

地震動が砂ろ過プロセスに与える影響に関する一考察

An experimental study of influence of seismic motion for sand filtration process

中井正人*, 宮島昌克**, 遠田智生***

Nakai MASATO, Masakatsu MIYAJIMA, Tomoo TODA

*工修, 大阪市水道局工務部計画担当 (〒533-0024 大阪市住之江区南港北 1-14-16)

** 工博, 金沢大学大学院自然科学研究科教授 (〒920-1192 金沢市角間町)

***工修, J R 東日本 (〒360-0033 埼玉県熊谷市曙町 5-5)

Water supply system is one of the most important infrastructures as a key lifeline which supplies tap water for drinking and city activities. Even if incase of disaster, it has a important mission such as emergency water supply and supplying water for fire-fighting and medical use. On the other hand, there are several risks such as Tonankai-Nankai earthquakes. Restarting water treatment as soon as possible contributes to minimizing social influence of disaster. Such a situation is considered, we estimate the influence on water treatment by seismic motion, and discuss the recovery strategy from the view point of Business Continuity Plan.

Key Words: Business Continuity Plan, Water Supply System

キーワード: 事業継続計画, 上水道システム

1. はじめに

現在, 我が国の水道事業はその普及率が 97% に達し, 地域社会を支える基幹的ライフラインとしての役割を担っている. 事故や災害等の危機事象によりそのサービスレベルが低下すると, 被災者への飲料水や生活水の給水が滞ることにより, 水不足による生命維持の危機や生活衛生の悪化によって感染症が蔓延する等の人的被害や企業活動への影響等, 多様・多大な影響がもたらされる. 従って, 地震等災害時においても, 需要者への水の提供レベルを低下させない, 許容される期間内に提供レベルを復旧させるといった, 事業の継続が必要である. このような社会背景の中, 内閣府によって公表された, 「事業継続ガイドライン第一版 我が国企業の減災と災害対応の向上のために」¹⁾ では, 各事業者の事業継続計画の策定において, 起こりうる様々な危機事象に関して, 事業内での重要業務が停止した場合, 事業へどのような影響がもたらされるかについて評価することが重要であるとしている¹⁾. 日本において大きく懸念される危機事象は地震災害であり, 水道事業における地震被害は必至であることから, 事業継続計画を考慮する上で地震の水道事業への影響度評価は重要である. 水道事業は, 河川から取り入れた水を浄化する浄水処理過程と, 浄化水を人々に提供する給配水過程とに大別できるが, この中でもと

りわけ, 浄水処理過程は製品となる清浄な水を作り出す言わば水道事業の心臓部であり, 最も重要な業務として位置付けられることから, 地震時の水道事業継続を考慮する上で, 地震が浄水処理過程にもたらす影響について評価することは大変重要であると言える.

本稿では, 東南海・南海地震等津波を伴い, 広域的な災害をもたらす海溝型地震の発生が切迫する中, 地震動が浄水処理プロセス, とりわけ急速砂ろ過プロセスにもたらす影響について, 実験を実施し評価した.

1.1 浄水処理システムにおける地震時リスク

(1) 地震に伴う津波の発生

海溝型地震が発生した場合, 津波に伴う海水の河川遡上により, 河川下流で取水を行なう浄水場では, 塩化物イオンやホウ素などの物質が流入するおそれがある²⁾.

(2) 浄水処理施設の被災に伴う施設の破損

地震によって浄水処理施設が破損した場合, 地表水, や土砂等が流入し, 水質が汚染される可能性がある. このような事態は水道水利用者の健康被害を引き起こしかねないことから, 処理を停止する等の対策が必要である.

