

## ◆ 下水道特集 ◆

# 下水管路施設の液状化による浮上がり被害とその対策

松尾 修\* 佐々木哲也\*\*

## 1. はじめに

下水管路施設の地震時の被害として、地盤の液状化による浮上がりがある。この現象は、下水管路施設がその構造上、原地盤の土に比べ著しく軽い構造物であり、地震による繰返せん断により周辺地盤に過剰間隙水圧が発生し、構造物に大きな揚圧力が作用することが原因となって生じる。実際、新潟地震、日本海中部地震、釧路沖地震、北海道東方沖地震、三陸はるか沖地震等の過去の地震において、下水管路施設に浮上がりによる被害が報告されている。

本報では、下水管路施設の地震時液状化による浮上がり被害に関して、この数年来実施している被害事例調査および実験的検討から得られた主な知見を紹介し、下水管路施設の浮上がり被害に及ぼす要因とその対策法について報告する。

## 2. 被害事例

下水管路施設は、過去の地震において液状化による被害を受けてきた。ここでは、1993年釧路沖地震の際に浮き上がったマンホールの開削調査結果、および1994年北海道東方沖地震で被害を受けた下水管路施設の被害原因調査の結果を報告する。

### 2.1 1993年釧路沖地震における下水管路施設の被害<sup>1)</sup>

1993年釧路沖地震では、釧路市、釧路町、標茶町、標津町、別海町、本別町において下水管路施設に被害が生じた。釧路市では総延長約947.5kmの内、7.7km(全延長の約0.8%)が、釧路町では総延長の17.5%の11.3kmがそれぞれ被災した。特に釧路町木場1丁目、木場2丁目、桂木1丁目のマンホールが最大1.5mも浮き上がる被害が生じた。

これらの被害メカニズムを解明するため、復旧時にこの浮き上がったマンホール周辺地盤の開削

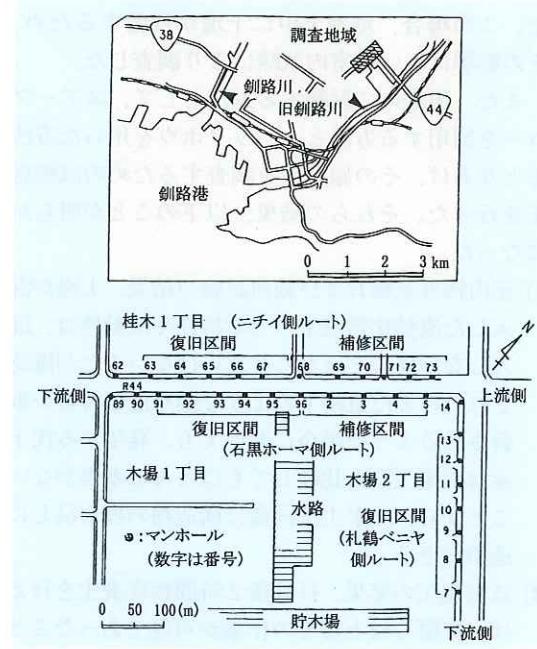


図-1 調査対象位置

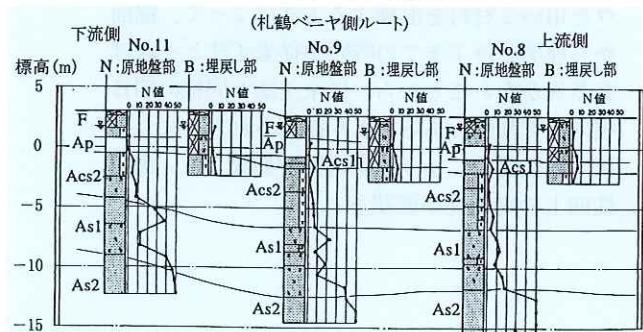


図-2 マンホール周辺地盤断面

調査が行われている。調査対象としたマンホールの位置を図-1に示す。また、地震後に実施したボーリング結果より推定したマンホール周辺の地盤断面の一例を図-2に示す。埋戻し土は、細粒分含有率8%程度、平均N値3程度の砂質土で非常に緩く、地下水位下では激しく液状化したものと推定される。原地盤は盛土層(F)、泥炭層(Ap)および砂質土層(Acs1, Acs2, As1, As2)で構成されている。調査時に測定されたN値等に基づき、水平震度を0.15~0.25まで変化させて算定し

