

橋脚－基礎－地盤系の動的応答解析に基づく 既存橋脚の合理的な耐震補強設計の検討

平尾 謙一¹・砂坂 善雄²・高橋 祐治³

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 工博 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 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)

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 effects of damage to piles on the dynamic behavior of bridge systems are discussed considering the combination of natural periods of bridge system and ground. Consideration that should be given in the seismic design for reinforcement of the structures is studied from viewpoint of the combination of the natural periods.

Key Words : bridge foundation, soil-structure system, numerical analysis, lumped masses model, Interaction, natural period, seismic design, reinforcement

1. はじめに

杭基礎などの深い基礎構造物の地震時挙動は構造物－基礎－地盤系の動的な相互作用に大きく影響され、基礎の地震時応力は上部構造物からの慣性力以外に地盤震動による影響を受ける。

筆者らはこれまでの報告^{1), 2)}で、液状化地盤及び非液状化地盤に対する構造物－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施し、上部構造物の慣性力と地盤震動が基礎に与える影響が、構造物の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係で異なることを確認している。

本報告では、地盤の固有周期と構造物の固有周期に着目した橋脚－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施し、橋脚及び基礎の補強が橋脚－基礎－地盤系の地震応答に与える影響を確認し、既存橋脚の合理的な耐震補強設計について検討する。

2. 研究目的

本研究の目的は、構造全体系としての地震時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、さらには既設橋脚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。

本報告では、地盤の固有周期と構造物の固有周期に着目した橋脚－基礎－地盤系の非線形動的応答解析を実施することにより、橋脚及び基礎の補強が橋脚－基礎－地盤系の地震応答に与える影響を確認し、

既設構造物の耐震補強設計上の留意点を明らかにする。

3. 検討条件

(1) 対象構造物および地盤

図-1に示すような橋脚－基礎および地盤を対象とし^{3), 4), 5)}、橋脚－基礎－地盤連成系の非線形動的応答解析を実施する。橋脚－基礎－地盤連成系の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係が基礎の応答に与える影響を調べるため、橋脚の断面形状を相似形で変化させて異なる固有周期を有する橋脚を設定し、 T_s と T_g の大小関係に着目した解析を実施する。 T_s , T_g は地盤の地震応答を時刻歴非線形解析により算出し、地震動作用の経過に伴う T_s , T_g の経時変化および大小関係の変化を考慮した検討を行う。なお、本報告では、地盤は液状化しないとした場合の検討結果について述べる。液状化を考慮した検討結果については、別の機会に報告したい。

(2) 杭および橋脚の非線形特性

橋脚及び杭は解析の目的に応じて線形弾性の場合と非線形性を考慮する場合の両者を設定する。非線形性を考慮する場合は、常時軸力作用下でのトリリニアな $M-\phi$ 関係を設定し、履歴特性は武藤モデルを用いる。

