

論文 地震動の周期特性が耐震性能残存率へ及ぼす影響についての検討

姚 倩倩*1・伊藤 淑紘*1・鈴木 裕介*2・前田 匡樹*3

要旨: 近年建物の高層化が進む一方、地震動の長周期成分による高層建物への被害が多くなっており、本論文では、地震動の周期特性が耐震性能残存率 R へ及ぼす影響を検討した。まず $0.864s$ より長い長周期帯の地震動応答スペクトルを最大耐力(S_{amax})・下降点周期(β_T)・傾き影響因子(γ)で定式化し、最大耐力と下降点周期を一定として、傾き影響因子をパラメータとした場合の地震動傾きモデルと最大耐力と傾き影響因子を一定として、下降点周期をパラメータとした場合の地震動周期特性モデルについて検討した。建物性能の耐力低下・変形性能低下・減衰低下から求めた損傷モデルを使用し、損傷前後の建物の固有周期と地震動周期特性の関係によって、建物を四つの損傷状態に分類し、耐震性能残存率 R を定式化した。そして、地震動特性の変化が耐震性能残存率 R へ及ぼす影響について検討した。

キーワード: 地震応答スペクトル特性, 損傷モデル, 保有耐震性能指標値, 耐震性能残存率

1. はじめに

近年建物の高層化が進む一方、長周期成分を含む地震による高層建物への被害が多く見られる。「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針」¹⁾では建物が保有する耐震性能を建物固有の指標値として評価するために図-1に示す保有耐震性能指標があり、それは限界地震動と減衰した基準地震動の比として定義されている。「被災度区分判定基準」²⁾では、耐震性能残存率 R に基づいて建物の被災度を判定している。既往の研究³⁾では、図-2のように示す応答スペクトル法に基づいて、建物の耐力低下・変形性能低下・減衰低下を考慮し、耐震性能残存率 R を損傷後の保有耐震性能指標値 α_x と損傷前の保有耐震性能指標値 α_0 の比 α_x/α_0 で評価している。

図-3に示すように Tohoku, Elcentro などの地震動加速度スペクトルは長周期成分と短周期成分に多様性がある。現行の耐震設計基準で、リスクを低減するために、図-3のように地震応答スペクトルの最小値と下降率について検討した。地震応答スペクトル低下を緩和する規定は過度に安全側に設定している問題もある。そして、地震応答スペクトルの周期特性が耐震性能残存率 R へ及ぼす影響についての検討が必要である。

そこで、図-4の地震動傾きモデルと図-5の地震動周期モデルを設定する。図-4に示すように傾きが小さい地震動1に対する残存率 R_1 と傾きが大きい地震動2に対する残存率 R_2 の関係を検討することで、傾きによる残存率への影響を検討する。また図-5のように示す下降点周期が短い地震動3に対する残存率 R_3 と下降点周期が長い地震動4に対する残存率 R_4 の関係を検討することで、周期特性による残存率への影響を検討する。

