

◆特集：最近の地震災害と耐震技術◆

下水道管路施設の耐震対策技術

佐々木哲也* 杉田秀樹** 石原雅規***

1. はじめに

2003年十勝沖地震や2004年新潟県中越地震では下水道管路やマンホールの浮上がり、路面沈下等の液状化による被害が多発した。下水道管路施設が上記のような被害を受けた場合、下水道の使用が不可能になるほか、道路交通機能にも支障をきたし、汚水の漏洩による水質の悪化等の二次的な被害が生じる恐れがある。最近の地震による下水道施設の被害をふまえ、下水道施設の「地震対策の現状と既存施設の地震対策への提言」¹⁾がまとめられる等、下水道施設の耐震性の向上が求められてきている。

本報では、2003年十勝沖地震および2004年新潟県中越地震の下水道管路施設の被害を概観し、下水道管路施設の液状化被害の要因、および液状化対策手法に関する研究の現状と今後の課題について報告する

2. 最近の地震における下水道管路施設の被害

2003年十勝沖地震、2004年新潟県中越地震では下水道管路施設に多大な被害が生じた。2003年十勝沖地震では、北海道庁の集計によると12市町で下水道管路施設が被害を受け、被害延長は24kmに達した²⁾。2004年新潟県中越地震では長岡市、小千谷市を始め25市町村（地震発生当時）で下水道管路施設が被害を受け、被害延長は151.9kmにも達した³⁾。いずれの地震においても、被害形態としては管路やマンホールの浮上がり被害が主体であった。写真-1に、2003年十勝沖地震におけるマンホールの浮上がり被害の様子を示す。マンホールは1m程度浮き上がり、路面は下水道布設の際の掘削部分に沿って沈下していることがわかる。これらの被害箇所の周辺では液状化の痕跡は見られなかったことから、被害の要因は管路埋設時の埋戻し土が液状化したためであると考えられる。2003年十勝沖地震や2004年新潟県中越地震

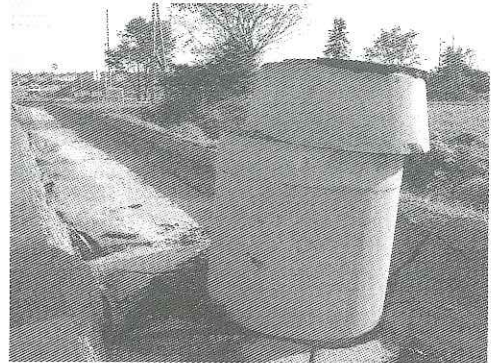


写真-1 液状化によるマンホールの浮上がり被害
(2003年十勝沖地震)

では、液状化が生じる恐れが少ない泥炭や軟弱粘性土の卓越した地盤において、このような埋戻し土の液状化による被害が多数の箇所が発生した。

一般に液状化は埋め立て地や沖積砂質土層が卓越する箇所が生じるが、下水道管渠は開削工法で施工され砂質土で埋め戻されることが多く、このため、地下水位が高い場合には周辺地盤に液状化が生じなくても埋戻し部が液状化することにより下水道管渠が被害を受けることがある。

3. 下水道管路施設液状化被害に及ぼす要因

下水道管路施設は膨大な延長に及ぶことから、被害が予想される箇所を適切に予測し、重要な管路や重大な二次的災害の恐れのある箇所については耐震対策を施す必要がある。そこで、下水道管路施設の液状化被害の発生を予測し、下水道管路施設の耐震性の向上を図るため、十勝沖地震による被害箇所の地盤調査および動的遠心模型実験を行った。

3.1 地質的要因の影響

図-1、2に十勝沖地震および新潟県中越地震における代表的な被害箇所および無被害箇所の地盤柱状図を示す。十勝沖地震の例では、被害箇所の周辺地盤には非常に軟弱な泥炭層がみられるが、無被害箇所の周辺地盤は締まった礫質土になっている。新潟県中越地震の例では、被害箇所の周辺

