

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

⁴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るとは言えない。

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。

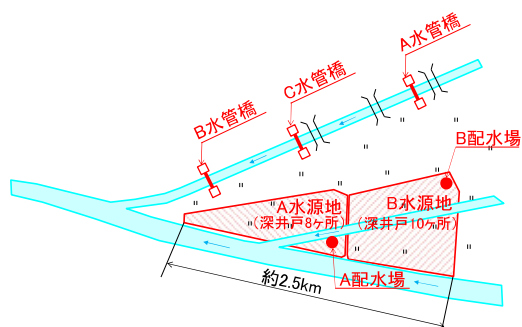


図-1 水源地概要図

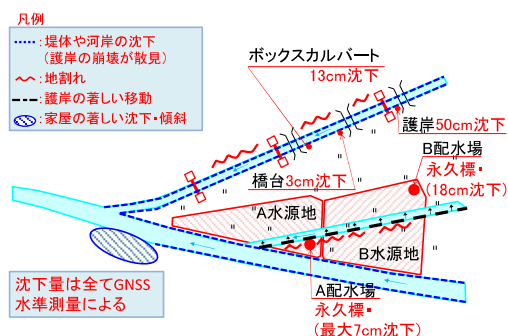


図-2 水源地周辺地盤の変状概要

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¹⁰⁾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。

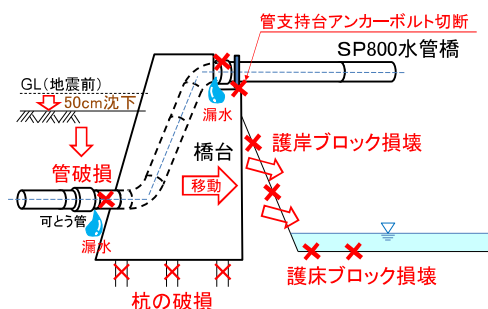


図-3 水管橋被害イメージ

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、予測困難な地盤変状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。

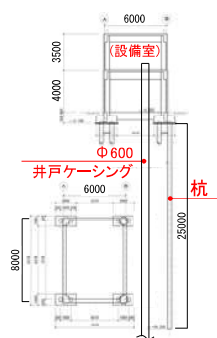


図4 井戸ポンプ室建屋概要図



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

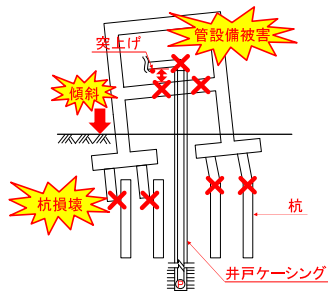


図-5 井戸ポンプ室建屋の被害イメージ図

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の箇所でのスクリーン損傷（原因を分析中）が確認され、その他3箇所での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。

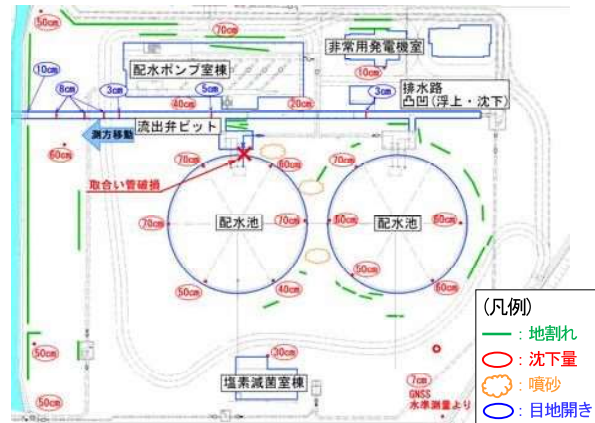


図-6 A配水場の被害状況

この被害は構造物取り付け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、構造物取り付け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な要因と考えられる。



写真-10 A配水場の主要施設



写真-11 構造物周辺の沈下状況

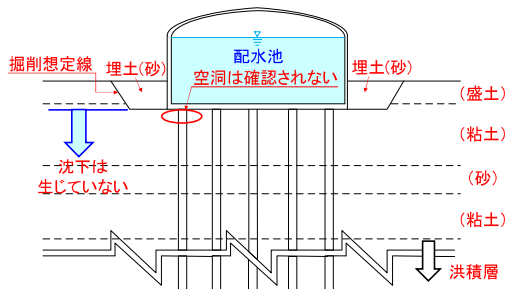


図-7 配水池地盤状況イメージ

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^{5(6,7,8)}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。

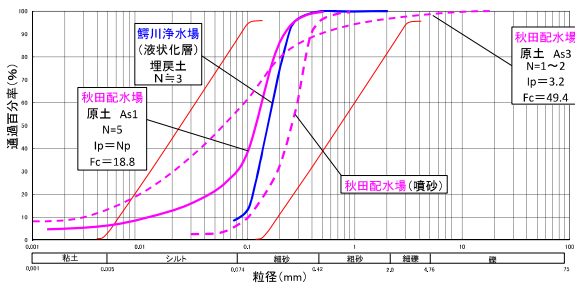


図-9 粒度分布図

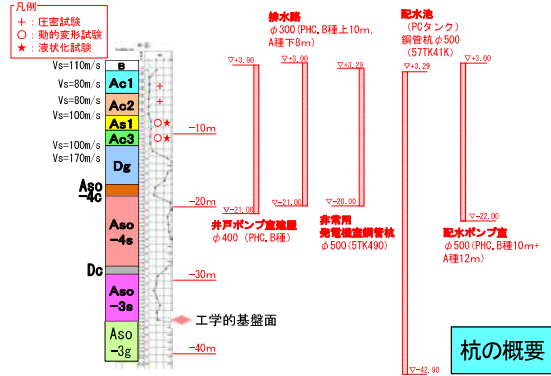


図-8 土質調査結果図

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。

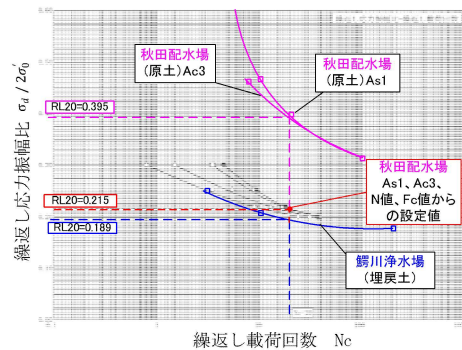
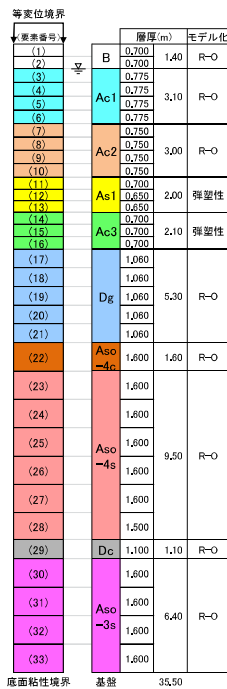


