

パイルベント構造物における地盤と構造物の動的相互作用の解明

宇佐美 敦浩* 室野 剛隆**

Study on Inertial and Kinematic Interaction in the Pile Bent Structure

Atsuhiko USAMI Yoshitaka MURONO

Pile bent structures have no underground beam, so bending moment displacement between the pile and pier becomes continuous. Therefore it is considered that dynamic response characteristics of the pile bent are complexly affected by the displacement of the 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 the moment due to the inertial force is dominant on the pier and the pile which is located at a small depth, and the displacement of the ground has an influence on not only the moment at the pier but also that at the pile.

キーワード：パイルベント，相互作用，慣性力，地盤変位，動的解析

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。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，地震時においては杭に作用する水平力を分散させる効果が期待される。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。そこで，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，施工性に優れる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，地盤変位の影響をうけることが解析^{1) 2) 3)}・実験^{4) 5) 6)} および被害事例⁷⁾ から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，耐震設計を行うにあたり，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関し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。

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。ただし，プロトタイプに比較して，重量を大きく設定し，構造物の周期を長くした。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

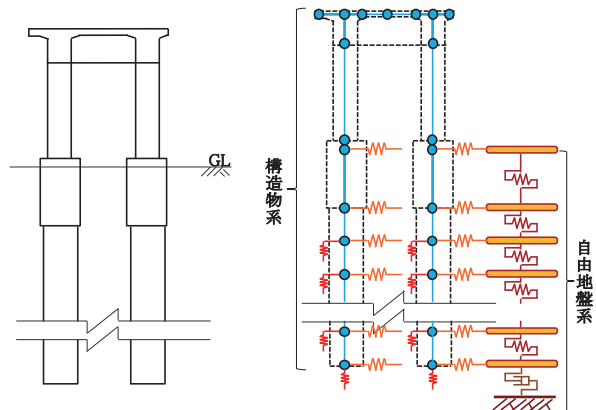


図1 構造一般図

図2 動的解析モデル

* 鉄道地震工学研究センター 地震動力学研究室

** 鉄道地震工学研究センター

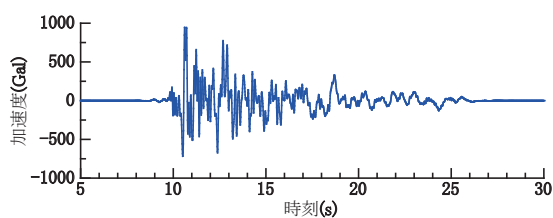


図3 入力波形 (L2 スペクトル II)

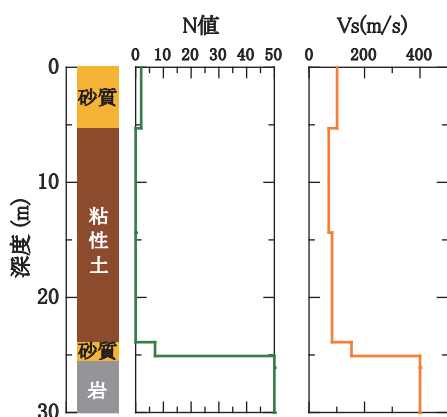


図4 対象地盤の層構造

表1 地盤モデルの諸元

| 層番 | 層厚 (m) | 深度 (m) | 土質区分 | 平均 N 値 | Vs (m/s) | Y (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 |

(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 $\gamma_{0.5}$ を用いて設定した。

なお、本検討では線路直角方向のみを対象としており、構造物の弾性固有周期は $T_s=1.03$ (s)である。

地盤条件としてはN値ゼロの粘性土層が厚く堆積する比較的一様な軟弱地盤(図4, 表1参照)である。固有値解析から求まる地盤の固有周期は $T_g=1.36$ (s)であり、耐震標準では本地盤は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(表2参照)。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 |

