

## 20. 下水道施設の変形量を考慮した液状化対策工の設計法に関する試験調査

(独)土木研究所 耐震研究グループ(振動) 上席研究員 杉田 秀樹

主任研究員 佐々木哲也

研究員 石原 雅規

### 1. はじめに

平成 15 年 9 月には 2003 年十勝沖地震が、平成 16 年 10 月には 2004 年新潟県中越地震が発生し、下水道管路が多大な被害を受けたため、本年度は下水道管路の被害原因に関する検討および耐震対策工法の効果の確認を行った。

上記地震による管路被害<sup>1), 2), 3)</sup>は、掘削埋戻しを行った範囲の路面の陥没やマンホールの浮き上がり、管路継ぎ手部の折れ曲がりなどが多い。被害箇所の中には、周辺の現地盤において液状化現象が確認できないにもかかわらず、陥没した路面上に噴砂が見られることから、埋戻し土の液状化が被害の直接の原因であると考えられている。このため、被害箇所の埋戻し土の液状化特性などを調べるために現地調査及び採取した埋戻し土の室内土質試験を行った。

また、被害の多く発生した地域では、泥炭地盤や軟弱な粘土層が存在することが多い。例えば、釧路市では、海岸に沿った砂丘上では被害がほとんど見られず、内陸に入った泥炭層が分布する地域において被害が多く発生している。このため、埋戻し土の特性だけでなく、原地盤の特性が被害の発生に大きな影響を及ぼしていると考えられる。そこで、泥炭地盤や軟弱な粘土層の影響について調べるために、動的遠心模型実験を行った。

さらに、砕石による埋戻しと十勝沖地震による被災箇所の多くで採用されたセメント改良土による埋戻しの 2 つの耐震対策工法の効果を動的遠心模型実験により確認した。

### 2. 現地調査及び室内土質試験

#### 2.1 現地調査箇所

現地調査は、下水道管渠が被害を受けた 4 地区 (A~D) において、復旧工事の掘削に合わせて実施した。

A 地区の調査地点周辺は A 地区の中でも最も大きな変状があったところで、マンホールが 1.4m 程度浮き上がり、路面舗装も下水管きょを埋設した側半分が 10cm~40cm 程度沈下した。沈下した路面には、噴砂によるものと思われる細かい砂が堆積していた。B 地区も被害の大きかった地区である。調査地点周辺が浮き上がり量が最も大きく、マンホールが約 1.6m 浮き上った。マンホール埋設位置が路肩脇のため、地表面の沈下は確認できなかった。マンホール付近では、噴砂が確認されている。C 地区は、道路の下の泥炭層は全て山砂に置き換えられており、下水管路は置き換えた山砂の中に設置されている。調査地点周辺では、マンホールが 1.0m 程度浮き上った。調査地点周辺の舗装面は起伏・傾斜していたが、沈下は確認できなかった。造成地と歩道の境目に噴砂によるものと思われる砂が堆積していた。D 地区のマンホールの浮き上り量は、最大でも 0.5m 程度であり、埋戻し部の沈下や舗装面の変状などは確認できなかった。また、管路の変状は、継ぎ手部で折れ曲がるような形で蛇行する程度であり、調査を行った 4 地区では最も軽微な被害であった。

4 地区に共通する特徴としては、地下水位が高い、埋設深度が比較的深い (4~5m 程度)、原地盤に泥炭層が分布することである。

#### 2.2 調査方法

各地区において、埋戻し土を対象として、土研式貫入試験、攪乱試料採取などの現地調査を実施するとともに、採取した試料を室内土質試験を実施した。室内土質試験は、含水比試験、土粒子密度試験、粒度分布試験、締固め試験、液状化強度試験を実施した。

#### 2.3 試験結果

採取した攪乱試料の粒度分布試験結果を図-1 に示す。A 地区の埋戻し土は、礫を多く含む良配合の材料である。その他の地点の埋戻し土にも所々礫が確認できたが、B 地区は細砂を主体とした、D 地区は粗砂~中砂を主体とした

