

### 地盤・構造物の減衰が応答変位法における 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 Ground and Structure Damping on Combination of Inertia Force and Ground Displacement in Seismic Deformation Method

Niki TANAKA Kimitoshi SAKAI

The seismic response values of pile foundation structures are calculated using the seismic deformation method, which uses inertia force and ground displacement. This paper presents a study that aims to achieve a highly accurate estimation of the combination of inertia force and ground displacement. Specifically, dynamic analyses were conducted for various types of grounds and structures under conditions where either damping was varied. The combination coefficients of the actions were then compiled and discussed. The result clarified that the combination coefficients of the actions change with the damping of the grounds and structures. Using this trend of change, a simple formula has been proposed to calculate the combination coefficient of the actions, taking into account the effect of damping. Using the proposed method, it is possible to set more appropriate coefficients than before, taking into account the damping effects on the ground and structure.

キーワード：減衰，応答変位法，慣性力，地盤変位

## 1. はじめに

杭基礎などの深く根入れされた基礎構造物は、地震時に上部工からの慣性力だけでなく、地盤変位の影響も強く受ける。そのため、耐震設計において両者の影響を適切に考慮することが重要であり、鉄道構造物の設計では応答変位法が用いられている<sup>1)</sup>。

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。そのため、地震作用の適切な設定という観点では、慣性力と地盤変位の組合せを適切に考慮することも必要となる。この慣性力と地盤変位の組合せに関する検討は以前から実施されており<sup>例えば 2)3)</sup>、これらの成果が建築基礎構造物<sup>4)</sup>や鉄道構造物<sup>1)</sup>の設計に反映されている。例えば「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」<sup>1)</sup>（以下、鉄道標準）においては、構造物の固有周期  $T_s$  と地盤の固有周期  $T_g$  の比  $a$  に対する組合せ係数の簡易な設定法（図1，式(1)，(2)）が提示されている。ただし、この組合せ係数は限られた実験、解析に基づいて設定されたものであるため、改良の余地が多く残されている。

【上限値 $w$ 】	$w = 1.0$	$(\alpha \leq 0.75)$	
	$w = -2.0\alpha + 2.5$	$(0.75 < \alpha \leq 1.10)$	(1)
	$w = 0.3$	$(1.10 \leq \alpha)$	
【下限値 $u$ 】	$u = 0.0$	$(\alpha \leq 0.75)$	
	$u = -2.0\alpha + 1.5$	$(0.75 < \alpha \leq 1.10)$	(2)
	$u = -0.7$	$(1.10 \leq \alpha)$	

\* 元 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

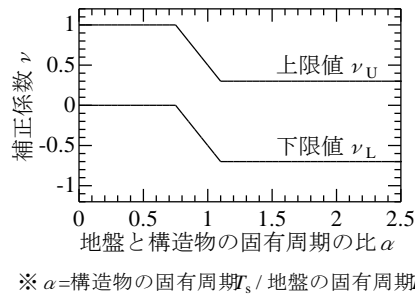


図1 慣性力と地盤変位を組み合わせるための補正係数<sup>1)</sup>

これを踏まえて筆者らは近年、慣性力と地盤変位を組み合わせるための係数（以降、補正係数 $\nu$ ）の高度化に向けた検討を行っている<sup>5)6)</sup>。これら検討では、地盤の固有周期 $T_g$ の変化<sup>5)</sup>や、地盤・構造物の非線形の程度<sup>6)</sup>が補正係数 $\nu$ に与える影響を把握するとともに、この影響を考慮した補正係数 $\nu$ の算定式を提案している。

これらは主に、地盤・構造物の振動の繰り返し回数や周期特性の変化に着目したものである。その一方で、大規模地震時には地盤・構造物の非線形挙動に伴って、各要素の減衰特性が大きく変化する。また、構造物が線形挙動をする条件においても、地中部と地上部の振動寄与率によって減衰特性が大きく変化することが確認されている<sup>7)</sup>。このような地盤・構造物の減衰の変化が、補正係数 $\nu$ に影響を与える可能性が考えられるが、この影響を分析した事例はほとんどない。

そこで本稿では、地盤・構造物それぞれの減衰の変化が、慣性力と地盤変位の組合せを表現する補正係数 $\nu$ に与える影響を把握した検討<sup>8)</sup>について報告する。具体的には、地盤と構造物の減衰定数を変化させた条件で、多様な地盤・構造物の組合せに対して地震応答解析を実施する。この結果を整理することで、補正係数 $\nu$ の傾向を把握するとともに、これを考慮した補正係数 $\nu$ の算定式を提案する。

