

論文 多数回繰り返し载荷を受ける超高層 RC 造骨組の履歴特性と地震応答

知野 裕和*¹・濱田 聡*²・秋田 知芳*³・和泉 信之*⁴

要旨: 長周期地震動による超高層 RC 造建築物の揺れが危惧されているが、多数回の繰り返し载荷が地震応答に及ぼす影響は解明されていない。本研究では、異なる履歴特性を有する RC 造骨組を対象として基準地震動を連続的に入力した時刻歴地震応答解析を行なった。まず 1 質点系モデルにより地震応答の特徴を把握し、次にフレームモデルにより多数回繰り返し载荷時の定性的な評価を行なった。履歴特性には慣用設計モデルと劣化検討モデルを用いた。それらの結果から、履歴特性の相違が地震応答に及ぼす影響を分析し、繰り返しによる経験変形の累積に伴い応答変形が増大することを示した。

キーワード: 超高層建築物, 鉄筋コンクリート造, 多数回繰り返し载荷, 時刻歴地震応答解析, 履歴特性

1. はじめに

近年、東海・東南海・南海地震などの大規模な海洋型の地震が発生することが危惧されている。このような大規模な地震が発生した場合、東京、大阪、名古屋などの堆積平野では長周期地震動に襲われる恐れがある。長周期地震動は長周期帯におけるエネルギーが大きいため、固有周期の長い超高層建築物は多数回の大きな揺れを受ける。これまでの耐震設計では、塑性域に入るほどの大きな部材変形は地震中に 2, 3 回程度と想定されているため、多数回繰り返し载荷に対する検討は行われていない。しかし、大地震が連動して発生した場合、超高層鉄筋コンクリート造（以下、RC 造と呼ぶ）建築物では塑性域に至る部材変形が多数回繰り返し発生する可能性があり、履歴特性におけるスリップ性状の変化や耐力低下などの劣化性状の影響が RC 造骨組の地震応答に与える影響が無視できなくなることが予想される。

著者らは、長周期地震動による多数回繰り返し変形を受ける超高層 RC 造建築物の耐震安全性評価について研究している。第一歩として、既存超高層 RC 造建築物の構造特性を模擬した骨組モデルを対象に、基準地震動を連続入力して多数回繰り返し载荷時の応答性状に及ぼす影響について報告した¹⁾。この研究では、履歴特性により異なるが、多数回繰り返し载荷により片寄り変形が生じて地震応答が増大する傾向があることを指摘した。

そこで本研究では、片寄り変形の発生要因に着目し、異なる履歴特性を有する 20 階建から 40 階建までの RC 造骨組を対象として履歴特性の相違が多数回繰り返し载荷時の地震応答に及ぼす影響を分析する。履歴特性には慣用的に耐震設計に用いられている武田モデル（以下、Takeda モデル）のほかに、繰り返し载荷による劣化やスリップ性状を設定した劣化検討モデル²⁾を用いる。基準

地震動を連続的に入力した時刻歴地震応答解析を行い、まず質点系モデルにより地震応答の特徴を把握する。次にフレームモデルにより多数回繰り返し载荷時の定性的な評価を行なう。基準地震動には既往の研究²⁾と同様に日本建築センター設計用入力地震動(BCJ-L2 波)を用い、入力レベルは応答変形の値に応じて適宜設定する。なお、劣化検討モデルは既往の研究^{1), 2)}などを参考に設定したものであり、多数回繰り返し载荷による超高層 RC 造骨組の履歴特性の劣化に関する定量的な評価については今後の研究課題としたい。

2. 解析計画

2.1 対象建築物

対象建築物は超高層 RC 造技術の進展度に着目した設計年代のうち、2000 年以降の第 3 年代を想定した 3 モデルである（表-1）。1 質点系モデルでは 20 階、30 階、40 階を対象に、フレームモデルでは 30 階を対象に解析モデルを作成する。詳しくは文献 3) を参照されたい。

表-1 骨組モデルの諸元

設計年代	第3年代					
	3G20		3G30		3G40	
モデル名	3G20		3G30		3G40	
方向	X	Y	X	Y	X	Y
建築物高さ(m)	63.6		94.6		125.6	
階数	20		30		40	
基準階階高(m)	3.1		3.1		3.1	
柱芯面積(m ²)	585		936		1170	
柱支配面積(m ²)	39		39		39	
スパン長(m)	6	6.5	6	6.5	6	6.5
スパン数	5	3	6	4	6	5
搭状比	2.12	3.26	2.63	3.64	3.49	3.86
Fc(N/mm ²)	42		54		70	
主筋強度(N/mm ²)	490		490		490	
平均重量(kN/m ²) [※]	15.4[11.6]		14.3[11.4]		13.4[10.9]	
T1(sec)	1.27	1.28	1.79	1.92	2.34	2.4
Cs	0.134		0.09		0.068	

