

杭基礎の損傷位置が構造物の地震応答に 与える影響の解析的検討

本山 紘希¹・室野 剛隆²・西村 隆義³・山崎 貴之⁴・高野 裕輔⁵

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)

Email:motoyama@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)

Email:muroano@rtri.or.jp

³正会員 (株) ジェイアール総研エンジニアリング 構造物技術部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

Email:t_nisimura@jrseg.co.jp

⁴正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備機構 鉄道建設本部 (〒231-8351 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

Email:tak.yamazaki@jrtr.go.jp

⁵正会員 (独) 鉄道建設・運輸施設整備機構 鉄道建設本部 (〒231-8351 神奈川県横浜市中区本町6-50-1)

Email:ysk.takano@jrtr.go.jp

地盤変位の影響による杭の深い位置での損傷と慣性力の影響による杭の浅い位置での損傷では、構造物の振動特性に与える影響が異なることが推測される。また、杭基礎の浅い位置での損傷は損傷位置によっても構造物の振動特性が変化する可能性もある。本論文では、これらに関する基礎的な検討として、杭部材の損傷位置を変化させた感度解析による検討を行った。検討においては、せん断土層を用いた杭基礎構造物の振動実験をプロトタイプとして数値解析に用いる解析モデルを作成した。これに対して、杭部材の損傷位置を変化させて解析を実施し、構造物の応答の変化について考察した。本検討では、杭の特性値 β を用いて表される深さ l/β より深い位置における損傷は、構造物の応答への影響が限定的であるが、浅い位置での損傷は、構造物の応答への影響が大きく、特に変位応答については増幅される可能性が示された。

Key Words : *pile, damage position of pile, safety, site nonlinearity and local nonlinearity, soil-structure interaction*

1. はじめに

土木構造物の耐震設計では、復旧性および安全性について検討する必要がある¹⁾。復旧性の観点では、杭部材が損傷を受けた際の修復が困難であることから²⁾、可能な限り杭部材の損傷を避けるのが一般的である¹⁾。しかし、安全性の観点からは、地盤の深い位置で杭基礎が損傷を受けるような場合、杭基礎の損傷が構造物の地震応答に与える影響が限定的である可能性も考えられ、そのような場合には、杭基礎の損傷を許容できる可能性もある。実際に杭基礎の損傷を許容可能かという議論は、常時の性能や余震の影響も考える必要があるため、地震(本震)時の安全性のみでは成立しない議論ではあるが、杭基礎の損傷や損傷位置が構造物の応答に与える影響について十分な知見があれば、杭基礎の構築においてより経済的な設計を模索することも可能である。

これらを踏まえ、本研究では、杭基礎と地盤の相互作

用の影響を詳細に検討し、杭基礎の損傷位置が構造物の応答与える影響について検討することとした。

既往の研究において、深い位置での杭の損傷は杭の抵抗特性への影響が限定的であることが示されており³⁾、当該研究の成果は、構造物の地震時の振動特性を直接的に扱ったものではないが、得られた結果は上述した本論文の想定に対して大変示唆深いと考えられる。杭部材の損傷と構造物の動的な応答特性の関係を議論した既往の研究としては、川中ら⁴⁾による地盤と構造の周期特性や相互作用を考慮した解析的な検討や、崔ら⁵⁾による損傷検知手法の開発を意図した実験的な研究が挙げられる。これらは、杭の損傷が構造物の応答に影響を与えているが、杭の損傷位置の影響や、地盤と杭基礎の相互作用の観点からの議論は扱われていない。

以上を踏まえ、本研究では、杭部材の損傷位置の変化が与える構造物の動的応答への影響を検討するため、動的解析を用いた検討を行う。解析に用いる基本モデルは、

せん断土槽内に設置された杭基礎模型の振動実験を2次元の梁・ばねモデルによりモデル化することにより作成する。これは、実験の再現解析モデルを用いることで、実現象との整合を取ることを意図したものである。再現解析モデルに対して、地盤と基礎の相互作用の観点から分析を行った上で、杭部材に損傷を許容し、杭部材の損傷位置が構造物の応答に与える影響を検討する。

なお、解析の信頼性を確保する上では、地盤の非線形性の影響を適切に表現する必要がある。地盤と杭の相互作用を表現するばね要素には、杭と杭周辺地盤の直接的な力のやり取りによる非線形（ローカル非線形）に加えて、せん断土層全体のせん断変形による非線形（サイト非線形）を考慮する必要があることが知られており⁶⁾、本研究においても、基本モデルの作成においてはこれらを考慮した。

以下の章においては、まず、基本モデルの作成について説明する。次に作成した解析モデルにおいて地盤と基礎の相互作用の観点から分析を行い、杭基礎に発生する断面力について慣性力による影響と地盤変位の影響を整理する。最終的に相互作用の観点からの分析も踏まえて、杭基礎の損傷を考慮した解析を行い、杭基礎の損傷位置における構造物の応答への影響について議論する。

2. 基本モデルの作成

本章では基本モデルとして用いるせん断土層を用いた杭基礎構造物の振動実験の概要と解析モデルの作成について述べる。

(1) 実験概要

本検討で取り扱った振動実験⁷⁾の概要を示す。実験の概要図を図-1に示す。実験は鉄道総研で所有するせん断土槽を用いて行ったものである。せん断土槽は幅3m、奥行き1.1m、高さ3mであり、12段のせん断フレームで構成されている。模型地盤は土層の下面から、バラスト層が200mm、碎石層が400mm、砂層（硅砂6号）が2200mmとなっている。砂層は相対密度60%で作成したものである。杭基礎模型は、鋼管杭（平面寸法100mm×50mm、厚さ2.3mm、長さ2800mm）を加振直角方向に杭間隔270mmで2本配置したものとなっており、バラスト層の上面から設置されている。また、上部構造物としてフーチング相当の位置に5kNのウェイトを設置している。

