

III-3 液状化地盤の変形に基づく橋梁基礎の耐震設計法に関する試験調査

研究予算：運営費交付金（道路整備勘定）

研究期間：平 12～平 16

担当チーム：耐震研究グループ（振動）

研究担当者：杉田秀樹，高橋章浩，谷本俊輔

【要旨】

液状化による大きな地盤変形を伴う液状化・流動化に対する道路橋基礎の安全性を確保するためには、上部構造等から受ける慣性力に対する基礎の変形性能に加え、液状化によって生じる地盤変形を受ける基礎の性能についても照査しておく必要がある。本研究の目的は、液状化および流動化時の地盤の変形が橋梁基礎に及ぼす影響を明らかにし、地盤の変形を考慮した橋梁基礎の性能照査法の一つである応答変位法の道路橋基礎への適用法を示すことである。

キーワード：液状化，流動化，橋梁基礎，地盤変位，応答変位法

1. はじめに

液状化による大きな地盤変形が構造物基礎損傷の原因であったと考えられる事例がこれまでに数多く報告されている。大きな地盤変形を伴う液状化・流動化に対する道路橋基礎の安全性を確保するためには、上部構造等から受ける慣性力に対する基礎の変形性能に加え、液状化によって生じる地盤変形を受ける基礎の性能についても照査しておく必要がある。そのような性能照査に必要な基礎の応答値算定手法には、多質点系一次元モデル¹⁾、2次元または3次元有限要素法等による動的応答解析や、基礎とその周辺地盤を2次元梁-バネ系でモデル化して静的に解く応答変位法などがある。ここで応答変位法とは、図-1に示すように、梁-バネ系モデルで模擬した杭基礎に対して、基礎に作用させる慣性力に加え、地盤と杭の相互作用バネを介して地盤変位を入力する静的解析法である。本研究では、レベル2地震動による基礎の損傷を考慮した非線形解析を行うことができ、かつ比較的簡便で実務設計として一般的に用いることが可能と考えられる応答変位法を基礎の応答値算定法として採用することを前提に各種検討を行った。

2. 地盤変形を考慮した耐震性能照査法の適用範囲

地盤が液状化に至る過程では、土の繰返しせん断やそれに伴う過剰間隙水圧の上昇により地盤の剛性・強度は低下するが、その時の地盤変位振幅は振動と共に徐々に大きくなるものの、基礎応答に影響を与えるほどには大きくならない。現行の道路橋示方書では、当該地盤が液状化すると判定された場合、土質定数を低減させた上で地震時保有水平耐力法により基礎の耐力や応答値を算定して基礎の性能を照査することとしているが、これは上

記のような液状化発生直前の基礎の性能照査に相当すると思われる。

その後、地盤が液状化してしまうと、橋の固有周期が長くなるため、基礎に作用する上部構造等からの慣性力は小さくなるものの、地盤変位振幅が大きくなるため、地盤変形の基礎応答に与える影響は相対的に大きくなる。これまでの地震被害調査で報告されている杭頭以外での深部での基礎の損傷はこの時点で発生していると考えられるため、このような液状化発生後に地盤変形を受ける基礎の性能照査も、液状化発生直前を対象とした地震時保有水平耐力法による照査に加えて行う必要がある。本研究で取り上げる地盤変形を考慮した耐震性能照査法（応答変位法による基礎応答値の算定・照査法）は、こ

