

保有耐震性能に基づく残存耐震性能評価法と現行評価法との比較

残存耐震性能 構造耐震指標 保有耐震性能指標
低減係数 耐力低下 変形能力低下

正会員 ○HAO LINFEI*¹ 正会員 鈴木 裕介*³
正会員 姚 倩倩*² 正会員 前田 匡樹*⁴

1. はじめに

被災した建物に対して、現行の耐震診断基準^[1]に規定されている耐震性能残存率 R は構造耐震指標 I_s を用いて算出され、損傷により低下した強度指標 C と靱性指標 F の積により残存耐震性能を評価している。この手法においては、主に Newmark エネルギー一定則に基づいて耐震性能を評価している。

三浦ら^[2]は、応答スペクトルを考慮して、建物の保有耐震性能指標 α に基づく残存耐震性能評価法を提案した。この評価法を用いて、筆者ら^{[3][4]}は、建物の耐力、変形能力、減衰等の性能低下の影響を分離して考えた。本研究では、現行評価法と提案法の結果の違いを比較し、その原因を検討した。さらに提案手法の妥当性を検証した。

2. 構造耐震指標による残存耐震性能評価

現行の基準において、被災前後の建物の構造耐震指標の低下率を耐震性能残存率としている。構造耐震指標 I_s を算出する時、強度指標 C はベースシア係数と同じとし、靱性指標 F を式(1)のように算定する。

$$F = \frac{\sqrt{2\mu_u - 1}}{0.75(1 + 0.05\mu_u)} \quad (1)$$

ここで μ_u : 終局塑性率である。

式(2)のように、靱性指標 F は弾性応答と降伏応答の比率であり、現行評価法は弾性応答により耐震性能を評価している(図-1)。残存耐震性能は式(3)のように弾性応答の低下率としている。

$$F = S_{ae}/S_{an} \quad (2)$$

$$R_0 = {}_D S_{ae}/S_{ae} = {}_D I_s/I_s \quad (3)$$

ここで S_{ae} : 弾性応答 ; S_{an} : 降伏応答 ; ${}_D S_{ae}$: 低下した弾性応答 ; ${}_D I_s$: 低下した構造耐震指標である。

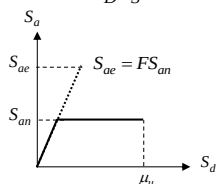


図1 現行法の弾性応答

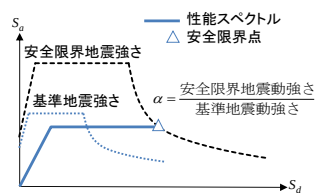


図2 保有耐震性能指標

本報では耐力、変形性能に着目するため、 C と F の低下のみを考えた。被災した建物の耐震性能残存率は式(4)で定義した。

$$R_0 = \frac{{}_D I_s}{I_s} = \eta_b \frac{(1 + 0.05\mu_u)\sqrt{2\mu_u\eta_d - 1}}{(1 + 0.05\mu_u\eta_d)\sqrt{2\mu_u - 1}} \quad (4)$$

ここで η_b : 耐力低下率 ; η_d : 変形能力低下率である。

3. 保有耐震性能指標に基づく残存耐震性能評価

三浦らが提案した残存耐震性能評価法は、式(3)のように、被災した建物の保有耐震性能指標 α (図-2)の低下率を耐震性能残存率とした。減衰定数 h とスペクトルの低減係数 F_h を式(4)と(5)により算定した。

$$R = {}_D \alpha / \alpha \quad (5)$$

$$h = h_0 + \beta(1 - 1/\sqrt{\mu_u}) = 0.05 + 0.25(1 - 1/\sqrt{\mu_u}) \quad (6)$$

$$F_h = 1.5 / (1 + 10h) \quad (7)$$

ここで α : 被災前の保有耐震性能指標 ; ${}_D \alpha$: 被災後の保有耐震性能指標である。

保有耐震性能指標 α は式(8)のように算出する。また等価線形化法(図-3)により、弾性応答と降伏応答は式(9)の関係がある。そして耐震性能残存率は式

$$\alpha = S_{an} / (S_{a0} F_h) \quad (8)$$

$$S_{ae} = \sqrt{\mu_u} S_{an} / F_h \quad (9)$$

$$R = \frac{{}_D \alpha}{\alpha} = \frac{\sqrt{{}_D \mu_u} S_{a0} {}_D S_{ae}}{\sqrt{\mu_u} S_{a0} S_{ae}} = \frac{{}_D S_{ae}}{\sqrt{{}_D \mu_u} S_{ae}} \quad (10)$$

