

## 橋梁杭基礎に対する地盤液状化と地震時慣性力の影響に関する実験的研究

五洋建設(株) 技術研究所 学生会員 ○宇野 州彦  
(九州大学大学院 工学府 博士後期課程)

九州大学大学院 工学研究院 フェロー 大塚 久哲  
五洋建設(株) 技術研究所 正会員 三藤 正明

### 1. はじめに

液状化が生じる地盤においては、杭基礎構造物は地震時慣性力に加え、地震時の液状化・側方流動等で大きな断面力の発生する箇所が液状化層・非液状化層の層境界、あるいは液状化層中で土質定数が大きく異なる箇所において見られ、これらの箇所において杭の塑性化や損傷を招くことが知られている。杭基礎の地震時特性に関しては、地盤-構造物系の動的相互作用に関する研究が多く<sup>1)~6)</sup>、液状化地盤においては、谷本ら<sup>7)</sup>が橋梁基礎の耐震性能照査法として、応答変位法を用いる場合における課題を挙げている。それによれば、液状化地盤の変位推定、液状化時の上部工慣性力の評価、土質定数の低減係数、地盤の水平抵抗、慣性力と地盤変位の組合せ等を課題としている。しかしながら、液状化地盤において杭中間部に発生する損傷メカニズムの解明や、実験および解析両面からの検討はほとんど行われておらず、また、現状の杭基礎液状化対策としても地盤改良が主流であり、断面力の増大を踏まえた上で構造的に対策を講じるものはほとんどない。

したがって、本研究開発は、水中振動台を用いた振動実験および数値解析を踏まえた、レベル 2 地震動に対する耐震性能を有する新しい橋梁杭基礎の開発を行い、新構造・新工法の提案を行うことを目的とする。

本論文では、液状化地盤における橋梁杭基礎の損傷メカニズムと、地盤液状化および慣性力の影響を把握するために、無対策の杭基礎を対象に行った模型振動台実験の結果を述べるものである。

### 2. 実験概要

#### 2.1 縮尺と相似則

実験模型の断面図を図-1 に示す。杭基礎のサイズ等、模型の縮尺は、モデル化範囲と土槽の大きさを考慮して 1/20 とした。相似則は、表-1 に示すように、井合により提案されている 1G 場における相似則<sup>8)</sup>を適用した。この相似則は、現象を支配する方程式に基づいて求め

られており、長さのパラメータを縮尺の基準として、加速度を縮尺比 1、密度を縮尺比 1、ひずみを縮尺比の 0.5 乗に比例するとして、他のパラメータの縮尺比を算出している。なお、この場合の地盤の土粒子骨格に対する相似則は、香川<sup>9)</sup>、国生<sup>10)</sup>の示した結果に一致している。

表-1 相似則

パラメータ	$\lambda$ =実物/模型	縮尺
長さ	$\lambda$	20
密度	1	1
時間	$\lambda^{0.75}$	9.46
応力	$\lambda$	20
間隙水圧	$\lambda$	20
変位	$\lambda^{1.5}$	89.4
加速度	1	1
ひずみ	$\lambda^{0.5}$	4.47
透水係数	$\lambda^{0.75}$	9.46
曲げ剛性	$\lambda^{4.5}$	715,542
軸剛性	$\lambda^{2.5}$	1,789

今回の実験では、加振による杭の挙動を分かりやすくするため、杭本数を 4 本にしている。杭基礎にはアルミパイプを用いた。

実験は地震時慣性力の影響をみるため、錘(25kg)のないモデル (Model A) と、錘のあるモデル (Model B) の 2 ケースを用意し、同一土槽内で加振を行った。

#### 2.2 実験装置および使用材料

加振装置には、振動台テーブルの直径 5.5m の大型水中振動台を使用した。実験土槽は長さ 4m、高さ 1.5m、奥行き 1.5m の箱型の鋼製枠である。土槽による水の反射を防ぐため、土槽の前面側、背面側にはエキスパンドメタルに不織布を貼付したものを土槽として使用し、土槽境界での水の流入出を可能にしている。

杭基礎および埋土の使用材料の一覧を表-2 に、杭基礎の模型寸法を表-3 にそれぞれ示す。本論文では、杭の上端と連結している鋼板 (通常、橋梁であればフーチング部にあたる箇所) を上部工、杭の下端と振動台

