

# 杭基礎を有するRC橋脚の非線形地震応答解析

孫利民・後藤洋三

正会員 工博 (株)大林組技術研究所 土木第五研究室 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸 4-640)

本論文は杭基礎を有するRC橋脚について質点系の修正 Penzien 型モデルに杭の軸力変動の影響を考慮できるモデルを付加して地盤～杭基礎の相互作用を考慮した非線形地震応答解析を行い、モデル化手法の適用性を検討したものである。結果として、次ぎの結論を得た。①上部橋脚の応答結果は杭部のモデル化手法にあまり影響されず、上部橋脚の耐震性能の評価を主な目的とする解析では、修正 Penzien 型モデルが十分適用できる。②一方、軸力変動の影響を考慮すると杭はより破壊されやすくなるので、軸力変動の影響を考慮しない修正 Penzien 型モデルで検討する場合、杭の耐震性能を過大評価する可能性がある。

Key Words: Nonlinear Analysis, Modified Penzien Model, M-N Interaction

## 1. はじめに

兵庫県南部地震の後、橋梁構造物の耐震設計基準<sup>1,2)</sup>が改定され、動的解析による耐震照査または耐震設計が要求されるようになった。杭基礎を有する橋梁の耐震性能を検討するには、橋脚～杭基礎～地盤により構成される全体系の一体地震応答解析を行い、地盤と杭基礎の相互作用や杭と橋脚の非線形挙動の相互影響などを検討するのが一つの手法である。

動的相互作用の一体解析モデルとしては、FEM モデル以外に、地盤および構造体を質点系に置き換えるモデルがある。後者の一つである修正 Penzien 型モデルは Penzien<sup>3)</sup>によって最初に提案されたモデルが後続の研究者ら<sup>4,7)</sup>によって変更されたものである。このモデルは自由地盤質点系と構造体・杭基礎・周辺地盤質点系およびそれらの相対運動を伝える相互作用バネから構成されている。Penzien モデルでは自由地盤と杭の相対加速度のみに作用するとしていた周辺地盤集約質量を地盤のせん断バネによって結ばれた杭周辺地盤の実体的質量として考え、側方の自由地盤からの相対変位および基盤からの地震動加速度を受けるものとしている。

FEM 系のモデル手法と比べ、質点系の修正 Penzien 型モデルは構造物の非線形現象だけでなく地盤の非線形現象も容易にモデル化でき、計算時間も短いなどの長所がある。一方、周辺地盤集約質量や地盤バネの評価に難があると指摘されている。著者ら<sup>8)</sup>は既に兵庫県南部地震で被災した2つの橋脚の被災解析を修正 Penzien モデルを用いて行っている。その際、周辺集約地盤質量をフーチングと同面積の土柱で設定し、周辺地盤と自由地

盤の間の相互作用バネ値を Mindlin 解により設定した。解析結果は実際の被害とほぼ合致し、橋脚および杭の被災メカニズムを定性的に説明できた。

一方、修正 Penzien モデルでは、複数本の杭を束ねて一本化したはりにモデル化することで、地盤との相互作用バネを比較的簡単に表現しているが、非線形応答での杭の断面力を評価する際、このモデル化手法では軸力

