

モンテカルロシミュレーションによる 水道供給システムの地震時異常挙動分析

村田幸一¹・宮島昌克²

¹大阪市水道局工務部柴島浄水場 (〒533-0024 大阪市淀川区柴島1-3-14)

E-mail: murata_kouichi@nifty.com

²金沢大学大学院自然科学研究科教授 (〒920-1192 石川県金沢市角間町)

E-mail: miyajima@t.kanazawa-u.ac.jp

水道供給システムでは地震が発生した直後、システムに物理的なダメージが無くても急激な流量増加と水圧減少という異常挙動現象が発生することがある。この異常挙動現象は、大規模漏水が発生した現象に酷似しており、管路被害による漏水なのか異常挙動によるものかを確認することが困難であるため、地震被害把握等の災害復旧過程における初動体制確立に影響を及ぼす可能性がある。本論文では、これらの原因と考えられるやや長周期地震動による受水槽のスロッシングと異常挙動の関係について考察するとともに、モンテカルロシミュレーションを用いた管網計算により、水道供給システムへの影響を定量的な分析を行った。

Key Words : Water Distribution System, Sloshing, Lifeline, Montecarlo simulation, Long-period Seismic Motion

1. はじめに

我が国は、世界でも有数の地震多発地帯であり、兵庫県南部地震以降、震度5以上を記録する地震が短期間に多発している状況である。特に震度5強を超える地震は、震源距離が200km以上離れた遠隔地にも長周期成分を伝播しており、広範囲の地域において有感地震として観測される。

大阪市の場合、このような地震においては水道施設への直接的な被害はなかったものの、地震発生直後から急激な流量増加と水圧減少といった異常挙動が発現した。図-1は2004年9月5日に発生した紀伊半島南東沖の地震発生直後の市内配水圧状況を示したものであり、図中の各線は各配水ポンプ場における水圧を示している。地震発生直後から急激な配水圧の減少が20分近く発生し、水道供給システムに影響を及ぼす結果となった。これらの異常挙動は紀伊半島南東沖の地震のみの現象ではない。表-1は大阪市における過去の地震発生直後の異常挙動について調査した結果であり、このような異常挙動は鳥取県西部地震や芸予地震等においても確認されている。また、東京都¹⁾においても過去に同様な異常挙動が確認されており、地震発生直後に再現性の高い現象であるといえよう。これら地震発生直後の水道供給システムの異常挙動現象は、大規模漏水が発生した現象に酷似しており、地震時にこの現象が発生した場

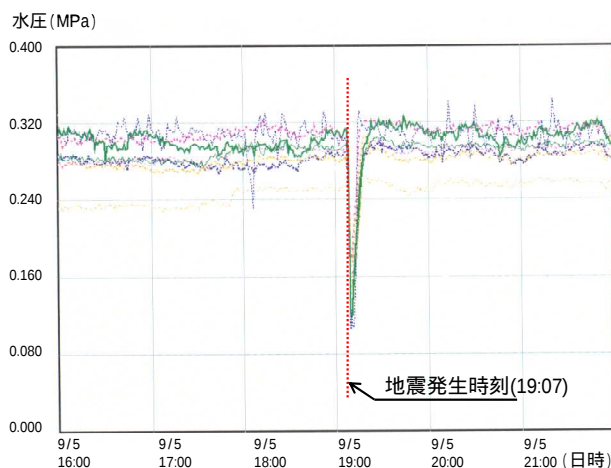


図-1 紀伊半島南東沖の地震発生直後の市内配水圧

表-1 過去の地震履歴と異常挙動の関係

	鳥取県西部	芸予	京都府南部	紀伊半島沖(1)	紀伊半島沖(2)
発生日	2000/10/6	2001/3/24	2001/8/25	2004/9/5	
発時刻	13時30分	15時28分	22時21分	19時07分	23時57分
震源	鳥取県西部	安芸灘	京都府南部	紀伊半島南東沖	
マグニチュード	7.3	6.7	5.3	6.9	7.4
大阪市における震度	震度4	震度2	震度3	震度4	震度4
異常挙動発生	あり	あり	なし	あり	あり

合、管路被害による漏水なのか異常挙動によるものか即座に確認することが困難である。これらの確認の遅れが災害時における配水管理を一時的に不能とさせ、復旧時の初動体制確立の遅れとなる可能性がある。

表-1に示すように京都府南部での地震では震度3であるにもかかわらず異常挙動が発生しなかった反面、芸予地震のように震度2でも発生していることから、地震直後の水道供給システムの異常挙動には、地震動の強さだけでなく、地震動の振動数特性も寄与しているのではないかと考えられる。

