

論文 離散的な土質情報を活用した 面的な地盤固有周期の推定手法の提案

田中 浩平¹・坂井 公俊²

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail:khtnk@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所（〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8-38）

E-mail:ksakai@rtri.or.jp

鉄道構造物の耐震設計では、標準貫入試験や PS 検層などの地盤調査結果を実施し、この結果から評価した地盤固有周期に基づいてその地点の地盤増幅特性を評価する。広域の地震リスク評価では、表層地盤の増幅特性を面的に評価する必要がある。この目的のために少ないパラメータから周期を推定する簡易式が提案されている。この簡易式の推定結果は、地盤調査に基づく推定結果と比較すると推定誤差が大きい。

そこで簡易式により推定した周期を、周辺の地盤調査結果を用いて補正することで、面的な周期の推定精度を向上する手法を提案する。具体的には、面的な周期変動を空間相関でモデリングし、離散的な地盤調査結果から Kriging 法により面的な補正量を評価する。この手法を、比較的高密度な地盤調査データが存在する南関東エリアにおける固有周期の面的推定に適用することで、手法の妥当性を確認した。

Key Words : *surface ground, site-amplification, natural period, Kriging method*

1. はじめに

表層地盤の地震増幅特性を適切に把握することは、地震動評価の精度向上において重要である。鉄道構造物の耐震設計では、この増幅特性を地盤固有周期に基づく地盤種別により表現しており、建設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際に、標準貫入試験や PS 検層などの地盤調査結果から評価した地盤固有周期を用いている¹⁾。また、鉄道路線を対象とする広域の地震リスク評価を実施するにあたっては、表層地盤の増幅特性をできる限り簡易に評価することが重要であり、野上らは地震増幅特性として、地盤固有周期を入力パラメータとした地盤増幅率の簡易評価法を提案している²⁾。

広域の鉄道構造物において、各地点の地盤固有周期を、事前に取得可能な情報から簡易に推定する方法として、微地形区分や標高などの一般的な地形効果をパラメータとした地盤固有周期の簡易推定式が提案されている³⁾。この式は、全国を対象として作成した簡易式であるため、地域差やより詳細な地形変動を表現できるパラメータが含まれていない。よって、地盤調査結果から評価される固有周期と比較すると、推定誤差が比較的大きくなることが確認されている⁴⁾。一方で、鉄道では設計時に実施した 100m 程度間隔の地盤調査を行っている。また近年では、公的機関で膨大な地盤調査結果が公開されている。

これらの調査箇所では精度の高い地盤固有周期が得られるが、このような離散的な情報を、面的な地盤情報の精度向上に展開する手法は整備されていない。

そこで、簡易式を用いて面的な周期の推定精度を向上するために、簡易式から得られた周期を周辺に存在する地盤調査による周期を用いて、補正することを考える。このような空間補間法として Kriging 法が提案されており^{例え}ば、面的な周期の変動を空間相関でモデリングすることで、面的な補正量を、離散的な地盤調査結果の固有周期から評価することが可能となる。

本論文では、全国の鉄道路線において地盤固有周期を評価することを目的として、比較的高密度な地盤調査データが存在する南関東エリアにおいて固有周期の面的推定を実施し、手法の妥当性を確認したので報告する。

2.では、固有周期の推定手法について提案する。続いて、3.では提案手法の評価対象とした領域について説明する。4.では、固有周期の補正量を算定するにあたって必要となる空間相関モデルを構築する。本手法では、周辺の地盤調査箇所の周期の線形和により、評価地点の補正量を算出することにしており、その際に地盤調査箇所と評価地点の類似度を表現する空間相関モデル⁹⁾が必要となる。最後に、5.において、提案した手法に基づく周期の面的推定を実施し、簡易法による推定との精度比較を行い、手法の妥当性を示す。

2. 固有周期の面的推定手法について

本検討における固有周期の面的推定手法を説明する。

図-1に示すような $M \times N$ 個のメッシュに分割した領域で、各メッシュ (i, j) の中心点における周期 $T_g(i, j)$ を評価する ($1 \leq i \leq M, 1 \leq j \leq N$)。具体的には、簡易式の推定周期を、周辺の地盤調査から得られた周期を用いて補正する。

