

地盤と構造物の一体モデルによる 免震橋の地震応答特性に関する検討

吉澤 努¹・平山 博²・近藤 香³

¹正会員 大日本コンサルタント株式会社 インフラ技術研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)
E-mail:yoshizawa@ne-con.co.jp

²正会員 大日本コンサルタント株式会社 インフラ技術研究所 (〒170-0003 東京都豊島区駒込3-23-1)
E-mail:hirayama@ne-con.co.jp

³大日本コンサルタント株式会社 インフラ技術研究所 (〒541-0058 大阪市中央区南久宝寺町3-1-8)
E-mail:kondo_kaoru@ne-con.co.jp

免震橋梁を対象として地盤と構造物の一体モデルによる動的解析を行い、地盤と橋の固有周期が比較的近い条件において両者の間に共振現象が生じるかを検討した。有効応力解析により液状化の影響を考慮した検討も行った。地盤と橋を一体とした動的解析では橋梁単体の解析に対し応答値が低減され、地盤と橋の共振現象は確認できなかった。液状化を考慮すると、条件によっては液状化を考慮しない場合より橋の応答値が増加するケースが見られた。これは、液状化地盤では橋脚ごとに基礎の変位が異なった値となることによると考えられる。本検討により、免震構造は液状化により地盤が不安定となる場合に採用が適さないことが確認された。

Key Words : base isolation, FEM, seismic analysis, soil-bridge resonance, liquefaction

1. はじめに

免震構造は、免震支承により橋を長周期化するとともに減衰性能を高め、橋の地震応答の低減を図る構造である。地盤条件が良好でかつ橋脚の剛性が高い橋は、長周期化の効果が大きく、免震構造に適している。地盤条件が軟弱である場合には、長周期化の効果は大きくないが、減衰性能の効果は見込めるため、Ⅲ種地盤の橋梁でも免震構造が採用されることが少なくない。

地盤が比較的軟弱な条件では、免震構造を採用すると地盤と橋が共振する可能性がある指摘されてきた。また、液状化により地盤が不安定になる場合には免震効果が十分に発揮されないことが考えられる。このため、道路橋示方書¹⁾では、地盤と橋が共振する可能性がある場合や、液状化により土質定数を零とする土層がある場合に、免震構造を採用してはならないとされている。

軟弱地盤や液状化が生じる地盤に免震構造を採用した場合に、大規模地震において橋がどのような挙動を示すのか、特に免震橋と地盤との共振が生じ得るか否か、また、地盤の液状化が免震橋にどのような影響を及ぼすの

か、このような課題について、地盤と橋を一体として地震応答解析を行う等の検討はこれまであまり行われていなかった。

免震橋を対象とし、地盤と構造物を一体としたFEM動的解析としては、鋼アーチ橋の側径間部を対象に行われた事例²⁾がある。この検討では、1994年北海道東方沖地震を対象として非線形FEM動的解析を行い、解析結果では計測された地震応答を比較的精度よく再現できたとしている。この検討では表層地盤の厚さが15m程度であり地盤の固有周期はあまり長周期ではない。また、地震動の規模も地表面近くで最大加速度が300gal程度と中程度である。このため、地盤と橋の共振現象は特に観察されておらず、地盤の液状化も考慮されていない。

本検討では、Ⅲ種地盤で地盤と橋の固有周期が比較的近い条件の免震橋梁を対象とし、地盤と構造物の一体モデルによる動的解析を行って、構造物単体の動的解析に対する違いを確認する。地盤と構造物の間に共振現象が生じているかの検討も行う。次に、有効応力解析により液状化の影響を考慮した解析を行い、地盤が不安定となった場合の免震橋の挙動について検討する。

