

鋼構造建築物の地震修復性能設計法に関する研究

岩田 善裕¹

¹独立行政法人建築研究所 構造研究グループ (〒305-0802 茨城県つくば市立原一番地)

鋼構造建築物の修復限界に基づく性能設計法の実現に向け、兵庫県南部地震で被災して修復あるいは解体された鋼構造建築物10件の実態調査を基に、技術的および経済的観点から鋼構造建築物の修復限界の分析を行った。分析においては、修復工事のし易さと対応しかつ実測同定が可能である残留変形角を工学的指標として採用し、実績データに基づき鋼構造建築物の修復限界値を推定した。一方、限界値と対をなす応答値については、設計者が指標となる残留変形角の値を応答解析によらず容易に算出できるよう、統計分析に基づく簡便な評価法を考案した。最後に、限界値と応答値の知見を統合し鋼構造建築物の修復性能に関する設計規範を提示した。

キーワード 性能設計、修復限界、鋼構造、残留変形、修復コスト

1. はじめに

平成7年に起きた兵庫県南部地震に代表される近年の大地震における鋼構造建築物の被害では、建物は倒壊を免れ人命は確保されたものの、建築主が予期せぬ形で多額の経済的損失を被らなければならない例が多く見られ、国民の間では従来の建物の使用性・安全性の確保のみならず、修復性にも配慮した設計への関心が高まっている。

建物の修復性は、小規模から大規模な修復で修復可能なもの、修復が不可能で解体を余儀なくされるものなど様々で、その修復コストは建物の修復性が低いほど増大する。なかでも、建物を修復して再使用できるか否かの境界、すなわち建物の修復限界は、建築主にとって最大の関心事の一つである。なぜなら、もし建物が修復不可能で解体を余儀なくされる場合、建築主は建物の建て替えに必要な多額の直接的なコストを要するだけでなく、建物を建て替える長期の工事期間中、建物を全く使用できないことで波及的に失われるビジネス上の利益などの間接的なコストの被害も受けることになるからである。

建物の修復限界は、技術的な観点に加え、経済的な観点とも密接な関係があるため、その設定には、実績データに基づく建物の修復性に関わる変形やコストの検討が不可欠となる。本論では、修復性に配慮した新たな設計プロセスの実現に向け、兵庫県南部地震で被災して修復あるいは解体された鋼構造建築物10件の実績データを基に、建物の修復性に関わる残留変形と修復コストに着目して分析を行い、技術的および経済的観点から鋼構造建築物の修復限界を明らかにすることを試みた。また、性能設計法では、建物の性能はある工学量に基づいて限界

値と応答値を比較することで評価されることから、実務での幅広い適用に向けては、一方の応答値についても、その簡便な評価法が限界値と合わせて提示される必要がある。本論では、修復限界の工学的指標として採用される残留変形角について、設計者がその値を応答解析によらず容易に算出できるよう、簡便な評価法を考案した。最後に、修復限界値と応答評価技術の知見を統合し、鋼構造建築物の修復性能に関する設計規範を提示した。

2. 鋼構造建築物の修復限界の分析

修復限界は実際に被災して修復あるいは解体された建物の実績データを基に定めると信頼性が高い。ここでは、文献¹⁾で実態調査を行った兵庫県南部地震で修復あるいは解体された鋼構造建築物10件のデータ（主に中低層の事務所・店舗、修復建物8件、解体建物2件）に基づき、技術面および経済面の観点から修復限界の分析を行った。

(1) 技術面における修復限界

技術面における修復限界を検討するためには、まず被害建物の損傷実態とそれに対する修復工事の難易度を把握する必要がある。

建物の構造部分（躯体）では、主に柱梁接合部の近傍の各部位における破断・座屈・亀裂・降伏による局所的な損傷実態が数多く見られ、その他に柱脚部、筋かい部などでの損傷実態も確認された。各部位の局所的な損傷に対する修復方法は、基本的なものは既にマニュアル化されており、兵庫県南部地震ではじめて見られた損傷実態に対しても、震災後の僅かな期間で修復対策が講じ