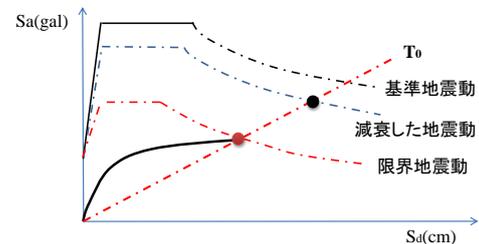


図-1 保有耐震性能指標

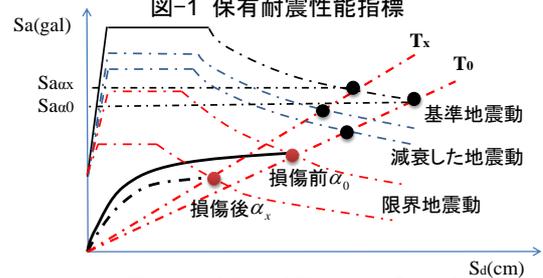


図-2 耐震性能残存率の計算法

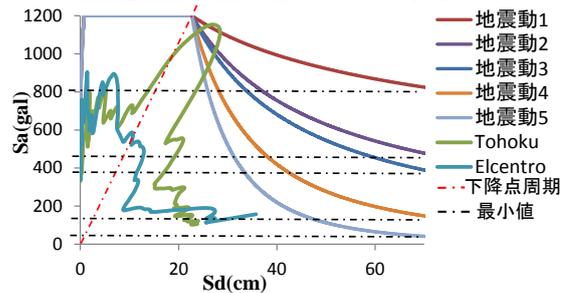


図-3 地震応答スペクトル特性

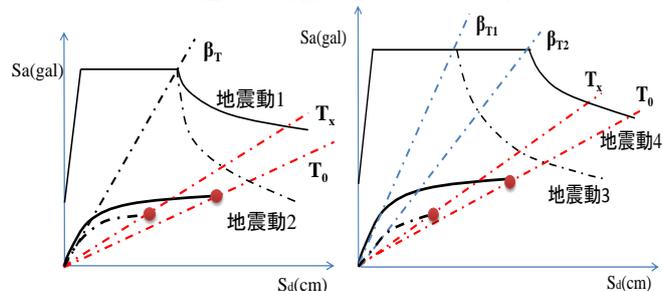


図-4 傾きモデル

図-5 周期特性モデル

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 博士課程前期 (学生会員)

*2 東北大学 災害科学国際研究所 助教 博士 (工学) (正会員)

*3 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 アメリカ西部における強地震動記録数

地盤	震度 M	震源距離(Km)				
		0<L≤10	10<L≤30	30<L≤50	50<L≤100	L>100
岩盤	M≥4	27	42	24	16	10
	M≥5	2	22	24	28	10
	M≥6	2	14	22	22	8
	M≥7	0	0	6	12	2
土壌	M≥4	169	209	142	126	44
	M≥5	59	182	142	122	44
	M≥6	13	73	124	100	44
	M≥7	0	10	8	46	8

表-2 台湾集集における強地震動記録数

サイト種類	震源距離(Km)				
	0<L≤30	30<L≤50	50<L≤80	80<L≤120	120<L≤200
C	4	18	28	14	4
D	24	44	58	58	34
E	4	22	18	20	52

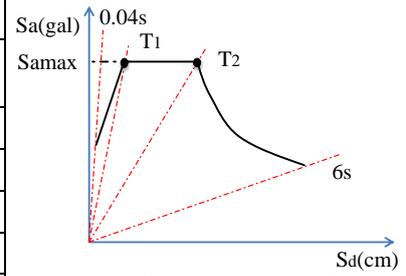


図-6 曲線 F3 による地震応答スペクトル特性

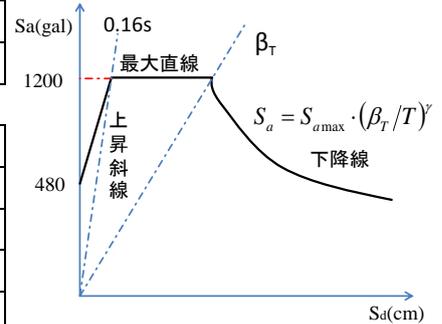


図-7 地震動特性

2. 地震動応答スペクトルの設定

近年においては建設技術の向上により建物の高層化が進む一方で、長周期成分を含む地震による高層建物への被害が多くある。例えば、1996年に中国の南黄海師長周期震災、2003年の日本十勝沖震災などが挙げられる。そこで本研究では0.864sより大きい長周期帯の地震動について検討した。

2.1 基準地震動

「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針」¹⁾による、建物の保有耐震性能を評価するための基準地震動は、建物の基礎底位置の入力地震動とし、解放工学的地盤における応答スペクトルから表層地盤の増幅特性を考慮して求める。第二種地盤を使用した基準地震動を式(1)に示す：

$$\begin{aligned}
 S_a &= 480 + 4500T \quad (T \leq 0.16) \\
 S_a &= 1200 \quad (0.16 < T \leq 0.864) \\
 S_a &= 1036.8/T \quad (0.864 < T)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

2.2 地震動特性モデルの設定

GENG Shuwei らの研究⁴⁾で、0.864sより長い周期帯の地震動応答スペクトルの形状が検討された。この論文ではデジタル地震観測システムにより計測されたアメリカ西部地震動記録と1999年台湾集集地震記録を用いた。岩盤と土壌のサイトにおける震源距離がL(Km)のアメリカ西部震度4級以上の水平方向の強地震動記録数を表-1に示す。C、D、Eのサイトにおける震源距離がL(Km)の1999年台湾集集強地震動記録数を表-2に示す。GENG Shuwei らの研究ではこれらの地震動記録に対する、5%減衰を考慮して、周期が6s以内

