

地盤および構造物の非線形性を考慮した 応答変位法の慣性力と地盤変位の組合せ

室野 剛隆¹・西村 昭彦²・長谷川 淳史³

¹正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)

²フェロー会員 工博 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術開発事業部 (同 上)

³正会員 (株)テス 技術部 (〒185-0034 国分寺市光町 2-8-38)

鉄道における軟弱地盤中の杭基礎構造物の耐震設計では応答変位法が用いられている。著者らは、これまでの検討で上部構造物による慣性力と地盤変位との間には位相差があることを説明しており、上部構造物と地盤の固有周期の大小関係から慣性力と地盤の荷重の組合せ方法を変化させることを提案してきた。これまでの検討は、弾性挙動の場合と上部構造物が塑性化した場合について報告してきた。本検討では杭部材そのものが塑性化した場合についても検討を行い、弾性挙動の場合・上部構造物が塑性化した場合の結果を比較し、組合せ方法の適用性を再確認した。

Key Words: Seismic deformation method, Inertial interaction, Kinematic interaction, Nonlinear response analysis

1. はじめに

軟弱な地盤では地震時の地盤変位量が大きく、この地盤変位により大きな応力が杭に発生する事がこれまでの解析と実験等により明らかになっている。鉄道では軟弱地盤中の杭基礎構造物の耐震設計においては、地震による上部構造物からの慣性力と地盤変位の影響を応答変位法により考慮している。慣性力と地盤変位はそれぞれ単独で作用しているのではなく、互いに影響を及ぼしあっている。著者らはこれまでに地盤-基礎-上部構造物系の動的解析・振動実験等により、上部構造物の固有周期(T_s)と地盤の固有周期(T_g)との大小関係により慣性力と地盤変位との間に位相差が生じる事を明らかにした¹⁾。慣性力と地盤変位との位相差を考慮した荷重の組合せの方法について提案してきた。さらに橋脚が塑性化した場合の組合せについても提案してきた³⁾。

本検討ではより精度の高い設計法とするため橋脚のみならず杭部材が塑性化した場合、慣性力と地盤変位の位相差がどのように変化するかを検討した。

2. 解析方法

これまでの検討と同様に軟弱粘性土地盤における場所

打ち杭形式の鉄道RC橋脚を想定し、地盤-杭-上部構造物系の解析モデルを構築した。各ケース毎に、上部構造物とフーチングに水平力を徐々に载荷させていく荷重増分法による静的非線形解析と非線形動的解析を行った。図1に解析モデルを示す。

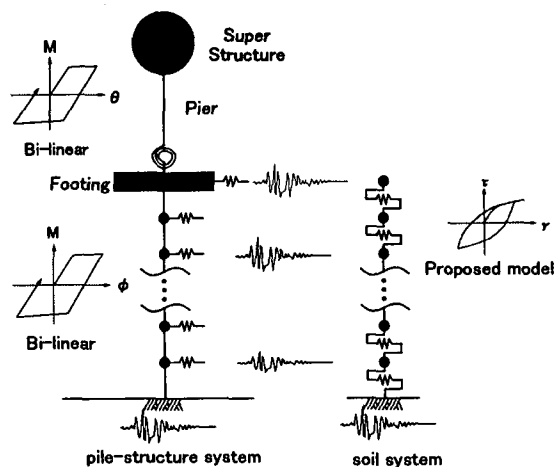


図1 解析モデル

(1) 自然地盤のモデル化

このモデルの応答解析には入力地震動に対する自然地盤の応答波形が必要となる。自然地盤の応答解析は著者らの一部が提案している土の応力-ひずみモデル⁴⁾を用いた非線形応答解析により求めている。

(2)地盤－杭－上部構造物系のモデル化

地盤－杭－上部構造物系を多質点系にモデル化した。橋脚高さを変化させることにより、橋脚下端固定時の固有周期を $T_s=0.5, 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0(\text{sec})$ の6ケースを考えた。

橋脚を塑性化させた場合と杭を塑性化させた場合について検討した。なお、基本ケースとして全体系を線形とした場合についても検討している。橋脚の場合、塑性ヒンジは橋脚下端で発生するので、橋脚下端に材端塑性回転ばねを設けて $M-\theta$ 関係でモデル化した。履歴モデルは、降伏剛性を初期剛性とするバイリニア型の履歴モデルを用い第2勾配比は5%とした。降伏震度(k_{hys})は実際の鉄道構造物を想定して、 $k_{hys}=0.3, 0.5, 0.8$ の3ケースを設定した。

