

ランダム振動論に基づく不整形性地盤箇所の非線形応答スペクトルの補正

鉄道・運輸機構 正会員 ○石川太郎, 曾我大介, 非会員 青柳広樹
 鉄道総合技術研究所 正会員 坂井公俊, 室野剛隆

1. はじめに 工学的基盤面や地表面の傾斜を有する不整形地盤箇所では、鉛直下方から伝播する直達波（実体波）と2次的に発生した水平方向伝播波（表面波）とが干渉し、局所的に地震動の増幅が発生する事が知られている。過去に発生した地震では、この影響によると考えられる構造物の被害が報告されており（例えば¹⁾、鉄道構造物の耐震設計²⁾ではこの影響を適切に考慮した上で地表面地震動を評価している。具体的には、不整形地盤箇所での地震動を評価する方法として、2次元、3次元の非線形有限要素解析を原則的な手順としている。この手法は精度が高いものの、地点ごとの詳細な地盤物性の入手、広域にわたる地盤のモデル化、解析実行、結果の解釈等が必要であるため、線状土木構造物の設計実務において実施が困難な場合もある。

また簡易な手法として、水平成層仮定での地表面地震動を補正する手法（以下、従来法）も用意されている²⁾。この手法では地盤の動的解析が不要であるとともに、一般的な調査から得られる地盤物性値のみから評価可能であることから、前出の FEM 解析と比較すると簡易に実施可能となる。しかしながら、整備新幹線の橋りょう・高架橋の耐震設計では、静的非線形解析と所要降伏震度スペクトルを用いた方法が一般的に用いられているものの、従来法によって得られる結果は時刻歴波形であり、構造物の応答値を算定する際には、動的解析を実施する必要が生じる。そのため、従来法を用いた場合にも構造物応答値の算定という観点では、作業量が多少増加する。

そこで本検討では、局所的な地震動の増幅を考慮して所要降伏震度スペクトルを直接補正することで、水平成層地盤箇所とほぼ同様の手順で構造物の地震応答値を算定可能な手法を提案する。

2. 所要降伏震度スペクトルの補正 従来法では、基盤の傾斜角、高低差、せん断弾性波速度、単位体積重量といった情報を基に周波数領域における補正係数 η を式(1)に従って算定し、これを不整形地盤の影響を無視した地震動のフーリエスペクトルに乗ずることで、不整形地盤の影響を考慮した地震動を算定している。

$$\eta(\omega, x) = \{1 + \alpha(x) \cdot \beta \cdot e^{-i \Delta t \cdot \omega}\} \quad (1)$$

ここに、 $\alpha(x)$ ：水平方向伝播波の振幅の補正係数、 β ：低振動数に対する補正係数で $\omega > \omega_g$: $\beta=1$, $\omega \leq \omega_g$: $\beta=\omega/\omega_g$, (ω_g ：表層地盤の固有円振動数) Δt ：建設地点 $x(m)$ までの水平方向伝播波の到達遅れ時間(秒)である。また、補正係数の絶対値 $|\eta(\omega, x)|$ が振幅の補正倍率を、偏角 $\arg \eta(\omega, x)$ が位相の補正量を与える。既往の検討で、杭基礎と周辺地盤との動的相互作用による入力損失を簡易に考慮するために、ランダム振動論に基づき所要降伏震度スペクトルを補正する方法が提案されている³⁾。本検討では、有効入力係数の代わりに式(1)の補正係数 η を適用することで、所要降伏震度スペクトルを直接補正することを試みる（以下、提案法）。

$$R(\omega_0, h, \mu) = \sqrt{\frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}(\mu), h_{eq}(\mu), \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_{eq}(\mu), h_{eq}(\mu), \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}} \quad (2)$$

ここに、 $G_a(\omega)$ は補正前の地震動のパワースペクトル密度関数、 $H_a(\omega_0, h, \omega)$ は1自由度系の絶対加速度の伝達関数である。また、 ω_0 ：構造物の固有周期、 μ ：応答塑性率、 h ：減衰定数、 ω_{eq} ：構造物の等価固有円振動数、 h_{eq} ：構造物の等価減衰定数である。

3. 従来法による地震動の補正例 図1に示す不整形地盤を対象として、図中の対象地点で設計地震動の補正を行う。式(1)の補正係数を算定した結果を図2に示す。不整形地盤の影響を考慮する前の時刻歴波形を図3に橙色の線で、この波形を従来法により補正した結果を青色の線で示す。また、補正前後の地震動の弾性加速度応答スペクト

キーワード 不整形地盤, 所要降伏震度スペクトル, ランダム振動論, 耐震設計

連絡先 〒231-8315 神奈川県横浜市中区本町 6-50-1 横浜アイランドタワー 27F TEL045-222-9082

ルによる比較を図4に示す。補正後の時刻歴波形は補正前と比較して最大加速度は小さくなっているものの、構造物応答は周期によっては大きくなる場合もあることがわかる。

4. 提案手法の有効性 2.で示した提案法により、所要降伏震度スペクトルの補正を行うとともに、従来法による結果と比較することで、提案手法の有効性を検証する。ここで従来法のスペクトルは、補正後の時刻歴波形を用いた1自由度系の非線形応答解析によって評価している。得られた所要降伏震度スペクトルを図5に示す。また、同図には補正前の地震動の所要降伏震度スペクトルも併記している。さらに図6には補正前後の所要降伏震度の比率を示す。これらの結果から、従来法/補正前の比率は、提案法/補正前の比率によって適切に表現されており、提案法の有効性が確認できる。

