論文　強度のばらつきが構造物の地震応答に与える影響

丸橋　奈々子 [*1]・市之瀬　敏勝 [*2]・梅村　恒 [*3]

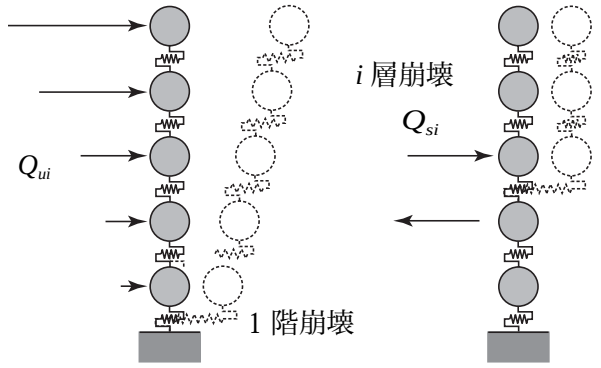
要旨：本研究では耐震診断において層降伏すると判定された鉄筋コンクリート建物を対象に，強度のばらつきが地震応答に与える影響について検討した。建物の強度指標をパラメータにとり，正規乱数によって各階の強度をばらつかせ，応答のばらつきを確率的に評価した。その結果，他階より強度指標の低い階では塑性率，累積塑性エネルギー分布の双方が正規分布とは大きく異なる分布となった。強度指標が高い階であっても，強度指標の低い階より大きく変形することがあり得ることがわかった。

キーワード：耐震診断，強度のばらつき，正規分布，層せん断余裕率，危険率

1. はじめに

部材強度のばらつきや非構造部材の影響から，実際の建物には強度のばらつきが存在する。ばらつきの影響に関する研究では，桑村 [1]，森口 [2] らが梁柱部材の曲げ強度のばらつきが崩壊モードや地震応答に及ぼす影響を論じているが，層崩壊する建物に関する研究は少ない。部材強度がばらつく場合，弱点階と判断された階以外で層崩壊が生じる可能性もある。

本研究の目的は建物強度のばらつきによって生じる応答変形や累積塑性エネルギーのばらつきを，建物の各階の建物の強度指標をパラメータにとり，確率的に評価することである。特に，強度指標が高いと判定された階の変形の増加量に注目した。



(a)　A_i 分布外力　　(b)　i 層を崩壊させる外力

図-１　２種類の外力と崩壊型

2. 各種定義と解析条件

本研究ではモンテカルロ法による統計解析手法を用いた。RC 構造建物の各層の降伏強度を正規乱数によりばらつかせたモデルを 2000 体作成し，動的解析を行った。

2.1　降伏強度のばらつき

既往の研究 [2] より部材強度のばらつきによる RC 建物の柱曲げ強度のばらつきは変動係数 10% 程度と示されてる。本研究では，建物モデルの降伏強度のばらつきを 5%, 10% と 2 種用い，比較を行った。

2.2 層せん断余裕率

本研究で行う検討は，耐震診断において層降伏すると判定された建物を対象としている。このため，強度指標 C_T が各階で異なる建物を用いた。

強度比を表す指標としては層せん断余裕率 [3] を用いた。図-1(a) のような A_i 分布外力を受け 1 階が崩壊する時の i 階の層せん断力を Q_{ui}，図-1(b) のような i 階が層崩壊する時の層せん断力を Q_{si} とする時，Q_{si} が Q_{ui} より十分に大きければ，i 層の崩壊は生じないと予想される。そこで層降伏に対する余裕度を表す指標として，層せん断余裕率 f_i を式 (1) のように表す。

$$f_i = \frac{Q_{si}}{Q_{ui}} - 1 \qquad (1)$$

*1　名古屋工業大学大学院　工学研究科システムマネジメント工学　大学院生　(正会員)
*2　名古屋工業大学大学院　工学研究科教授　工博　(正会員)
*3　名古屋工業大学大学院　工学研究科講師　博士（工学）　(正会員)

