

1. 序

近年、建築および土木分野において性能を基盤とした工学 (Performance Based Engineering) の概念を取り入れた構造性能評価法並びに構造設計法の開発が盛んに行われている。図 1.1 の概念図のようにこのような性能基盤型設計法では、構造物は、安全性はもちろん地震後の使用性も視野に入れた設計が必要とされ、あるレベルの地震に対して建物の損傷を修復可能な程度にとどめるという「修復性」の重要性も認識されている。従来わが国では、これらの性能が許容応力度設計や保有耐力確認などによって間接的に保障されるとの立場をとってきたが、建築基準法改正を機に、限界耐力計算法などの各限界状態の層間変位に注目し、安全性、修復性、使用性を判断する診断法が提案されている。具体的に、ドアの開閉が可能であり、避難経路が確認されているなどが変位によって確認する評価項目例としてある。

性能基盤型耐震性能評価法のひとつとして、Capacity Spectrum Method (以後、CSM 法) がある。この方法は、建物全体の構造特性を表す耐力曲線 (Capacity Spectrum 以後、CS) と、想定する地震動に対して建築物の塑性変形量に応じた等価粘性減衰を考慮して、低減した応答スペクトル (Demand Spectrum 以後、DS) を重ね合わせることによって、建築物の最大応答 (Performance Point 以後、PP) を推定している。CSM 法では、1 自由度系への縮約の際に PushOver 解析によって算出した各層のせん断力と変形、各階の質量、及び BaseShear を用いて CS を求める。よって、同法では PushOver 解析結果の影響が大きくなることは明白である。

本論では、RC 造建物において部材の特性を適切に表す要素を導入し、その解析仮定が PushOver 解析の結果にどう影響するか調べるため、1) 剛域の有無、2) せん断変形、3) 塑性ヒンジ領域長さ等を考慮した場合の解析結果の変化による性能基盤型設計法への影響を調べる。

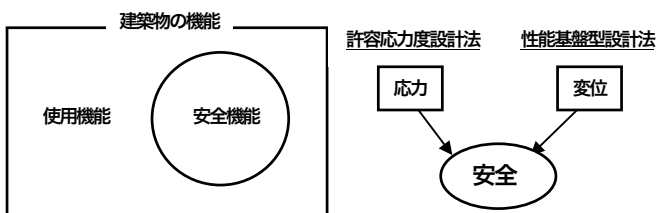


図 1.1 使用機能と安全機能

図 1.2 安全性の評価

2. RC 部材の梁要素の導入

2.1 M-φ関係のモデル化

コンファインドコンクリートの応力-ひずみ関係式として、式(2.1)の崎野・孫式¹⁾を用いる。低強度から高強度に対応し、帯筋補強や鋼管横補強など幅広い適応性を持ったものである。各変数・定数は本論を参照されたい。

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_{cB}} = \frac{AX + (D-1)X^2}{1 + (A-2)X + DX^2} \quad (2.1)$$

崎野・孫の応力-ひずみ関係¹⁾を用いて部材断面の M-φ 解析を行い図 2.3 のようにトリリニア化する。

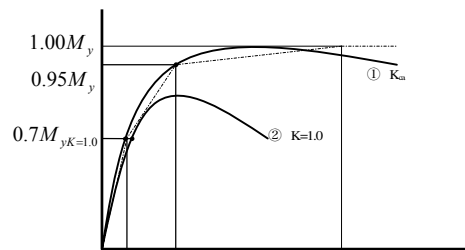


図 2.1 M-φ関係のトリリニア化

K : 強度上昇率。

M_y : $K > 1.0$ 時の M-φ関係における最大モーメント。

$M_{y,K=1.0}$: $K = 1.0$ 時の M-φ関係における最大モーメント。

2.2 剛域の考慮

RC 部材の接合部には、剛域と呼ばれる複数の部材によって拘束され元の部材よりも剛性が高くなった領域がある。本論では文献²⁾より、式(2.2)のように部材剛性マトリクス K_m に C_0 , C_0' マトリクスを両側から掛けることにより剛域を考慮する。スペースの都合上 C_0' を式 (2.3) に記す。