なお、解析結果の考察を容易とするため、本検討では地盤・構造物ともに線形弾性体とした条件で解析を実施する。L2地震時には地盤・構造物とも大きく非線形化することが想定されるが、この時には著者らが提案している手順<sup>6)</sup>に従って各要素の塑性化に伴う周期特性の変化を考慮するとともに、今回得られた知見に基づいて塑性化に伴う減衰変化の傾向を考慮することで、塑性化に伴う周期、減衰の変化を適切に考慮可能となる。

## 2. 解析条件・結果の整理方法

### 2.1 地盤の応答解析の条件

地盤の応答解析には、時間領域の動的解析法を用いる。対象地盤は、多様な地層構成を有する50地盤<sup>9)</sup>を用いる。50地盤の減衰は、各地盤の地層構成、土質区分、せん断剛性等に基づいたQ値の提案式<sup>10)</sup>をもとにしたレーリー減衰が設定されている<sup>9)</sup>。この減衰の周波数依存の形状を維持したまま、1次固有振動数の減衰定数が0.05となるようにレーリー減衰の係数 $a$ 、 $b$ を調整した。これを $h_g=0.05$ の基本ケースとする。

続いて、地盤の減衰の影響に着目した検討を行う際（3.1節）には、地盤の減衰定数 $h_g$ を0.01~0.30の間で変化させる。この時には、レーリー減衰の係数を基本ケースから定数倍する。

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II）<sup>1)</sup>を共通して用いる。

## 2.2 構造物の応答解析の条件

地盤応答解析によって得られた地表面地震動を入力とした構造物の応答解析を実施することで、構造物天端の応答を算定する。構造物は等価な1自由度モデルで表現する。構造物の固有周期  $T_s$  は、最終的な補正係数  $\nu$  の算定結果を地盤と構造物の固有周期比  $\alpha$  ( $= T_s/T_g$ ) で整理することを念頭に、各地盤の固有周期  $T_g$  に対して周期比  $\alpha$  が 0.1~2.5 まで 0.1 刻みで 25 タイプとなるように設定する。構造物の減衰定数  $h_s$  は 0.05 を基本とし、構造物の減衰の影響に着目した検討時 (3.2 節) には、この減衰定数  $h_s$  を 0.01~0.30 の間で変化させた。

なお、ここまで述べた地盤・構造物の減衰は、それぞれの非線形挙動に伴う履歴減衰も含めた等価減衰を想定したものである。そのため 30% という比較的大きな減衰まで設定している。また減衰が大きくなると、系の減衰固有振動数も変化するが、今回の減衰範囲ではせいぜい数% の変化であるため、この影響は無視して結果の整理を行う。

以上の条件に基づいて、地盤・構造物の動的解析を網羅的に実施することで、各条件における応答波形が得られる。これらの応答波形から補正係数  $\nu$  を算定することになるが、整理の手順は既往の検討<sup>5) 6)</sup>と同様であるため、紙面の都合上省略する。

## 3. 減衰の変化が補正係数 $\nu$ に与える影響

### 3.1 地盤の減衰定数 $h_g$ が補正係数 $\nu$ に与える影響

#### 3.1.1 補正係数 $\nu$ の算定結果

ここでは、地盤の減衰  $h_g$  が補正係数  $\nu$  に与える影響を把握する。具体的には、構造物の減衰定数を  $h_s=0.05$  に固定した上で、地盤の減衰定数を変化させた条件で解析を行い、 $h_g$  毎に補正係数  $\nu$  を整理する。得られた周期比  $\alpha$  と補正係数  $\nu$  の関係を図 2 に示す。

全体的な傾向として、補正係数  $\nu$  は下限値、上限値とも鉄道標準による取り扱い (図 1)<sup>1)</sup>と同様に右下がりの傾向を示している。これは周期比  $\alpha$  で表現することで、地盤と構造物の振動が同位相から逆位相に変化する傾向を表現したものである。

続いて地盤の減衰定数  $h_g$  の変化に伴う補正係数  $\nu$  の変化に着目する。周期比  $\alpha$  が 0.7 程度以下の領域では、補正係数  $\nu$  は地盤の減衰  $h_g$  によらず概ね同程度の値となっている。その一方で、周期比  $\alpha$  が 0.7 程度よりも大きくなると、地盤の減衰  $h_g$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなっている。これは上限値 (図 1 (a))、下限値 (図 1 (b)) とともにみられる傾向である。