実験は加振レベルを徐々に大きくしながら、不規則波（ホワイトノイズ）による加振が行われている。以下の検討では、主に最大加速度のレベルが50galの加振ケースと300galの加振ケースを基本にモデル化の検討を行っ

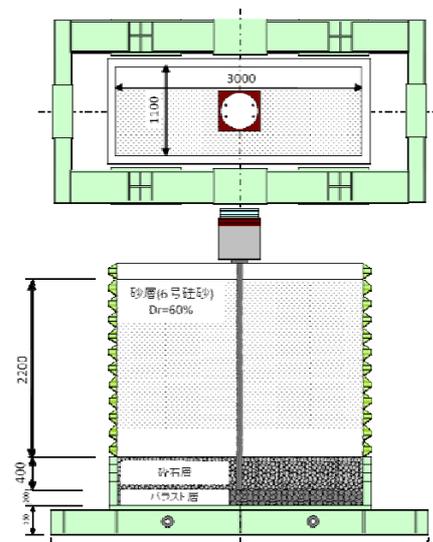


図-1 振動実験の概要

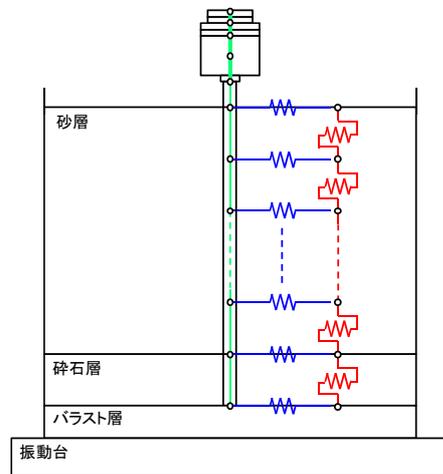


図-2 解析モデルの概要

ている。

(2) 解析モデルの作成

上述した実験を再現できる解析モデルを作成する。概要は図-2に示すものであり、梁・ばねモデルとして作成した。杭は梁要素で表現し、1要素100mmの長さでモデル化している。使用した鋼管杭には、実験時に塑性化が見られていないため、線形としてモデル化した。また、杭の各節点の位置（深さ）に対応するように、せん断土層の振動を表現する自由地盤の節点を設けた。土層のせん断挙動を表現するため、各節点間に自由地盤を表現するばね要素を設定している。さらに、杭と地盤の間の相互作用を表現するため、杭の節点と自由地盤の節点の間に相互作用ばねを設定した。

以下、自由地盤ばねおよび相互作用ばねの設定について、パラメータの設定方法を述べる。

a) 自由地盤ばねの設定

自由地盤ばねのばね値 K_s は、土層のサイズの土中を

考慮することで設定する。つまり、 $K_s = G \times bh / l$ (G : せん断剛性, b : 土層幅 (=3m), h : 土層奥行き (=1.1m), l : せん断ばね長さ (=0.1m)) とする。模型地盤の各位置におけるせん断剛性 G を測定しておけば、精度の高いばね値が得られるが、本実験では測定値がないため、砂層の三軸圧縮試験結果および模型地盤の50gal加振により得られた固有振動数を用いてせん断剛性 G の推定を行うことでばね値を設定する。以下の手順により算定した。

- ①地盤を5層に分割し、各層の平均拘束圧からせん断剛性の算定(せん断剛性は三軸圧縮試験により得られる G_0 から、拘束圧の0.6乗に比例するとして算定した)。
- ②各層のばね値 K_{s0}^i (i :層番号)の算定により、自由地盤モデルの作成。
- ③50gal加振時の模型地盤の固有振動数(9Hz)を表現するためのばね値の補正。

上記の手順③におけるばね値の補正においては、手順②で得られたばね値 K_{s0}^i を一律の係数 β で補正できる($K_s^i = \beta K_{s0}^i$)ことを仮定し、解析モデルの固有値解析の結果が微小加振により得られた固有振動数に一致する係数 β を探した。

ばねの非線形特性は、HDモデル(双曲線モデル)で表現した。HDモデルは、地盤の非線形特性を表現するには単純であり、挙動の再現には(i)履歴が大きいこと、(ii)骨格曲線が十分フィッティングできないこと、といった問題があることが知られているが、今回の再現解析では取扱いが簡便であることなどを考慮して選択した。HDモデルで必要となる上限値については、三軸圧縮試験の結果より算定したものを与えている。

b) 相互作用ばねの設定

相互作用ばねの設定においては次に示す手順で行った。

- ①設計で考慮するばね値 K_{hd}^i の算定。
- ②設計で考慮するばね値から50gal加振時のばね値 K_{h0}^i への補正。
- ③上限値の算定とHDモデルの適用(ローカル非線形の考慮)。
- ④サイト非線形を考慮したばね K_h^i の設定。

まず、手順①および手順③の設計で考慮するばねの剛性・上限値の設定においては鉄道的设计標準の手法を用いた⁹⁾。算定においては「a)自由地盤ばねの設定」に用いた層ごとのせん断剛性 G を用いている。ここで注意すべきは、鉄道的设计標準で定められた相互作用ばねのばね値は、実験の水平載荷試験データを元に杭頭変位10mm時の状態から逆算して得られる値であり、いわゆる等価剛性に相当する(図-3)。つまり、地盤の初期剛性に対して、剛性を低く算定していることになる。そのため、比較的小規模な加振である50gal加振時の杭模型の固有振動数(3Hz)を表現するため、 K_{hd}^i を補正する。ここでは、自由地盤の議論と同様、一律の係数 γ で