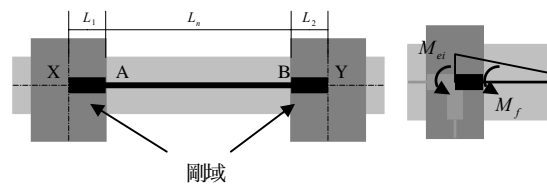


図 2.2 剛域のモデル化 (左) Face Moment (右)

$$K_A = C_0' K_m C_0 \quad (2.2)$$

$$C_0' = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -(L_1 + L_2) & 0 & 1 & -L_2 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

また、RC 部材では剛域を考慮した場合、部材は部材端部ではなく剛域と部材の節点から降伏する。この剛域と部材端の節点のモーメント M_f (今後 Face Moment とする。) が降

伏モーメント M_y に達したときに部材端にヒンジ領域が発生する。部材の i 端の Face Moment の算定法は以下の式(2.4)を用いる。

$$M_f = M_{ei} - L_1 \cdot \frac{M_{ei} + M_{ej}}{L} \quad (2.4)$$

M_{ei} : 部材 i 端部のモーメント

M_{ej} : 部材 j 端部のモーメント

2.3 せん断変形の考慮

せん断変形は部材の 3×3 たわみ性マトリックスの 2×2 成分に $(1+\gamma/2)$ を乗じることで考慮する。ここで、 γ はせん断変形に対する比率を表す係数で、ゼロを代入するとせん断変形を無視できる。 γ は以下の式(2.5)で表される。

$$\gamma = \frac{6EI\chi}{GAL^2} \quad (2.5)$$

A : 断面積。 L : 部材の長さ。 EI : 曲げ剛性。

G : せん断弾性係数。以下の式(2.6)を参照。

χ : せん断変形による形状係数。

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (2.6)$$

ν : ポアソン比。(コンクリートは $\nu = 1/6$ 。)

2.4 ヒンジ領域の考慮

図 2.3 のようなモデルのヒンジ領域は、文献²⁾より、直列連鎖材の拡張として、両端に曲げ剛性を低下させた部材の領域を付加し考慮する。二次剛性とヒンジ領域長さで部材の塑性後の剛性低下を評価する。

$$F_A = \sum H_{KD} {}^t F_K H_{KD} \quad (2.7)$$

$$= H_{BD} {}^t F_a H_{BD} + H_{CD} {}^t F_b H_{CD} + F_b$$

F_A : 直列連鎖材のたわみ性マトリックス

F : 各部材領域のたわみ性マトリックス

H : 各部材の釣り合いマトリックス

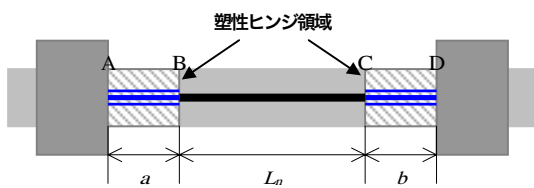


図 2.3 塑性ヒンジ領域モデル

3. CSM 法による RC 建造物の性能検証

第 3 章では、CSM 法の概要とともに 2 章で提案した RC 部材梁要素を用い、5 層 5 スパンの RC 建造物 (図 3.1) の PushOver 解析を行い要素の解析結果への影響を検討する。

3.1 CSM 法の概要

CSM 法による耐震性能検証のフローを図 3.2 に示す。各限界状態は表 3.1 のように設定する³⁾。荷重分布は A_i 分布にしたがう。表 3.2 に各層の重量、 A_i 分布の数値、および層せん断力分布の値を示す。