(3) 周辺施設の被災に伴う廃水の流出

取水域周辺の下水処理場, 工場, 事業所, 病院, 研究

施設等が地震によって被災した場合、これらの廃水が取水域に流入する恐れがある。

このような地震時リスクに関する実際の事例を表-1に示す。

1.2 リスクによる社会的影響と対策

地震によって浄水処理システム機能が低下する事態が発生すると、浄水処理システムの機能低下に伴う給水能力の低下により十分な水が確保できなくなると、地震被災者への十分な飲料水や生活用水の配給が滞る他、地震による火災への消防活動用水の不足、被災疾患、負傷患者に対する医療活動だけでなく、人工透析等の通常必要とされている医療活動の低下も懸念される。対策として表-2のような対策が想定される。

1.3 地震による浄水処理水への影響

地震により、安定していた水質・水量に影響をもたらすシステム全体を停止させ、我々の日常生活やその他の都市活動に大きな影響を及ぼす。これまで検討された地震時の浄水処理システムへの機能低下は、地震による施設の破壊と水源水質の汚染についての言及に留まり、地震動による浄水処理システムの処理機能自体の低下について紹介した調査研究や事例は、皆無に等しい状況である。そこで、1995年兵庫県南部地震時に、凝集沈殿処理プロセスおよびろ過処理プロセスにおいて観測された、地震前後での処理水の水質変化について紹介する。

表-1 地震による浄水処理プロセスへの被害事例³⁾

地震名	浄水処理に関する被害事例
1978年伊豆大島近海地震 (1978/1/14)	土砂及びシアンを含む鉱さい約 8 万 ³ m ³ が取水域に流出 取水停止 (半年間処理停止)。
千葉県東方沖地震 (1987/12/17)	凝集沈殿、急速ろ過施設の破壊、重油が取水域へ流出 取水停止 (30 時間の処理停止)。
兵庫県南部地震 (1995/1/17 日)	取水口の破壊による取水不能。浄水施設の伸縮目地破損による漏水、傾斜版、傾斜管、ろ過池表洗管の破損。
新潟県中越地震 (2004/10/23)	浄水施設の構造目地の損傷、周辺地盤崩壊による構造物の移動及び沈下 浄水機能停止。

表-2 水道事業における対策³⁾

対策	内容	対策種別	
		フロー	ストック
予防	施設耐震化		
	水源多様化・広域連携		
	配水容量増強		
	原水調整池整備		
応急	取水量調整、取水停止		
	浄水処理の強化		
復旧	捨水強化・洗浄強化		

2. 1995年兵庫県南部地震時における事例

2.1 大阪市水道局柴島浄水場の概要

大阪市柴島浄水場は、淀川を水源とし一日約 118 万³m³ (大阪市全体給水量の約半分) の水を供給する我が国最大規模の浄水場である。図-1 に浄水処理フローを、表-3 に各プロセスの役割を示す。

2.2 凝集沈殿プロセスにおける処理水への影響

図-2 は、凝集沈殿池において 1995 年兵庫県南部地震発生時に測定された、凝集沈殿処理水濁度の変化である。地震発生時刻である午前 5 時 46 分付近の濁度が地震発生とともに急上昇しており、第 2 系凝集沈殿池では最大濁度 4.8、第 3 系で 5.0、第 4 系で 4.6 にまで至っている (表 2.2)。これは、地震動やそれに伴う水面動揺によって池の中に流れの変化がもたらされ、フロックの沈降阻害と堆積スラッジ (フロックが集塊・沈降した沈殿物) の再浮上等が発生したことによる濁度上昇が観測されたものと考えられる。また、時間に着目すると、濁度に関する水質管理目標を超える状態が第 2 系沈殿池においては約 11 時間、3,4 系沈殿池における処理水の濁度は地震発生から約 2 時間継続したことがわかる。

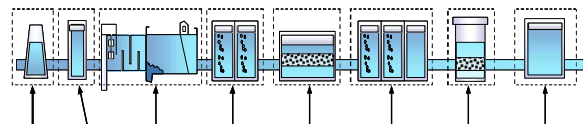


図-1 大阪市水道局における浄水処理プロセスの概要³⁾

表-3 各浄水処理プロセスの役割³⁾

番号	名称	役割
	取水塔・取水口	原水を取り入れる
	沈砂池	砂やごみを除去
	凝集沈殿池	凝集剤により懸濁成分を沈殿除去する
	中オゾン接触池	マンガンの酸化、有機物の分解
	砂ろ過池	マンガンの除去、微フロックの捕捉
	後オゾン接触池	かび臭分解、トリハロメタン前駆物質分解
	粒状活性炭吸着池	後オゾンで分解した成分の吸着・除去等
	塩素接触池	アンモニアの分解、pH値の調整

