

変位吸収溝を用いた側方流動対策工の振動台実験

武 部 篤 治 高 橋 浩
石 黒 健

要 旨

側方流動対策に関する各機関の研究によると、側方流動発生時に構造物に加わる外的荷重としては、液状化層よりも非液状化層からの受働土圧の方が大きいとの報告があり、すでに道路橋示方書¹⁾等の設計法に取り込まれている。本研究では、この非液状化層からの側方流動等の流動圧を低減することができれば、基礎構造物やライフラインの耐震強化につながるものと考え、対象とする構造物の周囲の非液状化層に側方流動圧を吸収する溝を設けることにより、この側方流動圧を免圧する対策工を提案し、その結果を確認するための一連の振動台実験を行った。

実験ケースとして、基礎杭と地中埋設管に対する流動圧低減効果を確認するための実験を行った。結果、非液状化層に溝を設けることで、基礎杭に加わる側方流動圧を大きく低減できること、また、地中埋設管の実験からも、溝が十分な流動圧低減効果を有することが確認できた。

キーワード 側方流動 / 非液状化層 / 変位吸収溝 / 曲げモーメント / 過剰間隙水圧

目 次

- | | |
|------------------|--------------------|
| 1．はじめに | 3．地中埋設管に対する流動圧低減効果 |
| 2．基礎杭に対する流動圧低減効果 | 4．まとめ |

SHAKING TABLE TEST ON THE COUNTERMEASURE AGAINST THE LATERAL FLOW OF LIQUEFIED GROUND BY THE EXCAVATION FOR DISPLACEMENT ABSORPTION

Atsuji TAKEBE Hiroshi TAKAHASHI
Takeshi ISHIGURO

Synopsis:

Past studies of some facilities report that a non-liquefied layer exert influence on the foundations of structures more than a liquefied layer at the lateral flow of a background. If the passive earth pressure could reduce by the lateral flow of this non-liquefied layer, the damages of structures should be also reduced. So, we suggest a technical method to reduce the load of the lateral flow of non-liquefied layer by excavating the ditch around the structures, and carried out a serial shaking table test to confirm the effect of the countermeasure.

We carried out the experiment to confirm the effect to reduce the load of the lateral flow for the foundation piles and the lifeline. As a result, we could confirm the effect to reduce the load of the lateral flow for the foundation piles and the lifeline greatly.

1. はじめに

過去、地震により液状化した地盤が水平方向移動する現象、すなわち側方流動が発生し杭基礎やライフラインの埋設管路などに多大な被害を与えたことが確認されている。側方流動の被災形態としては、

傾斜地盤において、地盤が標高の高い地域から低い地域に向かい流動を起こす。

埋め立て地や大河川沿岸部において、護岸が大きく移動することにより背後地盤が流動を起こす。

という2種類に大別できる。今まではそのような側方流動の対策工として、液状化が発生しても大きな流動を生じさせない、流動が発生しても構造物に機能支障を生じさせないように、流動圧に抵抗すべく構造物周辺の補強、また護岸近傍の地盤改良などが行われていた。しかし、既存の岸壁や護岸、近傍構造物の杭基礎などをこの対策工法で補強していくには、施工性や経済性を考えると大きな問題を抱える。

道路橋示方書では、側方流動荷重として、液状化層の流動圧と非液状化層からの受働土圧を設計に考慮している¹⁾。岸壁や護岸が移動することで液状化層の流動化が発生し、液状化層上部にある非液状化層がこれに引きずられて護岸構造物基礎に影響を及ぼすとの考え方が採用され、液状化層の流動圧と比較して、非液状化層からの受働土圧の方が大きいとされている。

既往の研究例でも、非液状化層の流動圧が構造物に与える影響の確認を目的とした実験が数多くみられる²⁾³⁾⁴⁾。ただ、側方流動発生時、非液状化層が液状化層に引きずられて発生する流動圧の大きさや、護岸構造物基礎に与える影響などを研究したものが多く、非液状化層からの受働土圧への対策工への実験はされていない。

