

耐力劣化域を含む RC 造復元力特性を用いた地震応答解析に関する資料

- 耐力劣化型復元力特性の設定方法と「武田スリップ劣化型モデル」を用いた解析例 -

既存建築物に対する耐震性能の動的評価や免制震構法による補強設計においては地震応答解析が有効です。このとき RC 造では耐力劣化や崩壊変形をも考慮した建物の復元力特性が必要となる場合がありますが，耐力劣化モデルに関する知見が十分でないことや静的荷重増分解析の制約などにより，荷重-変形関係から合理的にそれを設定することは非常に困難です。

一方，耐震補強設計マニュアル¹⁾の付録 9 では，住宅等一般用途の建物の強地震時の崩壊に対する安全性の評価 [中低層鉄筋コンクリート造集合住宅等の動的耐震診断] を目的に，耐震診断結果から劣化域や崩壊変形を含む復元力特性の設定方法と解析例が示されています。また芳村・高稻²⁾は，多くの RC 柱の破壊実験結果より，4 折れ線にモデル化された復元力特性における崩壊点と第 3 点を与える評価式を，破壊モード（せん断型，曲げ型）に応じて導いています。

本資料では，冒頭に示したような RC 造既存建物の地震応答解析を行うときの，劣化域を含む復元力特性設定の参考として，上記¹⁾²⁾に示された方法の概要を示し，また耐震補強設計マニュアル¹⁾での解析例を地震応答解析プログラム『SS21/DynamicPRO』で解析するための入力方法と解析結果を示します。

1. 耐震補強設計マニュアル¹⁾（中低層 RC 造動的耐震診断）での復元力特性の設定

【基本条件】

本方法によるモデル作成の前提となる基本条件を以下に示します。

基となる建築物の耐震性能評価方法は，強地震動被災後の再利用を絶対条件としない一般用途の建物（基本的に学校校舎や防災上重要な用途に用いる建物以外）が，強地震動をうけて倒壊またはこれに近い被害を受ける可能性が高いか否かを判断する目的としており，10 階建以下の鉄筋コンクリート造集合住宅などを対象としている。

鉄筋コンクリート造建物の復元力特性を，柱や耐震壁のせん断破壊発生後の耐力低下を考慮した複数のバネを有する質点系振動モデルに置換し，地盤特性を考慮した地表面地震動を用いた地震応答解析により応答変形量を求めて倒壊に対する安全性を判定するものとする。

復元力特性は，主として柱や梁のせん断余裕度，柱に接続する二次壁の形状寸法および構造スリットの有無等により想定される靱性の程度ならびに最大耐力以降の復元力特性に応じ，各階につきすべての鉛直部材を最大 4 グループに分類し個々の復元力特性を具体的に定める。

地震応答解析による建物各階の最大応答変形（部材）角から表 1-1 のように判定する。

表 1-1 倒壊に対する安全性の判定

領域	最大応答部材角 (rad.)	推定損傷状況
	1/100 以下	倒壊はせず，構造体や内部の損傷も少ない
	1/100 を超え 1/50 以下	倒壊はしないが，構造体の損傷がある
	1/50 以上	部分的または建物全体が倒壊する可能性が大きい