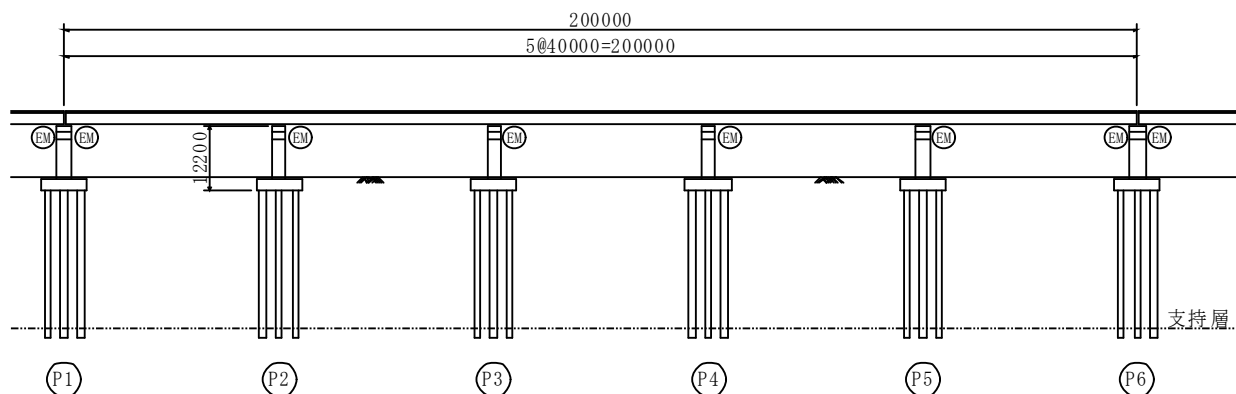


図-1 検討対象橋梁

2. 検討条件

(1) 検討対象橋梁

検討対象は日本道路協会の計算例³⁾に示された5径間連続I桁橋を元に、両端の橋台をかけ違い橋脚に変更した図-1に示すような連続高架橋とする。支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承（LRB）を用いた免震構造とし、橋脚の配筋及び支承寸法は道路橋示方書¹⁾と道路橋支承便覧⁴⁾により決定する。橋の固有周期は、検討で用いる地震動に対する等価剛性で算出した値として1.28秒である。

(2) 地盤条件

地盤条件は水平方向に一樣な成層地盤とし、地層構成は日本道路協会の計算例³⁾に示されたⅢ種地盤の例に準じて図-2のように設定する。地盤の固有周期は、地震時のせん断ひずみによる剛性低下を考慮した場合に1.17秒である。

地下水位は地表から5mの深さとし、これより下の深さ13mまでに存在する沖積砂層で液状化が生じる。

(3) 入力地震動

入力地震動はⅠ種地盤の地表面で観測された実際の地震波を用い、基盤入射波として地盤と構造物の一体モデルの底面から粘性境界を介して入力する。本検討では、2004年新潟県中越地震におけるJMA小千谷の観測波⁵⁾のうちE-W方向の地震波を用いる（図-3参照）。

(4) FEM動的解析モデル

FEM動的解析モデルは、図-4に示すように地盤と構造物を一体としたモデルとする。非線形FEM動的解析は計算負荷が高いため、解析ではモデルの対称性を考慮して中央で分割した1/2モデルを用いる。