図-10 非排水くり返し三軸試験結果



- ・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ことが懸念され、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（土の繰り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鱈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、鱈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。

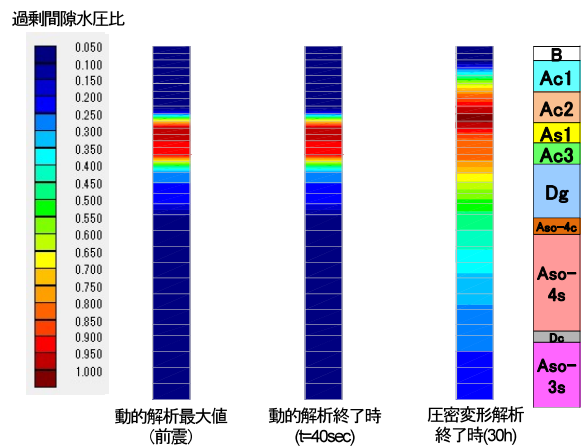


図-12 過剰間隙水圧比の分布図

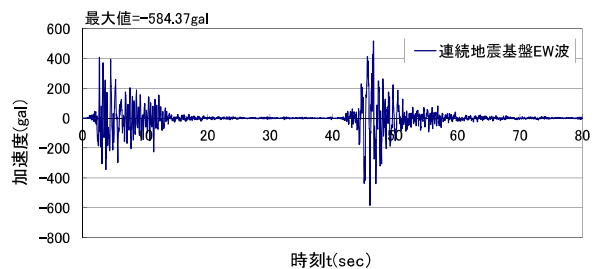


図-13 設計入力地震動・加速度波形（前震+本震：EW）

(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検層や動的変形試験、及び液状化試験（繰り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。

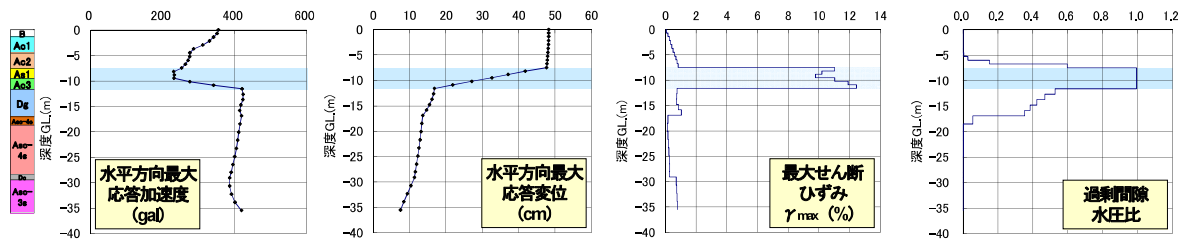


図-14 地盤の地震応答解析結果（前震+本震：EW）

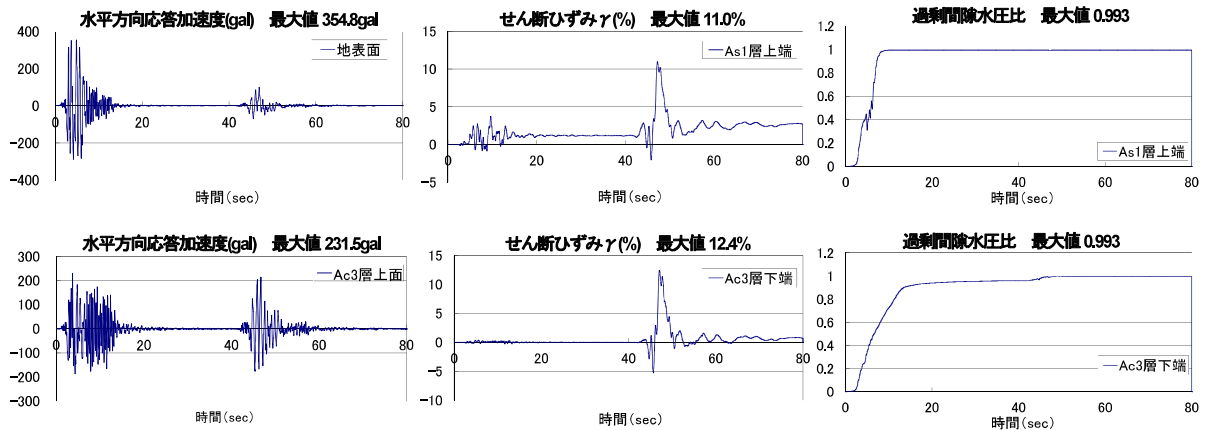


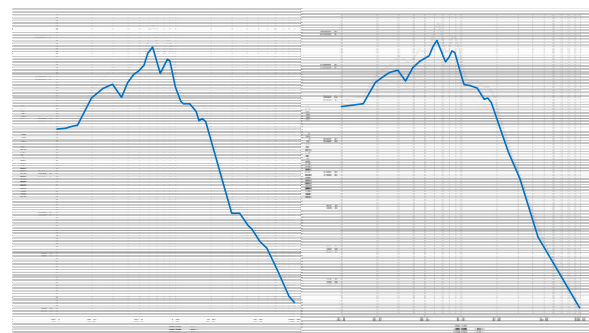
図-15 地震応答解析結果（前震+本震：EW）

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層の上端とAC3層下端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+本震)
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、実際の建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、杭は上部建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建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—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、このような建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.

