

熊本地震における水道施設の被害分析 (その1) ～水源地の被害と地震応答解析による検証～

宮本 勝利¹・小西 康彦²・飛田 哲男³・楯田 泰子⁴・中澤 博志⁵

¹非会員 株式会社日水コン 大阪水道部 (〒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 株式会社日水コン 事業統括本部建設マネジメント室 (〒163-1122 東京都新宿区西新宿6-22-1)
E-mail:konisi_y@nissuicon.co.jp

³正会員 関西大学准教授 環境都市工学部都市システム工学科
(〒564-8680 大阪府吹田市山手町3-3-35 第4学舎第6実験棟4階)
E-mail:tobita@kansai-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

⁵正会員 防災科学技術研究所 地震減災実験研究部門 (〒305-0006 茨城県つくば市天王台3-1)
E-mail:a.nakazawa@bosai.go.jp

熊本地震では、水道施設にも多数の被害が生じたが、河川に囲まれた軟弱な粘土層と飽和砂層で構成された低地にある水道用井戸の水源地周辺においては、想定していなかった顕著な地盤変状に伴う水道施設の被害や、新耐震基準以降に建設された水道施設の建築物に基礎被害が多数確認された。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、これらの水道施設の被害と液状化を含む地盤の地震時挙動との関連性や対策に関する知見を得るために各種調査や検証解析を実施した。本報告では、これらの結果をもとに、熊本市の水道事業において特に重要な井戸水源地を対象として、地震被害のメカニズムや要因を分析し、今後の耐震対策における留意点などを考察した。

Key Words : pipe, water pipe bridge, countermeasures against liquefaction, earthquake damage, water supply system

1. はじめに

上水道施設は、生活に不可欠なライフラインであり、水道法では地震時にも損傷しないこと、あるいは損傷しても機能を維持し早期に復旧できることが求められる。しかしながら、過去の大地震における被害では、上水道施設がひとたび被害を受けると、住民への飲料水の供給が断たれるなど、非常に大きな影響を与える事例が多い¹⁾。

このような状況のもと、水道事業を運営する全国の自治体などでは、浄水場における処理施設や建築物、また、浄水場から送水された水道水を貯留する配水池や需要者に供給する埋設管路などから構成される水道システム全体を対象として、耐震化率向上のための事

業(耐震診断、耐震補強設計、耐震補強工事など)を実施しているところである。しかし、水道事業は地方公営企業法に基づき独立採算制であることもあり、投資可能額の制約、配置技術者数の制約などにより、平成27年度末の耐震化率²⁾は、浄水施設が25.8%、配水池が51.5%、配水管などの基幹管路が37.2%と未だ低いレベルにある。そこで、早期にかつ効果的に耐震化を達成するためには、確実に耐震上の弱点への対策を集中的に実施するなど、できるだけ無駄な投資を抑えることが重要である。そのためには、設計実務において様々な水道施設の地震時の被害実態と合致した耐震設計(診断)手法を適用することに関して、より多くの知見を蓄積し検討する余地がある。

一方、熊本地震では、熊本市上下水道局の水道用井

戸水源地周辺において、水管橋の橋台取り合い部の管路が周辺地盤の著しい変状の影響により甚大な被害を受けた³⁾。東北地方太平洋沖地震においても液状化に伴う著しい地盤変状により、構造物取り合い部の管路に想定を大きく超える1m程度の相対変位が生じ甚大な被害⁴⁾となったが、設計指針⁵⁾ではこれらの構造物取り合い部の被害パターンを十分に網羅できていないとは言えない。

また、同じく井戸水源地において、昭和55年改正の建築基準法（いわゆる新耐震基準）が適用され設計・施工された水道施設の建築物に多数の地震被害が確認された。さらに、その要因としてこれまでの設計実務においては考慮することのない連続する地震（前震＋本震）の影響が考えられるなど、現行の各種基準や設計指針^{5,6,7,8)}では網羅していない地震の影響が要因となった可能性がある。

筆者らは、これらの井戸水源地及びその周辺における水道施設の被害に着目し、熊本市上下水道局の御協力のもと、上下水道局担当者や地域住民へのヒアリング、水源地施設の被害状況の測定、地震後の地盤調査や地形測量調査の実施、さらにそれらの結果を踏まえ地盤や構造物（杭）の動的解析などによる検証解析を実施した。本報告では、これらの各種調査結果などから被害実態を整理するとともに、構造物の杭や井戸ケーシングなどの地中構造物を対象を絞り、被害のメカニズムや要因について分析した。

2. 熊本市における水道用井戸水源地の概要

熊本市の水道事業では、50箇所（現在休止中の施設含む）の水源地を有し、水道水の全量をこれらの水源地にある深井戸からの地下水で賄っている。本調査において地震被害の調査・分析を行う水源地は、**図-1**に示すような河川に囲まれた低地にあるA水源地とB水源地である。この2箇所の水源地の取水量の合計は約80,000（m³/日）であり、熊本市全体の取水能力の約3割を占める重要な水源地である。