著者らは、既設構造物に対して施工性、経済性に優れた対策工を提案するために、また液状化に伴う側方流動が生じた時、構造物に加わる土圧としては液状化層よりも非液状化層の方が大となることに着目し、側方流動発

生に伴う非液状化層からの流動圧を低減する対策工法として、対象とする構造物周辺の非液状化層を一部除去し、発生した流動による側方変位を抑制する、変位吸収溝を設ける工法を提案している。本工法は、側方流動圧を免圧し、主として既設構造物の耐震性向上を図るものであり、本研究では上記の変位吸収溝を設けることによる効果を振動台実験により定性的に確認した。また、変位吸収溝に加え、下部液状化層の流動圧の軽減を目的とした変位拡散杭を併用した場合の効果、さらに非液状化層内に設置された埋設構造物を想定し、埋設管に対する変位吸収溝の効果を確認した結果を報告する。

2. 基礎杭に対する流動圧低減効果

2.1 実験概要

護岸背後の杭基礎構造物を想定して、非液状化層流動圧の低減を目的とした変位吸収溝と、下部液状化層流動圧の軽減を目的とした変位拡散杭を併用したときの振動台実験の概要を図-1に示す。土槽は、長さ1800mm×高さ500mm×幅300mmの鋼製土槽を用い、長手方向土槽端部から200mmの位置には、護岸の傾斜変状を模擬するため、下端をヒンジ構造にして上端のみ移動する可倒壁を設置している。模型杭は、 $\phi 22\text{mm}$ 、肉厚3mmの塩化ビニール管を使用し(図-2参照)、下端固定条件で可倒壁から200mmの位置に設置した。模型杭の諸元は、1G場での井合による模型振動実験の相似則⁵⁾を用いて算出した。模型杭の表面にはひずみゲージを4ヶ所設置して杭の変形を計測した。導入した変位拡散杭は、既設構造物にも対応可能なマイクロパイル($\phi 270\text{mm}$, d10mm)を想定し、塩化ビニール管($\phi 8\text{mm}$)を選定し、模型杭と同様下端固定条件を与えた。また、土圧測定のため、鋼製の土圧測定杭を上下両端固定条件で、模型杭と同位置で奥行き方向にずらして設置し、土圧測定杭の3ヶ所に土圧計を取り付けた(図-3参照)。地盤の液状化を判断するために間隙水圧計を土槽中央部の液

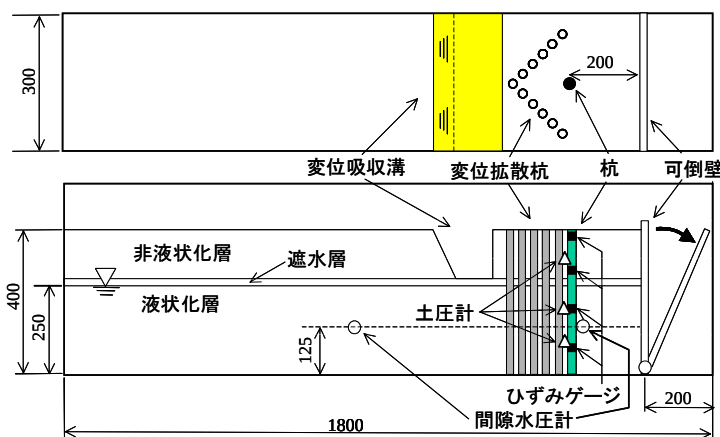


図-1 実験概要図(基礎杭に対する実験ケース)