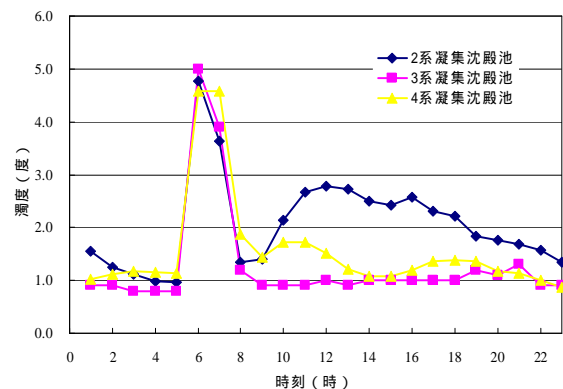


図-2 兵庫県南部地震時の凝集沈殿処理水濁度変化

表-4 各凝集沈殿処理水の最大濁度

凝集沈殿池	最大濁度	濁度継続時間 (2度以上)
第2系凝集沈殿池	4.8度	11.0時間
第3系凝集沈殿池	5.0度	2.0時間
第4系凝集沈殿池	4.6度	2.0時間

2.3 砂ろ過プロセスにおける処理水への影響

図-3は、凝集沈殿施設同様、1995年兵庫県南部地震発生時に測定された、砂ろ過処理水の水質変化を時刻歴で表したものである。これを見ると、凝集沈殿池同様に地震発生時刻である午前5時46分以降、処理水の濁度が急上昇していることがわかり、最大濁度が2.0にまで至っている。

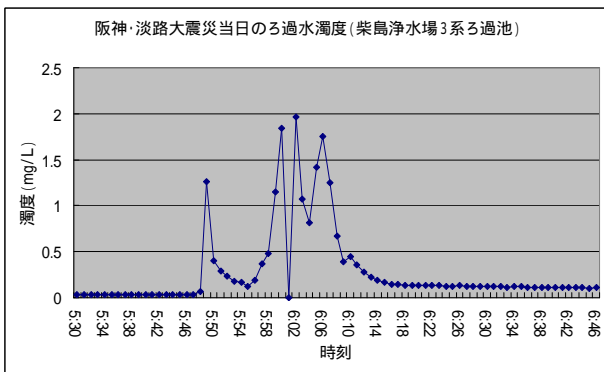


図-3 兵庫県南部地震時ろ過処理水濁度変化

3.地震動によるろ過処理水への影響に関する実験

3.1 概説

地震による浄水処理システムへの影響は、浄水施設の破壊や水源水質の汚染だけではなく、浄水処理機能そのものへの影響があることがわかった。そのため、地震時の水道事業における早期の復旧および事業の継続を考慮する上でこれらの影響を定量的に把握することは重要である。浄水処理プロセスでも特に、砂ろ過処理に関しては、濁質の量的抑留機能、水質・水量の変動に対する緩衝機能、水質基準や耐塩素性感染性微生物であるクリプトスピリジウム対策に適合する処理機能と多くの重要な機能を有し、全浄水処理システムの中樞を担っていると言えることから、地震による砂ろ過処理水への影響評価は大変重要であると考えられる。そこで本稿では、実際の砂ろ過処理プロセスを模型で再現し振動実験を行い、定量的な地震動のろ過処理水への影響を評価した。