熊本地震における水道施設の被害分析 (その2) ～杭・井戸の被害検証と現耐震設計法の課題～

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の配水場内基礎杭及び井戸ケーシングを対象として、地震被害のメカニズムや要因を分析し、今後の耐震設計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

「熊本地震における水道施設の被害分析(その1)」では、井戸水源地における地震被害状況の調査結果を示すとともに地盤の地震応答解析により、主に杭や井戸などにどのような影響があるかを検証した。

その結果、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付け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見られたが、設計指針¹⁾ではこれらの構造物取り付け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。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)の影響を検証した結果、連続する地震によってそれらの被害は確実に拡大したことが明らかとなった。現行の各種基準や設計指針^{1,2,3,4)}では網羅していない連続する地震の影響が被害の要因と考えられる。

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、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。さらに、今後の被害施設の本復旧工事に適用する耐震設計手法の提案や関連する現行の設計指針における課題などについて考察した。

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。

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。

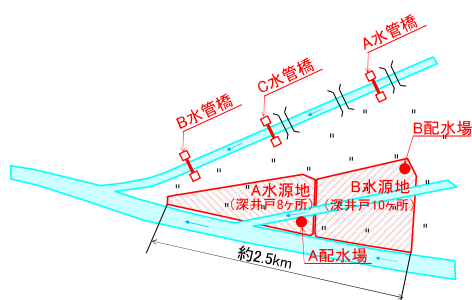


図-1 水源地概要図

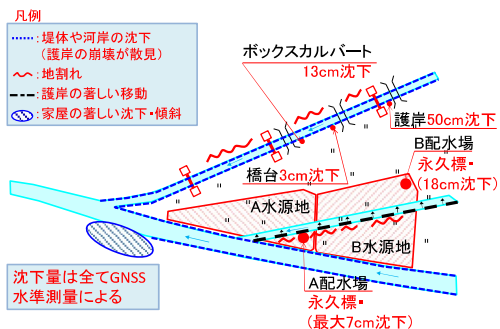


図-2 水源地周辺地盤の変状概要

3. 地震被害状況の調査結果

調査結果の詳細は（その1）で報告済みであり、以下に概要のみを示す。

(1) 井戸水源地上における地震被害状況の調査結果

a) 地盤変状とそれに伴う水管橋の被害

被害事例として、A水管橋では図-3や写真-1、2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-2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。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。

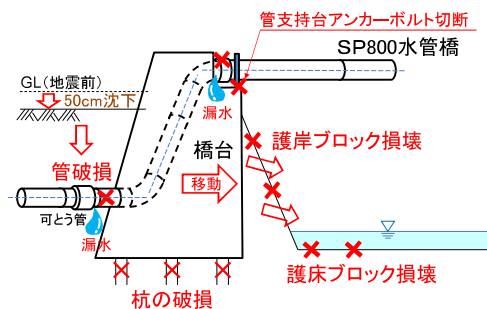


図-3 水管橋被害イメージ



写真-1 道路橋周辺地盤の変状



写真-2 護岸沈下・橋台移動に伴う被害

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。

b) 井戸施設の被害

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-3、4に示すように、井戸ポンプ室建屋（図-4参照）の傾斜・沈下や、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。

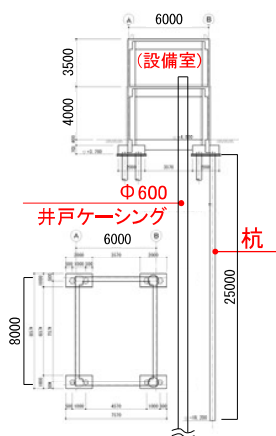


図4 井戸ポンプ室建屋概要図



写真-3 井戸ポンプ室建屋Aの傾斜・沈下



写真-4 井戸ポンプ室建屋Bの傾斜・沈下

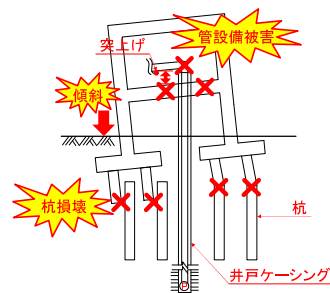


図-5 井戸ポンプ室建屋の被害イメージ図

この井戸ポンプ室建屋の傾斜や沈下による原因は、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する。今後、熊本市では、建屋の更新工事を実施する際の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。

c) 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に示すが、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に接続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。この被害は構造物取り付け部の管路被害であり、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。

また、図-6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が、図-7に示すように地震後に行なった配水池周辺の掘削調査では構造物基礎付近以下の層の沈下は確認されなかった。

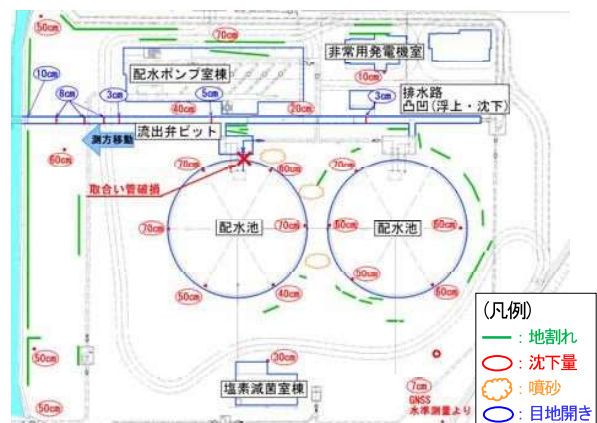


図-6 A配水場の被害状況

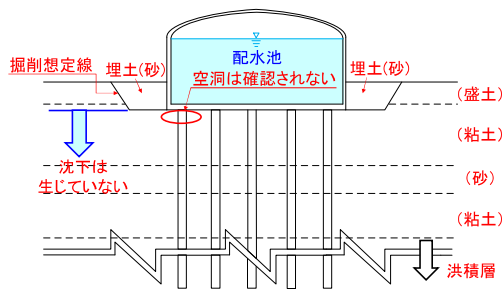


図-7 配水池地盤状況イメージ

d) 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⁹⁾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¹²³⁾⁹⁾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、現行の耐震基準類が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。