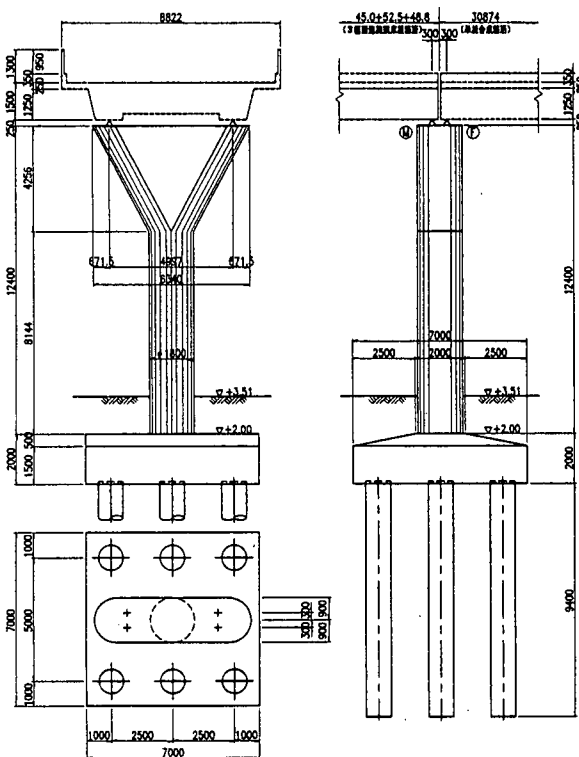


図-1 解析対象橋脚の構造図

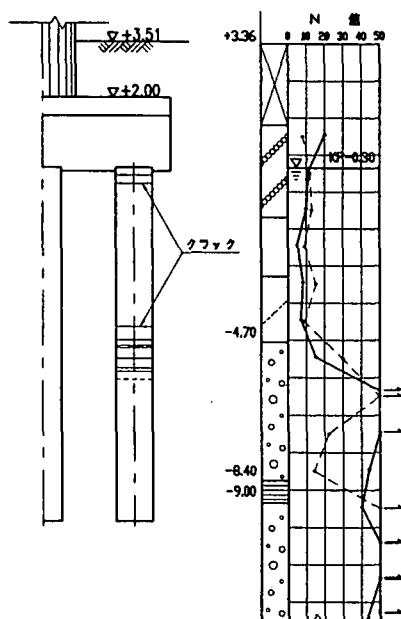


図-2 地盤条件および杭の被害状況

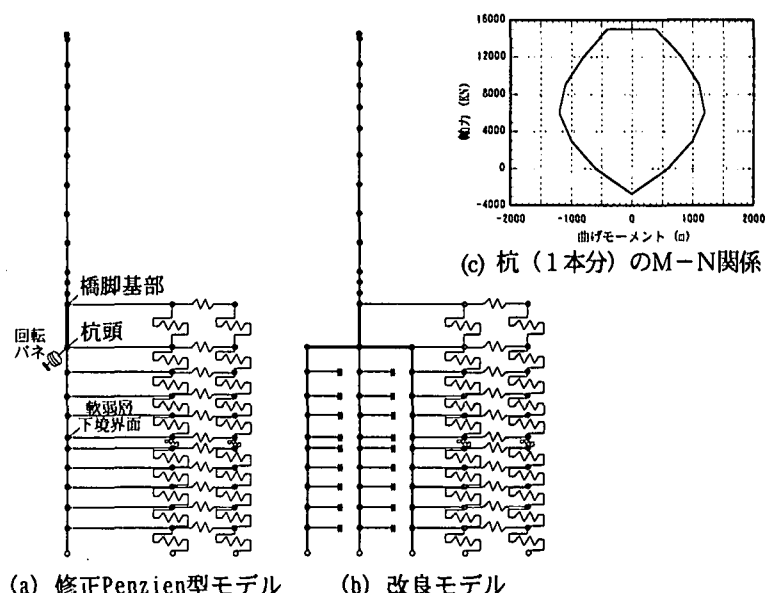


図-3 解析用構造モデル

変動を考慮できない欠点が残っている。そこで、本研究では従来の修正 Penzien 型モデルを改良し、一本化された杭を複数本のはりモデルで置き換えた。さらに、杭には軸力変動を考慮できる非線形曲げ～軸力相関モデルを用い、地震応答解析を行って、改良モデルの適用性および杭の軸力変動の影響を検討した。