構造物は梁要素とし、橋脚は曲げによる非線形応答を考慮する。支承部は非線形バネ要素を配置する。基礎は節点を地盤と共有する。杭は線形梁要素とする。

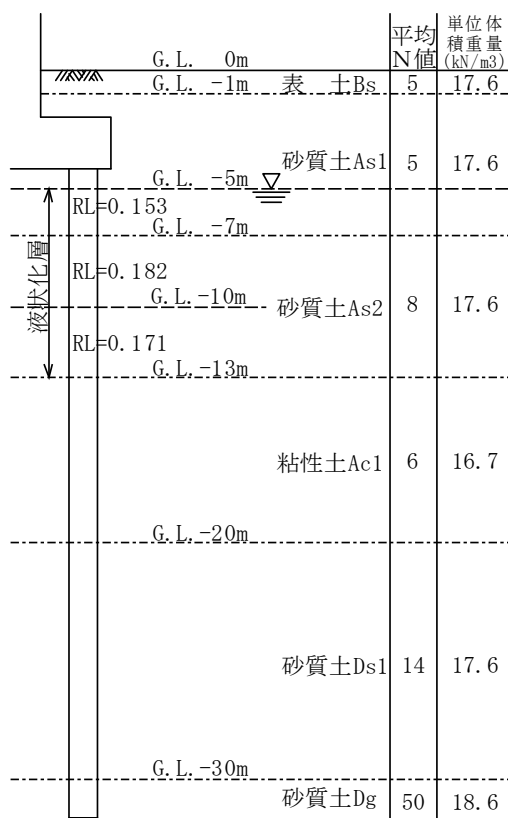


図-2 地盤条件

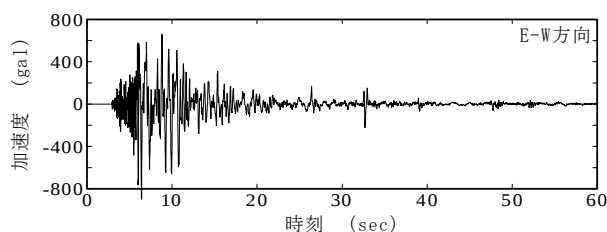


図-3 入力地震動

地盤は平面ひずみ要素とし、モデルの奥行はフーチングの幅に等しい8.5mとする。地盤の非線形性は修正R-Oモデルにより考慮する。修正R-Oモデルのパラメータは

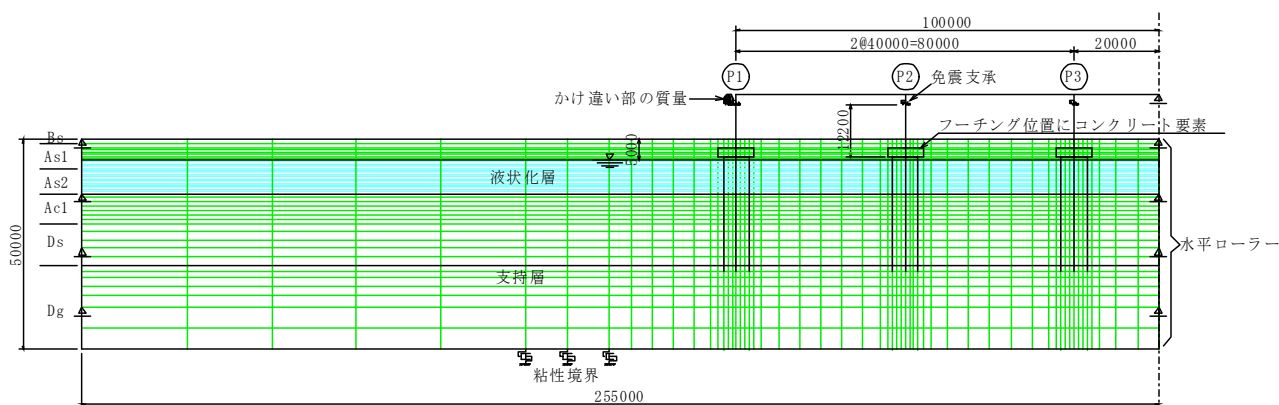


図-4 地盤－構造物一体系のFEM解析モデル

表-1 有効応力解析の地盤パラメータ

深度		おわんモデルパラメータ						
上面 (m)	下面 (m)	A	B	C	D	$Cs/(1+e0)$	$\chi1$	
5.0	7.0	-0.20	1.40	9.0	40.0	0.006	0.115	
7.0	10.0	-0.50	1.40	9.0	40.0	0.006	0.130	
10.0	13.0	-0.50	1.40	9.0	40.0	0.006	0.135	

地盤のひずみとせん断剛性や減衰定数の関係が応答ひずみの生じるレベルで合うように設定する。

(5) 有効応力解析モデル

有効応力解析はおわんモデル⁹⁾を用いる。おわんモデルのパラメータは道路橋示方書⁹⁾により算出される R_L の値を繰り返し回数20回に対する液状化強度比と見なし、この値をもとに設定する。おわんモデルの各パラメータの値を表-1に示す。

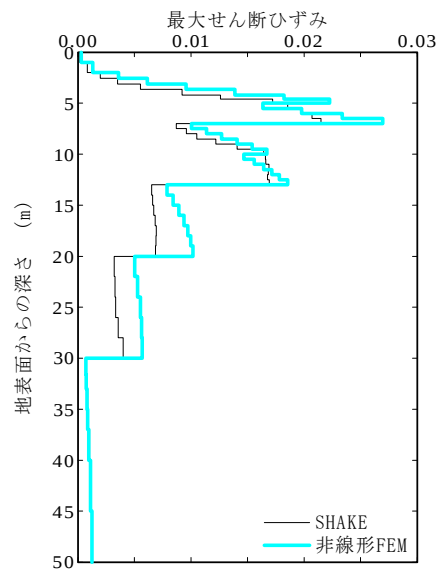


図-5 地盤の1次元動的解析結果

3. 全応力解析による地震応答解析

(1) 地盤の地震応答

全応力解析による地盤の1次元動的解析の結果を図-5に示す。地盤のせん断ひずみは沖積砂層で2%～3%程度の値となっている。1次元非線形FEM解析による地盤のせん断ひずみ分布はSHAKEによる等価線形化法による解析と同様の傾向を示している。