キーワード 橋梁杭基礎、地盤液状化、地震時慣性力、模型振動実験

連絡先 〒329-2746 栃木県那須塩原市四区町 1534-1 五洋建設株式会社 技術研究所 耐震構造グループ

TEL : 0287-39-2109 E-mail : Kunihiko.Uno@mail.penta-ocean.co.jp

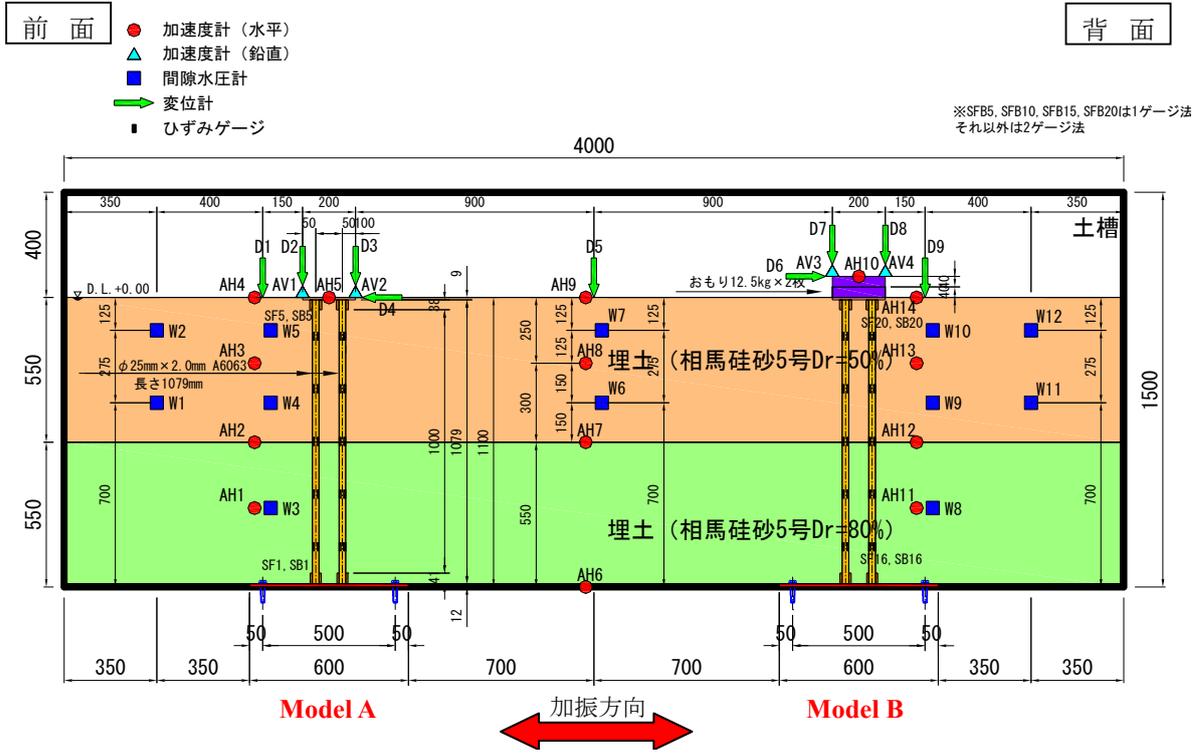


図-1 実験模型断面図

を固定している鋼板を下部工と呼ぶこととする。

表-2 使用材料一覧

項目	材料	備考
埋土	相馬硅砂5号 (水中落下法)	Dr≒50%
埋土	相馬硅砂5号 (気中落下法)	Dr≒80%
杭基礎	上部工	鋼板 t=9mm
	下部工	鋼板 t=12mm
	杭	アルミ管 φ=25mm, t=2.0mm

表-3 模型寸法一覧

モデル	構造形式	細目	形状	材質	寸法
Model A Model B	杭基礎	上部工	プレート	鉄	PL-200×200×9
			リング	鉄	外径42×肉厚8×高さ38(内径26mm)
		下部工	プレート	鉄	PL-1100×600×12
			リング	鉄	外径46×肉厚10×高さ41(内径26mm)
Model B	おもり	上下部工	プレート	鉄	PL-200×200×4

### 2.3 加振波

加振波には、杭基礎の固有周期を考慮して周波数10Hz、波数20波の正弦波を使用した。今回は段階加振を実施し、最大加速度を100Galとしたケース（以降、Case1）を行った後、300Gal（以降、Case2）としたケースの加振を行った。