## 2. 解析対象およびモデル化

解析対象の橋脚は図-1 に示すような単柱円断面 RC 橋脚で、杭径 1.0m の杭 6 本により支持されている。上部桁の重量は 305t である。地震後の被害調査によれば、目視では橋脚躯体に被害がなかった。図-2 には地盤条件および杭の被害状況を示している。地盤は地表から地下約 9m までは軟弱層で、外側の 1 本の杭のボアホールカメラ調査では、杭頭および軟弱層の下境界面で杭体にひび割れが生じていた。

解析には図-3 に示す 2 つのモデル、即ち、従来の修正 Penzien 型モデルと杭を 3 本にした改良モデルを用いた。修正 Penzien 型モデルでは、杭をモデル化したのは杭 6 本分に相当する断面としている。モデルの詳細については文献 7) を参照されたい。

改良モデルでは、修正 Penzien 型モデルで 1 本化されたはり を 3 本に分割し、それぞれを杭 2 本分に相当するはり材でモデル化した。今回のモデルでは、杭間の相対変形を生じないと仮定し、3 本の杭モデルがそれぞれ周辺集約地盤と水平方向に直結することとした。フーチング部は水平の剛はり でモデル化し、杭との連結は剛結とした。杭の非線形については、軸力変動の影響を考慮できるパイリニア修正 Clough モデルを用いた。周辺地盤、自由地盤の質量、バネおよび減衰定数の設定は修正

Penzien 型モデルと同様に行った。また、修正 Penzien 型モデルでは、杭を 1 本化したため、フーチング底面位置に、両側の杭の垂直抵抗に相当する回転バネを付ける必要があったが、改良モデルでは、それを自然に表現できるため、回転バネは不要になった。

杭の軸力変動を考慮した非線形材料モデルの設定には、図-3(c) ような M-N 相関曲線を用いた。この曲線は杭 1 本の断面配筋から平成 8 年度制定された土木学会コンクリート標準示方書設計編<sup>9)</sup>に基づいて算定したものである。また、計算モデルでは、骨格曲線を決定する際、初期および降伏後の剛性は軸力の影響を受けないものとして、降伏点の曲率を求めた。橋脚の非線形特性には、トリリニア武田モデルを用いた。橋脚の降伏変位は約 14cm である。

地震応答解析に用いた入力地震波は兵庫県南部地震に記録された波形に基づいて、サイト付近の深層地盤構造の影響や表層地盤の特性を考慮して算出した杭先端層の推定地震波である<sup>10)</sup> (図-4)。

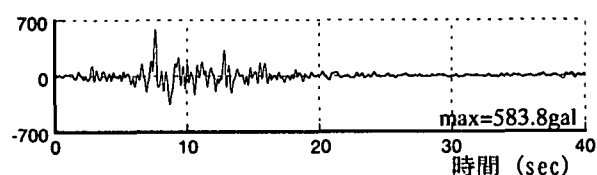


図-4 入力地震動

## 3. 解析結果の考察

2 つのモデルの固有値解析結果を図-5 に示す。両モデルの 1 次および 2 次固有周期がほぼ同じであることを確認した。1 次モードは橋脚の 1 次モードが反映していて、2 次モードは地盤の 1 次モードが反映している。地