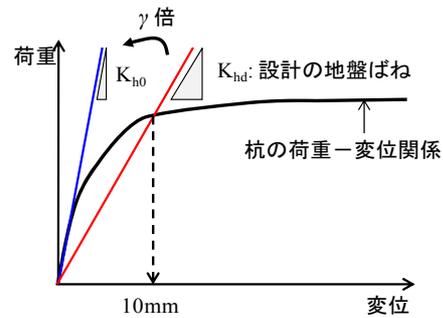


図-3 設計の地盤ばねの設定概要

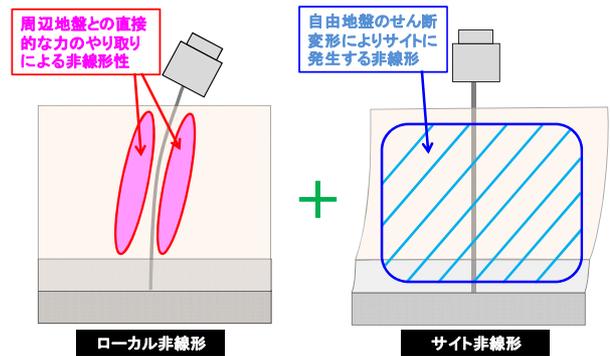


図-4 ローカル非線形性とサイト非線形性

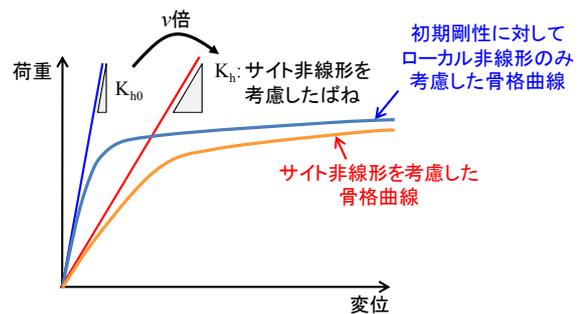


図-5 サイト非線形の考慮の方法

補正できる($K_{h0}^i = \gamma K_{hd}^i$)ことを仮定した。

手順④のサイト非線形性の設定にあたって、ローカル非線形とサイト非線形の関係を説明する。ローカル非線形は杭と周辺地盤の直接的な力のやり取りによって起こる非線形であり、サイト非線形は自由地盤がせん断変形することによって起こる非線形性である(図-4)。ローカル非線形は、杭の静的な荷重-変位関係を表しており、手順③までで設定されている。具体的にサイト非線形を考慮するには、ローカル非線形を表現したばねの剛性に、自由地盤のせん断ひずみに応じた低減係数 ν を乗じることで算定する($K_h^i = \nu K_{h0}^i$)。設定方法の概要を図-5に示す。この時、上限値については変化させていない。本来この低減係数 ν は文献6)に示されるように、応答解析中に時々刻々、変化すべきものであるが、ここでは簡単な表現として入力レベルごとに一定値を取ると仮定した。入力レベルに応じた低減係数 ν を算定するにあたっては、 ν を変化させた上で、実際に動的解析を実施し、

結果が実験値に近くなる ν を探索した。解析結果は次節で示すが、50gal加振の時は $\nu = 1.0$ 、300gal加振の時は $\nu = 0.33$ の時に、最も実験模型の応答を適切に表現できた。

(3) 基本モデルによる応答解析

前節までで作成した解析モデルに対して、動的解析を行い、解析モデルの精度について検討する。入力には実験においてせん断土層基部に取り付けた加速度計で計測された加速度波形（ホワイトノイズ）を用いた。図-6に入力レベルが300galの場合の入力波形を示す。

解析結果として、50galおよび300gal加振において、地表面と構造物（ウェイト）の加速度応答を図-7・8に示す。それぞれ、実験で得られた計測結果を重ね、加振中の5秒間を拡大して表示した。各ケースで概ね適切に実験により得られた波形を表現できていることが分かる。これにより、作成した基本モデルは非線形特性（ローカル非線形・サイト非線形）を適切に表現できていると判断できる。

なお、上記解析で得られた杭基礎の最大曲げモーメント分布は図-9に示すものとなった。

3. 杭基礎と地盤の相互作用を考慮した解析モデルの分析

前章で得られた解析モデルについて、杭基礎と地盤の相互作用の観点から分析を行う。具体的には、杭基礎に発生する断面力について慣性力による影響と地盤変位による影響を把握するため、構造物の重量を無視した解析（慣性力の影響を取り除いた解析）を実施し、地盤変位のみの影響を受けた場合の構造物の応答値を算定し、得られた解析結果と基本モデルによる通常解析結果を比較することにより分析する。

(1) 解析における検討波

分析に用いる入力波として2パターン検討する。1つは前章の再現解析で用いた入力波（ホワイトノイズ300gal）である。これを検討波①とする（図-6）。検討波①の特徴としては、ホワイトノイズであるため広い周期帯で一定の振幅を持っているが、実験で使用した入力波であり、振動台の性能に合わせて、周波数が1Hz以下でカットされたものになっている。もう1つの入力波は、鉄道的设计に使用されるL2地震動（スペクトルⅡ）¹⁾の基盤波を調節し、最大加速度が250galとなるように加速度の調整を行ったものである。最大加速度（250gal）は、検討波①と同程度のサイト非線形性となるように設定し