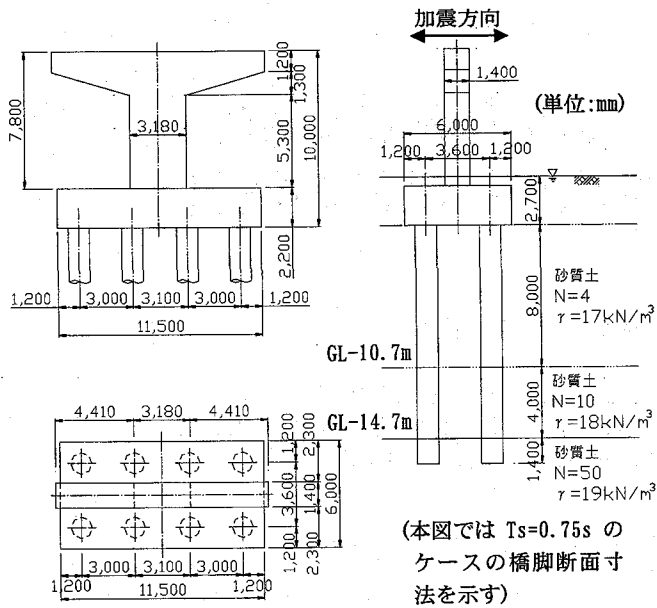


図-1 対象構造物および地盤

(3) 入力地震動

図-1に示す地盤モデルの第3層（ $N=50$ ）上端（GL-14.7m）を入力基盤面とし、道路橋示方書⁶⁾に規定されるⅠ種地盤が動的応答解析で想定する工学基盤と考え、タイプⅠ及びタイプⅡの標準波を、最大加速度を調整して入力する。最大加速度を400Galとした場合の入力地震動を図-2に示す。

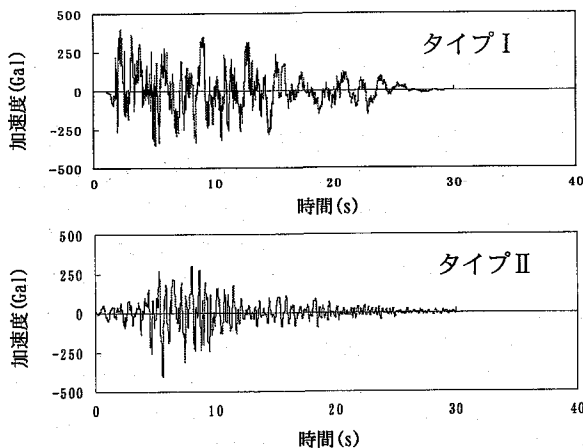


図-2 入力地震動

4. 解析モデルおよび解析手法

本解析では、橋脚及び群杭を1本の曲げせん断棒でモデル化した多質点系モデルを用いる。図-3に解析モデルを示す。各質点に接続する地盤との相互作用ばねは薄層要素法⁷⁾により算出する。相互作用ばねの非線形特性は図-4に示すMasing則に従うHardin-Drnevichモデルを用いる⁷⁾。

構造系全体の動的応答解析は、自由地盤の動的応

答解析（本報では時刻歴非線形解析FLIP⁸⁾）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多質点系モデルに入力することにより行う。図-5に解析手法の概要を示す。

なお、FLIPに用いるパラメータは港湾技研資料に示される簡易設定法⁹⁾を参照し、 N 値に基づいて設定している。

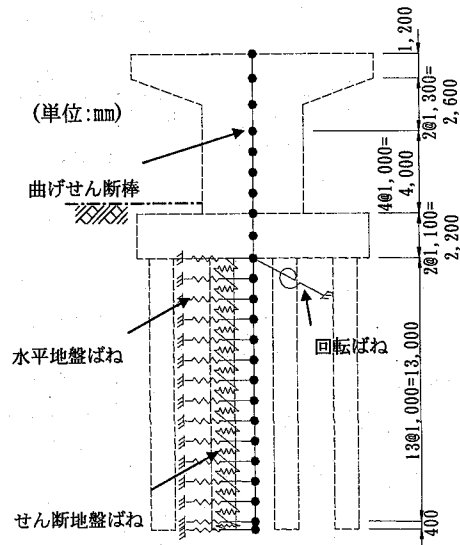


図-3 解析モデル

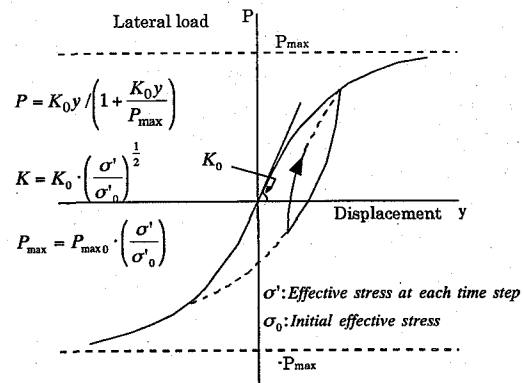


図-4 相互作用パネの非線形特性⁷⁾

5. 構造物応答の周期特性

ここでは、橋脚—基礎—地盤連成系の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の大小関係が構造物応答の位相特性に与える影響を調べるため、橋脚の断面形状を相似形で変化させて構造物の固有周期を数ケース設定し、動的応答解析を行った。

