

構造物の非線形性と地震動の非定常性を考慮した耐震性照査のための地震動波形の作成

ファラヒ アブドルホセイン¹・北浦 勝²・宮島 昌克³

¹金沢大学大学院自然科学研究科
(〒920-8667石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: fallahi@pbousa9.ce.t.kanazawa-u.ac.jp

²金沢大学工学部教授 (〒920-8667石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: kitaura@t.kanazawa-u.ac.jp

³金沢大学工学部教授 (〒920-8667石川県金沢市小立野2-40-20)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

強震記録と、非線形構造物の振動数特性の時間的変化を考慮して、応答ができるだけ大きくなる限界地震動波形作成手法を数値実験的に3通り開発した。制約条件は、限界地震動波形の振幅特性や最大値、全継続時間に対する振動数特性を基準となる地震動波形とある相対誤差の範囲内にあること、である。一つ目の手法では基準となる地震動波形を数個所の時刻で分割し、振動数特性を調整した。分割された波形同士の間で接続時刻でのなめらかな連続性も確保した。他の二つの手法は、地震動波形のパワーの大きい時刻と対象とする振動系の固有振動数成分が大きくなる時刻とを合致させ、応答を一気に大きくするという考えに基づく。地震動の特性に応じて適切な手法を選択し、限界地震動波形を得ることができた。

Key Words : *critical earthquake wave, nonlinear structure, earthquake response, non-stationary characteristics of earthquake wave*

1. はじめに

耐震設計における構造物の耐震性照査においては、1995年兵庫県南部地震などで得られた強震動記録を構造物の振動特性を考慮して、振動数領域で振幅調整した地震記録が用いられることが多い。このとき道路橋示方書¹⁾では「加速度波形としては、一般に1波形だけではなく、3波形程度」を用いることを推奨し、3波形程度の応答に対する「平均値をもって耐震性の照査をするのがよい」としている。これは「当該地点に予想される地震動は、地震の特性や規模等によって異なるため」であるが、本来地震記録には不確実性が含まれていることから、現在の地震科学技術をもってしても将来の地震動波形を時間領域と振動数領域で正確に予測することは容易でない²⁾。すなわち構造物の振動特性によっては、兵庫県南部地震などの波形や推定地震動波形よりもさらに不都合な波形の存在することが考えられる。このことに関連する論文は数多く発表されているが、古くは非線形系に対してDrenick³⁾が論じ、比較的最近でも竹脇^{4), 5)}が基準となる地震動波形と同じパワーと強さを持つという制約条件を設け、線形や非線

形1自由度系に対してcritical外乱を求める手法について議論している。

本研究ではこのような試みをさらに進め、地震波形と非線形構造物の振動特性が時間とともに変化することを考慮して、地震の最初から最後まで系が共振に近い状態で応答するような地震動波形の作成手法を数値実験的に検討、開発した。また地震動波形のパワーの大きい時刻と非線形系の固有振動数成分が大きくなる時刻とを合致させ、応答を一気に大きくする波形の作成法についても検討した。すなわち構造物がより破壊しやすい危険な地震動波形について検討した。本研究ではこのような地震動波形を限界地震動波形と呼び、兵庫県南部地震などで得られた強震記録を基準地震動波形と呼ぶ。なお基本となる地震動の有する性質として、地震動波形の振幅特性、すなわち包絡線や最大値と、全継続時間に対する振動数特性に注目し、これらが限界地震動波形と基準地震動波形とで確率的に同じであるという制約条件を満足させるようにした。

2. 限界地震動波形 $\ddot{z}(t)$ の作成法

(1) その1 : パワースペクトル密度における特定振動数成分増強法

限界地震動加速度波形 $\ddot{z}(t)$ を, 定常確率過程 $\ddot{i}(t)$ と時間 t に関する包絡線 $e_1(t)$ の積として作成する. すなわち

$$\ddot{z}(t) = e_1(t)\ddot{i}(t) \quad (1)$$

である. $e_1(t)$ は地震動波形の絶対値の極値のみを移動平均法 (移動平均時間 0.9 秒) で解析して求めた. 図-1 に兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の絶対値の波形 (NS 成分, 最大 8.18 m/s²) と包絡線 $e_1(t)$ を示す.

$\ddot{i}(t)$ は cos 波を足し合わせる後藤ら⁶⁾の方法により, 式(2)で作成する.

$$\ddot{i}(t) = \frac{1}{\sqrt{M}} \sum_{m=1}^M \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (2)$$

ここに M は cos 波の足し合わせ数, f_m は確率密度関数 $p(f)$ を有する振動数, ϕ_m は $0 \sim 2\pi$ で一様分布する位相である. なお $p(f)$ は $\ddot{i}(t)$ のパワースペクトル密度 $S_{\ddot{i}}(f)$ に比例することが証明されている. すなわち

$$p(f) \propto S_{\ddot{i}}(f) \quad (3)$$

である. 地震動の最初から最後まで非線形系の応答が共振に近い状況を作り出すためには, 基準地震動波形の振動数特性を時々刻々と調整する必要があるが, 実際には明らかに波の種類が変わった時点で, あるいは例えば30秒の継続時間を有する地震記録の場合には, それを5秒ごとの6区間に分割し, 以下の7ステップで限界地震動波形を作成する.

