

液状化に起因する上下水道管路の被害特性など に関する調査 (その2 上水道)

宮本 勝利¹・佐藤 清²・小西 康彦³・飛田 哲男⁴・鋤田 泰子⁵
砂坂 善雄⁶・松橋 学⁷・高橋 達⁸・日置 潤一⁹

¹正会員 株式会社日水コン 水道事業部 (〒564-0063 大阪府吹田市江坂町1-23-101)
E-mail:miyamoto_k@nissuicon.co.jp

²正会員 株式会社大林組 生産技術本部設計第一部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)
E-mail:sato.kiyo@obayashi.co.jp

³正会員 株式会社日水コン 下水道事業部 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)
E-mail:konisi_y@nissuicon.co.jp

⁴正会員 京都大学准教授 防災研究所地盤災害研究部門 (〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄E-414D)
E-mail:tobita.tetsuo@kyoto-u.ac.jp

⁵正会員 神戸大学准教授 大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1)
E-mail:kuwata@kobe-u.ac.jp

⁶正会員 鹿島建設株式会社 土木設計本部 (〒107-8502 東京都港区赤坂6-5-30)
E-mail:sunasaka@kajima.com

⁷国土交通省 国土技術政策総合研究所 下水道研究室 (〒305-0804 茨城県つくば市旭1)
E-mail:matsuhashi-m92ta@nilim.go.jp

⁸正会員 茅ヶ崎市 下水道河川建設課 (〒253-8686 茅ヶ崎市茅ヶ崎1-1-1)
E-mail:s-takahashi65d@city.chigasaki.kanagawa.jp

⁹元厚生労働省 健康局水道課 (〒100-8916 東京都千代田区霞ヶ関1-2-2)

東日本大震災では東京湾岸埋立地や利根川下流域を中心に広域的な液状化が発生し、住宅や道路、上下水道施設等に甚大な被害を与えた。筆者らは、浄水場や下水処理場および上下水道管路網の地震被害軽減対策を研究しており、上下水道施設の被害と液状化の関連性や液状化対策に関する知見を得るために、液状化被害が顕著であった浦安市、千葉県、潮来市、鰯川浄水場の他、兵庫県南部地震で被災した尼崎市に対してヒアリング調査を実施した。本報告ではヒアリングの内容をもとに、上水道管路の被害の特徴について整理し、地盤の液状化と被害の関連性や対策について考察した。なお、(その1)では下水道管路の被害について報告している。

Key Words : residential land, countermeasures against liquefaction, earthquake damage, water supply system, sewerage system

1. はじめに

上水道施設および下水道施設は、生活に不可欠のライフラインであり、地震時にも損傷しないこと、あるいは損傷しても早期に復旧できることが必要である。しかしながら過去の大地震において、これら施設は大きな被害を受けることが多く、被災住民への飲料水の供給を断ち、また、清潔な生活環境を奪うなどの直接的なダメー

ジを与えてきた¹⁾。

こうした状況のもと、各自治体では、上水道管路については強度や靱性に富んだダクタイル鑄鉄管への布設替えや、離脱防止機能を有する耐震継手の採用などを行い、下水道管路についてはマンホールの浮上り防止や、マンホールと管路の継手部を可とう化するなどの方法により、耐震性の向上を図っている。しかしながらこれらの対策では、浄水場や下水処理場と各家庭をつなぐ巨大な水循

環ネットワークの耐震化には莫大な費用と時間を要することから、早期に耐震化を達成するためにも、さらに合理的、効率的な対策を検討する余地がある。

一方、東日本大震災では東京湾岸埋立地や利根川下流域を中心に広域的な液状化が発生し、上下水道管路の被害を甚大化させた。各種設計指針²⁾では浮上りの照査等は示されているものの、管路の被害パターンを十分に網羅できているとは言えず、被害実態と合致した設計実務がなされているとは必ずしも言い難い。

筆者らは液状化による管路の被害に着目し、東日本大震災で液状化被害を受けた自治体にヒアリングを実施した。本報では上水道管路を対象を絞り、ヒアリングの結果から被害実態と液状化との関連性をまとめ、さらには今後の設計実務での留意点や、効果的な対策工法（案）について考察した。

2. 上下水道管路の現状

(1) 現状の上水道管路の耐震化評価方法

上水道管路における現状の耐震設計は、厚生労働省が作成した「耐震適合性基準」⁴⁾をもとに全国画一的に管種や継手毎の耐震適合性を評価している。これは、過去の地震における管路被害実績データ等を踏まえ、レベル1地震動、レベル2地震動に対して管種・継手毎に耐震性を評価したものである。設計対象管路毎に固有の地盤条件や地震動条件などを用いて、設計指針²⁾に記述されている応答変位法などの耐震計算により、耐震性能を評価することは設計実務においては少ない。なお、この耐震適合性基準は、東日本大震災による被害を踏まえても安全な評価が得られるものであることが確認されたため、震災後に見直しはされていない⁵⁾。

上水道管路は、図-1に示すように水道水の供給区域一面に埋設されている“場外管路”と、浄水場などの場内において施設間を連絡する“場内管路”に大別できる。

これらの特徴に関して以下のような違いがある。

- 管路形態に関しては、場外管路は公道下に単独で埋設され直管部が多いのに対し、場内管路は構造物周囲に布設され曲管部や構造物との接点が多い。
 - 液状化の可能性のある埋戻し範囲に関しては、場外管路は管路周辺部に限られ、管路以深には少ないのに対し、場内管路は近接構造物の施工時掘削・埋戻し範囲内に埋設されるため、管路以深にも多い場合がある。
 - 液状化対策の条件に関しては、場外管路は管路単独あるいは住宅や他ライフライン施設との共同の対策が考えられるのに対し、場内管路は浄水場という限られたエリア内での構造物と併せた対策が適用しやすい。
- これらの特徴の違いに着目し、ここでは主に公道下に

