

## 液状化対策としての地盤不飽和工法の道路盛土への適用性に関する研究

富田 雄一<sup>1</sup>, 紙田 直充<sup>1</sup>, 内田 純二<sup>1</sup>, 岡本 辰也<sup>2</sup>, 岡村 未対<sup>3</sup>

1 西日本高速道路株式会社・四国支社

2 大成建設(株)(元愛媛大学大学院理工学研究科)

3 愛媛大学大学院理工学研究科

### 概 要

本研究では、既存構造物直下に適用でき、かつ長い線状構造物に適用し得る可能性のある安価な液状化対策工法として、近年開発された空気注入不飽和工法の道路盛土への適用性を検討することを目的とし、動的遠心模型実験を行った。対象は緩い飽和砂地盤上の盛土とし、基礎地盤に空気注入を行わない無対策のケース、および空気注入により盛土直下の液状化層を不飽和化したケースの実験を行った。加速度振幅約 295gal の加振により、無対策の地盤では地盤が液状化し、天端は盛土高さの約 2 割の沈下を生じた。一方、盛土直下を不飽和化した地盤では顕著な間隙水圧抑制効果が確認され、地盤の変形量及び天端の沈下量は低減され、特に盛土直下地盤を全面的に不飽和化した模型では沈下量が無対策模型の約 1/50 と顕著な沈下抑制効果を確認した。続いて液状化による液状化流動解析 ALID を用い実験を対象とした解析を行い、同解析法の適用性について検討した。解析では、不飽和化による液状化強度の増加を Okamura and Soga (2006)の提案式により算定し、また実験を比較的幅の狭い剛な土槽で行ったことによる液状化のしにくさを考慮したところ、解析結果は実験で見られた不飽和化による天端の沈下量低減効果、および地盤の変形抑制効果がある程度、捉えたものとなった。盛土直下地盤では不飽和工法による液状化対策工法は有効であることがわかった。

キーワード：盛土、液状化、飽和度、遠心模型実験、液状化対策

### 1. はじめに

これまでの地震等の災害発生時において、高速道路は人命救助や復旧用物資運搬のための緊急輸送道路として重要な役割を果たしており、今後も期待されている。一方、我が国の高速道路では、盛土建設時の基礎地盤液状化対策は行わず、また、既設盛土に対する液状化対策も施されていない。これは、既往の地震において基礎地盤の液状化による盛土の被災事例が少ないこと、および被災しても比較的短期間に復旧されてきたことが主な理由であると考えられる。実際、2011年3月11日に発生した東北太平洋沖地震では高速道路盛土は被災規模が比較的小さく、被災後に道路機能が早期に回復した<sup>1)</sup>。また、2004年新潟県中越地震では高速道路の盛土部に液状化による被害も発生したが、緊急車両の通行が発災後19時間後には可能になるなど早期に機能を回復し、緊急輸送路としての大きな役割を果たした。

しかしながら、今後発生することが想定されている南海トラフを含む3連動地震<sup>2)</sup>等の大規模地震が発生した場合、高速道路盛土も大規模に被災しその機能を回復するために長期間を要する可能性がある。したがって、今後

は道路盛土直下地盤の液状化による盛土被害を想定し、必要に応じて事前対策の検討を行い、大規模地震に備える必要がある。検討は対策効果、施工性、経済性等の観点から整理を行う。

### 2. 液状化対策工法の検討

地震時に液状化の発生が予想される地盤上の既設道路盛土に対して液状化対策を行う場合、図1に示す盛土直下部の地盤全体の液状化発生を防ぐ方法と、法尻部直下地盤のみを地盤改良や鋼材の打設などによりを補強する方法が考えられる。後者の法尻対策工法は河川堤防<sup>3)</sup>や新幹線の盛土<sup>4)</sup>に適用されている。河川堤防の法尻対策工法については、模型実験によりその対策効果を調べた研究が多く行われてきた<sup>5)6)7)8)</sup>。法尻に対策を施しても盛土直下地盤の液状化の発生を防止することは出来ないが、法尻対策工が液状化した盛土直下の土の側方への流動変形を抑制することにより、盛土天端沈下量を低減できることが明らかになっている。しかしながら既往の模型実験では、法尻対策工による天端沈下量抑制効果は限定的であり、沈下量を1/2以下まで低減できた例は少ない。

一般に、レベル 2 地震動を考慮した設計では、ある程度の沈下が許容される。被災後に早期復旧を可能とし、緊急輸送路として機能させるためには、許容沈下量は最大でも数十 cm 程度である。大規模地震で長い延長区間が被災する場合には、許容沈下量はさらに小さいものとなることも考えられる。そのような場合には、法尻部直下地盤の対策では、十分な対策効果（天端沈下量の抑制効果）が必ずしも得られず、盛土直下部の液状化対策を検討することが必要となる。盛土直下部の地盤に対して液状化対策を行えば、天端沈下量の抑制効果は大きい、適用できる工法は限られ、かつ施工コストは高価である。表 1 は、底面幅 40m の盛土直下の層厚 10m の液状化層を対策する場合の概略の対策費用を示したものである（改良ボリューム 400m<sup>3</sup>/m）。既存の工法での直下地盤対策は極めて高価であり、長い延長区間に対策工を施工するのは極めて困難なのが現状である。

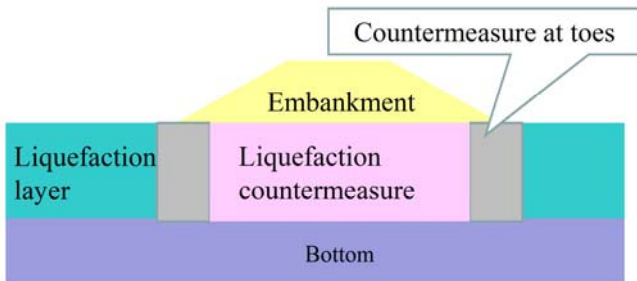


図 1 道路盛土への液状化対策

表 1 道路盛土への液状化対策工法の施工費の比較

工 法	万円/m
既存の工法（薬液注入）	1,200 <sup>9)</sup>
空気注入による地盤不飽和化	80 <sup>10)</sup>

近年、極めて経済性に優れ、既存構造物直下にも適用できる液状化対策工法として、空気を注入して地盤を不飽和化する工法が開発され、護岸や岸壁等の港湾構造物を対象として実用化されている<sup>10)11)</sup>。空気注入による液状化対策工法のイメージを図 2 に示す。当工法は、液状化地盤を空気注入により脱水し、その後空気注入を終了すると脱水域ではある程度復水するが、一定量の空気が間隙に残存することを利用し、不飽和地盤を形成する工法である。この時に土中で生じている現象は、加圧板法による保水性試験における脱水過程および吸水過程と同様である。施工は、液状化層にパイプを設置し、適切な圧力と時間で空気を地盤に注入することにより、注入管周りの地盤をまんべんなく脱水したことを確認後、空気注入を終了する。余剰な気泡は地盤中から抜け、比較的小さな安定した気泡が地盤中に残存し、このときの土の飽和度はおよそ 85-95%程度となる。空気注入により土の間隙に気泡がトラップされ飽和度が低下し、その継続性については空気注入から 27 年後の飽和度調査<sup>12)</sup> において 92.3~95.8%が確

認されており長期持続性も期待できることが報告されている。しかし、そのメカニズムについては必ずしも明らかになっておらず、その解明に向けた研究<sup>13)14)</sup>が進められているところである。

間隙に空気が存在することによる液状化強度の増加メカニズムは、発生する過剰間隙水圧が空気の圧縮により低減することである。図 3 に示すように土が土粒子と水及び空気からなるものとし、土粒子と水を非圧縮とすると、ある間隙圧の増加  $\Delta p$  による土の体積ひずみ  $\varepsilon_v$  は、土の間隙比を  $e$ 、飽和度を  $S_r$ 、初期間隙圧（絶対圧）を  $p_0$ 、有効上載圧を  $\sigma_v'$  とし、ボイル・シャルルの法則を用いると次式で表される。