られ、各建物に対し適切な修復処置が施されている¹⁾。従って、構造部分における各部位の局所的な損傷に対する修復工事については、作業量の増加に伴い修復コストは上昇するものの、その難易度は技術面における修復限界を規定するほど難しいものにはならないと推測される。

建物の非構造部分（内・外装の仕上げ、設備など）でも、構造部分と同様に各部位において様々な損傷実態が確認されている。しかし、非構造部分については、建物全体の修復限界を考える上では、各部位の損傷が修復不可能でも取り替えることが可能なので、作業量の増大に伴い修復コストと取り替えコストは上昇するものの、その工事の難易度は技術面で修復限界を規定するほど難しいものにはならないと推測される。

その一方で、損傷実態が構造部分の局所的な損傷や非構造部分の損傷だけに留まらず、これらの部分的な修復では建物が構造上必要な水平耐力を維持できない場合、すなわち、柱が大きな損傷を受けて建物のある層または全体に大きな残留変形が生じるような場合、損傷を受けた層や架構全体をブレースなどで大規模に補強したり、最悪の場合には建物を建て起こす必要が生じてくる。補強による修復は、建物の内・外部における柱間にブレースが追加されることなどにより、その美観性・機能が損なわれる危険性があることは否めないが、とりあえず低下した建物の耐震性を元の状態に回復させることは可能である。しかし、柱の残留変形が大きく補強による修復も不可能な場合には、建て起こし工事を行うことでしか建物の耐震性を回復できないことになる。ところが建て起こしによる修復工事は一般的に非常に難度が高く、建て起こしを必要とする建物は解体される可能性が高くなるのが一般的である。従って、修復工事を実施する際の一般的なレベルでの判断として、建て起こし工事を必要とせず各部位の局所的な損傷に対する修復工事により建物の耐震性を回復できる限界を技術面における修復限界とみなすのが妥当であり、その観点からすれば、残留変形角が技術的な修復限界を規定する重要な指標になり得ると考えられる。

そこで本論では、残留変形角として、建物全体の傾きを表す全体残留変形角と層の最大の傾きを表す最大残留層間変形角に着目し、実績データからこれらの残留変形角を調査することで、技術的な修復限界の設定を行うことを試みた。技術的な修復限界の指標となる全体残留変形角と最大残留層間変形角は、次の式で定義される。

$$\theta_R = \frac{u_R}{H} \quad (1)$$

$$\theta_{\max,r} = \max_{1 \leq i \leq N} \left[\frac{u_r}{h} \right]_i \quad (2)$$

ここで、

θ_R : 全体残留変形角、 $\theta_{\max,r}$: 最大残留層間変形角

u_R : 建物頂部の残留変形、 H : 建物頂部の高さ、

$\left[\frac{u_r}{h} \right]_i$: 第 i 層の残留層間変形角、 u_r : 残留層間変形、

h : 階高、 N : 階数

実績データの全体残留変形角と最大残留層間変形角を算出し、それらの値を大きい順に示したのが表1と表2である。建物FとJは建て起こし工事が断念され解体された物件であるため、これら2物件の値より小さな値の最大値が技術的な修復限界値となる。この条件を満たす建物は、全体残留変形角、最大残留層間変形角ともに、建物Bである。

以上の分析から、鋼構造建築物の全体残留変形角の修復限界値は 1/110、最大残留層間変形角の修復限界値は 1/71 と設定される。

$$\theta_{R,\lim} = \frac{1}{110} \quad (3)$$

$$\theta_{\max,r,\lim} = \frac{1}{71} \quad (4)$$

ここで、

$\theta_{R,\lim}$: 全体残留変形角の修復限界値

$\theta_{\max,r,\lim}$: 最大残留層間変形角の修復限界値

(2) 経済面における修復限界

建物が修復されるか否かは、その建物が技術的に修復可能な場合には最終的にコスト面での判断に基づいて決定されるものと考えられる。そこで本論では、修復コストを建て替えコストで基準化した修復コスト比を経済面における修復限界の指標として定義し、その最大値を調査することで経済面における修復限界の分析を行った。

$$R_c = \frac{C_{\text{repair}}}{C_{\text{replacement}}} \quad (5)$$

ここで、

R_c : 修復コスト比、 C_{repair} : 修復コスト

$C_{\text{replacement}}$: 建て替えコスト（解体費を含む）

表1 全体残留変形角の実測値 (注: 建物Hの実測値は不明、建物FとJは解体物件)