※基準階重量を柱芯面積(バルコニー)で除した値([] 内はバルコニー含む面積で除した値)

*1 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻博士前期課程 (学生会員)

*2 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻博士後期課程 (戸田建設) (正会員)

*3 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻助教 博(工) (正会員)

*4 千葉大学大学院 工学研究科建築・都市科学専攻教授 博(工) (正会員)

2.2 1 質点系モデル

層のスケルトンカーブは、ベースシア係数 (C_B) と代表変形角 (R_T : 外力分布の重心位置に相当する床の水平変形をその階の高さで除した変形角) の関係 (図-1) を参考としてトリリニア型に設定する。その際、第1折れ点の耐力は降伏時ベースシア係数 (C_{By}) の 1/5 とし、第2折れ点は $R_T=1/150$ として設定する。1 質点系モデルの重量は骨組モデルの 1 次固有周期に合わせて設定する。骨組モデルの重量に対して、20 階モデルでは 79%、30 階モデルでは 72%、40 階モデルでは 65% と設定する。

2.3 フレームモデル

地震応答解析は、立体的な挙動を評価できるように建築物を柱、梁部材の弾塑性特性を考慮した立体フレームモデルに置換し、各層を剛床仮定により水平変位を等値したモデルにより行う。柱は曲げ・せん断・軸変形を、梁は曲げ・せん断変形を考慮する。柱の曲げ・軸変形は、ひび割れ発生および降伏による剛性変化を考慮できるファイバーモデルを用いる。

2.4 復元力特性

復元力特性には慣用設計モデルとして Takeda モデル (図-2)、劣化検討モデルとして Saito-Slip モデル (図-3) を用いる。Takeda モデルの除荷時剛性低下指数は 0.5 とする。Saito-Slip モデル²⁾ は、式 (a)、(b) で示される戻り剛性 (k_r)、荷重反転後のスリップ剛性 (k_s) や、式 (c) に示される荷重反転後に指向する最大点の移動によって規定され、3 つのパラメータ α 、 β 、 γ によって履歴特性を変化させることができる。本研究ではこの 3 つのパラメータのうち α 、 β の値を 3 つの組み合わせで設定し、 γ は 0.0、0.1、0.2 を用いる。パラメータ α 、 β の組み合わせを表-2 に示す。Saito1 は、石橋ら⁴⁾ による梁実験の試験体 B3L、B4L の実験結果と Saito-Slip モデルの解析結果を比較して変形角 1/50rad 載荷時の履歴面積が実験の履歴ループに合うように設定した値 ($\alpha=0.1$ 、 $\beta=0.3$) である。Saito2 は、同実験において残留変形とスリップ剛性が実験結果と適合するように設定した値 ($\alpha=0.4$ 、 $\beta=0.4$) である。Saito3 は、多数回繰り返し載荷柱梁接合部の実験の解析²⁾ に用いられた値 ($\alpha=0.5$ 、 $\beta=0.7$) である。図-4 に変形角 1/50rad 載荷時の Takeda モデルと Saito-Slip モデルの履歴ループの対応を示す。

2.5 検討用地震動

検討用地震動は日本建築センター設計用入力地震動 (BCJ-L2 波) を同じ加速度倍率で 3 回連続入力する。また、地震動入力後の残留変形の大きさを見るため地震動 1 回入力ごとに 30 秒間の自由振動を挟む。1 質点系モデルの入力倍率は、Takeda のケースで 1 回 (120 秒) 入力した際に層の最大塑性率が 0.5、1.0、1.5、2.0 となる大きさをそれぞれ LF0.5、LF1.0、LF1.5、LF2.0 とする。フレ

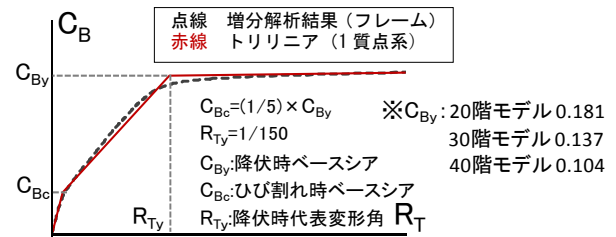


図-1 トリリニアの設定 (3G30)

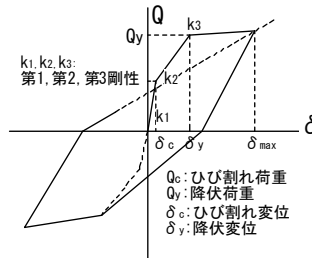


図-2 Takeda モデル

表-2 履歴特性パラメータの設定

ケース名	パラメータ
Takeda	除荷時剛性低下指数 $\gamma'=0.5$
Saito1	$\alpha=0.1, \beta=0.3$
Saito2	$\alpha=0.4, \beta=0.4$
Saito3	$\alpha=0.5, \beta=0.7$