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta p}{p_0 + \Delta p} (1 - S_r) \frac{e}{1 + e} \quad (1)$$

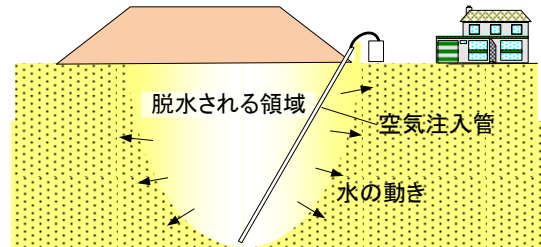


図 2 空気注入工法の概要図

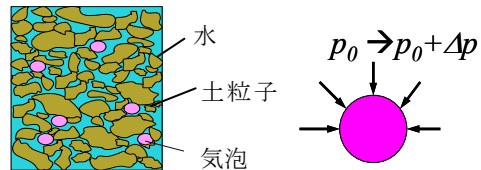


図 3 土中の気泡とそれに作用する圧力

この体積ひずみは液状化状態、すなわち過剰間隙水圧が上昇しきった  $\Delta p = \sigma_v'$  のときに最大値  $\varepsilon_v^*$  となる。

$$\varepsilon_v^* = \frac{\sigma_v'}{p_0 + \sigma_v'} (1 - S_r) \frac{e}{1 + e} \quad (2)$$

Okamura and Soga (2006) はこれら 3 つの量 ( $S_r$ ,  $p_0$ ,  $\sigma_v'$ ) を種々変化させて繰返し三軸試験を行い、液状化強度と飽和状態での液状化強度の比、すなわち液状化強度倍率と体積ひずみポテンシャル  $\varepsilon_v^*$  の間にユニークな関係があることを明かにし (図 4)、これによって不飽和砂の液状化強度の評価が可能となった。空気注入による不飽和加工法の施工費を表 1 に示す。空気注入工法による道路盛土直下への施工費は既存の他工法と比べておよそ 1/15 程度と安価である。

空気注入による不飽和工法は、これまで直接基礎<sup>15)</sup> やもたれ式護岸<sup>16)</sup>、重力式岸壁<sup>17)</sup> などに対してその液状化対策としての有効性の検証が行われてきたが、盛土に対する検証はなされていない。そこで、本研究では、空気注入

による不飽和工法の、盛土の液状化対策工法としての有効性を調べることを目的とし、遠心模型実験を行った。実験では空気注入を行わない無対策地盤、および対策範囲（空気注入による不飽和領域）を変化させた模型を加振し、過剰間隙水圧の応答と盛土および地盤の変形を調べた。また、2次元液状化流動解析プログラム ALID を用いて遠心模型を対象とした解析を行い、ALID の適用性についても検討した。

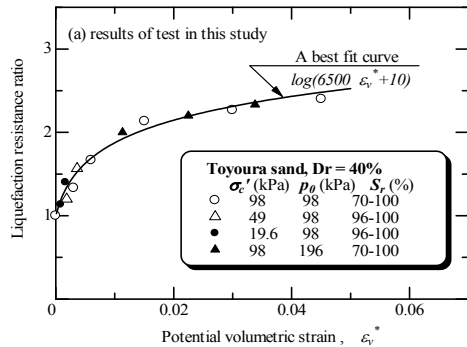


図 4 液状化強度倍率と間隙の圧縮性の関係<sup>18)</sup>

### 3. 遠心模型実験

#### 3.1 遠心模型実験の特徴

地盤の動的挙動を模型実験で再現するとき、土の力学特性が応力レベルに依存することから、動的遠心模型実験がしばしば行われる。空気注入により地盤の一部が不飽和状態となった地盤の動的挙動を再現する場合、特に以下の点で遠心模型実験は有利である。

- (1) 地下水位が地表面より下にある場合、毛管上昇高さも正確に  $1/n$  となる。ここで、 $n$  は模型の幾何学的縮尺比で、通常は遠心加速度比と同値である。
- (2) 不飽和化による液状化強度の増加を再現できる。

特に(2)については、液状化強度倍率を決める体積ひずみポテンシャル $\epsilon_v^*$ が有効土被り圧の関数であるため、模型内に原型と等しい応力状態を再現することが必須である。実際、模型内の応力レベルが低い重力場での振動台実験では、地盤の飽和度を低下させてもほとんど対策効果が見られないことが確認されている<sup>15)</sup>。

一方、地盤に空気注入を行う場合、注入された空気の挙動は重力場と遠心加速度場では異なる可能性がある。地盤内に注入された空気の挙動は、間隙水の表面張力、間隙の大きさ、気泡に作用する浮力、空気と水の密度、遠心加速度（重力加速度）、間隙水の粘性、透水係数、など多くの要因の影響を受ける。注入中の空気の流れと注入停止後の残留状態での気泡の存在状況を考えると、次の2つの無次元量が支配的な影響を持つものと考えられる。すなわち、流体に作用する浮力と毛管力の比であるボンド数( $Bo = (\rho_f - \rho_g)gr^2/T_s$ )、および間隙流体の粘性力と毛管力の比であるキャピラリー数 ( $Ca = \eta v/T_s$ ) である<sup>19)20)21)</sup>。ここで、 $\eta$  は間隙流体の粘性係数、 $v$  は速度、 $T_s$  は表面張力、 $\rho_f$  と  $\rho_g$

は間隙流体と空気の密度、 $g$  は重力加速度、 $r$  は気泡の半径である。

$Ca$  数が大きい場合には、粘性力が流体の流れを支配し、したがって種々の大きさを持つ粒体内の間隙のうち、大きな間隙を優先的に流れるのに対し、 $Ca$  数が小さい場合には表面張力による流れが支配的となり、小さな間隙を優先的に流れるようになる。従って、空気の注入による脱水や、空気注入停止による給水過程において、 $Ca$  数によって土の内部で生じる現象が異なることになる。遠心模型実験では流速  $v$  が  $n$  倍となり、 $Ca$  数も  $n$  倍になる。Kutter(2013)は  $Ca$  数の増加と共に飽和度が増加することを示している。

一方、空気注入後に地盤内から余剰な空気が浮上し大気中へ脱出した後の飽和度を考えると、 $Bo$  数が重要となる。これは、気泡が地盤中に滞留できる条件が、鉛直方向の力の釣り合いより、上向きの力（浮力）と気泡の動きに対する抵抗力（毛管力）の比によって決まるためであり、 $Bo$  が大きいと間隙に気泡がとどまりにくくなり、結果として飽和度が増加することになる。五十嵐(2010)は、 $Bo$  数が空気注入後の飽和度に影響を及ぼすのは、およそ  $Bo > 10^2$  の範囲であることを報告<sup>22)</sup>しており、その結果は岡村・来山(2008)と概ね整合している。一方、Kutter(2013)はこのように飽和度が一定になる  $Bo$  数の領域はみられないことを示している。この  $Bo$  数の影響については今後の研究が待たれるが、遠心模型実験では  $Bo$  数が  $n$  倍大きくなる。 $Ca$  数、 $Bo$  数の何れも遠心模型実験では大きくなるので、本研究で空気を注入した後の模型の飽和度は、原型のそれよりも高いものと考えられる。以上より、本研究の遠心模型実験は、空気注入後の不飽和領域内の飽和度は対応する原型よりも高いが、これ以外は模型内に原型と同様の挙動が再現できているものと考えられる。

#### 3.2 実験方法

実験に用いた模型を図5に示す。実験は3ケース行い、ケース1は空気注入を行わない無対策の地盤、ケース2は天端直下地盤を不飽和化した地盤、ケース3は盛土直下地盤を不飽和化した地盤である。

