地震時の水道管路内の水圧変動による空気弁被害に関する研究

メタデータ	言語: Japanese
	出版者:
	公開日: 2020-01-09
	キーワード (Ja):
	キーワード (En):
	作成者: 玉瀬, 充康, Tamase, Mitsuyasu
	メールアドレス:
	所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056498

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 3.0 International License.

博　士　論　文

地震時の水道管路内の水圧変動による空気弁被害に関する研究

金沢大学大学院自然科学研究科
環境デザイン学専攻

学　籍　番　号　1424052003
氏　　名　玉瀬　充康
主任指導教員名　宮島　昌克
提　出　年　月　令和元年6月

目　　次

第 1 章　序論 1
1.1　はじめに 2
1.2　空気弁の被害事例 3
1.2.1　1995 年兵庫県南部地震における被害 3
1.2.2　2011 年東北地方太平洋沖地震における被害 4
1.2.3　2018 年大阪府北部地震における被害 7
1.3　関連する既往の研究 8
1.3.1　地震時における管内水圧変動 8
1.3.2　地震時における配水システム異常挙動 9
1.4　本論文の構成 10
第 1 章の参考文献 10

第 2 章　空気弁の被害要因に係る調査と分析 12
2.1　はじめに 13
2.2　アンケート調査の概要 13
2.2.1　目的 13
2.2.2　調査の方法 13
2.2.3　アンケート回収状況と信頼性 14
2.3　調査結果 14
2.4　考察 21
2.5　熊本地震と東北地方太平洋沖地震のアンケート調査結果の比較 22
2.6　被害要因の分析 26
2.6.1　概要 26
2.6.2　分析方法 26
2.6.3　分析結果 28
2.7 急激な水圧変動をもたらす要因分析 35
2.7.1　空気弁の破壊形態とその要因 35
2.7.2　管路形態の変化がもたらす管内動水圧変化 36
2.7.3　配水池流出部の水圧変動の影響 39
2.8 まとめ 43
第 2 章の参考文献 44

第 3 章　実験による管内水圧変動に伴う影響の検証 45
3.1　はじめに 46
3.2　管路の振動に伴う管内動水圧変化 46

3.2.1　実験概要 46
3.2.2　実験装置 46
3.2.3　実験条件 48
3.2.4　実験結果及び考察 48
3.2.5　結果まとめ 57
3.3　配水池の振動に伴う水圧変動 58
3.3.1　実験概要 58
3.3.2　実験方法 58
3.3.3　実験結果及び考察 59
3.3.4　結果まとめ 77
3.4　地震直後の下流側管路の水圧変動 78
3.4.1　実験概要 78
3.4.2　実験方法 79
3.4.3　実験装置及び実験条件 80
3.4.4　実験結果及び考察 81
3.4.5　結果まとめ 88
3.5　まとめ 88
第3章の参考文献 89

第4章　急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムの特定 90
4.1　はじめに 91
4.2　管内の動水圧変化に伴う空気弁破損に至るメカニズム 91
4.2.1　管内の動水圧変化 91
4.2.2　空気弁の吸排気と弁付近の圧力変化 93
4.3　配水池流出部の水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズム 101
4.3.1　配水池流出部の水圧変動と空気弁における圧力変化 101
4.3.2　空気弁の吸排気と弁付近の圧力変化 102
4.4　まとめ 105
第4章の参考文献 106

第5章　結論 107
5.1　本研究から得られた知見 108
5.2　今後の課題 110
5.3　今後の展開 111

謝辞 113

第 1 章

序　論

第１章　序論

1.1　はじめに

水道施設は，市民生活や社会・経済活動を支える重要なライフラインの一つであり，飲料水・生活用水・都市活動用水等の供給を担っている．これまで地震，豪雨などの自然災害により，被災都市に断水被害や，管路の漏水発生に伴う道路冠水・陥没，交通障害，家屋浸水などの二次災害といった被害をもたらし，市民生活や産業活動に大きな影響を及ぼしてきた．

こういった状況の下，水道事業継続の観点から，災害時においても生命の維持や生活に必要な水を安定して供給し続けることを念頭に，過去の地震等災害における水道施設の被害分析を適切に行ったうえで，今後切迫する南海トラフ地震などの大規模地震に備え，水道施設の耐震対策を進め，信頼性向上を図っていく必要がある．中でも管路施設の耐震化は，震災時の復旧過程において，市民の飲料水や生活用水の確保に直結する重要な対策である．管路施設は，主に管路と空気弁や仕切り弁等の管路付属設備に大別される．これらのうち，空気弁については，管路と同様に被害が生じると漏水及び断水により震災後の給水活動や復旧活動に大きな影響を与える重要な設備であるが，2011 年東北地方太平洋沖地震以前においては，管路に比べ被害が目立たなかったこともあり，空気弁の地震対策について注目されることが少なかった．

しかしながら，2011 年東北地方太平洋沖地震を契機に，仙台市をはじめとした被災事業体において，その被害が顕著であったことから，今後管路耐震化だけでなく空気弁における耐震化等の必要性について述べられており [1)]，空気弁の地震対策の重要性が一層高まってきている．

また，過去の地震における管路施設の被害の分析において，主に管路を対象に，地震時の外力による管路本体の割れ等の破損，地震時の地盤変位による管継手の抜出しなどの破損形態から被害原因が特定され，これらを踏まえた地震動特性や地盤状況等に応じた管路被害予測手法構築等の研究 [2)~5)]が精力的に進められ，事業体における管路耐震化計画や災害時の応急復旧計画に反映されてきた．しかしながら，その一方で，管路に比べて，空気弁等の管路付属設備の被害について分析された事例は少なく，最近の地震による空気弁の被害事例から，地震時の外力だけでなく，管内水圧変動による影響と考えられているものの，未だその原因について明らかになっていない．

以上のような背景を踏まえ，本研究では，地震時における管内水圧変動が空気弁の破損被害に及ぼす影響に着目し，その要因とメカニズムを明らかにすることを目的とする．

1.2　空気弁の被害事例

1.2.1　1995 年兵庫県南部地震における被害

(1) 被害の概要

1995 年兵庫県南部地震では，約 3,600 件の配水管の被害の他，管路付属設備である空気弁，消火栓，仕切弁にも多くの被害が発生した．これらの被害箇所数は，658 件と管路被害件数の約 5 分の 1 を占めている．兵庫県南部地震における神戸市，芦屋市，西宮市を対象として，管路付属設備の損傷形態調査を実施した結果，**表-1.1** のとおり，被害件数では仕切弁の被害が多いものの，被害率では空気弁が約 3%と非常に高い値となっている．なお，空気弁とは，管内にたまった空気を自動的に排気するとともに，管内に負圧が生じた場合に外部から空気を自動的に吸気する機能を有する弁である．

(2) 空気弁の被害形態

空気弁の被害形態としては，フランジ継手部に多くの被害が見られ，これ以外に空気弁本体の破損，フランジ付 T 字管の折損であった．このような地震時の空気弁の各部の動きを考慮すると**表-1.2** のとおり損傷原因が想定されている．当時管路付属設備については，地震時の挙動や損傷形態に関する情報が乏しく，耐震化策においても，配水管に比べ必ずしも十分とは言えない状況であったことから，平成 9 年に日本水道協会より発行された「水道施設耐震工法指針・解説」[7]において管路付属設備の耐震化向上策が規定されるようになった．特に地震外力に対する被害が顕著であったことを踏まえ，その対策として**表-1.3** のとおり耐震性向上策が検討されている．

表-1.1　1995 年兵庫県南部地震による管路付属設備の被害数，被害率 [6]

種類	被害数	設置施設数(概算)	被害率
空気弁	141	約 4,500	3.1%
仕切弁	71	約 26,000	0.3%
消火栓	414	約 62,000	0.7%

表-1.2　1995 年兵庫県南部地震時における空気弁の想定破損原因 [6)7)]

想定要因	想定破損原因
慣性力	地震加速度によって作用する力
衝撃	室壁と弁体本体の衝突による衝撃
室壁の反力	室壁から弁本体へ作用する反力
共振	立上げ配管が共振し，変位が増大
地震時動水圧	地震時の動水圧による内水圧上昇

表-1.3　1995 年兵庫県南部地震以降における空気弁の耐震対策 [6)7)]

耐震対策		具体策
限界相対変位量を大きくする	初期隙間を大きくする	本体の小型化
		本体の軽量化
	室壁移動量を大きくする	弁室等の可とう化
	限界変形量を大きくする	溝形フランジの採用
		T 字部のダクタイル鋳鉄化による強度向上
地盤と管路の相対変位量を抑制する		前後の管路の耐震化

1.2.2　2011 年東北地方太平洋沖地震における被害

(1) 被害の概要

2011 年東北地方太平洋沖地震では多数の空気弁被害が報告され，東北地方の 5 つの水道の被災事業体で 148 箇所，被害率はおよそ 2%，また，工業用水道の被災事業体で 163 箇所，被害率はおよそ 6%となった [8) 9)]．水道事業体における管路付属設備の被害数・被害率を**表-1.4** に示す．一見少ない値のように思えるが，管路付属設備の被害調査において空気弁の被害率は仕切り弁，消火栓の被害率に比べてかなり大きいことがわかっている．