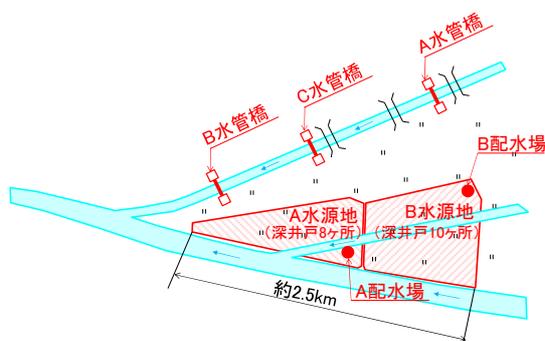


図-1 水源地概要図

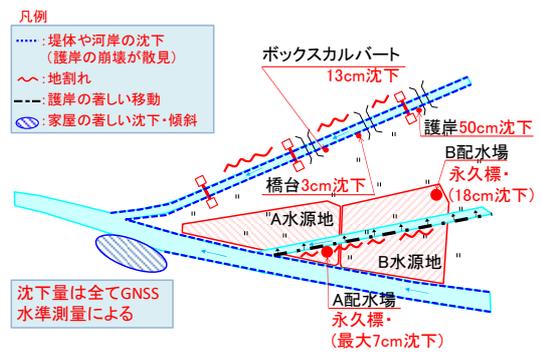


図-2 水源地周辺地盤の変状概要

A水源地、B水源地ともに深さ約150m～200mの深井戸により地下水をポンプにより汲み上げており、A水源地には8箇所、B水源地には10箇所の深井戸がある。また、A水源地、B水源地それぞれ1箇所毎の配水場があり、複数の井戸から汲み上げた水を集めて塩素剤注入による滅菌処理を行った後に大容量の配水池に一旦貯留し、配水ポンプにより各家庭や事業所などに水道水を供給している。

3. 井戸水源地における地震被害状況の調査結果

熊本市の主要水源地であるA水源地、B水源地における熊本地震での状況について、上下水道局担当者や地域住民へのヒアリング、施設の変状状況の測定、構造・基礎の特性整理、地震前・地震後の地盤調査や地形測量データの収集・分析などを行った。それらの結果をもとに、これらの水源地における地震被害状況について整理した。主な地震被害の状況は以下の通りである。

(1) 地盤変状とそれに伴う水管橋の被害

水源地周辺地盤の変状状況に関して、概況を**図-2**に示し、主な被害状況の考察を以下に示す。

水源地の地盤変状として、河川に囲まれた水源地の広い範囲において顕著な地盤沈下が確認された。沈下の程度は、**写真-1**や**写真-2**に示すように、特に河川や用水路近傍において大きい傾向が見られたが、その要因としては護岸の移動・崩壊による河川側への土の側方



写真-1 沈下の状況（1）



写真2 沈下の状況 (2)

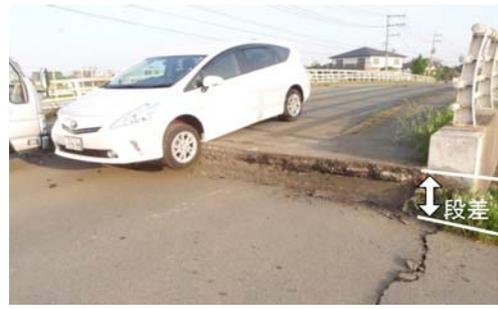


写真3 道路橋と背面地盤の段差¹²⁾

移動や盛土などのゆすり込み沈下によるものが考えられる。液状化による大規模な側方流動の影響については、地域の地質調査結果などによれば液状化層は河床以深にあることから支配的ではないと考えるが、既往の調査資料⁹⁾などからはこの地域で液状化が確認された箇所も散見されることから完全に否定できない。また、既往の文献⁽¹¹⁾によると、この地域の地表付近にある火山灰質系粘土は鋭敏比が大きく、地震の揺れ回数増加に伴う強度低下が顕著なことから、連続する地震の影響もあって、強度を大きく失い変状したことも考えられる。さらに、橋台や水門構造付近に局部的に顕著な地盤沈下や護岸崩壊が見られる箇所もあり、こういった箇所では構造物築造時のゆるい埋土や盛土地盤の変状も考えられる。このように、地盤変状のメカニズムは複雑であり、現状ではこれを科学的に明確にし、設計実務において想定することは困難なようである。

このような地盤変状に伴う被害としては、写真-3に示すように道路橋と周辺地盤の段差が大きくなり人や車の通行が困難になったことが挙げられるが、水道施設においても、この地盤変状が要因と考えられる水管橋の被害が複数確認された。

その例として、A水管橋では図-3や写真4, 5, 6に示すように橋台の周辺地盤変状に伴う水管橋の橋台取り付け部の埋設管路の損傷・漏水や、図-3や写真-6に示すような橋台の移動に伴う水管橋本体の支承部と伸縮管の損傷・漏水などが確認された。また、橋台取り付け部の埋設管路の損傷はC水管橋でも確認され、橋台の移動に伴う水管橋本体の被害はB水管橋でも確認された。

