

## 地震後の残留変位に着目した RC 構造物の修復性能評価に関する解析的研究

鉄筋コンクリート構造物 修復性能  
残留変位 地震応答解析

正会員

同

同

桑原里紗\*1

高橋典之\*2

中埜良昭\*3

## 1. はじめに

近年頻発している都市型震災の被害を機に、被災した建築物の安全性に関する情報(継続使用の可否判断)だけでなく、復旧に要する費用などの修復性に関する情報も重要な関心事となっている。

そこで本稿では、RC 構造物を対象に、修復性に影響する工学量として残留変位を採りあげ、震源近傍の強震動を対象とした地震動応答解析を行った。さらに、残留変位がどのような構造特性に影響を受けるか基礎的な検討を行った。

## 2. 検討対象とする修復性能の評価因子

被災した建築物の修復の容易さが「修復性能」であるとするれば、修復に要する費用の大小で、修復性能を計ることが可能になると考えられる。特に RC 構造物の場合、修復に要する費用の大小は、部材に残留するひび割れの量に強く依存すると思われる。

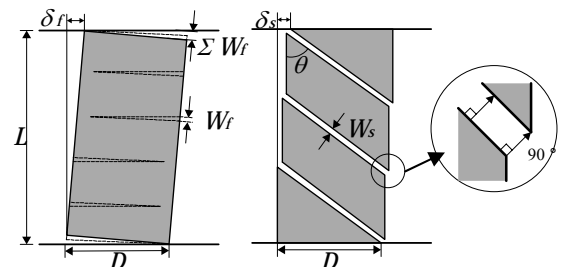
文献<sup>1)</sup>では、部材の曲げひび割れ幅およびせん断ひび割れ幅と部材変形の関係について図-1に示す幾何学的モデルを用いて説明している。この幾何学的モデルによれば、曲げ変形成分 $R_f$ とせん断変形成分 $R_s$ の合計値で表わされる部材角 $R$ は、次式のように表せる。

$$R = R_f + R_s = \frac{\sum W_f}{D - x} + \frac{\sum W_s \cdot \cos\theta}{L} \quad (1)$$

ここに、 $\sum W_f$ : 曲げひび割れ幅の材軸方向への合計、 $\sum W_s$ : せん断ひび割れ幅の合計、 $D$ : 部材せい、 $x$ : 圧縮縁から中立軸までの距離、 $\theta$ : せん断ひび割れと材軸のなす角度、 $L$ : 部材内法スパンである。このとき、図-2に示すように最大応答 $\delta_{max}$ からの除荷時残留変位 $\delta_{r,max}$ と地震応答終了時の残留変位 $\delta_r$ とが異なっても、最大残留ひび割れ幅はほぼ等しいと報告されている<sup>2)</sup>。しかし、両残留変位時における部材変形角は異なることを考えると、最大残留ひび割れ幅以外のひび割れは、図-3に示すようにひび割れ幅が異なって(閉じて)いなければならない。すなわち地震応答終了時の残留変位が小さい構造物では、平均残留ひび割れ幅が小さくなり、一般に修復に要する費用が減少すると予想される。そこで、本稿では残留変位 $\delta_r$ を修復性能に影響を与える工学量に設定した。

## 3. 残留変位に影響を与える構造特性の検討

RC 構造物を想定した非線形地震動応答解析によるパラメトリックスタディを行い、残留変位 $\delta_r$ に影響を与える構造特性について検討を行った。



(a) 曲げひび割れ変形モデル (b) せん断ひび割れ変形モデル  
図-1 幾何学的ひび割れ-変形モデル<sup>1)</sup>

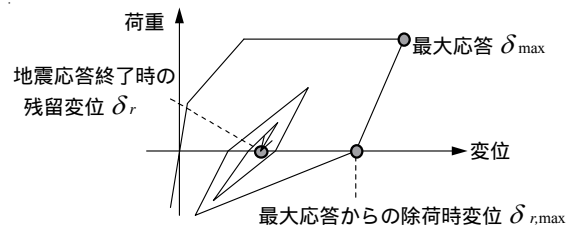
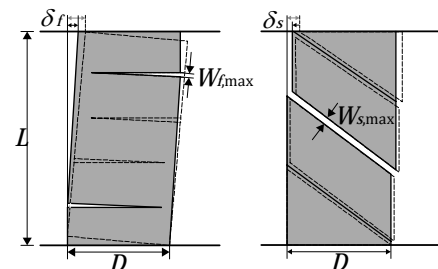