各地震動の振動特性を分析するために、大阪市水道局大淀配水場に設置した地震計で観測された地震波形を用いて速度応答スペクトルを求めた。表-1で挙げられている各地震の速度応答スペクトルを図-2に示す。異常挙動の発生が確認されている鳥取県西部地震、芸予地震および紀伊半島南東沖の地震において、1秒以上のやや長周期の振動成分が卓越している一方、異常挙動の発生が確認されなかった京都府南部を震源とする地震については、1秒以下の振動成分が卓越しており、他の地震に比べ卓越周期帯が短いことが判明した。これらの応答スペクトルから、地震発生直後に発生する水道供給システムの異常挙動は、周期1秒以上の地震動すなわちやや長周期の地震動が間接的に水道供給システムへ影響を及ぼしていると推測される。やや長周期の地震動に関する研究はこれまでも行われており、1964年新潟地震、1983年日本海中部地震、2003年十勝沖地震の際に石油タンク内の液体が長周期成分によりスロッシングを生じたことが研究されている²⁾³⁾。

水道供給システムに置き換えた場合、給水設備の一つである受水槽が石油タンクと同様に自由水面を有している構造であり、特に、受水槽は水位センサーによって引水制御しているため、図-3に示すようにスロッシングによって水位センサーが誤動作し、補充引水が行われた可能性が高いと考えられる。図-4は大阪市咲洲地区における受水槽実態調査によるデータから、受水槽の1次スロッシング固有周期を求め、累積度数として示したものである⁴⁾。長辺側での1次スロッシング固有周期は、80%以上の受水槽が1秒以上の周期を有する結果であり、図-2に示すような紀伊半島南東沖の地震をはじめとする給水システムの異常挙動が発生した時の地震動における卓越周期帯と合致しており、受水槽のスロッシングが異常挙動に深く関与しているといえよう。これまでの研究では、地震発生直後に発生する受水槽のスロッシングが配水システムの異常挙動に強く起因することは想定できるものの、果たして受水槽のスロッシングが引き金となって受水槽が誤動作引水を行い、配水システムに影響をしているのかについては、定量的な立証までには至っていない。本論文では、前述した地震時における配水システムの異常挙動原因の仮説に基づき、地震発生直後の受水槽による誤動作引水の発生しているときの需要形態をモンテカルロシミュレーションにより再現し、そのデータを元に管網

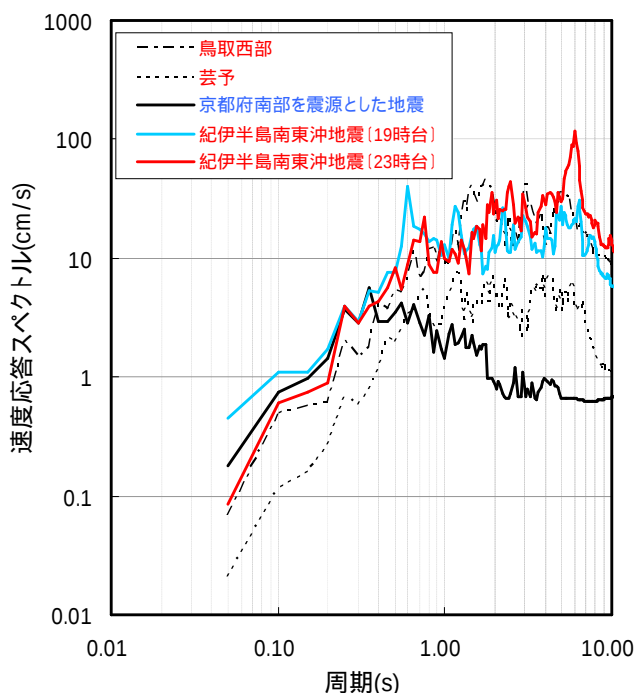


図-2 各地震における速度応答スペクトル

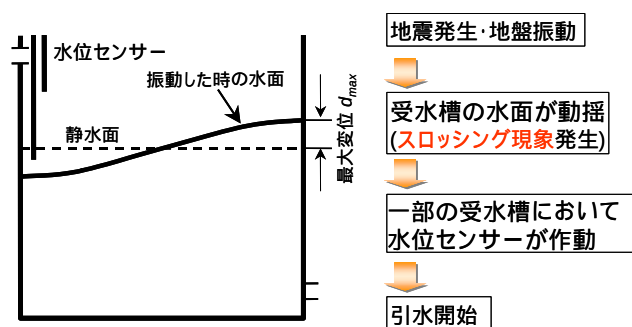


図-3 受水槽の誤動作引水までの流れ

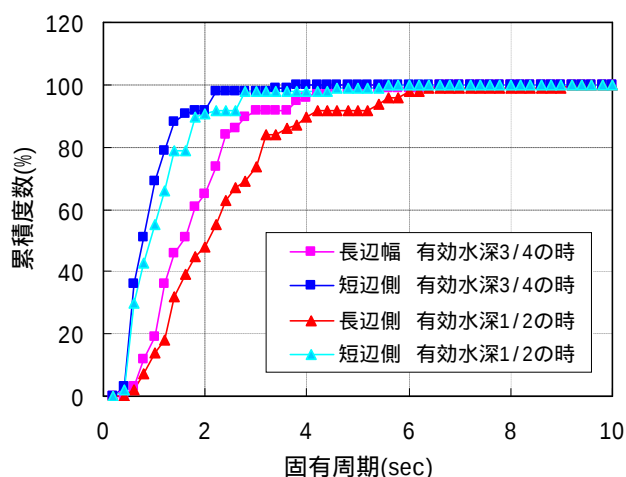


図-4 受水槽の1次固有周期累積度数分布

計算を行い、配水量並びに水圧の変動について検討した。また、このシミュレーションによって、紀伊半島南東沖の地震をはじめとする地震動がどのような異常挙動を発生させるかを定量的に比較検討を行い、対応を検討した。

