

空間相関を考慮した地盤固有周期の面的推定手法の提案

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 ○田中 浩平

(公財) 鉄道総合技術研究所 正会員 坂井 公俊

1. はじめに

地震時の表層地盤の地震増幅特性を把握する際に重要なパラメータとして地盤の固有周期がある。鉄道構造物の耐震設計では、ボーリング調査結果(標準貫入試験やPS検層など)から評価する地盤の固有周期から、その地点の地盤種別や耐震設計に用いる設計地震動を設定する¹⁾。鉄道や道路のような連続する線状構造物は、一連の構造物において表層地盤の地震増幅特性が変動する可能性があるが、調査できるボーリング間隔は数百メートル間隔程度に限られている。

地盤の固有周期を面的に推定する方法として、一般的な地形効果(微地形区分や標高など)をパラメータとして構築した経験式がある²⁾。この経験式は、全国を対象として作成した簡便式であるため、地域ごとの特性やより詳細な地形変動を表現できない。そこで、面的な固有周期の評価精度を向上するために、経験式で評価した周期を、その周辺のボーリング調査結果から評価した周期を用いて更新する方法が考えられる。本論文では、既報³⁾で構築された空間相関モデルにより、ボーリング調査結果を活用した固有周期の面的推定手法を提案し、その妥当性を検証する。

2. 提案手法の概要

図1に評価手法の概要を示す。はじめに、図1(a)に示すように経験式²⁾により各メッシュにおける平均値を評価する。この時、周辺で調査が実施されていればその地点の周期の情報を整理する。続いて、図1(b)に示すように、各調査地点において調査から算定される周期 $T_g^{obs}(k)$ と、図1(a)で評価した各メッシュの平均値 $T_g^{est}(ij)$ の対数残差を $\varepsilon(k)=\log(T_g^{obs}(k)/T_g^{est}(ij))$ として整理する((ij):メッシュ番号, k :調査地点番号)。この対数残差 $\varepsilon(k)$ の加重平均から、後述する方法により、補正量 $\varepsilon(i,j)$ を評価する。最後に、図1(c)では、図1(a)の平均値と図1(b)の補正量をメッシュごとに足しあわせて、最終的な周期の面的推定を行う。

メッシュ(ij)における補正量 $\varepsilon(i,j)$ を、(1)式のように N 個の地盤調査結果から評価した対数残差 $\varepsilon(k)$ の線形和で表現する。

$$\varepsilon(i,j) = \sum_{k=1}^N w_k \varepsilon(k) = \mathbf{w}' \boldsymbol{\varepsilon} \quad (1)$$

このとき、 $\mathbf{w}$ は要素の総和が1となる適当な重みベクトルである。この重みは(2)式で評価する。

$$\mathbf{w} = \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\gamma}_{i,j} + \left(\frac{1 - \mathbf{1}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\gamma}_{i,j}}{\mathbf{1}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1}} \right) \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1} \quad (2)$$

ここで、 $\boldsymbol{\gamma}_{i,j}=[\gamma_{i,j}(1), \dots, \gamma_{i,j}(k), \dots, \gamma_{i,j}(N)]$ は、メッシュ(ij)とボーリング調査位置 k の離間距離 $h_{ij,k}$ に応じたセミバリオグラム $\gamma_{i,j}(k)$ を要素とするベクトルであり、 $\boldsymbol{\Gamma}$ は地盤調査位置の全組合せ($N \times N$)のセミバリオグラム $\gamma(k,l)$ を要素とする行列である。このセミバリオグラムは、既報³⁾で構築した空間相関モデル $\rho(h)$ と対数残差の標準偏差 σ_{T_g} から評価する。

3. 空間相関のモデル化

本論文で用いた空間相関モデル³⁾について説明する。モデル化に用いたボーリング調査結果は国土数値情報⁴⁾で公開されているものとし、関東平野におけるデータを用いた評価結果を示す。ボーリング調査データにおける標準貫入試験による N 値の深度分布を用いて、工学的基盤以浅の表層地盤における固有周期 $T_g^{obs}(k)$ を算出した。続いて、ボーリング調査地点における固有周期 $T_g^{est}(ij)$ を経験式²⁾により算定した。これらの周期の対数残差 $\varepsilon(k)$ を評価し、離間距離に応じて、対数残差の相関係数、標準偏差を評価した。最後に、評価された空間相関に対して、モデル化を行った。