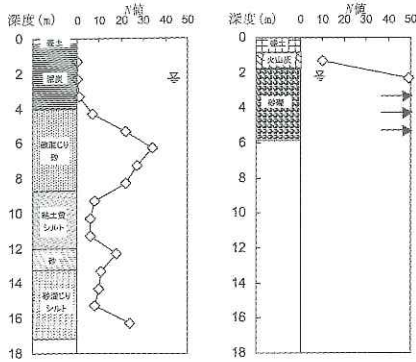


図-1 十勝沖地震における代表的な被害・無被害箇所の地盤柱状図

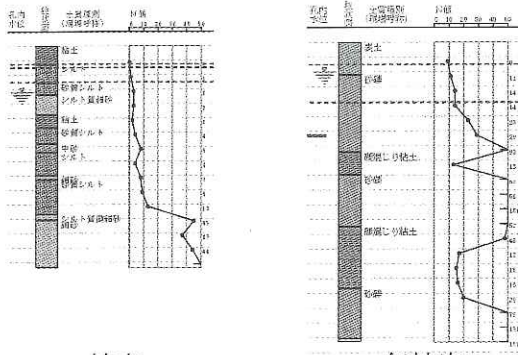


図-2 新潟県中越地震における代表的な被害・無被害箇所の地盤柱状図

地盤では、N値の小さい粘性土～シルト層が10m程度堆積している一方で、無被害箇所の周辺地盤は砂礫層であり、またN値50以上の砂礫層が比較的浅い位置に存在している。

また、十勝沖地震による被害箇所の埋戻し部で行った地盤調査結果によると、埋戻し土の大部分は火山性砂礫で、現場密度試験を行った結果、埋戻し部の締固め度は70%～80%強で非常に緩く、また、地下水位が浅いことから、埋戻し部は飽和しており液状化しやすい状態にあったことがわかっている¹⁾。これらの被害・無被害箇所の地盤柱状図の比較および現地調査結果から、被害箇所は、軟弱層が厚く堆積しており、地下水位が浅く、埋戻し部が緩い状態にあったことがわかった。

以上から、下水道管路液状化被害の原因として、軟弱地盤において地震動が増幅したこと、埋戻し部周辺地盤が泥炭層や軟弱粘性土である場合には、埋戻し部が大きくせん断変形を受け、また発生した過剰間隙水圧が消散しにくいことにより液状化の程度が高まったこと、が考えられる。

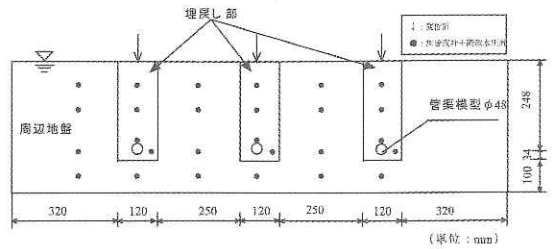


図-3 管渠の浮上りに関する遠心実験模型 (その1)

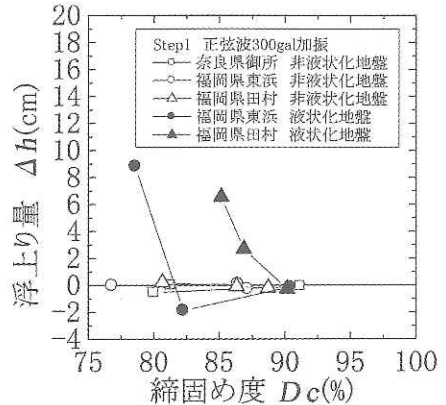


図-4 締固め度と浮上り量の関係

3.2 埋戻し土および周辺地盤の影響

動的遠心模型実験を行い、下水道管路施設の浮上り被害に及ぼす埋戻し部の締固め度の影響と周辺地盤の影響について調べた。

まず、浮上り被害に及ぼす埋戻し部の締固め度と周辺地盤の液状化の有無の影響について検討した実験例⁴⁾を紹介する。

模型の概要を図-3に示す。実験では、埋戻し部の締固め度、周辺地盤の密度を変化させて周辺地盤の液状化・非液状化の違いに着目して行っている。実験模型は、箱形土槽の中に周辺地盤を作成し、その中に、管渠模型を埋設した層厚30cmの埋戻し部を3つ作成したものである。周辺地盤は砂質土を用い、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突固めにより作成した。実験は10Gの遠心力場で行い、入力波として重力場換算1Hz、300gal20波の正弦波を用いた。

結果の例として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-4に示す。周辺地盤が液状化しない場合、300galの正弦波加振では浮上りが生じなかった。周辺地盤も液状化するケースでは、締固め度が87%以下のケースでは浮上りあ