※Saito-Slipモデルの γ と区別するためにTakedaの除荷時剛性低下指数を γ' とする

$$k_r = \left(\frac{M_y}{\phi_y} \right) \cdot \left| \frac{\phi_y}{\phi_m} \right|^\alpha \quad (a)$$

$$k_s = \left(\frac{M_m}{\phi_m - \phi_x} \right) \cdot \left| \frac{\phi_y}{\phi_m} \right|^\beta \quad (b)$$

$$\phi'_m = \left(1 + \gamma \cdot \left| \frac{\phi_y}{\phi_m} \right| \right) \cdot \phi_m \quad (c)$$

※耐力低下のパラメータは $\xi=0.0$ とする

図-3 Saito-Slip モデル

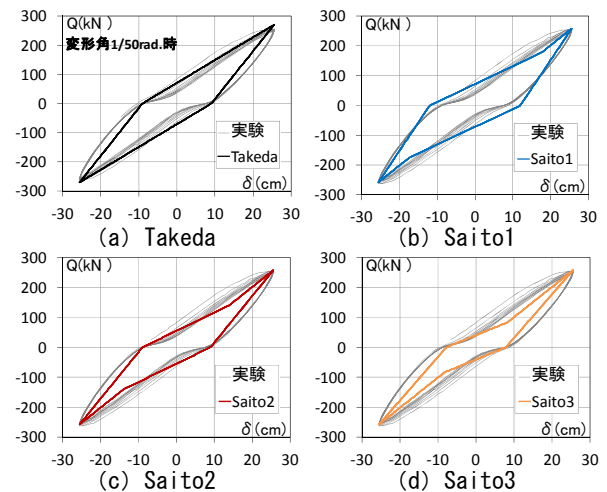


図-4 梁試験体 (B4L) の実験と解析の比較

表-3 地震動入力倍率

1 質点系モデル (骨組モデル)	入力レベル	BCJ-L2 入力倍率	最大加速度 (cm/sec ²)	継続時間 (s)
20階モデル	LF0.5	0.43	152.9	1 回入力 150秒 2 回入力 300秒 3 回入力 450秒
	LF1.0	0.78	277.4	
	LF1.5	1.12	398.4	
	LF2.0	1.30	462.4	
30階モデル	LF0.5	0.48	170.7	
	LF1.0	0.85	302.3	
	LF1.5	1.37	487.3	
	LF2.0	1.63	579.7	
40階モデル	LF0.5	0.56	199.2	
	LF1.0	0.96	341.4	
	LF1.5	1.27	451.7	
	LF2.0	1.80	640.2	
フレームモデル	レベル1	0.42	149.4	
	レベル2	1.1	391.2	

※BCJ-L2 元波は最大加速度 355.67cm/sec²

表-4 解析ケース

解析ケース	1質点系モデル (骨組モデル)	履歴特性	Saito-Slip パラメータ γ	地震動入力回数	地震動入力 レベル	第3勾配(k3) 第1勾配(k1)
ケース1 (1質点系)	20階モデル 1次固有周期1.27(s) 30階モデル 1次固有周期1.79(s)	Takeda Saito1 Saito2 Saito3	$\gamma=0.0$	1回入力 (継続時間150秒) 2回入力 (継続時間300秒) 3回入力 (継続時間450秒) ※自由振動区間 を含む	LF0.5~ LF2.0	0.001
ケース2 (1質点系)	40階モデル 1次固有周期2.40(s)	Takeda Saito3			0.001 0.01 0.02	
ケース3 (フレーム)	第3年代30階 1次固有周期1.79(s)	Takeda Saito1 Saito2 Saito3	$\gamma=0.0$		レベル1 レベル2	0.001
ケース4 (フレーム)		Saito3	$\gamma=0.0$ $\gamma=0.1$ $\gamma=0.2$		レベル2	0.001
ケース5 (フレーム)		Takeda Saito3	$\gamma=0.0$		レベル2	0.001 0.01