図-2 最大応答からの除荷時変位と残留変位の関係



(a) 曲げひび割れ変形モデル (b) せん断ひび割れ変形モデル  
図-3 幾何学的ひび割れ-変形モデルと残留変位

## 3.1 解析方法

対象とする RC 構造物を Takeda Model に従う 1 自由度振動系とみなした。系のベースシア係数 $C_B$ を 0.3 と定め、解析パラメータとして、弾性固有周期 $T$ を 0.2 秒, 0.3 秒, 0.4 秒および 0.5 秒の 4 通り、Takeda Model に用いる除荷剛性低下指数 $\alpha$ を 0.0 から 0.7 まで 0.1 刻みの 8 通り設定した。また入力地震動は 1995 年兵庫県南部地震で観測された強震記録 (JMA Kobe 1995 (NS 波)) を用いた。その際、最大応答塑性率 $\mu$ が 1.5, 2, 3 および 4 となるよう入力地震動に倍率を乗じた。

## 3.2 解析結果

前述のパラメータの組み合わせにより全 128 ケースの解析を行った。この時、各ケースの入力地震動レベルはそれぞれ異なり、これが残留変位 $\delta_r$ の大小に影響する。本稿では残留変位 $\delta_r$ に与える構造特性の影響を主な検討項目としているため、ここでは残留変位 $\delta_r$ を直接比較するのではなく、まず残

留変位の生じやすさを表す指標として残留変位比 $\gamma_r$ を式(2)で定義し、これと固有周期 $T$ 、最大応答塑性率 $\mu$ および除荷剛性低下指数 $\alpha$ の関係について検討した。その結果を図-4~図-6に示す。なお、同図では残留変位比 $\gamma_r$ と各パラメータとの関係を正規分布近似して示した。

$$\gamma_r = \frac{\delta_r}{\delta_{r,\max}} \quad (2)$$

固有周期 $T$ との関係(図-4)では、残留変位比 $\gamma_r$ は0~0.8の領域に分布し、特定の傾向はみられない。また最大応答塑性率 $\mu$ との関係(図-5)では、 $\mu=1.5$ の場合を除いて、残留変位比 $\gamma_r$ の平均値および標準偏差に大きな差はみられない。一方、除荷剛性低下指数 $\alpha$ との関係(図-6)では、 $\alpha=0.0$ の場合を除いて、 $\alpha$ の増大に伴い残留変位比 $\gamma_r$ の平均値および標準偏差は減少する。これは $\alpha$ が増大し履歴形状が原点指向型に近づくことで残留変位も原点により近づくためと考えられる。

#### 4. 除荷剛性低下指数と残留変位および最大変位の関係

3章の結果より、残留変位比 $\gamma_r$ に強く影響を与える構造特性は、除荷剛性低下指数 $\alpha$ であること、修復性能を向上させる、すなわち残留変位 $\delta_r$ を減少させるためには除荷剛性低下指数 $\alpha$ を増大させれば良いこと、が分かった。しかしながら、 $\alpha$ を増大させることは一方で履歴消費エネルギーの低下により最大変位 $\delta_{\max}$ を増大させ、耐震安全性を低下させることが予想される。そこで、除荷剛性低下指数 $\alpha$ (0.0~0.7)と残留変位 $\delta_r$ および最大変位 $\delta_{\max}$ の関係についてさらに検討を行った。

##### 4.1 解析方法

3章と同様の1自由度振動系を対象とし、入力地震動は、除荷剛性低下指数 $\alpha$ が0.0のときに最大応答塑性率 $\mu$ が3となるようJMA Kobe 1995(NS波)に倍率を乗じ、全てのパラメータに対して同一レベルの地震動を入力した。

##### 4.2 解析結果

図-7は、残留変位 $\delta_r$ および最大変位 $\delta_{\max}$ と除荷剛性低下指数 $\alpha$ の関係を、弾性固有周期 $T=0.5$ 秒のケースを一例にプロットしたものである。 $\alpha=0.2$ から $\alpha=0.6$ の区間において、 $\alpha$ の増大に伴い残留変位 $\delta_r$ が減少する傾向にある。一方、 $\alpha$ の増大に伴い最大変位 $\delta_{\max}$ は増大する傾向にある。