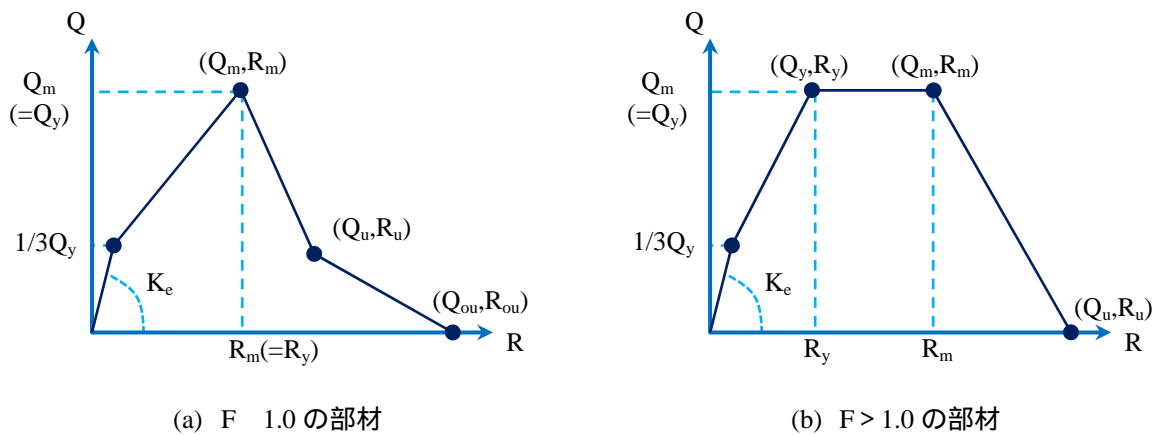


図 1-1 F 値による分類

表 1-2 鉛直部材判別の条件

Case	条件 1	R_y	R_m	条件 2	Q_u/Q_m	R_u	Q_{ou}/Q_m	R_{ou}
1a	F = 1.0	1/200	1/200	$\tau_u/F_c > 0.1$ or $\sigma_0/F_c > 0.3$	0.3	1/100	0	1/50
1b				$\tau_u/F_c = 0.1$ and $\sigma_0/F_c = 0.3$	0.5	1/100	0	1/50
2a	F > 1.0	1/200	$f_1(F)^{*1}$	$\tau_u/F_c > 0.1$ or $\sigma_0/F_c > 0.3$	0	1/40	-	-
2b				$\tau_u/F_c = 0.1$	0	1/20	-	-

*1) $R_m = f_1(F) = (F-1)/100 \dots (2 < F < 3.2)$
 $f_1(F) = F/200 \dots (1 < F < 2)$

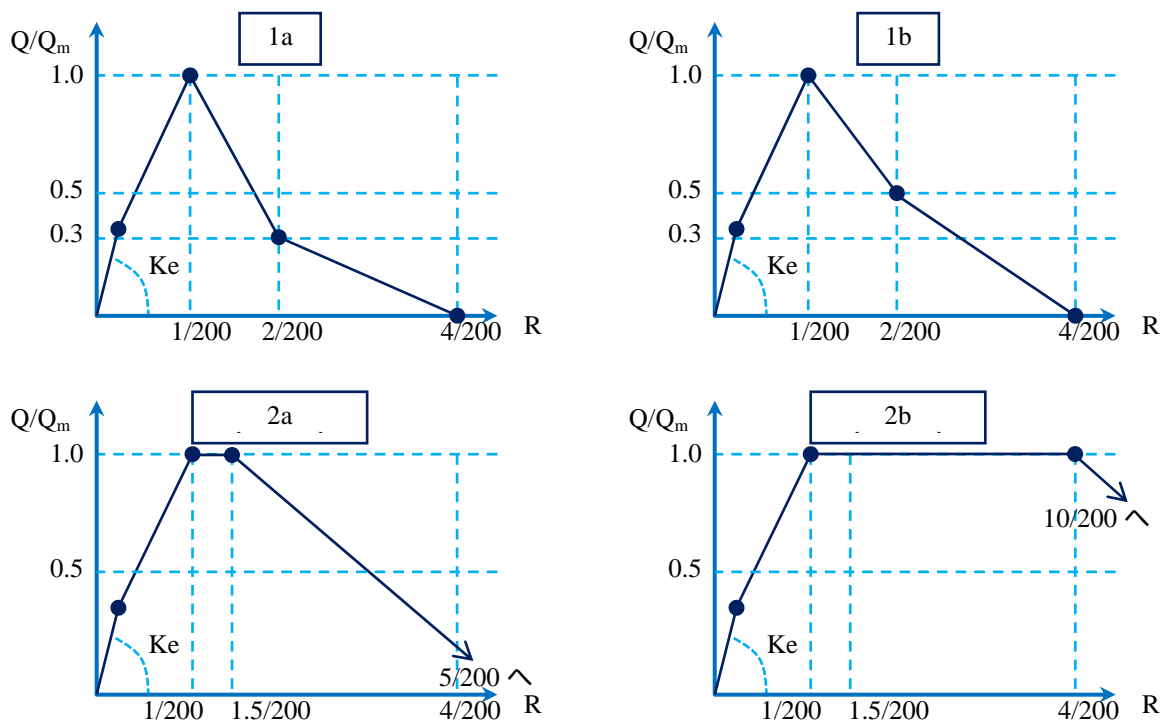


図 1-2 各ケースでの鉛直部材の復元力特性モデル

【復元力特性モデルの設定】

階毎の各鉛直部材の分類は，耐震診断結果による F 値によってまず行い（図 1-1），これに加え τ_u/F_c （ τ_u はメカニズム時平均せん断応力度）， σ_0/F_c （ σ_0 はメカニズム時軸方向応力度）のレベルにより， Q （部材耐力） - R （部材角）関係をそれぞれ表 1-2 のように分類します（図 1-2 に図示）。