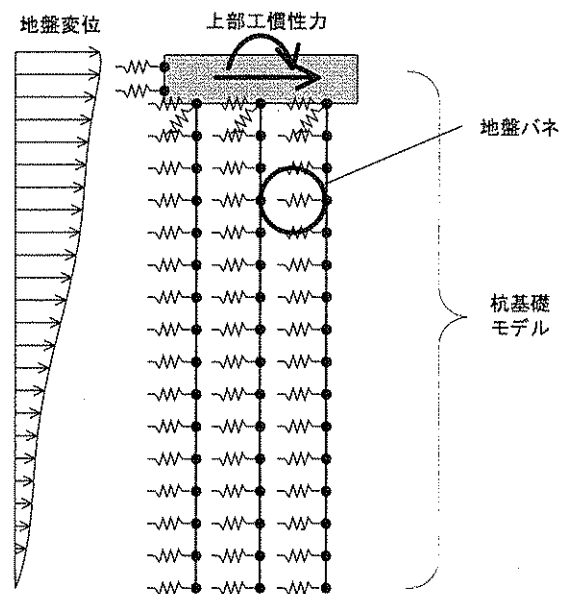


図-1 応答変位法の概念図

の液状化後の基礎の性能照査に適用するものである。

3. 応答変位法導入にあたって検討した事項

応答変位法によって地盤変形を考慮した基礎の性能照査法提案にあたって、下記の事柄を検討した。

3.1 地盤と基礎の相互作用バネ

地震時保有水平耐力法に用いられている地盤と基礎の相互作用バネの特性は、外力(上部構造等からの慣性力)に抵抗することを前提にしていることから、柔らかく弱いバネとすれば安全側の設定となる。しかしながら応答変位法においては、地盤変位が解析モデルに入力され、この変位と地盤バネの積が外力として基礎に作用することになることから、そのような特性のバネが必ずしも安全側の設定になるとはいえない。本研究では、地盤と基礎の相互作用バネ特性を実験により直接計測する方法を提案し、その結果を基に地盤と基礎の相互作用バネのモデル化手法を提案した。

図-2は提案した相互作用バネ特性を直接計測する実験に用いた土槽の概要である。せん断土槽(内寸0.75m×0.38m×0.50m)内に作用土圧を直接計測できる杭基礎模型を固定し、緩い飽和砂層と表層非液状化層からなる2層地盤(相対密度30~40%)を作成し、25Gの遠心力場で水平方向に加振し、地盤を液状化させて杭に作用する土圧等を詳細に測定した。ロードセルを内蔵した杭模型の杭頭は振動台上に設置した反力フレームに固定され、杭先端は土槽底面に固定されている。地盤と基礎の相対変位は地盤内に設置した加速度計の計測値から算出した。入力地震動は、原型スケールで周波数1.2Hz、振幅が各サイクルで異なる正弦波とした。図-3に上部非液状化層で得られた地盤反力と杭と地盤の相対変位の関係(p-y関係)の一例を示す。一連の载荷試験から得られた地盤反力と杭と地盤の相対変位の関係を整理したところ、割線地盤反力係数(k_b)と地盤と杭の相対変位(y)の関係が

$$k_b D / \sigma_v' = A (y/D)^B \quad (1)$$

なる関数でフィッティングすることができることがわかった(D=杭径、 σ_v' =有効上載圧)。ここでAとBはフィッティングパラメータで、Aは状態量(相対密度)の関数で、Bは材料固有の値である。緩い砂地盤においてこれらのパラメータはA=10~20程度、B=0.7であった。模型地盤の相対密度から換算したN値は2~3程度と非常に小さなものであったが、この値を使用して求めた地盤反力係数とその上限値は、得られたp-y関係をほぼ包括するものであったことから、応答変位法においても既存の