(1) 検討ケース

検討ケースを表-1に、入力地震動の加速度応答スペクトルを各ケースの T_s と併せて図-6に示す。なお、全ケースで橋脚は線形弾性とし、杭は非線形性を考慮している。また、地盤は液状化しない場合

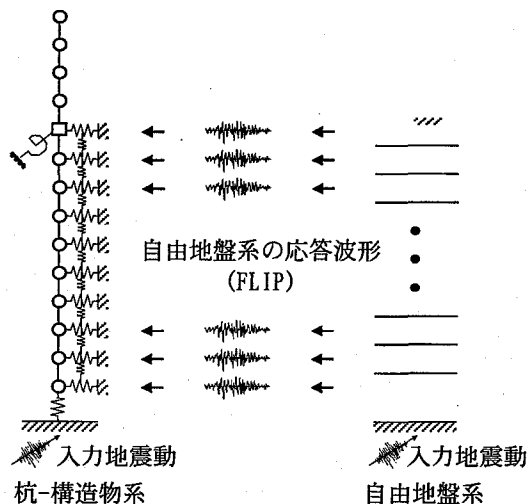


図-5 解析手法概要図

を対象としている。

解析結果として、地震動作用の経過時間に伴う T_s , T_g の推移を図-7に示す。各ケースとも、地盤のせん断ひずみの増加に伴う地盤の剛性低下により T_g が長周期化している。

表-1 検討ケース

	橋脚形状 (B×H)	地震動
CASE1	3180mm×1400mm	タイプⅡ
CASE2	1530mm×675mm	タイプⅡ
CASE3	1530mm×675mm	タイプⅠ

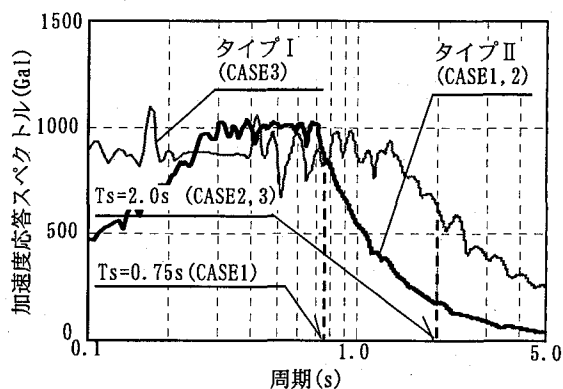


図-6 入力地震動の加速度応答スペクトル

(2) 橋脚の加速度応答の周期特性

図-8に橋脚天端の加速度と自由地盤地表面の加速度の応答波形を示す。図-7に示した T_s と T_g の大小関係に着目すると、CASE1では $T_s > T_g$ となる時間帯 ($t=0\sim4s$) で構造物と自由地盤の振動に位相差が見られるが、 $T_s < T_g$ となる時間帯 ($t=5\sim15s$) ではほぼ同位相となる。一方、全時刻で $T_s > T_g$ となる CASE2, 3 では全時刻を通じて構造物と自由地盤の振動の位相は大きく異なる。

