

## 建設残土有効利用と地下埋設管の液状化対策のための

### 鉄鋼スラグの積極的利用に関する研究

Effective Use of Excavated Soils and Steelmaking Slag  
for Liquefaction Countermeasures of Underground Pipelines

中澤博志（静岡理工科大学）

Proper management of excavated and generated soils from construction sites is a critical issue. In Shizuoka Prefecture, approximately 550,000 m<sup>3</sup> of construction surplus soils are disposed of annually, far exceeding the volume of newly purchased materials, which is about 400,000 m<sup>3</sup>. This situation highlights the urgent need to promote the reuse of surplus soils as valuable construction resources rather than treating them merely as waste. Liquefaction during earthquakes is another serious societal problem, frequently causing functional failure of lifeline facilities such as sewer and gas pipelines buried underground. Conventional liquefaction countermeasures for sewer systems have mainly focused on preventing the uplift of manholes; however, if the main pipelines connected to these manholes float due to liquefaction, not only structural damage but also prolonged post-earthquake recovery can occur. In this study, a field demonstration experiment was conducted to develop a liquefaction countermeasure that suppresses the uplift of buried pipelines while effectively utilizing construction surplus soils. At an experimental site in Mishima City, recycled improved soil was produced by mixing steelmaking slag with locally generated surplus soils and reused as backfill material. The results confirmed that this recycled material effectively mitigated liquefaction-induced uplift of sewer pipelines.

#### 1. はじめに

国土強靱化事業により、近年土砂発生量が増加の一途を辿っている。この土砂とは、端的に工事現場で排出される建設発生土であり、図 1 に示すように定義される。静岡県内では、建設発生土のリサイクルへの取組を推進する一方、有効活用できない場合には残土処分場において、3 割弱が処分されているのが現状である<sup>1)</sup>。また、熱海土石流以来の盛土規制強化<sup>2)</sup>により、残土処理施設における管理水準の高度化の下、リサイクル化の動きが鈍い状況にある。公共建設工事では「リサイクル原則化ルール」があるが、利用困難な場合、経済比較（運搬・処分費等）を行い最も安価となる残土処分場へ搬出している。特に、静岡県内の残土処分場は減少傾向にあり、処分場の容量がすでに不足している状況にある。したがって、建設発生土の発生抑制と共に、建設発生土の利用基準や土質改良土等の品質基準の整備を行い再利用促進が必要となる。そこで、現行の各種「発生土利用基準」や「盛土規制法」<sup>2)</sup>などにおいて、建設材料として適用用途を満たさない不良土を何とか再利用する方策が必要である。

本研究では、実際の現場から排出された建設発生土に鉄鋼スラグを混合した再生改良土を用いた下水道本管の液状化対策の確立を目的とした。その理由として、先の令和 6 年能登半島地震において、写真 2 に示す石川県珠洲市の事例の様に、発災後、地下埋設管の埋戻し土の液状化が道路機能不全にさせるケースが非常に多かったことが報告されている<sup>3)</sup>。道路直下の地下埋設管は、地盤・道路構造を開削し埋戻しを伴うことから弱部となる。勿論、液状化対策が施されているケースはあるが、基本的にはマンホールを対象に、薬液注入、アンカー工、過剰間隙水圧消散および重量化による対策が主な工種として提案されている。一方、延長の長い下水道管本管などへの対策工は殆ど見当たらないのが現状である。いずれにしても、開削を伴う施工が多いことから、掘削後の埋戻し作業時に、埋戻し材として建設残土の利用を促すため、鉄鋼スラグを混合し、固化処理土として地下埋設物の上部に埋戻し、締固め管理をすることで、管路の浮上を抑える方法を考え現場にて実証した。

## 2. 令和4年能登半島地震における被災事例

既往の研究において、マンホールに対する浮上がり対策技術は多数存在する。2003年9月26日に発生した十勝沖地震では、北海道十勝地方における泥炭地盤に施工されているマンホールの埋め戻し土で液状化が生じ、豊頃町や音別町、釧路町などでは多数のマンホールが最大浮上量約1.7mにも達した事例が報告されている<sup>4)</sup>。2004年10月23日に起きた新潟県中越地震では、長岡市・小千谷市などで、信濃川沿いの沖積低地、旧河道、埋戻し土の液状化によってマンホールの隆起、突出、沈下が1,400箇所以上発生し、交通障害、下水道機能の低下が発生し、マンホール浮上が社会問題化した<sup>5)</sup>。その後、地下埋設管浮上防止のための液状化対策工法の開発が推進された。2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、関東から東北の広域で液状化が生じたが、浦安市を中心に、数千基規模のマンホール浮上が確認され<sup>6)</sup>、記憶に新しい2024年1月1日における能登半島地震においても同様な被害が確認されている。

上述のうち、ライフライン全体系への被害が顕著であった震災は、2004年新潟中越地震であり、若松ら<sup>5)</sup>によれば、信濃川流域の旧河道や扇状地の低地において激しい液状化が発生し、下水道管やマンホールの浮上がりが多発したことによって、下水の流下機能が著しく損なわれた。また、管の継手の離脱や、そこからの噴砂・土砂流入による管路の閉塞が確認された。同様に、能登半島地震もその被害は顕著であったことが報告されている<sup>7)</sup>。によれば、石川県内の能登地域6市町（七尾市、輪島市、珠洲市、志賀町、穴水町、能登町）において極めて高い被災率が記録された。下水道総延長に対し、珠洲市で69.0%、穴水町で59.5%という驚異的な被害率が確認され、**図2**を見ると、被災延長は石川県で372 km、富山県の41 km、新潟県の14.8 km、福井県における0.8 kmと比較し、石川県への被害の集中が顕著であった。

本地震における主要な被害形態は、液状化に伴う管路のたるみ・蛇行、および人孔の浮上である。石川県内では約4,200箇所ものマンホール浮上が確認され、そのほとんどが液状化による側方流動が主要因であったことが報告されている。側方流動による管路の蛇行や継手部の脱落・損傷が確認されたが、マンホール単体の健全性が保たれている場合であっても、ライフラインとしての機能は喪失していた。

従来の液状化対策は、マンホール等の構造物に対する浮上がり防止策が中心であった。しかし、上述の事例の様に、新潟中越地震や能登半島地震の事例では、対策が施されたマンホール自体は持ちこたえても、周辺の本管部分が浮上・蛇行することでシステム全体が麻痺するという実態が浮き彫りとなった。応急工事が実施されたのは3県合計で17.5 kmに留まっており（2024年8月9日当時）、石川県のみでの被災延長372 kmと比較しても極めて限定的であり、