評価された離間距離ごとの相関係数を図2に示す。相関係数は離間距離とともに急速に減少し、離間距離5km程度で0.1程度になる。この結果に対し、(3)式に示す、べき乗モデルによる回帰を行った。

$$\rho(h) = 1 - \alpha \cdot h^\beta \quad (3)$$

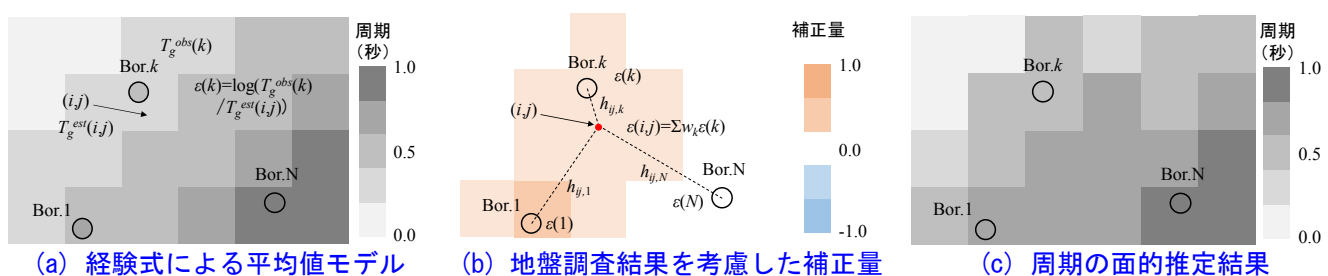


図1 地盤調査結果を用いた周期の面的推定手法の概要

キーワード 固有周期、地震動、面的推定、

連絡先 〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38

(公財) 鉄道総合技術研究所

TEL042-573-7394

ここで α と β はモデル係数である。図 2 に最小二乗法により回帰した結果を示す。モデル係数は $\alpha=0.66$, $\beta=0.22$ であり、プロットデータを概ね表現できていることが確認できる。また、離間距離に応じて標準偏差を評価した結果を図 3 に示す。標準偏差は離間距離による変動が小さく、概ね 0.3 程度の値になっている。

4. 関東平野における面的推定結果

提案手法により関東平野の周期を面的に推定した結果を示す。図 2 の空間相関モデルから判断して、空間相関は数 km で 0 に近づくことから、本検討では、離間距離が 2.0km 以内の地盤調査結果を用いて周期の推定を行う。また、地盤調査結果として公開地盤情報⁴⁾を用い、空間相関モデルは図 2 の結果を用いる。

推定結果とその流れを図 4 に示す。図 4(a) は経験式で評価される固有周期の平均値を表している。図 4(b) は周期の推定地点において、(1) 式の補正量 (対数残差) を評価した結果を示している。関東平野の周期は概ね経験式で評価される全国平均より長周期となり、補正量は正となる地点が多いが、霞ヶ浦の周辺では負となる地域も見られる。図 4(c) に、図 4(a), (b) の結果を統合して評価された周期の面的推定結果を示す。波長の長い変動は、経験式から評価した図 4(a) で見られるものと同じであるが、これにボーリング調査結果から推定される図 4(b) の波長の短い変動が加えられている。

最後に、提案手法により固有周期の推定精度が向上していることを検証する。ボーリング調査が実施されている地点において、この調査結果を使わずに周辺のボーリング調査結果から、提案手法による面的推定を行い、この地点の固有周期を推定する。この推定結果

を推定地点のボーリング調査結果から算定される周期と比較し、推定誤差を評価する。また、経験式から算定される周期とボーリング調査結果から算定される周期から推定誤差を評価し、上記と比較する。

図 5 に示した比較結果は、縦軸に地盤調査結果の周期 (正解値) と推定周期の差を誤差として示し、誤差の移動平均を評価した。いずれの周期においても概ね提案手法の誤差が小さくなっており、特に、長周期の地盤において、提案手法の推定値が正解値に近くなっていることが確認できる。以上の結果から、提案手法の妥当性が検証された。

