

# 論文 RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきを考慮した保証設計に関する一考察

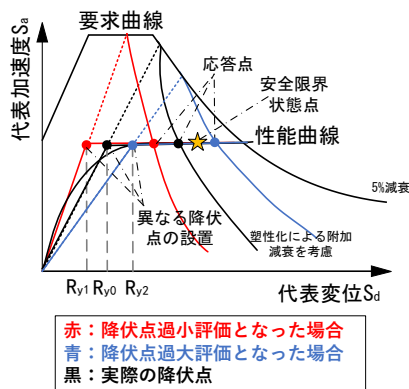
王 澤霖\*1・楠 浩一\*2・毎田 悠承\*3

**要旨：**等価線形化法を用いた RC 造建物の性能評価では、塑性率の基点となる降伏点変形を精度良く算出する必要がある。これまでの研究で、筆者らは RC 造部材の降伏点変形の計算式を提案し、計算値のばらつきが建物の性能評価に与える影響を検討した。本論文では、RC 造建物における柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに対する安全率を考慮する保証設計変形を設定するように検討を行った。その結果、筆者らが提案した柱梁部材の降伏点変形の計算式により、算出された建物の性能曲線における降伏点変形の 1.5 倍となる変形を保証設計用の降伏点変形とすれば十分な余裕があることを検証した。

**キーワード：**降伏点変形, ばらつき, 保証設計, 等価線形化法

## 1. はじめに

等価線形化法を用いた RC 造建物の耐震性能の評価では、建物の主要な振動モードを取り出し、1 質点系に縮約された性能曲線と、地震力に関する要求曲線の 2 つの曲線から得られた安全限界時応答点が、建物の安全限界状態点を下回ることを確認する必要がある<sup>1)</sup>。大地震時、**図-1** に示すように、性能曲線における降伏点の推定精度は地震応答の精度に大きな影響を与える。



**図-1** 等価線形化法における設定降伏点と応答点

建物の性能曲線は、一般的に建物の増分解析結果から得られた層せん断力-変形関係より算出されるため、層せん断力-層間変形関係を左右する部材の復元力特性の評価は重要である。筆者らは、RC 造柱梁部材の復元力モデルを評価する際に必要な降伏点変形の計算式を提案し、柱梁部材の実験データベースを用いてその妥当性および精度について検証し、提案式による計算値は常に実験値(真値)と完全に一致せずばらつきがあることを示した<sup>2)</sup>。加えて、5 層 RC 造試験体の震動台実験<sup>3)</sup>と静的増分

解析結果から、部材の降伏点変形角の計算値のばらつきが、性能曲線から得られた降伏点変形に与える影響についても検討を行った<sup>4)5)6)</sup>。

一方、現行の等価線形化法<sup>7)</sup>では、設計用地震動、架構と部材の解析モデルと限界値、算出される応答値のばらつきを考慮して、建物の性能曲線における応答点までの履歴消費エネルギーを 1.5 倍とした変形を保証設計変形として設計を行うものとしているが、部材の解析モデルにおいては、降伏点変形角のばらつきが考慮されていないのが現状である。

そこで、本論文では、RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに対する安全率を考慮した保証設計変形を設定することを目的とし、RC 造柱梁部材の復元力と性能曲線の関係より、柱梁部材の降伏点変形角のばらつきが性能曲線における降伏点変形に与える影響と保証設計の考え方について検討を行った。

## 2. 部材の降伏点変形角のばらつきを考慮した保証設計の考え方

大地震時に RC 造建物の非線形状態を想定して応答点を算定する際、塑性化による付加減衰を考慮し要求曲線を低減することによって応答点を低減する(**図-1**)。要求曲線の低減率は、国交省告示 1457 号第 9 においては、式(1)に定める応答低減係数  $F_h$  で評価される。

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

ここで、 $h$ : 建物の等価減衰定数で、同告示により式(2)で求められる。

$$h = 0.25(1 - 1/\sqrt{\mu}) + 0.05 \quad (2)$$

ここで、 $\mu$ : 塑性率 (応答変形/降伏変形) である。

性能曲線における降伏点変形の計算値が実際より小さ

\*1 東京大学大学院 工学系研究科建築学専攻 大学院生 修士 (工学) (学生会員)

\*2 東京大学 地震研究所 教授 博士 (工学) (正会員)

\*3 東京大学 地震研究所 准教授 博士 (工学) (正会員)

