

I - B 361

等価線形化による地震動の周期特性の影響を取り入れた弾塑性応答の推定

東京大学工学系研究科 正会員 阿部雅人
 東京大学工学系研究科 フェロー 藤野陽三
 東京大学大学院 学生会員 宇佐美哲

1. はじめに

地震時保有耐力法に見られるように、弾性応答で表される設計スペクトルから弾塑性応答を推定する際には、地震動の周期特性に依存しないエネルギー一定則や変位一定則が用いられることが多い。また、地震後の残留変位応答については、数多くの数値シミュレーションから経験的にその傾向が明らかになっており[1]、最大応答を基に計算する方法が提案されている。ところが、弾塑性地震応答は、地震動の周期特性の影響を大きく受けることが知られており、特に、地震動の卓越周期より短周期の構造物の弾塑性応答を著しく増大させる傾向がある（例えば[2]）。

そこで、本研究では、等価線形化の方法[3]を用いることにより、完全弾塑性1自由度系を対象に、その最大応答および残留応答の基本的性質を明らかにするとともに、地震動の周期特性の影響を取り入れた応答推定法を提案することを目的として検討を行う。

2. 地震動の周期特性を取り入れた最大応答推定

弾塑性1自由度系が定常調和外力 $p = Pe^{i\omega t}$ を受ける際の応答を、振幅並びに位相が等しくなるように調和応答 $x = Xe^{i\omega t}$ によって近似する。すると、振幅 $R = |X|$ は、

$$|P|^2 = (k_0 C(R) - m\omega^2 R)^2 + k_0^2 S(R)^2 \quad (1)$$

を R について解くことによって得られる。ここに、 $R > x_0$ のとき $S(R) = -R \sin^2(\theta) / \pi$ かつ $C(R) = R(\theta - \sin(2\theta)/2) / \pi$ ； $R \leq x_0$ のとき $S(R) = 0$ かつ $C(R) = R$ 、ただし、 x_0 は降伏変位、 $\theta = \cos^{-1}(1 - 2x_0/R)$ である[3]。図1に、各地震動を受ける降伏震度0.4gの弾塑性1自由度系の応答塑性率スペクトル（減衰5%）を実線で示した。なお、構造物の周期は、減衰5%時の速度応答スペクトルの最大値で定義した卓越周期 T_0 によって正規化している。また、一点鎖線は、卓越周期において各地震動と同じ最大応答値を与える調和入力を用いて、応答を式(1)によって計算した予測値を示している。ばらつきは大きいものの、等価な調和入力を考えることで、地震応答の傾向を定性的に再現できる。特に、兵庫県南部地震神戸海洋気象台およびJR 鷹取記録[4]において短周期側で塑性率が著しく増大するが、その傾向をよく表している。なお、式(1)より、短周期側で塑性率が無限大となる条件は、 $|P|/\pi > 4k_0 x_0$ で与えられる。

3. 残留変位応答の予測

図2(a)に、完全弾塑性を表すモデルの模式図を示す。完全弾塑性を図2(b)のようにMaxwellモデルによって、等価な線形系に置き換え、最大応答値 R と残留応答値 R_{perm} の間に成り立つ関係式を求めた。まず、完全弾塑性と等価なMaxwellモデルの剛性および粘性減衰は、振幅 R の関数として、

$$k_{eq} = k_0 \{ C(R)^2 + S(R)^2 \} / (RC(R)), \quad c_{eq} = -k_0 \{ C(R)^2 + S(R)^2 \} / (\omega_{eq} RS(R)) \quad (2a,b)$$

で表される。ここで、残留変位応答は、原点への復元力へ寄与しない粘性減衰の変位応答分であると考えると、

$$R_{perm} = \frac{\omega_{eq} c_{eq}}{\sqrt{(\omega_{eq} c_{eq})^2 + k_{eq}^2}} R \quad (3)$$

で与えられる。ここに、 ω_{eq} は、振幅 R での k_{eq} に対応する固有振動数である。図3は、神戸海洋気象台、JR 鷹取、ならびにエルセントロ記録を受ける弾塑性構造物（減衰5%；固有周期0.5, 1.0, 1.5[sec]；降伏震度0.2g, 0.4g, 0.6g；計9種類）について時刻歴解析から求めた残留応答比（ R_{perm}/R ）と、式(3)による予測値を比較したのものである。ばらつきは大きい、応答塑性率5以下では、式(3)による予測は時刻歴応答解析結果の傾向と整合的である。

4. まとめ

弾塑性応答に対する地震動の卓越周期の影響、ならびに残留応答の予測を、等価線形化の手法を用いて検討した。主たる結論は以下の通りである。

(1) 弾塑性構造物において、短周期側で応答塑性率が增大する現象は、地震動の卓越周期をもつ調和入力によっても再現可能である。これは、地震動の周期特性の弾塑性応答へ及ぼす影響を、地震動の卓越周期を式(1)によって表

