

液状化時の橋梁耐震設計に用いる 加速度応答スペクトルに関する検討

小林 寛¹・田村 敬一²

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ研究員（〒305-8516 つくば市南原1-6）

²正会員 工博 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ上席研究員（〒305-8516 つくば市南原1-6）

1. はじめに

同一の基盤地震動が入力した場合、液状化が生じた地盤では液状化が生じない地盤と比較して、一般には地表面における加速度が減少すると考えられる。これは液状化の発生により地震時せん断応力が地表面へ伝わりにくくなるためである。しかし、地盤の加速度自体は減少する傾向があるものの、液状化にともない地盤の振動が長周期化することにより長周期領域における構造物の応答加速度が増幅すること

も考えられる。このように、液状化を考慮した場合の構造物の応答特性は複雑でまだ十分に解明されているとはいえず、液状化時の構造物の照査に用いる設計地震力の評価については課題が残されている。現行の技術基準類においても液状化時の設計地震力については、液状化が生じない場合の設計地震力と同一にしているものがほとんどである。

このような背景から、本研究では、液状化時の地震動特性および構造物の応答特性の定量的な把握を目的として、種々の液状化地盤を対象とした有効応

[illegible]

図-1 地震応答解析に用いた地盤モデル

力解析を行い、液状化を考慮した地表面における加速度応答スペクトルを算出した。この解析結果と別途行った等価線形化解析結果との比較を行い、液状化時の加速度応答スペクトルについて検討を行った。

2. 地震応答解析の概要

地盤種別、地盤の特性値 T_G 、液状化指数 P_L 等の地盤条件を考慮し、図-1に示すような液状化地盤モデルを設定し、地盤モデルの基盤面に対して種々の基盤入力地震波形を入力し地震応答解析を行った。地盤モデルの構成は実際に存在するものを想定し、表層地盤厚を10mから50mの間で変化させ、平均N値7の液状化砂質土層、平均N値30の非液状化砂質土層および平均N値8の粘性土層を組み合わせることとした。また、基盤面としては $V_s=300\text{m/s}$ の地盤を想定した。その結果、道路橋示方書¹⁾のⅡ種地盤相当のもの8ケース、Ⅲ種地盤相当のもの10ケースの計18ケースの地盤モデルを設定した。

上記地盤モデルに対し、プレート境界型の大規模な地震を想定した地震動（以下、プレート境界型地震動）に相当する波形として図-2に示すような港湾

の施設の技術上の基準²⁾で規定されている十勝沖地震八戸基盤入射波形（S-252NSBase）と鉄道構造物等設計標準³⁾で規定されている基盤地震動波形のうちスペクトルⅠ適合波（以下、JR基盤地震動波形（スペクトルⅠ適合波））、また、内陸直下型地震を想定した地震動（以下、内陸直下型地震動）に相当する波形として兵庫県南部地震による東神戸大橋基盤入射波形と鉄道構造物等設計標準³⁾で規定されている基盤地震動波形のうちスペクトルⅡ適合波（以下、JR基盤地震動波形（スペクトルⅡ適合波））の基盤入力地震波形を入力した。なお、東神戸大橋基盤入射波形は、東神戸大橋でのGL-35.0mにおける観測波形をGL-68.5mの基盤面まで等価線形化法を用いて引き戻し、その位置を解放基盤面と仮定して算出した波形である。本研究では、液状化を考慮した解析を行うことを目的とすることから、地震応答解析手法については、過剰間隙水圧の上昇、消散など有効応力の変化が考慮できる有効応力解析法を用いた。また、有効応力解析のコードとしては、物性値の設定や解の安定性を考慮してFLIP⁴⁾を用いた。

3. 液状化を考慮した加速度応答スペクトルの算出

液状化を考慮した加速度応答スペクトルの算出方法を図-3に示す。2.で実施した有効応力解析から得られた地表面加速度時刻歴から任意の固有周期を有する1質点系の応答加速度時刻歴を算出する。有