くなる場合は、非線形化後の塑性率を大きく見込むことになる。その結果、式(2)による RC 造建物の減衰定数  $h$  が大きくなり、応答低減係数  $F_h$  も小さくなって応答点変形を小さく見込むことになる。文献 1)には、建物の安全性を確認する際、応答点変形が安全限界状態の変形を下回ることを確認することが示されている。降伏点変形の計算値が実際より小さくなる場合には、建物に要求される変形性能も小さくなるため、危険側の評価になるものと考えられる。そこで、図-2 に示すように、過小評価された降伏点変形を実験値と比較し、計算で得られた降伏点変形を  $p$  倍して補正することで、安全側の評価とする必要がある。この考えに基づき、RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに対して必要となる安全率を考慮した保証設計用の降伏点変形の補正係数  $p$  について検討を行う。

### 3. 部材の降伏点変形角のばらつきと建物の性能曲線における降伏点変形のばらつきの関係

#### 3.1 部材の降伏剛性と建物性能曲線における降伏剛性の関係<sup>6)</sup>

等価線形化法より、建物を等価 1 質点系に縮約して図-3 に示す性能曲線を求める際に、必要な代表加速度  ${}_1S_{a,y}$  および代表変位  ${}_1S_{d,y}$  は式(3)で算出される。

$${}_1S_a = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1\delta_i^2}{\left(\sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1\delta_i\right)^2} \cdot {}_1Q_B, \quad {}_1S_d = \frac{\sum_{i=1}^N m_i \cdot {}_1\delta_i^2}{\sum_{i=1}^N {}_1P_i \cdot {}_1\delta_i} \cdot {}_1S_a \quad (3)$$

ここで、 $m_i$ :  $i$  層の質量、 ${}_1\delta_i$ :  $i$  層の地表からの相対変位、 ${}_1P_i$ :  $i$  層の外力である。

建物の性能曲線における降伏剛性  ${}_1K_y$  (割線剛性) は式(4)に示すように、降伏点の代表加速度  ${}_1S_{a,y}$  および降伏点の代表変位  ${}_1S_{d,y}$  で表される。

$${}_1K_y = \frac{{}_1S_{a,y}}{{}_1S_{d,y}} = \frac{\{\varphi_1\}^T [K_y] \{\varphi_1\}}{\{\varphi_1\}^T [M] \{\varphi_1\}} \quad (4)$$

ここで、 $\{\varphi_1\}$ : 一次固有ベクトル、 $[K_y]$ : 降伏時の等価剛性マトリクス、 $[M]$ : 質量マトリクスである。なお、本研究では降伏点の代表加速度  ${}_1S_{a,y}$  のばらつきを無視して一定であると仮定し、柱梁部材の降伏点変形角の計算値のばらつきが性能曲線から得られた降伏点の降伏剛性お

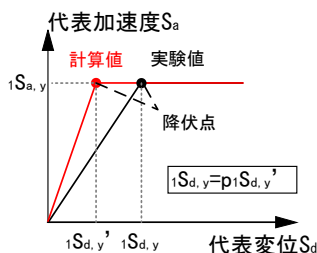


図-2 保証設計に用いる降伏点変形の補正係数

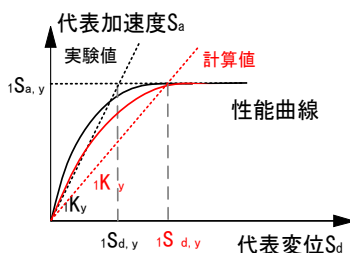


図-3 性能曲線における降伏点変形および剛性

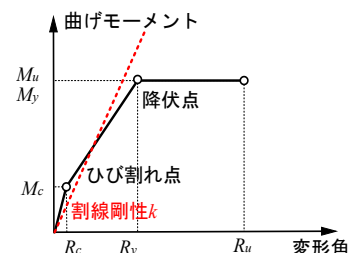


図-4 建物が降伏した時の部材の割線剛性

よび変形に与える影響を検討する。部材の降伏点変形角を計算した時のばらつきを考慮して建物の剛性マトリクス  $[K_y']$  より、降伏剛性の計算値  ${}_1K_y'$  (図-3 中の赤破線) と降伏剛性の実験値  ${}_1K_y$  (図-3 中の黒破線) の比  $\xi$  は、式(5)で表すことができる。

$$\xi = \frac{{}_1K_y'}{{}_1K_y} = \frac{\{\varphi_1\}^T [K_y'] \{\varphi_1\}}{\{\varphi_1\}^T [K_y] \{\varphi_1\}} = \frac{K'_{s1} \varphi_{1,1}^2 + \sum_{i=2}^N K'_{si} (\varphi_{1,i} - \varphi_{1,i-1})^2}{K_{s1} \varphi_{1,1}^2 + \sum_{i=2}^N K_{si} (\varphi_{1,i} - \varphi_{1,i-1})^2} \quad (5)$$

