

論文 3次元FEMを用いたRC杭基礎—地盤系の連成地震応答解析

牧 剛史^{*1}・土屋 智史^{*2}・渡辺 忠朋^{*3}・前川 宏一^{*4}

要旨: 鉄筋コンクリートと地盤の非線形材料構成則に基づく3次元有限要素解析により, RC杭基礎で支持された道路橋橋台を対象として, 周辺地盤を一体としてモデル化した基盤波入力による連成地震応答解析を行い, 杭基礎—地盤系の詳細な3次元応答を検討した。さらに, 静的漸増載荷解析を併せて行い, 杭基礎の変形モードや損傷位置, 周辺地盤のひずみ分布などの点で, 静的漸増載荷解析は連成地震応答解析と異なる結果を与えることを示した。

キーワード: 3次元有限要素解析, 連成地震応答解析, RC杭基礎

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震以降, RC構造物の耐震性能照査法の精度向上が進められると共に, 有限要素解析(FEM)を用い, 地上構造物を支持する基礎や周辺地盤を含めた構造物全体系の連成解析が可能となってきた。本手法は, 構造物が設置されている力学的条件を忠実に再現可能であり, 被災構造物の被害分析にも適用されてきた^{1,2)}。土木学会コンクリート標準示方書耐震性能照査編³⁾においては, 前述の構造全体系連成モデルを用い, 工学的基盤に地震波を入力する時刻歴応答解析を用いた耐震性能照査法が原則として位置づけられている。

しかし, 材料構成則に立脚した3次元FEM連成地震応答解析を, 新設構造物の耐震性能照査に適用するケースはまだ少なく, 仮に構造物を基礎・地盤まで3次元でモデル化したとしても, 慣性力作用位置に強制変位を与える静的解析に留まる場合が多い。この場合, 地盤は静止しているため, 杭部材の応答断面力や損傷位置が地震時のそれと一致する保証はなく, モデル化と計算結果の解釈に高度な工学的判断を要する。

過去, RC構造物全体系の地震応答解析に3次元FEMを適用した事例⁴⁾は幾つか見られるが, RC部材の復元力特性を適用するものが殆どで

ある。RC部材の曲げ非線形性のみならず, せん断破壊およびせん断破壊以後の軸力保持機能の劣化や耐力の軟化域までを, 地盤の非線形性ととも追跡できる全体系時刻歴応答解析は, これまでに全く前例がない。

以上の背景に鑑み, 本研究ではRC杭基礎を有する橋梁下部構造物に対して3次元FEMに基づく連成地震応答解析を適用し, 構造系全体の地震時挙動をありのままに再現することを目指す。道路橋橋台を解析対象として, 非線形材料構成則を導入した3次元立体要素によって構造物・杭基礎・地盤を全てモデル化し, 工学的基盤面から地震波を入力する。併せて, 当面の実務での連成地震応答解析の活用と今後の設計照査体系へのフィードバックを念頭に置き, 動的応答解析と同様のモデルを用いて, 慣性力作用位置に強制変位を与える3次元静的漸増載荷解析も実施して, 杭基礎の応答・変形挙動の観点から動的応答解析結果との比較検討を行う。

2. 解析対象構造物と解析モデル

2.1 解析対象構造物

解析対象とした道路橋橋台の諸元概要を図-1に, サイトの土質柱状図を図-2にそれぞれ示す。地盤表層部に砂質土層, 下部に軟弱なシルト層

*1 埼玉大学 大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門 助教授 博(工学) (正会員)

*2 (株)コムスエンジニアリング 博(工学) (正会員)

*3 北武コンサルタント(株) 博(工学) (正会員)

*4 東京大学 大学院 工学系研究科 社会基盤学専攻 教授 工博 (正会員)

を有する4径間連続橋梁の杭基礎支持逆T式橋台である。杭は頁岩基盤に支持された場所打ちRC杭（杭径1.2m、杭長13m、杭配列 $3 \times 5 = 15$ 本、杭間距離は杭径の1.5倍）である。杭断面には異形鉄筋D32が24本配置され、鉄筋中心までのかぶり厚は160mmである。支承位置での常時の死活荷重反力は合計2700kNである。実際には基礎から平面方向4.5m、深さ6mの範囲に地盤改良を施し、増加した改良体強度を杭の水平抵抗に見込む複合地盤杭工法で施工されており、部材を線材、地盤をバネで置換したモデルによる時刻歴応答解析法によって、設計計算上所要の耐震性能を有することが確認されている。