対象領域内には、 L 個の地盤調査結果が存在し、それぞれの地点で調査結果に基づく固有周期 $T_g^{obs}(k)$ が評価されている ($1 \leq k \leq L$)。また、簡易式に基づきメッシュ (i, j) の中心点における周期 $T_g^{est}(i, j)$ と、地盤調査箇所 k における周期 $T_g^{obs}(k)$ が評価されている (図-1(a))。

メッシュ (i, j) の周期 $T_g(i, j)$ は、簡易式の推定周期 $T_g^{est}(i, j)$ を補正量 $\varepsilon(i, j)$ で補正することで、式(1)で算定される。

$$T_g(i, j) = T_g^{est}(i, j) \cdot 10^{\varepsilon(i, j)} \quad (1)$$

ここで、補正量は、最良線形不偏予測に基づく通常 Kriging により算定される⁹⁾。地盤調査箇所 k において、調査結果から評価された固有周期 $T_g^{obs}(k)$ と簡易法で評価された固有周期 $T_g^{est}(k)$ の比の常用対数から、対数残差 $\varepsilon(k)$ を評価し、補正量 $\varepsilon(i, j)$ を式(2)のように $\varepsilon(k)$ の線形和として評価する (図-1(b))。

$$\varepsilon(i, j) = \sum_{k=1}^L w_k \varepsilon(k) = \mathbf{w}' \boldsymbol{\varepsilon} \quad (2)$$

ここで、 \mathbf{w} は要素の総和が 1 となる重みベクトルである。この重みと平均 2 乗予測誤差は、式(3)(4)で評価する。

$$\mathbf{w} = \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\gamma}_{i,j} + \left(\frac{1 - \mathbf{1}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\gamma}_{i,j}}{\mathbf{1}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1}} \right) \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1} \quad (3)$$

$$\sigma^2(i, j) = \boldsymbol{\gamma}_{i,j}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \boldsymbol{\gamma}_{i,j} - \frac{(\boldsymbol{\gamma}_{i,j}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1} - 1)^2}{\mathbf{1}' \boldsymbol{\Gamma}^{-1} \mathbf{1}} \quad (4)$$

ここで、 $\boldsymbol{\gamma}_{i,j} = [\gamma_{ij}(1), \dots, \gamma_{ij}(k), \dots, \gamma_{ij}(L)]$ は、メッシュ (i, j) とボーリング調査箇所 k の離間距離 $h_{ij,k}$ に応じたセミバリオグラム $\gamma_{ij}(k)$ 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 ($L \times L$) のセミバリオグラムを要素とする行列である。このセミバリオグラムは、離間距離 h に応じた対数残差の空間相関モデル $\rho(h)$ と、対数残差の標準偏差 σ_{T_g} から、式(5)で表される。

$$\gamma_{i,j}(k) = (1 - \rho^2(h_{ij,k})) \sigma_{T_g}^2 \quad (5)$$

以上から、各メッシュの補正量 $\varepsilon(i, j)$ が評価され、式(1)から補正による推定周期 $T_g(i, j)$ が得られる (図-1(c))。

3. 本検討における対象領域について

対象領域は、緯度：35.1 度~36.1 度、経度：138.9 度~140.0 度の範囲の南関東エリアである (図-2)。この領域内の地盤調査結果のうち、ボーリング調査による地層構成および標準貫入試験による N 値の深度分布が把握されている地点は、35541 点であった。これら地盤調査

