

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月14日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2008～2011

課題番号：20310108

研究課題名（和文） 長周期・長継続時間地震動による貯水槽スロッシングが配水システムに及ぼす被害予測

研究課題名（英文） Damage estimation of Water Distribution System by Sloshing of Water in Receiving Tank induced by Long Period and Long Duration Seismic Motion

研究代表者

宮島 昌克 (MIYAJIMA MASAKATSU)

金沢大学・環境デザイン学系・教授

研究者番号：70143881

研究成果の概要（和文）：地震発生直後に管路に直接的な被害が無くとも急激な流量の増加と水圧の低下といった配水システムにおける異常事態に着目し、被害地震が発生した際にアンケート調査を大規模水道事業体に行った。さらに、この現象が貯水槽の水のスロッシングによる水位センサーの誤作動によるものであることを明らかにし、今後発生する巨大地震による長周期・長継続時間地震動が配水システムの異常挙動に与える影響を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：The present study focuses on an abrupt increase in flow rate and a decrease in water pressure of water distribution system in spite of no damage to pipeline during an earthquake. First, a questionnaire survey on unusual behavior of water distribution system during an earthquake was conducted to large-scale waterworks bureaus in Japan. We clarified that sloshing of water in receiving tank induced by a long period, long duration seismic motion induce an error of water level sensor in a receiving tank. Effect of a long period, long duration seismic motion by mega earthquake to water distribution system was discussed.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	4,200,000	1,260,000	5,460,000
2009年度	3,000,000	900,000	3,900,000
2010年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2011年度	2,500,000	750,000	3,250,000
年度			
総計	12,300,000	3,690,000	15,990,000

研究分野：地震工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：長周期地震動，上水道，スロッシング，貯水槽，救命ライフライン

1. 研究開始当初の背景

2003年十勝沖地震（M 8.0）においては震源から遠く離れた苫小牧港の石油タンクの原油がスロッシング現象を起こし、越流することにより火災が発生した。これは、巨大地震の際に顕著になる長周期地震動によるも

のと考えられている。現在、南海トラフ地震の発生が危惧されており、巨大地震となる可能性が高いため、長周期地震動による石油タンクの原油のスロッシングや超高層ビル、長大橋梁の共振現象に関する検討が活発に行われている。

長周期地震動によるスロッシング現象は、

石油タンクの原油に限った現象ではなく、その卓越周期によるが、プールや浴槽の水でも地震時のスロッシング現象が確認されている。また、地震の継続時間が長いとスロッシングが成長することが知られており、長継続地震動においては振幅が十分に大きくなくても同様の現象の生じることが予想される。

このような現象が上水道の貯水槽で起こった場合、貯水槽には水位が下がったときに強制引水を行い貯水槽内に水を補給するための水位センサーが付いているので、スロッシング現象により自由水面が大きく震動すると、水位センサーが誤判断し、一斉に強制引水を起こす可能性が考えられる。その結果、水道管路網の流量が急増するとともに水圧が低下し、大規模漏水が発生したのと同様な挙動となり、本当の漏水箇所の把握が困難になるとともに、消火用水や救命給水にも重大な支障をきたす恐れのあることが危惧される。

このような背景から、長周期・長継続時間地震動によって上水貯水槽の水がスロッシング現象を起こし、強制引水を開始する条件をまず明らかにし、つぎに、同時に多くの貯水槽が強制引水を行ったときに上水道システムに及ぼす影響を検討し、さらに、救命ライフラインといわれる消火、医療給水に及ぼす影響を検討することが急務の課題となっている。

2. 研究の目的

まず、大地震直後に大規模漏水が発生していなくても水圧低下と流量増加といった配水システムの異常挙動が生ずることがあるが、この現象が貯水槽の強制引水によるものであることを確認する。長周期・長継続時間地震動によって上水貯水槽の水がスロッシング現象を起こし、強制引水を開始する条件を解析により明らかにし、同時に多くの貯水槽が強制引水を行ったときに上水道システムに及ぼす影響を検討することを目的とする。

3. 研究の方法

2007年能登半島地震と新潟県中越沖地震の際に水道配水システムに急激な流量増加、水圧低下という異常挙動が発生していなかったかを大規模水道局を対象にしたアンケート調査を通して明らかにするとともに、観測されている地震動記録を解析し、卓越周期、継続時間と異常挙動の発生の有無との関係

を検討した。さらに、研究期間中に発生した、2008年岩手・宮城内陸地震、2011年東北地方太平洋地震の際にも同様な調査を実施した。

卓越周期、継続時間をパラメタとして貯水槽模型を用いたスロッシングの振動実験を実施し、両パラメタとスロッシング高さとの関係を定量的に明らかにした。一方、ハウスマー博士が提案したスロッシング高さを評価する簡易式に、想定地震波形を用いてさまざまな大きさの貯水槽のスロッシング高さを検討し、振動実験結果と比較した。さらに、継続時間がスロッシング高さに及ぼす影響を定量的に評価するために、VOF法 (Volume of Fluid Method) を用いた動的解析を行った。