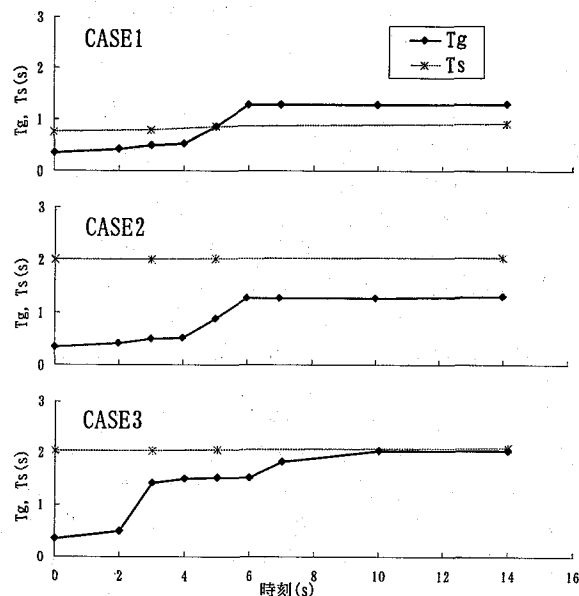


図-7 T_s , T_g の時刻歴

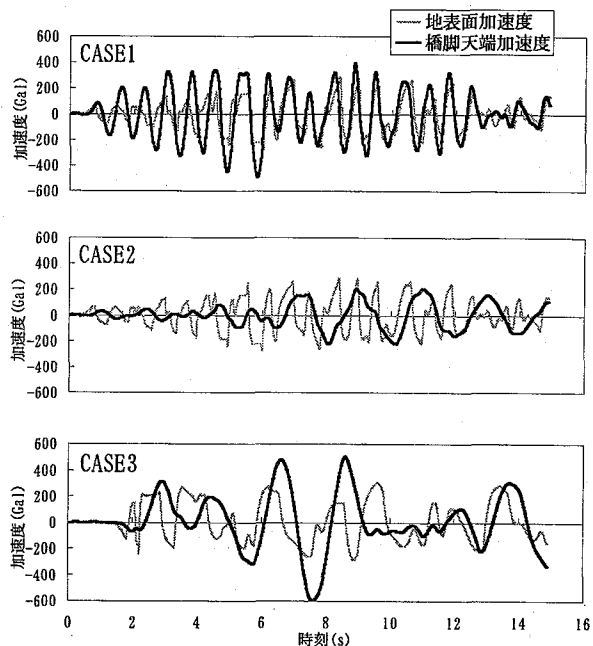


図-8 橋脚天端と自由地盤地表面の加速度時刻歴

(3) 杭の発生曲げモーメントの周期特性

ここでは、前節で示した3ケースについて、杭断面力を橋脚の慣性力による断面力 (Inertial) と地盤震動による断面力 (Kinematic) に分離して検討する。

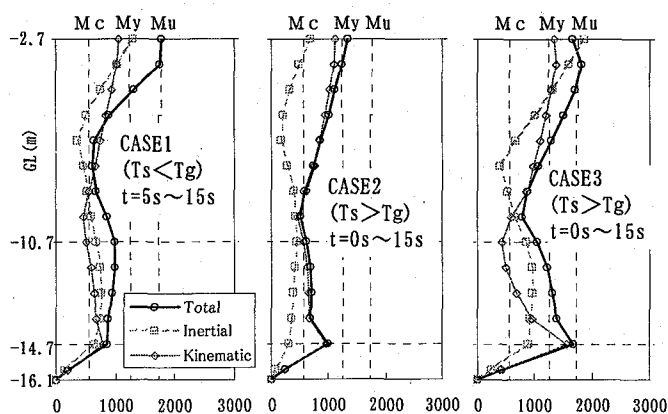
Kinematic は、図-5の解析手法概要図で橋脚を取り去り、基礎は剛性のみを残し質量を0とした無質量基礎を持つ杭基礎の動的応答解析を行って得られる、地盤震動のみによる杭の断面力である。また、Inertial は、全体系モデルの断面力 (Total) から地盤震動による断面力 (Kinematic) を差し引いて得られる杭の断面力である。図-9にこの方法で分離した杭の最大断面力を示す。なお、CASE1につい

では $T_s < T_g$ となる時間帯 ($t=5\sim 15s$) の最大値を、CASE2, 3 については全時刻 ($t=0\sim 15s$) の最大値を示す。