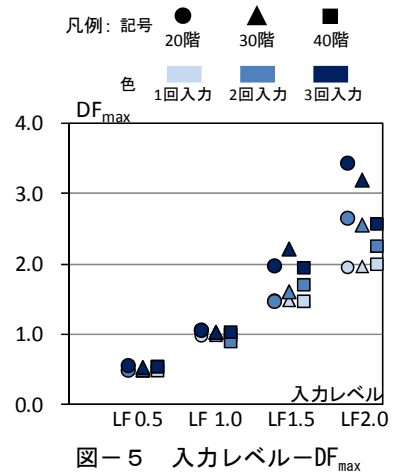


図-5 入力レベル-DF_{max}

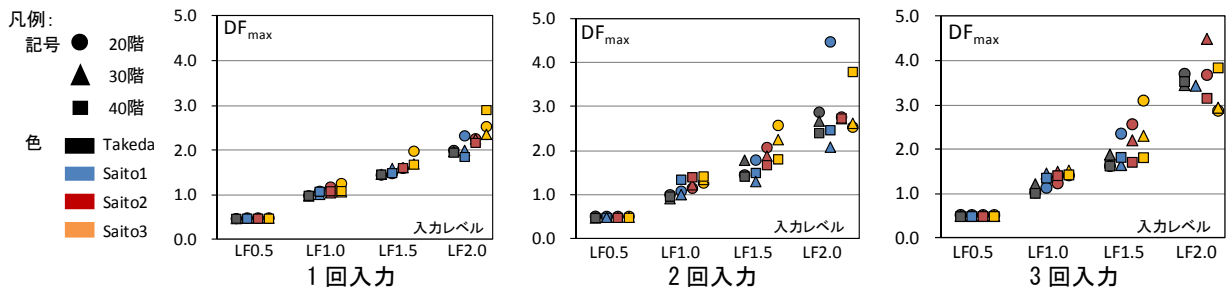


図-6 履歴特性の比較 (入力倍率-DF_{max})

ームモデルの入力倍率は、Takedaに1回入力した際に最大応答層間変形角が1/300程度となる倍率をレベル1、1/100程度となる倍率をレベル2とする(表-3)。

2.6 解析ケース

表-4に解析ケースの一覧を示す。内部粘性減衰は瞬間剛性比例型として、1次の減衰定数を3%とした。

3. 1質点系による地震応答解析

3.1 最大層塑性率

図-5にTakedaのケースにおける入力レベルと最大層塑性率(DF_{max})の関係を示す。なお、検討はケース1で行なう。LF0.5, LF1.0では入力回数による応答の増大はほとんど見られないが、LF1.5, LF2.0では、3つの1質点系モデル全てにおいて応答の増大が見られる。このことから層塑性率が大きい入力における繰り返し载荷では応答が増大することが分かる。また、図-6に履歴特性の設定ごとの入力レベルとDF_{max}の関係を履歴特性に関わらず、入力レベルの増大に応じてDF_{max}は増大する傾向が見られる。周期の異なる3つの1質点系モデルを比較すると、Takedaでは、層塑性率が大きい入力に対してもほとんど差は生じないが、Saito-Slipモデルでは、DF_{max}の増大傾向がパラメータの設定により大きく異なる。

3.2 残留層塑性率

図-7にTakedaのケースにおける、LF2.0における30

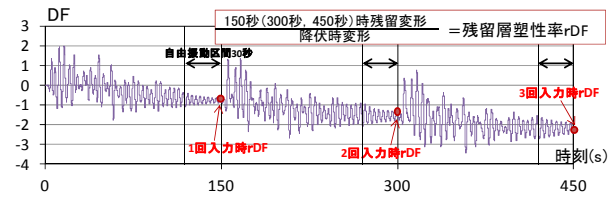


図-7 DFの時刻歴 (Takeda, 入力LF2.0)

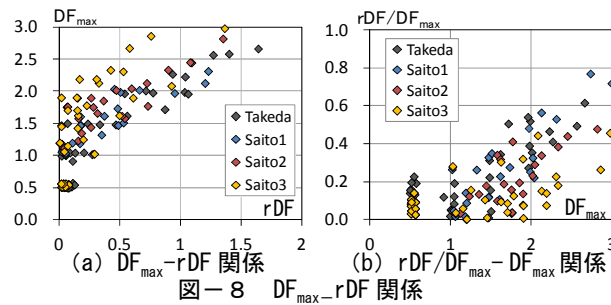


図-8 DF_{max}-rDF関係

階モデルのDFの時刻歴を示す。入力回数の増加とともに変形が次第に片側に寄っているのが分かる。また、自由振動区間において変形の片寄り元に戻ることは無く、変形が残っている。この解析終了時の変形量を残留変形とし、残留変形を降伏時の変形で除した値を残留層塑性率(rDF)とする。rDFとDF_{max}の関係、rDF/DF_{max}とDF_{max}の関係を図-8に示す。DF_{max}が1を超える範囲では、履歴特性によって差はあるが、rDFの増大に伴ってDF_{max}が増加している傾向が見られる。これらの結果から、繰り返し载荷によるDF_{max}の増大はrDFによる影響が強いと考えられる。また、戻り勾配が大きい履歴特性である