仙台市水道局を例に空気弁被害に着目すると，口径 400mm 以上の基幹管路上で 41 件もの管路付属設備の被害が発生しており，このうち 39 件が空気弁の破損であった．基幹管路上の管破損等の管自体の被害件数 6 件に比べると，空気弁被害が顕著であり，この被害が送配水機能に大きな影響を及ぼしたことが分かる [10)]．

表-1.4　2011 年東北地方太平洋沖地震による管路付属設備の被害数，被害率 [8)]

水道事業体		仙台市水道局	宮城県企業局		石巻地方広域水道企業団	千葉県水道局	水戸市水道部	合計
			大崎	仙南・仙塩				
空気弁	設置数	3,631	394	533	815	3,254	－	8,627
	被害件数	56	12	17	22	41	2	148
	被害率(%)	1.54	3.05	3.19	2.70	1.26	－	1.72
仕切弁	設置数	43,039	162	368	12,609	90,166	12,682	159,026
	被害件数	19	0	0	11	38	0	68
	被害率(%)	0.04	0.00	0.00	0.09	0.04	0.00	0.04
消火栓	設置数	14,760	0	0	2,496	34,965	3,749	55,970
	被害件数	7	0	0	5	6	0	18
	被害率(%)	0.05	0.00	0.00	0.20	0.02	0.00	0.03

(2) 空気弁の被害形態

1995 年兵庫県南部地震では空気弁や消火栓が弁室壁に衝突して破損する等の被害が多かったものの，2011 年東北地方太平洋沖地震では，空気弁内部の部品破損の割合が空気弁の破損被害全体に対して 33%を占めており，**表-1.5** に示すとおり地震時の管内の急激な圧力変動が原因と考えられている [8].

表-1.5　空気弁被害の要因と被害形態 [8]

主な要因	被害形態
外的要因 ・弁自体への外力の作用	・地震動・津波・道路崩壊・液状化等による T 字管部折損・継手部漏水
内的要因 ・管内の水圧変動	・空気弁内の部品の破損・漏水 ・異物の挟み等による漏水

日本水道協会は東北地方太平洋沖地震の空気弁の被害形態を把握するため，5 つの事業体に調査を行った．この調査結果 [8]によると，空気弁の被害状況は①フロート弁体に異物がつまったことによる漏水，②本体破損，③フランジ部からの漏水，④T 字管の破損の 4 つに区分できることがわかった．空気弁の被害形態を**図-1.1** に示し，各事業体別の空気弁被害状況を**表-1.6** に示す．被害形態に着目すると，被害形態②「本体(各部品)の破損」が最も多く 33.1%であった．次に，被害形態①「フロート弁体に異物がつまったことによる漏水」が 29.1%であった．三番目に，被害形態③「フランジ部からの漏水」が 22.3%と続いた．一方，被害形態④「T 字管の折損」はほとんどなかった．地域別の被害率に着目すると，宮城県企業局，石巻地方広域水道企業団は設置数に対しておよそ 3%の被害率であった．これに対し，仙台市水道局，千葉県水道局は 2%未満とやや少ない被害であった．この調査により， 東北地方太平洋沖地震では広範囲に渡って被害が発生しており，被害の形態にも様々な種類があることがわかった．

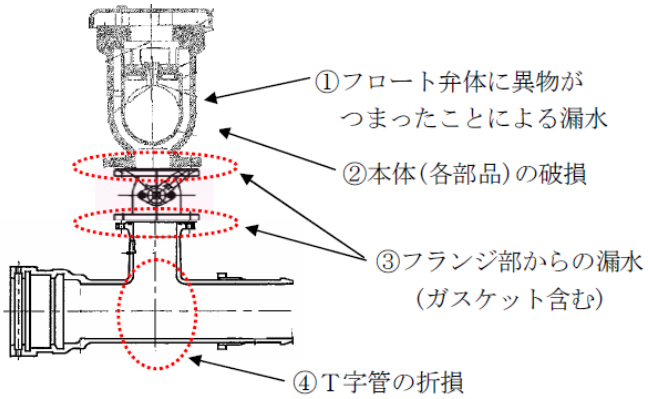


図-1.1　空気弁の被害形態 [8]

(「平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より引用)

表-1.6　各事業体別の空気弁被害状況 [8)]

（「平成 23 年（2011 年）東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より引用）

		仙台市水道局		宮城県企業局 大崎		宮城県企業局 仙南・仙塩		石巻地方広域		千葉県水道局		水戸市水道部		合計	
設置数(基)		3,631		394		533		815		3,254		ー		8,627	
被害数(件)		56		12		17		22		41		2		148	
被害率(%)		1.54%		3.05%		3.19%		2.70%		1.26%		ー		1.72%	
被害形態	被害形態①	0	0%	1	8%	5	29%	3	14%	34	83%	0	0	43	29.1%
	被害形態②	17	30%	8	67%	12	71%	11	50%	1	2%	0	0	49	33.1%
	被害形態③	18	32%	2	17%	0	0%	7	32%	6	15%	2	100%	33	22.3%
	被害形態④	0	0%	1	8%	0	0%	0	0%	0	0%	0	0	1	0.7%
	被害形態不明	21	38%	0	0%	0	0%	1	5%	0	0%	0	0	22	14.9%

(3) 空気弁被害の特徴と想定される要因

表-1.7 に，2011 年東北地方太平洋沖地震における空気弁の主な被害内容 [8)] を示す．破損状況について，いずれも内部部品の破損であり，急激な水圧変動の影響を受けた可能性が考えられる．表中の周辺環境等の箇所を見ると下流が片落ち管や，配管が 1m 下がっているケース，空気弁が約 8m 立ち上がった高低差のある場所に設置されていたケースも確認されている．これらの状況を踏まえると，前述で示したとおり，管路形態の変化（異形管部）等の周辺環境の影響を受けることで，急激な水圧変動を招き，空気弁が破損した可能性が考えられる．

以上のことから，空気弁被害に起因する急激な水圧変動をもたらす要因として，①空気弁付近の管路形態の変化（異形管部）に伴う地震時の揺れによる水圧変動，②ポンプ急停止，管路漏水等による急激な水圧変動の 2 つが挙げられる．①では，管路の形態が異なることにより，地震時に管内の水が異形管部に繰り返し衝突し水圧が大きく変動したものと考えられる．②では，地震による配水管破損に伴い漏水が発生，もしくはポンプが急停止することで，水圧が急低下する等，管内の水圧が大きく変動したものと考えられる．

表-1.7　2011 年東北地方太平洋沖地震における主な被害内容 [8)]

（「平成 23 年（2011 年）東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より引用，著者一部加筆）

事業体	仙台市水道局		宮城県企業局(仙南・仙塩)		千葉県水道局
浄・配水場名	将監第一配水所	国見浄水場	南部山浄水場		沼南給水場
送水方式	ポンプ圧送	自然流下	自然流下(高区)	自然流下(低区)	ポンプ圧送
地震直前送水圧	1.15MPa	約0.9MPa	1.15MPa		約0.39MPa
地震直後送水圧	0～0.1MPa	0～0.1MPa	0～0.1MPa		0～0.1MPa
管口径	Φ400mm	Φ800mm	Φ2400mm	Φ700mm	Φ500mm
呼び径	Φ75mm	Φ100mm	Φ200mm	Φ100mm	Φ100mm
製造年	平成元年	昭和62年	平成12年	昭和58年	昭和60年
管心高	約82m	約73m	約72.5m	約66.5m	約29.1m
破損状況	遊動弁体が破損。遊動弁体中心部が空気弁から抜けて飛び出ていた	案内の桟部が破断	案内桟部が破断遊動弁体がひび割れ	フロート弁体（SUS316製）が変形	遊動弁体・案内ガイドが破損
周辺環境等	停電のため**ポンプが停止し、送水停止**。管路被害は無く、ほぼ満水状態であった。**フラホイールと緩閉式逆止弁でウォーターハンマ対策済**	**下流側の管が破損し大規模漏水が発生**したため、管内の水はほぼ流出した。傾斜板が落下していることなどから、**液面揺動(スロッシング)現象があった。**	**すぐ下流はΦ2400mm×Φ1500mmの片落管**	**水管橋の川岸部に設置され、すぐ下流で管は約1m下がっている。**	ウォーターハンマ対策として、白井高架水(H.W.L64.7～L.W.L50.9)を設置していた。**空気弁は、7.85mほど立ち上がったところに設置。**

1.2.3　2018 年大阪府北部地震における被害

淀川に架かる枚方大橋の下流側に枚方水管橋（φ1200×2 条，竣工 1964 年）があり，当該水管橋の管路上に取り付けられた空気弁が 2 箇所破損した（**図-1.2** 参照）．2 条のうち，川上側の管路の水管橋上にある空気弁 5 箇所の内，2 箇所で被害が発生した．いずれも昭和 39 年頃に設置した FC 製の空気弁箱が脆性的破壊をしていたものであり，破損していない空気弁 3 基は平成 17 年度以降に取り替えられたものであった（**図-1.3** 参照）．なお，川下側の管路 1 条については更新工事に伴い休止中であったため，被害はなかった [11)]．

これらの被害の原因について，「大阪府北部の地震に係る報告会資料 [11)]」によれば，管異形部に発生する動水圧が局所的に増大し，管内部からの破損が生じたものと考えられている．

図-1.2　水管橋上の空気弁からの漏水 [11)]