#### 3.1.2 地盤の減衰定数 $h_g$ の影響の解釈

図 2 で得られた地盤の減衰  $h_g$  の違いが補正係数  $\nu$  に与える影響を解釈するため、固有周期  $T_s=1.006$  s の地

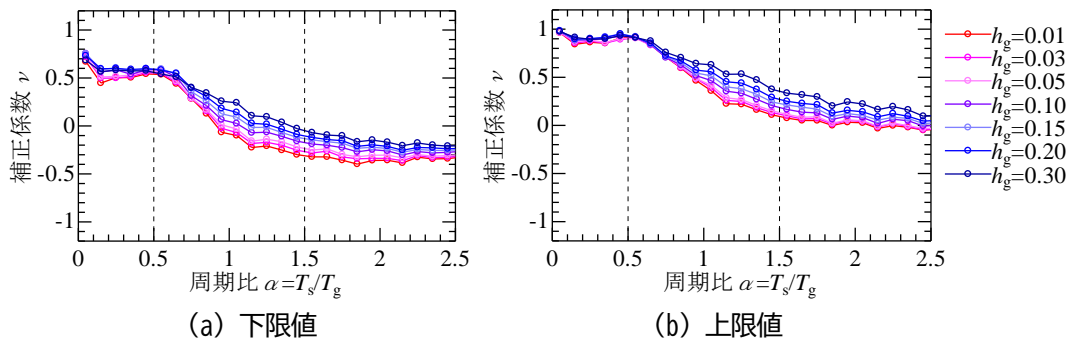


図 2 地盤の減衰  $h_g$  が変化した場合の補正係数の算定結果

盤に絞って考察を行う。まず、この地盤の減衰定数  $h_g$  を 0.01 から 0.30 まで変化させた条件における地盤変位波形の主要動付近の拡大図と各減衰の最大値をまとめて図 3 に示す。当然のように、減衰  $h_g$  が小さいほど変位振幅が大きくなっている。

続いて、地盤の減衰  $h_g = 0.03, 0.20$  の条件に絞って、地盤応答を正規化した結果を図 4 に、構造物の固有周期  $T_s = 1.509s$  における応答変位波形（正規化後）を図 5 に示す。まず、地盤変位（図 4）の絶対値が最大となる時刻は、減衰  $h_g$  によらず 13 秒付近であるが、それ以降の振幅は減衰  $h_g$  が小さい条件の方が相対的に大きくなっている。その一方で、正規化した構造物応答（図 5）は地盤の減衰  $h_g$  によらず概ね同様となっている。

以上の傾向を踏まえて、周期比  $\alpha = 0.5$  ( $T_s = 1.006s$ )、 $\alpha = 1.5$  ( $T_s = 1.509s$ ) の条件（図 2 の縦破線）における地盤・構造物応答波形を比較する。 $\alpha = 0.5$  における地盤・構造物の応答波形を図 6 に、 $\alpha = 1.5$  の応答波形を図 7 に示す。

周期比  $\alpha = 0.5$  の結果（図 6）を見ると、地盤と構造物は概ね同位相で振動するため、地盤・構造物の応答波形は類似している。そのため地盤の減衰定数  $h_g$  の大小によらず、地盤と構造物の変位が同時に最大となりやすい。

その一方で、周期比  $\alpha = 1.5$  の結果（図 7）を見ると、地盤・構造物の振動波形には位相ずれがみられるとともに、構造物応答は徐々に成長する。地盤変位が最大となる瞬間 ( $T = 13.0s$ ) において、構造物応答は成長途中であり、結果として補正係数  $\nu$  の値は小さい。また図 5 で示したように、構造物応答の波形形状は、地盤減衰の影響をあまり受けなため、結果的に地盤変位最大時の補正係数  $\nu$  は地盤減衰に依らず小さい値となっている。これに対して、構造物変位が最大となる瞬間（図 7(a) :  $T = 14.1s$ , 図 7(b) :  $T = 15.5s$ ) は、地盤変位が減衰する段階であり、図 4 で示したように地盤減衰が小さいほど振幅が大きくなる。そのため、地盤の減衰定数  $h_g$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が絶対値としては大きく（逆位相で振動する傾向が強いため、値としては小さく）なる傾向がみられる（図 7(a) :  $\nu = -0.68$ , 図 7(b) :  $\nu = -0.20$ ）。

以上のように、地盤の減衰  $h_g$  の変化は、周期比  $\alpha$  が 1 より大きくなる条件で顕著となり、減衰  $h_g$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が減少する傾向が強くなると解釈できる。