2.3 解析モデル

階高 3m，各階の質量 100t，6 階建てのせん断多質点系モデルを用いて地震応答解析を行った。図- 2 に示すように，モデルの復元力特性は修正武田モデルとした。降伏変形は 3cm とし，降伏点割線剛性は初期剛性の 0.3 倍とした。モデルの i 層の降伏強度 Q_{yi} は式 (2) で算出する。

$$Q_{yi} = C_b \times A_i \times (1 + f_i) \times W_i \qquad (2)$$

ここで，W_i は i 層以上の重量である。ベースシア係数 C_b は 0.5 とした。

強度をばらつかせた場合の降伏強度を Q_{yi}' とすると，Q_{yi}' は降伏変形を一定としてばらつかせた。また，各層のばらつきは独立である。

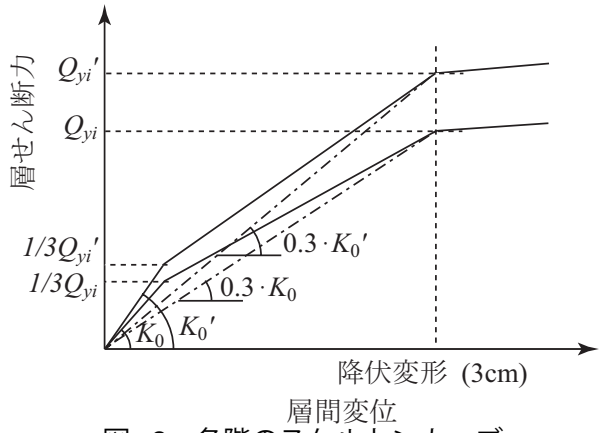


図- 2　各階のスケルトンカーブ

2.4 入力地震波

入力地震波は以下の 2 種を最大速度を 100kine に基準化して用いた。

(1)1968 年十勝沖地震八戸港湾記録 EW 成分

(2)1995 年兵庫県南部地震 JMA 記録 NS 成分

以降 (1) を hach，(2) を jma と呼ぶ。

3 強度のばらつきが応答に与える影響

耐震診断で 1 階の強度が弱いと判定された RC 建物を仮定して，強度のばらつきによって生じる建物の応答特性を調べた。1 階の層せん断余裕率を 0, 2~6 階の層せん断余裕率を 0 ～ 0.5 のパラメータとした。どのモデルも 2 ～ 6 階の f_i の値は一定とした。入力地震波は hach を用い，変動係数は 5%, 10% の場合の 2 種類を比較した。

図- 3 に各 f_i ごとのばらつきの確率密度分布を示す。横軸は $(1+f_i)$ で強度の比率を表す。

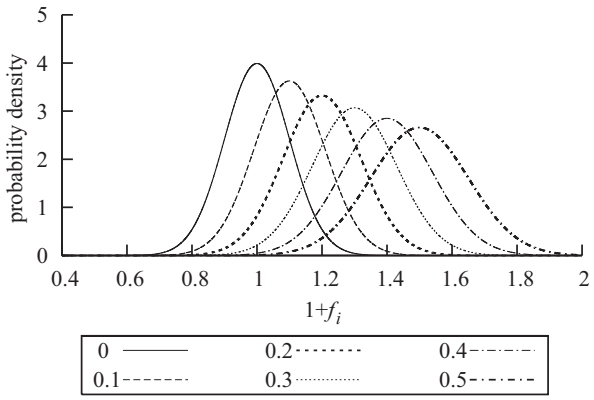
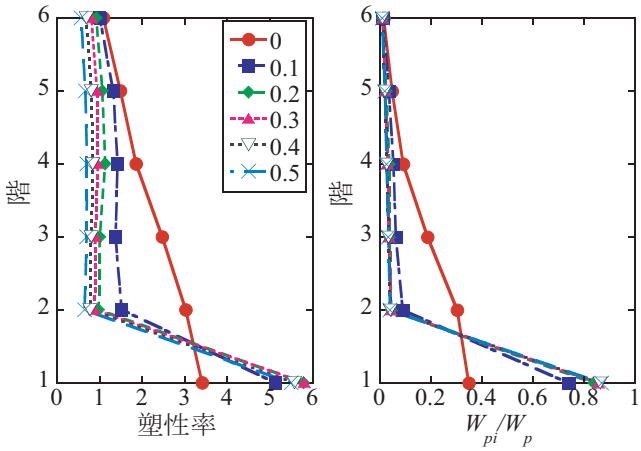