- 1) 基準地震動の対象区間 (最初は第 1 区間) に対する非線形系の応答計算をする.
- 2) 変位応答のパワースペクトル密度から卓越振動数 f_p を求める.
- 3) つぎの区間の地震動に対するパワースペクトル密度を計算する.
- 4) f_p を中心とする振動数領域 $2\Delta f_p$ のパワースペクトル密度を $a\%$ 増幅し, その他の振動数成分を減少させる. このときパワースペクトル密度の面積 (=パワー) が元の面積と等しくなるように減少させる (図-2).
- 5) 4) で得られた新しいパワースペクトル密度を振動数領域で積分し, 面積が 1 となるように基準化する. これを振動数 f の確率分布関数 $p(f)$ とみなし, さらにこれを f で積分して確率分布関数 $P(f)$ とみなし, $0 \sim 1$ で一様に分布する乱数に対応する振動数 f_m を $P(f)$ を介して M 個求める.
- 6) 式(2)に f_m , 位相 ϕ_m を代入し, $\ddot{i}(t)$ を作成する.
- 7) 6) で得られた波形 $\ddot{i}(t)$ に, 対応する区間

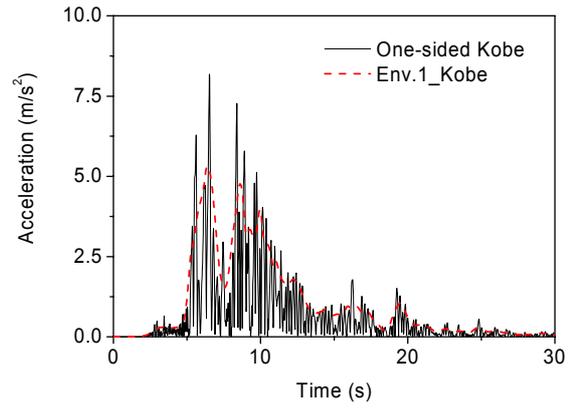


図-1 神戸海洋気象台の波形 (絶対値) と特定振動数成分増強法に用いる包絡線 $e_1(t)$

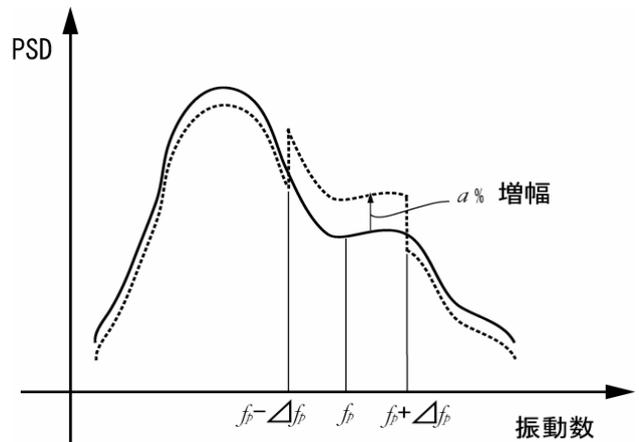


図-2 特定振動数成分増強法

の包絡線 $e_1(t)$ を乗じ, 限界地震動 $\ddot{z}(t)$ を作成する.

ステップ 7) で得られた $\ddot{z}(t)$ をステップ 1) の新しい区間波形として計算を続行する. 以上のステップ 1) から 7) を繰り返す. このとき限界地震動波形の最初の区間は基準地震動波形と同一にする.

a と $2\Delta f_p$ を決めるに当たっては限界地震動波形の全継続時間に対するパワースペクトル密度のパワーの大きい振動数領域と, 基準地震動のパワースペクトル密度のそれとがほぼ合致するように, すなわちパワースペクトル密度の面積同士の相対誤差が 5% 以内に, また卓越振動数 f_p 同士の相対誤差が 10% 以内に収まるように, さらに限界地震動の最大加速度の絶対値が基準地震動のそれ以下となるように工夫する.

隣り合う区間同士を滑らかにつなぎ合わせる方法として 2 つの手法を検討した. 一つ目の方法は, 6) で新しい区間の $\ddot{i}(t)$ を作成する際に区間長さの数倍の波形を発生させ, $\ddot{i}(t)$ と傾き ($\ddot{i}(t)$ - 時間 t 曲線における 2 点間の傾き) が前の区間の最後と滑らかにつながるとする点を新しい区間の始点とする方法

である⁷⁾。なお第1区間は基準地震動そのものであることから、式(1)の $\ddot{z}(t)$ を対応する区間の $e_1(t)$ で除し、 $\ddot{i}(t)$ の形にしてから、第2区間 $\ddot{i}(t)$ のりと滑らかにつなぎ合わせる。もう一つの方法は不連続につながったままの $\ddot{z}(t)$ を1自由度系への入力加速度とし、得られた応答加速度を $\ddot{z}(t)$ とみなす方法である。このとき元の $\ddot{z}(t)$ の振動数特性があまり変化しないように、広帯域振動数特性を有する1自由度系を用いた。なお本文では後者の方法を採用した。

