

地盤－基礎との連成を考慮した 橋脚の動的応答解析

高橋 祐治¹・砂坂 善雄²・塩崎 信久²・大野 晋也²
後藤 洋三³・孫 利民³・斉藤 悦郎⁴・岸下 崇裕⁵

¹正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

²正会員 工修 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)

³正会員 工博 株式会社大林組 技術研究所 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

⁴正会員 工博 株式会社フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

⁵正会員 工修 株式会社フジタ 技術研究所 (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

The objective of this study is to clarify seismic responses of bridge-soil system that consists of superstructure, pier, foundation, and surrounding ground by analytical method. In this paper, a supposed bridge-soil system is modeled using two numerical models, two-dimensional finite element model and lumped masses model. The analytical results show that stresses of the piles by two-dimensional finite element model are as much as those by lumped masses model and that stresses of the piles are large at pile-head and at the boundary of soil layer.

Key Words : bridge foundation, two-dimensional finite element model, lumped masses model, dynamic-response analysis

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震では多くの橋梁に被害が生じた。その後、橋脚の補強はより高い靱性を与えることを主眼として、外部に鋼板や炭素繊維を巻き付ける方法によって行われてきている。このような方法により補強された橋脚の強度増加や靱性増加については部材模型などによる実験が行われてきたが、地盤、基礎、上部工を含む構造系全体としての挙動や補強効果については十分に確認されていないのが実状である。

本研究では、地盤、基礎、橋脚および上部工を含む構造系全体としての挙動を解析的に解明し、橋梁設計の合理化、経済性の向上、さらには既設橋梁の最適な補強方法の開発に資する基礎資料を得ることを目標として解析的検討を行う。

2. 研究目的

本研究の最終目標は、小林、田村が実施するハイブリッド実験¹⁾を補完して、橋梁設計の合理化、経済性の向上、さらには既設橋梁の最適な補強方法の開発に資する基礎資料を得ることである。

構造系全体の解析は、a)杭、橋脚をビーム要素、

地盤をソリッド要素にモデル化する二次元有限要素法(以下二次元FEMモデルと呼ぶ)、b)杭基礎を一本の曲げせん断棒に置換し、地盤との相互作用ばねを取り付けた質点系にモデル化するフレーム解析(以下多質点系モデルと呼ぶ)の二通りの手法により行う。なお、本研究で解析対象とした橋脚は、小林、田村が実施したハイブリッド実験で対象とした橋脚と同様である。

本研究では、以下の検討を予定している。

①実験と解析の比較

実験結果と解析結果とを比較し、解析手法の妥当性を検証する。

②模型側方境界のモデル化による影響の検討

実構造物では、地盤は無限の広がりをも有しており、解析においてもエネルギー伝達境界等を用いることにより、無限の広がりをモデル化している。ところが、実験では振動台の大きさの制約からせん断土槽を用いて行うため、地盤の広がりには有限であり、境界はせん断土槽となる。このような境界条件が異なる影響を解析により把握する。

③実構造物と模型の比較

実構造物、模型の解析結果を比較し、結果の差異の有無、差異の原因(相似則、境界条件等の妥当性)について考察する。

④模型の解析に用いる実地震波のスケーリング方法

の比較

模型では構造物や地盤の卓越周期が実構造物のそれらと異なるため、実地震波を用いる場合には時間軸についてもスケーリングを行う必要がある。スケーリングの方法として、1) 構造物の1次固有周期に着目して時間をスケーリング、2) 地盤の1次固有周期に着目して時間をスケーリングの2通りを考え、解析結果の差異を把握するとともに、実験における地震波のスケーリング方法について考察する。

⑤解析手法の比較

多質点系モデルとFEMモデルの解析手法の違いによる解析結果の差異を把握し、それぞれの解析手法の特徴および破壊過程をシミュレーションするのに適した手法について考察する。