2. 解析手法とモデル設定

(1) 解析手順

地震発生直後の配水システムの異常挙動原因を把握するためには、スロッシングによる変動量を検討するだけでは不十分であり、その変動量に伴って発生する受水槽の誤動作引水が、どのような規模で発生するかどうかを精査した上で、市内の配水管網の水圧状況や流量状況を検討する必要がある。

しかしながら、スロッシングによる水面変位量は同じ地震動においても受水槽の水深により変動することから、受水槽の誤動作引水の検討に当たっては、受水槽モデルの設定とともに地震発生直後の受水槽の水深変動についても考慮が必要である。しかし、受水槽の水深は需要に応じて水位が常に変動していることから、解析を実施するために一般的な受水槽の水深を決定することは不可能でもある。

本研究では、給水区域に点在する受水槽の水深が一様分布で近似できると仮定し、モンテカルロシミュレーションを用いてランダムに受水槽の水深を設定し、スロッシングによる水面変位量の推定値を評価した。なお、これらの解析手順を図-5に示す。

(2) 管網モデル

本論文については、モデル管網の作成に当たり、受水槽の実態調査を行った咲洲地区を含む咲洲配水場の給水区域を解析対象とした。図-6は大阪市における咲洲地区の位置と当該地の管網図スケルトンを示したものである。

(3) 解析に用いた受水槽モデル

受水槽とは、図-7で示すように、市内に巡らされた配水管から水道水を引水し、一時的に貯留する設備で、一般的に集合住宅等の大口需要家で設置している。受水槽の形状は、その需要形態に応じた必要水量や敷地形状によって、様々な寸法で設置使用されている。本研究では、異常挙動の解析に当たり、