図-1.3　空気弁の破損 [11)]

既往の調査研究 [12)13)]においても，空気弁被害は地震動による直接的破損の他に，地震時に発生する管内の急激な水圧変動が一つの要因と考えられているものの，明確な原因が解明されていないのが現状である．

地震時における急激な水圧変動に関する事例を次に示す．

1.3　関連する既往の研究

1.3.1　地震時における管内水圧変動

地震時には，管水路の死端部の他，曲管部，T 字管部，片落ち管部で動水圧が発生し，管水路中を伝播することが分かっている [14)]．地震時の管内動水圧変化については，農業用水の分野において調査研究が進められており，実際の管水路で地震時動水圧による水圧変化を記録した事例として，2003 年 9 月 26 日に発生した十勝沖地震によって，北海道十勝地域の畑地灌漑用管水路の水圧が 0.33 MPa 上昇した事例が報告されている [15)]．この地震では，水圧測定地点近傍の地震観測点で震度が 5 弱，最大加速度が 2.5 m/s^2（水平成分合成）であったが，測定計器の性質上，詳細な水圧波形は得られていない．最近では，これらの地震時動水圧の実態把握を目的として，北海道内の供用中の管水路で観測されており，2016 年 1 月 14 日の震度 4 の地震動により発生した動水圧の観測結果について報告されている [16)]．観測結果から水圧変化の最大値は，観測地点直近の曲管部で生じた動水圧に他の曲管部等で生じて伝播してきた動水圧が重なって生じた可能性が考えられ，震度や継続時間の増大に伴って大きくなることが示唆されているものの，その発生要因は明らかになっていない．

1.3.2　地震時における配水システム異常挙動

過去地震において地震発生直後から急激な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発生し，水道供給システムを著しく機能低下する現象が確認されており，一例として，**図-1.4** に 2011 年東北地方太平洋沖地震時のさいたま市西部配水場での配水量，水圧の変化を示す．図より，地震発生直後，水圧が急低下し配水量が増加する現象が確認できる．このような異常挙動はさいたま市だけではなく，多くの地域でも確認されている．

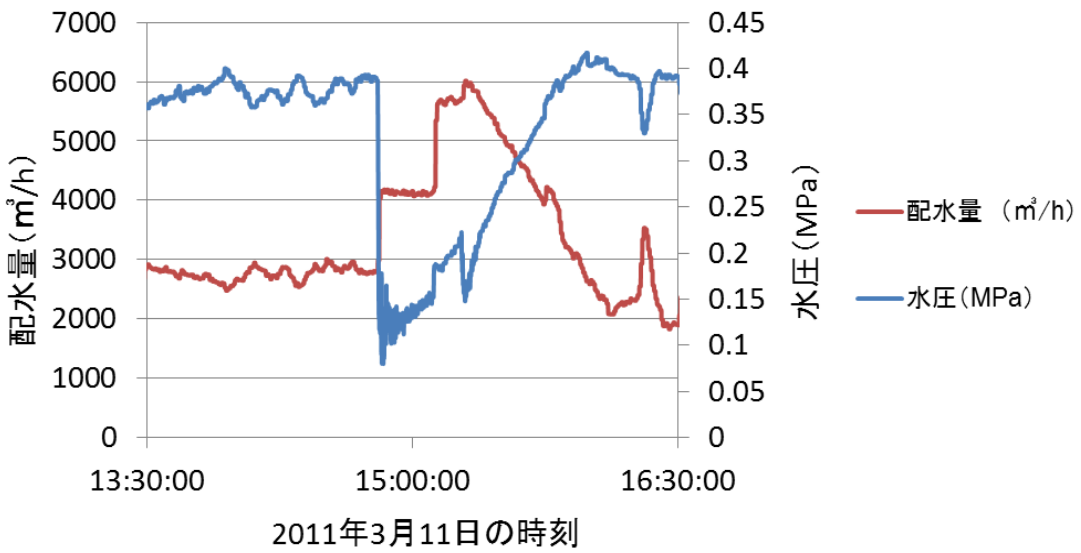


図-1.4　2011 年東北地方太平洋沖地震時のさいたま市西部配水場での配水量，水圧の変化 [17)]

以上の既往の被害事例・研究課題を踏まえ，本研究では，過去地震における被害事例から，空気弁の破損形態や被害箇所の周辺環境等の特徴と管内の水圧変動に影響を及ぼす要因を調査し，地震動との因果関係について被害分析を行う．また，模型実験により地震時の動きを再現することで，地震時の水圧変動の現象と特徴を明らかにしたうえで，空気弁破損に至る原因とメカニズムについて考察・検証する．これらの結果から地震時の留意事項等を提言し，空気弁の地震対策の一助とすることを目的とする．

1.4　本論文の構成

本論文の構成は次に示すとおりである.

第 1 章　　序論
第 2 章　　空気弁の被害要因に係る調査と分析
第 3 章　　実験による管内水圧変動に伴う影響の検証
第 4 章　　急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムの特定
第 5 章　　結論

第 1 章では，本論文の序論として，本研究の背景とその目的，空気弁の被害事例，関連する既往の研究について整理する.

第 2 章では，地震時における空気弁被害の要因として考えられる項目について，アンケート調査を行い，被害の要因に関する全容を把握するとともに，2016 年熊本地震における被害分析により，地震動と空気弁被害の関係性から破損要因を推定する.

第 3 章では，前章での分析結果から明らかになった空気弁被害の特徴と破損の要因を踏まえ，模型実験により地震時の動きを再現することで，地震時の管内水圧の変動といった現象とその特徴を明らかにする.

第 4 章では，前章の実験結果において，明らかになった現象と特徴を踏まえ，急激な水圧変動が空気弁に与える影響について理論的に考察を行ったうえで，実際の被害事例にあてはめ，定量的に分析・評価を行うことにより，空気弁破損に至る可能性について検証を行う.

第 5 章では，本研究で得られた成果と今後の課題についてとりまとめる.

第 1 章の参考文献

1) 高橋修：東日本大震災による管路被害と今後の管路耐震化に向けた課題，ダクタイル鉄管，第 93 号，pp.22-27，2013.
2) 磯山龍二，石田栄介，湯根清二，白水暢：水道管路の地震被害予測に関する研究，水道協会雑誌，Vol.67，No.2，pp.25-40，1998.
3) 高田至郎，藤原正弘，宮島昌克，鈴木康博，依田幹雄，戸島敏雄：直下型地震災害特性に基づく管路被害予測手法の研究，水道協会雑誌，Vol.70，No.3，pp.21-37，2001.
4) 丸山喜久，山崎文雄：近年の地震被害データを加味したマクロな配水管被害

予測式の改良，土木学会地震工学論文集，Vol.30，pp.565-574，2009.
5) 社団法人水道技術研究センター : 地震による管路被害予測の確立に向けた研究報告書，2013.
6) （社）日本水道協会 : 1995 年兵庫県南部地震による水道管路の被害と分析，1996.
7) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，1997.
8) 社団法人日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書，pp.109-119，2012.
9) 社団法人工業用水協会：2011 年東北地方太平洋沖地震に係る工業用水道施設の被災状況調査（概要），工業用水協会雑誌　工業用水，第 612 号，pp.17-46，2012.
10) 高橋修 : 仙台市水道における東日本大震災被災送・配水管路の考察と耐震化の取組み及び危機管理体制の見直しについて，学会誌「EICA」，第 18 巻，第 4 号，pp.5-8，2014.
11) 大阪広域水道企業団：大阪府北部の地震に係る報告会資料，pp.1-14，2019.
12) 村田幸一, 宮島昌克 : 受水槽のスロッシングが地震発生直後に発生する水圧・水量の異常挙動に及ぼす影響，地震工学会論文集，第 7 巻，第 1 号，pp.27-42，2007.
13) 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.
14) 小川信行 : 水道管路の被害と地震時動水圧，国立防災科学技術センター研究報告，第 15 号，1976.
15) 植屋賢祐，徳井順，阿部匡弘，長谷川和彦，田頭秀和，秀島好昭：「'03 十勝沖地震」に伴う管内発生水撃圧の分析，平成 16 年度農業土木学会大会講演会講演要旨集，pp.800-801，2004.
16) 大久保天，立石信次，今泉祐治 ，中村和正：震度 4 の地震動により農業用管水路に発生した動水圧，農業農村工学会論文集 IDRE Journal　No.306 (86-1), pp.Ⅳ_1-Ⅳ_2 ，2018.
17) 石田明久：上水道の配水管網における空気弁の地震被害要因に関する研究，平成 27 年度（2015 年）金沢大学修士学位論文，2015.