$T_s < T_g$ の場合 (CASE1, $t=5s\sim 15s$)、図-8 に示したように構造物と地盤が同位相で振動しており、杭頭付近の Total の杭断面力は Inertial と Kinematic の最大値の和にほぼ等しくなっている。

一方、 $T_s > T_g$ の場合 (CASE2, 3)、図-8 に示したように構造物と自由地盤の振動の位相が異なるため、Inertial と Kinematic の影響は同時に作用せず、両者の和は Total の杭断面力より大きくなる。

また、 T_s と地震動の卓越周期が大きく異なる CASE2 では杭の Total の杭断面力に対して Kinematic が支配的となる。一方、 T_s と地震動の卓越周期が比較的近い CASE3 では杭の Total の杭断面力に対して Inertial の影響も大きいことが分かる。



(単位: $kN\cdot m/本$)

図-9 分離した杭の最大曲げモーメント

6. 橋脚の補強設計における留意点

上述したように、 T_s と T_g の大小関係によって杭の発生断面力に与える橋脚の慣性力の影響が異なる。ここでは、橋脚の補強により橋脚の慣性力の影響が変化することから、 T_s と T_g の大小関係に着目して橋脚の補強設計について考察する。

(1) $T_s > T_g$ の場合

$T_s > T_g$ で T_s と地震動の卓越周期が大きく異なる場合は、杭断面力に対して慣性力と地盤振動は同時に最大とならず、しかも地盤振動の影響が支配的となる。このような場合は、橋脚の補強によって橋脚より上部の慣性力が増加しても杭の最大断面力は増加しない。従って、 $T_s > T_g$ の場合に、 T_s と地震動の卓越周期がどの程度乖離すれば、橋脚補強により慣性力が増加しても杭に対して影響がないと言えるか、を把握することは効率的な橋脚補強設計において重要であると考えられる。

ここでは $T_s > T_g$ の条件下で T_s に関するパラメータスタディを行い、地震動の加速度応答スペクトル

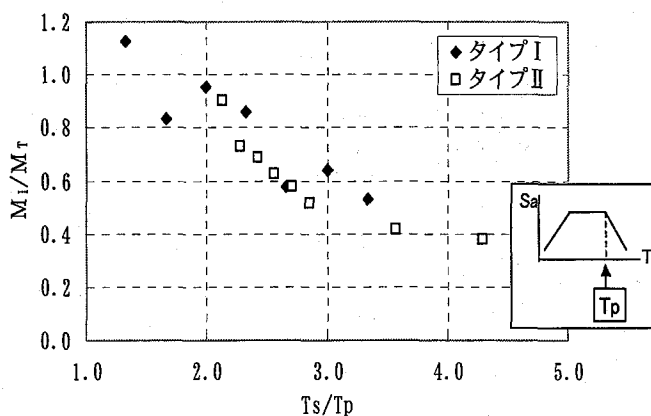


図-10 $[M_1/M_t] \sim [T_s/T_p]$ 関係

が最大となる周期帯の長周期側の限界 (T_p) と T_s の比率 $[T_s/T_p]$ と杭頭の Total 曲げモーメントに占める Inertial 成分の比率 $[M_1/M_t]$ の関係を求め、図-10 に示した。図-10 には、 $[T_s/T_p]$ が大きくなり T_s と地震動の卓越周期が乖離すれば、 $[M_1/M_t]$ は小さくなり杭頭の Total 曲げモーメントに占める Inertial 成分の割合が減少する傾向が示されている。例えば、 $[T_s/T_p]$ が $2.5\sim 3.0$ の場合、 $[M_1/M_t]$ は 0.6 程度となることがわかる。この場合、橋脚補強による慣性力増加を $1.0/0.6 \approx 1.6$ 倍の範囲内に抑えれば、杭断面力は Inertial 成分で決定されることはなく、橋脚補強による杭の最大断面力の増加は無いと考えられる。ただし、橋脚の慣性力の増加により構造系の動特性 (T_s) が大きく変化した場合はその影響を別途考慮する必要がある。

