

2011 年東北地方太平洋沖地震に伴う非線形応答スペクトル

香川大学工学部 フェロー会員 ○野田 茂

香川大学大学院

岡崎真友子

1. まえがき

2011 年東北地方太平洋沖地震では強震動が観測された結果、構造物の耐震性能強化が求められるようになった。そこで本研究では、代表的な非線形復元力特性を有する 1 質点系を対象に、降伏震度、リダクションファクター、塑性率、損傷指標の目標値を満足する、種々の非線形応答スペクトルを求め、地震動や各種パラメータの相違が非線形応答特性に及ぼす影響の感度分析を行う。

2. 入力地震動が非線形応答スペクトルに及ぼす影響

解析には、2011 年東北地方太平洋沖地震で観測された 3 地点（茨城県日立市、岩手県一関市、宮城県仙台市）の K-net 観測加速度記録 NS 成分を用いる。最大加速度は茨城波形で 1.6G、岩手波形で 1.5G、宮城波形で 1.0G ほどである。全体波形の揺れは 3 分ほど続く。

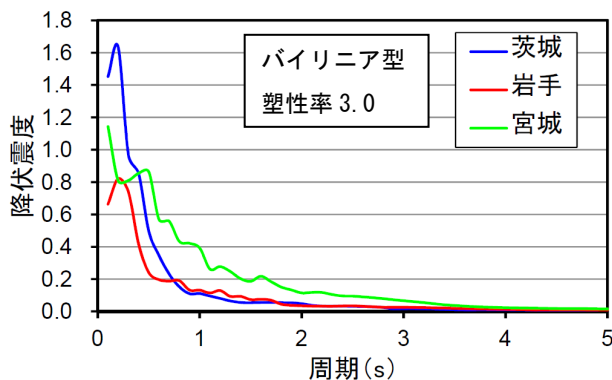


図 1 3 地点での所要降伏震度スペクトル

図 1 には、バイリニア型履歴復元力特性を対象に、所定の塑性率 3.0 を与えたときの所要降伏震度スペクトルを示す。極短周期側で降伏震度が 1.0 を超えて卓越しているが、東北地方太平洋沖地震の特徴である。その帯域における茨城波形の弾性系加速度応答スペクトルは岩手波形、宮城波形の 2 倍ほどあったが、降伏震度スペクトルの周期変化は若干異なる挙動を呈している。岩手波形の最大加速度 1.5G はスパイク的に生じたものであり、スパイク波を除くと、たかだか 0.5G で、非線形応答の面でもキラーパルスにはなっていない。宮城波形もスパイク波を除くと、0.7G の加速度となるが、弾性時よりもやや短周期側の周期以上で他の 2 波よりも非線形スペクトルが大きい。

茨城波形の強震部はほぼ単発的であったが、岩手波形、宮城波形には震源過程のマルチプルショックに伴う 2 つ

のフェーズが顕著に見られた。そこで、2 つのアスペリティ破壊が出現した宮城波形を対象に、図 2 に示すように、前半部（第一波）と後半部（第二波）のフェーズを切り出して全体波形の所要降伏震度スペクトルと比較した。復元力特性と塑性率の目標値は図 1 の解析条件と同じである。

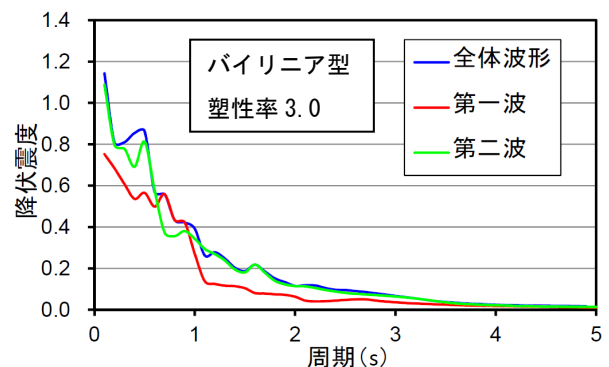


図 2 宮城波形分割による所要降伏震度スペクトル

一部の周期帯域で第一波の降伏震度スペクトルが全体波形のスペクトルと重なっているが、他の周期帯では第二波と全体波形のスペクトルがほぼ等しい。どちらのフェーズが非線形応答に卓越するかは、復元力特性、目標値、非線形応答の指標によって異なるが、この場合には第二波の影響が支配的であるといえる。

