

基礎－橋脚系のシステム挙動評価

足立 幸郎¹・運上 茂樹²

¹正会員 工修 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

²正会員 工博 建設省土木研究所 耐震技術研究センター 耐震研究室 (〒305 茨城県つくば市旭1番地)

平成7年1月に発生した兵庫県南部地震により数多くの道路橋が被災した。このような被災経験に基づくと、従来の道路橋の耐震設計は、上部構造、支承、下部構造、基礎構造などの構造部材別に行われてきたために、橋梁全体としてどのような耐震性を有しているかという観点で十分ではなかったことが1つの問題点として挙げられている。ここでは、道路橋の系統的な地震時挙動に着目した検討を行うために、兵庫県南部地震の被災橋のなかで特に基礎と橋脚の被災関係に着目した分析を行った。さらに基礎－橋脚のシステムとしての地震応答解析により、系統的な地震時挙動を検討した。その結果、基礎－橋脚系の剛性比や耐力比が全体システム挙動に大きく影響を与えることが明らかとなった。

Key words: System behavior, Foundation-structure interaction, Highway bridges, Seismic design

1. はじめに

橋脚のじん性率は降伏変位と終局変位の比で定義されるが、基礎の変形が大きくなるような場合には、基礎の変位を含めて基礎－橋脚系全体のシステムじん性率を評価する必要がある、例えば次式のように定義することが出来る⁽¹⁾。

$$\mu_S = (\delta_{F(P_u)} + \delta_{P_u}) / (\delta_{F(P_y)} + \delta_{P_y}) \quad (1)$$

ここに、 μ_S : システムのじん性率

δ_{P_u} 、 δ_{P_y} : 橋脚の終局・降伏時の変位

$\delta_{F(P_u)}$ 、 $\delta_{F(P_y)}$: 橋脚終局・降伏時の基礎変位

式(1)の示すことは、基礎－橋脚系全体のシステムのじん性率を考えた場合は、同じ耐震性を有する橋脚であっても基礎の剛性によってシステムのじん性率は変化を受けることになる。しかしながら、式(1)は静的なシステムの荷重－変位関係に基づいたものであるため、動的な効果例えば減衰効果や連成応答などは考慮されていない。ここでは実際のシステムの応答特性を検討するため、単純なモデルを用いたシステムの応答特性をパラメトリックな動的解析によって検討を行った。

2. 被災道路橋に対する系統的検討

阪神高速道路3号神戸線での基礎－橋脚系の被災傾向を、単柱橋脚でかつ基礎の被災程度を調査したもの限定して、降伏剛性比、降伏耐力比および被災傾向について整理したものが図-1、2である。図中、橋脚の被災はA s (倒壊崩壊程度) からD (構造的に無被害) の5段階に、基礎の被災はC (小さな曲げひび割れ) からD (損傷がなし、または軽微な曲げひび割れ) に分類している。基礎被災のEは損傷のないものを特に示している。図-1からは、Cランクの基礎の被災は、耐力比に対してはこれといった関係はみられないが、剛性比が小さい領域に多く分布している傾向が見られる。一方、図-2の橋脚の被災においては、大きな橋脚の被災は剛性比、耐力比等に偏りなく散らばっており、式(1)にあるような静的なシステムじん性に関する考察のみでは、システムとしての被災傾向を説明することは難しいことがわかる。また、これらの図からは、阪神高速道路3号神戸線のようなⅡ種地盤上において震度法によって設計された基礎－橋脚系は、一般的に耐力比にして2～7倍かつ剛性比にして1～3倍程度に分布していることが統計的にわかる。

