

橋脚と杭基礎の降伏耐力の比と杭基礎に生じる塑性損傷度の関係

矢部正明¹・川島一彦²

¹正会員 工学博士 株式会社長大 (〒305-0821 茨城県つくば市春日 3-22-6, 研究当時東京工業大学博士後期課程在学)

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)

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。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、杭基礎に生じる損傷度のある限定された範囲に抑えることができるかが重要である。本研究は、2種類の杭基礎に対して非線形動的解析により、杭基礎の地震時保有耐力と橋脚の地震時保有耐力の比として定義される修正降伏耐力比と杭基礎の塑性損傷度との関係を検討したものである。

Key Words : Ductility design method, Dynamic response analysis, Column-foundation interaction

1. まえがき

橋脚の降伏水平耐力に基づく杭基礎の耐震設計では、杭基礎に作用させる地震力として、橋脚の降伏水平耐力に相当する水平力や曲げモーメントにある割増しを加えた地震力が用いられている。これは、強震動下における杭基礎の損傷を抑えるための配慮であり、平成8年の道路橋示方書では割増し係数として1.1が用いられている。しかし、割増し係数がどの程度であればよいに関しては、十分検討された研究はない。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

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。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Ⅱ種地盤（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Ⅲ種地盤（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。道路橋示方書によれば、いずれの地盤においても液状化や流動化は生じないと判定される。

A橋、B橋ともに、径1.2mの現場打ち杭3列@3本＝9本から構成される杭基礎で支持されている。杭長はA橋では14.9m、B橋では30.4mである。杭基礎の降伏震度 k_{hf} は、A橋では0.85、B橋では0.79となる。

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することになる。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。曲げ破壊先行型となるように耐震設計された橋脚の降伏水平震度 k_{hp} は、0.36～0.81となる。

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。

$$\gamma_y = k_{hf} / k_{hp} \quad (1)$$

このようにすると、降伏耐力比 γ_y は1.05～2.36（A橋の場合）、0.98～2.19（B橋の場合）となる。

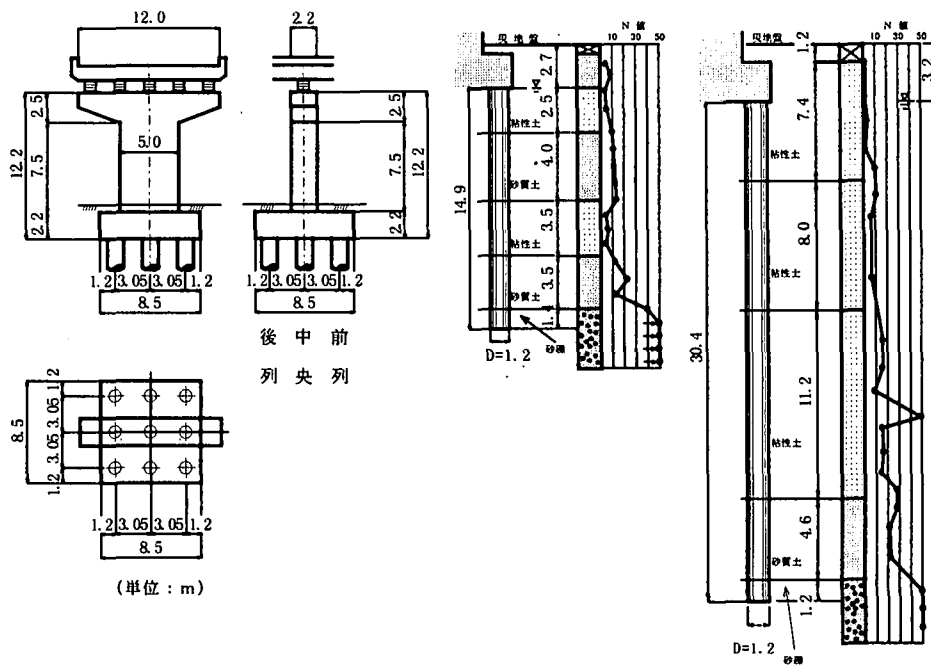


図-1 対象とした橋脚・杭基礎と地盤条件

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-2 に示すようにモデル化した。積層ゴム支承は線形せん断バネによってモデル化した。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本の杭をまとめることとし、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。地盤は、基礎の影響を受けない自然地盤として1次元の非線形せん断バネモデルによって表した。

橋脚の塑性ヒンジ区間における曲げモーメント M ～回転角 θ の履歴、杭の曲げモーメント M ～曲率 ϕ の履歴は、ひびわれ点を無視した剛性低下型の Takeda モデルで表した。フーチング前面～地盤間の水平力 P_F ～水平変位 δ_F の履歴はフーチングと周辺地盤の間に生じる剥離を考慮したスリップ型のバイリニアモデル、杭先端～支持地盤間の鉛直力 P_v ～鉛直変位 δ_v の履歴、杭～地盤間の水平力 P_H ～水平変位 δ_H の履歴は完全弾塑性型のバイリニアモデルでそれぞれ表した。周辺地盤のせん断応力 τ ～せん断ひずみ γ の履歴は、Hardin-Drnevich 型の双曲線モデルによって表した。

