

線形領域における地盤の固有周期が応答変位法に用いる慣性力と地盤変位の組合せに及ぼす影響

田中 仁規* 坂井 公俊*

Effect of Natural Period of Ground in Linear Region on Combination of Inertia Force and Ground Deformation in Seismic Deformation Method

Niki TANAKA Kimitoshi SAKAI

Inertia force and ground deformation are used to calculate the seismic response values of pile foundation structures using the seismic deformation method. In this paper, a study was carried out towards a highly accurate estimation of the combination of inertia force and ground deformation. Specifically, linear dynamic analyses were conducted on various types of grounds and structures, and the combination coefficients for the ratio of the period of grounds to the period of structures were calculated. As a result, it is clarified that the correction coefficient ν gradually decreases as the natural period of the ground T_g increases. Considering this tendency, we proposed a simple estimation method for the combination coefficients. In addition, it was confirmed that the proposed method expressed the results of dynamic analysis more appropriately than the conventional method. The proposed method makes the combination coefficients more accurate and the seismic response values of structures more reasonable.

キーワード：耐震設計，応答変位法，慣性力，地盤変位

1. はじめに

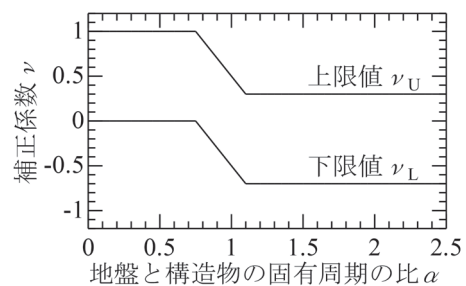
深く根入れされた杭基礎などの基礎構造物は、地震時に上部工からの慣性力だけでなく、地盤変位の影響を受ける^(例えば1) 2)。例えば1964年新潟地震では、地盤変位により杭が損傷したことで、建物が最大1.3m沈下した事例が報告されている³⁾。1995年兵庫県南部地震では、建設中の構造物において上部構造物が未構築の状態に杭基礎が地層境界部で被災した事例が報告⁴⁾されている等、耐震設計においても慣性力と地盤変位の両者の影響を適切に考慮する必要がある。

この時に、地盤と構造物を一体にモデル化した動的解析法を用いることで、慣性力と地盤変位の両者の影響を自動的に考慮することができる。その一方で、実務設計においては構造物のみをモデル化した静的解析法が用いられることが多いが、静的解析法において慣性力と地盤変位の両者の影響を考慮するためには工夫が必要であり、鉄道構造物の耐震設計では古くから応答変位法⁵⁾が用いられている。

応答変位法によって地震応答値を算定する際に、慣性力と地盤変位は必ずしも同時に最大とならないため、合理的な地震応答値の算定、耐震設計を実施するためには作用の組合せ係数を適切に設定することが重要である。これを実現するための検討^(例えば6) 7)がこれまで実施され

ており、鉄道構造物の設計においても、応答変位法に用いる慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数（以下、補正係数 ν ）が考慮されている⁸⁾。鉄道構造物で用いる補正係数 ν を図1に示す。図1を見ると、補正係数 ν は地盤と構造物の固有周期の比 α によって定まることが分かる。この補正係数 ν を定めた際の解析モデル⁶⁾は、自由地盤と杭-構造物の2つの系で構成するとともに、地盤は固有周期 $T_g = 0.5$ 秒の1地盤に固定した上で、構造物の固有周期 T_s を0.3~2.0秒まで変化させた解析によっている。よって、この補正係数 ν は限られた実験、解析に基づいて設定されたものであることや、地盤や構造物の条件に関わらず、両者の周期比 α のみをパラメータとしている等、改良する余地が多く残されている。

そこで本稿では、補正係数 ν の高精度化を目的とした基礎的な検討⁹⁾の報告を行う。具体的には、多数の地盤、



※ $\alpha =$ 構造物の固有周期 T_s / 地盤の固有周期 T_g

図1 慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数⁸⁾

* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

構造物条件を網羅的に組み合わせた線形動的解析を実施するとともに、この結果を整理・分析することで、表層地盤の固有周期 T_g の変化に伴って補正係数 ν が連続的に変化する傾向があることを示す。最終的に、図1に示す従来からの補正係数の簡易算定式に固有周期 T_g をパラメータとして追加した補正係数算定式を提案するとともに、提案手法を用いることで、補正係数の推定精度が向上することを確認する。