た液状化抵抗率  $FL$  によれば、原地盤部の  $A_{cs1}$ 、 $A_{cs2}$  および  $As_1$  層の液状化抵抗率は概ね 1 以下となり、原地盤部においても部分的に液状化が生じていたものと考えられる。また、原地盤部上方には透水性の低い  $Ap$  層が存在し、この  $Ap$  層により原地盤部の砂層および埋戻し土で発生した過剰間隙水圧の消散が妨げられることから、液状化の程度が高まつたことも推測される。これについては次節の統計分析で詳しく検討する。

開削調査時に測定された管渠の浮上がり状況を図-3 に示す。開削調査の結果、浮上がりが生じたマンホールおよび管渠の直下に空洞は見られず、埋戻し土が回り込んでいる様子が確認された。

これらの結果から、マンホールの浮上がりメカニズムとして、地震動により埋戻し部が激しく液状化し、マンホール底部に、液状化した埋戻し土が回り込む形が想定された(図-4 (1) 参照)。さらに、大きく浮き上がったマンホールの周辺地盤には、マンホール底版高さ付近に、比較的緩いきれいな砂層が 1m 以上の厚さで存在し、周辺地盤の液状化した砂が埋戻し土を絞り込むように変形したと考えられる(図-4 (2) 参照)。これらより、マンホールの浮上がりの主な原因是埋戻し土の液状化であり、さらに周辺原地盤も液状化すると浮上がり量がさらに大きくなるものと考えられる。

## 2.2 1994 年北海道東方沖地震における下水道管路施設の被害<sup>2)</sup>

1994 年北海道東方沖地震では、釧路市、釧路町、標津町、標茶町、阿寒町、中標津町、斜里町、根室市、別海町で下水道管路施設が被害を受け、これらの内、標津町では総延長 18.7km の内約 56% に相当する 10.5km が被災した。標津町における被害形態は、浮上がりによる管渠のたわみが主体であった。被害管渠の埋戻し部の地表面は大きく沈下していたことから、埋戻し部が激しく液状化したものと推測される。ここでは、標津町の被害管渠(100 箇所)と無被害管渠(49 箇所)を対象として、統計分析により被害原因を検討した。

### 2.2.1 調査地点

標津町の平面図および同図中の A-A' 線に沿っ

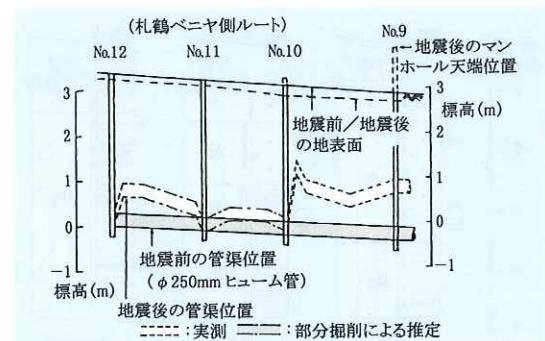
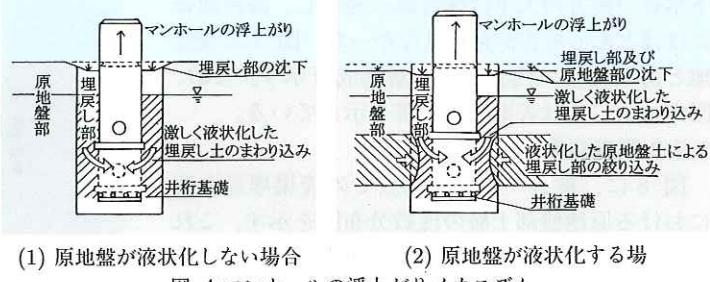