本論文では、これら研究目的に対する解析的検討の中間報告を行う。

3. 対象構造物および地盤

本論文で報告する解析検討の対象とする構造物は、文献1)「地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験」に示される実橋梁のP2橋脚である。図-1に橋脚-基礎の形状と地盤構成および地盤物性を示す。

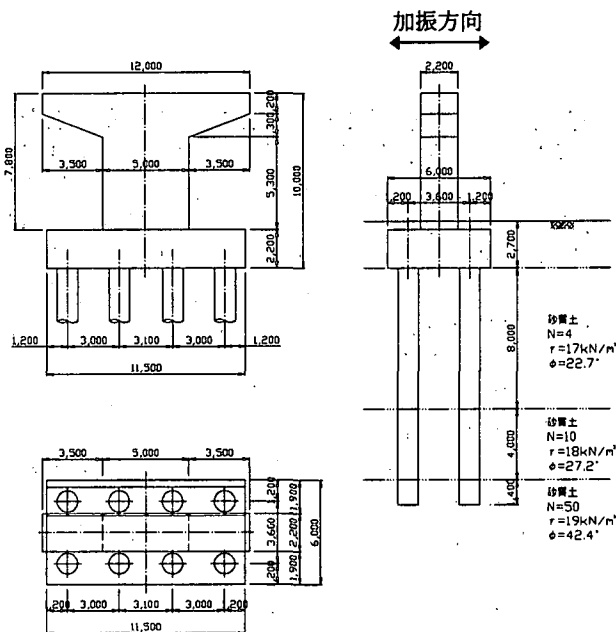


図-1 対象構造物および地盤

4. 解析方法

(1) 二次元FEMモデル

二次元FEMによる解析は、解析コードSuper-FLUSH²⁾を用いて行う。図-2に二次元FEMモデルの解析モデル図を示す。

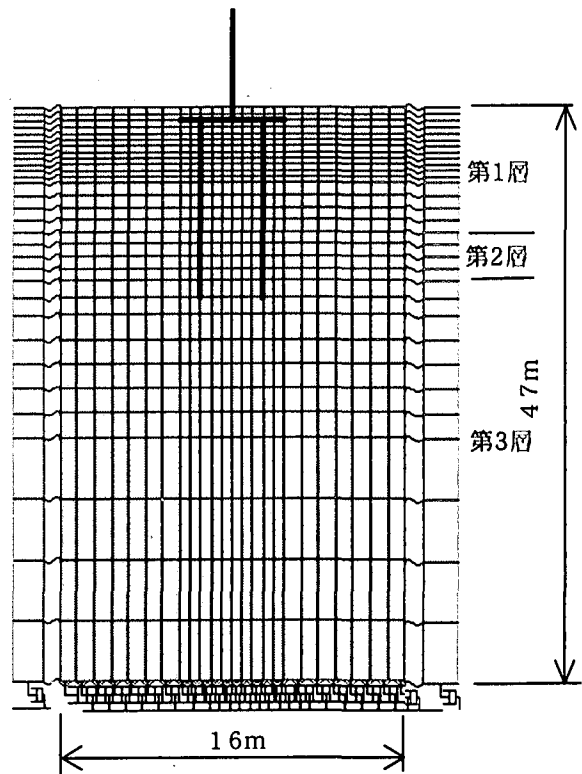


図-2 二次元FEMモデル

杭および橋脚を線形のビーム要素、地盤をソリッド要素にそれぞれモデル化し、地盤の第1層と第2層は等価線形剛性を用いている。支承部は、ゴム支承の弾性剛性を並進ばね要素により与えている。

地盤部は水平方向に16m、鉛直方向に4.7mの範囲をモデル化し、側方にはエネルギー伝達境界を底面には粘性境界をそれぞれ設ける。水平方向の長さは、実験で使用しているせん断土槽の内径4mをスケールアップした長さである。鉛直方向の長さは、杭下端から底面境界までの長さを杭長の約2倍となるようにした長さである。奥行き方向については、フーチングの奥行き幅11.5m当たりの物性を単位奥行き長さ当たりに換算して与えている。

