

# 軟弱地盤上に設置された道路橋基礎の健全度評価に関する研究

研究予算：運営費交付金  
 研究期間：平 25～平 28  
 担当チーム：橋梁構造研究グループ  
 研究担当者：七澤利明，谷本俊輔，坂下学，  
 大城一徳

## 【要旨】

軟弱地盤上に設置された道路橋基礎の橋台の変状が確認された場合に、基礎の健全度を早急に判断する評価方法が求められている。このため、本研究では、軟弱地盤上の橋台に関する遠心模型実験や、考案した健全度評価のための解析手法による再現解析などを行い、橋の共用性や安全性、修復や再構築の必要性などを早急に判断できる基礎の健全度評価法を提案した。

キーワード：軟弱地盤，側方流動，橋台，健全度評価，地盤変形解析，応答変位法

## 1. はじめに

軟弱地盤上に設置された道路橋下部構造では、施工時の側方流動や、地震時の液状化および流動化により、橋台や橋脚の移動や傾斜などの変状が生じる事例がある。このような変状が生じた場合、橋の共用性や安全性、修復や再構築の可否などの判断には、基礎の健全性を確認することが必要となるが、その確認のためには、掘削などの大規模な調査が必要となる。特に、大規模地震後など、早急に判断が求められるときの対応として、大規模な掘削などを行うのは容易ではない。

こうしたことから、軟弱地盤上に設置された道路橋基礎において、容易に計測することが可能な地上部で確認される橋台の変状から、地中部の基礎の健全度を早急に判断する評価方法が求められている。この評価方法として、本報では、地上部の変位計測データを用いて簡易な計算モデルによる解析を行い、地中部の基礎の損傷状況を推定する方法を考案した。具体的には、①軟弱粘性土地盤上における施工時の橋台の側方移動に関する遠心模型実験を行い、基礎の変位や杭の断面力分布を把握したうえで、②実験における地上部の変位計測データを用いて、簡易な計算モデルによる再現解析を行った。本報では、健全度評価法の確立を目指し、上記①および②の検証結果を報告する。

## 2. 遠心模型実験

### 2. 1 実験方法

模型実験において、軟弱粘性土地盤上の橋台が施

工時に側方流動の影響を受ける状況を再現するにあたり、盛土の施工を行う際の側方流動量は、盛土荷重や圧密過程における粘性土の強度発現度合いに依存することから、これを簡易に再現するため、遠心力場で実験を行うこととした。表-1 に実験ケース、図-1 に模型概要図を示す。実験は、背面盛土高と軟弱粘性土層の地盤材料をパラメータとし、3 ケースを 75G の遠心力場で行った。

表-1 実験ケース

実験ケース	盛土層 背面盛土高 (橋台高さ)	材料	粘性土層		
			塑性指数 $I_p$	圧縮指数 $C_c$	強度増加率 $c_u/p'$
Case1	12m	スミクレ	15.8	0.183	0.656
Case2	6m				
Case3	12m	カオリン	51.5	0.394	0.308

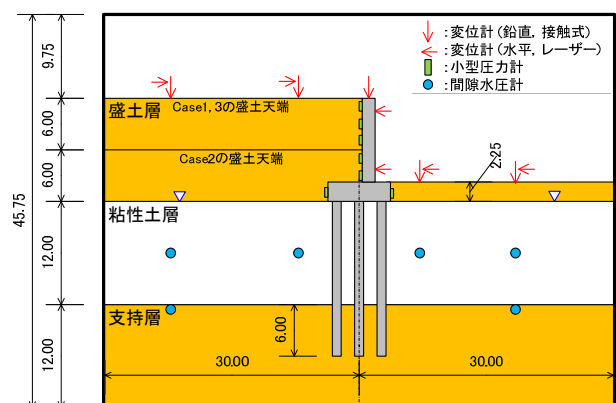


図-1 模型概要図 (実物スケール, 単位: m)