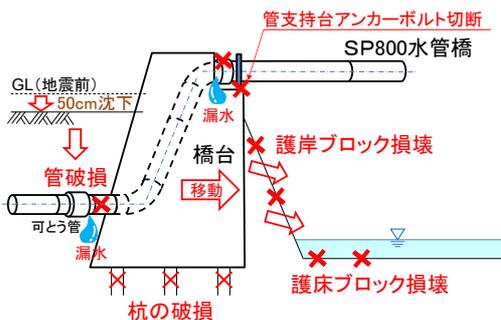


図-3 水管橋被害イメージ

なお、水管橋本体には地震の強い揺れに伴う慣性力の作用による損傷被害は確認されず、主に地盤や橋台の変位による被害であったと考えられる。

これらの構造物取り付け部の管路被害は、東北地方太平洋沖地震においても多く確認された被害¹⁾であるが、対策としては、十分な相対変位量をもった伸縮可とう管などの設置が考えられる。ただし、前述したように、設計実務において、今回のようなメカニズムが明確でない地盤変位量を想定することは困難であり、それをもとにした管路の相対変位量の想定も困難である。このようなことから、予測困難な地盤変位の影響を受けて管路が大きく変形（塑性）し通水断面が縮小したとしても、脱管・漏水には至らず通水機能が維持できる伸縮可とう管や管継手材料の採用など、地震時に要求される性能に応じた柔軟な対応が必要と考える。

また、水管橋の橋台付近の地盤変状が著しい箇所では、現状では漏水が確認できなくても、取り付け部の相対変位量が伸縮可とう管の許容値に達していることも想定される。そのため、それらの調査やその結果によっては管路更新などの対応が必要と考える。



写真4 水管橋全景



写真5 道路橋周辺地盤の変状¹³⁾



写真6 護岸沈下・橋台移動に伴う被害



写真7 井戸ポンプ室建屋 A の傾斜・沈下

一方、図-3に示すような水管橋の橋台移動は、基礎杭が破損し生じたものと考えられるが、橋台周辺地盤の変状として護岸崩壊などによる河川側への土の移動による影響が大きいものと考えられる。設計実務では、橋台の安定性や基礎杭の耐震設計に震度法を適用することが多く、こういった地盤の変位を考慮することは少ない。よって、設計実務においては、橋台周辺地盤による地震作用が大きいと判断できる場合は、地盤—構造連成系モデルの適用などにより、それらの影響を詳しく評価する必要がある。ただし、複雑な地盤変状を設計実務においてモデル化することが困難な場合もある。そこで、こういった大きな地盤変状が想定される場合は、橋台が移動することによる影響により水管橋の管路部が変形することは許容するも、脱管や漏水は防止し通水機能の維持と二次災害の防止ができるよう、延性に富んだ大きな相対変位にも対応できる伸縮可とう管の採用など柔軟な対応が必要と考える。

なお、A水管橋の漏水被害は、4月16日の本震後に確認したものであり、前震時には管からの漏水などの顕著な変状は確認していないとのことである。そのため、地盤の変状と同様に地震が連続したことにより、水管橋の被害が大きく拡大したことも考えられる。

(2) 井戸施設の被害

熊本市上下水道局の全ての井戸施設は前震並びに本震の直後に、濁度の上昇により運転を停止したが、およそ2日後には濁度も低下し水質的には全ての井戸施設は運転できる状況となった。

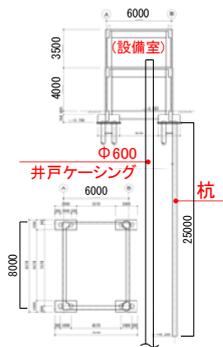


図4 井戸ポンプ室建屋概要図



写真8 井戸ポンプ室建屋 B の傾斜・沈下

ただし、前述したようにA水源地、B水源地の井戸施設の多くが写真-7, 8に示すように、井戸ポンプ室建屋（図-4参照）の傾斜・沈下や、写真-9に示すように建屋内にある井戸ケーシング（沈下していない）頂部との段差が生じたことによる管路などの設備被害により長期間の運転停止を余儀なくされた。これらの被害により、熊本市ではA水源地における8か所の井戸のうち、1か所のポンプ室建屋、B水源地における10か所のうち7ヶ所のポンプ室建屋の全面更新を計画するといった甚大な被害となった。

この井戸ポンプ室建屋の傾斜や沈下による原因は、建屋の柱などの構造体には、軽微なひび割れは確認できたが顕著な変形などは確認されなかったことから、建屋の基礎が沈下したことが考えられる。その要因は、杭の損傷と杭先端の支持層の沈下が疑われる。ただし、この建屋の基礎杭と同じ地層を支持層として、この建屋に比べ自重が大きい多くの水道構造物には、沈下や傾斜などの被害が全く確認されなかったことから、支持層のそのものの沈下ではなく、図-5のイメージ図に示すように杭本体の甚大な損傷により、建屋の傾斜や沈下被害とそれに伴う設備類の被害が生じたものと



