倒壊した。

(ii) の A_i 分布外力の場合、 $F = 1$ のモデルは倒壊が様々な階に分散して生じた。 $F = 3$ の場合、4 階モデルは最上階が多く倒壊し、8 階、12 階モデルは 1 階が多く倒壊した。つまり、 F 値の増

加に伴い、1つの階に損傷が集中しやすくなった。しかし、逆三角形分布と比べるといずれのモデルの場合も特定階への倒壊が集中しにくい。逆三角形分布より A_i 分布を用いて降伏強度を決定する方が良い。

4.2 実地震動入力時の各階倒壊確率

前節と同様のモデルに実地震動を入力した時の各階の倒壊確率を図-4に示す。実地震動においても、 A_i 分布の方が逆三角形分布よりも1つの階に倒壊が集中して生じなかったため、 A_i 分布を用いて降伏強度を決定した。図の左部は(i)各実地震動を等倍で入力した結果、図の右部は(ii)全ての実地震動において建物が倒壊するまで地震動を増幅させた場合(倒壊確率100%)の結果である。

(i)の実地震動を等倍で入力した場合、4階、8階、12階と階数が多くなるほど建物の倒壊確率は減少した。、 $F=1$ または2のモデルは建物の倒壊確率はほぼ同じであるが、 $F=3$ となると、倒壊確率は減少した。また、8階、12階モデルは、上部が倒壊しにくかった。

(ii)の倒壊確率が100%となる場合、模擬地震動を入力した際と同様に、モデルの階数、 F 値

の増加に伴い1つの階(各モデルの1階)に損傷が集中しやすくなった。模擬地震動の結果と異なり、4階モデルも1階が倒壊しやすかった。これは、実地震動の中には、模擬地震動に比べ継続時間が短く、一瞬で地動加速度が大きくなるものが多いからであると考えられる。

5. 特定階の C_T 値が異なる建物(全階 I_s 値一定)

図-5のように、全階の I_s 値が一定(=0.6)の建物で、 C_T 値を特定階で0.2から0.4まで変動させ、それ以外の階(以後、基準階と呼ぶ)で C_T 値一定とするモデルを考える。モデルの呼称を表-2に示す。ここで、4Bとは、4階建ての建物で1階の C_T 値を変動させたモデルという意味である。また、4M(8M)とは、4階(8階)建ての建物で2階(4階)の C_T 値を変動させたモデルという意味である。 A_i 分布を用いて降伏強度を決定した。

基準階の C_T 値を0.3($F=2$)とし、特定階の C_T 値を変動させた建物に模擬地震動と実地震動を入力した時の特定階の倒壊確率を図-6(a)、(b)に示す。この場合、 C_T 値が0.3を超えると倒壊確率が急速に減少した。つまり、 I_s 値が同じで

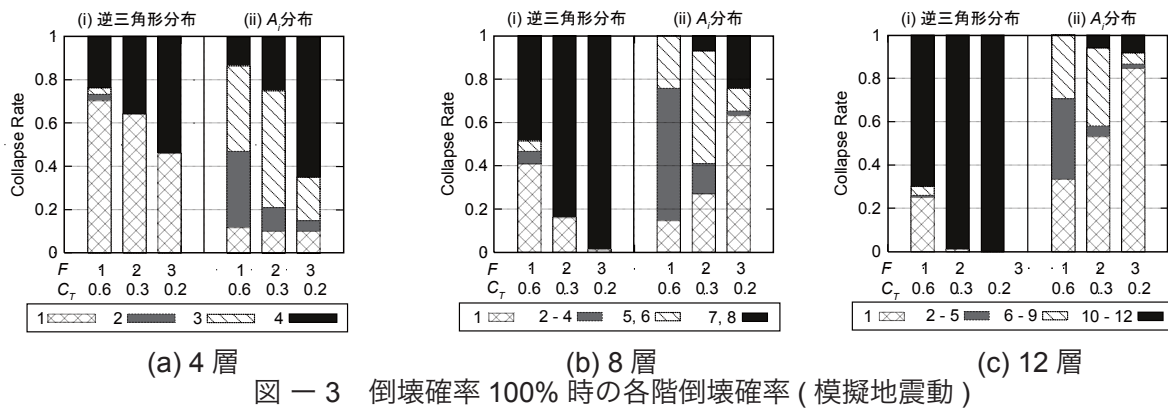


図-3 倒壊確率100%時の各階倒壊確率(模擬地震動)

