

下水道管渠の地震時浮上がり及び 埋戻し材料の影響

佐々木哲也¹・松尾 修²・田本修一³

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所耐震研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 工修 国土交通省国土技術政策総合研究所危機管理技術研究センター (〒305-0804 つくば市旭 1)

³国土交通省北海道開発局釧路開発建設部 (〒087-0026 根室市敷島町 1-5)

過去の地震時において、下水道管渠は液状化による浮上がり被害を受けているが、その主たる要因は埋戻し部の液状化であると考えられている。本研究では、埋戻し材として実際の下水道管渠の埋戻し土を用いて管渠を埋設した地盤模型を作成し、動的遠心模型実験により管渠の浮上り量と埋戻し土の液状化強度特性との関係を調べた。その結果、今回の実験では少なくとも締固め度 90%程度に締め固めていれば、埋戻し部が液状化しても周辺地盤の液状化の有無にかかわらず管路模型の浮上りは生じなかった。また、締固め度よりも、液状化強度あるいは液状化試験における応力-ひずみ曲線のループ面積で表される累積損失エネルギーが、浮上がり量との相関が高かった。さらに、液状化強度あるいは累積損失エネルギーがある程度高ければ管渠の浮上りは生じないことがわかった。

Key Words: *liquefaction, uplift, sewer pipes, backfill soil*

1. はじめに

地震の多い我が国において、ライフライン施設の一つである下水道管渠は過去に数々の被害を受けてきた。特に1993年に発生した釧路沖地震において釧路町で生じたマンホールの浮上がり現象は、外部から目に見える被害として最も目立つものであった¹⁾。釧路沖地震等で浮き上がったマンホールを対象に行われた被害調査¹⁾によると、下水道管路の被災の主たる要因は地下水位以下の埋戻し土の液状化であると考えられている。また、これまでに実施されている管路施設の浮上がりに関する模型振動台実験等^{2),3),4),5)}によると、埋戻し部分を十分に締め固めることにより、浮き上がりがある程度防止できることが示されている。そこで、本研究では、液状化による管渠の浮上がり被害を防止するために必要な埋戻し土の締固め程度を明らかにすることを目的として、実際に下水道管渠の埋戻しに用いられる砂質土を用いて下水道管渠の浮上りに関する動的遠心模型実験を行い、管渠の浮上り被害程度と埋戻し材の液状化特性との関係を調べた。

2. 埋戻し土の液状化特性

ここでは、動的遠心模型実験に使用する埋戻し材の液状化特性を把握することを目的に、繰返し非排水三軸試

験を行った。

(1) 試料

使用した埋戻し材は、実際に下水道管渠の埋戻し工事に用いられている砂質土を用いた。図-1及び表-1に試料の粒径加積曲線及び物理特性をそれぞれ示す。

(2) 試験方法

供試体は、締固め試験で得られた最適含水比に試料を調整し、締固め度 $D_r = (\rho_d / \rho_{dmax})$ が所定の値となるよう層厚 20mm 毎に突き固めて作成した。液状化試験の供試体の寸法は直径 50mm、高さ 100mm である。196kPa の背圧を与えて有効拘束圧 29.4kPa で等方圧密を行った。

本研究では、載荷条件として通常の液状化試験と異なり 20 波毎に応力振幅比を段階的に増加させる漸増振幅載荷を行った。漸増振幅載荷試験の載荷条件は、図-2に示すように、初期載荷応力振幅比を 0.05 または 0.1 とし、20 波毎に 0.025 ずつ段階的に増加する 0.1Hz の sin 波とした。なお、途中で圧密排水は行っていない。

各応力比振幅載荷終了時 (20 波載荷後) の両振幅軸ひずみ $\varepsilon_{DA} = 5\%$ となる繰返し応力比を液状化強度 R_{L20} と定義した。なお、別途行った試験⁶⁾により、漸増振幅載荷試験により求まる液状化強度は、通常の液状化試験による液状化強度と比較して、最大でも 10%ほど低くなる程度であることを確認している。

また、せん断応力-せん断ひずみ関係のループ面積を両振幅軸ひずみ 5%まで累積した値を累積損失エネルギー γ_{L20} として、それぞれの実験結果として得られた偏差応力-軸ひずみ関係をせん断応力-せん断ひずみに変換した後、次式により両振幅軸ひずみ 5%を超えた付近までの累積損失エネルギーを計算した。

$$\Delta W = \oint \tau \cdot d\gamma \tag{1}$$

ここに、 W : 累積損失エネルギー (kPa)、 τ : せん断応力 (kPa)、 γ : せん断ひずみ。

なお、風間らの研究^{7,8)}における累積損失エネルギーは定振幅漸増振幅試験結果に対して定義されているが、ここでは、応力制御の漸増振幅振幅試験に対してそのまま適用している。