## 3. 実験結果

### 3.1 液状化層と非液状化層の加速度時刻歴の比較

図-2は、液状化層と非液状化層における水平加速度時刻歴の比較を示したものである。液状化層のAH8においては、計測開始3.5秒を過ぎたあたりから応答が急激に低減している。これは間隙水圧の上昇に伴う液状化が発生したためと推察される。図-3にはCase2にお

ける加速度時刻歴の比較を示す。液状化による応答の低減理由はCase1と同じであると推察されるが、応答値がCase1に比べ小さくかつ低減が早いのは、液状化に至るまでの水圧上昇にかかる時間が短かったためと判断される。

### 3.2 加速度応答倍率

加速度の最大値分布を確認するため、土槽底版加速度AH6に対する加速度の応答倍率を図-4に示す。ただし、加速度応答倍率は、前面側への慣性力について整理したものである。Case1では、図-2より液状化後は応答値が低減するものの、最大値という点に着目すると、地表面に近づくにつれ増大している。一方、Case2では、非液状化層において、上方に波が進行するに従って応答値が増大しているが、液状化層に入ると最大値も低減していることが分かる。このことは液状化に至るまでの水圧上昇時間が短かったためであると推察される。

### 3.3 水圧の上昇と加速度応答の関係

過剰間隙水圧の上昇に伴う、杭基礎および地盤の応答加速度の変化について検証する。ここではCase1の実験に関して述べる。図-5に水圧比と杭基礎応答の比較を示す。W10において水圧が計測開始4秒で完全に液状化しているが、応答加速度に着目すると、その時点から応答が安定している。これは、地盤が液状化するまでは、地盤と構造物の相互作用が発生するために、挙動が複雑となり応答の増減が見られるが、完全液状

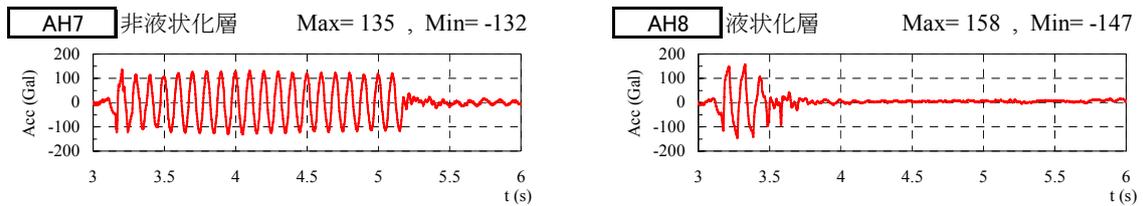


図-2 液状化層と非液状化層の加速度時刻歴の比較 (Case1)

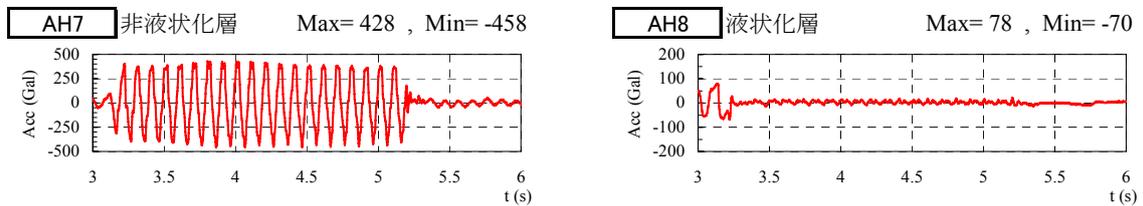


図-3 液状化層と非液状化層の加速度時刻歴の比較 (Case2)