建物	J	F	B	D	A	E	G	I	K
θ_R	1/50	1/100	1/110	1/120	1/216	1/250	1/286	1/416	1/1000

表2 最大残留層間変形角の実測値 (注: 建物Hの実測値は不明、建物FとJは解体物件)

建物	D	J	F	B	G	E	A	I	K
$\theta_{\max,r}$	1/46	1/48	1/48	1/71	1/98	1/100	1/125	1/208	1/1000

兵庫県南部地震で被災した 8 件の修復建物に対して、修復コスト比を算出し、その値を大きい順に示したのが表 3 である。修復コスト比を算出する上での注意点を次に列挙する。

[注意点]

- ・修復コスト：修復費の記録（1995 年）を用いる。
- ・建て替えコスト：新築費については、建設当時の新築費の記録を用いる。この時、過去の新築費を直接用いるのではなく、時点修正により建設当時の新築費を被災時（1995 年）の新築費に換算する。各建物の被災時の新築費は建設当時の新築費に時点修正係数をかけることで求められる。解体費については、1995 年の解体費の相場である 3.3 万円/㎡に各建物の延床面積を乗じて算出する。

鋼構造建築物の修復コスト比の修復限界値は、表 3 の最大値によって設定される。ただし、ここでは、建物 B と建物 D を除外して修復限界値の設定を行う。これは、文献¹⁾の建物別の修復概要に記されるように、建物 B は修復時に内装等の仕上工事を行わない特殊工事条件であったことから、修復コストにこれらの非構造部分の修復コストが含まれていないためである。また、建物 D は最大残留層間変形角が技術面における修復限界を超えており、本来なら建て起こし工事が行われてもおかしくない物件であったことに加え、多くの補強部材の追加により建物の耐震性は回復されているものの、補強に伴い建物内部の意匠・計画面に大きな変更や制約が生じているためである。

表 3 から、修復コスト比の最大値は 0.86（建物 A）で 1 より小さな値となることがわかる。これは、今回の修復建物では、建て替え工事の総費用を超えてまで建物を修復する事例は存在しなかったことを意味している。以上の分析から、鋼構造建築物の修復コスト比の修復限界値は、0.86 と設定される。

$$R_{c,lim} = 0.86 \quad (6)$$

ここで、 $R_{c,lim}$ ：修復コスト比の修復限界値

表 3 修復コスト比（修復建物 8 件）

(*の値は参考値)

建物	A	G	I	E	D*	H	K	B*
R_c	0.86	0.73	0.60	0.55	0.51	0.44	0.18	0.17

3. 実績データの残留変形角と修復コスト比の関係

修復性に配慮した新たな設計プロセスでは、設計者は建物が技術面における修復限界のみならず経済的における修復限界も満たすことを、設計段階であらかじめ確認する必要がある。そのためには、想定される建物の修復コストを前もって設計段階で評価する技術が必要となる。しかし現状では、構造躯体以外の非構造部材や建築設備

の損傷評価を行うことは、損傷に関するデータベースの不足のために非常に困難であり、また、損傷評価に続いて行う損失評価についても、コストに関するデータベースがほとんど整備されていないため、修復コストの評価を正確に行うことは、極めて困難であると言わざるを得ない。そのような状況を鑑み本論では、建物全体の修復コスト比が構造体の損傷度にある程度連動するという推測の基、修復コスト比の算出を行わずに、構造体の損傷度の評価から経済面の修復性評価を行えるよう、構造体の損傷度と修復コスト比の関係の調査を行った。構造体の損傷度としては、累積エネルギーや最大変形などが通常良く用いられるが、これらはコンピュータ解析においてのみ知り得る物理量であり、実際に被害を受けた建物から同定できる物理量ではない。従って、ここでは実績データ利用の観点から同定が可能な残留変形をとりあげ、構造体の損傷度として、全体残留変形角および最大残留層間変形角を採用した。