本論文では、地盤改良を施す前の地盤条件に対して、当該設計諸元の基礎構造を適用した。地震応答解析の結果、基礎-地盤系に塑性応答が生じることを念頭に置いたためである。

2.2 3次元有限要素モデル

解析には東京大学で開発されたRC構造物の3次元非線形有限要素解析コードCOM3^{5,6)}を用いる。本解析で用いる3次元有限要素モデル（メッシュ分割）を図-3に示す。杭体や橋台などの構造物および地盤は全て、3次元20節点アイソパラメトリック立体要素を用いてモデル化する。モデル高さは土質柱状図と標準貫入試験結果に

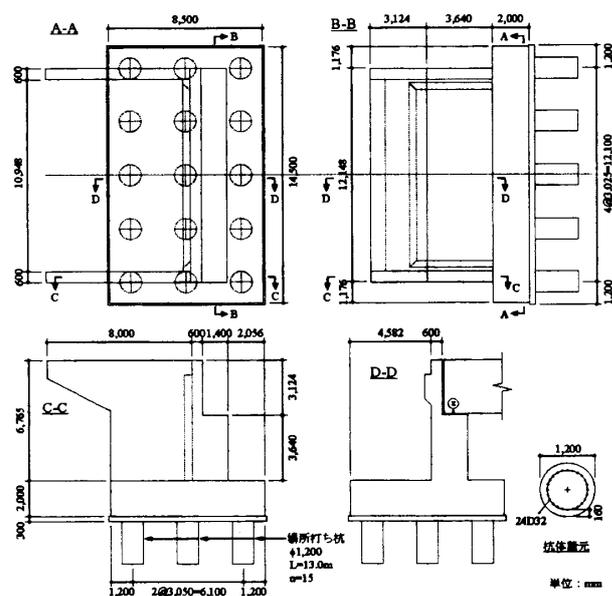


図-1 構造物諸元図面

基づき、工学的基盤面であるGL. -18.4mまでとし、橋軸に沿った鉛直面で切断した1/2領域を対象として、水平方向157.3m、奥行き方向44.65mと十分に広い範囲をモデル化した。場所打ちRC杭は、メッシュ分割の都合上、断面二次モーメントがほぼ等しい等価な正方形断面に置換した。

図-3(b)に示すように、構造物周辺地盤を取り囲むように、側面および底面に粘性境界要素を設置した。これは20節点立体要素の自由度を縮退した16節点ジョイント要素を準用し、開閉方向および面内せん断方向に粘性を付与したものである。粘性境界要素によって囲まれている領域の寸法は、幅77.3m、奥行き20.65m、深さ16.4mである。構造物と地盤との間には、接触・剥離とズレを考慮可能なジョイント要素を配置した。

2.3 材料構成則と材料特性値

杭体のRC要素には、岡村・前川ら^{5,6)}によって開発されたRCの履歴依存型非線形材料構成則を適用している。本構成則は非直交多方向固定ひび割れモデルや鉄筋の座屈モデルなど、RCの強非線形領域における適用性も既に検証されており、ひび割れ発生以降のせん断変形に対しても精度良く評価することが可能である。杭部材ではせん断変形が卓越するケースも十分想定されることを鑑みれば、本構成則を適用する意

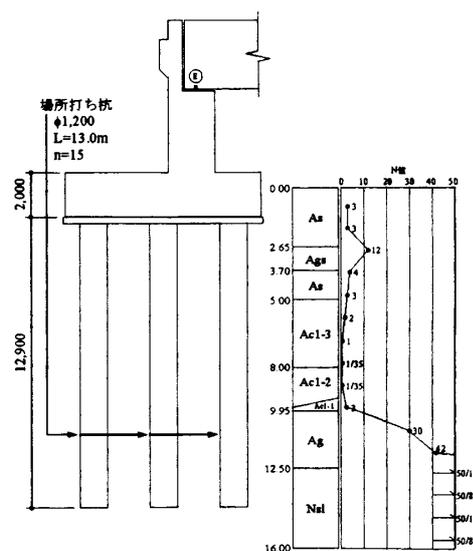


図-2 土質柱状図

義は大きい。RC 要素に入力する材料特性値は、コンクリートの設計圧縮強度 $f_c = 24 \text{ N/mm}^2$ 、引張強度 $f_t = 1.91 \text{ N/mm}^2$ 、鉄筋の設計降伏強度 $f_y = 345 \text{ N/mm}^2$ とした。また、フーチングや橋台部分は線形弾性体としてモデル化した。