2. 検討の方法及び解析の条件

本検討では、多様な地盤と構造物を組み合わせて網羅的な線形動的解析を実施する。この結果を整理することで、地盤・構造物が線形領域での補正係数 ν の改良の可能性について考察する。本章では、対象とした地盤・構造物の解析条件、動的解析結果の処理方法について整理する。

2.1 地盤応答解析の条件

地盤応答解析では自由地盤の時間領域の動的解析法を実施した。対象地盤は、多数の固有周期 T_g を有する線形の地盤（50種）とした。この50地盤は、全国の地盤ボーリングデータから「地表面地震動の分類」という観点でクラスタリングによって抽出されたもの¹⁰⁾である。なお地層構成や各層の地盤条件の設定方法等は文献10を参照されたい。この50地盤の分類は、鉄道標準⁸⁾に従って固有周期 T_g のみをパラメータとして6種類（G2地盤～G7地盤）に区分した。動的解析時の減衰定数は、地盤のせん断弾性波速度、土質分類をパラメータとして周波数依存性を考慮したQ値の提案式¹¹⁾に可能な限り一致するようなレーリー減衰を地盤毎に設定した。入力地震動は、鉄道構造物の耐震設計で一般的に用いられる標準L2地震動スペクトル Π ⁸⁾とした。

2.2 構造物の応答解析の条件

前節で得られた地表面地震動（50波形）を入力とした構造物の応答解析を実施することで、構造物天端の応答波形を算定する。この時の構造物は等価な1自由度モデルで表現することとし、固有周期 T_s は最終的な結果を地盤と構造物の固有周期比 α で整理することを念頭に、地盤毎に周期比 α が同一になるように設定した。具体的には、各地盤の固有周期 T_g に対して、地盤と構造物の固有周期の比 α が0.1～2.0まで0.1刻みで20タイプの固有周期 T_s を有する構造物を設定した。また構造物の損傷の影響は考慮せず全て線形弾性体で設定し、動的解析時の減衰定数は0.05とした。

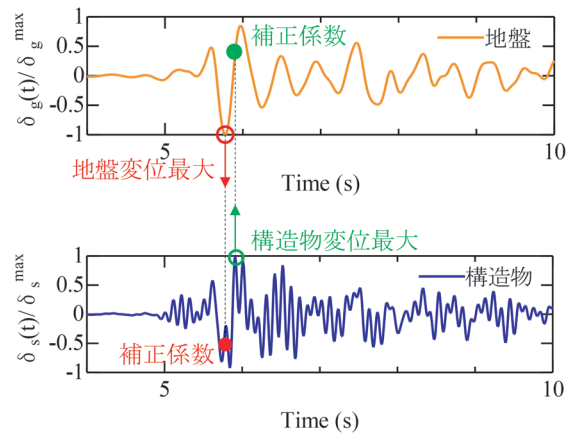


図2 正規化した時刻歴応答波形の例
($T_g=0.41s$, $T_s=0.10s$, $\alpha=0.25$ の場合)

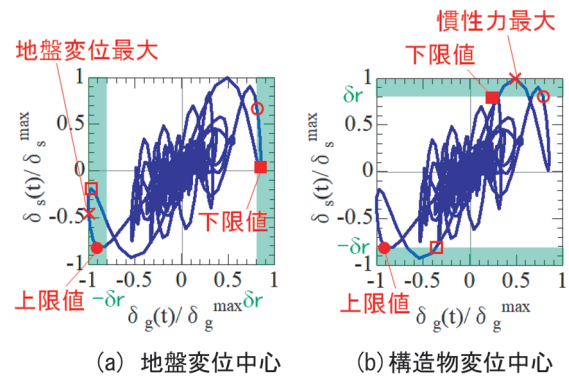


図3 地盤変位—構造物変位関係の例
($T_g=0.41s$, $T_s=0.10s$, $\alpha=0.25$ の場合)

