

地盤－基礎との連成を考慮した 橋脚の非線形動的解析

高原 秀夫¹・高橋 祐治²・砂坂 善雄¹・大野 晋也³
齊藤 悦郎⁴・岸下 崇裕⁵

¹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)

²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)

³正会員 工修 鹿島建設株式会社 横浜支店 (〒231-0011 神奈川県横浜市太田町4-51)

⁴正会員 工博 株式会社フジタ 技術センター (〒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 技術センター (〒243-0125 神奈川県厚木市小野2025-1)

In this paper, in order to evaluate the dynamic behavior of bridge systems, we conduct the seismic response analysis for soil-structure system, whose structure consists of foundation, pier and superstructure. The analysis was performed applying two different models: two-dimensional finite element model and lumped masses model. The result showed that there was a slight difference between the two models particularly for a large ground motion, and that plastic hinge of pile didn't improve dynamic behavior of the bridge well enough to prevent damage to piles.

Key Words : bridge foundation, soil-structure system, numerical analysis, lumped masses model, two-dimensional finite element model

1. はじめに

橋脚の補強工法には、断面の耐力を増加させる工法、より高い靱性を与える工法等が提案されている。このような工法は、補強された橋脚の部材模型などによる実験により、強度増加や靱性増加について有効性が確認されてきた。しかし、地盤、基礎、上部構造を含む構造系全体としての挙動を踏まえた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、橋脚および上部構造を含む構造系全体としての挙動を解明し、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いる。

2. 研究目的

本研究の最終目標は、土木研究所で実施されているハイブリッド振動実験^{1),2)}を補完して、構造全体系としての地震時の挙動を解析により解明し、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である。

構造系全体の地震応答解析は、a) 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モデルによるフレーム解析(以下多質点系モデルと呼ぶ)、b) 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解析(以下二次元FEMモデルと呼ぶ)の二通りの手法により行う。

