

論文 実地盤中に設置された実大コンクリート杭の耐震性状に関する研究

醍醐 宏治^{*1}・Rabin TULADHAR^{*1}・牧 剛史^{*2}・睦好 宏史^{*3}

要旨：構造物全体系の地震応答解析法の確立を行う上で、まだ十分には明らかにされていない地盤－杭体の相互作用について検討するために実地盤中に設置された実大コンクリート杭の水平載荷実験を行い、復元力特性や変形性能について検討を行った。また、この実験に即した条件で3次元有限要素解析を行った。杭体のモデル化に線材要素を適用したモデルを作成し、その精度について比較・検討を行った。その結果、ある程度の精度で挙動を推定できることが確認でき、線材モデルが実大コンクリート杭に適用できることが明らかとなった。

キーワード：実大コンクリート杭，水平載荷，3次元有限要素解析，地盤反力，線材要素

1. はじめに

現在、コンクリート構造物の耐震設計法は性能照査型に移行しつつあり、上部構造物のみでなく、地盤、基礎構造物も含めた構造物全体での耐震性状を求めて照査することが必要とされてきている。そのためには基礎構造物の耐震性状や変形性能の把握が不可欠であり、それに関する実験的及び解析的研究が盛んに行なわれるようになった^{1),2)}。しかし、それらの研究の多くはモデル化された杭・地盤を用いた実験や、それに基づいて構築された解析手法を用いたものであり、これらの研究で得られた知見がどの程度整合するのか、もしくはいかなる精度をもって適用可能なのかという点については不明である。そこで本研究では、地震時における実大コンクリート杭の復元力特性や地盤中での変形について明らかにすることを目的として実地盤中に設置された実大コンクリート杭の水平載荷実験を、また構造物全体系での動的応答解析を行う際の有用な指標を得ることを目的として杭部材のモデル化が杭の応答性状に及ぼす影響についての検討を行った。

2. 実地盤中における実大杭の水平載荷実験

本実験で用いた載荷システムの概要図を図-1に示す。実地盤中に実大コンクリート杭を設置し、地表面から突出させた杭頭部の高さ0.6mの位置に油圧ジャッキを固定して水平単調載荷並びに水平正負交番載荷をそれぞれ1ケースずつ行った。試験杭は周辺地盤をできるだけ乱さないために中掘り工法を用いて施工された。載荷実験を行った地盤の土質柱状図とN値分布を図-2に示す。

実大杭試験体は、図-3に示すような直径45cm、肉厚7cmを有する円形中空断面を有するPHC杭を用いた。杭長は14mとし、杭下端から地表面までは12.8m、地表面から載荷点までは0.6mとした。杭軸方向にはφ7mmのPC鋼線を試験体外面から3cmの位置に合計12本配置し、φ3mmのスパイラル筋を100mmピッチで配筋した。試験体作製時にはプレテンションによって断面に5MPaのプレストレスを与えてある。コンクリートの圧縮強度は79MPa、PC鋼線の降伏強度は1325MPaであり、単純曲げ載荷実験によって求められた杭体の降伏モーメントは124kN・m、降伏曲率は終局モーメントは160kN・mであり、降伏曲率は1.8μ/mmであった。試験

*1 埼玉大学大学院 理工学研究科 建設工学専攻 (正会員)

*2 埼玉大学大学院 理工学研究科 助教授 工博 (正会員)

*3 埼玉大学大学院 理工学研究科 教授 工博 (正会員)