3.2 実験装置

地震動がろ過機能に与える影響を定量的に把握するた

め、写真-1のような砂ろ過池を模した実験装置を作成した。

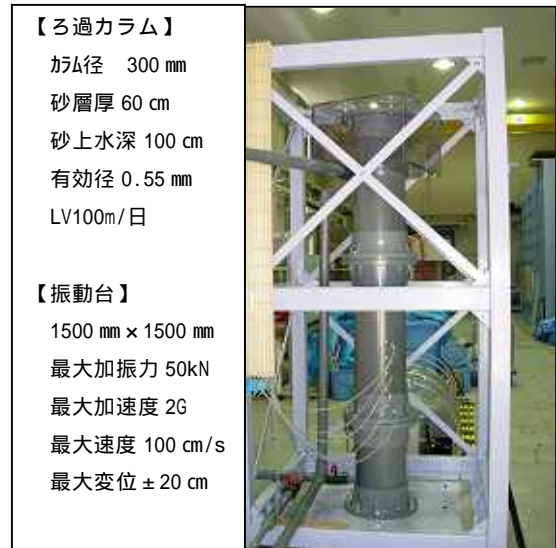


写真-1 砂ろ過模型

3.3 濁質を添加しないブランク水道水による振動実験

地震動によるろ過処理水への影響を定量的に評価するためには、洗浄後のろ材に付着・残留している懸濁物質が地震動を受け、剥離、溶出することによるろ過処理水への影響把握が必要である。そこで十分洗浄したろ層内に、濁質を添加していない水道水(「ブランク水」)を充填し、振動台によって、振動数 0.5Hz、継続時間 30秒で、入力加速度 80gal、150galの正弦波加振を行ない、その後ブランク水で通常ろ過をし、振動後の濁度変化を観測する実験を行った。地震動は、発生が懸念されている南海・東南海地震を視野に、大阪市上町台地における強震動予測結果⁴⁾も参考に設定した。また、振動による影響を明確にするため、正弦波とした。図-4に結果を示す。ここでは、ブランク水の自然ろ過通水時の濁度変化と、振動を与えた後のブランク水のろ過処理水の濁度変化を比較している。振動後のブランク水については、80gal、150gal加振双方のケースにおいて、濁度の初期値が高いことがわかる。これは、測定セル内に水が充填される際に、濁度計が安定しないことによると推測され、その後は濁度が0.1付近まで下がり安定している。ブランク水の自然ろ過通水の場合、濁度が概ね0.2以下で推移し、振動後のブランク水の濁度も、双方、概ね0.2以内で推移し続けていることがわかる。実験ろ層が60cmであることを考えると、ろ層内に滞留していた水が全て排出される時間は、ろ過速度を考慮して約1000秒となる。もし、ろ層内で懸濁物質の剥離が起こり、濁質がろ過水と共に排出されると考えると、通水開始から1000秒間以内に顕著な濁度のピークが見られると考えられるが、今回の実験でそのような傾向は見られなかった。従ってこの結果から、

ろ材表面の懸濁物質による濁度への大きな影響は無く、ろ層洗浄を十分に行なうことで同一のろ層条件を再現できると考えられる。

3.4 入力地震動を変化させた実験

(1)入力加速度を変化させた実験

ろ過水濁度への地震動の影響を明らかにするため、ろ層モデルに入力する加速度を変化させ、振動後の濁度変化をそれぞれ比較する実験を行った。振動条件は、正弦波、振動数 0.5Hz、継続時間 30 秒で、入力する加速度は 20gal、80gal、150gal の 3 ケースを行なった。各実験ケースにおける振動後のろ過処理水の濁度変化を図-5 に示す。