ここで ${}_D S_{ae}$: 低下した弾性応答 ; S_{ae} : 無被害弾性応答 ; S_{an} : 降伏応答 ; ${}_D S_{a0}$: 低下した終局周期における基準応答 ; S_{a0} : 無被害終局周期における基準応答 ; ${}_D \mu_u$: 低下した終局塑性率 ; μ_u : 終局塑性率 ; F_h : 低減係数である。

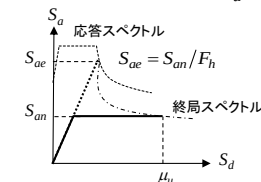


図3 提案法の弾性応答

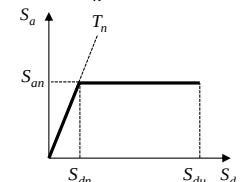


図4 一質点系モデル

筆者らは建物の耐力、変形能力、減衰等の性能低下を分離し、三浦らの耐震性能残存率を用いて、耐震性能残存率 R の計算式を式(6)のように提案した^[4]。

$$R = \sqrt{\eta_b} \frac{1.5\sqrt{\eta_d} + 2.5\eta_h\sqrt{\eta_d} - 2.5\eta_h/\sqrt{\mu_u}}{4 - 2.5/\sqrt{\mu_u}} \quad (11)$$

ここで η_b : 耐力低下率 ; η_d : 変形能力低下率 ; η_h : 減衰低下率 ; μ_u : 建物無被害時の終局塑性率である。基準地震動は第二種地盤仮定されて、安全限界点の周期は 0.864 秒以上に仮定された。

現行基準の評価法と比較するため、 η_b と η_d のみを考慮して、式(6)は式(7)となる。

$$R = \sqrt{\eta_b} (4\sqrt{\eta_d} - 2.5/\sqrt{\mu_u}) / (4 - 2.5/\sqrt{\mu_u}) \quad (12)$$

4. 二つ評価法の比較

図-5 のように一質点系の性能スペクトルをバイリニアモデルで設定した。モデルの諸元を表-1 に示す。

表-1 一質点系の諸元

ベースシア係数	C	0.3	降伏代表変位	S_{dn}	7.6cm
降伏後応答加速度	S_{an}	300gal	終局塑性率	μ_u	5
降伏点周期	T_n	1s	終局代表変位	S_{du}	38cm

式(2)により弾性応答は 960gal であり、構造耐震指標は 0.96 になる。終局時の基準応答スペクトルを図-5 に示す。 α は式(8)により 1.24 になり、終局点における弾性応答は式(9)により 1286gal である。

式(4)の R_0 が 0.6 とした時、取りうる終局点を結んだ曲線を図-5、図-6 に示す。終局点がこの線に交わる二つ低下させた性能スペクトルにおいて、残存耐震性能率は現行評価法で共に 0.6 である。図-5 は耐力低下が支配的な場合である。この場合に変形能力の低下は小さいため、終局までの塑性率が大きくなる。そして F_h は小さくなり、 $_D S_{ae}$ は大きくなった。さらに η_b は小さくなり、式(10)により R は大きくなって、 R_0 を上回った。図-6 は変形能力低下が支配的な場合である。低下したモデルの塑性率が小さいので、 F_h は大きくなり、 $_D S_{ae}$ は小さくなった。さらに η_b は大きくなるので、 R は R_0 より小さくなった。