(2) その2：非定常パワースペクトル $G(t, f)$ ⁸⁾を使用する方法

a) 非定常パワースペクトル $G(t, f)$ と地震動波形の合成

本方法は、地震動波形のパワーの大きい時刻と対象とする振動系の固有振動数成分が大きくなる時刻とを合致させ、応答を一気に大きくするという考えに基づくものである。そのためには、地震動波形の各振動数成分の時間的変化、すなわち非定常パワースペクトル密度をできる限り正確に計算する必要があることから、ここでは亀田の非定常パワースペクトル $G(t, f)$ を用いた。非定常パワースペクトルでは1自由度系を狭帯域フィルターとして使い、非定常確率過程に対する系の位置エネルギーと運動エネルギーの和を時間方向で移動平均した量を非定常パワースペクトル $G(t, f)$ と定義している。

これを神戸海洋気象台の波形に適用して得られた $G(t, f)$ を図-3に示す。なお $G(t, f)$ の計算においてはコンピュータのファイルサイズが膨大となることから、0.05gを最初に越えた時刻から0.05gを最後に越えた時刻の間のみを用いた。それ故に地震動継続時間は神戸海洋気象台の波形の場合、18秒と短くなっている。つぎにこのスペクトルを式(4)によって加え合わせ、元の波が再現されるかを確認した。位相を元の波のそれを使って再現し、地震動の全体的な波形はもとより最大加速度についても確認したところ、図-4のようになり、神戸海洋気象台の最大値が実際の8.18 m/s²から11.9 m/s²と1.5倍になった。また1978年Tabas地震のTabasにおける波形(L成分, 最大8.16 m/s²)では8.16 m/s²が25.4 m/s²と3倍になり、図は省略するが2002年鳥取県西部地震の新見における波形(EW成分, 最大8.27 m/s²)でも2.4倍になった。一方、亀田が採用しているように0~2 π で一様に分布する位相を用いると、3者ともにほぼ元の最大加速度が得られた⁸⁾。

$$\ddot{z}(t) = -\sum_{m=1}^M 2\sqrt{G(t, f_m)} 2\pi\Delta f \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (4)$$

b) 非定常パワースペクトル $G_{mod}(t, f)$ による限界地震動波形

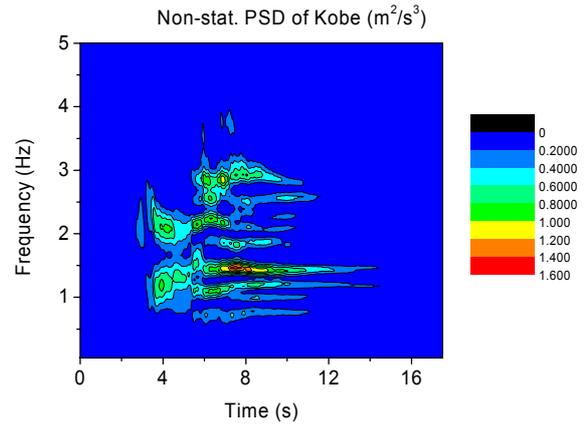


図-3 神戸海洋気象台の波形に対する非定常パワースペクトル $G(t, f)$

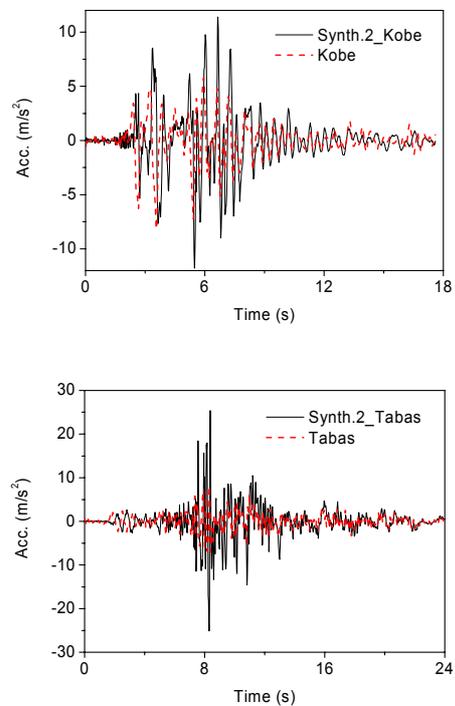


図-4 式(4)による元の波形の再現

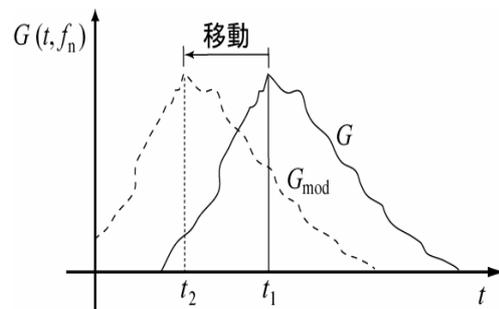


図-5 $G(t, f_n)$ の時間軸の移動

バイリニア系においては、変位応答が大きくなるにつれて卓越振動数は低下するが、たいていの時間では線形時の固有振動数で振動している。そこで線形時の固有振動数 f_n の成分 $G(t, f_n)$ が最大の時刻 t_1 を地震動波形のパワーの大きい時刻 t_2 に移動させる (図-5)。このとき移動させる非定常パワースペクトルの成分の数は f_n に対応する1つのみでも f_n 周辺の複数個でもよいが、2. (1) に記述した限界地震動波形となるための制約条件は満足されなければならない。このようにして求まる波形の最大加速度が、大崎の定義した包絡線 $e_2(t)$ ⁹⁾ の最大値を取りうる時間領域で発生するとき、その波形を限界地震動波形とする。

