

弾性応答スペクトルを用いたRC構造物の残留変位推定手法の検証

鉄筋コンクリート構造物 修復性能
残留変位 弾性応答スペクトル

正会員 ○横地未咲*¹ 同 壁谷澤里紗*²
同 高橋典之*³ 同 崔 琥*³
同 中埜良昭*⁴

1. はじめに

近年、大地震での建物の損傷による経済損失の重要性が注目され、被災後の機能維持・早期回復を目的とする修復性を考慮した耐震設計の必要性があると考えられるようになってきた。修復性を確保するには残留変位の制御が有効な手段の一つとして考えられるが¹⁾、一般的には時刻歴応答解析をしなければ残留変位がわからない。そこで本稿では建物の骨格曲線と弾性応答スペクトルを用いて地震応答終了時の残留変位を推定する手法について検証する。

2. 振動中心軸のずれ変位量 R と残留変位 δ_r の関係

図1に、本研究におけるRC構造物の系の応答履歴及び残留変位 δ_r 、振動中心軸のずれ変位量 R_N の定義を示す。1st ピーク P_1 は、非線形地震応答解析時の最大応答点、2nd ピーク P_2 は 1st ピーク経験後の符号を異にする領域での最大応答点を表し、それ以降のピークも同様のルールで P_N と定義する。さらに、1st ピークと 2nd ピークを結んだ直線上で荷重ゼロとなる点を変位量 R_1 とし、順次 Nth ピークと(N+1)th ピークによる点を変位量 R_N とする。

既報²⁾において、 R_1 と P_1 及び R_2 と P_2 を結ぶ等価剛性の比から、 R_1 または R_2 どちらの値を採用するか判定し、その値をもって精度よく残留変位を推定できることが示された。

3. 弾性応答スペクトルによる残留変位の推定

前章で示した変位量 R_N は、非線形地震応答解析の結果として得られる値である。本章では、前章で示した関係を参考にしつつ、設計段階で利用可能な弾性応答スペクトルによる残留変位 δ_r の推定手法を提案し、その推定精度について検討する。

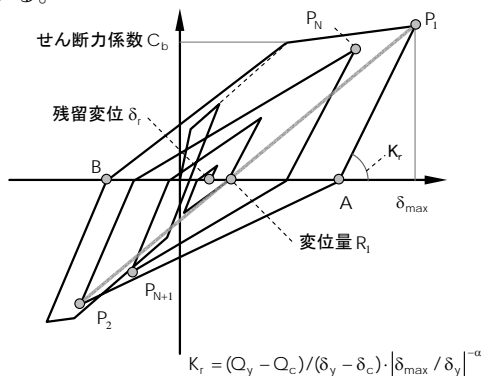


図1 系の応答履歴及び残留変位 δ_r 、変位量 R_N の定義

3.1 S_A-S_D 曲線による残留変位 δ_r の推定

本研究で提案する推定手法の手順を以下に示す。ここで

は、通常の弾性応答スペクトル ($S_{A1}-S_{D1}$ 曲線)に加えて、最大応答経験後にその最大応答と異符号の応答最大値から求められる応答スペクトル (これらを第2および第3ピークスペクトル ($S_{A2}-S_{D2}$ 曲線および $S_{A3}-S_{D3}$ 曲線) と呼ぶ) を新たに定義する。

[1st ピーク P_1^* の推定]

- (1) まず、図2に示す骨格曲線上に1st ピーク P_1^* を正側に仮定する。
- (2) 正側に仮定した最大応答値 (P_1^*) と絶対値の等しい応答値を負側の最大応答と仮定し ($-P_1^*$)、式(1)および式(2)により等価減衰 h_{eq1} と減衰補正係数 F_{h1} を求める。式(2)の $\alpha_i(i=1)$ は、非定常応答を考慮するため、国土交通省告示 No.1457 に基づき 0.8 と設定した。また、図2に示す除荷時変位 δ_{u1} は、除荷剛性低下指数 (α) を 0.5 と設定した Takeda モデルに従い求められるものと仮定した。

$$F_{hi} = \frac{1.5}{1 + 10(h_{eqi} + 0.05)} \quad (1)$$

$$h_{eqi} = \frac{1}{4\pi} \cdot \frac{\Delta W_i^*}{W_i^*} \times \alpha_i \quad (2)$$