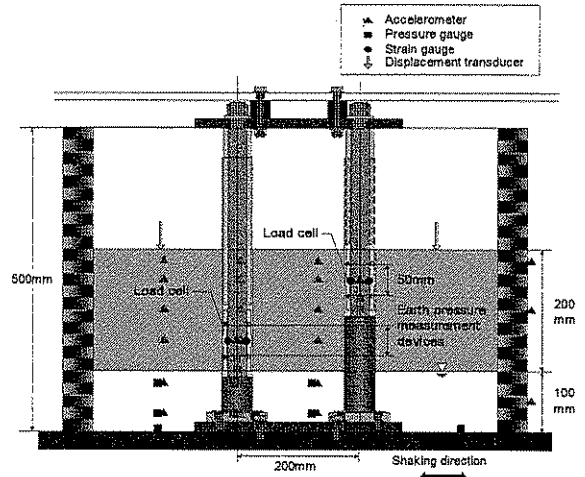


図-2 実験に用いた土圧計測杭と模型地盤概要

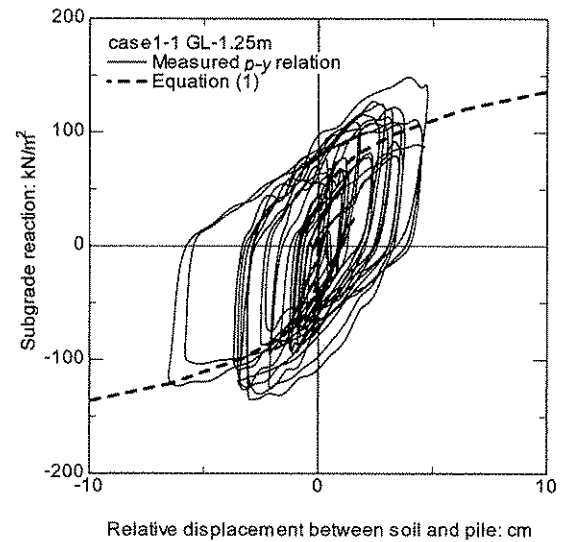
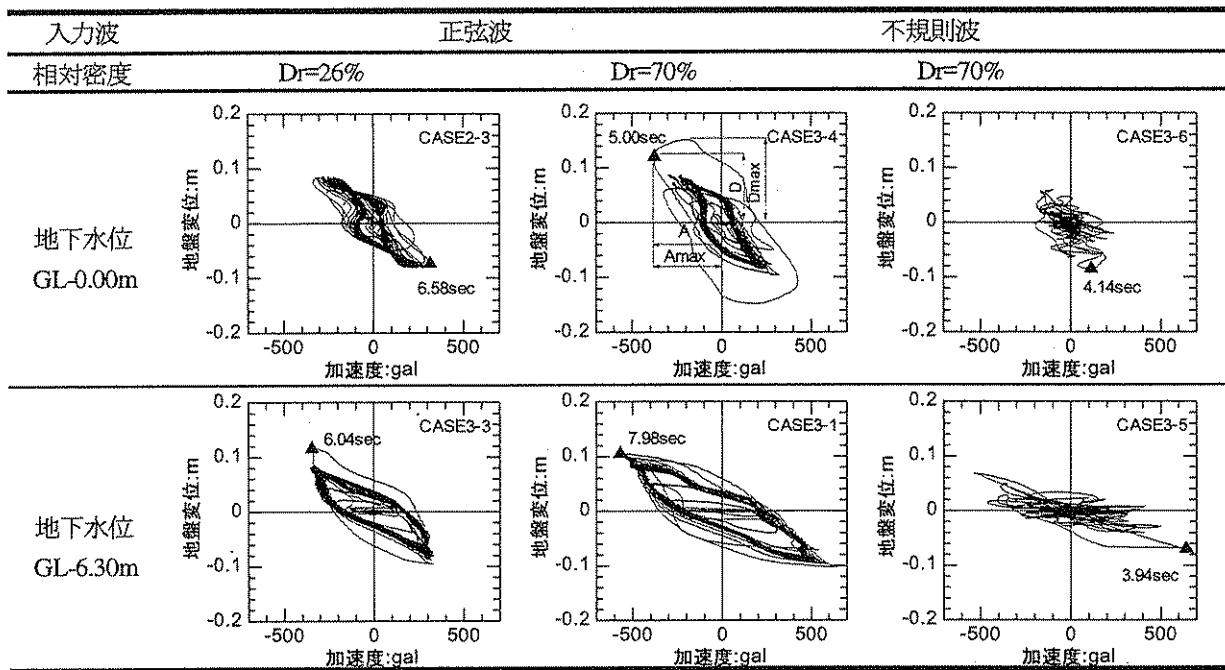