の地震動応答スペクトル S_a - S_d 曲線が F1-F6 の六種類に定式化された。その結果として式(2)のような地震動応答スペクトル S_a - S_d 曲線 F3 が実際の地震動に最も近似するという結論を得た。地震動応答スペクトル S_a - S_d 曲線 F3 を 図-6 に示す。 S_{amax} は地震動 S_a - S_d 曲線の最大値であり、 T_1 、 T_2 は特性周期である。特性周期を境に地震動応答スペクトルの変化(上昇, 低下)率が変わる。

$$\begin{aligned}
 F3 &= a + (S_{amax} - a) \left(\frac{T - 0.04}{T_1 - 0.04} \right) \quad (0.04 \leq T < T_1) \\
 F3 &= S_{amax} \quad (T_1 \leq T < T_2) \\
 F3 &= S_{amax} \left(\frac{T_2}{T} \right)^b \quad (T_2 \leq T < 6.0)
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

本研究で式(2)の地震動応答スペクトル S_a - S_d 曲線に基づく、図-7 のような地震動応答スペクトル S_a - S_d 曲線を上昇斜線、最大直線、下降線の三段階に設定した。上昇斜線と最大直線は式(1)の $T \leq 0.16$ 、 $0.16 < T \leq 0.864$ 部分の式と同じである。式(2)の三番目の式の周期 T_2 を β_T に置換し、傾き影響因子 b を γ に置換すると、地震動下降線は式(3)で表すことができる。

$$S_a = S_{amax} \cdot (\beta_T / T)^\gamma \tag{3}$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{S_d}{S_a}} \tag{4}$$

- T : 終局周期
- β_T : 地震動下降点周期
- S_{amax} : 最大耐力
- γ : 傾き影響因子
- $\gamma = 1$, $\beta_T = 0.864s$, $S_{amax} = 1200gal$ 時の地震動は「鉄

筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針¹⁾で定義された基準地震動である。傾き影響因子が小さくなると、地震動下降線は緩くなる。下降点周期と下降線傾きは長周期架構の耐震設計に大きな影響を及ぼす。従って、表-3のように地震動傾きモデルと地震動周期性モデルを設定した。

1) 地震動傾きモデル

最大耐力と下降点周期を一定にし、傾き影響因子を変える。検討モデルを図-8に示す。

2) 地震動周期性モデル

最大耐力と傾き影響因子を一定にし、下降点周期を変える。検討モデルを図-9に示す。

3. 建物損傷モデルについて

3.1 建物モデル

本研究における建物モデルの荷重-変形関係を図-10に示す。ベースシア係数 $Q_y/W=0.3$ と仮定し、最大加速度を 300gal、ひび割れ耐力は最大耐力の 1/3 とした。また降伏時変形角は 0.5%、ひび割れ時変形角を 0.05% とし、終局塑性率を 4 とした。本モデルの各折れ点は下記ようになる。

ひび割れ点(1cm, 100gal)

降伏点(10cm, 300gal)

終局点(40cm, 300gal)

3.2 損傷モデルの検討

伊藤・前田らの研究⁵⁾では、既往の部材実験結果から各損傷度における部材の耐力・変形性能・減衰性能の低減係数を定義した。各損傷度の耐力・変形性能・減衰性能の低減係数を表-4と表-5に示す。

建物周期と減衰による応答スペクトル補正係数は式(5)に示す。建物モデルの安全限界点(300gal, 40cm)と各損傷度の耐力・変形性能・減衰性能の低減係数による建物の損傷モデルを求めた。表-6に曲げ損傷モデルを示し、表-7にせん断損傷モデルを示す。

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h) \quad (5)$$

図-11に建物の周期と2.2で設定した地震動モデルの下降点周期の関係を示す。損傷度 I 時の建物周期は損傷前の周期と同じである。損傷度 II, III 時の周期は損傷前の周期より短くなり、損傷度 IV 時の周期は損傷前の周期より長くなる結果となった。

4. 地震動下降点周期と損傷前後建物周期の関係による損傷状態の検討

図-1のように保有耐震性能指標は限界地震動と減衰した地震動の比で求める。図-12に示すように地震動の下降点周期 β_T が建物の周期 T_0 , T_x より短い場合