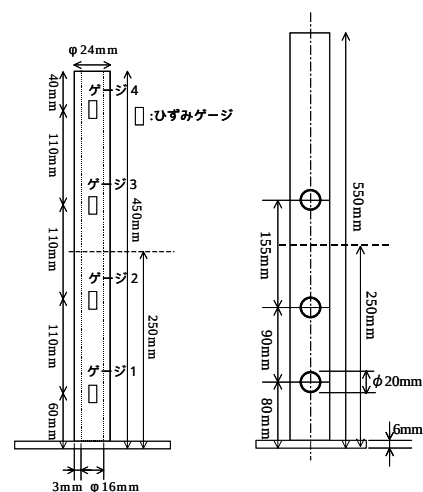


図-2 模型杭概要 図-3 土圧計設置杭概要

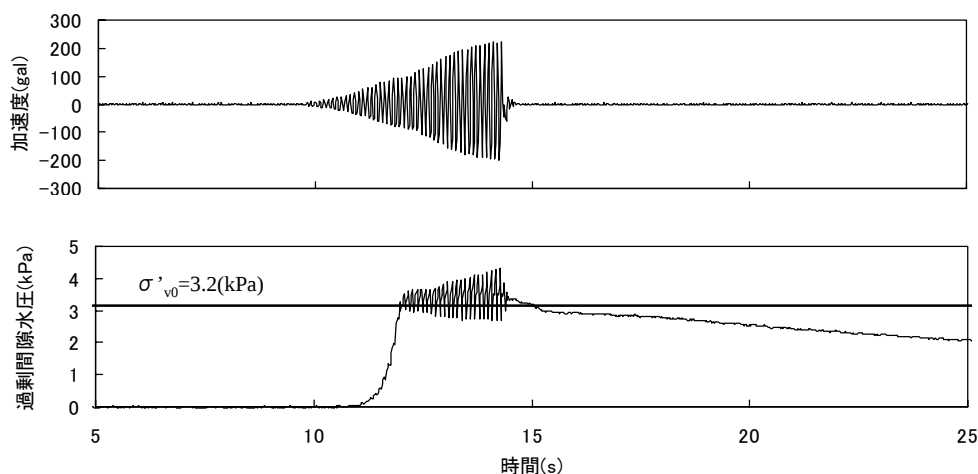


図-4 入力加速度波形と過剰間隙水圧 (case : 無対策)

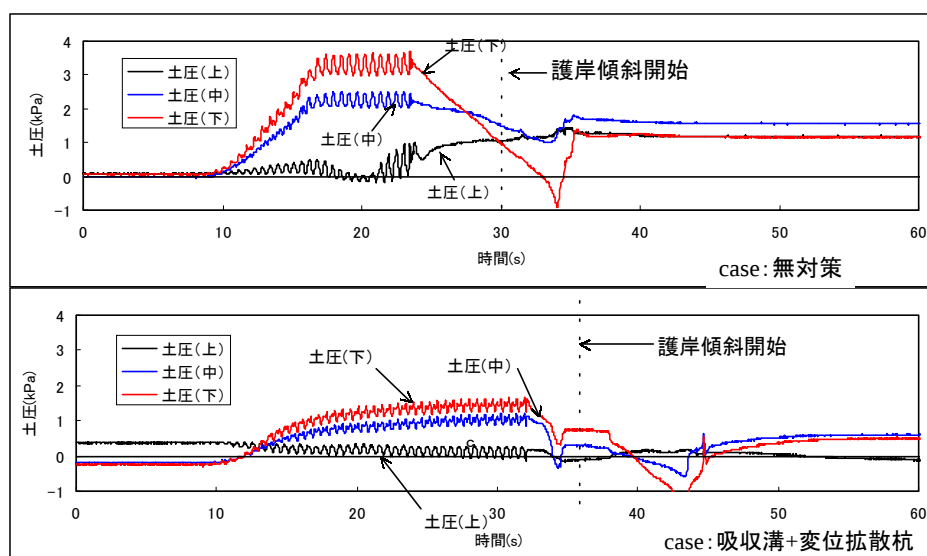


図-5 土圧計時系列 (基礎杭想定の場合)