支持層および盛土層は、東北珪砂7号を用い、相対密度  $D_r=80\%$  となるように作製した。

粘性土層は、スラリー状の粘性土材料を土槽に投

入した後、遠心力場で 80kPa 程度の上載荷重を与えた状態で圧密させることにより作製し、層厚を 12m とした。表-1 に示すように、使用したスミクレーはカオリンに比べて圧縮性が低く、せん断強度が大きいのが特徴である。実験では、75G に達するまで 0.1G/分の速度で遠心加速度を上昇させた後、圧密が完了するまで遠心加速度を保持した。

模型杭は、杭頭をフーチングに剛結し、外径 1.05m、肉厚 75mm の 5 列×3 列とし、アルミパイプにより模した。一部の模型杭には、軸ひずみおよび曲げひずみを測定するため、パイプの内側にひずみゲージを設置した。

## 2. 2 実験結果

図-2 に、Case3 を例に実験後の模型地盤の残留変位の観察記録を示す。背面盛土層に大きな沈下が生じていること、それに比して背面盛土層や粘性土層に生じた残留水平変位が小さいことが分かる。なお、フーチング上載土とさらにその背後で変位量が不連続に変化しているが、破壊域の大きさと段差の生じ方から、主働破壊や受働破壊の痕跡ではなく、単なる不など沈下の影響であると見られる。粘性土の圧縮性が低い Case1 と、さらに盛土荷重が小さい Case2 では、Case3 に比べて模型地盤の表面および内部の残留変位量が小さかったものの、変形モードに有意な差異は認められなかった。

図-3 に、フーチング下面位置における水平変位(模型スケール)と、遠心加速度の推移を示す。いずれのケースも、水平変位は、遠心加速度が 75G に達するまでの間に発生し、その後の圧密進行過程～遠心力の除荷過程における累積量は小さい。この傾向は、たて壁の傾斜角や杭の曲げモーメントについても同様であった(図-4)。また、75G 到達時における基礎の変位は、盛土荷重が大きく粘性土が軟弱な Case3 で最も大きくなった。

図-5 に、75G 到達直後における杭の曲げモーメント分布を示す。いずれのケースについても、後列杭のモーメント分布の形状からは、粘性土層からの側圧を直接的に受けていることが分かる。その一方で、前列杭と中列杭は前面地盤からの水平抵抗を得ていることが分かる。ケース間で比較すると、盛土高が大きいほど、また、粘性土の圧縮性が高くせん断強度が小さいほど、大きな曲げモーメントが生じている。

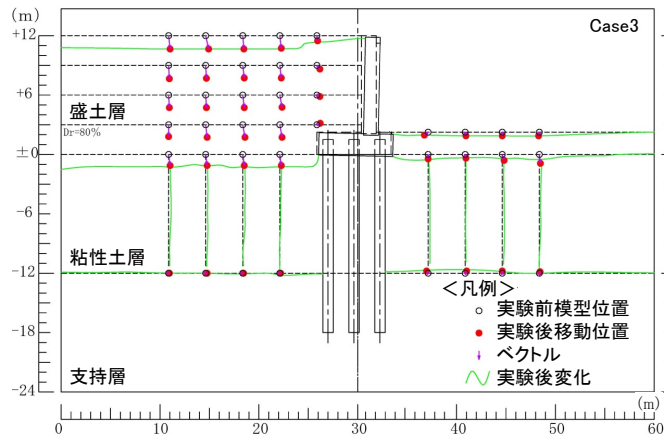


図-2 実験後の模型の変形図 (Case3)