模型地盤は、剛な土槽（内寸幅 43cm×奥行 12cm×深さ 21.5cm）内に以下のように作製した。はじめに土槽底面上の所定の位置に空気注入口を設置し、豊浦砂を相対密度  $Dr=90\%$  に突き固めて層厚 2cm の支持層を作製した。空気注入口は幅 0.1cm 長さ 12cm の開口部を持ち、開口部には試料の侵入を防ぐためのステンレスメッシュを貼り付けてある。これに空気圧を供給することにより、土槽の奥行き方向に一樣に二次元の空気注入を行うものである。続いてこの上に層厚 13.5cm、 $Dr=60\%$  の液状化層を空中落下法で作製した。地盤内に加速度計および水圧計を図5に示す位置に設置した。その後、模型を真空槽内に設置し、真空槽内を二酸化炭素で置換した後に、 $-95\text{kPa}$  の負圧下にてメチルセルロース 2%溶液(50cst)を模型上面にゆっくりと注

ぎ、地盤全体を飽和した。その後負圧を解除し大気圧下で地盤の飽和度を測定し<sup>23)</sup>、99.8~99.7%とほぼ完全に飽和したことを確認した。

盛土材料は混合砂(豊浦砂とカオリン粘土を乾燥重量比3:1で混合)を用いた。盛土は専用の型枠内に締固め度 $D_c=95\sim97\%$ で突き固めて作製した。その後、盛土を基礎地盤上に設置し型枠を除去し、底面及び天端の沈下量を測定するためのポテンシオメータを設置した。

模型を遠心模型実験装置に設置し、空気注入により不飽和化するケース2, 3では空気注入口に接続した空圧供給ラインに流量計および圧力計を接続し、遠心装置外から流量と空圧をモニタリングしながら空気を供給できるようにした。遠心加速度を40gに上昇し、地下水位をGL.-1cm~-2cmまで排水した後、ケース2, 3では土層底面上に設置した空気注入口から空気を注入し、地盤の一部を不飽和化した。各ケースの地盤条件を表2に示す。

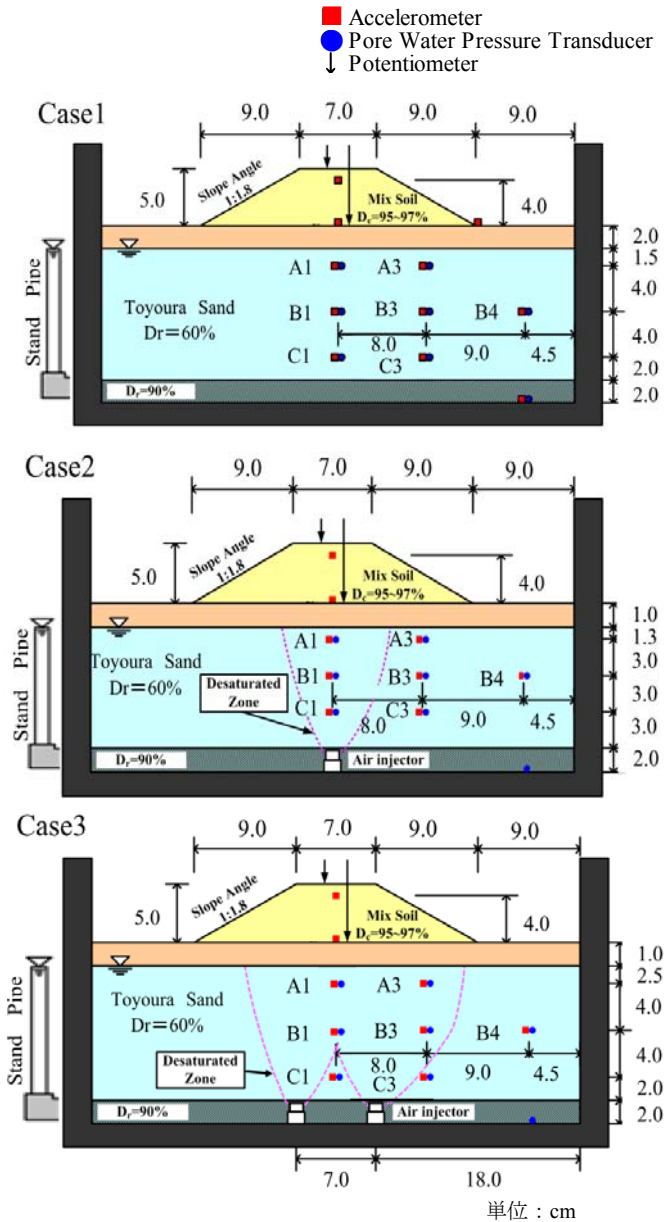


図5 模型地盤の概要図(模型スケール)

空気注入後に水位が安定したことを確認し、原型スケールに換算して85gal, 190gal, および295galの3回の加振を行った。入力加速度の時刻歴を図6に示す。砂は飽和度により色が変化するので、図5のケース2,3に破線で示す不飽和領域は、遠心実験装置運転中のビデオカメラの画像で変色した領域を特定したものである。また実験終了後にはその範囲が変化していないこと、およびその領域にお微細な気泡が含まれていることを目視で確認した。

### 3.3 地盤への空気注入

空気の注入は、空気注入口へ供給する空気圧を段階的に増加させながら行った。空気圧, 空気流量, および空気注入口から離れた土槽底部に設置した水圧計で測定した水圧変化量を図7に示す。

飽和粒状体中への空気の流入を生じさせるための最小の圧力( $p_{inj,min}$ )は、注入地点での水圧( $p_{hyd}$ )と土の空気侵入値(AEV)の和である<sup>21)</sup>。

$$(p_{inj})_{min} = p_{hyd} + AEV \quad (3)$$

空気圧が $(p_{inj})_{min}$ となった時点( $t = 500s$ )で流量が増加し始め、空気が注入され始めたことがわかる。空気の流量は、空気圧を増加させた時点で急激に増加するだけではなく、その後空気圧を一定に保っている間にも増加し続けている。これは時間と共に不飽和領域が広がること、および不飽和領域内の飽和度が低下し透気係数が増加しているためであると考えられる。間隙水圧も空気流量の増加に対応して増加している。これは、地盤内への空気侵入によって不飽和領域から水が排水されたため、不飽和領域外の水位が上昇したものである。したがって、不飽和領域外の水位上昇分が、飽和領域内から排水された水の体積、すなわち不飽和領域内の空気の体積と等しい。 $t=500s$ から $t=1200s$ の約700秒間空気を注入した後、空気注入を停止した。地盤内の余剰な空気が浮上し大気中に抜け出したため間隙水圧増分は低下し、0.45kPaで一定となった。空気注入後の地盤中の空気体積と、目視観察による不飽和領域の体積から不飽和領域の平均飽和度を求めたところ、88%であった。上述したように遠心模型実験ではBo数およびCa数が原型のn倍となるため、空気注入後の飽和領域の飽和度は原型のそれよりも大きくなるものと考えられる。しかしながら、ここで測定された飽和度は、加圧板などによる保水性試験の給水過程でサクシオンゼロとしたときに得られる飽和度<sup>23)</sup>よりも低い。今回の模型地盤は乾燥砂の空中落下法で作製しており、この方法では水平方向にわずかな層状の不均一が現れる。地盤の作製中にセンサーや色砂の設置のために、層厚で約2cm毎に空中落下を中断するため、僅かに粒度の粗い層と細かい層ができ、これは飽和過程において間隙流体を浸透させていく過程でしばしば目視出来る。今回の模型実験で地盤に注入した空気は、僅かに粒度の細かい層の下にトラップされ、比較的多くの空気が地盤内に残留したものと考えられる。

空気注入中の盛土天端沈下量の時刻歴を図7(b)に示す。

空気注入中に天端が 0.05mm と僅かながら沈下した。空気の注入により、地盤内の間隙圧は静水圧から上昇し、したがって有効応力が減少することになる。間隙圧の増加量は、空気注入地点で最も大きく約 8kPa である。盛土沈下量の大半が空気注入のごく初期に生じていることから、地盤の透気係数が低い空気流入開始時において過剰間隙水圧の増加量が大きく、地盤の有効応力が最も低下したことが考えられる。本実験では空気注入による盛土の沈下量は極めて小さく、盛土や道路の機能に何ら障害を与えるものではないが、空気注入中の天端沈下量の発生を抑制するためには初期段階の空気圧増加速度を低く抑えることが有効であるものと考えられる。