3. 履歴復元力特性や解析パラメータが所要非線形応答スペクトルに及ぼす影響

復元力特性の相違（バイリニア、クラフ、原点指向、スリップ型）が宮城波形の所要降伏震度スペクトル（目標塑性率 3.0）に及ぼす影響は図 3 のようになる。

バイリニアとクラフ型復元力特性、原点指向とスリップ型復元力特性の降伏震度スペクトルはほぼ同様の挙動を

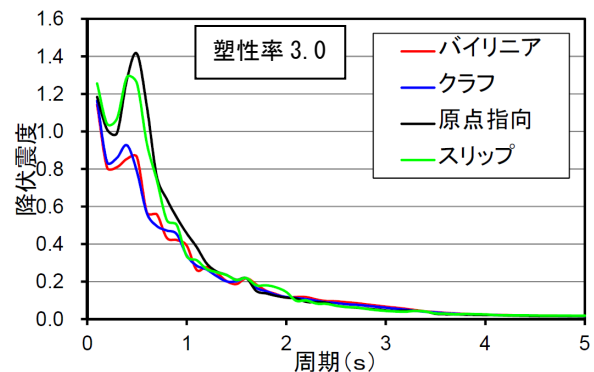


図 3 復元力特性の相違による所要降伏震度スペクトル

キーワード：東北地方太平洋沖地震 非線形応答スペクトル 履歴復元力モデル 応答指標 耐震性能評価

連絡先：香川県高松市林町 2217-20 香川大学工学部 Tel& Fax 087-864-2153

示している。後者は前者よりも大きい。これは履歴形状が影響しており、履歴ダンパーが少なくなったことが要因であると考えられる。精密な構造復元力特性のモデル化に伴う非線形応答スペクトルを耐震設計や耐震診断に役立てることが重要なことを示唆している。

宮城波形、バイリニア型履歴復元力特性を基に、所定の目標値である塑性率を変化させて所要降伏震度スペクトルを求めると、図4のようになる。

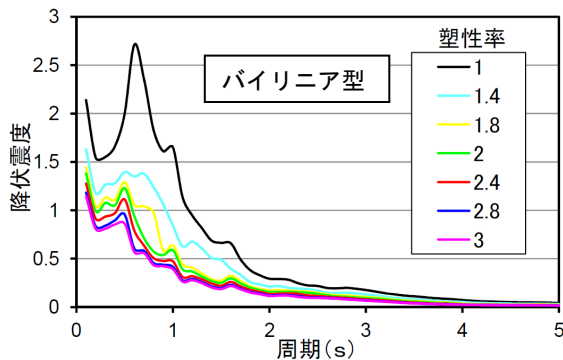


図4 所要降伏震度スペクトルの塑性率比較

弾性範囲である塑性率 1.0 の降伏震度が最も大きく、塑性率が高まるほど、降伏震度スペクトルは低下している。感度分析より、塑性率と降伏震度の関係は非線形性を呈している。塑性率が 2.4 以上になれば、降伏震度はほぼ 1.0 以下に収まる。塑性率設定においては最適な目標値を定める必要がある。