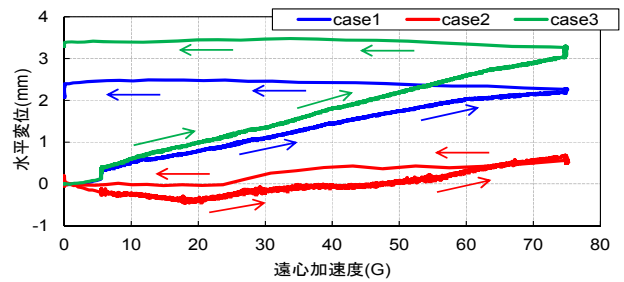


図-3 フーチングの水平変位と遠心加速度の関係

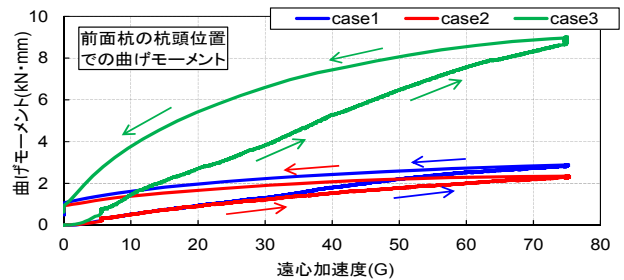


図-4 前面杭の杭頭の曲げモーメントと遠心加速度の関係

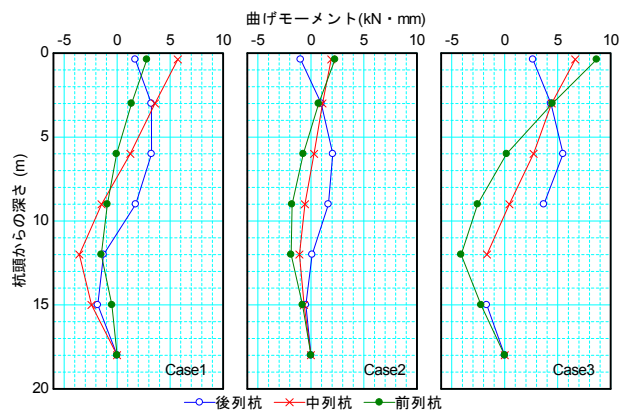


図-5 75G到達直後における杭の曲げモーメント分布

## 3. 再現解析

### 3. 1 解析概要

再現解析では実務での適用性を考慮し、簡易に計算可能なはり・ばねモデルを用いた応答変位法によ

る解析を行うこととした。ただし、応答変位法を行うには、杭周辺部の地盤変位が必要となるので、この地盤変位を地上部変位から予測するために、応答変位法に先立ち、有限要素法（FEM）による地盤変形解析を行う必要がある。そこで、本報では、地盤変形解析と応答変位法を組み合わせた2段階の解析手法を考案した。具体的には、地盤変形解析で実験の地上部変位を再現し、その解析結果で得られた地盤変位を応答変位法に入力して基礎に発生する断面力などを解析した（図-6）。

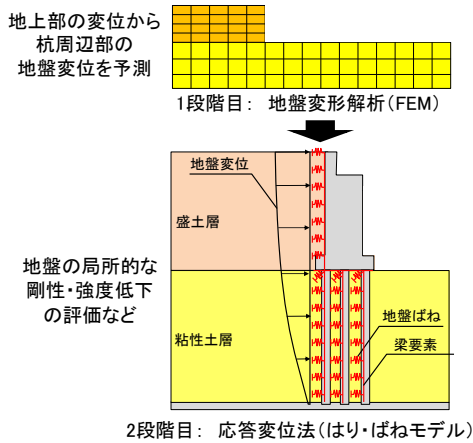


図-6 2段階による再現解析モデルのイメージ

### 3. 2 地盤変形解析

地盤変形解析では、杭位置における地盤変位分布を得るため、2次元有限要素法による自重変形解析により、実験における地上部の水平変位を再現した。具体的には、橋台たて壁の回転の影響を排除するために、たて壁下部の水平変位の実験値に解析値を合わせるようにした。

粘性土層および支持層には、拘束圧依存性を考慮した線形弾性モデルを適用した。その粘性土層における弾性係数を、圧密非排水(CU)三軸圧縮試験で得られた変形係数  $E_{50}$  を基準に低下させていき、た

て壁下部の水平変位の実験値と解析値が一致するような低下剛性を逆解析的に算定した。ここでは、圧密に伴う粘性土の体積圧縮量を線形弾性体で表現することは困難であるため、圧密による沈下量には着目しないこととした。

背面盛土層は引張応力を発揮することで下部の粘性土層の変形を阻害しないように配慮し、降伏基準に Mohr-Coulomb 式を、塑性ポテンシャルに Drucker-Prager 式を用いた弾完全塑性モデル (MC/DP モデル) を適用した。なお、地盤変位の算出を目的とするこのモデルでは橋台躯体および杭基礎をモデル化していないため、背面土の粘着力が小さい場合は容易に主働崩壊を生じる結果となる。そこで、たて壁位置に静止土圧相当の分布荷重を与えることで背面土に自立性を与えている。