表 2 各ケースの条件 (模型スケール)

ケース	1	2	3
盛土高さ (cm)	5		
盛土のり面勾配 (h:w)	1:1.8		
盛土締固め度 (%)	96.0	94.4	95.2
液化化層相対密度 (%)	57.7	59.1	58.8
空気注入前飽和度 (%)	99.8	99.8	99.7
不飽和域の飽和度 (%)	—	87.7	93.2
不飽和域の地下水位 における幅 (cm)	—	9.7	19.5
地下水位 (GL-cm)	-2.0	-1.2	-1.0
入力加速度 (gal)	85, 190, 295		

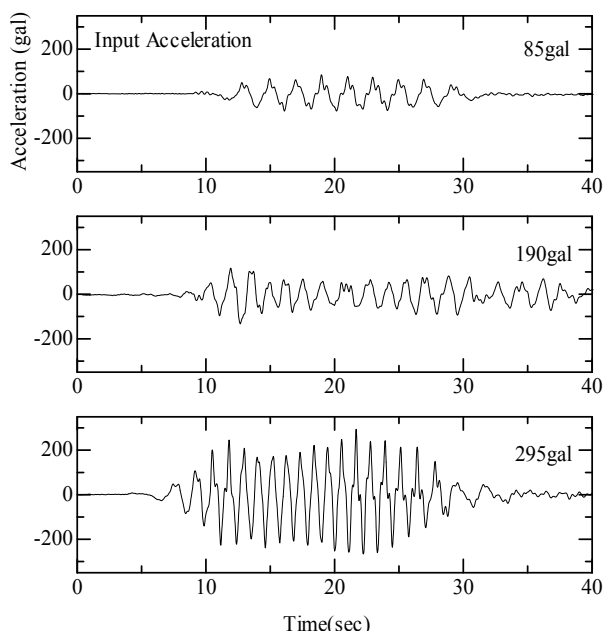


図 6 入力地震動

### 3.4 加振実験の結果と考察

実験では、3回の加振を行ったが、2回目の加振 (190gal) までは地盤の変形は小さく、天端沈下量も最大で 0.5mm (原型スケールで 2cm) と小さかった。そこで本節では、大きな変形が生じた 3回目の加振実験 (295gal 加振) について

主に述べる。なお、以後の実験結果は遠心模型実験の相似則にしたがって原型スケールに全て換算して述べる。

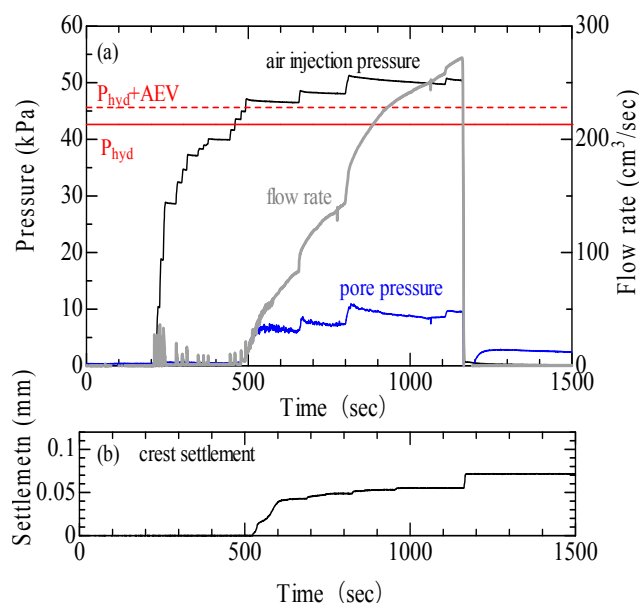


図 7 空気の注入圧力図 (Case2)

図 8 (b),(c),(d)は天端直下の 3 深度にて測定した過剰間隙水圧の時刻歴である。図中には、直上の盛土高さから単純に求めた初期有効土被り圧が破線で示してある。無対策のケース 1 では、破線の初期有効土被り近くまで上昇し、その後ほぼ一定値となっており、盛土の液化化実験において盛土直下の液化化層で見られる典型的な間隙水圧挙動である。一方、ケース 2, 3 ではこの領域は空気注入によって不飽和化された領域である。過剰間隙水圧は有効上載圧に比べて極めて小さく、液化化の発生が抑制されたことがわかる。

法面直下の 3 深度で測定した過剰間隙水圧を図 8 (e),(f),(g)に示す。ケース 1 では過剰間隙水圧が有効上載圧にはほぼ達し液化化していることがわかる。ケース 3 ではこれら 3 深度は不飽和領域内にある。ここでも天端直下と同様に、過剰間隙水圧の上昇は小さく顕著な過剰間隙水圧の抑制効果が確認できる。一方、ケース 2 におけるこれら 3 深度は不飽和領域の外側にあるが、ケース 1 と比べて水圧が低い。飽和領域と不飽和領域の境界付近では、2つの領域での過剰間隙水圧が異なることから水圧の伝播及び間隙水のマイグレーションが発生する。ケース 2 のこれら 3 深度においては、近傍の不飽和領域の存在によって液化化の発生が抑制されたものと考えられる。

図 9 は過剰間隙水圧の最大値と有効上載圧の比較である。ここでも有効上載圧は、各センサー直上の土層厚から単純に求めたものである。各測定地点のうち不飽和域の過剰間隙水圧は、深度に関係なく抑制されていることが確認できた。また飽和領域のうち不飽和領域の近傍にあるケース 3 の C1, C3 についても過剰間隙水圧が抑制されている。また、水平地盤部 (第 4 列) では何れのケース

でも飽和領域内であり、過剰間隙水圧はほぼ初期有効応力近くまで上昇し液状化したことがわかる。

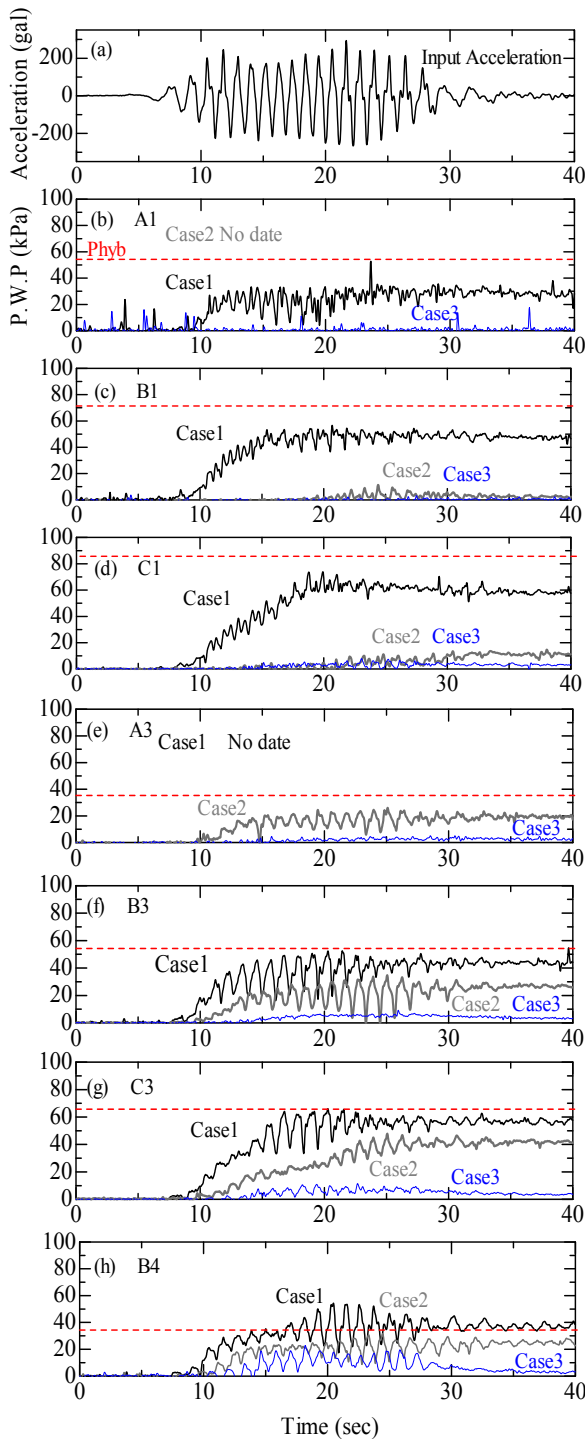


図 8 過剰間隙水圧の時刻歴図

図 10 は、ケース 2, 3 の飽和領域における過剰間隙水圧比の最大値を飽和/不飽和領域境界からの距離に対してプロットしたものである。境界から約 0.5m と不飽和領域に近いケース 3 の C1 地点では、過剰間隙水圧比は極めて小さくなっている。これは、この地点の両側に不飽和領域が存在し水圧の伝播効果が著しいことに加え、両側の不飽和領域が液状化しなかったため、C1 地点を含む小さな