状化層中央に設置し、また長手方向に一樣に液状化していることを確認するため、模型杭近傍の液状化層中央部にも設置した。

液状化層は、珪砂 7 号 ($D_{50}=0.12\text{mm}$ 程度) を使用して相対密度 50% を目標に水中落下法により作成し、非液状化層は珪砂 3 号 ($D_{50}=1.20\text{mm}$ 程度) を使用して気中落下法により作成した。また地下水位を地盤作成時から加振開始時まで一定に保つため、護岸解放側と逆側に地下水位調整管を設置して、それにより地盤作成中は地下水位を調整し、さらに液状化層からの上向き浸透流による非液状化層の間隙水圧上昇を防ぐ目的で、不透水層として液状化層と非液状化層の境界にベントナイト層を敷設した。

入力加速度は加速度 300gal、周波数 3Hz の正弦波を護岸可倒方向の直交方向に加え、間隙水圧計により液状化層の液状化を確認したあと、振動を停止し、即座に可倒壁を倒すことで、側方流動を人工的に発生させた。図-4 は、上段が使用した振動台の入力加速度波形、下段がその時の液状化層内の過剰間隙水圧の時系列である。こ

表-1 実験ケース一覧

ケース1	無対策
ケース2	変位拡散杭のみ
ケース3	変位吸収溝のみ
ケース4	変位拡散杭+変位吸収溝

こでは無対策のケースを例としてあげている。過剰間隙水圧が実線で示した初期有効応力に達しており、液状化していると判断される。表-1 に、実験ケース一覧表を示す。

2.2 実験結果

(1) 土圧計の比較結果

図-5 に模型地盤内部の土圧の時系列を示す。図中の無対策のケースでは護岸傾斜後に液状化層内の土圧 (土圧 (中) および土圧 (下)) は、過剰間隙水圧の消散に伴い減少しているが、非液状化層の土圧 (土圧 (上)) は全く減少していない。これは、液状化層が流動し、その上層にある非液状化層がせん断剛性を保ったまま、流動下流方向へ引きずられて移動し、受働土圧を発生させた

ものと考えられる．これは，道路橋示方書等の設計指針類¹⁾に考慮されている非液化化層からの受動土圧の取り扱いと定性的に整合する．吸収溝を設置したケースでは，土圧(上)の増加がほとんど見られず，土圧(中)(下)に関しても，無対策のケースと比較して，土圧の減少が認められる．非液化化層に吸収溝を設置することで，非液化化層の上流側からの流動土圧を減少させることができ，また，変位拡散杭を液化化層内に設置することで，液化化層内流動圧を減圧させることがわかり，対策工の効果が見える．

そこで，残留土圧を深度方向に整理し，無対策および対策有りのケースの両者を併記したものが図-6である．図より，非液化化層内の残留土圧は無対策のものでは約2kPaであるのに対し，対策有りのものでは，0.6kPa程度と約3分の1に低減されている．土圧(下)の位置では土圧にほとんど差がなくなっているが，この大小関係は液化化層内でも同様であることが伺える．また，液化化層の境界から8cm下方に設置した液化化層内の土圧計(土圧(中))の値と，さらに9cm下方の土圧計(土圧(下))の値を比較すると，土圧(中)の方が大きい土圧が加わっていることがわかる．これは，液化化層内であっても，間隙水圧の消散が早い中央部では，地盤のせん断剛性の回復が早いため，残留する土圧が大きいと考えられる．このような現象が発生しながらも，吸収溝+変位拡散杭のケースでは無対策のケースに比べ，残留土圧は低く押さえられており，液化化層内の流動圧軽減を目的として設置した変位拡散杭の効果が，現れていることが伺える．

(2) 曲げモーメントの比較結果

次に，模型杭のひずみゲージから算出した曲げモーメントの比較を行う．図-7は模型杭にかかる曲げモーメントの時系列である．これも，土圧の場合と同様の傾向を示し，護岸傾斜後より無対策のケースでは杭の曲げモーメントは急激に増加するのに対して，吸収溝+変位拡散