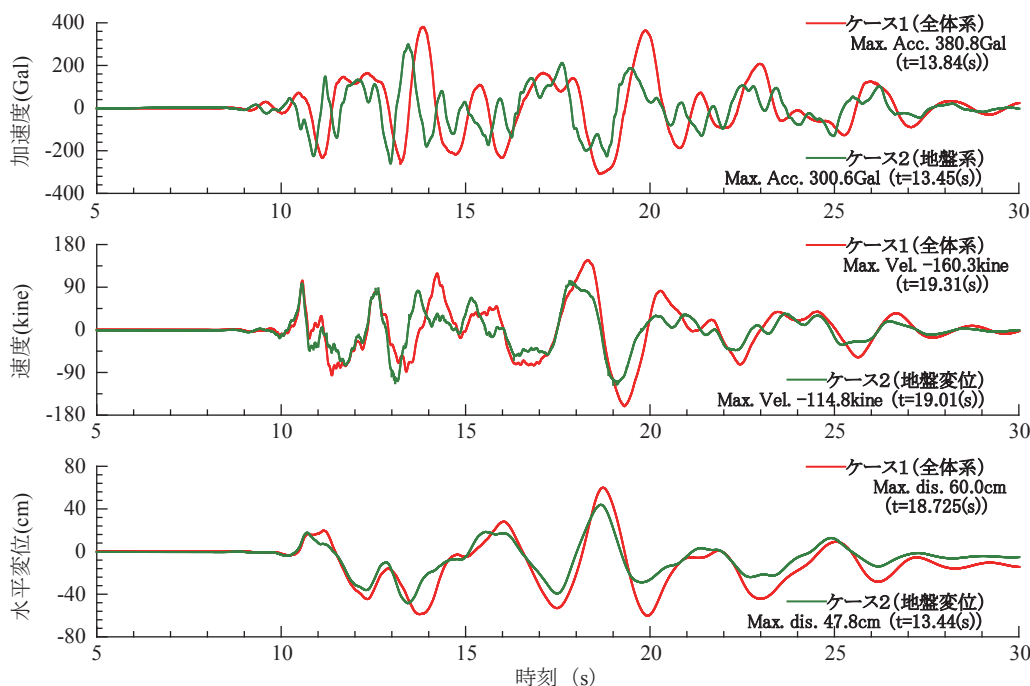


図5 構造物天端の時刻歴波形

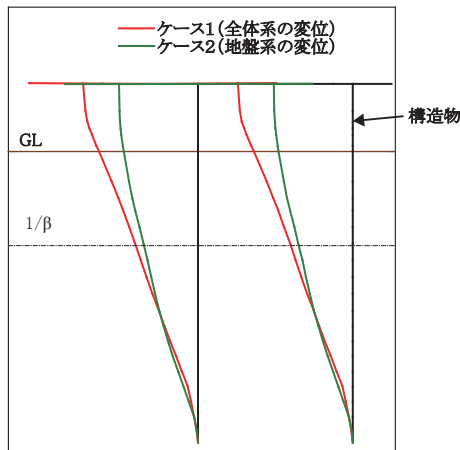
4. 解析結果

4.1 両ケースの比較

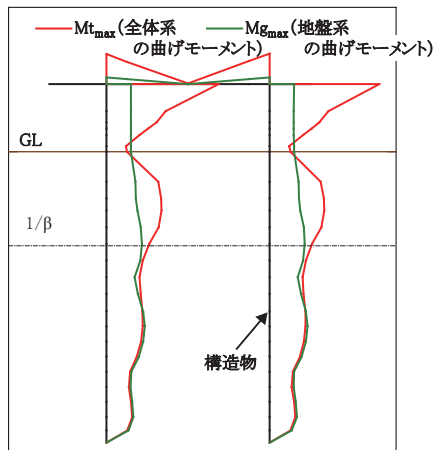
構造物天端における加速度，速度，変位の時刻歴波形について，全解析時間 40 秒のうち応答が顕著に発生した 5～30 秒における結果を図 5 に示す。地盤系（ケース 2）は慣性力の影響を受けていないため，変位・加速度ともに全体系（ケース 1）と比較して全体的に小さいことが分かる。さらに，最大値をとる時刻は両ケースで異なることも確認できる。

図 5 に示した変位，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）。ここでは両ケースの相対関係について示すため，スケールは表示していない。まず，両ケースの変位について比較すると $1/\beta$ （ β : 杭の特性値）以深においては同程度であるが， $1/\beta$ 以浅の場合において，全体系（ケース 1）では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。