図-7 に、再現解析における杭位置の地盤の水平変位を示す。粘性土層の剛性低下率は、実験ケースによらず、1/10 程度と逆算された。また、水平変位は、実験ケースによらず、粘性土層の上端から4m 程度の深さで最大変位を示しており、Case1, 2 で 40 cm, Case3 で 60 cm 程度であった。

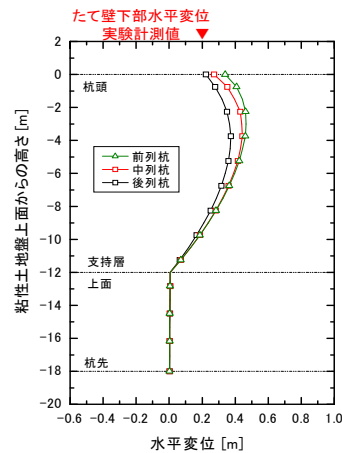


図-7 杭位置での地盤の水平変位 (Case1)

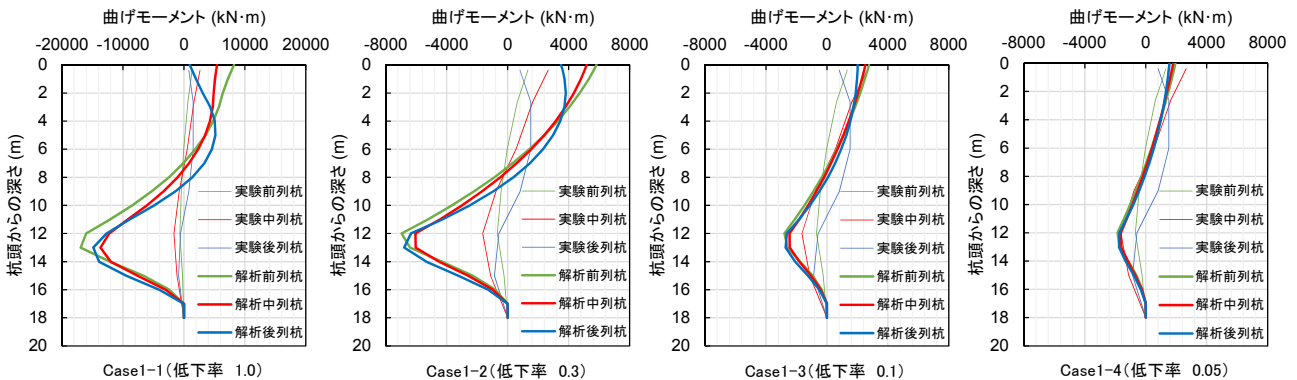


図-8 曲げモーメント分布図 (Case1)

### 3. 3 応答変位法による解析

応答変位法による解析では、橋台および杭基礎を模した2次元はり・ばねモデルを用いて、応答変位法による解析を行った。構造物は弾性のはり要素としてモデル化した。地盤ばねは水平方向地盤反力係数と地盤反力度の上限値を与えたバイリニアモデルとし、既往の研究(1)を参考に群杭効果を考慮した。地盤ばねの一端を杭と接続し、他端に地盤変形解析で得た変位を強制的に与えることで、杭体の曲げモーメントを求めた。ただし、粘性土層が背面盛土層の自重による偏差応力により塑性化している状態を想定し、粘性土層については水平方向地盤反力係数と地盤反力度の上限値を低下させることとし、その低下率をパラメータとして解析を行った。

図-8に、Case1を例に杭体の曲げモーメント分布を示す。粘性土層の地盤ばねを低下させないCase1-1(低下率1.0)は実験結果を大きく超過しており、Case1-3(低下率0.1)で、実験値と近似した。この傾向は実験ケースによらず同様であり、実験結果と近似するのは低下率0.1程度であった。モーメント分布に着目すると、低下率によらず杭頭から8m付近で曲げモーメントの符号が反転している。ただし、杭列毎の曲げモーメント分布は、実験と異なり、差が生じていない。解析では、3列共に一様の曲げモーメント分布を示しているのに対し、実験では、後列杭と中前列で異なる分布を示している。解析において、抵抗に関しては杭列毎に隣接杭の影響を考慮した水平地盤ばねを設定しているが、作用に関しても隣接杭の影響を考慮するなどの改良が必要と考えられる。

