

不整形地盤箇所における設計地震動の簡易評価法の提案

田中 浩平* 坂井 公俊**

Proposal of a Simplified Estimation Method for Design Ground Motion in Irregular Ground

Kohei TANAKA Kimitoshi SAKAI

In this study, based on random vibration theory, the authors propose a method of directly correcting nonlinear spectrum for local seismic amplification in irregular ground. The effect of irregular ground can be estimated more simply within current design. Next, the authors conducted soil response analysis under various conditions of ground for improving the estimation of correction factor. The effects due to these conditions are estimated using the results of soil response analysis. Finally, the authors propose an estimation method for design ground motion in irregular ground, in which the effects due to various conditions are considered in the current simplified method using the damping factor of ground as an index.

キーワード：不整形地盤，設計地震動，所要降伏震度スペクトル，静的設計法，減衰定数

1. はじめに

耐震設計上の基盤面や地表面が傾斜する不整形地盤では、水平成層地盤と比較して地表面位置の地震動に局所的な増幅が見られることがある。過去の地震でも、この増幅が被災要因の1つと考えられる地点が報告されている(例えば1)~4)。鉄道構造物の耐震設計では、不整形地盤箇所は特に注意を要する地盤に該当し、局所的な増幅を考慮した地表面位置の設計地震動を算定する必要がある⁵⁾。この算定においては、各地点の地盤構造に応じて2次元もしくは3次元の有限要素法モデルを作成し、時刻歴応答解析を実施することが原則である(以下、詳細法)。この解析では各地点の不整形性を適切に考慮できるが、地点ごとに地盤構造が変動する土木構造物では、区間ごとに地点固有の地震動評価が必要となるため、設計実務における対応が難しい場合もある。

そこで、鉄道構造物の耐震設計標準⁵⁾では、地盤の不整形性の影響を簡易に考慮した地震動を算定する方法が提案されている(以下、従来法)。この手法では、上記の動的解析が不要で、モデル作成や計算の実行、結果の解釈等に要する作業が削減できるという利点がある。一方で、評価には周波数領域における地震動の補正が必要となる。

また、地盤の不整形性を考慮して地表面位置の地震動を算定した場合、詳細法と従来法のいずれの手法でも時刻歴波形が評価される。これを静的解析に基づく一般的な耐震設計において活用する場合には、別途網羅的な非線形応答値解析を実施し、所要降伏震度スペクトルを作成する必要がある。この解析は、現状の設計で一般的に実施されているものではなく、設計者が実施するハード

ルはやや高い。

そこで実務的な手法として、設計地震動に対して不整形性による局所的な増幅を考慮する場合に、従来法を基本として、構造物の動的解析を実施せずに、所要降伏震度スペクトルを直接補正できる手法を、著者の一人が提案している⁶⁾ので、2章でその概要を紹介する。これにより、不整形地盤においても通常の応答値算定法とほぼ同様の手順で、応答値を算定することが可能となる。

また、従来法の条件設定では、詳細法と比較して、地震動の補正量に影響を与える可能性があるにもかかわらず、現状では考慮されていない条件がある。そこで、従来法の適用性をさらに広げることを目的として、従来は考慮していなかった条件に対して地盤応答解析を実施することで、これらの影響を把握するとともに、従来法に導入するための手法を3章において提案する。

2. 不整形地盤箇所における所要降伏震度スペクトルの補正方法

2.1 補正方法の提案

不整形地盤箇所における局所的な増幅を考慮して、所要降伏スペクトルを直接補正する方法を提案する。ここでは、杭基礎と周辺地盤との動的相互作用による入力損失を補正する際に用いられている方法と同様のアプローチをとる。既往の検討⁷⁾において、有効入力係数の補正を行った地震動の所要降伏震度スペクトルを、ランダム振動論に基づき直接評価する方法が提案されている。本検討では、有効入力係数を不整形性による地震動の補正係数 η に置き換えることで、不整形性の補正においても、所要降伏震度スペクトルを直接補正できるようにする(以下、提案法)。

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

ランダム振動論では、パワースペクトルや実効値 (RMS) を用いて振動を取り扱うとともに、確率論的応答評価に基づきピークファクター p を求めることで、構造物の最大応答を評価する⁸⁾。実効値は、構造物応答の平均的な大きさを表す指標であり、1 自由度系の絶対加速度の伝達関数の絶対値の二乗と地震動の加速度パワースペクトル密度の積の全振動数にわたる積分値の平方根である式 (1) で表される。

$$\sigma_a(\omega_0, h) = \sqrt{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (1)$$