(3) その3：多重フィルター $F(t, f)$ を使用する方 法

a) 多重フィルター $F(t, f)$ と地震動波形の合成

本方法の考え方は「(2) 非定常パワースペクトル $G(t, f)$ を使用方法」とほぼ同じであるが、非定常パワースペクトルの代わりに1自由度系の加速度応答 $F(t, f)$ を振動数成分として使用する。 $F(t, f)$ を式(5)によって加え合わせ、元の波が再現されるかどうかを神戸海洋気象台の波形と Tabas の波形とで確認したところ、十分再現できることが分かった (図-6)。

$$\ddot{z}(t) = \frac{1}{N_f} \sum_{m=1}^{N_f} F(t, f_m) \quad (5)$$

なお同式において N_f は重ね合わせ数であり、FFTにおける折り曲げ振動数に相当する。式(4)と比較すると、式(4)では f_m なる振動数成分が振幅に相当する $2\sqrt{G(t, f)2\pi\Delta f}$ と \cos 波に分離されているのに対して、式(5)では両者が渾然一体となっていると解釈できる。

b) 多重フィルター $F(t, f)$ による限界地震動波形

対象構造物の線形時の固有振動数付近の成分を地震動波形のパワーの大きい時刻に移動させて限界地震動波形を作成する。ところが線形多重フィルターを用いる場合、得られた波形の固有振動数付近のパワースペクトル密度が大きくなり、パワースペクトル密度の包絡線の最大値同士の相対誤差が 30% 以内に収まらなかったため、形を平たくするように、フィルターを線形系から非線形弾性系に替えた。すなわちフィルターの運動方程式を

$$\ddot{x}(t) + 2h\omega_n\dot{x}(t) + \omega_n^2 R\{x(t)\} = -\ddot{y}(t) \quad (6)$$

とするとき、 $x(t)$ と $R\{x(t)\}$ の関係を $x = R + \varepsilon R^3$ なるソフトスプリング型とした。 $R\{x(t)\}$ はこの3次式を $R\{x(t)\}$ について解けば得られる。ここに $\ddot{y}(t)$ は基準地震動波形である。このときフィルタ

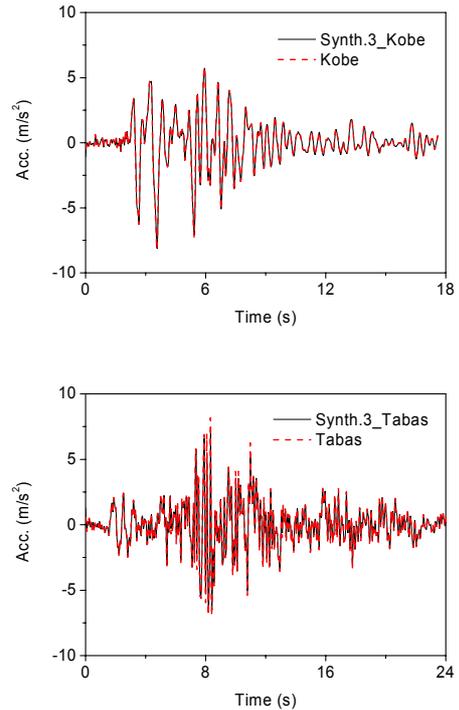
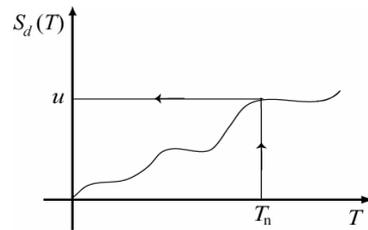
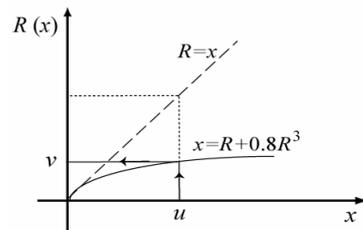