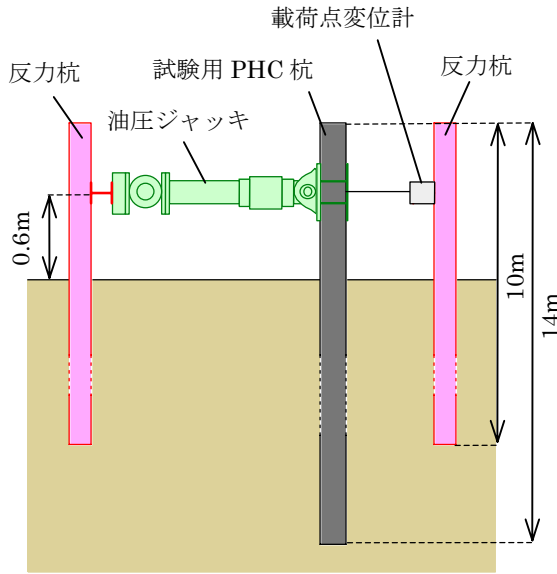


図-1 載荷システム概要図

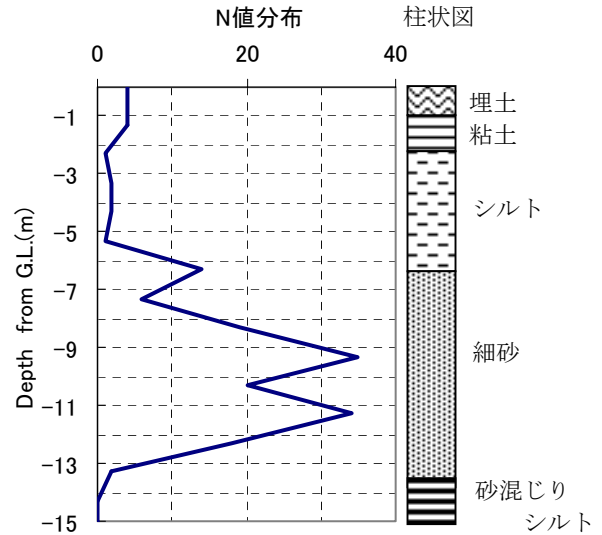


図-2 N値分布・土質柱状図

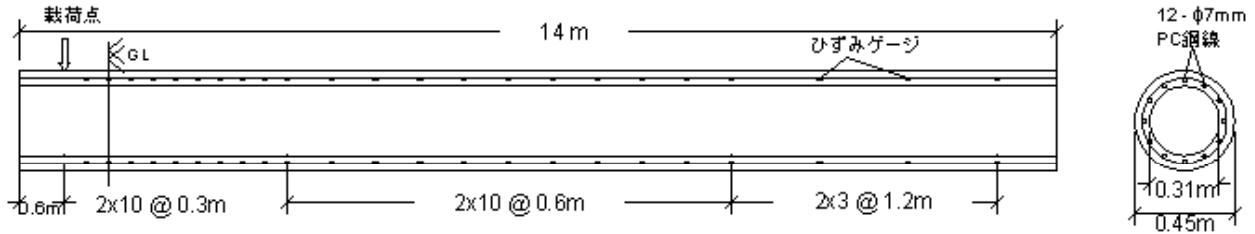


図-3 試験体概要

体の養生は蒸気養生にて行われた。水平正負交番載荷実験における載荷方法は、振幅を 15mm ピッチで変化させ、繰り返し回数は各サイクル 1 回ずつとした。なお、実験における測定項目として、杭頭反力、水平変位のほかに、杭体深さ方向の曲率分布を算定するために PC 鋼線にひずみゲージを貼付し、PC 鋼線ひずみを測定した。

3. 静的水平載荷実験結果

3.1 杭頭復元力-変位関係

図-4 は、単調載荷、正負交番載荷時の杭頭における復元力-変位関係を示したものである。正負交番載荷における履歴骨格曲線はスリップ型の形状を示しており、戻り剛性が低いことがわかる。これは繰り返し載荷によって生じた杭体と地盤の間隙に起因するものと考えられる。

また、単調載荷と正負交番載荷における最大荷重を比較すると、単調載荷では 135kN、正負交番載荷では 110kN となっており、正負交番載荷時の方が最大荷重が低くなっていることがわ