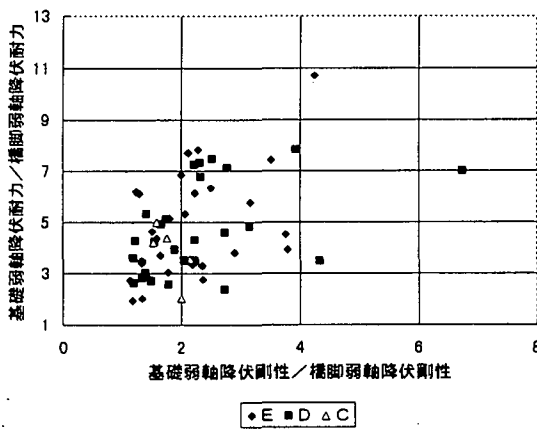


図-1 基礎-橋脚系の被災傾向（基礎被災に着目）

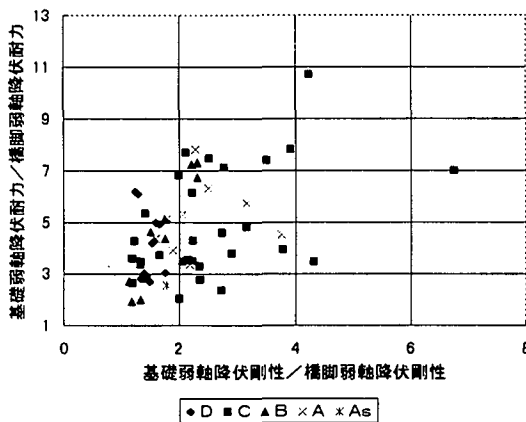


図-2 基礎-橋脚系の被災傾向（橋脚被災に着目）

3. 基礎-橋脚系システムのモデル化

式(1)に示したように基礎の剛性が比較的小さいときにシステムの応答の変化が現れると考え、軟弱地盤上に建設された道路橋を対象として、図-3に示すような2質点系の基礎-橋脚系のモデル化を行って、システムの地震応答特性を検討した。このケースは図-4に示されるように、比較的基础と橋脚の剛性・耐力とも近接している場合を基本ケースとしたことになる。橋脚の非線形履歴特性は武藤モデル、基礎は復旧仕様に基づいたP- δ 解析結果を近似する修正Hardin-Dernevich型曲線モデルを用いている。入力地震波として観測された原波をL2-Type II型III種地盤応答スペクトルに適合するよう振幅調整したポートアイランド波、東神戸大橋波を使用した。パラメトリック解析は、橋脚の剛性・耐力を固定し、基礎の剛性・耐力を変化させ、様々な耐力比、剛性比における応答特性を計算した。なお、ここで示す耐力・剛性は降伏時のものを表わし、

比で表示する場合は、基礎のそれを分子にしている。式(1)で定義されるシステムのじん性率を図-5に示す。システムのじん性率が基礎剛性によって大きく変化することがわかる。

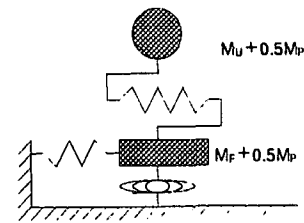


図-3 基礎-橋脚系のモデル化

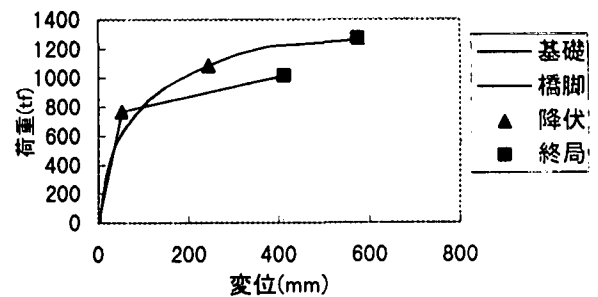


図-4 モデルとした基礎-橋脚系のP- δ 関係

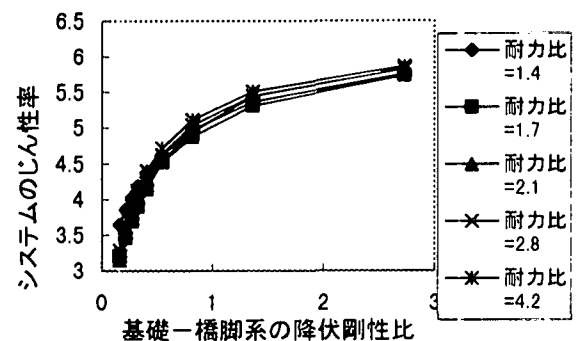


図-5 モデルとした基礎-橋脚系のシステムじん性率

4. 基礎-橋脚系の地震応答特性

図-6にはポートアイランド波を用いたときの上部構造応答加速度の変化を示す。基礎-橋脚系の剛性比が小さくつ耐力比が小さい場合においては、応答が低減していることがわかる。また耐力比によっても上部構造応答に変化が現れてきているのは、基礎の履歴応答を修正Hardin-Dernevichモデルを用いているためで

あり、降伏剛性と初期剛性とは大きな差があり、耐力比が大きい場合には、その違いが応答値に影響を与えるためである。いずれにせよ、式(1)のような静的な考え方の他に動的効果を取り入れた考察が必要であることが理解される。