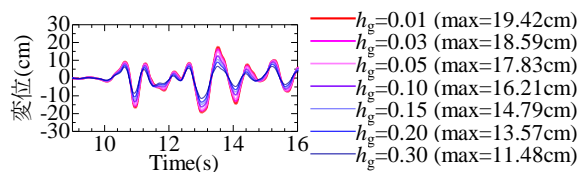


図 3 地盤の減衰  $h_g$  が変化した場合の地盤応答 ( $T_g = 1.006s$ )

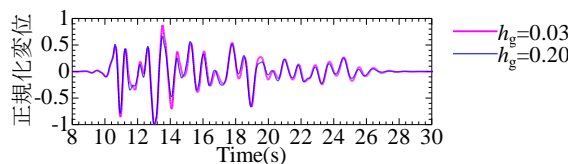


図 4 正規化した地盤応答 ( $T_g = 1.006s$ )

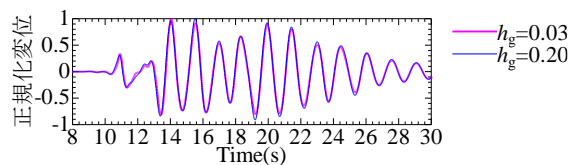


図 5 正規化した構造物応答 ( $T_g = 1.006s$ ,  $T_s = 1.509s$ ,  $h_s = 0.05$ )

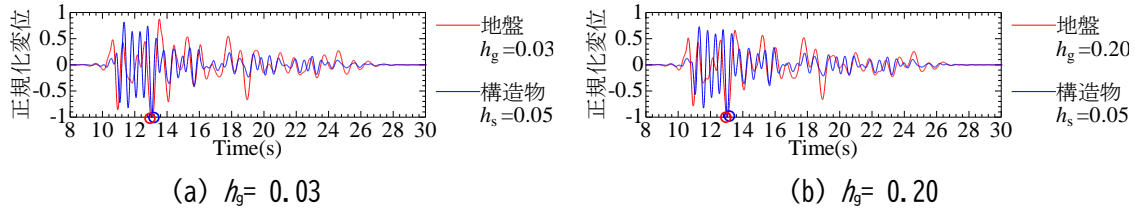


図6 周期比 $\alpha=0.5$ の場合の正規化した地盤、構造物の時刻歴応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=0.503s$ )

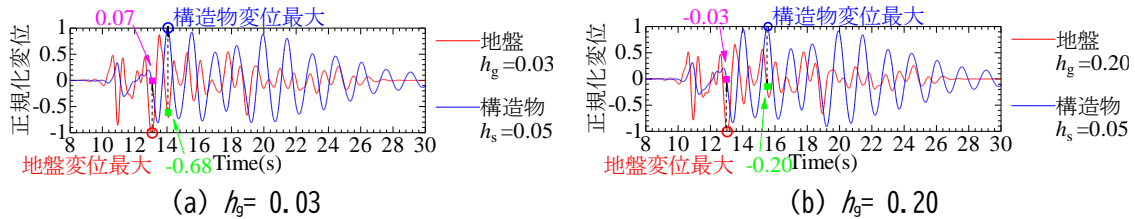


図7 周期比 $\alpha=1.5$ の場合の正規化した地盤、構造物の時刻歴応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=1.509s$ )

### 3.2 構造物の減衰定数 $h_s$ が補正係数 $\nu$ に与える影響

#### 3.2.1 補正係数 $\nu$ の算定結果

次に、構造物の減衰  $h_s$  の変化が補正係数  $\nu$  に与える影響について整理する。これは前節とは逆に、地盤の減衰を  $h_g=0.05$  に固定した上で、構造物の減衰定数  $h_s$  を  $0.01\sim 0.30$  の範囲で変化させた条件で整理を行う。それぞれの減衰定数の組合せ毎に補正係数  $\nu$  を算出するとともに、周期比  $a$  ごとの平均値を算定した。得られた周期比  $a$  と補正係数  $\nu$  の関係を図8に示すが、全体的な右下がりの傾向は図2と同様である。

まず図8(a)に示した下限値の結果を見ると、周期比  $a$  が  $0 \leq a \leq 1.3$  の範囲において構造物の減衰定数  $h_s$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなるとともに、これ以上 ( $1.3 \leq a$ ) の範囲では減衰の影響は相対的に小さい。

上限値の結果 (図8(b)) では、周期比  $a=0.1$  付近、 $1.8 \leq a$  の範囲では構造物減衰  $h_s$  が変化しても  $\nu$  は概ね同等である。その一方で、 $0.3 \leq a \leq 1.8$  程度の範囲では、減衰  $h_s$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなっている。