(3) 試験結果および考察

締固め度と液状化強度 R_{L20} の関係を図-3 に示す。この図よりいずれの試料においても締固め度が高くなるほど液状化強度は高くなっていることがわかる。また、同じ締固め度でも試料により液状化抵抗は大きく異なることがわかる。次に締固め度と累積損失エネルギーの関係を図-4 に示す。いずれの試料においても締固め度が高くなるほど累積損失エネルギーが高くなり、液状化抵抗同様に同じ締固め度でも試料により液状化抵抗は大きく異なることがわかる。

下水管の埋戻し施工管理基準を締固め度で規定する場合、締固め度 $D=90\%$ 以上としている例が多いが、 $D=90\%$ の結果を見ると液状化強度は 0.2 程度のものである。大規模地震時に対する液状化発生の防止の観点からは、この値は十分とはいえない可能性も考えられる。また、累積損失エネルギーは土の粘り強さを表すとされているが、被害の程度との構造物の被害との相関については不明である。したがって、次節では動的遠心模型実験により、埋戻し土の材料特性と浮上がり被害との関係を調べた。

3. 動的遠心模型実験

ここでは、埋戻し土の液状化特性と道管渠の被害程度との相関を調べることを目的に、下水道管渠の浮上がりに関する動的遠心模型実験を行なった。

(1) 実験方法

模型の概要を図-5、実験条件を表-2 に示す。実験は、埋戻し材の違い、埋戻し部の密度の違い、および周辺地盤の液状化の有無に着目して4 ケース実施した。模型は、箱形土槽の中に管渠模型を埋設した幅 12cm、層厚 30 cm の埋戻し部を3 箇所に設けた飽和砂地盤を作成したものである。管渠模型は、見かけの比重が 0.6 となるように調整した塩化ビニール製パイプを用いた。周辺地盤は表

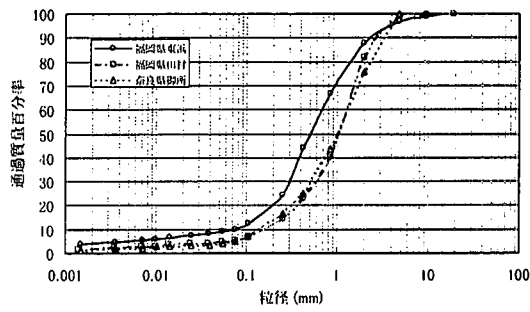


図-1 埋戻し土の粒径加積曲線

表-1 試料の物理特性

土 質 試 料		福岡県東浜	福岡県田村	奈良県御所
物 理 特 性	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.694	2.666	2.710
	含 水 比 w (%)	3.2	-	1.3
	礫 分 含 有 率 (%)	12.3	18.1	24.2
	砂 分 含 有 率 (%)	78.0	76.5	71.0
	シルト分含有率 (%)	4.9	2.7	2.8
	粘土分含有率 (%)	4.8	2.7	2.0
	平均粒径 D_{50} (mm)	0.503	1.05	1.02
	均等係数 U_c	8.6	8.0	9.1
締固め試験	砂の最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.553	1.657	1.746
	砂の最小乾燥密度 ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.215	1.305	1.315
	最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.871	1.708	1.729
	最適含水比 w_{opt} (%)	11.5	15.4	14.5