図-3 地盤反力と地盤と杭相対変位の関係の一例
p-y関係を用いても良いこともわかった。

3.2 入力外力の組み合わせ

応答変位法では、繰返しを伴う動的な地盤と基礎の相互作用を、静的な単調载荷によってモデル化するため、動的解析では自然と考慮される上部構造等から受ける慣性力と地震動中の地盤変形を境界条件として与える必要がある。ここで問題となるのはこれらの大きさと組み合わせ方である。特に後者については、橋と地盤の振動特性の違いにより、基礎に作用する慣性力と地盤変位は必ずしも同位相にならないことから、想定される両者の最大値を同方向に作用させることが不合理な設計となる可能性がある²⁾。液状化地盤中の地盤と基礎の相互作用を理解するために実施した動的遠心模型実験で得られたデータの分析より、慣性力と地盤変位の組み合わせにつ



▲: 杭頭曲げモーメント最大時

図4 フーチング加速度一表層地盤変位履歴曲線

いて検討した。

動的遠心模型実験で用いた模型杭は外径 20mm, 内径 18mm のアルミパイプを 2 列×2 列, 計 4 本を配列したものであり, 杭中心間隔は杭径の 5 倍である。このうち 1 本の杭の内側 8 深度にひずみゲージが設置されている。杭の境界条件は, 杭頭をフーチングに剛結, 杭下端は自由であり, 相対密度 $D_r=95\%$ の砂地盤に根入れされている。フーチング質量は 4.3kg である。模型地盤の試料は豊浦砂であり, 相対密度 $D_r=95\%$ の根入れ層, およびその上層の $D_r=26\%$ または $D_r=70\%$ の砂層から構成されている。入力波は, 1G 場換算で 1Hz500gal 相当の正弦波, および不規則波である。実験は, 地下水位, 地盤の相対密度および入力波をパラメータとし, 63G の遠心力場に行った。

図4は各実験ケースのフーチング加速度一表層地盤変位の履歴曲線をまとめたものである。表層地盤変位は計測した加速度を 2 回積分して算出した。図中の▲は加振を通して杭頭曲げひずみが最大となる時点を示す。図5は杭頭で最大曲げひずみが発生する時刻におけるフーチング加速度(A)と加振中を通して計測されたフーチング最大加速度(A_{max})の比, および同時刻における表層地盤変位(U)と加振中を通して計測された表層最大変位(D_{max})の比をプロットしたものである。地下水位が低く表層に非液化化層があるような条件下では, いずれの比も 0.95 以上となり, 杭頭で最大曲げひずみが発生する時刻におけるフーチング加速度および表層地盤変位は, いずれも加

振中に計測した最大値とほぼ同じ値となる。これは表層非液化化層が杭を拘束する影響により, フーチング慣性力と表層地盤変位の位相が大きくずれることはないためであると考えられる。一方, 地表面に水位があり表層が液化化する条件下では, フーチング加速度と表層地盤変位のピーク時刻は必ずしも一致しない。この場合, 図5に示すように, A/A_{max} または U/U_{max} のどちらか一方は 1 に近い値を示すが, 他方は 0.47~0.90 と幅を持っており, 杭頭曲げひずみ最大時におけるフーチング加速度および表層地盤変位の間には明確な相関は見られない。これらのことから, 表層の剛性が高く地盤が杭を拘束するような条件下では, フーチング加速度最大時には地盤変位も最大かつ杭頭曲げモーメントも最大となり, 逆に表層の剛性が小さい条件下では, フーチング加速度, 表層地盤変位および杭頭曲げモーメント最大時は必ずしも一致しないことがわかった。

応答変位法による解析を通じて, 地盤変形が杭に生じる最大曲げモーメントの大きさに与える影響についても検討した。具体的には, 実験において最大曲げモーメントが観察された時点を応答変位法によって再現し, そのパラメータを用いて上部工慣性力のみを考慮した解析を行い, 両者(地盤変形と慣性力を入力したケースと慣性力のみを入力したケース)を比較することによって, 地盤変形の最大曲げモーメント増加に与える寄与率を算定した。図6はその結果をまとめたものである。ここで, 縦軸の R_M は慣性力および地盤変位の両方を与えた解析