飽和領域の加振中の変形も抑制されたためであると考えられる。このような不飽和領域に囲まれた小さな領域は、不飽和化されなくても液状化しにくいことがわかる。

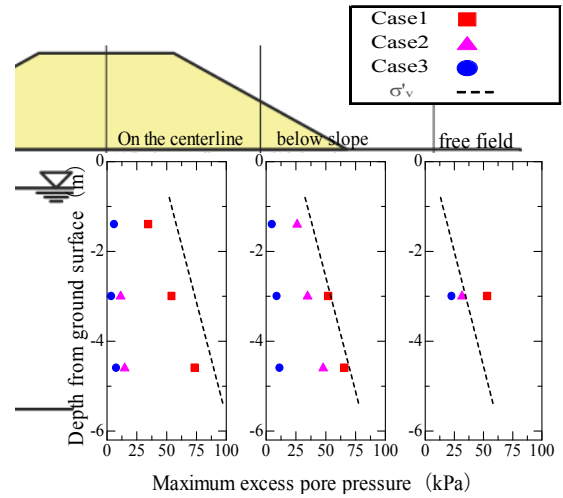


図 9 最大過剰間隙水圧と有効上載圧の比較

境界から 1.5m 以上離れた地点でも、60~90%の過剰間隙水圧比となっており、不飽和領域の存在による水圧低減効果が見られる。ケース 2 の C3, B3 地点とケース 3 の B4 地点の水圧比を比較すると、境界からの距離はほぼ同じであるにも関わらずケース 3 の B4 地点での水圧が低い。これは、ケース 3 の不飽和域がケース 2 よりも広く、領域内の空気圧縮量が大きいために周辺の飽和領域に及ぼす水圧抑制効果がより大きかったためであると考えられる<sup>24)</sup>。

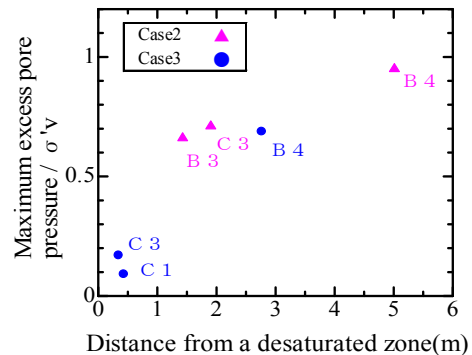


図 10 過剰間隙水圧の比較

写真 1 は実験後の模型の写真である。また、図 11 は、各ケースにおける変位ベクトル図である。全域飽和のケース 1 では盛土直下の液状化層の土が中心部から外側へ流動し盛土が沈下したことがわかる。盛土天端直下を不飽和化したケース 2 では、不飽和領域に明らかな変形はなく、飽和領域では変形が生じた。飽和/不飽和領域の境界の直上にあたる盛土のり面の中心付近にクラックが発生し、飽和領域直上の盛土は沈下した。盛土直下のほぼ全域を不飽和化したケース 3 では、地盤全域において明らかな変形は生じていない。ケース 3 は、上述したよう

に不飽和化領域の間に不飽和化されずに残った狭い領域が存在する(水圧計 C1 の位置)。この部分にも変形は見られず、また天端の沈下量も極めて小さいことから、空気注入点の間に部分的に飽和域が残存しても盛土の沈下量にはほとんど影響しないことが確認できる。

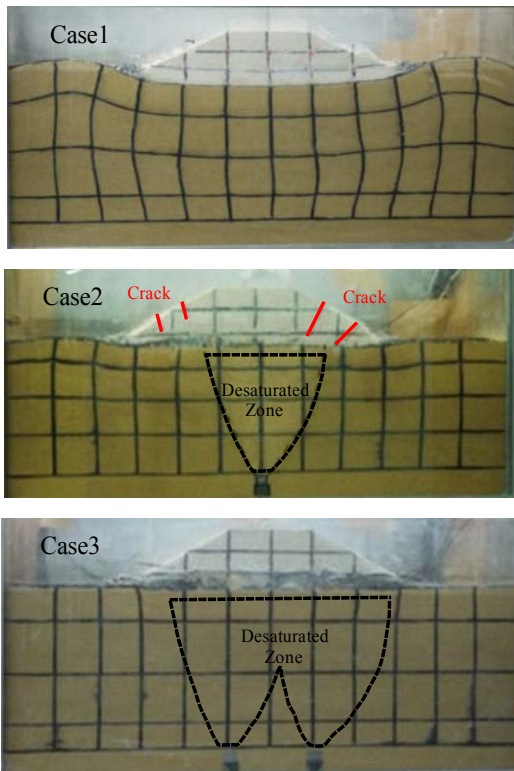


写真 1 実験後

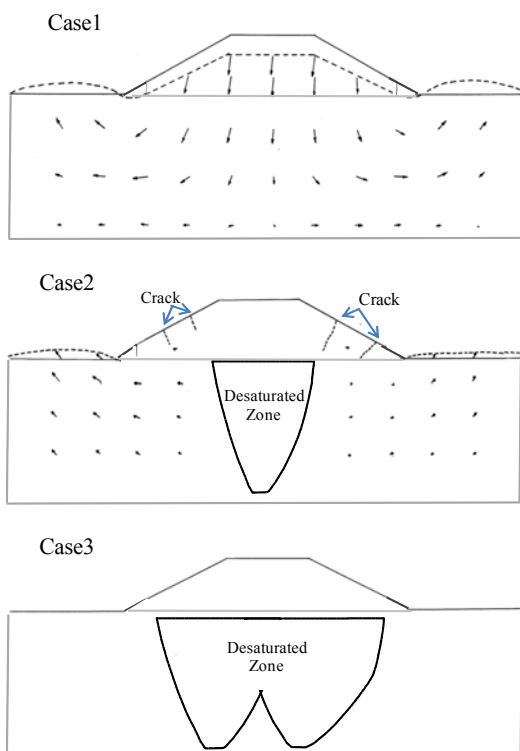


図 11 変位ベクトル図

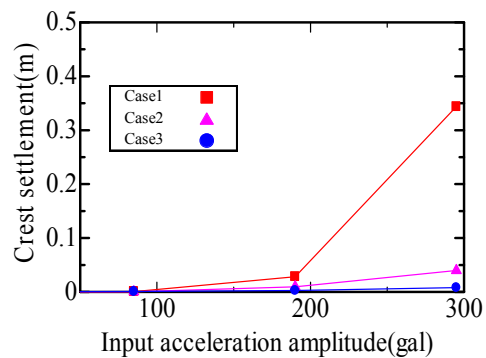


図 12 累計沈下量

図 12 は盛土の天端累積沈下量と入力加速度の関係である。全域飽和のケース 1 の累積沈下量は 0.344m に対し、不飽和領域のあるケース 2, 3 の累積沈下量は大幅に抑制された。特にケース 3 の累積沈下量は 0.008m と極めて顕著な沈下抑制効果となった。