履歴モデルには図 1-3 で表されるような，武田スリップモデル³⁾に耐力劣化を考慮したモデル⁴⁾を用います。武田スリップモデルの塑性域における除荷時剛性 K_d は，最大耐力以前または以降において次式で表されます。

$$\begin{cases} K_d = \frac{Q_c + Q_{\max}}{\delta_c + \delta_{\max}} & \text{(最大耐力以前)} \\ K_d = \frac{Q_c + Q_y}{\delta_c + \delta_y} \left(\frac{\delta_{\max}}{\delta_y} \right)^{-\gamma} & \text{(最大耐力以降)} \end{cases} \quad (0-1a,b)$$

ここに， Q_c, δ_c はひび割れ時の耐力と変形， Q_y, δ_y はひび割れ時の耐力と変形， Q_{\max}, δ_{\max} は経験最大時の荷重と変形です（最大耐力以降の Q_{\max} は δ_{\max} との同時性がなくなるが未使用です）。また γ は除荷時剛性パラメータで，耐震補強設計マニュアル¹⁾では 0.5 としています。

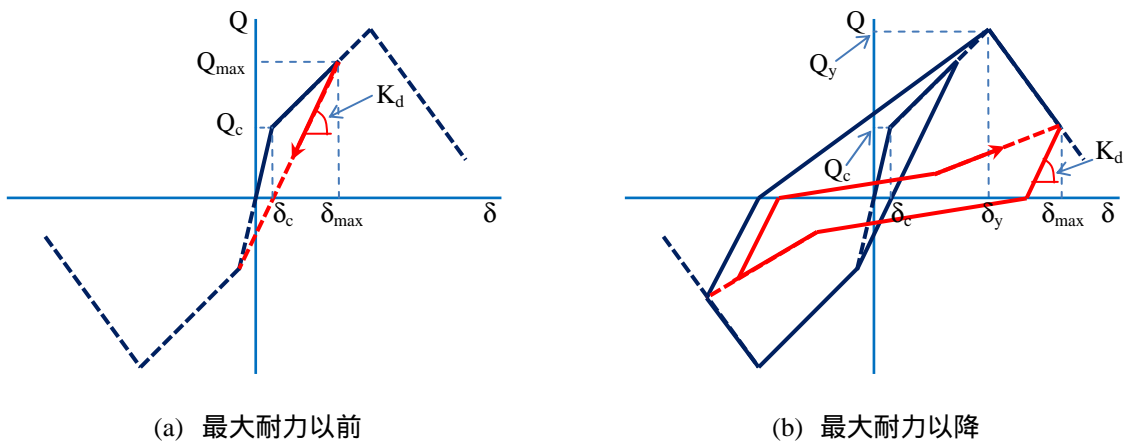


図 1-3 耐力劣化を考慮した武田スリップモデル

2. 芳村・高稻²⁾(破壊モードに応じた耐力劣化域)での復元力特性の設定

芳村・高稻²⁾は, 多くの実験結果より鉄筋コンクリート柱の崩壊部材角 R_u の定式化を, 破壊モード(せん断型, 曲げ型)に応じて, 横補強筋比 p_w , 軸力比 η , 主筋比 p_g をパラメータとして行い, さらに4折れ線型復元力特性の第3点と第4点をモデル化しています。これらは表 2-1 のようにまとめられ, それぞれ図 2-1 のようになります。