図- 3　ばらつきの確率密度分布 (変動係数 10%)

3.1 ばらつきのないモデルの場合

強度にばらつきのない場合の f_i の差による建物の応答性状を調べた。図- 4 に，強度をばらつかせない時（変動係数 0%）のモデルの各階の応答分布を示す。(a) は塑性率，(b) は i 階の累積塑性エネルギー W_{pi} を建物全体の累積塑性エネルギー W_p で除した値 W_{pi}/W_p である。凡例の値は，2 ～ 6 階の f_i の値を示す。全階 f_i が 0 のモデルは，1 ～ 3 階が比較的大きく変形し，W_{pi}/W_p の値も大きい。2 ～ 6 階の f_i が 0.1 となると，1 階に損傷が集中する。それ以上になると 0.1 の場合とほぼ同様の分布を示す。ばらつきのないモデルの場合，2 ～ 6 階の f_i が 0.1 あれば 1 階に損傷が集中するといえる。



(a) 塑性率　　(b) W_{pi}/W_p

図- 4 ばらつきのないモデルの応答

3.2 強度をばらつかせた時の応答分布

図- 5 に変動係数 5%，10% で強度をばらつかせた時の 1 階の塑性率の分布を示す。(a) ～ (d) は，2 ～ 6 階の f_i が順に 0，0.1，0.2，0.3 の時の解析結果である。実線は変動係数 0 のばらつき

のないモデルの値，実線によるヒストグラムは，変動係数 5% のモデルの値，網掛け部分は変動係数 10% のモデルの値である。破線は変動係数 10% の平均値，σ は標準偏差を表す。

変動係数 10% の分布を (a) ～ (d) で比較すると，強度差が大きくなるにつれて分布の尖端が右にシフトしていることがわかる。(a) ～ (d) いずれのモデルも，強度設定に用いた正規分布とは異なる分布を示した。平均値はばらつきのないモデルの値を下回った。(a) ～ (d) の順に，標準偏差が小さくなる傾向にあり，0.2 までは塑性率の低い結果も多くばらつきが大きいが，0.3 になると少なくなり，値も集中しやすくなった。変動係数 5% の結果は 10% の結果よりも集中した分布型となった。しかし，10% の分布を縦に引き伸ばした形に近く，正規分布とは異なる分布を示した。

図- 6 に変動係数 10% で強度をばらつかせた時の 2，3 階の塑性率の分布を示す。2，3 階としたのは，1 階の次に損傷が大きかったからである。実線及び破線はばらつきのないモデルの 2 階の値，3 階の値である。