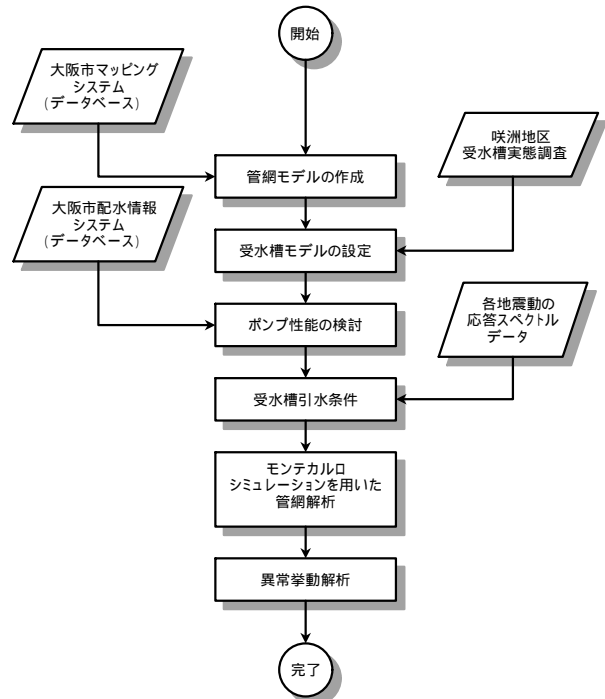


図-5 解析手順の流れ

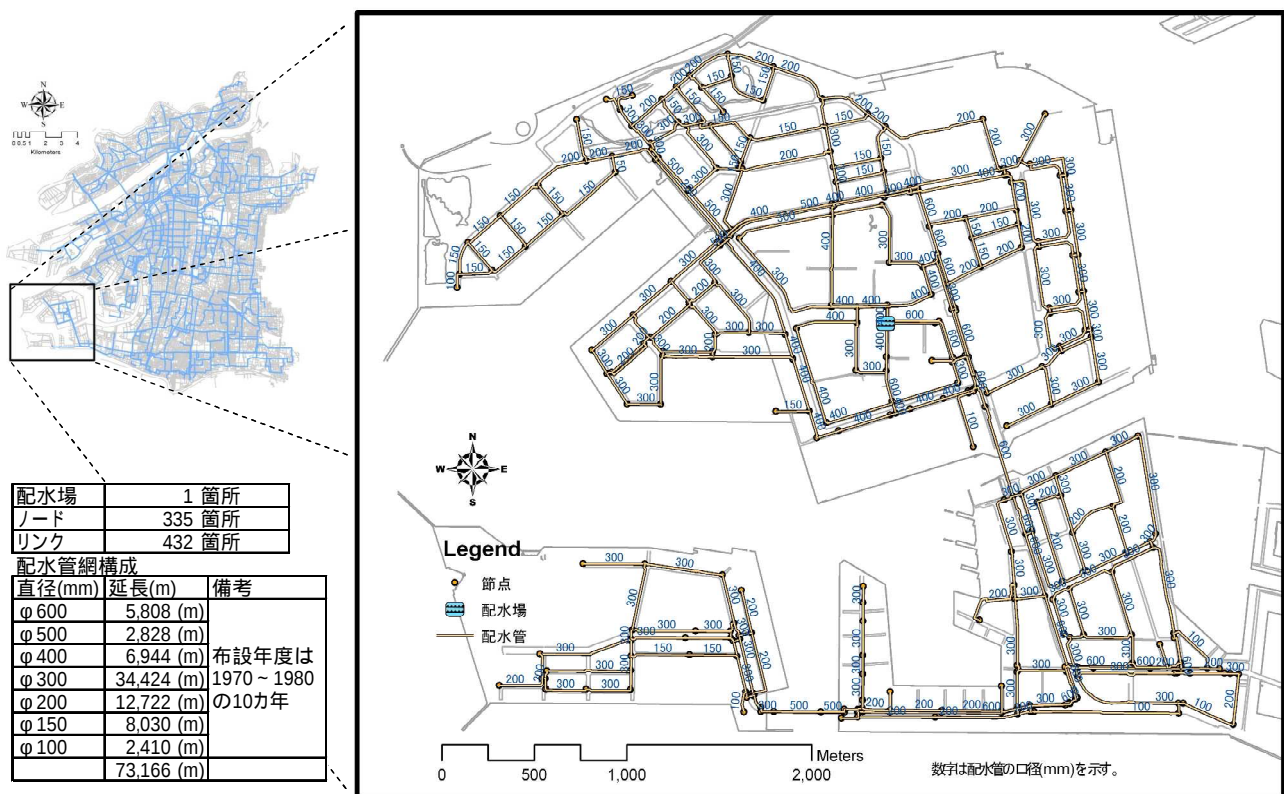


図-6 管網モデル

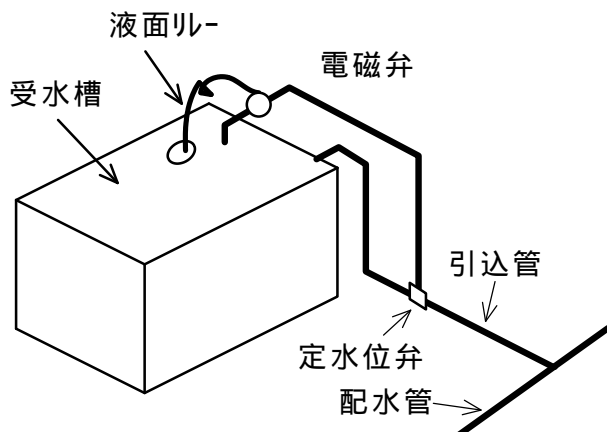


図-7 配水管から受水槽までのイメージ図

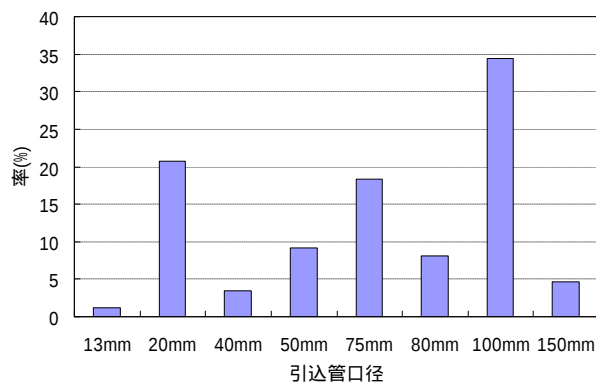


図-8 引込管口径率

咲洲地区における受水槽のフィールド調査から得られた受水槽容量や寸法を基に、平均的な受水槽モデルとして、有効水深4.00m×幅3.60m×奥行き5.70mと設定した。また、引水条件については、一般的に受水槽有効水深の1/2の水深で引水を設定していたため、解析でも有効水深の1/2に設定した。

図-7に示される配水管から受水槽まで連絡された引込管を通る流量は、引込管の管口径と流速が判明すれば、受水槽が引水する時の流量が算出できる。引込管の管口径については、受水槽の実態調査において図-8に示される比率で布設されていることが判明しており、これらのデータを基に引込管の平均断面積であった80mmに設定した。

また、流速については、流速が速くなると笛状騒音やキャピテーションをはじめとする過度の不愉快な騒音の発生が考えられる。さらに、配管の摩擦損失が増大し、ポンプの運転経費に影響が懸念されていることから、経済的な推奨流速として、1.0m/sから1.2m/sの流速になるように設計段階で口径決定⁵⁾がされている。そのため、本研究では解析で用いる流速を1.0m/sと設定した。これら引込管口径と流速から受水槽が引水を始めたときの引水水量は18.10m³/hourと設定した。