4. 杭・井戸の検証解析などによる地震時挙動の分析

(1) 検証解析の概要

本検討では、上部構造物に傾斜や沈下などの基礎杭の被害傾向が見られないA配水場内の複数施設を対象

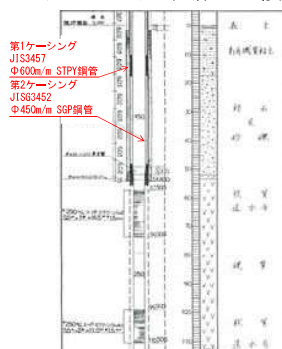


図-8 井戸ケーシング概要図

とし、さらに同様に地中部に損傷被害が確認されていない井戸ケーシングも対象として地震時の検証解析を行い、被害の状況や要因を解析的に検証する。

ここで図-8に示すような井戸ケーシングについても解析対象としたのは、既往の文献⁹⁾によると、過去の地震において、今回の対象地盤と同様に地盤ひずみの影響が大きくなる液状化層と粘土層の境界付近を中心に、表層地盤中の井戸ケーシングの被害事例が報告されていることから、A水源地、B水源地の全ての井戸施設に共通する図-8のような二重ケーシング方式の耐震性能を分析するためである。

(2) 解析対象、条件など

検証解析の解析対象や条件などを図-9に示す。これらの解析対象や条件のもと、全ての杭や井戸について、主に地盤の地震応答解析の結果から地盤変位を詳しく評価するために図-9に示すような2次元の地盤—杭連成系FEMモデルを用いた。ただし、井戸ポンプ室建屋については、上部構造物の慣性力の影響も評価するために図-10に示す地盤—杭—上部構造連成系FEMモデルでも解析を行った。

地盤要素のモデル化は液状化層については弾塑性モデル、非液状化層についてはR—Oモデル、杭や井戸モデルは梁モデルにて非線形性を表現した。そして、動的解析（時刻歴応答解析、有効応力解析）を実施した。各基礎杭の先端支持層は、前述したように特に上部荷重の大きい配水池（PCタンク）を除き、深度20m程度の阿蘇火砕流堆積物の位置にあり、配水池についてはN値50が連続する深度30m程度の位置を支持層としている。

また、井戸ケーシングは、地下水の揚水のため深度200m程度までに達し、深度50mまでの掘削はφ600mmの鋼管を用い、深度50m以深の掘削はφ450mmの鋼管を用いたことにより、地表部分はφ600+φ450の二重ケーシングとなり、結果的に耐震性能の高い構造となっている。このような状況のもと、今回の解析の目的は、地表部分の地盤のせん断ひずみの影響が大きい深度の検証であることから、解析モデルは工学的基盤面として考えられる深度35mまでをモデル化の対象とした。

なお、これらの杭の特徴としては、構造物が完全に地中にあり自重の軽微な排水路（昭和58年建設）や配水池流出弁室（昭和58年）については、地震作用などの水平荷重を設計時に見込まないPC杭のA種を使用している。建築基準の新耐震基準が適用されたと考える配水ポンプ室（昭和58年）や井戸ポンプ室建屋（平成9年）の杭は水平荷重を見込んだB種を使用している。また、荷重の非常に大きい配水池や最近に設計された非常用発電機室（平成28年）は韌性に富んだ鋼管杭を使用している。

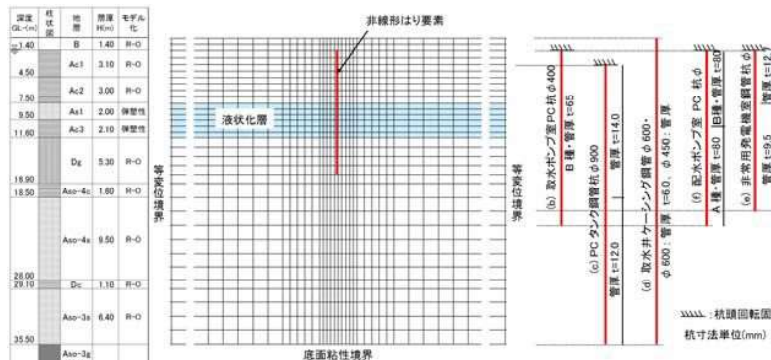
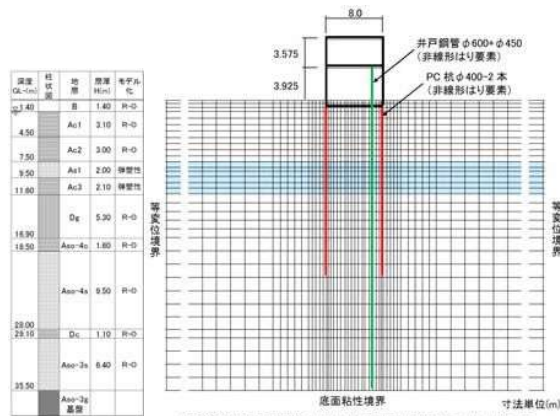


図-9 解析モデル図 (地盤・杭連成系モデル)

- ・2次元解析モデル側面に等変位境界を配置。底面に配置した粘性境界を介して路頭基礎加速度波形を水平入力。
- ・はり要素の M- θ 関係は軸力なしの条件で算定。
- ・地盤の奥行き幅は(a)、(b)と(φ)が杭直径。(c)~(e)が杭直径の 1/2。
- ・地震応答解析はニューマークの β 法 ($\beta=1/4$)。解析時間間隔は 0.001 秒。
- (a)排水溝 PC 杭 $\phi 300$ (A 種・管厚 $t=60$)



- ・解析断面は建屋短辺方向。構造物の奥行き幅は建屋幅の 1/2。地盤の奥行き幅は柱脚基礎の杭中心間隔。
- ・2次元解析モデル側面に等変位境界を配置。底面に配置した粘性境界を介して路頭基礎加速度波形を水平入力。
- ・はり要素の M- θ 関係は建屋重量による軸力条件で算定。
- ・地震応答解析はニューマークの β 法 ($\beta=1/4$)。解析時間間隔は 0.001 秒。