図-6 式(5)による元の波形の再現



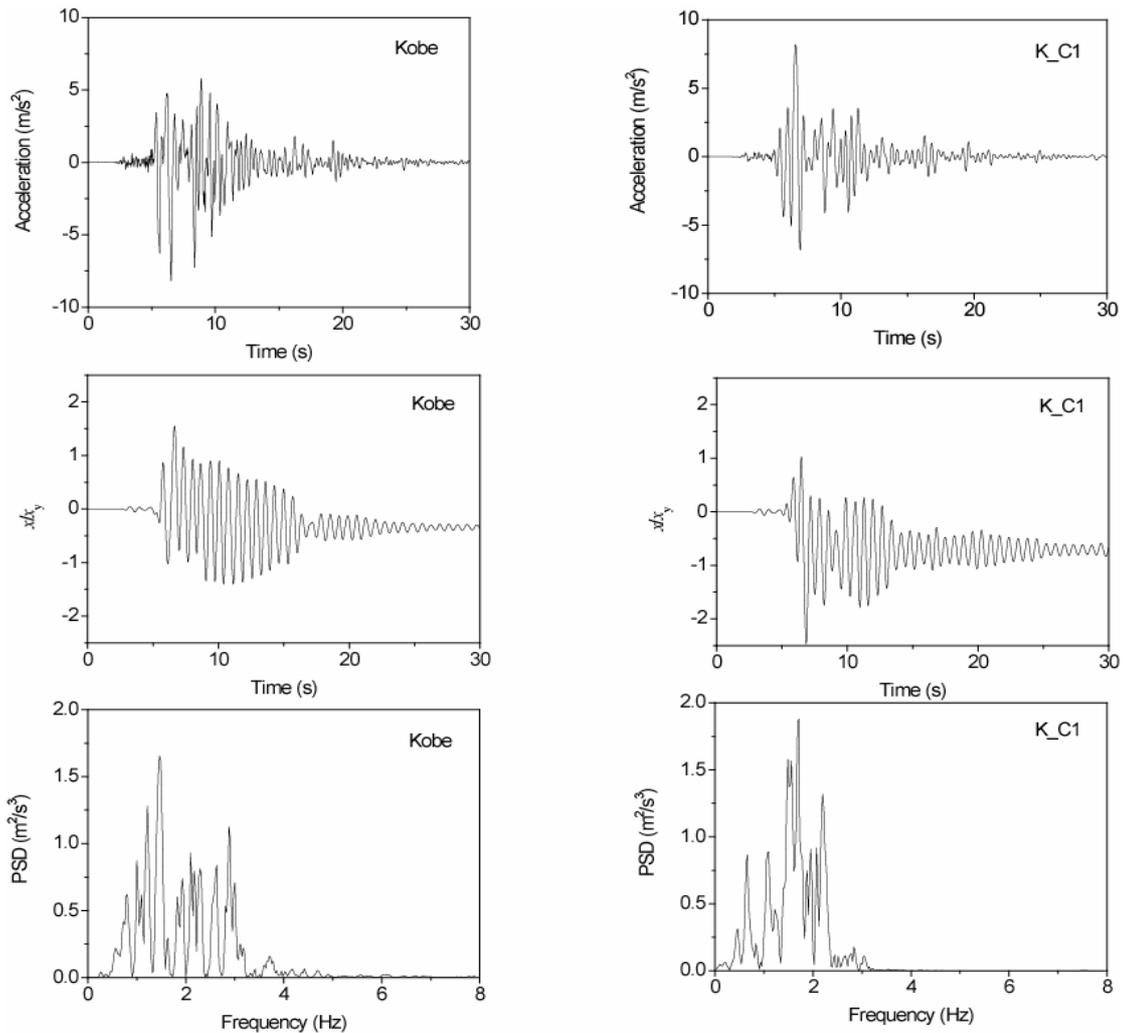
(a) 変位応答スペクトル $S_d(T)$



(b) ソフトスプリング型の $R-x$ 関係

図-7 多重フィルター法におけるフィルターの等価固有振動数の求め方

一の等価固有振動数 $f_f (=1/T_f)$ を以下のようにして求めた。フィルターの線形時の固有振動数 f を $f_n (= \omega_n/2\pi = 1/T_n)$ とする。この固有周期 T_n に対する基準地震動波形の変位応答スペクトル $S_d(T)$ は図-7(a)から u となる。 $R-x$ の関係を表す図(b)を用いて u に対応する R を求めると v となる。したがって図(b)において地震力が静的に作用すると仮定した場合の等価バネ定数 k_{eq} は v/u となるから等価



(a) 基準地震動波形・神戸波

(b) 神戸波の限界地震動波形

図-8 特定振動数成分増強法による対象構造物の限界地震動波形と基準地震動波形の比較
—地震動の加速度波形，応答 x/x_y ，地震動のパワースペクトル密度PSD—

固有振動数 f_f は $f_f = f_n \sqrt{k_{eq}} = f_n \sqrt{v/u}$ となる。この加速度応答 $(\ddot{x} + \ddot{y})$ を対象構造物の線形時の固有振動数 f_n 付近の成分として使用する。なお R に関する 3 次式の ε を定めるためにいくつかの基準地震動波形に対して試算した結果、 $\varepsilon = 0.8$ が全体的に良い結果を与えたので、以下ではこの値を用いる。