写真9 井戸ポンプ室建屋内の管路設備被害

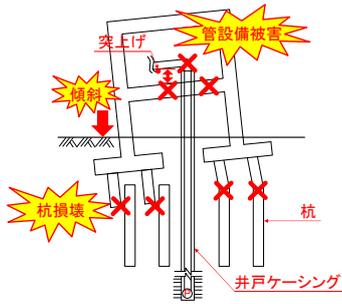


図5 井戸ポンプ室建屋の被害イメージ図

考える。今後、熊本市では、建屋の更新工事を実施する際に、現状の構造物取り壊し時に、杭の損傷状況を確認する予定である。

なお、この取水ポンプ室建屋の著しい傾斜は、地域住民へのヒアリングによると、4月16日の本震後に確認できたものであり、地震が連続して発生したことにより被害が拡大したことも考えられる。

一方、写真-7の井戸本体のケーシングについても、カメラを井戸内に挿入したが、現時点ではケーシングの破損は確認されていない。また、別の井戸では地下約160mの箇所のスクリーン損傷（原因を分析中）が確認され、その他3箇所でケーシングの損傷が確認された。

（原因を分析中）

(3) 配水場の被害

A水源地のA配水場の被害状況に関して、各種調査結果を図-6に示し、主な被害状況の考察を以下に示す。

A配水場は、A水源地内にある全ての井戸水を集め、塩素滅菌処理した水道水を熊本市内の需要者にポンプによる圧送方式で配水する機能を有しており、写真-10に示すように、比較的規模の大きい建築物や水槽構造物（配水池・PCタンク）が設置されている。

A配水場では、これらの建築物や配水池に機能上問題となるようなひび割れなどの損傷被害はなかった。また、傾斜や沈下被害も確認されず、図-6に示すように配水池から流出する管路の損傷被害が最も機能に影響を与えた被害であった。



写真-10 A配水場の主要施設

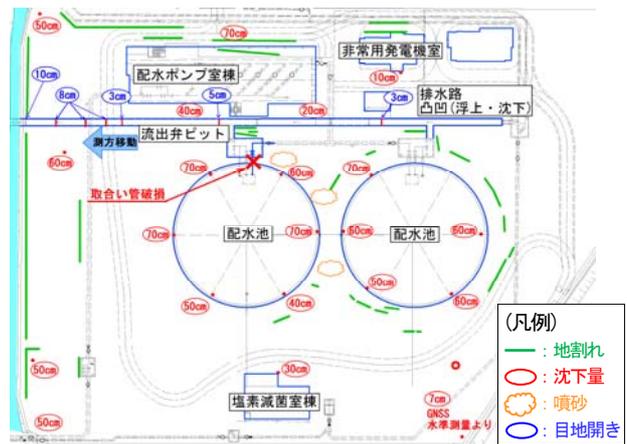


図6 A配水場の被害状況

この被害は構造物取り合い部の管路被害であるが、この要因は被害状況から配水池と流出弁室の地震時挙動の違いや、流出弁室の基礎杭の損傷による移動に対して、両施設の間に伸縮可とう管が設置されておらず、管路がこれらの相対変位に追従できなかったことが考えられる。この被害事例からも、構造物取り合い管路部における対策が重要なことがわかる。なお、この管路部の被害も本震時に生じたものである（要確認）。また、図-6や写真-11に示すように主に構造物周辺の地盤地下が顕著であった。これにより、地表面付近に埋設された塩素注入管路の損傷被害を招いたことなどから、耐震設計の実務において、注目すべき被害である。このような構造物周辺付近の地盤沈下のメカニズムとして、まず、図-7に示すように地震後に行った配水池周辺の掘削調査により、構造物基礎付近以下の地層の沈下は確認されなかった。同じく地震後の地質調査結果より、図-7に示すように構造物基礎より上部の表層付近の粘土層は過圧密状態であったことから一般には粘土層の沈下は考えにくい。そして、液状化による噴砂は極めて局部的であり、図-7に示すように構造物周辺の埋戻し土の液状化現象に伴う沈下の影響は小さい。このようなことから、図-6に示すような地表面の地割れの発生状況や、場内の排水路が用水路の方向に大きく水平移動している状況なども踏まえ、埋戻し土や盛土などの比較的緩い地層のゆすり込沈下や護岸への移動に伴う地盤沈下などが主要な要因と考えられる。



写真-11 構造物周辺の沈下状況

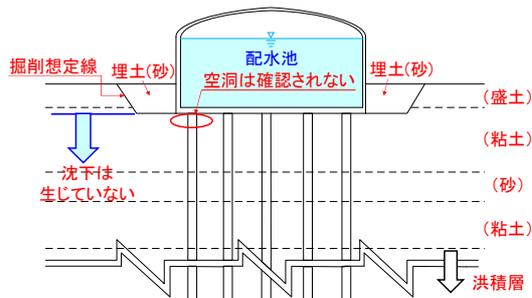


図-7 配水池地盤状況イメージ

この配水場のように浄水場などでは地表面付近に機能上非常に重要な設備（電機ケーブル、電柱、薬品移送管路等）や水道管路が設置されているケースも多いことから、従来の設計では考慮することのないこれらの埋戻し土や盛土、及び周辺に護岸がある場合は、地盤に対する検討や対策も重要と考える。