キーワード：等価線形化、地震応答、弾塑性応答、残留応答、卓越周期
 連絡先：〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1, Tel: 03-3812-2111 内線 6096, Fax: 03-5689-7292
 E-mail: masato@kyouryou.t.u-tokyo.ac.jp

される定常応答解に取り込むことで、定量的に評価できる可能性を示唆するものである。

(2) 完全弾塑性モデルをMaxwellモデルで等価線形化することにより、地震時残留応答と最大弾塑性応答の関係式を得ることができた。応答塑性率が小さい場合には時刻歴応答解析結果の傾向をよく表している。

謝辞：本研究は、一部、財団法人河上記念財団の工学研究助成によるものである。ここに記して謝意を表す。

参考文献：[1]川島一彦・Macrae, G. A.・星隈順一・長屋和宏：残留変位応答スペクトルの提案とその適用，土木学会論文集，No.501，pp.183-192，1994。[2]阿部雅人・藤野陽三・吉見雅行：直下地震動が構造物の応答に及ぼす影響に関する一検討，構造工学論文集，土木学会，Vol.44A，pp.641-650，1998。[3]Caughey, T. K.: Sinusoidal excitation of a system with bilinear hysteresis, *Journal of Applied Mechanics*, Vol.27, 640-643, 1960。[4]中村豊，上半文昭，井上英司：1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)，JR地震情報No.23d，財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部，1996。

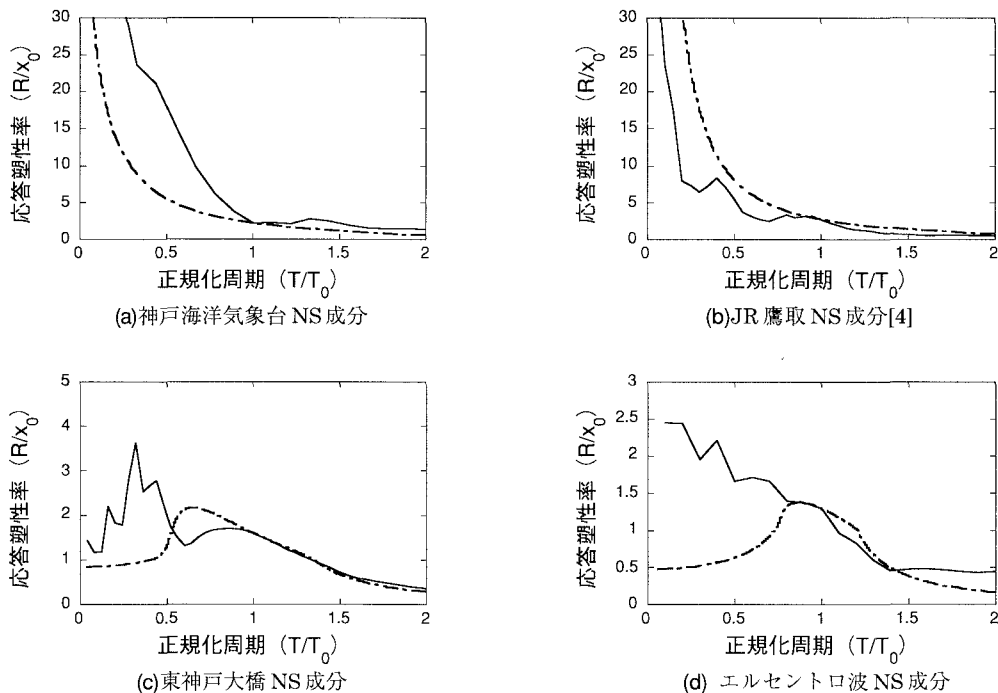


図1. 調和応答に基づく最大応答の予測 ———：弾塑性解析値，---：式(1)による予測値

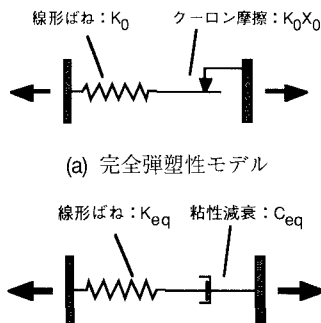


図2. 完全弾塑性モデルと等価線形モデル

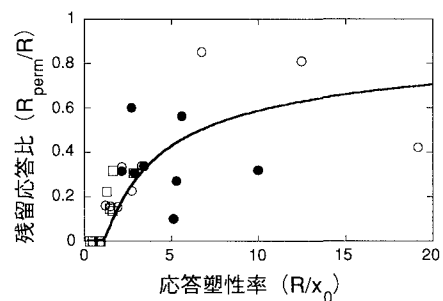


図3. 残留応答の予測

———：理論値，
○：海洋気象台，●：JR 鷹取，□：エルセントロ