表 2-1 破壊モードに応じた崩壊変形と荷重低下域の復元力特性

せん断型	崩壊部材角 R_u (%)		$R_u = 62.2p_w - 51.9\eta + 6.07p_g - 9.91 \geq 1.5$ せん断余裕度=0.49~0.73, $p_w=0.11 \sim 0.21\%$, $\eta=0.18 \sim 0.35$ $p_g=1.69 \sim 2.65\%$, $h_o/D=2.0 \sim 4.0$
	第3点	部材角 R_3 (%)	$R_3 = 0.3R_u \geq R_2$, R_2 は第2点の部材角
		荷重 P_3	$P_3 = 0.4P_2$, P_2 は第2点の荷重
	第4点	部材角 R_4 (%)	$R_3 = R_u$
荷重 P_4		$P_4 = 0$	
曲げ型	崩壊部材角 R_u (%)		$R_u = 28.0p_w - 42.3\eta - 8.60p_g + 20.6 \geq 1.5$ せん断余裕度=0.71~0.96, $p_w=0.07 \sim 0.28\%$, $\eta=0.15 \sim 0.24$ $p_g=0.91 \sim 1.69\%$, $h_o/D=2.4 \sim 4.0$
	第3点	部材角 R_3 (%)	$R_3 = 2$
		荷重 P_3	$P_3 = P_2$, P_2 は第2点の荷重
	第4点	部材角 R_4 (%)	$R_3 = R_u$
荷重 P_4		$P_4 = P_2 - 0.075P_2(R_u - 2)$	

せん断余裕度 0.71~0.73 においては, $p_g > 1.7\%$ のときはせん断型, $p_g \leq 1.7\%$ のときは曲げ型とする

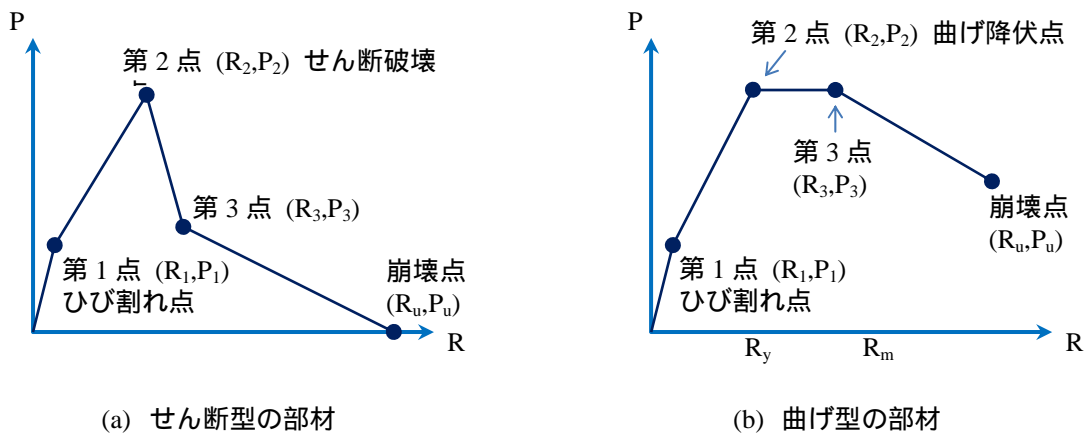


図 2-1 破壊モードに応じた復元力特性の形状

3. 『SS21/DynamicPRO』による「武田スリップ劣化型モデル」を用いた解析例

耐震補強設計マニュアル¹⁾に記載されている中低層共同住宅に対する解析例を，地震応答解析プログラム『SS21/DynamicPRO』で解析するための入力方法と解析した結果を示します。ただし，当データの解析には『SS21/Dynamic D-Tri モデル追加オプション』が別途必要です。

【建物データと解析条件】

解析対象の建物データを表 3-1 に，各階の復元力特性モデルを図 3-1 に示します。

表 3-1 建物データ（文献¹⁾を SI 単位系に変更し，1F の 1b， Q_u を修正）

階	建物重量 (kN)	階高 (内法) (cm)	部材群	K_e (kN/cm)	Q_y (kN)	Q_m (kN)	Q_u (kN)	Q_{ou} (kN)	R_y (rad.)	R_m (rad.)	R_u (rad.)	R_{ou} (rad.)
4F	4678	272.0 (200)	1a	2000.0	1200.0	1200.0	360.0	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			1b	19054.0	3690.0	3690.0	1845.0	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			2b	30776.3	3559.0	3559.0	0.0	-	1/200	1/100	1/20	-
3F	5044	265.0 (200)	1b	30279.0	6018.0	6018.0	3009.0	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			2b	35592.5	4335.0	4335.0	0.0	-	1/200	1/100	1/20	-
2F	5044	265.0 (200)	1b	34204.0	6518.0	6518.0	3259.0	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			2b	34634.2	4818.0	4818.0	0.0	-	1/200	1/100	1/20	-
1F	5044	297.5 (200)	1a	44571.0	7001.0	7001.0	2100.3	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			1b	6525.0	3542.0	3542.0	1771.0	0.0	1/200	1/200	1/100	1/50
			2b	27034.3	1932.0	1932.0	0.0	-	1/200	1/100	1/20	-