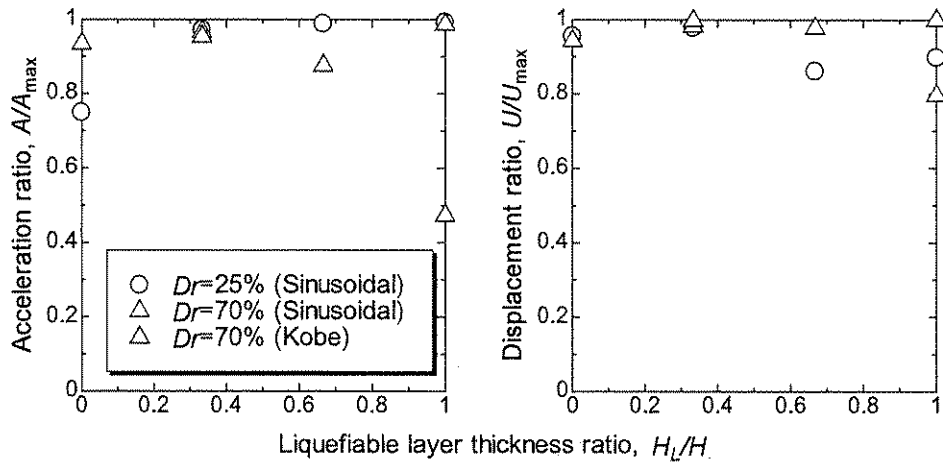


図-5 液状化層厚比と A/A_{max} , U/U_{max} の関係

の杭頭曲げモーメントに対する慣性力のみ与えた解析の杭頭曲げモーメントの比であり、 R_D は杭頭変位に関する同様な比である。いずれのグラフにおいても、液状化層厚比 R_L (緩い砂層厚に対する液状化層厚の比) が小さくなるほど、また相対密度が大きいものほど R_M および R_D が小さくなる傾向があり、表層の非液状化層厚が大きく、剛性・強度が大きいほど、地盤変形の杭の最大曲げモーメント増加に与える影響は大きくなることからわかる。従って表層の非液状化層厚が相対的に大きな地盤では特に、基礎の応答値算定において地盤変形の考慮が不可欠であるといえる。

3.3 各種パラメータの応答計算に与える感度

上記の検討結果を踏まえて、一般的な諸元を有する橋梁の橋梁基礎³⁾ (地震時水平力分散構造を有する5径間連続桁橋のある1基の橋脚基礎)の橋軸方向を対象に、各種パラメータの基礎応答計算に与える感度について検討した。解析モデルの一例を図-7に示す。地盤パネにはバイリニア型の非線形性を考慮し、そのパラメータは道示に基づいて算出したものを用いた。ただし、水平方向の地盤パネについては、フーチング天端以深に配置した。また、液状化層における土質定数の低減係数 D_E は砂層2で1/10とした。杭基礎は杭径1.2m、杭長27.4mのRC場所打ち杭であり、3列×3本の配列となっている。

杭基礎に作用させる地盤変位の大きさは、兵庫県南部地震において実際に液状化が生じたポートアイランドの強震観測記録を参考に決めた。すなわち、観測波形から算出した液状化層の最大平均せん断ひずみが強軸方向で約2.5%程度であったことから、液状化層のせん断ひずみを2.5%と仮定した。非液状化層のせん断ひずみはゼロと