ここで $G_a(\omega)$ は地震動の加速度パワースペクトル密度である。また、 $H_a(\omega_0, h, \omega)$ は 1 自由度系の伝達関数であり、式 (2) の関係がある。

$$|H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 = \frac{1 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2}{\{1 - (\omega/\omega_0)^2\}^2 + 4h^2(\omega/\omega_0)^2} \quad (2)$$

ここで、 ω_0 は構造物の固有円振動数、 h は構造物の減衰定数を示す。続いて、最大加速度応答 $S_a(\omega_0, h)$ は、1 自由度系の構造物の加速度応答の実効値にピークファクター p を乗じた式 (3) で評価する。

$$S_a(\omega_0, h) = p(\omega_0, t_d) \cdot \sigma_a(\omega_0, h) \quad (3)$$

ここで、ピークファクターは、例えば Rosenbluth and Bustamante⁹⁾ によれば、構造物の固有円振動数 ω_0 や地震動の継続時間 t_d の関数で表現される。いま、補正前の設計地震動の応答スペクトルを $S_a^{org}(\omega_0, h)$ 、不整形性による補正を行った応答スペクトルを $S_a^{mod}(\omega_0, h)$ とする。このとき、2 つのスペクトルの比率 R は、式 (4) となる。

$$R(\omega_0, h) = \frac{S_a^{mod}(\omega_0, h)}{S_a^{org}(\omega_0, h)} = \frac{\sigma_a^{mod}(\omega_0, h)}{\sigma_a^{org}(\omega_0, h)} \quad (4)$$

ここで、補正前後の地震動の継続時間がほとんど変わらないと考えると、ピークファクターは補正前後で概ね一致するため、最終的にキャンセルされるとした。式 (4) に式 (1) を代入すると、比率 R は式 (5) で表すことができる。

$$R(\omega_0, h, x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot \{\eta(\omega, x)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |H_a(\omega_0, h, \omega)|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (5)$$

ここで、 $\eta(\omega, x)$ は位置 x に依存する不整形性の補正係数であり、通常の地盤調査で得られる物性値、堆積構造の情報に基き、耐震設計標準⁵⁾ に示された方法で算定する。

式 (5) は弾性応答スペクトルの比であるため、所要降伏震度スペクトルの比に変換する必要がある。そのためには式 (5) において構造物の非線形性を考慮する必要があるが、本検討ではこれを等価 1 自由度モデルにより表現する。具体的には、式 (5) における構造物の固有円振動数 ω_0 、減衰定数 h の代わりに、等価線形化法¹⁰⁾ により、ある塑性率 μ の最大点剛性から算定される構造物の等価

円振動数 ω_{eq} 、等価減衰定数 h_{eq} を用いる (式 (6)、式 (7))。

$$\omega_{eq}(\mu) = \frac{\omega_0}{\sqrt{\mu}} \quad (6)$$

$$h_{eq}(\mu) = h_0 + \frac{1}{\pi} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{\mu}} \right] \quad (7)$$

ここで、 h_0 は初期減衰である。以上より、構造物の非線形性を考慮した場合、式 (5) は式 (8) に変換される。

$$R(\omega_0, h, \mu, x) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} |(H_a(\omega_{eq}(\mu), h_{eq}(\mu), \omega))|^2 \cdot \{\eta(\omega, x)\}^2 \cdot G_a(\omega) d\omega}{\int_{-\infty}^{\infty} |(H_a(\omega_{eq}(\mu), h_{eq}(\mu), \omega))|^2 \cdot G_a(\omega) d\omega} \quad (8)$$

この式 (8) が、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係数である。

2.2 提案法の検証

2.1 節で説明した提案法の有効性を検証する。まず、従来法により補正した地表面地震動に対して、網羅的な非線形動的解析を実施することで、所要降伏震度スペクトルを算定する (検証における正解値)。続いて、式 (8) に従って算定した所要降伏震度スペクトルの比率 $R(\omega_0, h, \mu, x)$ を補正前の所要降伏震度スペクトルに乗じて、補正後のスペクトルを評価する (検証における推定値)。ここで、所要降伏震度スペクトルを算定する際の構造物の非線形特性は、全て耐震設計標準⁵⁾ に従って設定した。