図-10 解析モデル図 (地盤・杭・上部構造連成系モデル)

なお、配水池、非常用発電機室、及び配水ポンプ室などは、杭の上部と下部で杭仕様を変えている。配水ポンプ室においては、経済設計を目的に地表面から深度8m付近の上部には水平抵抗力の高いPC杭B種を選定し、下部には水平抵抗力の低いPC杭A種を選定している。この上部の杭は液状化層よりも浅い位置にあることから、液状化付近のひずみの影響は考慮されていないことがわかる。

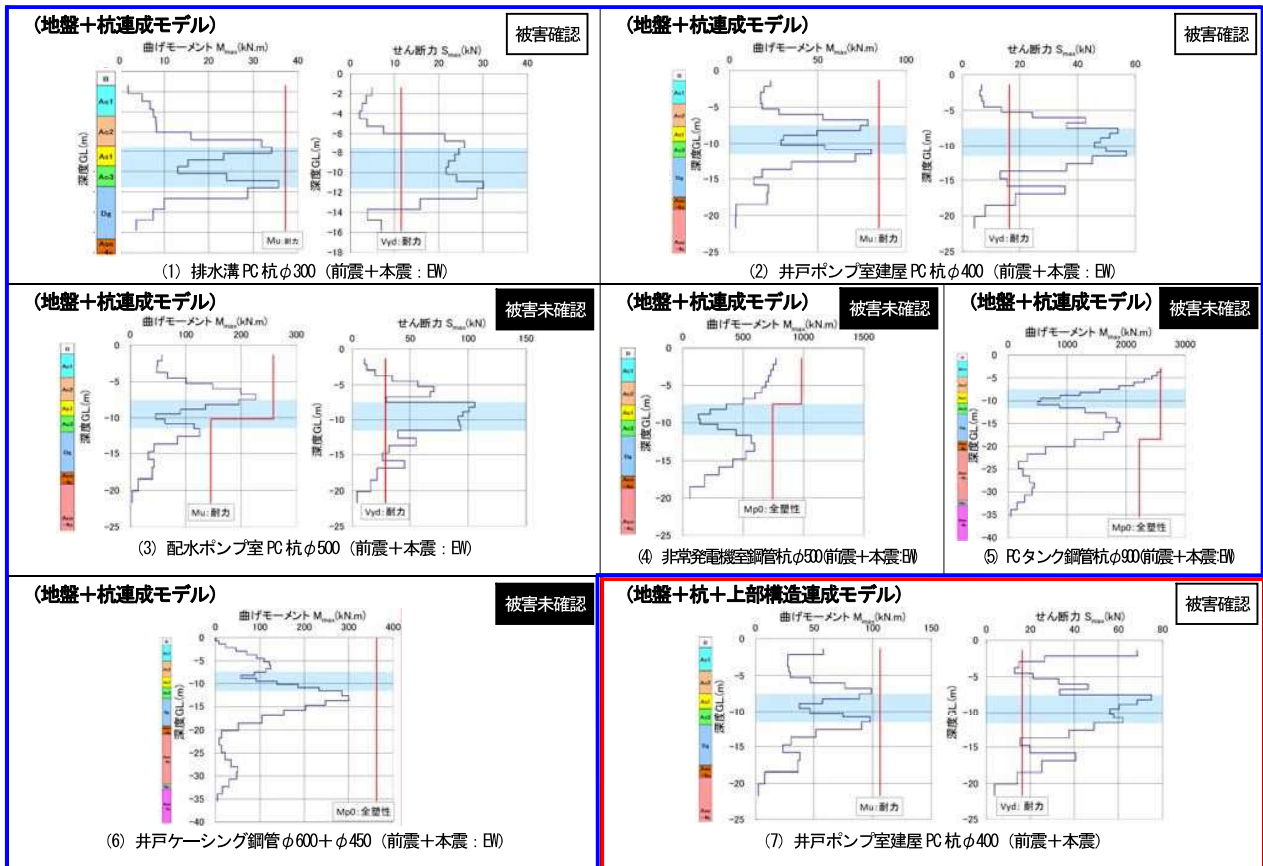


図-11 【杭、井戸ケーシングの耐震計算結果】

(3) 解析結果と考察

各施設の杭，井戸ケーシングの検証解析結果として，PC杭については，地震時（前震+本震）の最大曲げモーメントと最大せん断力の照査結果を図-11に示し，鋼管杭や鋼管を用いた井戸ケーシングについては，地震時の最大曲げモーメントの照査結果を図-11に示す。また，実施設において杭の損傷被害の可能性があると考えた井戸ポンプ室建屋と排水路の杭については，前震～本震の地震継続期間中の水平方向応答変位と応答せん断力の時刻歴の結果を図-12に示す。なお，耐震性能の照査用限界値⁹⁾は，レベル2地震動及び大規模地震動の照査用限界値であり，かつ上部の構造物に変位などが現れると考える損傷レベルに達する曲げ耐力とせん断耐力とした。

これらの検証解析結果の考察を以下に示す。

- 対象とした杭や井戸ケーシングの解析結果として，耐震性能の判定結果は，配水ポンプ室を除いて実際の上部構造物の変位などから推測できる杭や井戸ケーシングの損傷状況と整合した。
- 配水ポンプ室については，構造物の平面規模が大きく，杭本数も非常に多いことから，杭損傷の影響が現れにくく，実際には解析結果と同様に杭に損傷被害が生じていることが考えられる。
- 杭の損傷は全てせん断破壊であり，その破壊箇所は，地盤の地震応答解析結果から推測できた液状化層付近の広い範囲となった。
- 上記のことから，杭はかなり複雑な破壊状態となっており，実際に上部の構造物が傾斜や沈下していることと整合すると考える。
- このような杭のせん断破壊のタイミングは，本震時であり，前震時には，著しいせん断破壊は生じていない。これについても，実際の被害状況と整合する。
- 井戸ポンプ室建屋の杭の解析結果より，地盤—杭—上部構造連成系モデルと上部構造をモデル化しない解析結果は大きく変わらないことから，慣性力の影響よりも地盤の変位による影響がかなり大きく支配的と考える。