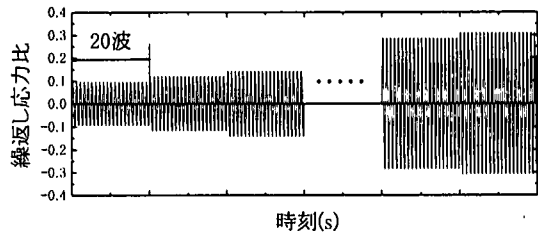


図-2 漸増振幅振幅荷

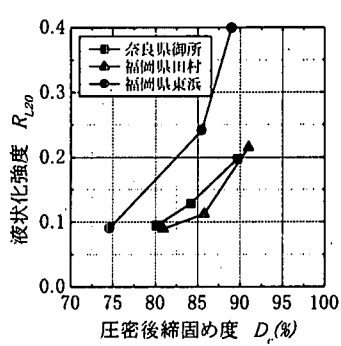


図-3 締固め度と液状化強度の関係

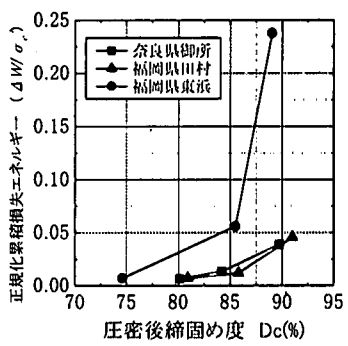


図-4 締固め度と正規化累積損失エネルギーの関係

図-2に示した乾燥密度を目標に山砂 ($D_{50}=0.17\text{mm}$, $U_c=2.0$, $F_c=10\%$) を用いて、突固めにより作成し、埋戻し部は奈良県御所、福岡県東浜および田村から取り寄せた埋戻し土を用いて同じく突固めにより作成した。周辺地盤は case1~3 は液状化しない場合、case4 では周辺地盤も液状化する場合を想定している。実験中、管渠模型及び埋戻し部の変位、管渠模型、埋戻し部及び周辺地盤の加速度、間隙水圧を測定した。実験は10 Gの遠心力場で行い、それにともない間隙流体は水の 10 倍の粘性を持つメチルセルロース水溶液を用いた。入力波として、重力場換

算 1Hz、20 波、300gal および 600gal の正弦波、および最大 1200gal の不規則波を用いて、3 段階のステップ加振を行った。

(3) 実験結果および考察

以後、全て実物スケールに換算して示す。遠心圧密後の締固め度と管路模型の浮上り量の関係を図-6 に示す。周辺地盤が非液状化の場合、300gal 加振では浮上りが生じなかった。また、600gal 加振では締固め度が小さいほど浮上り量は大きくなった。なお、ケース 3 の step1 加振及び全ケースの step2 加振以降において埋戻し部は液状化していた。周辺地盤も液状化するケース 4 では、300gal 加振でも浮上り量が生じた。周辺地盤が液状化しないケース 1, 2 および 3 において、締固め度が同じでも材料が異なると浮上り量は異なった。下水管の埋戻し施工管理基準値を締固め度で規定する場合、締固め度 $D_r \geq 90\%$ 以上としている例が多いが、今回の実験で少なくとも $D_r \geq 90\%$ 程度に締め固めていれば、埋戻し部が液状化しても周辺地盤の液状化の有無にかかわらず管渠模型の浮上りは生じなかった。ただし、本実験の浮上り量は最大値でも 9.5cm で管径の約 2 割程度の浮上り量であり、管渠模型下部の埋戻し層厚が薄いこと、埋戻し部の開削幅が狭いこと等が影響し、今回の実験条件は浮き上がりにくい条件であった可能性もある。

4. 埋戻し材料の液状化特性と管渠の浮上り量の関係

次に埋戻し材の液状化特性と管渠の浮上り量の関係について調べた。ここでは、繰返し非排水三軸試験による繰返し載荷回数 20 回で両振幅軸ひずみ 5% となる繰返し応力比を液状化強度 R_{L20} とし、また、偏差応力軸ひずみ関係のループ面積を両振幅軸ひずみ 5% まで累積した値を累積損失エネルギーとして、これらと浮上り量の関係を調べた。

まず、埋戻し材の液状化強度と浮上り量の関係を図-7

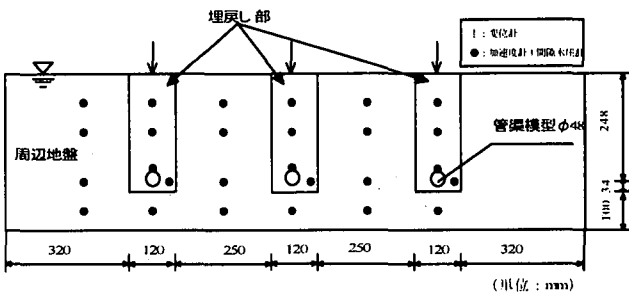


図-5 実験模型

表-2 実験条件

ケース	埋戻し部		周辺地盤		加振条件 (重力場換算)
	材料	目標締固め度 (%)	材料	目標乾燥密度 (g/cm ³)	
1	御所砂	90	江戸崎砂	1.65 (非液状化)	Step1 正弦波 300gal 20波
	東浜砂	90			
	田村砂	90			
2	御所砂	85			Step2 正弦波 600gal 20波
	東浜砂	80			
	田村砂	85			
3	御所砂	75		1.43 (液状化)	Step3 不規則波 最大 1200gal
	東浜砂	75			
	田村砂	75			
4	東浜砂	75			
	東浜砂	82			
	東浜砂	90			