なお、前述したように、場内の排水路や流出弁室には水平移動や上下移動が確認されたことから、基礎杭の損傷被害が想定される。

(4) 調査結果の要点整理（詳細分析項目の抽出）

これらの様々な水道施設の地震被害において、設計実務の視点で最も注目すべき被害は、甚大な基礎の被害が確認された井戸ポンプ室建屋の被害である。その理由としては、被害のあった井戸ポンプ室建屋は現行と変わらない建築基準に基づいて設計・施工された構造（杭）も含まれることである。また、このような建屋の顕著な傾斜・沈下については、現行の耐震設計指針には考慮されていない連続する地震の影響により被害が生じた可能性がある点も注目すべきである。

このようなことから、今回の井戸ポンプ室建屋の被害については、現行の耐震基準類^{56,78)}では網羅できていないことが考えられる。そこで、杭の損傷被害について着目することとした。そして、現行と変わらない建築基準に基づいて設計されたと考えるA井戸ポンプ室建屋の詳細な地質調査を行ったうえで、地盤や杭の地震時挙動の分析を行い、被害のメカニズムや要因、並びに耐震基準類の適応性などについて考察するものとした。そして、今後の熊本市における井戸施設の本復旧における適切な耐震設計法などを提案することとした。

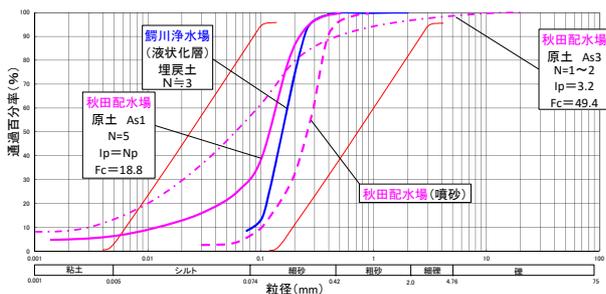


図-9 粒度分布図

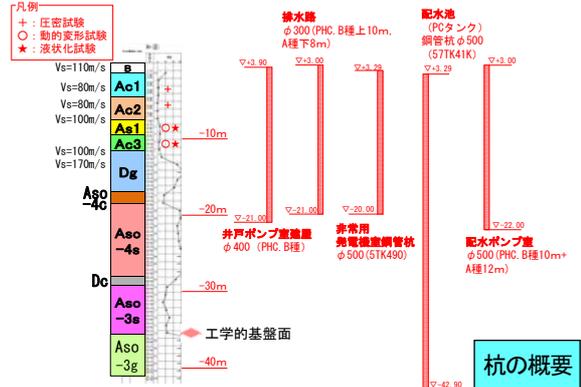


図-8 土質調査結果図

4. 地盤の検証解析などによる地震時挙動の分析

(1) 地盤条件の考察

A水源地にあるA配水場内の地質調査結果と主要構造物の杭の概要を図-8に示す。

既往の地質調査結果より、A配水場並びにそれに近接するA井戸ポンプ室建屋周辺は、ほぼ図-8に示す地層条件の水平成層地盤であり、さらに、A水源地全体もおおむね同様な地層条件の水平成層地盤である。

図-8に示すように、地表から15m程度の深度までは、N値が5以下の緩い地盤であり、それ以深は比較的密な阿蘇火砕流堆積物（Aso）を主体とする洪積層となる。各構造物の杭の先端支持層は、荷重が非常に大きい水槽の配水池（PCタンク）を除き比較的N値が高い値で安定している阿蘇火砕流堆積物としている。また、地表から深度11m程度までの地層は腐食物やシルト及び細砂で構成される緩い地層であるが、その中でもAS1層とAC3層は、図-9に示すように、粒度分布から液状化の可能性のある地層と考えられる。特にAS1層の粒度分布については粒径がかなり揃っており、東北地方太平洋沖地震の際に茨城県企業局鰐川浄水場を1か月以上にわたる運転停止といった甚大な被害をもたらす要因となった非常に顕著な液状化層（埋土層）の粒径分布¹⁴⁾と類似することから、同様の顕著な液状化が生じる可能性があると考えられる。

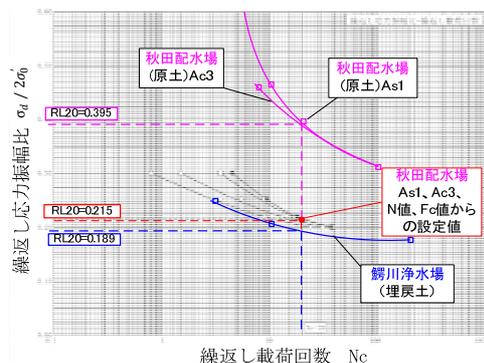


図-10 非排水くり返し三軸試験結果



- ・1次元解析モデル底面の粘性境界を介して路頭基盤加速度波形を水平入力。
- ・地震応答解析はニューマークのβ法 (β=1/4), 解析時間間隔は0.001秒。

