

慣性力及び地盤変位が軟弱地盤中の パイルベント構造物に及ぼす影響

宇佐美 敦浩¹・室野 剛隆²

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: usami.atsumuro.46@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

E-mail: murono.yoshitaka.51@rtri.or.jp

地中梁を有しないパイルベント構造物は杭と柱部材の間でモーメント分布が連続するため、地盤変位と慣性力の影響が複雑に作用すると考えられるが、この動的相互作用は必ずしも明らかにされていない。そこで、非線形時刻歴動的解析を用いて、パイルベント構造物に作用する地盤変位と慣性力の関係について検討を行った。その結果、軟弱地盤を対象とした場合、柱部材および地中梁の1/β以下において慣性力によるモーメント (Ma) が支配的であることが分かった。しかし、地盤変位は杭だけではなく、柱部材に発生するモーメントにも少なからず影響を与えていることが明らかとなった。また、地盤変位が小さい普通地盤を対象とした場合についても検討を行い、地盤変位の影響によるモーメント (Mg) は小さいものの、柱部材においても発生していることが分かった。

Key Words : *Pile Bent, Inertial and Kinematic Interaction, Displacement of Ground, Inertial force*

1. はじめに

一般的なラーメン高架橋では線路方向、線路直角方向に地中梁を有する構造が多い。この地中梁は各基礎における地盤抵抗のばらつきを平準化する働きを有し、また、地震時には杭に作用する水平力を分散させる効果が期待されることから、構造上有利である。しかし、地中梁の構築にあたっては、掘削土量が増加することや、杭頭部付近において配筋が過密となることから施工性が劣り、コストや工期の面において課題がある。特に都市部における連続立体交差化事業等においては営業線近接工事となることや住宅密集地などでは施工ヤードの確保が困難であることから、施工性に優れた地中梁を省略したパイルベントラーメン構造が近年数多く用いられている。

軟弱地盤に建設された杭基礎構造物は慣性力だけではなく、地盤変位の影響を受けることが解析¹⁾²⁾³⁾・実験⁴⁾⁵⁾・および被害事例⁷⁾などからも明らかになっている。そこで、鉄道構造物設計標準 耐震設計⁸⁾ (以下、耐震標準)

においては、地盤変位を地盤ばねを介して構造物に作用させる応答変位法が適用されている。ところで、フーチングが存在する通常の構造形式の場合、地盤変位の影響は基礎のみに現れる。しかし、パイルベント構造の場合、地中梁がないことから杭と柱部材の間でモーメント分布が連続するため、地盤変位による影響が上部構造物の曲げモーメント分布に及ぶことが考えられる。そのため、地盤変位と慣性力の両者の影響が構造物全体系に複雑に作用するが、これらの動的相互作用の特性については必ずしも明らかになっていない。そこで、本検討ではパイルベントラーメン高架橋を対象に非線形時刻歴動的解析を実施し、地盤変位と慣性力が構造物に及ぼす応答特性について検討を行った。

検討においては、地盤変位の大小が構造物の応答特性に及ぼす影響についても比較検討を行うため、地盤変位量が比較的大きい軟弱地盤と普通地盤の2地盤を対象とした。

2. 検討条件

対象とした構造物は図1に示すパイルベントラーメン高架橋である。動的解析のモデル化に際しては、自由地盤と構造物を一体として扱うことで地盤と構造物の動的相互作用を自動的に考慮できる一体型モデルを用いた。そして、部材を梁要素、地盤をばね要素でモデル化した質点系モデルを作成した(図2参照)。本モデルでは基盤位置へ図3に示す地震動(耐震標準における断層近傍の地震を想定したL2地震動スペクトルII)を入力している。また、土の非線形構成則は修正ROモデル⁹⁾を用い、G- γ 関係は耐震標準に示す標準パラメータ¹⁰⁾と安田・山口式¹¹⁾から推定した γ_{0s} を用いて設定した。