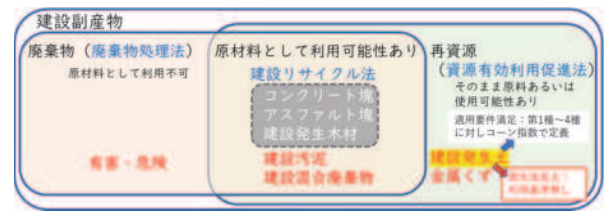


Fig.1 建設副産物



Photo.1 2016年熊本地震における埋設管理戻し部の陥没とマンホール突出

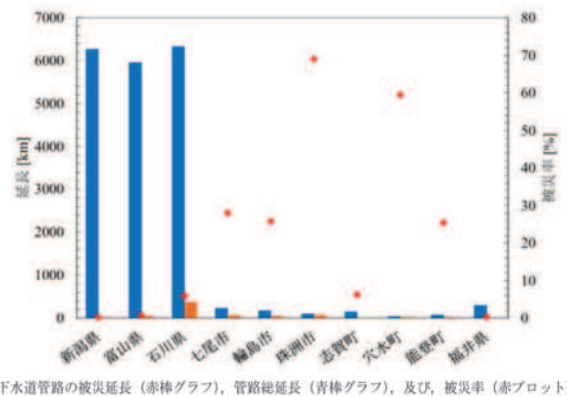


Fig.2 下水道管路の被災延長<sup>8)</sup>

管路の液状化対策が困難であることを示唆している。

## 3. 液状化対策の現状

埋設管が浮上する物理的なプロセスについて、仙頭ら<sup>8)</sup>は模型振動実験を行い、液状化時の浸透流に着目した埋設管浮上メカニズムを検討している。この研究では、浮上現象は単なる静的な浮力の作用だけではなく、地盤内の過剰間隙水圧の変化と土粒子の動的な挙動が密接に関係していることを明らかにしている。このように、埋設管の浮上メカニズムに関する研究は幾つか確認できるものの、マンホールの浮上メカニズムに関する研究に比べ少ないのが現状である。しかし、過去の震災事例から、国土技術政策総合研究所<sup>9)</sup>において、下水道本管の液状化対策は極めて重要な課題と位置づけられており、代表的な手法として砕石（グラベルドレーン工法）等を用いた対策が挙げられる。砕石を用いた対策の主な目的は、地盤内の過剰間隙水圧の上昇を抑制することにある。埋設管の周囲を透水性の高い砕石で置換することにより、地震時に発生する過剰間

隙水圧を速やかに消散させ、有効応力の消失を防ぎ揚圧力の発生を抑える効果があると考えられる。

埋設管は延長が非常に長く広範囲に及ぶため、従来の地盤改良や砕石による対策を全ての区間に施すには膨大なコストと工期を要する。国土交通省の指針においても、管路全体の浮上がり抑制は技術的・経済的課題が多く、抜本的な対策技術が十分には確立されていないため、施工性に優れた安価、かつ管路に沿った連続的対策手法の確立が必要である。そこで、改質材として、鉄の製造時の副産物である鉄鋼スラグ<sup>10)</sup>を建設発生土に混合することで、水和反応による水硬性を期待し<sup>11)</sup>、埋設管に沿って上部を埋戻すことで浮上防止を講じる対策について検討した。

#### 4. 室内試験

現場実験に先立ち、三島市内の現場から提供された建設発生土と改質材としての鉄鋼スラグを混合した再生改良土（以下、スラグ混合土）の物理・力学特性を室内試験により把握した。表1に試験結果のとりまとめを示す。埋設管の埋め戻し砂を含め、土の粒度試験（JIS A 1204:2020）、突固めによる土の締固め試験（JIS A 1210:2020）、土の一軸圧縮試験（JIS A 1216:2020）、埋め戻し砂において土の圧密排水（CD）三軸圧縮試験（JGS 0524）および土の繰返し非排水三軸試験（JGS 0541-2009）などを実施し、物理的性質と力学的性質を把握した。力学試験については、最適含水比によって養生した供試体を用いた。以下に各試験結果について述べる。

##### 4.1 粒度特性

配合試験に先立ち、母材となる建設発生土へ鉄鋼スラグを混合率させた地盤材料を準備した。現場における施工性を考慮し、母材となる建設発生土への鉄鋼スラグの混合率は体積比とし、建設発生土:鉄鋼スラグで1:0、1:2、1:5の配合を行った。

図3に粒度試験結果を示す。同図には、後述する埋設管周りへの埋め戻し砂のデータも併記している。写真2に示す提供された鉄鋼スラグは、粗粒子が大半を占めていたため、建設発生土と混合しやすいように、9.5 mm 以下の通過分を改質材として用いた。図3によると、鉄鋼スラグ混合率が増加するにつれて、粒径加積曲線全体が右側にシフトするが、すべての地盤材料で液状化の可能性が高いとされる粒径範囲に含まれていることが確認できる。また、表1に示す均等係数  $U_c$  ( $\geq 10$  が良質土) と曲率係数  $U_c'$  (1~3 が良質土) を見ると、鉄鋼スラグ混合率に拘わらず、粒度が悪い材料であることがわかる。

##### 4.2 締固め特性

図4に締固め曲線を示す。建設発生土のみの状態からスラグ混合率の増加とともに、最大乾燥密度  $\rho_{dmax}$  が 1.48  $g/cm^3$  から 1.68  $g/cm^3$  まで増加し、一方、最適含水比  $w_{opt}$  は 23.6% から 18.4% まで低下している様子が確認できる。

Table. 1 建設発生土における物理特性

地盤材料		現場発生土	現場発生土-鉄鋼スラグ(1:5)	現場発生土-鉄鋼スラグ(1:3)
土粒子の密度試験	$\rho_s$ ( $g/cm^3$ )	2.79	2.80	2.92
土の粒度試験	礫分 (%)	10.8	20.0	25.6
	砂分 (%)	70.4	68.0	61.0
	シルト分 (%)	9.4	5.9	6.8
	粘土分 (%)	9.4	6.1	6.6
	$D_{max}$ (mm)	9.5	19	19
	$U_c$	75	17	44
	$U_c'$	12	2.2	3.6
突固めによる土の締固め試験	$\rho_{dmax}$ ( $g/cm^3$ )	1.48	1.61	1.68
	$w_{opt}$ (%)	23.6	20.0	18.4