図-11 地盤の解析モデル図

また、これらの液状化層の上部には層厚の大きいシルト層があり、水源地一帯に液状化層が露呈するような地形は見られないことから、液状化が生じた場合、過剰間隙水圧が消散しにくく、長時間にわたり水圧が高い状態（液状化層の剛性が低い状態）を維持しやすい。そのため、今回の熊本地震のように大きな地震が水圧が消散しない期間内に連続して生じる場合は、液状化による影響がさらに大きくなる懸念され、検証解析などで分析する必要がある。

このような、AS1層とAS2層の液状化に関する特性については、図-8に示すように各構造物の杭への影響が大きいことが考えられたため、液状化試験（土の繰返し非排水三軸試験）を実施した。その結果を図-10に示すが、設計指針に従ってN値や粒度分布などから算定した値よりも液状化強度は非常に高く、粒度分布が類似する鰐川浄水場の強度とも大きな差があることが分かった。これは、鰐川浄水場の液状化層は埋土材料であり、乱された時期から30年程度しか経過していないが、本配水場の液状化層は近年乱されたことがない原地盤材料であることが要因の一つと考えられる。すなわち、内陸部の液状化層と埋立地などの液状化層とはN値や粒度分布などから評価できない液状化強度の顕著な差が見られる場合もあるようである。地下の構造物や管路施設を主体とする全国の水道事業の耐震化においては、耐震対策を効率的・効果的に実施する観点から、重要な留意事項と考えられる。

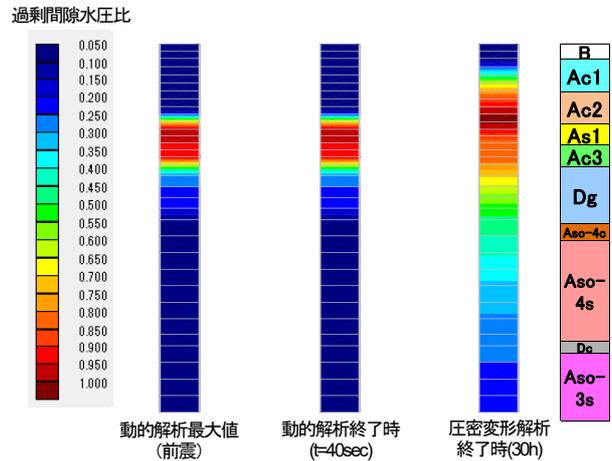


図-12 過剰間隙水圧比の分布図

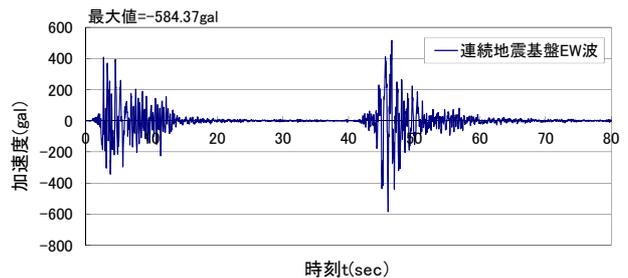


図-13 設計入力地震動・加速度波形（前震+本震：EW）

(2) 地盤の地震応答解析（熊本地震の検証解析）

a) 解析条件など

地盤の地震応答解析を実施するにあたり、図-8に示す地盤条件を対象として、杭への地震作用が大きいと考えられる地表部分については、PS陰層や動的変形試験、及び液状化試験（繰返し非排水三軸試験）などを実施した結果から地盤の解析モデルを設定した。解析モデル図を図-11に示す。解析モデル図に示すように、液状化の可能性のあるAS1層とAC3は弾塑性モデル（有効応力モデル）とし、その他はR-Oモデルとし、工学的基盤面は、N値50が連続する深度35m付近とした。入力地震動については、水源地からおおよそ4.5km離れた位置にある益城町における前震と本震の観測記録（地下—240m）[kik-net益城（KMMM16）]を深部地盤の地震応答解析を行い算定した。なお、図-12に示すように、前震の応答解析の後に過剰間隙水圧の消散解析を実施したが、液状化層上部の粘土層による影響で本震が生じるまでの時間内に液状化層の水圧消散傾向は全く確認されなかったことから、解析では図-13に示すように前震と本震を連続して入力するものとした。