2.3 解析結果の整理方法

地盤応答解析、構造物の応答解析から、地表面と構造物天端の時刻歴応答 $\delta_g(t)$, $\delta_s(t)$ が得られる。このうち、地表面位置の変位は解析モデル下端（工学的基盤上面）からの相対変位である。これらの時刻歴応答をそれぞれの最大値 δ_g^{\max} , δ_s^{\max} で正規化した例を図2に示す。地盤変位が最大になる時の構造物変位（図2の赤色●印）と、構造物変位が最大になる時の地盤変位（図2の緑色●印）をそれぞれ抽出し、これが各ケースでの補正係数 ν となる。

ここで、横軸に地盤の正規化応答変位、縦軸に構造物の正規化応答変位で表示した結果を図3に示す。図3(a), (b)は同一の図であるが、着目する変位が異なる。図3を見ると、当然のように $\delta_g(t)/\delta_g^{\max} = 1.0$, $\delta_s(t)/\delta_s^{\max} = 1.0$ となる瞬間は、それぞれ縦軸および横軸の値が +1.0 あるいは -1.0 となる線と点で接している（今回のケースでは、地盤変位最大時の $\nu=0.41$ （図3(a)の×印）、慣性力最大時の $\nu=0.49$ （図3(b)の×印））。ただし、それ以外にも地盤変位、慣性力の組み合わせがともに大きくなるタイミングが存在しており、構造物の設

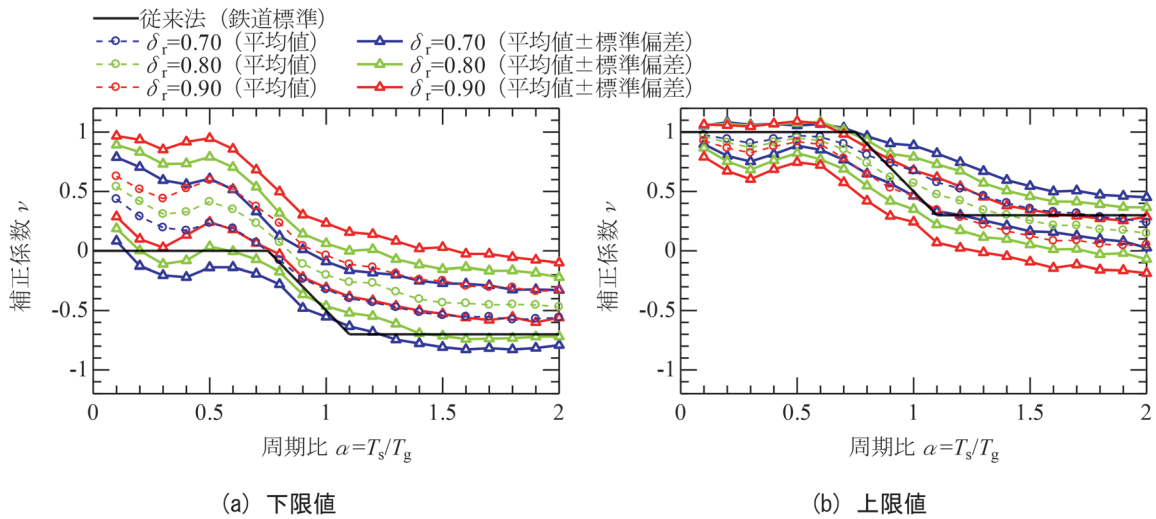


図4 δ_r による補正係数の比較

計を考えた場合には、この瞬間に応答値が厳しくなる可能性も考えられる。そこで、従来の検討⁶⁾と同様に解析結果をある程度の幅を持って解釈することが望ましいが、本検討では膨大なケースの整理を行う必要があるため、従来のように目視による判定を行う事は困難である。