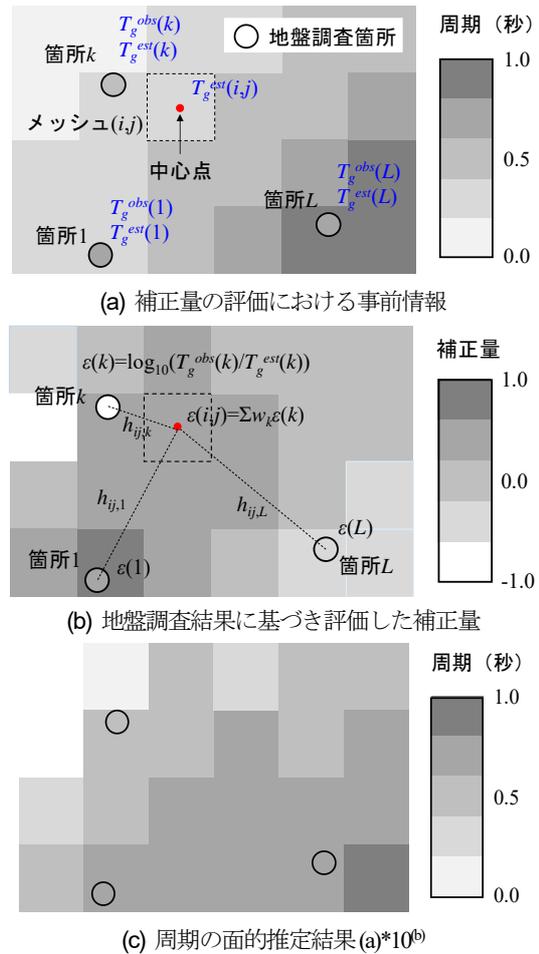


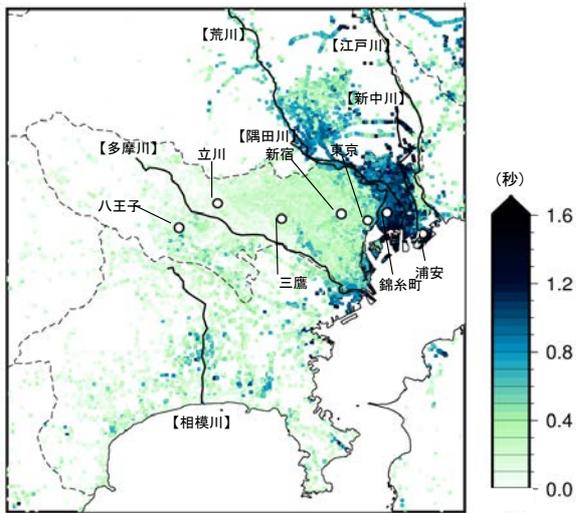
図-1 地盤調査結果に基づく周期の面的推定手法

情報として、Kunijiban⁷⁾、新・関東の地盤⁸⁾、ジオステーション⁹⁾、東京の地盤¹⁰⁾、かながわ地質情報 MAP¹¹⁾、静岡県地理情報システム¹²⁾で公開しているものを使用した。

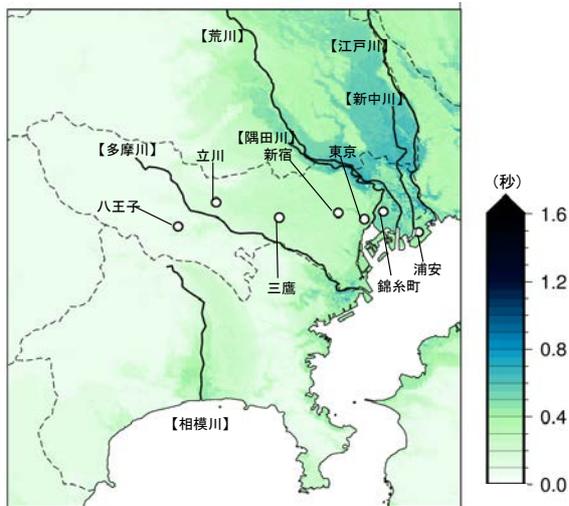
地盤調査箇所の固有周期を評価するにあたっては、調査結果の中から、耐震設計上の基盤面以浅の表層地盤に対応する部分を抽出する必要がある。耐震設計上の基盤とは、せん断弾性波速度 V_s が 400m/s、もしくは N 値が砂質土の場合は 50、粘性土の場合は 30 程度の連続地層である。そこで、調査箇所ごとに N 値の深度分布から、自動的に基盤を判定・抽出する基盤判定アルゴリズム¹³⁾により、耐震設計上の基盤面を推定した。

固有周期 T_g^{obs} の評価においては、表層地盤モデルに対する固有値解析の結果から算定した。表層地盤モデルは、調査結果から、地層区分、層厚、密度、 V_s を設定することで作成する。 V_s については、各層の地層区分から、土質区分 (砂質土、粘性土) を判定し、標準貫入試験の N 値から換算式を用いて評価した。