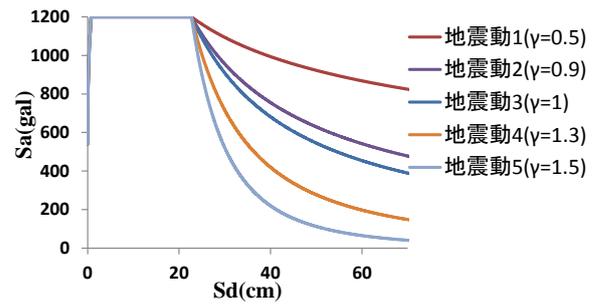


図-8 地震動傾きモデル

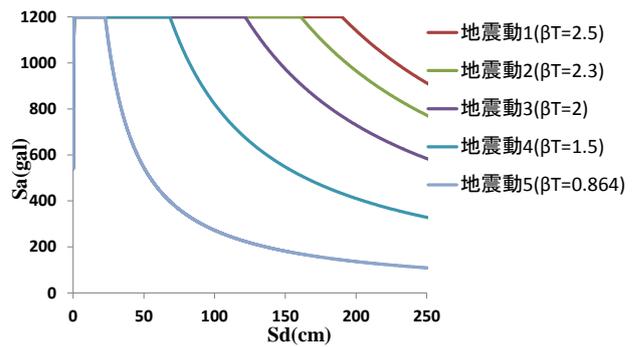


図-9 地震動周期性モデル

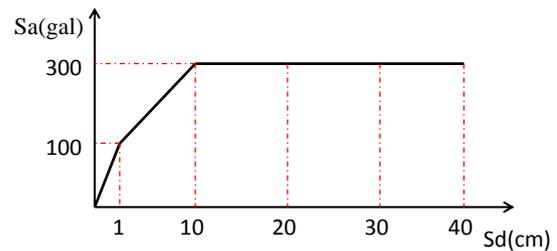


図-10 建物モデル

表-3 地震動モデル

モデル	上昇斜線	下降線		
		S_{amax} (gal)	β_T (s)	γ
傾きモデル	式(1)の $T < 0.16$ と 同じ	1200	0.864	1.5, 1.3, 1.0, 0.9, 0.5
周期性モデル	式(1)の $T < 0.16$ と 同じ	1200	2.5, 2.3, 2.0, 1.5, 0.864	1

表-4 曲げ損傷低減係数

損傷度	耐力低下	変形低下	減衰低下
I	1.00	1.00	0.95
II	1.00	0.95	0.80
III	1.00	0.85	0.75
IV	0.60	0.75	0.70

の保有耐震性能指標を式(6), (7) ように定式した。図-13 ように示す地震動の下降点周期 β_T が建物の周期 T_0 , T_x , より長い場合の保有耐震性能指標を式(8), (9) ように定式した。

$$\beta_T \leq T_0 \quad \alpha_{0(\beta_T \leq T_0)} = \frac{S_{a0}}{S_{amax} \cdot \left(\frac{\beta_T}{T_0}\right)^\gamma \cdot F_{h0}} \quad (6)$$

$$\beta_T \leq T_x \quad \alpha_{x(\beta_T \leq T_x)} = \frac{S_{ax}}{S_{amax} \cdot \left(\frac{\beta_T}{T_x}\right)^\gamma \cdot F_{hx}} \quad (7)$$

$$\beta_T \geq T_0 \quad \alpha_{0(\beta_T \geq T_0)} = \frac{S_{a0}}{S_{amax} \cdot F_{h0}} \quad (8)$$

$$\beta_T \geq T_x \quad \alpha_{x(\beta_T \geq T_x)} = \frac{S_{ax}}{S_{amax} \cdot F_{hx}} \quad (9)$$

T_0 : 建物損傷前の周期

T_x : 建物損傷後の周期

β_T : 地震動下降点周期

α_0 : 損傷前の保有耐震性能指標

α_x : 損傷後の保有耐震性能指標

図-14 に示すように T_0 , T_x , β_T の関係から建物を表-8 のような四つの損傷状態 Damage 1, Damage 2, Damage 3, Damage 4 に分類した。表-6 と表-7 の損傷度に対する性能低減係数を用いて図-2 のように損傷後の保有耐震性能指標と損傷前の保有耐震性能指標の比で四つの損傷状態の耐震性能残存率 R を式(10)~(13) ように定式化した。