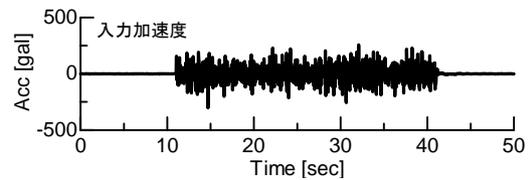
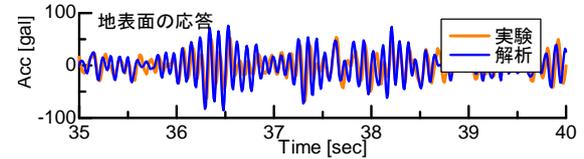
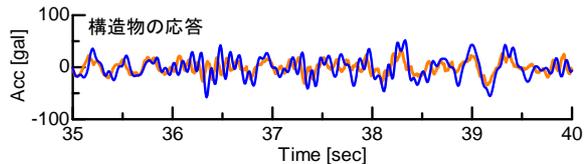


図-6 入力波形（ホワイトノイズ300gal）

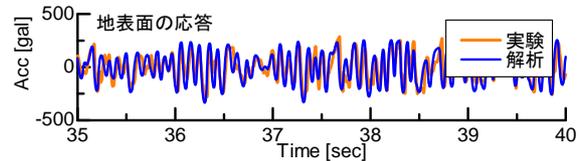


(a)地表面

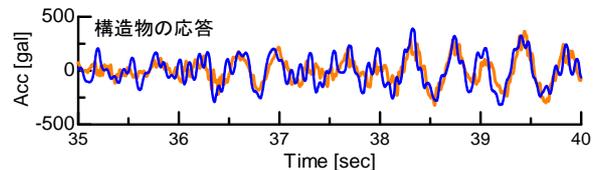


(b)構造物

図-7 50gal加振時の応答（実験と解析の比較）



(a)地表面



(b)構造物

図-8 300gal加振時の応答（実験と解析の比較）

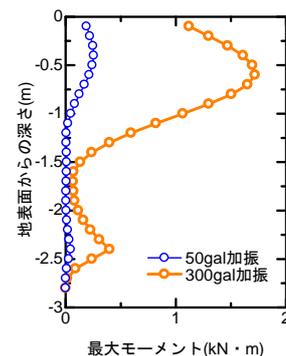


図-9 杭の最大曲げモーメント分布

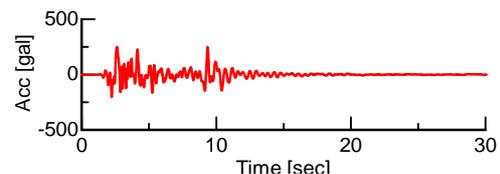


図-10 検討波②（鉄道設計標準スペクトルⅡの振幅調整波）

たものであり、動的解析を行った際に土層の最大変位分布が検討波①と同程度となるように考慮した。この調整により得られた波を検討波②とする(図-10)。また、検討波①および②について図-11にフーリエスペクトルを示した。検討波①は1Hz以上の周波数帯に広く振幅を持つのに対して検討波②は0~5Hzにのみに振幅が集中していることが分かる。

以下の検討においては、ここで設定した2波を用いることとする。

(2) 杭の発生断面力に対する相互作用の観点からの分析

上述のように、構造物の重量を無視し、慣性力の影響を取り除いたモデルにより応答解析を実施することで、地盤変位の影響のみによる応答値を算定することが可能である。各検討波について、地盤変位による影響のみを考慮した杭の最大曲げモーメント分布を算定し、通常の応答解析で得られる杭の最大曲げモーメント分布(慣性力の影響+地盤変位の影響を考慮)と比較すると、図-12のようになる。

いずれの検討波においても、地盤変位の影響のみ考慮した解析では、1.5mより浅い位置において、断面力がほぼ発生していないことが分かる。つまり、この領域では、杭に発生する断面力に対して慣性力の影響が支配的であることが分かる。一方、1.5m以深(特に深度2.4m付近)においては、通常の解析と地盤変位の影響のみを考慮した解析において断面力が一致するため、この領域では、杭に発生する断面力に対して地盤変位の影響が支配的であることが分かる。

また、地盤変位の影響により発生する断面力について両検討波で比較すると、ほぼ違いが見られないことも分かる。一方、通常の応答解析においては、深度0.5m付近の発生曲げモーメントに見られるように、検討波②の方が検討波①に比較して発生曲げモーメントが大きくなっており、検討波②では検討波①に比較して、慣性力の影響が大きく表れる傾向が分かる。

(3) 相互作用を考慮した分析のまとめ

前節の解析により、本解析モデルでは、杭の発生曲げモーメントに対して、1.5m以浅では慣性力の影響が支配的で、逆に1.5m以深では地盤変位の影響が支配的であることが分かった。以降の検討では、杭の損傷位置を変化させた感度解析を実施するが、1.5m以浅での損傷は慣性力の影響によることを意味し、1.5m以深での損傷は地盤変位の影響によることを意味することを考慮して検討する必要があることが分かった。

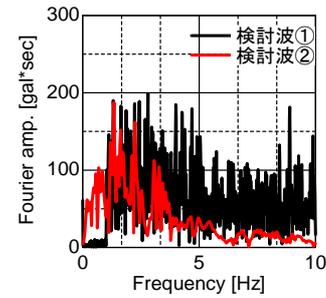
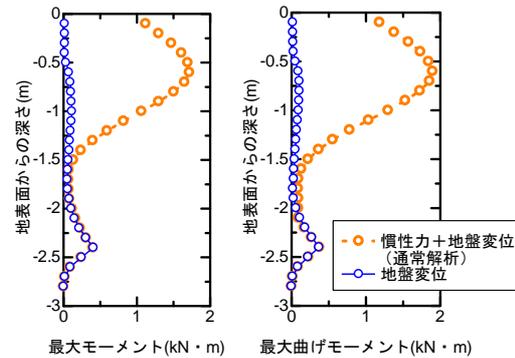