杭の非線形モデルは、曲げモーメント分布が曲線分布となるので、 $M-\phi$ 関係でモデル化した。降伏震度(k_{hyf})は0.4となるように降伏モーメント M_y を設定した。

地盤ばね定数は、自然地盤の解析結果に基づき、せん断ひずみによる剛性低下を考慮した値を用いて鉄道の設計標準⁹⁾により求め、線形ばねとして扱った。

解析ケースを表1に示す。Case1が基本となる線形解析モデルで、Case2は橋脚の塑性化、Case3は杭の塑性化をみたものである。

表1 解析ケース

解析ケース	橋脚	杭部材	地盤ばね
Case1	線形	線形	線形
Case2-1	非線形($k_{hys}=0.3$)	線形	線形
Case2-2	非線形($k_{hys}=0.5$)	線形	線形
Case2-3	非線形($k_{hys}=0.8$)	線形	線形
Case3	線形	非線形($k_{hyf}=0.4$)	線形

(3)入力地震動

内陸断層近傍のレベルⅡ地震動を想定した設計加速度スペクトルに適合させた地震波を用いた。位相特性についても断層破壊過程を考慮したものである⁹⁾。

3. 静的解析結果

$T_s=0.5(\text{s})$ の構造系について静的非線形解析より得られた、橋脚天端での荷重～変位関係を図2に示す。橋脚が塑性化する場合(Case2)、ほぼ橋脚の降伏震度の位置で折れ曲がるのがわかる。しかし、杭部材が塑性化しても、橋脚が塑性化した時のような明確な折れ曲がり方はみられない。全体系の荷重～変位関係が折れ曲がる要因として、杭の塑性化よりも押し込み地盤が降伏した場合に多いことが指摘されている。本報告における解析モデルは、鉛直地盤ばねをモデル化していないことや水平地盤ばね

を線形としているため、杭部材が塑性化しても顕著な折れ曲がりを見せなかったものと思われる。

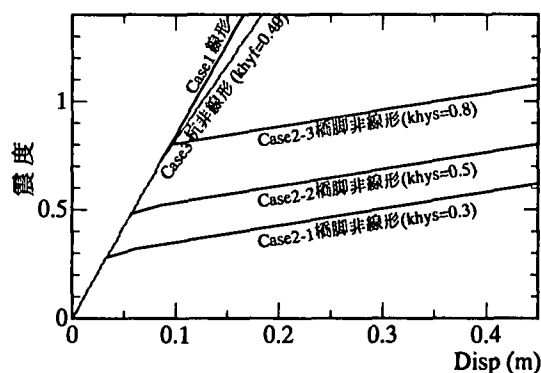


図2 荷重－変位図

4. 動的解析結果

地表面地盤変位 $\delta(t)$ と上部構造物応答加速度 $\text{Acc}(t)$ をそれぞれの絶対値の最大値で正規化し、両者の関係を図化した。図3は橋脚・杭ともに線形(Case1)、図4は橋脚のみ非線形で降伏震度 $k_{hys}=0.5$ (Case2-2)、図5は杭部材非線形で降伏震度 $k_{hyf}=0.4$ (Case3)となっている。なお、図中◎は杭頭での最大モーメント発生時刻、○は地中部での最大モーメント発生時刻を示している。(誌面の都合によりCase2-2, Case2-3は省略する。)

(1)橋脚の塑性化の影響

橋脚が線形・非線形の場合どちらにおいても、概ね加速度が最大となる時刻に杭頭におけるモーメントが最大となり、地盤変位が最大となる時刻で地中部のモーメントが最大となる傾向にある。

しかし、線形の場合については $\text{Acc}(t)/|\text{Acc}(\max)|$ 、 $\delta(t)/|\delta(\max)|=\pm 1$ に点で接しているのに対し、橋脚が塑性化した場合、図中に記号○で示すように、幅を持って $\text{Acc}(t)/|\text{Acc}(\max)|$ 、 $\delta(t)/|\delta(\max)|=\pm 1$ に接している。つまり、橋脚が塑性化し、全体系の荷重～変位関係が折れ曲がるような場合には、応答加速度波形の形状は頭打ちになる事を意味している。このような傾向は解析条件が異なるものの文献3)で行った結果と同様であると言える。