- (3) 減衰定数 5% の応答スペクトル ($S_{A1}-S_{D1}$ 曲線) に非線形応答による履歴消費エネルギーの効果を考慮した上記の F_{h1} を掛け合わせた曲線 ($[S_{A1}-S_{D1}] \times F_{h1}$) と骨格曲線の交点を P_1^* とおく (図3)。
- (4) 図2と図3に示す P_1^* が一致するまで収束計算を行う。

[2nd ピーク P_2^* の推定]

- (1) 上記収束計算で得られた P_1^* と絶対値の等しい応答値を負側の 2nd ピーク P_2^* の初期値と仮定する。
- (2) 仮定した P_2^* と P_1^* を結んだ直線と X 軸 (変位軸) との交点を変位量 R_1^* とおく。式(2)の ΔW_2^* と W_2^* を求める際に、負側の除荷時変位 δ_{u2}^n が Takeda モデルに従うと仮定し (除荷剛性低下指数 $\alpha=0.5$)、 $|R_1^* - \delta_{u2}^n|$ が $|R_1^* - \delta_{u2}^n|$ と等しくなる δ_{u2}^p を求める。 R_1^* を振動中心と仮定して、式(1)および式(2)により等価減衰 h_{eq2} と減衰補正係数 F_{h2} を求める (図4)。ここで、式(2)の α_2 については、2nd ピークスペクトルと非線形応答解析における ΔW_2^* の履歴吸収エネルギーの比率に関する予備解析より 0.8 と仮定した。
- (3) R_1^* を原点として移動させた、応答スペクトル ($S_{A2}-S_{D2}$ 曲線) に上記の F_{h2} を掛け合わせた曲線 ($[S_{A2}-S_{D2}$

曲線]× F_{h2})と骨格曲線の交点を P_2^* とおく(図5)。

(4) 図4と図5に示す P_2^* が一致するまで収束計算を行い、変位量 R_1^* を確定する。

[3rd ピーク P_3^* の推定]

(1) P_3^* の初期値は、正側の最大応答よりも小さな値で、Takeda モデルの履歴ルールに従えば、 P_1^* を指向する履歴上にある。そこで、 P_3^* は上記で求めた δ_{u2}^n と P_1^* を結んだ線上の任意の点になると考え、その初期値として P_1^* を仮定した(図6)。

(2) 仮定した P_3^* と P_2^* を結んだ直線とX軸(変位軸)との交点を変位量 R_2^* とおく。2nd ピーク P_2^* の推定時と同様、 $|R_2^* - \delta_{u3}^n| = |R_2^* - \delta_{u2}^n|$ となる δ_{u3}^n を求め、 R_2^* を振動中心と仮定して、式(1)および式(2)により h_{eq3} と F_{h3} を求める。ここで、式(2)の α_2 については、予備解析より1.0と仮定した。

(3) R_2^* を原点として移動させた応答スペクトル(S_{A3} - S_{D3} 曲線)に上記の F_{h3} を掛け合わせた曲線($[S_{A3}$ - S_{D3} 曲線]× F_{h3})と、 δ_{u2}^n と P_1^* を結んだ線上の交点を P_3^* とおく(図7)。

(4) 図6と図7に示す P_3^* が一致するまで収束計算を行い、変位量 R_2^* を確定する。

3.2 推定結果

本節では、前節で提案した S_A - S_D 曲線により推定した変位量 R_1^* あるいは R_2^* のどちらかを既報²⁾の等価剛性比による条件に基づき選別し、非線形地震応答解析から得られた残留変位 δ_r と比較することで、本手法の推定精度を検討する。正解値とする非線形地震応答解析のモデルの詳細は文献²⁾を参考されたい。入力地震動はEl Centro NS 1940, 東北大学 NS 1978, JMA 神戸 NS 1995の3波とし、目標最大応答塑性率 μ が2.0, 3.0となるように地震動に倍率を乗じた。

図8に非線形地震応答解析で得られた残留変位 δ_r と本手法で得られた変位量 R_1^* あるいは R_2^* の関係を示す。また図9は、式(3)で表される、変位量 R^* による残留変位 δ_r の推定誤差を示す。

$$\varepsilon = (\delta_r - R^*) / 2\delta_r \quad (3)$$

いずれの地震波においても±10%以下の誤差範囲内に収まっている。本手法で提案した弾性応答スペクトルを用いた変位量 R^* は、非線形地震応答解析で得られた結果を概ね近似できることを確認した。