全体残留変形角と修復コスト比の関係を示したのが図 1 である。図のプロットは修復建物 8 件のうち、残留変形角が不明である建物 H、2 章で記した理由による建物 B と D を除く計 5 件に対するプロットである。図の実線は計 5 件のプロットに対する回帰直線である。プロットと回帰直線の間には多少ばらつきがみられるが、大局的には概ね線型関係にあるとみなすことができる。ばらつきの原因としては、残留変形が構造体の損傷度を表すある程度目安となり得るものの、一方でそれは単に建物の最終被害状態を表すものであり、必ずしも建物全体の損傷と対応するものではないことが一因であると考えられる。回帰直線に基づく修復コスト比の値は、次式で定義される。

$$R_c = 177.48 \cdot \theta_R \quad (7)$$

ここで、

R_c ：回帰直線に基づく修復コスト比の値

θ_R ：全体残留変形角

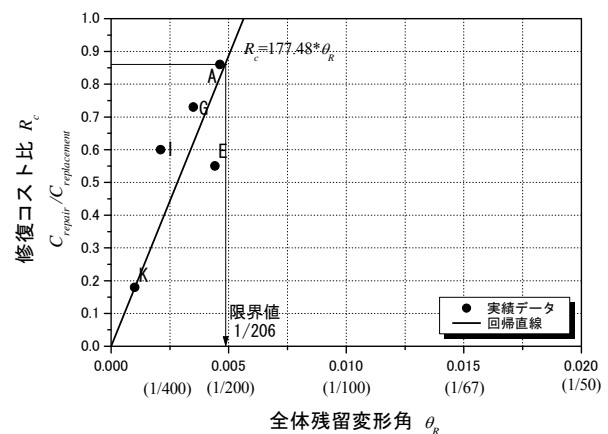


図 1 全体残留変形角と修復コスト比の関係

(7)式から、修復コスト比の修復限界値 (0.86) に対応する全体残留変形角の限界値は、図 1 のように 1/206 となり、この値が経済的要因を考慮した場合の全体残留変形角の修復限界値となる。なお、設計用の修復限界値としては、以下の値を採用することにする。

$$\theta_{R,\text{lim},c} = \frac{1}{200} \quad (8)$$

ここで、

$\theta_{R,\text{lim},c}$: 経済的要因による全体残留変形角の修復限界値

次に、最大残留層間変形角と修復コスト比の関係を示したのが図 2 である。図の実線は計 5 件のプロットに対する回帰直線である。回帰直線に基づく修復コスト比の値は、次式で定義される。

$$R_c = 78.35 \cdot \theta_{\text{max},r} \quad (9)$$

ここで、

R_c : 回帰直線に基づく修復コスト比の値

$\theta_{\text{max},r}$: 最大残留層間変形角

(9)式から、修復コスト比の修復限界値 (0.86) に対応する最大残留層間変形角の修復限界値は、図 2 のように 1/91 となり、この値が経済的要因を考慮した場合の最大残留層間変形角の修復限界値となる。なお、設計用の修復限界値としては、次の値を採用することにする。