この解析により得られた地表面の加速度波形を、構造物単体の動的解析での入力地震動とする。

(2) 構造物の地震応答

地盤と構造物の一体モデル及び橋梁単体モデルの動的解析結果より、主桁の応答加速度波形を図-6に示す。振幅の最大値は一体モデルによる全応力解析の結果が橋梁単体の解析結果を下回っている。

図-7はP2橋脚の支承を表すバネの水平反力－水平変位履歴図である。この図でも地盤と構造物の一体モデルの

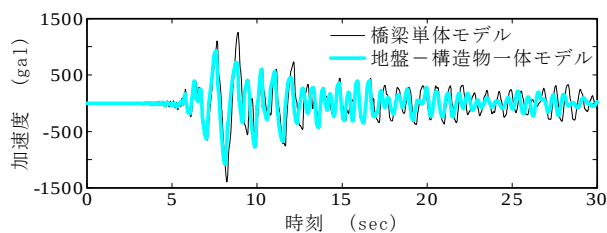


図-6 主桁の応答加速度波形

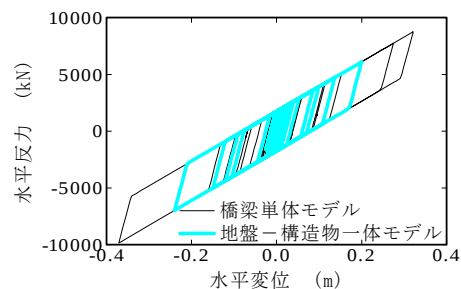


図-7 P2橋脚支承バネの履歴

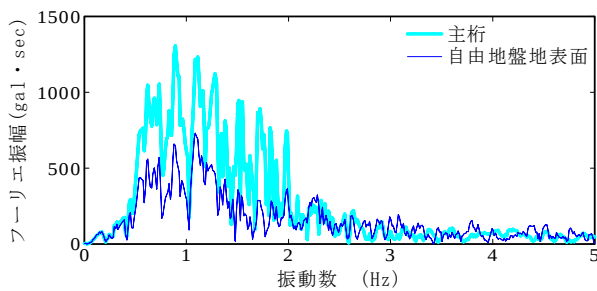


図-8 地盤と主桁の応答加速度のフーリエスペクトル

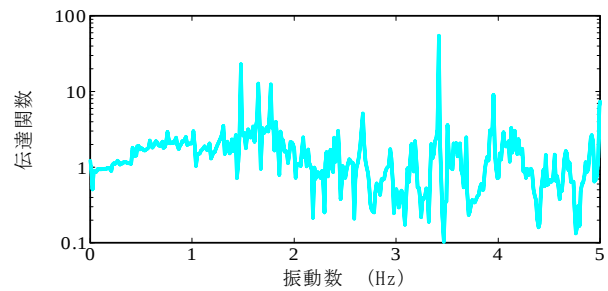


図-9 地盤に対する主桁の応答加速度の伝達関数

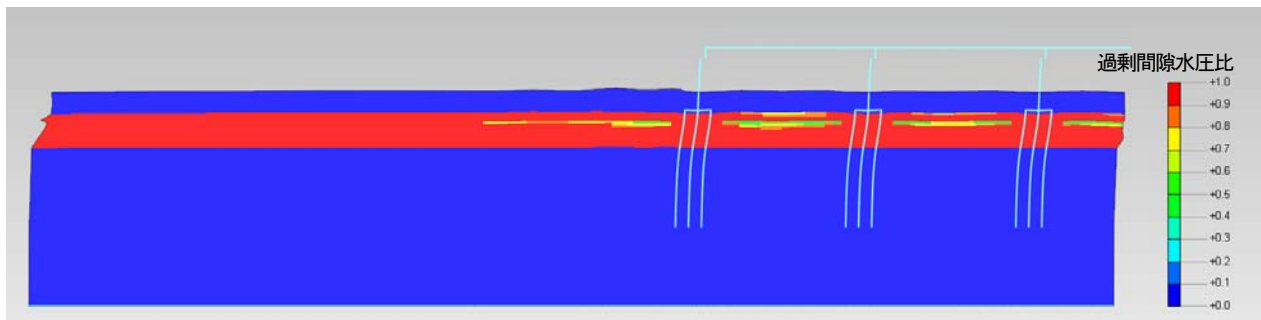


図-10 過剰間隙水圧比の最大値の分布

解析結果の値が橋梁単体の解析結果より小さくなっている。これは地盤と構造物の動的相互作用の影響が、橋梁単体モデルで想定している基礎の減衰より大きく表れたことによると考えられ、近藤らによる地盤と橋の一体モデルによる検討結果⁷⁾と整合している。

地盤と構造物の一体モデルの解析結果より、主桁の加速度波形と構造物から十分離れた自由地盤と見なせる位置での地表面の加速度波形についてフーリエスペクトルを算出して図-8に示す。振動数2Hz以下で地盤に対し主桁の加速度が2倍程度増幅されている。この2つのスペクトルから主桁の応答加速度の伝達関数を求めたものを図-9に示す。振動数が約1.4Hzより低い領域では、橋や地盤の固有振動数のある領域にもかかわらず、伝達関数に明瞭なピークは見られない。このため、本検討での解析では、地盤と橋の共振と言うべき現象は生じていないと考えられる。免震構造は非線形性が強いいため、特定の振動数に対して鋭く応答するような振動特性は有していないと推測される。

