

◆ 液状化特集 ◆

地盤の流動が橋梁基礎に及ぼす影響の解析的検討

東 拓生* 田村敬一**

1. はじめに

平成7年兵庫県南部地震では、臨海部の埋立地盤の広い範囲で液状化が発生するとともに、特に水際線近傍では液状化に伴い地盤に流動的な変形が生じ、橋梁基礎に残留変位が生じた事例が見られた。このことに鑑みて、平成8年12月に改訂された道路橋示方書では流動化に対する規定が設けられたが、地盤の流動が基礎に及ぼす影響については未解明の部分が多く残されているのが現状である。本研究は、埋立地盤の護岸近傍における地盤の流動に伴う地盤の変位及び橋梁基礎に生じる変位並びに断面力に関する解析手法について検討したものである。

2. 地盤の流動とその解析手法

本研究で取り扱う地盤の流動とは、地震時の地盤の液状化に伴い、地盤の剛性が著しく低下し、埋立地盤の護岸近傍等の解放面を有する地盤や、地表面が傾斜した地盤などで地盤が水平に大きく変形する現象である。これにより水平に移動した地盤は、地中に埋設されている構造物（基礎構造物、地中埋設管など）に水平力を与えることとなる。このような現象は、昭和39年新潟地震の際の信濃川流域¹⁾、昭和58年日本海中部地震の際の能代市¹⁾、平成7年兵庫県南部地震の際の神戸市周辺の埋立地盤^{2),3)}などで顕著に見られた。

流動に伴う地盤の変形量を推定するための解析手法としては、主として下記に示すものが提案されている。

- ①有限要素法を基本として、地盤のうち液状化した部分のみについて剛性を低下させ、これに自重により生じる変形を地盤の流動変形と考える手法。
- ②有限要素法を基本として、地盤の液状化に伴う諸現象（過剰間隙水圧の上昇、土の剛性低下等）を時々刻々と追跡する動的解析手法。
- ③有限要素法などを基本として、液状化した地盤を、ある粘性を有する流体と考え、この流体に自

重によって生じる流れを地盤の流動と考える手法。

②の手法については、地盤の流動のような大変形問題では計算結果が安定しにくいとともに、地盤の材料物性等に関するパラメータの設定が難しいという問題がある。また、③の手法については、地盤の粘性などのパラメータ設定が難しいとともに、地盤の性質が液状化の進行に伴い流体的なものへと変化し、地震動の終了後に固体的な性質を徐々に回復する、という複雑な現象を再現しなければならず、解析手法が複雑になるという問題がある。①の手法については、必要なパラメータは土の単位体積重量や液状化後の地盤剛性などの、比較的設定が容易なものであり、解析手法は一般に多く用いられ、解析ツールも豊富な静的有限要素解析である。このため、本研究では、①に基づいて流動に伴う変形を推定することとした。

また、流動が基礎に及ぼす影響を評価するための解析手法としては、地盤の変位をバネを介して基礎構造物に作用させる、応答変位法に基づく手法を用いた。

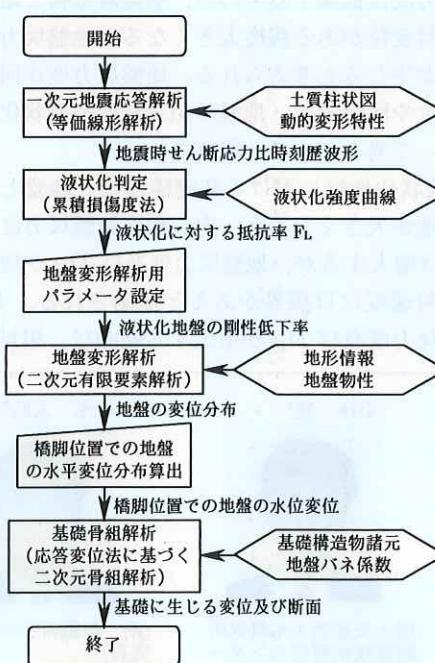


図-1 解析のフロー

3. 解析方法

3.1 解析手順

本研究の解析手順を図-1に示す。

はじめに、液状化の判定を行うことにより、地盤の液状化の程度を算出する(以下、液状化判定という)。次に、解析対象地点の二次元有限要素

解析モデルを作成するが、この解析モデルの作成にあたっては、先に述べた液状化判定の結果に基づき、液状化の程度が高い部分の地盤剛性を、液状化の程度に応じて低下させる。このモデルを用いて、静的二次元有限要素解析により流動に伴う地盤の変位を算出する(以下、地盤変形解析という)。さらに、地盤変形解析により得られた、橋