図-11 検討波のフーリエスペクトル



(a) 検討波① (b) 検討波②

図-12 杭の断面力における慣性力と地盤変位の影響(通常解析と地盤変位の影響を考慮した解析の比較)

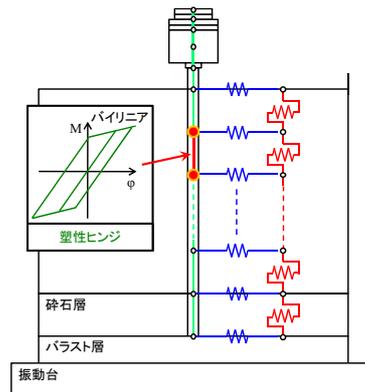


図-13 損傷を考慮した場合のモデル化概要

4. 杭の損傷を考慮した解析

前章まで作成・分析した基本モデルに対して、杭部材に非線形性を導入し、損傷を表現できるモデルを作成する。また、検討は地盤変位の影響で損傷する場合と慣性力の影響で損傷する場合についてそれぞれ実施する。

ここでは、杭が損傷する場合のモデル化と作成したモデルによる解析結果について示す。

(1) 損傷のモデル化

杭部材に損傷を考慮したモデルは、図-13に概要を示すようにある深度の要素の $M-\phi$ 関係に上限値を設定し、バイリニア型の骨格曲線を適用することで塑性ヒンジと

して表現した。損傷を考慮した要素においてのみ損傷を考慮するモデルとなっており、その他の要素は基本モデルのまま線形要素としている。

以下では、地盤変位の影響で損傷が起こる場合と、慣性力の影響で損傷が起こる場合について、それぞれ損傷のモデル化手法を説明する。

a) 地盤変位の影響による損傷を考慮する場合

地盤変位の影響により曲げモーメントが発生する領域は杭の非常に短い領域（深度2.4m周辺）であるため、さらに損傷位置を細分化し、感度解析を実施するのは困難である。そこで、地盤変位の影響で損傷する場合については、深度2.4mの位置において損傷が発生したことを想定した検討を実施し、この損傷が構造物の地震応答に対して影響をおよぼすか確認する。

バイリニアモデルの降伏曲げモーメントとしては、上限値=0.25kN・mを与えた。図-14(a)に検討波①（ホワイトノイズ300gal）による加振時に発生した最大曲げモーメント分布とここで設定した上限値の関係を示す。

また、バイリニアモデルにおける降伏後の曲げ剛性は初期剛性の10分の1とした。

b) 慣性力の影響による損傷を考慮する場合

慣性力の影響により曲げモーメントが発生する領域は地盤変位の影響に関する検討と異なり、杭頭から深度1.5mと広い領域となっているため、損傷位置の構造物の応答に対する影響を検討する際には、この範囲内において感度解析が必要になる。

設定するバイリニアモデルの降伏曲げモーメントとしては、上限値=0.5kN・mを与えた。図-14(b)に検討波①（ホワイトノイズ300gal）による加振時に発生した最大曲げモーメント分布とここで設定した上限値の関係を示す。1.1m以浅の範囲において塑性ヒンジを設定した場合に、杭の損傷による応答の影響が検討できる解析モデルとなっている。なお、杭の特性値 β を用いて表される $1/\beta$ は0.94mである。

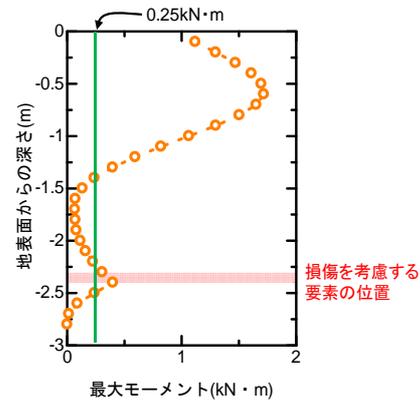
また、上記と同様バイリニアモデルにおける降伏後の曲げ剛性は初期剛性の10分の1とした。

(2) 損傷を考慮した解析による応答

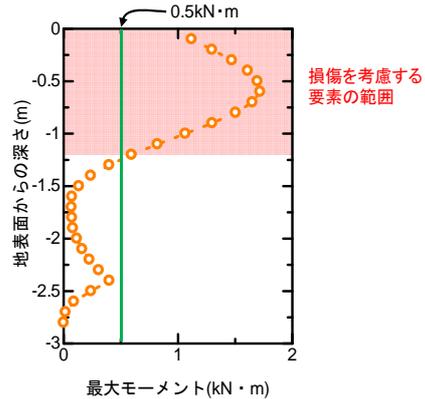
前節で作成したモデルに対して、動的解析を行い、構造物天端の加速度応答・変位応答に着目して解析結果を整理する。

a) 地盤変位の影響による損傷を考慮する場合

図-14(a)に示した位置において損傷を設定し、杭基礎に地盤変位の影響による損傷を考慮した解析を実施した。検討波①を用いた場合について、損傷を考慮した解析と損傷がない場合の解析（2章で作成した基本モデルによる解析）と比較した結果を図-15に示す。波形は5秒間を