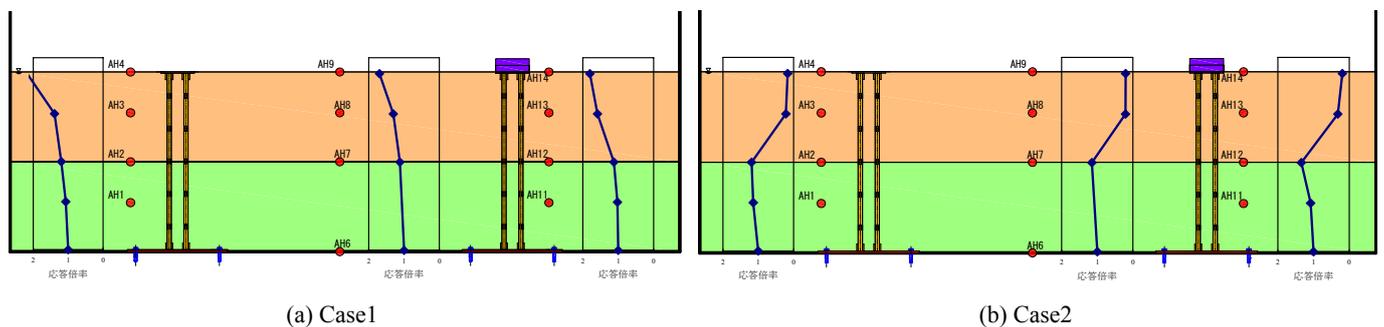


図-4 加速度応答倍率

化してしまった後は、地盤の液状化により、土圧が低減したため杭基礎の応答が一定となっていると推察される。次に、図-6 に水圧比と地盤応答の比較を示す。こちらは計測開始 3.5 秒で水圧の上昇が一定に近いほどゆるやかになっているが、その時点で地盤の応答加速度が急激に低減している。これも水圧上昇により地盤の有効応力が減少したためと考えられる。

### 3.4 杭基礎の曲げモーメント分布

杭に発生したひずみから曲げモーメントを求め、その分布より加振時に杭に発生する断面力について検証する。図-7 に Case1 において杭基礎に発生する最大曲げモーメントの分布を示す。上部工が前面側に曲げられる値について整理したものである。なお Model A の方には Model A のみの結果 (赤線) を、Model B の方には Model A の結果 (青線) と Model B の結果 (赤線) を重ね書きしている。まず Model A については、杭頭部と杭中間部で大きな曲げモーメントが発生している。これは液状化により層境界にあたる杭中間部へ断面力が集中したためと推察される。次に Model B については、Model A に比べ全体的に発生曲げモーメントが大きくなっている。ただし、杭下端 (先端) や液状化層の中心部においては、さほど曲げモーメントの増加は見

られない。ここでは杭頭部と杭中間部の応答の増加が他の箇所と比べ顕著である。これは上層が液状化したことによって、杭周辺の地盤が受動土圧として抵抗しなくなり、下方地盤との土圧の差が大きくなったために、その境界部で大きな断面力が発生したものと判断される。

次に、図-8 に Case2 における最大曲げモーメント分布を示す。Model A に着目すると、Case1 と異なり、杭下端 (先端) に残留ひずみが発生しているため、モーメント分布が Case1 と異なっている。次に Model B に着目すると、Case1 と同じように杭頭および杭中間部に大きな曲げモーメントが発生している。また杭中間部に関しては、層境界だけでなく、その下方まで大きな曲げモーメントが発生している。これは加振前に境界部であった箇所が液状化したことにより、液状化層と非液状化層の境界部が下方へとずれたためであると推察される。このことは実規模モデルでの解析を行った際にも同様の結果が得られていることを確認している。今後、杭中間部に関して何らかの対策を講じる場合には、層境界部およびその下方の断面力を低減できるものを開発する必要のあることがわかる。

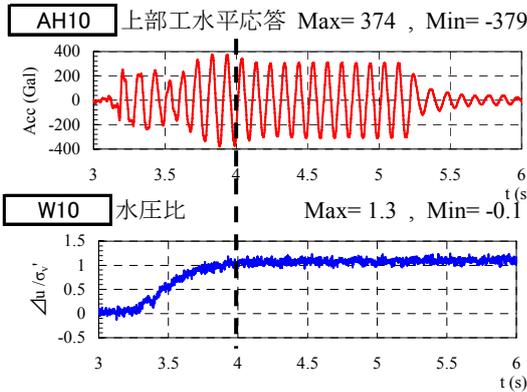


図-5 水圧比と杭基礎応答の比較

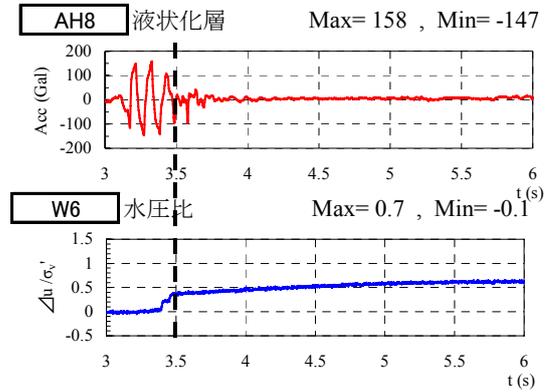


図-6 水圧比と地盤応答の比較

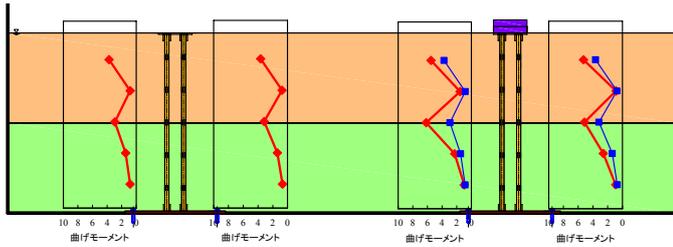


図-7 杭基礎最大曲げモーメント分布 (Case1)