(4) 受水槽数ならびに管網モデルへの割り付け

解析対象となる受水槽数は、全体で480基あり、設置された場所もモデル地区に点在している。本論



図-9 受水槽の位置配水ポンプのQHカーブ

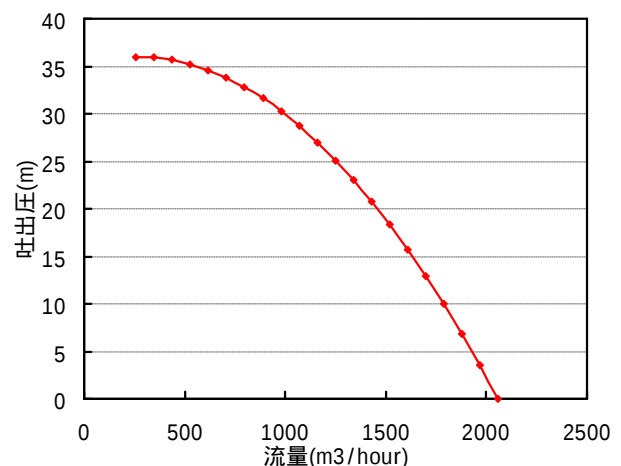


図-10 配水ポンプのQHカーブ

文では、受水槽の配水管網モデルへの貼り付けについて図-9に示すように、受水槽の近傍に位置する節点にこれらの需要水量を付加するよう設定した。また、一般生活における水需要についても同様に、需要ポイントの近傍に位置する節点に付加するように設定した。

(5) 配水ポンプの設定

ポンプは流量が増大するに従い、維持できる水圧が低下する特性を有している。本論文では、紀伊半島南東沖の地震(19時台)の実績データを基に、図-10に示すような咲洲配水ポンプ場の流量と吐出圧関係、すなわちQHカーブを作成し、解析に用いた。

3. モンテカルロシミュレーションを用いた管網解析

地震直後の配水システムの異常挙動の解析については、前章で前述したとおり、受水槽の誤動作引水がどのような規模で発生するかを精査する必要がある。

る．特に異常挙動の要因とされる受水槽については，変化する需要水量によって水位が常に変動しており，水位を変数として持つ 1 次スロッシング固有周期やスロッシングによる水面変位も受水槽水位の変動に合わせ変化している．これらの数値は，受水槽のスロッシングによる誤動作引水の発生の有無を調べ，配水増加量を求める上で重要な数値である一方，事前に設定することが非常に困難である．

したがって，本研究では図-11 の計算フローに示されているように，モンテカルロシミュレーションの手法を用い，乱数に対応する水深を各受水槽に設定した上で，スロッシングによる水面変位量を求め，これらの差が引水設定水位（有効水深の 1/2）以下に達すると受水槽の誤動作引水を発生させ，誤動作引水に応じた配水増加量をモデル管網に付加し，管網計算を行った．また，モンテカルロシミュレーションの場合，その試行回数を増加する度に計算精度が上がることから，試行回数を 10,000 回とした．

(1) スロッシングによる最大変位量

受水槽の 1 次スロッシング固有周期は F R P 水槽式耐震設計基準改訂委員会⁶⁾に示されている式(1)を使用した．

$$Ts = \sqrt{\frac{2\pi}{1.58 \frac{g}{l} \tanh\left(1.58 \frac{h}{l}\right)}} \quad (1)$$

Ts : 1 次スロッシング固有周期(s)
 g : 重力加速度 (9.8m/s²)
 h : 水深(m)
 l : 水槽幅の 1/2(m)

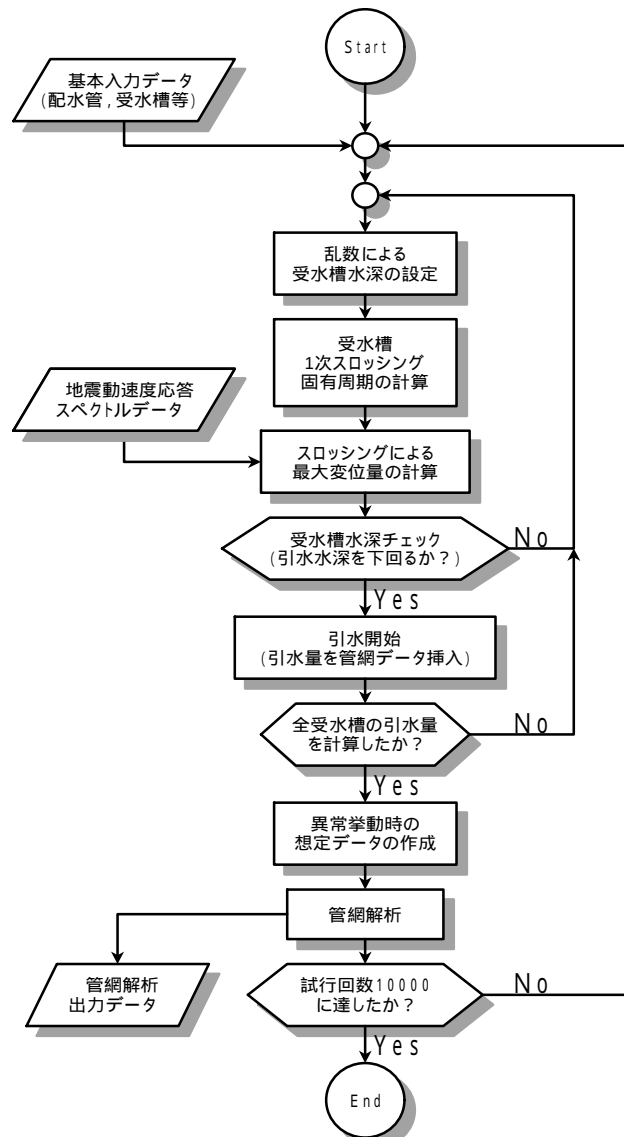
また，スロッシングによる水面変位量については，Housner の耐震計算式⁷⁾である式(2)並びに式(3)を用いて，変位量を算定した．