ここで、 $K_{si}$ : 層間剛性の実験値、 $K'_{si}$ : 層間剛性の計算値、 $\varphi_{1,i}$  は 1 次モードにおける  $i$  層の数値である。

また、 $i$  層の層間剛性  $K_{si}$  は、 $i$  層の各部材の剛性  $k_i$  から文献 7) に示されている方法により式(6)を用いて近似的に計算できる。

$$K_{si} = \frac{24}{H^2} \left( \frac{1 + C_s}{\frac{2}{\sum k_c} + \frac{1}{\eta_i \sum k_{bt}} + \frac{1}{\eta_b \sum k_{bb}}} \right) \quad (6)$$

ここで、 $C_s$ : 柱梁部材の剛性に関する修正係数、 $\eta_i$ ,  $\eta_b$ : 層高さに関する修正係数、 $\sum k_c$ : 建物が降伏した時の  $i$  層の柱の剛性の合計、 $\sum k_{bt}$ : 建物が降伏した時の  $i$  層の梁の剛性の合計、 $\sum k_{bb}$ : 建物が降伏した時の  $i-1$  層の梁の剛性の合計である。

なお、層間剛性の計算値  $K'_{si}$  は、柱・梁部材の降伏点変形角の計算値による建物降伏時の各部材の剛性  $k_c'$ ,  $k_{bt}'$ ,  $k_{bb}'$  を式(6)に代入することで算出できる。建物が降伏した時、建物の各部材はひび割れ点に達していない部材、ひび割れ点と降伏点の間の状態にある部材、降伏した部材の 3 種類に分類できるため、ここで、部材の復元力モデルを三折れ線モデルとした場合には、柱、梁部材の剛性  $k_c$ ,  $k_{bt}$ ,  $k_{bb}$  は図-4 に示す割線剛性 (原点と荷重一変形曲線におけるある状態の点を結んだ線、図中の赤破線) とする。

式(5)および式(6)を用いて、部材の降伏剛性の計算値が建物の性能曲線における降伏剛性に与える影響を求める。

#### 3.2 部材の降伏点変形角のばらつきを考慮した性能曲線における降伏点変形のばらつき

RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきを考慮する際に、実際の施工などの状況を想定して、1 つの建物に対して、同じような部材および材料となるので、全ての柱梁部材の降伏点変形角のばらつきは同時に過大あるい

は過小評価となる可能性が高いと考えられる。そのため、本検討では、以下の3つのケースを想定して検討する。ここで、ばらつきは計算値と実験値の比として表す。(1) 全ての柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比は同じ値となるケース。(2) 各層における全ての柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比は各層で異なるケース。(3) 柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比はそれぞれ異なるケースである。図-5にこの3つのケースを概念図で示す。図中、色の濃さにより、計算値と実験値の比の大きさを表している。

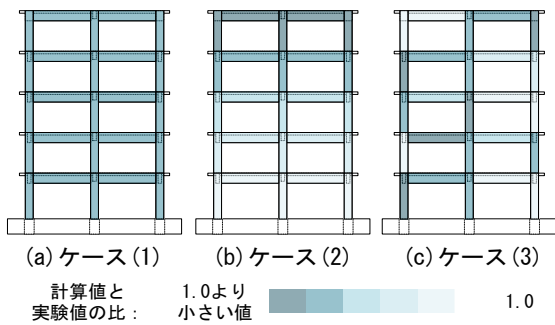
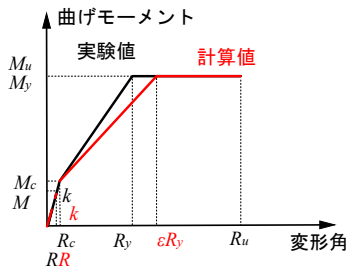


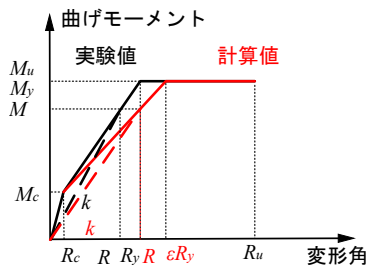
図-5 降伏点変形のばらつきを有する部材の位置

ケース(1)に関する検討は、文献(6)に理論的に分析する方法が提示されている。3.1節の検討に基づき、式(6)を用いて建物が降伏時の各部材の剛性で層間剛性  $K_{si}$  を算定する際に、必要な割線剛性  $k$  は各部材が負担している曲げモーメント  $M$  および  $M$  によって生じる変形角  $R$  から算出されるため、部材の降伏点変形角が変化するとき、 $k$  も変化することとなる。そこで、建物が降伏した時、柱梁部材の降伏点変形角を計算値とした時の部材の剛性  $k'$  と実験値とした時の剛性  $k$  の比を、 $\gamma = k'/k$  で表し、ひび割れ点に達していない部材、ひび割れ点と降伏点の間に状態にある部材、降伏した部材の3種類の場合について  $\gamma$  をそれぞれ検討した(図-6)。その際、各節点に集まる部材の剛比はほぼ変わらないことで、各部材が負担している曲げモーメントについても大きな差がないものと仮定した。