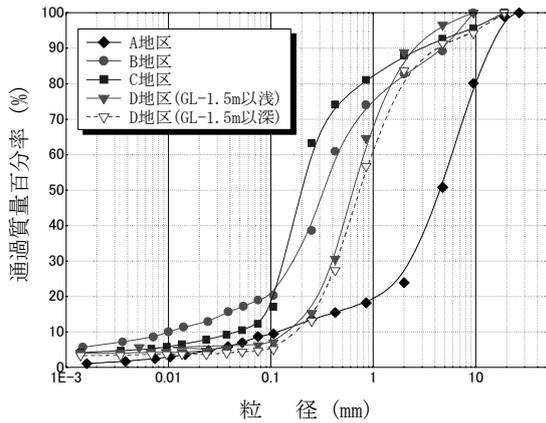


図-1 粒径加積曲線

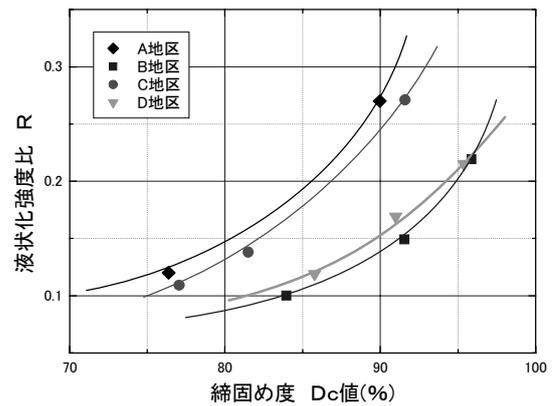


図-2 液状化強度比と締固め度の関係

比較的貧配合の材料である。B地区は、砂を主体としているが、礫分及び細粒分もある程度含む材料である。

A地区の埋戻し土は礫の影響が無視できないため、 $\phi 150\text{mm} \times \text{H}300\text{mm}$ の大型供試体により、液状化強度試験を行った。その他は、礫の影響が少ないと考えられるため、粒径4.7mm以下に調整し、 $\phi 50\text{mm} \times \text{H}100\text{mm}$ の供試体により非排水繰返し三軸試験を行った。供試体の締固め度は、取り除いた礫分の補正を行った値を目標とした。

液状化強度試験の結果を図-2に示す。締固め度とともに液状化強度比が増加し、その傾向は2つに分類できる。より礫分を多く含む緩やかな粒径加積曲線のA、C地区において液状化強度比が高く、貧配合のB、D地区において液状化強度比が低い。

現地調査結果から推定した液状化強度比は、以下のとおりとなった。

マンホールの浮き上がり量が多いA地区とB地区では、液状化強度比は0.15程度と非常に液状化しやすい状態にあったと考えられる。

C地区は、部分的に液状化強度比が0.2を上回る結果が得られた。マンホールは1m程度浮き上がったものの、路面の沈下が明確に見られなかったのは、比較的密度が高いために液状化後の体積圧縮が発生しにくかったためであると考えられる。

また、D地区の埋戻し土は、貫入試験の結果から、地表面付近の約2mが比較的強く、その下から管路までの約2mは弱いことが分かっている。この地表面付近の液状化強度比が0.15程度であると推定される。その下の埋戻し土の液状化強度比はさらに小さいものと推測される。D地区の被害程度が比較的小さかったのは、地表面付近の埋戻し土が相対的に強かったことと、原地盤のN値が他の地区よりも若干高かったためであると思われる。

埋戻し土の液状化強度比は、いずれの地区でも0.15~0.20の範囲に分布しているため、2003年十勝沖地震により十分液状化することが確かめられた。しかし、被害程度と埋戻し土の液状化強度比の間に明確な関係は認められなかった。したがって、今回の現地調査の範囲では、埋戻し土の液状化強度比のみで被害の有無や被害の程度を説明・予測することは難しい。浮き上がり被害は、埋戻し土の液状化強度のほかにも様々な要因が複雑に影響しあっているものと考えられるため、埋戻し土の締固め度のほかにも、埋戻し土の周辺地盤に着目して次節の遠心模型実験を行った。

### 3. 下水道管路の動的遠心模型実験

#### 3.1 実験条件

高さ300mm、幅800mm、奥行き200mmの土槽の中に、図-3に示すような模型を作成した。実験条件は、表-2に示すとおりである。

土槽底面に飽和及び排水のための砕石を敷き、その上に7号珪砂をよく締め固めた支持層を設けた。1つの土槽の中に、埋戻し部を3箇所設け、締固め度を変化させた。周辺地盤に江戸崎砂と合成ゴムを用いた2種類のケースがある。江戸崎砂を用いたCase2~4では、周辺地盤の締固め度をそれぞれ約70%、約80%、約90%と変化させ、埋戻し部と同じく、湿潤状態で締め固めて作成した。合成ゴムを用いたケースでは、底面に飽和・排水用の切り欠きがある直方体の合成ゴムの塊を用意し、土槽底面に固定した。合成ゴムは、泥炭などと同程度の硬さの材料（弾性係数＝

約 1.2MPa) を使用した。下水道管路の模型は、直径 20mm のアクリル製の円筒に、管路の鉛直変位を計測するためのターゲットを取り付けるなどの加工を施したものである。また、土層前面のガラス面の内側には、画像処理のための多数の標点を埋め込み、加振時の周辺地盤のせん断ひずみ振幅を算出した。