なお、本検討は線路直角方向のみを対象としており、構造物の等価固有周期は $T_{eq}=1.03(s)$ である。

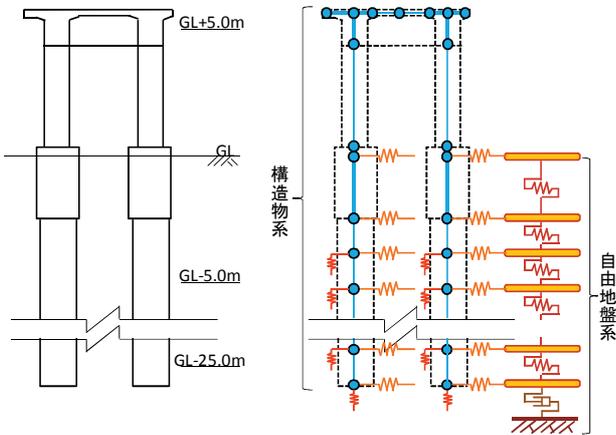


図1 構造一般図

図2 動的解析モデル

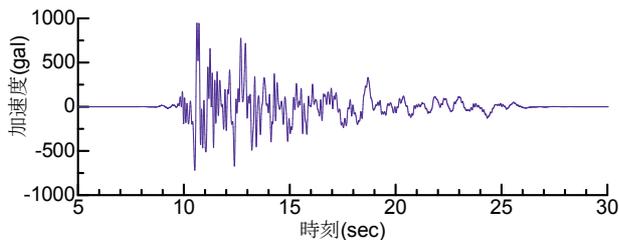


図3 入力波形 (L2スペクトルII)

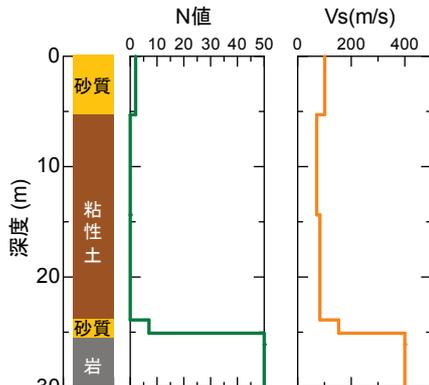


図4 対象地盤の層構造 (G6地盤)

表1 地盤モデルの諸元 (G6地盤)

層番	層厚 (m)	深度 (m)	土質区分	平均N値	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)
1	5.30	5.30	砂質土	2	101	18
2	9.07	14.37	粘性土	0	71	14
3	9.52	23.89	粘性土	0	83	14
4	1.20	25.09	砂礫	7	153	17
5	1.02	26.11	凝灰質砂岩	50	400	20

地盤条件としてはN値ゼロが連続し、層構造が比較的一様な軟弱地盤(図4, 表1参照)を対象とした。本地盤は、固有値解析から求まる地盤の固有周期が $T_g=1.36(s)$ であり、耐震標準によればG6地盤(軟弱地盤)に該当する。

3. 検討ケース

本検討では、地盤変位と慣性力が構造物に作用するメカニズムを解明することを目的としている。そこで、地盤変位と慣性力の両者を作用させた通常解析(ケース1: 全体系)に加え、構造物(上部構造物および杭)の質量をゼロとすることにより、慣性力の影響を含まず、地盤変位のみが考慮された解析(ケース2: 地盤系)を実施した。そして、両者の結果の差分が慣性力の影響のみを考慮したもの(慣性力系)となる。

表2 解析ケース

解析ケース名	内容	考慮される作用
ケース1	全体系	地盤変位と慣性力
ケース2	地盤系	地盤変位

4. 解析結果

(1) 両ケースの比較

構造物天端における加速度、速度、変位の時刻歴波形について、全解析時間40秒のうち応答が顕著に発生した5~30秒における結果を図5に示す。地盤系(ケース2)は慣性力の影響を受けていないため、変位・加速度ともなが全体系(ケース1)と比較して全体的に小さいことが分かる。さらに、最大値をとる時刻は両ケースで異なることも確認できる。

変位、曲げモーメントに関して全解析時間における最大値を全節点において求めた結果を図6に示す(ここで最大値とは絶対値の最大である)。両ケースの変位について比較すると $1/\beta$ (β : 杭の特性値)で深においては同程度であるが、 $1/\beta$ で浅の場合において、全体系(ケー