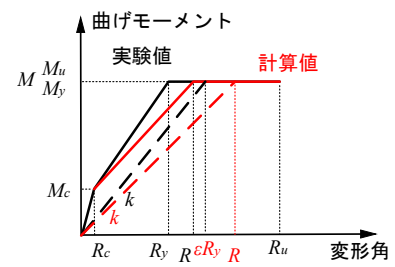
(1) ひび割れ点に達していない部材：



(a) ひび割れ点に達していない部材



(b) ひび割れ点と降伏点の間に状態にある部材



(c) 降伏した部材

— 復元力モデル (実験) — 復元力モデル (計算) - - 割線剛性 (実験) - - 割線剛性 (計算)

図-6 建物が降伏した時の部材の割線剛性の算定モデル<sup>6)</sup>

図-6(a)に示すように、部材の初期剛性のばらつきを考慮していないため、降伏点変形角の変化は対象部材の剛性に影響しない。各部材の降伏点変形角の計算値による剛性と実験値による剛性の比  $\gamma$  は式(7a)によって計算される。

$$\gamma = k'/k = 1.0 \quad (7a)$$

(2) ひび割れ点と降伏点の間に状態にある部材：

図-6(b)に示すように、 $\gamma$  は式(7b)で計算される。

$$\gamma = \frac{k'}{k} = \frac{M/R'}{M/R} = \frac{R}{R'} = \mu / (\mu + (\varepsilon - 1) \cdot \frac{\mu - R_c/R_y}{1 - R_c/R_y}) \quad (7b)$$

ここで、 $\varepsilon$ ：部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比 ( $=R_y'/R_y$ )、 $\mu$ ：建物が降伏した時の柱梁部材の塑性率である。建物が降伏する時、塑性率  $\mu=1.0$  の柱梁部材の場合には、 $\gamma=1/\varepsilon$  となる。

(3) 降伏した部材：

図-6(c)に示すように、 $\gamma$  は式(7c)で計算される。

$$\gamma = k'/k = 1/\varepsilon \quad (7c)$$

ケース(1)において、全てのRC造柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比が同じ値  $\varepsilon_1$  をとるとすると、式(7)で計算された各RC造柱梁部材の  $\gamma_{1,ij}$  ( $i$ ：層数、 $j$ ：部材の番号) は式(8)で表される。

$$\gamma_{1,ij} \leq 1/\varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 < 1) \quad 1/\varepsilon_1 \leq \gamma_{1,ij} \quad (\varepsilon_1 > 1) \quad (8)$$

式(8)を式(6)に代入すると、 $i$ 層の層間剛性の計算値  $K'_{1,si}$  と実験値  $K_{1,si}$  の比は式(9)で表される。

$$\begin{aligned} K'_{1,si}/K_{1,si} < \gamma_{1,i,max} &\leq 1/\varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 < 1) \\ 1/\varepsilon_1 &\leq \gamma_{1,i,min} < K'_{1,si}/K_{1,si} \quad (\varepsilon_1 > 1) \end{aligned} \quad (9)$$

式(9)と式(5)より、降伏剛性の計算値  ${}_iK_{1,y}'$  と実験値  ${}_iK_{1,y}$  の比  $\xi_1$  は式(10)で表される。

$$\begin{aligned} \xi_1 < (K'_{1,si}/K_{1,si})_{max} &< \gamma_{1,max} \leq 1/\varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 < 1) \\ 1/\varepsilon_1 &\leq \gamma_{1,min} < (K'_{1,si}/K_{1,si})_{min} < \xi_1 \quad (\varepsilon_1 > 1) \end{aligned} \quad (10)$$

性能曲線における降伏点変形角と降伏剛性の関係より、ケース(1)において、全ての柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比が同じ値  $\varepsilon_1$  をとるとすると、性能曲線における降伏点変形の計算値/実験値 ( $1/\xi_1$ ) はより小さくなり、その結果は式(11)で表される<sup>6)</sup>。

$$\varepsilon_1 < 1/\xi_1 \quad (\varepsilon_1 < 1) \quad 1/\xi_1 < \varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 > 1) \quad (11)$$