脚近傍での地盤変位を用いて、応答変位法に基づく二次元骨組解析を行うことにより、地盤の流動に伴い橋梁基礎に生じる変位及び断面力を算出する(以下、基礎骨組解析という)。解析対象地点は、神戸市東灘区魚崎浜の南岸に位置する阪神高速道路5号湾岸線の橋脚及びその周辺地盤である。以下に解析の詳細を示す。

3.2 液状化判定

図-2に解析モデルの概要を示す。図中に示すように解析対象橋脚は護岸先端部(水際線)から内陸側に30.9mの場所に位置している。液状化判定は、図中の

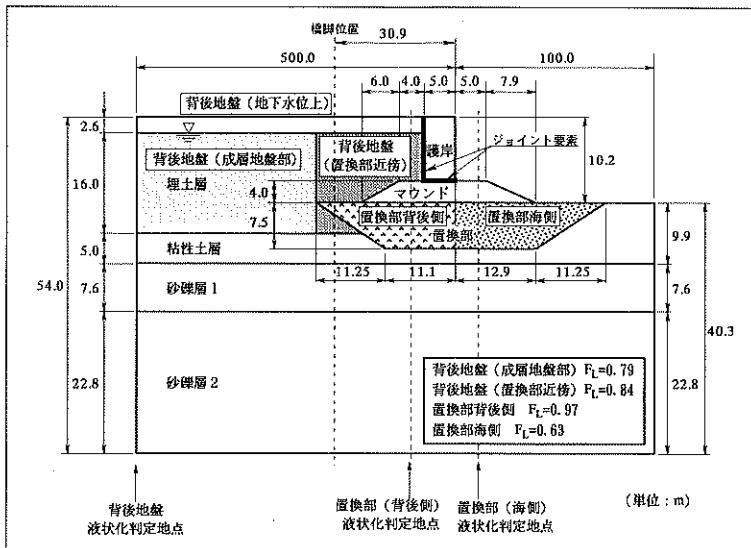


図-2 地盤変形解析のモデル概要

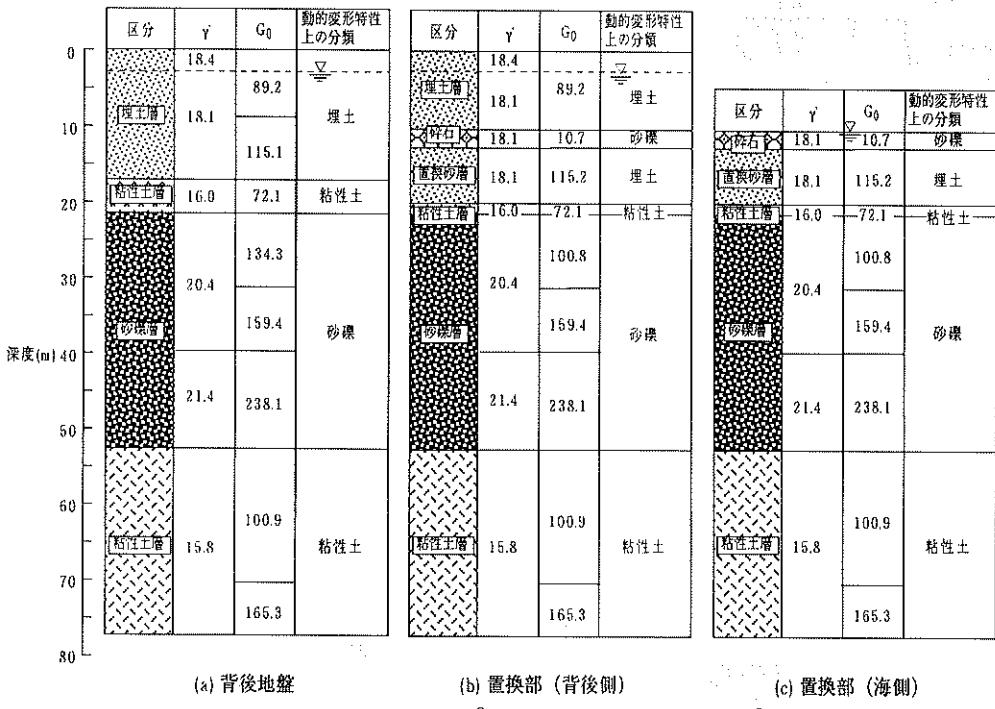


図-3 一次元地震応答解析に用いた地盤モデル

3箇所の液状化判定地点(背後地盤1箇所及び置換部2箇所)において行い、液状化の程度を表す指標である液状化に対する抵抗率 F_L を算出する。

まず、一次元地震応答解析(等価線形解析)により地震時せん断応力比の時刻歴波形を算出する。図-3に一次元地震応答解析に用いた地盤モデル、図-4に地盤の動的変形特性(せん断剛性率 G -せん断ひずみ γ 関係)を示す。

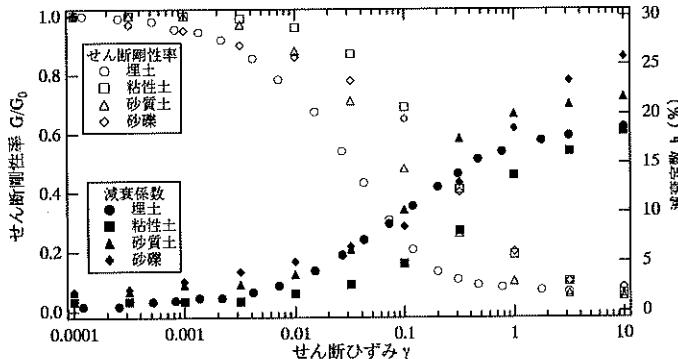