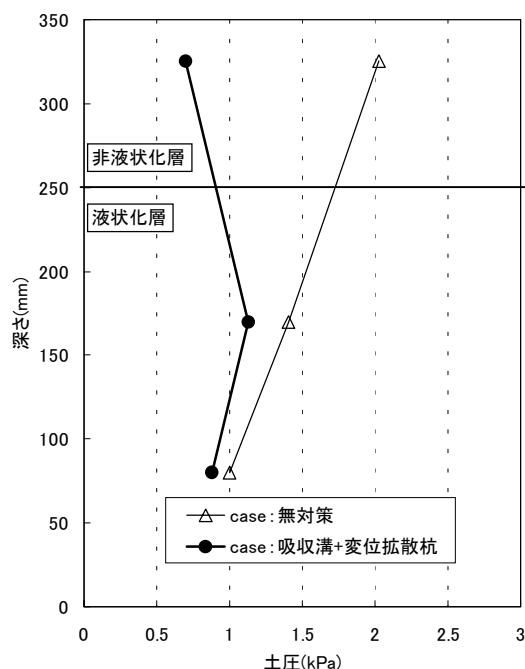


図-6 残留土圧の深度方向分布

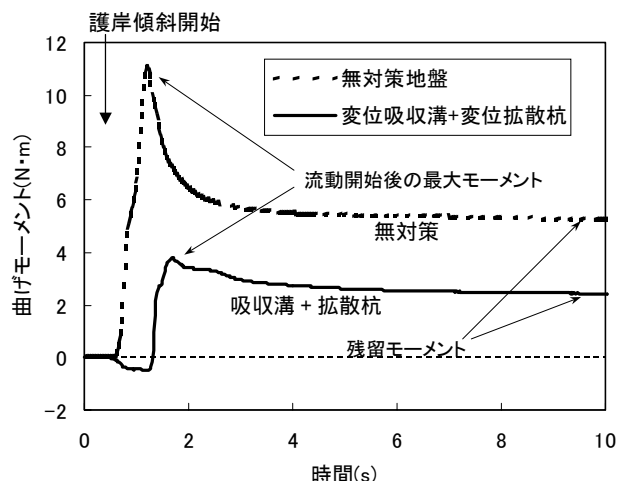


図-8 曲げモーメント増分量の比較

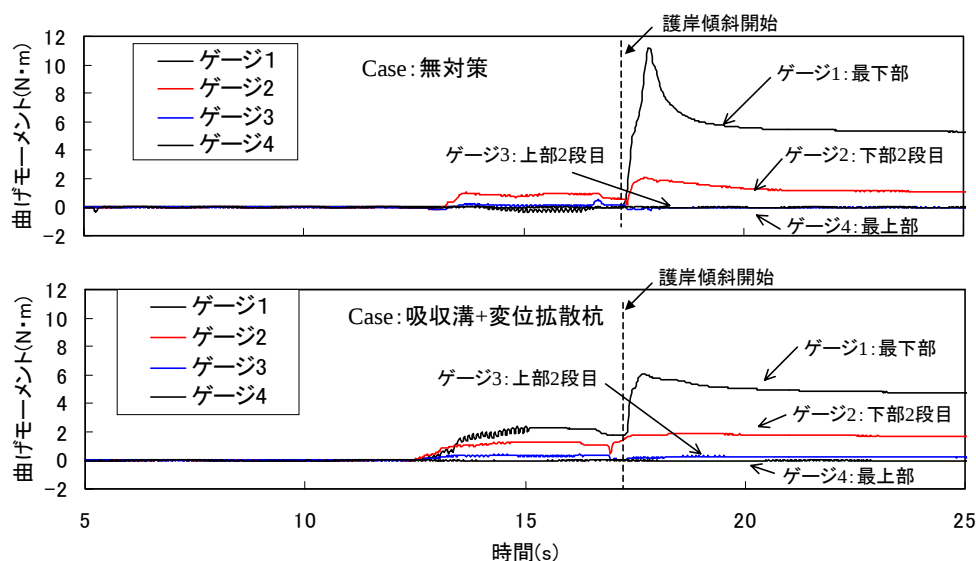


図-7 曲げモーメントの時系列(基礎杭想定の場合)