(a) 変位図



(b) 曲げモーメント図

図 6 最大値の分布形状

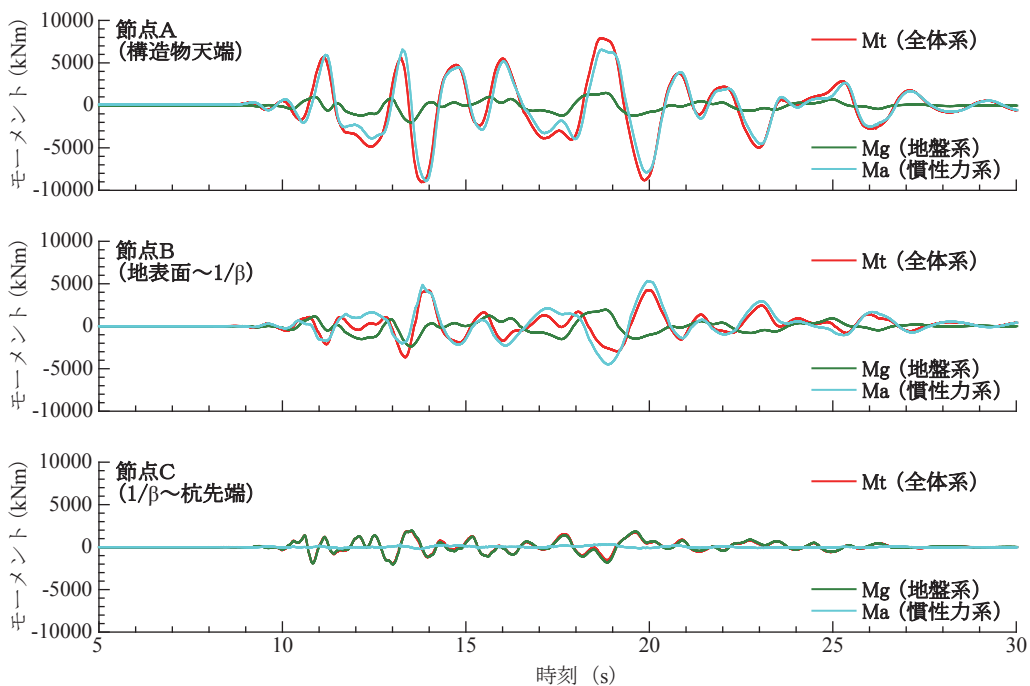


図 7 時刻歴曲げモーメント

特集：地震防災・耐震技術

4.2 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

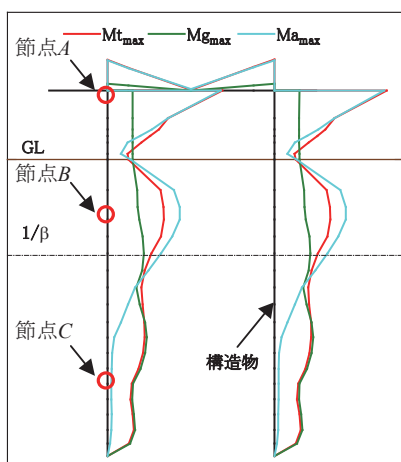


図8 最大曲げモーメントの分布形状

メント波形 (Mt, Ma, Mg) の全解析時間における最大値 ($Mt_{max}, Ma_{max}, Mg_{max}$) 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。

(1) 構造物天端 (節点A)

図8より構造物天端 (節点A) においては、 $Mt_{max} \neq Mg_{max} + Ma_{max}$ となっており、 Mg_{max} と Ma_{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1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 (Mt_{max}) には地盤変位が寄与していないように見える。

なお、このように両者において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 (b) は全体系の解析結果に関して、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重ねて図示したものである。同図より、図9 (a) の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。ここで、両者の関係について詳細に考察する。全体系の解析において、地表面の応答変位 ($\delta(t)$) と構造物天端における応答加速度 ($a(t)$) をそれぞれの最大値 δ_{max}, a_{max} で正規化し、全解析時間にわたるこれらの関係をプロットしたものを図10 (a) に示す。同図において▽および▼印はそれぞれ $|\delta(t)/\delta_{max}|=1, |a(t)/a_{max}|=1$ となる点を示している。大局的に見れば原点を中心とした