4. まとめ

RC 構造物を対象に修復性能に影響を与える工学量として残留変位を取り上げ、非線形時刻歴応答解析を行わずに、弾性応答スペクトルを用いた簡便な手法による残留変位の応答推定を試みた。その結果、本手法を用いた推定結果は非線形地震応答解析で得られた結果と概ね一致した。

[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) 桑原里紗ほか：RC 構造物における地震応答終了時の残留変位の評価法に関する解析的研究, 日本建築学会学術講演会論文集, pp. 527-528, 2009. 8

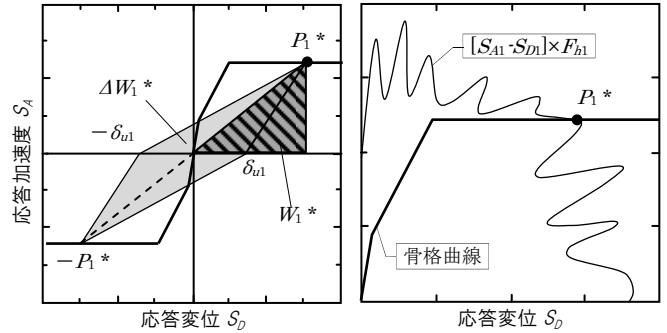


図2 ΔW_1^* と W_1^* の定義

図3 P_1^* の定義

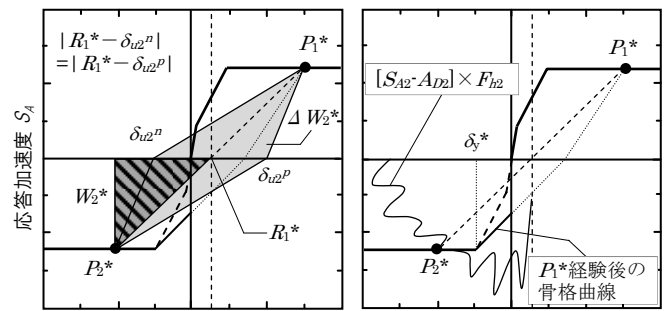


図4 ΔW_2^* と W_2^* の定義

図5 P_2^* の定義

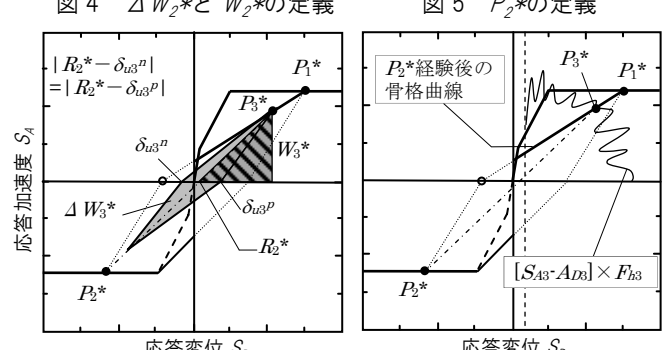


図6 ΔW_3^* と W_3^* の定義

図7 P_3^* の定義

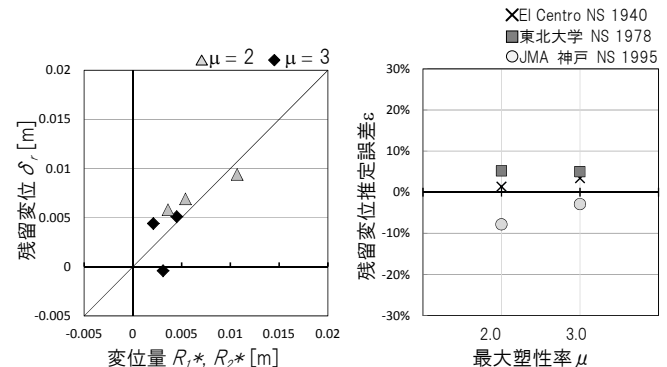


図8 δ_r と R_1^* , R_2^* の比較

図9 R^* の δ_r 推定誤差

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

*1 Graduate Student, Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo
 *2 Former Graduate Student, Graduate School of Eng., Univ. of Tokyo
 *3 Research Assistant, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Ph.D.
 *4 Professor, Institute of Industrial Science, Univ. of Tokyo, Dr. Eng.