ある場外管路と、浄水場内にある場内管路を区別して被害特性などを考察する。

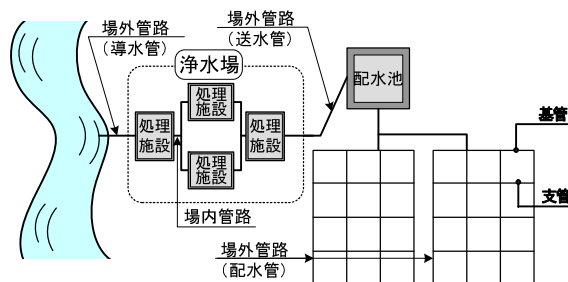


図-1 場内管路と場外管路のイメージ図

(2) 場外管路の耐震化の現状

場外管路において、布設延長の殆どを占める配水管路が耐震管路になっているのは、表-1に示すように未だ約17%と低い。

表-1 全国の配水管路（支管含む）における耐震化状況⁶⁾

管種	非耐震管路					耐震管路				
	ダクタイル 鋳鉄管	硬質塩化 ビニル管	水道配水管 ポリプロ ピレン管	その他	その他	ダクタイル 鋳鉄管	ダクタイル 鋳鉄管	鋼管	硬質塩化 ビニル管	その他
継手 形式	T, A, K形 等	TS, RR等				K形等	NS形等		RR, G	
割合 (%)	3	41	33	2	3	6	8	0.7	0.5	2
	83					17				

非耐震管路の中では、ダクタイル鋳鉄管の延長が最も大きく、今後、継手形式K型、T型、A型の耐震化対策が重要となる。これまで、非耐震管路に対しては耐震管路への全面布設替えが行われることが多く、管体が健全な場合に有効と考える継手だけの対策事例は、現状では実施されることは少ない。

配水管路は水道水の供給エリアに網目状に密に埋設されており、その延長は膨大である。よって、配水管路の耐震化が今後の水道事業全体の運営に与える影響が大きく、早期に耐震化を達成することの難しさが大きな課題となっている。

(3) 場内管路（浄水場）の耐震化の現状

現在、浄水場の耐震化も進められているが、わが国の浄水場の耐震化率は平成23年度の調査によると浄水場施設能力の集計にて約20%である⁹⁾。

厚生労働省の調査⁷⁾⁸⁾では、兵庫県南部地震も含め過去の地震において、周辺斜面の崩壊や津波などの外的な要因があった場合を除き、運転水量を減量した被害事例は多くあるものの、運転停止に至った浄水場は東北地方太平洋沖地震での液状化の影響による3箇所の浄水場のみである。また、これらの浄水場の被害では、構造物被害のあった浄水場もあるが、浄水処理施設を連絡する管路の被害が浄水場の運転停止の主要な要因となっている。

設計実務では、浄水場の連絡管についても、耐震適合性基準を適用することから、構造物だけでなく浄水場内の非耐震管路の耐震化も必要となる。特に、浄水場等で

は構造物の被害に比べ、連絡管路の被害が圧倒的に多いことから、その評価と対策が非常に重要である。

3. ヒアリングによる調査方法

(1) ヒアリング調査の目的

「1. はじめに」で述べたように、東日本大震災では液状化の被害を受けた地域で上下水道管路の被害が顕著になった。そこで、液状化の被害が甚大であった自治体を対象にヒアリングを行い、上下水道管路の被害実態と液状化の状況について調査した。液状化によって個人住宅が被災した自治体の中には、住宅地を対象とした広域的な液状化対策を検討・実施している自治体もある。広域的な住宅地の液状化対策は、上下水道などの公共施設の液状化対策としても効果的であると考えられるため、ヒアリングではそれらについても調査した。

(2) ヒアリングした自治体および施設

ヒアリングを実施した自治体および施設は、以下のとおりである。

- ①浦安市
- ②千葉県水道局
- ③潮来市（日の出地区）
- ④鰐川浄水場（茨城県企業局鹿行水道事務所）

①浦安市⁹⁾、②千葉県¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾、③潮来市¹³⁾¹⁴⁾については東日本大震災において液状化による甚大な被害が発生し、上下水道管路をはじめ多くの個人住宅も液状化被害を受けた。④鰐川浄水場¹⁵⁾¹⁶⁾¹⁷⁾は東日本大震災における液状化によって、場内管路に大きな被害が発生した。また、鰐川浄水場から神栖市などに上水を供給するための場外管路（送水管路）¹⁵⁾にも被害が生じた。本報は上水道管路を考察の対象としていることから、②千葉県水道局（主に浦安市埋立地区の被害）、③潮来市（日の出地区）、④鰐川浄水場に絞ってヒアリング結果をまとめる。下水道被害に関するヒアリング結果については文献¹⁸⁾を参考にされたい。

4. 上水道管路の被害に関する調査結果など

(1) 鰐川浄水場・場内管路（茨城県企業局）

鰐川浄水場（上水道給水人口：約10万人、給水量：30,000m³/日）は液状化の影響により運用停止し、仮復旧までに1ヶ月程度要したことから、周辺地域の長期的な水道水の断・減水を招く要因となった。