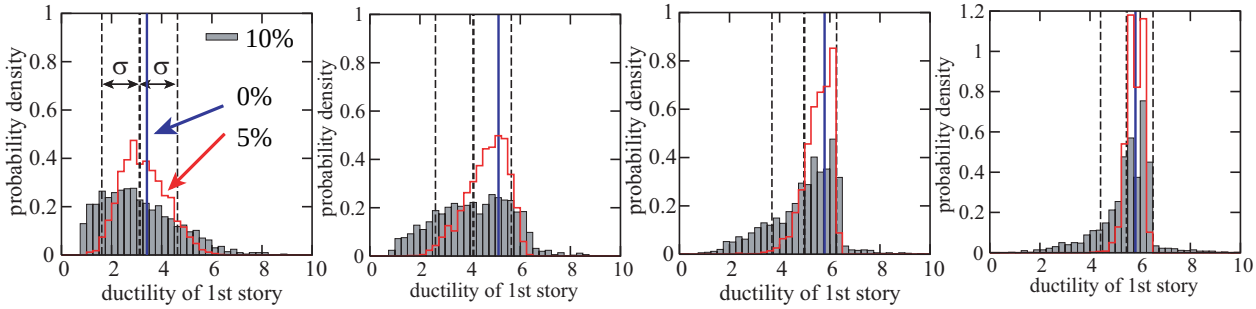
(a) ～ (d) いずれのモデルも，ばらつきのないモデルよりも高い塑性率となるモデルが多く見られた。特に (b) ～ (d) では，変動係数 10% でばらつかせると大きく変形し，ばらつきのないモデルの 5 倍程度の塑性率となるケースが見られた。

次に，累積塑性エネルギーの集中度合いを評価した。図- 7 に 1 階の W_{p1}/W_p の分布を示す。(a) ～ (d) は塑性率と同様である。塑性率の分布の変化に対応して，W_{p1}/W_p の分布も強度差が大きくなるにつれて分布の尖端が右にシフトしている。しかし，変動係数が 5% の時の分布が塑性率の分布に比べて，10% の分布に近くなっている。また，(d) ではほとんどのモデルが 1 階に集中するが，W_{p1}/W_p が 1 となるモデルはない。これは，1 階に変形が集中し他階の変形が小さい場合にも，他階でコンクリートのひび割れによる累積エネルギー消費があるために，1 階に全累積塑性エネルギーが集中しづらいからである。