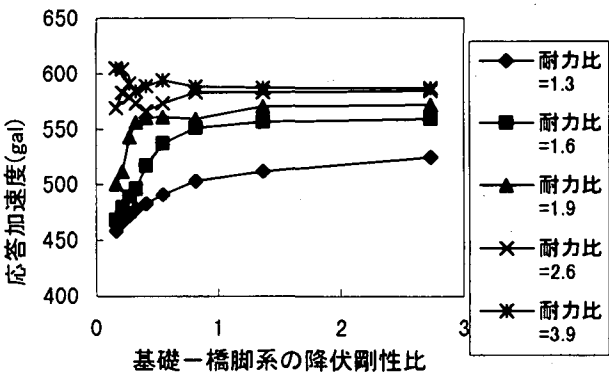


図-6 基礎-橋脚の剛性・耐力比による上部工の応答加速度

図-7は、東神戸大橋波における応答解析において、システム全体における総履歴吸収エネルギーにおいて基礎-橋脚における履歴吸収エネルギーの分担比を示したものである。耐力比や剛性比が大きくなるにつれて、システムへの履歴吸収エネルギーに占める橋脚の分担率が大きくなる傾向が見られる。基礎の剛性が小さくなるにつれて基礎に入力されるエネルギー量が大きくなっていることもあるが、基礎および橋脚においてエネルギー吸収絶対量の分担があることは確かである。したがって、図-6において、剛性比が小さい場合において見られる応答の低減は、主に連成応答によるものと類推される。

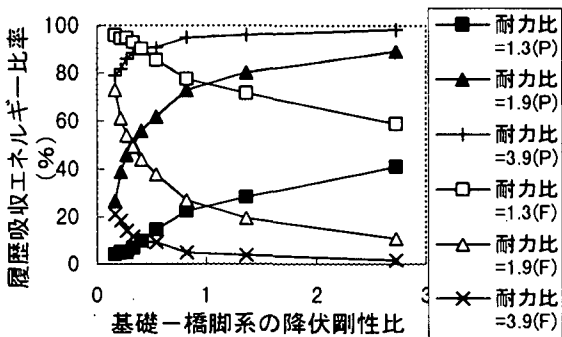


図-7 履歴吸収エネルギーの基礎橋脚分担比率
(東神戸大橋波)

以上を総合的に考察する限り、基礎-橋脚系のシステム応答は、基礎と橋脚の剛性比が小さい領域におい

てみられ、基礎の耐力がおおむね橋脚の2倍以上、または剛性比にして1.5～2倍以上の差がある場合は、橋脚へ集中してエネルギーが吸収され、連成応答の影響は無視できることがわかる。

これまでⅡ種地盤上に震度法によって設計されてきた橋脚-基礎系は、統計的に耐力比にして2～7倍かつ剛性比にして1～3倍程度となっていることは前にも示したとおりであるが、図-6、7に示されるように橋脚にエネルギーが集中する領域にあったことがわかる。阪神高速道路3号神戸線においては基礎への被害が少なかったことが報告されているが、このような耐力比、剛性比が大きく離れていたことが原因の一つと考えられる。

5. システム挙動の評価に関する検討

(1)基礎質量を無視した場合のシステム挙動

式(1)が示すシステムのじん性の評価法は、ある意味では基礎質量を無視したシステムのじん性評価手法と解釈ができる。したがって、上部構造-(橋脚+基礎バネ)系の応答との比較検討を行い、基礎質量を考慮した場合との応答特性の差の検討を行った。

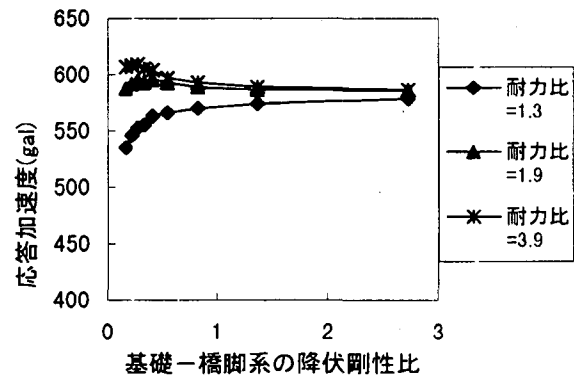


図-8 基礎質量を無視した場合の上部工の応答加速度の変化(ポートアイランド波)