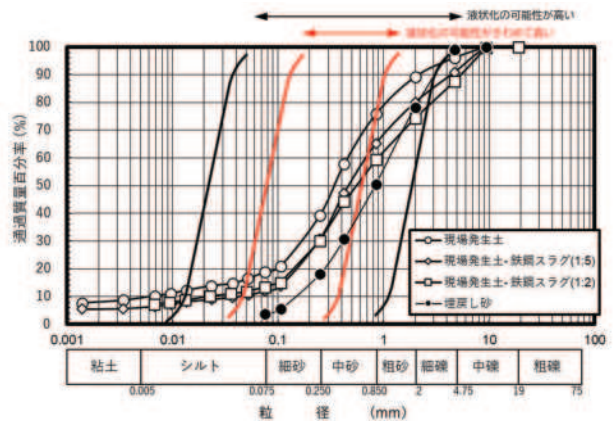


Fig. 3 降雨量および体積含水率の変化



Photo. 2 使用した鉄鋼スラグ

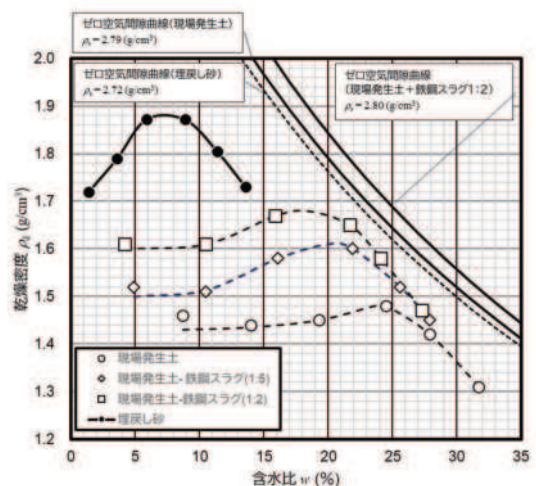


Fig. 4 スラグ混合土の締固め曲線

つまり、鉄鋼スラグ混合率が高いほど、粗粒土的な性質を示すことがわかる。

### 4.3 鉄鋼スラグ配合試験

後述の現場実験の実験ケースを検討するため、建設発生土と鉄鋼スラグによるスラグ混合土の配合試験を実施した。配合試験実施にあたり、現場における施工性を考慮し、前述のとおり、建設発生土:鉄鋼スラグは体積比で 1:0, 1:2, 1:5 の配合を行った。なお、予備検討において固化が進まないケースが生じたため、固化促進材として、尿素水を添加し固化処理を行った。

まず、建設発生土と鉄鋼スラグ（いずれも 9.5 mm ふるい分け通過分）を混合し、 $\phi 50$  mm,  $h 100$  mm のサイズのプラモールドに 3 層に分けて、湿潤密度  $\rho_t$  が  $1.8 \text{ g/cm}^3$  を目標に突き固め養生した。建設発生土:鉄鋼スラグの質量比 1:2 および 1:5 を対象に、28 日養生後の一軸圧縮試験結果を図 5 に示す。この試験結果より、質量比 1:2 の混合では  $46 \sim 85 \text{ kPa}$ 、また質量比 1:5 では  $44 \sim 110 \text{ kPa}$  の強度を得た。これにより、建設発生土にスラグを混合することで、明確な粘着力の付加によるせん断強度の発現が確認された。しかし、母材の性質によっては、設計で必要とされるレベルのせん断強度の確保や均質性に関する課題が確認された。

次に、固化性能の向上と品質の均質化を目的とし、建設発生土と鉄鋼スラグをともに 2.0 mm ふるい通過分を使用し、固化促進剤として尿素水を添加し、先に同様な方法で供試体を作製した。質量比は 2:1 の供試体を対象として、尿素 32.5%、純水 67.5% で構成された水溶液を用いた。この際、尿素そのものの添加量は、土の乾燥質量に対する尿素的質量比が 1% および 3% となるように設定し、さらに最適含水比  $w_{opt}$  である 18.4% となるように調整した。写真 3 に試験後の供試体の破壊性状の一例を示す。図 6 に示す様に、尿素水添加量に拘わらず、7 日強度で概ね  $40 \text{ kPa}$ 、28 日強度で  $50 \sim 55 \text{ kPa}$  となり、時間の経過とともに  $q_u$  は増加することが確認されたが、添加量による明確な差は認められなかった。本試験条件下においては、尿素的の過度な増量が必ずしも強度向上や品質安定に直結しないことが示唆された。

### 4.4 埋戻し砂の物理・力学特性

現場実験で使用した埋戻し砂の物理特性および力学特性について、表 2、表 3 にそれぞれ示す。力学試験については、土の圧密排水 (CD) 三軸圧縮試験 (JGS 0524) および土の繰返し非排水三軸試験 (JGS 0541-2009) を実施した。

供試体は、相対密度  $D_r$  が 60% と 80% となるように密度調整し、CD 試験では、有効拘束圧  $\sigma'_0 = 25, 50, 100 \text{ kPa}$  で試験を実施し  $c_d$  および  $\phi_d$  を求めた。 $D_r = 60\%$  および  $80\%$  の内部摩擦角  $\phi_d = 34.4^\circ$  を得た。また、液状化強度曲線を図 7 に示すが、 $D_r = 60\%$  の液状化強度が  $R_L = 0.220$ 、 $D_r = 80\%$  では、 $R_L = 0.311$  を示し、比較的液状化しやすい材料であることがわかる。

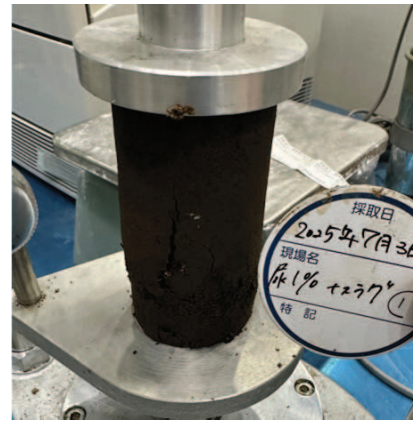
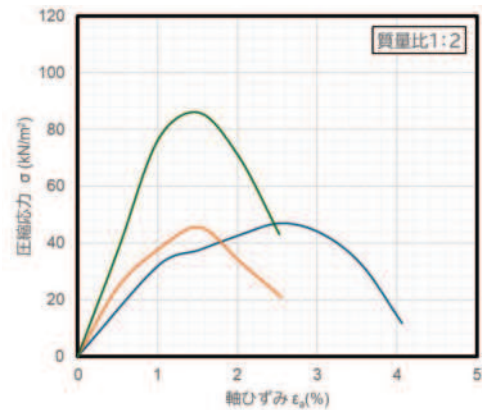
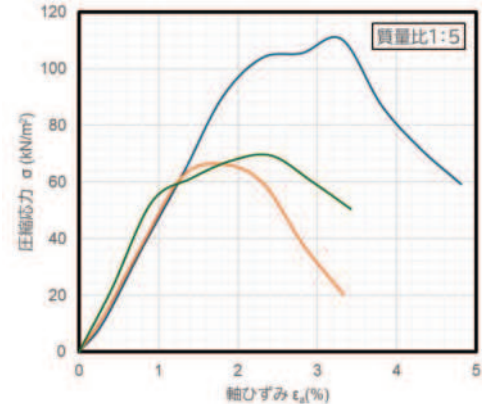