以上の考察より，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を中心に広い範囲で甚大なせん断破壊が生じている可能性が高いと考えられる。その要因としては，上部の慣性力の影響ではなく，地盤の変位による影響が支配的と考える。

同様の液状化層にある杭の被害事例として，過去の地震において上部構造物の傾斜が見られた水道池状構造物の杭を引き抜いたところ，写真-5に示すように液状化層全体に渡って杭のせん断破壊とみられる著しい

損傷が確認されている。この事例においても今回と同様の手法を適用し検証解析を行った結果，実際の被害と整合する結果となっている。

このようなことから，液状化層のような大きなひずみを生じる付近の杭の損傷被害は甚大であり，水道施設の水槽構造物や建築物の杭の設計実務においては，設計指針¹²³⁴⁾に沿って従来多く適用される震度法ではなく，地盤のひずみや応答変位を詳しく表現することが重要であり，特に液状化層付近の地盤のひずみ量は地盤の地震応答解析結果などをもとに詳しく評価し，杭などへの地震作用として適切に考慮する必要があると考える。

また，連続する地震の影響により，被害が拡大していることから，液状化層を中心に連続する地震の影響を動的解析などで適切に表現することが必要と考える。

なお，今後のこれらの解析精度を向上するために，予定されている井戸ポンプ室建屋の更新工事には，杭の損傷状況を詳しく調査することを予定している。

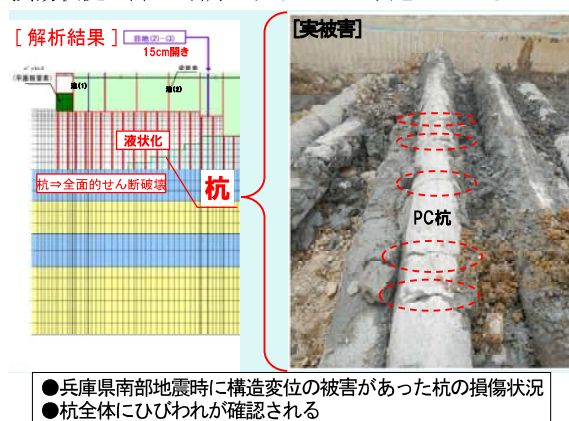
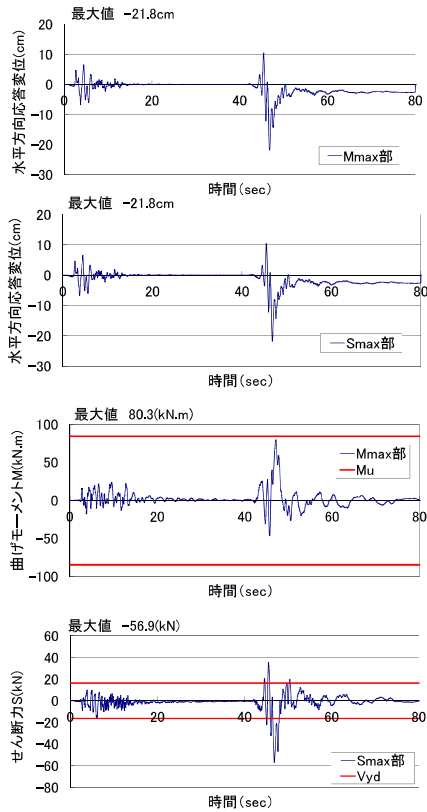


写真-5 液状構造物の杭被害例と解析結果

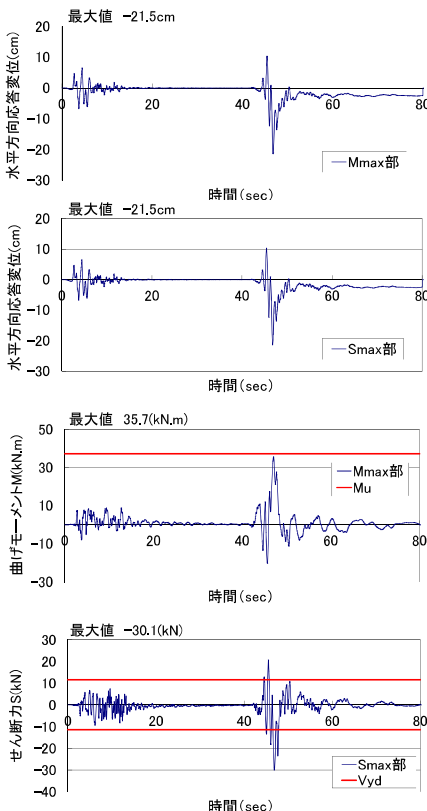
5. 今後の本復旧に向けた最適な耐震設計手法に関する分析と提案

ここでは，熊本市水道局のA水源地やB水源地などの本復旧工事にもなる設計実務や，類似する地盤条件，地震環境条件などにある杭，井戸などの地中構造物の設計実務を対象として，今回のような地震被害を招かない最適な耐震設計手法を提案することを目的に各種分析を行った結果を整理する。

これまでの調査・検討結果などから，今回の地震被害においては連続する地震の影響により，地盤のひずみ量増大に伴う杭の被害が発生（又は拡大）したと考えたが，それを確認するために，前震単独，本震単独を想定した場合の杭の耐震計算を実施し，前震+本震の計算結果との比較を行った。



(1) 井戸ポンプ室建屋 PC 杭φ400 (前震+本震: B)



(2) 排水溝 PC 杭φ300 (前震+本震: B)