(2) 多質点系モデル

本解析で用いる杭基礎の質点系モデルは、群杭を1本の多質点曲げせん断棒にモデル化し、各質点に相互作用ばねを取り付けたモデルである。図-3に多質点系モデルの解析モデル図を示す。

質点系モデルの地震応答は、自由地盤系の地震応答解析(本論文では次元波動理論を用いた解析プログラムSHAKE)から得られた各質点深さでの変位応答波形を、相互作用ばねを介して入力することにより時刻歴応答解析を行う。

相互作用ばねは、地震応答による自由地盤でのせん断ひずみに依存した非線形性が杭位置地盤でも同様に生じるものとして、自由地盤の解析から得られた各深さレベルの有効せん断ひずみ(0.65 γ_{max})に相当するせん断剛性をもつ等価剛性地盤のばね定

数を算定する。さらに、この相互作用ばねに杭と地盤との相対変位により生じる非線形性による影響を考慮する。

複数本の杭の相互作用ばねを評価するには、群杭効果を考慮する必要がある。相互作用ばね定数は、3次元薄層要素法によるリング加振解により求められる群杭全体の相互作用ばねを縮約して求める³⁾。

相互作用ばねの非線形特性としては、杭-地盤間の相対変位と地盤反力の関係に、図-4に示すMasing則に従うHardin-Drnevichモデルを用いる。水平地盤ばね K_a の極限地盤反力は、砂質土に対してはBromsによる(1)式に示す値を用いる。また、杭周地盤の非線形化が進むと地盤線形時に比べて群杭効果は小さくなり、群杭1本当たりの杭頭反力は単杭に近づくことが指摘されており、群杭の極限地盤反力 $P_a^i \max$ として単杭の極限地盤反力に杭本数を乗じた値を用いることにする。

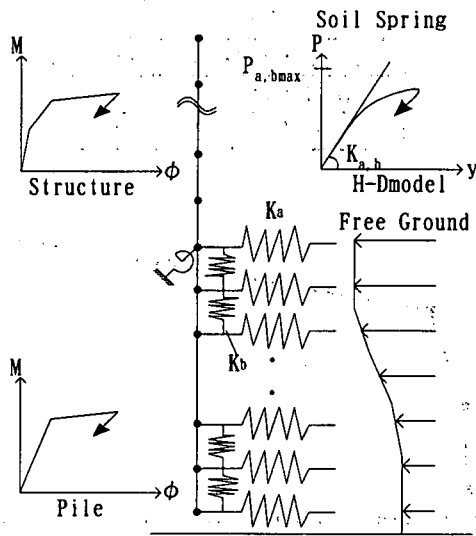


図-3 多質点系モデル

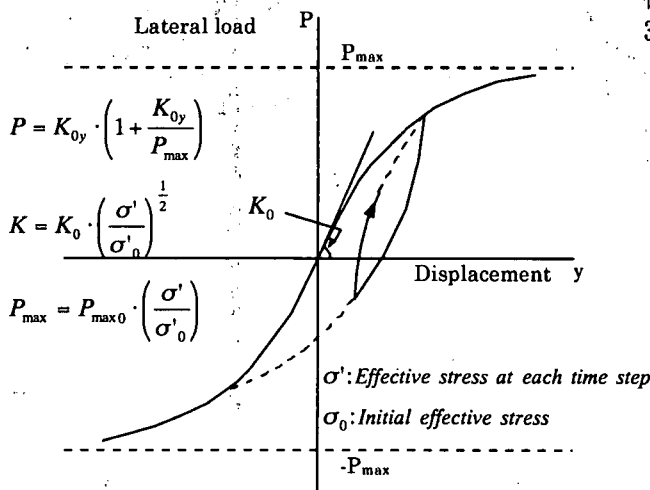


図-4 相互作用ばねの非線形特性

$$P_a^i \max = 3 \cdot \sigma_0 \cdot K_p \cdot D \cdot l \cdot n \quad (\text{砂質土}) \quad (1)$$