主な被害は、図-2に示すように施設間を連絡する管路

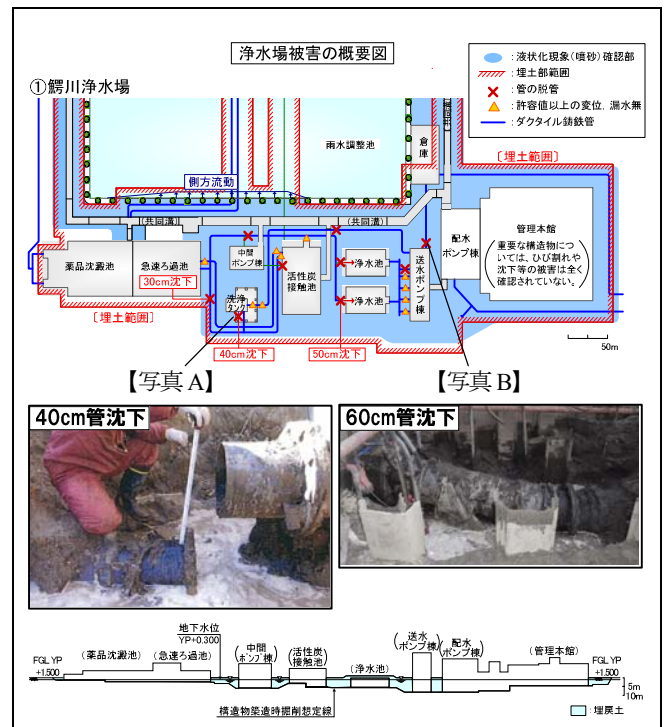


図-2 鰐川浄水場の管路被害の状況

の特に構造物との接続部において生じた。これらの被害は他の浄水場や下水処理場でも多く確認されているが、その被害要因は、構造物構築時の埋土材料の液状化と、場内にある雨水調整池護岸崩壊による側方流動と考えられている。管理棟やポンプ棟などの建築構造物や池状構造物においては、ひび割れや構造全体の変位（浮上、沈下など）などの被害は全く確認されていない。なお、構造物周辺の埋土材料の液状化は茨城県その他施設でも確認されている¹⁵⁾。

鰐川浄水場が長期的な運転停止となった主な要因は、以下の通りである。

- 構造物取り合い部の管路の継手や伸縮可とう管の抜けによる漏水、および噴砂侵入が多発した。
- 膨大な量の噴砂・噴水がにより地上からの被害箇所特定が困難だったため、全路線開削工事により確認せざるを得なかった。
- 掘削深さが大きく、大規模な土留工事を必要とした。
- 被害管路を介して噴砂が池状構造物内に侵入した。

図-2に示す管路被害は継手部の損傷であり、管体破損被害は確認されていない。被害のあった継手の種類はダクタイル鋳鉄管のメカニカル継手（K型、A型など）やフランジ継手形式の管路であり、耐震性適合基準では、いずれも非耐震管路に評価されている。

また、被害のあった伸縮可とう管は構造物と管路の相対変位に追随することを目的に設置されているが、許容伸縮量を大きく上回る沈下量が生じたことにより脱管したと考えられる。

応急復旧では被害が甚大であった既設管路は使用せず、仮設管路を地上に布設した。本復旧では全主要管路の耐震管路への布設替えを行い、管周辺には碎石による埋戻しを行うとともに、構造物との接続部には許容変位量が大きく脱管しにくい伸縮可とう管を設置した。

(2) 鰐川浄水場周辺・場外管路（茨城県企業局・導送水管路）

鰐川浄水場を運営する鹿行広域用水供給事業の場外管路の被害は、全体で15箇所確認されているが、全てダクタイル鋳鉄管路K型φ400mm、600mmの継手の漏水被害であり、管体被害は確認されていない。

この15箇所の被害の内、特に被害が集中した、鰐川浄水場と同時期に干拓された地盤地域における被害状況を図-3に示す。これらの被害6箇所は全て液状化によるものと考えられており、この内3箇所は構造物との接続部での埋土材料の液状化による沈下や、水管橋橋台周りの局所的な側方流動等が要因と考えられる。残り3箇所は宅地造成地の液状化による直線管路部の被害である。これら場外管路の被害は、前項の鰐川浄水場の被害と比べ被害件数（率）が少なく、被害が生じた箇所の特定が比較的容易だったこともあり、復旧は数日で完了している。

また、復旧に際しては他浄水場（鹿島浄水場）からの水道水の供給により復旧用水（管路の洗浄、漏水位置の確認、水圧の検査など）の確保が可能であったことが有効に機能し、複数系統による供給システム構築の重要性が改めて認識できた。

復旧方法として、水管橋は被害が甚大であったため地上部に仮設管路を布設し、直線管路部においては、比較的被害が軽度であったため被害のあった継手部の補修を行い本復旧としている。



図-3 鹿行広域用水供給事業の場外管路の被害状況¹⁹⁾

(3) 浦安地区・場外管路（千葉県水道局、配水管路）

千葉県水道局は、千葉県下の11市に水道水の供給を行っているが、9市において926件の水道管路の漏水が生じ、その内、83%の766件が東京湾岸埋立地域の液状化によ

るものであった。

図-4に示す浦安地区の漏水は全て埋立地において生じ、千葉県の埋立地での被害の80%（607件）がこの地区に集中している。この地区内では、特に第一期、第二期埋立地である中町および新町に被害が生じ、第一期埋立地の被害が多い。この被害により33000世帯が断水し、応急給水が完了するまでに約20日、応急復旧が完了し水道水の断水が解消されるまでに約1ヶ月を要した。