図-12 時刻歴応答結果

(1) 連続する地震動の影響について

比較の対象は、実際に地震被害が生じたと考えるA井戸ポンプ室建屋の杭とし、解析モデルや条件については検証解析と同じものとした。

計算結果として、杭の発生最大曲げモーメントと最大せん断力を図-13に示す。

図-13に示すように、前震単独の場合と本震単独の場合の発生断面力は、前震+本震の場合と比べて液状化層付近においてかなり小さくなった。そのため、杭においてせん断破壊が生じる結果は変わらないが、破壊の程度には大きな違いがあると考えられ、杭の材料条件によっては、前震単独や本震単独では曲げ破壊やせん断破壊が生じないものの、連続地震を考慮することで曲げ破壊やせん断破壊が生じることがあると考える。

これらの結果から、特に液状化層の過剰水圧が消散しにくいなど、地震の影響により低下した地盤の剛性が回復しにくい地盤条件においては、従来の水道施設における耐震設計時に想定することのない連続地震の影響を想定する必要があると考える。

(2) 水道施設の杭・井戸の耐震設計手法について

a) 現在の各種耐震基準の概要

水道施設として使用される構造物の耐震設計基準として、今回、地震被害が確認された井戸ポンプ室建屋の杭に関しては、建築構造物であることから建築基準法や、それを基にした具体的な基準書として建築基礎構造設計指針⁷⁾などが適用される。また、水道施設であることから水道施設耐震工法指針¹⁾も適用される。今回の地震で被害があったと考える水管橋の橋台や水道池状構造物などの土木構造物の杭には道路橋示方書³⁾が適用される。井戸については、水道施設耐震工法指針¹⁾が

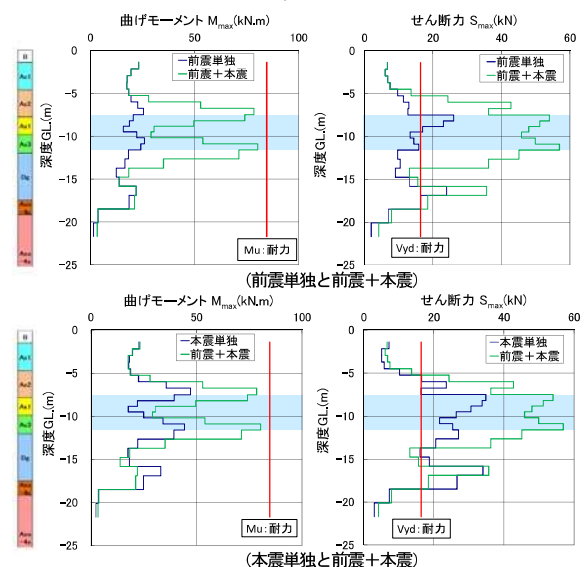


図-13 【連続地震と単独地震の比較】

井戸ポンプ室建屋PC杭φ400

適用される。設計実務においては、基本的にはこれらの各種基準を従うが、設計者判断の部分も多い。

そこで、実務者の視点から設計実務に適用されることが多い手法を整理すると、杭の耐震設計法に関しては、今回の井戸ポンプ室建屋の場合は、基本的には建築基準法⁴⁾に準拠し、中地震を対象に構造物の慣性力を地震作用とする震度法を適用し耐震計算を実施するケースが多い。建築基礎構造設計指針⁹⁾では、地盤変位が大きく変化する箇所などでは地盤の変位を考慮することが望ましいと記述されているが、実務においてはこのような対応を行うことは徹底されておらず稀である。また、水管橋の橋台や池状構造物の場合は、道路橋示方書を適用し、レベル1、レベル2地震を対象に構造物の慣性力を地震作用とする震度法や保有水平耐力法を適用し耐震計算を実施するケースが殆どである。道路橋示方書⁹⁾では、上部構造物の慣性力の影響が支配的であるから地盤の変位は考量しないこととしている。なお、水道用井戸については、水道耐震指針などにおいても耐震設計法に関する記述はない。

このようなことから、設計実務を行う場合を想定し、これらの現行の耐震基準に従い、井戸ポンプ室建屋の杭や井戸ケーシングの耐震計算を実施し、今回の地震被害に対する現行の耐震基準の適応性などについて考察を行った。

b) 現行の建築構造物の耐震基準を適用した場合の耐震計算手法の分析

井戸ポンプ室建屋の杭を対象として、現行の建築構造物の耐震基準を適用した場合の耐震計算条件を表-1に示し、耐震計算結果を図-14に示す。

図-14に示す耐震計算結果より、現行の耐震基準に準拠し設計実務において多く使用されている耐震設計法を適用した場合、杭は所定の耐震性能を十分に満足する結果となった。これは、実際に地震被害と、地盤—杭連成系モデルを用いて地盤ひずみを詳しく評価した検証解析の結果とは異なることとなった。

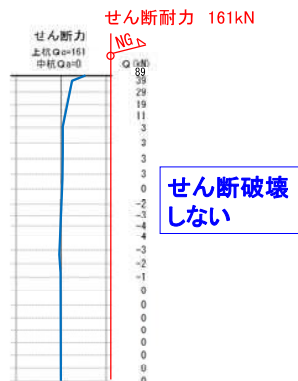


図-14 震度法による杭の耐震診断結果
(建築基準を適用した場合)

表-1 耐震計算条件 (建築構造物の基準適用の場合)

耐震計算法	震度法 (静的線形解析)
解析モデル	杭単独モデル, 地盤バネモデル
杭への地震作用	杭頭部に上部構造物の慣性力を作用
設計地震動	水平震度 (上屋) 0.2 (基礎) 0.1
液状化の影響	FL 値に応じて横地盤反力係数などの地盤定数を低減

この要因としては、震度法における杭への地震作用は上部構造物の慣性力のみであり、地盤変位を考慮していないことと考えられるが、今回の実際の地震被害を踏まえると、構造条件 (例えば上部構造物の荷重が比較的小さい等) や地盤条件 (地層境界部のひずみが大きい地盤等) によっては、杭の耐震計算において地盤変位を適切に考慮することが重要と考える。

c) 現行の水道池状構造物の耐震基準を適用した場合の耐震計算手法の分析

井戸ポンプ室建屋の杭を対象として水管橋の橋台や池状構造物の杭の耐震設計をイメージし、現行の道路橋示方書の耐震基準を適用した場合の耐震計算条件を表-2に示し、耐震計算結果を図-15に示す。