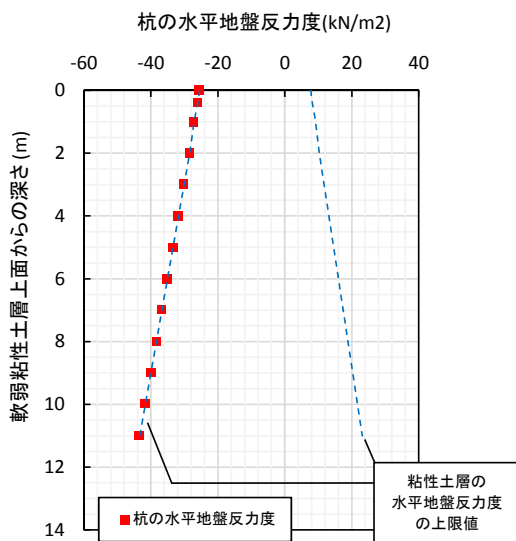


図-9 杭の水平地盤反力度 (Case1-3)

図-9に、Case1-3を例に粘性土層における杭の水平地盤反力度の深度分布を示す。図では水平地盤反力度が上限値に達している。この結果、発生曲げモーメントは、地盤変形解析で得た強制変位量に依存しない結果となり、この傾向は実験ケースによらず同様であった。今回の結果では、粘性土層の水平地盤反力度が上限値に達していることから、今後は、強制変位が小さく水平地盤反力度が上限値に達しないようなケースへの適用性について検討する必要がある。

### 4. まとめ

側方移動の影響を受けた橋台基礎の健全性を評価する手法として、遠心模型実験を行うとともに、実験における地上部の変位計測データを用いて、簡易な計算モデルである地盤変形解析と応答変位法を組み合わせた手法により、再現解析を行った。以下に検証結果を示す。

- ・遠心模型実験では、75G到達直後に橋台の応答が最大となり、その応答値は盛土荷重、粘性土の材料特性の影響を受ける結果となった。
- ・地盤変形解析では、粘性土層の剛性低下率を土質試験の1/10とすることで、実験での地上部変位を再現することができた。
- ・応答変位法では、地盤変形解析で得られた変位を入力して解析を行ったところ、粘性土層の剛性低下率を地盤変形解析と同様に1/10とすることにより、実験での曲げモーメント分布を再現することができた。ただし、曲げモーメント分布の杭列による違いなどは再現することはできなかった。

これらの結果から、橋の共用性や安全性、修復や再構築の必要性などを早急に判断できる基礎の健全度評価法を、概ね提案することが出来た。今後さらに検討を重ね、結果を蓄積することで、健全度評価の汎用性および推定精度の向上を図っていきたい。

### 参考文献

- 1) 白戸真大, 野々村佳哲, 福井次郎:「動的解析における群杭のモデル化に関する検討」, 地震工学研究発表会講演論文集, E-84, 2005.

# A STUDY ON SOUNDNESS EVALUATION OF BRIDGE FOUNDATION ON SOFT GROUND

**Budget** : Grants for operating expenses

**Research Period** : FY2013-2016

**Research Team** : Bridge and Structural Technology  
Research Group

**Author** : Toshiaki Nanazawa  
Shunsuke Tanimoto  
Gaku Sakashita  
Kazunori Oshiro

**Abstract** : There is a need for an evaluation method to quickly judge the soundness of the foundation when the deformation of the bridge of the road bridge foundation installed on the soft ground is confirmed. For this reason, in this research, centrifugal model experiments on the abutments on the soft ground and the reconstruction analysis by the analyzing method for devising the proposed soundness assessment, etc. are carried out and the necessity of bridge sharing, safety, restoration and reconstruction We propose a method for evaluating the soundness of the foundation so that we can quickly judge.

**Keywords** : Soft ground, Lateral flow, Bridge abutment, Soundness evaluation, Ground deformation analysis, Response displacement method