ケース(2)に対して、各層において、全ての柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比は同じ値である。ここで、層間剛性は急変する場合、全体崩壊形とならず層崩壊のメカニズムに至る可能性があり、本検討対象外となり、層間剛性は急変していないことと仮定した。この時、各層の柱梁部材が負担している曲げモーメントについても大きな差がないことが想定できる。このことから、式(7)を用いて建物が降伏時、部材の降伏点変形角を計算値とした時の部材の剛性  $k'$  と実験値とした時の剛性  $k$  の比は式(7)により計算できるものと考えられる。この時、 $N$  層建物の  $i$  層における各柱梁部材の降伏点変形角の計算値と実験値の比は  $\varepsilon_{2,i}$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) である。式(8)~式(11)の分析と同様に、ケース(2)に対して、柱梁部材の降伏点変形角を計算値および実験値とした場合、性能曲線における降伏点変形の計算値/実験値 ( $1/\xi_2$ ) は式(12)に示す関係を有する。

$$\varepsilon_{2,min} < 1/\xi_2 \ (\varepsilon_{2,i} < 1) \quad 1/\xi_2 < \varepsilon_{2,max} \ (\varepsilon_{2,i} > 1) \quad (12)$$

また、ケース(1)と(2)の比較において、柱梁部材の降伏点変形角の計算値が過小評価となる場合、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{2,min}$  の時、 $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{2,i}$  ( $i=1,2,\dots,N$ ) となることから、式(7)より、各 RC 造柱梁部材に対する  $\gamma_{1,ij}$  と  $\gamma_{2,ij}$  は式(14)で表される。

$$\gamma_{2,ij} \leq \gamma_{1,ij} \quad (14)$$

層間降伏剛性の比  $K_{2,si}'/K_{1,si}$  と  $K_{2,si}'/K_{2,si}$  は式(6)と式(14)より式(15)で表される。

$$K_{2,si}'/K_{2,si} < K_{1,si}'/K_{1,si} \quad (15)$$

式(15)を式(5)に代入すると、 $1/\xi_1$  は  $1/\xi_2$  の関係は式(16a)で表される。

$$1/\xi_1 < 1/\xi_2 \quad (16a)$$

柱梁部材の降伏点変形角の計算値が過大評価となる場合、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{2,max}$  の時、 $1/\xi_1$  と  $1/\xi_2$  の関係は式(16b)で表される。

$$1/\xi_2 < 1/\xi_1 \quad (16b)$$

一方、2 節で示した保証設計の考え方にに基づき、性能曲線において過小評価となる降伏点変形に対する補正係数  $p$  は式(5)を用いて式(17)で表される。

$$p = {}_1S_{d,y} / {}_1S'_{d,y} = \xi \geq \xi_{max} \quad (17)$$

式(16a)と式(17)より、RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきをケース(1)に対して安全側となるように補正すると、ケース(2)についても安全側の評価を与えることが分かる。

ケース(3)では、各柱梁部材の降伏点変形角の計算値/実験値はばらついているため、柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに応じて、各柱梁部材の剛性もばらついており、ケース(1)、(2)の場合と違って、各節点に集まる各部材の剛性の比は大きく変化するため、上記の方法は適用できないものと考えられる。次節ではケース(3)に対するばらつきを考慮した解析について述べる。

## 4. 震動台実験による検証

### 4.1 架構解析モデルの概要<sup>4),6)</sup>

3 節で行った検討を検証するため、既往の RC 造 5 層試験体の震動台実験の結果を用いて、OpenSeesPy 3.2.2.6/<sup>7)</sup> OpenSees 3.2.2<sup>8)</sup>を用いて静的増分フレーム解析を行った。紙面の都合上、震動台実験の詳細については文献 3)、解析モデルは文献 4)、6)を参照されたい。以下に試験体における柱梁部材の非線形モデルの概要を述べる。