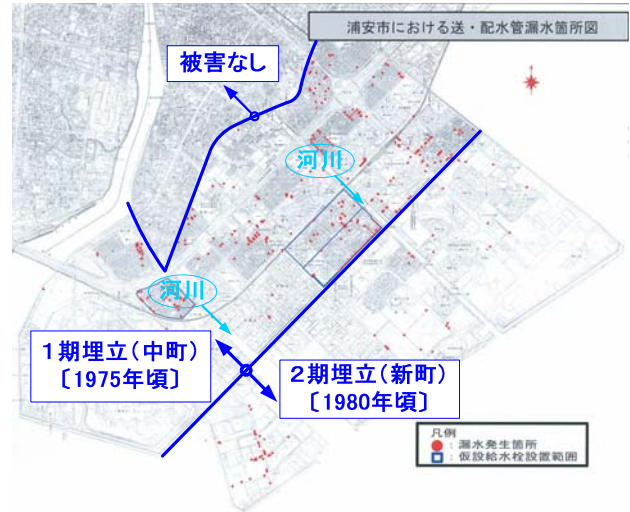


図-4 浦安市埋立地区の管路被害状況⁹⁾

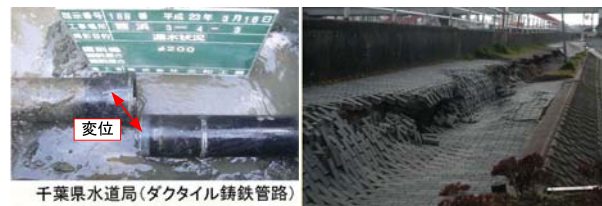


写真-3 管路の被害状況 写真-4 護岸周辺状況

漏水箇所607件の内訳は、口径75mm以上600mm未満の配水管の被害が360件であり（その他は200mm以下の給水管）、その内、管体からの漏水は321件、仕切弁などの附属施設からのからの漏水は38件、水管橋からの漏水は1件である。仕切り弁からの漏水にはフランジ継手からの漏水も含まれる。

配水管の管体から漏水を生じた321件の管種、口径、継ぎ手形式などの内訳を表-2に示す。管体からの漏水の要因は、その多くがダクタイル鋳鉄管路の継手部での“ゆるみ”“脱管”であり、継手形式がT型、A型の被害割合が大きく、K型の割合は小さい。S型やNS型などの耐震管路の被害は生じていない。

表-2 配水管本体からの漏水箇所の詳細(浦安市)

口径	75		100		150		200		
	ダクタイル鋳鉄管 A型	ダクタイル鋳鉄管 T型	ダクタイル鋳鉄管 A型	ダクタイル鋳鉄管 T型	ダクタイル鋳鉄管 A型	ダクタイル鋳鉄管 T型	ダクタイル鋳鉄管 A型	ダクタイル鋳鉄管 T型	ダクタイル鋳鉄管 K型
件数	1	50	37	52	24	60	26	30	1
口径	300		400		500		600		
管種	ダクタイル鋳鉄管		ダクタイル鋳鉄管		ダクタイル鋳鉄管		ダクタイル鋳鉄管		
	A型	K型	A型	K型	A型	K型	A型	T型	K型
件数	28	4	4	4	2	2	1	1	321

ヒアリングによると、これらの被害箇所は直線管路部の継手箇所が多く生じているようであり、被害要因の1つとして、**図-4**に示す埋立地盤の側方流動の影響が考えられている。曲管、異形管部や構造物との接続部などの特殊部の継手箇所は、管内水圧の衝撃圧による継手の抜き出し防止を目的として設置されていた離脱防止金具の効果もあり、顕著な被害はなかった。また、管体の破損被害はほとんどなかった。

応急復旧にあたっては、既設管路の継手部の補修により対応する路線が多かったが、被害が集中した路線では地上部に仮設管路を布設した。これら復旧に際しては、被害件数が膨大なことと液状化による多量の噴砂や噴水が作業の障害となるなどの問題が生じた。

本復旧にあたっては、浦安市の全送配水管路延長300kmのうち被害の集中した路線（約13.5km）について耐震管路への布設替えを実施し、水管橋は補修工事が行われている。

なお、他のライフライン施設の液状化対策も並行して進められており、宅地の液状化対策として格子状地盤改良工法の適用が予定されている。また、車道部や歩道部においても液状化対策として、地表部の地盤改良や碎石置換などが行われている⁹⁾。

千葉県水道局では、管内カメラ調査などにより管路の変状状況を詳しく調査し、液状化地域の地盤変状と管路挙動（漏水被害）の関係分析を行っている²⁰⁾。

(4) 潮来市日の出地区・場外管路（潮来市上下水道課、配水管路）

潮来市では、市内の日の出地区、潮来・辻地区、延方・大洲地区、徳島地区、十番地区、及び小泉地区において液状化被害が見られ、市内全体において9,900世帯で断水が生じ、仮復旧まで約40日を要した。

市全体の上水道配水管被害延長は26kmであり、総延長約300kmに対して約8.7%の被害率である。このうち被害が最も大きかった日の出地区では、**図-5**に示すように、特に液状化現象が顕著であった4～6丁目、8丁目（南側）においてほぼ全延長分の管路の災害復旧工事が必要となった。この地区での被害は、ほとんどが小口径（φ50mm～150mm程度）の塩化ビニル管（RR継手：ゴム輪継手）の継手部の抜け、塩化ビニル管（TS継手：接着継手）の継手部の破損などである。その要因は液状化により塩ビ管が全延長に渡って大きく浮上、水平変位したことが考えられる。

1～3丁目、7丁目、8丁目（北側）では38箇所の塩化ビニル管の継手から漏水が生じ、4～6丁目、8丁目（南側）の被害に比べ軽微である。また、日の出地区にはダクタイル鋳鉄管（K型、φ200mm～400mm）もおおよそ2kmが布設されていたが、直線管路部において3箇所の

継手からの漏水被害が報告されている。応急復旧については、壊滅的な被害のあった4～6丁目、8丁目（南側）ではほぼ全路線において地上部への仮設管路が布設され、被害が比較的少なかった1～3、7丁目、8丁目（北側）では、継手部の補修が行われた。

本復旧は、壊滅的な被害のあった4～6丁目、8丁目（南側）では、口径に応じて耐震型のダクタイル鋳鉄管やポリエチレン管への全面更新が行われている。これらの復旧にあたっては、道路の復旧工事と工事時期などの調整が行われていて、地震後の本格的な復旧が行われていない状態の道路が多く見られた。