杭のケースでは増加傾向を示すものの、それと比較して低い値をとることがわかる。図-8 は、無対策の実験ケースと変位吸収溝+変位拡散杭を併用した実験ケースの 2 ケースで、模型杭に加わった曲げモーメント（最下部にあるゲージ）の時刻歴を比較した結果である。ここでは、加振終了以降（可倒壁傾斜開始以降）の曲げモーメント増分量を取り出し、側方流動の影響による曲げモーメント発生量のみを純粋に比較している。可倒壁を倒した瞬間に、開放側（可倒壁側）に大きな土圧が加わり、模型杭に瞬間的に大きな曲げモーメントが発生している。そのピーク値を比較すると、変位吸収溝と変位拡散杭を併用した対策地盤は、無対策地盤に比べ、曲げモーメント量が 1/3 程度に低減しており、杭に加わる負担が非常に小さくなっていることがわかる。残留曲げモーメントについても、ほぼ半減していることが見てとれる。また、杭頭の残留変位を計測しており、無対策のものでは 6mm 程度解放側に移動しており、対策有りのものでは、約 1mm という結果が得られている。

図-9 には、加振終了時以降の曲げモーメント増分量の最大値（上記のピーク値）と流動終了後の残留モーメントを各ケースごとにプロットしている。比較する実験ケースは表-1 の 4 ケースである。変位吸収溝のみ、または拡散杭のみの両ケースとも、無対策地盤と比較してピーク値、残留値ともに低減傾向がみられ、対策効果が認められるが、吸収溝と拡散杭を併用したケースでは、両者が相まってより顕著な効果が生じることが確認される。

3. 地中埋設管に対する流動圧低減効果

3.1 実験概要

非液化化層内の地中埋設管を想定して変位吸収溝を設置した実験ケースの概要を図-10 に示す。埋設管を想定した模型は、実際の地中埋設管の剛性（外径 14cm，厚さ 4.5mm， $EI=4.0E+11(N/mm^2)$ を想定）を選定し、

相似則を勘案の上、同等の剛性を有するアルミ板を使用した。地中埋設管を想定したアルミ板にひずみゲージを貼り、ひずみ量を計測することで曲げモーメントを算出するとともに、間隙水圧計を設置して、過剰間隙水圧を計測した。実験状況を写真-1 に示す。土槽、実験方法および使用機器類は、基礎杭を想定した実験と同一である。

今回実施した実験ケースを表-2 に示す。ケース 2 では、埋設管の設置深度まで掘削した場合を想定し、掘削深度の差による比較を行った。なお、写真-1 に示すように、埋設管モデルは非液化化層厚の中央深度に設置し、両端を固定している。

3.2 実験結果

非液化化層内に設置された地中埋設管を想定して行った実験の結果を示す。図-11 は、加振終了以降（可倒壁傾斜開始以降）の曲げモーメント増分量の時刻歴であり、側方流動の影響による曲げモーメント発生量のみを純粋に示している。模型杭の実験と同様、可倒壁を倒した瞬間に開放側（可倒壁側）に大きな土圧が加わり、瞬間的に大きな曲げモーメントが発生している。そのピーク値を比較すると、変位吸収溝を施した対策地盤は、無対策地盤に比べて曲げモーメント量が 1/3 程度に低減しており、地中埋設管に加わる負担が大きく低減されていることがわかる。残留曲げモーメントについては、吸収溝設置のケースでほぼ 0 となり、大きく低減していることが見てとれる。

図-12 は、可倒壁を倒した時点以降の最大曲げモーメント増分量を各ケース別にプロットした図である。変位吸収溝を施した 2 ケースの曲げモーメント値は、無対策地盤のモーメント値と比較して 1/2 以下に低減している。

表-2 実験ケース一覧（埋設管想定ケース）

ケース1	無対策
ケース2	変位吸収溝あり(非液化化層を半分掘削)
ケース3	変位吸収溝あり(非液化化層を前面掘削)