このように、 $\alpha$ の増減は修復性能と耐震安全性に相反した影響を与える。したがって修復性能および耐震安全性の両者のクライテリアを満足するような $\alpha$ を設定することが合理的な構造設計を行う上で重要となると考えられる。

#### 5. まとめ

RC構造物を対象に、修復性能に影響する工学量として残留変位を採りあげ、残留変位に影響を与える構造特性について検討を行った。その結果、除荷剛性低下指数 $\alpha$ を増大させれば残留変位が減少し修復性能が向上する傾向がみられる一方、最大応答変位の増大に伴い耐震安全性が低下することから、

合理的な構造設計を行う上で、修復性能と耐震安全性の最適なバランスを考慮した構造特性パラメータの設定が重要であることがわかった。

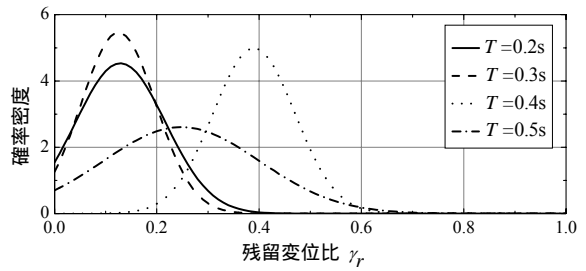


図-4 残留変位比 $\gamma_r$ と固有周期 $T$ の関係

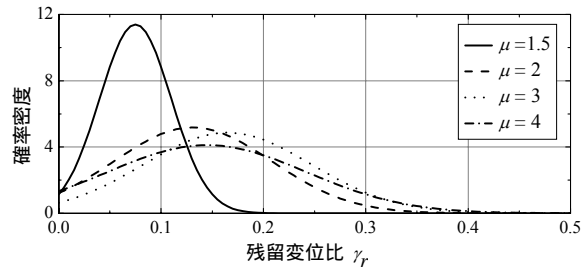


図-5 残留変位比 $\gamma_r$ と最大応答塑性率 $\mu$ の関係

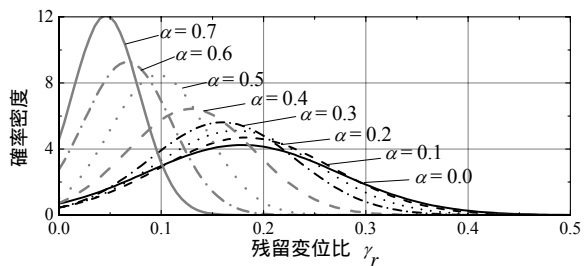


図-6 残留変位比 $\gamma_r$ と除荷剛性低下指数 $\alpha$ の関係

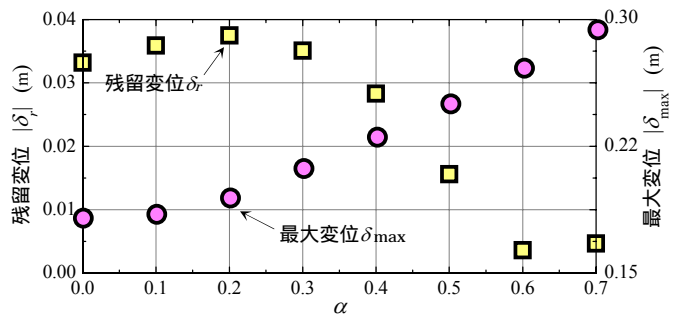


図-7 残留変位 $\delta_r$ と最大変位 $\delta_{\max}$ の関係

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会:鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説,日本建築学会,2004,1
- 2) 康大彦ほか:サブストラクチャー擬似動の実験による震災RC造建築物の残存耐震性能の評価,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.1093-1098, 2002.6

\*1 東京大学大学院 工学系研究科 大学院生  
\*2 東京大学 生産技術研究所 助教 博(工)  
\*3 東京大学 生産技術研究所 教授 工博

\*1 Graduate School of Engineering, University of Tokyo  
\*2 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.  
\*3 Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Dr. Eng.