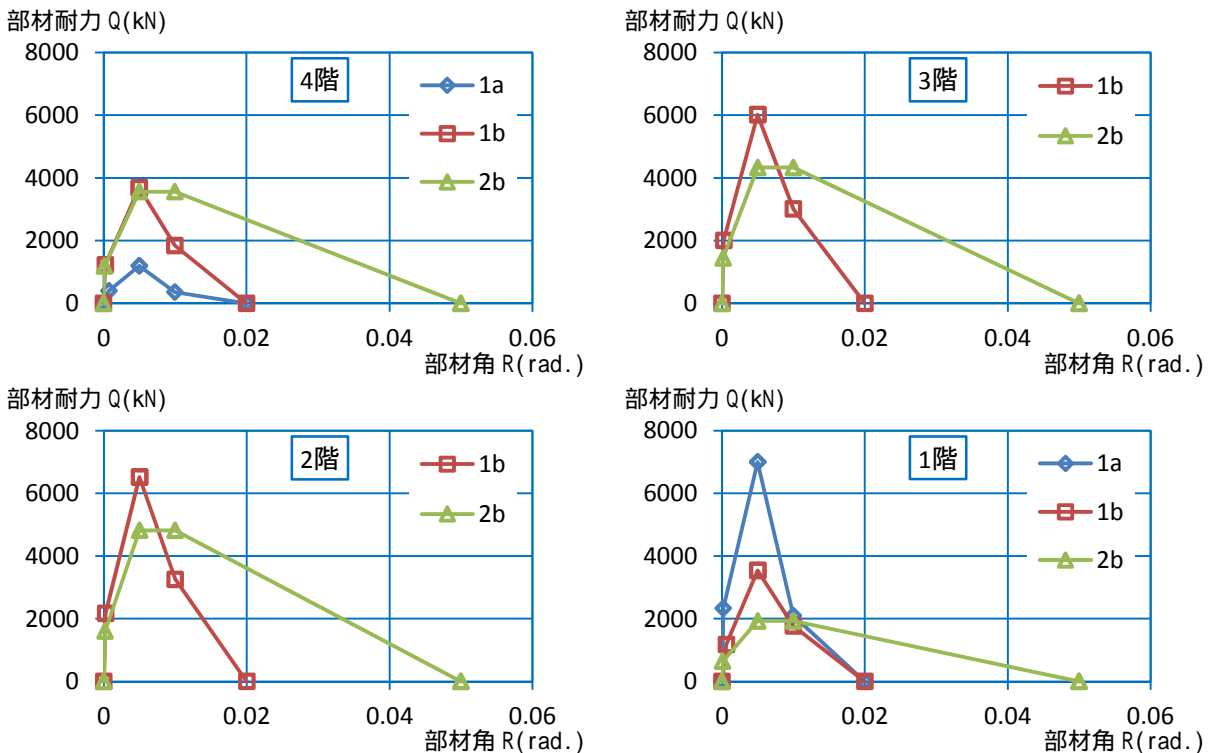


図 3-1 各階の復元力特性モデル

その他の解析条件として、建物の粘性減衰定数は 1 次周期に対して 3%（初期剛性比例）とし、地震波は JMA 神戸 NS⁵⁾、EL CENTRO NS⁶⁾、BCJ-L1 波⁷⁾を最大加速度 400cm/s² に基準化したものとします。

【データの入力】

『SS21/DynamicPRO』へのデータ入力のうち、ここでは特に復元力特性データについて説明します。

復元力特性タイプとして、『SS21/Dynamic D-Tri モデル追加オプション』で追加される「武田スリップ劣化型（芳村・中村）モデル⁴⁾」を用います。まずプログラムの入力画面に合わせて、表 3-1 に示した復元力特性データを表 3-2 のように整理します。ここに、 $K_0=K_c$ 、 $Q_1=ひび割れ時耐力$ 、 $\beta_1=ひび割れ後剛性低下率$ 、 $Q_2=Q_y$ 、 $Q_3=Q_m$ または Q_u 、 $R_3=R_m$ または R_u 、 $Q_4=Q_u$ または Q_{ou} 、 $R_4=R_u$ または R_{ou} です。