ここに、 σ_0 : i 節点における初期鉛直有効応力

K_p : 受働土圧係数

$$= (1 + \sin \phi') / (1 - \sin \phi')$$

D : 杭の直径

l : i 節点の質点重量に相当する杭長

n : 杭本数

ϕ' : 有効内部摩擦角

せん断地盤ばね K_b の極限地盤反力 $P_b^i \max$ は、地盤のせん断強度 τ_f に(2)式から求められる等価な支配領域 S を掛け合わせた(3)式とする。

$$K_b = G \cdot S / l \quad (2)$$

$$P_b^i \max = \tau_f \cdot S = \tau_f \cdot K_b \cdot l / G \quad (3)$$

ここに、 G : 等価せん断剛性

l : 杭質点間距離

杭頭位置の回転ばねは、杭先端固定時の杭の軸剛性から回転ばね定数を求め、線形とする。

5. 解析条件

(1) 入力地震動

道路橋示方書⁴⁾に規定される標準加速度応答スペクトルに近い特性を有するよう、既往の強振記録を振動数領域で振幅調整した加速度波形を用いることとし、文献⁵⁾に示される標準地震波より選定する。ただし、同文献に示される道路橋示方書に準拠した波形は、耐震設計上の地盤面で規定されるものであり、基盤面の上の堆積層の影響が含まれている。そこで本検討においては、道路橋示方書のI種地盤が地盤応答解析で想定している工学的基盤であると考え、図-5に示すタイプIIの標準波II-I-1(修正神戸海洋気象台NS)を基盤に2E入力する。基盤は第3層(N値50)とする。

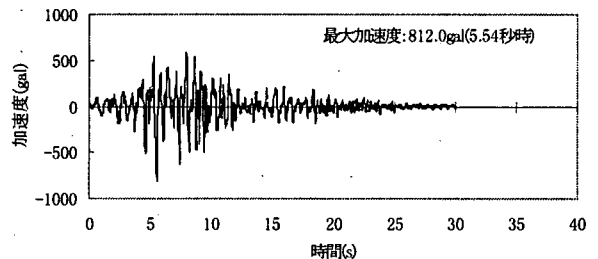


図-5 入力地震波形

入力する地震レベルは最大加速度の大きさを表-1に示す3種類として、振幅調整を行って入力する。

表-1 入力地震動レベル

| 入力地震動 | 最大加速度レベル (2E) |
|-------|------------------|
| レベルs | 40.6 Gal |
| レベルm | 406 Gal |
| レベルl | 812 Gal |

(2) 動的物性値

地盤の初期のせん断剛性は、(4)式によって算定する。

$$G_0 = \frac{\gamma_i V_s^2}{g} \quad (4)$$

ここに、 G_0 : 地盤のせん断剛性 (kN/m²)

γ_i : 地盤の単位体積重量 (kN/m³)

V_s : 地盤のせん断弾性波速度 (m/s)

(= $80 N_i^{1/3}$)

g : 重力加速度 (=9.8m/s²)

