基盤入力を用いた地震応答解析で得られた 地盤-橋系の地震応答特性の分析

石井 洋輔¹·片岡 正次郎²

¹正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地) E-mail: ishii-y92ta@mlit.go.jp

²正会員 国土技術政策総合研究所 道路地震防災研究室長(〒305-0804 茨城県つくば市旭1番地) E-mail: kataoka-s92rc@mlit.go.jp

本論文では、道路橋と周辺地盤を一体とした照査手法の提案に向け、限られた地盤調査結果と地震応答 記録を基に地震応答解析を行い、道路橋と周辺地盤を一体とした地震応答解析を行う際の留意点を考察し た.まず、地盤と橋を一体とした動的解析手法の再現性の検証を行うため、震度3相当の実測記録を用い た地震応答解析を行った.解析で得られた値は実測値と概ね一致し、本論文で取り扱った解析手法は実際 の道路橋の地震応答をある程度再現できていることが分かった.次に、再現性を検証した解析手法を用い て、レベル2地震動相当の地震動を入力し、橋脚や杭の応答を確認した.その結果、橋脚の応答は限界状 態1に至っておらず、杭の曲率は終局曲率の60~70%であった.

Key Words: soil-structure interaction, earthquake observation record, earthquake response, highway bridge

1. はじめに

橋梁の基礎構造物の耐震設計および耐震補強設計は, 地盤との動的相互作用を性能照査に取り入れることで, 合理的な設計が可能となるものがある.これは,橋梁の 基礎構造物に地震動が作用する際,入力損失効果が確認 されており¹⁾,基礎構造物と周辺地盤の動的相互作用が 働くことで,構造物に作用する地震動が低減する効果を 期待するものである.道路橋示方書・同解説では,地盤 を一体とした照査法は確立されておらず,道路橋と地盤 を一体とした動的解析手法を規定するためには,入力地 震動の設定法やモデル化の手法など,照査手法を確立す る必要がある.

橋梁の基礎構造物と地盤の動的相互作用を考慮できる 動的解析手法の一つに、周辺地盤と構造物を一体のモデ ルとし、工学的基盤面に地震動を入力する解析手法³⁾ (以下、「地盤-橋系の地震応答解析」という.)があ る.この解析手法は、周辺地盤一体をモデル化すること から、入力損失効果が自動的に考慮され³⁾、より合理的 な設計が可能になると考えられる.道路橋では、地盤と の動的相互作用に関する検討は行われてきたものの^{例えば 4,6}、いずれの検討も基礎構造物のモデル化に着目して 解析を実施したものであり,実際の道路橋と地盤を一体 としてとらえた際の上部構造や地盤の応答の再現性は, 十分には検証されていない.

平成29年道路橋示方書・同解説V耐震設計編[¬]では, 非線形時刻歴応答解析を行う際は,モデル化が適切であ るかどうかを確認するのが良いとされており[¬],解析手 法の再現性を確認した上で解析結果を吟味することが重 要である.そこで本検討では,国総研で強震観測をして いる道路橋を対象にし,応答記録を用いて解析再現性の 確認を行った.

本検討は、まず、地盤-橋系の地震応答解析手法の再 現性を確認するため、解析対象となる道路橋(以下、

「対象橋」という.)で得られた地震記録を入力地震動 とした地震応答解析を行い,実測された構造物の応答値 と解析値を比較した.その後,解析モデルの橋脚部分に 非線形性を考慮し,基盤面にレベル2地震動相当の地震 動を入力する地盤ー橋系の地震応答解析を実施した.解 析より,杭や上部構造の応答値,周辺地盤の応答値と最 大せん断ひずみを算出した.地盤ー橋系の地震応答解析 結果を踏まえ,地盤ー橋系で解析を行う際の留意点を考 察した.