に示す。なお、ここでは周辺地盤が非液状化のケースで step 2 の結果について示している。液状化強度と浮上り量の関係は材料の違いによるばらつきは比較的小さいこと、今回の実験では埋戻し部がたとえ液状化しても液状化強度がある程度高ければ管渠の浮上りは生じないようであること、がわかる。

次に累積損失エネルギーと管路模型の浮上り量の関係を図-8 に示す。累積損失エネルギーが小さくなると浮上り量が大きくなる傾向が見られる。累積損失エネルギーと浮上り量の関係も液状化強度と同様に材料の違いによるばらつきは比較的小さいようである。

地盤を一次元土柱と考え埋戻し部の応答加速度より求めたせん断応力と、埋戻し部の加速度の測定値を積分することにより求めたひずみの関係 (図-9 参照) のループ面積を積分することにより、実験中に埋戻し部で消費した損失エネルギー ΔW を求めた。その際、15~300Hz のバンドパスフィルターによりドリフト成分を除去して

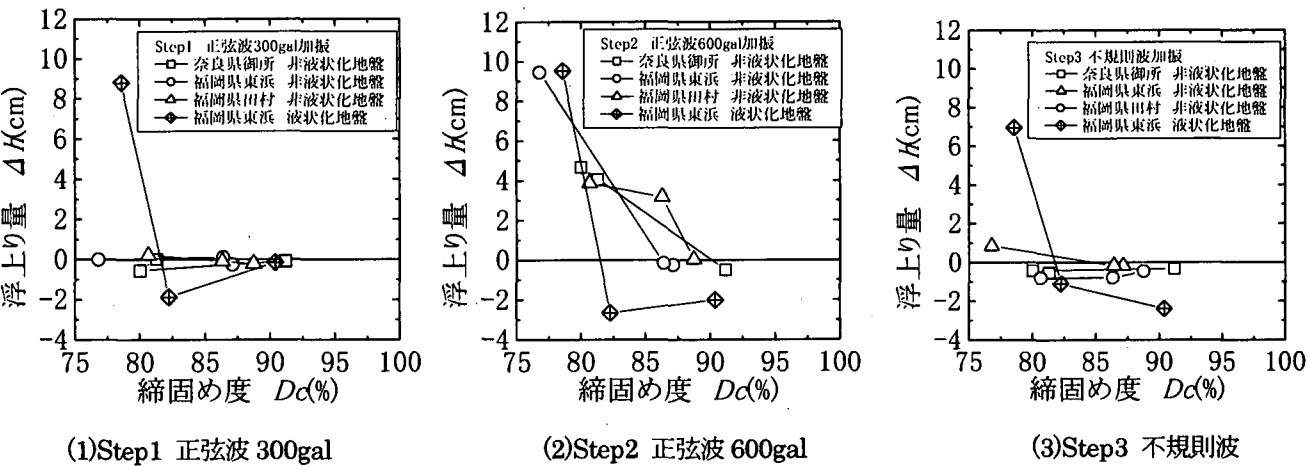


図-6 締固め度と浮上り量の関係

いる。加速度計より求めた損失エネルギー比 $\Delta W/\sigma_{v0}'$ と繰返し三軸試験により $DA=5\%$ までの損失エネルギー $\Delta W_{DA=5\%}/\sigma_{m0}$ の比 $(W_{DA=5\%}/\sigma_{m0})/(\Delta W/\sigma_{v0}')$ と、浮上り量の関係を示したのが、図-10 である。これより、 $(W_{DA=5\%}/\sigma_{m0})/(\Delta W/\sigma_{v0}')$ の値が 0.3 以下になると浮上りが生じ、この値が小さいほど浮上り量が大きくなる傾向が見られる。

5. まとめ

今回の実験では少なくとも締固め度 $D=90\%$ 程度に締め固めておけば、埋戻し部が液状化しても周辺地盤の液状化の有無にかかわらず管路模型の浮上りは生じないこと、液状化強度がある程度高ければ管渠の浮上りは生じないようであること、がわかった。また、下水道管渠の浮上り量との相関は締固め度よりも、液状化強度または累積損失エネルギーが高く、埋戻し部が液状化しても液状化強度、あるいは累積損失エネルギーが大きければ浮上りは生じないことがわかった。