地盤構成則は全応力に基づいて定式化され、地盤要素の体積変形成分を線形弾性とし、偏差応力-偏差ひずみ関係に対して、Osaki モデル⁷⁾で記述される履歴則を適用した。初期せん断剛性 G_0 およびせん断強度 S_u は、サイトの土質柱状図と標準貫入試験結果から深さ毎に設定した¹⁾。

粘性境界要素には、深さ毎の地盤物性値から定めた粘性減衰係数¹⁾を設定した。また、構造物-地盤間のジョイント要素は、引張およびせん断剛性をゼロ(周面摩擦を無視したと等価)とし、閉合方向に対しては高い圧縮剛性を与えて、数値計算上、地盤要素と RC 要素が重ならないようにした。杭先端に位置するジョイント要素に限っては、杭が N 値 50 の工学的基盤に根入れされていることを想定して、要素の開閉方向に高い引張剛性も与えて、橋台の水平応答に伴う杭の過大な引き抜けが生じないようにした。

動的応答解析を行う際に考慮する減衰特性は、

コンクリート標準示方書³⁾に基づき、材料構成則における履歴減衰のみとした。モデル底面・側面に配置した粘性境界要素による逸散減衰を除き、その他の粘性減衰は一切考慮していない。

2.4 境界条件と荷重条件および入力地震波形

境界条件は、モデル最下端の全節点を 3 方向拘束し、粘性境界外側の自由地盤要素の節点は鉛直方向自由度を拘束した。なお、静的漸増荷重解析の際は、地盤の両側面を完全固定とし、橋台支承位置(慣性力作用位置)に水平強制変位を与えた。また、桁を模した薄い立体要素を支承位置に配し、それを含めた全ての立体要素に相応の単位体積質量を与えた上で、橋台自重および桁の鉛直反力は集中荷重として別途作用させた。地震波はモデル最底面に基盤波形を橋軸方向に入力する。ここでは、図-4 に示すコンクリート標準示方書³⁾におけるレベル 2 地震動(内陸型①)波形を適用する。本地震波は既往の多くの観測記録に基づいて合成されており、多様な地震特性を内在する波形であることから今回の検討ではこの 1 波に限定した。動的解析に際しては、波形の主要動部分(12 秒間)を用い、Newmark の β 法 ($\beta=0.36$) による直接積分を行う。時間刻みは 0.01 秒である。