図- 8 に 2.3 階の W_{pi}/W_p の分布を示す。塑性率同様の傾向を示し，ばらつきのないモデルの値を大きく上回るモデルが多くあった。

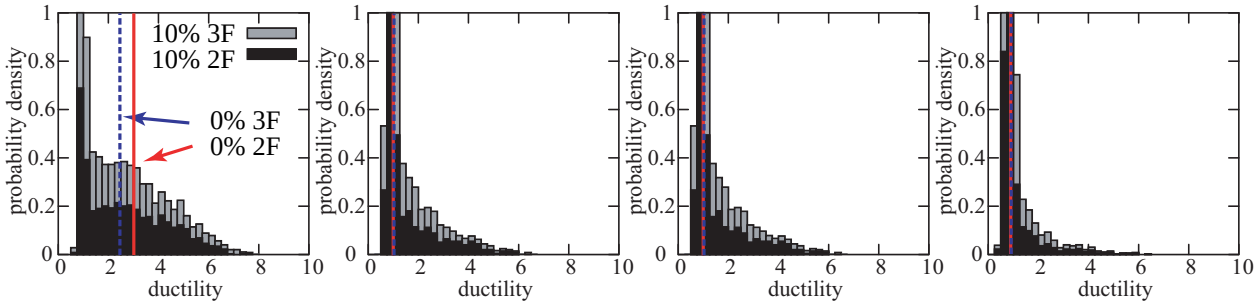
3.3 ばらつきの比較

変動係数 10% で強度をばらつかせた時の f_i の変化に対する，1 階の塑性率，W_{p1}/W_p の分布の



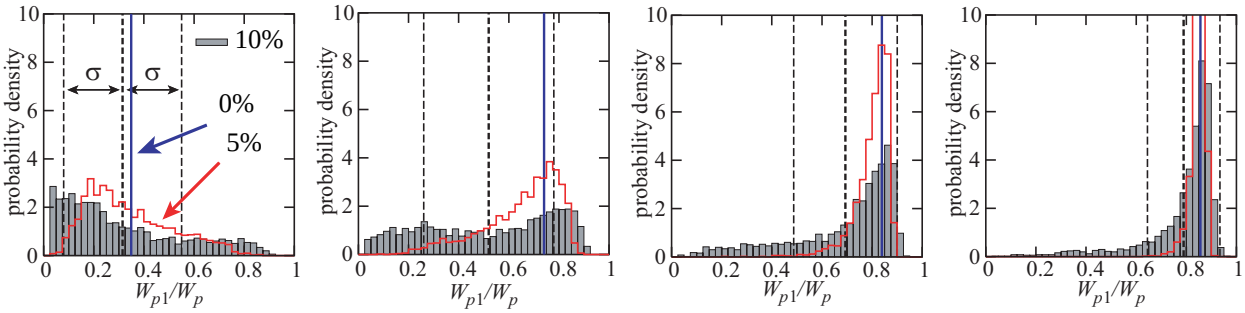
(a) f_i=0　(b) f_i=0.1　(c) f_i=0.2　(d) f_i=0.3

図- 5 1 階の塑性率



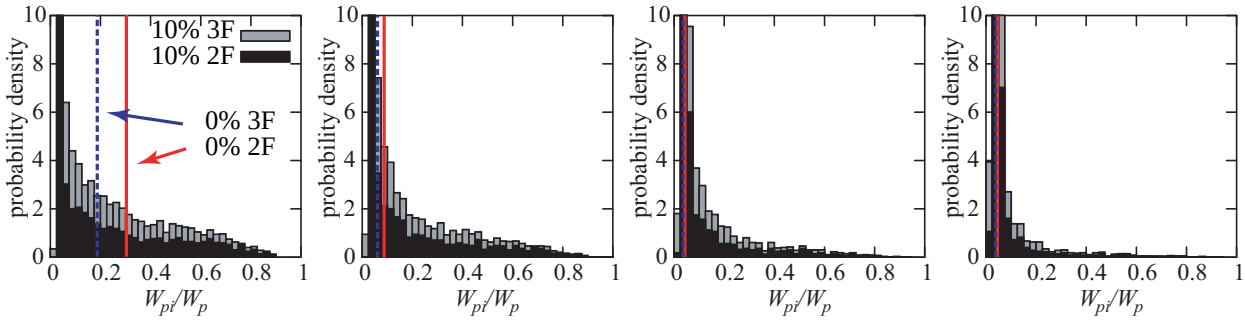
(a) f_i=0　(b) f_i=0.1　(c) f_i=0.2　(d) f_i=0.3

図- 6 2，3 階の塑性率



(a) f_i=0　(b) f_i=0.1　(c) f_i=0.2　(d) f_i=0.3

図- 7　1 階の W_{pi}/W_p



(a) f_i=0　(b) f_i=0.1　(c) f_i=0.2　(d) f_i=0.3

図- 8　2，3 階の W_{pi}/W_p

ばらつきを比較する。図 -9 にこれらの変動係数の値を示す。

塑性率，W_{p1}/W_p どちらも強度の変動係数を上回っており，応答のばらつきが強度のばらつきより大きいことがわかる。f_i の増加に対し，塑性率は f_i が 0.3 までは減少するが 0.4，0.5 になるとわずかに増加するが，ほぼ一定の値をとる。W_{p1}/W_p は常に減少するが，変化幅は次第に小さくなり，0.3 を超えると塑性率同様あまり変化しない。W_{p1}/W_p の方が塑性率よりも変化の幅が大きい。

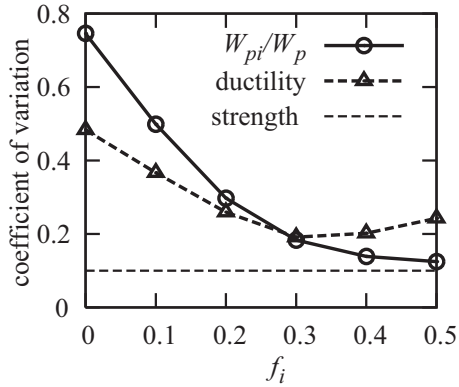
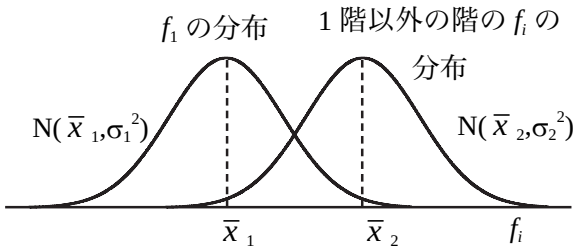