検証対象とした不整形地盤の条件を図 1 に、提案法、従来法による所要降伏震度スペクトルの補正係数の比較を図 2 に示す (応答塑性率 $\mu = 1, 3, 6, 9$)。なお、これらの結果では、式 (8) の比率が 1.0 を下回る場合にはスペクトルの補正係数を 1.0 とし、補正後のスペクトルが補正前を下回らないように表示している。

図 2 から、従来法の比率は、提案法の比率と概ね同程度であることが確認でき、提案法により適切に評価されていることがわかる。また、図 2 から補正係数は応答塑性率が大きくなると小さくなることから、高い変形性能を有する構造物ほど不整形地盤の影響を受けにくくなることがわかる。

以上より、提案法の導入により周波数領域の解析と、時刻歴の非線形動的解析を行うことなく、かつ適切に地盤の不整形性による地震動増幅の影響を考慮した構造物の応答値算定が可能となることが確認された。

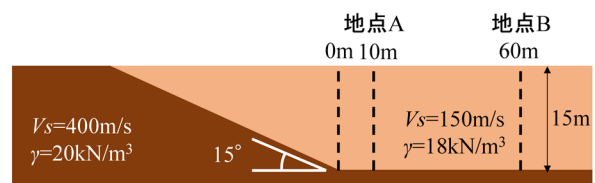
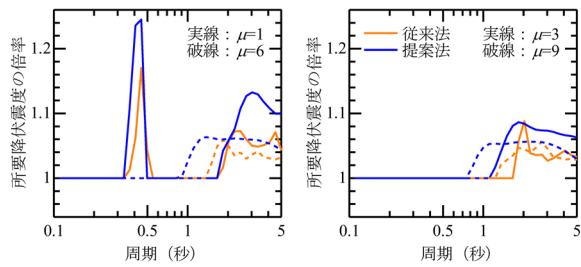
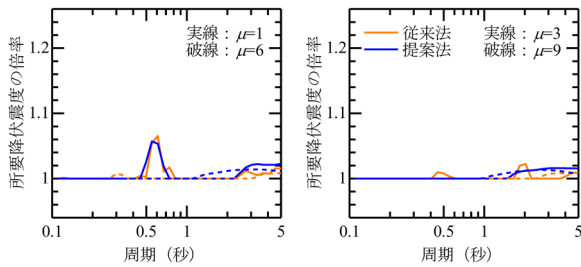


図 1 対象とした不整形地盤



(a) 地点A



(b) 地点B

図2 不整形地盤の影響を考慮する前後の地表面地震動の所要降伏震度スペクトルの比率⁶⁾

3. 不整形性の補正係数評価の高度化検討

本章では、従来法に対して、不整形地盤箇所の適用性を広げることが目的として、従来は考慮していなかった多様な条件において地盤応答解析を実施し、不整形性への影響を把握するとともに、これらの条件を簡易に考慮可能な手法を構築することを目的とする。

検討ケースを表1に示す。ケース1は従来法の条件での結果を表す基本ケース、ケース2～6は基盤上の堆積層が局所的な地震増幅に与える影響を把握するためのケース、ケース7,8は地盤塑性化の程度が局所的な地震増幅に与える影響を把握するためのケースである。さらにケース9～11は、堆積層の減衰定数を調整することでケース2～8の影響を簡易に考慮する手法を構築することを目的としたケースである。これにより、地盤中を伝わる地震波動の減衰の大小が、不整形地盤箇所における局所的な地震増幅に与える影響を整理する。また、これらのケース以外にも、傾斜角や表層地盤のせん断弾性波速度 V_s 、基盤層と堆積層のインピーダンス比を変化させた検討、さらにそれぞれの堆積層厚さに対して、地盤を非線形とした検討や、減衰を変化させた検討も実施しており、これらの条件下でも最終的な結論が変わらないことを確認している。以上の結果を整理し、不整形地盤箇所の地盤挙動をより合理的に評価する手法を構築する。

全ての解析ケースで共通する解析条件について説明する。対象地盤は、基盤層と堆積層からなる2層地盤とし、基本的な条件は図3に示すとおりとした。解析モデルは面内2次元有限要素で構築し、計算は全て大規模非線形構造解析システム FINAS/STAR¹¹⁾ を用いて実行する。