そこで、正規化した応答波形に対してパラメータ δ_r を設定し、 $\delta_r \leq \delta_g(t)/\delta_g^{\max}$ 、 $-\delta_r \leq \delta_s(t)/\delta_s^{\max} \leq 1.0$ の範囲での最大値、最小値を自動的に抽出し、これを上限値、下限値として整理することを試みる。図3には $\delta_r = 0.80$ とした場合の着目範囲も緑色で塗って示しているが、それぞれの図において着目範囲内の最大値、最小値を抽出する。例えば図3(a)では、地盤変位が $\delta_r \leq \delta_g(t)/\delta_g^{\max} \leq 1.0$ の範囲において構造物変位が+1に最も近い値(図3(a)の○印)と、地盤変位が $-1.0 \leq \delta_s(t)/\delta_s^{\max} \leq -\delta_r$ の範囲において構造物変位が-1に最も近い点(図3(a)の●印)を比較した結果、後者の方が±1に近いいため、これを上限値として抽出する。同様に、地盤変位が $\delta_r \leq \delta_g(t)/\delta_g^{\max} \leq 1.0$ の範囲において構造物変位が-1に最も近い点(図3(a)の■印)と、地盤変位が $-1.0 \leq \delta_s(t)/\delta_s^{\max} \leq -\delta_r$ の範囲において構造物変位が+1に最も近い点(図3(a)の□印)を比較した結果、前者の方が±1に近いいため、これを下限値として抽出した。構造物変位中心の時も図3(b)に対して同様に上限値、下限値を抽出する。この方法を採用することで、従来の検討⁶⁾のように解析結果に対してある程度の幅を持った評価が可能であるとともに、膨大な解析ケースに対しても自動で補正係数 ν の抽出が可能となる。このパラメータ δ_r の設定には任意性が残されるが、本検討では以下の手順で決定することとした。まず δ_r として複数の値を設定し、いくつかのケースで上限値、下限値を自動で抽出する。次にこの結果を従来の補正係数⁸⁾と比較し、従来と同等の結果が抽出されるかを確認した。その結果

を図4に示す。鉄道標準と各ケースの平均値±標準偏差の値を比較すると、下限値は $\delta_r = 0.80$ 、上限値は $\delta_r = 0.90$ のときに従来法と調和的な傾向になることを確認した。上限値、下限値の全体的なバランスを鑑みて、以降は全て $\delta_r = 0.90$ の条件で自動抽出を行った補正係数 ν について議論を行う。

3. 補正係数 ν の算定結果

3.1 全体的な傾向

前章の手順に従って、全解析ケース(50地盤×20構造物=1,000ケース)に対して補正係数 ν を算定した。これを従来法と同様に地盤の固有周期 T_g と構造物の固有周期 T_s の比率 α によって整理した結果を図5にまとめて示す。これを見ると、同一の周期比 α であっても解析条件によって補正係数 ν にはばらつきが見られるが、全体的な傾向としては周期比 α の増大に伴って補正係数 ν は徐々に小さくなっていることが分かる。これは上限値、下限値によらず共通して見られる傾向である。

続いて、各周期比 α の平均的な傾向(図5の黒丸)を従来法⁸⁾による補正係数(図5の破線)と比較すると、まず図5(a)に示した上限値では、本検討による動的解析結果は従来法による補正係数 ν と良好に一致している。その一方で図5(b)に示した下限値では、動的解析による結果よりも従来法による補正係数 ν の方がより小さな値となっており、地盤と構造物が逆位相で振動する傾向をより強調した作用の組み合わせ係数を設定していることが分かる。ただし、大きなばらつきを有する全解析結果の下限値で見ると、従来法による補正係数 ν の傾向と概ね一致している。