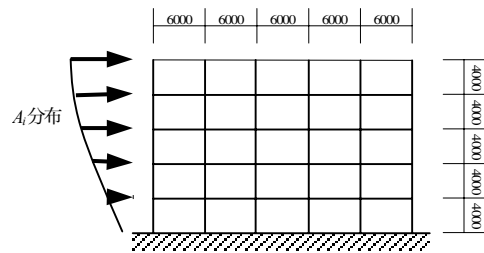


図 3.1 解析対象建造物

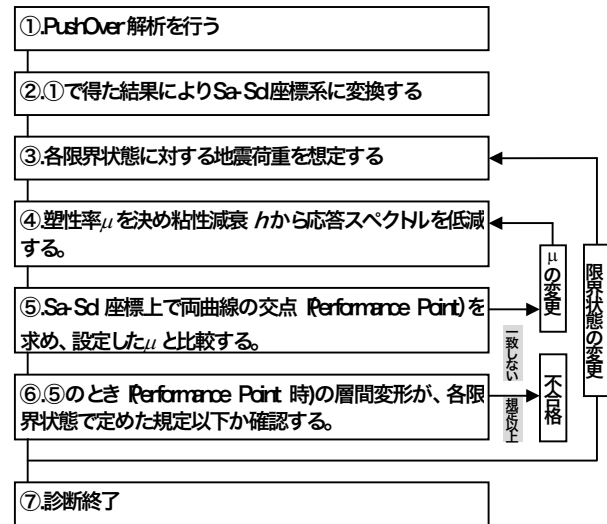


図 3.2 CSM 法のフロー

表 3.1 各種限界状態

使用限界状態: 非構造体を含んで建築物の使用に問題ない限界として以下の値を採用する。
①部材未降伏
②代表変位角 1/240 程度, 層間変形角 1/200 程度
修復限界状態: 構造体の大規模な補修をしなくて良い限界として以下の値を採用する。
①一般の部材の塑性率 2 程度, 境界梁の塑性率 3 程度
②層がおおむね弾性限界程度
③代表点位置の変形角 1/120 程度, 層間変形角 1/100 程度
安全限界状態: 構造体の安全性に問題のない限界状態として以下の値を採用する。
①代表点位置の変位の変形角 1/55 程度, 層間変形角 1/50 程度

表 3.2 対象建物の各階重量及び層せん断力

story	H(m)	W(ton)	ΣW(ton)	a_i	A_i	C_i	Q_i (ton)
R	20	180	180	0.189	1.766	0.353	63.6
5	16	185	365	0.384	1.447	0.289	105.6
4	12	190	555	0.584	1.263	0.253	140.2
3	8	195	750	0.789	1.122	0.224	168.3
2	4	200	950	1.000	1.000	0.200	190.0
1	0						

3.2 Demand Spectrum の作成方法

弾性時の各限界状態の DS を図 3.3 (左) に示す。安全限界状態に対する地震荷重は、5%減衰に対する応答スペクトルとして与え、短周期側の加速度一定部分を 1176gal、長周期側の速度一定部分を 160cm/sec とする。同様に、修復限界状態を短周期側の加速度一定部分を 493.9gal、長周期側の速度一定部分を 67.2cm/sec。使用限界状態を短周期側の加速度一定部分を 211.7gal、速度一定部分を 28.8cm/sec とする。

塑性変形の影響による reduced DS は、式 (3.1) で示すような低減係数 F_h を弾性時 DS にかき $S_a(T)$ から $S_a(S_d)$ に変換することによって得られる。式中の h は等価粘性減衰定数であり、図 3.4 に示す劣化型定常履歴ループモデルを用いる場合の h は式(3.2)のように略算できる³⁾。地震波の種類により γ は $1/\pi \sim 1/10$ とかなりばらつきがある。本論では、 $\gamma=0.2$ とし地盤等の減衰を 0.05 加え式(3.3)で等価粘性減衰定数を算出する。

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h) \quad (3.1)$$

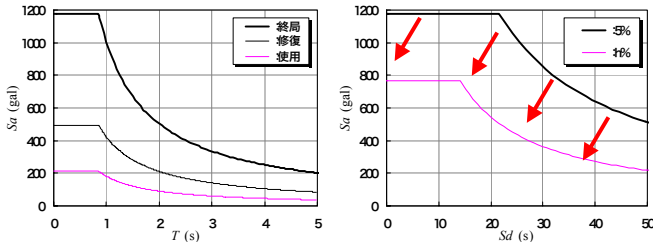
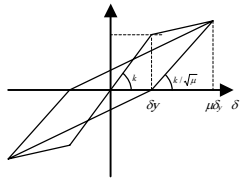