図-1 検討対象とした道路橋の概要図



図-2 地盤-橋系の地震応答解析に用いる解析モデル(右側省略)

	表-1 対象と	:した道路橋の諸元			
橋梁形式		鋼5径間連続鋼床版2主桁橋			
地盤種別		III種地盤			
供用開始		2003年			
P8 橋脚の構成					
	支承	積層ゴム支承			
	橋脚	RC橋脚			
	基礎構造	場所打ち杭			
解析条件					
	上部構造重量	4,820 (kN)			
	橋脚柱重量	1,791 (kN)			
	フーチング重量	3,457 (kN)			
	支承条件	固定			



図-3 橋脚のモデル化

線形はり要素 初期剛性:コンクリート

塑性ヒンジ区間

Ш

非線形はり要素 初期剛性:降伏剛性

総断面剛性

2. 対象構造物および周辺地盤のモデル

本検討は、解析手法の再現性を確認するため、強震観 測を実施しており、杭基礎を有する鋼5径間連続鋼床版 2 主桁の道路橋を対象とした. この道路橋の地盤と橋脚 で同時に地震観測を実施している P8 橋脚を地盤-橋系 の地震応答解析の対象とした. 対象橋の概要図を図-1に 示し、道路橋の諸元を表-1 に示す. この P8 橋脚を対象 に、周辺地盤-基礎構造-橋脚-上部構造系の動的解析 モデル(以下、「解析モデル」という.)を作成した. 解析モデルを図-2に示す. 解析モデルは、地盤は平面ひ ずみ要素でモデル化し、地盤の水平方向の広がりは基盤 面までの深さの2倍とした.橋の上部構造は線形はり要素、フーチングは線形はり要素、杭は道路橋の耐震設計で使用頻度の高いファイバー要素⁸でモデル化した.なお、解析モデルは2次元であり、橋軸直角方向を検討対象方向とした一方向入力である.支承は固定であり、本検討は、橋軸直角方向を対象としたためモデル化をしなかった.

対象橋は、耐震設計上の地盤種別^かで III 種地盤に分類 される地盤に架橋されており、P8 橋脚に位置する地質 の分類は、図-2 に示すとおりである.3 層目、6 層目、9 層目に砂質土に分類される軟弱地盤の層が確認されてい



図4 杭のモデル化



図-5 R-Oモデルのフィッティングの例

る. 基盤面は 11 層目の底面に位置し、約 80m 付近で N 値 50 を示している.

図-3 に非線形性を考慮した橋脚のモデルを示す.橋脚の非線形性は、平成 14 年道路橋示方書・同解説V耐 震設計編の参考資料⁹に記載された、式(1)~(3)を基にモ デル化した.具体的には、P-δ関係から求められるMø関係を塑性ヒンジ部に考慮し、塑性ヒンジ部以外はコ ンクリート総断面剛性の2次元線形はり要素とした.塑 性ヒンジ長は、平成14年道路橋示方書⁹の算出方法で求 めた. なお、橋脚柱部の塑性ヒンジ区間の非線形性は、 完全バイリニア型のTakedaモデルを用いた.

$$M_y = P_y \left(h - \frac{L_p}{2} \right) \tag{1}$$

$$\phi_y = \left(\frac{\delta_{py}}{h - L_p/2}\right) / L_p \tag{2}$$

 M_v : 非線形はり要素中央の降伏曲げモーメント(N・mm)

表-2 各層の地盤のパラメータ

		初期せん断 弾性係数 G ₀	基準ひずみ ン [,]	最大減衰定 数 h _{max}
		(kN/m ²)		
第1層	粘性土	1.531×10^{4}	8.2242×10 ⁵	0.200
第2層	粘性土	2.033×10^{4}	2.2399×104	0.200
第3層	砂質土	3.175×10^{4}	2.6900×10^{4}	0.290
第4層	粘性土	2.842×10^{4}	1.2886×10^{-3}	0.200
第5層	粘性土	3.895×104	1.6358×10^{-3}	0.200
第6層	砂質土	3.585×104	6.1249×10 ⁴	0.280
第7層	粘性土	6.168×10^{4}	2.1821×10^{-3}	0.200
第8層	粘性土	9.075×10^{4}	2.5061×10^{3}	0.200
第9層	砂質土	8.003×10^{4}	1.1001×10^{3}	0.270
第10層	粘性土	9.402×104	2.9052×10^{3}	0.200
第11層	粘性土	1.561×10 ⁵	9.5639×104	0.264