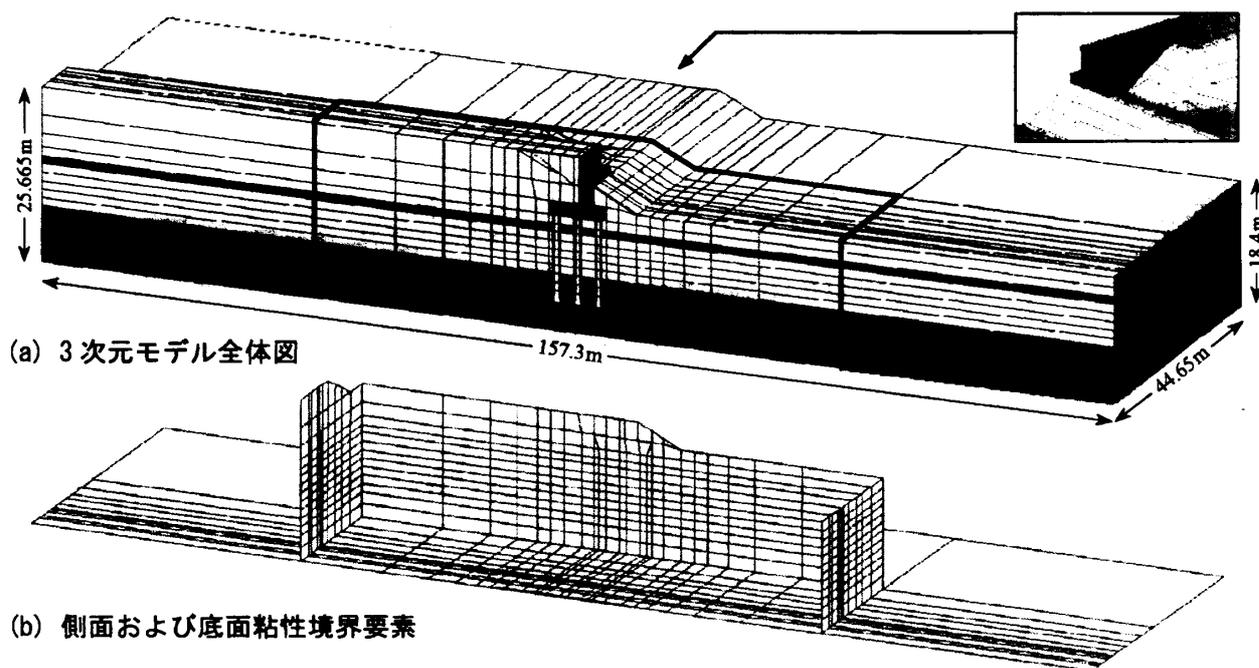


図-3 3次元有限要素モデル

3. 連成地震応答解析の結果

3.1 全体応答挙動

地震応答解析において橋台支承位置の応答変位が最大となる時刻の全体変形図と、支承位置水平変位がほぼ同じ時点での、静的解析における変形図を図-5 に示す（変形を 10 倍に拡大表示）。支承位置の変位は中央杭下端部からの相対変位とし、これが最大となる時刻（3.39sec）を最大応答変位時とした。図-5(a)から分かるように、構造物の変形は主に背面側からの地盤の変形によってもたらされている。最大応答時には橋台と左側地盤との間に大きなすべりと隙間が生じ、これが軟弱シルト層まで続いている。軟弱シルト層とその下の良質な砂礫層との境界付近では、杭の背面側（右側）にも隙間が生じている。

支承位置の相対応答変位および絶対応答加速度の時刻歴曲線を図-6 に示す。始めに正側、ついで負側に大きく応答した後は、負側で応答を続ける片振り応答の傾向が見られる。また、4 秒および 10 秒付近で見られるパルス状の過大な応答加速度は、橋台から剥離した地盤が、再度橋台に衝突する現象に対応したものである。

一方、静的漸増載荷解析では、図-5(b)に示す

ように橋台の変位方向前面の地盤が抵抗しており、隙間やすべりは背面側で生じている。すなわち、支承位置相対変位同一時で比較すると、連成地震応答解析の結果とは異なっている。

3.2 杭基礎の変形性状

地震応答解析および静的漸増載荷解析における杭基礎の変形図および杭軸方向ひずみのコンター図を図-7 に示す。いずれも振動あるいは加力と直交方向の列毎に異なる変形性状となっており、3 次元的に応答していることが分かる。図-7(a)では、杭頭部および軟弱シルト層下端境界付近で大きな損傷が生じており、最も奥に位置する杭（B 列）の損傷が小さい。一方、図-7(b)ではシルト層下部境界付近の損傷はそれほど大きくなく、杭頭部の損傷も奥側に位置する B 列の方が大きい。杭体の変形後の形状も、前者では S 字