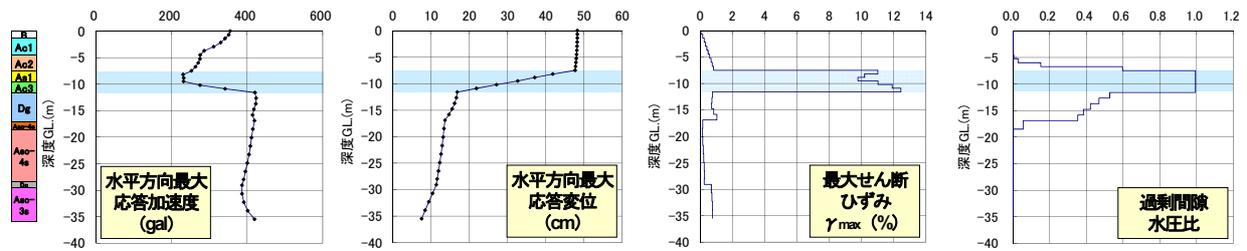


図-14 地盤の地震応答解析結果（前震+本震：EW）

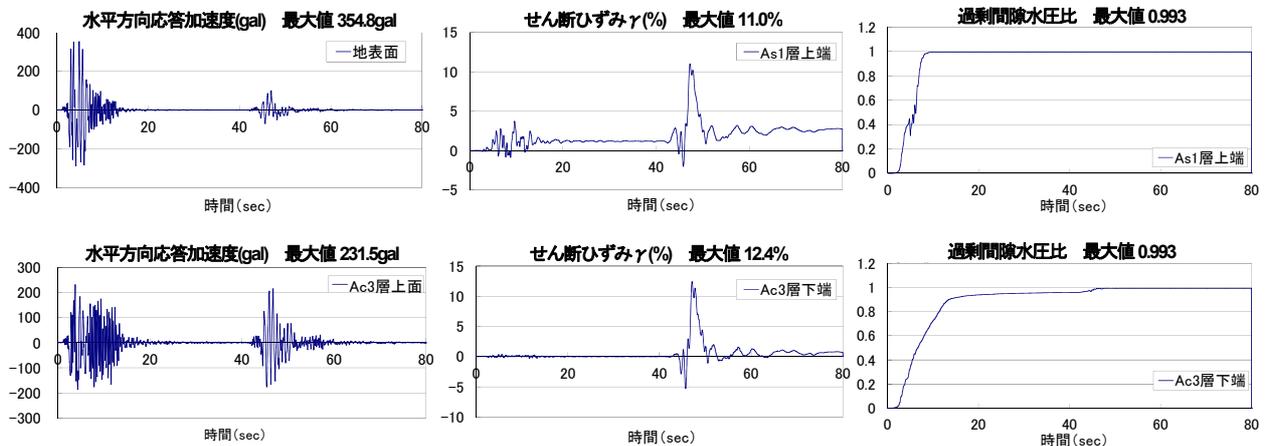


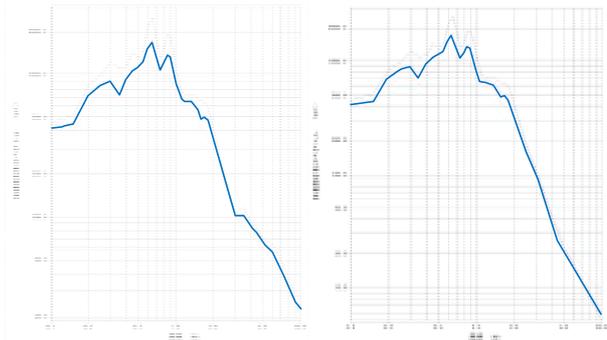
図-15 地震応答解析結果（前震+本震：EW）

b) 解析結果

地盤の地震応答解析結果として、前震+本震における各種応答値（加速度、変位、ひずみ、過剰間隙水圧比）の深度分布を図-14に示し、地表面と液状化が確認された（過剰間隙水圧比が1に到達）AS1層の上面とAC3層下面における加速度応答とせん断ひずみ、及び過剰間隙水圧比の時刻歴図を図-15に示す。また、地表面における加速度応答スペクトル図を図-16に示す。

これらの解析結果から、主に杭や井戸などへの地盤による影響に関する考察を以下に示す。

- AS1, AC3 層において、液状化が生じ、加速度応答値の著しい減少と応答変位の増大傾向が見られる。
- AS1, AC3 層におけるせん断ひずみが非常に大きく、それらの上下層とのひずみ量の差がかなり大きい。
- 前震時には地表面の加速度応答振幅は大きいですが、本震時の地表面における加速度応答振幅は小さく、液状化の影響による地震動の減衰傾向が明瞭に現れている。
- 前震には、過剰間隙水圧比は1に到達していない箇所は、水圧が消散しないまま本震の作用により水圧比が1に到達する。
- 液状化層のせん断ひずみは、前震時にはわずかであるものの、本震時に大きな値を示している。
- 前震+本震の連続地震の地表面加速度応答スペクトルは、前震の単独地震の応答スペクトルに近似しており、加速度応答の影響は前震時が支配的と考える。



(前震) (前震+平震)

図-16 地表面加速度応答スペクトル図

5. まとめ

今回の被害調査で特に注目したA水源地やB水源地では、橋台周辺の著しい地盤変状などによって水管橋の橋台取り合い部の管路に想定を大きく上回る相対変位が生じ通水機能を失うような甚大な被害が確認できた。また、地盤変状が関係すると見られる橋台の移動に伴う被害も多く見られた。そして、連続する地震によってそれらの被害は確実に拡大したと想定される。

