

降伏耐力比に着目した杭基礎の損傷度に関する検討

矢部正明¹・川島一彦²

¹正会員 東京工業大学 社会人博士課程 工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

²フェロー会員 工学博士 東京工業大学教授 工学部土木工学科（〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1）

1. まえがき

地震時保有耐力法では、橋脚基部の曲げ保有耐力に相当する水平力と曲げモーメントを地震力として作用させて杭基礎の耐震設計をする。本来は基礎には塑性変形を生じさせないことが望ましいが、我が国のように非常に強い地震動が作用する環境下では、橋脚と同時に杭基礎にも塑性化が生じることは避けられないと考えられる。従って、こうして設計された杭基礎の地震時保有耐力がどの程度橋脚の地震時保有耐力に対して余裕があればよいかが重要であるが、これに関しては従来ほとんど検討されていない。本研究では、橋脚の降伏水平耐力と杭基礎の降伏耐力の比に着目し、これが変化した場合に杭基礎に生じる損傷（塑性変形）がどのように変化するかを2種類の橋に対して解析的に検討した結果を報告するものである。

2. 解析対象橋梁

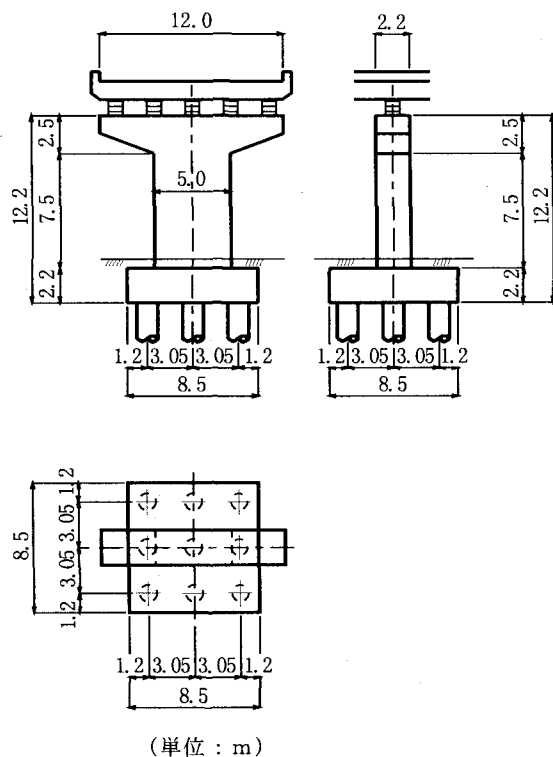
（1）解析対象橋

解析対象橋を地盤条件とともに図-1に示す。2種類の地盤を想定してこの上に同一構造の桁および橋脚を有する杭基礎を平成8年道路橋示方書に基づき試設計した。橋脚の降伏水平耐力を変化させるために、橋脚の配筋は5段階に変化させたが、これについては後述する。上部構造は、水平地震力分散支承として積層ゴム支承を用いた5径間連続鋼Iげた橋の一部を取り出したものであり、隣接する橋脚、基礎系の構造条件がほぼ同じであることから、1基の橋脚-杭基礎系だけを取り出したものである。地盤条件としては、地表面下20mの砂礫層を支持層とし、その上に粘性土と砂層が互層になっている地盤（以下、この条件の橋をA橋と呼ぶ）と地表面下30mの砂礫層を支持層とし、粘性土が堆積した地

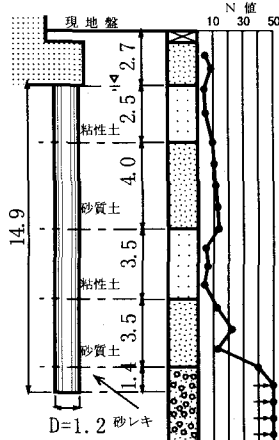
盤（以下、この条件の橋をB橋と呼ぶ）の2種類を取り上げることにする。支持層とする砂礫層上面を耐震設計上の基盤面とみなし、表層地盤の固有周期 T_G を求めると、A橋地点では0.38秒、B橋地点では1.17秒となり、それぞれ、道路橋示方書に規定されるⅡ種およびⅢ種地盤となる。

道路橋示方書では、震度法と地震時保有水平耐力法の両者により杭基礎の耐震設計が行われる。震度法による耐震設計では、A橋においては杭先端の押込み支持力により、また、B橋においては杭軸方向の引張応力度により、それぞれ断面決定されている。これは、A橋、B橋ともに砂礫層のN値は約50であるが、B橋では粘性土層が厚い分だけ許容支持力が大きく、このため杭先端の押込みではなく、杭体の軸方向の引張で設計が決まっているからである。