N_i : 地層 i における地盤のN値

地盤の動的特性は拘束圧に依存した関係式を用いる⁶⁾。

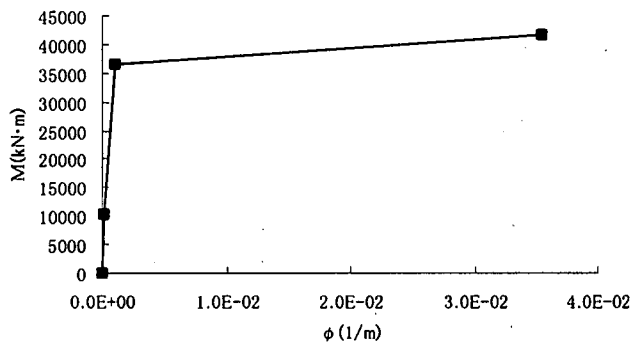
橋脚および杭の部材については、全断面有効の線

形剛性を用いる。

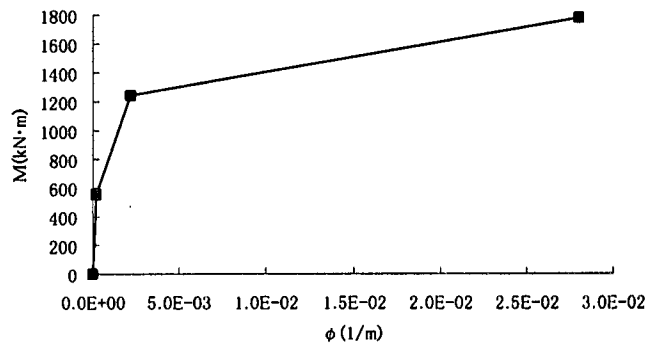
また、多質点系モデルについては、橋脚・杭の曲げ非線形性を考慮した解析も行う。橋脚および杭の曲げ非線形性は、ひび割れ-降伏-終局を結ぶトリリニアの曲げモーメントM-曲率φの関係を用いる。曲げモーメントM-曲率φ関係は死荷重時の軸力を考慮し、コンクリートの応力ひずみ関係は、横拘束筋の拘束効果を考慮した道路橋示方書に示される式を用いて算定する。図-6に橋脚下端および杭頭部の非線形性を示す。なお、復元力の履歴特性は武藤モデルを用いる。減衰定数は道路橋示方書に示される値を参考に表-2のように設定する。地震応答解析に先立ち、以上のように設定したモデルを用いて固有値解析を行った。減衰は内部粘性減衰として、構造物が大きく変形するモードである二次の固有周期に対して与えた。

表-2 減衰定数

| | 減衰定数 |
|--------|------|
| 上部工・支承 | 2% |
| 橋脚・杭 | 5% |
| 地盤 | 3% |



(1) 橋脚



(2) 杭

図-6 橋脚および杭の非線形性

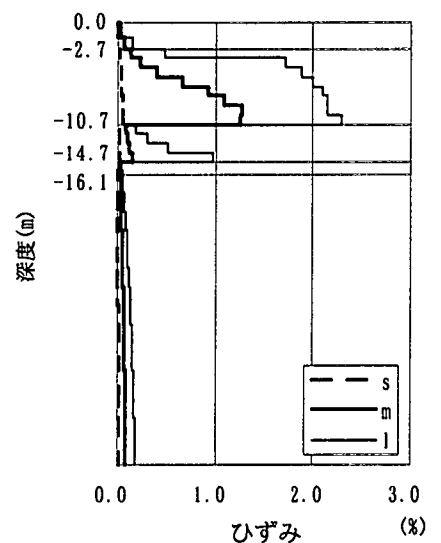
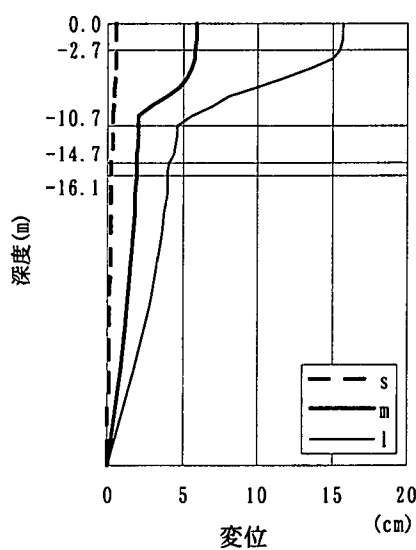
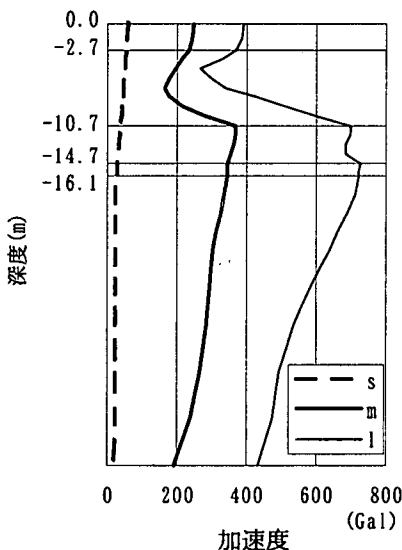