$$\theta_{\text{max},r,\text{lim},c} = \frac{1}{90} \quad (10)$$

ここで、

$\theta_{\text{max},r,\text{lim},c}$: 経済的要因による最大残留層間変形角の修復限界値

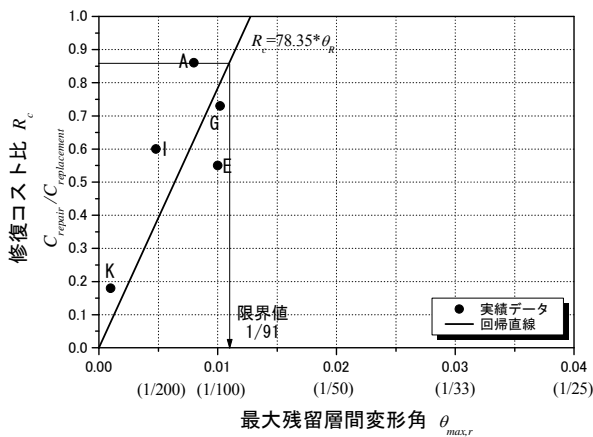


図2 最大残留層間変形角と修復コスト比の関係

4. 残留変形の評価

3章において、鋼構造建築物の修復限界を残留変形角

で定義したことを踏まえ、ここでは、設計者がその値を応答解析などの複雑な手法によらず簡易評価できる手法について、確率論的な視点から検討を行った。

(1) 解析の準備

a) 残留変形率の導入

本研究では、残留変形の確率論的な評価を行うにあたり、次式で定義される残留変形率 R_u を確率変数として導入する。

$$R_u = \pm \frac{u_r}{|u_{r,\text{max}}|} \quad (11)$$

ここで、 $|u_r|$: 残留変形、 $|u_{\text{max}}|$: 上界残留変形である。上界残留変形とは、層の変形が最大に達した地点で弾性除荷を行い、復元力が 0 になる時の変形のこと、残留変形がとりうる上界を表す。

b) 解析モデル

解析モデルには、せん断型の 1 質点系および多質点系モデルを用いる。減衰定数は 2% とし、多質点系の場合は 2% の初期剛性比例型とする。履歴特性は図 3 で示すバイリニア型とする。2 次剛性比 γ と塑性率 μ は以下のように定義される。

$$\gamma = k_2 / k_1 \quad (12)$$

$$\mu = |u_{\text{max}} / u_y| \quad (13)$$

ここで、 k_1 : 1 次剛性、 k_2 : 2 次剛性、 $|u_{\text{max}}|$: 最大変形、 $|u_y|$: 降伏変形である。なお、本研究で用いる 2 次剛性比 γ は 0 以上の値をとるものとする。これは、層が修復限界に至る近傍では、まだ層の急激な耐力劣化は起きないと判断したためである。

(11)式の上界残留変形は、(12)、(13)式を用いて次式で定義される。なお、入力地震動には文献²⁾で示される耐震性能評価用模擬地震動 50 波を用いた。

$$|u_{r,\text{max}}| = (\mu - 1)(1 - \gamma)u_y, \quad \gamma(\mu - 1) < 1 \quad (14a)$$

$$|u_{r,\text{max}}| = (1 - \gamma)u_y / \gamma, \quad \gamma(\mu - 1) \geq 1 \quad (14b)$$

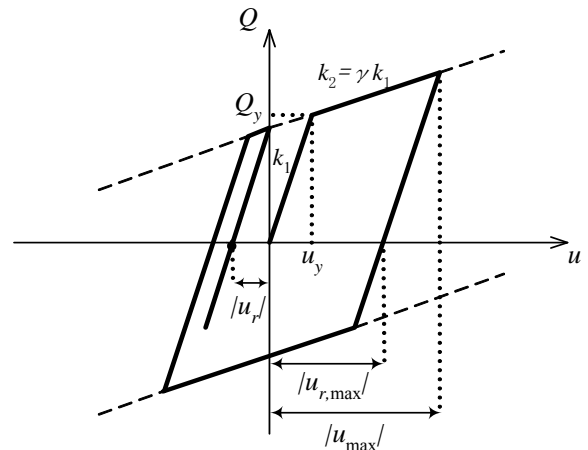


図3 履歴特性および解析諸量の説明図

(2) 残留変形率の評価

a) 残留変形率に関する統計分析

一般的な確率分布では、平均と標準偏差がその分布を規定する上での重要な統計量となる。残留変形率の場合は、(11)式から平均が0となることが自明である。従って、ここでは後者の標準偏差に的を絞り、構造特性や地震動特性をパラメータとした1質点系の応答解析により、残留変形率の標準偏差に及ぼす各種要因の分析を行った。分析因子は、①塑性化の度合、②固有周期、③地震動の位相特性、④2次剛性比の4種で、分析結果は文献²⁾に示されるとおり、①～③が標準偏差 σ の値に及ぼす影響は小さいものの、④の2次剛性比 γ の違いによる影響は大きく、 γ の増大に伴い σ が単調減少することが明らかとなった。