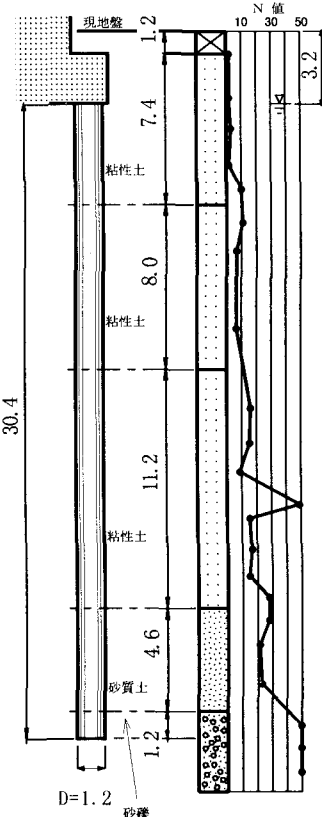
一方、地震時保有水平耐力法による耐震設計では、プッシュオーバーアナリシスを用いて図-2(a)に示すようにフーチング底面位置に、これより上に存在する構造部分の重量を初期荷重として作用させた状態で、図-2(b)に示すように桁、橋脚、フーチングの慣性力を作用させる。図-2(c)に示すようにフーチング底面に生じるモーメント M_{F0} とせん断力 F_{F0} を求め、フーチングの並進および回転により上部構造慣性力作用位置に生じる水平変位を求める。図-3は、A橋、B橋に対してプッシュオーバーアナリシスを行った結果であり、上部構造慣性力作用位置における水平震度 k_h とフーチングの変形により上部構造慣性力作用位置に生じる水平変位 δ_F の関係を示している。A橋では、水平震度 k_h が0.68になると後列の杭（図-2に示すように右側に慣性力が作用した場合に引張側となる杭）が最初に引張降伏し、次いで水平震度 k_h が0.85になると前列の杭（図-2に示すように右側に慣性力が作用した場合に圧縮側となる



(a) 桁, 橋脚, 杭配置



(b) A橋の地盤条件



(c) B橋の地盤条件

図-1 対象とした橋脚・杭基礎と地盤条件

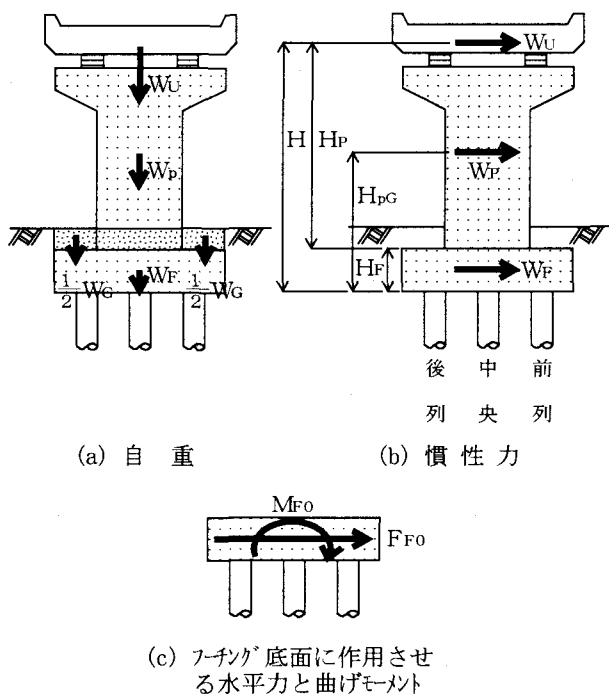


図-2 基礎の水平力-水平変位関係を求めるために作用させる自重と慣性力

杭) において押込み力が押込み耐力に達して、上述した

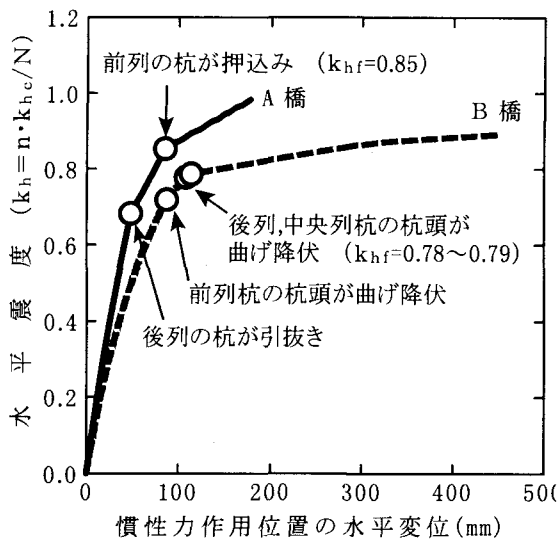
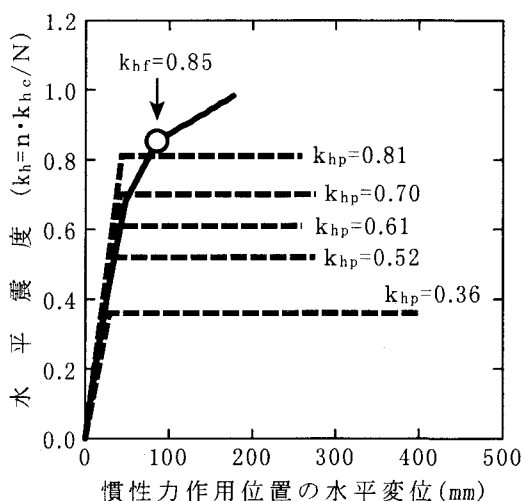
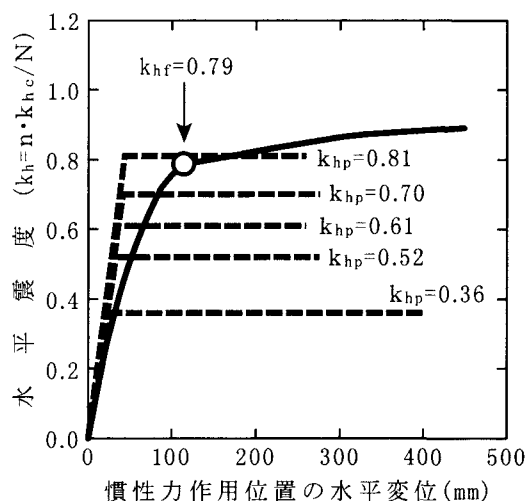