なお、この地区では宅地や道路なども含めた広域的な液状化対策として、地下水位低下工法の適用が実施されており、実施にあたっては実証実験などで効果の確認や地盤沈下量などの評価も詳細に行われている。



写真5 潮来市日の出地区の管路被害状況

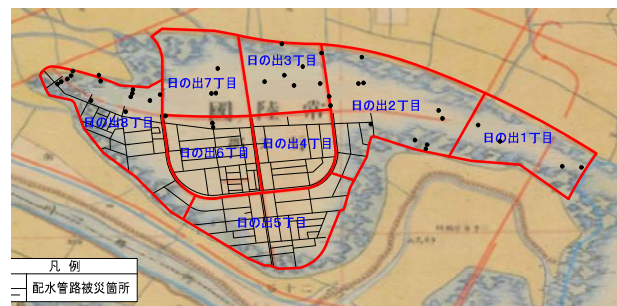


図5 潮来市日の出地区の管路被害状況¹⁹⁾

5. 上水道管路の被害実態と液状化の関連性についての考察

(1) 目的

今回の被害調査結果では、液状化による上水道管路の被害実態が、管路の埋設状況や液状化の状況及びこれらの関連性など、それぞれの条件に応じて異なっていることが分かった。被害状況が異なれば、応急復旧や本復旧の方法、期間も異なるのは当然である。

そこで、管路や液状化の状況などの特徴に応じて液状化に起因する管路の被害パターンを想定し、より合理的な液状化対策を導くことを目的として、ヒアリングや提供資料、及び関連公表資料などから、上水道管路の被害実態と液状化現象との関連性などについて考察した。

(2) 被害実態の整理と液状化の関連性について

a) 鱈川浄水場・場内管路

図-6に示すように、液状化は構造物周辺部の埋戻し層で生じ、それに伴う地盤沈下（最大1m程度）と管路基礎地盤の支持力低下が、管路が大きく沈下（最大80cm）した要因と考えられる。沈下は地下水位と管路の位置に関わらず全ての管路で発生しており、液状化地盤に比べ単位体積重量が軽い管路であっても大きく沈下していることが特徴的である。なお、周辺の田畑（干拓地）では顕著な液状化は確認されておらず、浄水場内の局所的な液状化による被害が、水道システム全体に大きく影響したことは注目すべきである。

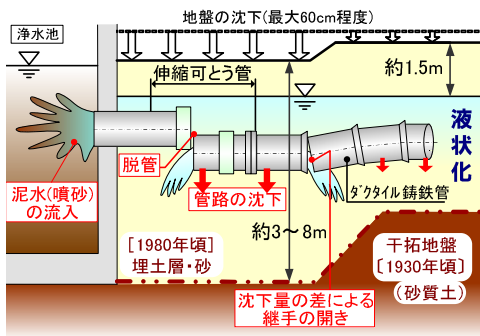


図-6 管路被害と液状化イメージ図（場内管路・鱈川浄水場）

b) 鱈川浄水場周辺・場外管路（導水・送水管路）

図-7に示すように、直線管路部の被害は、干拓地盤上に宅地造成が行われた地盤での様な液状化により生じたものと考えられる。管路周辺の埋土材の液状化によると考えられる地盤沈下も確認されたが、その直下の管路被害は確認されなかった。多くの管路が地下水位より上方にあったが、抜けなどの被害が生じており、液状化地盤に比べ単位体積重量が軽い管路であっても沈下傾向が確認された。また、護岸周辺では液状化にともなう側方流動と思われる現象により、水管橋取り合い管路部にも甚大な被害が生じた。

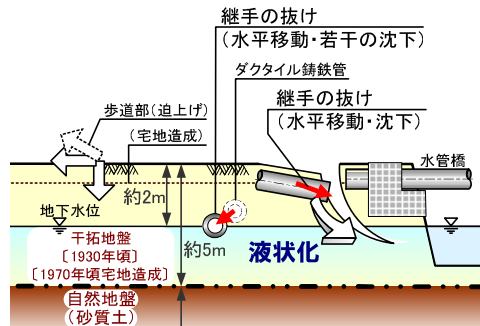


図-7 管路被害と液状化イメージ図
（場外管路・鱈川浄水場周辺）

c) 潮来市日の出地区・場外管路（配水管路）

図-8に示すように、直線管路部の被害は干拓地盤上に宅地造成が行われた地盤での様な液状化により生じたものと考えられる。その造成高さの違いにより被害の程度が大きく異なり、塩化ビニル管の浮上被害には非液状化層厚の影響が比較的大きい可能性がある。

特徴的な現象として、液状化とそれに伴う道路地盤の著しい水平移動により、塩化ビニル管も大きく水平変位していること、地表面まで浮上していることが挙げられる（他にも同様の被害報告²¹⁾）。特に路盤厚の小さい歩道部での液状化現象が顕著であったが、管路被害も同様の傾向があった。被害が甚大な4~6丁目、8丁目（南側）の被害件数は、既往の被害件数予測式²²⁾による評価値をオーダ的にも大きく上回る壊滅的な被害であり、既往の評価式によりこの地域の被害件数を想定することは困難と考える。

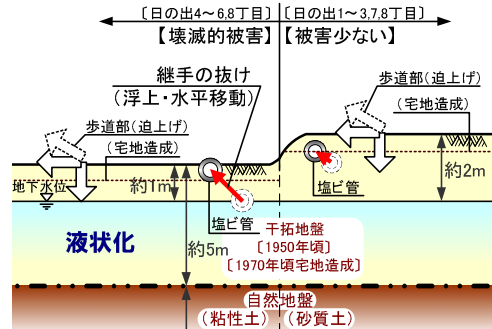


図-8 管路被害と液状化イメージ図（場外管路・日の出地区）

d) 千葉県浦安市埋立て地区・場外管路（送配水管路）

図-9に示すように、直線管路部の被害は埋立て地盤での液状化による側方流動に起因すると考えられる。特に、道路地盤や歩道地盤の突き上げ現象、迫り上げ現象¹²⁾²⁰⁾による管路被害への影響も大きいと考える。