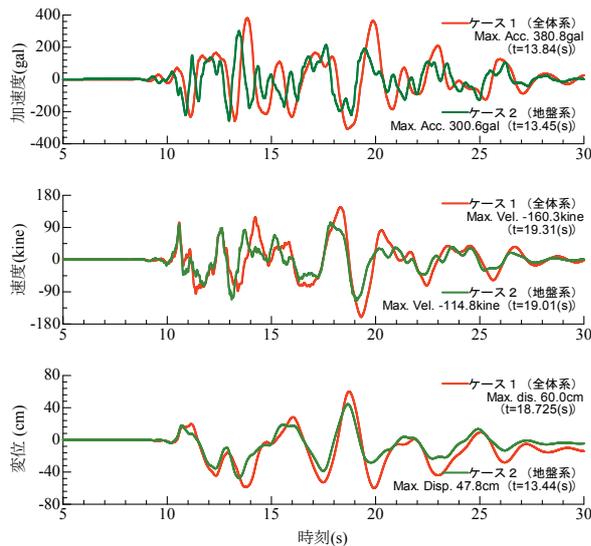


図5 構造物天端の時刻歴波形

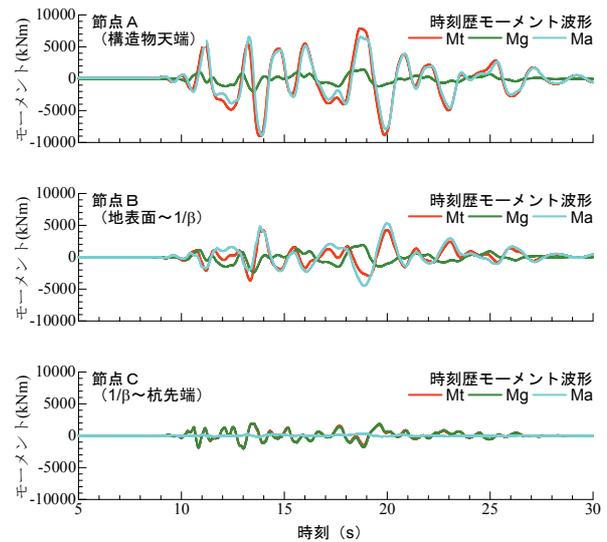


図7 時刻歴モーメント図

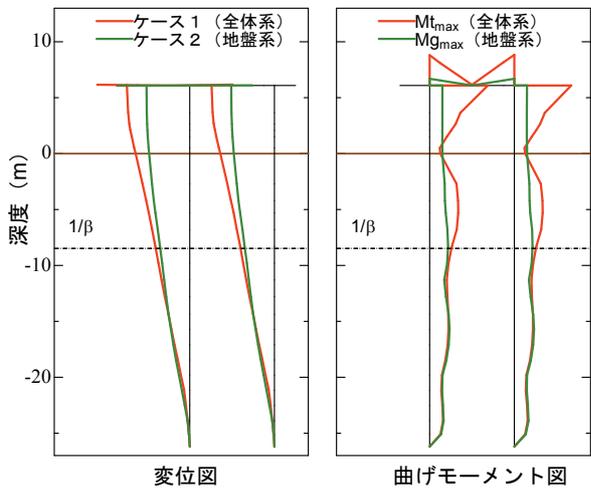


図6 最大値分布

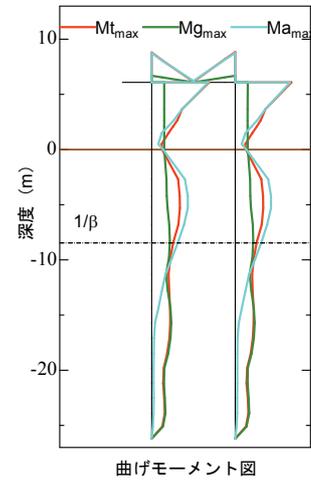


図8 最大曲げモーメント分布

ス1)では慣性力の影響で変位が増大していることが確認できる。これより、 $1/\beta$ 以浅では慣性力、 $1/\beta$ 以深では地盤変位による影響が支配的であることが分かる。

曲げモーメントについて比較をすると、柱部材において慣性力の影響が支配的であるが、全体系のモーメント ($M_{t_{max}}$) の1/3程度の大きさのモーメントが地盤変位により発生していることに注意が必要である。なお、地盤系のモーメント ($M_{g_{max}}$) は地中部においてあまり変化が見られないが、これは今回対象とした地盤の層構造が比較的一様であり、地盤中において局所的な変位増大が発生しないためである。

(2) 地盤変位と慣性力の影響

地盤変位と慣性力の影響による各々の応答特性を評価するため、曲げモーメントを対象に両者の影響を個別に評価する。ここで、慣性力系のモーメント (Ma) は全体系 (ケース1) の発生曲げモーメント (Mt) か