以上のように、下限値、上限値とも限られた周期比  $a$  において、構造物減衰  $h_s$  の影響を受ける傾向がみられた。

#### 3.2.2 構造物の減衰定数 $h_s$ の影響の解釈

図8の傾向を解釈するための考察を行う。まず、地盤を前節と同様 (周期  $T_g=1.006s$ ) とした上で、周期比  $\alpha=0.8$  ( $T_s=0.805s$ ) とした条件での構造物減衰  $h_s$  毎の構造物応答波形をまとめて図9に示す。これより、

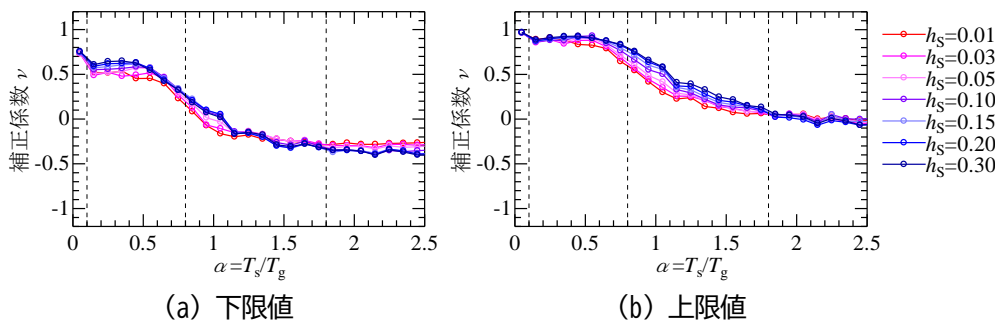


図8 構造物の減衰  $h_s$  が変化した場合の補正係数の算定結果

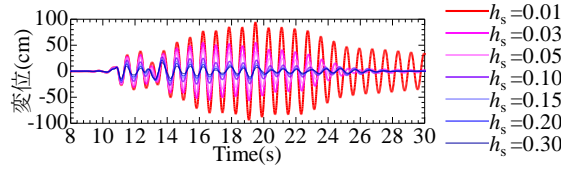


図9 構造物の減衰  $h_s$  が変化した場合の構造物の応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=0.805s$ )

構造物の減衰定数  $h_s$  が小さいほど、構造物応答が成長するために必要な時間と振動全体の継続時間が長くなる。

続いて、構造物の減衰を  $h_s=0.03, 0.20$  に絞って、周期比  $\alpha=0.1, 0.8, 1.8$  とした条件での正規化した地盤・構造物応答を図10～図12に示す。

まず周期比  $\alpha=0.1$  の結果(図10)を見ると、地盤・構造物は同位相かつ類似した波形形状となっており、両者はほぼ同じタイミングで最大となっている。

次に周期比  $\alpha=0.8$  の条件(図11)では、地盤振動によって構造物応答が徐々に増幅するため、構造物減衰が小さい場合(図11(a))では、構造物の振動継続時間が長くなる。一方で、構造物の減衰が大きくなる(図11(b))と、構造物応答の成長が限定的であり、結果として構造物応答は地盤と類似した形状になる。これによって、構造物の減衰  $h_s$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなったと考えられる。

最後に、周期比  $\alpha=1.8$  の条件(図12)では、地盤と構造物が逆位相で振動している。また、構造物減衰が小さい条件(図12(a))では、構造物応答が十分成長する前に地震動が終了している。その一方で構造物減衰が大きい条件(図12(b))では、図11(b)と同様に構造物応答の成長が限定的である。結果的に構造物減衰の大小によらず構造物応答の成長が限定的になり、補正係数  $\nu$  に与える構造物の減衰  $h_s$  の影響が相対的に小さかったと解釈できる。

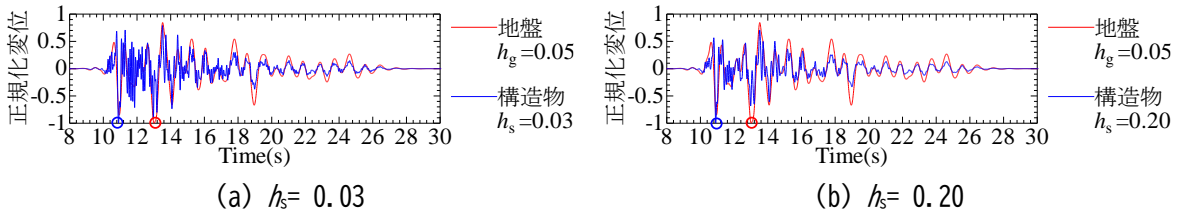


図10 周期比  $\alpha=0.1$  の場合の正規化した地盤、構造物の時刻歴応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=0.101s$ )