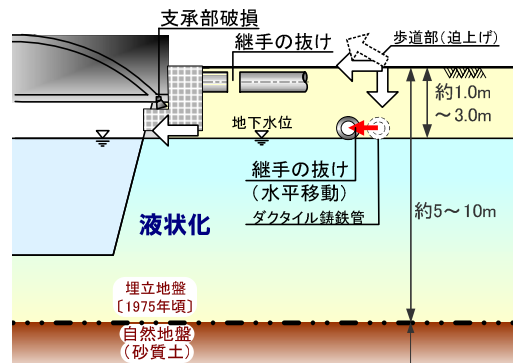


図-9 管路被害と液状化イメージ図（場外管路・浦安市）

管路の多くは、地下水位付近あるいは以浅にあったと考えられるが、主に水平移動による被害であり、顕著な浮上や沈下被害は確認されていない。被害件数は液状化による地盤沈下量と比例しており、沈下量 10~30cm の箇所での被害が最も多い²⁾。

水管橋では水管橋橋台の移動により、側方流動の影響を受け、支承部破損等の被害が生じた。

(3) 設計実務を行う上での留意点

前項の被害の実態に関する考察を踏まえ、今後の上水道管路の耐震設計や耐震対策を検討する上での留意点として、これまでの上水道管路の設計実務では想定していない事象や、さらに注意が必要と考えられる事象などについて整理する。

a) 地下水位以浅にある管路の被害

上水道管路の設計実務では、水道耐震指針²⁾に具体的な記述がないこともあり、地下水位以浅にある管路については浮上の評価は行わない。ただし今回、地下水位付近や以浅にある管路で甚大な被害が確認されたこと、そして、一般的に上水道管路の土被りは 1.2m 程度であり地下水位位よりも以浅にある管路も多いことなどを踏まえ、地下水位との関係にとらわれず、様々な液状化の影響による管路の被害形態をイメージし安全性を評価することが必要である。

b) 管路の塩化ビニル管の著しい浮上

単位体積重量が軽い塩化ビニル管は、地下水位以浅にある場合、設計実務では浮き上がりの安全性評価も実施しないが、今回、塩化ビニル管が地表面まで浮上する被害が確認された。このような壊滅的な被害の場合、既設管路全体が使用できず、応急復旧として全路線仮設管路の布設が必要となるため、復旧時間が長期化する可能性があり、適切な復旧材料の備蓄や復旧体制の準備が必要である。

c) ダクタイル鋳鉄管の沈下

ダクタイル鋳鉄管路は口径等によっては、液状化地盤に比べて単位体積重量が軽いものもあるが、今回の被害では浮上は確認されず、沈下が多く確認された。そのため、特に浄水場などでの構造物周辺を中心に、管路の単位体積重量にとらわれず、液状化によるダクタイル鋳鉄管路の沈下を考慮することが重要である。

d) 構造物取り合い管路の評価

液状化に伴う著しい管路の沈下を考慮した、構造物取り合い部の安全性評価が重要である。構造物取合い部の抜けは、浄水場の運転停止や減水が長期に及ぶ可能性

がある。現状の実務レベルでは、液状化に伴い構造物取り合い部に生じる管路の相対変位量や作用力の評価が困難であり、さらなる研究が必要と考える。今回の調査結果を踏まえると、標準的な伸縮可とう管の許容変位量を大きく上回る沈下量が生じることも考えられ、新設や既設の更新を行う場合は、想定変位量を超えた場合にも脱管しにくい伸縮可とう管の採用や、取り合い部だけでなく管路線全体で変位に追随する等の対応が必要である。

e) 液状化による地盤沈下量の評価

上記の構造物取り合い部の評価に関係する液状化に伴う地盤沈下量は、噴砂の影響などもあり、下水道施設指針³⁾に記述されている液状化層の 5% を大きく上回る場合もあることに留意が必要である。

f) 埋戻し材料の液状化

浄水場などの設計実務では、周辺の自然地盤を対象に液状化の影響を評価することがあっても、構造物周辺の埋戻し材料の液状化評価を想定しない場合が多いと考えられる。今回、特に埋戻し土の液状化被害が甚大であったことも踏まえ、その安全性評価が重要と言える。

g) 離脱防止金具の液状化対策としての効果

耐震性適合基準では非耐震管路であるダクタイル鋳鉄管路 (K 形等) であっても、図-10 に示すような離脱防止金具を既設管路の継手に追加設置することで被害を防止、抑制できることも考えられる。

この対策が実現できれば、既設管路の有効活用が可能となる。ただし、その実現には液状化による管路挙動の評価方法や、その使用材料の選定、および使用方法について技術的な検討を十分に行う必要がある。



図-10 離脱防止金具（例）の概要図

h) 路盤厚さの影響評価

路盤厚さが小さい歩道部などでは地盤変状の程度と同様に管路被害が顕著になる場合があることに留意が必要である。路盤厚さを大きくすることで被害を抑制することが考えられる。

i) 応急復旧時間

液状化による被害の場合、多量の噴砂や噴水が応急復旧の障害となるため、液状化が要因となっていない管路被害と比べて、復旧時間を長めに想定しておく必要がある。

j) 宅地造成地での被害件数

現在、上水道管路の耐震化優先度の評価などに用いることが多い管路の被害件数予測式²²⁾は、管路網のマクロ的な評価を目的としていることもあり、詳細な地盤情報は評価しないことから、宅地造成地での液状化による被害件数を小さく評価する場合がある。そのため、宅地造成地での被害件数の精度を高めるための被害件数予測式の改良が必要な場合があると考えられる。