(2)杭の塑性化の影響

図2に示した荷重～変位関係において、杭部材が塑性化しても明確な折れ点がないため、線形解析結果と同様な軌跡を描き、 $\text{Acc}(t)/|\text{Acc}(\max)|=\pm 1$ 、 $\delta(t)/|\delta(\max)|=\pm 1$ に接する点も線形解析結果と概ね一致している。

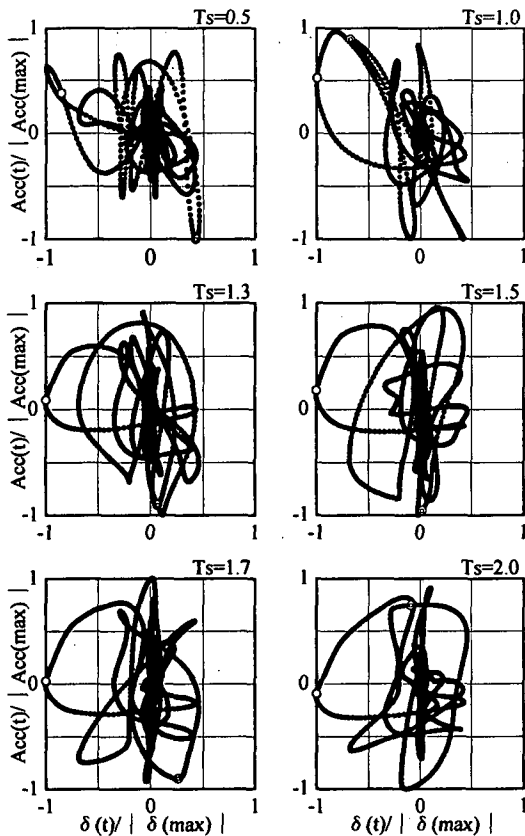


図3 慣性力と地盤変位の関係(Case1 線形)

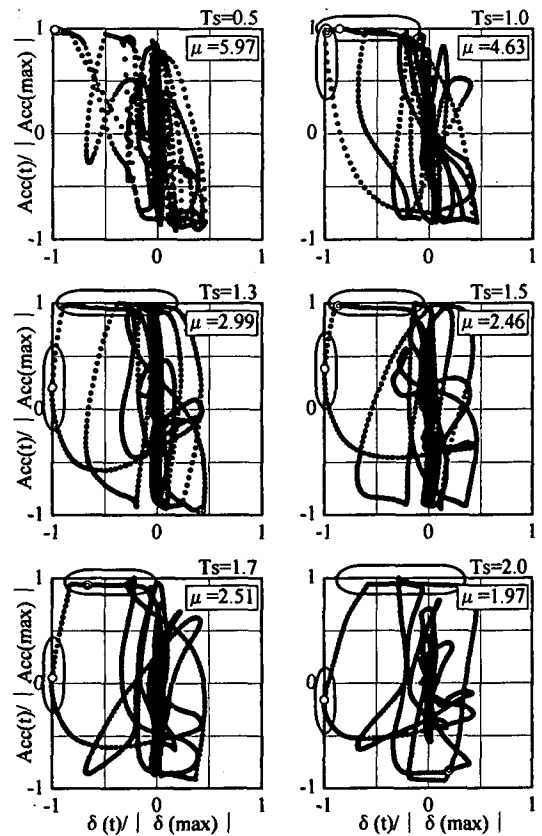


図4 慣性力と地盤変位の関係(Case2 $k_{hys}=0.5$)