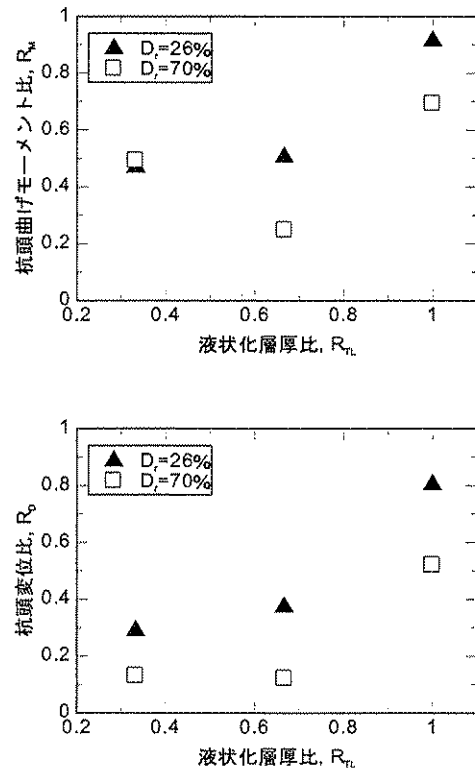


図-6 杭の最大曲げモーメントに対する慣性力の寄与率

した。また、上部構造等の慣性力は、本解析が液状化発生後を対象としていることから、小林・田村⁴⁾の結果に基づき、通常的设计水平震度に0.7を乗じたものを设计水平震度とした。

パラメータスタディでは様々な影響因子について検討したが、ここではその内、慣性力と地盤変位の入力順序に関する検討結果について紹介する。本検討では、地下水位が異なる2モデル(モデル1: GL.-7.0m, モデル2:

GL-10.0m)に対して外力作用パターンを各3種類(同時, 地盤変位先行, 慣性力先行), 計6ケースについて行った. 外力は, 静的非線形解析の各増分ステップにおいて一定の割合で増加させることによって与え, 地盤変位または

慣性力いずれか片方を先行して作用させた状態を Step1, 残りの外力を作用させた最終的な状態を Step2 とした.

図-8に, 地下水水位が異なるモデル1およびモデル2に関して, 各外力作用パターンにおける Step1 および Step2 の解析結果を示す. まず载荷順序による差がより顕著であるモデル2に着目する. 地盤変位先行のケースの Step1 において杭は概ね与えた地盤変位に沿って変形し, また砂層1のいずれの深度においても地盤反力度が上限値に達していない. Step2 においては, 慣性力の影響によって杭頭付近の変位が増加するとともに, フーチング前面の地盤反力度が負(抵抗側)の上限値に達しているが, フーチング直下の非液状化層においてはその上限値に達しておらず, 地盤が杭を拘束するため過大な杭変位は見られない. 一方, 慣性力先行のケースの Step2 では, 地盤変位先行のケースの Step2 と比べて大きな杭変位が生じている. これは, Step1 でフーチング前面の地盤反力度が上限値に達した状態から Step2 の地盤変位が作用するため, 地盤が比較的剛である表層非液状化層下端付近(図中 A)に沿って変位した杭に対して, フーチング前面地盤の抵抗を見込めないことによると考えられる. これらのことより, 外力作用順序による解析結果の差は, Step1 におけ