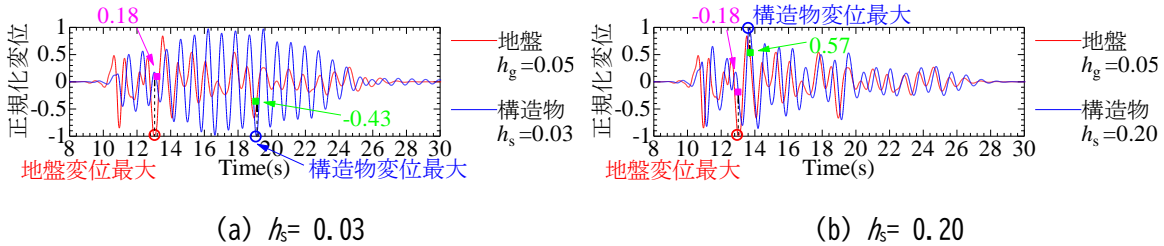


図11 周期比  $\alpha=0.8$  の場合の正規化した地盤、構造物の時刻歴応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=0.805s$ )

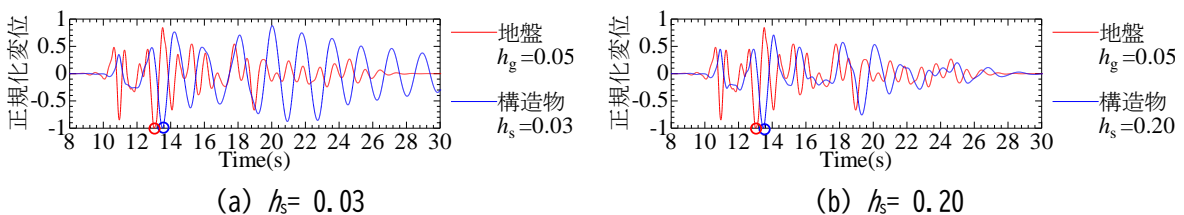


図12 周期比  $\alpha=1.8$  の場合の規化した地盤、構造物の時刻歴応答波形 ( $T_g=1.006s$ ,  $T_s=1.811s$ )

以上のように、構造物の減衰  $h_s$  の変化は、周期比  $\alpha$  が 1 前後の領域でのみ顕著となり、減衰  $h_s$  が小さいほど補正係数  $v_g$  が減少する傾向が強くなる。

#### 4. 減衰の変化を考慮した補正係数 $v_g$ の算定法

##### 4.1 補正係数 $v_g$ の改良方針

前章で確認した地盤・構造物の減衰が補正係数  $v_g$  に与える影響に基づいて、設計で用いる補正係数  $v_g$  に減衰の影響を導入する手法を提示する。ここで、既往の検討<sup>5)6)</sup>との連続性を勘案して、地盤・構造物の減衰定数  $h_g$ ,  $h_s$  を 0.05 とした場合の解析結果を基本とし、この結果との差分によって減衰  $h_g$ ,  $h_s$  の影響を整理する。最終的に、従来の補正係数の簡易算定式<sup>1)</sup> (図 1, 式(1), (2)) に減衰の補正項を組み込む。

##### 4.2 地盤の減衰定数 $h_g$ の影響

基本ケース ( $h_g=0.05$ ) との補正係数  $v_g$  の差  $\Delta v_g(h_g)$  を地盤の減衰定数  $h_g$  ごとに算定した結果を図 13 に示す。なお前章の結果から、地盤の減衰定数  $h_g$  が補正係数  $v_g$  に与える影響は上限値、下限値でほぼ同様であるため、両者の平均値を実線で記載している。

この図より、周期比  $\alpha < 0.75$  の範囲では、減衰  $h_g$  の影響は限定的である。その一方で、周期比  $\alpha \geq 0.75$  の範囲では、減衰  $h_g$  が大きいほど補正係数の差  $\Delta v_g(h_g)$  が大きくなる。ただし周期比  $\alpha \geq 1.1$  の範囲では、 $\Delta v_g(h_g)$  は周期比  $\alpha$  に依らず概ね一定になっている。