図 -9　1 階の変動係数の比較

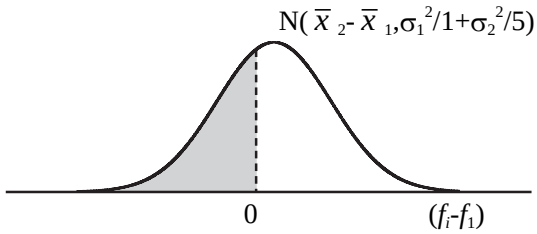
3.4 危険率

本研究では，強度差があると判定された建物を対象としている。しかし，強度が図- 3 に示されるようなばらつきをもつために，判定された強度差が逆転することがあり得る。このため，図- 6，図- 8 で見られるような弱点階以外の階の大きな変形や累積塑性エネルギー消費が見られると考えられる。

弱点階と弱点階以外の階の強度差が逆転する確率と，応答変形の関係を検討するため，この確率を定義する。図- 10(a) のように，弱点階の強度が $N(\bar{x}_1,\sigma_1^2)$ の正規分布に従い，弱点階以外の階の強度が $N(\bar{x}_2,\sigma_2^2)$ の正規分布に従う。



(a)　弱点階と弱点階以外の階の母集団



(b)　(f_i-f_1) の母集団

図- 10 強度の危険率

各々の母集団から f_1，1 階以外の階の f_i を標本として抽出した場合，f_1, f_i は独立であるため，$(f_i\text{-}f_1)$ の分布は図- 10(b) のような正規分布 $N(\bar{x}_2\text{-}\bar{x}_1, \sigma_1^2/1+\sigma_2^2/5)$ となる。強度差が逆転し $(f_i\text{-}f_1)<0$ となる確率，図- 10(b) の網掛け部分をとる確率を強度の危険率とする。

3.5 強度の危険率と応答変形

弱点階以外の階の応答変形と強度の危険率の関係を評価する。2 ～ 6 階のいずれかの階が，ある応答塑性率 μ 以上の値をとる確率を到達率とした時，図- 11 に到達率と強度の危険率について示す。(a) に f_i による変化，(b) に到達率と強度の危険率の関係を示す。塑性率は 1，1.5，2 の 3 種を比較した。変動係数 10% の解析の結果を用いた。

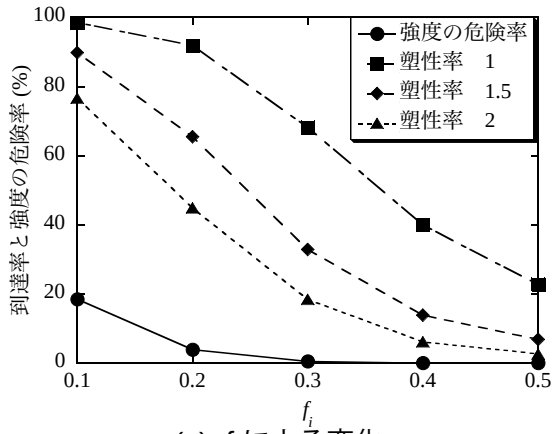
図- 11(a) では，f_i の増加に伴い，危険率，到達率共に減少している。強度の危険率と到達率の間には相関性があることがわかる。f_i が 0.1 の時は強度の危険率が 20% 程度であるのに対し，塑性率が 2 以上の階も半数以上ある。f_i が 0.3 の時に危険率がほぼ 0% となるが，20% 程度が塑性率 2 以上である。強度差が 0.5 になると，塑性率 2 以上の階はほぼなくなるが，20% が降伏に至る。