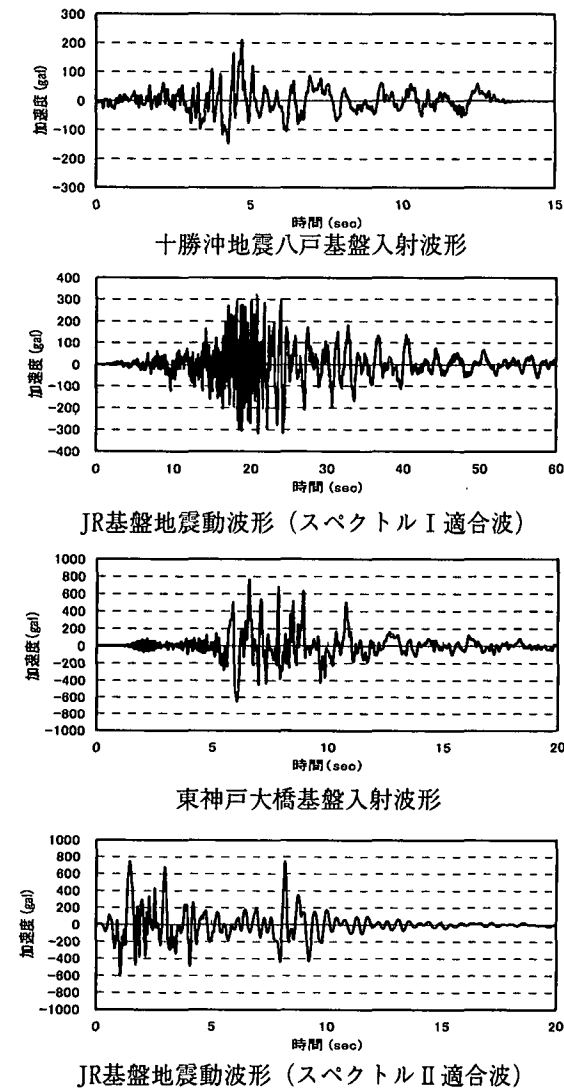


図-2 基盤入力地震波形

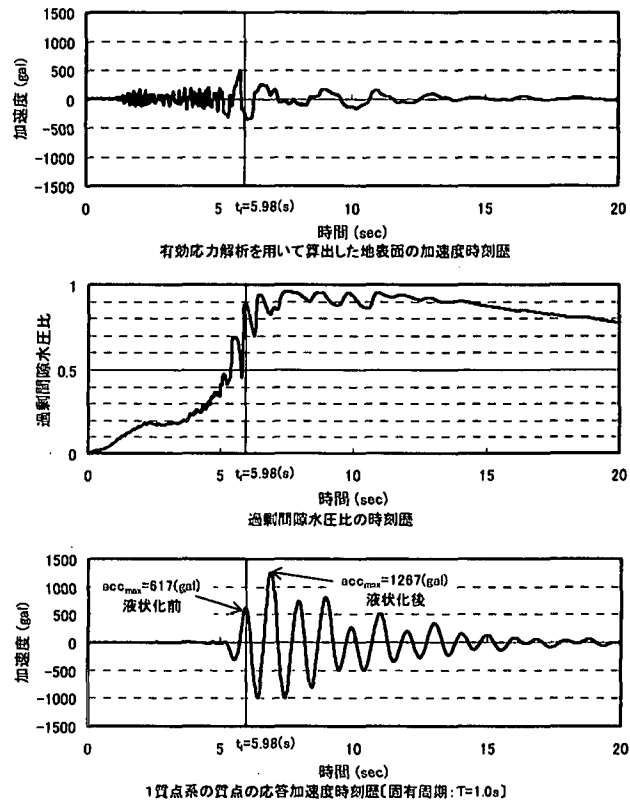


図-3 液状化を考慮した加速度応答スペクトルの算出方法

効応力解析から得られた液状化層の最上部における過剰間隙水圧比の時刻歴について過剰間隙水圧比が0.9以上に達した時刻 t_l を液状化が生じた時刻とみなし、 t_l 以降における質点の応答加速度の最大値を加速度応答スペクトルと定義した。この手法を用いることにより、液状化前後の応答波形の連続性を考慮することが可能となり、液状化が生じる前の地盤の振動の影響を含めた液状化後の加速度応答スペクトルを算出することができる。

4. 等価線形化解析との比較

液状化が生じないと仮定した場合の加速度応答スペクトルから液状化を考慮した場合の加速度応答スペクトルを評価することを目的に、等価線形化解析と有効応力解析の比較を行った。ここで、等価線形化法は過剰間隙水圧の上昇、消散現象による有効応力の変化にかかわらず土の応力～ひずみ関係は一定であるといった仮定に基づいた地震応答解析手法であることより、液状化を考慮しない場合の解析手法とみなし、液状化を考慮した地震応答解析手法である有効応力解析と区別した。