この結果を踏まえて、周期比  $\alpha=0.75, 1.1$  を分岐とした式(3)による表現を試みる。

$$\begin{aligned} \Delta v_g(h_g) &= 0 & (\alpha \leq 0.75) \\ \Delta v_g(h_g) &= 0.75(h_g - 0.05)(\alpha - 0.75) / (1.1 - 0.75) & (0.75 < \alpha \leq 1.10) \\ \Delta v_g(h_g) &= 0.75(h_g - 0.05) & (1.10 < \alpha \leq 2.5) \end{aligned} \tag{3}$$

この式(3)によって表現される補正係数の差  $\Delta v_g(h_g)$  をまとめて図 14 に示す。これを見ると、簡易な表現によっても図 13 の全体的な傾向を良好に表現できている。

そこで、式(3)に示す  $\Delta v_g(h_g)$  を用いた次式によって、地盤の減衰定数  $h_g$  の変化を考慮することを考える。

$$v_g(h_g) = v_g(0.05) + \Delta v_g(h_g) \tag{4}$$

ここに、 $v_g(h_g)$  : 地盤の減衰定数  $h_g$  における補正係数、 $v_g(0.05)$  :  $h_g=0.05$  のときの補正係数である。

式(4)を用いて、地盤の減衰定数  $h_g$  の変化に伴う補正係数  $v_g(h_g)$  を算出した結果を図 15 に青色実線で示す。この図には、補正前の結果として、減衰定数  $h_g=0.05$  における補正係数  $v_g(0.05)$  を水色実線で、正解値