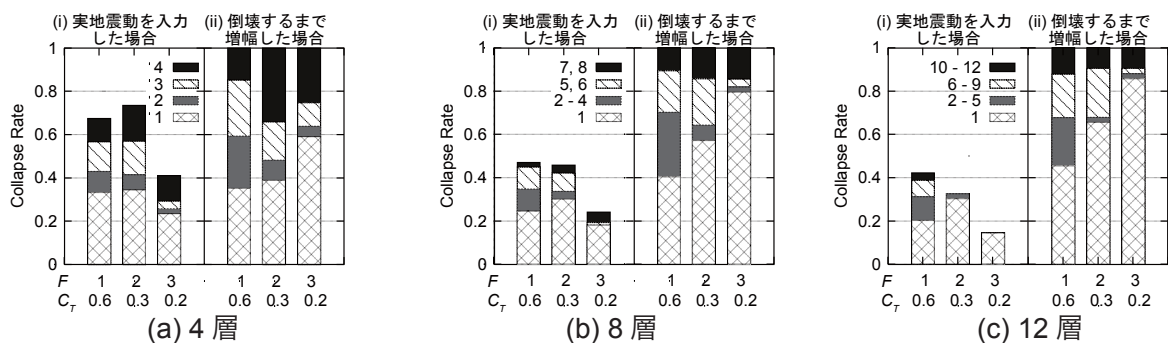


図-4 実地震動入力時の各階倒壊確率

あっても、 C_T 値が高い階では倒壊が生じにくいことがわかる。逆に、 C_T 値が 0.25 (他階の 5/6) を下回ると、8T, 12T モデルを例外として、崩壊確率が 90% を超える。 I_S 値が同じであっても、 C_T 値が低い階では崩壊が生じやすいことがわかる。なお、8T, 12T モデルは C_T 値が低い場合でも倒壊しづらい。前章で示したように、これらは、 A_i 分布外力によって降伏強度を決定すると最上階に倒壊が生じにくいからである。また、模擬地震動よりも、実地震動の方が倒壊確率の傾きが緩やかであった。これは実地震動の方が特性にばらつきがあるためであると考えられる。

基準階の C_T 値を 0.6 (つまり $F = 1$) とし、特定階の C_T 値を変動させた場合 (図 - 6(c), (d))

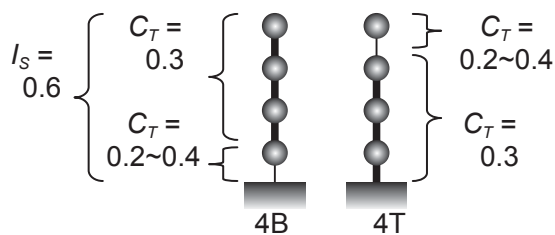
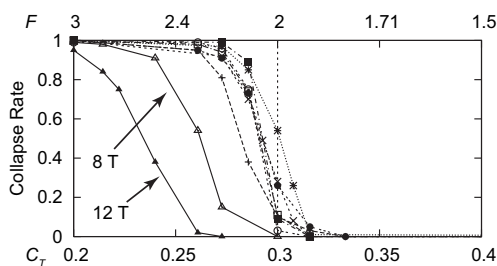


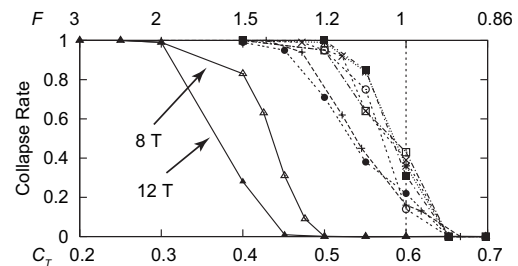
図 - 5 4B, 4T モデル (基準階 $C_T = 0.3, F = 2$)

表 - 2 C_T 値の異なる階とモデルの呼称

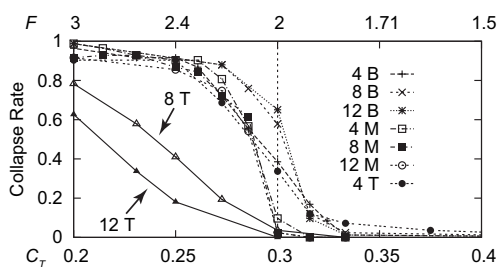
階数	最上階	中間階	最上階
4	4B	4M	4T
8	8B	8M	8T
12	12B	12M	12T