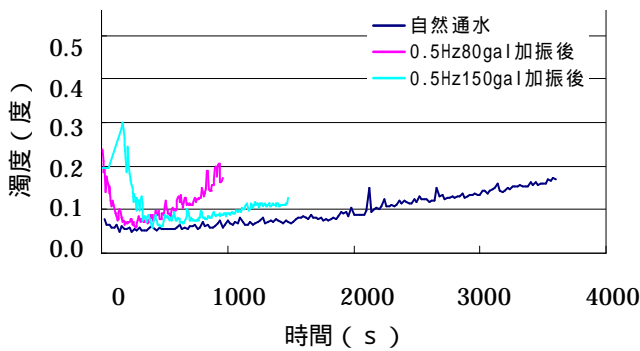


図-4 ブランク水振動後の濁度変化

150gal、80gal で加振した実験では、ろ過再開後濁度が上昇し、150gal 加振では最大濁度が 8.8、80gal 加振では 4.8 にまで至っている。これはろ層攪乱による懸濁物質の漏出によるものであると考えられる。また、20gal 加振の結果は他の 2 ケースと濁度上昇の程度が大きく違うため顕著なピークは確認しにくい。ろ過再開後濁度が 0.2 度から 0.35 度まで上昇。このことから、20gal 程度の地震動ではろ層攪乱が比較的小さく、懸濁物質の剥離、漏出も比較的小さいと考えられる。また、図-6 の入力加速度と最大濁度の関係が示すように、入力加速度が大きくなるに従ってろ過処理水の最大濁度が大きくなる傾向が見られる。理由として、加速度増加に伴い、ろ層に作用する慣性力が増加し、ろ層の攪乱がより大きくなることが考えられる。慣性力の増加により動水圧の増加が考えられるが、ろ層内で測定した水圧の加振時の変化と濁度上昇の関係を整理した。振動中に測定した水圧の静水圧からの最大変化を動水圧最大値として、入力加速度との関係を整理した。上層の結果を図-7 に示す。入力加速度の増加に従い、ろ過モデル壁面に加わる動水圧が増加する傾向にある。また、最大濁度と最大動水圧変化との関係を示すと図-8 のようになり、最大動水圧変化が大きいほど最大濁度も大きい。このことから、ろ層に加わる慣性力に加え、動水圧の影響で、懸濁物質の剥離・漏出が大きくなり、最大濁度も大きくなる傾向と考えられる。