(2) $T_s < T_g$ の場合

$T_s < T_g$ の場合、すなわち杭に対して Inertial と Kinematic が同位相で作用する場合、橋脚の耐震補強において慣性力が増加するような補強を行えば、杭の断面力は増加する。ただし、鋼板巻立て工法のように重量の増加が無視できる場合でも、橋脚の耐力増加により補強後の杭断面力が増加することが考えられる。ここでは、橋脚耐力増加が杭応答に与える影響について検討する。

(a) 橋脚基部を補強する場合

ここでは、図-1 に示す橋脚に対して、昭和 47 年道路橋耐震設計指針¹⁰⁾に準拠して配筋設計したケースを「補強前」、平成 14 年道路橋示方書⁶⁾に準拠して配筋設計したケースを「補強後」と仮定し、両者の杭断面力を比較した。両ケースの $M-\phi$ 関係を図-11 に示す。

橋脚及び杭の最大曲げモーメント分布を図-12 に示す。なお比較を容易にするため、杭は線形弾性として解析を実施している。

図-12 より、補強後の杭断面力は補強前に比べて増加することが分かる。なお、本解析で対象としたケースでは、杭断面力の増加の程度は橋脚基部の断面力の増加と比較すると小さく、橋脚基部の耐力 (降伏モーメント) の増加が杭断面力にダイレクトに反

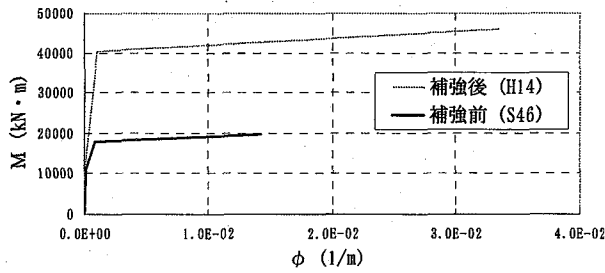


図-11 補強前後の橋脚基部M-φ関係

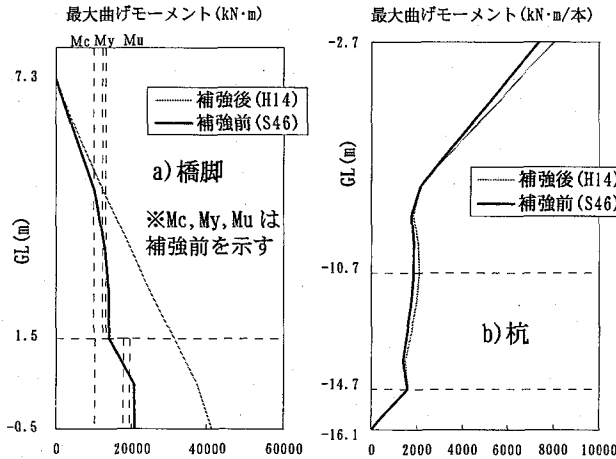


図-12 橋脚補強前後の最大曲げモーメント

映されていない。これは橋脚基部の増分モーメントの大部分は、杭群としてのロッキングバネで抵抗されることが理由として考えられる。

(b) 段落し部を補強する場合

段落し部の補強が杭応答に与える影響を検討する。基部については前節(a)と同様に平成14年道路橋示方書に準拠して配筋し、適宜段落しを設定したケースを「補強前」とする。これに対して、橋脚全体について基部と同じ配筋とし、段落しをなくしたケースを「補強後」とする。段落し部の補強の杭応答への影響は、「段落し位置」と「補強程度」に関係するものと考えられるため、段落し位置と段落し部の降伏モーメントに対するパラメータスタディを実施した。