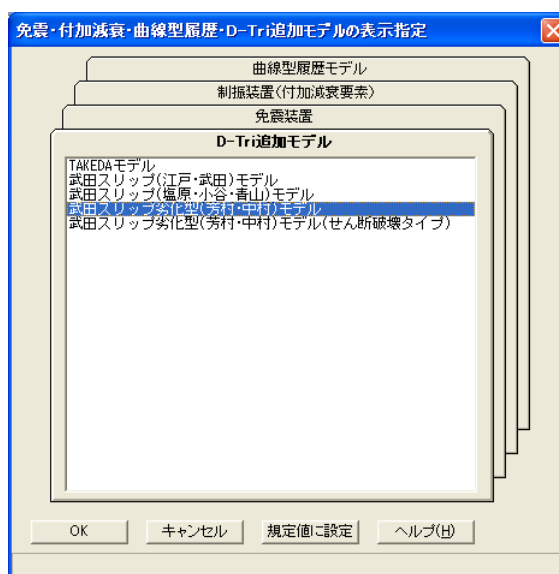
表 3-2 入力用に整理した復元力特性データ（網掛部が入力データ）

階	部材群	要素	K_0	Q_1	β_1	Q_2	Q_3	$1/R_3$	Q_4	$1/R_4$
			(kN/cm)	(kN)	(-)	(kN)	(kN)	(1/rad.)	(kN)	(1/rad.)
4	1a	4-1	2000.0	400.00	0.34483	1200	360	100	0	50
	1b	4-2	19054.0	1230.00	0.09966	3690	1845	100	0	50
	2b	4-3	30776.3	1186.30	0.05834	3559	3559	100	0	20
3	1b	3-1	30279.0	2006.00	0.10526	6018	3009	100	0	50
	2b	3-2	35592.5	1445.00	0.06322	4335	4335	100	0	20
2	1b	2-1	34204.0	2172.67	0.10071	6518	3259	100	0	50
	2b	2-2	34634.2	1606.00	0.07253	4818	4818	100	0	20
1	1a	1-1	44571.0	2333.67	0.07297	7001	2100.3	100	0	50
	1b	1-2	6525.0	1180.67	0.27698	3542	1771	100	0	50
	2b	1-3	27034.3	644.0	0.03255	1932	1932	100	0	20

K_0 =初期剛性、 Q_1 =折れ点荷重 1、 β_1 =剛性低下率 1、 Q_2 =折れ点荷重 2、 Q_3 =折れ点荷重 3
 $1/R_3=1/(\text{変形角 } 3)$ 、 Q_4 =破壊荷重、 $1/R_4=1/(\text{破壊変形角})$

以下、『SS21/DynamicPRO』の入力画面に沿って手順を示します。

[ツール]-[免震・付加減衰・D-Tri 追加モデルの表示指定]で「D-Tri 追加モデル」の「武田スリップ劣化型（芳村・中村）モデル」を有効にします。



[振動モデルの基本事項]の[質点への要素数の変更]で、各階に設定する復元力特性のケース数を指定する。指定後は[OK]または[更新]をクリックします。

振動モデルの基本事項

基本事項 置換振動系と付加減衰要素

タイトル, 利用者
 タイトル(T): 中低層鉄筋コンクリート造集合住宅の動的耐震診断
 サブタイトル(S): 桁行方向
 利用者(U): Union System

階数, 質点数
 階数(E): 4 質点数は階数と同じ(D)
 質点数(M): 4 質点への要素数の変更(E)...
 全要素数 10

スウェイの指定
 スウェイを考慮する(W)
 スウェイの要素数(Y): 1

ロッキングの指定
 ロッキングを考慮する(B)
 ロッキングの要素数(D): 1

OK キャンセル 更新(U) ヘルプ(H)

質点への要素数

質点	要素数
4	3
3	2
2	2
1	3

OK キャンセル ヘルプ(H)

[初期バネ定数]のコンボボックスから「武田スリップ劣化型（芳村・中村）モデル」を指定する。すべて指定後は[OK]または[更新]をクリックします。

初期バネ定数

要素	初期バネ定数(kN/cm)	要素の時刻歴応答値
4-1	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
4-2	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
4-3	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
3-1	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
3-2	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
2-1	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
2-2	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
1-1	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
1-2	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す
1-3	武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル	残す