b) 残留変形率の確率分布

a)の結果を踏まえ、ここでは、2次剛性比 γ (0.00, 0.05, 0.10, 0.15, 0.20, 0.25)の6種類ごとに、残留変形率の確率分布を調査した。解析の基本設定は、構造特性係数： $D_2=0.2\sim 0.6$ (0.05刻み)、固有周期： $T=0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ (s)、地震動：耐震性能評価用模擬地震動50波とした。

図4に各 γ における残留変形率の頻度分布を示す。頻度分布は総面積が1となるように基準化されているため、縦軸は確率密度を表すことになる。実線は確率分布を正規分布にあてはめたものである。この図から、 γ が0.00の場合では横軸 $-1\sim 1$ の範囲においてその分布が一様分布に近い形となるが、 γ が0.05以上の場合では残留変形率の確率分布はほぼ正規分布で近似されることがわかる。なお、多質点系においても、1質点系と同様、その確率分布は2次剛性比 γ に大きく支配され、1質点系の確率分布との対応性が確認されている²⁾。

(3) 残留変形の確率論的評価

以上の分析から、残留変形率の確率分布は、2次剛性比 γ ごとに次式の正規分布で近似される。

$$p(R_{u_r}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp(-R_{u_r}^2 / 2\sigma^2) \quad (15)$$

ここで、 σ は2次剛性比 γ ($\gamma \geq 0.05$)に応じて定められる標準偏差の値で、 $\gamma=0.05$ の時、 $\sigma=0.48$ 、 $\gamma=0.10$ の時、 $\sigma=0.39$ 、 $\gamma=0.15$ の時、 $\sigma=0.32$ 、 $\gamma=0.20$ の時、 $\sigma=0.27$ 、 $\gamma=0.25$ の時、 $\sigma=0.23$ である。