「段落し位置」と「補強程度」の影響を表す指標として、 $\alpha = [(M_{y_B}/h_B)/(M_{y_T}/h_T)]$ を導入する。ここに、

M_{y_B} : 橋脚基部の降伏モーメント

M_{y_T} : 段落し部の降伏モーメント

h_B : 橋脚天端から基部までの高さ

h_T : 橋脚天端から段落し部までの高さ

橋脚の曲げモーメントの分布が三角形分布の場合、 $\alpha < 1$ は基部損傷先行、 $\alpha > 1$ は段落し部損傷先行を表す。

検討結果として、 $\alpha = [(M_{y_B}/h_B)/(M_{y_T}/h_T)]$ と $[M_{P1}/M_{P0}]$ の関係をプロットして図-13に示す。ここに、

M_{P1} : 補強後の杭頭最大モーメント

M_{P0} : 補強前の杭頭最大モーメント

図-13の結果から、段落し部のみの補強が杭応答に与える影響は小さいと考えて良いと思われる。また、現実的な段落し仕様を把握するため、橋脚高さ、上部工重量、設計震度をいくつか設定し、昭和47年道路橋耐震設計指針¹⁰⁾に基づき、試設計を実施したところ、 α は概ね1.0~1.2程度であった。

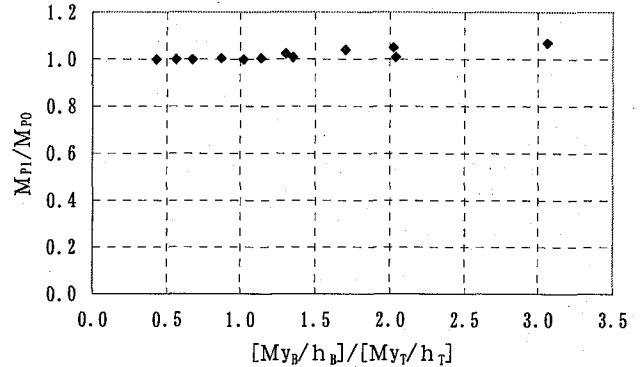


図-13 段落し部のみ補強の影響検討結果

7. 杭の補強設計における留意点

ここでは、杭の補強が橋脚の地震時応答に与える影響を検討するために、表-1に示した3ケースについて、杭を線形弾性とした場合を「補強後」、杭の非線形性を考慮した場合を「補強前」と考え、両ケースの橋脚の地震応答を比較した。なお、比較を容易にするために、全ケースで橋脚は線形弾性としている。また、杭の非線形性を考慮した場合、全ケースで杭体は降伏に達している。

橋脚の最大曲げモーメントを、杭を線形弾性とした場合(補強後)と、杭の非線形性を考慮した場合(補強前)とで比較して図-14に示す。なお、CASE1については $T_s < T_g$ となる時間帯($t=5 \sim 15s$)の最大値を、CASE2, 3については全時刻($t=0 \sim 15s$)の最大値を示す。

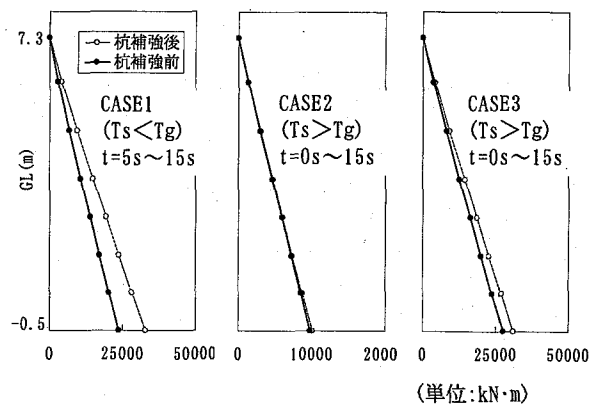


図-14 橋脚の最大曲げモーメント

$T_s < T_g$ の場合 (CASE1), 及び $T_s > T_g$ で杭断面力に対して地盤振動の影響だけでなく慣性力の影響も大きい場合 (CASE3) は, 杭を補強することにより橋脚の断面力が増加する. 一方, $T_s > T_g$ で杭断面力に対して地盤振動の影響が支配的な場合 (CASE2) は, 杭の補強は橋脚の応答に影響を与えない.