なお、解析対象とした橋脚は、前述のハイブリッド振動実験²⁾で対象とした橋脚と同様なものである。本報では以下の検討を実施した。

①解析手法の比較

多質点系モデルと二次元FEMモデルの解析手法の差異を把握し、構造全体系の解析での有効性を検討する。

②橋脚の補強の有無による挙動の相違の検討

橋脚部の塑性ヒンジの有無が、杭の損傷に与える影響、および構造系全体の応答性状に与える影響を検討する。

3. 検討条件

(1) 検討対象構造物および地盤

検討の対象とする構造物は、文献²⁾に示される橋梁の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。

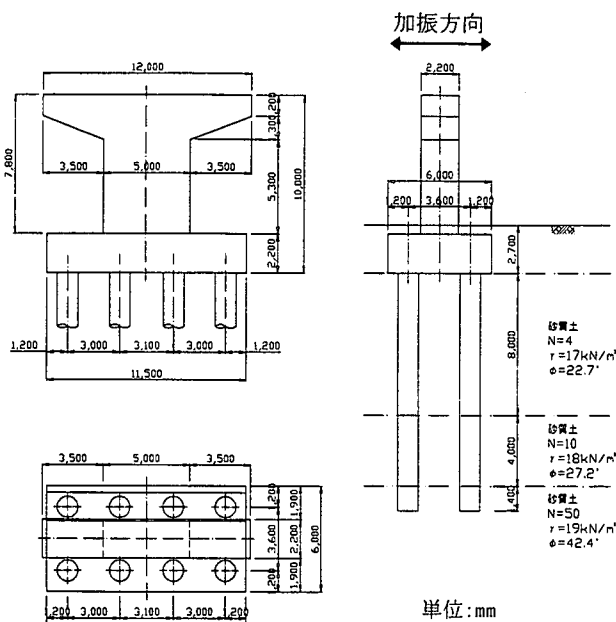


図-1 対象構造物および地盤

地盤条件として、図-1に示す地盤を地盤A、第1層 (N=4)、および第2層 (N=10) のN値を3倍とした地盤を地盤Bとした2種類を想定した。

(2) 構造物の非線形特性

橋脚、杭には、常時軸力に基づくトリリニアなM-φ関係を設定し、紡錘型の履歴特性を考慮する。橋脚は、昭和47年道路橋耐震設計指針・同解説³⁾に準拠して設計された橋脚（補強前）と、これと比較するため、平成8年に改定された道路橋示方書⁴⁾に基づき設計した橋脚（補強後）の2種類を想定した。なお、補強前の橋脚では、橋脚基部から2mの位置に段落しを設けている。補強後の橋脚は、これまでの研究⁵⁾で想定していたものと同じである。

橋脚、および杭のM-φ関係を図-2,3に示す。

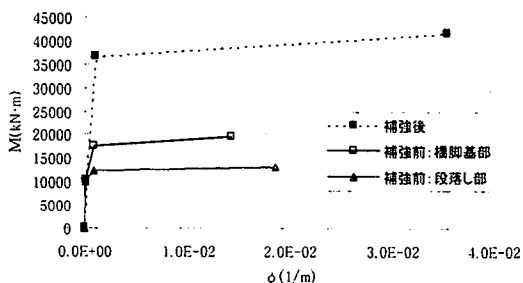


図-2 橋脚のM-φ関係

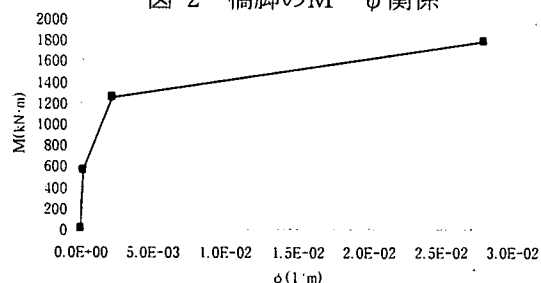


図-3 杭のM-φ関係

(3) 地盤の動的変形特性

地盤の初期のせん断剛性は、(1)式によって算定し、動的変形特性は拘束圧に依存した関係式⁶⁾を用いる。

$$G_0 = \frac{\gamma_i V_s^2}{g} \quad (1)$$

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

(4) 入力地震動

工学基盤として第3層 (N=50) を想定する。道路橋示方書に規定されるI種地盤が、地震応答解析で想定する工学基盤と考え、図-4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として入力する。

地震動レベルとして表-1に示す2ケースを想定し、振幅を調整して入力する。

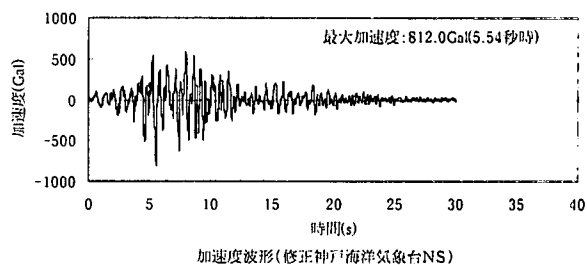


図-4 入力地震波形

表-1 入力地震動レベル

地震動レベル	最大加速度レベル (2E)
レベルm	406 Gal
レベルl	812 Gal

(5) 検討ケース

検討ケースの一覧を表-2に示す。

表-2 検討ケース一覧

ケース No	橋脚の条件	地盤条件	地震動レベル
CASE1	補強前	地盤A	レベルm
CASE2	補強前	地盤A	レベルl
CASE3	補強後	地盤A	レベルl
CASE4	補強前	地盤B	レベルl
CASE5	補強後	地盤B	レベルl

4. 解析手法

(1) 多質点系モデル

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-5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解析は、自由地盤系の地震応答解析（本論文ではSHAKEを使用）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行う。相互作用ばねの値は文献7),8)に示す方法で設定した。