るいは沈下が生じた。下水管の埋戻し施工管理基準を締固め度で規定している機関では締固め度 $D=90\%$ 以上としていることが多いが、今回の実験で少なくとも $D=90\%$ 程度に締め固めていれば、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。

次に、周辺地盤の軟弱層の影響について検討した動的遠心模型実験の例⁵⁾を紹介する。図-5に模型の例を示す。実験模型は周辺地盤と管渠模型を埋設した3つの埋戻し部からなり、周辺地盤として軟弱粘性土地盤（泥炭）を模擬した合成ゴム、あるいは液状化地盤を模擬した飽和砂質土層を用い、埋戻し部は細粒分を10%程度含んだ砂質土を用いて締固め度を3とおりに変化させた。実験は、周辺地盤部が砂質土のケースでは砂質土の相対密度を、合成ゴムのケースでは管路埋設深さおよび合成ゴムの厚さを変化させて、合計6つのモデルについて実施している。

結果の一例として、図-6に管渠の浮上がり量と管渠埋設深さ付近の周辺地盤のせん断ひずみの関係を示す。ここで、周辺地盤のせん断ひずみは、管渠埋設深さ付近の周辺地盤の応答変位が大きくなるほど大きくなる。これより、周辺地盤のせん

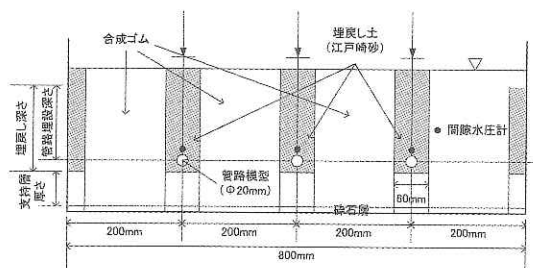


図-5 管渠の浮上りに関する遠心実験模型 (その2)

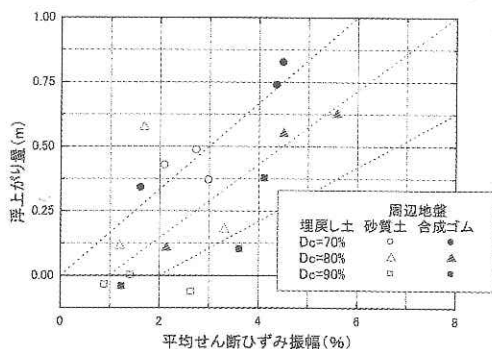


図-6 管渠の浮き上がり量と管渠埋設深さ付近の周辺地盤の平均せん断ひずみ振幅の関係

断ひずみが大きく、すなわち周辺地盤の応答変位が大きいほど、また、埋戻し土の締固め度が小さいほど、浮上がり量が大きくなっており、特に周辺地盤が合成ゴムのケースでは締固め度90%のケースでも浮上がりが生じていることがわかる。これは、泥炭や軟弱粘性土地盤のように周辺地盤が軟弱で地盤の応答が増幅されるような場合には、埋戻し部が周辺地盤により強制的にせん断変形を受けて埋戻し部の液状化の程度が高まることにより、管路の浮上がり変位が増大したものと考えられる。

3.3 下水道管路施設の液状化被害の原因

以上の検討結果から、下水道管路施設の液状化被害の要因として以下のことが考えられる。

- 1) 下水道管路の浮上がり被害の要因は埋戻し土の液状化である。
- 2) 地下水位が高く、埋戻し部が緩い状態にあるほど埋戻し部の液状化が生じやすい。
- 3) 周辺地盤が液状化する場合および周辺地盤が軟弱な場合ほど、浮上がり程度が大きくなる。
- 4) 周辺地盤に粘性土層や泥炭層等の軟弱層があると、地震動が局所的に増幅すること、および周辺に透水性の低い層が存在することにより埋戻し土の液状化の程度が高められること、により被害の程度が大きくなる。

4. 下水道管路施設の液状化対策に関する検討

下水道管路施設の埋戻し土の液状化による被害軽減策として、セメント改良土による埋戻し、砕石による埋戻しの効果について、動的遠心模型実験により検討している。

図-5の模型の埋戻し部をセメント改良土、砕石(7号砕石)埋戻しおよび未改良の砂質土で埋め戻したケースの管路の浮上がり量と埋戻し部の締固め度の関係を図-7に示す。これより、埋戻し部の固化および砕石による埋戻しの効果が確認できる。ただし、締固め度70%と極端に緩い状態で埋め戻したケースではいずれも浮上がりないしは沈下が生じており、セメント改良土および砕石埋戻しについても適切に締固めを行わないと効果が発揮されないことも確認できる。