$$d_{max} = \frac{0.527l \coth\left(1.58 \frac{h}{l}\right)}{\frac{g}{\omega^2 \theta_h l} - 1} \quad (2)$$

$$\theta_h = 1.58 \frac{S_v}{\omega l} \tanh\left(1.58 \frac{h}{l}\right) \quad (3)$$

d_{max} : 水面最大変位量(m)
 Ts : 1 次スロッシング固有周期(s)
 ω : 固有角振動数 ($\omega = 2\pi / Ts$)
 g : 重力加速度 (9.8m/s²)
 h : 水深(m)
 l : 水槽幅の 1/2(m)
 S_v : 1 次スロッシング固有周期における速度応答スペクトル値(m/s)
 θ_h : 振幅角 (rad)

なお，スロッシング解析に用いた速度応答スペクトルの減衰定数の設定によっては水面変位量は大きく影響する．石油タンクにおける各研究報告では 0.07% ~ 0.1% であることが報告されている⁸⁾．また，



11) である 100 を使用した。

$$h = 10.666C^{-1.85}D^{-4.87}Q^{1.85}L \quad (4)$$

h : 管の摩擦損失水頭
 C : 流速係数 (Hazen-Williams 式)
 D : 管の口径 (m)
 Q : 流量 (m³/sec)
 L : 管の延長 (m)

(3) 管網解析

管網解析を行うツールには、様々な種類がある一方、今回のような地震時の異常挙動分析といった特殊な条件での解析に対応したものではない。これらの問題を解消するため、米国環境保護局 United States Environmental Protection Agency が公開している管網解析ツール EPANET2.0 を使用して解析を実施した。EPANET2.0 解析エンジンのソースコードや Dynamic Link Library は公開されており、この解析エンジンを使用して、遺伝的アルゴリズム等の最適化数値シミュレーション手法と組み合わせた研究報告¹²⁾¹³⁾が行われている。したがって、本論文においてもソースコードが公開され、プログラムの付加が可能な EPANET2 の解析エンジンを基に解析を行った。

4. 解析結果

(1) 紀伊半島南東沖の地震〔19 時台〕の解析結果

大阪市水道局大淀配水場で観測された紀伊半島南東沖の地震〔19 時台〕の地震波形を用い、地震発生直後の異常挙動解析を実施した。図-12 は、紀伊半島南東沖の地震〔19 時台〕での咲洲配水場における異常挙動時の瞬間最大配水量を示した図である。黄色の棒グラフがモンテカルロシミュレーションによって算出された咲洲配水場の最大配水量の分布を示している。また、青色で表示された流量は、管網解析によって得られた最大配水量の平均値を示したものであり、赤色で表示している数値は当時の咲洲配水場における瞬間最大配水量の実測値である。実測された瞬間最大配水量は 1,698m³/hour であるのに対し、解析値は 1,600 m³/hour であり、実測値に近い結果であることがわかる。さらに、図-13 は T M南港局における異常挙動時の水圧を示した図である。黄色の棒グラフがモンテカルロシミュレーションによって算出された T M南港局の水圧分布を示している。また、青色で表示された数値は、解析結果の平均水圧の値を示したものであり、赤色で表示している数値は当時の T M南港局における最低水圧の実測値である。実測された最低水圧は 10.632 m であるのに対し、解析値は、10.303 mであり、その差はわずか 0.329 mと咲洲配水場における最大流量と同様、実測値とかなり近似している結果であった。これら流量並びに水圧結果は、モンテカルロシ