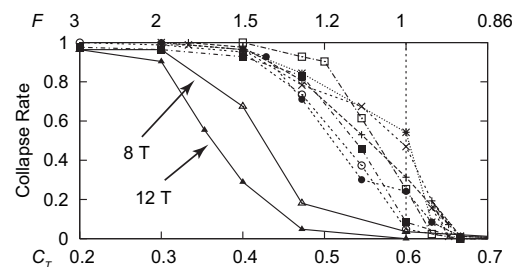
(a) 基準階 $C_T = 0.3$ (模擬地震動)



(c) 基準階 $C_T = 0.6$ (模擬地震動)



(b) 基準階 $C_T = 0.3$ (実地震動)



(d) 基準階 $C_T = 0.6$ (実地震動)

図 - 6 C_T 値が異なる階の倒壊率 (全階 $I_S = 0.6$)

にも同様の傾向が見られた。 F 値が 1 を下回るような脆性的な階であっても、 C_T 値が他の階よりも高い場合には倒壊しないことがわかる。

6. 建物が倒壊するときの地震動強さ

全階の I_S 値が一定 (= 0.6) の建物で、建物が倒壊するときの地震動の強さがどの程度であるかを検討する。全階の C_T 値、 F 値が一定である建物に模擬地震動を入力した際の、倒壊確率と地震動強さ (PGV) の関係を図 - 7 に、1 階の C_T 値が他階よりも低い (F 値が大きい) 建物の場合を図 - 8 に示す。(a), (b) はそれぞれ 4 階, 12 階モデルである。

図 - 7(a) では、モデルが倒壊し始める PGV はいずれのモデルもほぼ同じであったが、倒壊確率が 100% となる時の PGV は F 値が 3 のモデルが最も大きかった。また図 - 7(b) では、モデルの F 値の増加に伴い、倒壊確率に対する PGV が増加した。倒壊確率が 100% となる時の PGV は $F = 3$ のモデルは $F = 1$ のモデルの 2 倍程度となった。また、4 階モデルよりも 12 階モデルの方が大きな PGV で倒壊した。つまり、 I_S 値が一定であるにも関わらず、靱性のある高層建物の方が強い結果となった。

図 - 8(a), (b) では図 - 7(a), (b) と比べて、

倒壊確率と地震動強さの関係が、 F 値が変化してもあまり変わらなかった。4階モデルと12階モデルの差も少ない。 C_T 値、 F 値が一定の場合、特定階に倒壊が集中しにくかったが(図-3(a), (c)参照), 1階の C_T 値が他階よりも低い建物は全て1階で倒壊した(図-6(a), (c)参照)。1つの階に地震エネルギーが集中するため、12階モデルが倒壊するPGVが小さくなったものと考えられる。実際の建物では、全階の C_T 値、 F 値が一定ということは、あり得ない。よって I_S 値が等しい建物は、建物の階数、 C_T 値、 F 値に関わらず、ほぼ同じ耐震性であるといえる。

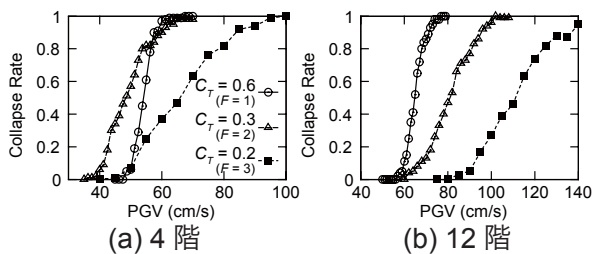


図-7 地震強さと倒壊 (全階 C_T 値一定)

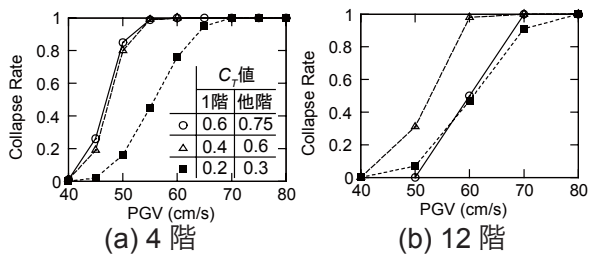


図-8 地震強さと倒壊 (1階 C_T 値が低い)

7. 特定階の I_S 値が低い建物

図-9のように、特定階の I_S 値が0.5、それ以外(基準階)の I_S 値が0.6という建物を考える。この場合、 C_T 値にかかわらず特定階が最も危険といえるかどうかを検討する。