盤の一次固有周期が約 0.6sec であることから、道路橋示方書<sup>1)</sup>の基準によれば、地盤はⅢ種地盤に分類される。

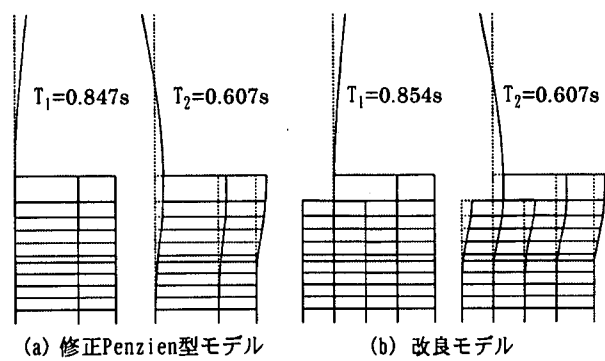


図-5 固有値解析結果

地震応答解析結果の最大値を図-6 に示す。両モデルの計算結果では、橋脚の最大応答変位、加速度および断面モーメントがほぼ同じであることが分かる。この結果から、今回の解析例（橋脚固有周期約 0.85sec、Ⅲ種地盤）では、杭のモデル化手法の違いによる上部橋脚の応答への影響は少ないと言えよう。しかし、杭の断面力に大きな差があった。杭頭部では、改良モデルの中杭の 1 本当たりの最大モーメントは修正 Penzien 型モデルとほぼ同じであるが、外杭の最大モーメントは約 2 割程度大きいことが分かる。また、杭中部の軟弱層の境界面でも、改良モデルのモーメントは修正 Penzien 型モデルのより大きくなっている。

図-7 は改良モデルの両側の外杭の杭頭軸力変動を示したものである。杭（2 本杭相当）の初期軸力は 2200KN で、軸力の変動幅は約±4000KN である。地震中、引

張軸力が生じるが、杭の引張耐力を越えていない。図-3(c)によれば、この軸力の変動幅に応じて、杭の降伏モーメントは約±40%を変動する。なお、改良モデルを用いた解析では、まず自重解析より初期軸力を求め、それを初期値として動的解析を行っている。

図-8 では、杭頭と杭中部（軟弱層の境界面位置）の杭断面のモーメント～曲率履歴を示している。修正 Penzien 型モデルや改良モデルの中杭の場合は軸力変動を考慮しないあるいはその影響を受けないため、曲げ降伏モーメントがほぼ一定となっているのに対し、改良モデルの外杭では、軸力変動の影響で曲げ降伏モーメントが変動していることを確認できる。また、軸力変動の影響を考慮した改良モデルでは、杭頭の曲げ曲率は修正 Penzien 型モデルとほぼ同じであるが、杭中部は約 5 割大きいことが分かる。この結果から、修正 Penzien 型モデルは、杭の被害を過小評価する可能性があると考えられる。

図-9 は改良モデルの杭軸力とモーメント関係を示したものである。杭の軸力が減少すれば、曲げ降伏モーメントが低減され、杭が破壊されやすくなることが分かる。

#### 4. まとめ

本研究では、修正 Penzien 型モデルと、同モデルでは 1 本化されている杭を複数本の杭に置き換えた改良モデルを用いて杭基礎を有する橋脚の地震応答解析を行い、モデルの適用性を検討した。