かる。これは、正負交番載荷では周辺地盤が除荷・再載荷の繰り返し変形を受けることによって地盤反力が低下したことによるものと考えられる。

3.2 杭体曲率分布

試験杭の PC 鋼線に貼付したひずみゲージより得られた PC 鋼線ひずみより各断面における曲率を算定した。正負交番載荷実験における曲率分布を図-5 に示す。図より、曲率分布に凹凸がはっきりと出ていることが確認できる。鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートはコンクリートにひび割れが発生すると鋼材とコンクリートの付着が切れ、ひび割れ発生位置にひずみが局所化しやすくなる。さらにこの実験で用いた試験体は鋼材量が少なく、このようなコンクリート部材も同様にひび割れが局所化しやすい。このことを踏まえると、杭体のひび割れ発生点ではひずみが局所的に増加したことにより、その分その他の点で受け持つひずみ量が増加しなかったために凹凸のはっきりした分布

になったと考えられる。

4.3 次元有限要素法解析の概要

4.1 解析目的

先にも述べたとおり、本研究は構造物全体系での地震応答解析法の確立を目指す上で、特に杭-地盤系の挙動について精度よく追跡できる解析法の開発を目的としている。本章では解析結果が実験結果をどの程度評価できているか確認すると共に、杭体のモデル化が解析精度に及ぼす精度についての検討を行うために、東京大学で開発されたコンクリート構造物の非線形 FEM 解析プログラム COM3³⁾を用いて3次元有限要素法解析を行った。

4.2 解析モデル

既往の研究¹⁾において、杭体にファイバーモデルに基づいた線材要素を用いてモデル化した3次元非線形有限要素解析を行い、RC 杭の杭頭載荷実験結果との比較を行っている。その結果、杭体と地盤を完全付着として地盤要素を粗めに設定したものが実験結果を良好に追跡できることがわかっている。これを踏まえて本解析では、実験杭においてもこの結果が成立するか検討するために20節点立体要素とファイバーモデルに基づいた3節点線材要素を用いて杭体のモデル化を行った。解析対象地盤は粘性土層と砂質土層の2層よりなるものとして分割を行い、地盤要素として20節点要素を用いている。本解析において適用した有限要素モデルを図-6に示す。

本解析で検討したパラメータを表-1に示す。杭体のモデル化と地盤要素分割幅が解析精度に与える影響を検討するために、それぞれ杭体に適用する要素タイプと地盤要素分割幅をパラメータとした。また、正負交番実験結果との比較を行うために地盤の分割幅を粗くとり、杭体のモデルに線材要素を用いたモデルについても解析を行った。