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

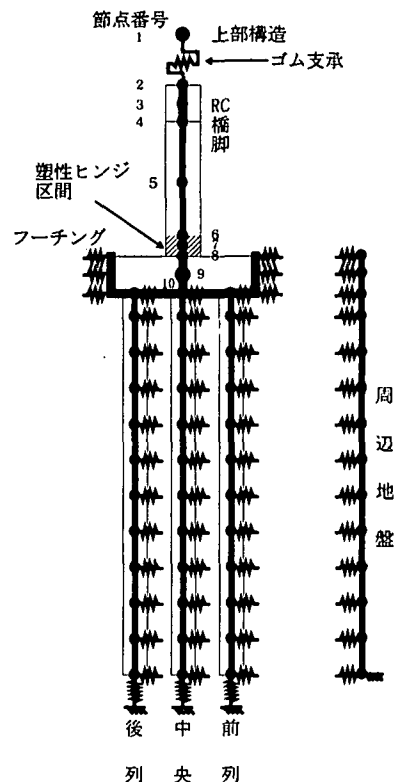


図-2 RC 橋脚-杭基礎-周辺地盤系の解析モデル

橋ともに 20%とした。地盤、フーチングは、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。

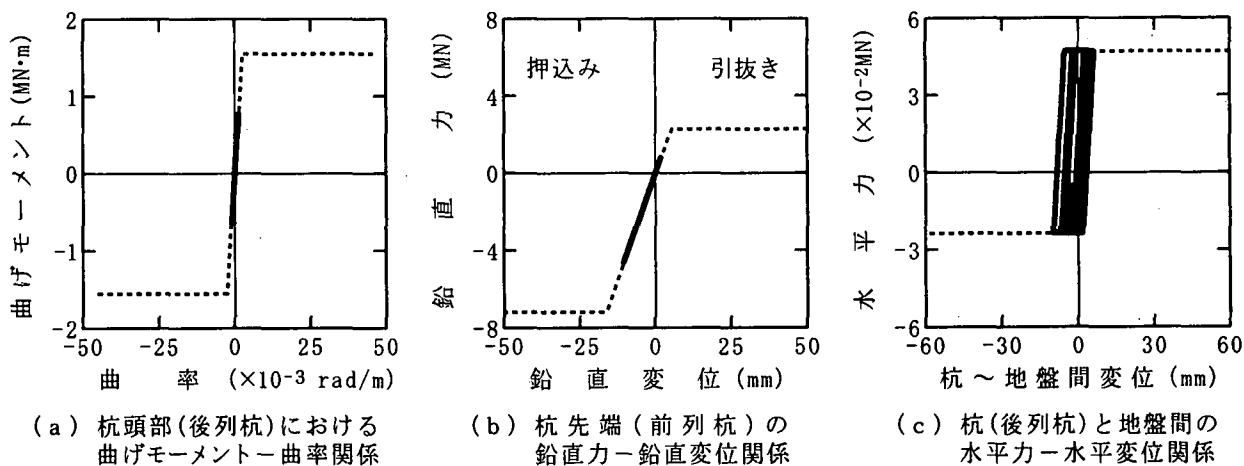


図-3 杭基礎の応答履歴 (A 橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 2.36$ の場合)

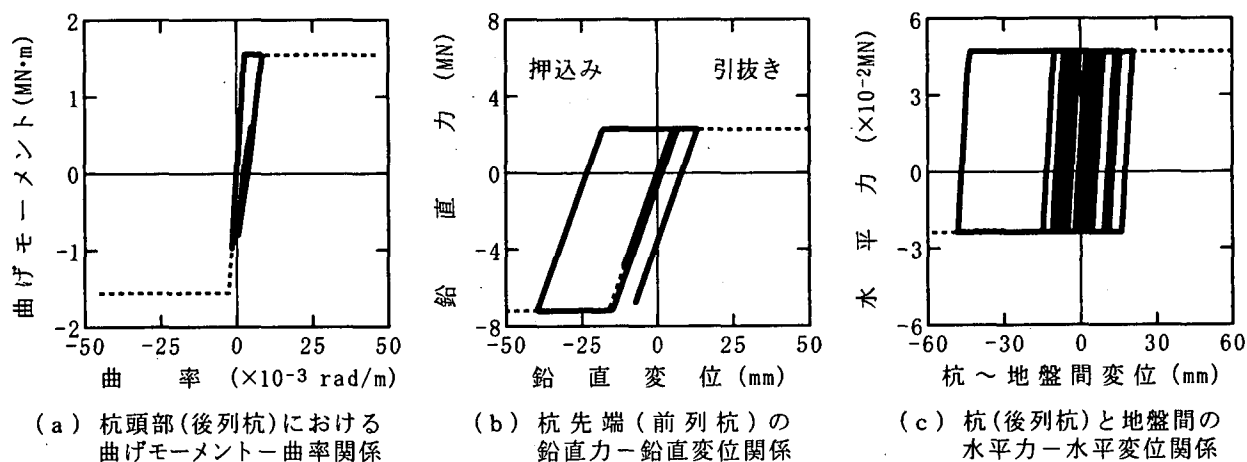


図-4 杭基礎の応答履歴 (A 橋, 降伏耐力比 $\gamma_y = 1.05$ の場合)