ら地盤系 (ケース2) の発生曲げモーメント (Mg) を差し引くことにより求めている (式(1))。

$$Ma = Mt - Mg \quad (1)$$

構造物上の代表的な3点 (節点A: 構造物天端, 節点B: 地表面~ $1/\beta$ 間でモーメントが最大となる点, 節点C: $1/\beta$ から杭先端の間で慣性力の影響が小さい点) における時刻歴モーメント波形を図7に示す。さらに、各モーメント波形 (Mt, Ma, Mg) の全解析時間における最大値 ($M_{t_{max}}, M_{a_{max}}, M_{g_{max}}$) を解析モデルの全節点において求めた結果を図8に示す。同図より構造物天端 (節点A) では、 $M_{t_{max}} \neq M_{g_{max}} + M_{a_{max}}$ となっており、 $M_{g_{max}}$ と $M_{a_{max}}$ は同時に最大とならないことが分かる。地中梁を有しないパイルベント構造の特徴の一つとして、地盤変位による曲げモーメント (Mg) が上部構造物まで影響することが挙げられるが、図7より Mg と Ma の間では位相のずれがあることから、見かけ上、全体系モーメントの最大値 ($M_{t_{max}}$) には地盤変位が寄与していないように見える。

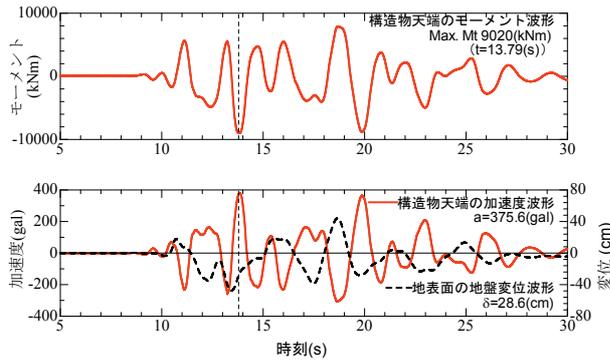


図9 構造物加速度と地表面地盤変位（全体系）

なお、このように位相差が発生していることは構造物天端における加速度波形と地表面における地盤変位波形を比較することにより確認できる。図9下は両者を図化したものであり、破線で示した曲げモーメントが最大となる時刻 ($t=13.79(s)$) において、加速度は最大となっているが、同時刻において地盤変位は最大値の約半分程度しか発生していないことが分かる。

一方、図7より地中部の節点BにおいてはMgとMaが逆位相でお互い打ち消しあうように作用していることから、全体系のモーメントは慣性力によるモーメントより小さい ($M_{tmax} < M_{amax}$)。したがって、全体系の最大モーメント M_{tmax} を単純に M_{gmax} と M_{amax} の和とした場合には過大評価となる。

杭基礎橋脚を対象とした既往の研究^{12), 13)}によれば、杭に作用する地盤変位と慣性力の位相差は、地盤の固有周期 (T_g) と構造物の固有周期 (T_s) の比が関係しており、本検討のように $T_g' > T_s$ の場合では同位相となる (ここで、 T_g' は地盤の非線形化 ($V_s=0.5 \cdot V_{s0}$) を考慮した値であり、本条件では $T_g'=2.72(s)$ 、また $T_s=1.03(s)$ である)。ただし、これは地中梁 (フーチング) を有し、杭頭が固定の条件下を対象としている。今回対象としたパイルベント構造物のように、1柱1杭型式で杭頭の回転拘束度が小さい場合においては、 $T_g' > T_s$ であっても発生モーメントの波形が逆位相となることも明らかとなり¹³⁾、本検討でも同様の結果が得られた。

つづいて、モーメント分布形状について述べる。図8より、 M_{tmax} および M_{amax} は地中部のうち地表面~1/β間において大きくなっていることが確認できる。一般にフーチングを有する構造物の場合、発生曲げモーメントが大きくなる位置は杭頭であるが、このように曲げモーメントが最大となる位置が地中浅部となることは地中梁を有しないパイルベント構造物の特徴の一つである。この現象は以下の通り説明できる。すなわち、地中梁を有する場合、杭頭の回転が拘束されるため、杭頭において発生曲げモーメントは大きくなる (図10右参照)。一方、パイルベント構造物では回転が許容されているため、地震