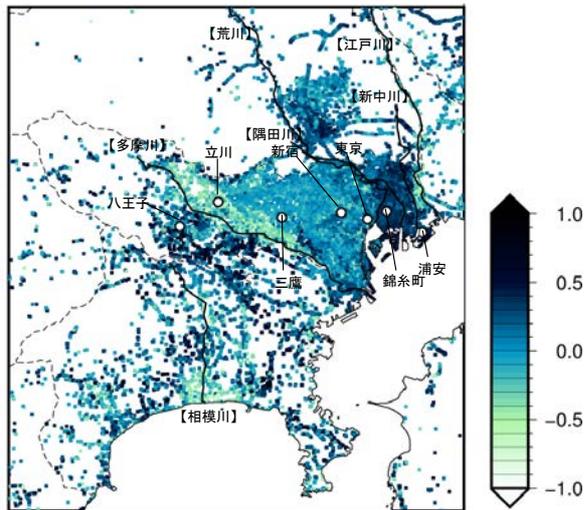
各地盤調査箇所ので評価された固有周期の空間分布を図-2(a)に示す。対象領域では、地盤固有周期は東側ほど長くなる傾向にあり、地域ごとに大まかなゾーニングができる。例えば、東京都の東側は、新中川以東のエリア、新中川~隅田川までのエリア (錦糸町等)、隅田川以西



(a) 地盤調査結果に基づく固有周期



(b) 簡易式に基づく固有周期



(c) 地盤調査地点における対数残差

図-2 検討対象領域における固有周期の空間分布

の山の手エリア（東京等）で周期が大きく変化する。

簡易式³⁾に基づき評価された固有周期を図-2 (b)に示す。簡易式は微地形区分、標高等の地形情報から評価できるため、図-2 (a)で地盤調査が存在しない地点でも周期の

推定ができています。しかし、地盤調査結果に基づく周期と比較すると周期の変動が小さく、特に、東京都の東側エリアでは、固有周期が短いことが確認できる。そこで、両者の利点を考慮した Kriging 法による補正を実施する。

図-2 (a)の地盤調査結果による固有周期と、図-2 (b)の簡易式に基づく固有周期の比の常用対数を、対数残差として評価したものを図-2 (c)に示す。簡易式による周期の推定が高精度であれば、この対数残差は小さく、空間的にランダムに分布するはずである。しかし、実際には対数残差の値は大きく、空間的な偏りが存在していることがわかる。よって、これらの空間分布から、離間距離と対数残差の相関性をモデル化し、簡易式で推定された周期の補正を行う。このモデル化は4.に述べる。なお、ここで評価された対数残差の標準偏差は 0.30 であった。

図-3 に対象領域の地盤調査結果における固有周期の累積頻度分布を示す。対象領域は、0-2.0 秒の幅広い固有周期を有する地盤が分布しており、提案手法の適用性を確認する上で十分な情報が存在していると考えられる。また、図-4に、各地盤調査箇所の微地形区分の頻度割合の分布を示す。ここでは、24区分の中から全体に占める割合が大きい順に11区分を示している（全体の84%）。ローム台地が全体の32%の割合を占めており、図-2における新宿、三鷹を含むエリアに広く分布している。また多摩川南部の八王子を含むエリアが丘陵地帯、多摩川北部の立川を含むエリアが砂礫質台地となっており、図-2 (a)の固有周期にも明瞭な差が見られる。東京都東部エリア（錦糸町、浦安など）には、三角州・海岸低地、干拓地、埋立地が広がっており、いずれも固有周期が1.0秒を超える地点がみられる。4.では、これらの微地形区分ごとの空間相関の違いについても議論する。