3. 対象構造物と限界地震動波形

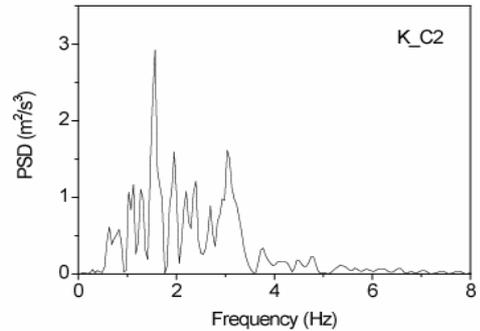
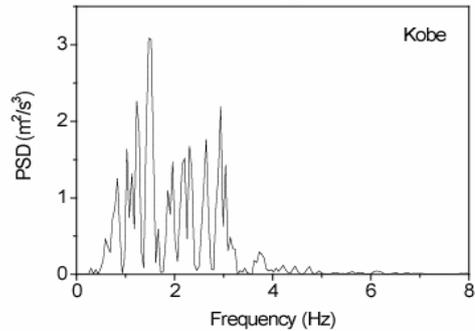
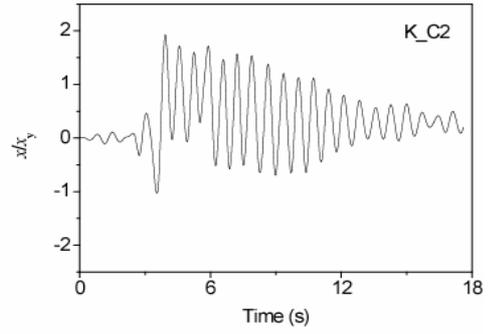
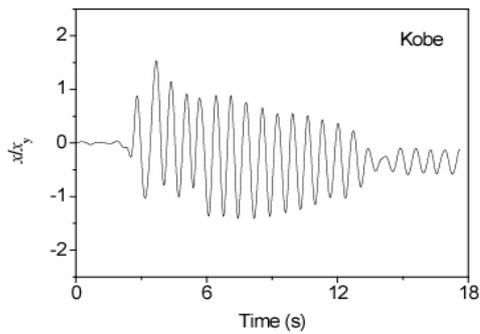
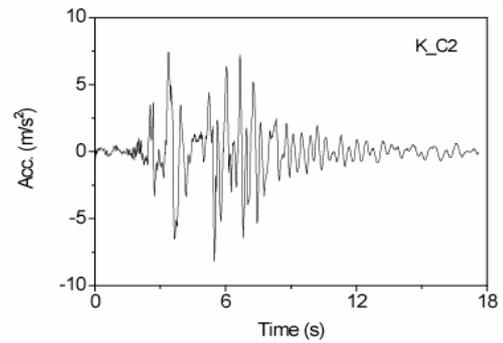
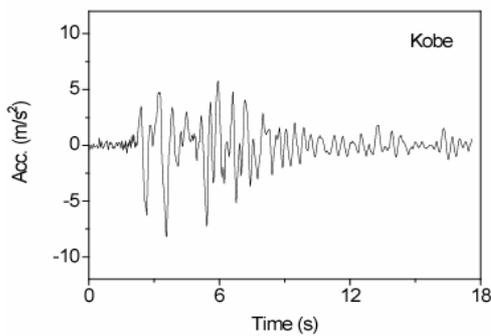
(1) 対象構造物

本研究では、固有振動数 $f_n = 1.4$ Hz ($T_n = 0.7$ 秒)、減衰定数 5 %、降伏変位 $x_y = 0.14$ m、第2分枝と第1分枝の傾きの比 $k_2/k_1 = 0.05$ であるバイリニア型復元力を有する 1 自由度系を対象構造物とした場合を中心に説明する。なお 0.7 秒なる固有周期はイラン

の BHRC 耐震規準¹⁰⁾ ではほぼ 6 階建ての鉄骨構造物に相当する。また復元力の形は文献^{7), 11)} などによった。

(2) 手法ごとの限界地震動波形の比較

手法その 1 (振動数成分増強法) による神戸海洋気象台の波形 (= 基準地震動波形) とその限界地震動波形のパワースペクトル密度、および応答変位 x を x_y で除した値を図-8 に示す。このとき隣り合う区間同士を滑らかにつなぎ合わせるために用いた広帯域振動数特性を有する 1 自由度系の固有振動数は 2 Hz であり、減衰定数は 0.7 である。これらはいくつかの基準地震動波形に対して試みた結果、得られた値である。両地震動波形のパワーを含む振幅特性と全継続時間に対するパワースペクトル密度および卓越振動数が 2。(1) に記述した制約条件を満足していることを確認できる。また基準地震動波形に対



(a) 基準地震動波形・神戸波

(b) 神戸波の限界地震動波形

図-9 非定常パワースペクトル $G(t, f)$ 法による対象構造物の限界地震動波形と基準地震動波形の比較
—地震動の加速度波形, 応答 x/x_y , 地震動のパワースペクトル密度PSD—

する塑性率 μ が1.5であるのに対して, 限界地震動波形に対するそれは2.6と, 1.7倍になっている. なおこの手法は解析したすべての地震記録と構造物に対して有効であるが, 塑性率 μ の大きさは, 当然のことながら, 地震波形や構造物の特性により異なる. また乱数を用いてパラメータを決めるから, 制約条件を満足し, かつ応答が大きくなる解を見つけるには多数回のシミュレーションを試行しなければならない.

手法その2 (非定常パワースペクトル法) では, シミュレートされた地震波形加速度の最大値が基準地震動波形のそれとほぼ同じである場合, この方法は限界地震波形を得やすい. しかし一般にこの方法ではシミュレートされた波形の最大値がかなり大きくなるので, それを基準地震動波形の最大値と合わせるように修正すると, 応答は却って小さくなる. 図-9は神戸海洋気象台の波形を基準地震動波形と