以上のように、全体的な傾向としては、従来法による結果は網羅的な解析結果と類似しているため、従来法は

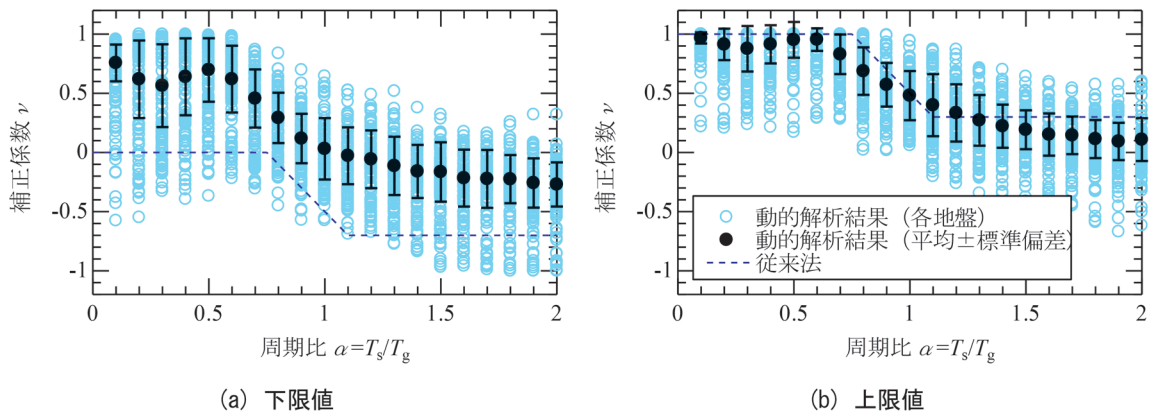


図5 補正係数の上限値及び下限値（全結果）

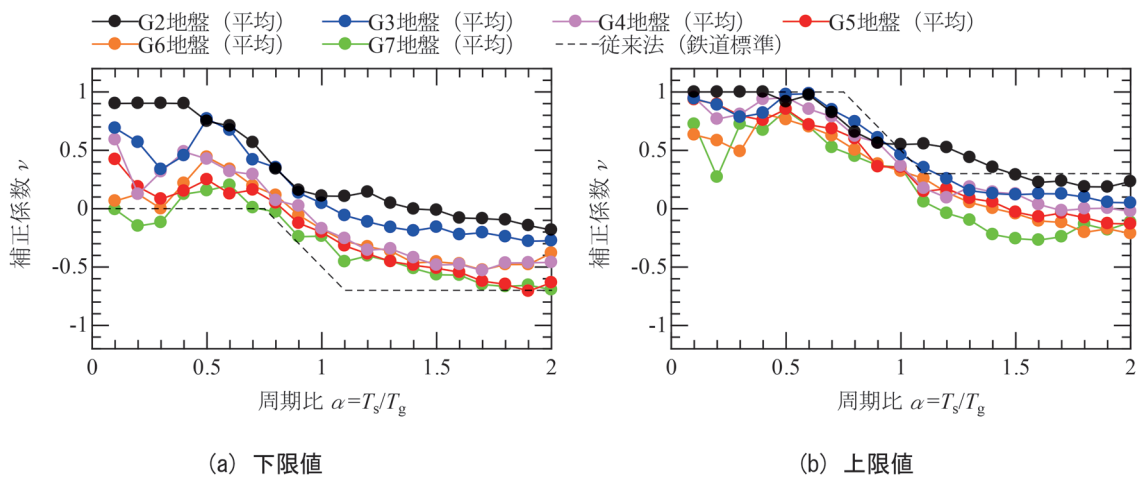


図6 地盤種別の変化に伴う補正係数の変化

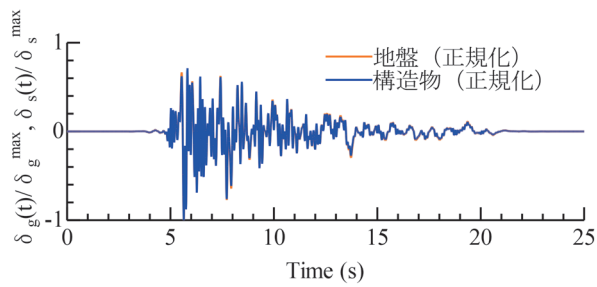
一定の信頼性を持っていると言える。その一方で解析結果には大きなばらつきが存在するとともに、下限値については平均的な傾向と多少の乖離も見られる。そのため、これらの要因を把握するとともに、それを適切に考慮することで、補正係数 ν の高精度化、合理化が可能となる。

3.2 地盤の固有周期 T_g の変化に伴う補正係数の変化の傾向

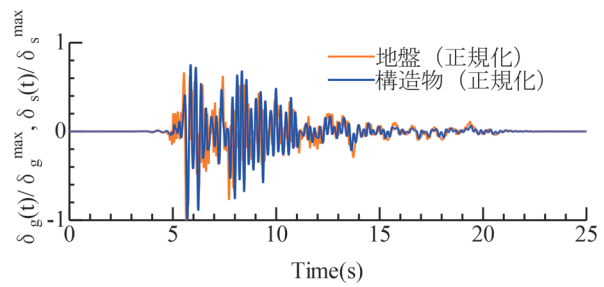
前節で整理した解析的な補正係数 ν を、地盤種別ごとに分類し、地盤種別毎に周期比 α によって平均を算定した結果を図6に示す。これを見ると、G2地盤やG3地盤などの固有周期 T_g が短い地盤ほど、上限値、下限値ともに補正係数が大きい傾向がある。それに対してG6地盤やG7地盤などの固有周期 T_g が長い地盤は、上限値、下限値ともに値が小さい。この要因に関して、代表的な解析結果を用いて簡単に考察する。図7には地盤の固有周期が短い条件 ($T_g=0.12\text{s}$ (G2地盤)) での結果を、図8には地盤の固有周期が長い条件 ($T_g=1.55\text{s}$ (G7地盤)) での、地盤・構造物の応答波形を重ね描いたものを示す。なお各図の (a) は周期比 $\alpha=0.1$ とした場合、(b)