第 2 章

空気弁の被害要因に係る調査と分析

第 2 章　空気弁の被害要因に係る調査と分析

2.1　はじめに

本章では，1 章で述べたこれまでの地震における空気弁被害の特徴や想定される要因を踏まえ，2016 年熊本地震における空気弁被害について，アンケートによる調査を行い，その要因と特徴を明らかにする．さらに，地震動との因果関係を明らかにするために，被害要因の分析を行うものである．

2.2　アンケート調査の概要

2.2.1　目的

2016 年 4 月に発生した熊本地震について，九州地方の水道事業体を対象としたアンケート調査により，空気弁の破損被害の形態や被害箇所の周辺環境等の特徴を明らかにすることを目的とする．

2.2.2　調査の方法

九州地方全域を対象に，九州地方の沖縄県を除く 7 県(福岡・佐賀・長崎・大分・熊本・宮崎・鹿児島)の 209 の水道事業体を選定し，**表-2.1** に示す項目について調査した．アンケートを各市町村の水道事業体もしくは自治体の水道課に対し，返信用封筒を同封し郵送する方法で行った．回収方法は，返信用封筒または，E メールでの返答とした．アンケート実施日時としては，平成 28 年 9 月 2 日送付，9 月 12 日締め切りとした．

表-2.1　アンケート調査内容

項目	内容
空気弁の破損	空気弁破損の有無，破損箇所数
	空気弁被害は前震，本震どちらによるものか
	漏水の有無（空気弁破損がなかった場合），原因
	空気弁の点検・整備状況・頻度
	空気弁破損の原因
被害のあった空気弁の特徴	空気弁の諸元（種類・機種・規格・空気弁口径・配水管口径・製造年・設置標高・使用圧力・最高許容応力・管路施設区分）
	空気弁の被害箇所
	フロート弁体の種類，弁体の材質
	空気弁の設置場所，直近の配管形態
空気弁破損に伴う復旧等の対策	空気弁破損に伴う断水の有無
	空気弁修繕までの期間
	復旧材料の調達までの期間
異常挙動の状況	水圧・流量変化の有無
	流量の停止，減少の有無，原因
	水圧・流量変化の時間

2.2.3　アンケート回収状況と信頼性

回収のできたアンケートは 137 件であり，回収率は 65.5%であった．都道府県別の回収率を**表-2.2** に示す．

母集団の大きさを全事業体数である 209 とし，次式を用いて信頼度 95%に対する必要回答数の計算を行った．

$$n \geq \frac{N}{\left(\frac{e}{k}\right)^2 \frac{N-1}{\pi(1-\pi)}+1} \tag{2-1}$$

ここで，

n：必要標本数　N：母集団の大きさ

e：目標精度　　a：信頼率

π：母比率　　k：信頼率に対応する標準正規分布の%点とする．

目標精度 e を 5%，信頼率 a を 95%（1.96），母比率 π は最も安全な（大きな）標本の大きさを得ることができる 0.5 とする．式（2-1）より必要標本数は，135.6 件となった．回収したアンケート数は 137 件であり，アンケートの信頼性は得られたといえる．

表-2.2　アンケート回収率

都道府県	母数	回収数	回収率(%)
福岡県	62	40	64.5
佐賀県	20	13	65.0
長崎県	21	18	85.7
熊本県	29	19	65.5
大分県	16	11	68.8
宮崎県	23	17	73.9
鹿児島県	38	18	47.4
全体	209	136	65.1

2.3　調査結果

(1) 空気弁破損被害の発生状況

空気弁の破損被害が生じた事業体，震度，及び空気弁の破損被害数の内訳は**表-2.3** に示すとおりであり，11 事業体で合計 33 箇所の破損被害が発生した．また，**図-2.1** に被害のあった事業体の位置を示す．**図-2.1** によれば，被害は震央付近の熊本県と大分県に集中していることがわかる．一方，佐賀県佐賀市や宮崎県延岡市といった震央から比較的離れた地域においても被害が発生していた．

表-2.3　各事業体の空気弁の被害箇所数

都道府県	事業体名	空気弁破損被害数
佐賀県	A	3
	B	2
熊本県	C	8
	D	1
	E	9
	F	1
	G	1
	H	1
大分県	I	4
	J	2
宮崎県	K	1
合計		33

図-2.1　被害発生事業体の所在地 [1)]

次に，前震又は本震における空気弁の破損被害発生状況について結果を**表-2.4**，**図-2.2** に示す．ここで，前震は，2016 年 4 月 14 日 21 時 26 分に発生した地震で，熊本県熊本地方を震央とし，震源の深さ 11 km，マグニチュード 6.5，同県の益城町で最大震度 7 を記録した [2)]．本震は 2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した地震で，熊本県熊本地方を震央とし，震源の深さ 12 km，マグニチュード 7.3，同県の西原村と益城町で最大震度 7 を記録した [2)]．表より，前震で被害が発生した事業体は 2 事業体のみで，半数以上の事業体では本震での被害であった．**表-2.5** に被害の発生した事業体所在地の震度と被害の発生した地震を示す．表より，被害のあった事業体の多くは，本震による揺れが大きく，その影響を受けたものと考えられる．

表-2.4　空気弁被害が発生した地震

分類	被害事業体数
前震のみ	0
本震のみ	6
両方	2
不明	3
合計	11

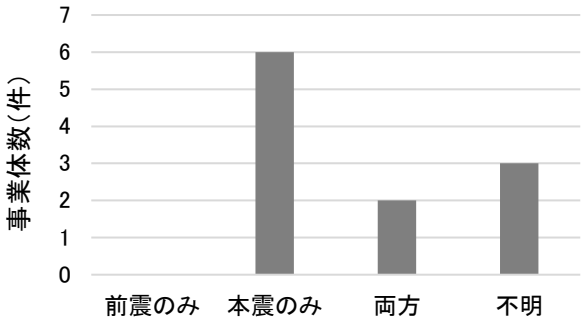


図-2.2　空気弁被害が発生した地震

表-2.5　各事業体の震度と被害の発生した地震

都道府県	事業体名	震度（前震）	震度（本震）	被害の発生した地震（前震 or 本震）
佐賀県	A	4	5 強	本震
	B	4	5 弱	両方
熊本県	C	5 強	6 強	不明
	D	6 弱	6 強	不明
	E	5 強	6 強	両方
	F	3	5 強	本震
	G	6 弱	7	本震
	H	5 強	6 弱	不明
大分県	I	3	5 弱	本震
	J	2	5 弱	本震
宮崎県	K	4	5 弱	本震

(2) 空気弁の破損被害の形態

空気弁の構造 [3]を**図-2.3** に示し，空気弁の破損部位の内訳と割合を**表-2.6**，**図-2.4** に示す．破損部位を見ると，遊動弁体の破損(**写真-2.1**)が最も多く，次いでフロート弁体(**写真-2.2**)，フランジ継手部(**写真-2.3**)の順であった．

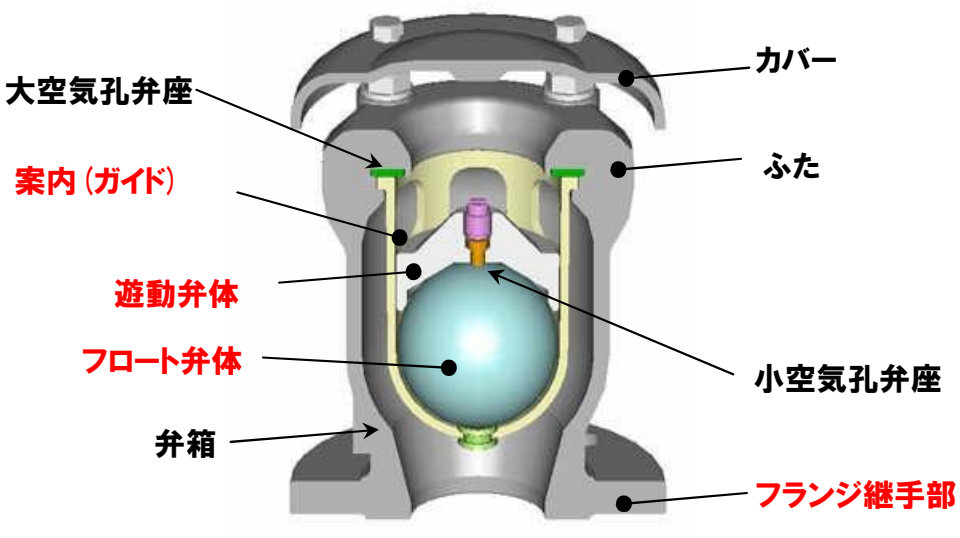


図-2.3　空気弁の構造 [3]

(「平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より転記)

表-2.6　空気弁の破損部位内訳

部位	被害数
遊動弁体	10
フロート弁体	7
フランジ継手部	5
フロート弁体案内(ガイド)	2
カバー	2
その他	5

※未回答は除く

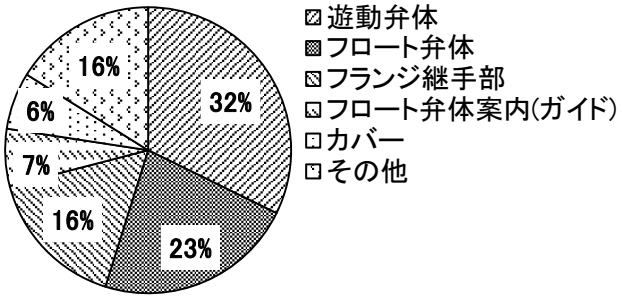


図-2.4　空気弁の破損部位の割合

写真-2.1　破損した遊動弁体[4)]