- P_v:橋脚の降伏水平耐力(N)
- h:橋脚基部から上部構造の慣性力作用位置までの距離(mm)

 L_p : 塑性ヒンジ長(mm)

- ϕ_v :非線形はり要素中央の降伏曲率(l/mm)
- δ_p: 降伏変位のうち塑性ヒンジ領域の弾性変形によって上部構造の 慣性力作用位置に生じる水平変位(mm)

$$\delta_{P} = \delta_{y} - \delta_{ey} \tag{3}$$

 δ_y :降伏水平変位(mm)

 δ_{ey} : 塑性ヒンジ区間以外の脚中部の弾性変形によって上部構造の慣性力の作用位置に生じる水平変位 (mm)

図4に非線形を考慮した杭のモデルを示す. 杭は、フ ァイバー要素を用い, コアコンクリートとかぶりコンク リート,軸方向鉄筋の3要素に分けてモデル化した.な お、コンクリートの応力度-ひずみ関係は、通常の設計 での考え方と同様に考え、かぶり・コアコンクリート共 に拘束効果の影響を考慮した応力-ひずみ関係を用いた. コンクリートの応力度-ひずみ関係は指数関数型,軸方 向鉄筋の応力度-ひずみ関係は、バイリニア型とした. 軸方向鉄筋の2次勾配は、一般的に用いられる値と解析 安定性を考慮し、1次剛性の1/100とした. 地盤の非線形 性を考慮するため、地盤の動的変形特性は、N 値より既 往文献10-14で提案されている算出式で求めた値を用いた. 地盤の非線形性を示すモデルは、R-Oモデル¹⁵を用いた. R-O モデルは、初期せん断弾性係数 Goと基準ひずみ yr, 最大減衰定数 hmax を入力することでモデル化を行うもの であり.対象地盤の各層の $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線, $\tau \sim \gamma$ 曲線 と, R-O モデルをフィッテングさせ, それぞれの値を算 出した. 対象とした地盤の第1層目でフィッティングし た例を図-5 に示す.また,各層の初期せん断弾性係数 Goと基準ひずみ yr, 最大減衰定数 hmaxを表-2に示す.な お、初期せん断弾性係数 Goは、各層内の分布を式(4)よ り考慮した 10.



 $G_0 = A \times \sigma_m^{0.5}$

(4)

G0:初期せん断弾性係数

A:係数(沖積砂礫土:831,沖積粘性土:448)

 σ_m :有劾拘束圧

3. 実測記録を用いた地震応答解析

地盤-橋系の地震応答解析の再現性を確認するため, 対象橋で実測された強震記録を用いた地震応答解析を行った.なお,解析モデルは,2.と同様のモデルを用いているが,実測記録を用いた解析では,計測震度3相当の地震動を入力するため,初降伏相当の応答は生じていないと考えられる.そこで,橋脚に非線形化は生じないと考え,図-3の橋脚の塑性ヒンジ区間は考慮せず,橋脚柱 全体を2次元線形はり要素でモデル化した解析モデルを 用いた.

(1) 入力地震動

対象とする地震動は、2017年11月11日1:38の宮城県 沖を震源とする地震(気象庁マグニチュード4.7)で観 測された波形を用いた.解析モデルの基盤面に入力する ため、地表面で得られた波形を等価線形化法を用いて、 対象地盤の基盤面まで引き戻した.対象橋の橋脚等の4 地点で得られた波形と基盤面まで引き戻した波形、地表 と基盤面まで引き戻した波形の加速度応答スペクトルを 図-6に示す.

地表面の波形は、パルス状であり、構造物の応答波形 も同様の傾向がみられている.図-6より、基盤面の波形 は、地表面の波形よりも短周期成分が大きく、固有周期 1秒付近では小さくなる傾向が見られる.実測記録を用 いた解析は、この基盤面の地震動を解析モデルに作用さ



図-7 それぞれの部位ごとの解析値と実測値のフーリエスペ クトルの比較

せた.