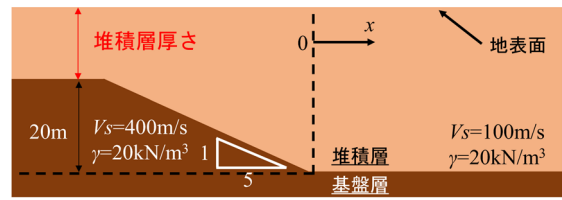


図3 構築した地盤モデルの概要

表1 解析ケース一覧

(基本ケース1に対して変化させた数値を太字で表示)

ケース	堆積層厚さ	減衰	地盤のモデル化
1	0	0.15	線形
2	5	0.15	線形
3	10	0.15	線形
4	20	0.15	線形
5	30	0.15	線形
6	50	0.15	線形
7	0	0.15	非線形 (300gal)
8	0	0.15	非線形 (1000gal)
9	0	0.05	線形
10	0	0.10	線形
11	0	0.20	線形

境界条件は、側方境界・底面境界ともに粘性境界とすることで、反射波の影響が極力小さくなるように設定した。解析の保証周波数は10Hzとしてメッシュ分割を行っている。また、不整形性の影響を把握するために、各地点で同一の地盤条件を持つ水平1次元地盤を作成し、応答解析を実施している。モデル底面に入力する地震波はL2地震動スペクトルII (G1地盤)とした。地表面位置の応答波形に対して、水平地盤と不整形地盤の増幅特性の比較を行った。モデル上の水平距離 x は、紙面右方向を正とし図3に示す原点を0m位置として表現している。

3.1 堆積層が地表面地震動に与える影響の評価

不整形地盤の上に存在する堆積層が地表面地震動に与える影響を把握する。具体的には、堆積層の厚さのみを変化させた表1のケース2～6について、水平地盤に対する不整形地盤の増幅程度を算定することで、各ケースにおける傾斜層の影響を把握する。

解析結果の例として、ケース1 (基本ケース) における図3の $x = 0m$ 地点での地表面波形を図4に示す。それぞれ上から、不整形地盤、水平地盤、不整形地盤の影響のみを抽出するために不整形地盤の地表面波形から水平地盤の地表面波形を引いた結果を示している。不整形地盤-水平地盤の結果から不整形地盤による地表面地震

動の差異が確認でき、不整形地盤で最大加速度が大きくなっていることが確認できる。

これと同様に、堆積層厚さを変化させたケース2～6で不整形地盤と水平地盤の差分の地表面加速度波形を算出した結果を図5に示す。この結果より、堆積層が厚くなるほど差分波形の加速度レベルが徐々に小さくなることが確認でき、堆積層が厚くなると不整形地盤の影響が小さくなっていることがわかる。

続いて、堆積層の影響の水平距離による変化を把握するために、図5と同様の検討を各水平距離で実施した。得られた不整形地盤－水平地盤の地表面波形の最大値を、水平地盤の地表面波形最大値で除した結果を図6に示す。これは基盤傾斜が地表面地震動に与える影響を水平距離に応じて図示したものである。いずれの水平距離においても堆積層が厚くなるほど振幅比が小さくなり、基盤傾斜の影響が小さくなる。ただし、水平距離100mを超える位置では、基盤傾斜の影響がそもそも小さいため、堆積層による低減効果もあまり見られなくなる。

従来の地震動補正手法は、堆積層厚を0mとした解析結果に基づいて構築されているため、この効果を適切に考慮することで、より合理的な不整形地盤箇所の構造物の設計が実施可能になる。

3.2 地盤非線形化が地表面地震動に与える影響の評価

地盤の非線形化が不整形地盤の地表面地震動に与える影響について検討する。具体的には、表1のケース7, 8において、地盤の構成則として塑性化を考慮可能なモデルに変更するとともに、入力波の最大加速度を300gal, 1000galとしたケースを実施することで、地盤の非線形化の程度を変化させることとした。地盤の非線形構成則はGHE-Sモデル¹²⁾を用いることとし、非線形パラメータは、多数の室内試験の結果を統合して整理した標準的な値^{13) 14)}を設定した。その他の条件は全て2.2節の解析モデルと同一である。これらの条件に基づいて地盤応答解析を実施して地表面波形を算出し、水平地盤での地表面地震動と比較することで、地盤の非線形化の