適用した材料構成則を図-7に示す。地盤要素に対しては、偏差応力第2不変量と偏差ひずみ第2不変量に対して大崎モデルを導入している。

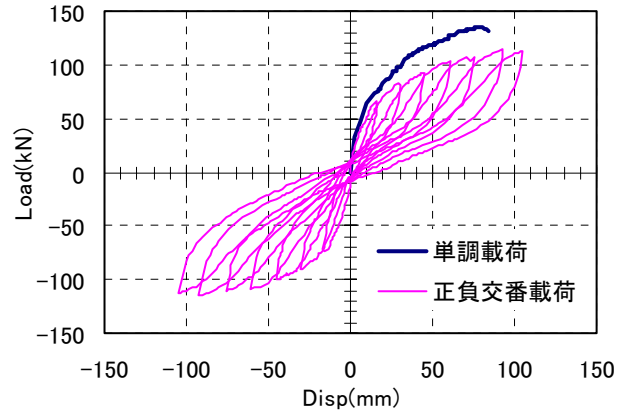


図-4 杭頭復元力-変位関係

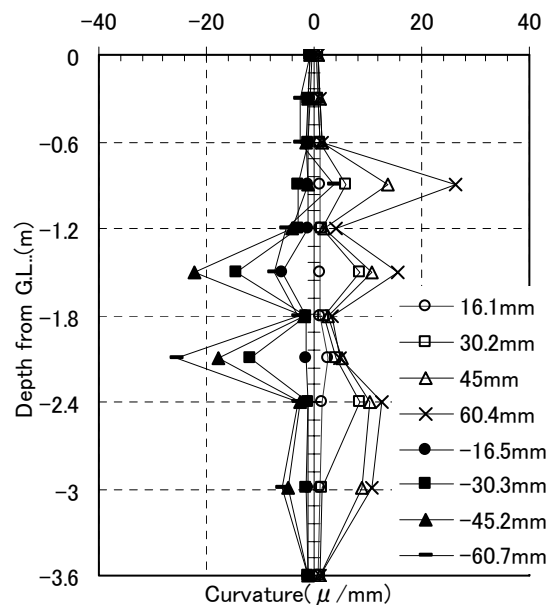


図-5 正負交番試験曲率分布

体積成分は線形弾性とし、平均引張応力も許容する構成則となっている。解析対象地盤の諸元を表-2に示す。実験を行った地盤の地質調査とN値からの算定式⁴⁾を用い、解析対象地盤の諸元を決定した。

立体要素モデルには杭体と地盤の間に生じる間隙を考慮するために、2次元16接点要素の接合要素を用いた。地盤要素の分割幅については図-8に示す様に杭体から杭径の半分(=225mm)離れたところに新たな分割を加えて要素を細かくしている。