は周期比 $\alpha=2.0$ とした場合の結果である。まず、地盤の固有周期が短い条件での結果 (図7) に着目すると、当然のように $\alpha=0.1$ では地盤と構造物が概ね同一の挙動を示している。これに対して $\alpha=2.0$ では多少の位相ずれが生じているようにも見えるが、全体的な振動の傾向は地盤・構造物とも類似しており、それぞれが最大変位を示す時刻は、地震動の主要動の到達時間内 (時刻5~10秒周辺) の範囲に収まっている。続いて、地盤の固有周期が長い条件 (図8) を見ると、まず $\alpha=0.1$ とした条件では地盤と構造物が概ね同一の挙動を示している。また $\alpha=2.0$ とした条件では、構造物の振動が非常に緩やかに成長するため、応答変位が最大になるタイミングが地震動の主要動が終了した後の時刻となっている。

以上のように、地盤・構造物の固有周期が変化すると、地震動の継続時間中のそれぞれの振動回数も変化するため、応答の成長過程、減衰過程に大きな差が生じる。結果として同一の固有周期比 α で整理した場合には、固有周期が短い条件の方がより最大応答のタイミングが一致する可能性が高くなる一方で、固有周期が長い条件では最大応答のタイミングがずれる可能性が高くなって

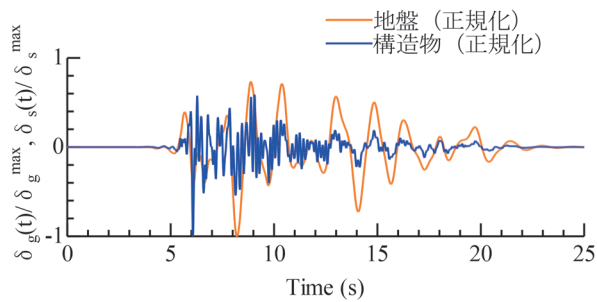


(a) $\alpha=0.1$ の場合 (上限値 : 1.00, 下限値 : 0.91)

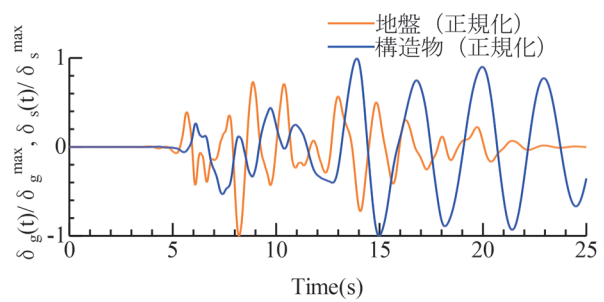


(b) $\alpha=2.0$ の場合 (上限値 : 0.48, 下限値 : -0.08)

図7 地盤固有周期が短い条件 ($T_g=0.12s$) での地盤・構造物の応答変位波形



(a) $\alpha=0.1$ の場合 (上限値 : 0.54, 下限値 : -0.17)



(b) $\alpha=2.0$ の場合 (上限値 : 0.09, 下限値 : -0.72)

図8 地盤固有周期が長い条件 ($T_g=1.55s$) での地盤・構造物の応答変位波形

る。その結果、図6のように地盤の固有周期 T_g が長くなると徐々に補正係数 ν が小さくなる傾向が見られるものと解釈できる。

3.3 補正係数 ν の推定式の提案

これまでの検討を踏まえて、地盤の固有周期 T_g をパラメータとして考慮した補正係数 ν の算定方法を提案する。この時には、耐震標準⁸⁾で採用されている補正係数 ν の算定式を基本とすることとした。図6より、地盤の固有周期 T_g が短いG2地盤では、補正係数の上限値は従来法と良好に一致する一方で、下限値は従来法と比較するとより大きくなっている。これに対して地盤の固有周期 T_g が長いG7地盤では、補正係数の下限値は従来法と類似した傾向を示しているものの、補正係数の上限値は従来法に対してより小さくなっている。そこで、地盤の固有周期 T_g に応じて、従来法の上限値を線形的に低減、下限値を線形的に増加させる表現形式として、次式を定義した。