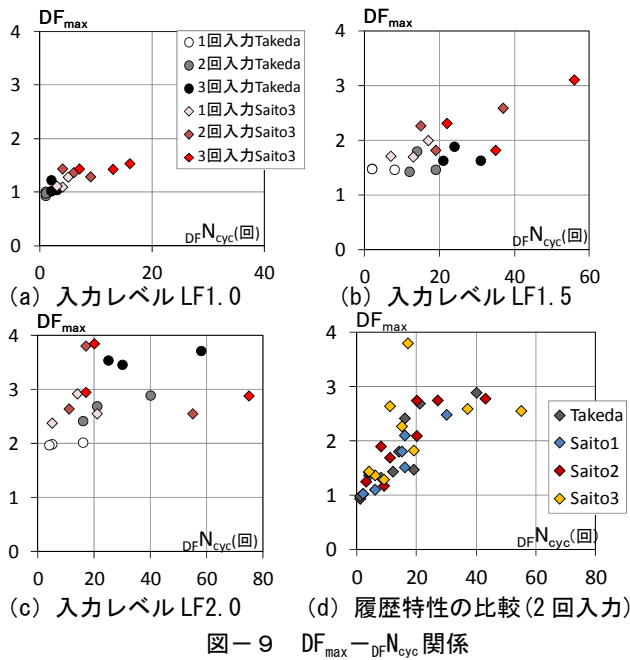
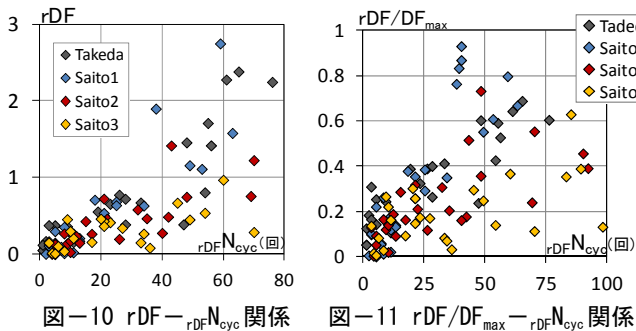


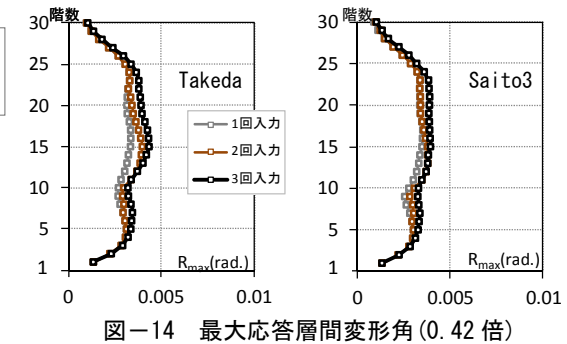
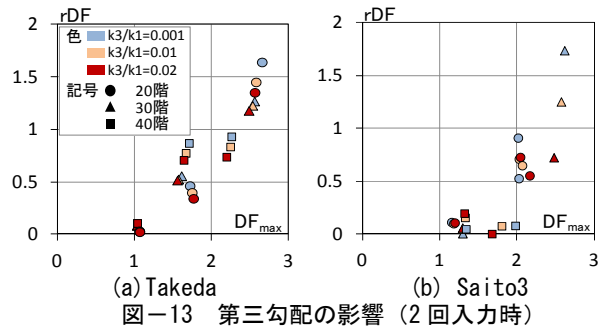
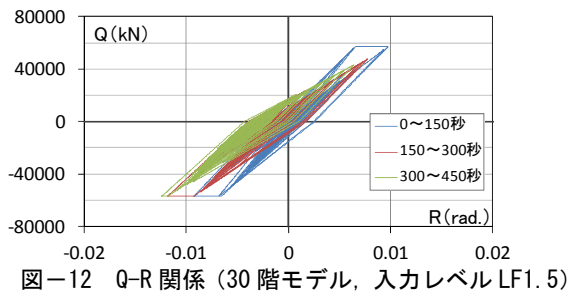
図-9 DF_{max} - $DF_{N_{cyc}}$ 関係



Saito1 や Takeda は DF_{max} に対して rDF の占める割合が大きい。これは復元力特性の戻り勾配が大きい場合、残留変形が残り易い履歴特性であることなどが要因と考えられる。なお、残留変形のばらつきなどに関する評価は今後の課題としたい。

3.3 繰り返し経験回数

時刻歴解析結果から層塑性率がある設定値を超えた回数を経験回数とする。なお、 DF_{max} の検討では DF_{max} を生じた時刻までの回数 ($DF_{N_{cyc}}$) とする。図-9 に層塑性率 1 を設定値とした時のケース 1 における DF_{max} と $DF_{N_{cyc}}$ の関係を示す。なお、(a) から (c) では入力レベルごとの Takeda と Saito3 の応答を示し、(d) には地震動 2 回入力時の各履歴特性の応答結果を示す。Takeda, Saito3 ともに入力回数が増え、それに伴い DF_{max} も増大していることが分かる。また、図-10 に rDF と経験回数の関係を示す。 rDF の検討では、地震動継続時間中に受けた繰り返し载荷の累積を評価するために、解析終了時までの回数を経験回数 ($rDF_{N_{cyc}}$) とする。図-11 に rDF を DF_{max} で除した比 rDF/DF_{max} と $rDF_{N_{cyc}}$ の関係を示す。 rDF - $rDF_{N_{cyc}}$ 関係も DF_{max} と同様に $rDF_{N_{cyc}}$ の増加に伴って rDF の増大し、 rDF が占める割合が大きくな



