

# 論文 下階の壁が抜ける中高層 RC 造壁フレーム構造の水平耐力と変形

滝澤 光\*1・板倉 航大\*2・和泉 信之\*3

**要旨:** 少数の層の柱が曲げ破壊する部分崩壊形を形成する RC 造建築物は、全体崩壊形と比較してエネルギー吸収の期待できる層が少なく、地震時変形が大きくなるのが危惧される。本研究では、下階の壁が抜けて部分崩壊形を形成する 6・10・14 階建 RC 造壁フレーム構造を対象として、崩壊層の比率や保有水平耐力をパラメータとした 66 モデルについて、静的非線形解析及び時刻歴応答解析を実施した。その結果から、崩壊層の比率に応じて 1 階ヒンジ柱の地震時変形角を目標変形角以下とするための水平耐力に関する条件を提示し、水平耐力発揮時の変形について考察した。

**キーワード:** 鉄筋コンクリート造建築物, 保有水平耐力計算, 時刻歴応答解析, 部分崩壊形, 地震応答

## 1. はじめに

「鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準 (案)・同解説」<sup>1)</sup> (以下、保耐規準) では、曲げ破壊による靱性抵抗型全体崩壊形 (A ルート) を推奨しており、所定の部分崩壊形を適用範囲としている。ピロティ構造のような少数層の柱が曲げ破壊する部分崩壊形の RC 造骨組では、1995 年兵庫県南部地震などの大地震において、甚大な被害が生じている。これは、全体崩壊形と比較してエネルギー吸収の期待できる層が少なく、崩壊層の地震時変形が大きくなるためである。そのため、保耐規準では曲げ破壊により少数層が崩壊する部分崩壊形 (C ルート) に対しては、構造特性係数  $D_s$  値を最大値である 0.55 として必要保有水平耐力を割増している。しかし、保有水平耐力計算では、大地震時の変形を算定することは求められていないため、部分崩壊形では設計者が地震時変形角を目標値以下とするために必要な水平耐力や水平剛性の大きさはたいへん重要な検討課題である。

著者らは、下階の壁が抜けて部分崩壊形を形成する中高層 RC 造壁フレーム構造を対象として、崩壊層の比率に応じた保有水平耐力と地震応答との関係について研究している。10・14 階建骨組に関して、ヒンジ柱の応答変形角が過大とならない崩壊層の比率と保有水平耐力との関係については既に報告した<sup>2)</sup>。

本研究では、文献 2) の研究対象を更に拡大するとともに、ヒンジ柱に想定される地震時変形角を目標変形角以下にするための具体的な条件を考察する。そのため、下階の壁が抜けて部分崩壊形を形成する 6・10・14 階建 RC 造壁フレーム構造 66 モデル (図-1) を対象として、静的非線形解析及び時刻歴応答解析を実施する。解析結果から、崩壊層比率に保有水平耐力の値を乗じた崩壊層耐力係数に着目して検討する。さらに、変形が過大とならないために必要な崩壊層耐力係数を発揮する際の崩壊層

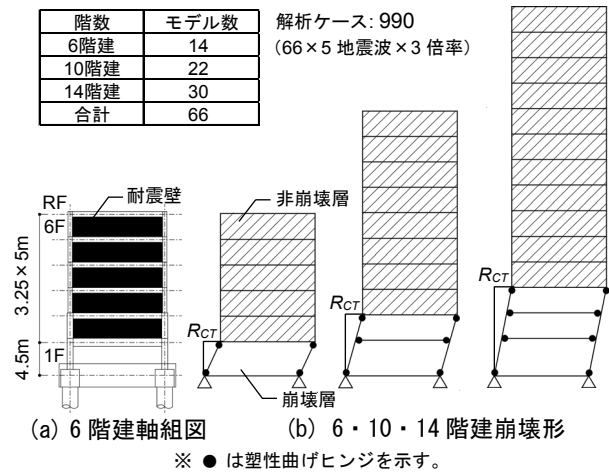


図-1 対象とする部分崩壊形の例と解析モデル数

の水平剛性について考察する。想定する崩壊形は、特定の層が崩壊する部分崩壊形とし、全体崩壊形は生じないものとする。なお、本論では非線形解析による崩壊層全体の水平変形角を崩壊層変形角 ( $R_{cr}$ ) とする (図-1)。

## 2. 崩壊指標

### 2.1 崩壊層比率

崩壊層比率 ( $pR$ ) は、崩壊層の形成状況を比率で表す指標である。本研究では、文献 2) と同様に崩壊層の層数を全層数で除した崩壊層比率 ( $pR1$ ) 及び  $A_i$  分布に基づく部分崩壊形の外力仕事量を全体崩壊形の外力仕事量で除した崩壊層比率 ( $pR2$ ) を用いる。

$$pR2 = \frac{\text{部分崩壊形の} \sum_{\text{部分}} Q_i \cdot h_i \cdot \theta_i}{\text{全体崩壊形の} \sum_{\text{全体}} Q_i \cdot h_i \cdot \theta_i} \quad (1)$$

ここで、 $Q_i$ :  $i$  階の部分崩壊形形成時の層せん断力、 $C_B$ : 部分崩壊形形成時のベースシア係数、 $Q_i$ : 全体崩壊形のベースシア係数が  $C_B$  となる  $i$  階の層せん断力、 $h_i$ :  $i$  階の階高、 $\theta_i$ : 仮想仕事法における  $i$  階の層間変形角である。

\*1 千葉大学大学院 融合理工学府 創成工学専攻 建築学コース 博士前期課程 (学生会員)

\*2 千葉大学 工学部建築学科

\*3 千葉大学大学院 工学研究院 教授 博士 (工学)

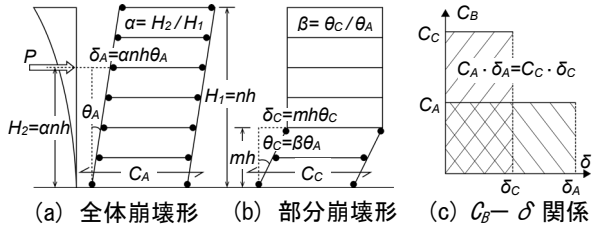
(フェロー会員)