5. まとめ

空間相関モデルを用いて、固有周期の面的推定を行う手法について提案した。関東平野を対象とした面的推定結果を示し、経験式と提案手法による推定値を比較することにより、提案手法による推定精度が向上していることを確認した。

謝辞 本研究の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。

参考文献 1) 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, p.270, 2012.9, 丸善, 2) 加藤尚, 坂井公俊, 室野剛隆: 地形区分を用いた表層地盤の固有周期の簡易推定, 第 47 回地盤工学研究発表会, 2012.7, 3) 村田諒平, 田中浩平, 坂井公俊, 橋本光史: 地盤調査結果に基づく地盤固有周期の空間相関モデルの作成, 第 50 回地盤工学研究発表会, 2016.9, 4) (独) 土木研究所: 国土地盤情報検索サイト Kunijiban, <http://www.kunijiban.pwri.go.jp/jp/> (2016 年 3 月閲覧)

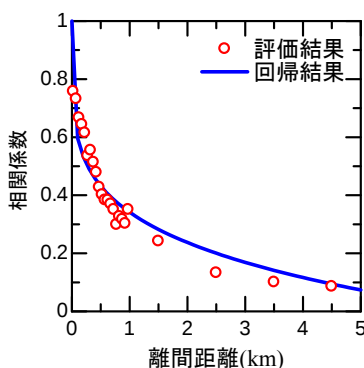


図 2 離間距離と相関係数の関係

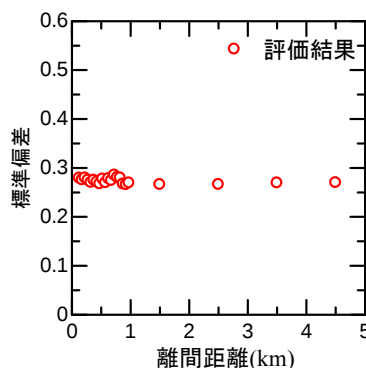


図 3 離間距離と標準偏差の関係

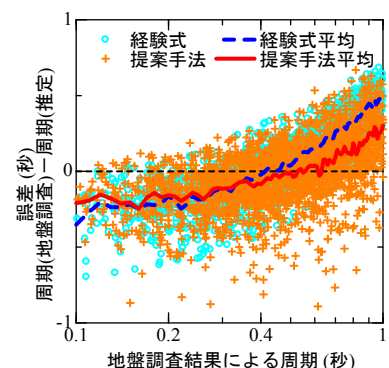
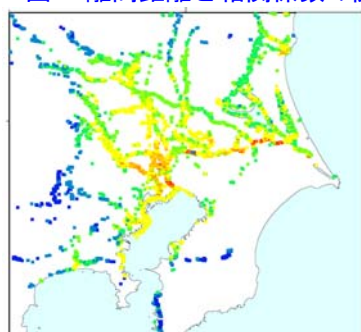
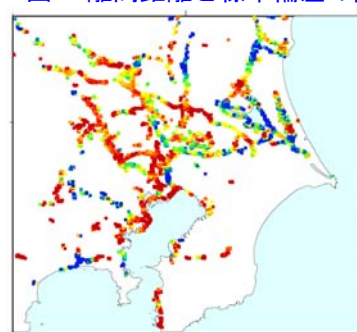


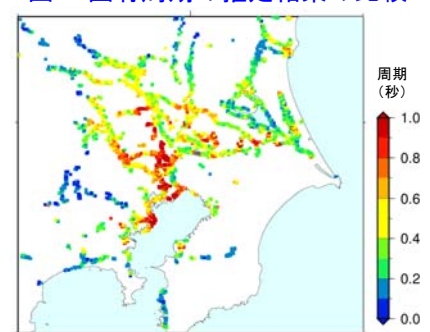
図 5 固有周期の推定結果の比較



(a) 経験式による平均値



(b) 各地点における補正量



(c) 面的推定結果 (a)*exp(b)

図 4 関東平野を対象とした地盤固有周期の推定結果