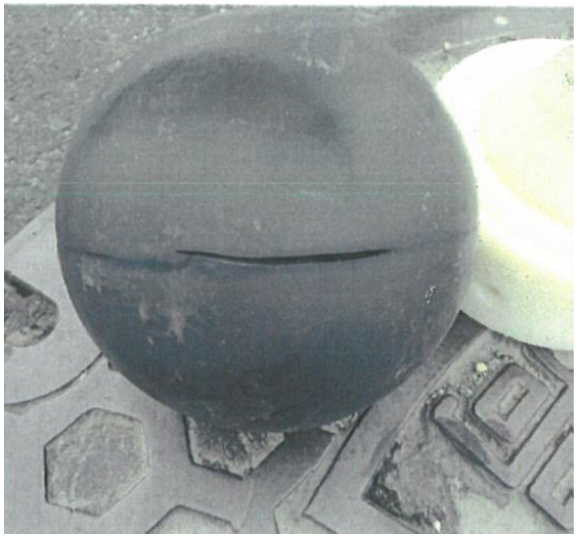
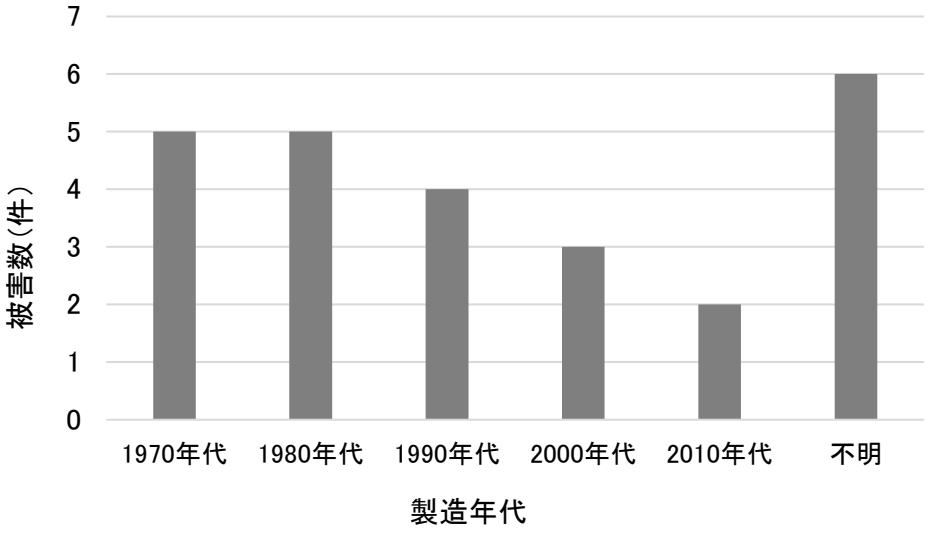


写真-2.2　破損したフロート弁体[4)]

写真-2.3　フランジ継手部からの漏水[4)]

(3) 破損被害を受けた空気弁の製造年

破損被害を受けた空気弁の製造年のアンケート結果を**図-2.5** に示す．いずれの空気弁も 1970 年以降に製造されたものであり，古い年代ではやや被害が多く発生している一方で，2000 年以降に製造された比較的新しい空気弁も破損している．



※上図において未回答(8 箇所)は除く

図-2.5　破損した空気弁の製造年

(4) 破損被害を受けた空気弁の周辺状況

破損被害を受けた空気弁付近の管路形態の内訳と割合を**表-2.7**，**図-2.6** に示す．図より，80%以上が曲管等の異形管であり，被害箇所付近では管路形態の変化が生じていることが分かる．

表-2.7　空気弁付近の管路形態内訳

形態	被害数
45 度曲管	10
T 字管	8
90 度曲管	2
その他	2
不明	3

※未回答(8 箇所)は除く

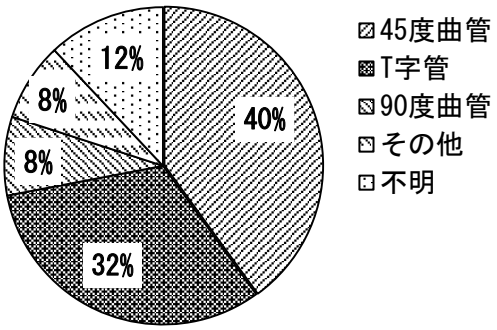


図-2.6　空気弁付近の管路形態の割合

次に，被害を受けた空気弁の設置箇所を**表-2.8**，**図-2.7** に示す．空気弁の設置箇所を見ると，被害が発生した空気弁の 40%の空気弁は水管橋など管路の凸部，橋梁添架管などに設置されていることが分かった．

表-2.8　空気弁の設置箇所内訳

設置箇所	被害数
管路の凸部，水管橋，橋梁添架管	10
勾配のない管路	5
平坦部から下り勾配に移る地点	3
遮断弁の前後	2
その他	2
不明	3

※未回答（8 箇所）は除く

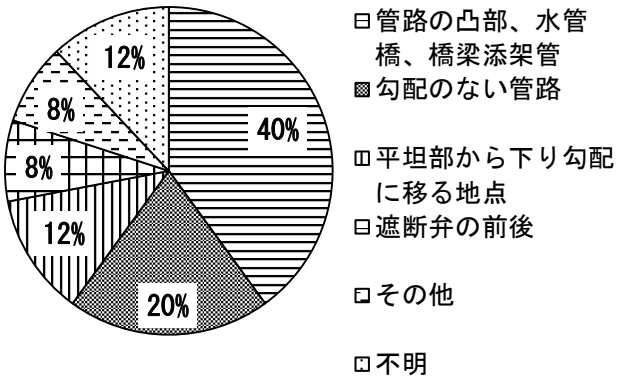


図-2.7　空気弁の設置場所

なお，空気弁の全設置母数は非常に多く，事業体の方では，これらの竣工当時のデータについて不明な部分も多く，データを入手できなかったため，被害のなかった空気弁も含め，上記調査項目における被害率の算定が不可能であった．そのため，ここでは被害のあった空気弁に限定した調査結果にとどめている．

(5) 空気弁破損に伴う復旧等の対応

復旧期間別の破損被害を受けた被災事業体数と割合を**表-2.9**，**図-2.8** に示す．図より，即日復旧対応できた事業体が 28%であるのに対して，復旧に 1 週間程度以上要した事業体は約 54%と半数を占めており，その中でも 1 か月以上期間を要した事業体もあった．

表-2.9　復旧期間別の被災事業体数

復旧期間	被災事業体数
即日	3
2～3 日	0
1週間	2
1か月	2
1か月以上	2
不明	2

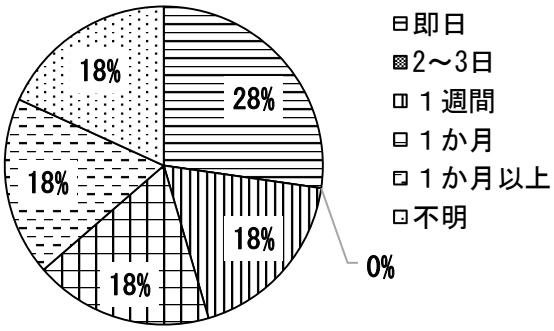


図-2.8　復旧期間別の被災事業体の割合

次に，材料調達期間別の破損被害を受けた被災事業体数と割合を**表-2.10**，**図-2.9** に示す.図より,2～3 日までに調達できた事業体が 18%であるのに対して，1 週間程度以上要した事業体は約 72%と大半を占めており,その中でも 1 か月以上期間を要した事業体もあった.

表-2.10　調達期間別の被災事業体数

調達期間	被災事業体数
即日	1
2～3 日	1
1週間	3
1か月	4
1か月以上	1
不明	1

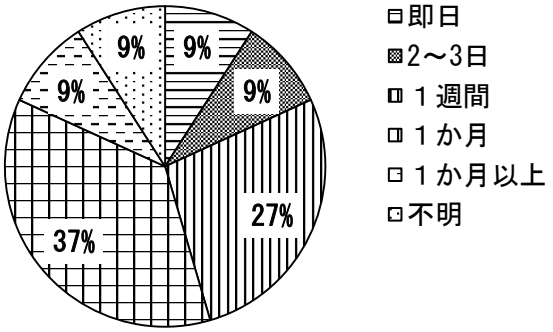


図-2.9　調達期間別の被災事業体の割合

2.4　考察

(1) 空気弁破損被害の発生状況

空気弁の破損被害箇所は，震央付近に集中しているが，佐賀県や宮城県といった震央から離れている地域や，比較的震度の小さい地域においても被害が発生している．熊本地震では，前震と本震の 2 度の大きな揺れが起こったが，被害は本震で多数発生していた．被害の発生した各地点の震度を調査すると，本震のみで被害の発生した地点は，前震での震度は小さかった所が多い．前震と本震で，最大震度は 7 で同じであったがマグニチュードに差があり，その影響を受けて本震では強い揺れが伝わる範囲が広くなり，被害が拡大したと考えられる．

(2) 空気弁の破損被害の形態

被害の多かった遊動弁体・フロート弁体は，管内の水に含まれる空気排気を効率よく行うための部位である．ここで，吸排気の仕組みについて補足すると，管内の水に含まれる空気が空気弁内に溜まると，水位の低下に伴い，遊動弁体・フロート弁体が降下し，空気孔弁座が開放され，排気が行われる．排気が完了するとフロート弁体は上昇し空気孔が閉じ，この動作を自動的に繰り返して管路内の空気の排気を行うものである．これらの部位は水圧変動の影響を受けるため，熊本地震においてもその影響を大きく受けたものと考えられる．また，フロート弁体案内（ガイド）・カバーも同様に水圧変動の影響を受ける部位であり，その影響を受けたものと考えられる．一方，遊動弁体，フロート弁体に次いで破損が