図-7 自由地盤の最大応答値

6. 解析結果

(1) 自由地盤の応答

自由地盤の最大応答値の結果を図-7に示す。GL-10.7mの層境でひずみが増加し地盤の変形が大きくなっており、入力地震動レベルが大きくなるに従ってその傾向は顕著となっている。また入力地震動レベルmおよび1では、GL-10.7m付近で地盤のひずみが大きくなり剛性が著しく低下したことによって、GL-10.7m以浅では地表面方向に向かって応答加速度が減少する結果となった。

(2) 構造物を線形要素とした応答解析

橋脚・杭の部材を全断面有効剛性の線形要素とし、

二次元FEMモデルおよび多質点系モデルを用いて地震応答解析を行った。図-8, 9は入力地震動レベルをパラメータとして杭に発生する最大曲げモーメントおよび最大せん断力の分布を二次元FEMモデルと多質点系モデルで比較したものである。両者は入力地震動レベルが大きい場合には比較的よく一致したが、入力地震動レベルが小さい場合には多質点系モデルの方がFEMモデルに比べて大きくなった。これについては、実験結果との比較検討を行い、解析モデルおよび解析手法の妥当性を検証していく予定である。特に二次元FEM解析の奥行き方向のモデル化については検討の必要があると思われる。

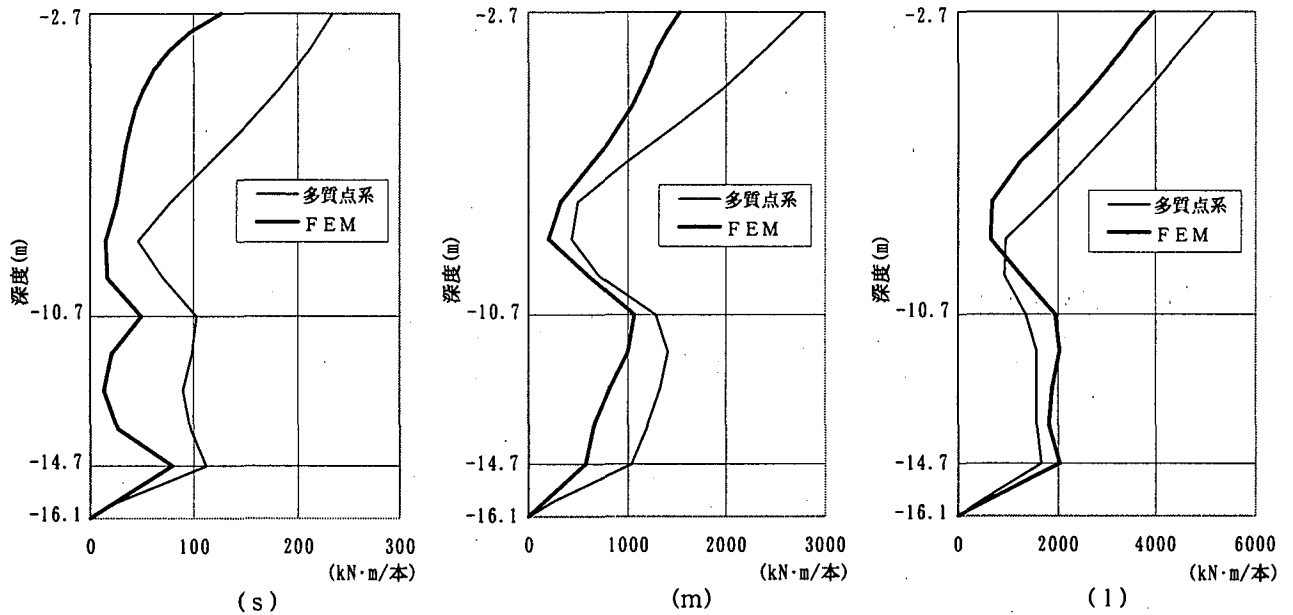


図-8 最大曲げモーメント分布

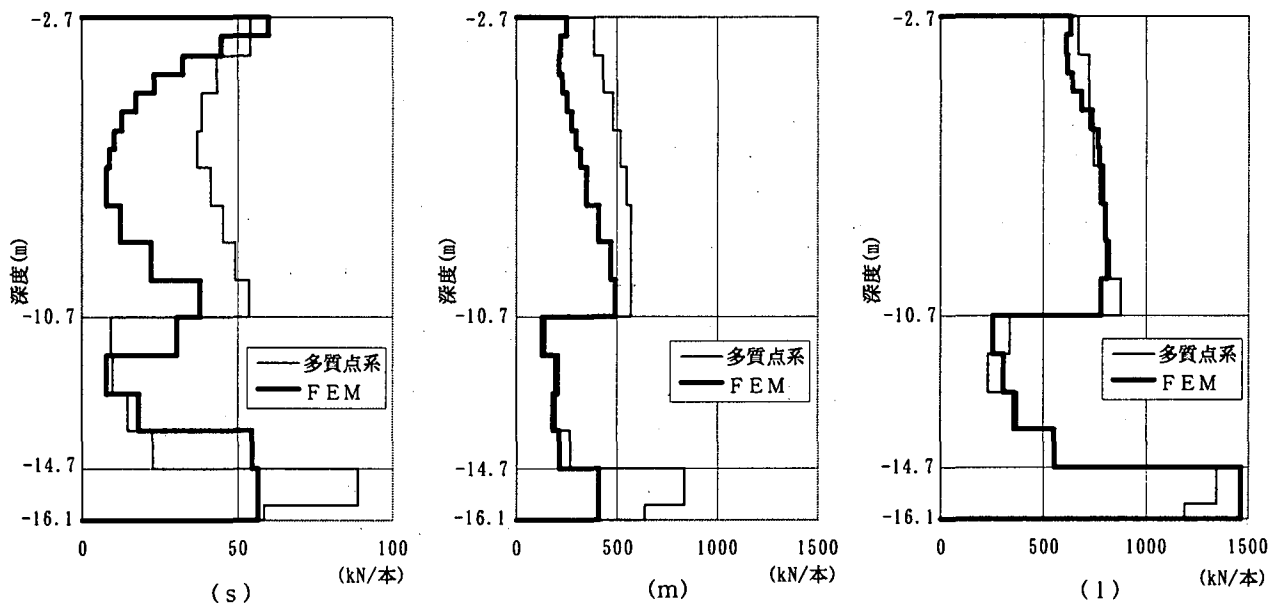


図-9 最大せん断力分布

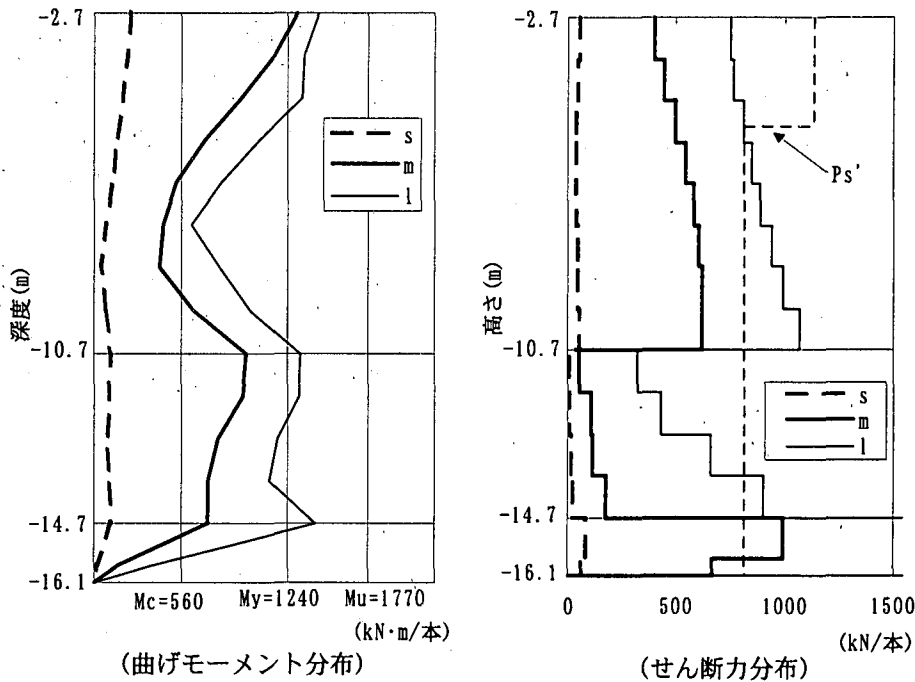