図-3 プッシュオーバーアナリシスにより求めた水平震度 k_h と水平変位の関係

道路橋示方書の定義に基づく杭基礎としての降伏に達する。B橋では、水平震度 k_h が0.72で前列の杭が、次いで水平震度 k_h が0.78になると後列の杭が、また、水平震度 k_h が0.79になると中央列の杭が、それぞれ杭頭



(1) A 橋



(2) B 橋

図-4 プッシュオーバーアナリシスにより求めた A 橋と B 橋の水平震度—水平変位関係

で降伏して、杭基礎としての降伏に達する。したがって、杭基礎としての降伏震度 k_{hf} は、A 橋では 0.85、B 橋では 0.79 となる。

(2) 橋脚の配筋および降伏耐力比 γ_y

橋脚の降伏水平耐力 P_y に相当する水平力を地震動として杭基礎を設計する場合には、橋脚の降伏水平耐力 P_y が変化すれば、杭基礎に作用する地震力も変化してくることになる。このような点を検討するため、橋脚断面は図-1 を保ったまま軸方向鉄筋量や帯鉄筋量、鉄筋の降伏点強度を変化させることにより、橋脚の降伏水平耐力 P_y を 5 段階に変化させた。橋脚の断面寸法を一定に保ったのは、フーチング底面より上に存在する構造部分の重量を等しくすると同時に、上部構造—橋脚系の固有周期をほぼ同じにするためである。このようにして試設計された橋脚の固有周期は、後述する解析モデルを用いた固有値解析結果より、上部構造—橋脚—基礎系の基本固有周期は、A 橋では 1.18～1.21 秒、B 橋では 1.20～1.23 秒となる。

橋脚の降伏水平震度 k_{hp} を

$$k_{hp} = \frac{P_y}{W} \quad (1)$$

と定義すると、ここで対象とした橋脚の降伏水平震度 k_{hp} は 0.36～0.81 となる。なお、式(1)で、 W は次式で与えられる等価重量である。

$$W = W_U + 0.5W_p \quad (2)$$

以上のようにして求めた 5 種類の橋脚の降伏水平震

度 k_{hp} と上部構造慣性力作用位置の水平変位の関係を図-3 に示した杭基礎の結果と合わせて示すと図-4 のようになる。橋脚の降伏水平震度 k_{hp} を変化させたことにより、杭基礎の降伏耐力との関係がいろいろ変化するが、これを表すために、両者の降伏耐力比 γ_y を次式のように定義する。

$$\gamma_y = \frac{k_{hf}}{k_{hp}} \quad (3)$$

このようにすると、降伏耐力比 γ_y は A 橋では 1.05～2.36、B 橋では 0.98～2.19 となる。

3. 解析モデル及び入力地震動

図-1 に示した桁—橋脚—杭基礎系からなる構造系を動的解析により検討するために、これを図-5 に示すようにモデル化した。上部構造はその軸方向剛性が橋脚や杭の曲げ剛性に比較して大きいと見做すこととし、積層ゴム支承は線形せん断バネによってモデル化した。橋脚躯体は、橋脚基部から 1.1m の塑性ヒンジ区間は非線形回転バネで、また、これ以外の区間は線形梁要素でそれぞれモデル化した。ただし橋脚躯体のうち、横梁部は剛体とした。塑性ヒンジ区間の復元力は、ひびわれ点を無視した剛性低下型の Takeda モデルで表した。

フーチングは剛体とし、橋軸方向の並進と橋軸直角軸回りの回転を有する 2 自由度系とした。

杭は各列ごとに、橋軸直角方向に存在する 3 本の杭をまとめ、各列の杭の剛性および質量は杭 1 本当たりの値の 3 倍とした。また、杭は、非線形梁要素でモデ

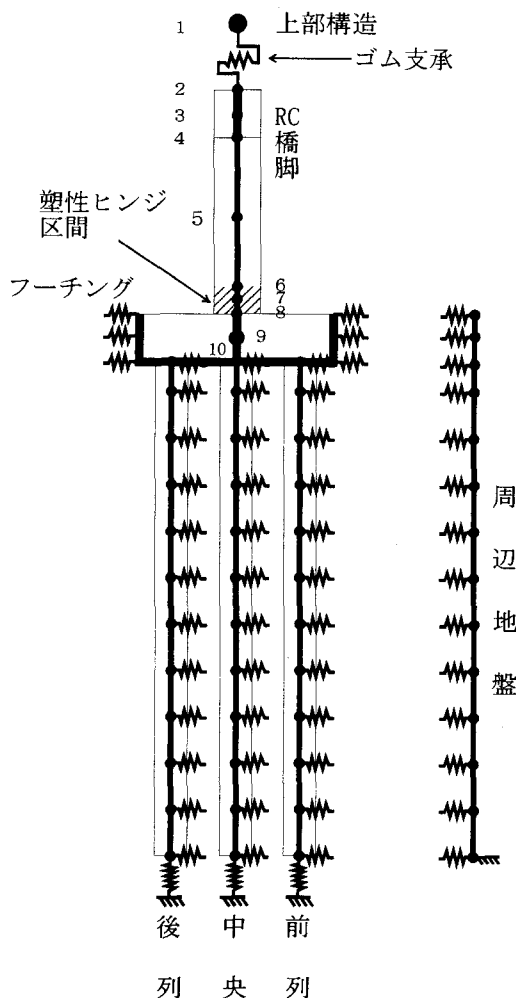


図-5 RC橋脚-杭基礎-周辺地盤系の解析モデル

ル化し、杭の質量には杭に囲まれた範囲の地盤の質量を付加質量として見込んだ。場所打ち杭の耐力や変形特性に関する研究は多くないが、木村らの研究³⁾によれば、RC橋脚と同様な特性を示すと考えられることから、杭の復元力は橋脚と同様にひびわれ点を無視した剛性低下型の Takeda モデルによって表すこととした。