図-3 管渠の浮上がり状況



(1) 原地盤が液状化しない場合

(2) 原地盤が液状化する場

図-4 マンホールの浮上がりメカニズム

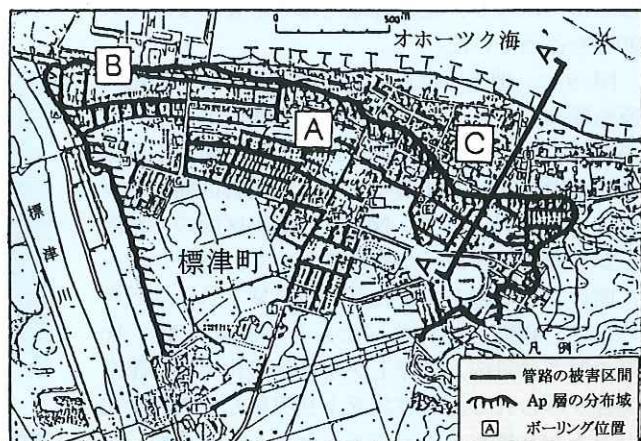


図-5 調査対象位置

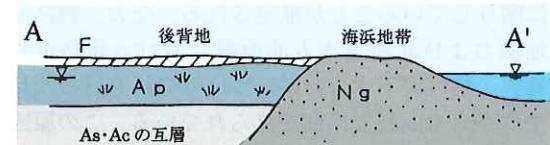


図-6 地質断面図(図-5 の A-A')

た地質断面の模式図を図-5, 6 にそれぞれ示す。標津町の地質は大きく分けて、 $N$  値 0~3 の泥炭層( $Ap$  層)、 $N$  値 10 以下の砂質土層( $As$  層)および $N$  値 3 以下の粘性土( $Ac$  層)からなる後背地と、海浜堆積物であり $N$  値 20~30 で密に締まった礫質土層( $Ng$  層)からなる海浜地帯に分けられる。

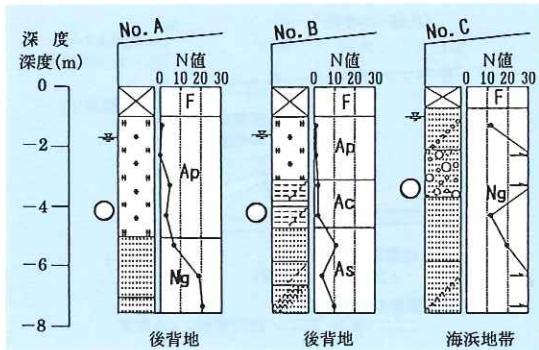


図-7 代表的な土層構成

下水管の被害の大半は後背地に発生し、海浜地帯にはほとんど被害が見られなかった。図-7に後背地と海浜地帯の代表的な土層構成を示す。なお、図中の「○」は管渠埋設位置を示している。

## 2.2.2 調査結果

図-8に、被害・無被害地点での管渠埋設深度における原地盤部土層の度数分布図を示す。これより、被害地点と無被害地点に明瞭な差異がみられ、被害地点はAc, Ap, As層が全体の約80%を占めるのに対し、無被害地点はNg層が全体の約90%を占めていた。