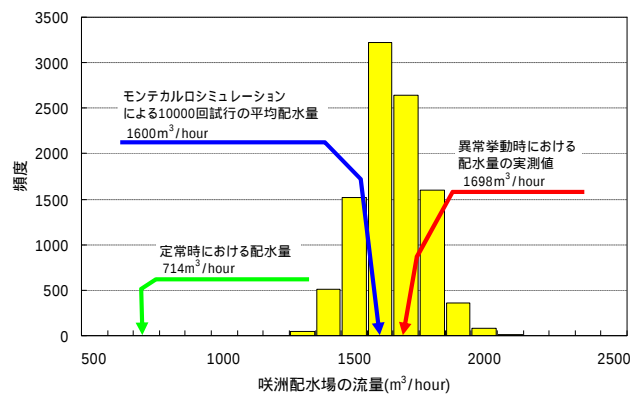


図-12 異常挙動時の咲洲配水場における最大流量

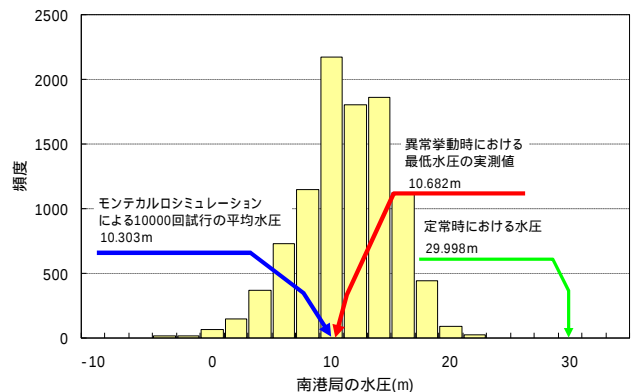


図-13 異常挙動時の T M南港における最大流量

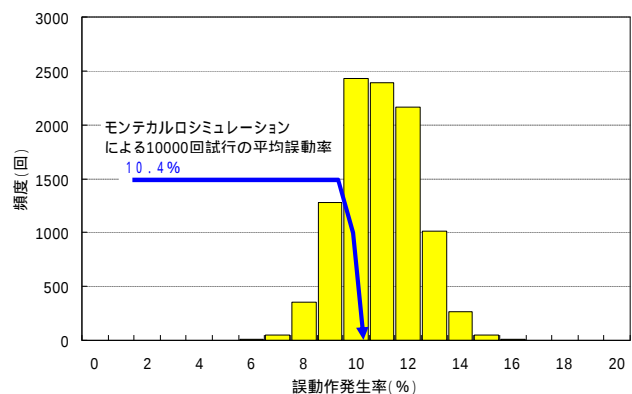


図-14 異常挙動時の受水槽の誤動作発生率

ミュレーションによる管網解析が実際の異常挙動をよく再現していること示すとともに、スロッシングによる受水槽の誤動作引水が異常挙動を発生させていることを立証しているといえよう。

(2) 受水槽の誤動作引水発生率

長周期地震動による誤動作引水率についても、前項と同様の紀伊半島南東沖の地震〔19 時台〕の地震波形を用い分析した。図-14 はモンテカルロシミュレーションによる誤動作引水発生率の分布を示したものである。この結果からも判るように紀伊半島南東沖の地震〔19 時台〕の場合、平均誤動作引水率が全受水槽の約 10%であり、受水槽の一部でも誤動作引水が一斉に発生すれば、水供給システムの異常挙動が十分に発生する可能性が高いということが判明した。

(2) その他地震の異常挙動解析結果

表-2 および図-15 は解析対象とした地震について、咲洲配水場における異常挙動時の流量増加量（ピーク値）の解析値と実測値の関係を示したものである。異常挙動が確認された地震については、水圧や配水量が記録として残っていたものの、2001 年 8 月 25 日に発生した京都府南部の地震は、異常挙動が確認されておらず、当時の実測値が保存されていなかったことから N/A とした。これらの解析結果においても、異常挙動が確認できた地震については、解析による流量も増加しており、また実測値との比較においても同じ増加傾向を示す結果となった。すなわち、モンテカルロシミュレーションを用いた地震発生直後の異常挙動現象分析は、紀伊半島南東沖の地震のみの再現に止まらず、鳥取県西部地震をはじめとする配水システムに異常挙動現象が観測された各地震においても再現が可能であることを示しており、地震時における配水システムの異常挙動現象が、地震動による受水槽のスロッシング現象に深く関与していることが判る。

5. まとめ

本論文では、地震動による受水槽のスロッシングがどのように水道供給システムへ影響しているのか分析するため、地震発生直後の受水槽による誤動作引水の発生している需要形態をモンテカルロシミュレーションにより再現し、管網計算を実施した。

その結果、地震発生直後において配水システムに発生する流量の増加並びに水圧低下は実測数値と近似していることが判明した。この結果は、やや長周期の地震動の強さによって、影響の程度が変化することを示しており、発生確率が高い南海・東南海地震のような海溝型巨大地震が発生した場合、広範囲において水道供給システムに異常挙動現象が発生する可能性を示唆している。配水システムの異常挙動は、大規模漏水が発生した現象と酷似しており、管路被害による漏水なのか異常挙動によるものか確認することは難しく、復旧時の初動体制確立や消火活動の遅れとなる可能性があるとともに、急激すぎる配水量の増加は、ウォーターハンマー等を発生させる可能性もあり、配水管への 2 次的被害も発生することも考えられる。これら受水槽のスロッシングによる異常挙動については、長周期地震動に対して揺れにくい受水槽形状の検討や水位センサの設置場所や引水するトリガータイミングの改良が必要であると考えられ、今後、さらなる検討を進める予定である。

参考文献

- 1) 小林泰章：地震動による送配水システム内水道水の異常挙動，水道協会雑誌，第 57 巻，第 6 号，pp.2-14,1988.
- 2) 座間信作：石油タンクのスロッシングとやや長