5. まとめ 本稿ではランダム振動論に基づいて、不整形地盤の影響を考慮した所要降伏震度スペクトルの補正方法を提案した。試算の結果、提案法により算定した応答値は従来法を適切に表現できている。また、従来法では補正後の地震動に対して応答値を算定する際に動的解析を行う必要があったが、提案法では一般的な鉄道橋梁・高架橋とほぼ同様の手順により応答値を算定することが可能である。

参考文献 1) 田中俊作, 蔣建群, 西村昭彦, 稲葉紀昭: 北海道南西沖地震による鉄道高架橋の被害解析(木戸内高架橋), 地震工学研究発表会講演概要, 23巻, pp.493-496, 1995. 2) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 2012. 3) 實地雄大, 室野剛隆: 杭基礎による入力損失効果の実務的評価手法の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp.473-482, 2017.

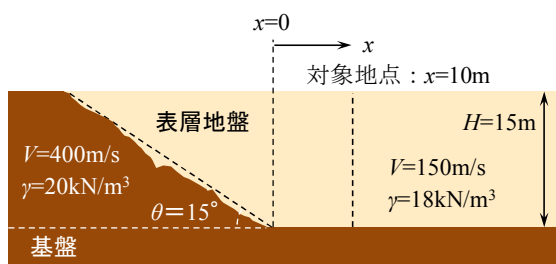


図1 対象とした不整形地盤

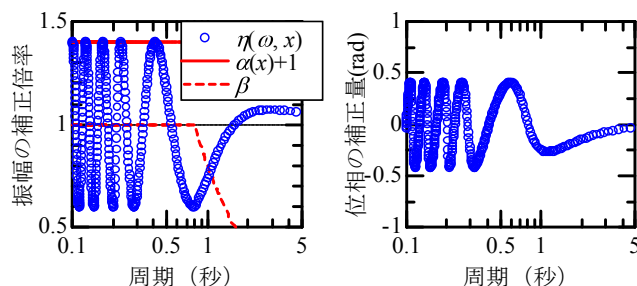


図2 不整形地盤箇所振幅、位相の補正量(従来法)

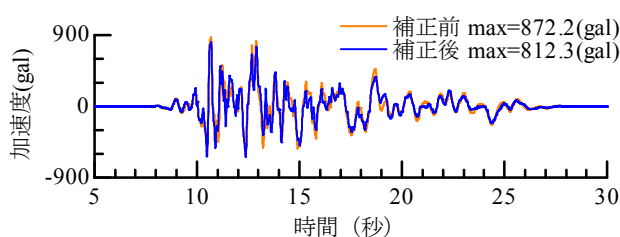


図3 不整形地盤箇所の設計地震動波形の補正結果(従来法)

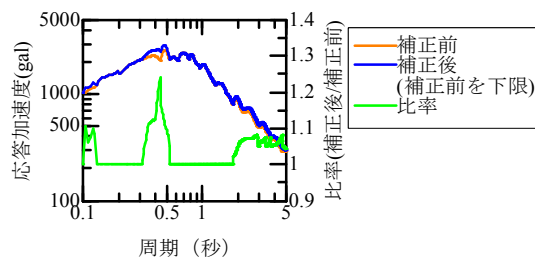


図4 弾性加速度応答スペクトル(従来法)

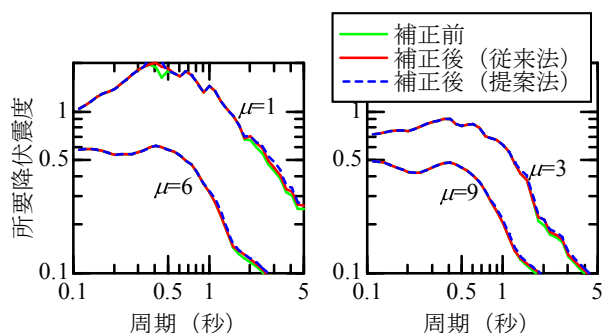


図5 補正前後の所要降伏震度スペクトル

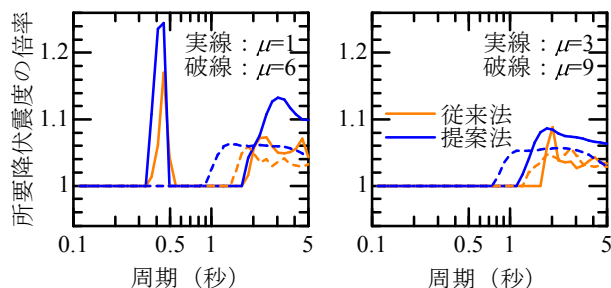


図6 補正係数R(所要降伏震度スペクトルの比率)