多かったフランジ継手部は，水道管と空気弁を繋ぐ役割を担う部位で外部に接しており，水圧変動の影響を受けない．そのため，当該部位の破損は経年劣化や，地震の揺れによる直接的な外力によるものと考えられる．

(3) 破損被害を受けた空気弁の製造年

2000 年以降に製造された比較的新しい空気弁について，耐食性・耐久性が向上しているにもかかわらず破損していたことから，想定水圧以上の急激な水圧変動が影響を与えた可能性が考えられる．

(4) 破損被害を受けた空気弁の周辺状況

異形管部等の変化点において，地震の揺れによる動水圧が発生し，この水圧変化が空気弁に影響を及ぼした可能性が考えられる．また，被害の多かった管路の凸部や平坦部から下り勾配に移る地点は最も空気泡がたまりやすく，水圧変動の影響を最も受けやすいと考えられる．その一方で，勾配のない管路等の他の場所でも被害が生じている．なお，管路の凸部の設置母数が多いことで空気弁被害数が多くなった可能性も考えられる．

以上のことから，破損被害のあった空気弁の多くは，水圧変動の影響を受けたことに加えて，その被害の特徴から，水圧変動の影響を受けやすい環境にあったものと推察される．

(5) 空気弁破損に伴う復旧等の対応

破損した空気弁については，内部部品の交換や新しい空気弁への取替え等による対応が必要となるが，メーカーの在庫等で対応できる数も限られていることもあり，今回のように多数被害が生じた事業体では，在庫等での即調達が困難であったと考えられる．これまでの多くの事業体では，管路耐震化の重要性から応急復旧計画等の中で，応急復旧資機材として主に管材料が備蓄されているものの，空気弁については，備蓄がない又は不足していたことで，その調達に時間を要したことが，復旧期間を長引かせた要因であると考えられる．

2.5　熊本地震と東北地方太平洋沖地震のアンケート調査結果の比較

本章のアンケート調査で得た結果について，平成 28 年度に実施した，2011 年東北地方太平洋沖地震での空気弁被害に関するアンケート調査結果 [5)]と比較する．**表-2.11** に熊本地震と東北地方太平洋沖地震の概要を示す．

まず，空気弁の被害が発生した地域について，**表-2.3**，**図-2.10** を参照すると，

両方の地震ともに震央付近及び震度の大きかった地域に被害が集中している一方で，熊本地震では佐賀県や宮崎県，東北地方太平洋沖地震では青森県から神奈川県までと，震央から比較的距離のある地域にも被害が及んでいる．また，被害の範囲について，**図-2.1** と**図-2.11** を比較すると，熊本地震に比べて東北地方太平洋沖地震では非常に広範囲に被害が及んでいることが分かる．**表-2.11** に示すように，熊本地震は内陸型地震であり，地震のエネルギーがマグニチュード 7.3，一方で東北地方太平洋沖地震は海溝型地震であり，マグニチュード 9.0 でエネルギーは約 350 倍になる．海溝型の東北地方太平洋沖地震は，エネルギーが非常に大きく震源も深いため，強い揺れが広範囲に伝わり，その影響を受けて，空気弁の被害も広範囲に渡ったものと考えられる．

表-2.11　熊本地震と東北地方太平洋沖地震の概要 [6) 7)]

	熊本地震	東北地方太平洋沖地震
震央	熊本県熊本地方	三陸沖(仙台市東方70km)
震源の深さ	12km	24km
持続時間	約20秒	160-170秒
規模	マグニチュード7.3	マグニチュード9.0
最大震度	震度7:熊本県熊本地方(益城町，西原村)	震度7:宮城県栗原市
地震の種類	内陸型地震	海溝型地震

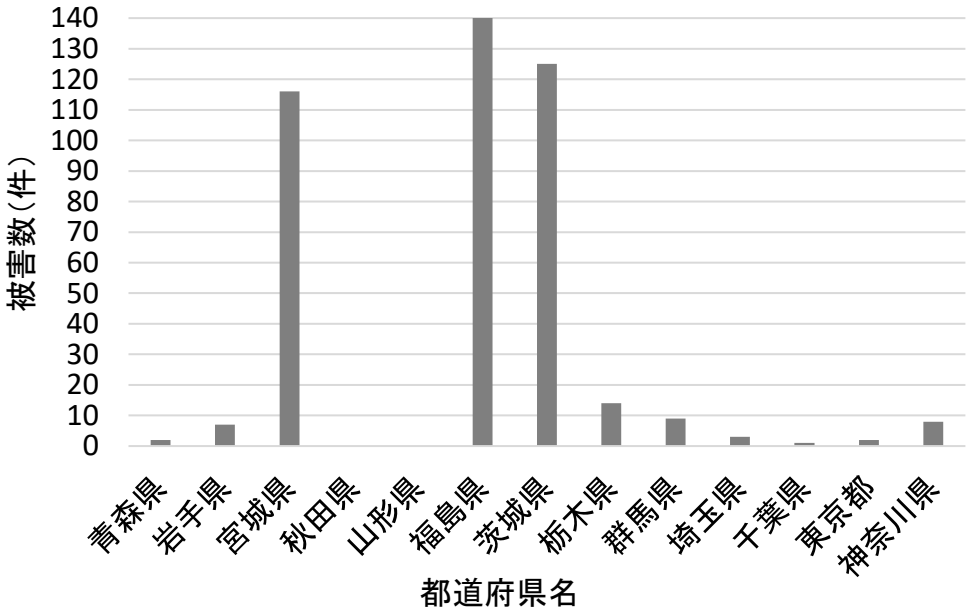


図-2.10　東北地方太平洋沖地震時の各都道府県における空気弁被害数 [5)]

図-2.11 東北地方太平洋沖地震において空気弁被害の発生した事業体所在地 [1)]

次に，空気弁の破損部位と要因について，**図-2.12**，**図-2.13**，**図-2.4** を比較する．熊本地震では，前述のように水圧変動が原因で破損したと考えられる遊動弁体・フロート弁体に破損被害が多く，地震直後の急な水圧変動の影響を大きく受けた．一方，東北地方太平洋沖地震では，遊動弁体の破損割合は少なかったものの，フロート弁体や同じく水圧変動の影響を受けやすいフロート弁体案内（ガイド）の割合が大きい．また，どちらの地震においてもフランジ継手部の破損は16～20%ほど生じており，地震の揺れによる直接的な外力の影響も同時に空気弁に影響を及ぼしている．

以上のことから，熊本地震のアンケート調査結果と平成 28 年度に実施した東北地方太平洋沖地震の空気弁被害に関するアンケート調査結果を比較した結果，被害の範囲に関しては地震の種類により大きな差があったが，空気弁被害の実態に着目すると，共通点が多くあることが分かり，その結果，被害形態や破損要因等の被害の実態をより明らかにすることができた．

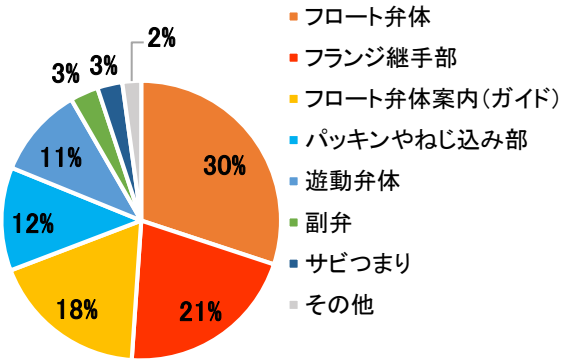


図-2.12 空気弁の破損部位 [5)]

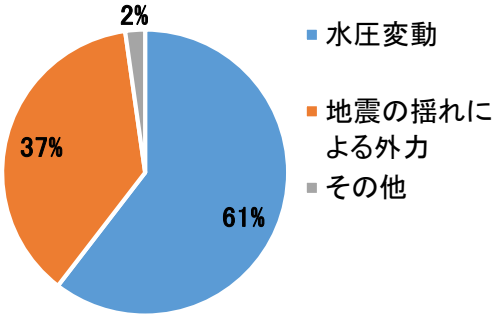


図-2.13 空気弁の破損要因 [5)]

2.6　被害要因の分析

2.6.1　概要

前述のアンケート調査結果では，熊本市上下水道局において，破損部位・原因等が特定されたものとして 8 か所の空気弁破損が計上されていたが，さらに，熊本市上下水道局から提供いただいた配水管網における漏水被害及び弁類等の管路付属設備被害箇所のデータを項目毎に集計・分析した結果，これらの破損部位等が特定された空気弁の他にも，多数の空気弁から漏水被害が生じていたことが判明した（**図-2.14**）．なお，これらの漏水被害については，空気弁の破損状況や漏水の原因が特定できなかったものも含めたものとしている．

そこで，空気弁の漏水被害に影響を及ぼしている要因を明らかにするため，地震動特性に焦点を当て，被害の多かった熊本市を対象に被害要因の分析を行うこととした．分析にあたって，これらのデータを基に，熊本市の配水管網と空気弁の漏水被害箇所の分布を作成したものを**図-2.15** に示す．