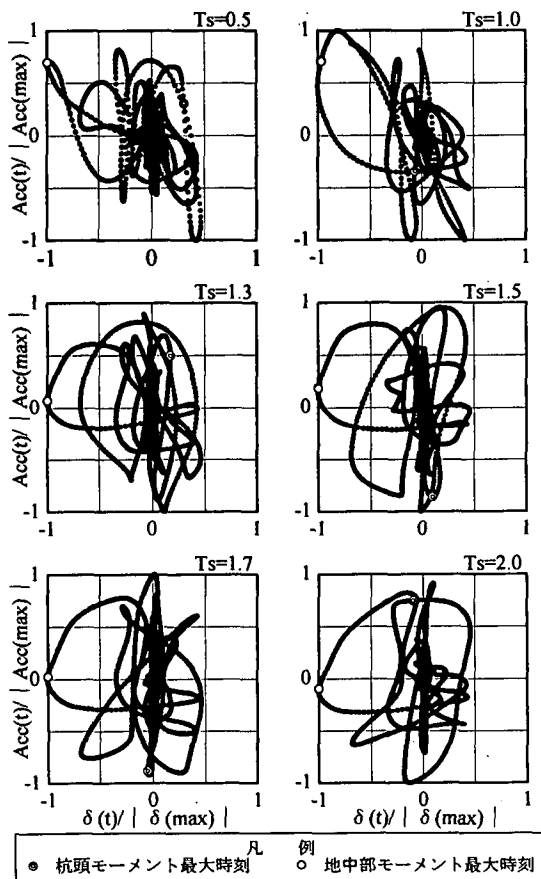


図5 慣性力と地盤変位の関係(Case3 $k_{hyf}=0.4$)

5. 慣性力と地盤変位の組合せ

これまで著者らは、①地盤変位を主体とした荷重の組合せ (式(1)) と②慣性力を主体とした荷重の組合せ (式(2)) との2段階設計を提案している³⁾。

$$R_t = 1.0 \times R_a + \gamma R_g \cdots \cdots (1)$$

$$R_t = \beta \times R_a + 1.0 R_g \cdots \cdots (2)$$

そこで本検討でも、動的解析結果より係数 β を地盤変位が最大の時刻($t=t_g$)における上部構造物の最大応答加速度 $Acc(t_g)$ の最大値 Acc_{max} に対する比 $Acc(t_g)/Acc_{max}$ として求めた。同様に、係数 γ を上部構造物応答加速度が最大の時刻($t=t_a$)における地盤変位 $\delta(t=t_a)$ の最大値(δ_{max})に対する比 $\delta(t_a)/\delta_{max}$ を求めた。

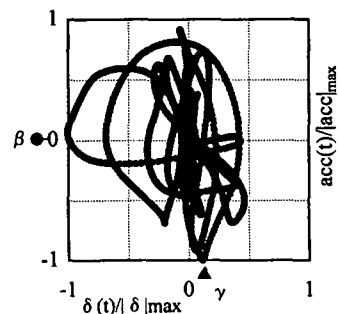


図6 組合せ係数 $\beta \cdot \gamma$ の取り方 (線形)

線形の場合、図6に示す▲が γ の値で $Acc(t)/Acc_{max}$

$|\pm 1$ に1点で接し、●が β の値で $\delta(t)/\delta(\max)|=\pm 1$ に1点で接している。

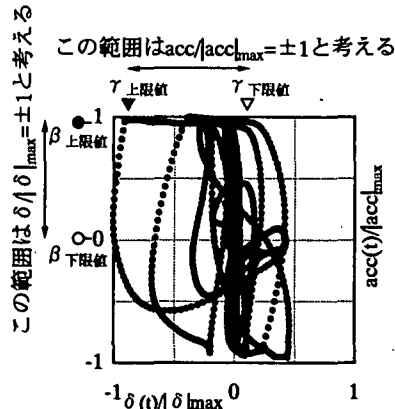


図7 組合せ係数 $\beta \cdot \gamma$ の取り方 (非線形)

橋脚の塑性化(Case2)を考慮した場合、4(1)で述べたとおり $\delta(t)/\delta(\max)|=\pm 1$, $Acc(t)/Acc(\max)|=\pm 1$ に接している。従って図7に示すようにある程度の幅を持って $\beta \cdot \gamma$ を定める必要がある。そこで、地盤変位最大時の加速度の大きい値(上限値)を●, 小さい値(下限値)を○で示す。また、加速度最大時の地盤変位の大きい値を▼, 小さい値を▽で示した。

これらの $\beta \cdot \gamma$ と固有周期の関係を図8に示す。横軸は構造物の固有周期(T_s)と地盤の周期(T_g)の比 α で縦軸に $\beta \cdot \gamma$ をプロットした。 T_g は、非線形化を考慮したときの固有周期で、 T_s は連成系の固有周期である。なお図中の記号、◆▲■は上限値、◇△□は下限値を示す。実線はこれまでの検討より設定した上限値 ν_U ・下限値 ν_L である。上限値・下限値の工学的意味と使い分けの詳細は文献7)を参考されたい。