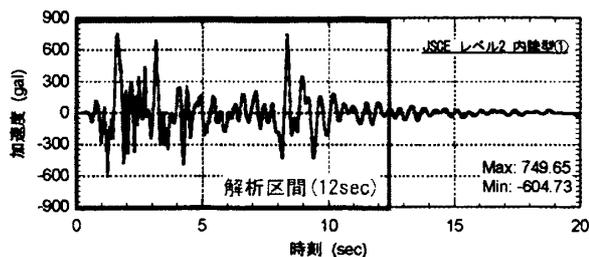
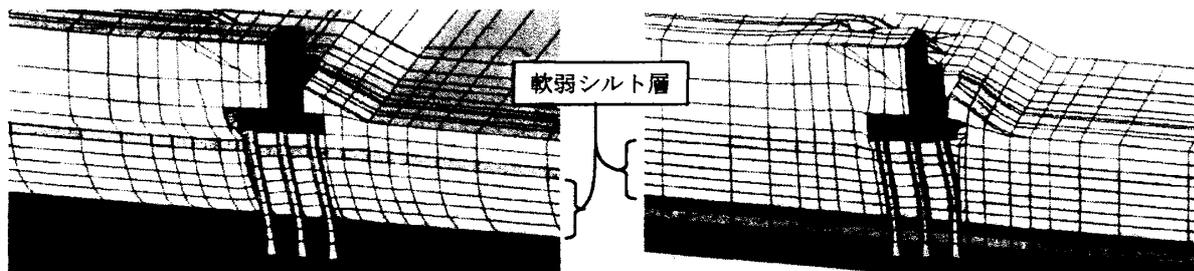


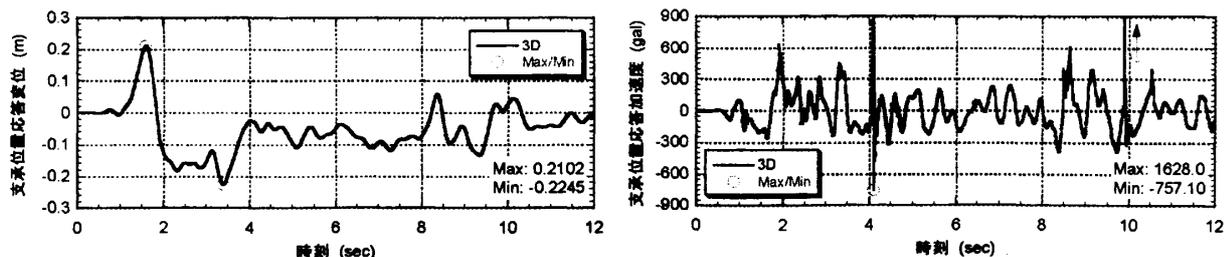
図-4 入力したレベル2地震動波形



(a) 地震応答解析・最大応答変位時 (3.39sec)

(b) 静的解析 (支承位置相対変位 -0.22m 時)

図-5 橋台-地盤系の全体変形図 (変形 10 倍に拡大)



(a) 相対応答変位

(b) 絶対応答加速度

図-6 支承位置における相対応答変位および絶対応答加速度の時刻歴曲線

形、後者は弓形であり、地盤自身も応答して変形を生じること起因する差異と考えられる。

杭体の深さ方向曲率分布を図-8に示す。算定される曲率値が要素ガウス点ひずみの局所性に影響されるのを避けるため、節点変位から要素の平均軸方向ひずみを算出し、要素の平均的な曲率を算定した。地震応答解析と静的解析では杭体の変形モードが明らかに異なり、特に変形方向に対して後列に位置する杭では、大きな損傷を生じる深さが全く異なるのが分かる。

3.3 杭基礎周辺地盤の変形性状

静的漸増載荷解析および地震応答解析における地盤の水平(橋軸)方向直ひずみの分布を図-9に示す。(a)図より、静的解析では基礎変形方向

地盤の比較的浅い領域で、大きな水平直ひずみ(圧縮)が生じている(面A~C)。つまり、基礎の水平変形に対して、変位方向前面の地盤が反力体として抵抗していることを意味する。

これに対して(b)では、基礎の変形方向後方地盤の相対的に深い位置で圧縮ひずみが生じており(面B~D)、地盤が基礎を後方から押すという、言わば加力体として機能していることが分かる。また、変形方向前方に位置する杭間の地盤に大きな引張ひずみが生じており、基礎の前方地盤(左側)が先行して変形していることを示唆している。