(2) 実測記録を用いた地震応答解析

解析手法の予測精度の確認として、対象橋で実際に観 測された地震記録(実測値)と解析値を比較した. 図-7 は、主桁下フランジ、橋脚橋座、フーチング上面、地表 面の解析値と実測値の加速度フーリエスペクトルを比較 したものである. 地表面のフーリエスペクトルは、実測



図-8 地盤の最大加速度と最大せん断ひずみ

値と解析値がほぼ一致しており,解析結果を十分に再現 できている.地表面以外では,フーチング上面は,02 秒付近のピークが無くなっていることや,主桁下フラン ジでは短い周期が過小評価になっているなど,地表面と 比較して再現性が良くない.しかし,図-7で示した4点 の応答値は,実測値と多少のずれはあるものの最大値を 示す周期を捉えている.

図-8は、実測記録を入力した際の地盤応答の解析結 果である.2.で作成した解析モデルの自由地盤での解析 結果を,解析モデルから構造物を取り除いた2次元の地 盤モデルでの解析結果,および1次元の地盤モデルでの 解析結果と比較した.図-8より,地盤の最大加速度分布 は、1次元の地盤モデルでの解析結果とそれ以外で差が ある結果となった.ただし、地盤の最大せん断ひずみ分 布は、3つの解析手法で差はほとんどなく、線形域の地 盤ー橋系の地震応答解析では、地盤の全体系の挙動を捉 えることができている.

4. レベル2地震動相当の地震応答解析

(1) 入力地震動

地盤ー橋系で解析を行う際に、レベル2地震動相当の 地震動を基盤面から入力するため、検討用の地震動の加 速度応答スペクトルを設定した.本検討で取り扱う地震 動の加速度応答スペクトルを図-9に示す. CASE1は、過 去の地震で、耐震設計上の基盤面^ので得られた波形や地 表面より引き戻した波形の加速度応答スペクトルより設 定したものである. CASE2 は、地盤の解析を行う際に 基盤面の地震動の代わりにもしばしば用いられている、 道路橋示方書ⁿの標準加速度応答スペクトル(I種地盤) を用いた.



図-9 検討対象とした地震動の加速度応答スペクトル

強重記録の謎示

まっ

12~ 月天在山外、夕阳月日						
	地震	強震記録	名称			
タイプI	2011年東北地方 太平洋沖地震	開北橋EW	C1:KAI C2:KAI			
	2011年東北地方 太平洋沖地震	山崎震動観測所NS	C1:YAM C2:YAM			
タイ プⅡ	1995年兵庫県南 部地震	神戸海洋気象台NS	C1:KOB C2:KOB			
	1995年兵庫県南 部地震	大阪ガス葺合NS	C1:GUS C2:GUS			



図-10 入力地震動の加速度応答スペクトル

入力地震動のもととなる強震記録は、2011年東北地方 太平洋沖地震と 1995 年兵庫県南部地震の強震記録を対 象とした.対象とした強震記録の諸元を表-3に示す.基 盤面の入力地震動を作成するため、まず、表-3に示した 地震動を改良 FDEL^{ID}を用いて耐震設計上の基盤面^Dであ る Vs=300(m/s)以上の地盤まで引き戻した.作成した基盤 面の地震動を CASEI および2にスペクトルフィッティン グさせ、解析に用いる入力地震動を作成した.作成した 地震動の加速度応答スペクトルを図-10 に示す.本検討 は、表-3 に示したレベル 2 地震動タイプ I(以下、「タ イプ I」という.)の2波、レベル2地震動タイプ II(以 下、「タイプ II」という.)の2波をそれぞれ図-10の加







図-12 橋脚柱基部の曲げモーメント

速度応答スペクトルにフィッティングさせた8波の地震 動を対象とした.入力地震動は、フィッティングさせた 加速度応答スペクトルを踏まえ、表-3の名称とした.

(2) レベル2 地震動相当の地震応答解析

2.で作成した解析モデルを用いて、地盤-橋系の地震 応答解析を実施した.