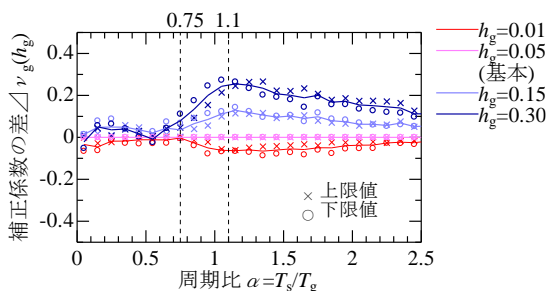


図 13 基本ケースとの補正係数  $v_g$  の差  $\Delta v_g(h_g)$

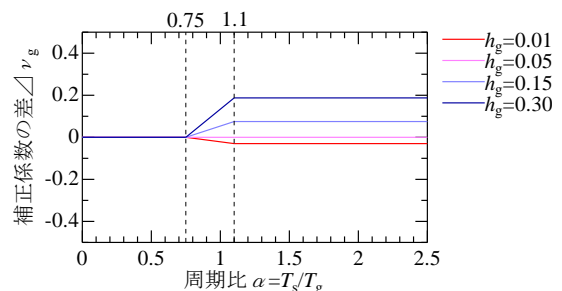


図 14  $\Delta v_g(h_g)$  の近似式

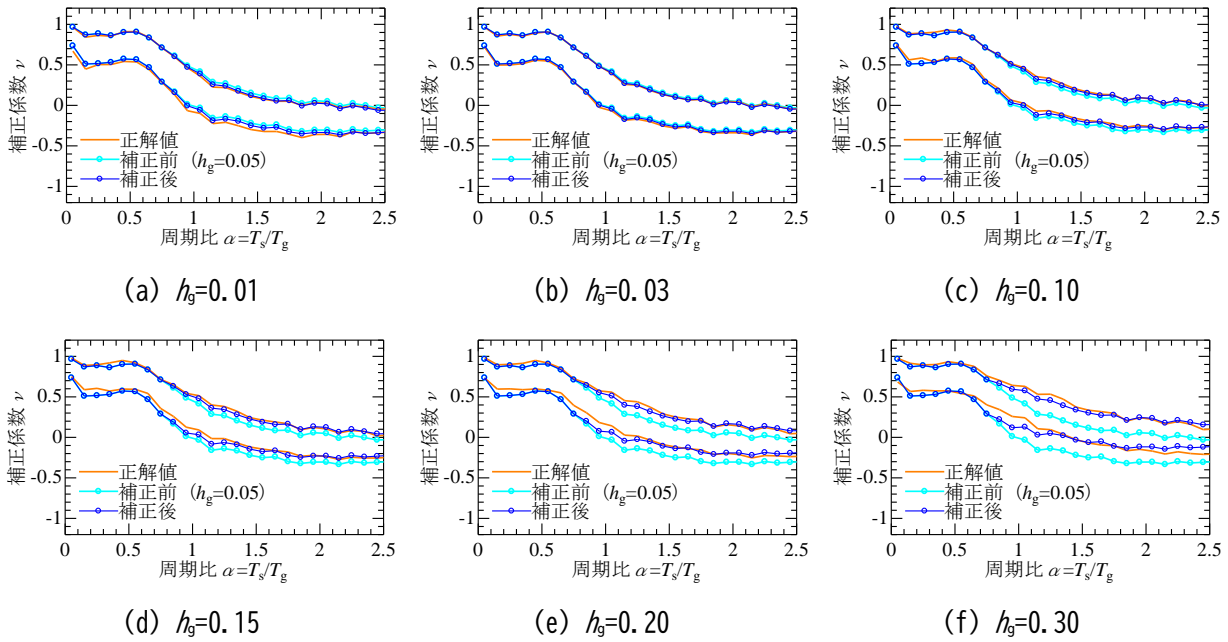


図 15 補正係数の算定結果 (地盤の減衰定数  $h_g$  を補正後)

として、各減衰  $h_g$  における解析結果を橙色実線で示している。式(4)による補正係数  $\nu_g(h_g)$  が正解値に近づいており、今回提案した簡易な補正係数  $\nu$  の妥当性が確認できる。

なお紙面の都合上省略するが、構造物の減衰定数  $h_s$  による補正手法の提案と妥当性の確認も別途実施<sup>8)</sup>している。

## 5. まとめ

本検討では、応答変位法における慣性力と地盤変位の組合せ係数の高度化に向けた検討を行った。具体的には、地盤・構造物の減衰定数の変化が作用の組合せ係数に与える影響を解析的に把握するとともに、この結果の解釈、簡易な補正式の提案を行った。本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 多数の地盤、構造物に対してそれぞれの減衰定数を変化させた網羅的な動的解析を実施するとともに、この結果から慣性力と地盤変位の補正係数  $\nu$  を整理した。この補正係数  $\nu$  を地盤と構造物の周期比  $\alpha$  で整理したところ、地盤、構造物の減衰によって補正係数  $\nu$  が変化し、その変化率は周期比  $\alpha$  によって異なる傾向を示すことを確認した。
- (2) 地盤の減衰  $h_g$  が補正係数  $\nu$  に与える影響は、周期比  $\alpha$  が小さい範囲では些少であり、周期比  $\alpha$  が大きい範囲では、減衰  $h_g$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなる。
- (3) 構造物の減衰  $h_s$  が補正係数  $\nu$  に与える影響は、周期比  $\alpha$  が小さい範囲では減衰  $h_s$  が小さいほど補正係数  $\nu$  が小さくなる。周期比  $\alpha$  が大きい範囲では、影響は些少であった。また上記(2)も含めて、代表的な解析結果に基づく分析を実施し、各減衰の変化が補正係数に影響する要因を整理した。
- (4) 地盤、構造物の減衰の影響を補正係数  $\nu$  に簡易に考慮可能とするため、地盤、構造物の減衰定数を考慮した補正係数  $\nu$  の簡易算定式を提示した。さらに、提案手法の妥当性を確認した。

今回整理した方法を用いることで、これまで考慮していなかった地盤条件・構造物条件の違いや非線形化に伴う地盤・構造物の減衰の変化を考慮した上でのより適切な慣性力と地盤変位の組合せ係数  $\nu$  の設定が期待される。

ここで本検討における減衰は、地盤・構造物それぞれの履歴減衰を含んだ等価減衰を表現していることに相当する。設計実務を考えると、地盤・構造物それぞれの塑性化程度と減衰変化の関係を簡易に表現する必要がある。さらに、これまでの検討内容<sup>6)7)</sup>との融合や実際の構造物を対象とした妥当性の検討、構造物断面に与える影響の把握も必要である。これらについては、今後も検討を継続する予定である。

## 文献

- 1) 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
- 2) 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，pp.1-8，1999
- 3) 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
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019
- 5) 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－線形状態での検討－，土木学会論文集，Vol.80，No.13，論文ID: 23-13119，2024
- 6) 田中仁規，坂井公俊：地盤と構造物の非線形化を考慮した応答変位法における作用の組合せ係数の改良，日本地震工学会論文集，Vol.25，No.4，pp.62-73，2025
- 7) 石川太郎，坂井公俊，和田一範，室野剛隆，小島謙一：構造物全体系の振動モードに占める地中部の振幅比を考慮した鉄道橋梁・高架橋の実用的な減衰設定方法の提案，日本地震工学会論文集，Vol.20，No.3，pp.3\_35-3\_50，2020
- 8) 田中仁規，坂井公俊：鉄道構造物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－地盤・構造物の減衰の影響－，土木学会論文集，Vol.81，No.13，論文ID: 24-13495，2025
- 9) 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，論文ID: 22-13001，2023
- 10) 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