図- 11(b) では，危険率が 5% 以下の範囲で急激にどの到達率も上昇している。

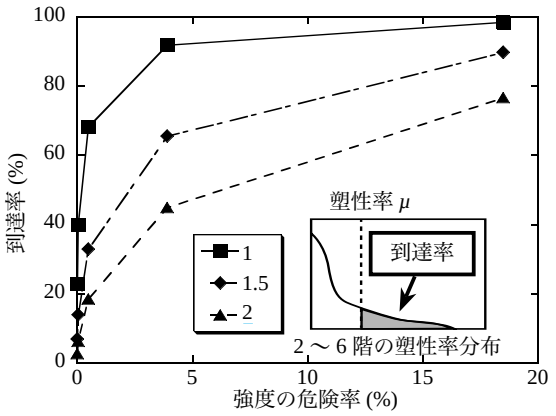
3.6 応答塑性率における危険率

1 階と 2 ～ 6 階の間で，設定強度に逆転が起きたように，応答変形にも逆転が起きているため，2 つの現象の起こる確率を比較する。強度の危険率と同様に 2 ～ 6 階のいずれかの階が，1 階の応答塑性率を上回る確率を，応答塑性率の危険率とした時，図- 12 に強度と応答塑性率の危険率について示す。(a) に f_i の差の変化に対する変化，(b) に 2 つの危険率の関係を示す。変動係数 10% と 5% の解析結果を用いた。

強度の危険率が減少するにつれて，応答塑性率の危険率も減少する。f_i が 0.1 の時は応答塑性

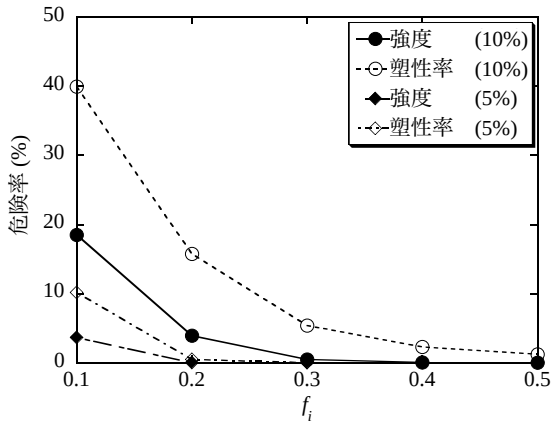


(a) f_i による変化

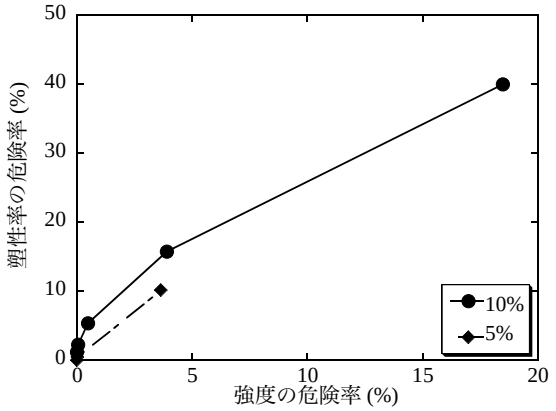


(b) 到達率と危険率の関係

図- 11 到達率と危険率 (変動係数 10%)



(a) f_i による変化



(b) 強度の危険率と応答塑性率の危険率の関係

図- 12 強度と応答塑性率の危険率

率の危険率が非常に高い。図- 11(a) の f_i が 0.1 での到達率も高かったことにも対応している。変動係数が 10% の場合は応答塑性率の危険率が高い値を示しており，f_i が 0.5 の時もわずかに上回る場合がある。変動係数 5% の場合は強度，塑性率ともに f_i が 0.2 で逆転しなくなる。