具体的には2.で行った有効応力解析と同一の地盤モデルを用いて等価線形化解析を行い、地表面における加速度応答スペクトルを算出した。その結果をもとに有効応力解析結果と等価線形化解析結果の比（加速度応答スペクトル比 R_s = 有効応力解析による液状化後の加速度応答スペクトル / 等価線形化解析による加速度応答スペクトル）を固有周期ごとに算出した。なお、ここで加速度応答スペクトル比の算出対象とした固有周期は $T=0.7, 1.0, 1.2, 1.6$ 、

2.0、2.4、3.0(s)である。加速度応答スペクトル比 R_s を算出することにより、液状化が生じないと仮定した場合の加速度応答スペクトルを用いて液状化を考慮した場合の加速度応答スペクトルを評価することができる。

図-4に基盤入力地震波形のタイプ別に全地盤モデルの加速度応答スペクトル比の頻度分布の例（ $T=2.4s$ ）を示す。図中の点は確率密度分布を表している。固有周期ごとのばらつきを見ると、標準偏差 σ は0.2～0.35の範囲を示した。また、確率密度分布は一部の固有周期では異なるものの、比較的、正規分布に近い形状を示した。これら加速度応答スペクトル比の変動を考慮すると、液状化を考慮した場合の加速度応答スペクトルを液状化が生じないと仮定した場合の加速度応答スペクトルから合理的かつ安全側に算出するには、平均値 μ + 標準偏差 σ を評価指標の一つとすることは妥当であると考えられる。

5. 液状化時における地表面加速度応答スペクトルの検討

図-5にプレート境界型地震動と図-6に内陸直下型地震動を入力した場合の加速度応答スペクトル比の平均値 μ および平均値 μ + 標準偏差 σ をプロットした。これを見ると両者とも平均値では、液状化を考慮しない場合の加速度応答スペクトルに比べて0.6倍程度に低減しているが、傾向としては周期が2～2.4sを超えたあたりからスペクトル比が1.0に近づいている。平均値 μ + 標準偏差 σ の場合は、両者とも周期が2sより短い範囲では0.9程度の加速度応答スペクトル比だが、2sより周期が長い部分においてスペクトル比が1.0をこえる。特にプレート境界型地震動入力では2.4s以上、内陸直下型地震動入力では2s以上の範囲で応答スペクトル比が1.0をこえており、液状化を考慮しない場合の加速度応答スペクトルよりも大きくなる可能性があることを示している。これらの応答スペクトル比を直線で結んだものが式(1)～(4)である。これら式から算出される加速度応答スペクトル比 R_s を用いることにより、液状化が生じないと仮定した場合の加速度応答スペクトルから液状化を考慮した場合の加速度応答スペクトルを評価することができる。