7.1 靱性抵抗型建物

基準階で $C_T = 0.3$ 、 $F = 2$ (つまり $I_S = 0.6$)とし、特定階(最上階、中間階または最下階)の I_S 値を0.5として C_T 値を変動させた時の特定階の倒壊確率を図-10(a), (b)に示す。それぞれ模擬地震動と実地震動を入力した。この場合、 C_T 値が0.3(=基準階 C_T 値)付近で、 C_T 値の増加に伴い急激に倒壊確率が減少した。 C_T 値が0.3の時には倒壊確率が50%以上のモデルが多いが、0.35程度(他階の7/6)となると10%未満となった。

特定階の I_S 値を0.4とした時の特定階の倒壊確率を図-10(c), (d)に示す。(c)は C_T 値が0.35、(d)は、 C_T 値が0.45(他階の3/2)で倒壊確率が10%未満となった。

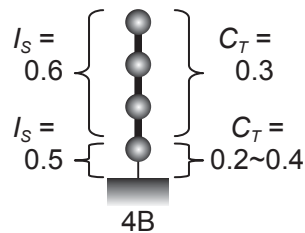
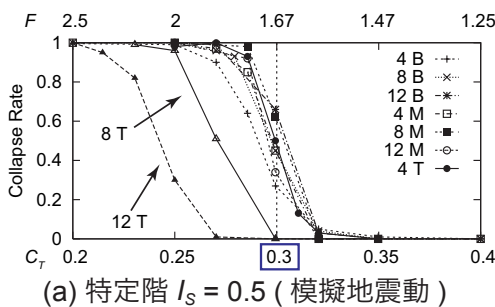
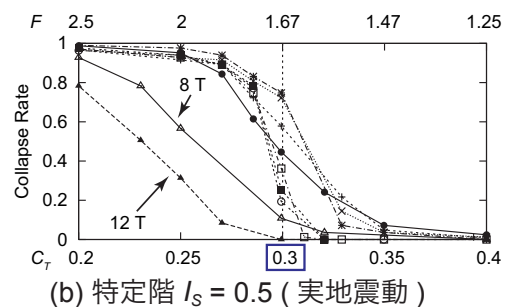


図-9 4Bモデル (特定階 $I_S = 0.5$, 基準階 $I_S = 0.6$)

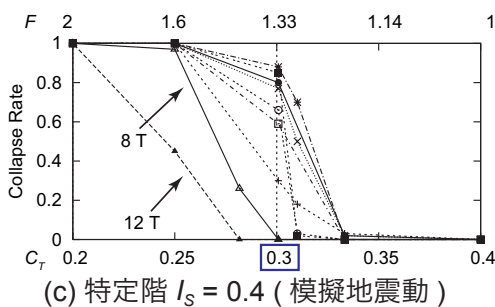
つまり、 I_S 値が他の階よりも小さい階であっても、全階の I_S 値が等しい場合(図-6(a), (b)参照)



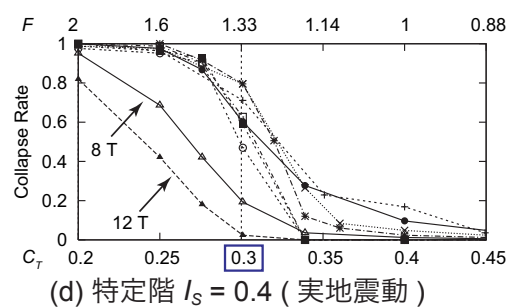
(a) 特定階 $I_S = 0.5$ (模擬地震動)



(b) 特定階 $I_S = 0.5$ (実地震動)



(c) 特定階 $I_S = 0.4$ (模擬地震動)



(d) 特定階 $I_S = 0.4$ (実地震動)

図-10 I_S 値が異なる階の倒壊率 (基準階 $C_T = 0.3$, $F = 2$, $I_S = 0.6$)

と同様に、 C_T 値が高い階は倒壊しにくいことがわかる。倒壊確率の傾きは特定階の I_S 値が低い方が緩やかであり、倒壊確率がほぼ 0 となる C_T 値も高くなった。これは、 I_S 値が低い階の方が倒壊しやすいからである。しかし、前述のように I_S 値の差が 0.2 程度では、階の倒壊しやすさは C_T 値によって大きく左右される。