図-9に、地下水位から管渠埋設深度までの飽和原地盤の中から、透水性が著しく低いAp+Ac層の層厚の度数分布図を示した。被害区間の不透水層の平均層厚は1.36mであり、無被害区間のそれは0.48mと薄かった。図-10は被害区間のうち浮上がり量の大きかった路線について、各マンホール間における管渠の最大浮上がり量とAp+Ac層の厚さを縦断方向に並べたものである。Ap+Ac層の厚さに対応して浮上がり量が変化する明瞭な関係がみられる。被害状況より埋戻し土の液状化が浮上がり被害の主因であると考えられるが、原地盤の透水性の低いAp+Ac層の影響が被害程度に関与していることが推定される。なお、釧路沖地震および北海道東方沖地震における釧路市の被害・無被害下水管渠について分析を行った結果<sup>3)</sup>からも同様な傾向が見られている。この原因として、原地盤の不透水層により過剰間隙水圧の消散が妨げられること、ないしは軟弱粘土および泥炭層において地震動が局所的に増幅することにより、埋戻し土の液状化の程度が大きくなつたことが考えられる。後者に関しては、釧路町のマンホールが浮き上がった箇所で常時微動計測が行われており<sup>4),5)</sup>、微動から推定した地盤構造を元に、等価線形解析により被害地点において地震動が

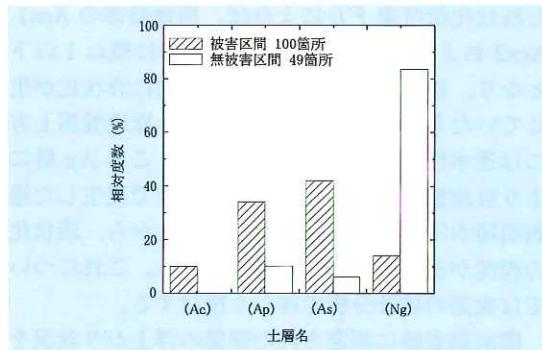


図-8 原地盤部の土層の頻度分布

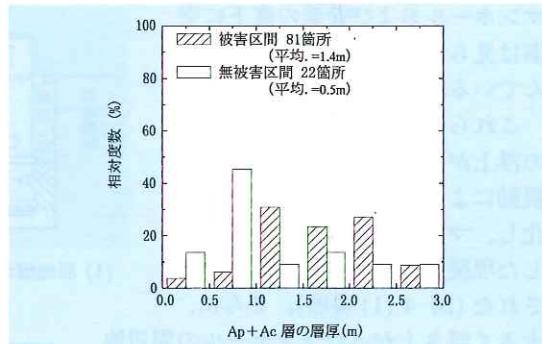


図-9 Ap+Ac 層の層厚 (m)

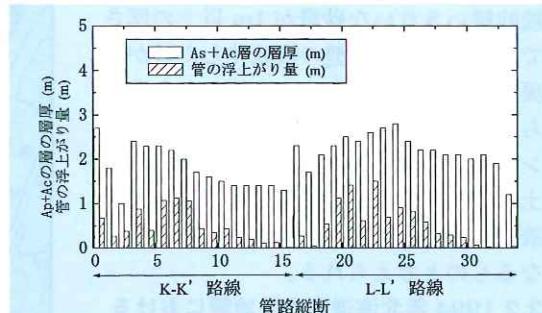


図-10 管渠の最大浮上がり量とAp+Ac層厚  
増幅したとの報告もある<sup>5)</sup>が、今後更に検討を加える必要がある。なお、今回の分析では、周辺地盤の液状化層(As層)厚等と被害の有無について明瞭な関係は、特に見られなかった。

## 3. 下水管路の浮上がりに関する振動台実験<sup>6)</sup>

ここでは、管路施設の浮上がり安定性に及ぼす要因、ならびにその対策工としての碎石による埋戻し、および安定処理土による埋戻しの対策効果について模型振動台実験により検討した。

### 3.1 実験方法

実験条件および代表的な模型断面を表-1、図-11にそれぞれ示す。模型寸法は実物の約1/6相当で

ある。実験は原地盤部の液状化の有無、管径、埋戻し土の密度、埋戻し材の種類、基礎の有無等を変化させて行った。原地盤部は、原地盤部の液状化を想定したケースでは、豊浦砂で相対密度  $Dr = 60\%$ 、液状化しない場合を想定したケースでは、 $Dr = 100\%$ 程度になるように作成したのち、