試験体の各 RC 造柱梁部材では曲げ挙動が卓越するため、曲げバネは、図-7 に示すようなひび割れ点、降伏点、終局点を考慮した三折れ線モデルとした。ここで、降伏点変形角  $R_y$  のみを変数として検討を行った。 $R_y$  については、計算値のばらつきを考慮する際、実験値を基準値とする必要があるが、震動台実験では、各部材の降伏点変形角を実験から得ることができなかったため、解析では、筆者らの提案式<sup>2)</sup>による降伏点変形角  $R_{y0}$  を基準値として、計算値のばらつきに関する係数  $\varepsilon$  を乗じて降伏点変形角  $R_y (= \varepsilon R_{y0})$  を算出した。なお、係数  $\varepsilon$  の決定方法については次節で述べる。降伏点変形角  $R_y$  のばらつきを考慮した解析結果を基準値 ( $\varepsilon=1.0$ ) とし、その結果を比較することによって、降伏点変形角のばらつきが性能曲線に与える影響を検討できる。ひび割れ点  $M_c$  および  $R_c$ 、降伏点  $M_y$ 、終局点  $M_u$  および  $R_u$  の算定方法は文献 4)、6)を参照されたい。

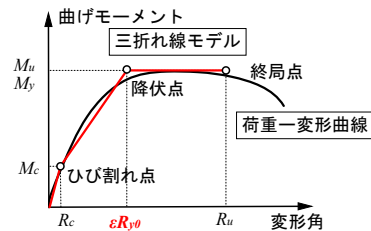
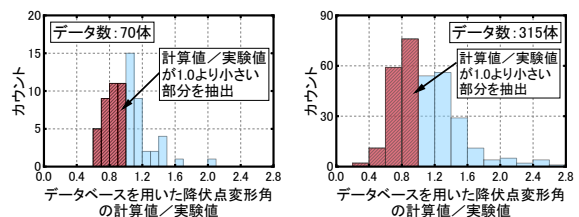


図-7 曲げバネの三折れ線モデル<sup>6)</sup>

### 4.2 部材の降伏点変形角のばらつきを考慮した解析

部材の降伏点変形角のばらつきは、3.2 節に示した 3 つのケースについて解析により検証を行った。ケース(1)では、柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに関する係数  $\varepsilon_1$  は全部材とも 0.6 として検討を行った。ケース(2)では、1 層~5 層において、 $\varepsilon_2$  をそれぞれ 1.0, 0.9, 0.8, 0.7, 0.6 とし



(a)梁部材

(b)柱部材

図-8 データベースを用いた降伏点変形角の算定精度

た。この時、 $\varepsilon_1 = \varepsilon_{2, \min}$  となった。また、ケース(3)では、図-8に示す既往の実験データベース<sup>9)</sup>を用いた部材の降伏点変形角の計算値/実験値の検討結果<sup>2)</sup>のうち、柱梁部材の降伏点変形角の計算値/実験値が1.0より小さい部分を抽出して(図中の赤のヒストグラム)、モンテカルロ法により同分布に従う乱数列を生成し、250体の増分解析を行った。

### 4.3 解析結果・分析

RC造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきを4.2節に示したケース(1)およびケース(2)とした時、静的増分解析から得られた各階の層せん断力-層間変形関係を図-9(a)~(e)に示す。式(3)により等価1質点系に縮約して得られた性能曲線を図-9(f)に示す。同図中には、楠らが提案した性能曲線を三折れ線モデル化する方法<sup>10)</sup>により算出された第2折れ点を降伏点とし、その変形も図中に示している。また、同図に部材の降伏点変形角のばらつきを考慮していない場合( $\varepsilon = 1.0$ )の結果も示している。

図-9(a)~(e)より、1層~5層では、ひび割れ点から剛性が急変する降伏点までの範囲において、ケース(2)とした場合の層せん断力-変形曲線(図中緑破線)はどちらもケース(1)の結果(図中青2点線)とばらつきを考慮していない結果(図中赤1点線)の間にあることが分かる。ケース(2)の場合、1層~5層まで各層に乗じたばらつきに関する係数 $\varepsilon_2$ が1.0から0.6までに徐々に小さくなっており、算出された層せん断力-変形曲線は、ばらつきを考慮していない場合の結果との差は大きくなることが分かった。1層で $\varepsilon_2$ が1.0の場合、式(6)、(7a)より、ケース(2)では、層せん断力-変形曲線はばらつきを考慮していない結果と同じになるはずであるが、図-9(a)より、図中緑破線は図中赤1点線と完全に一致していないことが分かる。これは、2層の層間剛性が1層より相対的に低くなっており、1層における各柱梁部材が負担している曲げモーメントが2層の柱梁部材に対して大きくなり、