図 3.3 応答スペクトルとその低減



$$h = 0.02 + \gamma(1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (3.2)$$

$$h = 0.05 + 0.2(1 - 1/\sqrt{\mu}) \quad (3.3)$$

図 3.4 等価粘性減衰定数

3.3 Capacity Spectrum の作成方法

建築物の PushOver 解析結果を式(3.4)によって A-D Format に変換することによって CS を求めることができる。ここで、 m_i は各層の質量、 δ_i は各床レベルの変位 P_i は各層の層せん断力、 Q_B は BaseShear である。

$$S_a = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times \delta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^n m_i \times \delta_i \right)^2} \cdot Q_B, \quad S_d = \frac{S_a}{\omega^2} \quad (3.4)$$

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n m_i \times \delta_i^2}{\sum_{i=1}^n P_i \times \delta_i}}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}$$

3.4 CSM 法の結果と考察

前項までの方法で求めた CS と DS により、剛域の有無と、1.25D~0.50D の範囲でヒンジ領域長さ別の CSM 法の診断検討結果を以下に述べる。

図 3.5 は剛域考慮による CSM 法に及ぼす影響である。剛域を考慮することで初期剛性、耐力、PP が大きく変化していることが分かる。なお、図はスペースの都合上示していないが、層間変位も大きく変化し、性能設計において大きな影響を及ぼすことは明白である。

図 3.6 はヒンジ領域長さごとの S_a-S_d 座標上の PP である。図中の表は各種限界時の S_a と S_d である。この表から、使

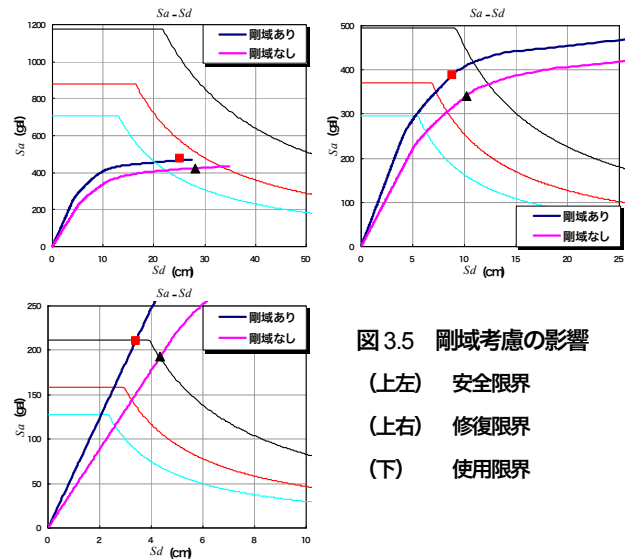


図 3.5 剛域考慮の影響

- (上左) 安全限界
- (上右) 修復限界
- (下) 使用限界

用限界時は弾性域なので、 S_a と S_d ともに変化は無いが、修復限界においてはヒンジ長さが長くなるにつれて、 S_d は増加し、 S_a は減少していく。安全限界においても同様な傾向が見られる。

次に、図 3.7 は層せん断力・層間変位曲線に及ぼすヒンジ領域長さの影響、表 3.3 に各種限界時の層間変形角を示す。(表中では使用限界は弾性域によりヒンジ領域長さの影響がないので数値結果を省略している。) この図表から、ヒンジ領域長さによる限界状態時の層間変位、ひいては層間変形角の変化が顕著でないことが分かる。それは、本解析対象建築物が全体崩壊機構を示し、塑性ヒンジがほとんど梁端部に生じていたからである。

4. 結論

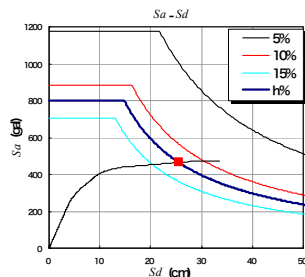
- 1) 塑性変形、剛域の有無とヒンジ領域の長さの影響を考慮できる梁要素の剛性マトリックスを導いた。
- 2) 全体崩壊型の骨組構造においては、部材端部のヒンジ領域の長さが修復限界状態時の応答値に影響を及ぼすが、安全限界状態と使用限界時の応答値に及ぼす影響は軽微である。
- 3) 部材端部に剛域を有する場合の応答値と、剛域を無視して行った応答値は大きく異なる。
- 4) 層崩壊の恐れのある建物について、水平変位が主に柱のヒンジ領域の変形に起因することから、ヒンジ領域長さの影響が顕著となると予測される。これを検討することを今後の課題とする。