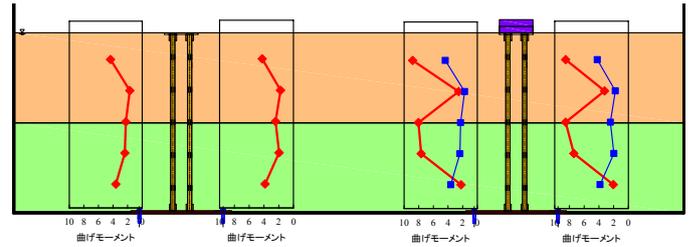


図-8 杭基礎最大曲げモーメント分布 (Case2)

4. まとめ

以上の検討内容より得られた知見を以下に示す。

- 1) 杭基礎上端の応答は、加速度加振開始直後では、地盤との相互作用の影響により応答最大値に乱れが生じているが、過剰間隙水圧の上昇により液状化が発生すると応答が安定化する。
- 2) 加速度応答倍率の結果から判断して、Case2においては上方地盤が液状化するまでにかかる時間が短かったことから、液状化層における応答加速度の最大値も小さくなったと推察される。
- 3) 杭に発生するひずみの時刻歴からわかるように、杭頭部および杭中間部で大きなひずみが発生した。また上方地盤が液状化に至ると、特にModel Bでは層境界にあたる杭中間部での応答が杭頭部よりも大きくなった。これは、液状化によって上部工の慣性力が杭中間部に作用するためと考えられる。これらのことから大地震時に杭中間部より損傷する危険性のあることが示されたと言えよう。

参考文献

- 1) 土岐憲三, 清野純史, 小野祐輔, 古川愛子: 杭基礎-地盤系における非弾性挙動を考慮した相互作用ばねのモデル化について, 土木学会論文集, No.710/I-60, pp.235-245, 2002.7
- 2) 宇野州彦, 塩尻弘雄, 川口和広, 仲村成貴, 中原知洋, 大島貴充: 解析手法や境界条件等の違いが地盤-基礎-上部構造物からなる系の動的挙動に与える影響評価, 第29回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1151-1158, 2007.6

- 3) Kunihiko Uno, Hiroo Shiojiri, Kazuhiro Kawaguchi and Masataka Nakamura: Analytical Method, Modeling and Boundary Condition for the Response Analysis with Nonlinear Soil-Structure Interaction, The 14<sup>th</sup> World Conference on Earthquake Engineering, No.14-0156, 2008.10
- 4) 木村至伸, 河野健二: 非線形性を有する地盤-構造物系の地震応答解析に関する基礎的研究, 構造工学論文集, Vol.47A, pp.599-606, 2001.3
- 5) 富澤幸一, 西本聡, 橋本至: 2003 十勝沖地震の液状化に伴う橋梁基礎杭の変状事例, 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム, (社)地盤工学会, pp.217-220, 2004.12
- 6) 飛田哲男, 井合進, 仲山賢司, 中道正人, 斉藤安立, 近藤徹: 杭-地盤系の動的応答の位相関係に関する実験的研究, 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム, (社)地盤工学会, pp.241-244, 2004.12
- 7) 谷本俊輔, 杉田秀樹, 高橋章浩, 林和幸: 液状化時の地盤変位を考慮した橋梁基礎の耐震性能照査法に関する試算検討, 液状化地盤中の杭の挙動と設計法に関するシンポジウム, (社)地盤工学会, pp.185-188, 2004.12
- 8) Susumu IAI: Similitude for Shaking Table Tests on Soil-Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.27, No.3, 1988.
- 9) 香川崇章: 土構造物の模型振動実験における相似則, 土木学会論文報告集, 第275号, pp.69-77, 1978.7
- 10) 国生剛治: 低拘束圧下の砂の動的特性と模型振動実験に適用される相似則, 第15回地震工学研究発表会, pp.265-268, 1979.7