模型地盤作成後、真空槽内において、水の粘性の 25 倍に調整したメトロース溶液により底面から時間をかけて飽和した。その後、真空槽から取り出し、地下水位が地表面となるよう水位調整を行った。25G の遠心加速度を作用させた後、加振した。入力波形は、図-4 に示すとおり、最大加速度約 10G (400gal 相当) 25Hz (1 Hz 相当) 20 波の波である。

### 3.2 実験結果

図-5 に対策工を除くケースの浮き上がり量を図示する。周辺地盤を江戸崎砂としたケースでは、Case4 の埋戻し土の締固め度 90%を除き、埋戻し土の密度が高いほど、浮き上がり量が少なくなる傾向にあることがわかる。埋戻し土の密度が高いほど、水圧が一旦上昇しても、正のダイレイタンスが生じ管路の浮き上がりに対して抵抗するためであると考えられる。また、今回の実験条件では周辺地盤の密度が変わっても、浮き上がり量に有意な差は見られなかった。

周辺地盤に合成ゴムを用いた Case8,9 では、埋設深度を浅くしたケースにおいて、浮き上がり量が非常に大きくなった。合成ゴムのように柔らかいものが周辺にある場合に大きな浮き上がり量となることを示している。一方、Case8,9 と同様合成ゴムを用いたが、埋設深度を深くした Case5 では、周辺地盤が江戸崎砂のケースとほぼ同じ比較的小さな浮き上がり量となった。周辺地盤を合成ゴムとした場合に管路の埋設深度によって浮き上がり方が異なるのは、管路と同じ深度の周辺原地盤の振幅が異なるためであると考えられる。合成ゴムの下端を土槽底面に剛結したため、埋設深が浅いほど原地盤の振幅が大きくなる。浮き上がり量と原地盤の振幅の関係を整理するために、Case2 ~6,8,9 の高速度カメラの画像を解析し、管路周辺地盤のせん断ひずみを求めた。その結果得られたものが図-6 である。管路周辺の原地盤の振幅が大きいほど、また、埋め戻し土の締固め度が低いほど浮き上がり量が大きくなる傾向にあることが明らかとなった。

管路の浮き上がる理由として、埋戻し土が液状化し管路に浮力が作用するためという説明が一般的であるが、これだけでは、原地盤の振幅が大きいほど浮き上がり量が大きくなる現象は説明できない。加振中の管路と現地盤の動きを観察すると、加振によって管路と原地盤の間隔が広がったり狭くなったりし、その度に管路は浮き上がっているこ

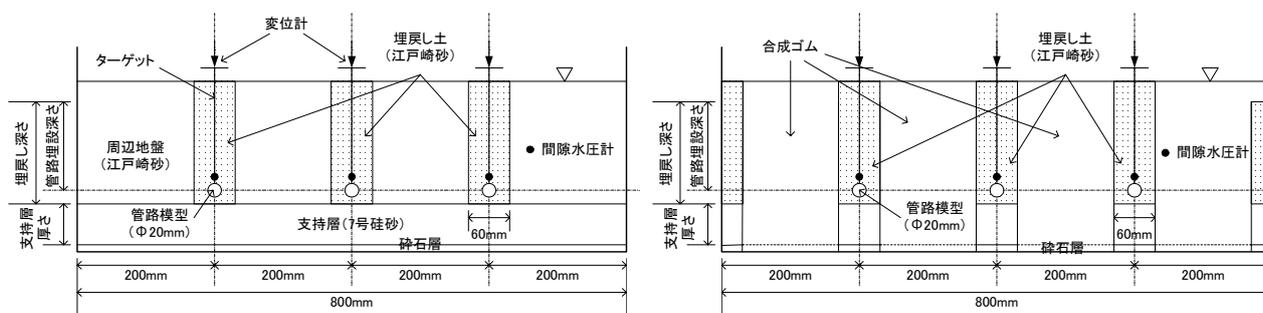


図-3 遠心模型

表-2 動的遠心模型実験条件と浮き上がり量

Case	埋め戻し土				支持層		周辺地盤		浮き上がり量(mm)		
	材料	締固め度	埋戻し深さ	管路埋設深さ	材料	厚さ	材料	締固め度	埋戻し土の締固め度		
		(%)							(mm)	(mm)	(%)
2	江戸崎砂	70, 80, 90	180	160	7号珪砂	60	江戸崎砂	70	14.7	7.12	-2.6
3	江戸崎砂	70, 80, 90	180	160	7号珪砂	60	江戸崎砂	80	19.4	4.6	-1.5
4	江戸崎砂	70, 80, 90	180	160	7号珪砂	60	江戸崎砂	90	17	23	0
5	江戸崎砂	70, 80, 90	180	160	7号珪砂	60	合成ゴム		13.5	4.3	-1.8
6	セメント改良	70, 80, 90	180	160	7号珪砂	60	合成ゴム		6.64	-3.1	-2.09
7	7号珪石	小, 中, 大	180	80	7号珪砂	180	合成ゴム		-5.81	-4.83	-4.39
8	江戸崎砂	70, 80, 90	180	80	7号珪砂	60	合成ゴム		29	22	4
9	江戸崎砂	70, 80, 90	180	80	7号珪砂	180	合成ゴム		33	25	15