## 2.2 崩壊層耐力係数

崩壊層耐力係数 ( $pRC_1$ ,  $pRC_2$ ) は  $pR1$ ,  $pR2$  に崩壊形形成時のベースシア係数 ( $C_u$ ) を乗じた値である。例として (図-2), 階数  $n$ , 階高  $h$ , 重量, 固有周期, 剛性,  $A_i$  分布による外力分布形が等しい全体崩壊形 A と部分崩壊形 C (崩壊層数  $m$ ) を考える。水平外力の合力  $P$  の重心位置を  $anh$ , 全体崩壊形の変形角  $\theta_A$  に対する部分崩壊形  $\theta_C$  の割増係数を  $\beta$  とすると,  $pR1$  は  $m/n$ ,  $pR2$  は式 (2) で表される。完全弾塑性系として (図-2(c)), 両者の仕事量が等しくなる場合, 図-2(c) の関係式に全体崩壊形の変位  $\delta_A$ , 部分崩壊形の変位  $\delta_C$ ,  $pR1$  及び  $pR2$  を代入し, 式(3)が得られる。これは, 全体崩壊形 A と同じ仕事量となる部分崩壊形 C の崩壊層耐力係数を示している。

$$pR2 = \frac{P \cdot mh \cdot \theta}{P \cdot anh \cdot \theta} = \frac{m}{an} = \frac{1}{\alpha} pR1 \quad (2)$$

$$pR1 \times C_C = \alpha \cdot pR2 \times C_C = \frac{\alpha}{\beta} C_A \quad (3)$$



(a) 全体崩壊形 (b) 部分崩壊形 (c)  $C_B$ - $\delta$  関係

図-2 崩壊形と崩壊層耐力係数

## 3. 解析計画

### 3.1 対象骨組

対象骨組は, 6・10・14階建 RC 造住宅 (図-3) の張間方向を想定した曲げ破壊型の壁フレーム構造である。張間方向は同様の骨組が並列したものとして, 解析には平面フレームモデル (図-1) を用いる。下階の壁が抜ける部分崩壊形を想定し, 崩壊層比率及び保有水平耐力をパラメータとした 66 モデルを設定する。崩壊層数は 6 階建で 1~3 層, 10 階建で 1~5 層, 14 階建で 1~7 層である。各モデルの部材断面は  $C_u$  が 0.30, 0.45, 0.55, 0.70 となるように設定する。特にピロティ構造である 1CF モデルでは, 「建築物の構造関係技術基準解説書」<sup>3)</sup> のピロティ構造の軸方向力に対する設計及び柱主筋の拘束に関する構造規定を参照し,  $C_u$  を 0.85, 1.0 にしたモデルも設定する。1CF モデルの 1 階柱のコンクリートの設計基準強度 ( $F_c$ ) は最大  $60\text{N/mm}^2$  とし, 断面は  ${}_{14}\text{ICF}_{1.0}$  が最大で  $2000 \times 1000\text{mm}$  とする (表-1)。ヒンジ柱では, 保耐規準の A ランクのせん断補強指標を満足するように帯筋を配筋し, 脆性破壊が生じないことを確認している。耐震壁の壁厚は 6・10 階建では 180mm, 14 階建では 200mm とする。柱梁接合部は接合部降伏破壊<sup>1)</sup>が生じないものとする。なお, 柱・梁・耐震壁の耐力は保耐規準に準拠して算定する。