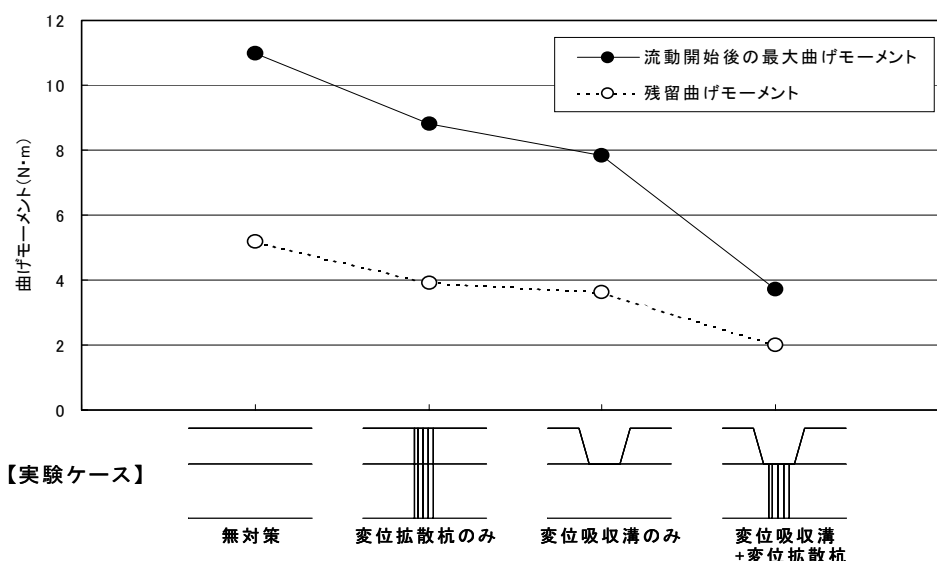


図-9 各ケースの最大曲げモーメントと残留曲げモーメント

本結果から、非液状化層内の埋設管に対して、変位吸収溝による対策効果は十分あるものと判断できる。また、吸収溝の掘削深度も非液状化層全層でなく、埋設管設置深度まででも効果は十分であるといえる。

4. まとめ

今回の実験により、非液状化層に変位吸収溝を、下部液状化層内に変位拡散杭を設置することで、杭に加わる側方流動圧を大きく軽減できることが定性的に確認できた。さらに、非液状化層中の地中埋設管を想定した実験から、変位吸収溝が十分な発生応力低減効果を有することも確認できた。岸壁や護岸近くの既存構造物杭基礎、地中埋設管などの補強で問題となる施工性や経済性については、既設構造物近傍を非液状化層のみ掘削し、液状化層にマイクロパイルを打設するという本工法は、非常に経済的であり、施工性を考えても、高さ制限、スペースが限られた既設構造物にでも十分に実施可能と思われる。ただ、今回の実験では、用いた土槽や地盤モデルのサイズが小さいため排水距離が短いこと、および護岸傾斜に伴う土の体積変化により過剰間隙水圧が急激に低下するという現象が生じ、実地盤の側方流動現象

(過剰間隙水圧の長期的な継続と、これに伴う側方流動の発生)を十分に再現できなかった。今後、よりスケールの大きな土槽実験や、数値解析による検討が必要と考えられる。また、掘削溝の施工方法や地震時(加振中)の溝の安定性についても検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.83-90
- 2) 濱田政則,大野政弘:流動地盤から模型杭に作用する外力の特性(2)非液状化層を含む模型実験, 土木学会 53 回年次学術講演会, I-B300, pp.600-601, 1998
- 3) 安田進, 森本弘光:液状化層上部の非液状化層における強度・変形特性, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.2061-2062, 1999
- 4) 大友敬三,河井正,桑原弘昌: 非液状化層の側方流動外力特性に関する振動台実験, 土木学会 53 回年次学術講演会, I-B396, pp.792-793, 1998
- 5) Iai,S :Similitude for shaking table tests on soil-structure-field model in 1g gravitational field, Soil and Foundations,Vol.29, No.1, pp.105-118, 1989