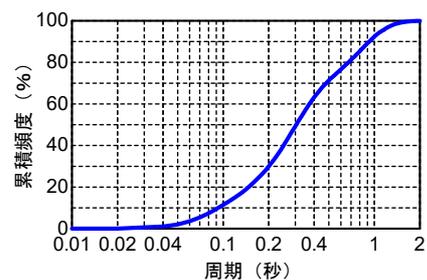


図-3 地盤調査結果における固有周期の累積頻度分布

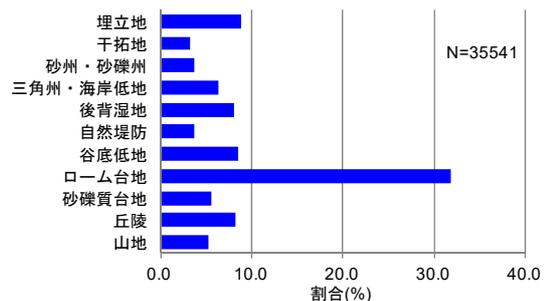


図-4 地盤調査結果における微地形区分の頻度割合

4. 対数残差の空間相関モデルの構築

図-2 (c)でみられた対数残差の空間相関の特徴について、モデル化を試みる。図-5 に全データを対象として評価した、離間距離ごとの対数残差の散布図を示す。この図は、全 35541 データにおける 2つのデータの組み合わせから離間距離と対数残差を整理し、離間距離ごとに分類してプロットしたものである。離間距離が大きくなるにつれて、対数残差は円形にプロットされ、相関係数が小さくなる。

この相関係数を離間距離ごとに評価したものを図-6 に示す。図-6 (a)は全データ、図-6 (b)~(d)はそれぞれ微地形区分をローム台地、丘陵、埋立地に限定して評価したものである。以下に、これらの傾向を整理した。

- 全データを対象とした結果から、離間距離 10-100m 程度のごく近接したデータの相関は 0.6-0.8 程度と高い相関を有する。その後、相関係数は急速に低下し、500m 程度で 0.4 を下回る。
- 微地形区分ごとに空間相関の特性は異なる。ローム台地の空間相関は、全データを対象とするものと概ね同様である。丘陵に分類された地域は地形変動が大きいいため全データと比べて相関が低いと考えられる。一方で、埋立地に分類された地域は地形変動が小さく相関係数が高いと考えられる。

また、評価結果は離間距離 10m のごく近傍でも相関係数が 0.8 程度であり、1.0 とはならない。これは、地盤調査箇所の離間距離や地盤調査結果に基づく固有周期の評価に含まれる誤差が影響していると考えられる。

固有周期の面的推定においては、空間相関に応じて対数残差の線形和の重みを設定する。上記の結果から、空間相関は微地形区分ごとに異なっており、空間相関モデルの設定によって推定結果が変わる可能性がある。そこで、上記のような推定条件による結果の違いについては、5.において確認することとする。

続いて、評価された空間相関をモデル化する。モデル化には、空間相関と離間距離の関係に、最も適合度が高いと思われる、べき乗モデルを用いた (式(6))。

$$\rho(h) = 1 - \alpha \cdot h^\beta \quad (6)$$

ここで、 h は離間距離(km)を表す。なお、このモデルは、離間距離が大きくなると相関係数が負となるため、補正に使用する周辺地盤データの離間距離の上限を小さく設定し、負の相関係数を使用しないようにする。

表-1 に評価された係数 α , β を示す。また、各回帰曲線において、相関係数が 0.4 となる離間距離を相関距離として評価した。相関距離は、概ね 0.5-1.0km 程度である。また、三角州・海岸低地、干拓地、埋立地は相関距