表-1 実験条件

ケース	管径 (比重)	原地盤 密度	埋戻し部	基礎	加振加速度 振幅		
1	$\phi 60\text{mm}$ (0.75)	60%	緩詰め <sup>1)</sup>	梯子胴木	正弦波 5Hz 20波 103, 124, 144, 163, 186, 207, 259, 307, 398, 505gal		
2			上半分碎石 <sup>2)</sup>				
3			密詰め $Dr = 90\%$				
4	$\phi 114\text{mm}$ (0.65)	59%	緩詰め <sup>1)</sup>				
5			安定処理土 <sup>1)</sup>				
6							
9	$\phi 60\text{mm}$ (0.6)	60%	緩詰め <sup>1)</sup>	なし	正弦波 5Hz 20波(最終ステップのみ 100波) 200, 306, 410gal		
10			上半分砂礫 <sup>4)</sup>	梯子胴木			
11		98%	緩詰め <sup>1)</sup>	なし	梯子胴木		
12			緩詰め <sup>1), 5)</sup>	なし <sup>4)</sup>			
13			上半分碎石 <sup>2)</sup>				
14		61%	全面碎石 <sup>2)</sup>				
15			下半分碎石 <sup>2)</sup>				
16			上半分碎石 <sup>2)</sup>	なし	正弦波 5Hz 20波(最終ステップのみ 100波) 215, 311, 414gal		
17		97%	全面碎石 <sup>2)</sup>				
18			下半分碎石 <sup>2)</sup>				
19							
20							

- 1) 緩詰めのケースでは7号珪砂を空中落下または水中落下で出来るだけ緩く作成した。
- 2) 碎石は7号碎石と6号碎石を4:1で混合したもの用いた。
- 3) 安定処理土は7号珪砂と超微粒子セメントを1:0.03の重量比で配合した埋戻し材を用いた。
- 4) 埋戻しの上半分に礫分40%、砂分56%、細粒分4%の砂礫を用いた。
- 5) 埋戻し部の深さ大(50cm)。

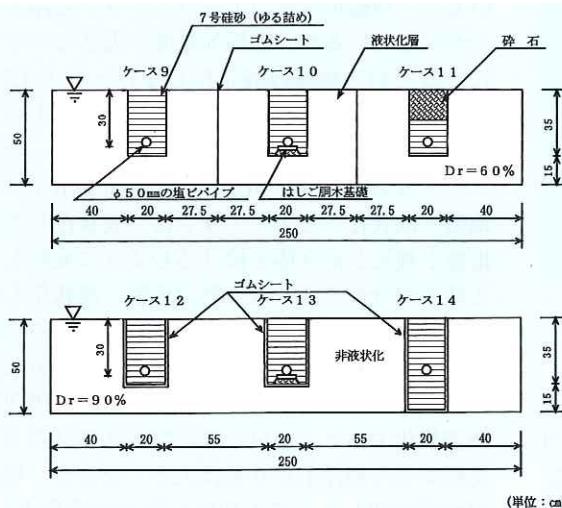


図-11 実験模型断面の例

脱気水で飽和した。埋戻し部は、緩詰めのケースでは7号珪砂を空中落下あるいは水中落下で出来るだけ緩く作成し、密詰めのケース3では $Dr = 90\%$ 程度に締め固めて作成した。碎石埋戻し、安定処理土は、それぞれ7号碎石と6号碎石を4:1で混合したもの、7号珪砂と超微粒子セメント1:0.03の重量比で配合したものを用いた。なお、ケース11の埋戻し部には、三陸はるか沖地震で被災した下水管路<sup>7)</sup>の埋戻しに用いられていた砂礫(礫分40%、砂分56%、細粒分4%)を用いている。加振は5Hzの正弦波20波または100波の入力とし、段階的に加速度振幅を増加させ、ケースにより10段階、5段階または3段階のステップ加振を行った。