参考文献

- 1) 孫玉平, 直線型横補強材により拘束された鉄筋コンクリート柱の弾塑性性状, 九州大学博士論文, 1991年2月
- 2) 青山博之 上村智彦, マトリックス法による構造解析, 培風館, 1988年2月
- 3) 建設省大臣官房技術調査室 監修 (社) 建築研究振興協会編, 鉄筋コンクリート造建築物の性能評価ガイドライン, 技報堂出版, 2000年8月

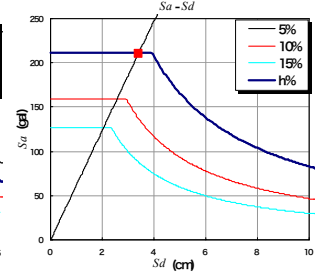
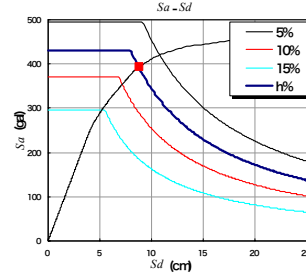
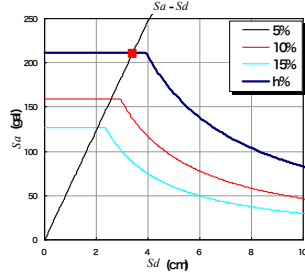
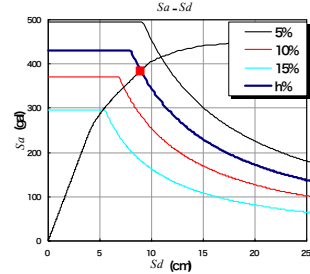
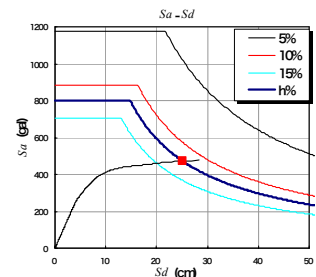
1.25D

安全限界	
Sd	Sa
25.5	464.7
修復限界	
Sd	Sa
8.9	383.8
使用限界	
Sd	Sa
3.4	210.5



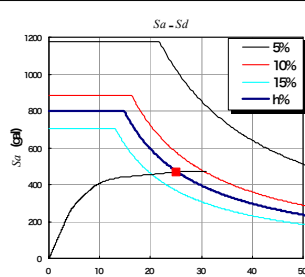
0.75D

安全限界	
Sd	Sa
25.0	472.5
修復限界	
Sd	Sa
8.8	394.2
使用限界	
Sd	Sa
3.4	210.5



1.00D

安全限界	
Sd	Sa
25.2	468.0
修復限界	
Sd	Sa
8.8	388.9
使用限界	
Sd	Sa
3.4	210.5



0.50D

安全限界	
Sd	Sa
24.7	476.5
修復限界	
Sd	Sa
8.7	396.6
使用限界	
Sd	Sa
3.4	210.5

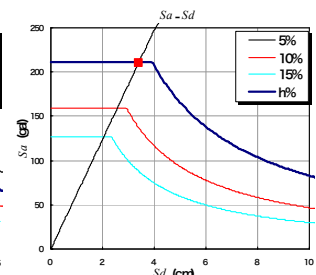
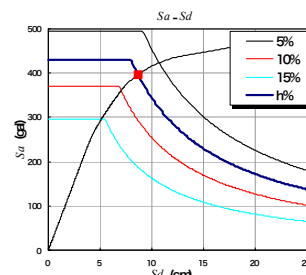
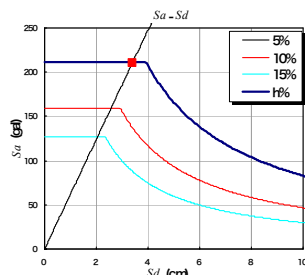
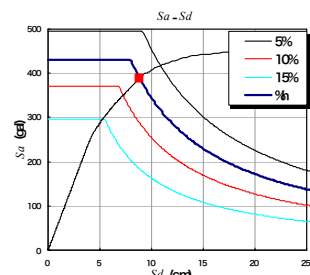
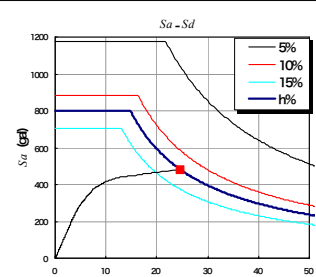