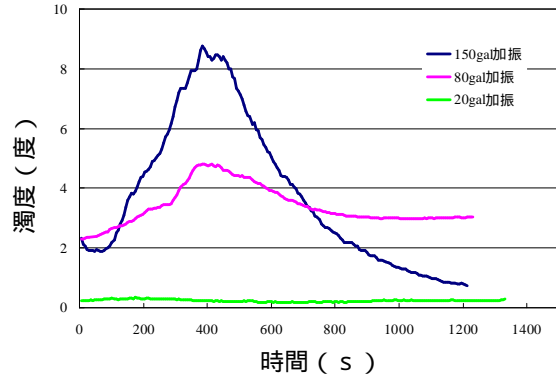


図-5 振動後の濁度の変化

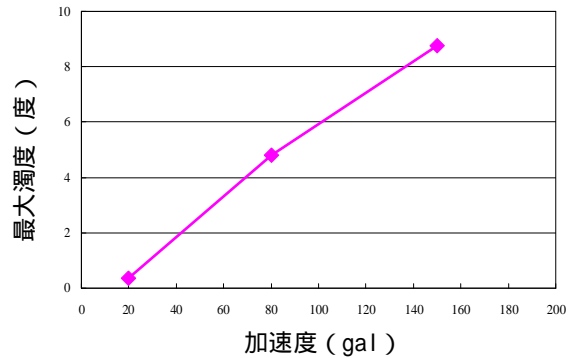


図-6 入力加速度と最大濁度の関係

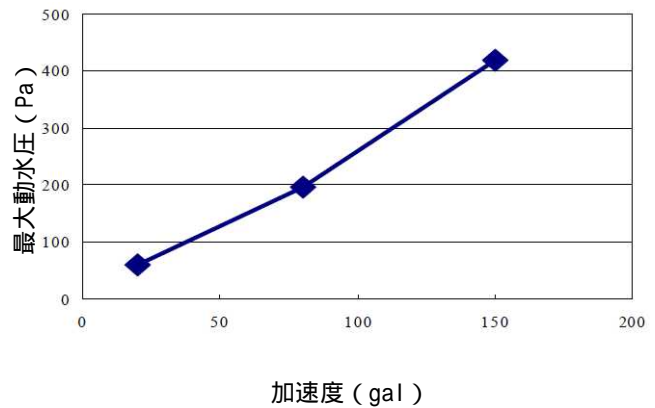


図-7 入力加速度と最大動水圧変化（上層）

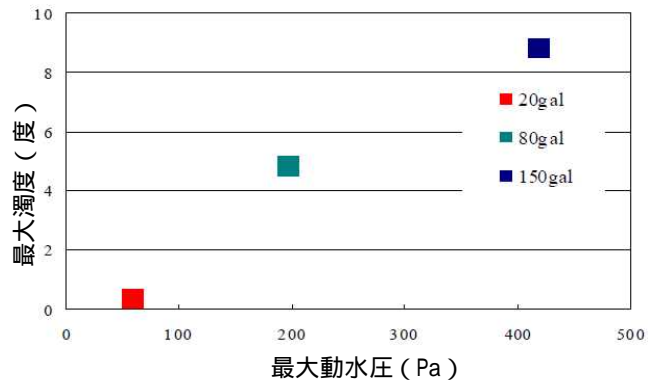


図-8 最大動水圧変化と最大濁度（上層）

(2) 入力振動数を変化させた実験

地震動の振動数の変化が、ろ過水濁度上昇に与える影響を明らかにするため、入力加速度 150gal, 継続時間 30 秒(正弦波)で、振動数を 0.5Hz, 1.0Hz, 5.0Hz, 10.0Hz, 19.5Hz と変化させた。図-9 に各実験ケースでの振動後のろ過処理水の濁度変化を示す。全てのケースで、ろ過再開後、ろ過処理水の濁度上昇が見られる。各ケースの最大濁度は、0.5Hz 加振では 8.8, 1.0Hz 加振では 2.5, 5.0Hz 加振では 4.2, 10.0Hz 加振では 2.7, 19.5Hz では 20.3 である。特に 19.5Hz 加振で卓越が見られた。理由として、19.5Hz はろ過模型全体での固有振動数であるため、ろ層攪乱が他のケースよりも大きかったと考えられる。また濁度は、約 1000 秒で安定した。安定時の濁度は、1.0Hz, 5.0Hz 加振で、ピーク後の安定濁度がろ過開始の初期値を上回り、ろ層攪乱によるろ過機能の低下がうかがえる。次に、振動数と最大濁度の関係から入力振動数による濁度上昇への影響について考察する。図-10 に振動数と最大濁度の関係を示す。明瞭な相関は見出し難いが、2.0Hz 未満の領域で、ろ層自体の固有周期が影響を与えていることも考えられる。

(3) 濁度上昇へ影響を及ぼす要因

これまでの実験を踏まえ、濁度漏出に大きく影響する要因について考察する。入力加速度の実験では、加速度の増加に伴って増加する慣性力に加え、同様に増加する動水圧がろ過処理水への濁度上昇に関係していることがわかった。そこで、まず全実験ケースでろ層内の動水圧変化と最大濁度との関係を見るため、ろ層中層で測定した動水圧変化の最大値を代表値として最大濁度との関係を見ることにした。その結果を図-11 に示す。概ね動水圧変化が大きいほど最大濁度も大きい傾向が見られる。しかしながら、0.5Hz で 80gal, 150gal 加振のデータを見ると最大動水圧は小さいが、濁度は 1.0Hz, 5.0Hz 加振の 2 倍程度にもなっていることがわかる。そのため、動水圧変化のみが溶出濁度への大きな要因とはいえない。

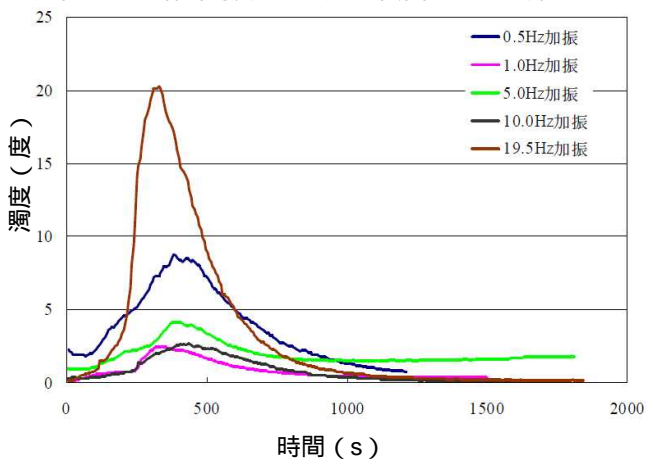


図-9 各振動数での濁度変化

次に、振動中のろ過模型の変位量と最大濁度との関係を整理する。ろ過コラムの上で測定したろ過模型の応答加速度波形から最大応答変位を算出し、そこから、振動台の入力加速度波形から算出した入力変位を差し引き、振動中のろ過模型の最大相対変位を算出し、それと各実験ケースでの最大濁度との関係を考察した。図-12 に結果を示す。19.5Hz 加振では、ろ過模型の応答の影響が考えられる。それ以外は、概ね最大相対変位が大きくなるほど最大濁度も大きくなる傾向が見られる。特に 0.5Hz, 150gal 加振では、相対変位 7.6cm に対して最大濁度が 8.8 となっている。これは、振動によつてろ過模型に大きな変位が与えられることで、ろ層の変形が促され、それに伴うろ材からの懸濁物質の剥離効果により、ろ過水への濁度漏出が顕著となったものと考えられる。また、振動中の変位が微量であれば、ろ層の動きが抑制され懸濁物質の漏出が抑えられることも考察される。