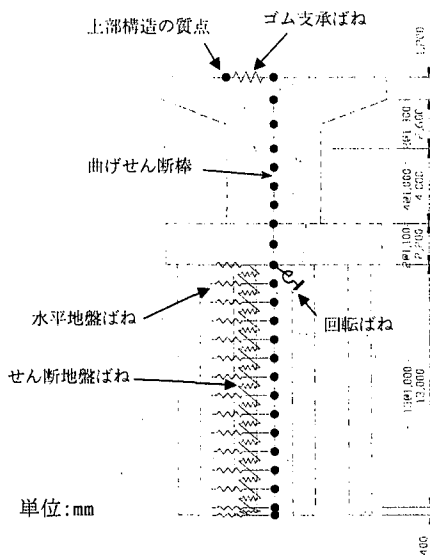


図-5 多質点系モデル

(2) 二次元FEMモデル

二次元FEMモデルは、解析幅をフーチング奥行き幅とした平面ひずみ条件で、地盤をソリッド要素、橋脚、杭、フーチングをビーム要素でモデル化した。地盤には修正R-0モデルに基づく非線形特性を考慮した。修正R-0モデルの定数は、3.解析条件で規定した動的変形特性を基に設定した。

解析領域は、杭基礎の応答に境界条件が影響しないよう留意し、モデル幅を150m、モデル深さを40mとした。境界条件は、側方境界、底部境界ともに粘性境界を用いた。

なお、入力地震動はGL-14.7mで規定しているため、これをGL-40mまで引き戻し、底部粘性境界を介して2E入力した。モデル図を図-6示す。

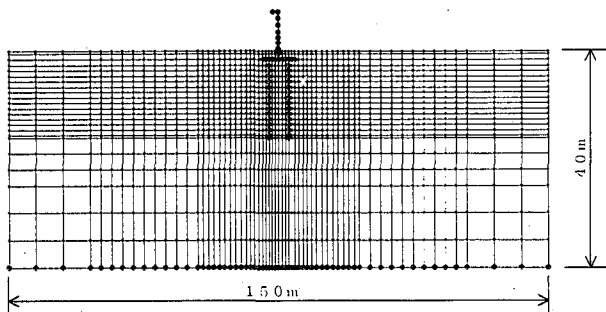


図-6 二次元FEMモデル

5. 解析手法の比較検討結果

解析手法の比較検討は、CASE1,2を対象に行った。杭の最大断面力の比較結果を図-7,8に、杭頭のM-φ履歴ループの比較を図-9,10に示す。

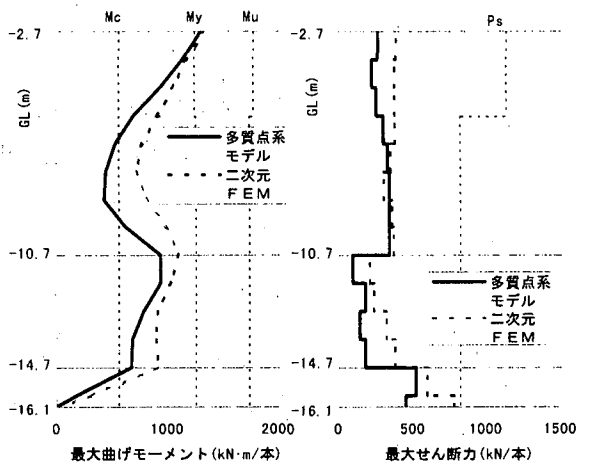


図-7 解析手法の比較 (CASE1:地震動レベルm)