### 3.2 実験結果

一例として、ケース1, 3, 4における管渠下端の過剰間隙水圧の最大値と加振加速度の関係を図-12に示す。なお、図中には各ケースの管渠直下から同深度の埋戻し土中の初期有効上載圧の範囲を示してある。また、管渠の累積浮上がり量と加振加速度の関係を図-13(1)~(3)に示す。

図-12より、埋戻し部が緩いケース1, 4では、それぞれ260gal, 160gal程度で過剰間隙水圧が初期有効上載圧に達し、液状化状態となっている。なお、各ケース管渠直下の初期有効上載圧以上に過剰間隙水圧が上昇しているが、これは水圧の伝播により周辺地盤の初期有効上載圧まで上昇しうること、および縮尺模型のため有効上載圧が小さく、特に加振加速度が

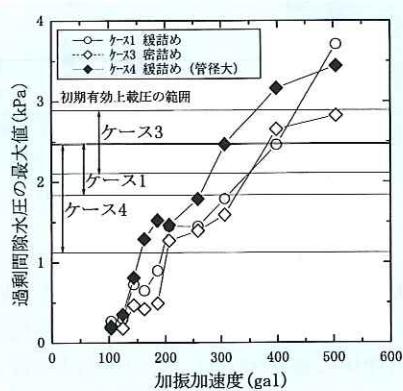


図-12 加振加速度と最大過剰間隙水圧の関係

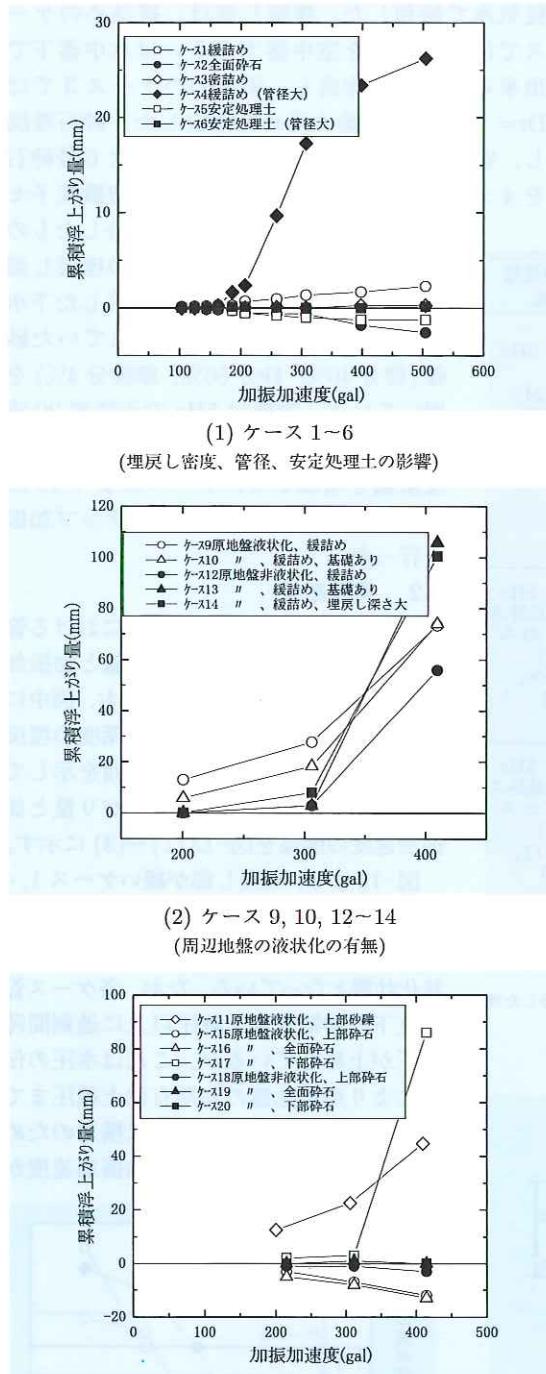


図-13 加振加速度と最大浮上がり量の管径

大きくなると動水圧成分が相対的に大きくなるためである。図-13(1)より、管径の大きいケース4は埋戻し部が液状化した160galで浮上がり始め、全ケース中最も浮上がり量が大きかった。また、管径の小さいケース1では埋戻し部が液状化した