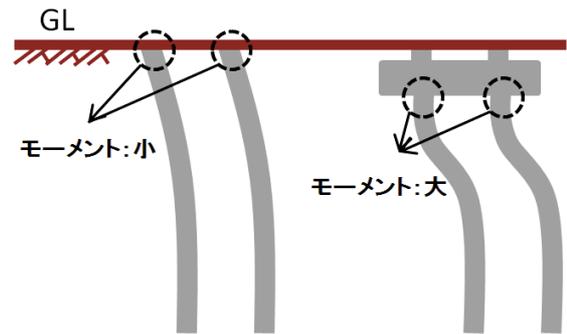


図10 構造物加速度と地表面地盤変位（全体系）

時の挙動はスウェイ (水平振動) よりロッキング (回転振動) が卓越すること (図10左参照) から、杭頭での曲げモーメントは小さくなる。従って、杭頭よりも下の位置において、モーメントが最大となる。

5. 地盤変位の影響に関する検討

これまでの検討からパイルベント構造物の特徴として、地盤変位によるモーメント (M_g) は柱においても発生することが明らかとなった。そこで、地盤条件を変えた場合における M_g の感度について検討を行った。対象とした地盤は図11および表3に示すような地盤 (耐震標準におけるG4地盤、普通地盤に該当) であり、固有値解析から求まる本地盤の固有周期は $T_g=0.6(s)$ である。

この地盤を対象に同様の解析 (全体系および地盤系の動的解析) を行い、得られた時刻歴曲げモーメントおよび最大変位・最大曲げモーメント分布を図12および図13に示す。

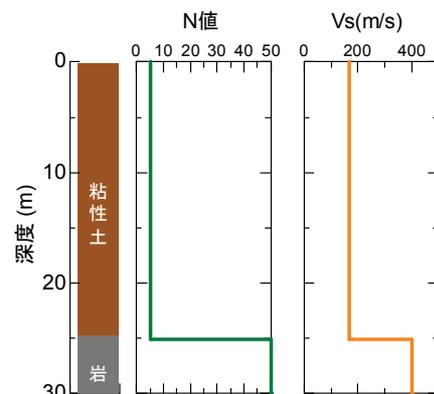


図11 対象地盤の層構造 (G4地盤)

表3 地盤モデルの諸元 (G4地盤)

層番	層厚 (m)	深度 (m)	土質区分	平均 N値	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)
1	25.09	25.09	粘性土	5	167	16
2	1.11	26.2	砂岩	50	400	20