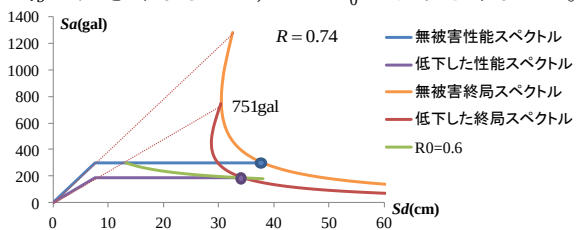


図-5 耐力低下は主にした場合の比較

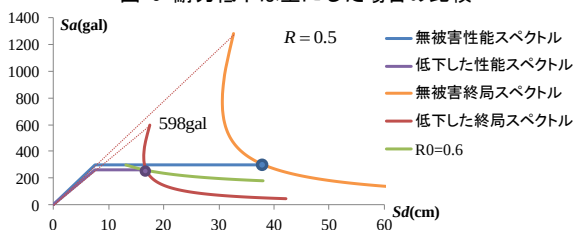


図-6 変形能力低下は主にした場合の比較

以上の二つ低下させた性能スペクトルにおいて、現行評価法の弾性応答は $960\text{gal} \times 0.6 = 576\text{gal}$ である、等価線形化法の結果と比べて、どちらも現行評価法による弾性応答は小さい。現行評価法の応答推定は安全側となることがわかった。さらに図-6 の場合に提案法の等価弾性応答は現行評価法の 1.04 倍であり、図-5 の場合に現行評価法の 1.3 倍になった。変形能力の低下が小さい場合に F_h による応答減衰を考慮していないので、現行評価法は過度に安全側になることが考えられる。

図-5 の $R_0 = 0.6$ 曲線における (η_{bi}, η_{di}) をそれぞれ式(4)、式(12)に代入して、算出したものを図-7 示す。変形能力低下が小さい場合に R が R_0 を上回りことがわかった。式(4)の R_0 と式(12)の R がそれぞれ 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9 とした時、取りうる終局点を結んだ曲線を図-8、図-9 に示す。同じ低下した終局点において、耐力低下が支配的な場合に、提案法の評価結果は現行評価法より大きいことが見られる。

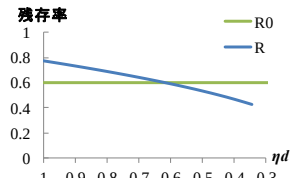


図-7 同じ低下率における R と R_0 の比較

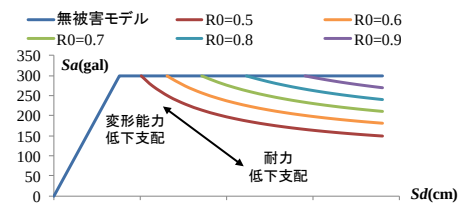


図-8 R_0 の終局スペクトル

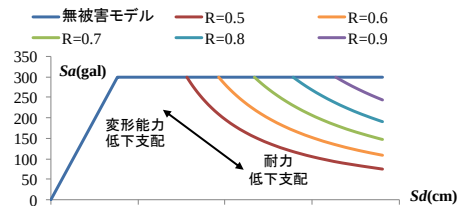


図-9 R の終局スペクトル

6. まとめ

建物の残存耐震性能の評価を目的とし、筆者らが提案した評価法を現行評価法と比較した。耐力低下が支配的な場合、つまり変形性能が十分に保持されている時、現行評価法では F_h による応答スペクトルの低減が考慮されていないため、耐震性能残存率を過小（安全側）に評価している。しかし、提案法では F_h を考慮しているため、より実現象に基づいた評価であると考えられる。

参考文献

- [1] 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準，2001.
- [2] 三浦 耕太ほか：部材耐力と減衰を考慮したRC造1層架構の耐震性能に及ぼす各部材の影響度評価法，日本建築学会構造系論文集，Vol177, No678, pp1283-1290, 2012.
- [3] 姚 倩倩ほか：応答スペクトルに基づく震災RC 造建築物の残存耐震性能評価 その1，日本建築学会大会学術梗概集，神戸，2014.
- [4] HAO L. et al. *Residual Seismic Capacity Assessment of Damaged RC Buildings Based on Response Spectrum, Part 2*. AIJ Annual Convention, Kobe, 2014.

*1 東北大学大学院 博士課程後期・修士（工学）
 *2 東北大学大学院 博士課程前期
 *3 東北大学災害科学国際研究所 助教・博士（工学）
 *4 東北大学大学院 教授・博士（工学）

*1 Graduate School of Eng., Tohoku Univ., Mr. Eng.
 *2 Graduate School of Eng., Tohoku Univ.
 *3 Assistant Prof., IRIDeS, Tohoku Univ., Dr.Eng.
 *4 Prof., Graduate School, Tohoku Univ., Dr.Eng.