表-8 の損傷状態の Damage 1 の場合は $\beta_T < T_x < T_0$ または $\beta_T < T_0 < T_x$, 残存率 R は式(10)の R_{D1} で計算する。Damage 2 の場合は $T_x < \beta_T < T_0$, 残存率 R は式(11)の R_{D2} で計算する。Damage 3 の場合は $T_0 < \beta_T < T_x$, 残存率 R は式(12)の R_{D3} で計算する。Damage 4 の場合は $T_x < T_0 < \beta_T$ または $T_0 < T_x < \beta_T$, 残存率 R は式(13)の R_{D4} で計算する。

$$R_{D1} = \frac{\alpha_{x(\beta_T \leq T_x)}}{\alpha_{0(\beta_T \leq T_0)}} = \frac{S_{ax}}{S_{a0}} \cdot \frac{F_{h0}}{F_{hx}} \cdot \left(\frac{T_x}{T_0}\right)^\gamma \quad (10)$$

$$R_{D2} = \frac{\alpha_{x(\beta_T \geq T_x)}}{\alpha_{0(\beta_T \leq T_0)}} = \frac{S_{ax}}{S_{a0}} \cdot \frac{F_{h0}}{F_{hx}} \cdot \left(\frac{\beta_T}{T_0}\right)^\gamma \quad (11)$$

$$R_{D3} = \frac{\alpha_{x(\beta_T \leq T_x)}}{\alpha_{0(\beta_T \geq T_0)}} = \frac{S_{ax}}{S_{a0}} \cdot \frac{F_{h0}}{F_{hx}} \cdot \left(\frac{T_x}{\beta_T}\right)^\gamma \quad (12)$$

$$R_{D4} = \frac{\alpha_{x(\beta_T \geq T_x)}}{\alpha_{0(\beta_T \geq T_0)}} = \frac{S_{ax}}{S_{a0}} \cdot \frac{F_{h0}}{F_{hx}} \quad (13)$$

表-5 せん断損傷低減係数

損傷度	耐力低下	変形低下	減衰低下
I	1.00	1.00	0.90
II	1.00	0.85	0.70
III	1.00	0.70	0.60
IV	0.40	0.50	0.50

表-6 曲げ損傷モデル

損傷度	Sa(gal)	Sd(cm)	h	T(s)	Fh
no damage	300	40	0.175	2.293	0.545
I	300	40	0.166	2.293	0.563
II	300	38	0.140	2.235	0.625
III	300	34	0.131	2.114	0.649
IV	180	30	0.123	2.564	0.674

表-7 せん断損傷モデル

損傷度	Sa(gal)	Sd(cm)	h	T(s)	Fh
no damage	300	40	0.175	2.293	0.545
I	300	40	0.158	2.293	0.581
II	300	34	0.123	2.114	0.673
III	300	28	0.105	1.919	0.731
IV	120	20	0.088	2.564	0.798

表-8 損傷状態

損傷状態	下降点周期と建物の周期の関係
Damage 1 (R_{D1})	$\beta_T < T_x < T_0$, $\beta_T < T_0 < T_x$
Damage 2 (R_{D2})	$T_x < \beta_T < T_0$
Damage 3 (R_{D3})	$T_0 < \beta_T < T_x$
Damage 4 (R_{D4})	$T_x < T_0 < \beta_T$, $T_0 < T_x < \beta_T$