① 上限値 ν_U の算定

$$\begin{aligned} \nu_U &= 1.0 - 0.2T_g & (\alpha \leq 0.75) \\ \nu_U &= -2.0\alpha + 2.5 - 0.2T_g & (0.75 < \alpha \leq 1.10) \\ \nu_U &= 0.3 - 0.2T_g & (1.10 \leq \alpha) \end{aligned} \quad (1)$$

② 下限値 ν_L の算定

$$\begin{aligned} \nu_L &= 0.3 - 0.2T_g & (\alpha \leq 0.75) \\ \nu_L &= -2.0\alpha + 1.8 - 0.2T_g & (0.75 < \alpha \leq 1.10) \\ \nu_L &= -0.4 - 0.2T_g & (1.10 \leq \alpha) \end{aligned} \quad (2)$$

上式による補正係数 ν ($T_g=0.1, 0.8, 1.5$ とした場合) と従来法による補正係数 ν の比較結果を図9に示す。これを見ると、補正係数 ν の全体的な傾向は従来法と同一である一方で、提案法を用いることで、地盤の固有周期 T_g が短い場合は補正係数の下限値が従来法よりも大きくなっている。また、地盤の固有周期 T_g が長い条件では、

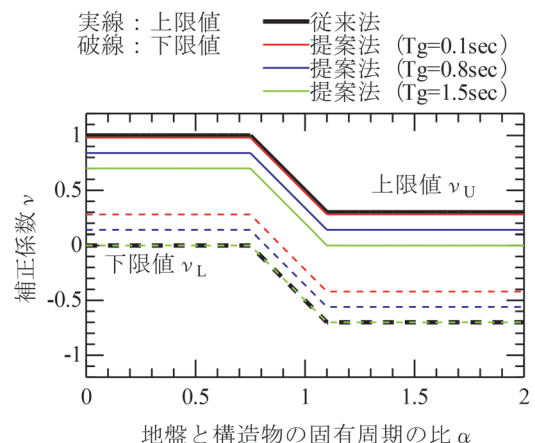
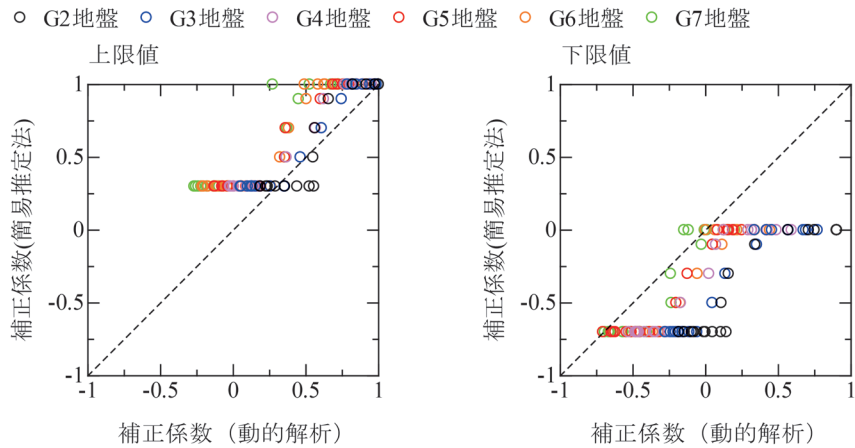
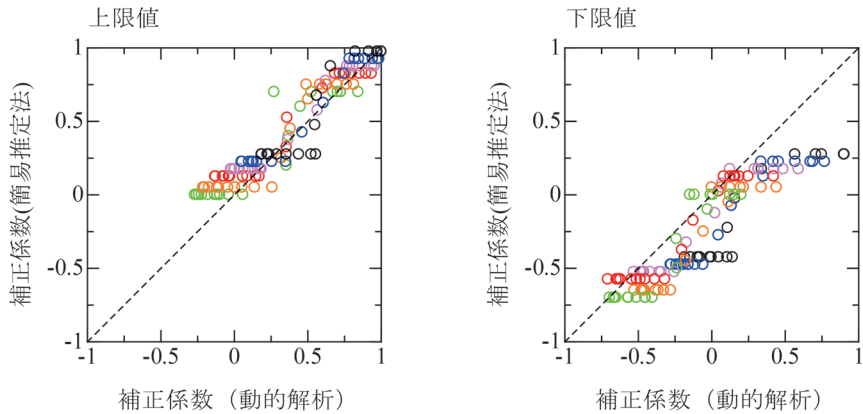