離が大きく、相関係数が全体的に高い。一方で、丘陵の相関距離は小さく、相関係数が全体的に低い。

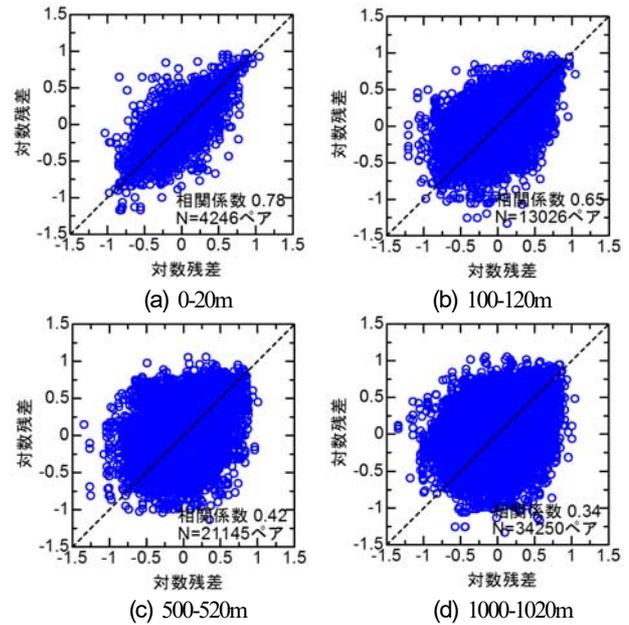


図-5 離間距離に応じた対数残差の散布図

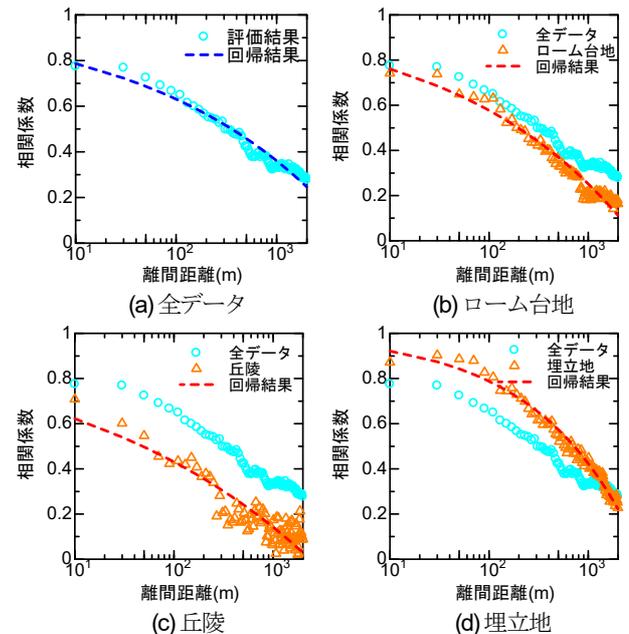


図-6 離間距離に応じた相関係数の変化

表-1 空間相関モデルの回帰結果

区分	α	β	相関距離 (km)
全データ	0.64	0.24	0.89
丘陵	0.86	0.18	0.42
砂礫質台地	0.60	0.23	1.02
ローム台地	0.75	0.25	0.68
谷底低地	0.71	0.22	0.71
自然堤防	0.54	0.19	1.25
後背湿地	0.66	0.27	0.86
三角州・海岸低地	0.65	0.52	0.93
干拓地	0.55	0.33	1.13
埋立地	0.58	0.43	1.04

5. 提案手法に基づく固有周期の面的推定

(1) 面的推定結果

対象領域において固有周期の面的推定を行う。推定では全地盤調査データを対象とし、空間相関モデルは全データで評価した $\alpha=0.64$, $\beta=0.24$ のモデルを使用する。対数残差の標準偏差は、3. で評価した0.30を設定する。推定は、対象領域に含まれる、標準地域メッシュにおける第5次メッシュ（4分の1地域メッシュ）の中心点で行う。このとき隣接点間隔は250mとなる。

はじめに、各メッシュ中心点で簡易式による周期の推定を行った（図-2 (b)）。補正量の算定は、メッシュの中心点の緯度・経度 ± 0.005 度（約750m）の領域に、地盤調査結果が存在する場合に行った。この対象領域は、表-1に示す相関距離を参照して設定した。また、補正量の算定時に、式(4)に示す推定誤差を評価し、この値が最初に設定した0.30より小さい場合に周期の補正を実施した。

固有周期の面的推定結果を図-7に示す。簡易式に比べて周期の変動が大きく、地盤調査結果が存在する地点では、調査周期に近い結果となる。図-8に式(4)で評価した推定誤差を示す。調査データが豊富にあるエリアでは、推定誤差が0.30より小さいことが確認できる。

(2) 推定精度に関する考察

周期の推定精度に関する考察を行う。はじめに、提案手法の推定結果が簡易式より、精度向上していることを検証する。検証にあたっては、全地盤調査箇所において、その箇所の地盤データが存在しないという仮定で、周辺のデータのみから、その地点の固有周期を推定した場合の精度を比較した。結果を図-9 (a)に示す。提案法による推定結果は簡易法に比べて、正解値である地盤調査周期に一致しており、精度向上が確認できる。