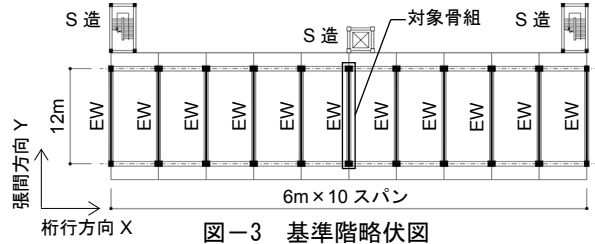


図-3 基準階略図

表-1 1階柱と2階梁の断面

解析モデル	柱					梁		
	$F_c$	$D_x$ [mm]	$D_y$ [mm]	主筋配筋	$\rho_w$ [%]	$b$ [mm]	$D$ [mm]	$\rho_l$ [%]
${}_{6}\text{1CF}_{0.30}$	36	900	650	3/4-D22	0.83	600	1200	0.56
${}_{6}\text{1CF}_{0.45}$	36	1100	800	3/5-D29	0.68	650	1200	0.81
${}_{6}\text{1CF}_{0.55}$	36	1250	800	3/6-D32	0.68	650	1200	0.81
${}_{6}\text{1CF}_{0.70}$	36	1250	850	5/6-D32	0.51	650	1200	0.81
${}_{6}\text{1CF}_{0.85}$	42	1400	850	8/7-D32	0.85	800	1000	0.79
${}_{6}\text{1CF}_{1.0}$	42	1600	850	10/7+4-D32	0.75	800	1000	0.99
${}_{6}\text{2CF}_{0.30}$	36	900	700	5/4-D25	0.66	600	1200	0.56
${}_{6}\text{2CF}_{0.45}$	36	1100	850	6/5+4-D29	0.58	650	1200	0.81
${}_{6}\text{2CF}_{0.55}$	36	1250	850	6/6+4-D32	0.51	650	1200	0.81
${}_{6}\text{2CF}_{0.70}$	36	1250	950	7/7+12-D32	0.51	700	1200	1.13
${}_{6}\text{3CF}_{0.30}$	36	900	750	6/4-D25	0.47	600	1200	0.56
${}_{6}\text{3CF}_{0.45}$	36	1100	850	6/6+8-D29	0.46	650	1200	0.81
${}_{6}\text{3CF}_{0.55}$	36	1250	850	7/6+8-D32	0.41	700	1200	1.04
${}_{6}\text{3CF}_{0.70}$	36	1250	950	9/7+12-D32	0.51	750	1200	1.24
${}_{10}\text{1CF}_{0.30}$	42	1050	650	4/5-D35	1.52	900	1000	1.27
${}_{10}\text{1CF}_{0.45}$	48	1100	750	5/5+4-D35	0.91	900	1000	1.27
${}_{10}\text{1CF}_{0.55}$	48	1250	800	6/7+8-D35	0.96	900	1000	1.27
${}_{10}\text{1CF}_{0.70}$	48	1550	800	7/7+10-D38	0.90	900	1000	1.27
${}_{10}\text{1CF}_{0.85}$	60	1600	850	8/7+12-D38	1.00	900	1000	1.27
${}_{10}\text{1CF}_{1.0}$	60	1800	900	10/7+16-D38	1.11	900	1000	1.27
${}_{10}\text{2CF}_{0.30}$	42	1150	750	5/5-D35	0.96	600	1200	1.10
${}_{10}\text{2CF}_{0.45}$	42	1200	850	8/6-D38	1.00	900	1200	0.89
${}_{10}\text{2CF}_{0.55}$	48	1500	900	10/6+4-D38	0.80	950	1200	0.84
${}_{10}\text{2CF}_{0.70}$	48	1550	1000	11/8+16-D38	0.77	1000	1200	0.96
${}_{10}\text{3CF}_{0.30}$	42	1150	750	7/5-D35	1.04	650	1200	1.23
${}_{10}\text{3CF}_{0.45}$	48	1250	850	9/7-D38	0.96	900	1200	1.06
${}_{10}\text{3CF}_{0.55}$	48	1500	950	11/7+14-D38	0.80	950	1200	1.18
${}_{10}\text{3CF}_{0.70}$	48	1550	1100	12/7+22-D38	0.77	1000	1200	1.28
${}_{10}\text{4CF}_{0.30}$	42	1200	850	8/6-D38	0.83	650	1200	0.98
${}_{10}\text{4CF}_{0.45}$	42	1300	900	10/7+16-D38	0.92	900	1200	1.27
${}_{10}\text{4CF}_{0.55}$	42	1500	950	11/8+14-D38	0.80	950	1200	1.40
${}_{10}\text{4CF}_{0.70}$	42	1550	1100	12/8+16-D38	0.77	1100	1200	1.38
${}_{10}\text{5CF}_{0.30}$	42	1250	850	8/7-D38	0.80	650	1200	1.17
${}_{10}\text{5CF}_{0.45}$	48	1300	900	10/7+16-D38	0.92	900	1200	1.27
${}_{10}\text{5CF}_{0.55}$	48	1550	1000	11/8+14-D38	0.77	950	1200	1.60
${}_{10}\text{5CF}_{0.70}$	48	1550	1100	14/9+20-D38	0.77	1100	1200	1.55
${}_{14}\text{1CF}_{0.30}$	42	1200	800	5/7-D35	1.66	900	1000	1.27
${}_{14}\text{1CF}_{0.45}$	48	1400	850	8/7+8-D35	1.07	900	1000	1.27
${}_{14}\text{1CF}_{0.55}$	48	1600	850	8/7+14-D38	1.00	900	1000	1.27
${}_{14}\text{1CF}_{0.70}$	54	1650	900	11/7+20-D38	1.21	900	1000	1.27
${}_{14}\text{1CF}_{0.85}$	60	1800	1000	12/7+22-D38	1.11	900	1000	1.27
${}_{14}\text{1CF}_{1.0}$	60	2000	1000	15/7+28-D38	1.19	900	1000	1.27
${}_{14}\text{2CF}_{0.30}$	48	1250	900	6/7+4-D38	0.96	600	1000	1.28
${}_{14}\text{2CF}_{0.45}$	48	1350	1000	10/7+4-D41	1.03	700	1200	1.36
${}_{14}\text{2CF}_{0.55}$	48	1450	1000	12/9+8-D41	1.10	700	1200	1.36
${}_{14}\text{2CF}_{0.70}$	48	1650	1050	13/10+18-D41	0.97	700	1200	1.63
${}_{14}\text{3CF}_{0.30}$	48	1250	900	7/7+6-D41	0.96	650	1100	1.43
${}_{14}\text{3CF}_{0.45}$	48	1350	1050	12/8+4-D41	1.03	700	1200	1.63
${}_{14}\text{3CF}_{0.55}$	48	1450	1100	13/10+12-D41	1.37	800	1200	1.66
${}_{14}\text{3CF}_{0.70}$	48	1650	1100	15/10+22-HD41	0.97	800	1200	1.78
${}_{14}\text{4CF}_{0.30}$	48	1250	900	8/7+6-D41	0.96	650	1200	1.46
${}_{14}\text{4CF}_{0.45}$	48	1400	1100	13/8+4-D41	1.00	800	1200	1.66
${}_{14}\text{4CF}_{0.55}$	48	1500	1150	15/10+14-D41	1.19	800	1200	1.90
${}_{14}\text{4CF}_{0.70}$	48	1650	1100	15/11+24-HD41	0.97	800	1200	2.23
${}_{14}\text{5CF}_{0.30}$	48	1250	950	8/7+6-D41	0.96	650	1200	1.46
${}_{14}\text{5CF}_{0.45}$	48	1400	1100	14/8+4-D41	1.00	800	1200	1.90
${}_{14}\text{5CF}_{0.55}$	48	1500	1150	15/10+16-D41	0.93	800	1200	2.14
${}_{14}\text{5CF}_{0.70}$	48	1650	1150	15/11+28-HD41	1.21	900	1200	2.11
${}_{14}\text{6CF}_{0.30}$	48	1250	950	8/7+8-D41	0.96	650	1200	1.61
${}_{14}\text{6CF}_{0.45}$	48	1400	1100	14/9+12-D41	1.00	800	1200	1.90
${}_{14}\text{6CF}_{0.55}$	48	1500	1200	15/11+16-D41	0.93	900	1200	2.11
${}_{14}\text{6CF}_{0.70}$	48	1650	1200	16/11+28-HD41	0.97	1000	1200	2.23
${}_{14}\text{7CF}_{0.30}$	48	1250	950	9/7+8-D41	0.96	650	1200	1.61
${}_{14}\text{7CF}_{0.45}$	48	1400	1100	14/9+16-D41	1.00	900	1200	1.69
${}_{14}\text{7CF}_{0.55}$	48	1500	1250	15/11+18-D41	0.93	1000	1200	2.23
${}_{14}\text{7CF}_{0.70}$	48	1650	1250	16/12+30-HD41	0.97	1000	1200	2.23