図- 12(b) では，変動係数の値に関わらず，強度の危険率よりも大きな確率で応答変形に逆転が起きている。以上のことから，実際の既存 RC 建物の耐震診断で 1 階の強度より 2 ～ 6 階の強度が高いと判定された場合，ばらつきの影響により，強度差が逆転する確率より高い確率で 2 ～ 6 階の変形が 1 階の変形を上回ることがあり得る。変動係数 10% で強度をばらつかせた場合，f_i が 0.3 程度では 8% の確率で，弱点階よりも大きな変形となる。

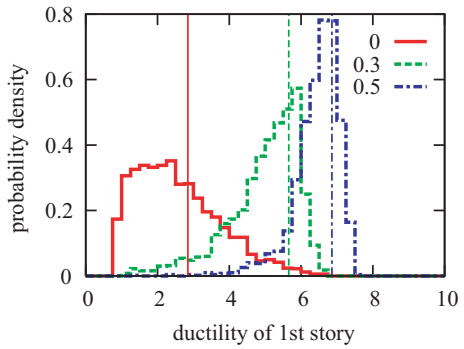
3.7 地震波の性質の影響

地震波の特性によって塑性率の分布形状に変化があるかどうかを検討した。変動係数 10% のモデルで jma を用いて解析を行った。図- 13(a) に解析結果として，2 ～ 6 階の f_i が 0，0.3，0.5 の時の 1 階の塑性率分布を示す。比較として (b) に hach の結果を示す。細い線はばらつきのないモデルの値を示す。図- 13(a) は f_i の増加に伴い塑性率が大きくなっているが，図- 13(b) は 0.3 と 0.5 が同じ程度の塑性率である。強度がばらつくことで建物の周期が変化し，地震波のスペクトル特性の影響を受け (a)，(b) の塑性率分布が異なったと考えられる。

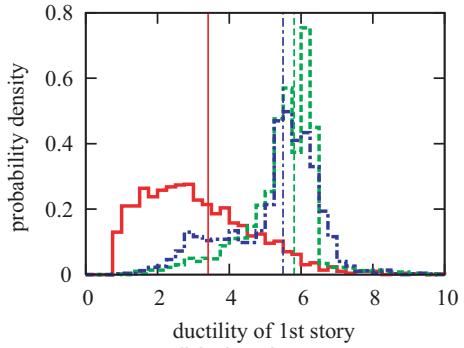
4. まとめ

本研究では，1 階の強度指標が他階より低い 6 階建て RC 建物モデルを用い，強度を変動係数 10% の正規乱数でばらつかせ，地震応答解析を行うことによって以下の結論を得た。

1. 1 階の塑性率や累積塑性エネルギー分布が正規分布とは異なる分布を示した。平均値はばらつきのないモデルの塑性率を下回った。，2 ～ 6 階の強度指標が高くなるほど，分布の変動係数は小さくなる。2～6階の強度指標が1.3 倍となると，変動係数がほぼ一定となる。
2. 1 階以外の階の塑性率，累積塑性エネルギーが，ばらつかないと仮定したときの値を大きく上回ることがあり得る。強度指標が 1 階の 1.5 倍あっても，20% の建物が降伏した。
3. 2 ～ 6 階の強度が 1 階の強度を上回る確率より高い確率で，2 ～ 6 階が 1 階の応答塑性率を上回った。他階の強度指標が 1.3 倍あっても，8% の確率で上回った。



(a) jma



(b) hach

図- 13 塑性率分布

参考文献

1) 桑村仁，佐々木道夫，加藤勉：降伏耐力のばらつきを考慮した全体崩壊メカニズム骨組の設計，日本建築学会構造系論文集，No.401，pp151-162，1989.7

2) 森口英樹，中埜良昭，藤原薫：部材強度のばらつきを考慮した柱梁耐力比と柱ヒンジ発生確率，日本建築学会構造系論文集，No.509，pp119-126，1998.7

3) 市之瀬敏勝，梅村恒，籠端英仲，ディン　ヴァン　トゥアト：鉄筋コンクリート建物の耐震診断における形状指標，日本建築学会構造系論文集，No.560，pp155-160，2002.10