周辺地盤の応答は1次元せん断振動モデルによって計算することとし、復元力は、Hardin-Drnevich 型の双曲線モデルによって表した。

杭基礎は、バネを介して1次元地盤モデルに支持されているとモデル化している。基礎～地盤間バネは、フーチングとその前面に位置する周辺地盤を結ぶ水平方向バネ、杭とその周辺地盤を結ぶ水平方向バネ、杭先端と支持地盤を結ぶ鉛直方向バネに分けられる。フーチング前面～地盤間バネの復元力は、フーチングと周辺地盤の間に生じる剥離を考慮するためにスリップ型のバイリニアモデルで表した。スリップ型バイリニアモデルは、フーチングと地盤間の相対変位が圧縮となる（接近）ときには抵抗を発揮するが、引張となる（離れる）ときは地盤の抵抗は生じず変形が進む。復元力は、受働土圧を上限值としている。このバネを、

図-5に示すように、フーチングの両側に配している。杭～地盤間の水平方向バネの復元力は、完全弾塑性型のバイリニアモデルで表した。杭～地盤間の水平方向の復元力は、杭の位置によって異なることが既往の大変形載荷試験より報告されている。ここでは、図-5に示す前列と後列に位置する杭と地盤を結ぶ水平方向バネの復元力は、杭と地盤間の相対変位が圧縮となる場合は受働土圧を、引張となる場合は受働土圧の1/2をそれぞれ上限値とした¹⁾。図-5に示す中央列の杭と地盤を結ぶ水平方向バネの復元力は、常に前列と後列の杭の背面に位置するため、杭と地盤間の相対変位が圧縮、引張にかかわらず受働土圧の1/2を上限值とした¹⁾。杭先端～支持地盤間の鉛直方向バネの復元力は、完全弾塑性型のバイリニアモデルで表した。復元力は、杭が押し込みとなる場合は地盤から決まる杭の極限支持力、杭が引抜きとなる場合は杭の軸引張耐力をそれぞれ上限値とした¹⁾。

減衰定数は、ひずみエネルギー比例減衰法で求めるものとし、ゴム支承、橋脚、杭にそれぞれ2%を与えた。基礎～地盤間バネに対しては逸散減衰を見込んで、A橋、B橋ともに20%とした。地盤は非線形復元力特性を見込んでモデル化しているため、また、フーチングは剛体変形するとモデル化しているため、それぞれ、減衰定数を0とした。以上のような減衰定数から、ひずみエネルギー比例減衰法によりモード減衰定数を求め、レイリー減衰により減衰力を与えた。レイリー減衰の2つの係数は、A橋では上部構造の橋軸方向振動が卓越する1次と基礎の回転が卓越する3次振動モード、B橋では上部構造の橋軸方向振動が卓越する1次と橋脚躯体や杭体の曲げ変形が卓越する4次振動モードに着目して定めた。

入力地震動としては、道路橋示方書のタイプⅡの標準波形を用いることとし、A橋に対してはⅡ種地盤用の標準波形（Ⅱ-Ⅱ-1）を、またB橋に対してはⅢ種地盤用の標準波形（Ⅱ-Ⅲ-1）を作用させた。耐震設計上の基盤面において入力地震動を与えるために、これらの波形をSHAKEにより基盤地震動に変換した。

4. 橋脚と基礎の非線形応答

(1) A橋の非線形応答

図-6は杭頭部、杭先端、地盤と杭間を結ぶ地盤バネの履歴を降伏耐力比 γ_y が2.36の場合について示したものである。地盤～杭間がわずかに非線形化している他は、杭には非線形応答は生じていない。これに対して、降伏耐力比 γ_y を1.05にすると上述した降伏耐力比 $\gamma_y=2.36$ の場合に比較して杭の非線形性は大きく増大する。図-