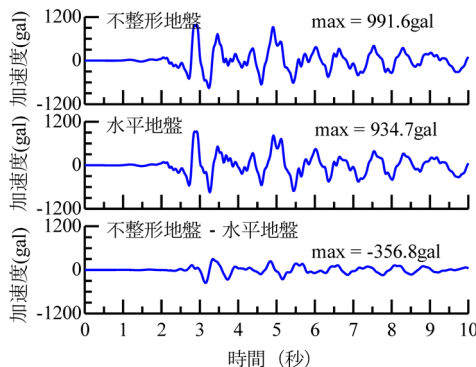


図4 x = 0m の地表面加速度波形

影響を考察した。

x = -20m 地点での水平地盤、不整形地盤の地表面加速度波形における不整形地盤の影響を確認するために、不整形地盤と水平地盤の地表面波形の差分と、これを入力波の最大加速度で正規化した結果（正規化加速度）を図7に示す。これが当該地点における不整形性による地震増幅を表す。正規化された波形を見ると、地盤の非線形化が大きい1000gal入力の場合に正規化加速度が小さくなり、不整形性の影響が小さくなることを確認できる。

続いて、各水平距離での非線形性の影響を確認するために、図7と同様の検討を各地点で実施した結果を図8に示す。これを見ると、非線形化の程度が強い条件(1000gal入力)では、ほぼすべての地点において不整形の影響がやや小さくなることを確認できる。そのため、地盤の非線形性の影響を適切に考慮することで、非線形化により不整形地盤箇所の構造物の設計が合理的に実施できる可能性がある。

3.3 地盤の減衰が地表面地震動に与える影響の評価

3.1, 3.2 節の検討を総括すると、不整形地盤上の堆積層が厚く、地盤の非線形化の程度が強いほど、また不整形箇所から離れるほど、基盤傾斜に伴う局所的な地震増幅が小さくなることを確認された。これは、堆積層厚や非線形化の影響により相対的に大きくなった地盤減衰

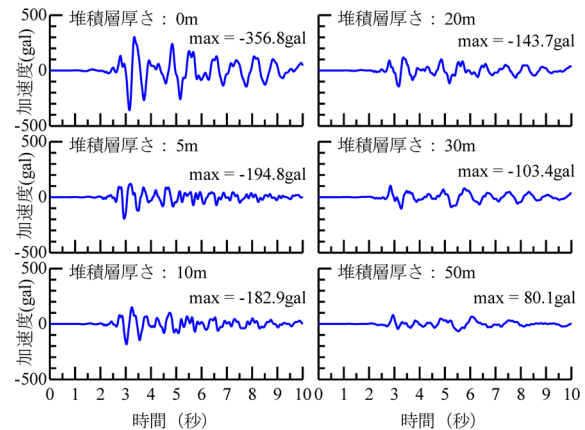


図5 不整形地盤－水平地盤の地表面波形にみる各堆積層厚さの影響 (x = 0m)

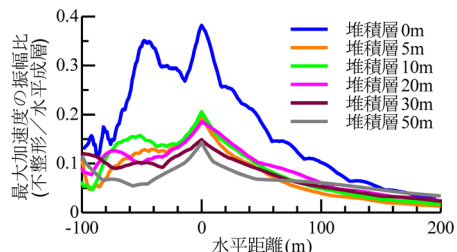


図6 堆積層厚さと地震増幅の関係

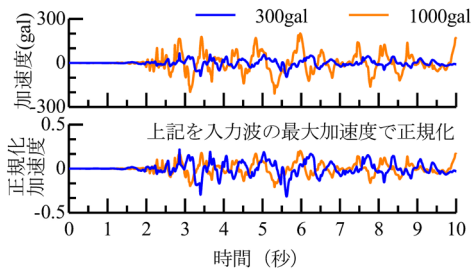


図7 塑性化の程度に応じた不整形地盤—水平地盤の地表面地震動 ($x = -20\text{m}$)

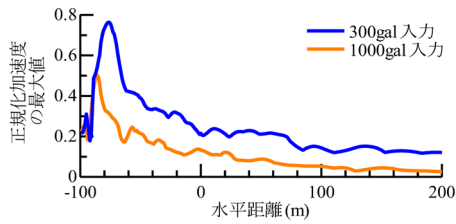


図8 入力レベルと正規化加速度の関係

により、不整形地盤から発生する表面波の影響が小さくなったことが主要な原因と考えられる。そこで本節では、地盤の減衰の変化を不整形地盤の局所的な増幅に与える影響を評価するとともに、この影響を従来の地震動補正式に減衰定数を加えることで表現し、堆積層の影響、地盤非線形の影響を間接的に考慮するための方法を提案する。