図-10 最大断面力分布

(3) 構造物を非線形要素とした応答解析

橋脚および杭の部材の非線形性を考慮した多質点系モデルを用いて地震応答解析を行った。杭に発生する最大発生断面力分布を図-10に示す。

曲げモーメントについては、入力地震動レベルmの時に杭頭部で、入力地震動レベルlの時に杭頭部とGL-10.7m, GL-14.7mの層境でそれぞれ降伏曲げモーメントを超える結果となった。せん断力については入力地震動レベルmの時にGL-14.7mの層境で、入力地震動レベルlの時にGL-10.7m, GL-14.7mの層境で、それぞれせん断耐力を超える応答を示した。

7. まとめと今後の課題

研究目的に対する第一段階として実構造物を対象とし、地盤と基礎との連成を考慮した二次元FEMモデルおよび多質点系モデルにより地震応答解析を行った。構造物を全断面有効剛性の線形要素とした二次元FEMモデルと多質点系モデルの解析を比較すると、入力地震動レベルが大きい場合には杭に発生する断面力は比較的良好に一致する結果を示した。また、構造物を非線形要素とした多質点系モデルの解析では、入力地震動レベルが大きい場合に、地盤物性の変化する層境で断面力が大きくなることが分かった。

今後は、解析的検討に加えて実験結果との比較検討を行っていく予定である。

謝辞：本研究は、平成11年度科学技術振興調整費「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」の一環として実施したものである。(社)土木学会技術推進機構に設置された「構造物の破壊過程解明に基づく生活基盤の地震防災性向上に関する研究」第3分科会第3班において貴重な意見を賜った。また、解析を行うに当たっては、鹿島小堀研究室の宮本裕司主管研究員、酒向裕司主任研究員に御尽力を賜った。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 小林寛ほか：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験、第1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、平成12年3月
- 2) Lysmer, J., Udaka, T., Tsai, C.F. and Seed, H.B., FLUSH, A Computer Program for Approximate 3-D Analysis of Soil-Structure Interaction Problems, EERC Report, No.75-30, Nov.1975
- 3) 宮本裕司ほか：非線形、液状化地盤における杭基礎の地震応答性状に関する研究、日本建築学会構造系論文報告集、第471号、pp.41~50、1995年5月
- 4) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、平成8年12月
- 5) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、平成9年3月
- 6) 建設省土木研究所地震防災部振動研究室：地盤の地震時応答特性の数値解析法—SHAKE: DESRA—、昭和57年2月