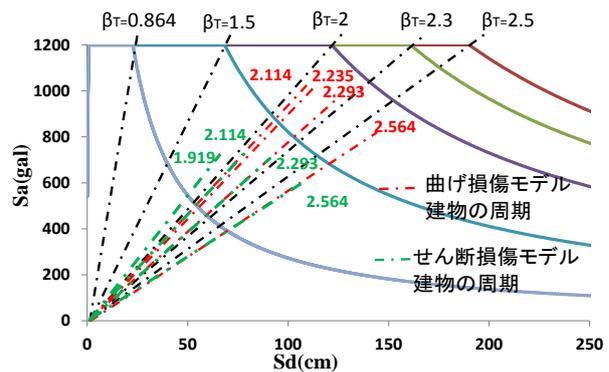


図-11 建物の周期と地震動周期特性の関係

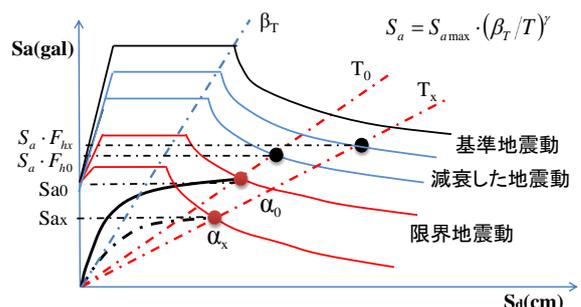


図-12 $\beta_T < T_x$, $\beta_T < T_0$ 場合の保有耐震性能指標

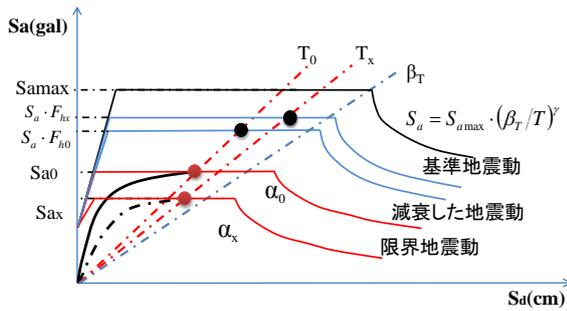


図-13 $\beta_T > T_x$, $\beta_T > T_0$ 場合の保有耐震性能指標

式(10)~(13)より建物損傷モデルが一定の場合、 $S_{ax} F_{h0} / S_{a0} F_{hx}$ が一定であるので、図-2 のように残存率 R は損傷前建物の基準地震動 S_{a0} と損傷後建物の基準地震動 S_{aux} の比 $\omega = S_{a0} / S_{aux}$ で決まることが分かった。

5. 地震動応答スペクトルの影響

5.1 地震動傾きの影響

図-11 のように地震動傾きモデルの下降点周期は 0.864s であるので、表-6 と表-7 のように建物の損傷モデルに対する建物の損傷状態は全て Damage 1 である。

1) 図-15, 図-16 から、損傷度 I で地震動傾きにかかわらず、耐震性能残存率 R は同じである。損傷度 II と損傷度 III で、傾きが小さくなると、耐震性能残存率 R は大きくなる。損傷度 IV で傾きが小さくなると、耐震性能残存率 R は小さくなる。

2) 原因としては、損傷度 I の建物の周期は損傷前と同じであるので、地震動特性は残存率 R への影響がない。図-19 ように $\omega_{\gamma 1} = S_{a1} / S_{ax1}$, $\omega_{\gamma 2} = S_{a2} / S_{ax2}$, $\omega_{\gamma 1} > \omega_{\gamma 2}$, そして $R_1 > R_2$ となる。

5.2 地震動周期特性の影響

図-11 ように示す地震動周期特性モデルに対する、表-6 と表-7 のように建物損傷モデルの損傷状態を表-9 と表-10 に示す。

1) 図-17, 図-18 から、損傷度 I の時、残存率は同じである。損傷度 II, III の時、地震動 1, 2 場合の残存率は地震動 3, 4, 5, 6 の場合より大きくなる。損傷度 IV の時、地震動 1 の場合の残存率は地震動 2, 3, 4, 5, 6 の場合より小さくなる。

2) 原因としては、地震動 1, 2 の場合、建物の損傷状態は Damage 4 と Damage 3 になった。地震動 3, 4, 5 の場合、建物の損傷状態は Damage 1 と Damage 2 になった。図-20 のように Damage 3 で $\omega_{T2} > \omega_{T1}$ となる。従って、同じ損傷レベルで地震動 2 の R_{D3} は地震動 1 の R_{D3} より大きい。図-21 ように $\omega_2 > \omega_1$, そして同じ損傷レベルで $R_{D2} > R_{D1}$ となる。図-22 ように $\omega_4 > \omega_1$, そして同じ損傷レベルで $R_{D4} > R_{D1}$ となる。