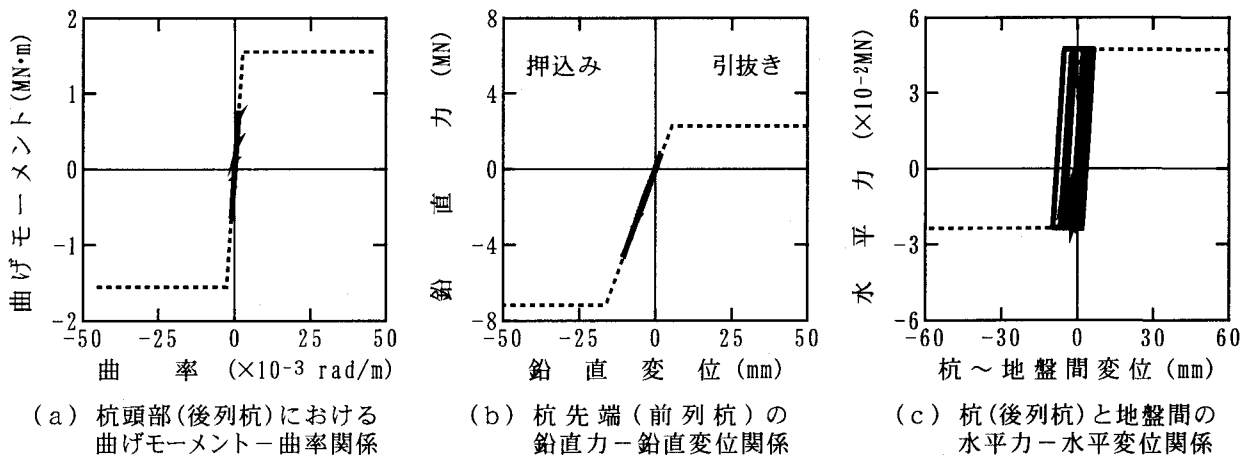


図-6 杭の応答履歴 (A橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 2.36$ の場合)

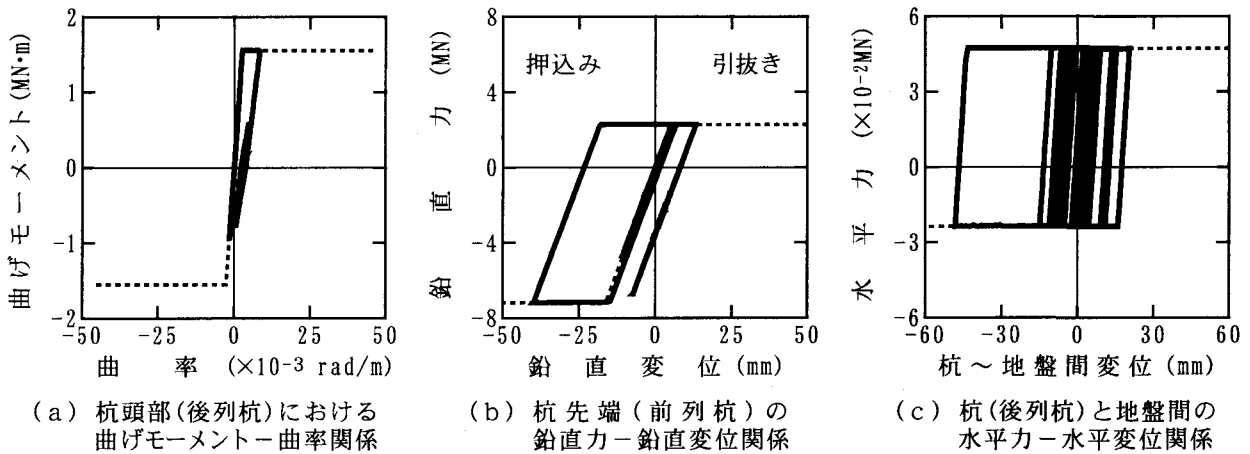


図-7 杭の応答履歴 (A橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 1.05$ の場合)

7は図-8と同じスタイルで杭頭部、杭先端、地盤と杭間を結ぶバネの履歴を示したものである。降伏耐力比 $\gamma_y = 2.36$ の場合には降伏していなかった杭が杭頭で塑性化するとともに、杭先端においては、押込み、引抜けともに非線形域に達している。引抜けは13mm程度であるのに対して、押込みは40mmに達している。静的なつり合いに基づけば、降伏耐力比 γ_y が1.0を上まわれれば杭には塑性化が生じないはずであるが、 $\gamma_y = 1.05$ においてもこのようにかなりの塑性化が生じる理由として、地盤変形の影響と減衰力の影響の2つが考えられる¹⁾。

(2) B橋の非線形応答

降伏耐力比 γ_y が2.19と大きい場合を対象に、杭頭部、杭先端、地盤と杭間を結ぶバネの履歴を示した結果が図-8である。上述したように、降伏耐力比 γ_y が2.19と大きければ、静的な力のつり合いに基づけば、大きな塑性

化は生じないはずであるにもかかわらず、杭頭にはわずかであるが塑性化が生じている。一方、図-9は降伏耐力比 γ_y を0.98とした場合の結果である。この場合には、基礎には大きな塑性化が生じている。

(3) 基礎に作用する地震力に及ぼす減衰力の影響

カンチレバー状の橋脚において、完全弾塑性型の履歴モデルを有する基部に塑性化が生じる場合を想定すると、静的な力のつり合いに基づく限りはフーチング上面には、橋脚の終局曲げモーメント M_u 、降伏水平震度 k_{hp} に相当する水平力 $k_{hp}(W_u + W_p)$ 以上の曲げモーメントやせん断力は作用しないはずである。しかし、非線形動的解析を行うと減衰力の寄与により、降伏耐力以上の慣性力が作用することになる¹⁾。今、橋を質量 m と減衰係数 c を有する1自由度系にモデル化した場合の非線形応答を考えると、減衰力を加えた橋脚基部に作用する慣性力は式(4)によって求められる。