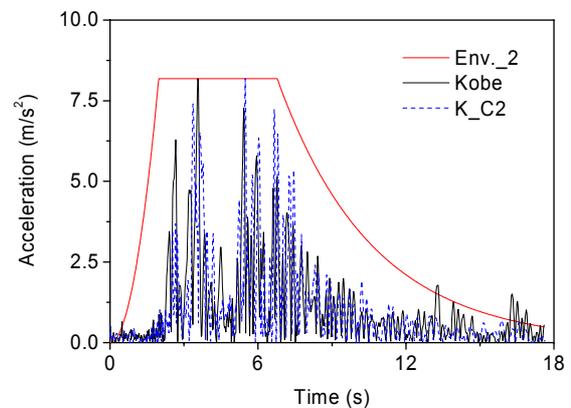
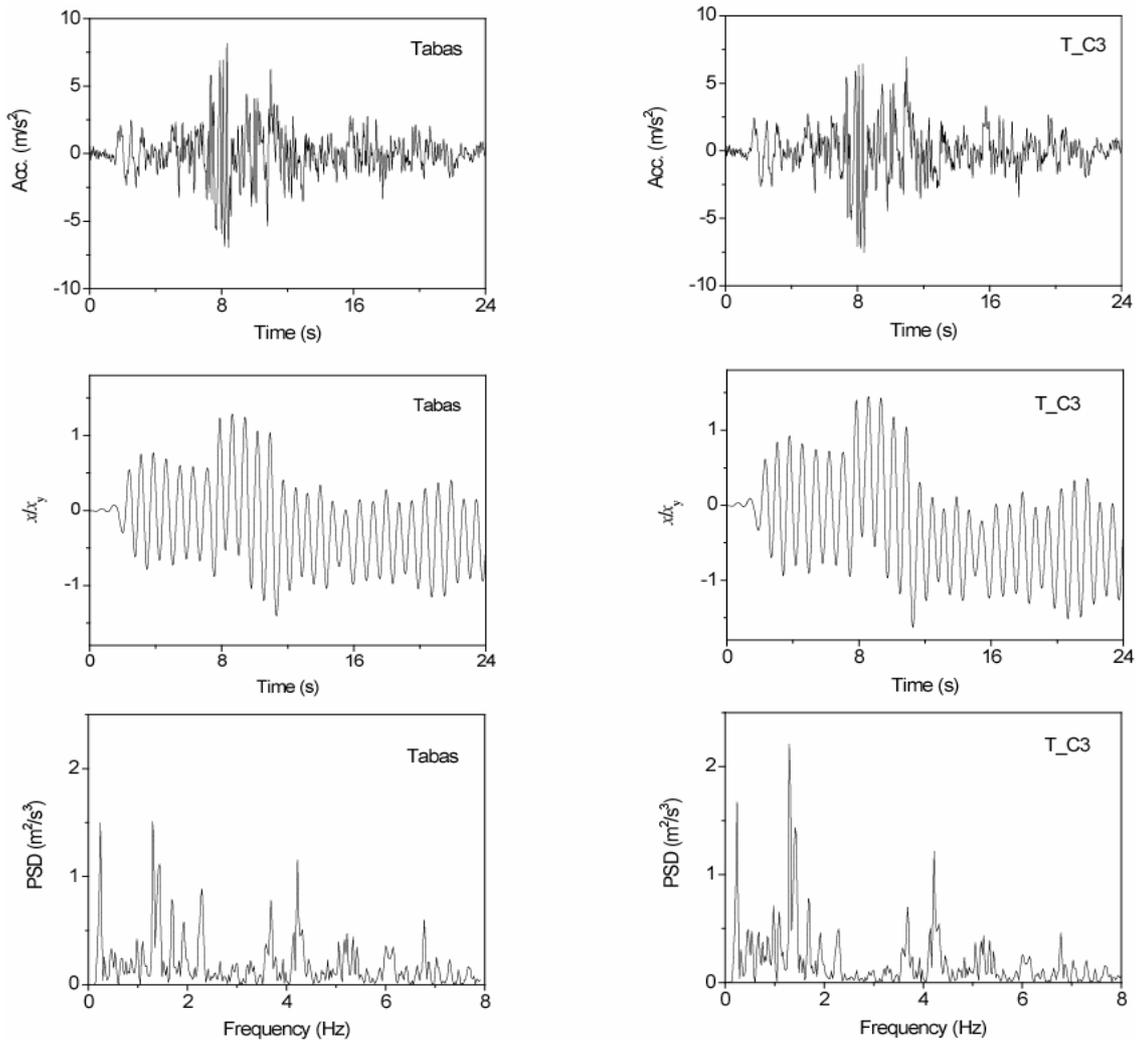


図-10 限界地震動波形が神戸波の包絡線 $e_2(t)$ に含まれている様子



(a) 基準地震動波形・Tabas波

(b) Tabas波の限界地震動波形

図-11 多重フィルター $F(t, f)$ 法による対象構造物の限界地震動波形と基準地震動波形の比較

—地震動の加速度波形, 応答 x/x_y , 地震動のパワースペクトル密度 PSD—

し, 固有振動数付近の7つの成分を移動して得た限界地震動波形とパワースペクトル密度, およびその応答である. なお限界地震動波形は最大値が大崎の定義した包絡線の最大となる範囲に入っており (図-10), その他の制約条件も満たしている. その結果は塑性率 μ が1.5から1.9と1.3倍に増大している. しかしこの方法は神戸海洋気象台の卓越振動数と離れた固有振動数を持つ構造物にはあまり有効ではない. これは神戸海洋気象台の波形では卓越振動数付近のパワーがかなり大きく, それ以外の振動数成分を移動しても波形に及ぼす影響が小さいからであろうと考えられる.