OK キャンセル 更新(U) ヘルプ(H)

ロッキングの単位:初期バネ定数(kN·m/rad)

[D-Tri 追加モデルに関するデータ]-[武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデル]を指定し、各階の(復元力特性)要素番号に対して、表 3-2 で整理したデータを入力します。入力画面には表 3-2 の他に、「塑性率の基点」「除荷時パラメータ」「内部ループパラメータ」「スリップ係数」「スリップ硬化係数」の入力項目があり、プログラムマニュアルを参照して入力を行います。

武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデルに関するデータ

要素	初期剛性(kN/cm)	塑性率の基点(cm)	折れ点荷重1(kN)	剛性低下率1	折れ点荷重2(kN)
4-1	2000.00	第2折れ点	400.00	0.34483	1200.00
4-2	19054.00	第2折れ点	1280.00	0.09966	3690.00
4-3	30776.30	第2折れ点	1186.33	0.05834	3559.00
3-1	30278.00	第2折れ点	2006.00	0.10526	6018.00
3-2	35592.50	第2折れ点	1445.00	0.08322	4335.00
2-1	34204.00	第2折れ点	2172.67	0.10071	6518.00
2-2	34634.20	第2折れ点	1606.00	0.07253	4818.00
1-1	44571.00	第2折れ点	2333.67	0.07297	7001.00
1-2	6525.00	第2折れ点	1180.67	0.27698	3542.00
1-3	27034.30	第2折れ点	644.00	0.03255	1932.00

OK キャンセル 更新(O) ヘルプ(H)

武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデルに関するデータ

要素	折れ点荷重3(kN)	1/変形角3(1/rad)	破壊荷重(kN)	1/破壊変形角(1/rad)	除荷時パラメータ
4-1	360.00	100.00	0.00	50.00	0.40000
4-2	1845.00	100.00	0.00	50.00	0.40000
4-3	3559.00	100.00	0.00	20.00	0.40000
3-1	3003.00	100.00	0.00	50.00	0.40000
3-2	4335.00	100.00	0.00	20.00	0.40000
2-1	3259.00	100.00	0.00	50.00	0.40000
2-2	4818.00	100.00	0.00	20.00	0.40000
1-1	2100.30	100.00	0.00	50.00	0.40000
1-2	1771.00	100.00	0.00	50.00	0.40000
1-3	1932.00	100.00	0.00	20.00	0.40000

OK キャンセル 更新(O) ヘルプ(H)

武田スリップ劣化型(芳村・中村)モデルに関するデータ

要素	内部ループパラメータ	スリップ係数	スリップ硬化係数
4-1	1.00000	0.80000	1.00000
4-2	1.00000	0.80000	1.00000
4-3	1.00000	0.80000	1.00000
3-1	1.00000	0.80000	1.00000
3-2	1.00000	0.80000	1.00000
2-1	1.00000	0.80000	1.00000
2-2	1.00000	0.80000	1.00000
1-1	1.00000	0.80000	1.00000
1-2	1.00000	0.80000	1.00000
1-3	1.00000	0.80000	1.00000

OK キャンセル 更新(O) ヘルプ(H)

【解析結果】

解析結果として、図 3-2 に加速度，層間変位，層せん断力係数の各最大応答値を，図 3-3 に各地震波における 1 階の応答履歴ループを示します。また耐震補強設計マニュアル¹⁾では内法階高による層間変形角が示されており，同条件による結果を表 3-3 で比較します。

BCJ-L1 による応答が耐力の劣化域まで達しましたが，他の 2 地震波は最大耐力未滿に留まりました。耐震補強設計マニュアル¹⁾の記載値と比較すると，BCJ-L1 と EL CENTRO NS においてほぼ対応した結果となっていますが，JMA 神戸 NS についてはやや差異が生じました。2 つの地震波で対応していることより，JMA 神戸 NS の差異の原因としては，それぞれで用いている地震波形が異なっていることが考えられます。