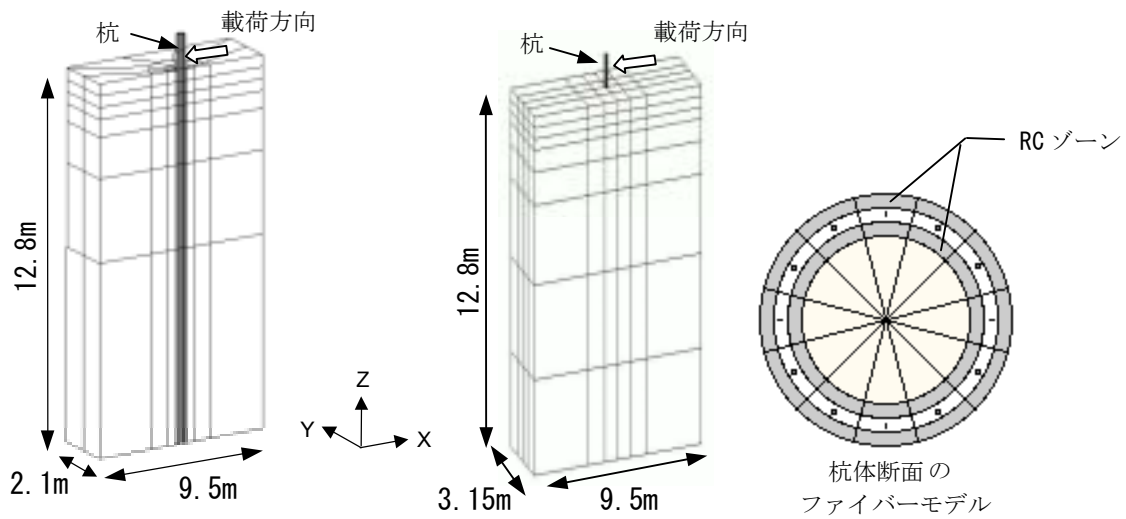


図-6 有限要素モデル

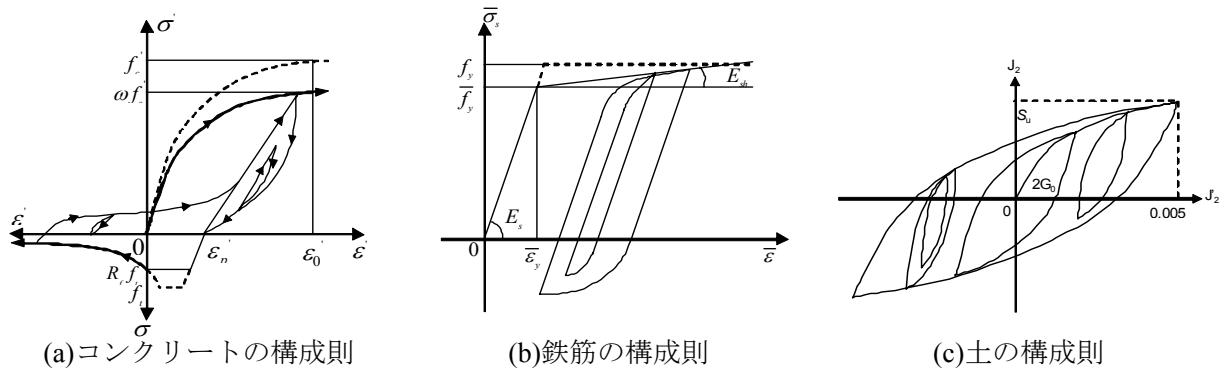


図-7 材料構成則^{5), 6), 7)}

表-1 解析パラメータ

ケース	要素タイプ	分割幅
SL	立体要素	—
FB-F	線材要素	細かい
FB-R		粗い

表-2 解析対象地盤の諸元

地表面からの深さ (m)	土質	単位体積重量 (g/cm ³)	初期せん断剛性 (N/mm ²)
0~6	粘性土	2.64	20.5
6~12.8	砂質土	2.74	154