手法その3 (多重フィルター法) による例として, 図-11にTabasの波形を基準地震動波形とし, 固有振動数付近の1つの成分を移動して得た限界地震動波形とパワースペクトル密度, およびその応答

を示す. 塑性率 μ が約1.4から1.6と16%近く増大している. この場合, 制約条件のパワーは等しいが, パワースペクトル密度の形状はやや異なっている. Tabas波形では構造物の固有振動数がTabas波形の卓越振動数に近い場合もそうでない場合も, 塑性率 μ には10数%程度の増加がある. なお1990年Manjil地震におけるAbbarでの記録 (L成分, 最大5.04 m/s²) でも14%大きい応答を得ている. しかし神戸海洋気象台や鳥取県西部地震の新見における波形では数十回の試行にもかかわらず, 制約条件を満足する限界地震動波形を見つけることができなかった. これはTabas波形のパワースペクトル密度が示しているような, 広帯域の振動数特性を有している地震動波形では振動数成分の移動は応答増加に効果があるが, 神戸や新見波形の振動数特性は広帯域

とは言えないから、効果が小さいのではないかと考えられる。

4. 結論

本研究では非線形構造物の応答ができるだけ大きくなる地震動波形作成手法を数値実験的に3通り開発した。制約条件は、地震動波形の振幅特性や最大値、全継続時間に対する振動数特性が基準となる地震動波形とある相対誤差の範囲内にあること、である。その結果、以下の結論を得た。

1) 振動数成分増強法では基準となる地震動波形を数個所の時刻で分割し、振動数特性を調整した。分割された波形同士の接続時刻でのなめらかな連続性も確保した。この手法の適用範囲は広い。しかし乱数を用いてパラメータを決めることから、条件を満足する解を見つけるには多数回の試行が要る。

2) 非定常パワースペクトル法は、地震動波形のパワーの大きい時刻と対象とする振動系の固有振動数成分が大きくなる時刻とを合致させ、応答を一気に大きくするという考えに基づく。非定常パワースペクトルから元の波形が精度良く合成でき、地震動波形の卓越振動数付近のパワーが相対的に大きく、かつ構造物の固有振動数が卓越振動数付近にある場合には限界地震動波形を見つけやすい。

3) 多重フィルター法は2)における非定常パワースペクトルの代わりにソフトスプリング型の多重フィルターを用いる手法であり、広帯域の振動数特性を有している地震動波形に対して限界地震動波形を見つけやすい。

以上見るように、地震動の有する特性に応じて、3つの手法を使い分けることにより限界地震動波形を得ることができた。今後は種々の固有振動数を有する構造物に対して、限界地震動波形を作成する一般的な手法を開発する予定である。

謝辞： 研究においてK-netなどの地震記録を使用させていただいた。査読者の指摘は本文を改善す

るのに有効であった。記して感謝する次第である。
参考文献

- 1) 社) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，pp.77-78，平成8年12月。
- 2) 例えば，Proc. of US-Japan workshop: Effects of near-field earthquake shaking, sponsored by PEER center, ATC, Japan Ministry of education, science, sports, and cultures, US-NSF, San Francisco, March 20-21, 2000.
- 3) Drenick R.F.: The critical excitation of nonlinear systems, Journal of Applied Mechanics, pp.333-336, 1977.
- 4) 竹脇 出：確率論に基づく新しいcritical外乱法，日本建築学会構造系論文集，第533号，pp.69-74，2000年7月。
- 5) Takewaki, I.: Critical excitation for elastic-plastic structures via statistical equivalent linearization, Probabilistic Engineering Mechanics, Vol.17, pp.73-84, 2002.
- 6) 後藤 尚男・土岐 憲三・秋吉 卓：電子計算機による耐震設計用の人工地震波に関する研究，日本地震工学シンポジウム講演集，pp.25-30, 1966.
- 7) Fallahi, A., Kitaura, M. and Miyajima, M.: A method of making critical earthquake for a nonlinear SDOF structure using 1995 Kobe earthquake and 1978 Tabas earthquake records, The Fourth International Conference on Seismology and Earthquake Engineering (SEE4), CD-ROM, Tehran, Iran, 2003.
- 8) 亀田 弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察，土木学会論文報告集，No.235, pp.55-62, 1975.
- 9) 大崎 順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版会，p.200, 1994.
- 10) Building and Housing Research Center (BHRC): Iranian code of practice for seismic resistant design of buildings (in Persian), Iranian Building Codes Series, Standard No.2800, second revised edition, Teheran, Iran, 1997.
- 11) 寺田 昌広・Fallahi, A.・梅田 洋平・北浦勝：非線形構造物に対する限界地震動の実験的検証，土木学会中部支部研究発表会概要集，pp.31-32, 2003.

(2003. 6. 29 受付)

SIMULATION OF EARTHQUAKE WAVE FOR ASEISMIC CHECK OF A NONLINEAR STRUCTURE CONSIDERING NON-STATIONARY CHARACTERISTIC OF EARTHQUAKE MOTION

Abdolhossein FALLAHI, Masaru KITAURA and Masakatsu MIYAJIMA

Using a given earthquake wave as target, by considering its frequency variation in time, 3 methods for simulation of critical earthquake, which causes larger response than target on a nonlinear structure while contains similar amplitude and frequency characteristics, are developed. In the first method, power spectral density (PSD) of target is modified according to frequency characteristic of nonlinear structure in consecutive time intervals. Non-stationary PSD, $G(t,f)$, and multi-filter spectrum, $F(t,f)$, of target is dealt with in the other two methods, respectively, and critical earthquake is simulated by drifting special component(s) of $G(t,f)$ and $F(t,f)$ to the peak acceleration time of target. Using different earthquake motions, appropriate method was chosen and critical earthquakes were simulated.