以上を総合すると、今回のケースでは静的解析と動的解析で地盤のひずみ状態が明瞭に異なること、入力加速度レベルの増加に伴って、基礎の

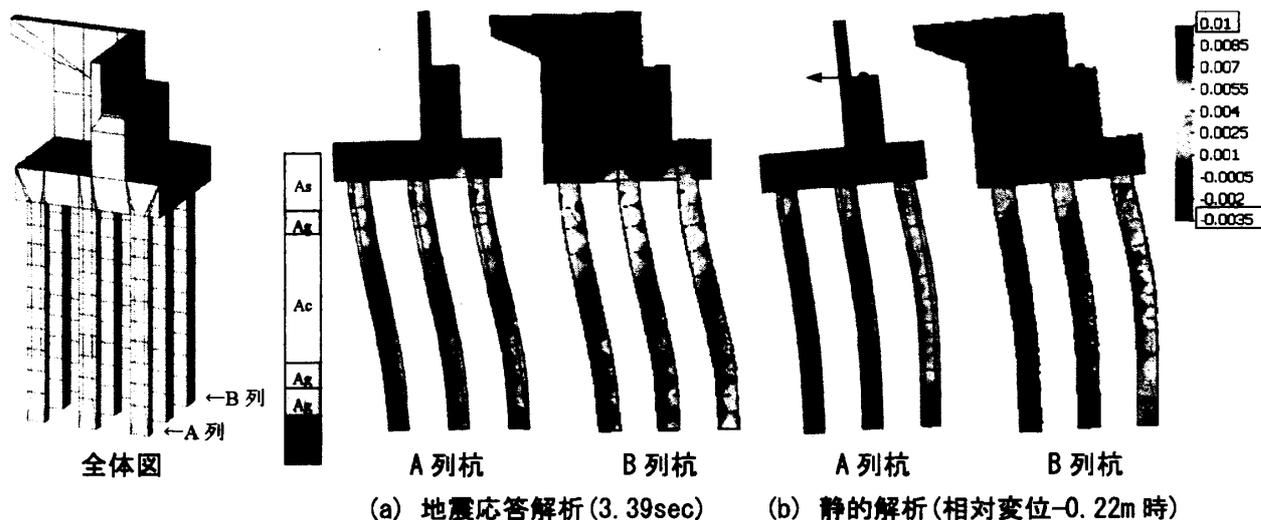


図-7 杭基礎の変形および鉛直方向ひずみコンター図(変形10倍に拡大)

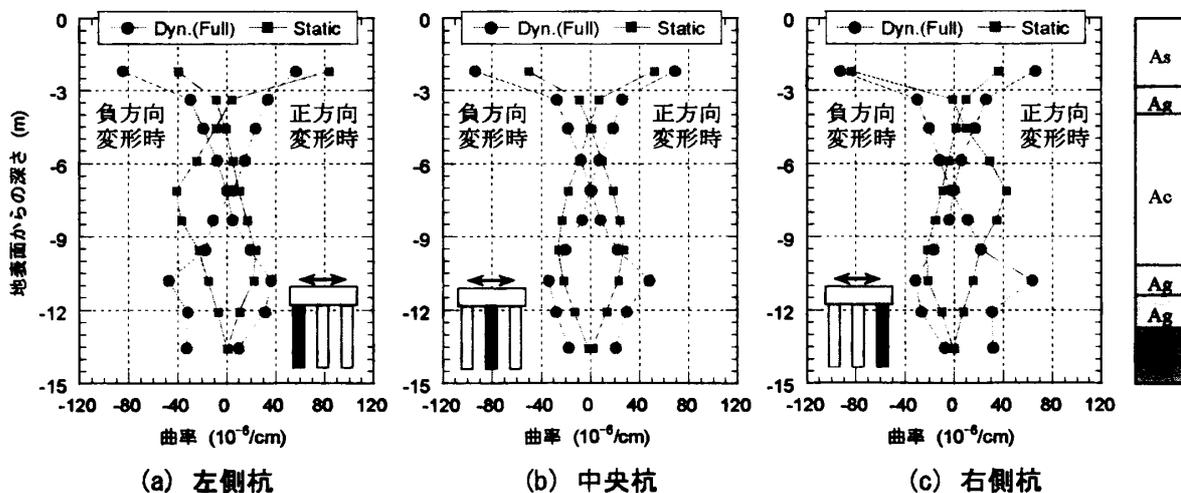


図-8 杭体の曲率分布(A列杭)(動的：正負最大応答変位時、静的：相対変位±0.22m時)