ることが分かる。

3.4 スケルトンカーブの第 3 勾配

図-12 に 30 階モデルの LF1.5 入力時の Takeda モデルを用いた層せん断力 (Q) と層間変形角 (R) の関係を示す。2 回目の入力以降、変形が片寄り、一方向に変形が増大している。スケルトンカーブの第 3 勾配に入ってから大きく変形が増大することがわかる。そこで応答性状に対する第 3 勾配の影響を検討するため、第 3 勾配 (k_3) の第 1 勾配 (k_1) に対する比率 (k_3/k_1) を 0.001, 0.01, 0.02 とした時の応答性状の変化を見る。図-13 に Takeda, Saito3 を用いた rDF - DF_{max} 関係を DF_{max} の値が 3 までの範囲で示す。第 3 勾配による影響は、Takeda において層塑性率が 1.5 を超える範囲で平均 10% 程度の rDF の減少が見られる。また、Saito3 においても同様に rDF が減少する傾向が見られる。

4. 立体フレームによる地震応答解析

4.1 最大応答層間変形角

Takeda と Saito3 についてレベル 1 入力の最大応答層間変形角 (R_{max}) を図-14 に示す。なお、検討はケース 3 で行なう。検討の結果、両方とも繰り返しによる応答の

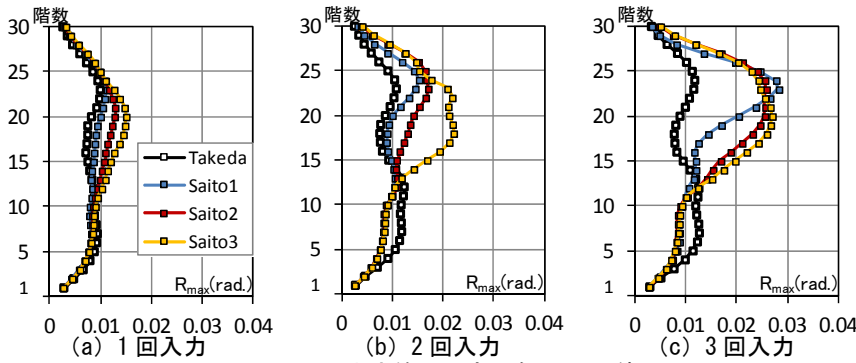


図-15 最大応答層間変形角 (1.10倍)

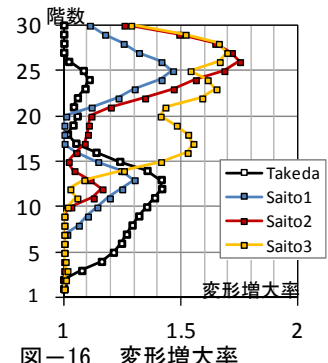


図-16 変形増大率 (2回入力/1回入力)