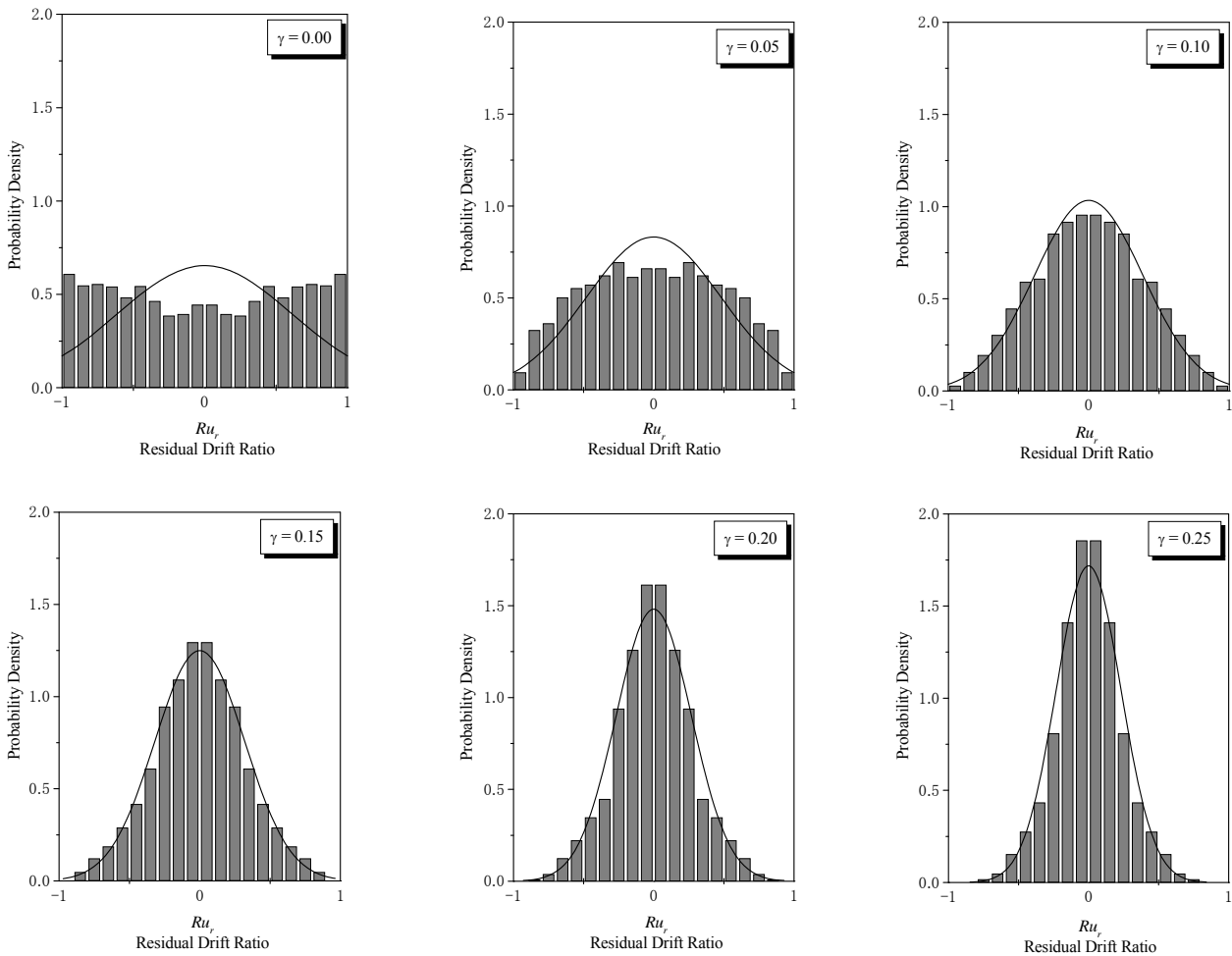


図4 残留変形率の確率分布と正規分布による近似曲線

一方、残留変形の評価に必要となるもう一つの変数である上界残留変形については、(14)式を用いて最大変形から自動的に計算される。最大変形の算出には、pushover解析と応答スペクトルを援用した既往の予測式が援用可能である。上界残留変形の予測値には予測誤差が生じるため、残留変形の評価の際には、次式のように予測誤差に関する確率変数も考慮する必要がある。

$$u_r = \pm \frac{u_r}{u_{r,max}} \cdot \frac{u_{r,max}}{u_{r,max,p}} \cdot u_{r,max,p} = R_{u_r} \cdot R_{p,u_r,max} \cdot u_{r,max,p} \quad (16)$$

ここで、

$R_{p,u_r,max}$: 上界残留変形の予測精度率 (確率変数)、

$u_{r,max}$: 上界残留変形の解析値、 $u_{r,max,p}$: 上界残留変形の予測値である。

なお、上界残留変形の予測精度率の確率分布は、予測に NSP (Nonlinear Static Procedure) を用いた場合、中低層建物 8、7、5 層、耐震性能評価用模擬地震動 50 波による計 1000 個のデータを統計処理した結果、次の対数正規分布で概ね近似できることが確認されている²⁾。

$$p(R_{p,u_r,max}) = \frac{1}{1.50 \cdot R_{p,u_r,max}} \exp\left(-\frac{(\ln R_{p,u_r,max})^2}{0.72}\right) \quad (17)$$

(15)、(17)式を用いれば、確率変数である残留変形率および上界残留変形の予測精度率の積の値を超過確率に基づいて表4のように定めることができる。表4の値は、モンテカルロシミュレーション (試行回数 10000 回) によって定めたものである。この数値表を用いれば、残留変形の値は、表4の値と上界残留変形の予測値を乗じることで超過確率に基づいて確率的に簡易評価される。