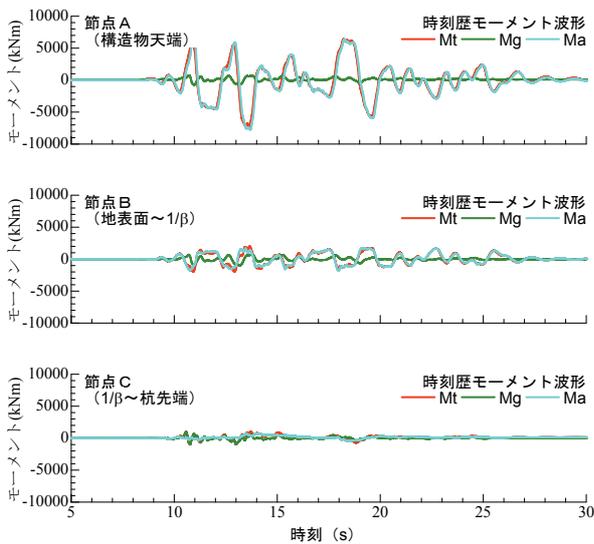


図 12 時刻歴モーメント図

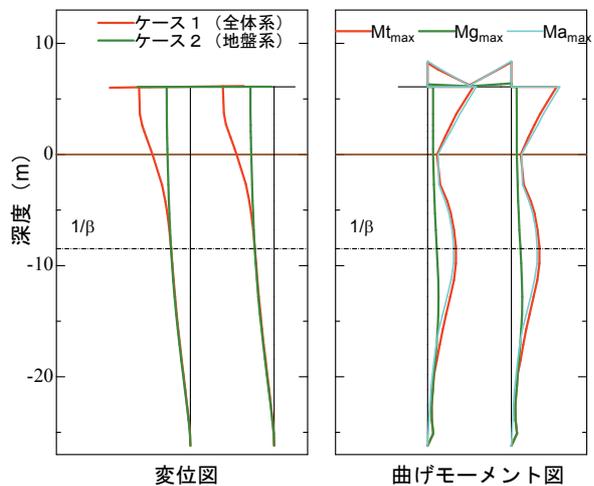


図 13 最大値分布

本地盤条件 (G4地盤) は前章の条件 (G6地盤) と比較して地盤が硬く、地盤変位自体が小さい。そのため、地盤変位の影響による構造物変位は小さく、構造物天端において全体系の変位に占める地盤変位の影響は半分以下である (図13右参照)。また、曲げモーメント分布図からも構造物天端において、 $M_{t_{max}}$ の1/5程度の大きさしか、 $M_{g_{max}}$ が発生していないことが確認できる。このように地盤の硬い普通地盤においては、地盤変位そのものが小さいことから、おおむね $M_{t_{max}} = M_{a_{max}}$ となっている。

6. まとめ

本研究ではパイルベント構造物を対象として、地盤変位と慣性力による構造物への応答特性を把握することを目的に動的解析を行った。その結果、地中梁を有しないパイルベント構造物の特徴として、以下のことが明らかとなった。

- ・地盤変位は上部構造物のモーメントにも影響に及ぼす。特に軟弱地盤においては地盤変位が大きいことからモーメントの値も大きい。
- ・軟弱地盤では、地盤変位によるモーメント (M_g) と慣性力による曲げモーメント (M_a) は位相差を伴って構造物へ作用することから、全体系のモーメント (M_t) には地盤変位の影響による寄与は少ない ($1/\beta$ 以深を除く)。ただし、本検討では $T_g > T_s$ の条件であったが、この結果は T_g と T_s の大小関係により変化することが予想される。

参考文献

- 1) 長谷川正幸, 中井正一: 杭の地震時応力とその評価法に関する研究, 日本建築学会構造系論文報告集, 第432号, pp.105~118, 1992.
- 2) 竹宮宏和, 片山吉史: フレキシビリティ法による群杭基礎の動的解析と設計への提案, 土木学会論文集 No.489/I-27, pp.207~215, 1994.
- 3) Y.MURONO and A.NISHIMURA: Evaluation of Seismic Force of Pile Foundation Induced by Inertial and Kinematic Interaction, Proc. of 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000, 1496.
- 4) 水野二十一: 建物—杭基礎—地盤系模型振動実験, 土と基礎, vol.28, pp.47~58, 1980.
- 5) 田蔵隆, 清水勝美, 佐藤忠信: 杭基礎・地盤系の動的相互作用現象の実証的把握, 第27回土質工学研究発表会講演集, pp.1033~1036, 1992.
- 6) 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講演論文集, pp.625-628, 1997.
- 7) 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年.
- 8) (公財) 鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 2012年.
- 9) 龍岡文夫, 福島信二: 砂のランダム繰返し入力に対する応力~歪関係のモデル化について, 生産研究 第30巻, 第9号, pp.26~29, 1978.
- 10) 野上雄太, 室野剛隆: S字型履歴曲線を有する土の非線形モデルとその標準パラメータの設定, 土木学会地震工学研究発表会論文集, vol.30, 論文No.2-0014, 2009.
- 11) 安田進, 山口勇: 種々の不攪乱土における動的変形特性, 第20回土質工学研究発表会, 1985.
- 12) 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.
- 13) 室野剛隆, 西村昭彦: 地盤と構造物の動的相互作用を考慮した応答変位法, 鉄道総研報告, Vol.13, No.2, 1999.

Influence of Inertial and Kinematic Interaction in the Pile Bent Structure on the Soft Groud

ATSUHIRO Usami, and YOSHITAKA Muroho

Pile bent structures have no underground beam, so a bending moment displacement between the pile and pier becomes continuing. Therefore it is considered that dynamic response characteristic of pile bent is complexly affected by the displacement of ground and the inertial force, but this inertial and kinematic interaction is unclear. In this paper, the inertial and kinematic interaction acting on the pile bent structures is studied by nonlinear time-history dynamic analysis. As a result, it is revealed that moment due to inertial force is dominant on the pier and the pile which is located in the shallow depth, and displacement of ground gives an influence on not only the moment at the pier but also that at the pile.