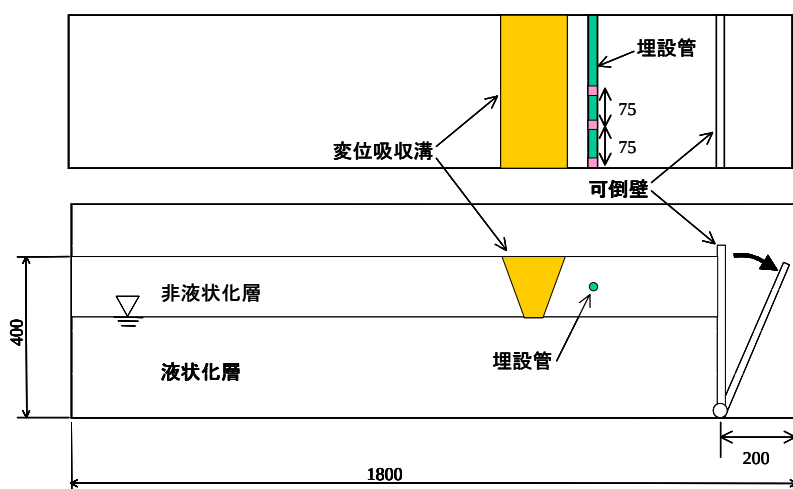


図-10 実験概要図(埋設管を想定したケース)

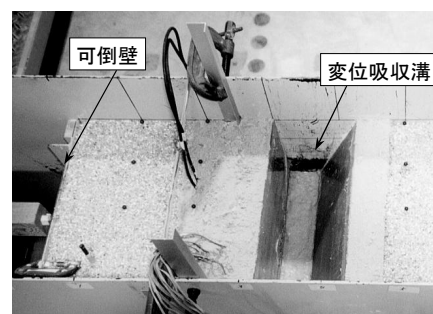


写真-1 実験状況
(非液状化層全面掘削)

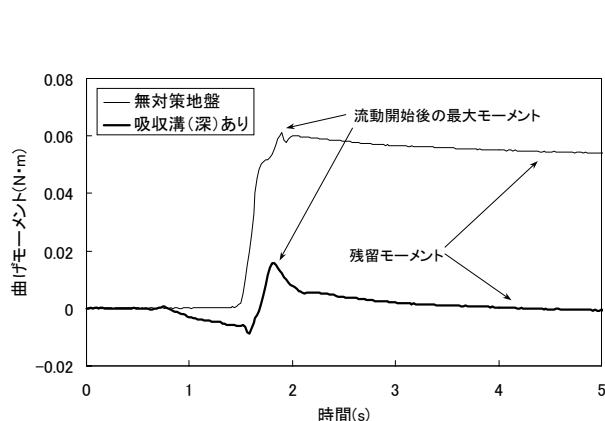


図-11 曲げモーメント増分量の比較

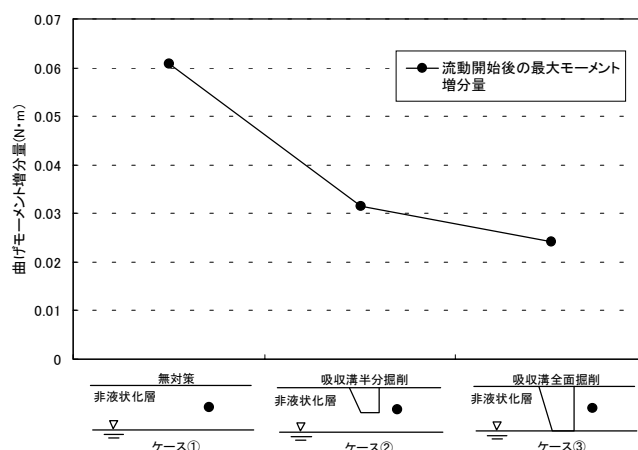


図-12 埋設管想定ケースの最大曲げモーメント