以上より, $T_s < T_g$ の場合, 及び $T_s > T_g$ で杭断面力に対して地盤振動の影響だけでなく慣性力の影響も大きい場合は, 杭を補強することで橋脚の応答が増加するので注意が必要である. ただ, この場合逆に考えると杭の塑性化により橋脚の断面力が低下するので, 杭のじん性を向上させることにより, 杭の塑性化をある程度認めるような橋脚-基礎の強度バランスを考えれば合理的な橋脚の補強設計が可能になると考えられる.

8. まとめ

地盤の固有周期と構造物の固有周期に着目した橋脚-基礎-地盤系の非線形動的応答解析を実施することにより橋脚及び基礎の補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答に与える影響を確認し, 既存橋脚の合理的な耐震補強設計について検討した.

橋脚及び基礎の補強が橋脚-基礎-地盤系の地震応答に与える影響は, 構造物の固有周期 T_s と地盤の固有周期 T_g の関係, 入力時震動の周期特性と構造物の固有周期の関係により異なる. $T_s < T_g$ の場合, 上部構造物の慣性力と地盤振動の影響が杭に対して同時に作用する. $T_s > T_g$ の場合は上部構造物の慣性力と地盤振動の影響は杭に同時に作用しない. $T_s > T_g$ の場合で, T_s が地震動の卓越周期から外れる場合は杭に対して地盤振動の影響が支配的となる.

橋脚の補強が杭の応答に与える影響については以下のようにまとめられる.

- ① $T_s > T_g$ の場合で T_s が地震動の卓越周期から外れる場合は, 杭に対して地盤振動の影響が支配的となる. この場合は杭に関係なく橋脚のみに着目した耐震補強を行うことができる.
- ② 橋脚の自重の増加が無視できる場合でも, 橋脚基部の耐力増加により杭に作用する慣性力は増加する.
- ③ 段落し部のみ耐力を増大させる補強を行う場合は, 杭に対して影響を与えないと考えてよい.

杭の補強が橋脚の応答に与える影響については以下のようにまとめられる.

- ① $T_s < T_g$ の場合, 及び $T_s > T_g$ で杭断面力に対して地盤振動の影響が支配的でない場合は, 杭を補強することで橋脚の応答が増加するので注意が必要である.

- ② 逆に①の場合は杭の塑性化により橋脚の断面力が低下するので, 杭のじん性を向上させることにより, 杭の塑性化をある程度認めるような橋脚-基礎の強度バランスを考えれば合理的な橋脚の補強設計が可能になると考えられる.

謝辞: 本研究は, 平成 14, 15 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分科会の「橋脚の破壊過程と最適補強法」研究班において, 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) 川中徹人他: 橋脚-基礎-地盤系の非線形動的応答解析, 第3回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp. 213-218, 2002. 3.
- 2) 平尾謙一, 砂坂善雄, 高橋祐二: 液状化を考慮した橋脚-基礎-地盤系の動的応答解析, 第4回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp. 259-264, 2003. 3.
- 3) 小林寛, 田村敬一: 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向上に関するシンポジウム論文集, pp. 145-150, 2000. 3.
- 4) 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向上に関するシンポジウム論文集, pp. 151-156, 2000. 3.
- 5) 高原秀夫他: 地盤-基礎との連成を考慮した橋脚の非線形動的解析, 第2回構造物の破壊過程解明に基づく地震防災向上に関するシンポジウム論文集, pp. 207-212, 2001. 3.
- 6) 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14年3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, pp. 41-50, 1995. 5.
- 8) 井合進他: ひずみ空間における塑性論に基づくサイクリックモビリティのモデル, 港湾技術研究所報告, 第29巻第4号, pp. 27-56, 1990. 12.
- 9) 森田年一他: 液状化による構造物被害予測プログラム FLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法, 港湾技研資料, No. 869, 1997. 6.
- 10) 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月.