Photo. 3 一軸圧縮試験後の供試体の様子



(a) 質量比 1:2



(b) 質量比 1:5

Fig. 5 一軸圧縮試験結果

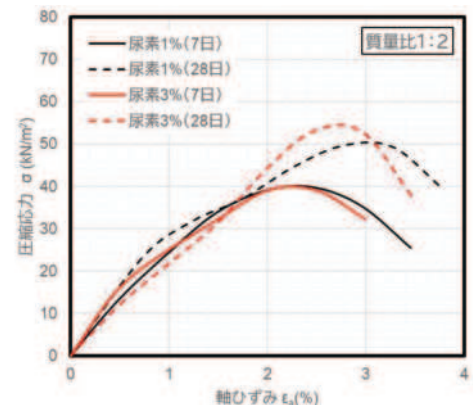


Fig. 6 一軸圧縮試験結果（尿素水添加）

Table.2 埋戻し砂の物理特性

地盤材料		現場発生土
土粒子の密度試験	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.72
	礫分 (%)	21.8
	砂分 (%)	74.4
土の粒度試験	細粒分 (%)	3.8
	D <sub>max</sub> (mm)	9.5
	U <sub>c</sub>	6.88
	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.889
突固めによる土の締固め試験	W <sub>opt</sub> (%)	7.3
	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.458
最小密度	$\rho_{dmin}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.458
最大密度	$\rho_{dmax}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.845

Table.3 埋戻し砂の力学特性

地盤材料		Dr=60%	Dr=80%
液状化強度	R <sub>L</sub>	0.220	0.311
三軸CD	c (kN/m <sup>2</sup> )	1.0	8.0
	$\phi$ (°)	34.4	34.8

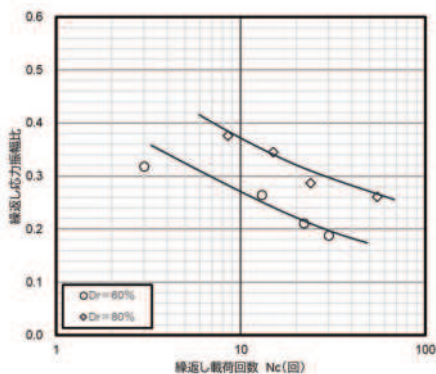


Fig. 7 液状化強度曲線



Fig. 8 実験箇所案内図 (国土地理院 GSI マップに加筆)

## 5. 現場実証実験

現場実証実験は、山本建設敷地内（静岡県三島市南二日町20-2）で実施された。実験箇所案内図と実験現場の様子を図8および写真4にそれぞれ示す。実験現場は駐車場である平坦な敷地であったが、アスファルトにカッターを入れ、バックホウを用い幅1m、長さ6mおよび深さ1mの範囲で開削した。その後、下水道管を模した地下埋設管設置し、室内試験条件に併せたスラグ混合率による改良土で埋め戻し造成した。

### 5.1 実験ケース

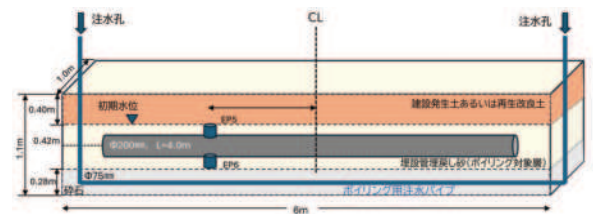
実験ケースと実験概要図を表4および図9にそれぞれ示す。実験ケースは5ケースとしたが、ケース1は、埋設管を敷設後、埋戻し砂のみで施工管理せずに表層まで造成したケース、ケース2はケース1と同様であるが、タンパーにより締固め管理を行ったケースとした。ケース3~5に



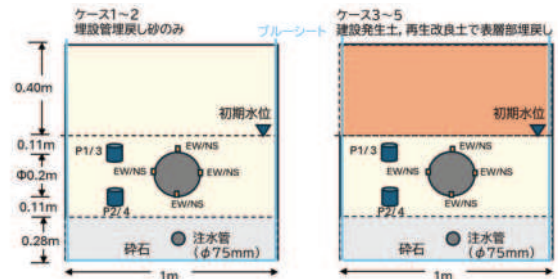
Photo. 4 実験場の様子

Table.4 実験ケース

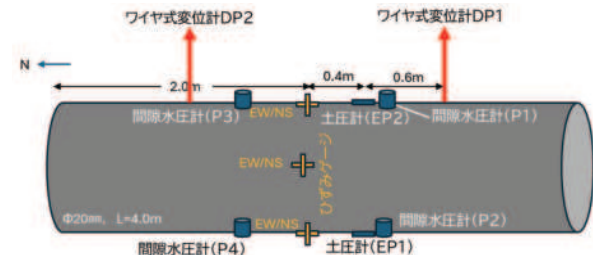
ケース	埋設管埋戻し	埋設管上の埋め戻し
ケース1	転圧無し (Dr=50%相当)	埋設管周の砂, 転圧無し (Dr=50%相当)
ケース2	転圧有り (Dr=80%相当)	埋設管周の砂, 転圧有り (Dr=80%相当)
ケース3	転圧無し (Dr=50%相当)	建設発生土をDc=90%相当で転圧
ケース4	転圧無し (Dr=50%相当)	建設発生土と鉄鋼スラグの体積比3:1の再生改良土をDc=90%相当で転圧
ケース5	転圧無し (Dr=50%相当)	建設発生土と鉄鋼スラグの体積比2:1の再生改良土をDc=90%相当で転圧



(a) 実験概要図



(b) 実験断面図



(c) 埋設管

Fig. 9 実験概要

については、埋設管周辺は埋戻し砂で施工したが、埋設管上部から表層までは、掘削時に発生した土砂を用いて転圧を加え埋め戻した。ケース3は建設発生土のみ、ケース4は建設発生土と鉄鋼スラグの質量比を3:1、およびケース5の質量比を2:1として実験条件を設定した。なお、ケース5に関しては、降雨のため、完結することが出来なかった。