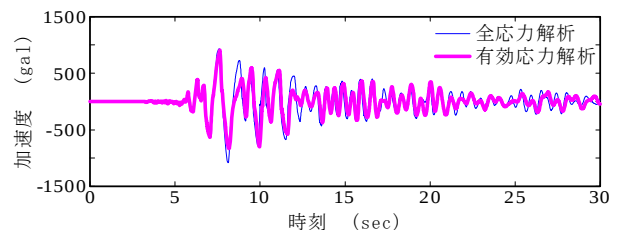


図-11 主桁の応答加速度波形（液状化有無の比較）

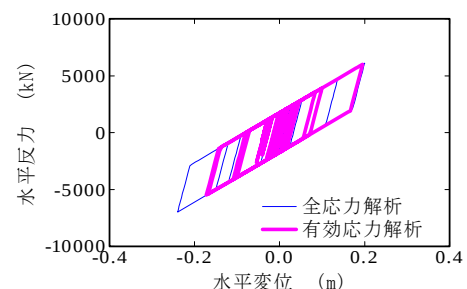


図-12 支承バネの履歴（液状化有無の比較）

4. 有効応力解析による地震応答解析

(1) 地盤の液状化の影響

有効応力解析結果より、過剰間隙水圧比の分布図を図-10に示す。液状化を想定している層では、過剰間隙水圧比の最大値は1に近い値となっている。また、地盤の変位は液状化層で大きく生じている。一方、杭基礎の近傍では杭の剛性の影響で変位や過剰間隙水圧比の最大値

がある程度低減されている。

構造物の地震応答として、主桁の応答加速度波形を図-11に、P2橋脚の免震支承の履歴を図-12に示す。液状化を考慮しない全応力解析の結果（図-6及び図-7の「地盤－構造物一体モデル」）と比較して、液状化を考慮した有効応力解析では絶対値最大となるマイナス側のピークが低くなり、地震応答が低減されている。

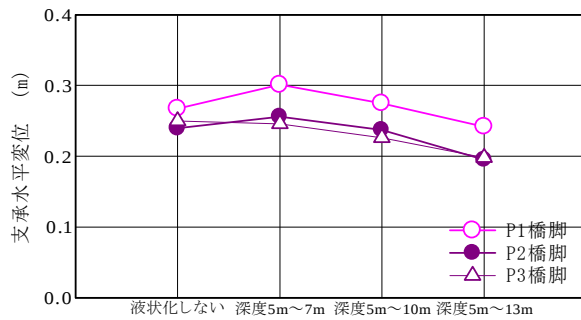


図-13 液状化の条件を変化させた場合の支承最大変位の比較

(2) 液状化層の条件に対する橋の応答値の変化

液状化を考慮した有効応力解析では、全応力解析に対して橋の応答値が低減される結果となった。しかし、地震時の地盤の挙動を正確に予測することは困難であるため、解析では実際の液状化現象を正しく再現できない可能性が考えられる。このため、液状化を全くしない、または想定した層が最大限に液状化するという2ケースの検討だけでは、橋の応答が最大となる条件を見逃す恐れがある。そこで、液状化の条件を変えて複数ケースの解析を行い、橋の応答値の変化を確認する。