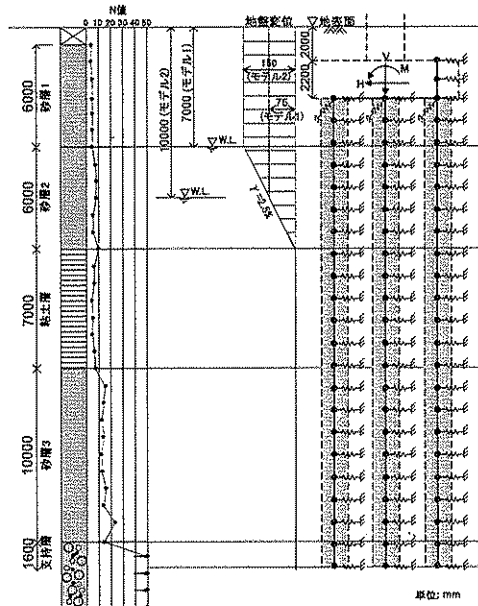


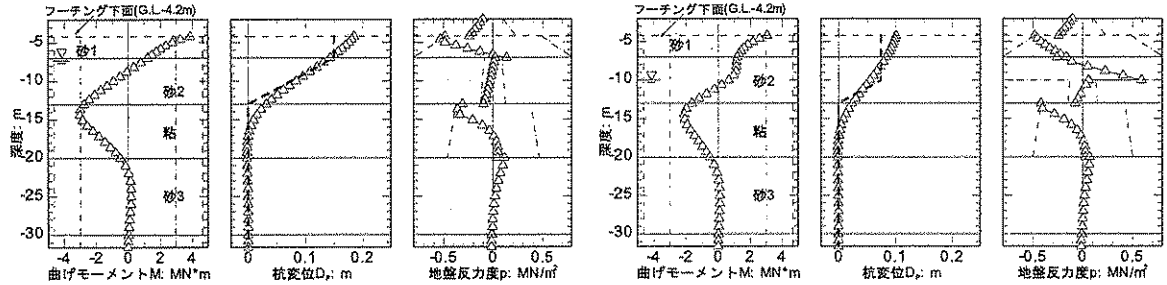
図7 解析モデルの例

载荷パターン

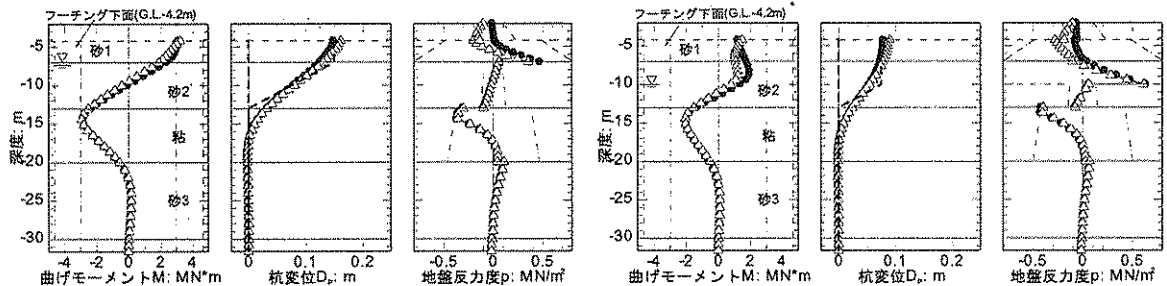
モデル1: 地下水水位 GL-7.0m

モデル2: 地下水水位 GL-10.0m

【同時载荷】



【地盤変位先行】



【慣性力先行】

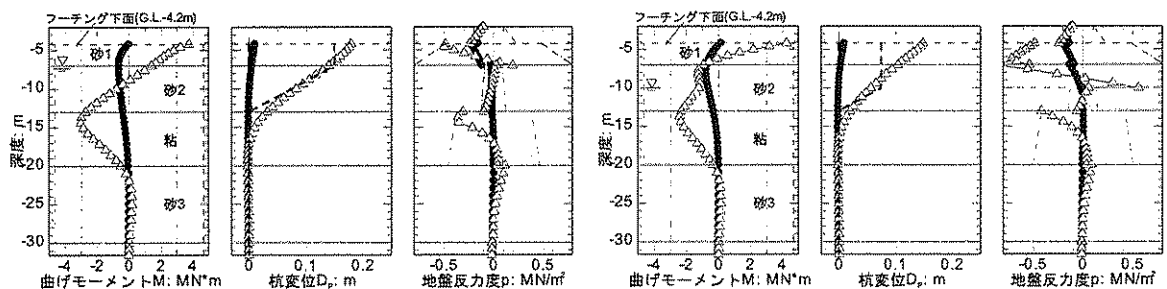


図8 各ケースの解析結果

る地盤反力度が上限値に達するかどうかが先行して作用させる外力によって異なることにより生じたと考えられる。

モデル間で比較すると、地下水位が浅いモデル1ではモデル2と比べて外力作用順序の違いによる解析結果の差は小さい。これは、杭は概ね地盤に沿って変位するが、地下水位が浅いほど表層非液状化層における杭と地盤の相対変位が小さくなり地盤反力度が上限値に達しにくくなることと、表層非液状化層が薄いためそこで地盤反力度が上限値に達したとしてもそのことが解析結果全体に占める割合としては小さいことによると考えられる。