$$m(\ddot{u} + \ddot{z}_g) = -c\dot{u} - f_R \quad (4)$$

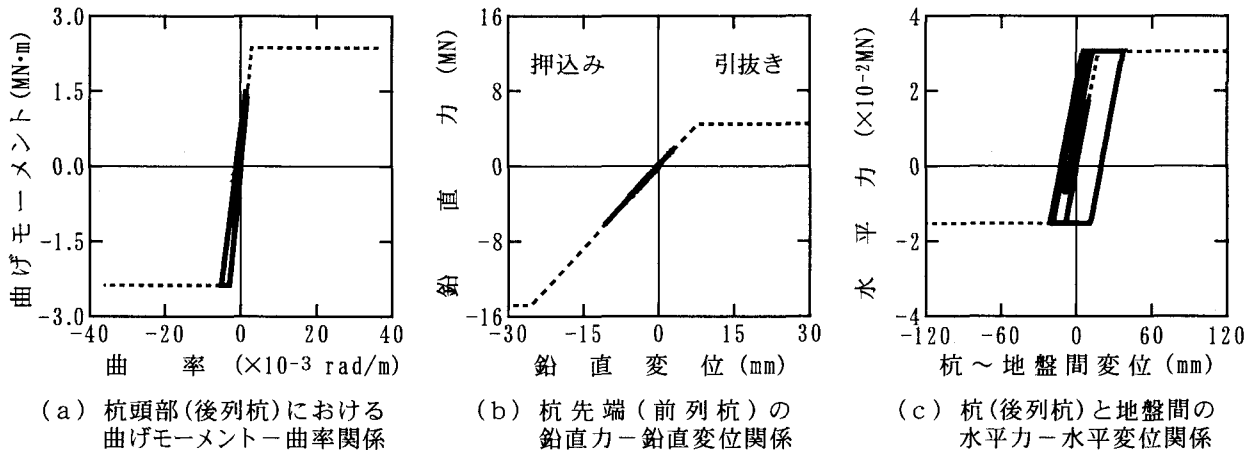


図-8 杭の応答履歴 (B 橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 2.19$ の場合)

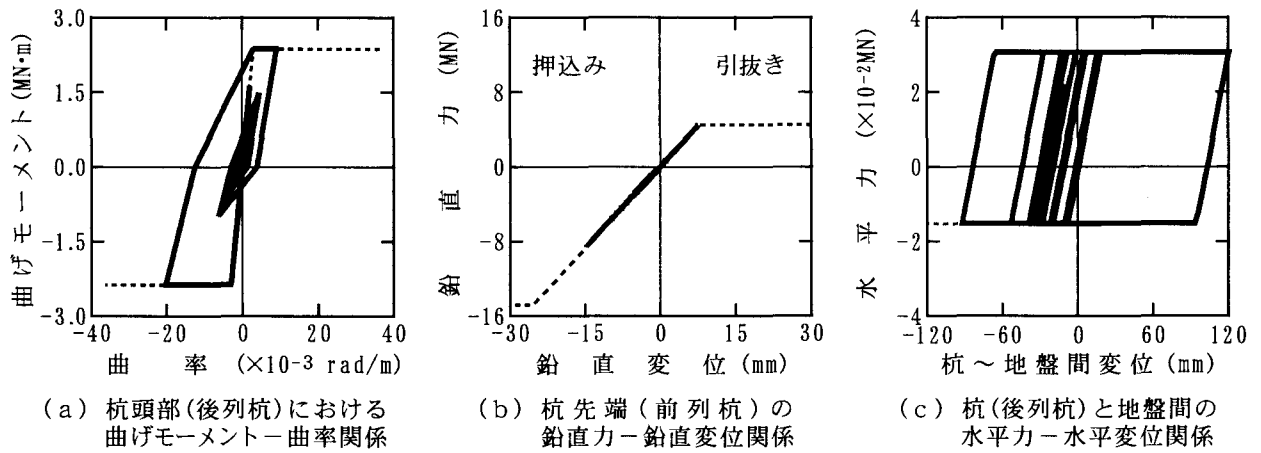


図-9 杭の応答履歴 (B 橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 0.98$ の場合)

ここで, $\ddot{u}, \dot{u}$ は 1 自由度系の相対加速度, 相対速度であり, $\ddot{z}_g$ は入力地震動加速度, f_R は橋脚の復元力である。

式(4)において, 完全弾塑性型の履歴モデルによる復元力が降伏水平耐力に達した場合, 慣性力 $m(\ddot{u} + \ddot{z}_g)$ は, 減衰力の寄与により降伏耐力よりも大きくなることからわかる。

そのため, ここでは式(3)による降伏耐力比 γ_y に加えて, 実際に非線形動的解析から求めた杭基礎(フーチング上面)に作用する水平力 F_{pym} をもとに次式のように修正降伏耐力比 γ_{ym} を定義する。

$$\gamma_{ym} = \frac{k_{hf}}{k_{hp}^*} \quad (5)$$

ここで, k_{hp}^* は F_{pym} に相当する橋脚の降伏震度(修正降伏震度と呼ぶ)で, 次式で与えられる。

$$k_{hp}^* = \frac{F_{pym}}{(W_U + W_p)} \quad (6)$$

以下, 式(5)で与えられる γ_{ym} を式(3)で与えられる降伏耐力比 γ_y と区別するために修正降伏耐力比と呼ぶ。

5. 修正降伏耐力比と杭基礎の塑性損傷度

(1) 杭基礎の塑性損傷度指標

杭基礎の損傷度を評価するために, ここでは, 塑性域の変形と杭基礎としての安定性に着目して以下の2つの指標に着目することとする。

a) 杭の曲率応答塑性率

杭に生じる最大応答曲率 ϕ_{max} , 杭の降伏曲率 ϕ_{Fy} に基づいて杭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$ を次のように定義する。