※「 ${}_{6}\text{1CF}_{0.30}$ 」の表記は, 6階建の1層崩壊で目標  $C_u$  が 0.30 を表す。

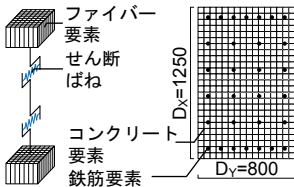
※「10/7+4-D32」の表記は, X 方向に 10 本, Y 方向に 7 本, 芯筋が 4 本とする。D 表示は SD390, HD 表示は SD490 を示し, 柱梁のせん断補強筋は USD785 とする。

### 3.2 部材モデル

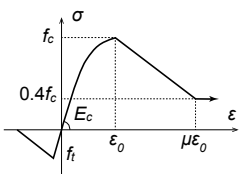
柱・耐震壁の曲げ及び軸力に対してはファイバーモデル（要素分割 50mm, 図-4）を用いる。ファイバースライスは部材端に配置し、塑性ヒンジ長さは可とう長さの 1/10 とする。ファイバーモデルにおけるコンクリートの応力-ひずみ関係は、曲線剛性逓減型<sup>4)</sup>として引張強度は設計基準強度の 1/12 とする。鉄筋の応力-ひずみ関係はバイリニア剛性逓減型とする。柱のせん断特性はバイリニア原点指向型、耐震壁のせん断特性はトリリニア原点指向型（図-5）とする。梁の曲げに対しては材端ばねモデル、履歴特性は TAKEDA モデルとする（図-6）。なお、塑性ヒンジ発生時点は、梁は、第 2 折点に達した時点、柱はファイバーモデルにおける鉄筋要素の 50%が材料強度に達した時点とする。

### 3.3 解析方法

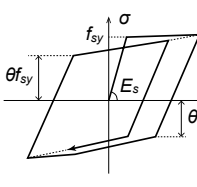
静的非線形解析では、外力分布は  $A_i$  分布に基づく分



(a) 101CF<sub>0.55</sub>の柱モデル



(b) コンクリート要素  
図-4 ファイバーモデル



(c) 鉄筋要素

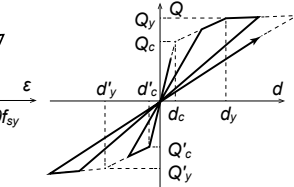


図-5 原点指向型モデル

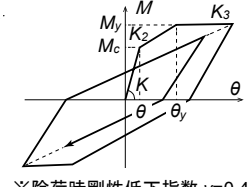


図-6 TAKEDA モデル  
※除荷時剛性低下指数  $\gamma=0.4$

表-2 検討用地震動（告示波）

波形名称 (レベル2相当)	最大速度 [cm/s]	最大加速度 [cm/s <sup>2</sup> ]	継続時間 [s]
CODE-BCJ-2	52	330	120
CODE-ELC-2	54	349	60
CODE-HAC-2	66	394	80
CODE-TAF-2	56	355	60
CODE-JMA-1	55	393	60

※ CODE-JMA-1 は他の波と異なる表層地盤である。

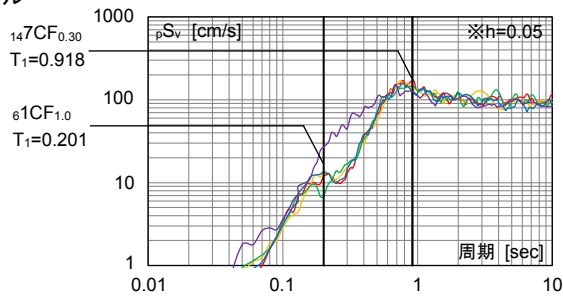


図-7 擬似速度応答スペクトル

表-3 弾性 1 次固有周期（単位:sec）

目標 $C_u$	61CF	62CF	63CF	101CF	102CF	103CF	104CF	105CF	141CF	142CF	143CF	144CF	145CF	146CF	147CF
0.30	0.305	0.387	0.435	0.409	0.467	0.562	0.577	0.624	0.550	0.659	0.733	0.771	0.834	0.873	0.918
0.45	0.251	0.328	0.391	0.373	0.413	0.479	0.524	0.566	0.519	0.573	0.636	0.675	0.730	0.777	0.799
0.55	0.237	0.318	0.356	0.350	0.382	0.442	0.500	0.538	0.502	0.554	0.598	0.668	0.702	0.721	0.756
0.70	0.227	0.296	0.353	0.335	0.357	0.414	0.463	0.507	0.487	0.534	0.569	0.646	0.677	0.708	0.740
0.85	0.207	-	-	0.321	-	-	-	-	0.471	-	-	-	-	-	-
1.0	0.201	-	-	0.309	-	-	-	-	0.461	-	-	-	-	-	-

赤: 1CF 橙: 2CF 黄緑: 3CF 緑: 4CF  
水: 5CF 青: 6CF 紫: 7CF  
○: 6階建 □: 10階建 △: 14階建

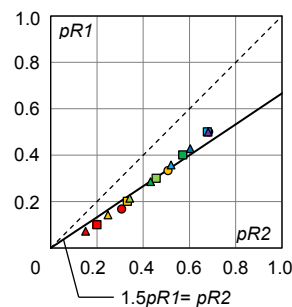
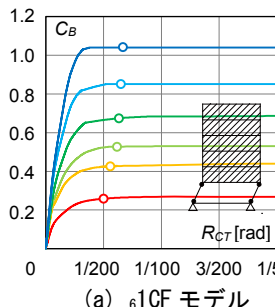
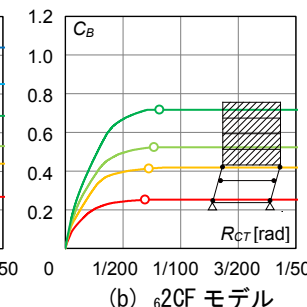