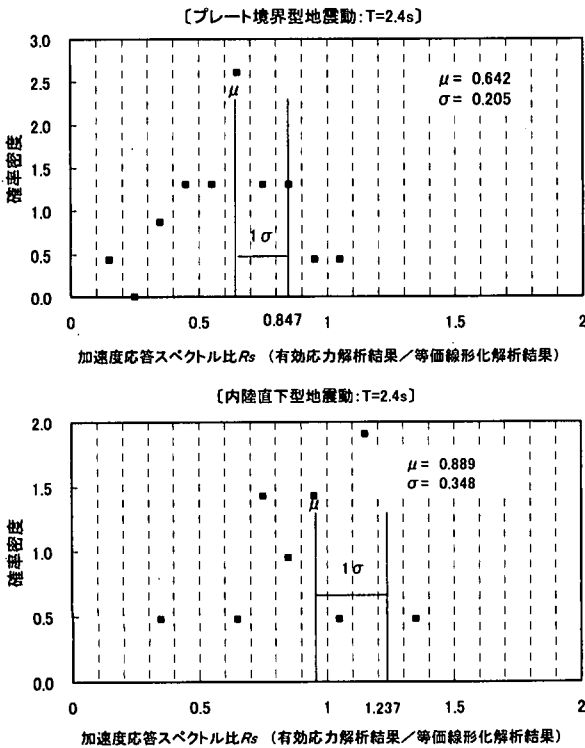


図-4 加速度応答スペクトル比の頻度分布

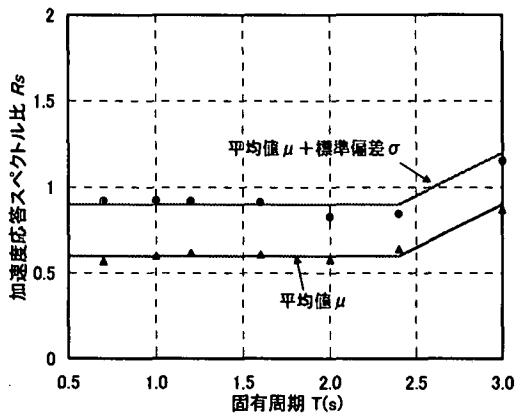


図-5 加速度応答スペクトル比の周期分布
(プレート境界型地震動)

(1) プレート境界型地震動

・ 平均値 μ

$$R_s = \begin{cases} 0.6 & (T < 2.4) \\ 0.5(T - 2.4) + 0.6 & (2.4 \leq T < 3.0) \\ 0.9 & (3.0 \leq T) \end{cases} \quad \dots (1)$$

・ 平均値 μ + 標準偏差 σ

$$R_s = \begin{cases} 0.9 & (T < 2.4) \\ 0.5(T - 2.4) + 0.9 & (2.4 \leq T < 3.0) \\ 1.2 & (3.0 \leq T) \end{cases} \quad \dots (2)$$

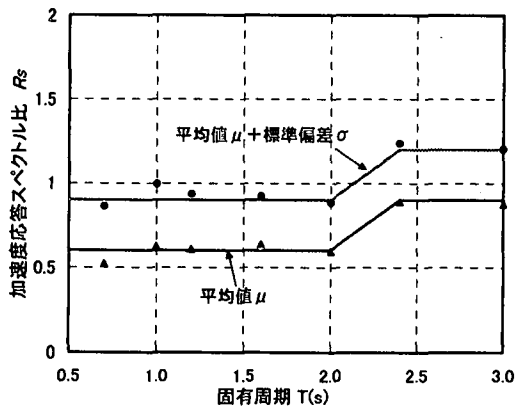


図-6 加速度応答スペクトル比の周期分布
(内陸直下型地震動)

(2) 内陸直下型地震動

・ 平均値 μ

$$R_s = \begin{cases} 0.6 & (T < 2.0) \\ 0.75(T - 2.0) + 0.6 & (2.0 \leq T < 2.4) \\ 0.9 & (2.4 \leq T) \end{cases} \quad \dots (3)$$

・ 平均値 μ + 標準偏差 σ

$$R_s = \begin{cases} 0.9 & (T < 2.0) \\ 0.75(T - 2.0) + 0.9 & (2.0 \leq T < 2.4) \\ 1.2 & (2.4 \leq T) \end{cases} \quad \dots (4)$$

6. まとめ

本研究では、有効応力解析を用いて液状化を考慮した場合における加速度応答スペクトルの算出方法の提案を行うとともに、算出結果を用いて液状時における加速度応答スペクトルについて検討を行った。その結果、 $T=0.7 \sim 3.0$ sの固有周期領域において加速度応答スペクトルが液状化を考慮しない場合と比較して低減する傾向が得られた。この傾向は、 $T=2.0$ s程度までは一律に低減しているものの、 $T=2.0$ s～ 2.4 sを越えると低減割合が小さくなっていた。さらに、加速度応答スペクトル比の算出結果には変動が認められたため、平均値 μ + 標準偏差 σ を考えた場合、 2 sを越えるような長周期領域において液状化を考慮しない場合の加速度応答スペクトルを上回る可能性があることを示した。これらの結果を踏まえて、液状化が生じないと仮定した場合の加速度応答スペクトルから液状化を考慮した場合の加速度応答スペクトルを推定する手法を提案した。今後は、有効応力解析のパラメータ設定及び解析精度、加速度応答スペクトルに及ぼす液状化程度の影響等について検討が必要である。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編，社団法人日本道路協会，1996
- 2) 港湾の施設の技術上の基準・同解説，社団法人日本港湾協会，1999.4
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説－耐震設計，運輸省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編，1999.10
- 4) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, Soils and Foundations, Vol.32, No 2, pp. 1-15, 1992