## 5.2 施工工程

埋設管、センサ設置および造成方法について以下に示す。

- (1) **写真 5** に示す様に、バックホウを用い幅 1 m、長さ 6 m および深さ 1 m の範囲で開削した後、実験時の逸水を防止するため、掘削底面および側面に防水用のブルーシートを敷いた。
- (2) **写真 6** に示す様に、土被り 1.0m の位置にフィルタ材 (RC-40) を敷き詰め、液状化させるための給水管を設置した。給水管は埋設管直下に設置したが、地震時に発生する過剰間隙水圧の発生を人工的に再現することを目的とした。給水管には有孔管 ( $\phi 75$  mm) を用い、埋戻し砂を対象に強制的に液状化させるため、地上から給水車と接続して注水することで、ボイリングを発生させつ構造とした。
- (3) 一般的に用いられる下水道用管 (ゴム輪受口片受直管,  $\phi 200$  mm) 内部に水の侵入が無いように管両端に蓋をした。したがって、管内部に水位が無い条件とした。**写真 7** に開削部への設置状況を示す。
- (4) 実験後の管路の変位 (浮上量) を定量的に把握するためのワイヤ式変位のワイヤを、埋戻し砂との摩擦防ぐため、管路中央部に塩化ビニル管用 90°支管を装着し、そこから  $\phi 100$  mm の管を地上部まで垂直に立ち上げた。(写真 8)
- (5) 埋戻し工程では、下層から順にフィルタ材、埋設管周囲に埋め戻し砂、およびその上位には、ケースによって異なるが、表 4 に示したケースごとに造成が行われた。特に、再生改良土を用いた埋設管上部の埋戻しについては、施工現場内において、建設発生土と鉄鋼スラグをバックホウにより攪拌し、同時に効果促進剤として、尿素水を散水しながら混合する作業を行った。(写真 9)
- (6) 埋設管上の埋戻しを行い、写真 10 に示す様に、プレートコンパクター締固めを行い、締固め度  $D_c > 90\%$  となるように施工管理した。施工後、実験実施まで約一か月養生した。

## 5.3 実験および計測方法

実験は、埋設管埋戻し部をボイリングさせるため、散水車から給水管に直接送水することで、過剰間隙水圧を発生させる方法で行われた。この際、埋設管本体の変形と浮き上がり量を定量的に把握するため、各種センサやひずみゲージを埋設管や周辺の埋戻し部に設置した。埋設管には変位計、土圧計、ケース 1 に限り埋設管周面に間隙水圧計を設置した。浮き上がり挙動については、2か所の垂直管を通じ、ワイヤ式変位計を用い、浮上量を直接計測した。また、液状化時における埋設管浮き上がり時の変形を把握するため、ひずみゲージを管の円周方向に対して、管軸方向



Photo. 5 掘削後



Photo. 6 フィルタ材敷設後



Photo. 7 掘埋設管設置状況



Photo. 8 掘削後

(NS 方向) と管軸直交方向 (EW 方向) に設置した。埋設管埋戻し部には、注水時のボイリングの状況を把握するため間隙水圧計を設置した。詳細な設置箇所は図 9 に示されている。



Photo. 9 建設発生土と鉄鋼スラグ混合の様子



Photo. 10 建設発生土と鉄鋼スラグ混合の様子

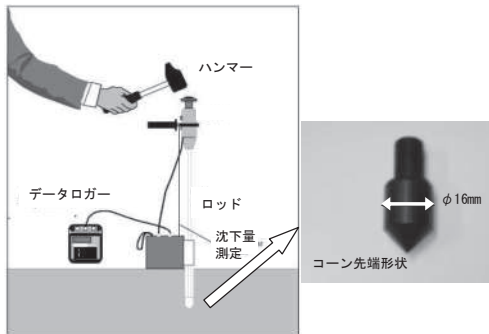


Fig. 10 軽量簡易動的コーン貫入試験



Photo. 11 軽量簡易動的コーン貫入試験の様子

実験前には、埋戻し砂と建設発生土の境界である GL.-0.4 m の深度まで、ゆっくりと給水・飽和させ、初期条件とした。実験に際しては、振動台の様に動的な実験条件ではないため、すべてのセンサを 1 Hz のサンプリングレートで計測開始し注水を開始した。過剰間隙水圧上昇と

液状化の確認を経て、埋設管の挙動を確認した後、注水を止めた。そして、過剰間隙水圧の消散を確認した後、計測をストップした。

#### 5.4 液状化前後の地盤調査

今回の実験では、液状化前後において、**図10**に示す軽量簡易動的コーン貫入試験<sup>12)</sup>が用いられた。**写真11**に試験の様子を示す。本試験から得られるコーン先端抵抗 $q_d$ は、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込み、そのときの1打撃毎に得られることから、空間分解能の高いデータとなる。コーン先端抵抗 $q_d$ は、ハンマーによる打撃でロッドとその先端に接続したコーンを地盤に打ち込み、そのときの1打撃毎に得ることが出来る。また、 $q_d$ は一打撃ごとの打撃エネルギーとその伝達効率および貫入量の関係から、式(1)により求められる。

$$q_d = \frac{1}{A} \frac{\left(\frac{1}{2}MV^2\right)}{\left(1 + \frac{P}{M}\right)x} \quad (1)$$

ここに、 $A$ はコーン断面積( $\text{cm}^2$ )、 $M$ はハンマーの質量( $\text{kg}$ )、 $P$ はアンピルの質量( $\text{kg}$ )、 $V$ は衝撃速度( $\text{cm/s}$ )、 $x$ は1打撃あたりの貫入長さ( $\text{cm}$ )であり、打撃エネルギー( $MV^2/2$ )は、アンピル内部のひずみゲージ式のセンサにより求められる。本調査法の利点として、狭い場所、一人で試験が可能、打撃力が任意であり試験に時間をそれほど要さない、また、試験後直ちにデータのチェックが可能なが挙げられる。試験の実施にあたり、1打撃あたりの貫入量が数 $\text{cm}$ となるように力加減を調節して試験を行った。

## 6. 現場実験結果

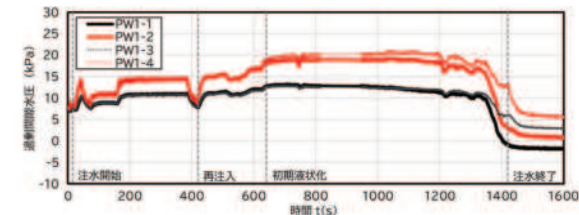
室内試験で得られた質量比をもとに現場で実際に施工、埋戻しを行い、ボーリングにより埋設管の挙動を把握した。ケース1から4までの各実験結果について以下に述べる。