図-4 1 次元地震応答解析に用いた地盤の動的変形特性

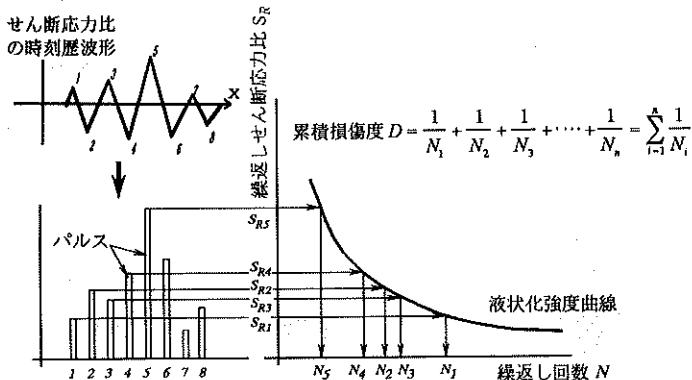
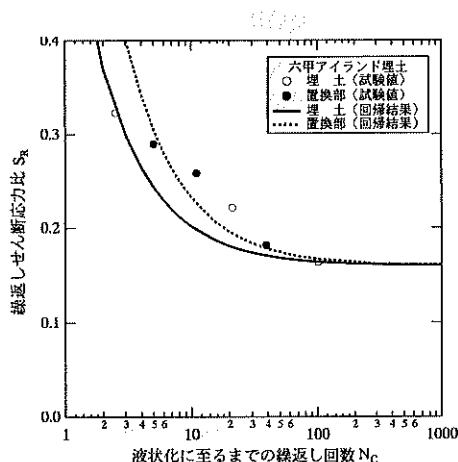


図-5 累積損傷度法の概要

図-6 液状化強度曲線⁴⁾

ん断ひずみ γ 関係、減衰定数 h -せん断ひずみ γ 関係)を示す。

次に、地震応答解析によって得られた、地震時せん断応力比の時刻歴波形を用いて、累積損傷度法に基づく計算により、地盤の液状化強度比(R_L)を算出する。図-5に、累積損傷度法の概念を示す。まず、地震応答解析で得られたせん断応力比

の時刻歴波形を、ゼロクロスする点ではさまたれたX軸上下の部分のパルスに分解し、パルス1個を1回の繰返しと考える。一方、正弦波による砂質土の非排水繰返しせん断強度試験から、繰返しせん断応力比 S_R と繰返し回数 N の関係(液状化強度曲線)を求める。ここで、図-5の左のようにパルス化した波形を液状化強度曲線に当てはめると、それに対応した繰返し回数が得られる。この繰返し回数の逆数を全てのパルスについて求め、その総和を累積損傷度 D とし、 $D \geq 1.0$ となつたとき液状化すると判定するものである。