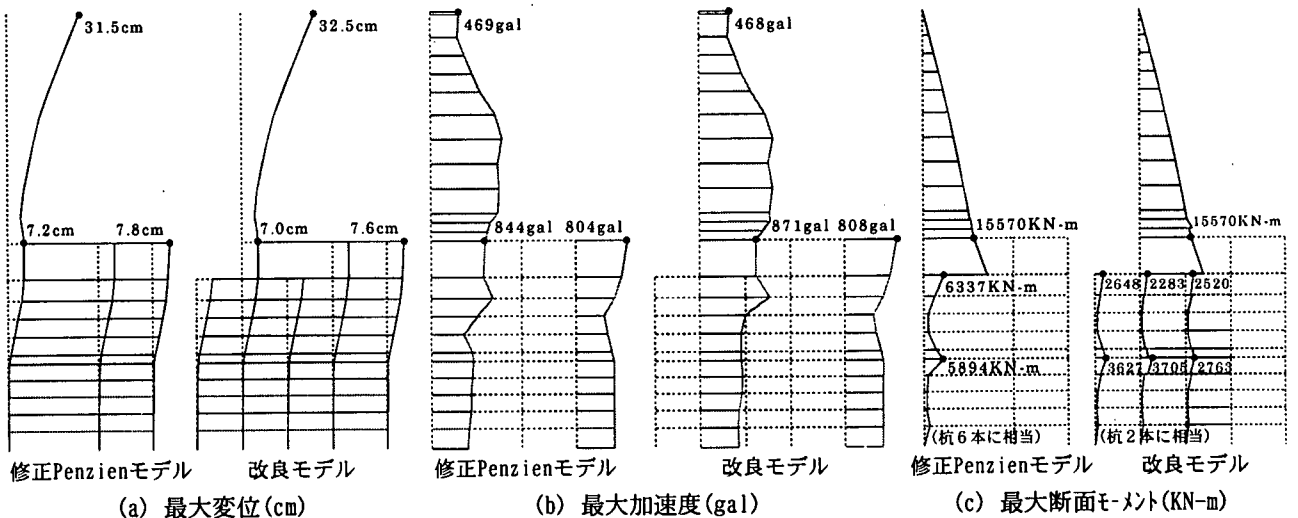


図-6 地震応答解析結果の最大値

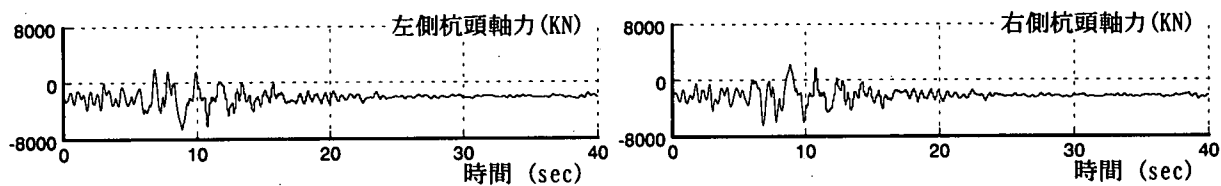


図-7 改良モデルの杭頭軸力変動（杭 2 本に相当）

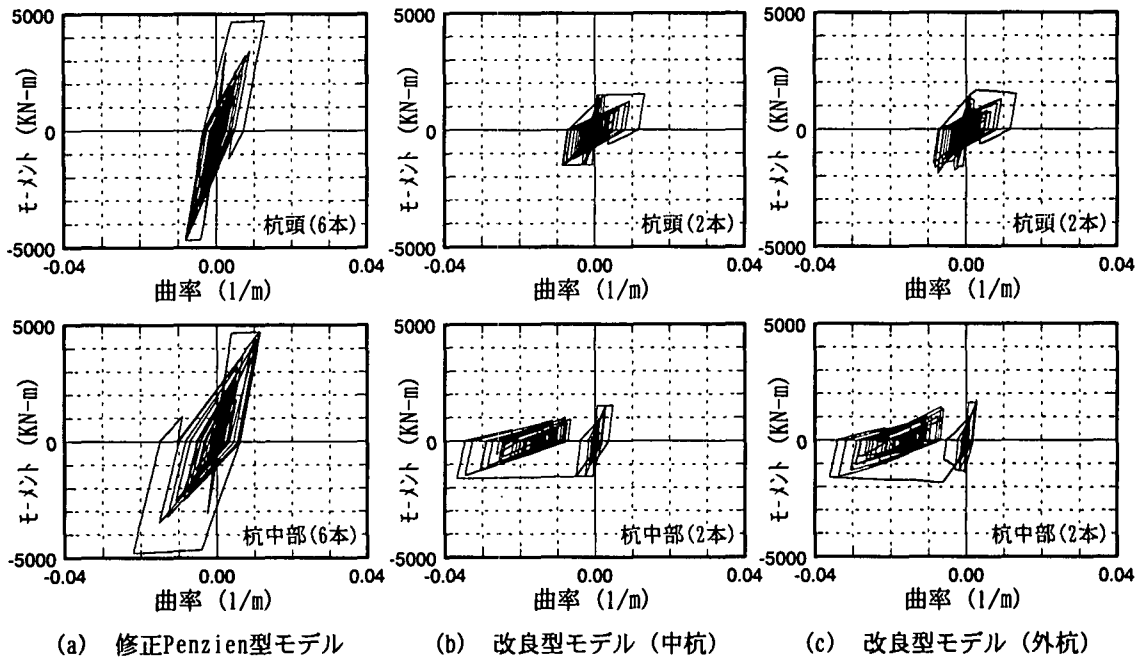


図-8 杭頭と杭中部のモーメント～曲率履歴

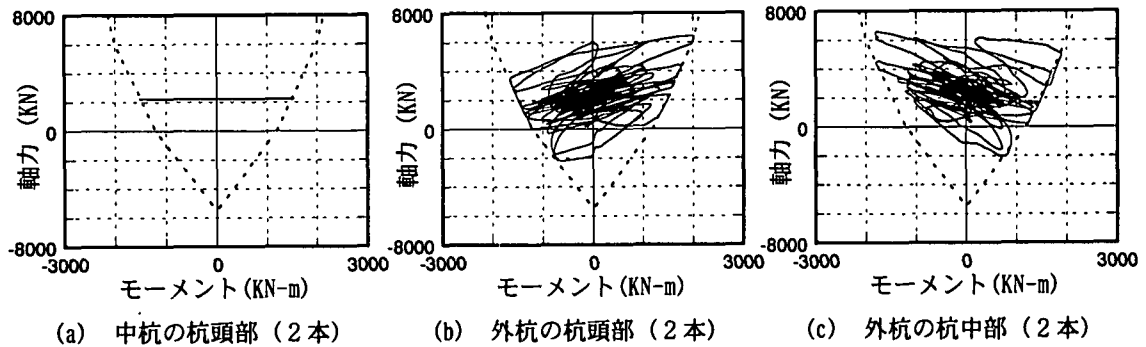


図-9 改良モデルの杭のM-N相関関係

上部橋脚の応答結果は杭部のモデル化手法にあまり影響されず、上部橋脚の耐震性能の評価を主な目的とする解析では、修正 Penzien 型モデルが十分適用できると言える。

一方、杭基礎の断面力については2つのモデルの解析結果に差があった。改良モデルの場合、杭を複数本のはりでモデル化したため、杭の軸力の変動を考慮することが可能となり、杭はより破壊されやすい結果となった。修正 Penzien 型モデルで杭の耐震性を検討する場合、杭基礎耐力の過大評価になる（言い換えれば、被災解析の場合は、被災状況を過小評価する）と考えられる。

今回のモデルでは、杭間の相互影響を考慮しておらず、今後さらに検討する必要がある。

#### 参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書 V耐震設計編，平成8年。
- 2) 矢部正明：地震時保有水平耐力法による橋脚・杭基礎系の耐震設計に関する研究，東京工業大学博士論文，平成11年3月。
- 3) Penzien, J., Scheffey, C. F., and Parmelee, R. A.:

Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, ASCE, Vol.90, No. EM3, pp223-254, June, 1964.

- 4) 河村壮一：埋立軟着地盤に建つ杭支持建物の地震動観測と解析（その7）Penzien 型モデルと集約型モデル，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp415-416，昭和50年10月。
- 5) （社）日本建築学会：構造物と地盤の動的相互作用シンポジウム，第1回/1985年4月，第2回/1989年9月。
- 6) 三輪滋，森伸一郎：Mindlin-II 解を用いた群杭基礎の相互作用バネの簡易評価式に関する検討，第27回土質工学研究発表会，pp1051-1054，平成4年6月。
- 7) （社）建築研究振興協会：「大都市地域における地震防災技術の開発」報告書，平成7年3月。
- 8) 孫利民，伊藤政人，田坂幹雄，後藤洋三：質点系モデルを用いた被災橋脚の非線形地震応答解析，第10回日本地震工学シンポジウム，平成10年11月。
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 設計編，平成8年。
- 10) 藤森健史ら：1995年兵庫県南部地震における三宮断面の地震動評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，1997年9月。