なお本実験では剛な土槽を用いたため、全域飽和のケース 1 では左右の土槽壁面が地盤の水平変位を拘束して盛土の沈下量を抑制している可能性がある。一方、不飽和対策したケース 2, 3 では、不飽和化されていない水平地盤部は液状化しているもののその変形量は小さく、従って土槽壁面の存在による盛土直下地盤の変形量や盛土の沈下量への影響は小さいものと考えられる。

#### 4. 地震時残留変形解析

##### 4.1 解析条件

遠心模型実験を対象とし、有限要素法に基づく静的解析法「ALID」を用いて液状化沈下解析を行い実験と解析結果の比較を行った。ALID の特徴は、液状化流動のメカニズムを、液状化の発生と加振の継続、土粒子構造の劣化、液状化砂層の剛性低下として捉え、流動解析を静的な剛性低下解析を行うものである。主な ALID の解析条件を表 3 に示す。解析では、まず地盤の液状化安全率 FL 値の分布を道路橋示方書<sup>25)</sup>の液状化判定法により求めた。そこでは、豊浦砂 ( $D_r=60\%$ ) の液状化強度比 RL20 を 0.136 とし、不飽和領域の液状化強度は、Okamura & Soga<sup>18)</sup>による液状化強度倍率 (図 4) を飽和状態の液状化強度に乗じることで求めた。不飽和化による単位体積重量の変化は約  $-1.5\%$  と小さいことから解析では無視した。また、飽和状態および不飽和状態 ( $S_r=90,97\%$ ) における豊浦砂の動的変形試験により、この程度の不飽和化では  $G-\gamma$  および  $h-\gamma$  曲線はほとんど変化しないことが確認されており<sup>26)</sup>、地盤の振動特性はほとんど変わらないと考えられる。さらに、三軸液状化試験において、飽和状態および不飽和状態 ( $S_r=70\sim 100\%$ ) 供試体の液状化後のひずみの増加程度、および液状化後の剛性低下率に明確な差が見られないことが報告されている<sup>26)</sup>。以上により、本研究では不飽和領域の液状化強度のみ変更して解析を行った。盛土の初期剛

性は遠心模型実験時に微小加振を別途行って測定したせん断波速度より  $G0=14.628\text{MPa}$  とした。また、盛土および地下水位以浅の不飽和層の剛性低下率はモール・クーロンの破壊基準に従った弾塑性モデルとした。このようにして設定した定数を用いて ALID の残留変形解析を行ったところ、ケース 2, 3 を含む全てのケースで基礎地盤の全領域において FL が 1 を大きく下回る結果となり、残留沈下量も非常に大きく実験結果と乖離したものとなった。これは、本実験が比較的幅の狭い剛な土槽を用いていることが原因であると考えられる。剛土槽を用いた実験では、側壁による地盤の変形抑制によって液状化するときの加速度が三軸液状化試験結果から予測される加速度に比べて大きく、見かけの液状化強度が大きくなる<sup>27)</sup>。そこで、本研究では次のように液状化強度の補正を行った。すなわち、まず、ケース 1 の水平地盤部(B4 地点)において、液状化する時点 ( $t=17\text{s}$ ) までの主要な加速度波の数 ( $N=7$  波) と加速度振幅 ( $190\text{gal}$ )、および豊浦砂 ( $D_r=50\%$ ) の液状化強度曲線<sup>28)</sup> (図 13) における  $N=7$  回に対応するせん断応力比 ( $RL9=0.130$ ) より液状化判定を行うと、 $FL=0.296(=1/3.4)$  となった。そこで、全てのケースの地盤の液状化強度をそれぞれ 3.4 倍して解析を行った。

表 3 ALID の解析条件

項目	盛土	表層	液状化層	支持層
非線形モデル	MC/DP		応力依存剛性	
せん断弾性係数 (MPa)	14.63	84.55	84.55	99.25
ポアソン比	0.33			
湿潤単体重量 ( $\text{KN}/\text{m}^3$ )	19.65	16.42	18.92	19.57
剛性低下率	MC/DP		—	1/10

MC/DP: 弾塑性モデル

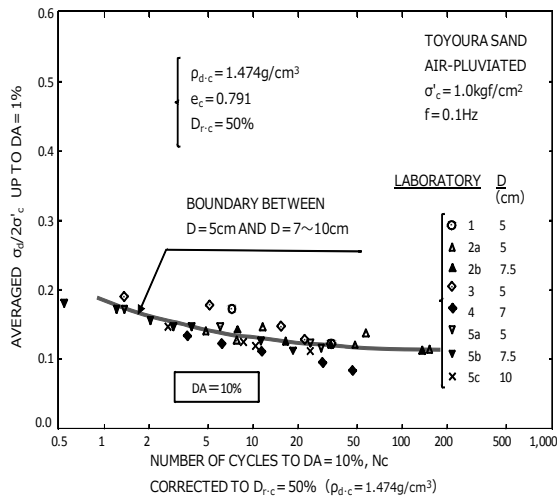


図 13 三軸液状化強度曲線 (豊浦砂)<sup>28)</sup>

図 14 は、このようにして求めた各ケースの FL 値の分布である。ケース 1 では盛土直下の浅部に一部  $FL>1$  の領域があるが、そこ以外は全域で  $FL<1$  となった。またケース 2, 3 の不飽和領域での FL 値は 1.4~2.1 となった。

#### 4.2 解析結果と考察

図 15 は ALID により得られたケース 1~3 の 295gal 加振時の変形図である。ケース 1 は液状化層が中心から外側へ移動し盛土が沈下しており、実験と同様の変形形態となった。不飽和領域のあるケース 2~3 では、実験での不飽和化による地盤の変形抑制を良く捉えたものとなった。

図 16 は、実験前後の画像から模型地盤内の色砂の格子点座標を読み取り、それによって求めた各ケースの最大せん断ひずみ図である。全域飽和のケース 1 では盛土直下の液状化層で最大せん断ひずみが 0~18% 以上となり、液状化層は中心から外側へ移動し、盛土が沈下した。不飽和領域のあるケース 2 での不飽和部の最大せん断ひずみは 0~5% となった。のり尻およびその直下の地盤の浅い部分に変形した。不飽和領域の浅い部分は変形抑制効果が小さい<sup>2)</sup>。不飽和領域のあるケース 3 での最大せん断ひずみは 0~3% となり、ケース 2 に比べ変形抑制効果が大きい。飽和領域のうち不飽和領域の近傍にある飽和領域では、最大せん断ひずみが抑制されていた。

図 17 は、解析による各ケースの最大せん断ひずみ図である。全域飽和のケース 1 では盛土直下の液状化層で最大せん断ひずみが 0~6% となった。不飽和領域のあるケース 2 での不飽和部のひずみは 0~3% となった。不飽和領域のあるケース 3 での最大せん断ひずみは極めて小さく、ケース 2 に比べ変形抑制効果が大きい。

実験と解析の最大せん断ひずみを比較すると、ケース 1 は液状化層が中心から外側へ移動し盛土が沈下しており、実験と同様の変形形態となった。盛土直下の浅い部分が小さく、それより深い部分では大きく、定量的には差があるものの、解析で得られた最大せん断ひずみの分布状況は、実験で得られたケース 1 の分布形状の特徴を捉えている。

図 18 に実験と解析から得られた各ケースの沈下量をまとめて示す。全てのケースにおいて ALID による解析結果は、実験結果よりも小さくなっているものの盛土直下地盤の不飽和化による天端沈下量の変化傾向を良く捉えたものとなった。

なお、本研究では模型実験における液状化対策効果を ALID でシミュレーションするにあたり、地盤全体の液状化強度を増加させた。これは、上述したとおり比較的幅の狭い土槽を実験で用いたことによる変形拘束効果により、見かけの液状化強度が大きくなったことに便宜的に対処するためである。このように地盤全体の液状化強度を一定の割合 (3.4 倍) で増加させることにより、液状化対策の有無による地盤変形状体の違いを定性的に捉えること