図-8  $pR1$  と  $pR2$  との関係

赤: 目標  $C_u=0.30$  橙: 目標  $C_u=0.45$  黄緑: 目標  $C_u=0.55$   
緑: 目標  $C_u=0.70$  水: 目標  $C_u=0.85$  青: 目標  $C_u=1.0$



(a) 61CF モデル



(b) 62CF モデル

図-9  $C_B$  と  $R_{CT}$  との関係

赤: 1CF 橙: 2CF 黄緑: 3CF 緑: 4CF  
水: 5CF 青: 6CF 紫: 7CF  
○: 6階建 □: 10階建 △: 14階建

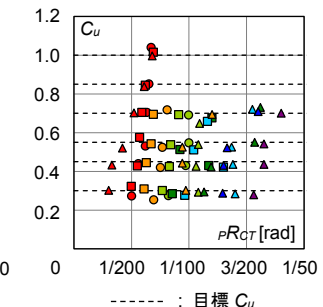


図-10  $C_u$  と  $pR_{CT}$  との関係

表-4 1階ヒンジ柱の軸力比とせん断補強指標

解析モデル	$\sigma_0 / F_C$	$\rho_w \sigma_{we} / (V_0 F_C)$	$0.3(\sigma_0 / F_C)^2 + 0.1$	解析モデル	$\sigma_0 / F_C$	$\rho_w \sigma_{we} / (V_0 F_C)$	$0.3(\sigma_0 / F_C)^2 + 0.1$	解析モデル	$\sigma_0 / F_C$	$\rho_w \sigma_{we} / (V_0 F_C)$	$0.3(\sigma_0 / F_C)^2 + 0.1$
${}_61CF_{0.55}$	0.19	0.1875	0.1108	${}_{10}3CF_{0.55}$	0.30	0.2085	0.1270	${}_{14}3CF_{0.55}$	0.38	0.3595	0.1422
${}_62CF_{0.55}$	0.18	0.1396	0.1093	${}_{10}4CF_{0.55}$	0.26	0.2132	0.1205	${}_{14}4CF_{0.55}$	0.35	0.3128	0.1372
${}_63CF_{0.55}$	0.18	0.1117	0.1094	${}_{10}5CF_{0.55}$	0.23	0.2018	0.1158	${}_{14}5CF_{0.55}$	0.35	0.2433	0.1365
${}_{10}1CF_{0.55}$	0.33	0.2502	0.1326	${}_{14}1CF_{0.55}$	0.44	0.2606	0.1591	${}_{14}6CF_{0.55}$	0.33	0.2433	0.1327
${}_{10}2CF_{0.55}$	0.24	0.2085	0.1172	${}_{14}2CF_{0.55}$	0.41	0.2876	0.1514	${}_{14}7CF_{0.55}$	0.33	0.2433	0.1321

※ A ランクのせん断補強指標:  $\rho_w \sigma_{we} / (V_0 F_C) \geq 0.3(\sigma_0 / F_C)^2 + 0.1$  を満たす。

表-5 1階ヒンジ柱の限界変形角

目標 $C_u$	${}_61CF$	${}_62CF$	${}_63CF$	${}_{10}1CF$	${}_{10}2CF$	${}_{10}3CF$	${}_{10}4CF$	${}_{10}5CF$	${}_{14}1CF$	${}_{14}2CF$	${}_{14}3CF$	${}_{14}4CF$	${}_{14}5CF$	${}_{14}6CF$	${}_{14}7CF$
0.30	1/49	1/45	1/45	1/45	1/46	1/37	1/42	1/42	1/47	1/47	1/47	1/47	1/47	1/47	1/47
0.45	1/47	1/43	1/47	1/49	1/41	1/39	1/40	1/37	1/47	1/44	1/44	1/44	1/45	1/44	1/44
0.55	1/47	1/46	1/49	1/47	1/42	1/41	1/45	1/39	1/44	1/40	1/46	1/46	1/50	1/48	1/47
0.70	1/47	1/42	1/42	1/47	1/45	1/41	1/46	1/42	1/37	1/47	1/44	1/47	1/42	1/48	1/48
0.85	1/27	-	-	1/37	-	-	-	-	1/43	-	-	-	-	-	-
1.0	1/31	-	-	1/27	-	-	-	-	1/33	-	-	-	-	-	-

壊形成時は、計画した崩壊形のすべての柱と梁に塑性ヒンジが発生した時点であり、その時の  $R_{CT}$  を崩壊形成時変形角 ( $pR_{CT}$ ) とする。崩壊層数が多い程、また  $C_u$  が大きい程、 $pR_{CT}$  が大きいことがわかる。次に各モデルの  $C_u$  と  $pR_{CT}$  との関係を図-10 に示す。すべてのモデルで  $C_u$  は目標とした  $C_u$  と概ね一致している。

#### 4.2 崩壊形成時のヒンジ柱

6・10・14階建の  $CF_{0.55}$  モデルについて崩壊形成時の柱軸力比 ( $\sigma_0 / F_C$ ) 及びせん断補強指標を表-4 に示す。軸力比は 0.18 (6階建) ~ 0.44 (14階建) 程度であり、コンクリートの短期許容圧縮応力度未満である。また、崩壊形成時において、保耐規準におけるせん断補強指標  $\rho_w$  の A ランクの条件を満たしている。

次に、「鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針」<sup>5)</sup>の曲げ圧縮破壊時変形角の算出方法を参考にし、静的非線形解析による1階ヒンジ柱の柱脚の曲げに対する限界変形角 ( $cR_u$ ) を算出する(表-5)。各モデルの  $cR_u$  は 1/50 ~ 1/27 であり、A ランクの部材変形性能 ( $cR_u$  が 1/50 程度)<sup>1)</sup>以上を確保している。

#### 5. 時刻歴応答解析による検討

##### 5.1 最大層間変形角

6・10階建の  $CF_{0.55}$  モデルについて入力倍率 1.0 時の時刻歴応答解析による最大層間変形角 ( $dR_{max}$ ) の高さ方向分布を図-11 に示す。 $dR_{max}$  は 3CF モデルで最も大きく 6階建で 1/63, 10階建で 1/49 である。10階建では、それよりも崩壊層数が増えるに伴い、変形が小さくなり  $dR_{max}$  は 4CF モデルで 1/52, 5CF モデルで 1/58 である。地震動別に見ると、6・10階建ともに CODE-HAC-2 波の応答が最も大きい。