以上のことから、表層非液状化層における地盤反力度の上限値の設定が解析結果を左右する要因となることとともに、地下水位によっては外力の作用順序が解析結果に及ぼす影響が顕著となることが明らかとなった。

3.4 流動化に対する基礎の応答計算に与えるパラメータの感度

流動化した地盤中の基礎の応答計算にも応答変位法が適していると考えられる。応答変位法では地震動中の地盤の繰返しせん断に伴う変位の蓄積を疑似静的に（単調に）入力するため、通常の杭の載荷試験結果等に基づいて求めた地盤と基礎の相互作用バネの復元特性（ p - y 関係）をそのまま用いることができず、地盤流動照査用の p - y 関係を規定する必要がある。

多くの場合、地盤流動中の基礎を対象とした p - y 関係のモデル化やパラメータの設定は、限られた数の模型実験結果やケーススタディに基づいて行われるため、ある実験結果から得られたパラメータをそのまま別の対象構造物に適用できることはまれである^{例えは⁵⁾}。このようなパラメータの基礎応答に対する感度分析を、いくつかの異なる機関で実施された模型実験結果を対象に行った⁶⁾。パラメータの最適値は予想通り大きくばらついていたものの、得られた平均推定値を用いることによって杭の最大曲げモーメントを概ね推定できることがわかった。低減係数推定値の精度向上と適用範囲の拡大のためには、更に異なる境界条件下での基礎を対象としたケーススタディを実施する必要がある。

4. まとめ

液状化および流動化時の地盤の変形が橋梁基礎に及ぼす影響を明らかにし、地盤の変形を考慮した橋梁基礎の性能照査法を提案することを目的とした検討結果をまとめると以下のとおりである。

1. 種々の地盤構成を有する液状化地盤中の橋梁杭基

礎を対象とした動的遠心模型実験ならびにその数値解析を行い、地盤の液状化に至るまでの基礎と地盤の動的相互作用を系統的に解明した。

2. 耐震性能照査に用いる地盤と基礎の相互作用バネ特性を実験により直接計測する方法を提案し、その結果を基に地盤と基礎の相互作用バネをモデル化した。1.の動的遠心模型実験で得られた知見と提案した相互作用バネを用いた数値解析を通じて、応答値計算法の妥当性、応答変位法の道路橋基礎への適用性を示し、液状化・流動化による地盤変形を考慮した橋梁基礎の耐震性能照査法を提案した。

参考文献

- 1) 森伸一郎, 滝本幸夫, 武藤正人, 戸早孝幸, 池田隆明: 地盤-構造物連成系に対する有効応力液状化解析の適用性, 第8回日本地震工学シンポジウム論文集, 801-806, 1990
- 2) 室野剛隆: 強震時の非線形動的相互作用を考慮した杭基礎の耐震設計法に関する研究, 京都大学大学院博士論文, 181-195, 2001.6
- 3) 日本道路協会: 6. 地震時に不安定となる地盤がある場合の設計計算例, 道路橋の耐震設計に関する資料, 1997.3
- 4) 小林寛, 田村敬一: 液状化時の橋梁耐震設計に用いる加速度応答スペクトルに関する検討, 第5回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 113-116, 2002.1
- 5) Brandenberg, S.J., Singh, P., Boulanger, R.W., and Kutter, B.L.: Behavior of piles in laterally spreading ground during earthquakes, *Proc. 6th Caltrans Seismic Research Workshop*, CA, Paper 02-106, 2001
- 6) Takahashi, A., Sugita, H., and Tanimoto, S.: Beam on Winkler foundation method for piles in laterally spreading soils, *ASCE Geotechnical Special Publication*, No.1??, 2005 (accepted).