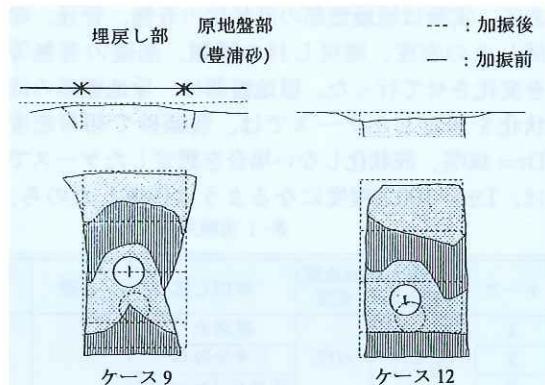


図-14 模型の変形状況

260gal以降で浮き上がった。これより、埋戻し部が液状化すると浮上がりが生じ、また、今回の実験の範囲では、管径が大きく管渠の見かけの密度が小さい方が浮き上がりやすいことがわかる。

埋戻し部が密なケース3では、図-12に示したように400gal加振以降に埋戻し部は液状化しているが、管渠の浮上がりは生じていない(図-13(1)参照)。これは密な地盤では過剰間隙水圧が有効上載圧に達してもその後のひずみは急激に進まず、いわゆる粘りのある挙動を示すため、管渠の浮上がりは抑制されたものと考えられる。したがって、埋戻し部を十分に締め固めておけば、たとえ埋戻し部が液状化しても大規模な浮上がりは防止できると考えられる。

埋戻し部に安定処理土を用いたケース5、ケース6については浮上がりが生じなかった。

周辺地盤の土質の影響等を検討した図-13(2)を見ると、周辺地盤も液状化するケース9、10においては、加振加速度が小さいステップで浮き上がりが生じているが、加振加速度が大きなステップになると周辺地盤は液状化しないケース12~14でも埋戻し部が液状化することにより浮上がりが生じている。図-14に実験終了後にスケッチしたケース9および12の模型の断面図を示す。周辺地盤が液状化したケース9では、液状化した周辺地盤が埋戻し部全体を絞り込むように変形している様子が分かる。一方、周辺地盤が液状化しないケース12では、地盤の変形は埋戻し部のみに限られており、液状化した埋戻し土が管渠下方に回り込んでいる様子がわかる。したがって、周辺地盤が液状化すると、埋戻し部が絞り込まれるように変形するため浮上がり量は大きくなるが、周辺地盤が液状化しなくても埋戻し部が液状化すれば、管渠下方に液状化した埋戻し土が回り込むことに

より、浮上がりは生じてしまうことがわかる。

図-13(2)に示した埋戻し部の深いケース14と埋戻し深さ以外の条件の同じケース9の比較より、埋戻し深さの影響は今回の実験の範囲では見られなかった。

図-13(3)は碎石埋戻しの効果を調べた実験の結果である。埋戻し部の全高あるいは上部のみを碎石で埋め戻したケース15, 16, 18, 19においては、浮上がりは生じなかつた。周辺地盤が液状化するケース15, 16では液状化後の周辺地盤の圧密沈下により沈下が生じた。一方、管渠周辺の埋戻し部下半分のみを碎石で埋め戻したケース17, 20では、管渠は大きく浮き上がる結果となり、対策効果は見られない。これは下半分のみを碎石で埋戻しても過剰間隙水圧の上方への消散が妨げられ、碎石部も液状化してしまうためである。また、砂礫で埋め戻したケース11においては浮上がりが生じている。これは、ケース15~20で用いた碎石は比較的透水性が高いのに対して、ケース11で用いた砂礫は、砂分56%、細粒分4%を含んでおり比較的透水性が低かったために、液状化して浮上がりが生じたと考えられる。したがって、液状化対策として埋戻し材に礫質土を用いる場合は、その透水性についても留意する必要がある。