上記の検証では、空間相関モデルや補正に使用する地盤データは、全データを対象としている。しかし、4. で確認したように、空間相関モデルは微地形区分ごとに違いがあることから、周期の補正に使用する空間相関モデルや地盤データを微地形区分ごとに限定して補正することも考えられる。そこで、表-1に示した9個の微地形区分に位置する評価地点（全体の84%）で、同一の微地形区分に存在する地盤データと、表-1の各空間相関モデルを用いた場合の周期の推定を行った。

推定結果を図-9 (b)に示す。微地形区分を限定しても評価結果に、ほとんど違いがみられない。また、補正に使用する地盤データや、空間相関モデルを微地形ごとに設定することは、本検討のようにデータが十分に存在する場合には実施可能であるが、いずれの地点でもこの条件を満たすとは限らない。よって、精度に著しい向上が

みられない以上、微地形区分によらない、全データを用いた推定が適切であると考えられる。

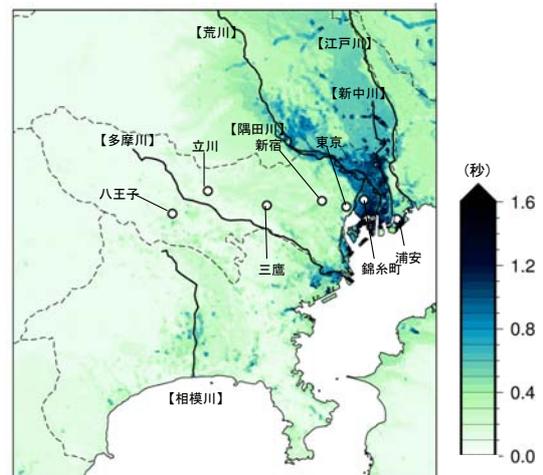


図-7 提案手法に基づく面的推定結果

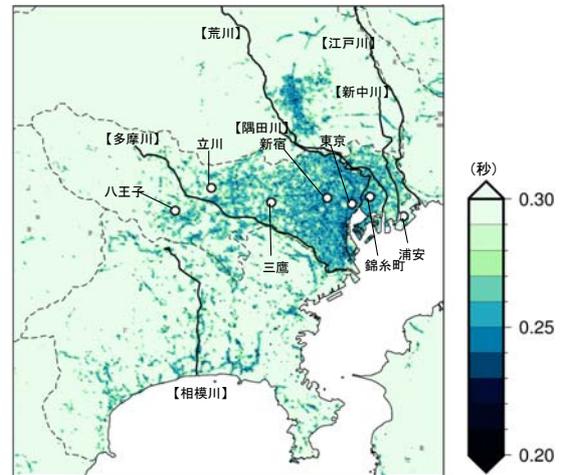
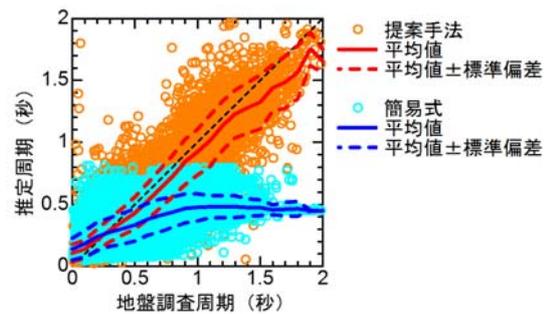
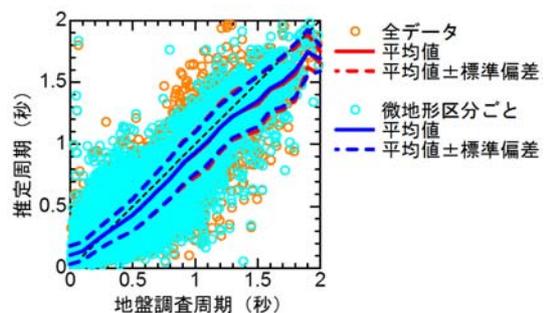