表4 残留変形率と上界残留変形の予測精度率の積値

超過確率	$R_{u_r} \cdot R_{p,u_r,max}$					
	$\gamma = 0.05$	$\gamma = 0.10$	$\gamma = 0.15$	$\gamma = 0.20$	$\gamma = 0.25$	$\gamma = 0.30$
5%	1.70	1.58	1.35	1.16	0.99	0.86
10%	1.13	0.99	0.83	0.70	0.60	0.52
15%	0.82	0.70	0.59	0.50	0.43	0.37
20%	0.61	0.52	0.43	0.37	0.31	0.27
25%	0.45	0.38	0.32	0.27	0.23	0.20
30%	0.34	0.28	0.23	0.19	0.17	0.14

4. 修復性能に関する設計規範

2章から4章における残留変形角を工学的指標とする修復限界値とその応答評価技術に関する検討から、鋼構造建築物の修復性能に関する設計規範は、次のように定められる。ここでは、全体残留変形角と最大残留層間変形角の両方において、応答値が限界値を上回らないことを確認することで、鋼構造建築物の修復性能が確保される。

[設計規範]

$$R \geq Q \quad (18)$$

(R : 限界値、 Q : 応答値)

□ 全体残留変形角

$$\theta_{R,lim,c} \geq \theta_R \quad \leftrightarrow \quad \frac{1}{200} \geq R_{u_r} \cdot R_{p,u_r,max} \cdot \frac{u_{r,max,p}}{h} \quad (19)$$

□ 最大残留層間変形角

$$\theta_{max,r,lim,c} \geq \theta_{max,r} \quad \leftrightarrow \quad \frac{1}{90} \geq \max_{1 \leq i \leq N} \left[R_{u_r} \cdot R_{p,u_r,max} \cdot \frac{u_{r,max,p}}{h} \right]_i \quad (20)$$

上記の設計規範における限界値には、3章で提示した設計用の修復限界値を採用した。残留変形率と上界残留変形の予測精度率の積は、3章で示した表4の数値表から、超過確率に基づいて定められる。上階残留変形の値については、等価1質点系への縮約と応答スペクトルの利用に基づく具体的な予測手順が文献²⁾で提示されている。

5. まとめ

本論では、兵庫県南部地震で被災して修復あるいは解体された鋼構造建築物 10 件の実態調査に基づき、建物の修復性に関わる残留変形と修復コストの分析を行い、技術面および経済面から鋼構造建築物の修復限界を分析した。その結果、技術面と経済面の両者を統合した残留変形角の修復限界値は、全体残留変形角の場合は 1/200、最大残留層間変形角の場合は 1/90 となることが明らかとなった。また、実務での幅広い適用に向けて考案した残留変形角の簡便な応答評価技術と組み合わせ、鋼構造建築物の修復性能に関する設計規範を提示した。

なお、今後の修復性能設計法の高度化に向けては、所定の修復限界に基づく最低限の修復性確保のみならず、建築主が要望する任意の修復コスト・修復期間に対しても設計できる手法が開発されることが望ましい。そのため、構造躯体に加え、非構造部材、建築設備の各部位における損傷状態と修復コスト・修復期間に関するデータベースを、実験等を通じて地道に構築していくことが重要となる。本件については、建築研究所の重点的研究開発課題：『建築構造物の災害後の機能維持／早期回復を目指した構造性能評価システムの開発』において、今後引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 岩田善裕、杉本浩一、桑村 仁：鋼構造建築物の修復限界—鋼構造建築物の性能設計に関する研究 その 2—、日本建築学会構造系論文集、No.588、pp.165-172、2005.2
- 2) 岩田善裕：鋼構造ラーメン骨組の修復性能設計に向けた残留変形の確率的評価、日本建築学会構造工学論文集、Vol. 54B、pp.649-656、2008.3