2.6.2　分析方法

前述のアンケート調査結果と熊本市上下水道局から提供いただいた空気弁漏水等の管路付属設備の被害のデータを基に，防災科学研究所の提供データ [8]と国土交通省国土技術政策総合研究所の提供データ [9]（以下，「J-SHIS 等データ」）を用いて，地震動特性として最大速度及び最大加速度による分析を行った．方法として，管路付属設備の内，空気弁の漏水被害が発生した地点の住所を J-SHIS 等データのマップに入力し，その地点を含む 250m 四方のメッシュの最大速度について調査・分析した．また，地理情報システム〔GIS：Geographic Information System〕（以下，「GIS」）を利用し，空気弁の漏水被害箇所データと最大速度及び最大加速度データを入力し，被害分布図を作成した．なお，被害が発生した箇所は，平成 28 年 4 月 14 日 21 時 26 分に発生した前震によるものか，平成 28 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した本震によるものか，特定されていない．そのため，分析にあたっての前提条件として，全ての被害が前震で発生したものと仮定した場合と本震で発生したものと仮定した場合の 2 パターンについて分析を行うこととした．

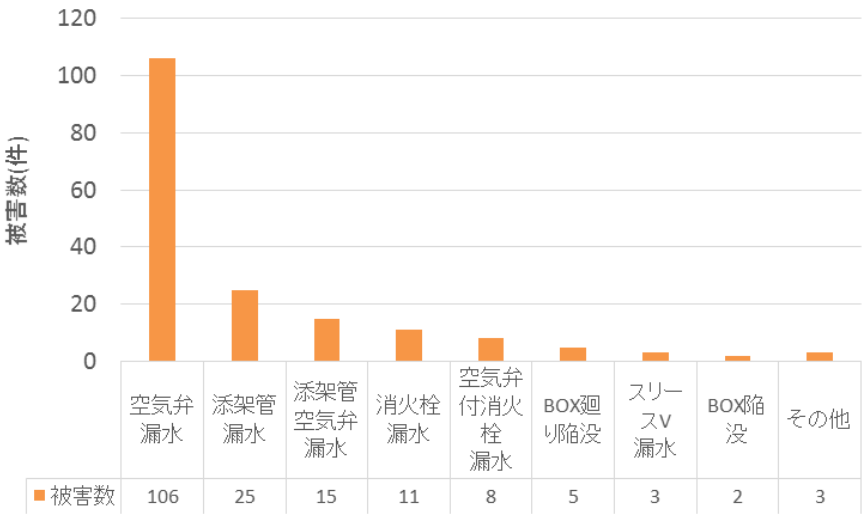


図-2.14　項目別の被害数

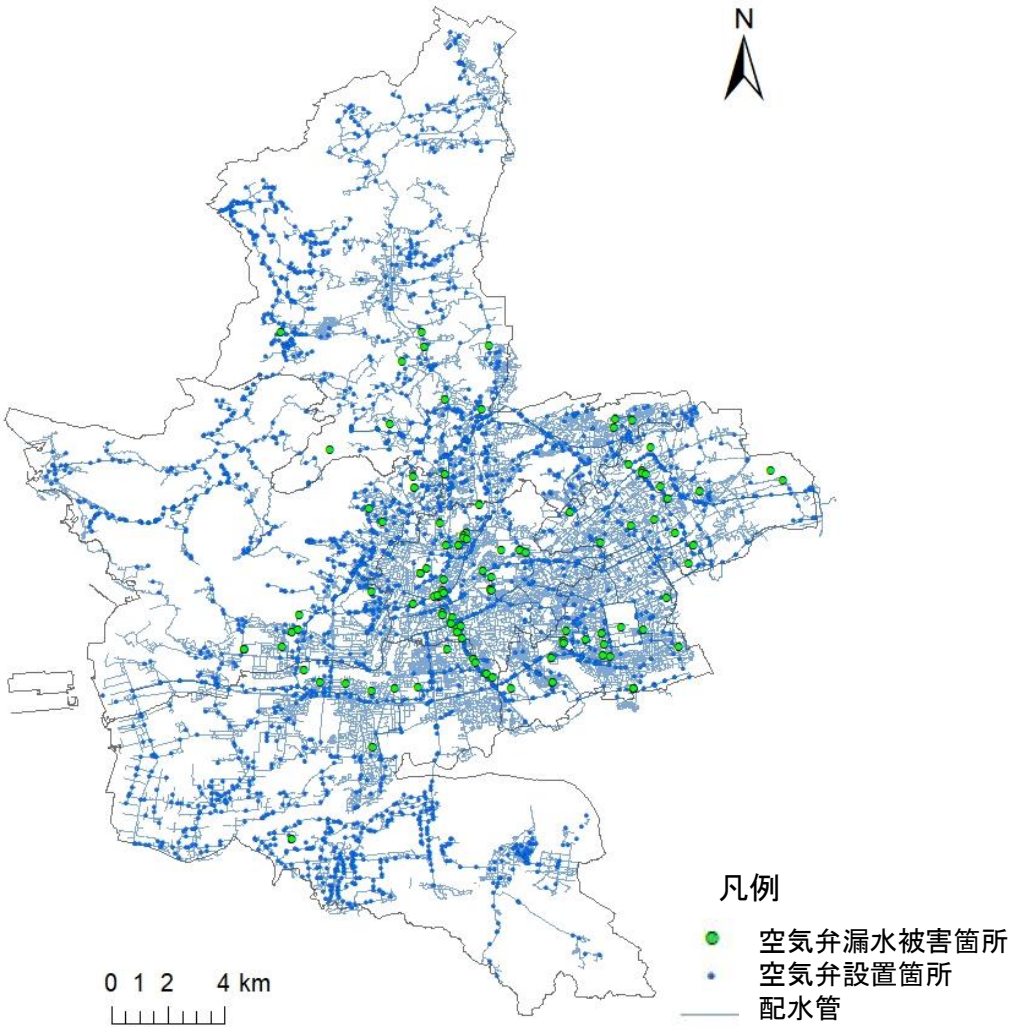


図-2.15　熊本市内の配水管網及び空気弁の漏水被害箇所

2.6.3　分析結果

(1) 空気弁の漏水被害と最大速度の関係

GIS にデータを入力し作成した最大速度及び空気弁の漏水被害の分布について，本震の場合を**図-2.16** に，前震の場合を**図-2.17** に示す．これらの図より，熊本市の中央及び東部を中心に被害が発生しており，最大速度（PGV）が 40cm/s 以上の所で，被害が多く発生している．次に，空気弁の漏水被害率（空気弁設置箇所数に対する漏水被害箇所数の割合）を最大速度毎に集計した結果について，**図-2.18** に示す．図より本震では，最大速度 40cm/s より，その増加に伴い被害率が徐々に増加する傾向となり，最大速度と被害率との相関関係を確認した．前震の場合も，最大速度 20cm/s より，その増加に伴い被害率の増加の傾向を確認した．