が出来たが、盛土天端沈下量や地盤の歪みには実験と解析で数倍の違いが見られた。本研究のように地盤全体の液化強度を増加させるのは模型実験のシミュレーションをALIDで行う際の便法の一つであるが、今後の更なる検討が必要である。

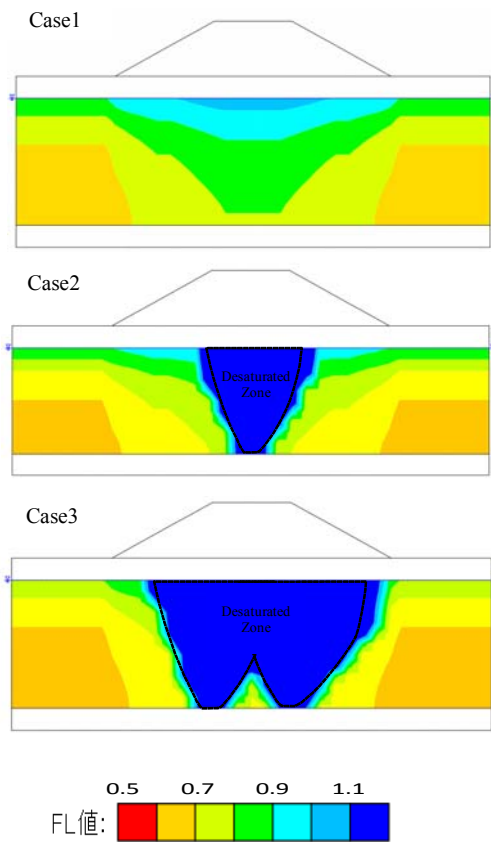


図 14 FL 値

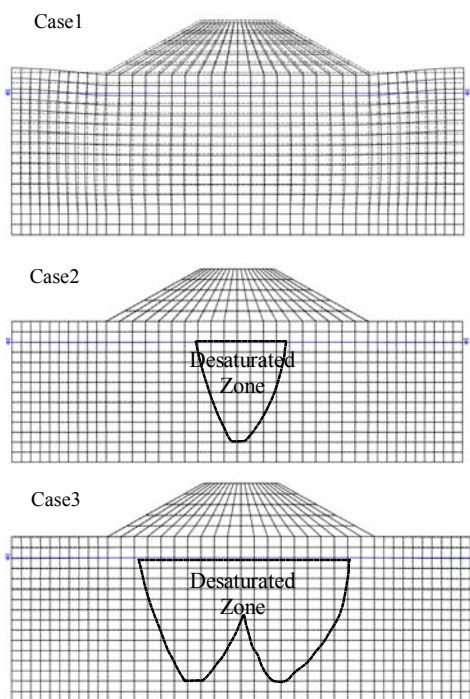


図 15 変形図

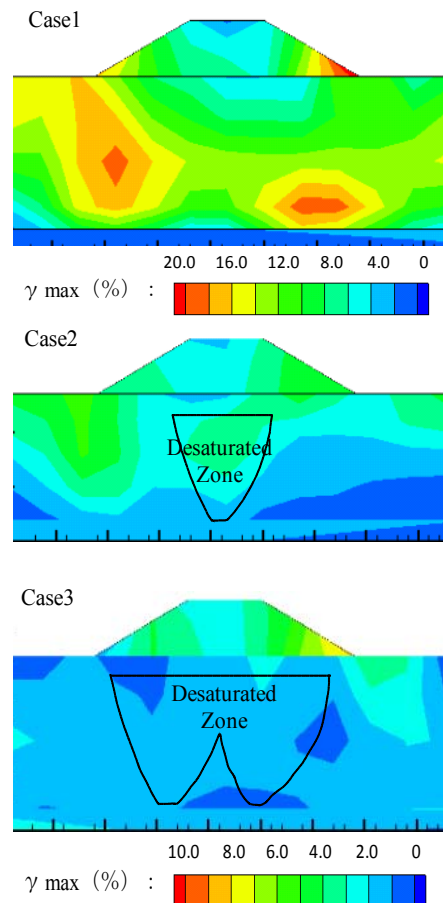


図 16 実験の最大せん断ひずみ

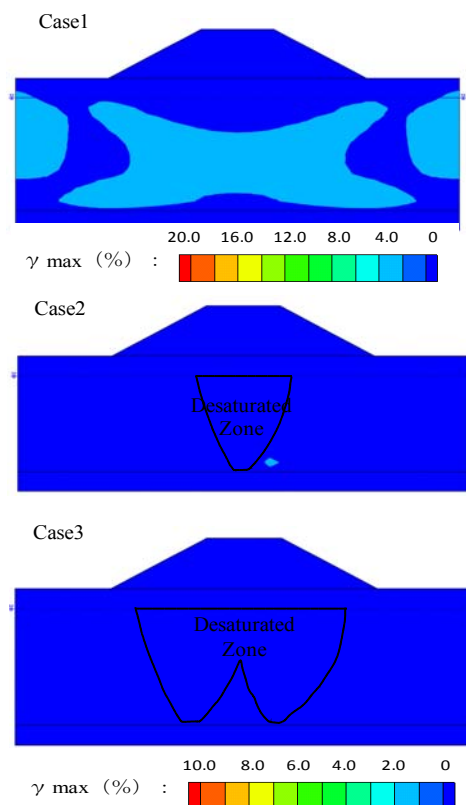


図 17 解析の最大せん断ひずみ

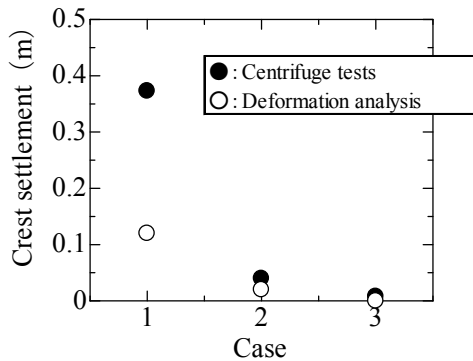


図 18 沈下量比較図

## 5. まとめ

本研究では、既存構造物直下に適用でき、かつ長い線状構造物に適用し得る可能性のある安価な液状化対策工法である、空気注入不飽和化工法の道路盛土への適用性を検討することを目的とし、動的遠心模型実験を行った。また、液状化による残留変形解析法 ALID を用いて実験を対象とした解析を行い、同解析法の適用性について検討した。その結果、以下の結論を得た。すなわち、

- (1) 地盤に空気を注入した後の地盤の飽和度は、保水性試験から得られる飽和度よりも低くなった。これは、地盤の僅かな不均一性により、僅かに粒度が小さな土の層の下に空気がトラップされたものと考えられる。
- (2) 加速度振幅約 295gal の加振により、無対策の地盤(ケース 1)では地盤が液状化し、天端は盛土高さの約 2 割の沈下を生じた。一方、盛土直下地盤を空気注入により不飽和化した地盤(ケース 2, 3)では、加振による不飽和領域内の過剰間隙水圧比は 20%以下と小さく、顕著な間隙水圧抑制効果が確認された。また、地盤の変形量及び天端の沈下量は低減され、特に盛土直下地盤を全面的に不飽和化したケース 3 では沈下量が無対策模型の約 1/50 と大幅な沈下抑制効果を確認した。
- (3) 不飽和領域に挟まれた比較的狭い飽和領域では、加振中の過剰間隙水圧が低く、液状化の発生が抑制された。これは、周囲の不飽和領域への間隙水のマイグレーションによる水圧低減効果と、液状化せず剛性を保った領域に囲まれていることによる変形抑制効果によるものと考えられる。
- (4) 土被り圧が大きい状態ほど不飽和化による砂質土の液状化強度倍率が大きくなるため、盛土直下地盤では不飽和化工法による液状化対策工法は有効であることがわかった。
- (5) 残留変形解析法 ALID による解析では、不飽和化による液状化強度の増加を Okamura and Soga (2006)の提案式により算定し、また実験を比較的幅の狭い剛な土槽で行ったことによる液状化のしにくさを考慮した。その結果、液状化に対する安全率 FL は、実験で測定された過剰間隙水圧比と良い対応を示した。また、解析結果は実験での