4. 研究成果

まず、水供給システムにおいて多地点で流量や水圧の経時変化を観測している、比較的大規模な水道事業体に対して、2007年能登半島地震、新潟県中越沖地震、2008年岩手・宮城内陸地震の発生時の配水システムの異常挙動に関するアンケート調査を実施した。異常の有無とともに、異常が顕著であった地域の住環境特性や配水地域にある貯水槽の大きさと数などに注目して調査票を作成した。それらを集計し、異常挙動の発生する条件について検討した。さらに、配水区域で比較的多くの地震動記録が得られている仙台市水道局の岩手・宮城内陸地震の例をケーススタディとして詳細な分析を行った。すなわち、配水ブロックごとの貯水槽の容量とそれぞれの数を調査するとともに、近接する強震観測点の地震記録における卓越周期、継続時間と異常挙動の発生程度などについて分析した。その結果、貯水槽の容量が大きいと異常挙動の程度が必ずしも大きいとは限らず、地震動の卓越周期と貯水槽のスロッシング卓越周期の関係も関与していることが示唆された。さらに、速度応答スペクトルを用いて貯水槽の卓越周期との関係から液体のスロッシング高さを求める、ハウスマー博士が提案した簡易式により、貯水槽で発生しうるスロッシングの高さについても検討した。

つぎに、大阪市水道局の上水道システムを対象に、強制引水が水道システムに及ぼす影響に関するケーススタディを行った。すなわち、まず大阪市の対象地区を選定し、対象地区における上水貯水槽の空間分布を調査し、強制引水の条件付発生確率に基づいて、想定地震における強制引水量とその空間分布を推定した。想定地震による強制引水が発生し

た場合について管網解析を行い、強制引水が発生しない場合と、管網内の流量、水圧の分布を比較、検討した。ここでの解析は、ハウズナー博士が提案した簡易式により、貯水槽で発生しうるスロッシングの高さを計算したので、地震動継続時間の影響を考慮できなかったが、解析結果と実測結果は非常に良い対応を示した。

ハウズナー博士が提案したスロッシング高さを求める簡易式では、巨大地震の際に問題となると考えられている地震動継続時間が非常に長くなる場合については十分には考慮できないので、VOF法を用いた3次元時刻歴スロッシング解析手法を構築した。解析結果の精度を検証するために、水槽を用いたスロッシング振動実験を行い、相互のスロッシング高さを比較したところ、図1に示すように、良い対応が得られた。そこで、これまでに配水システムの異常挙動が報告されている地震と、報告されていない地震の観測地震動波形を用いてVOF法を用いた3次元時刻歴スロッシング解析を行った。その結果、VOF法を用いたスロッシング解析は、地震時の矩形水槽のスロッシング挙動を分析する上で有効であることを確認するとともに、スロッシングの継続時間もスロッシングの最大水面変位とともに、配水システムの異常挙動発生と相関があることが明らかとなった。今後は、3次元解析の利点を活用して、水位センサーの最適設置位置を検討し、水位センサーの誤作動対策を検討することが望まれる。

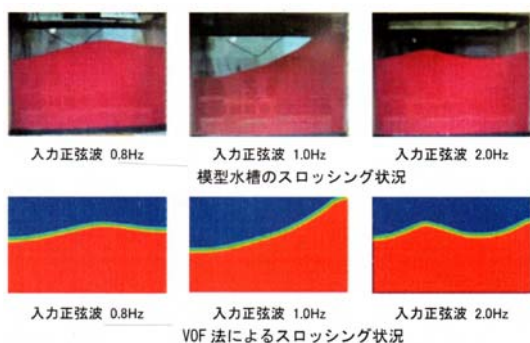


図1 VOF法による解析結果と振動実験結果のスロッシング形状の比較

2011年東北地方太平洋沖地震が発生したことにより、申請時の計画を一部変更し、比較的大規模な水道事業体に対して、2011年東北地方太平洋沖地震時の配水システムの異常挙動に関するアンケート調査を実施した。その結果、震度6弱が観測された仙台市や震度5強千葉県で配水システムの異常挙動が観測されたのみならず、震度4であった名

古屋市や震度3大阪市でも異常挙動が観測されたことが明らかとなった。したがって、異常挙動は地震動の大きさだけによるものではないことが、再認識された。観測されている地震動記録も同時に収集し、卓越周期、継続時間と異常挙動の発生の有無との関係を検討した。地震波形を直接用いたスロッシング解析を、2011年東北地方太平洋沖地震にて記録された地震波形を用いて実施し、周期及び継続時間と最大スロッシング高さとの関係を考察した。その結果、今回の地震の特徴のひとつである、長継続時間がスロッシングに及ぼす影響を定量的に明らかにすることができた。