入力地震動としては、道路橋示方書のタイプⅡ地震動の標準波形を用いることとし、A 橋に対しては標準波形Ⅱ-Ⅱ-1 を、B 橋に対しては標準波形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、これらの波形が図-1(b), (c)に示した地盤の地表面上で観測されたものとしてみなして、SHAKEによりそれぞれの地盤における基盤地震動に変換した。

4. 杭基礎の非線形応答

図-3 は杭頭部、杭先端、地盤と杭間を結ぶ地盤バネの履歴を、A 橋の降伏耐力比 γ_y が 2.36 の場合について示したものである。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-4 は図-3 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い杭が杭頭で塑性化するとともに、杭先端においては、押し込み、引抜けと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、押し込みは 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、静的な慣性力の分布と、減衰力の影響や応答加速度分布の影響を受ける動的な慣性力の分布の違いが考えられる。これについては後述する。

ここには示さなかったが、B 橋においても、修正降伏耐力比 γ_y が小さくなるにつれて杭基礎に生じる非線形応答は大きくなる傾向にある。

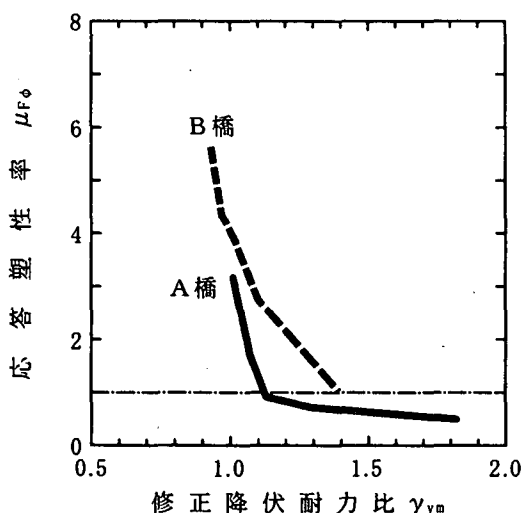


図-5 修正降伏耐力比 γ_{ym} と後列杭の曲率応答塑性率

5. 修正降伏耐力比と杭基礎の塑性損傷度

完全弾塑性型の履歴モデルを有する橋脚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、橋脚の降伏水平震度 k_{hp} に相当する曲げモーメントやせん断力よりも大きな地震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これ以上の地震力が作用し、この原因が減衰力であることが既往の研究より報告されている。そのため、ここでは、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} の最大応答値 $F_{pym}^{\max}$ より、橋脚の応答震度 $k_{hp}^* = F_{pym}^{\max} / (W_U + W_p)$ を求める。ここで、 W_U ；地震時に支持するべき上部構造重量、 W_p ；橋脚躯体重量である。そして、式(1)による降伏耐力比 γ_y に加えて、次式のように修正降伏耐力比 γ_{ym} を定義する。

$$\gamma_{ym} = k_{hf} / k_{hp}^* \quad (2)$$

図-5は後列杭の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。耐震設計上は、修正降伏耐力比 γ_{ym} をどの程度大きくすれば、杭の塑性化を抑えられるかが重要である。杭の曲率応答塑性率 $\mu_{F\phi}$ が1.0以下になるのは、A橋の後列杭では γ_{ym} を1.3以上とした場合、同様にB橋の後列杭では γ_{ym} を1.4～1.5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。

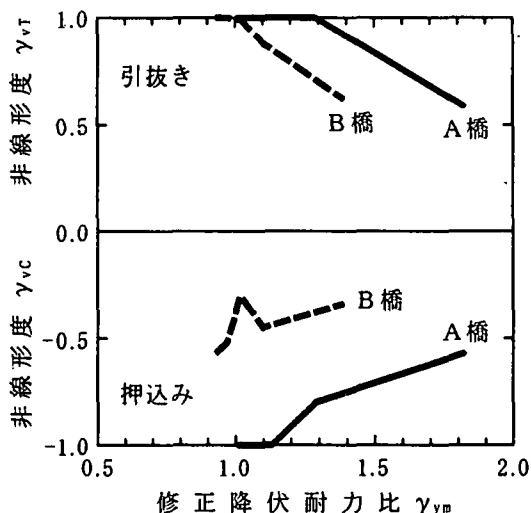


図-6 修正降伏耐力比 γ_{ym} と後列杭の杭軸方向非線形度

図-6は後列杭の杭先端に生じる軸力を軸圧縮耐力、軸引張耐力で除した杭軸方向非線形度 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 γ_{vt} 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、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非線形動的解析を行い、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。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(2)により修正降伏耐力比を定義すれば、橋脚や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。