参考文献

- 1) 田中修司, 塩路勝久, 大塚久哲, 二宮嘉郎, 松尾修, 古関潤一: 釧路沖地震により浮上した下水道マンホールの調査, 土木研究所資料第 3275 号, 1994.
- 2) 松尾修, 古関潤一, 佐々木哲也, 近藤浩市, 林裕士: 管路施設の地震時浮上りに関する模型振動実験, 土木研究所資料第 3486 号, 1997.
- 3) 田村敬一, 東拓生, 小林寛: 埋戻し部の締固めに着目した下水道管渠の浮上り特性, 土木学会第 52 回年次学術講演会, pp.314-315, 1997.
- 4) 島村一訓, 濱田政則, 安田進, 小島清嗣, 藤田裕介, 菊池敏男: 実大実験による埋設管路の液状化時の浮上に関する研究, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, pp.1399-1404, 1998.
- 5) 清水恵助, 永瀬英夫, 廣岡明彦, 新井章太, 橋本裕二郎: 締固め工と矢板による締切り工を併用した地中構造物の液状化時浮上り抑制工に関する重力場振動台実験, 第 34 回地盤工学研究発表会, pp.1723-1724, 1999.
- 6) 田本修一, 松尾修, 佐々木哲也: 下水管埋設に用いられる砂質土の液状化特性, 地盤工学研究発表会, pp.773-774, 2000.
- 7) 風間基樹, 柳澤栄司, 増田昌昭: 定ひずみ制御繰返し三軸試験による液状化強度評価の可能性, 土と基礎, Vol.46, No.4, pp.21~24, 1998.
- 8) 風間基樹, 鈴木崇弘, 柳澤栄司: 地盤に入力された累積損失エネルギーの評価法と液状化予測への適用, 土木学会論文集, No.631/III-48, pp.161-177, 1999.

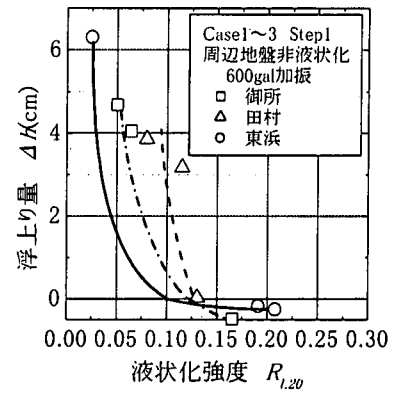


図-7 液状化強度と浮上り量の関係

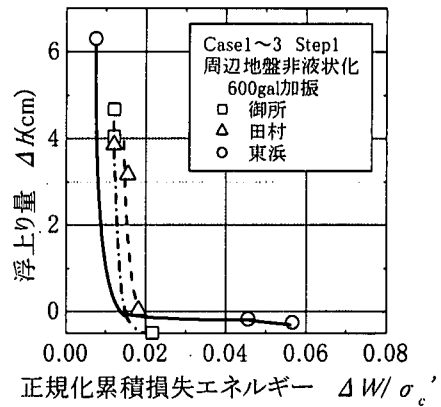
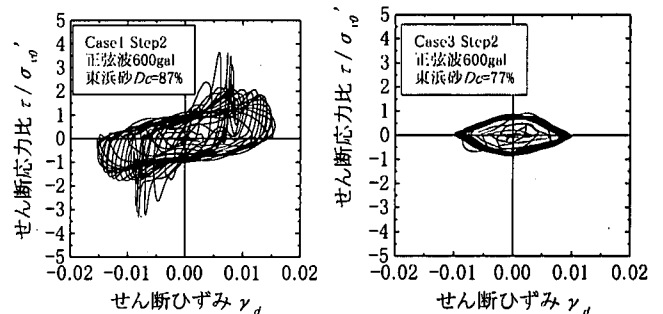


図-8 累積損失エネルギーと浮上り量の関係



(1) 東浜砂 $D_c=87\%$

(2) 東浜砂 $D_c=77\%$

図-9 加速度計から求めた応力ひずみ関係の例

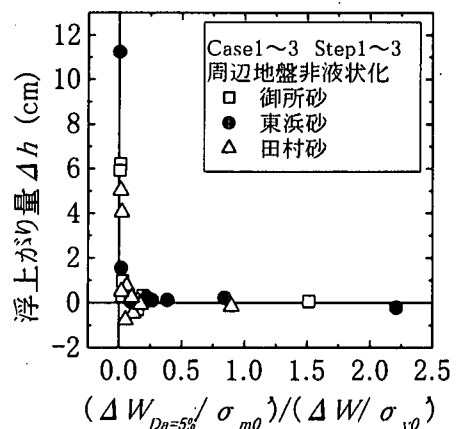


図-10 損失エネルギー比と浮上り量の関係