有効応力解析の追加ケースは、液状化層の深さの設定を変化させたものとする。地盤要素に適用する有効応力解析のパラメータを、表-1に示す3層全てに適用したものが最初に行った有効応力解析であり、液状化層の深さは5m~13mである。追加ケースは下部の1層または2層の地盤要素を液状化しない層とし、おわんモデルに関するパラメータを適用しない。すなわち、液状化層を深さ5m~10mの範囲としたケース及び深さ5m~7mの範囲としたケースの2ケースを追加ケースとする。

解析結果より、免震支承の水平変位の値を液状化層の設定深さを横軸としてプロットしたものを図-13に示す。液状化しないケースに比べて、液状化層を13mの深さまでとした最初の実効応力解析ケースでは支承の変位が低減されている。これに対して、追加ケース、特に液状化層の深さを7mまでとしたケースでは支承の変位は液状化しないケースより大きい。

液状化深さ7mのケースで橋の地震応答が増えた理由を検討するため、まず、橋の応答加速度を比較する。図-14に全応力解析と液状化深さを7mとした2つのケースについて、主桁の加速度波形図を重ねて示す。加速度波形はほとんど重なっているため、追加ケースで地盤と橋の共振現象などによる応答加速度の増加は生じていないと考えられる。

続いて、橋の応答変位を検討する。図-15に全応力解析と液状化深さ7mとした場合の実効応力解析について、P1橋脚の免震支承の変位波形図を重ねて示す。時刻8秒

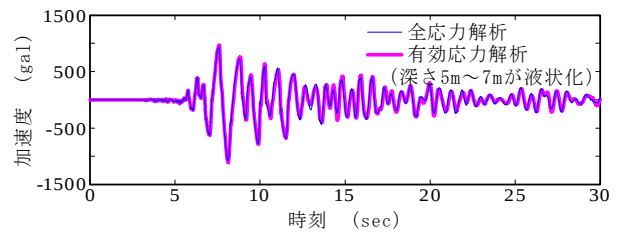


図-14 主桁の応答加速度波形の比較

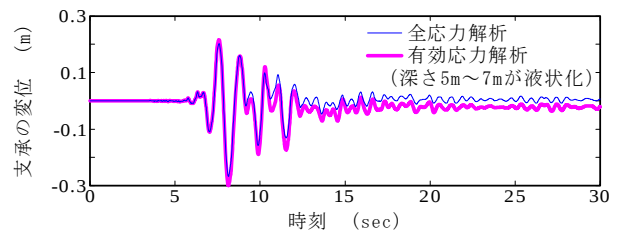


図-15 P1 橋脚の支承の応答変位波形

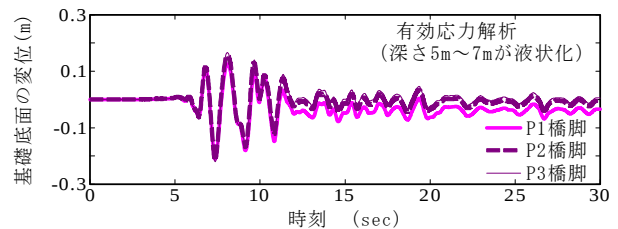


図-16 フーチング底面の応答変位波形

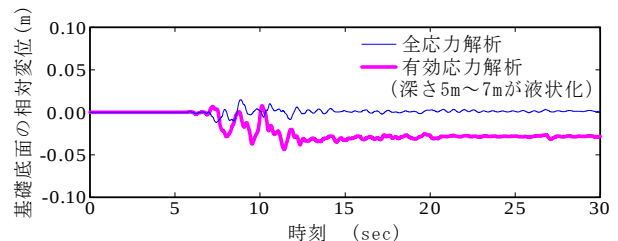


図-17 P1 橋脚と P2 橋脚のフーチング底面の相対変位波形

頃のマイナス側のピークで液状化深さ7mのケースの方が変位が全応力解析より数十mm大きくなっており、以後支承変位は全応力解析に対しマイナス側に同様の値だけずれている。