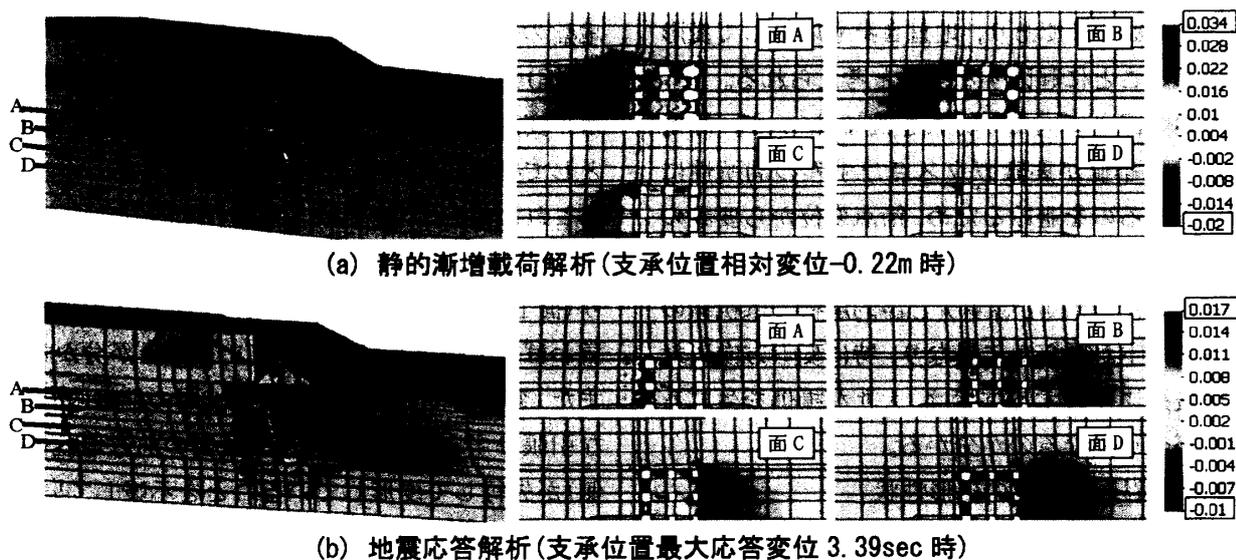


図-9 地盤の水平方向直ひずみコンター図 (変形 10 倍に拡大)

変形方向前方に位置する杭近傍で地盤ひずみが局所化する傾向があると言える。

4. まとめ

本研究では、RC 杭基礎-非対称地盤系の完全 3次元非線形有限要素モデルを用いた連成地震応答解析を実施した。現状では多大な計算時間を要するものの、発散することなく所要のステップまで計算し、系全体の3次元的な連成応答挙動を評価できた。得られた知見を以下に示す。

- (1) 連成応答解析と静的漸増載荷解析を比較した結果、静的解析では得られなかった軟弱シルト層境界付近の杭体の損傷が、連成地震応答解析では見られるなど、杭基礎の変形モードが大きく異なることが明らかとなった。
- (2) 地震時には杭基礎と前面地盤との間に大きなギャップが生じており、静的解析で前提としている基礎前面地盤の反力体としての機能が発揮されないことが考えられる。

今回は、超軟弱地盤に設置された橋台を限定的に対象としたが、地盤条件が異なるケースや橋脚など他の構造形式、多方向入力など地震動特性の影響についても今後検討を行い、材料構成則に基づく3次元FEMによる連成地震応答解析の実用化に向けた取り組みを進めていく予定である。

参考文献

- 1) 土木学会コンクリート委員会：阪神淡路大震災の被害分析に基づくコンクリート構造物の耐震性能照査方法の検証-解析手法の適用と比較-, コンクリート技術シリーズ 49, 2002.12
- 2) 日本コンクリート工学協会：近年の被害地震におけるコンクリート構造物の耐震性能評価に関する研究委員会報告書・論文集, 2004.7
- 3) 土木学会コンクリート標準示方書 [耐震性能照査編], 2002.12
- 4) 例えば Kimura, M. and Zhang, F.: Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elasto-plastic finite element analysis, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.5
- 5) 岡村 甫, 前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解と構成則, 技報堂出版, 1991
- 6) Maekawa, K, Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003
- 7) Osaki, Y.: Some Notes on Masing's Law and Non-Linear Response of Soil Deposits, Journal of the Faculty of Engineering, The University of Tokyo(B), Vol. XXXV, No.4, pp.513-536, 1980