$$\mu_{F\phi} = \frac{\phi_{\max}}{\phi_{Fy}} \quad (7)$$

曲率応答塑性率は、杭の塑性化の度合いを直接的に表現する指標である。

b) 杭の軸方向の非線形度

ここでは回転型の崩壊モードに着目し、杭基礎としての安定性を評価する。杭に作用する鉛直力は、押込み（圧縮）側と引張側とで異なるため、押込み側については押込み力 P_{vC} と杭先端地盤の押込み耐力（極限支持力） P_{vyC} との比により杭先端押込み非線形度 γ_{vC} を、また、引張側については杭に作用する引張力 P_{vT} と杭の軸引張耐力 P_{vyT} との比により杭体引張非線形度 γ_{vT} を、それぞれ以下のように定義する。

$$\gamma_{vC} = \frac{P_{vC}}{P_{vyC}} ; \gamma_{vT} = \frac{P_{vT}}{P_{vyT}} \quad (8)$$

(2) 杭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$

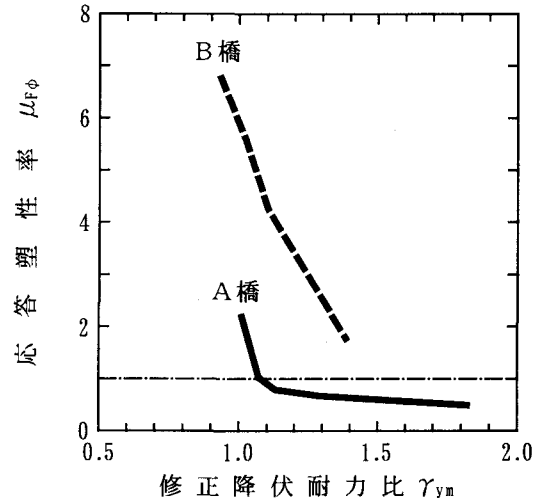
図-10 は杭頭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$ が、修正降伏耐力比 γ_{ym} によってどのように変化するかを示したものである。A 橋、B 橋ともに、杭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$ は、修正降伏耐力比 γ_{ym} が大きくなるに従い小さくなる。杭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$ が 1.0 以下になるのは、A 橋における前列杭と中央列の杭では γ_{ym} を 1.1 以上、後列杭では γ_{ym} を 1.3 以上とした場合である。同様に B 橋においては、A 橋よりももっと修正降伏耐力比 γ_{ym} を大きくしないと、杭の塑性化を抑えることができない。すなわち、曲率応答塑性率を 1.0 以下にするためには、中央列の杭では γ_{ym} を 1.4 以上としなければならないし、前列杭と後列杭では、 γ_{ym} を 1.4~1.5 以上としなければならない。

このように、杭の塑性化を抑えるためには、修正降伏耐力比 γ_{ym} を A 橋では 1.3 程度以上、B 橋では 1.5 程度以上としなければならない。A 橋よりも B 橋の方が大きな修正降伏耐力比が要求されるのは、A 橋よりも B 橋の方が軟質地盤が厚いため、地盤の変形の影響が大きいからである。

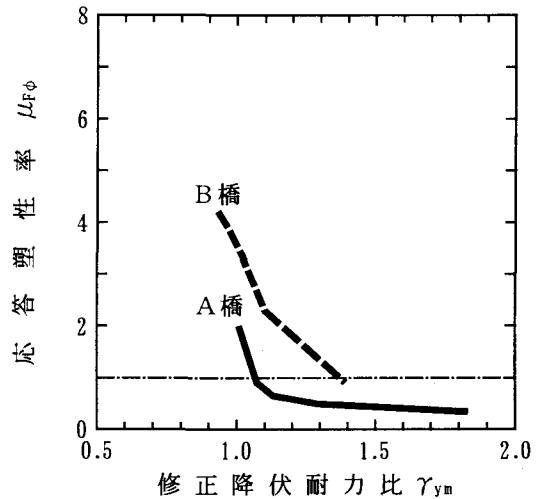
(3) 杭先端押込み非線形度 γ_{vC} および杭体引張非線形度 γ_{vT}

図-11 は杭の軸方向の非線形度 γ_{vC} 、 γ_{vT} が、修正降伏耐力比 γ_{ym} によってどのように変化するかを示したものである。修正降伏耐力比 γ_{ym} が大きくなれば、杭に作用する地震力が減少し、杭先端押込み非線形度 γ_{vC} および杭体引張非線形度 γ_{vT} は減少していく。

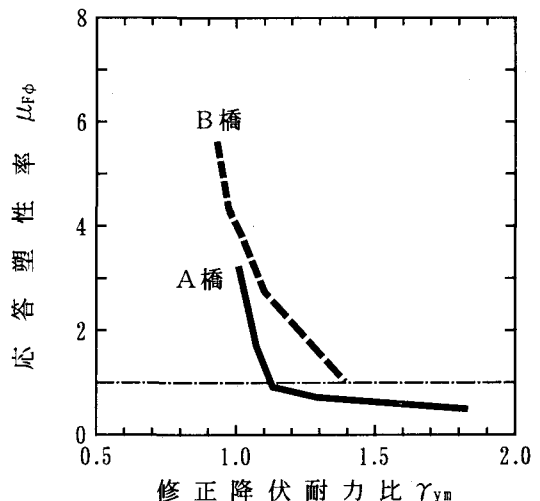
A 橋の場合には、杭先端における押込みや杭体引張による非線形化を生じさせないためには、修正降伏耐力