(1) 橋脚が塑性化する場合

- 上限値：図8のとおり、 $\beta \cdot \gamma$ の上限値は固有周期比 α によらず1.0に近づく傾向にある。地盤変位と慣性力は同時に最大値をとる可能性が有り、係数による低減を行わない。従って上限値 ν_U を使う場合、 $\alpha (=T_s/T_g)$ によらず、 $\nu_U=1.0$ する。
- 下限値： $\beta \cdot \gamma$ の下限値は、上限値と比べ移動は少なく変化が小さいことから、塑性化しても線形の場合と同じ ν_L の線を用いる。

(2) 杭部材が塑性化する場合

杭部材が塑性化しても構造物全体系の静的な荷重-変位関係、また動的な慣性力と地盤変位の関係ともに線形的な傾向があることがわかった。 $\beta \cdot \gamma$ ともに線形の結果とほぼ一致しているため、線形の場合と同一の補正係数を用いて、荷重を低減する事が可能である。

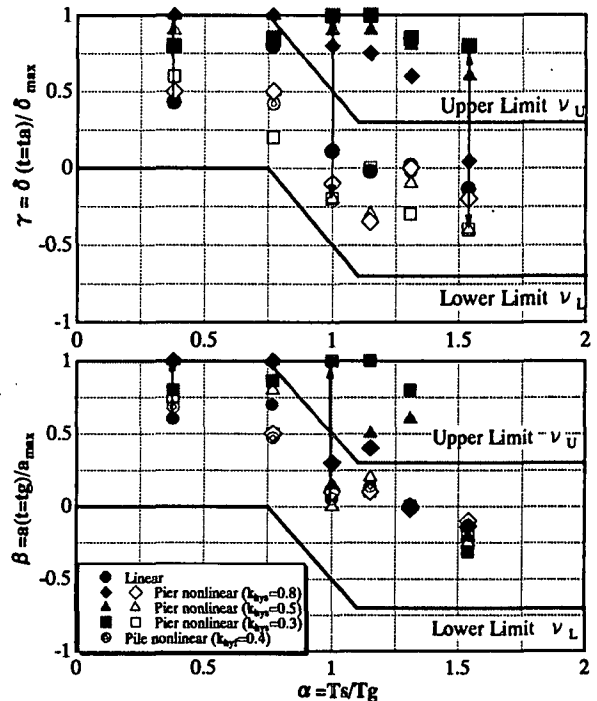


図8 慣性力と地盤変位の組合せ補正係数

6. まとめ

著者らはこれまでに、応答変位法における慣性力と地盤の荷重の組合せを提案してきた。本論文では橋脚・杭部材が塑性化する場合の影響について検討を行い、以下の事がわかった。

橋脚が塑性化し、荷重-変位関係が折れ曲がるような場合、地盤変位と慣性力は同時に最大値をとる可能性があり荷重の低減は行わない。一方、杭のみが塑性化し荷重-変位関係に明確な変曲点が無い場合は、線形の場合と同様に T_s/T_g によって荷重の組合せを低減する事ができる。

参考文献

- 1) 室野, 西村ら: 地盤振動を考慮した杭基礎構造物の耐震設計法に関する実験的検討, 第24回地震工学研究発表会, 1997.7
- 2) 西村, 室野, 永妻: 地盤振動を考慮した軟弱地盤中の杭基礎構造物の耐震設計法, 第24回地震工学研究発表会, 1997.7
- 3) 室野, 西村: 杭基礎構造物の地震時応力に与える地盤・構造物の非線形性の影響とその評価手法, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, 1998.11
- 4) 西村, 室野: GHEモデルと簡易な履歴則を用いた土の非線形モデルの提案と実験的検証, 第25回地震工学研究発表会, 1999.7 (投稿中)
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説基礎構造物・抗土圧構造物, 1997.3
- 6) 佐藤, 室野ら: 震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化, 土木学会論文集 No.612, I-46, 1999.1
- 7) 西村, 室野ら: 地震時杭応力における慣性力と地盤変位の影響に関する考察, 土木学会第53回年次学術講演会, I-B314, 1998.10