本研究では、せん断応力比の時刻歴波形の振幅を変化させて D を計算し、 $D = 1.0$ となるときの地震動波形の最大せん断応力比を地震動波形に対する液状化強度比 R_L と定義した。この R_L を前述の一次元地震応答解析により得られるせん断応力比(動的せん断応

力/有効上載圧)の最大値 L_{max} で除すことにより、液状化に対する抵抗率($F_L = R_L / L_{max}$)を求めた。地震応答解析に用いた入力地震動は、ポートアイランド GL-79mにおいて観測された水平方向2成分であり、この2成分の解析結果を用いて液状化判定を行い、 F_L が低い結果となるものを採用了。また、図-4の動的変形特性及び図-6の液状化強度曲線としては、魚崎浜での試験結果がないため、六甲アイランドのもの⁴⁾を用いた。

3.3 地盤変形解析

地盤変形解析を行う前に、図-7を用いて液状化判定で得られた F_L に応じて液状化後のせん断剛性をどの程度低減させるかを決定する。図-7の縦軸は、液状化後のせん断剛性 G_1 を液状化前(常時)のせん断剛性 G_N で除したものであり、これをせん断剛性低下率と呼ぶこととする。 G_N は、

道路橋示方書 IV 下部構造編の標準貫入 N 値に基づく変形係数の算定式 $E_0 = 28N(\text{kgf}/\text{cm}^2) = 2744N(\text{kN}/\text{m}^2)$ (N は標準貫入 N 値) で E_0 を算出し、ポアソン比 $\nu = 0.33$ として下式で算出する。

$$G_N = E_0 / 2(1 + \nu) \quad (1)$$

図-7 の白丸で示したせん断剛性低下率と F_L の関係は、中空ねじりせん断試験により、まさ土で

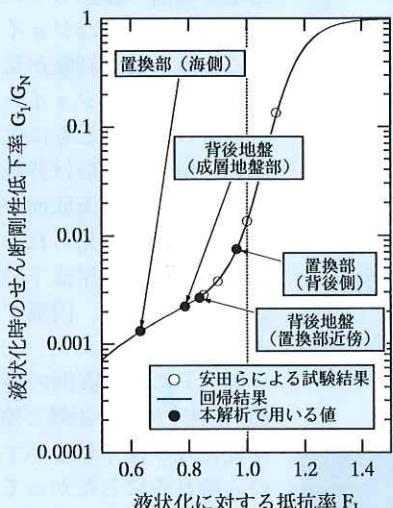


図-7 地盤の液状化後の剛性低下率

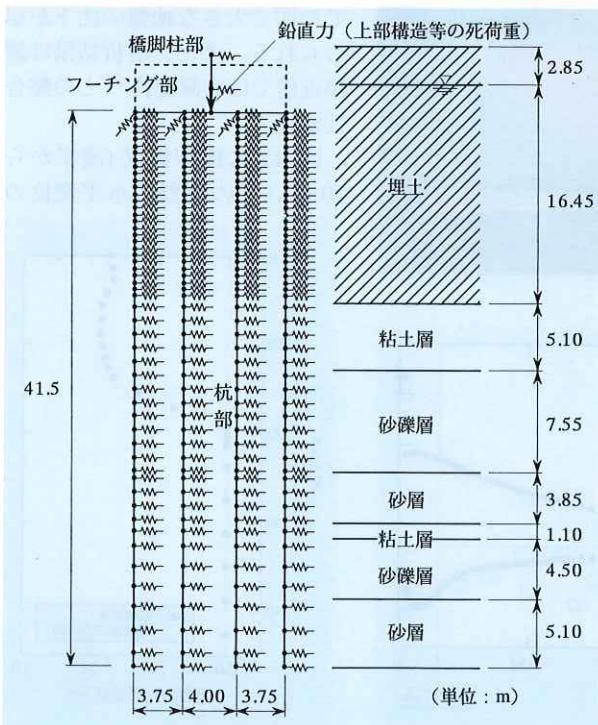


図-8 橋梁基礎骨組解析のモデル

作成した供試体に対して、所定の液状化状態になるよう繰返せん断を与えた後、この供試体に一定方向に静的せん断を与え、液状化後のせん断剛性を推定するという試験の結果⁵⁾に基づいて、得られたものである。これを回帰分析することにより式(2)の回帰式を得た。

$$\frac{G_1}{G_N} = \exp \left\{ \frac{-5.6}{F_L^{0.35} + 0.31 F_L^{18}} \right\} \quad (2)$$