図9 提案法による補正係数 ν



(a) 従来法を使用した場合



(b) 提案法を使用した場合

図 10 簡易推定法（従来法、提案法）と動的解析結果の比較

補正係数の上限値が従来法よりも小さくなっており、前節の解析的な検討によって得られた特徴を良好に表現できていることが分かる。

続いて提案法の有効性を確認するため、動的解析に基づいて評価した補正係数 ν （図6に示す補正係数 ν ）と、簡易推定法（従来法、提案法）による補正係数 ν を比較した結果を図10に示す。この結果より、提案法を用いることで補正係数の上限値、下限値ともに従来式よりもより適切な結果を推定していることが確認できる。また従来法と比較すると上限値がより小さく、下限値がより大きくなる傾向があるため、結果的に補正係数 ν の低減、設計の合理化も期待される。

4. まとめ

本検討では、杭基礎構造物の地震応答値を応答変位法によって算出する際の慣性力と地盤変位の組合せ係数の高精度推定に向けた検討を行った。具体的には、多数の地盤・構造物に対して線形動的解析を実施するとともに、

この結果から補正係数 ν を自動処理する方法を整理した。その結果、地盤と構造物の周期比 α が同一であっても地盤の固有周期 T_g が大きくなると徐々に補正係数 ν が小さくなることを確認した。これを踏まえて地盤の固有周期 T_g をパラメータとして考慮した補正係数 ν の簡易推定法を提案した。これにより、従来法と比較して、補正係数 ν をより適切に設定可能であることを確認した。

なお今回の検討では地盤、構造物とも線形領域に限定した整理となっているが、当然のように地盤・構造物が塑性化すると、それぞれの周期特性も複雑に変化するため、これを考慮した適切な周期比 α を設定する必要がある。これらについては今後さらに検討を行う。

文 献

- 1) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 軟弱地盤中の杭基礎構造物の地震応答特性と耐震設計への応用, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.631-640, 1998
- 2) 野上雄太, 室野剛隆, 西村隆義: 構造形式の違いによる慣

- 性力と地盤変位の杭への影響度，第12回地震時保有耐力に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2009
- 3) 河村壮一，西沢敏明，田尻貞夫：液状化で破損した杭の調査，基礎工，Vol.2，No.7，pp.120-124，1984
 - 4) 日本建築学会近畿支部基礎構造部会，兵庫県南部地震建築基礎被害調査委員会：兵庫県南部地震における建築基礎の被害調査事例報告書，1996
 - 5) 日本国有鉄道：耐震設計指針（案）解説，1983
 - 6) 室野剛隆，西村昭彦：杭基礎の耐震設計における地盤変位と慣性力の組合せ，第3回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，1999
 - 7) 田村修次，藤森健史，勝二理智，三町直志，眞野英之，内田明彦，船原英樹，関口徹：応答変位法における地盤変位と構造物慣性力の低減係数，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造I，pp.519-520，2012
 - 8) 国土交通省鉄道局監修，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），丸善出版，2012
 - 9) 田中仁規，坂井公俊：鉄道の耐震設計における慣性力と地盤変位の組合せ係数の改良一線形状態での検討一，土木学会論文集，Vol.80，No.13，23-13119，2024
 - 10) 坂井公俊：大規模地震時の地表面地震動を効率的に評価するための標準地盤データの提案，土木学会論文集，Vol.79，No.13，22-13001，2023
 - 11) 福島美光，翠川三郎：周波数依存性を考慮した表層地盤の平均的な Q^{-1} とそれに基づく地盤増幅率の評価，日本建築学会構造系論文集，第460号，pp.37-46，1994