##### 5.2 ヒンジ柱の応答変形

入力倍率 1.0 時及び 1.5 時の 1階ヒンジ柱の柱脚の応答変形角 ( $cR_D$ ) と  $pRC_1$ ,  $pRC_2$  との関係を図-12 に示す。 $cR_D$  は  $pRC_1$ ,  $pRC_2$  が大きくなる程、小さくなることわかる。A ランクの部材変形性能に相当すると考えら

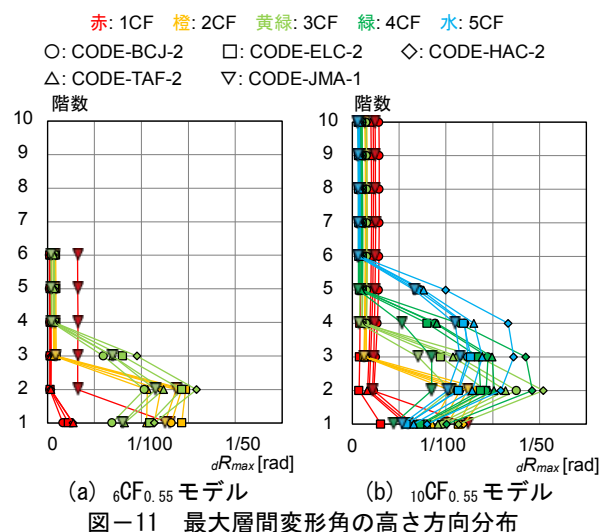


図-11 最大層間変形角の高さ方向分布

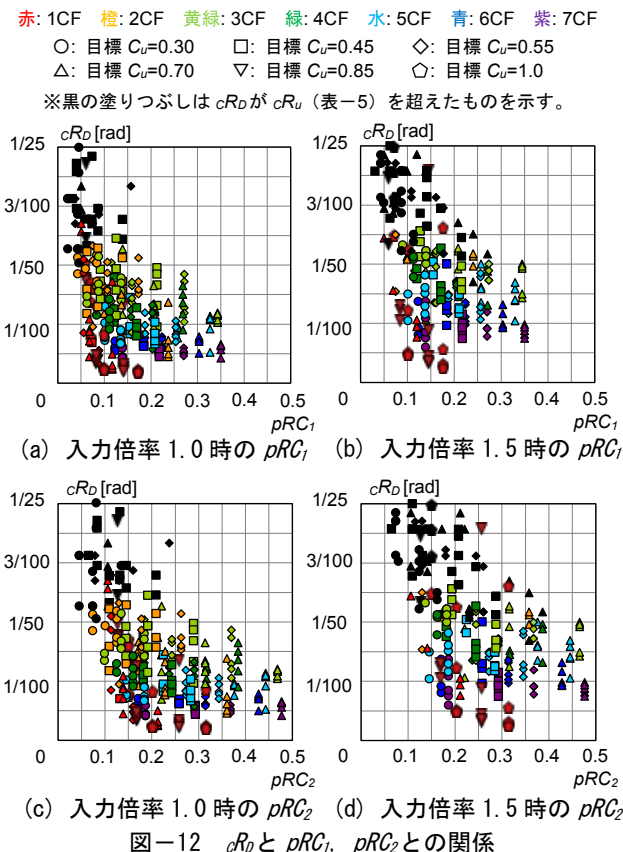


図-12  $cR_0$  と  $pRC_1$ ,  $pRC_2$  との関係

れる 1/50 に着目すると、 $cR_D$  が 1/50 以下となるのは、入力倍率 1.0 時では、 $pRC_1$  が 0.18 以上、 $pRC_2$  が 0.27 以上、入力倍率 1.5 時では、 $pRC_1$  が 0.30 以上、 $pRC_2$  が 0.42 以上である。 $pR_2$  は  $pR_1$  に比べて大きいため、 $pRC_2$  は  $pRC_1$  より大きくなり、入力倍率 1.0 時では 1.5 倍、入力倍率 1.5 時では 1.4 倍である。これは、式(2)に示す  $1/a$  ( $a=2/3$  時に 1.5 倍) に概ね対応している。