具体的には表1のケース9～11において、地盤の減衰定数のみを変化させた条件で地盤応答解析を実施し、地表面波形における不整形地盤の影響を評価する。なお、ここでは従来の補正手法と同様に周波数領域での補正方法を構築することを念頭に置き、不整形地盤による増幅の影響をフーリエ振幅スペクトルの変化で評価した。

以上の条件に基づいて算定された各地点での地表面波形に対して、不整形地盤の影響のみを抽出するために、不整形地盤のフーリエ振幅を水平地盤のフーリエ振幅で除した結果をケース1も含めて図9に示す。減衰定数が大きくなるほど、地震動の増幅倍率が1.0倍以上となる周波数帯域で、増幅倍率が小さくなっている。

続いて従来法に減衰定数の設定を考慮する方法について説明する。従来法の地震動補正⁴⁾は、地盤の減衰定数を $h = 0.15$ と設定している。そこで、 $h = 0.15$ のフーリエ振幅比 β を1とした場合に、その他の減衰定数におけるフーリエ振幅比 β を各水平距離で読み取り、ケースごとでの結果を減衰定数ごとにプロットした結果を図10に示す。この結果に式(9)で示される関係を当てはめることで、減衰定数ごとの平均値の傾向を適切に捉えていることが確認できる。

$$\beta = \frac{0.15}{h} \quad (9)$$

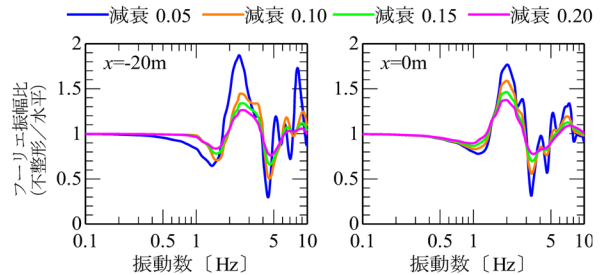


図9 各減衰定数におけるフーリエ振幅スペクトル比 ($x = -20, 0\text{m}$)

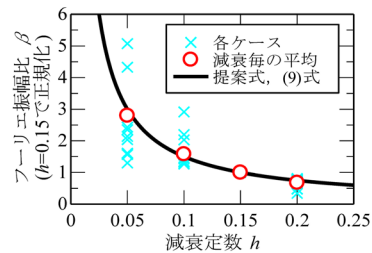
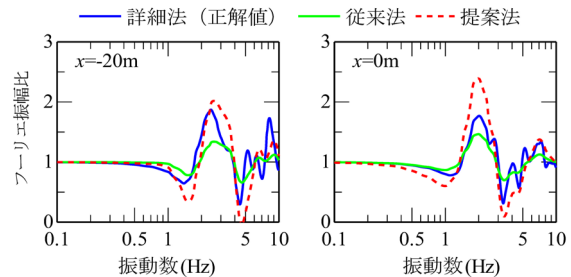
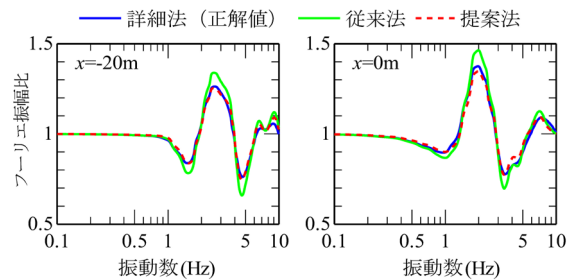


図10 各地点の増幅の影響との比較



(a) 減衰定数 $h = 0.05$ の場合



(b) 減衰定数 $h = 0.20$ の場合

図11 各手法における増幅倍率の比較結果

また、上記で説明した減衰定数の導入方法の適用性を確認するために、表1のケース9, 11を対象とした条件において、有限要素法解析から評価した不整形地盤の増幅倍率(詳細法)と、 $h = 0.15$ の不整形地盤の増幅倍率(従来法)、従来法の補正係数に式(9)で評価された β を乗じることで補正をした増幅倍率(提案法)を比較した結果を図11に示す。これを見ると、従来法では、 $h = 0.05$ の条件(図11(a))では過小評価、 $h = 0.20$