天端沈下量および地盤の変形量よりもやや小さくなったものの、沈下量低減効果、および地盤内変形メカニズムの変化を良く捉えたものとなった。

本研究では、このように模型地盤の FL 値の評価に課題が残る結果となり、ALID の適用性を十分に評価するに至らなかった。今後せん断土槽を用いた実験を行い、それを対象とした ALID の解析結果と実験結果を比較することにより、改めて ALID の適用性を評価する必要があるものと考えられる。

## 参考文献

- 1) 独立行政法人日本高速道路保有・債務返済機構:高速道路機構ファクトブック2011, ppIII112-115, 2011.12
- 2) 内閣府(防災担当): 南海トラフの巨大地震による震度分布・津波高について(南海トラフの巨大地震による最大クラスの震度分布), 2012.3
- 3) 建設省土木研究所: 河川堤防の液状化対策工法設計施工マニュアル(案), 1997.10
- 4) 総合土木研究所: 基礎工, pp.77-79, 2006.4
- 5) Okamura, M. and Matsuo, O.: Effects of remedial measures for mitigating embankment settlement due to foundation liquefaction. International journal of physical modeling in geotechnics. volume2 No.2, pp.1-12, 2002
- 6) Adalier, K., Elgamal, A.-W. and Martin, G. R. (1998): "Foundation liquefaction countermeasures for earth embankment," J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 124(6), pp. 500-517, 1998
- 7) 井樋世一朗, 東畑邦生他: 法尻の締切矢板による盛土の地震時沈下軽減工法の振動台模型実験, 第35回地盤工学研究発表会, 2000.6
- 8) Takeuchi, M., Yanagihara, S. and Ishihara, K. (1991): "Shaking table tests on model dikes founded on sand deposits with compacted zone," Proc. Int. Conf. Geo-Coast '91, pp. 509-514, 1991
- 9) 国土交通省: 新技術情報提供システム (New Technology Information System: NETIS) の薬液注入工より, 2013.5
- 10) Air-des 工法研究会: 空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) 技術マニュアル, 2012.7
- 11) 岡村未対: 新しい液状化対策技術 - 空気注入不飽和化工法 (Air-Des 工法) -, 地盤工学会誌, Vol.60, No.5, pp.12-15, 2012.5
- 12) 岡村未対: 空気注入による液状化対策の実用化に向けて, 基礎工, pp.68-69, 2008.1
- 13) 西垣誠, 藤井直: 液状化防止を目的とした地盤の不飽和化に関する実験的研究, 土木学会論文集 C Vol.64 No.2, pp.340-352, 2008.6
- 14) 笠松亮太, 岡村未対: 土中空気の溶解現象による不飽和地盤内の飽和度経時変化に関する実験的研究, 第20回土木学会四国支部技術研究発表会, 2014.5
- 15) Mitsu Okamura and Taiji Teraoka (2005): Shaking table tests to investigate soil desaturation as a liquefaction countermeasure, ASCE Geotechnical Special Publication, No.145, Seismic performance and simulation of pile foundations in liquefied and laterally spreading ground, pp. 282-293, 2005
- 16) 相原聡, 岡村未対: 空気注入によって液状化対策された地盤の未改良部における水圧低下, 第44回地盤工学研究発表会, 2011
- 17) 竹村次朗, 小松本奈央美, 関栄, 井澤淳: 重力式岸壁の液状化対策としての地盤の不飽和化に関する遠心模型実験, 第45回地盤工学研究発表会, pp.1293-1294, 2010.8
- 18) Okamura, M. and Soga, Y.: Effect on liquefaction resistance of volumetric strain of pore fluid, Soils and Foundations, Vol. 46, No. 5, pp. 696-700, 2006

- 19) Ratnam, S., Culligan-Hensley, P.J., and Germaine, J.T. (1996) Modeling the Behavior of LNAPLs Under Hydraulic Flushing, Non-Aqueous Phase Liquids (NAPLs) in Subsurface Environment: Assessment and Remediation, Proceedings of the Specialty Conference, conjunction with the ASCE National Convention, pp. 595-606, 1996
- 20) Kutter B. L. (2013): Effects of Capillary Number, Bond Number, and Gas Solubility on Water Saturation of Sand Specimens, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 50, No. 2, pp.133-144, 2013
- 21) Marulanda, C., Culligan, P. J. and Germaine, J. T. (2000): Centrifuge modeling of air sparging — a study of air flow through saturated porous media, Journal of Hazardous Materials, Vol. 72, pp. 179-215, 2000
- 22) 五十嵐ひろ子:飽和地盤への空気注入による地盤不飽和化メカニズムの解明, 修士論文, 2009.1
- 23) 岡村未対・来山博昭(2008): 遠心加速度を利用した飽和模型地盤の作製法と飽和度計測法に関する研究, 土木学会論文集, Vol.64, No.3, pp. 662-671, 2008
- 24) 岡本辰也:基礎地盤の不飽和化による盛土の液状化対策効果の検討, 学位論文, 2011.2
- 25) 社団法人日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, pp.349-342, 2002.3
- 26) Air-des 工法研究会:空気注入不飽和化工法 (Air-des 工法) 技術マニュアル付属資料, pp.1-8, 2012.7
- 27) 庄司登, 岡村未対:液状化実験における土槽境界と地盤飽和度の影響, 第19回土木学会四国支部技術研究発表会, pp.141-142, 2013.5
- 28) 飽和豊浦砂の繰返し非排水三軸試験における変形特性に及ぼす諸要因に関する共同研究報告, 土質工学会シンポジウム発表論文集, 1984.12

(2013. 8. 9 受付)

---

---

## Effects of desaturation as a liquefaction countermeasure for existing embankments

Yuichi TOMIDA<sup>1</sup>, Naomitsu KAMIDA<sup>1</sup>, Junji UCHIDA<sup>1</sup>, Tatsuya OKAMOTO<sup>2</sup> and Mitsu OKAMURA<sup>3</sup>

- 1 West Nippon Expressway Company Limited, Shikoku Branch
- 2 Taisei Corporation (Former Ehime University)
- 3 Graduate School of Science & Engineering, Ehime University

### Abstract

Highways in Japan have played important roles as emergency traffic routes after earthquakes. Although highway embankments often damaged due mostly to soil liquefaction or related phenomena, however, any liquefaction countermeasure is not implemented. This is largely due to the fact that damaged embankments had been fixed in relatively short time. But this may not be the case if huge earthquake such as the Nankai earthquake occur. In this study, an innovative liquefaction countermeasure technique, desaturation by air injection, is focused on which is inexpensive and applicable to foundation soil below existing structures. Effectiveness of the technique to embankments on liquefiable soils were studied through a series of centrifuge tests.

Three models were tested including the benchmark model without desaturated zone and two models with partly saturated foundation soils. In the later models, fully saturated foundation soils were prepared first and air was injected in flight. The resultant degree of saturation in the desaturated zones after the air injection was halted was some 88%. All the models were horizontally shaken at 40g field and model responses were observed in detail.

The foundation soil of the benchmark model was liquefied during shaking and embankment crest settled as much as about 20% of the embankment height. While for desaturated model, observed excess pore pressures in the desaturated zones were considerably low and significant reduction in crest settlement was observed.

In this study an attempt was made to simulate the centrifuge models using a numerical code, ALID. In the simulation, liquefaction resistances of sand in the desaturated zone were estimated based on the formula proposed by Okamura and Soga (2006). In addition, influence of ridged boundary imposed by the rigid container side walls were taken into account. The simulations captured fairly well the overall figure of experimental observations that crest settlement and deformation of foundation soil decrease with increasing the width of desaturated zone.

Key words: embankment, liquefaction, degree of saturation, centrifuge test, liquefaction countermeasure