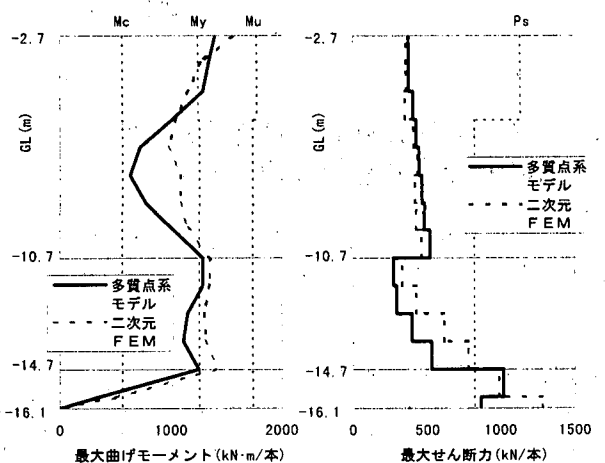


図-8 解析手法の比較 (CASE2:地震動レベル1)

杭の断面力はCASE1,2ともに、多質点系モデルによる解析結果と二次元FEM解析結果は比較的良く一致している。また、履歴ループには解析コードの履歴則の相違に伴う若干の差が見られるが、杭の塑性化の程度は同程度となっている。

杭を線形要素とした既往の検討⁵⁾では、入力地震動が小さい場合、多質点系モデルと二次元FEMモデルとで杭の断面力に差が見られたが、入力地震動が今回と同じレベルで、地盤剛性の低下が比較的大きい場合には、両者は比較的よく一致していた。杭を非線形要素とした今回の検討でも、同様な結果が得られることが確認された。

このことから、地盤剛性が大きく低下するレベル2相当の地震力に対して、構造全体系の解析を実施する場合は、多質点系モデルと二次元FEMモデルの解析結果の差は小さいと考えられる。

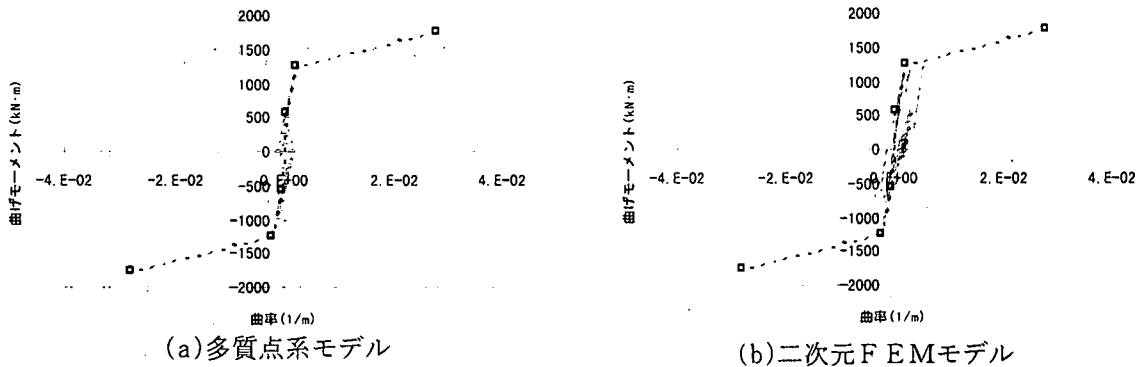


図-9 杭頭のM-φ履歴ループの比較 (CASE1:地震動レベルm)