### 6.1 ケース1およびケース2

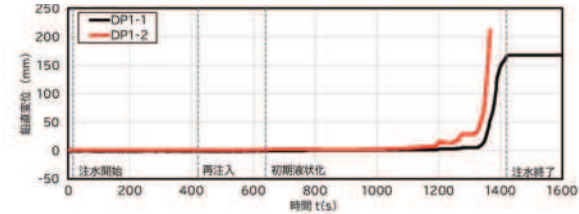
ケース1およびケース2の実験結果を**図11**、**図12**にそれぞれ示す。ケース1では、埋戻し砂のみで施工を行い、締固めなどの施工管理は行っていない、いわゆる緩詰状態である。一方、ケース2は、埋設管埋戻し砂を約30cm撒き出し、プレートコンパクターにより締固め管理を行っている。両ケースともに、注水によるボーリングによって、埋設管は浮上したが、ケース2の様子を**写真12**に示す。

**図11**に示すケース1の計測結果より、注水開始から約600sで過剰間隙水圧が一定となり初期液状化に至っている。1200s過ぎに埋設管の浮上が始まり、1400sで完全に浮上したため、注水を止め過剰間隙水圧が消散した。管周方向(管軸直交方向)のひずみ分布をみると、過剰間隙水圧消散時に水平方向に圧縮される変形状を示し、水平方向の有効拘束圧の回復に伴う変形と考えられる。

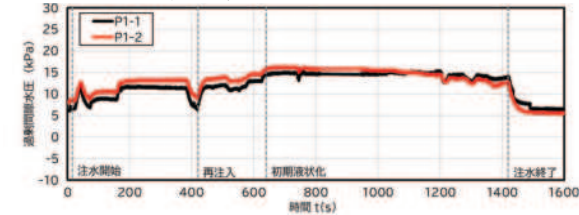
**図12**に示す示すケース2の過剰間隙水圧を見ると、



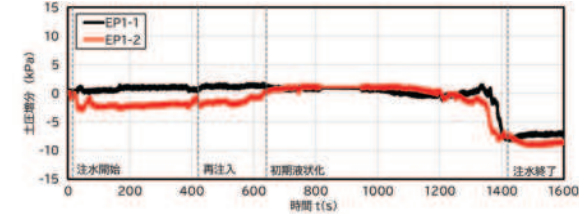
(a) 埋設管周の過剰間隙水圧



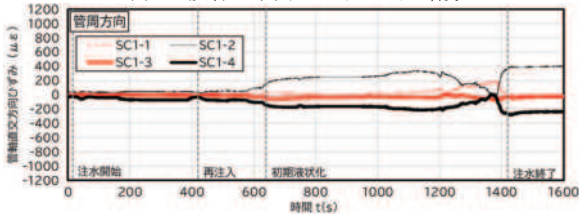
(b) 鉛直変位 (プラスが浮き上がり)



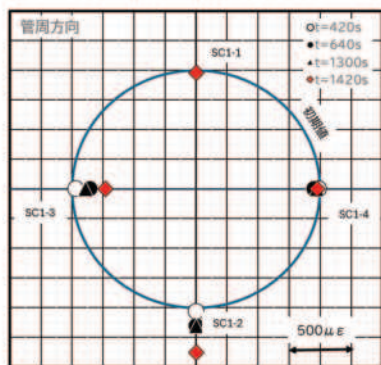
(c) 埋戻し砂の過剰間隙水圧



(d) 埋設管上下面における土圧増分



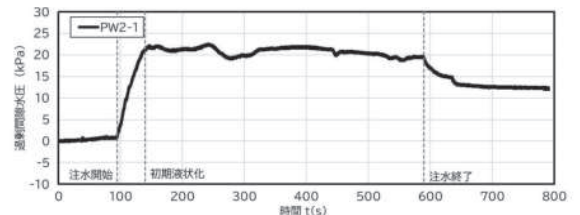
(e) 管周方向のひずみ



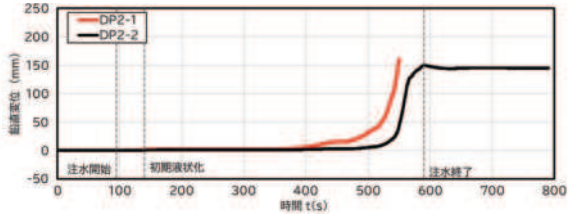
(f) 埋設管方向のひずみ分布  
Fig. 11 実験結果 (ケース 1)

140s から 600s 付近にかけて液状しており、400s 過ぎから管体の浮き上がり挙動が確認できることがわかる。最終的に浮上しきった 600s で注水を停止し、その後過剰間隙水圧消散しているおり、ひずみ分布から求められる最終的な管周の変形傾向はケース 1 と同様であった。

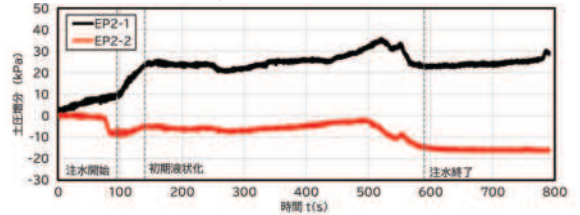
両ケースともに、浮き上がり挙動時に、管周のひずみが一旦 0 に戻る傾向を示すが、液状化した地盤材料中では等



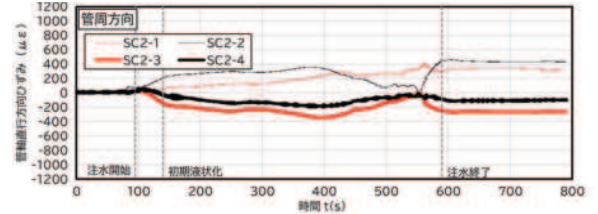
(a) 埋戻し砂の過剰間隙水圧



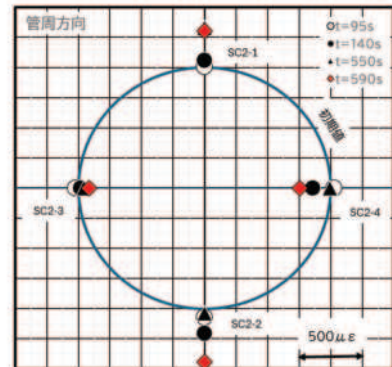
(b) 鉛直変位 (プラスが浮き上がり)