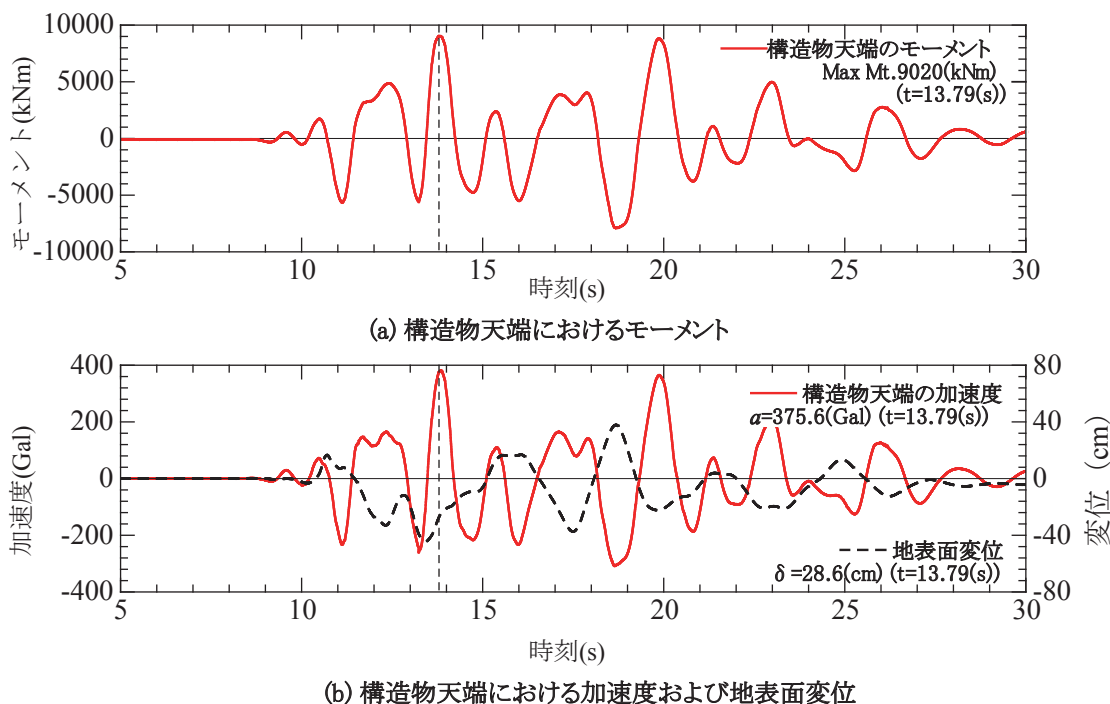
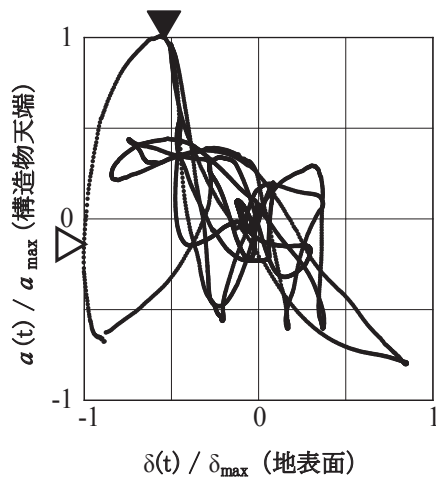
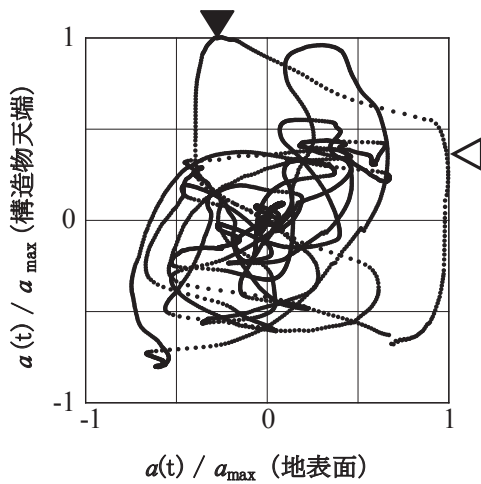


図9 構造物加速度と地表面地盤変位 (全体系)



(a) 構造物天端の加速度と地表面の変位



(b) 構造物天端と地表面の加速度

図 10 位相差

円形内に収まっており、地盤変位と慣性力の間には位相差があることが分かる。また、▽の位置は地表面変位が負側で最大となる瞬間であるが、この時点において構造物天端の加速度は0に近い。このことから両者に位相差があることが確認できる。ただし、一時的に傾き-1の直線に近い場合（図中の第4象限）もあり、この場合は地盤変位と慣性力が同位相で作用していると考えられる。（加速度と反対方向に慣性力は作用するため、傾きが-1の場合が地盤変位と慣性力が同位相である。）具体的には、図7の節点A（構造物天端）の時刻歴曲げモーメント波形のうち、約19秒において $Mt=Ma+Mg$ となっていることが対応している。同様に構造物上と地表面上の両者の応答加速度の関係を図10(b)に示す。同図も図10(a)同様に円形を描いていること、また、▽と▼印が離れている（最大値同士で振動していない）ことか

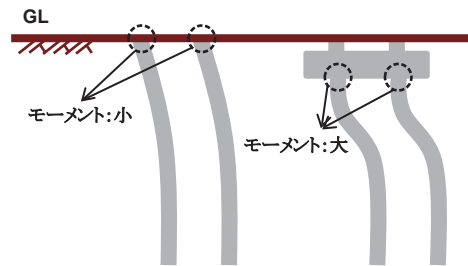


図 11 杭の変形イメージ
(左：パイルベント，右：地中梁あり)

ら、地盤と構造物が位相差をもって振動している様子が確認できる。

(2) 地中浅部（節点B）

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合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($Mt_{max} < Ma_{max}$)。したがって、全体系の最大モーメント Mt_{max} を単純に Mg_{max} と Ma_{max} 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($V_s=0.5*V_{s0}$)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っており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、 Mt_{max} および Ma_{max} は地中部のうち地表面～ $1/\beta$ 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。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11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11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. おわりに

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。なお、対象構造物はプロトタイプに比べ、周期を長く設定した。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。
- ・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。

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, pp.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) 室野剛隆, 西村昭彦, 永妻真治: 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
- 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
- 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, pp.41-46, 1999