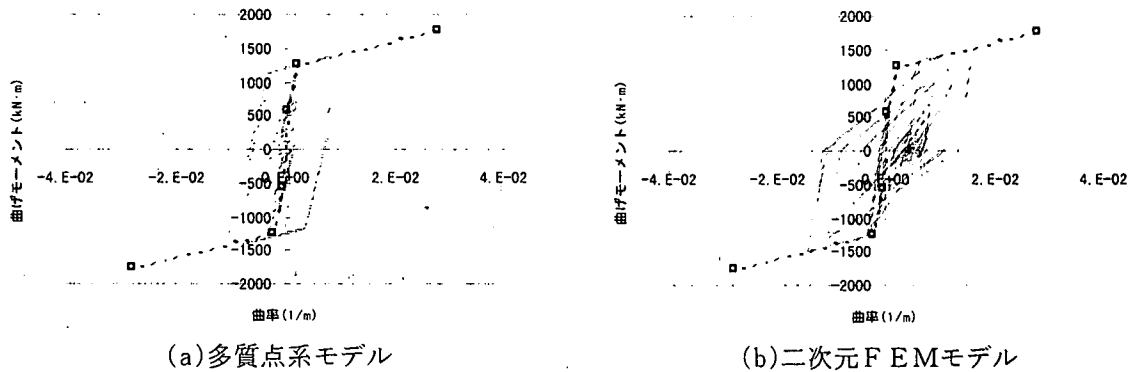


図-10 杭頭のM-φ履歴ループの比較 (CASE2:地震動レベル1)

6. 橋脚の補強の有無が構造系全体の応答に及ぼす影響の検討結果

本検討は、解析手法による結果の差が小さいことが明らかとなったため、多質点系モデルで実施した。

(1) 地盤Aでの検討結果

CASE2 (補強前) とCASE3 (補強後) の最大加速度分布、最大水平変位分布の比較を図-11に、橋脚の最大断面力の比較を図-12に、杭の最大断面力の比較を図-13に示す。

地盤Aの場合、補強後の橋脚に生じる曲げモーメントが、補強前の橋脚の降伏モーメントと同程度であり、補強前の橋脚は、段落し部 (GL+1.5m) と橋脚基部が僅かに塑性化するに程度であった。

杭の断面力に着目すると、橋脚の補強の有無による相違はほとんど認められない。

また、杭のせん断力は、GL-14.7mの土層境界部付近で、せん断耐力を越えている。これは、この付近で地盤のひずみが急激に増加する影響の他、第1層および第2層の剛性低下が著しいため、杭頭に作用する慣性力に地盤が十分に抵抗できず、GL-14.7m以深の支持層まで慣性力を伝達していることが原因と考えられる。

このような地盤では、地盤改良等により地盤の剛性を増加させる対策が有効であると考えられる。

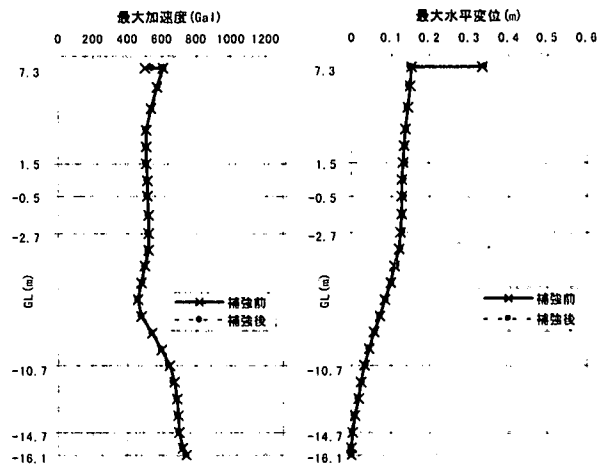
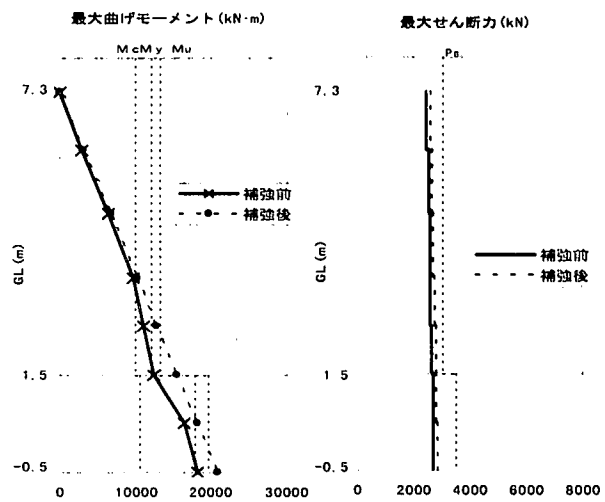


図-11 最大加速度、変位の比較 (地盤A)