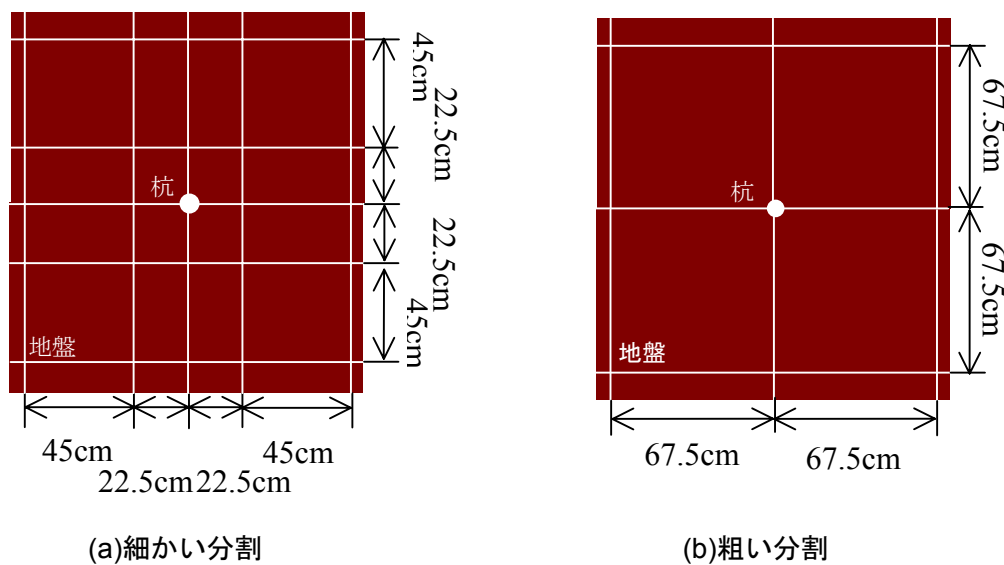


図-8 要素分割幅

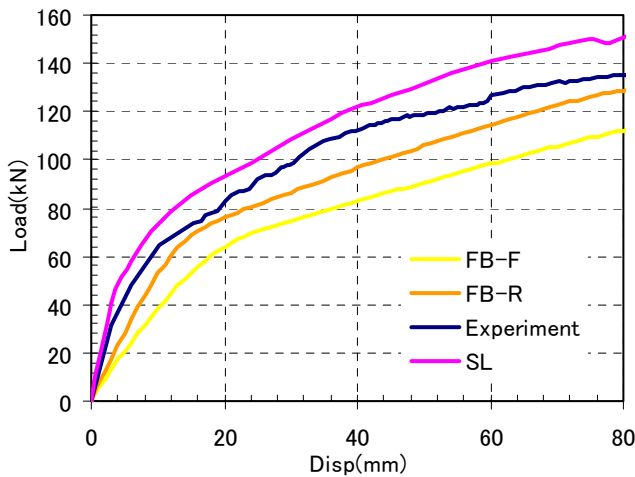


図-9 荷重-変位関係

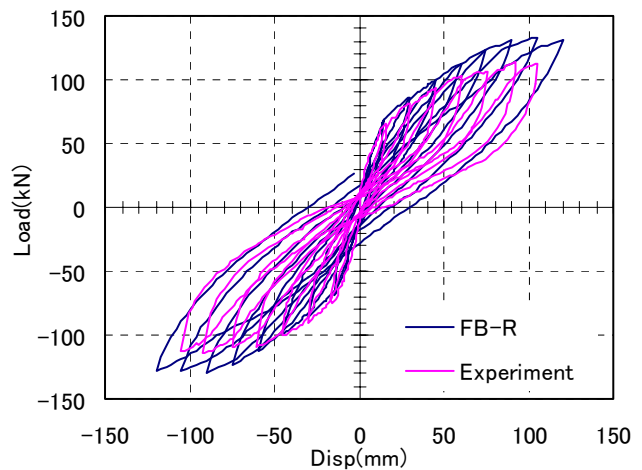


図-10 正負交番載荷 荷重-変位関係

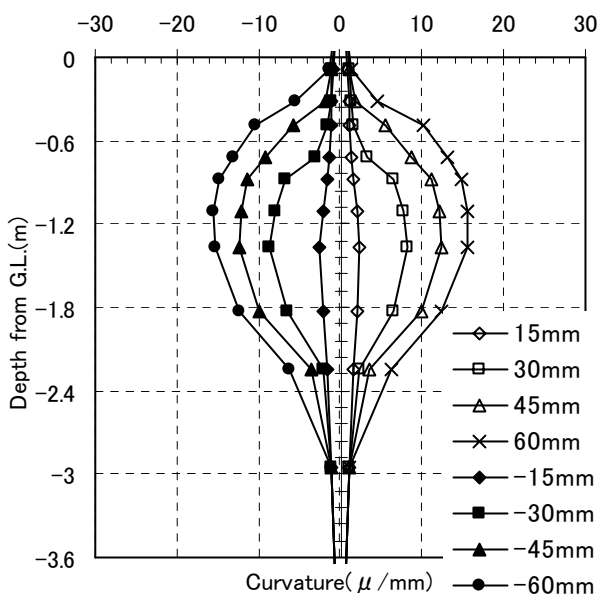


図-11 FB-R 曲率分布

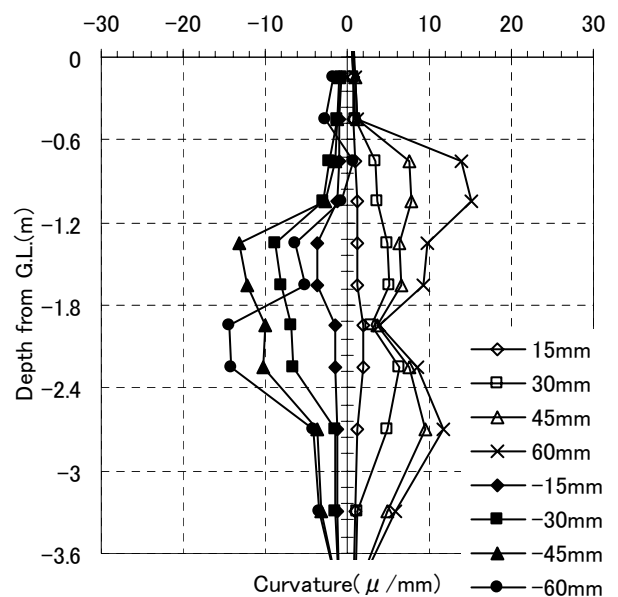


図-12 平滑化された曲率分布

5. 解析結果

5.1 荷重-変位関係

図-9にSL, FB-F, FB-Rの3ケースにおける荷重-変位関係を実験結果と併せて示す。地盤の要素分割幅を細かくしたFB-Fは分割幅の粗いFB-Rと比べて全体を通して荷重が小さく出ていることがわかる。これはFB-Fの分割幅がFB-Rのものに比べて細かいことによって地盤に局所的な塑性化が生じ、地盤反力が低下したことに起因する。また、SLとFB-Rは実験結果と比較して近い値を示していることがわかる。以上のことより、本研究においてSL, FB-Rモデルは比較的良好に実験結果を追跡できていると言える。