(c) 埋設管上下面における土圧増分



(d) 管周方向のひずみ



(e) 埋設管方向のひずみ分布  
Fig. 12 実験結果 (ケース 2)

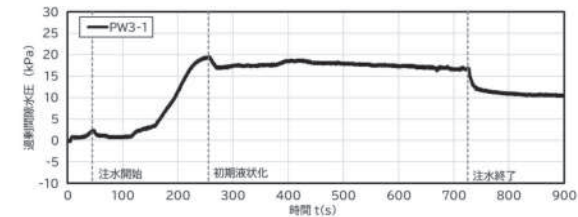


(a) 実験前 (b) 実験後  
Photo. 12 ケース 2 における実験前後の様子

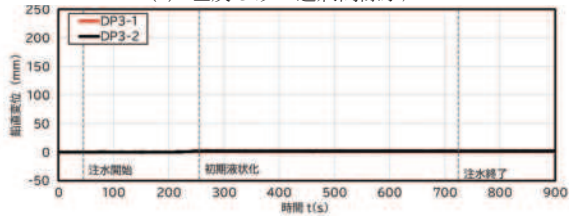
方応力状態になるためであるものと考えられる。

## 6.2 ケース 3 および ケース 4

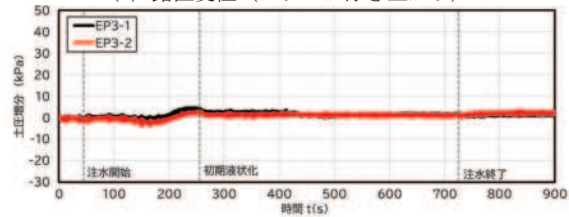
ケース 3 は、埋設管埋戻し砂の上位に、実験サイト掘削



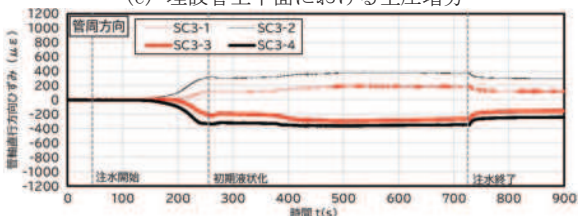
(a) 埋戻し砂の過剰間隙水圧



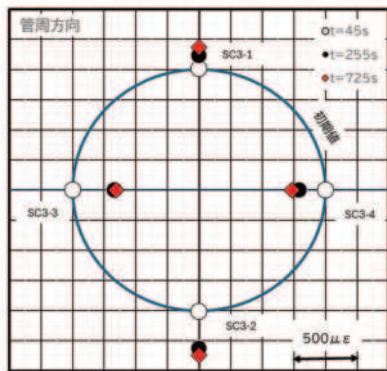
(b) 鉛直変位 (プラスチックが浮き上がり)



(c) 埋設管上下面における土圧増分

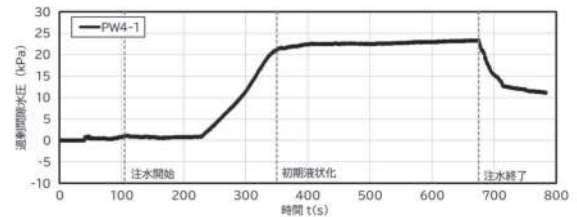


(d) 管周方向のひずみ

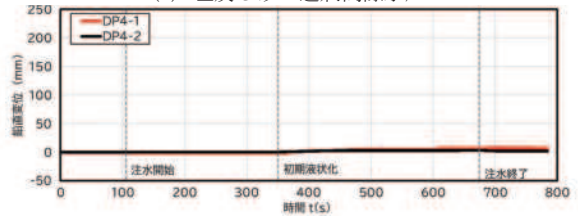


(e) 埋設管方向のひずみ分布

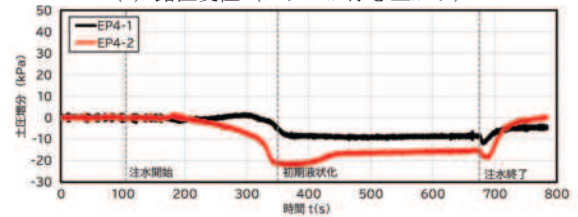
Fig. 13 実験結果 (ケース 3)



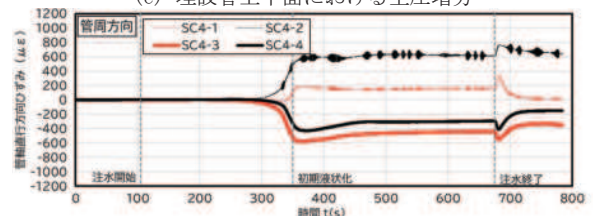
(a) 埋戻し砂の過剰間隙水圧



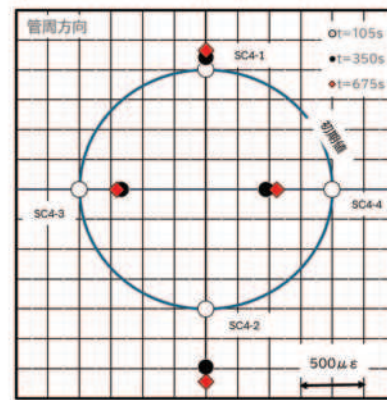
(b) 鉛直変位 (プラスチックが浮き上がり)



(c) 埋設管上下面における土圧増分



(d) 管周方向のひずみ



(e) 埋設管方向のひずみ分布

Fig. 14 実験結果 (ケース 4)

時の建設発生土を転圧した施工を行ったケースである。なお、ローム系の土質であり、建設発生土としての分類は、1種あるいは2種相当と推察された。一方、ケース4は、埋設管埋戻し砂と管の上部に、同じ建設発生土と鉄鋼スラグの質量比を3:1とし、鉄鋼スラグを現場で混合して締固め施工を行った。図13および図14に実験結果を示す。ケース1および2では、液状化の継続によって、埋設管の浮上が確認されたが、両ケースともに、顕著な埋設管の浮き上がりは、確認されなかった。

図13に示す過剰間隙水圧の計測結果より、40sの時刻での注水開始から約200sの時点で初期液状化に至り、液状化状態が維持されている管の埋設管上下に作用する土圧増分や埋設管の浮き上がり挙動は僅かであることがわ