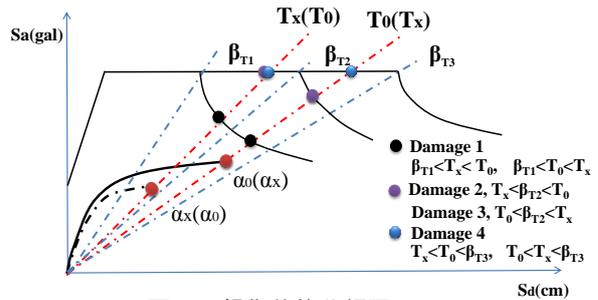


図-14 損傷状態分類図

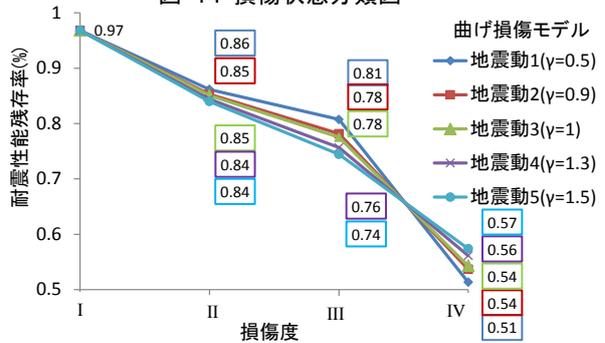


図-15 地震動傾きの残存率への影響

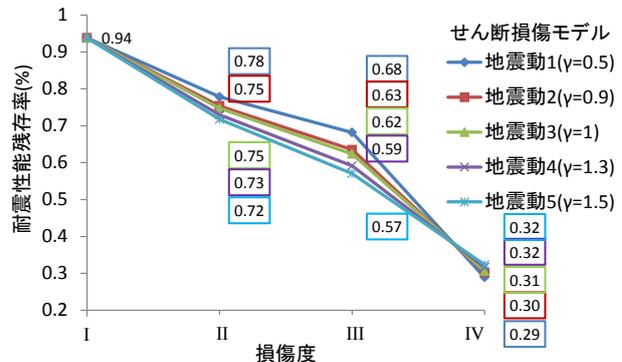


図-16 地震動傾きの残存率への影響

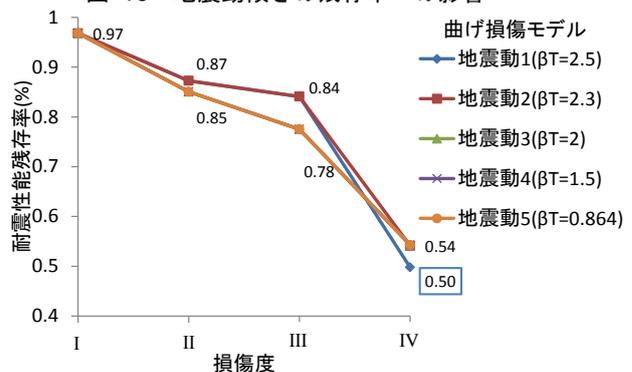


図-17 地震動周期特性の残存率への影響

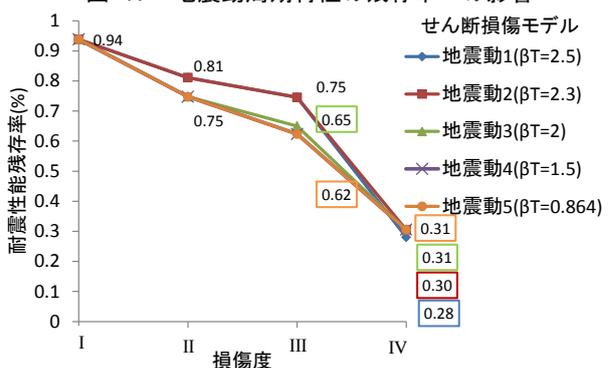


図-18 地震動周期特性の残存率への影響

表-9 曲げ損傷モデルの損傷状態

損傷状態	損傷度 I ($T_1=2.293$)	損傷度 II ($T_2=2.235$)	損傷度 III ($T_3=2.114$)	損傷度 IV ($T_4=2.564$)
地震動 1($\beta_T=2.5$)	Damage 4	Damage 4	Damage 4	Damage 3
地震動 2($\beta_T=2.3$)	Damage 4	Damage 4	Damage 4	Damage 3
地震動 3($\beta_T=2$)	Damage 1	Damage 1	Damage 1	Damage 1
地震動 4($\beta_T=1.5$)	Damage 1	Damage 1	Damage 1	Damage 1
地震動 5($\beta_T=0.864$)	Damage 1	Damage 1	Damage 1	Damage 1

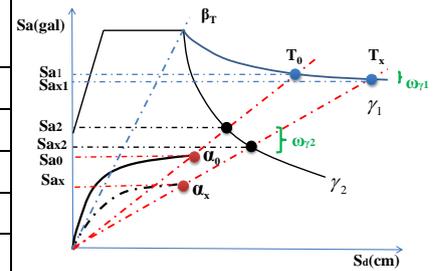


図-19 Damage 3 傾きの影響

表-10 せん断損傷モデルの損傷状態

損傷状態	損傷度 I ($T_1=2.293$)	損傷度 II ($T_2=2.114$)	損傷度 III ($T_3=1.919$)	損傷度 IV ($T_4=2.564$)
地震動 1($\beta_T=2.5$)	Damage 4	Damage 4	Damage 4	Damage 3
地震動 2($\beta_T=2.3$)	Damage 4	Damage 4	Damage 4	Damage 3
地震動 3($\beta_T=2$)	Damage 1	Damage 1	Damage 2	Damage 1
地震動 4($\beta_T=1.5$)	Damage 1	Damage 1	Damage 1	Damage 1
地震動 5($\beta_T=0.864$)	Damage 1	Damage 1	Damage 1	Damage 1