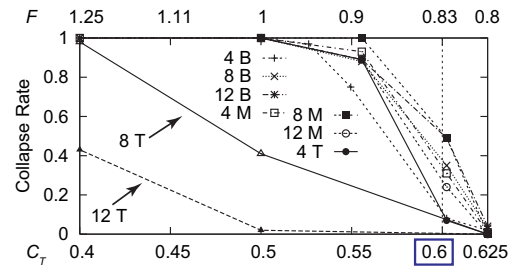
7.2 強度抵抗型建物

基準階で $C_T = 0.6$ 、 $F = 1$ (つまり $I_S = 0.6$) とし、特定階の I_S 値を 0.5 として C_T 値を変動させた時の特定階の倒壊確率を図 11(a), (b) に示す。前節と同様に特定階の C_T 値が他階よりも高い場合には、倒壊しにくい結果となった。模擬地震動の場合には、 C_T 値が 0.625 あれば、 F 値が 0.8 と極めて靱性がない階でも特定階はほぼ倒壊せず、実地震動の場合には、倒壊確率は 40% 未満となる。図に示すように、 C_T 値が他階を上回る範囲 ($0.6 < C_T < 0.625$) が少ないため、基準階の C_T 値が 0.3 ($F = 2$) のモデルよりは倒壊しやすい。しかしながら、 C_T 値によって倒壊確率が変化する点は同じである。特定階の I_S 値を 0.4 としたモデル (図 11(c), (d)) は、 $C_T < 0.5$ となるため、倒壊が生じにくい 8T, 12T モデル以外は、特定階が倒壊した。

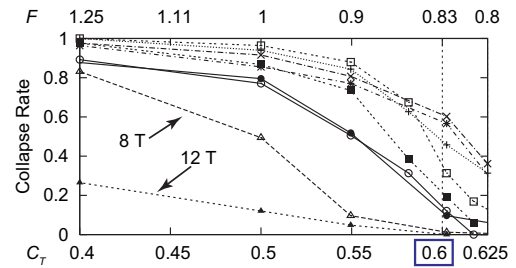
8. まとめ

I_S 値が 0.6 以下の 4 階から 12 階までの層降伏型 RC 建物を対象に、各階 C_T 値、 F 値、 I_S 値をパラメータとし、最も倒壊しやすい階を特定するための解析的検討を行った。ただし、モデルの質量分布は均等である。

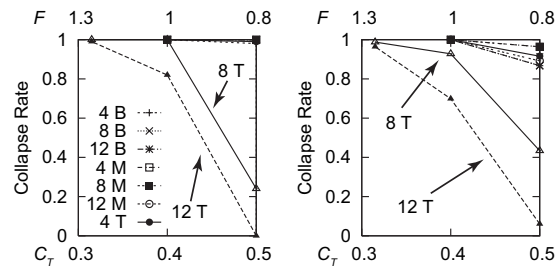
- (1) A_1 分布を用いて C_T 値からモデルの降伏強度を算出すると、最上階の耐震性が過小評価気味になるが、逆三角形分布よりは適切な評価ができる。
- (2) 全階の I_S 値が等しい建物では、 C_T 値が最も低い階が倒壊しやすい。
- (3) 靱性抵抗型建物は、 I_S 値が他階よりも 0.2 低い階であっても、他階よりも 3/2 以上高い C_T 値であれば倒壊率が 10% 未満となる。



(a) 特定階 $I_S = 0.5$ (模擬地震動)



(b) 特定階 $I_S = 0.5$ (実地震動)



(c) 特定階 $I_S = 0.4$ (模擬地震動)

(d) 特定階 $I_S = 0.4$ (実地震動)

図 11 I_S 値が異なる階の倒壊率
(基準階 $C_T = 0.6$, $F = 1$, $I_S = 0.6$)

- (4) 強度抵抗型の建物は、 I_S 値が他階よりも 0.1 低い階であっても、 C_T 値が他の階よりも 5% 高ければ、倒壊確率は 40% 未満となる。また、 I_S 値が他階よりも 0.2 低い階は倒壊する。

参考文献

- 1) (財)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，2001
- 2) 上野由美子，芳村学，中村隆也：既存低階鉄筋コンクリート建物の I_S 値と倒壊 (その 1, その 2)，日本建築学会大会学術講演梗概集 C - 2, pp711 - 714, 2004. 8
- 3) 澤木美穂，麻里哲広，石山祐二：耐震診断に用いる構造体新指標 I_S 値の地震応答解析による検証，日本建築学会大会学術講演梗概集 C - 2, pp715 - 716, 2004. 8