

非線形応答値を特徴指標とした入力地震動の記述手法の提案

東京大学大学院 学生員 ○宮本 崇
東京大学大学院 正 員 本田利器

1. はじめに

社会基盤構造物の設計は性能照査型への移行が進みつつあり、動的解析の結果によって安全性の評価を行う手法が採り入れられている。このとき、設計に用いる地震動の時刻歴波形を合理的に設定することは重要である。

ある地震動を設計に用いる根拠を明らかにするために、構造系に与える影響の観点から地震動の特徴を把握、記述することは重要である。しかし、現在設計地震動の特徴の記述に多く用いられる応答スペクトルは線形系を前提としているため、設計対象となる構造系の非線形挙動に与える影響を考慮するには不十分である。

本稿は、構造系の非線形挙動に与える影響を考慮するために、対象構造系の非線形挙動に関連の高い値を特徴指標として地震動を記述することを提案する。ここではそのような特徴指標として、対象とする構造系のモデルを用いた動的解析の応答値を利用することとする。

どのようなモデルを用いても、構造パラメタを完全には知り得ず不確実性が存在し、そのような不確実性は動的解析結果に大きな影響を及ぼす。したがって、確定的な構造パラメタを用いた精緻な解析が、必ずしも信頼性の高い指標の値を与えるとは限らない。そこで、構造パラメタに変動を与え、設定したパラメタの近傍を含む動的解析による結果を地震動の記述に用いることとする。多数の構造パラメタを持つ精緻なモデルでは計算コストが増加することや、パラメタの変動に対する非線形挙動の鋭敏性を考慮すると精緻ではなくとも挙動の支配的要因を把握することが重要であるとの考えから、ここでは対象構造系の特徴を記述するのに十分な程度に単純化したモデルを用いる。

構造パラメタに変動を与えた動的解析からは、特徴指標の確率分布が得られる。本稿ではこの確率分布を地震動の記述に用いる手法を提案し、この手法に基づいて対象構造系に対して影響の大きな入力地震動を合成する手法を提案し、その有効性の検証を行う。

2. 特徴指標を用いた地震動の記述

(1) 提案手法

対象構造系の1次モードの固有周期に対応する1自由度系の挙動など、適切にモデル化された構造モデルの動的挙動は実際の構造系の挙動と関連が高いと考えられる。そこで、地震動による構造モデルの応答値を、地震動の特徴を表現するための1つの指標とみなすこととする。

このとき、構造パラメタの不確実性が動的解析の結果に及ぼす影響を考慮するために、構造パラメタに変動を与えたモンテカルロシミュレーションを行う。すると特徴指標は確率分布として得られるが、平均や分散だけでなく確率分布のより高次のモーメントが有する情報を利用するために、指標の確率分布そのものを用いて地震動を記述する。

特徴指標の確率分布を用いることにより、確率分布のなす空間である情報幾何空間の中で地震動を記述することが可能となる。このとき、特徴指標の確率分布がそれぞれ p, q である2つの地震動間の距離を、KL ダイバージェンス $D(p, q) = \int p(x) \log \frac{p(x)}{q(x)} dx$ によって評価する。KL ダイバージェンスは対称性を満たさないため数学上の厳密な距離とはならないが、学習理論や情報理論などの分野において広く用いられている。

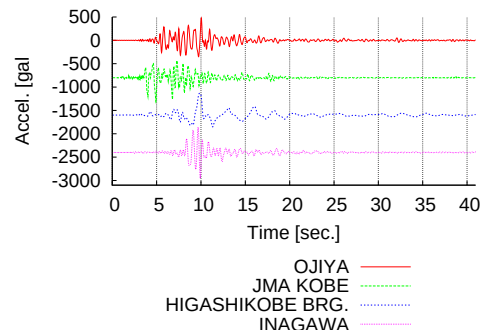


図-1 検証に用いた強震記録

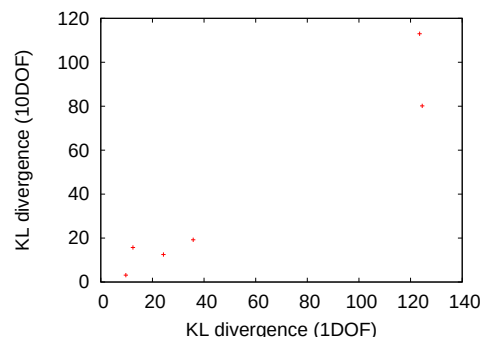


図-2 10 自由度系の応答値の KL ダイバージェンスと 1 自由度系の応答値の KL ダイバージェンスの関係 (相関係数 0.965)