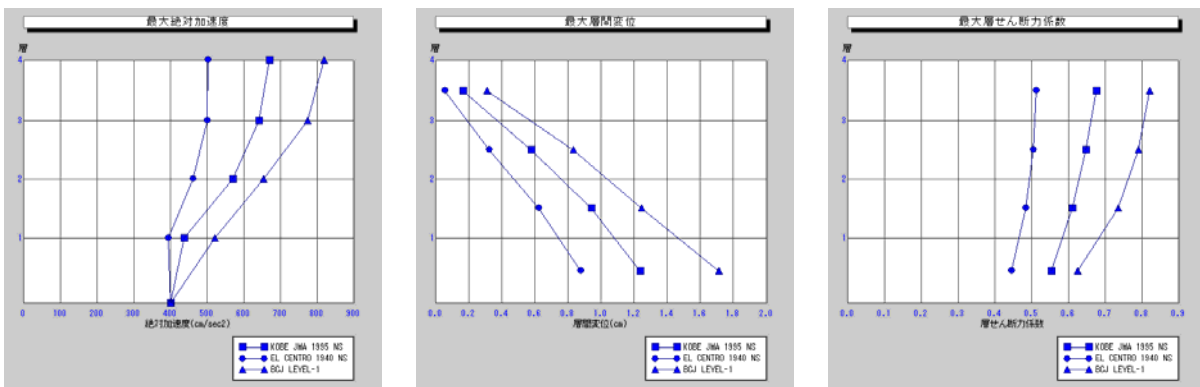


図 3-2 最大応答値

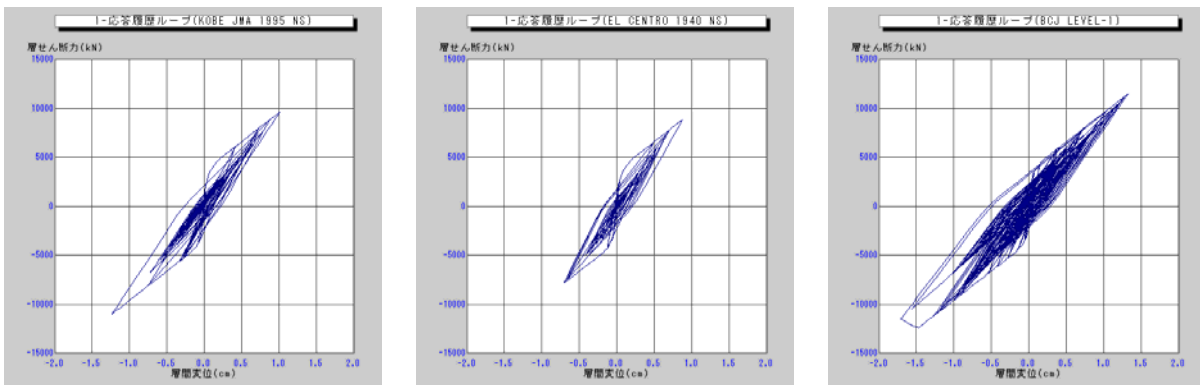


図 3-3 応答履歴ループ

表 3-3 解析結果の比較

階	JMA 神戸 NS		EL CENTRO NS		BCJ-L1	
	文献 ¹⁾	DynamicPRO	文献 ¹⁾	DynamicPRO	文献 ¹⁾	DynamicPRO
4F	1/2381	1/1250	1/3448	1/3333	1/662	1/645
3F	1/486	1/345	1/621	1/625	1/243	1/241
2F	1/289	1/213	1/248	1/323	1/162	1/161
1F	1/269	1/161	1/230	1/227	1/115	1/117

参考文献

- 1) 既存建築物の耐震診断・耐震補強設計マニュアル 2003 年度版：建築研究振興協会，構造調査コンサルティング協会，横浜市建築設計共同組合
- 2) 芳村学，高稻宜和：崩壊変形を含む鉄筋コンクリート柱の荷重低減域における挙動の定式化，日本建築学会構造系論文集 第 587 号，2005.1
- 3) 江戸宏彰，武田寿一：鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析，日本建築学会大会学術講演梗概集，1977.10
- 4) 芳村学，上野裕美子，中村孝也：既存低層鉄筋コンクリート建物の I_s 値と倒壊の関係 - 診断基準における「せん断柱」からなる建物を対象として - ，日本建築学会構造系論文集 第 587 号，2005.1
- 5) 日本気象協会：気象庁 87 型電磁式強震計波形提供リスト
- 6) 日本建築センター：高層建築物の動的解析用地震動に関する研究，平成 6 年度研究助成報告書 No.9404
- 7) 設計用入力地震動作成手法技術指針（案）：建設省建築研究所（当時），日本建築センター，1992.3