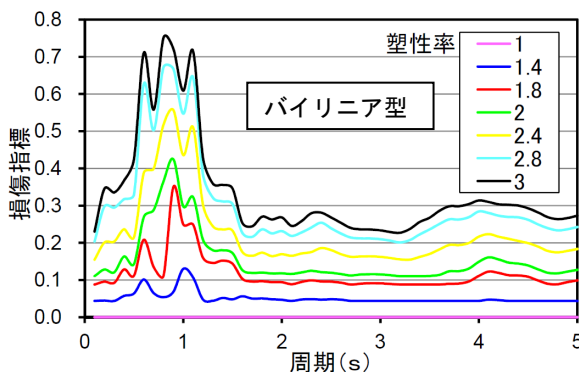


図5 損傷指標スペクトルの塑性率比較

宮城波形、バイリニア型履歴復元力特性を基に、所定の塑性率による所要損傷指標スペクトルを求めると、図5のようになる。なお、損傷指標スペクトルの計算については Bozorgnia et al.¹⁾ の定義に基づいた。

塑性率 1.0 は弾性的挙動なので、損傷指標は 0.0 となる。塑性率が大きいほど、非線形性挙動を呈するので、損傷指標は高くなる。小破の損傷を許容するならば、損傷指標を 0.25 未満に設定する必要がある。周期 1.0 秒付近で高い値を示すものの、塑性率 1.8 以下では全体的に小破に留まることがわかる。周期 1 秒前後の構造物では、塑性率が 2.0 より大きくなれば、大破 (損傷指標 0.4 以上) に至る。

損傷指標に基づく塑性率設計では塑性率目標 2.0 付近に設定することが望ましい。

図6には、宮城波形、バイリニア型履歴復元力特性を基に、所定の塑性率によるリダクションファクタースペクトルを示す。損傷指標スペクトルと同様、周期 0.5 秒から 1.7 秒範囲でリダクションファクターの反応が顕著であり、大きな値をとっている。他の周期帯ではほぼ 2 前後の一定値となる。

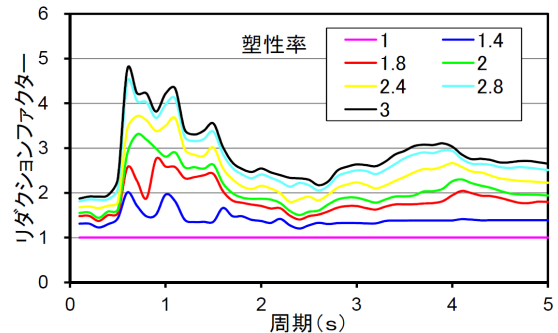


図6 リダクションファクタースペクトルの塑性率比較

図6の解析条件と同様に、リダクションファクターの目標値を基に塑性率スペクトルを求めると、図7のようになる。降伏震度スペクトルと同様、極短周期においてリダクションファクターの反応が顕著であり、かなり異常な値になる。他の周期帯では 3 前後の塑性率であり、図6のリダクションファクタースペクトルと対比関係にあり、挙動変化は妥当であると考えられる。

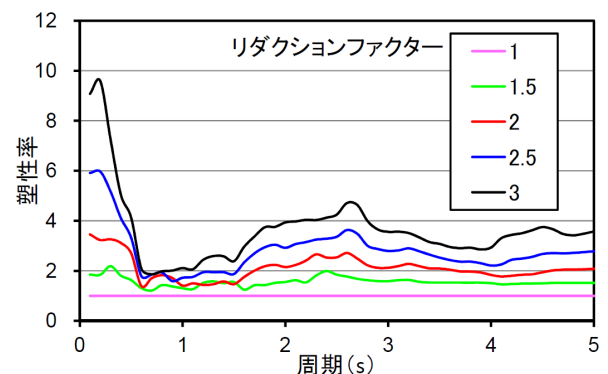


図7 リダクションファクターによる塑性率スペクトル

4. あとがき

本研究では、東北地方太平洋沖地震記録を基に、応答指標の目標値を満足する、降伏変位、耐力、エネルギー量などに関連した各種の非線形応答スペクトルを求めた。今後は、耐震性能を合理的に評価する指標の検討のため、より多くの精緻な分析が必要である。

参考文献

- 1) Bozorgnia, Y. and Bertero, V.V. : Damage spectra: Characteristics and applications to seismic risk reduction, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 129, No. 10, pp. 1330-1340, October 2003.