(2) 有効性の検証

提案手法の有効性を検証するため、対象構造系の非線形挙動に与える影響に関する複数の強震記録の類似性の評価を、特徴指標の KL ダイバージェンスを用いて行った。評価対象とする強震記録は、

- 新潟県中越地震 K-NET 小千谷 NS 成分
- 兵庫県南部地震 JMA 神戸 NS 成分
- 兵庫県南部地震 阪神高速道路公団東神戸大橋 N78 °E 成分
- 兵庫県南部地震 阪神高速道路公団猪名川 NS 成分

の計 4 記録を用いることとした。図-1 に、その時刻歴波形を示す。

1 次モードの固有周期が 0.5sec. であるバイリニア 10 自由度系を対象構造系とし、剛性と初期降伏変位にそれぞれ設定値の 20% の一様変動を与えて得られた 100 体の構造系に対する地震動の影響を議論することとした。

特徴指標として、固有周期が 0.5sec. であるバイリニア 1 自由度系の最大変位と履歴吸収エネルギーの 2 指標を利用した。対象構造系と同様に剛性と初期降伏変位に 20% の一様変動を与え、1000 回の動的解析のモンテカルロシミュレーションを行うことで得られた特徴指標の結合確率密度関数の KL ダイバージェンスと、10 自由度系の最上部のノードの最大変位の確率密度関数の KL ダイバージェンスの間には図-2 のように相関性があることが分かり、提案手法の有効性が確認された。

3. 特徴指標のなす空間内における地震動の合成

(1) 合成手法の定式化

対象構造系に対し大きな影響を与える地震動の合成という問題を、確率密度関数がなす情報幾何空間内における特徴指標が大きな値をとる地震動の探索という問題として考える。

対象構造系の非線形挙動に影響を与えるように、地震動 f に微小な変化 df を与えるという過程を繰り返しながら地震動の探索を行うと、対象構造系に対する影響の獲得は、空間内において大きく距離が移動するように地震動を変化させることに相当する。このとき、1 度の探索過程における df の量に制約を加え、一定の変化量の下で最も空間内を大きく移動するような波形の変化方法を探すこととすると、これは $df = \text{const.}$ という条件の下で波形の移動距離 $D(p(f+df), p(f))$ を最大にする問題として定式化される。ただし、 $p(f)$ は地震動 f による特徴指標の確率密度関数である。

(2) 数値解析

対象構造系として、1 次モード固有周期が 1.0sec. であるバイリニア 10 自由度系を想定し、1 次モードに対応するバイリニア 1 自由度系の最大変位と履歴吸収エネルギーの 2 値を特徴指標とした。

df の制約として波形の持つパワーの増分値に制約を与えた。最適な df を解析的に求めることは難しいため、いくつかの候補の中から $D(p(f+df), p(f))$ を最大にする df を採用することとした。また、波形の変化 df はウェーブレット変換によって与え、表-1 に示す条件の下で波形合成を行った。図-3 に、解析に用いた初期波形と合成後の波形を示す。

合成された波形は、ランダムな探索を行った波形などに比較して対象構造系の応答が大きな値をとることが確認された。また、探索の際、合成波形は探索の段階に応じて獲得する時間周波数成分が変化しており、波形の強度に応じて獲得する成分が変化していることが分かった。

4. まとめ

本稿は、対象構造系に与える影響の観点から地震動を記述する手法を提案し、同手法に基づいた波形合成の手法を提案した。今後は適用事例の蓄積を行う予定である。

参考文献

- 1) 甘利俊一、長岡浩司:情報幾何の方法 岩波講座 応用数学, 岩波書店, 1993
- 2) S.Amari:Natural Gradient Works Efficiently in Learning, *Neural Computation* 10, pp.251-276, 1998

表-1 波形合成の解析における諸条件

変化させる時間領域	5.0 - 20.0 [sec.]
変化させる周波数領域	0.3 - 1.2 [Hz]
パワー増分の制約	初期値の 2 %
1 ステップにおける波形候補数	30 波
波形探索の総ステップ数	50 回

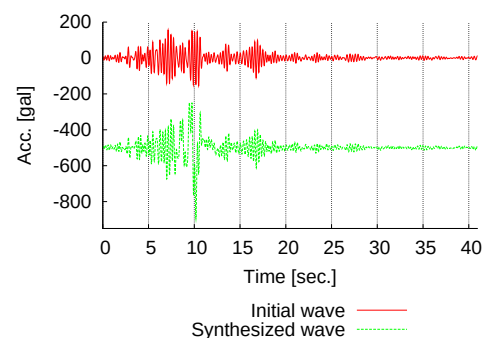


図-3 初期波形と合成波形の比較