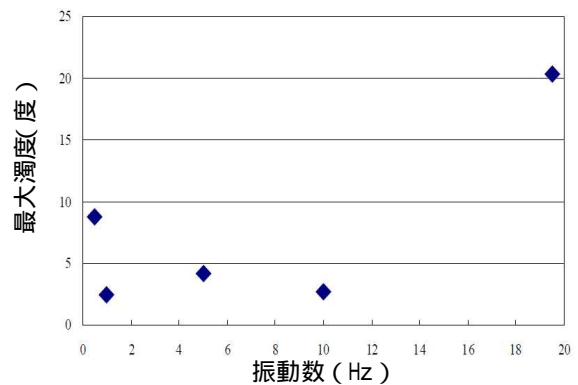


図-10 振動数と最大濁度

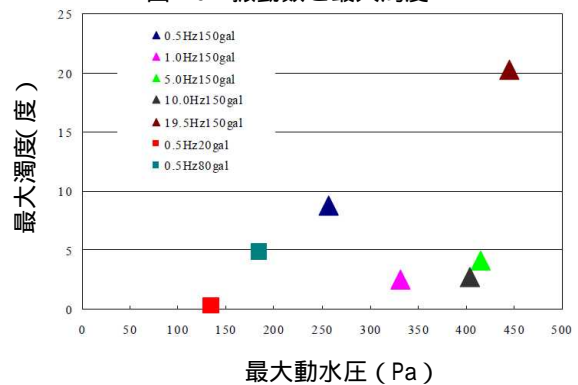


図-11 全実験ケースの最大動水圧変化と最大濁度

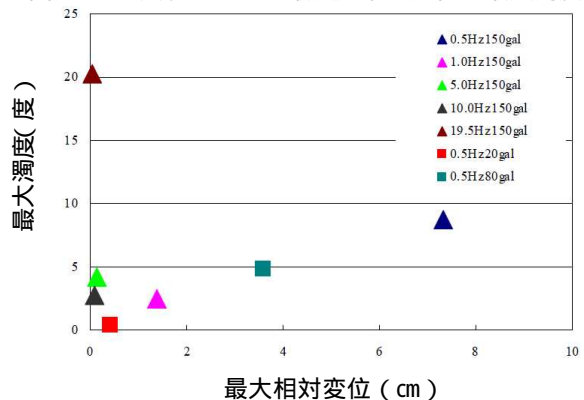


図-12 全実験ケースの最大相対変位と最大濁度

(4) まとめ

入力加速度を考慮した実験では、加速度の増加に伴い、ろ層に加わる慣性力及び水塊の移動による動水圧が増加することにより、ろ材からの濁度溶出が大きくなる傾向がある。20gal 加振ではろ過処理水への影響はほとんどなかったが、80gal 加振ではろ過機能低下傾向が見られた。2)振動数を考慮した実験では、ろ過模型全体の固有振動数での加振で、濁度が最大となった。また、1.0Hz, 5.0Hz 加振ではろ過機能の低下を見ることができた。