これらの成果は、2003年十勝沖地震および2004年新潟県中越地震後にまとめられた、「管路施設の本復旧にあたっての技術的緊急提言」、および

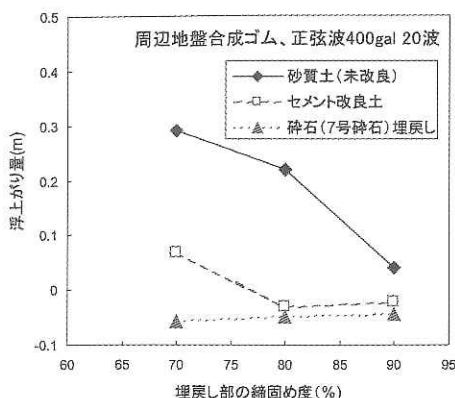


図-7 下水道管の浮上上がりに及ぼす対策工の効果

新潟県中越地震後に出された「新潟県中越地震の総括と地震対策の現状を踏まえた今後の下水道地震対策のあり方」¹⁾に生かされている(表-1参照)。これらの提言では、液状化被害を受けた管路の復旧に際しては、埋戻し土の締固め、砕石による埋戻し、セメント改良土などによる埋戻し部の固化対策を原則として施すものとしている。

5. 下水道管路の液状化対策に関する今後の課題

下水道管路施設は膨大な延長に及ぶことから、既存の下水道管路施設全てについて耐震対策を施すことは現実的ではない。したがって、被害が予想される箇所を適切に予測し、重要な管路や重大な二次的災害の恐れのある箇所については耐震対策を施すとともに、管路施設が被害を受けた場合の備えをしておく必要がある。

これまでの検討から、下水道管路施設の埋戻し部の液状化による被害には周辺の地盤条件が大きく影響していることから、今後は、周辺の地盤条件等から下水道管路の液状化被害が生じる箇所を予測する手法を提案する予定である。

表-1 埋戻し工における施工管理に関する提言内容

	埋戻し材料	施工管理の提案
埋戻し部の締固め	良質な砂	締固め度で90%以上しかし、90%以上でも周辺が軟弱な場合には液状化被害の事例もあったことから、現地の特性をふまえて対策を検討すること
砕石による埋戻し	平均粒径 D_{50} が 10mm 以上かつ 10% 粒径 D_{10} が 1mm 以上の砕石	締固め度 90% 以上
埋戻し部の固化	セメントの添加量は一軸圧縮強度で 100kPa ~ 200kPa	現場強度として 50kPa ~ 100kPa

また、既設の下水道管路施設の液状化対策について、安価で現実的な対策手法を開発する必要がある。さらに、近年では下水道管路布設時に際し、建設発生土のリサイクル材料や汚泥焼却灰等が埋戻し材料として用いられており、これらの材料についての管路の液状化被害防止の観点からの性能についても検討する必要がある。

参考文献

- 1) 下水道地震対策技術検討委員会 (2005) : 新潟県中越地震の総括と地震対策の現状を踏まえた今後の下水道地震対策のあり方。
- 2) 国土技術政策総合研究所、土木研究所他 (2004) : 平成15年(2003年)十勝沖地震被害に係わる現地調査報告書。
- 3) 国土技術政策総合研究所、土木研究所他 (2005) : 平成16年(2004年)新潟県中越地震被害に係わる現地調査概要。
- 4) 佐々木哲也、松尾 修、田本修一 (2001) : 下水道管渠の地震時浮上りに及ぼす埋戻し材料の影響、第26回地震工学研究発表会。
- 5) 石原雅規、杉田秀樹、行方 馨 (2005) : 下水道管路の耐震対策に関する動的遠心模型実験、平成17年度下水道研究発表会。

佐々木哲也*



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム主任研究員
Tetsuya SASAKI

杉田秀樹**



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム上席研究員、工博
Dr. Hiideki SUGITA

石原雅規***



独立行政法人土木研究所耐震研究グループ振動チーム研究員
Masanori ISHIHARA