剛性も高くなることが原因として考えられる。しかし、層せん断力-変形曲線の大きな差異が認められないことから、この影響は小さいと言える。一方、5層で $\varepsilon_2$ が0.6の場合、ケース(2)では、層せん断力-変形曲線はケース(1)の場合の結果と同一とならないことを示しており、これは、式(6)より、4層の梁の剛性が5層の層間剛性に影響を与えることを意味している。それぞれのケースについて算出した性能曲線の結果(図-9(f))より、ケース(1)、ケース(2)、ばらつきを考慮せずに算出した降伏点変形はそれぞれ3.70cm、5.26cm、5.71cmであり、ケース(2)の場合の性能曲線はケース(1)の結果とばらつきを考慮していない結果の間にあることが分かった。降伏点変形は最も小さいケース(1)に対して安全率を考慮して補正を行うと、他のケースも安全側に評価できることが分かる。これは、3.2節で得られた式(16a)の結果と一致しており、その結果は妥当であると考えられる。

また、RC柱梁部材の降伏点変形角のばらつきを前節で示したケース(3)とした場合、250回の増分解析を行った。得られた性能曲線を同様な方法<sup>9),10)</sup>で三折れ線モデル化して第2折れ点の変形を抽出した。算出された降伏点変形と図-9(f)に示すばらつきを考慮していない( $\varepsilon = 1.0$ )場合の結果(基準値、 $S_{d,y} = 5.71\text{cm}$ )との比較(計算値/基準値)を図-10に示す(図中青のヒストグラム)。同図には、10%、中央値、90%点の箱ひげ図も併せて示す(図中下方のグレーのバー)。4.2節より、ケース(3)では、各部材の降伏点変形角のばらつきはどちらも危険側となる( $\varepsilon < 1.0$ )ため、図-10に示す性能曲線における降伏点変形の計算値/基準値も全て危険側となっている。同図より、90%のデータは降伏点変形角の計算値/基準値が0.69以上となっている。算出された性能曲線における降伏点変形を $1/0.69 = 1.45$ 倍すること(同図中の緑のヒストグラム)で、90%以上のデータは安全側の評価となっているものと考えられる。さらに多くのデータは安全側の

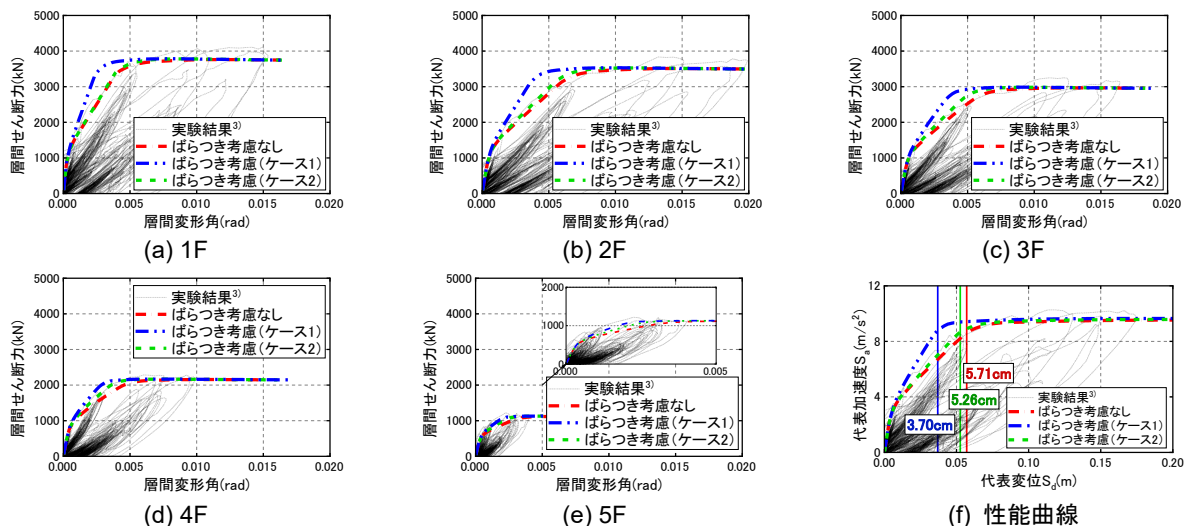


図-9 静的増分解析結果 (ケース(1)およびケース(2))

評価となる場合、より大きい補正係数が採用される必要がある。4.2 節に示したケース(3)におけるばらつきの想定方法および乱数列の生成方法は必ずしも柱梁部材の降伏点変形角の計算値が安全側となるわけではないことから、安全側の評価として性能曲線において降伏点変形を1.45倍としておけば充分余裕があると言える。