4.事業継続計画の観点からの影響度評価の重要性

ろ過処理施設が地震動を受けると、ろ過機能に影響を受けることがわかった。その程度は、水道水質基準を超過しており、その後のろ過継続が困難となる状況が予想される。事業継続計画を考慮した場合、地震時であっても需要者への水供給レベルを低下させない必要があり、今回の実験で対象とした急速ろ過プロセスは、浄水処理システム全体の中核であることから、ろ過処理水への影響が浄水処理システムにどう影響するのかを考察し、早期の復旧に向けた対策を講じることは重要であると考えられる。実験では、ろ過処理水の濁度溶出が安定する時間はろ層内の滞留水の排出に一致すること、入力加速の増加に伴い溶出する濁度も上昇すること、ろ層攪乱によるろ過機能の低下の傾向が見られることが明らかとなった。ろ過処理では、ろ過機能が損なわれた場合、捨水や洗浄を実施し、ろ過機能を回復させている。今回の実験によって明らかになったろ過処理への影響を整理すると、実際のろ過処理プロセスでは図-13 に示すような状況となると予想される。ろ層攪乱をもたらさない加速度のレベルでは、フロー に従い、ろ過処理水に影響は無いことから通常のろ過を引き続き継続できる。しかし、ろ層攪乱をもたらす加速度のレベルでは、 のフローに従うことになる。ろ層攪乱によってろ過処理水に濁度が溶出すると、その濁度が水質基準を満たすまで捨水を継続させる必要がある。また、いくつかの実験ケースで見られた、ろ層が攪乱されることでろ層の処理機能が低下し水質基準を満たせない状況が続く場合、フロー のように、ろ過処理水の捨水後、ろ層洗浄を行ない、さらにろ層洗浄によって溶出する濁度が無くなるまで再び捨水を継続しなければならない事態が発生する。

地震時のろ過処理再開を迅速に行なうためには、どのような地震動レベルでどのような運用を各所で行なうのかについてあらかじめ想定しておく必要があると言える。今回の検討では、地震動に応じて浄水処理の停止、ろ層洗浄前の捨水、ろ層洗浄を行なう必要があり、これらを考慮した地震時の運用案の策定、人員配置、自動制御システムの導入等を行なっていく必要がある。さらには、ハード面の対策メニューとして、ろ層洗浄用設備の強化、洗浄用水の確保・配水池の増強及びろ過スロースタート

の整備等を実施していく必要があると考えられる。

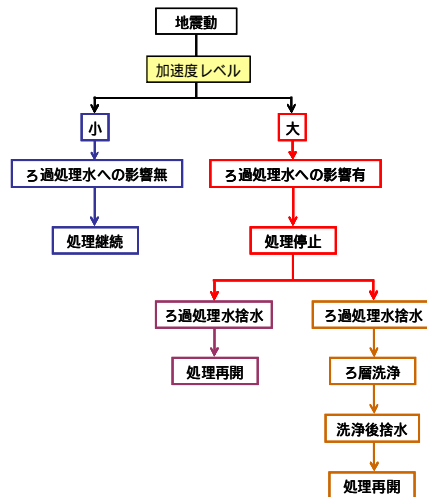


図-13 地震時のろ過処理システムへの影響

5.結論

- 1)地震動によるろ過水への濁度漏出によって、実際のろ過施設においては、地震動に応じて、汚染されたるろ過処理水の捨水、ろ層洗浄、ろ層洗浄後水質が安定するまでの捨水が必要となることが示唆された。
- 2)ろ過処理再開の迅速化への対策としては、浄水機能の復帰力及び経済性を踏まえながら、ハード・ソフト両面で更に実験・検討を深めていく必要がある。
- 3)さらには、他の浄水処理プロセス（沈澱、活性炭処理等）の地震動に関する影響も引き続き検証していく必要がある。
- 4)水道事業で事業継続計画を策定する際には、地震動が浄水処理の各プロセスや、トータルの浄水処理機能自体に与える影響（処理停止時間、処理再開所要時間、処理性低下度合い等）を定量的に把握する必要がある。

参考文献

- 1) 中央防災会議、民間と市場の力を活かした防災力向上に関する専門調査会企業評価・事業継続ワーキンググループ、内閣府防災担当：事業継続ガイドライン第一版 我が国企業の減災と災害対応の向上のために、pp.1-15, 2005。
- 2) 中井正人、宮島昌克：東南海・南海地震における浄水場のリスクに関する一考察（その1）、土木学会地震工学論文集、pp.623-632, 2007。
- 3) 緊急時水循環機能障害リスク検討委員会：第1回緊急時水循環機能障害リスク検討委員会資料 3-2、pp.9-15, 2005。
- 4) 入倉孝次郎：巨大地震による長周期地震動とその対策、緊急地震速報伝達システムの開発と地震災害の軽減に関するシンポジウム、2005。

(2009年8月7日受付)