#### 4. まとめと今後の課題

釧路沖地震により被災したマンホールの開削調査、北海道東方沖地震による標津町における下水管路の被害と地盤条件の統計的検討、および模型実験振動台実験の結果から、下水管路の浮上がりメカニズムおよび対策工の効果に関し、以下のことがいえる。

- (1)管路の浮上がり被害の直接的な要因は埋戻し土の液状化である。
- (2)周辺地盤の液状化が浮上がり被害を大きくしていた可能性がある。
- (3)周辺地盤に粘性土層や泥炭層等の著しく透水性の低い層が存在すると、浮上がり量が大きくなる傾向があった。これらの原因として、不透水層により埋戻し部の液状化程度が増加したこと、および地震動の局部的な増幅が考えられる。
- (4)管径が大きく見かけの比重が小さいケースの方が浮き上がり量は大きかった。
- (5)埋戻し部を密に締め固めたケースでは、埋戻し部が液状化状態になっているにも拘わらず、浮上がりは生じなかつた。密な地盤では液状化

後もひずみが急激に進行することはないことから、埋戻し部を適切に締め固めておけば、ある程度、埋戻し部が液状化しても浮上がり被害を防止できる可能性が示唆される。

(6)埋戻し部全高あるいは上半部を碎石で埋め戻すことは浮き上がり対策として有効である。ただし、透水性の高くなない礫質土を用いたり、埋戻し部下半部のみに碎石を用いると対策効果が発揮されない。

(7)貧配合の安定処理土を埋戻し材に用いることは、浮上がり防止対策として有効である。

今後の課題として、液状化被害防止の観点からの適切な締め固め管理基準を見いだすこと、ならびに碎石埋戻しおよび安定処理土の適用性について更に詳細な検討を加えること等があげられる。

#### 参考文献

- 1) 田中修司、塩路勝久、大塚久哲、二宮嘉朗、松尾修、古閑潤一：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) 斎藤和夫、佐々木哲也、松尾修、古閑潤一：1994年北海道東方沖地震による標津町下水道管路の被害特性、第33回地盤工学研究発表会、pp.981-982、1998。
- 3) 松尾修、古閑潤一、佐々木哲也、林裕士：1993年釧路沖地震・1994年北海道東方沖地震及び1994年三陸はるか沖地震による下水道管路施設の被災調査、土木研究所資料第3498号。
- 4) 松尾修、佐々木哲也、田本修一、松村正裕、阿部秋男：釧路町マンホール被害箇所における常時微動測定、土木学会第54回年次学術講演会、1999。
- 5) 時松孝次、岡口徹：1993年釧路沖地震のマンホール被害分布に与えた不整形地盤構造の影響、第34回地盤工学研究発表会、pp.1923-1924、1999。
- 6) 松尾修、古閑潤一、佐々木哲也、近藤浩市、林裕士：管路施設の地震時浮上がりに関する模型振動実験、土木研究所資料第3486号、1997。
- 7) 古閑潤一、松尾修、田中修司：三陸はるか沖地震による十和田市の下水道管渠の浮上がり被害、三陸はるか沖地震シンポジウム論文集、1998。

松尾 修\*



佐々木哲也\*\*



建設省土木研究所  
耐震技術研究センター  
動土質研究室長  
Osamu MATSUO

同 動土質研究室研究員  
Tetsuya SASAKI