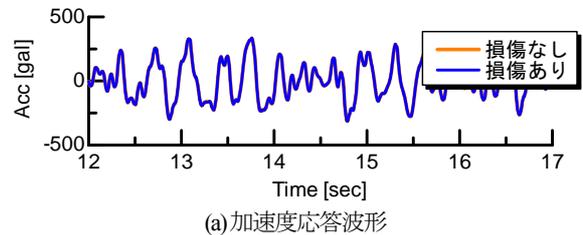


(a) 地盤変位の影響による損傷を考慮する場合

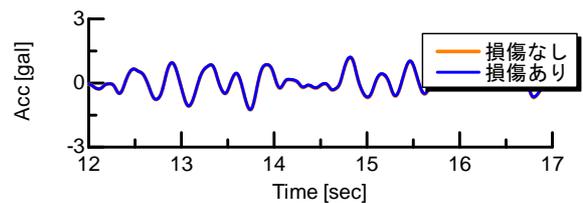


(b) 慣性力の影響による損傷を考慮する場合

図-14 バイリニアモデルに設定する上限値と杭に発生する最大曲げモーメント分布の関係



(a) 加速度応答波形



(b) 変位応答波形

図-15 地盤変位の影響による損傷の有無による構造物応答波形比較（検討波①）

拡大したものとなっている。図に示したように、杭の損傷の有無に関わらず、構造物の加速度応答波形および変位応答波形は変化がないことが分かった。なお、検討波②による結果も検討波①の場合と同様、損傷の有無で応答に変化が現れなかった。これより、地盤変位による深い位置での杭の損傷は構造物の応答に影響を与えないこ

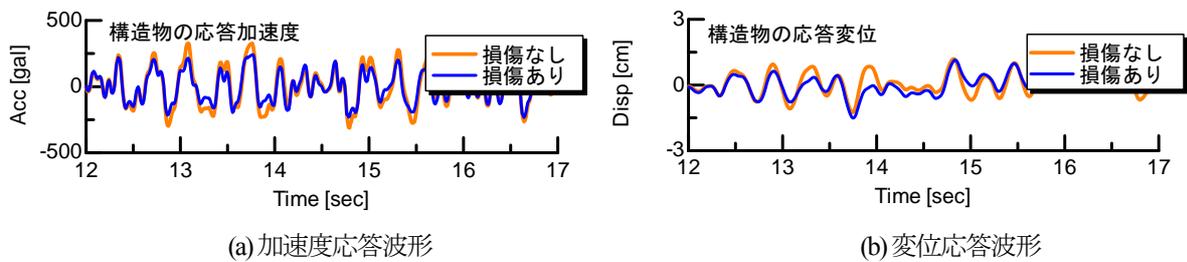


図-16 慣性力の影響による損傷の有無による構造物応答波形比較 (検討波①) 【損傷深度：0.5m】

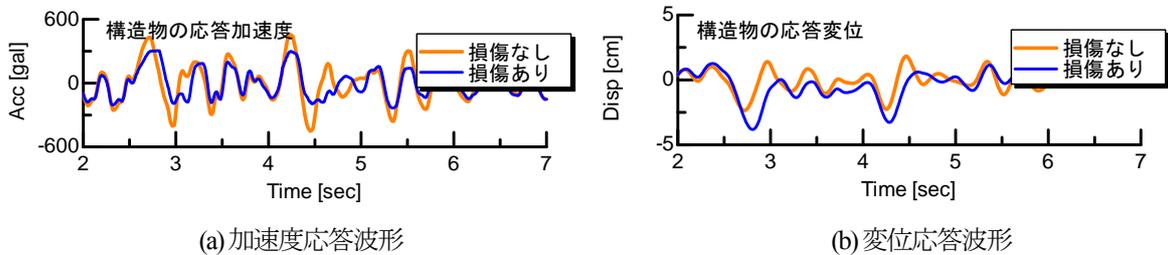


図-17 慣性力の影響による損傷の有無による構造物応答波形比較 (検討波②) 【損傷深度：0.5m】

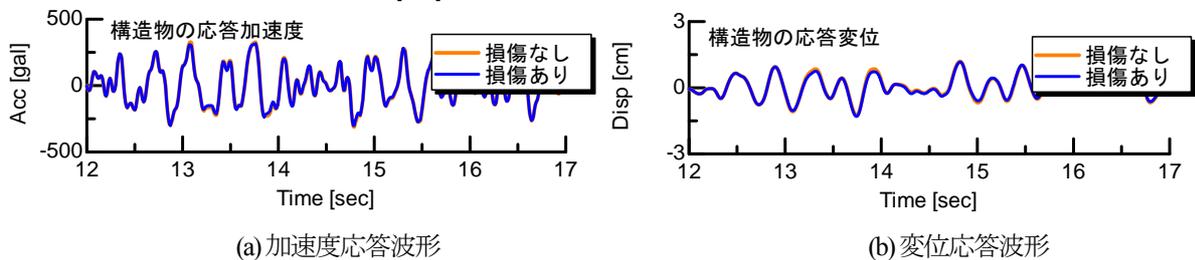


図-18 慣性力の影響による損傷の有無による構造物応答波形比較 (検討波①) 【損傷深度：1.0m】

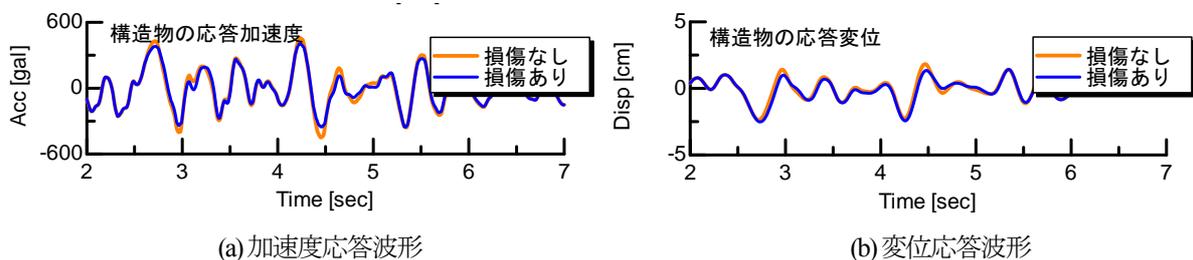


図-19 慣性力の影響による損傷の有無による構造物応答波形比較 (検討波②) 【損傷深度：1.0m】

とが分かる。

b) 慣性力の影響による損傷を考慮する場合の例

損傷位置が杭頭から0.5mの位置にある場合について、構造物天端の応答加速度波形・応答変位波形を2つの検討波についてそれぞれ図-16・17に示した。波形はそれぞれ損傷がない（基本モデルの）場合との比較を示し、5秒間を拡大したものになっている。