(a) 前 列 杭

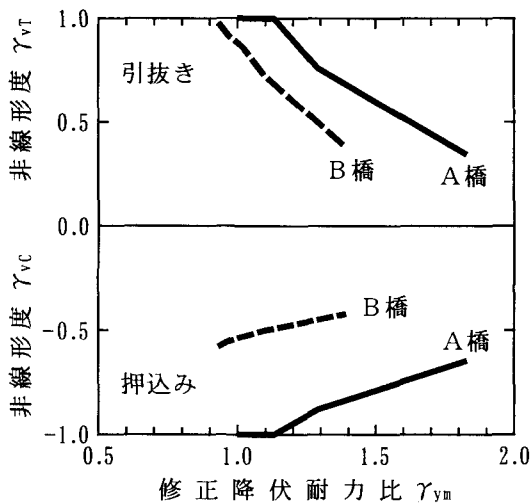


(b) 中 央 列 杭

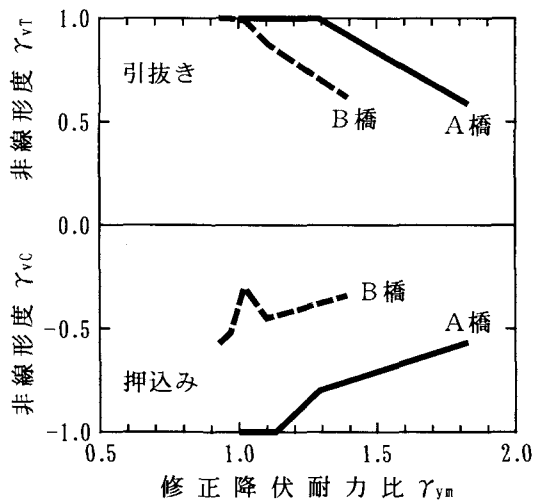


(c) 後 列 杭

図-10 修正降伏耐力比 γ_{ym} と杭の曲率応答塑性率



(a) 前 列 杭



(b) 後 列 杭

図-11 修正降伏耐力比 γ_{ym} と杭軸方向の非線形度

比 γ_{ym} を1.3程度以上としなければならない。B橋の場合には、修正降伏耐力比 γ_{ym} が0.97よりも小さいと杭体軸引張非線形度が1.0に達する場合もあるが、A橋に比較すると杭先端押込み非線形度 γ_{vc} 、杭体引張非線形度 γ_{vt} ともに小さく、修正降伏耐力比が1.0以上であればこれらはいずれも1.0以下となっている。これは、ここには示さなかったが、A橋ではフーチングの並進よりも回転によって桁に生じる変位が卓越するのに対して、軟質地盤の厚さが厚いB橋では基礎の水平変位によって杭に生じる変位が卓越するため、ロッキングに伴う杭の作用力が小さいためである。

6. 結 論

桁-RC橋脚-杭基礎系を対象として、橋脚と杭基礎

の降伏耐力比を変化させながら非線形動的解析を行い、橋脚の塑性化の度合いが杭基礎の非線形応答に与える影響や、橋脚と杭基礎の降伏耐力比と杭基礎の塑性損傷度の関係について明らかにした。本解析で得られた結果をまとめると次のとおりである。

(1) 動的解析においては、橋脚の降伏水平耐力に相当する水平力以上のせん断力がフーチング上面に作用する。このため、動的解析によって求められるフーチング上面に作用するせん断力を水平震度として表した値と杭基礎の降伏水平震度の比として式(5)により修正降伏耐力比を定義すれば、杭の各部に生じる塑性化の度合いをよく表すことができる。

(2) 杭の塑性化を抑えるためには、修正降伏耐力比 γ_{ym} を中程度の地盤(Ⅱ種地盤)中に設置されるA橋では1.3程度以上、軟質地盤(Ⅲ種地盤)中に設置されるB橋では1.5程度以上としなければならない。

(3) 杭先端における押込みや杭体引張による非線形化を生じさせないためには、修正降伏耐力比 γ_{ym} をフーチングの並進よりも回転によって桁に生じる変位が卓越するA橋では1.3程度以上、軟質地盤の厚さが厚く基礎の水平変位によって杭に生じる変位が卓越するため、ロッキングに伴う杭の作用力が小さいB橋では1.0以上であればよい。

参考文献

- 1) 矢部正明, 川島一彦: 杭基礎の非線形地震応答特性とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究, 土木学会論文集投稿中
- 2) 矢部正明, 川島一彦: 橋脚と杭の降伏耐力比が杭基礎の塑性損傷に及ぼす影響, 土木学会論文集投稿中
- 3) 木村嘉富, 大越盛幸, 中野正則, 福井次郎, 横山功一: 杭基礎の変形性能に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1597~1606, 1998.
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編, V耐震設計編, 1996.
- 5) (社)日本道路協会: 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.
- 6) Priestley, M.J.N, Seible, F. and Calvi, G.M.: Seismic Design and Retrofit of Bridges, John Wiley & Sons, Inc., 1996., 川島一彦 監訳: 橋梁の耐震設計と耐震補強, 技報堂, 1998.
- 7) 矢部正明, 川島一彦: 杭基礎の非線形地震応答特性とプッシュオーバーアナリシスによる解析法に関する研究, Report No. TIT/EERG98-4, 1998.
- 8) 矢部正明, 川島一彦: 橋脚と杭の降伏耐力比が杭基礎の塑性損傷に及ぼす影響, Report No. TIT/EERG98-10, 1998.