## 6. 崩壊層の水平耐力と変形に関する考察

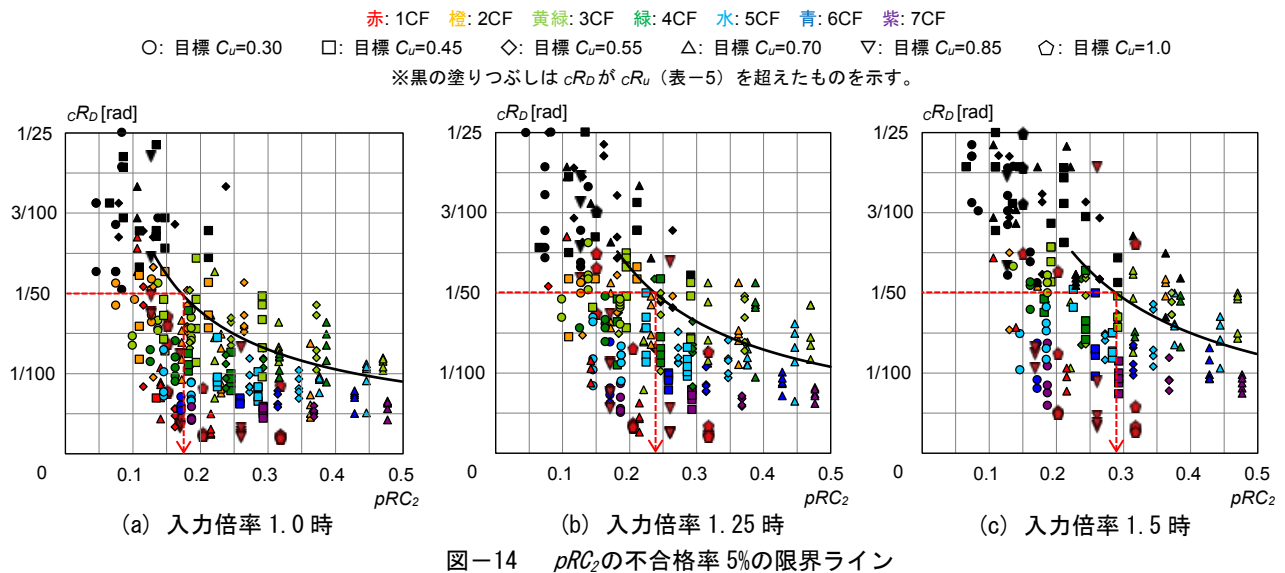
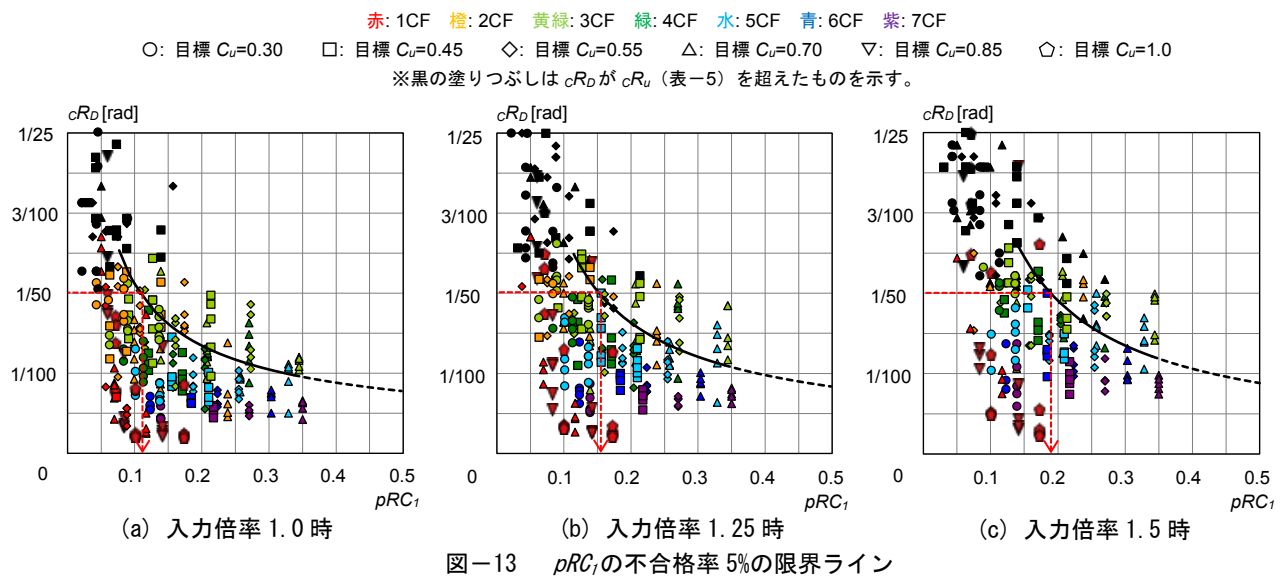
### 6.1 必要崩壊層耐力係数の条件

$cR_D$  が目標値以下となる崩壊層耐力係数 (必要崩壊層耐力係数、 $pRC_{1n}$ 、 $pRC_{2n}$ ) について、 $cR_D$  の不合格率が 5% となる限界ラインを検討する (図-13、図-14)。図中の線は 1 階ヒンジ柱の  $cR_D$  が目標値以下となる必要崩壊層耐力係数の限界ラインを示す。なお、限界変形角 (表-5) の平均値は約 1/40 であり、 $cR_D$  が  $cR_u$  を超えるデータは考察から除外する。入力倍率 1.0 時の限界ラインにお

いて、 $cR_D$  を A ランクの変形性能に相当する 1/50 以下とするためには、 $pRC_{1n}$  は 0.12 以上、 $pRC_{2n}$  は 0.18 以上必要である。また、入力倍率 1.25 時の限界ラインにおいて、同様に  $cR_D$  を 1/50 以下とするためには、 $pRC_{1n}$  は 0.16 以上、 $pRC_{2n}$  は 0.24 以上必要であり、入力倍率 1.5 時では、 $pRC_{1n}$  は 0.19 以上、 $pRC_{2n}$  は 0.29 以上必要である。保耐標準の C ルート ( $D_s$  値を 0.55) に則り、 $C_u$  を 0.55 とした場合、入力倍率 1.0 時では  $pR_1$  は 0.21 以上、 $pR_2$  は 0.32 以上となり、6・10 階建では崩壊層数が 2 層以上、14 階建では 3 層以上が該当する。よってピロティ構造ではこれらの値を満足しない。ピロティ構造に必要となる  $C_u$  は入力倍率 1.0 時に 6 階建が約 0.57、10 階建が約 0.87、14 階建が約 1.15 である。

### 6.2 崩壊層の水平剛性

必要崩壊層耐力係数を満足する  $C_B$  ( $C_{un}$ ) を発揮する時点における崩壊層の水平剛性について考察する。崩壊層の水平耐力と変形の概念を図-15 に示す。静的非線形解





析において、 $C_{um}$ を發揮した時点の $R_{CT}$ を $C_{um}$ 時崩壊層変形角( ${}_nR_{CT}$ )とし、その時点の水平剛性を $C_{um}$ 時崩壊層剛性( ${}_nK=C_{um}/{}_nR_{CT}$ )とする。

66モデルについて ${}_nK$ と $pRC_2$ との関係を図-16に示す。なお、各モデルの $cR_D$ は5波による応答値の最大値とする。入力倍率1.0時の限界ラインにより $cR_D$ を1/50以下とする $pRC_{2n}$ は0.18であるため、 $pRC_2$ が0.18以上の領域にある大多数のモデルの $cR_D$ は1/50以下であることがわかる。なお、 ${}_nK$ が小さい極少数のモデルでは、特定の地震動に対する $cR_D$ が1/50を越えている。