それぞれの検討波で共通の特徴として、損傷する場合、加速度応答の最大値が低減することが分かる。加速度の低減は、杭の塑性化により荷重が頭打ちになったこと、および杭の塑性化による振動数の低下が原因であると考えられる。検討波ごとに比較すると、検討波②（図-10）の方が、加速度波形の変化が顕著である。これは、1Hz以下の振幅をカットした検討波①と異なり、検討波②が低振動数側までエネルギーを持つためであると考え

られる。

変位波形について見ると、検討波②では変位の増大が見られる。これは、上述のように検討波②では杭基礎の塑性化後の低振動数側でもエネルギーを持つためであると考えられる。検討波①では、変位波形の変化は見られるが、振幅の明確な変化までは見られない結果であった。

(3) 損傷を考慮した解析による応答のまとめ

以上の検討により、まず、地盤変位の影響で発生する杭基礎の深い位置での損傷では、構造物の応答に影響が表れないことが分かった。一方、慣性力の影響で発生する杭基礎の浅い位置での損傷は、構造物の応答に感度があることが分かった。杭基礎に慣性力の影響による損傷が発生した場合については、次章において、さらに損傷位置を変化させることによる感度解析を実施する。

5. 慣性力の影響を考慮した場合の杭の損傷位置による感度解析

慣性力の影響による損傷を考慮したモデルについて、損傷位置を変化させて動的解析を行い、主に上部構造物の応答の変化について検討する。

(1) 損傷位置を変化させた解析

前章の検討に対して、損傷位置の深さを1.0mの位置に変更した解析を行い、その影響について検討する。応答解析の結果について、上記と同様、応答加速度・応答変位について、検討波ごとに図-18・19に示す。結果から分かるように、損傷位置を深くすると、損傷の影響による応答の変化が小さくなること分かる。特に検討波①（図-6）では、損傷がない場合と比較した時に解析結果に違いがほとんど見られない。

次に、損傷位置の深さが0.5mのケースと1.0mのケースで杭に発生する最大曲げモーメント分布を検討波ごとに比較する（図-20）。損傷位置が0.5mの場合は1.0mの場合に比べて、曲げモーメントの分布全体が小さくなっている。これからも、杭の浅い位置での損傷が構造物の応答に対して影響が大きいことが分かる。

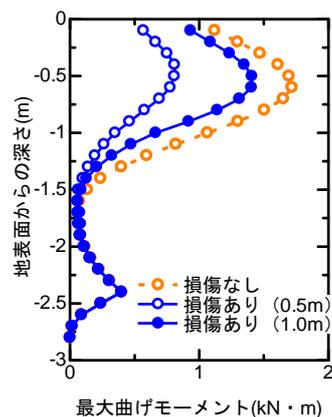
検討波で比較すると、損傷位置の変化による曲げモーメントの変化が検討波①では大きい。これは、前章でも考察したように、検討波①では杭部材が塑性化し、全体の振動数が低くなった時に構造物を振動させるエネルギーが小さくなるためであると考えられる。

(2) 損傷位置を連続的に変化させた感度解析

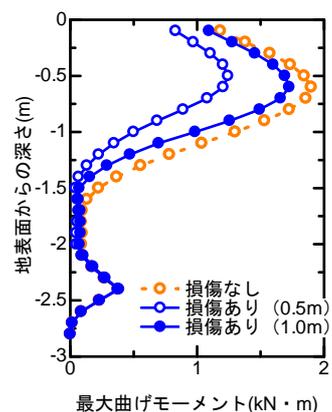
損傷を許容する位置を連続的に変化させ、構造物の最大応答加速度および最大応答変位を、損傷しない場合からの変化率として整理し、両検討波について比較する。結果を図-21に示す。最大加速度応答においては、杭基礎の損傷を許容すると両検討波とも応答の低減が見られる。一方、最大変位応答は、杭基礎の損傷を許容した場合、検討波①ではほとんど変化しないが、検討波②では応答が増大する傾向があることが分かる。また、応答に変化が見られる場合については、損傷を許容する位置が浅いほど応答の変化が大きく、0.5m～1.0mで徐々に応答の変化が小さくなっていくことが分かる。なお、深さ0.5mの位置は杭に発生するモーメントが最大となる位置と整合的であり、深さ1.0mの位置は杭の特性値 β を用いて表現される深さ $1/\beta$ （=0.94m）と整合がある。

(3) 損傷位置を連続的に変化させた解析のまとめ

上記の結果について、整理すると以下ようになる。



(a) 検討波①



(b) 検討波②

図-20 損傷を許容する位置の違いによる杭の最大曲げモーメント分布

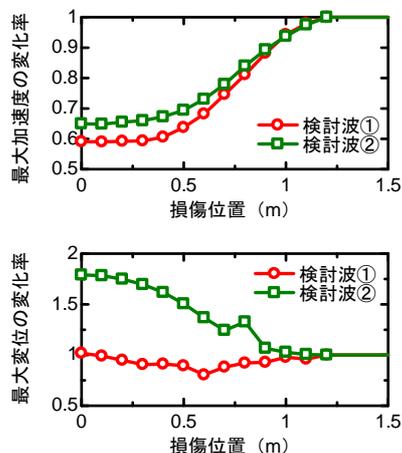


図-21 損傷位置を変化させた場合の最大応答の変化率

- ① 加速度応答は杭の塑性化により低減するがその変化の割合は杭の損傷位置が浅いほど大きく、損傷位置が深くなっていくと1.0m付近で変化がほとんど見られなくなる。
- ② 変位応答は損傷位置により変化するが、入力波形が異なると応答の変化の傾向に違いが生じる。検討波によっては、変位が増大する場合もある。ただし、変化率については加速度応答と同様1.0m付近で