図 3.6 各種限界状態時のヒンジ領域長さ別の Performance Point

表 3.3 各種限界状態の層間変形角

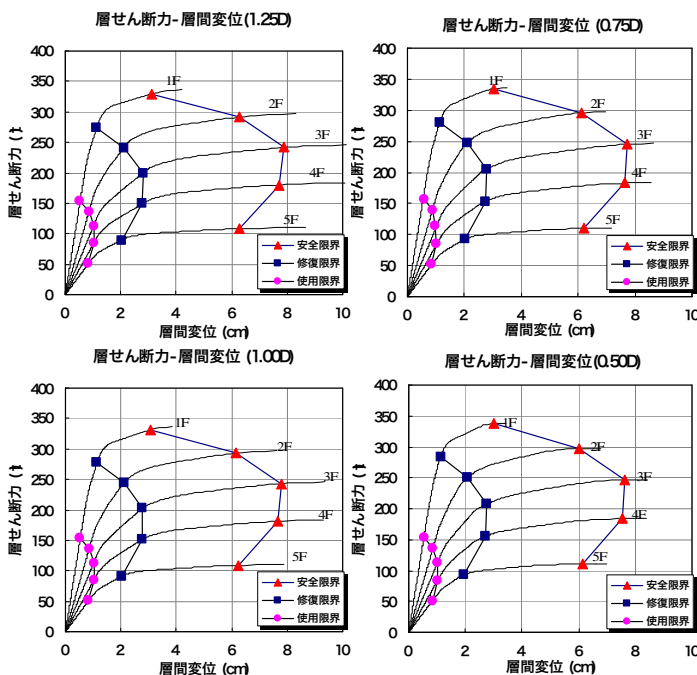


図 3.7 層せん断力-層間変位に及ぼすヒンジ領域長さの影響

1.25D

安全限界		
層間変位	層せん断力	Story Drift
6.3	108.2	1/ 64
7.7	180.2	1/ 52
7.9	241.6	1/ 51
6.3	291.4	1/ 64
3.1	330.0	1/ 128

修復限界

層間変位	層せん断力	Story Drift
2.0	89.5	1/ 198
2.8	149.1	1/ 144
2.8	199.8	1/ 142
2.1	241.1	1/ 189
1.1	273.0	1/ 354

1.00D

安全限界		
層間変位	層せん断力	Story Drift
6.2	108.9	1/ 64
7.6	181.3	1/ 52
7.8	243.0	1/ 51
6.2	293.2	1/ 65
3.1	332.0	1/ 129

修復限界

層間変位	層せん断力	Story Drift
2.0	90.9	1/ 198
2.8	151.2	1/ 145
2.8	202.8	1/ 144
2.1	244.6	1/ 190
1.1	277.0	1/ 352

0.75D

安全限界		
層間変位	層せん断力	Story Drift
6.2	109.8	1/ 64
7.6	182.7	1/ 52
7.7	245.0	1/ 52
6.1	295.5	1/ 66
3.0	334.6	1/ 131

修復限界

層間変位	層せん断力	Story Drift
2.0	92.2	1/ 199
2.7	153.4	1/ 146
2.8	205.7	1/ 143
2.1	248.1	1/ 189
1.1	281.0	1/ 351

0.50D

安全限界		
層間変位	層せん断力	Story Drift
6.1	110.5	1/ 65
7.5	184.0	1/ 53
7.6	246.7	1/ 53
6.0	297.6	1/ 66
3.0	337.0	1/ 133

修復限界

層間変位	層せん断力	Story Drift
2.0	92.8	1/ 204
2.7	154.5	1/ 148
2.8	207.2	1/ 145
2.1	249.9	1/ 192
1.1	283.0	1/ 355