表-2 耐震計算条件 (水管橋の橋台や池状構造物 (道路橋示方書適用の場合))

耐震計算法	震度法 (静的線形解析, レベル 2 地震は構造物特性係数考慮)
解析モデル	杭単独モデル, 地盤バネモデル
杭への地震作用	杭頭部に上部構造物の慣性力を作用
設計地震動	(レベル 2 地震動) 水平震度 0.36 (構造物特性係数考慮)
液状化の影響	FL 値に応じて横地盤反力係数などの地盤定数を低減

図-15に示す耐震計算結果より、現行の耐震基準に準拠し設計実務において多く使用されている耐震設計法を適用した場合、杭は所定の耐震性能を満足する結果となった。これは、実際に地震被害と、地盤—杭連成系モデルを用いて地盤ひずみを詳しく評価した検証解

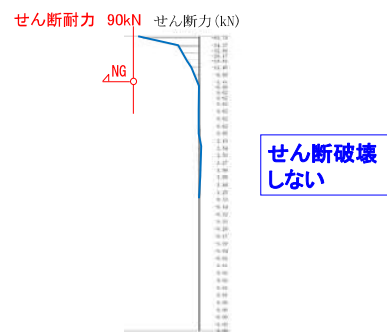


図-15 震度法による杭の耐震診断結果
(液状構造物の耐震基準を適用した場合)

析の結果とは異なる結果となった。

この要因としては、震度法における杭への地震作用は上部構造物の慣性力のみであり、地盤変位を考慮していないことと考えられるが、水道施設に多く使用されている水管橋や池状構造物についても、道路橋に比べ上部荷重が小さく、特に池状構造物はアスペクト比が大きいことなどを踏まえると、これらの構造物への慣性力の影響は道路橋に比べて支配的なものにはならない傾向があると考えられる。そこで、水管橋や池状構造物についても、道路橋示方書に準拠するだけではなく、構造条件や地盤条件によって、杭の耐震計算において地盤変位を適切に考慮することが重要と考える。

d) 井戸ケーシングが1重管の場合の耐震性能の分析

熊本市のA水源地の井戸ケーシングについては、施工上の理由により図-8に示すように二重管構造となっており、地表部分において結果的に地盤の変位などの地震作用に対して有効な構造となっている。但し、これまでに井戸ケーシングの耐震設計法について詳しく整理されたものがないこともあり、全国的には一重管のケーシングとすることが多い。

そこで、今回、検証解析を実施した二重管の井戸ケーシングを内側φ450の1重管ケーシングとした場合を想定し、検証解析と同様に地盤一杭連成系モデルを用いた動的解析（有効応力解析）を実施し、その耐震性能を評価した。耐震計算結果を図-16に示す。

図-16に示す耐震計算結果より、井戸ケーシングを一重管とした場合、所定の耐震性能を満足せず井戸ケーシングは大きく塑性化する結果となった。二重管の場合は、実際の地震被害が確認されていないことと、検証解析においても所定の耐震性能を満足する結果とは異なる結果となった。

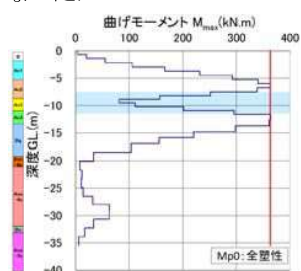


図-16 【耐震計算結果】井戸ケーシング鋼管
φ450 一重管の場合（前震+本震：EW）

このようなことから、熊本市ではA水源地やB水源地の井戸の設計においては、今回、地震被害を免れた井戸ケーシングの構造を参考に今後の耐震設計を実施すべきと考える。また、現行では具体的な耐震設計手法が整理されていないものの、今後は井戸施設についても、地盤の応答変位を適切に考慮できるよう耐震設計の指針類を整理することが重要で有ると考える。

6. まとめ

本調査では、顕著な鉛直方向・水平方向の地盤変位などに伴う管路被害や構造物の杭被害により、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。また、連続する強い地震は、液状化による地盤変位の著しい増大を招くことなどにより、地震被害をさらに拡大することも確認できた。そのため、今後の水道施設の耐震化事業においては、現行の関連する耐震基準や耐震指針類が、これらの被害の評価や対策について記述してなくても、設計実務では設計者の判断により適切に対応することが必要である。

特に今回注目したA水源地やB水源地では、杭や井戸ケーシングにおいて、液状化層と非液状化層の境界付近などの地盤変位が大きくなる場合や、液状化層の過剰間隙水圧が消散しにくく地盤の剛性が戻りにくい地盤条件下において連続する地震の影響がある場合は、上部構造物の慣性力ではなく地盤変位の影響が支配的となり、杭の甚大な被害を招くことを確認した。そのため、今後の水道施設における構造物の杭や井戸ケーシングの耐震設計においては、地盤条件や構造条件、及び地震条件などを十分に分析し、地盤の変位を積極的に考慮することが重要と考える。そして、現行の水道施設耐震工法指針では水道施設において水管橋や池状構造物の杭の耐震計算法を道路橋示方書に準拠し震度法の採用を推奨している点や、井戸ケーシングの耐震設計法に関する記述がない点、さらに連続する地震の影響について記述がない点など見直す余地があるものとする。

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) 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。
- 2) 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。
- 3) 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。
- 4) 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。

- 5) 上村靖司：中越沖地震における消雪施設の被災状況とその特徴，長岡技術科学大学 HP
6) 阪神水道企業団により提供
7) 公益社団法人日本建築学会，2001.
- 8) 公益社団法人日本建築学会，2001.， P.264
9) 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.， P.106
(2017. 9. 7 受付)

SEISMIC DAMAGE ANALYSIS OF WATER SUPPLY FACILITIES CAUSED
BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKES PART 2:
VERIFICATION OF PILES AND WELLS SEISMIC DAMAGE,
AND THE ISSUES OF THE CURRENT SEISMIC DESIGN METHOD

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 piles and well casings inside water distribution stations in water supply well areas, which are very important for the water supply system of Kumamoto City.