注) 図中に示す耐力線は補強前の断面に対するものである。

図-12 橋脚の最大断面力の比較 (地盤A)

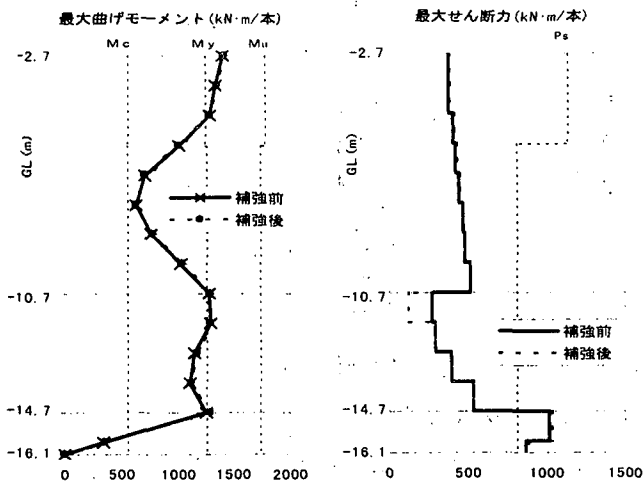


図-13 杭の最大断面力の比較 (地盤A)

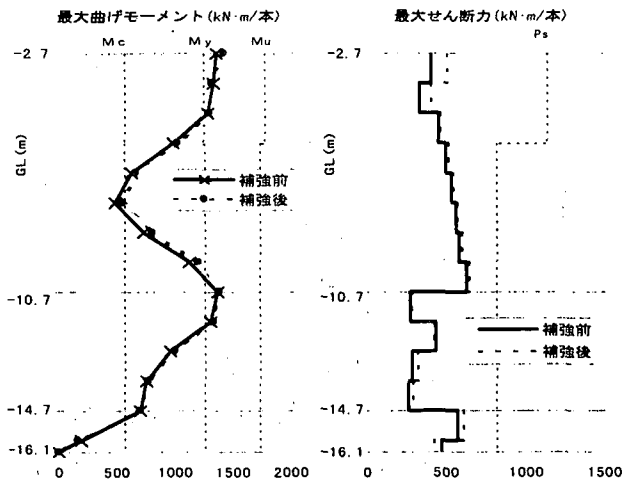


図-16 杭の最大断面力の比較 (地盤B)

(2) 地盤Bでの検討結果

CASE4 (補強前) とCASE5 (補強後) の最大加速度分布, 最大水平変位分布の比較を図-14に, 橋脚の最大断面力の比較を図-15に, 杭の最大断面力の比較を図-16に示す。

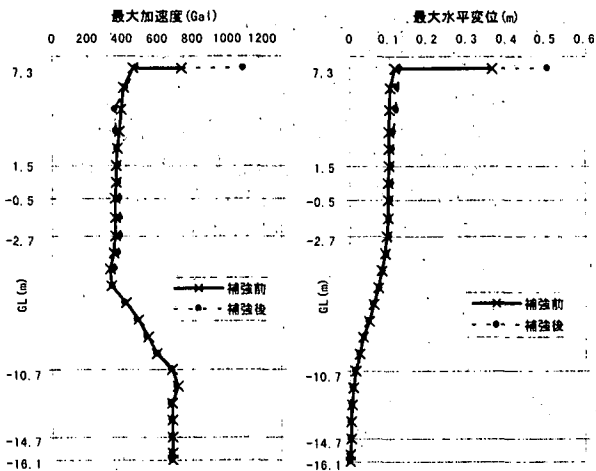
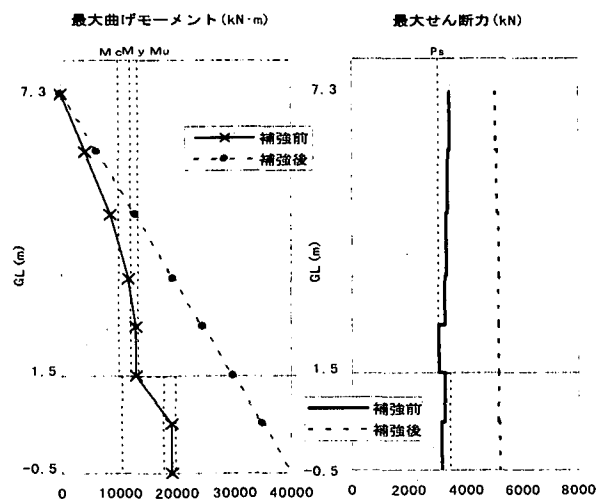