この回帰式に基づいて、本解析に用いる地盤のせん断剛性低下率を設定した。なお、粘性土層、砂礫層については、常時のせん断剛性を用いるものとした。

解析モデルは、節点数 2255 点、要素数 2142 個(平面ひずみ要素 2131 個、ジョイント要素 11 個)であり、境界条件は、側方境界は鉛直自由、水平固定とし、底面境界については鉛直・水平ともに固定とした。

3.4 基礎骨組解析

基礎骨組解析では、基礎構造物(杭、フーチング)及び橋脚柱のうち地中部を二次元非線形梁要素によりモデル化し、それに橋脚の死荷重及び非線形バネ要素を介して地盤変形解析により得られた地盤変位を作用させ、橋梁基礎の変形及び断面力を求めた。

解析モデルとしては、図-8 に示すような骨組モデルを用いた。基礎のモデル化は、地表面より杭先端(深度 46.5m、杭長 41.5m)までとした。解析モデルは、節点数 635 点、要素数 266 個(梁要素 210 個、バネ要素 56 個)であり、杭先端の境界条件は鉛直・水平を自由とし、回転を拘束した。また、橋脚柱部及び上部構造の自重をフーチング部中央に鉛直力として作用させた。

基礎杭はトリリニア型の $M-\phi$ 関係を持つ非線形梁要素とした。また、橋脚柱部、フーチング部は剛な梁要素とした。

地盤は受働土圧強度を上限値とするバイリニア型の非線形バネ要素とした。なお、軸方向バネについても、地盤の極限支持力を上限値とする、バイリニア型の非線形バネ要素として表現した。

4. 解析結果

4.1 液状化判定の結果

図-9 に一次元地震応答解析で得られた地盤内の最大せん断応力比の分布と、液状化強度比

R_L 、液状化に対する抵抗率 $F_L (= R_L / L_{max})$ を示す。このようにして得られた F_L を基に図-7を用いて液状化後のせん断剛性低下率を求めた(図-7中の黒丸が本解析に用いた値)。その結果、地盤のせん断剛性低下率は、背後地盤(成層地盤部)で約1/450、背後地盤(置換部近傍)で約1/370、置換部

(背後側)で約1/130、置換部(海側)で約1/750となった。なお、表層の非液状化層のせん断剛性は背後地盤(成層地盤部)の150倍とした。

4.2 地盤変形解析の結果

図-10に地盤変形解析により得られた、護岸近傍の地盤の変形状況を示す。メッシュの色はせん断ひずみの大きさを示している。護岸は、ほぼ直立した状態を保ったまま海側へ移動している。護岸背面に設定したジョイント要素には滑り及び剥離が見られるが、護岸底面のジョイント要素には滑り、剥離ともに生じていない。地盤の変形は背後地盤側が陥没し、海側海底面が隆起するという傾向が見られる。せん断ひずみは、護岸直下の置換部に集中しており、円弧すべり状の傾向を示した。

図-11に、地震前の護岸の前面(海側)からの距離と地盤の水平変位及び沈下量を示す。護岸から離れるにしたがって、地盤の水平変位が減少するとともに、置換部がある護岸から約30mまでの間で大きな地盤の沈下が認められる。また、解析結果は護岸近傍では実測変位²⁾との整合性が高い。