図-11 は、解析より得られた地表面波形の加速度応答 スペクトルである. タイプ I, タイプ II の地表面波形の 加速度応答スペクトルは、短周期成分が小さく、長い周 期が大きくなっている. タイプ I は、タイプ I と比較し

て固有周期1秒付近で卓越している. なお,設定した加速度応答スペクトルの CASE1と2では,1秒以降の長めの周期になると,CACE1の方が大きな値を示している. 一方,図-10に示した入力地震動より全体的に小さいスペクトルになっている.この理由として,Ⅲ種地盤を対象としていることからも,軟弱地盤により地震動が低減したことが考えられる.

図-12 は、橋脚柱基部の曲げモーメントを示している. 図の黒線は、対象橋の橋脚の水平カー水平変位関係である.図-12 より、本解析で実施した結果は、降伏はしておらず、限界状態1にも至っていないことが分かる.これは、タイプIの波形、タイプIの波形を入力した場合でも同様の傾向がみられ、入力地震動によっても変わらなかった.タイプIの波形の応答は、CASE1にフィッティングさせた地震動を入力した解析結果の方が小さい傾向であるが、タイプIIの波形の応答は、入力地震動による差はみられない.

図-13, 14 は、それぞれの波形を入力した際の上部構造の応答である。タイプIの波形を入力した結果を図-13 に示し、タイプIの波形を入力した結果を図-14 に示す。 解析結果は、タイプI、タイプIIとも最大加速度が 5m/s² 未満であり、レベル2地震動相当が作用したと考えると、 比較的小さい応答が得られている。加速度フーリエスペクトルは、卓越周期をみると入力地震動による違いは見られていないが、CASE1 にフィッティングした地震動の方が1秒以降の長めの周期で大きな値を示している。

図-15, 16 は、地盤-橋系の解析より得られた杭と周辺地盤の応答である。杭の曲率に着目した図では、軸力0kNと死荷重作用時のそれぞれの終局曲率なを黒線および黒破線で示している。タイプIの波形を入力した解析結果を図-15, タイプIの波形を入力した解析結果を図-16 に示す。

タイプ I の結果とタイプ II の結果を比較すると,全体 的にタイプ II を作用させた方が地盤の最大加速度と最大 せん断ひずみがやや大きな値となっている. 杭の応答に は大きな差はみられていない. 設定した加速度応答スペ クトルの違いに着目すると,地盤の最大せん断ひずみと 杭の応答は, CASE1 にフィッティングさせた地震動が 比較的大きい値を示している.

杭のせん断力に着目すると、タイプ I、タイプ I とも、 3,6,9 層目で比較的大きくなっており、それ以外の地層 では 500kN 未満である。特に6 層目と9 層目では、せん 断耐力を超える応答が得られている。

杭の曲率も同様の傾向がみられるが、こちらは6層目 が他の層と比較して大きくなっている. なお、杭の曲率 は終局曲率を超えることはなく、最大でも60~70%程度 であった.

地盤の最大加速度は、地表になるにつれて全体的には



減少している.タイプIIの解析結果に着目すると,基盤 面に近い層では,最大加速度に差がみられていたが,地 表に近い層になるにつれて加速度の大きさに差がなくな る傾向にある.また,地盤の最大せん断ひずみは,3,6, 9層目の砂質土の層で大きくなっている.この結果から, 軟弱地盤の層で地盤の最大せん断ひずみが大きくなる影 響より,地震動が伝達できない現象を表現していること が考えられる.

地層ごとの地盤の最大せん断ひずみの変化に着目する と、軟弱地盤の層で値が大きくなっており、杭の応答と 地盤の最大せん断ひずみの値は対応していることがわか る.地盤ー橋系の地震応答解析を用いた性能照査は、地 盤の最大せん断ひずみが杭の解析結果に大きく影響を与 えることが考えられ、この影響を精度よく考慮できるこ とが重要である.

5. まとめ

本検討では、実測記録が得られている道路橋を対象に 地盤-橋系の地震応答解析を実施し、再現性を確認した



上で解析結果の妥当性を検証した.その結果,地盤の非

線形化により、軟弱地盤の層で杭の応答値が大きくなり 杭のせん断力は、せん断耐力を大きく上回ったものの、 曲率は道路橋示方書で示される終局曲率の 60~70%であった.