かる。管周方向の断面の変形挙動については、ケース1、ケース2と異なり、液状化中にひずみが元に戻らない特徴を示しており、本ケースの浮き上がり量は僅かであることから、浮き上がり時特有の断面の変形特性であることがわかる。しかし、残留変形については、ケース1および2と同様な傾向を示している。図14に示すケース4の各測定結果も、ケース4とほぼ同様な傾向を示しており、液状化時の管周方向断面の変形はほぼ変わらず、埋設管の浮き上がり量も殆ど確認できないことがわかる。

### 6.3 軽量簡易動的コーン貫入試験結果

実験前後において、軽量簡易動的コーン貫入試験を行った。各ケースの試験結果を図15に示す。ケース1および

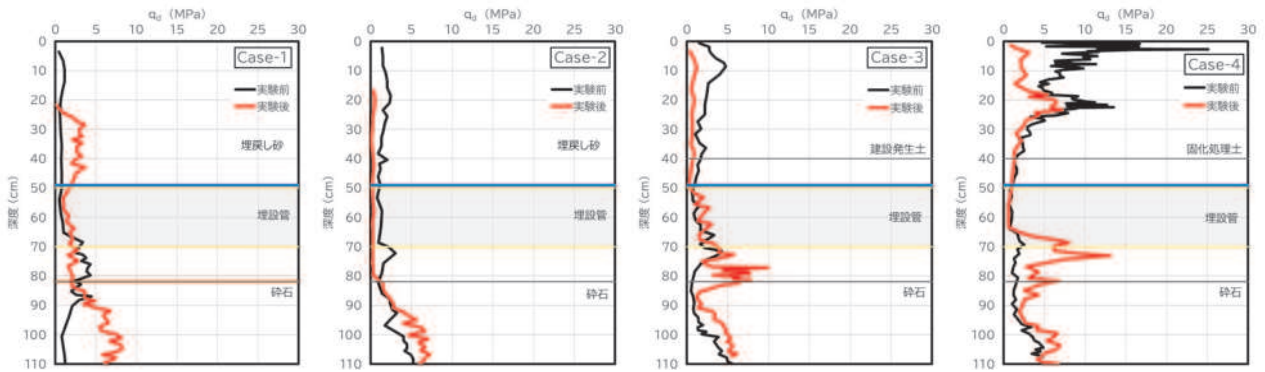


Fig. 15 軽量簡易動的コーン貫入試験結果

ケース 2 における液状化前後のコーン先端抵抗  $q_d$  を比較すると、両ケースともに、埋戻し砂が全体的に液状化していることから、液状化前後の  $q_d$  の深度分布に大きな変化がないことが確認できる。一方、ケース 3 は、液状化させた埋戻し砂の上部は建設発生土のみで施工されており、表層付近の  $q_d$  の分布が、液状化後に低下していることがわかる。これは、下部層の液状化の影響で飽和度が上昇したことなどが要因ではないかと考える。埋戻し砂の上位に鉄鋼スラグを混合した再生改良土を用いたケース 4 についても、ケース 3 と同様な傾向を示している、しかし、ケース 4 は、建設発生土を固化処理することによって、液状化前には、表層部の  $q_d$  が大きく、かつ、液状化後にも残留強度はある程度の期待できることがわかる。

## 7. まとめ

本研究は、建設現場の掘削や造成工事に伴い発生する建設発生土の再利用を目的に、鉄鋼スラグを混合した再生改良土として埋設管の液状化対策としての可能性を現場実験で件祖父仕様としたものである。実験結果から、表層部に建設発生土のみでも、埋設管の液状化時の浮上はある程度抑えられてはいたものの、鉄鋼スラグ混合土を用いた場合には、埋設管の浮上抑制は勿論のこと、軽量簡易動的コーン貫入試験結果から、液状化後の残留強度も期待できる可能性を示した。これは、車両通行性能にもつながるメリットであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 静岡県：建設発生土の処理に関する基本方針 (R5.3), [https://www.pref.shizuoka.jp/\\_res/projects/default\\_project\\_page\\_001/054/611/01\\_kensetsuhasseidokihonhou\\_sinn.pdf.pdf](https://www.pref.shizuoka.jp/_res/projects/default_project_page_001/054/611/01_kensetsuhasseidokihonhou_sinn.pdf.pdf), (閲覧日 2026 年 2 月 1 日)
- 2) 国土交通省：盛土規制法の概要, <https://www.mlit.go.jp/toshi/morido-gaiyou.html>, (閲覧日 2026 年 3 月 20 日)
- 3) 中澤博志, 原忠, 河又洋介：令和 6 年能登半島地震における液状化調査と液状化地盤が津波避難に及ぼす影響, 土木学会論文集 A 81(13), pp.1-9, 2025.
- 4) 安田進, 規矩大義：ライフラインの被害のうち下水道の被害, 2003 年十勝沖地震被害調査報告会, <https://www.jsce.or.jp/report/25/pdf/gesui.pdf>, (閲覧日 2026 年 3 月 20 日)
- 5) 国土交通省：東日本大震災における下水道管路施設液状化対策工法の被害状況と今後の課題, <https://www.mlit.go.jp/common/000193184.pdf>, (閲覧日 2026 年 2 月 2 日)
- 6) 若松加寿江, 吉田望, 規矩大義：2004 年新潟県中越地震による液状化現象と液状化発生地点の地形・地盤特性, 土木学会論文集 C, 62(2), pp.263-276, 2006.
- 7) 庄司学, 宮島晶克, 能島暢呂, 飛田哲男, 小野祐輔, 丸山喜久, 鍛田泰子, 石川敬祐, 朱牟田善治, 奥津大：令和 6 年 (2024 年) 能登半島地震によるライフライン被害, 地盤工学会災害調査論文報告集, Vol.3, No.1, pp.20-40, 2025.
- 8) 仙頭紀明, 齋藤和寿, 平山拓海：液状化した地盤中の埋設管浮上メカニズムに着目した模型振動実験, 土木学会論文集 C (地圏工学), 74(3), pp. 332-341, 2018.
- 9) 国土技術政策総合研究所：下水道管路の更生工法等における耐震化対策検討報告書, <https://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/h23tohoku/houkou2/happyou/06.pdf>, (閲覧日 2026 年 2 月 2 日)
- 10) 国土交通省：発生土利用基準について, <https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/region/recycle/pdf/recyclehou/manual/180810hassei.pdf>, (閲覧日 2026 年 2 月 2 日)
- 11) 原弘行：飽和・不飽和状態で養生した高炉水砕スラグの強度発現特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.17, No.3, pp.277-284, 2022.
- 12) Langston, D.D.: The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction, Ground Engineering September, pp.33-34, 1999.