図-12に橋脚位置(護岸から30.9m)での地盤の水平変位の

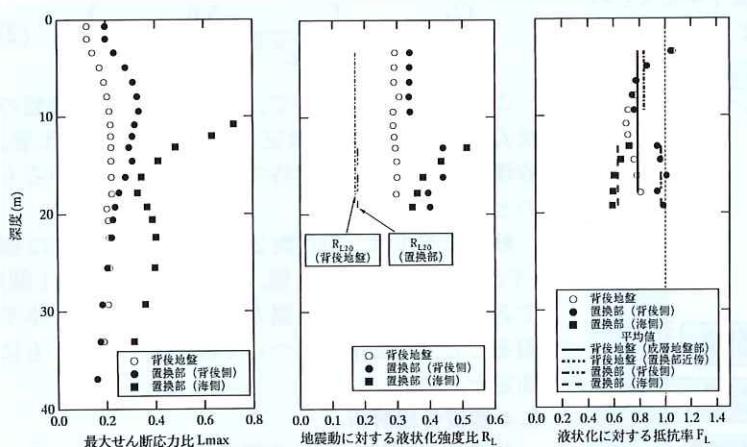


図-9 地震応答解析及び液状化判定の結果

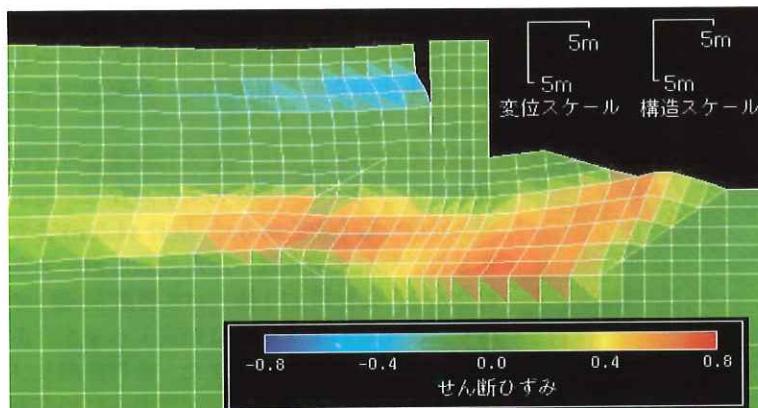


図-10 地盤の変形状況

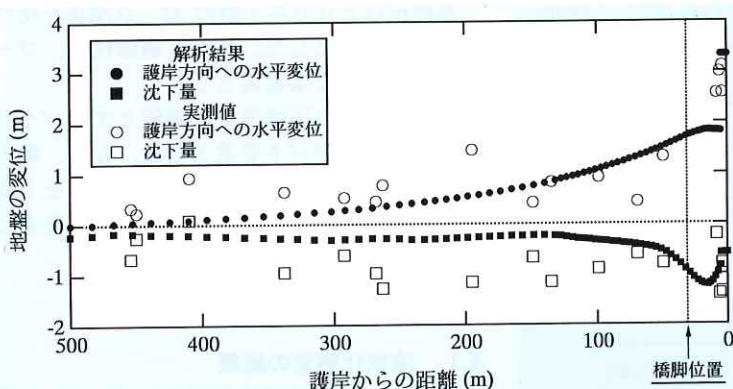


図-11 地盤の変位と護岸から距離の関係

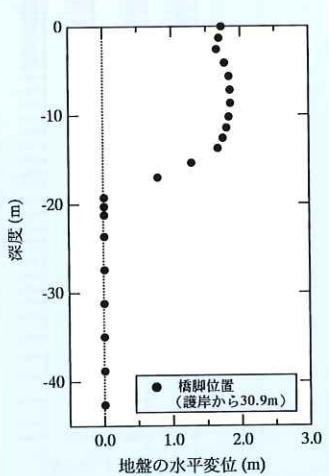


図-12 地盤変位の深度分布

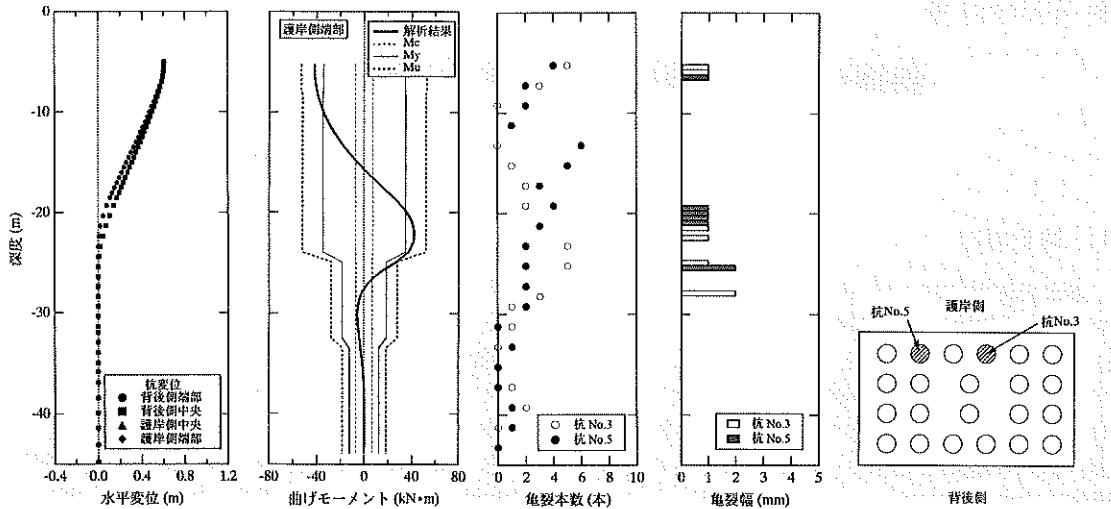


図-13 杭の水平変位、杭に作用する曲げモーメント、地盤変位分布を示す。地表面変位は約 1.7m であり、

変位の分布形状は液状化層の下端である深度 18m 付近から急激に増加し、地表面で最大となる分布を示している。また、前述のとおり、置換部に相当する 18m から 15m の間での変位の増加の度合い（ひずみ）が大きくなっている。

4.3 橋梁基礎骨組解析の結果

図-12 に示した地盤変位を、図-8 に示す橋梁基礎骨組モデルにバネを介して作用させる基礎骨組解析により得られた、基礎の水平変位、基礎に生じた曲げモーメント、兵庫県南部地震後に計測された杭に生じた亀裂の位置及び幅を、図-13 に示す。基礎の変位は、杭頭部で 60cm 程度であり、地震後の実測値が 62cm であったことから、地盤の変位について本解析は実測値とよく整合している。また、曲げモーメントについては、杭頭から 4~5m 及び深度 19m~21m 付近で降伏曲げモーメントを越える結果となっている。実際の杭でもこの付近で大きなクラックが認められており、このような状況とも整合している。

5. まとめ

地盤の流動に伴う地盤の変位並びに橋梁基礎に生じる変位及び断面力に関する解析手法について検討を行った。その結果、下記のことが明らかとなった。
(1) 護岸から離れるにしたがって、地盤の水平変位が減少しているとともに、置換部がある護岸から約 30m までの間で地表面の沈下が顕著であり、解析結果は護岸近傍では実測変位との整合性が高い。また、変位の地中分布形状は、液状化層の下端付近から急激に増加し、地表面で最大となる