地盤-橋系の地震応答解析の再現性は、地震応答記録 や被災事例など実現象を基に、より詳細に検証を進める 必要がある.今後、地盤-橋系の地震応答解析を用いた 地震応答解析手法の提案に向け、以下の検討を実施する.

- (1) 地盤の非線形性を精度よく再現できるようにする 動的解析モデルの設定
- (2) (1)を踏まえた地盤ー橋系の照査に用いる地盤パラ メータの設定および設定に必要な地質調査の内容
- (3) 解析手法を適用できる道路橋の確認

謝辞:解析にあたり、大阪ガス(株)、気象庁の強震 記録を使用した.記して謝意を表する.







図-16 杭のせん断力・曲率と地盤の最大加速度・最大せん断ひずみ (タイプII)

参考文献

- 中尾吉宏,片岡正次郎:道路橋杭基礎における地震動の入力損失効果の基礎的検討,第19回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集,pp.423-428,2016.
- 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計基準・同解 説 耐震設計,2012.
- 4) 中谷昌一, 白戸真大, 井落久貴, 野村朋之: 杭基礎 に関する動的照査法の適用について, 土木研究所資 料第 4083 号, 2007.
- 5) 白戸真大, 野々村佳哲, 中谷昌一, 福井次郎: Winkler バネを用いた深い基礎の非線形動的解析モ デル, 第9回地震時保有体力法に基づく橋梁等構造 物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2006.
- 6) 安藤滋芳, 河野哲也, 谷本俊輔, 西田秀明, 星隈順

ー:動的解析による既製コンクリート杭を有する既 設道路橋基礎の耐震性評価に関する検討,構造工学 論文集, Vol.59A, 2013.

- (公社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐 震設計編,2017.
- (社)日本道路協会:道路橋示方書・同解説V耐震 設計編,2002.
- Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, pp. 248-299, 2004.
- 建設省土木研究所:地盤の地震時応答特性の数値解 析法-SHAKE:DESRA-,土木研究所資料第 1778 号, 1982.
- 岩崎敏男, 龍岡文夫, 高木義和: 地盤の動的変形特 性に関する実験的研究(II), 土木研究所報告, Vol.153-2, 1980.
- 岩崎敏男,龍岡文夫,高木義和:地盤の動的変形特 性に関する実験的研究(II),土木研究所報告, Vol.153-2,1980.

- 岩崎敏男,常田賢一,吉田清一:沖積粘性土の動的 変形・強度特性について,土質工学研究所発表会, Vol.15,pp.625-628, 1980.
- 14) 横田耕一郎, 龍岡文夫: 不撹乱洪積粘土のせん断変 形係数について, 土木学会年次学術講演概要集, Vol.32,pp.257-258, 1982.
- 15) 吉田望,澤田純男,竹島康人,三上武子,澤田俊 一:履歴減衰特性が地盤の地震応答に与える影響, 土木学会地震工学研究発表会梗概集,2003.
- 16) 吉田望: 1995 年兵庫県南部地震におけるポートアイ

ランドの地震応答解析, 地盤工学会誌, 土と基礎, pp.49~54, 1995.

17) 末冨岩男,吉田望:周波数依存型地盤応答解析にお けるパラメータの最適化のための一検討,土木学会 論文集 A1(構造・地震工学), Vol. 72, No. 4(地震 工学論文集第 35 巻),I_177-I_187, 2016.

ANALYSIS OF SOIL-BRIDGE EARTHQUAKE RESPONSE CHARACTERISTIC ON EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS USING THE BASE INPUT ORIGIN

Yosuke ISHII and Shojiro KATAOKA

The purpose of this article is to suggest the soil-bridge verification. We performed earthquake response analysis based on limited ground findings and earthquake observation record; we considered of soil-bridge earthquake response analysis. First, earthquake response analysis using a seismic intensity 3 earthquake observation record was for reproducible inspection of soil-bridge earthquake response analysis method. The analysis level almost accorded with an earthquake observation record; the analysis method reproduce real highway bridge response. Second, using the analysis method that inspected plasticity, the response pier and pile were confirmed of input level2 earthquake motions. As a result, the response of pier was crazing degree, and the response of pile curvature was 60-70% of the end curvature.