図-14 最大加速度, 変位の比較 (地盤B)



注) 図中に示す耐力線は補強前の断面に対するものである。

図-15 橋脚の最大断面力比較 (地盤B)

地盤Bの場合, 橋脚の曲げモーメントは補強の有無により大きく異なる。補強前の橋脚では基部から2m程度の領域が降伏モーメントに達し, これにより上部構造の慣性力も補強後と比較して大きく低下している。また, 補強前の橋脚には, せん断耐力を越えるせん断力が発生している。

しかし, 杭の断面力には, 橋脚補強の有無による相違がほとんど見られない。

図-17に, CASE5 (補強後) での杭の断面力 (Total) と, ここから地盤振動による断面力 (Kinematic) を分離した結果を示す。

図-17から, 杭の断面力は地盤振動の影響を強く受けていることが判る。このため, 図-15において橋脚補強の有無による相違, すなわち, 上部構造の慣性力による相違がほとんど見られなかったものと考えられる。

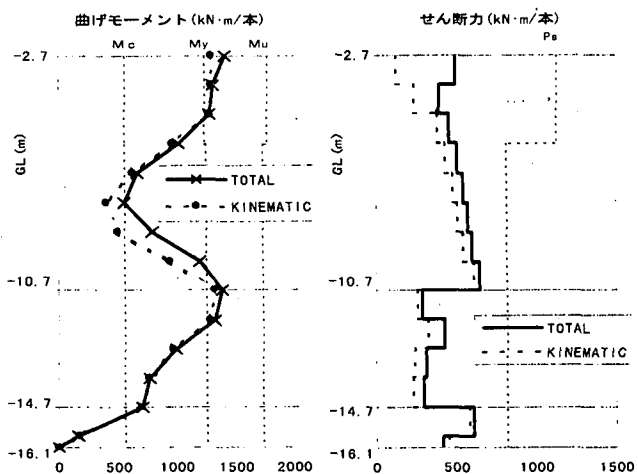


図-17 CASE5 (補強後) の杭断面力の分離 (地盤B)