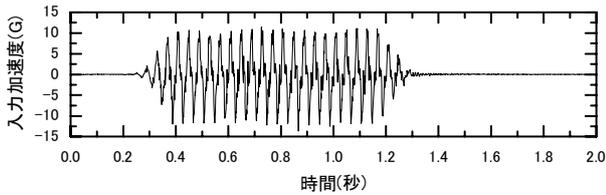


図-4 入力加速度 (全ケース共通)

とがわかる。間隔が狭まる時に、管路と原地盤の間にある埋戻し土は、管路の上下どちらかに移動する必要があるが、管路には浮力が作用しているため、管路の下側に移動する埋戻し土の方が多いためと考えられる。地震動によりこのようなメカニズムで管路の脇の埋戻し土が繰返し管路の下側に回りこむために徐々に浮き上がっていくものと考えられる。このため、周辺の原地盤の振幅が大きいほど、埋戻し土の回り込み量も大きくなると考えられる。一般に、泥炭層や軟弱な粘土層でひずみ振幅が大きくなるため、このような層がある地域で被害が多く発生するものと考えられる。

また、Case6,7により、セメント改良土及び碎石埋戻しの浮き上がり抑制効果を確認した。セメント改良土については、埋め戻す際にある程度締め固めることで大きな効果が発揮されることが分かった。また、碎石については、液状化の可能性がない粒度分布の材料でなくても（多少の細粒分や砂分を含んでいても）ある程度の対策効果が期待できると思われるが、このような材料の評価・選別を如何に行うかという課題が残る。

#### 4. まとめ

地震により下水道管路が被害を受けた地区の現地調査及び室内土質試験より、調査した被災箇所の埋戻し土は液状化強度比が0.2を下回っており、液状化しやすい状態であったことが明らかとなった。しかし、被害程度と埋戻し土の液状化強度比の間に明確な関係は認められなかったため、今回の現地調査の範囲では、埋戻し土の液状化強度比のみで被害発生の有無や被害程度を予測することは難しい。

また、動的遠心模型実験を行い、以下の結論を得た。埋戻し土の密度が低いほど、周辺原地盤が大きく振動するほど管路の浮き上がり量は増加することを明らかにした。また、そのメカニズムについて考察を加えた。

さらに、碎石及びセメント改良土による埋戻しの対策効果を確認した。

謝辞：現地調査は北海道庁及び関係市町等の支援により行うことができたものである。ここに感謝の意を表す。

#### 参考文献：

- 1) 行方、田村、石原：十勝沖地震による下水道施設の被害状況、第41回下水道研究発表会、2004年
- 2) 安田、規矩、田中、石川：2003年十勝沖地震による音別町の下水道被害、第59回土木学会年次学術講演会第III部門、2004年
- 3) 規矩、安田、田中、伊藤：2003年十勝沖地震における豊頃町の下水道被害、第59回土木学会年次学術講演会第III部門、2004年

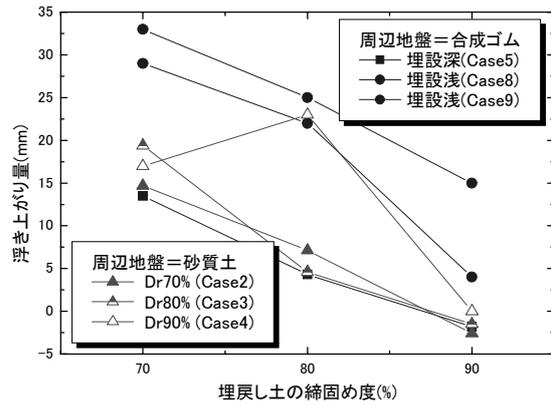


図-5 Case2~5,8,9の浮き上がり量の比較

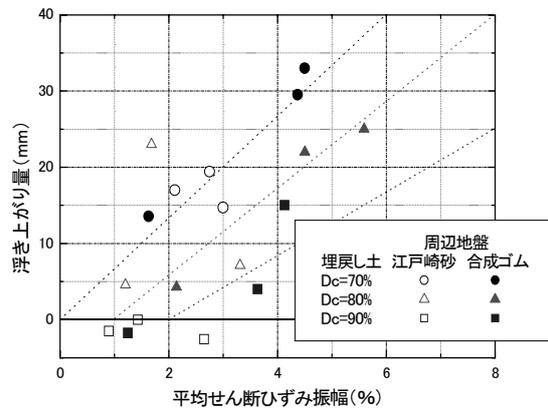


図-6 浮き上がり量と周辺地盤のせん断ひずみ振幅の関係