図-8に基礎質量を無視した場合における、修正ポートアイランド波における上部工の最大応答加速度と基礎-橋脚系の剛性・耐力比の関係を示す。この場合、極端に基礎剛性が小さい場合を除き、ほぼ応答値が一定している。図-6と比較した場合、やはり耐力比が2倍以上、剛性比が1.5～2倍以上の場合、ほぼ同等の応答値を示しており、上記場合においては、基礎

質量を無視した1自由度系に簡略化した評価が可能であることがわかる。

(2) システムの減衰定数とシステム応答

非線形時刻歴応答解析によって得られた上部工の最大応答加速度と、システムの減衰定数別補正係数 $C_D^{(2)}$ との関係を整理したものが図-9である。ここでシステムの減衰定数別補正係数は、慣性力作用位置に橋脚の終局荷重を作用させた場合の変位における、定常状態を仮定した場合における橋脚および基礎の減衰を基に、ひずみ比例型でシステムの減衰定数を算出したものである。

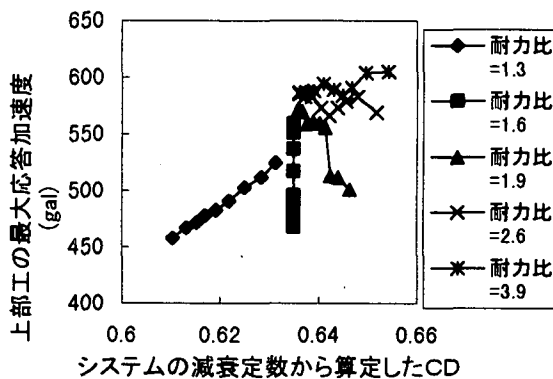


図-9 システムの減衰定数から算定した減衰定数別
応答低減係数 C_D と上部工の最大応答加速度
(ポートアイランド波)

図-9より明らかなように、システムの減衰定数から求める減衰定数別補正係数はほぼ同じ値を示しており、このことから等価減衰等の手法を用いたシステムの応答を推定することは難しいことがわかる。

(3) システムのじん性率とシステム応答

式(1)を用いたシステムのじん性率によりシステムの応答特性を評価することを試みたものが図-10である。ここでは、橋脚が終局となるときシステムのじん性率を用いてエネルギー一定則を用いた応答補正指標 $(1/2\sqrt{2\mu_s-1})$ と、システムの上部構造の応答加速度との対応をみたものである。剛性比が小さい場合は応答補正指標は大きくなり、逆も同様である。システムのじん性率によるエネルギー一定則が成り立つならば、左下がりの曲線を描くはずであるが、計算結果では逆の傾向にある。

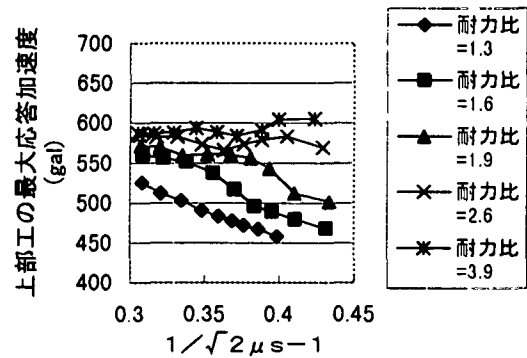


図-10 システムのじん性率から算定した応答低
減係数とのシステム応答との関係

4. 結論

マクロ的に道路橋の基礎-橋脚系のシステム応答特性として以下のことがまとめられる。

- ①兵庫県南部地震における基礎の被災は、明確ではないが、基礎-橋脚系の剛性比に近い領域に見られる。
- ②基礎-橋脚系の地震応答解析結果によれば、橋脚の剛性に比較して基礎の剛性が小さい場合、連成応答が顕著になり、応答が低減する。また基礎の耐力が橋脚の耐力と非常に近い場合も同様な傾向にある。
- ③基礎-橋脚の剛性比が約1.5~2倍以上、耐力比が2倍以上ある場合には、基礎質量を無視した1自由度系の応答とほぼ等しい。
- ④1自由度系に基づいた等価線形やエネルギー一定則等の手法ではシステムの応答特性の表現は難しい。

5. おわりに

今回の試算結果で、部材を中心とした静的なじん性率の考察のみだけではシステムの耐震挙動が説明できないことが明らかになった。キャパシティデザインは主たる非線形性が1部材に集中することが重要であり、このような慣性力相互作用について検討していく予定である。

【参考文献】

- 1) Priestlyら、「Seismic design and retrofit of bridges」、Wiley、1995
- 2) 日本道路協会、「道路橋示方書第V編耐震設計編」、1996、1