そこで、A配水場並びにそれに近接するA井戸ポンプ室建屋周辺について、図-8に示す地層条件で地盤の地震応答解析を実施した。その結果、熊本地震において損傷したと考える井戸ポンプ室建屋の杭や配水場内の排水路の杭は、せん断ひずみが大きい液状化層付近において損傷被害が生じている可能性がある。

また、実際の構造物の被害が本震時に生じた（あるいは拡大した）ことを踏まえると、地表面の加速度応答が大きく地盤ひずみの小さい前震時の影響よりも、液状化の影響が顕著に現れとことよって加速度応答が小さく地盤ひずみの大きい本震時の影響が支配的と考えられることから、杭は上部構造物の慣性力よりも地盤ひずみの影響により損傷したと考えられる。

さらに、地震が連続したことによる影響として、過剰間隙水圧の段階的な上昇による液状化範囲の拡大や剛性の低下した地盤への連続する地震作用に伴い、地盤ひずみの著しい拡大傾向が確認された。よって、今回のような地盤条件における地中構造物の耐震設計においては、液状化層の過剰間隙水圧や剛性変化の状況を弾塑性モデルを用いた動的非線形解析により詳しく表現し、連続する地震による液状化などの影響を適切に評価することが重要である。

そして、今回のような地盤条件における杭や井戸ケーシングの耐震計算においては、地盤ひずみの影響が支配的となるので、一般に水道施設の建築物や水槽構造物（池状構造物、地上水槽など）の杭を対象とした場合に用いられる震度法ではなく、地盤一杭連成系モデルなどの地盤の応答変位が詳しく考慮できる耐震計算法の適用が必要であろう。

今後の水管橋の耐震化事業においては、水管橋本体だけでなく橋台取り合い部の管路の耐震性能についても注目し、橋台周辺の埋土地盤や護岸の条件などの局所的な条件も詳しく評価するとともに、想定以上の地盤変位や橋台の移動が生じても脱管しにくい伸縮可とう管や管の継手形式の採用などにより地震時に要求される性能を確実に確保することが重要である。筆者らは、このような構造物取り合い部の管路に注目し、確実な対策の実施、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について検討を進めている。

謝辞：本研究においては、熊本市上下水道局の水道整備課・島村幸一様はじめ、多くのご担当者の皆様より、多くの貴重な情報をご提供いただいたとともに、各種調査においてご協力をいただきました。また、本研究は土木学会地震工学委員会「水循環施設の合理的な災害軽減対策研究小委員会（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、委員長をはじめ委員各位には多くの助言を頂きました。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，2013. 3.
- 2) 平成 27 年度末厚生労働省水道課調べ
- 3) 例えば、厚生労働省水道課：熊本地震水道施設被害等現地調査団報告書，2016.
- 4) 宮本勝利：液状化に起因する上水道管路の被害特性に関する調査，土木学会論文集 A1，Vol.71，No.4，2015.
- 5) 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.
- 6) 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 2014，2014. 5.
- 7) 例えば、社団法人日本水道協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，2012.3.
- 8) 例えば、一般財団法人日本建築防災協会，建築物の構造関係技術基準解説書，2015.
- 9) 特定非営利活動法人，社会基盤技術支援協会：熊本地震による宅地地盤災害
- 10) 國生，大川，大島，加藤，中島：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性（その 1），第 38 回地盤工学研究発表会（秋田），2003.7.
- 11) 國生，大川，大島，加藤，中島：鋭敏比の高い火山灰粘性土の地震時力学特性（その 2），第 38 回地盤工学研究発表会（秋田），2003.7.
- 12) 熊本市：平成 28 年熊本地震による被災状況について
- 13) 東京工業大学盛川研究室：2016 年熊本地震調査速報（秋津川周辺の被害）
- 14) 宮本勝利：鱒川浄水場液状化現象による被害の状況分析，土木学会誌，Vol.96，No.9，pp.53-55，公益社団法人土木学会，2011. 9.

(2017. 9. 7 受付)

SEISMIC DAMAGE ANALYSIS OF WATER SUPPLY FACILITIES CAUSED
BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKES PART 1:
SEISMIC DAMAGE IN WATER SOURCE AREAS AND THE VERIFICATION
BY SEISMIC RESPONSE ANALYSIS

Katsutoshi MIYAMOTO, Yasuhiko KONISHI, Tetsuo TOBITA,
Yasuko KUWATA, Hiroshi NAKAZAWA

The 2016 Kumamoto earthquakes had caused many damages on water supply facilities. Damages of water supply facilities associated with unexpected significant ground deformation, and foundation damages of the structures that meet the new earthquake resistant standard (standard for earthquake resistant design after 1981 in Japan) were reported at water supply well areas that surrounded by rivers and located in lowland with soft clay layer and saturated sand layer. As professional engineers and researchers who design and construct water treatment and sewage plants and pipelines, the authors conducted investigation and analyzation in order to find out the relevance between the damage of water supply facilities and the ground behavior including liquefaction during the earthquake. Based on the results of this study, we analyzed the seismic damage mechanism and factors, and discussed about the earthquake-resistant measures in future for the water supply well areas, which are very important for the water supply system of Kumamoto City.