図-8 提案手法における推定誤差（対数標準偏差）



(a) 簡易法と本検討の推定結果



(b) 全データと微地形区分ごとの推定結果

図-9 固有周期の面的推定結果の比較

6. まとめ

面的な地震動評価を実施するにあたって、表層地盤の地震増幅特性を表す地盤固有周期を、面的に精度よく推定するための手法として、簡易法で評価される周期を地盤調査箇所固有周期で補正する手法を提案した。以下に得られた知見について列挙する。

- ・ 地盤調査による固有周期と簡易法による推定周期の対数残差にみられる空間分布特性を、離間距離と相関係数の関係によりモデル化した。
- ・ 空間相関モデルを用いた Kriging 法により、地盤固有周期の面的推定を実施し、簡易法と比べて推定精度が向上していることを確認した。
- ・ 面的推定においては、空間相関モデルや補正に使用するデータを微地形区分ごとに限定した評価を実施したが、全データを対象としたものと推定精度に大きな違いがみられないことを確認した。

今後は、本手法を全国の鉄道路線における固有周期の推定に展開する予定である。

謝辞：本検討の一部は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施した。また、一部の図の作成には、GMT¹⁴⁾を使用した。記して謝意を表す。

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) 野上雄太，坂井公俊，室野剛隆，盛川仁：表層地盤と入力波の周期特性を考慮した表層地盤での地震増幅率の評価，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol.68，No.1，pp.191-202，2012.
- 3) 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，2011.
- 4) 田中浩平，坂井公俊，宇佐美敦弘，室野剛隆：地盤の固有周期推定手法の精度と構造物の応答評価に与える影響，第 48 回地盤工学研究発表会，2012.
- 5) 間瀬茂，武田純：空間データモデリング—空間統計学の応用—，p.200，共立出版，2001.
- 6) 高田毅士，下村哲人：台湾集集地震記録に基づく地震動のマクロ空間相関特性，日本建築学会構造系論文集，第 565 号，pp.41-48，2003.
- 7) 国土交通省：国土地盤情報検索サイト Kunijiban，<http://www.kunijiban.pwri.go.jp/>（参照 2018.4.2）
- 8) 地盤工学会：新・関東の地盤 増補地盤情報データベースと地盤モデル付（2014 年版），pp.234，2014.
- 9) 防災科学技術研究所：Geo-Station，<http://www.geo-stn.bosai.go.jp>（参照 2018.4.2）
- 10) 東京都土木技術支援・人材育成センター：東京の地盤（GIS 版）<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyuhou/geo-web/geo-webmap.aspx>（参照 2018.4.2）
- 11) 神奈川県都市整備技術センター：かながわ地質情報 MAP，<http://www.kanagawa-boring.jp/>（参照 2018.4.2）
- 12) 静岡県交通基盤部 建設支援局 技術管理課：静岡県地理情報システム <https://www.gis.pref.shizuoka.jp/>（参照 2018.4.2）
- 13) 田中浩平，坂井公俊，坂元一雄，庄司正弘：地盤調査結果における工学的基盤位置の自動抽出アルゴリズムの構築，第 51 回地盤工学研究発表会，2017
- 14) Wessel, P. and Smith, W.H.F. : New, improved version of Generic Mapping Tools released, EOS, *Trans. AGU*, Vol.79, p.579, 1998

(2018.4.6 受付)

ESTIMATION OF THE NATURAL PERIOD OF SURFACE GROUND USING THE DISCRETE SOIL INVESTIGATION DATA

Kohei TANAKA, Kimitoshi SAKAI

It is important to identify the seismic amplification of the surface ground for the improvement of the accuracy of the seismic ground motion estimation. This amplification is expressed with the natural period of the surface ground in the seismic design and risk assessment for the railway structures. It is necessary to estimate the period at each site from the limited information which can be obtained in advance. For this purpose, an estimation method modeled by simple parameters such as the micro-zonation and altitudes has been proposed. However, it is confirmed that the estimation errors of this method are relatively large. Therefore, we use the Kriging method which modifies the period estimated by the simplified method by the period evaluated by soil investigation data, in order to reduce the errors. In this paper, we estimate the periods by the proposed method and confirm the validation of this method in the southern of Kanto area where the high-density investigation data exist.