6. 既設管路の利用を目的とした液状化対策に関する考察

今回の被害事例調査の対象と同様の条件下にあり、液状化の影響により甚大な被害が生じる危険性のある浄水場内の管路、あるいは公道にある管路網は多数存在すると考えられる。水道事業者の多くは、人口減少に伴う水道料金収入の減少が予想されることもあり、耐震化への巨額な投資は現実的に難しい。また、既設

浄水場などでは施設の運用を停止することができず、耐震管路への更新が困難なケースも多い。

このような中、既設管路の有効活用を考えると、今回ヒアリングを実施した尼崎市²⁴⁾、浦安市⁹⁾、および潮来市¹³⁾などでの液状化対策の適用や、新工法の開発も必要になると考えられる。これらを視野に入れた対策案が、表-3に示される方法である。現時点では上水道施設への適用には課題があり、効果が明確でないものもあり、今後の研究や開発などが重要である。

しかしながら、実現できれば有効性も大きい。例えば、非耐震管路への離脱防止金具の設置による既設管路の抜け出し防止が可能となれば、既設管路の有効活用と施設運用を継続しながらの施工が可能となる。路盤厚さの確保により噴砂を抑制し応急復旧速度の向上が可能になれば、重要度の低い配水管の支線管などの事後対策も考慮した総合的な対策としても有効である。

広域液状化対策となる地下水位低下工法は、浄水場内の輻輳する管路（電気ケーブルや薬品移送管路も含む）を構造物と併せ一括して対策でき、非常に有効と考えられる。さらに、場外の公道下管路では被害が宅地造成地などに集中する傾向もあることに注目し、対策エリアの絞り込みができれば適用性が高くなるものとする。格子状地盤改良については、対策規模が比較的小さくなるが浄水場内の特定施設への適用の可能性が考えられる。

表-3 既設管路の液状化対策案のイメージ

	個別対策 継手の補強	事後対策・噴砂抑制対策	全体対策 地下水位低下工法	格子状改良工法
	対策イメージ図			
主な対策メカニズム・効果	<ul style="list-style-type: none"> 既設管路の継手や伸縮可とう管において金具や杭等を設置し抜け止め防止。 	<ul style="list-style-type: none"> ドレーン材により水圧を消散させることにより地表面への噴砂の堆積を抑制し応急復旧を速める。 密実な路盤による揺れの控束効果による地表面の変位を抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場内全体や宅地造成地等を対象として広域的に地下水位を低下させ液状化を阻止、又は抑制する。 	<ul style="list-style-type: none"> 単独、又は複数の施設の周囲を格子状に地盤改良し、液状化の影響を抑制する。 確実に液状化の発生を防止できる可能性がある。
適用の制限	<ul style="list-style-type: none"> 管体強度不足（腐食含む）には対応できない。 深度の大きい管路の場合、管路更新との費用差は小さい。 対策継手位置の特定が容易でない（場外管路は適用性が低い） 	<ul style="list-style-type: none"> 液状化現象として、地盤変状・沈下等を防止することは出来ない。 主に事後対策として有効。 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下に伴う地盤沈下が顕著な場合、様々な施設に障害が生じ、また、基礎杭の場合、損傷の危険性がある。 地下水に環境基準を上回る有害物質を含む場合は対応できない。 	<ul style="list-style-type: none"> 建物直下の施工ができず平面規模の大きい池状構造物には適用困難 地下埋設物が多い場合適用困難 浄水場全体や場外管路には適用性が低い。
実現に向けての課題	<ul style="list-style-type: none"> 管体の挙動、管への作用力、及び抜け止め阻止力が明確でない。 対策用材料の設計法 	<ul style="list-style-type: none"> 砕石の設置範囲と効果の関係が明確でない。 道路管理者との調整 	<ul style="list-style-type: none"> 地下水位低下量と対策（浮上、水平変位、沈下）効果の関係が明確でない。 地下水位低下に伴う地盤沈下の評価方法 	<ul style="list-style-type: none"> 平面的な改良規模と対策効果の関係が明確でない場合がある。 既設埋設物周辺の地盤改良方法 既設管路継手からの改良材の侵入による水質劣化が懸念。
適用性が高い管路条件	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場内のダクト用鉄鋳管 	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場内・場外における被害抑制対策・事後対策、管種は特定しない。 歩道部の塩化ビニール管の浮上対策 	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場全体又は、地域一帯の対策 管種は特定しない 	<ul style="list-style-type: none"> 浄水場内の特定施設の対策 管種は特定しない

7. まとめ

本調査では、液状化による著しい地盤変状などに伴う管路被害により、水道システム全体に甚大な被害が生じることが改めて確認できた。そのため、上水道における耐震化事業においては、液状化に起因する管路の安全性評価と対策は、何より最優先で検討する必要があると考えられる。さらに、地下水位以浅にある管路の被害や構造物周辺での埋土材の液状化による著しい被害、および汎用的な伸縮可とう管の許容変位量を上回る沈下の発生など、現状の設計実務において必ずしも対応できているとは言い難い被害実態を確認したことから、これらの実態も踏まえ適切な対応が重要である。

一方、液状化に起因する上水道管路の被害被害形態は多種多様であり、液状化と管路被害の関係も非常に複雑である。被害メカニズムを明らかにし、それを踏まえたより合理的な対策工法の適用や開発は、今後の詳細な被害分析や研究に委ねることになる。