次に解析モデルFB-Rを正負交番載荷に適用したケースと実験結果との比較を行った。図-10に示すFB-Rと実験結果の荷重-変位関係を見ると、正負交番載荷においてもFB-Rは全体的によく追跡できていることがわかる。しかし、履歴骨格曲線の形を見ると実験結果はスリップ型であるのに対してFB-Rはやや平行四辺形型に近いことがわかる。これは杭体のモデルに線材モデルを用いた場合、地盤と杭体を完全付着としていることによって、地盤と杭体の間に発生するはずの間隙が発生せず杭体に常に地盤反力がかかっていることによるものと考えられる。

5.2 曲率分布

解析モデル FB-R の正負交番載荷時における曲率分布を図-11 に示す。ここでは FB-R と実験結果の曲率分布について検討を行うが、図-5 で示した実験における曲率分布はひずみが局所化しすぎており凸凹が激しすぎるため解析結果との比較は不適当と判断した。そこでここでは便宜上、連続する 2 つのひずみゲージの計測値の平均をとり、その値をひずみゲージの中間点におけるひずみ値として曲率を算定し、それを実験結果として用いることとした。このようにして平滑化を行った実験における曲率分布を図-12 に示す。なお、どちらのグラフにおいても 3.6m 以深においては曲率がほとんど出ていなかったため、地表面からの深さを 3.6m までとした。図-11 と図-12 比較すると、杭体の変形範囲が 3m 付近までであることと、最大損傷点深さが実験では 1.5m 付近だったのに対して FB-R でも 1.3m 付近であることから、FB-R は杭体のおおまかな変形についてある程度の精度で推定できていると言える。

6.まとめ

本研究では、構造物の全体系動的応答解析法の確立を将来的に見据え、実地盤中に設置された実大杭の水平載荷実験、並びに 3 次元非線形有限要素法解析を行い、解析精度について検討を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) 杭体のモデルとして線材モデルを用い、地盤の分割幅を粗めに設定することによって実大杭における荷重-変位関係にある程度の精度で追跡することができた。ただ杭体と地盤を完全付着にすることにより、正負交番載荷における履歴骨格曲線に違いが生じた。
- (2) 変形範囲、曲率最大点深さをある程度推定できていたことより、実大杭の大まかな変形の予測は可能である。

謝辞：本研究で用いた非線形 FEM プログラム COM3 は東京大学 前川宏一教授の御厚意によりご提供頂きました。ここに記して感謝の意を表します。また、実験を行うに当たり、小寺氏（日本コンクリート工業株式会社）、久保氏、大村氏、後藤氏（共に高脇基礎工事株式会社）、鈴木氏（埼玉大学大学院）にご協力頂いたことを記し、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 牧 剛史, 前川 宏一, 睦好 宏史: 杭部材のモデル化が RC 杭-地盤系の応答性状に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集, vol26, No.2, pp.1027-1032, 2004
- 2) 牧 剛史, 睦好 宏史, 前川 宏一: RC 杭体-地盤相互作用解析における線材モデルの適用性, 土木学会論文集, No.746/V-61, pp57-70, 2003.11
- 3) 岡村 甫, 前川 宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1990
- 4) Ohsaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo (B), Vol.35, No.4, pp.513-536, 1980
- 5) 土屋 智史, 福浦尚之, 前川 宏一: Fiber Model を用いた 3 次元有限要素動的解析における多方向入力を受ける RC 橋脚の応答, JCI「塑性域の繰返し劣化性状」に関するシンポジウム論文集, pp359-368, 1998.8
- 6) 福浦 尚之, 前川 宏一: RC 非線形解析に用いる鉄筋の繰返し履歴モデル, 土木学会論文集, No.564/V-35, pp.291-295, 1997.5.
- 7) An, X., Maekawa, K. and Okamura, H.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Proceeding of JSCE, No.564/V-35, pp297-316, 1997.5.