深度分布を示す。地表面変位は約 1.7m であり、

変位の分布形状は液状化層の下端である深度 18m 付近から急激に増加し、地表面で最大となる分布を示している。また、前述のとおり、置換部に相当する 18m から 15m の間での変位の増加の度合い（ひずみ）が大きくなっている。

(2) 解析により得られた基礎の変位は、杭頭部で 60cm 程度であり、地震後の実測値とよく整合した。また、解析により得られた杭の曲げモーメントが降伏点を越えている深度と、兵庫県南部地震後に計測された杭に生じた亀裂が多く確認されている深度はよく整合していた。

参考文献

- 浜田正則、安田進、磯山龍二、恵本克利：液状化による地盤の永久変位の測定と考察、土木学会論文集、第 376 号、1986.12
- Masanori Hamada, Ryoji Isoyama and Kazue Wakamatsu : The 1995 HyogokenNanbu (Kobe) Earthquake Liquefaction, Ground Displacement and Soil Condition in Hanshin Area, Association for Development of Earthquake Prediction, August, 1995.8
- 田村敬一、濱田慎、東拓生：流動化に対する道路橋の耐震設計、土木技術資料、Vol.39, No.2, 1997.2
- 港湾技術研究所：兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察、港湾技研資料、No.813, 1995.9
- 安田進、吉田望、安達健司、規矩大義、五瀬伸吾、増田民夫：液状化に伴う流動の簡易評価法、土木学会論文集、No.638/III-49, pp71-89, 1999.12

東 拓生*



国土交通省土木研究所
地盤情報資料課資料係長
(前 振動研究室研究員)
Takuo AZUMA

田村敬一**



同 地盤情報資料課
振動研究室長、工博
Dr.Keiichi TAMURA