液状化深さ7mのケースについて、各橋脚のフーチング底面の応答変位波形を図-16に示す。この解析ケースでは橋脚ごとに変位にばらつきが見られ、特にP1橋脚とP2、P3橋脚とのずれが大きい。図-4に示すように、P1橋脚は自由地盤と橋梁との境界にあるため、変位応答が他の基礎と異なるものとなったと考えられる。

P1橋脚のフーチング底面とP2橋脚のフーチング底面の

相対変位を、全応力解析と液状化深さ7mのケースについてプロットしたものを図-17に示す。時刻7秒頃から液状化深さ7mのケースではP1橋脚基礎とP2橋脚基礎の相対変位が大きくなり、最終的に40mmほどの残留変位が生じている。このため、P1橋脚とP2橋脚の2基の下部構造の変位のずれがP1橋脚の免震支承の応答変位を増加させていると考えられる。図-13で液状化深さ7mのケースが極大値を示した理由は、基礎ごとの変位のばらつきの影響であると推察される。

液状化層の設定に関する他のケースで支承の変位が概ね全応力解析の結果を下回ったのは、7m以深にある液状化層により橋に入力される地震動が低減され、その影響が基礎ごとに異なる応答変位の影響を相殺したことによると考えられる。

以上より、液状化に伴う下部構造の不均等な変位が免震支承の応答値を大きくする場合があることことから、地盤が不安定となる条件での免震構造の採用には注意を要することが確認された。

5. まとめ

本検討で得られた結果を以下にまとめる。

- ① 地盤と橋を一体とした解析では、橋梁単体の解析に対し応答値が低減された。これは、地盤と橋の動的相互作用の影響と考えられる。
- ② 地盤と橋の加速度波形のスペクトルによる比較から、両者の間で共振現象は生じていないと考えられる。
- ③ 有効応力解析により液状化の影響を考慮すると、橋の応答値は全応力解析に比較して低減された。
- ④ 解析の不確実性を考慮し、液状化の条件を変更して

解析を行った結果、液状化を考慮しない場合より橋の応答値が増加するケースが見られた。この理由は、液状化の影響により橋脚ごとに基礎の応答変位が異なることによると考えられる。

免震構造は非線形性が強いいため、地盤と共振する可能性は低いと考えられる。一方、液状化により地盤が不安定となる条件では、支承の変位などの地震応答が液状化を考慮せずに算出した値より大きくなる可能性がある。液状化地盤において免震構造の採用を制限する必要性が本検討により改めて確認された。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，平成 24 年 3 月。
- 2) 吉岡勉，石川博之，岡田慎哉，佐藤京，原田政彦：2 次元 FEM 地震応答解析による免震橋の地震時挙動の推定精度，土木学会第 62 回年次学術講演会，I-496，pp.106-107，2007.9。
- 3) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，平成 9 年 3 月。
- 4) 日本道路協会：道路橋支承便覧，平成 16 年 4 月。
- 5) http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin/04_1023_niigata/nigata_main.htm
- 6) 福武毅芳，松岡元：任意方向単純せん断におけるダイレイタンシーの統一的解釈，土木学会論文集，第 412 号，III-12，pp.143-151，1989。
- 7) 近藤香，堺淳一：地盤と構造物の非線形相互作用を考慮した解析手法の違いに関する一検討，第 13 回地震時保有水平耐力法に身と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，2010.2。

(2015. 9. 11 受付)

STUDY OF SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF BASE ISOLATION BRIDGE WITH SOIL-STRUCTURE INTEGRAL MODEL

Tsutomu YOSHIZAWA, Hiroshi HIRAYAMA and Kaoru KONDOU

Dynamic analysis of a base isolation bridge was carried out with soil-structure integral model. Soil-bridge resonance was discussed in this study. At this model, soil and bridge have similar natural period. Effective stress analysis was carried out to consider the effect of the liquefaction. As a result, seismic response of the bridge was reduced from the structure simple model with integral model. And the soil-bridge resonance was not observed. Seismic response of the bridge was reduced from the total stress analysis with the effective stress analysis. But seismic response was increased at some liquefaction parameter modified model. The base deformation increased the bridge response. Base isolation bridge is not suitable for liquefactable soil conditions.