本委員会では、対策コストの低減、耐震化の早期達成を主な目的として、より合理的な対策工法案について検討していきたいと考えている。その一つとして、今回の調査で水道システム全体に甚大な影響を与えた構造物周辺地盤の液状化に伴う管路の沈下被害に注目し、どのような力が管路に作用するのか、既設管路の使用を前提としてその作用を軽減するような効果的な対策はないかなど、遠心模型実験装置を用いて詳細な分析を行う予定としている。

謝辞：本研究において実施したヒアリング調査では、千葉県水道局、浦安市、潮来市、鰯川浄水場に加えて尼崎市のご担当者の皆様より、多くの貴重な情報をご提供頂きました。また、潮来市へのヒアリングでは中日本建設コンサルタントの皆様それぞれご協力頂きました。本研究は土木学会地震工学委員会「水循環NW施設災害軽減対策研究小委員会（小委員長：金沢大学・宮島昌克教授）」の活動として実施したもので、小委員長をはじめ委員各位には多くのご助言を頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば、厚生労働省健康局水道課：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書、平成 25 年 3 月。
- 2) 例えば、公益社団法人日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説、2009。
- 3) 例えば、公益社団法人日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説 2014
- 4) 厚生労働省：管路の耐震化に関する検討会報告書（平成 19 年 3 月）
- 5) 厚生労働省：管路の耐震化に関する検討会報告書

（平成 26 年 3 月）

- 6) 公益社団法人日本水道協会：水道統計平成 23 年度版
- 7) 厚生労働省：東日本大震災水道施設被害状況調査最終報告書（平成 25 年 3 月）
- 8) 厚生労働省：平成 24 年度水道技術管理者研修 II. 東日本大震災水道施設被害状況調査の概要（平成 24 年 11 月）
- 9) 例えば、浦安市液状化対策技術検討調査委員会他：平成 23 年度浦安市液状化対策技術検討調査報告書、平成 24 年 3 月。
- 10) 例えば、千葉県環境研究センター：千葉県環境研究センター調査研究報告 G-8 号、平成 23（2011）年東北地方太平洋沖地震時の房総半島における液状化・流動化現象、第 1 報～第 5 報、平成 24 年 8 月。
- 11) 千葉県水道局：東日本大震災 水道応急活動記録（平成 25 年 3 月）
- 12) 安田進 原田健二 石川敬祐 東北地方太平洋沖地震による千葉県の被害 地震工学ジャーナル Vol. 7 NO. 1
- 13) 例えば、潮来市液状化対策検討委員会：日の出地区液状化対策検討委員会報告書。
- 14) 鋦田泰子 池尻大介 鹿島地域の液状化による管路被害集中地域と地形変遷 日本地震工学会論文集第 12 巻 第 4 号 2012
- 15) 茨城県企業局：東日本大震災 水道復旧の記録
- 16) 田中慎太郎 液状化現象による浄水場被害の状況分析事例の報告 技術報告集（第 27 号）一般社団法人 全国上下水道コンサルタント協会（平成 25 年 3 月）
- 17) 宮本勝利 鰯川浄水場液状化現象による被害の状況分析 土木学会誌 2011 年 9 月号 公益社団法人土木学会
- 18) 小西康彦, 佐藤清, 宮本勝利, 飛田哲男, 鋦田泰子, 砂坂善雄, 橋本学, 高橋達, 日置潤一：液状化に起因する上下水道管路の被害特性などに関する調査-その 1 下水道, 第 34 回地震工学研究発表会（投稿中）。
- 19) 迅速測図（農業環境技術研究所：歴史的農業環境閲覧システム）<http://habs.dc.affrc.go.jp/index.html>
- 20) 岩瀬伸朗, 長田克也, 武田賢治, 畑中哲夫：平成 25 年度全国会議（水道研究発表会）平成 25.10（10-13）千葉県水道局における東日本大震災を踏まえた取組み（I）-液状化地盤における管路挙動の共同研究-
- 21) 香取 光, 藤田伸宏, 飯篠実, 久保裕史, 増田嘉志, 椎名晃大：平成 25 年度全国会議（水道研究発表会）平成 25.10（10-6）東北地方太平洋沖地震に伴う液状化による香取市水道管路施設の被害の特徴と復旧
- 22) 地震による管路被害予測式（改訂版）（（公）水道技術研究センターH25.3 月）
- 23) 田中 佑典, 武田賢治, 畑中哲夫, 後藤大, 岩瀬伸朗, 並木武史：平成 25 年度全国会議（水道研究発表会）平成 25.10（10-15）東日本大震災における液状化地盤の管路挙動調査及び分析-千葉県水道局との共同研究に関する取り組み-
- 24) 諏訪靖二, 福田光治, 濱田晃之, 本郷隆夫, 執行晃：液状化対策のための地下水位低下工法による実施例, 第 10 回地盤改良シンポジウム論文集, 2012.10.

Hearing investigation for damage on water and sewage systems after the 2011 Tohoku off-the pacific coast, Japan, earthquake - Part II : Water supply system

Katsutoshi MIYAMOTO, Kiyoshi SATO, Yasuhiko KONISHI, Tetsuo TOBITA, Yasuko KUWATA, Yoshio Sunasaka, Manabu Matsuhashi, Satoru TAKAHASHI and Junichi HIOKI

Occurrence of liquefaction in the wide range of Kanto plain has been reported after the great Tohoku earthquake. Tremendous damage associated with the liquefaction includes damage on residential houses, roads, and water and sewage systems. As professional engineers and researchers who design and construct water treatment and sewage plants and pipelines, and study geotechnical site conditions, the authors conducted investigation through interviewing with the responsible personnels in Chiba Prefecture, Urayasu city, Itako city, Wanigawa water treatment plant, and Amagasaki city which suffered severe damage at the 1995 Hyogoken-Nanbu earthquake. Based on the hearing investigation, analyses are made on characteristics of those damages due to liquefaction and local site conditions and some measures for mitigation are introduced. In addition, Part I has reported the sewerage system.