表-2 咲洲配水場における異常挙動時の増加水量

	鳥取県西部地震	芸予地震	京都府南部の地震	紀伊半島南東沖地震(19時台)	紀伊半島南東沖地震(23時台)	定常時
年月日	2000/10/6	2001/3/24	2001/8/25	2004/9/5	2004/9/5	2004/9/5
時刻	13:30	15:28	22:21	19:07	23:57	19:06
解析値 (m ³ /hour)	2,413	871	816	1,600	1,531	694
実測値 (m ³ /hour)	2,289	1,252	N/A	1,698	1,579	714

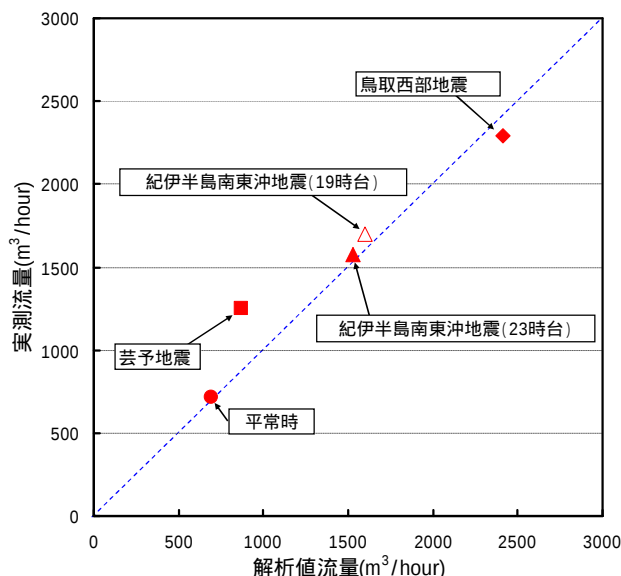


図-15 異常挙動時の増加水量の解析値と実測値の関係

周期地震動，第 18 回地盤震動シンポジウム講演論文集，pp.15-20，1990．

- 3) 畑山 建，座間信作，西 晴樹，山田 實，廣川幹浩，井上涼介：2003 年十勝沖地震による周期数秒から数十秒の長周期地震動と石油タンクの被害，地震，第 57 巻，pp.83-103,2004.
- 4) 村田幸一，宮島昌克：受水槽のスロッシングが地震直後に発生する水圧・水量の異常挙動に及ぼす影響，日本地震工学論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.27-42，2007.
- 5) 清水 洋：給排水衛生設備の設計，鹿島出版会，pp.133-141，1976.
- 6) 多田直美：FRP 水槽耐震設計基準改訂委員会報告，強化プラスチック協会誌，Vol.42，No.10，pp.379-385，1997.
- 7) (社)日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説 1997 年度版，pp.97-105，1997．
- 8) 座間信作，井上涼介：1993 年北海道南西沖地震による石油タンクのスロッシング，消防研究所報告，第 77 号，pp.1-10,1994．
- 9) (社)土木学会，(社)日本建築学会：海溝型巨大地震による長周期地震動と土木・建築構造物の耐震性向上に関する共同提言，p.40，2006.
- 10) 山本善稔：第 11 版 給水装置，大阪水道工業会研究所，p.124，2002.
- 11) Toru Nagatani, Koji Yasuhara, Kouichi Murata, Mariko Takeda, Toshiko Nakamura, Tomohiro Fuchigami, Katsuhiko Terashima: Residual Chlorine Decay Simulation in Water Distribution System, Proceedings of the 7th International Symposium on

Water Supply Technology in Yokohama 2006,O2-7,
pp.560-568, 2006.

- 12) 稲員とよの, 小泉 明: 配水管網における残留
塩素濃度推定に関するニューラルネットワーク
の応用, 水道協会雑誌, 第 71 巻, 第 8 号,
pp.2-10, 2002.

- 13) 小泉 明, 稲員とよの: 遺伝的アルゴリズムに
よる配水管網の漏水防止制御計画, 水道協会雑
誌, 第 73 巻, 第 8 号, pp.20-30. 2004.

(2007. 4. 6 受付)

ANALYSIS OF UNUSAL BEHAVIOR OF WATER DISTRIBUTION SYSTEM IN EARTHQUAKE BY MONTE CARLO SIMULATION

Kouichi MURATA and Masakatsu MIYAJIMA

Japan is situated in one of the most active seismic zones in the world. Many strong earthquakes of seismic intensity 5 or more have occurred in Japan within a short period after the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake. In earthquakes of seismic intensity 5 or more, the long-period component of seismic motion is propagated over 200 km or more distances from the focus, and some of such earthquakes were noticeable in Osaka City even though the city was situated distantly from the focus. Although no Osaka Municipal Waterworks Bureau (OMWB) suffered physical damage from these earthquakes, unusual phenomena such as an abrupt increase in flow rate and a decrease in water pressure were observed right after the occurrence of the earthquake.

The present study studies this phenomenon, focuses on sloshing in water receiving tanks as a possible cause of the phenomenon, and discusses causal relationship from the observed data. The relationship between the amount of sloshing in the water receiving tank and the frequency characteristics of seismic motion is analyzed by using seismic wave data observed in OMWB.