図-18に杭頭位置でのM-φ履歴ループの比較を示す。僅かではあるが, 上部構造の慣性力が大きいため, 補強後の橋脚の方が塑性化が進んでいる。

しかし, 両ケースとも終局点に対しては十分な余裕がある。

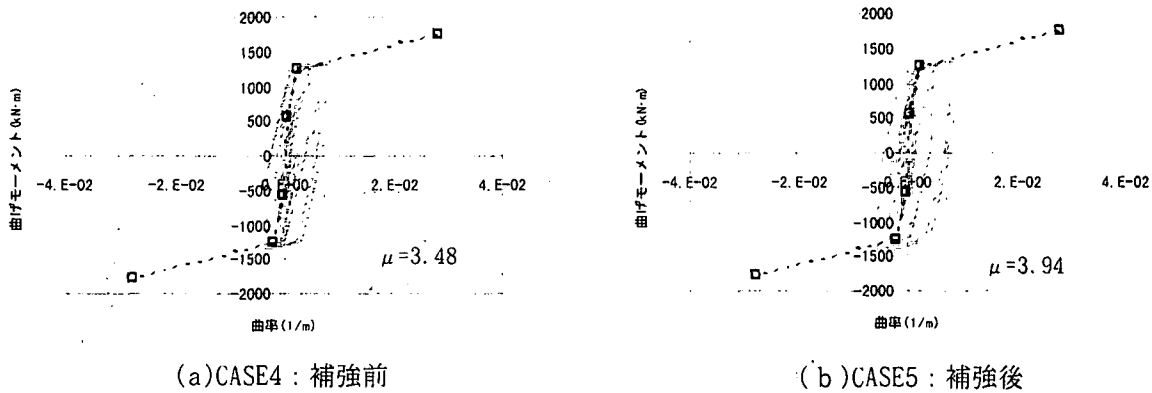


図-18 杭頭でのM- ϕ 履歴ループの比較(地盤B)

上部構造の変位に着目すると、補強後の方が慣性力が大きいため、最大変位は大きくなっている。一方、図-19に示す橋脚天端での水平変位の時刻歴図からは、橋脚に塑性ヒンジが生じるため、補強前の方が残留変位が大きいことが判る。

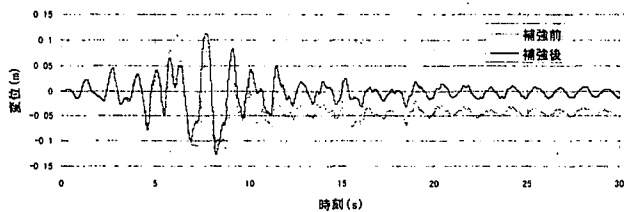


図-19 橋脚天端の水平変位時刻歴(地盤B)

以上の結果から、想定した橋脚にはせん断耐力を増加させる補強は必要である。しかし、曲げ耐力を増加させることにより杭の損傷程度が大きくなった。このため、橋脚の塑性化の程度、および残留変位が許容できる範囲であれば、曲げ補強の必要性は無いと言える。

7. まとめと今後の課題

地盤、基礎、橋脚、および上部構造を含む構造系全体の地震応答解析を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- ① 地盤剛性が大きく低下するレベル2相当の地震動に対しては、多質点系モデルによる解析と二次元FEM解析の結果の差は小さい。
- ② 想定した橋脚では、橋脚補強の有無による杭の断面力の相違は小さい。杭は橋脚補強の有無によらず損傷を受ける。
- ③ 杭の断面力は、地盤振動の影響を強く受けるため、杭の損傷を防ぐには地盤改良が有効である。
- ④ 想定した橋脚には、せん断補強は必要であるが、曲げ補強の必要性は小さい。

なお、今回想定した橋脚の特徴的な挙動として、橋脚のせん断力分布が高さ方向にほとんど変化していないことが挙げられる。せん断力の勾配は地震震度である。従って、橋脚の断面力は支承上部の上部構造の応答に支配され、橋脚自身の慣性力はほとんど影響していないと言える。今回の検討対象橋梁で

は、道路橋示方書に示されるタイプBのゴム支承を想定しており、保有耐力法設計で想定している1自由度系の構造ではない。また、本文中には示していないが、上部構造はゴム支承の周期で応答している。

今後、支承形式を変えた検討を含め、様々な構造形式での検討を行い、構造形式ごとの破壊過程に基づく最適補強方法の提案を行う予定である。

謝辞：本研究は、平成12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、解析を行うに当たり鹿島小堀研究室の宮本裕司次長、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します。

参考文献

- 1) 小林 寛他：基礎-地盤系模型を用いたハイブリッド振動実験に関する研究，第2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13年3月
- 2) 小林 寛他：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
- 3) 社団法人 日本道路協会：道路橋耐震設計指針・同解説，昭和47年
- 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) 高橋祐治他：地盤-基礎との連成を考慮した橋脚の動的応答解析，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
- 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
- 7) 宮本裕司他：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，1995年5月
- 8) 高橋祐治他：地盤-基礎系模型を用いたハイブリッド振動実験のシミュレーション解析，第2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13年3月