今後は、発生が危惧されている南海トラフ地震の際に卓越周期や継続時間の違いによって、異常挙動の程度がどの程度異なるのか、どのような地盤構造の地域において異常挙動が顕著になるのかについて検討するとともに、異常挙動の程度と救命ライフラインといわれる消火、医療給水に及ぼす影響の関係を定量的に検討することが重要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計15件)

- 1) Miyajima, M.: Damage to water supply system induced by the 2011 great east Japan earthquake, Proceedings of International Symposium on Engineering Lessons Learned from the Giant Earthquake, 査読無, pp. 1467-1474, CD-ROM, 2012.3.
- 2) Miyajima, M.: Damage to water supply facilities during the 2011 great east Japan earthquake and tsunami, Proceedings of the 9th International Symposium on Mitigation of Geo-disasters in Asia, 査読無, pp. 185-190, 2011.12.
- 3) Miyajima, M.: Lessons from the 2011 Great East Japan Earthquake and Tsunami disasters, Proceedings of 7th Japan-US-Taiwan Workshop on Water System Seismic Practices, 査読無, 7p. CD-ROM, 2011.10
- 4) Nakai, M. and Miyajima, M.: Risk assessment of shutdown of water purification plant caused by Tohankai-Nankai earthquakes tsunami

- surge, Proceedings of the 11th International Conference on Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering, 査読有, pp. 2020-2025, 2011. 8.
- 5) 村田幸一, 水崎洋佑, 宮島昌克: 上水道配水システムの地震時異常挙動のための受水槽のスロッシング解析, 第13回日本地震工学シンポジウム論文集, 査読無, pp. 1752-1757, 2010. 11.
 - 6) 中井正人, 宮島昌克: 東南海・南海地震による浄水場のリスクに関する一考察(その2), 土木学会論文集 A1 [特] 地震工学論文集, 査読有, Vol. 66, No. 1, pp. 310-316, 2010. 10.
 - 7) 能島暢呂: 破壊要素の相関性を考慮したネットワーク最大フロー評価のシミュレーション, 地域安全学会論文集, 査読有, Vol. 11, pp. 183-192. 2009.
 - 8) 中井正人, 宮島昌克, 遠田智生: 地震動が砂ろ過プロセスに与える影響に関する一考察, 土木学会安全問題研究論文集, 査読有, Vol. 4, pp. 65-70, 2009. 11.
 - 9) Miyajima, M. and Murata, K.: Effects of sloshing of water in receiving water tank on water distribution system during earthquake, Proceedings of the sixth Taiwan-US-Japan Workshop on Water System Seismic Practices, 査読無, pp. 101-108, 2009. 10.
 - 10) 能島暢呂: 脆弱性指数を用いたライフライン網の地震時脆弱性評価～上水道配水管網への適用～, 地域安全学会論文集, 査読有, Vol. 10, pp. 137-146. 2008.

[学会発表] (計4件)

- 1) 坪川俊行, 宮島昌克: 東北地方太平洋沖地震における配水システムの異常挙動, 第63回全国水道研究発表会, 島根県立産業交流会館(島根県), 2012. 5. 17.
- 2) 水崎洋佑, 宮島昌克, 村田幸一: VOF法を用いた長周期地震動による受水槽のスロッシング解析, 平成21年度土木学会中部支部研究発表会, 金沢工業大学(石川県), 2010. 3. 1.
- 3) 谷津成輝, 宮島昌克, 中井正人: 地震動が浄水処理プロセスに与える水質的影響に関する実験, 平成21年度土木学会中部支部研究発表会, 金沢工業大学(石川県), 2010. 3. 1.
- 4) 仙福太郎, 宮島昌克, 村田幸一: 2008年岩手・宮城内陸地震による長周期地震動が配水システムに及ぼした影響, 第27回日本自然災害学会学術講演会, 九州大学(福岡県), 2008. 9. 26.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮島昌克 (MIYAJIMA MASAKATSU)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 70143881

(2) 研究分担者

清野 純史 (KIYONO JUNJI)
京都大学・工学研究科・教授
研究者番号: 00161597

能島暢呂 (NOJIMA NOBUOTO)
岐阜大学・工学部・教授
研究者番号: 20222200

鶴来 雅人 (TSURUGI MASATO)
(財)地域地盤環境研究所・地震防災グループ・グループリーダー
研究者番号: 60450912

吉田 雅穂 (YOSHIDA MASAHO)
福井工業高等専門学校・環境都市工学科・教授
研究者番号: 90210723

池本 良子 (IKEMOTO RYOKO)
金沢大学・環境デザイン学系・教授
研究者番号: 40159223