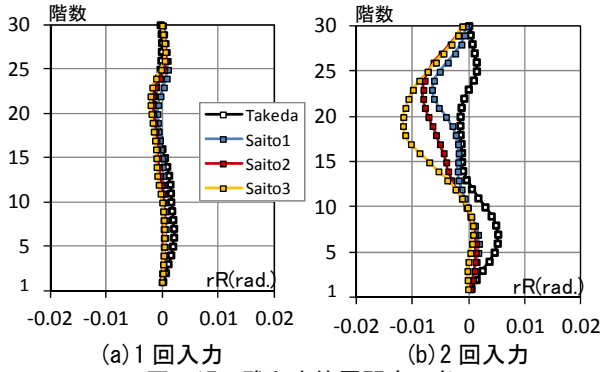


図-17 残留応答層間変形角

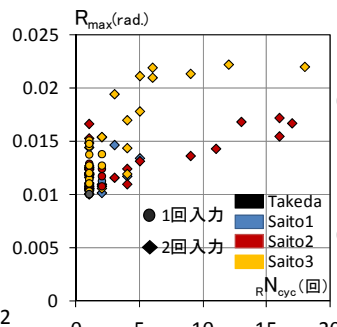


図-18 R_{max} - $R_{N_{cyc}}$ 関係

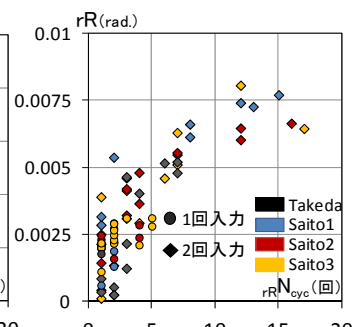


図-19 rR - $rR_{N_{cyc}}$ 関係

増大がわずかに見られた。地震動入力1回に対する2回入力の変形増大率を見ると、両履歴特性ともに概ね1.1~1.2倍程度であった。また、図-15にレベル2入力の R_{max} を示し、図-16に R_{max} の入力1回目に対する2回目の変形増大率を示す。レベル2入力では、入力回数による応答の増大が顕著であり、履歴特性による影響も大きい。変形増大率の最大値はTakedaモデルで1.4程度、Saito-Slipモデルで1.5~1.75程度であった。これより、部材の塑性化が生じるような規模の地震動による繰り返し载荷を受けると、応答の増大が生じ易く、履歴特性による応答への影響が大きいことが分かる。

4.2 残留層間変形角

解析終了時(150秒, 300秒, 450秒)の層間変形角を残留層間変形角(rR)とし、解析ケース3について、1階から30階までの各層の rR の検討を行う。図-17に履歴特性と rR 関係を示す。1回入力に対して2回入力時は履歴特性による差が大きく、最大の rR はTakedaモデルとSaito-Slipモデルでは最大で2倍程度となる。また、 rR が増大する階がTakedaモデルとSaito-Slipモデルで異なり、履歴特性の影響が見られる。 R_{max} が増大した層において rR が増大しているため、1質点系モデルの検討結果と同様に応答の増大は残留変形による影響が大きいと考えられる。

4.3 繰り返し経験回数

ある層において R が $1/100$ を超えた回数をその層の経験回数とする。なお、 R_{max} の検討では R_{max} を生じた時刻

までの回数($R_{N_{cyc}}$)とし、 rR の検討では解析終了までの回数($rR_{N_{cyc}}$)とする。

図-18、図-19に各層の R_{max} と $R_{N_{cyc}}$ の関係と各層の rR と $rR_{N_{cyc}}$ の関係を示す。地震動の入力回数が増えるとSaito-Slipモデルでは $R_{N_{cyc}}$ の増加が見られ、Saito3では R_{max} の増大が見られる。Takedaモデルでは R_{max} に至るまでに層間変形角 $1/100rad$ を経験する回数が少なく、 R_{max} はほとんど変化しない。一方で、 rR - $rR_{N_{cyc}}$ 関係では履歴特性に関わらず $rR_{N_{cyc}}$ が増加し、それに伴い rR が増大している。Saito3の $rR_{N_{cyc}}$ を見ると、地震動の入力回数1回では最大で5回であるのに対し、入力2回では10回よりも大きくなっており、繰り返し载荷によって変形が増大し易くなると考えられる。

4.4 繰り返し载荷による影響

Saito-Slipモデルのパラメータ γ は定振幅での繰り返しで耐力が劣化する性状を、荷重反転後に指向する最大点の変位の移動によって表したものである。Saito3のパラメータ γ を0.0, 0.1, 0.2とした場合の R_{max} - rR 関係と rR - $rR_{N_{cyc}}$ 関係を図-20に示す。なお、検討はケース4で行なう。検討の結果、 $rR_{N_{cyc}}$ が50回より少ない範囲ではSaito-Slipモデルのパラメータ γ による影響はほとんど見られない。 $rR_{N_{cyc}}$ が多い範囲では、 R_{max} の変化はわずかだが、 $rR_{N_{cyc}}$ の増加に伴い rR が増大する傾向が見られる。