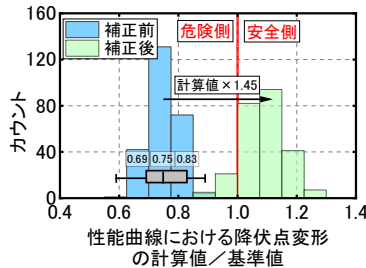


図-10 降伏点変形角のばらつきを考慮した性能曲線における降伏点変形のばらつきとそれに対する補正

### 5. 保証設計用の降伏点変形に対する提案

式(11), (16a), (17)より、性能評価における過小評価された降伏点変形の補正係数  $p$  は式(19)で表される。

$$p > 1/\varepsilon_{min} \quad (19)$$

ここで、 $\varepsilon_{min}$  は既往の部材実験データベースを用いた検討結果<sup>2)</sup>より決定する。表-1 に異なる信頼区間による RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに関する計算値/実験値の分位数を示す(図-8 中青ヒストグラムと同じ分布である)。本検討では、信頼区間 90% の分位数を考慮し、 $\varepsilon_{min}$  を 0.67 とした場合、算出された補正係数  $p$  は 1.5 になる。また、図-10 に示す各柱梁部材の降伏点変形角がばらついた場合の補正係数 1.45 よりも大きくなるのが分かった。そのため、RC 造部材の降伏点変形の算定に筆者らの提案式を用いる場合、計算値のばらつきを考慮して算出された性能曲線における降伏点変形を 1.5 倍とした変形を保証設計用の降伏点変形とする。

表-1 部材実験データベースによる降伏点変形角の計算値/実験値の分位数<sup>2)</sup>

信頼区間	梁部材		柱部材		壁部材	
	$\varepsilon_{min}$	$\varepsilon_{max}$	$\varepsilon_{min}$	$\varepsilon_{max}$	$\varepsilon_{min}$	$\varepsilon_{max}$
95%	0.67	1.44	0.59	1.85	0.59	1.65
90%	0.73	1.32	0.67	1.63	0.67	1.48
85%	0.77	1.25	0.73	1.50	0.72	1.37

### 6. まとめ

本研究では、RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきに対する安全率を考慮した保証設計変形を設定することを目的とし、RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきが、性能曲線における降伏点変形に与える影響を検討した。得られた知見を以下にまとめる。

(1) 性能曲線における降伏点変形の計算値が過小評価となる場合は危険側となるため、RC 造部材の降伏

点変形角のばらつきに対する安全率を考慮した保証設計変形を考慮する必要がある。

- (2) RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきが、建物の性能曲線における降伏点変形に与える影響を柱梁部材の降伏点変形角のばらつきを考慮して、全ての部材の降伏点変形角の変化量が同じものとして比較・検討を行った結果、充分余裕があることが分かった。
- (3) 提案する RC 造柱梁部材の降伏点変形の計算式によって算出された建物の性能曲線における降伏点変形を 1.5 倍とした変形を保証設計用の降伏点変形とすることが妥当であることを示した。

### 謝辞

本研究は、JST 次世代研究者挑戦的研究プログラム JPMJSP2108 の支援を受けて行ったものです。

### 参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の等価線形化に基づく耐震性能評価型設計指針・同解説，2019
- 2) Wang Z., et. al: Estimation and verification of the yield deformation of reinforced concrete members, Engineering Structures, Vol. 249, 113252, Dec. 2021
- 3) 浅井竜也他：RC 造建物の降伏変形評価手法の提案とその震動台実験に基づく検証，日本建築学会構造系論文集，Vol.87, No.795, pp.464-474, 2022.5
- 4) 王澤霖，楠浩一，勅使川原正臣，諏訪田晴彦：RC 造柱梁部材の降伏点変形の推定法が限界耐力計算法への応用に関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.44, No.2, pp.13-18, 2022.7
- 5) 王澤霖他：RC 造建物の振動減衰性状評価方法の検討 その 52，日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），構造IV，pp.407-408, 2022.9
- 6) 王澤霖，楠浩一，毎田悠承：RC 造柱梁部材の降伏点変形角のばらつきが建物の性能曲線における降伏点変形に与える影響，日本地震工学会・大会-2022, Paper No. TS\_20220010, 2022.12
- 7) Schultz AE: Approximating lateral stiffness of stories in elastic frames, Journal of Structural Engineering ASCE, Vol.118, No.2, pp.243-263, 1999
- 8) OpenSeesPy: <https://openseespydoc.readthedocs.io/en/latest/index.html>, (閲覧日：2022年12月1日)
- 9) 向井智久他：建築研究所資料 実験データベースを用いた鉄筋コンクリート造部材の構造特性評価式の検証，建築研究所，No.175, 2016.11
- 10) 楠浩一：加速度記録により求めた R/C 造建物の性能曲線のための外挿法に関する研究，日本建築学会構造系論文集，Vol.84, No.761, pp.961-971, 2019.7