の条件（図 11(b)）では過大評価となるが、提案法を用いることで、減衰定数の大小によらず、増幅の山谷の値を適切に表現できていることが確認できる。

以上の検討を整理すると次の通りである。3.1 節、3.2 節の結果から、堆積層厚や非線形性による基盤傾斜の地震増幅効果の低減効果を定量的に評価できた。また、本節ではこれらの低減効果と減衰定数の関係を式 (9) により整理するとともに、従来の地震動補正手法において減衰定数を考慮できるようにした。よって、堆積層厚や非線形性による影響を減衰定数により表現することができれば、従来法でもこれらの条件を考慮した合理的な地盤挙動の評価、地表面設計地震動の評価が可能となる。

4. まとめ

本検討では、設計地震動に対して不整形性による局所的な増幅を考慮する場合に用いられている耐震設計標準記載の方法（従来法）を基本として、実務的な適用性を向上するための補正手法やより詳細な条件を考慮した合理的な補正係数を評価する手法を提案した。

はじめに、表層地盤の堆積構造、せん断弾性波速度 V_s 、単位体積重量 γ といった通常の地盤調査で得られる情報を基に、ランダム振動論に基づき所要降伏震度スペクトルを直接補正する方法を提案した。さらに、本手法の有効性を確認するために、仮定した不整形地盤箇所における試算を実施した。その結果、いずれの応答塑性率においても、従来法による所要降伏震度スペクトルと概ね一致する結果となり、提案法の有効性を確認した。

続いて、不整形地盤箇所の補正係数評価の高度化を目的として、多様な地盤条件を想定した地盤応答解析を実施した。その結果、不整形地盤の上の堆積層が厚く、地盤の非線形挙動の影響が強いほど、不整形地盤による地震増幅の影響が小さくなることを確認した。これらの効果を従来法に導入するために、地盤の減衰定数を指標とした不整形地盤位置の地震動補正手法の提案を行い、有効性を確認した。以上から、堆積層厚や非線形性による影響を減衰定数で表現することができれば、従来法においてもこれらの条件を考慮した補正係数を評価できる。

今回提案した 2 つの手法をそれぞれ従来法に導入することで、不整形地盤箇所における設計地震動をより実務的かつ合理的に設定することができる。

文献

- 1) 棚村史郎, 西村昭彦, 井上章彦, 丹生春雄: 鉄道高架橋の震害と原因の推定 (その 1), 地震工学研究発表会講演概要, 第 20 巻, pp.13-16, 1989
- 2) 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, 第 23 巻, pp.493-496, 1995
- 3) 蔣建群, 田中俊作, 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 (第三建高架橋), 地震工学研究発表会講演概要, 第 23 巻, pp.489-492, 1995
- 4) 菊入崇, 室野剛隆, 永妻真治, 西村昭彦: 局所的な地盤条件が鉄道高架橋の被害に与える影響について, 第 24 回地震工学研究発表会講演論文集, 1997
- 5) 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
- 6) 石川太郎, 坂井公俊, 室野剛隆, 西恭彦, 曾我大介, 青柳広樹: ランダム振動論に基づく不整形箇所の所要降伏震度スペクトルの補正, 鉄道工学シンポジウム論文集, 第 23 号, pp.171-178, 2019
- 7) 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
- 8) Kiureghian, A.D.: A response spectrum method for random vibration analysis of MDF systems, Earthquake Engineering & Structural Dynamics, Vol.9, No.5, pp.419-435, 1981.
- 9) Rosenbluth, E., and J.I.Bustamante: Distribution of structural response to earthquakes, Journal of the Engineering Mechanics Division, Vol.88, No.3, pp75-106, 1962.
- 10) 柴田明徳: 最新版耐震構造解析, pp.127-129, 森北出版, 1981
- 11) Jin C., Chiba T., Hasegawa Y., Matsumoto I., Nakamura H.: Evaluation of parallel version of nonlinear FEM solver FINAS, Proceedings of Computational Engineering Conference, Vol.13, 2008.
- 12) 室野剛隆, 野上雄太: S 字型の履歴曲線の形状を考慮した土の応力～ひずみ関係, 第 12 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.494-497, 2006
- 13) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第 20 回土質工学研究発表会, pp.539-542, 1985
- 14) 野上雄太, 室野剛隆: S 字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 第 30 回土木学会地震工学研究発表会論文集, 2009