入力倍率1.0時において $cR_D$ が1/50以下となるモデルについて、 ${}_nK$ と $C_u$ との関係を図-17(a)に示す。図中には ${}_nK-C_u$ 関係の回帰直線を示す。 $C_u$ が大きい程、 ${}_nK$ が大きい傾向が見られる。

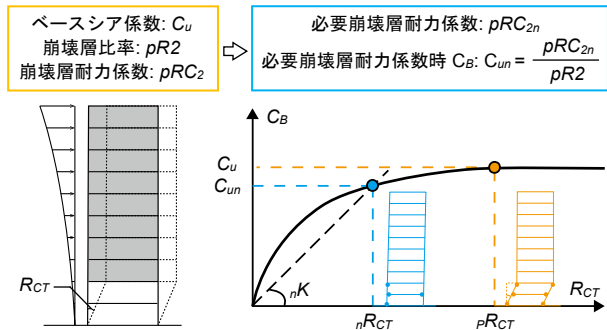


図-15 水平耐力と変形概念

- : 倍率  $1.5cR_D \leq 1/50$  ○: 倍率  $1.5cR_D > 1/50$ , 倍率  $1.0cR_D \leq 1/50$
- :  $1/50 < \text{倍率 } 1.0cR_D \leq 1/40$  ●: 倍率  $1.0cR_D > 1/40$

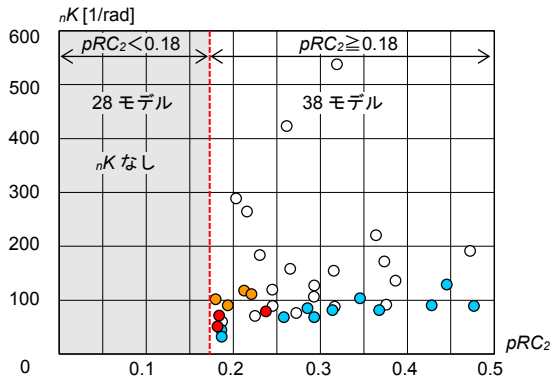


図-16  ${}_nK$ と $pRC_2$ との関係

- : 倍率  $1.5cR_D \leq 1/50$  ○: 倍率  $1.5cR_D > 1/50$ , 倍率  $1.0cR_D \leq 1/50$

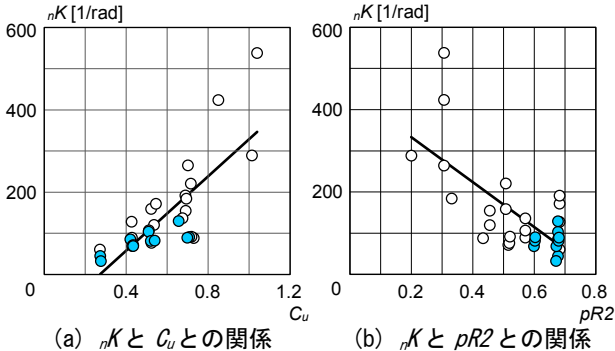


図-17 (a)  ${}_nK$ と $C_u$ との関係 (b)  ${}_nK$ と $pR_2$ との関係

図-17  ${}_nK$ と $C_u \cdot pR_2$ との関係

次に、入力倍率1.0時において $cR_D$ が1/50以下となるモデルについて、 ${}_nK$ と $pR_2$ との関係を図-17(b)に示す。図中には ${}_nK-pR_2$ 関係の回帰直線を示す。 $pR_2$ が大きい程、 ${}_nK$ が小さい傾向が見られる。なお、 ${}_nK$ については $C_u$ との関係や $pR_2$ との関係の観点から、今後対象事例を増やして検討していきたい。

## 7. まとめ

下階の壁が抜けて部分崩壊形を形成する6・10・14階建RC造壁フレーム構造を対象として静的非線形解析及び時刻歴応答解析を実施した。その結果、本解析の範囲内であるが、以下の知見を得た。

- (1) 1階ヒンジ柱の柱脚の応答変形角( $cR_D$ )と崩壊層比率に崩壊形形成時のベースシア係数( $C_u$ )の値を乗じた崩壊層耐力係数( $pRC_1, pRC_2$ )の関係を示した。 $cR_D$ は崩壊層耐力係数が大きくなる程小さくなる。
- (2) 目標とする $cR_D$ に応じた崩壊層耐力係数を表す不合格率5%の限界ラインにより必要崩壊層耐力係数を示した。
- (3)  $cR_D$ を1/50以下とするためには、入力倍率1.0時では必要崩壊層耐力係数 $pRC_{1n}$ は0.12以上、必要崩壊層耐力係数 $pRC_{2n}$ は0.18以上となる。
- (4)  $C_u$ を0.55とした場合、 $cR_D$ を1/50以下とする崩壊層の層数は、入力倍率1.0時では6・10階建では2層以上、14階建では3層以上が該当する。
- (5) 入力倍率1.0時では、必要崩壊層耐力係数よりピロティ構造において必要となる $C_u$ は6階建が約0.57、10階建が約0.87、14階建が約1.15である。
- (6) 必要崩壊層耐力係数を満足する $C_B$ を發揮する時点における崩壊層の水平剛性は、 $C_u$ が大きい程大きく、 $pR_2$ が大きい程小さい傾向が見られる。

今後、ヒンジ柱の目標変形角に応じた必要崩壊層耐力係数を満足する崩壊層の水平剛性について検討事例を積み重ねて更に考察していきたい。

## 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造保有水平耐力計算規準(案)・同解説、2016.4
- 2) 白石泰志, 秋山光, 毎田悠承, 和泉信之：下層階において部分崩壊形を形成する中高層RC造壁フレーム構造の保有水平耐力と地震応答, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.1-6, 2018.7
- 3) 国土交通省住宅局建築指導課ほか：建築物の構造関係技術基準解説書, pp.730-748, 2015.6
- 4) 構造システム(株)：SNAP Ver.7 テクニカルマニュアル, 2015.11
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート建造物の靱性保証型耐震設計指針・同解説, pp.114-126, 1999.8