4.5 梁のスケルトンカーブの第3勾配

残留変形は部材の塑性化が生じるような大きな変形を受けた場合に、片側に変形が片寄ることにより大きくな

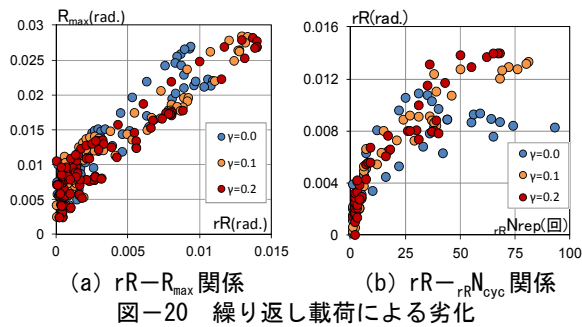


図-20 繰り返し载荷による劣化

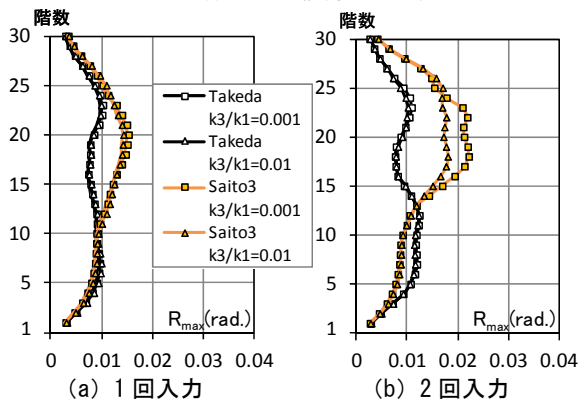


図-21 第3勾配の影響

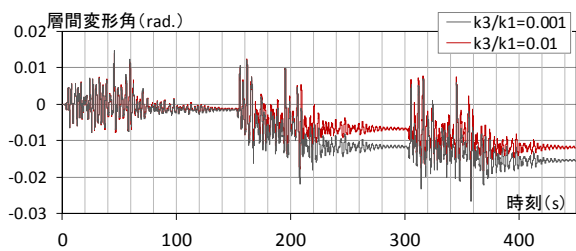


図-22 層間変形角の時刻歴 (20階, Saito3)

ると考えられる。超高層 RC 造骨組では梁降伏型崩壊機構を許容しているため、梁部材についてスケルトンカーブの第3勾配が応答変形へ及ぼす影響を検討する。なお、検討はケース5で行なう。第3勾配の設定の違いについてレベル2入力時の R_{max} を図-21に示す。Takedaモデルでは応答の変化はほとんど見られないが、Saito-Slipモデルの解析において応答の減少が見られる。 $k3/k1=0.001$ に対する $k3/k1=0.01$ とした場合の R_{max} の低減率はTakedaの上層階で3~8%、Saito3の中層階で13~24%であった。また、 R_{max} の応答差が大きい入力レベル2におけるSaito3の20階の層間変形角の時刻歴を図-22に示す。 $k3/k1$ が大きいと層全体の片振れ変形が抑制されることにより R_{max} が減少し、残留変形も小さくなることが分かる。このことから、梁降伏後の耐力低下や剛性低下を抑えることで残留変形を減らし、最大応答も減少させることができると考えられる。

5. まとめ

異なる履歴特性を有する RC 造骨組を対象として基準地震動を連続的に入力した時刻歴地震応答解析を行なっ

た。本解析の範囲内であるが、得られた知見を示す。

- 1) 1質点系の検討より、層の塑性化が進展する程、層の残留変形が大きくなるため、履歴特性に関わらず応答変形が増大する傾向があることがわかる。その傾向は劣化検討モデルで大きい。
- 2) 層の塑性化が生じないレベル1相当の入力では、履歴特性に関わらず繰り返し载荷（地震動の入力回数の増加）による応答変形を増大はあまり見られない。
- 3) 層の塑性化が生じるレベル2相当の入力では、設計用履歴特性においても繰り返し载荷による応答変形が10~40%程度増大する傾向が見られる。
- 4) レベル2相当の入力では、繰り返し载荷時の履歴特性による応答変形を増大に違いが見られ、劣化検討モデルの応答変形は設計用履歴特性より増大しやすい。
- 5) 繰り返し载荷により経験回数の増加が見られ、経験変形が累積するにつれて残留変形が大きくなるため、応答変形は増大する傾向が顕著である。
- 6) レベル2相当の入力では、層の残留変形は履歴特性による違いが見られ、繰り返し载荷により経験変形が累積するにつれて特定の層において増大する。
- 7) 多数回繰り返し载荷による応答変形を増大させないためには、部材の塑性化の進展を遅らせ、部材降伏後の耐力低下を抑制することが重要である。

今後、超高層 RC 造骨組の耐力劣化の評価とともに、応答変形増大への対策について研究していきたい。

謝辞

本研究は科研費「多数回繰り返し変形を受ける既存超高層鉄筋コンクリート造住宅の耐震安全性評価及び対策（課題番号：25420569）」の助成を受けたものである。また、千葉大学和泉・秋田研究室卒論生の横川智裕さんに協力を得ました。ここに記して深甚なる謝意を表します。

参考文献

- 1) 濱田聡ほか：多数回繰り返し载荷を受ける既存超高層鉄筋コンクリート造建築物の地震応答評価，構造工学論文集，Vol.59B，pp27-37，2013.3
- 2) 斉藤大樹ほか：長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造特性その13，日本建築学会大会学術講演梗概集(分冊 C-2)，pp.735-736，2010.9
- 3) 秋田知芳ほか：既存超高層鉄筋コンクリート造建築物の構造特性と骨組モデル，コンクリート工学年次論文報告集，Vol33，No.2，pp.925-930，2011.7
- 4) 石橋久義ほか：長周期地震動を受ける RC 造超高層建築物の構造特性その2，日本建築学会大会学術講演梗概集(分冊 C-2)，pp.501-502，2009.8