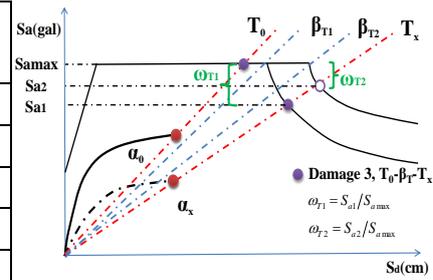


図-20 Damage 3 で周期特性の影響

6. まとめ

本研究では地震応答スペクトルの傾き・周期特性モデルを設定し、建物性能の耐力低下・変形性能低下・減衰低下から求めた損傷モデルを使用し、地震動の周期特性が耐震性能残存率へ及ぼす影響を検討した。

- 地震応答スペクトルの傾きモデルは傾き影響因子が小さくなると、地震動下降線は緩くなる。
- 建物の損傷状態は損傷前後建物周期と地震動の下降点周期の関係で決まる。本研究では四つの損傷状態の耐震性能残存率を定式化した。Damage 1($\beta_T < T_x < T_0$, $\beta_T < T_0 < T_x$), 2($T_x < \beta_T < T_0$), 3($T_0 < \beta_T < T_x$) の場合、地震応答スペクトルの傾きおよび下降点周期と建物の周期が耐震性能残存率に影響する；Damage 4($T_x < T_0 < \beta_T$, $T_0 < T_x < \beta_T$) の場合、地震応答スペクトル特性は耐震性能残存率へは影響しない。
- 建物損傷モデルが一定の場合、耐震性能残存率 R は損傷前建物の減衰した地震動と損傷後建物の減衰した地震動の比 ω で決まる。地震動傾きは小さくなると、耐震性能残存率 R は大きくなる傾向が見られた；地震動の下降点周期は小さくなると、同じ損傷レベルで残存率は大きくなる傾向が見られた。
- 耐震設計用地震動として、下降点周期が小さい地震動と傾きが大きい地震動に対する建物は安全側である。

参考文献

- 日本建築学会:「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針」・同解説, 2004
- 日本建築防災協会:「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」, 2001

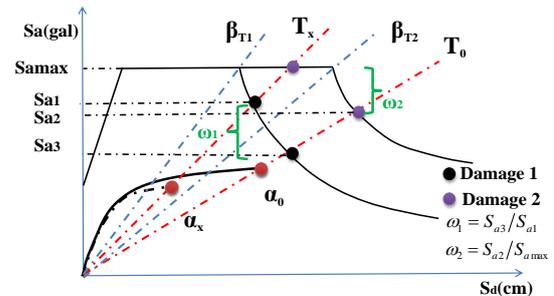


図-21 同じ損傷レベル Damage 1, 2 の比較

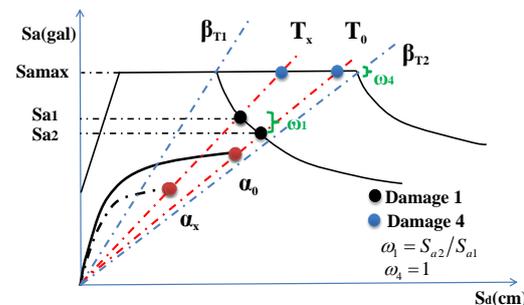


図-22 同じ損傷レベル Damage 1, 4 の比較

- 姚倩倩・前田ら: 応答スペクトルに基づく震災 RC 造建物の残存耐震性能評価 その1 評価法の基本概念と架構の性能低下の影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集(近畿), pp195-196, 2014.8
- GENG Shuwei: study on the provisions for the values of design response spectra in long period section, WORLD EARTHQUAKE ENGINEERING, Vol.24, No.2, Jun., 2008
- 伊藤淑絃: 損傷部材の強度・変形・減衰性能の低下に基づく被災 RC 造建物の残存耐震性能評価法, 修士学位論文(東北大学), 2015.3