影響が十分小さくなる。

以上の結果から、比較的浅い部分で損傷を許容した場合、上部構造物の応答に影響が表れることが分かる。加速度が小さくなることから、慣性力の影響は小さくなることが示唆される（これは、図-20に示した杭基礎の曲げモーメント分布とも整合する）が、逆に言えば、杭基礎の損傷と構造物の安全性についての議論が残り、例えば、残留変位に配慮する必要がある場合等は損傷を設計で求められる一定のレベル以下に抑える必要がある。また、鉄道高架橋のように応答変位が増大すると安全性に影響が出るような場合（列車の走行安全性）、性能の評価には注意が必要である。

一方、深い位置（本検討では、 $1/\beta=0.94\text{m}$ 以深）での損傷が構造物の応答に与える影響は、加速度・変位とも限定的であることが示された。これは、前章の地盤変位の影響に関する検討を踏まえても、共通の結論である。これより、深い位置での損傷は構造物の応答に変化を与えないため、安全性を議論する上では部材の損傷を許容できる可能性があると考えられる。

6. まとめ

本研究では、杭基礎における損傷位置が構造物の応答に与える影響について解析的に検討した。解析に用いたモデルは、実際に振動実験を行った杭基礎構造物の模型に対する再現解析モデルを用いており、地盤の非線形性の影響を検討に用いた加振レベルで再現したモデルとなっている。本モデルに対して、地盤と基礎の相互作用の観点から分析を行い、損傷が地盤変位の影響で起こる場合および慣性力の影響で起こる場合について検討した。慣性力の影響で損傷が起こる場合については、損傷位置により感度解析を実施し、損傷位置が構造物の応答に与える影響を詳細に検討した。

検討によって以下のことが分かった。

- ①地盤変位の影響により杭の深い位置で発生する損傷は構造物の応答に対して感度は小さい。
- ②慣性力の影響により杭基礎に損傷が発生する場合、損傷位置が比較的浅い時には、構造物の加速度応

答は低減する。また、変位応答については増大する可能性がある。

- ③慣性力の影響により杭基礎に損傷が発生する場合、損傷位置が比較的深い時には、杭基礎の損傷が構造物の応答に与える影響は限定的である。
- ④本検討においては、応答に影響を与えなくなる杭基礎の損傷の深さは $1/\beta$ （ β : 杭の特性値）と整合がある。

以上の結果により、杭基礎の損傷が地盤変位の影響・慣性力の影響のどちらで発生するとしても、杭基礎の損傷箇所を十分深く設定できるのであれば、杭基礎の損傷が構造物の地震応答に与える影響は限定的であることが分かった。これにより、構造物の地震時の安全性のみの議論であれば、杭基礎の損傷を許容した設計についても検討の余地があることが示された。

参考文献

- 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）、2012。
- 2) 足立幸郎、庄司学：兵庫県南部地震で被災を受けた都市高速道路橋の復旧費に関する検討、土木学会第27回地震工学研究発表会論文集、2003。
- 3) 川中徹人、高橋祐治、砂坂善雄、高原秀夫：橋脚一基礎一地盤系の非線形動的応答解析一杭の損傷が橋脚の地震応答に与える影響について一、第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災性向上に関するシンポジウム論文集、2002.2、pp.213-218。
- 4) 崔井圭、濱本卓司：Penzien型質点系モデルを用いた杭基礎の損傷検知、日本建築学会構造系論文集、第77巻、第674号、2012.4、pp.545-554。
- 5) 佐名川太亮、西岡英俊、神田政幸、森野達也、米澤豊司、青木一二三：慣性力と地盤変位が同時に作用する杭の水平抵抗特性に及ぼす杭体の段落し部での損傷の影響、地盤工学ジャーナル。
- 6) 室野剛隆、小長井一男：土の非線形性を考慮した群杭基礎の動的相互作用の新たな表現方法、土木学会地震工学論文集、2003、pp.1-8。
- 7) 手嶋正和、西岡英俊、佐名川太亮、澤田亮、神田政幸、豊岡亮洋、室野剛隆：地盤と杭基礎の動的相互作用に着目した大型せん断土槽による模型振動実験、第13回日本地震工学シンポジウム、2010、pp.1054-1061。

NUMERICAL ANALYSIS ON THE EFFECT OF DAMAGE POSITION OF PILE ON SEISMIC RESPONSE

Hiroki MOTOYAMA, Yoshitaka MURONO, Takayoshi NISHIMURA
Takayuki YAMAZAKI, and Yusuke TAKANO

The damage positions of pile are affected by the soil-pile interaction and the different damage position

affect the seismic response of structure. As the fundamental study on this problem, we study the effect of the damage position on pile by sensitivity analysis. In the analysis, we use the analytical model of the soil and pile that complies with shaking test. Using this analytical model, we change the damage position, and study the difference of seismic response. From this analysis, we found that if the damage position is deeper than $1/\beta$ (β : the characteristic value of a pile), the response of the structure is restrained to a limited extent, whereas the shallower damage position than $1/\beta$ dominates the response of the structure significantly. Especially, due to the damage at shallower position, the displacement response can be increased.