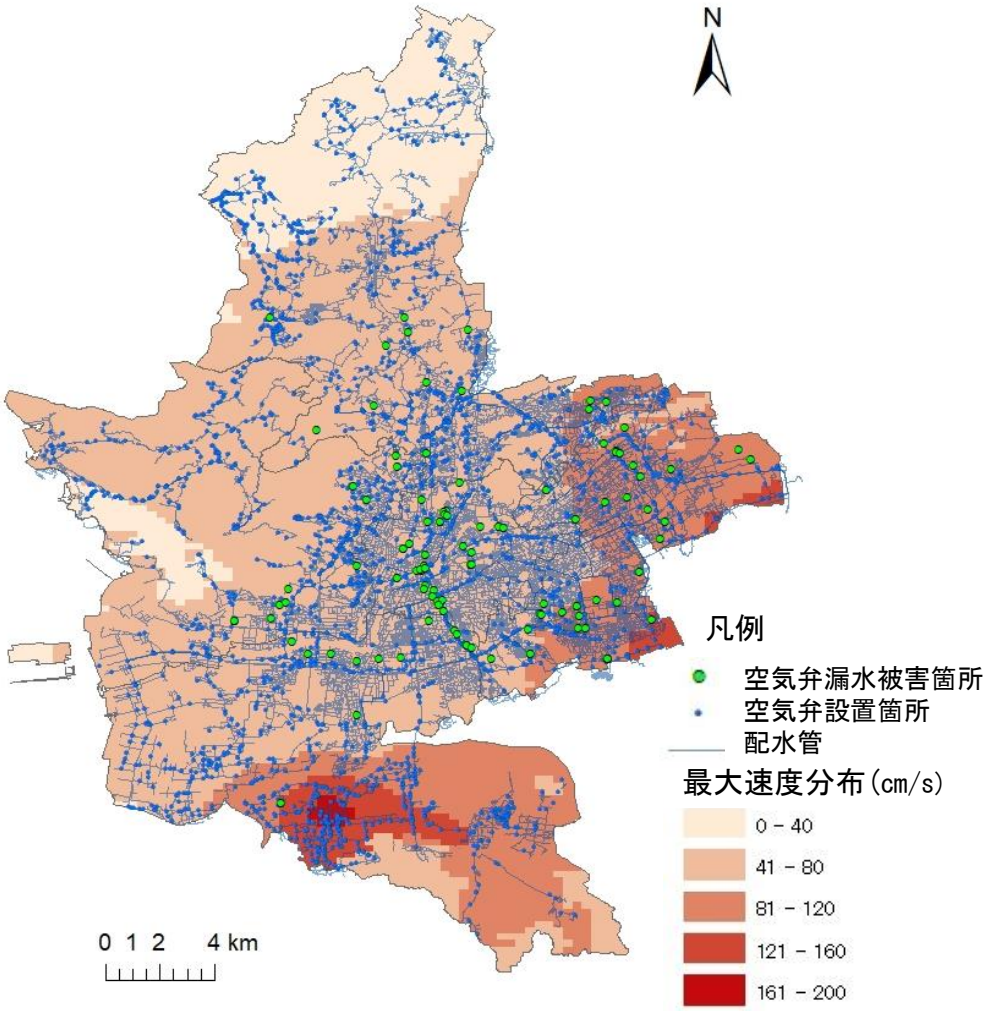


図-2.16　最大速度と空気弁の漏水被害分布（本震）

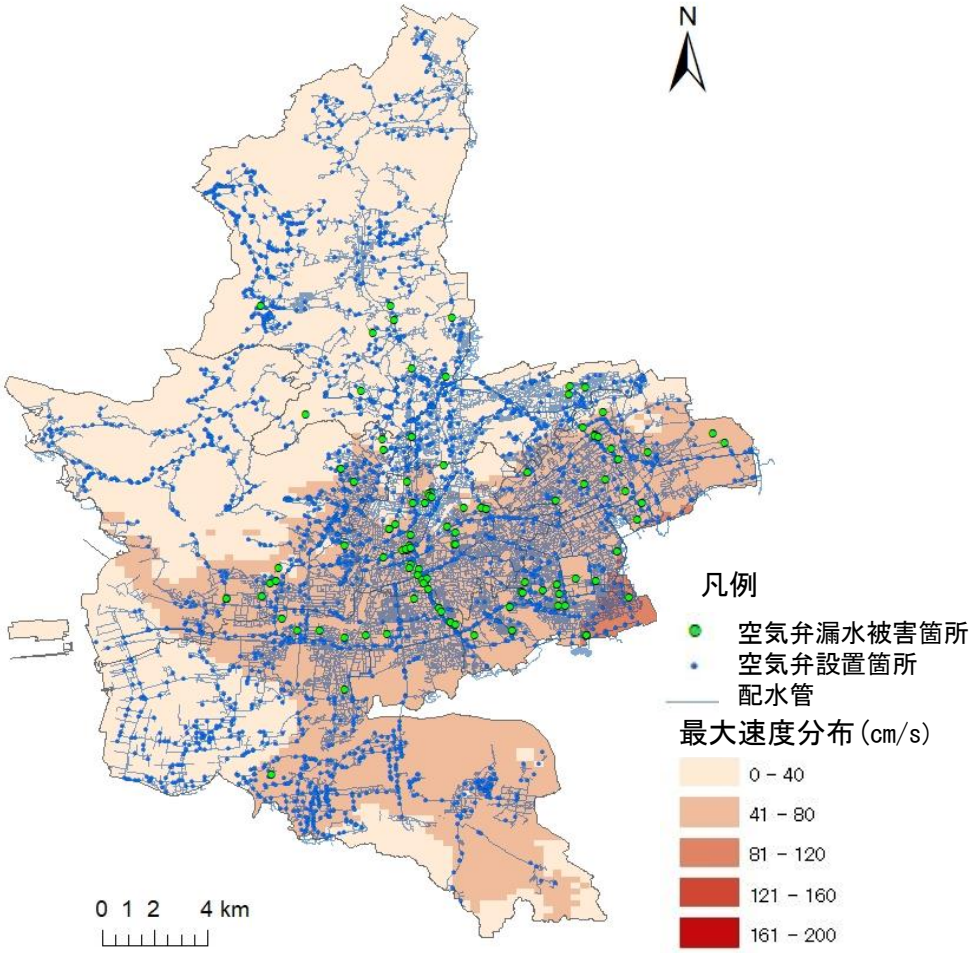
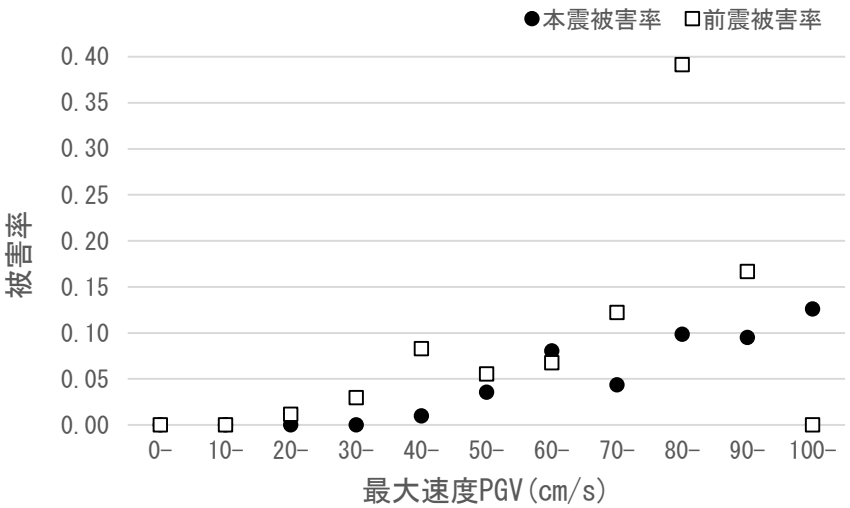


図-2.17　最大速度と空気弁の漏水被害分布（前震）



※被害率は空気弁設置箇所数に対する漏水被害箇所数の割合

図-2.18　最大速度別の漏水被害率の内訳

(2) 空気弁の漏水被害と最大加速度の関係

GIS にデータを入力し作成した，最大加速度（PGA）及び空気弁の漏水被害の分布について，本震の場合を**図-2.19** に，前震の場合を**図-2.20** に示す．これらの図より，前震と本震の場合とも最大加速度が 200cm/s^2 以上の所で，被害が発生している．次に，空気弁の漏水被害率を最大加速度毎に集計した結果について，**図-2.21** に示す．図より本震では，最大加速度 200cm/ s^2 以上において被害率が急増し，その後増加傾向となった．

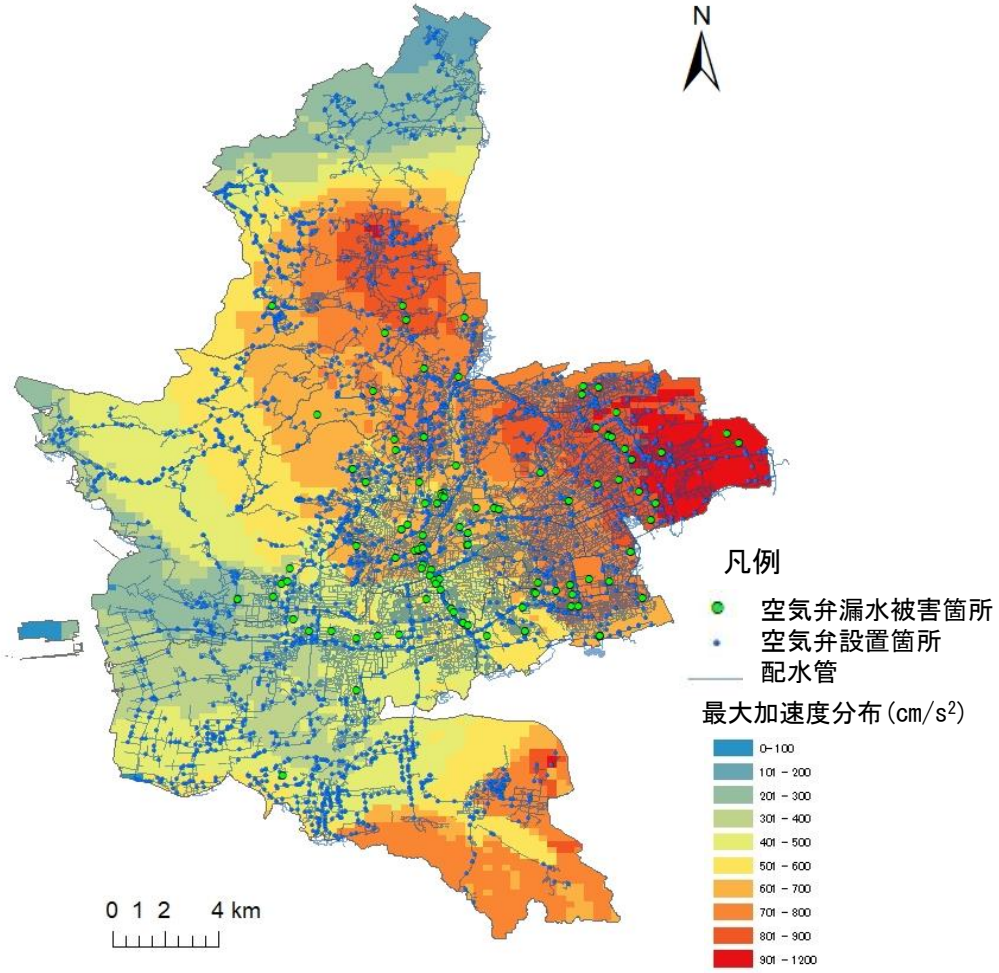


図-2.19　最大加速度と空気弁の漏水被害分布（本震）

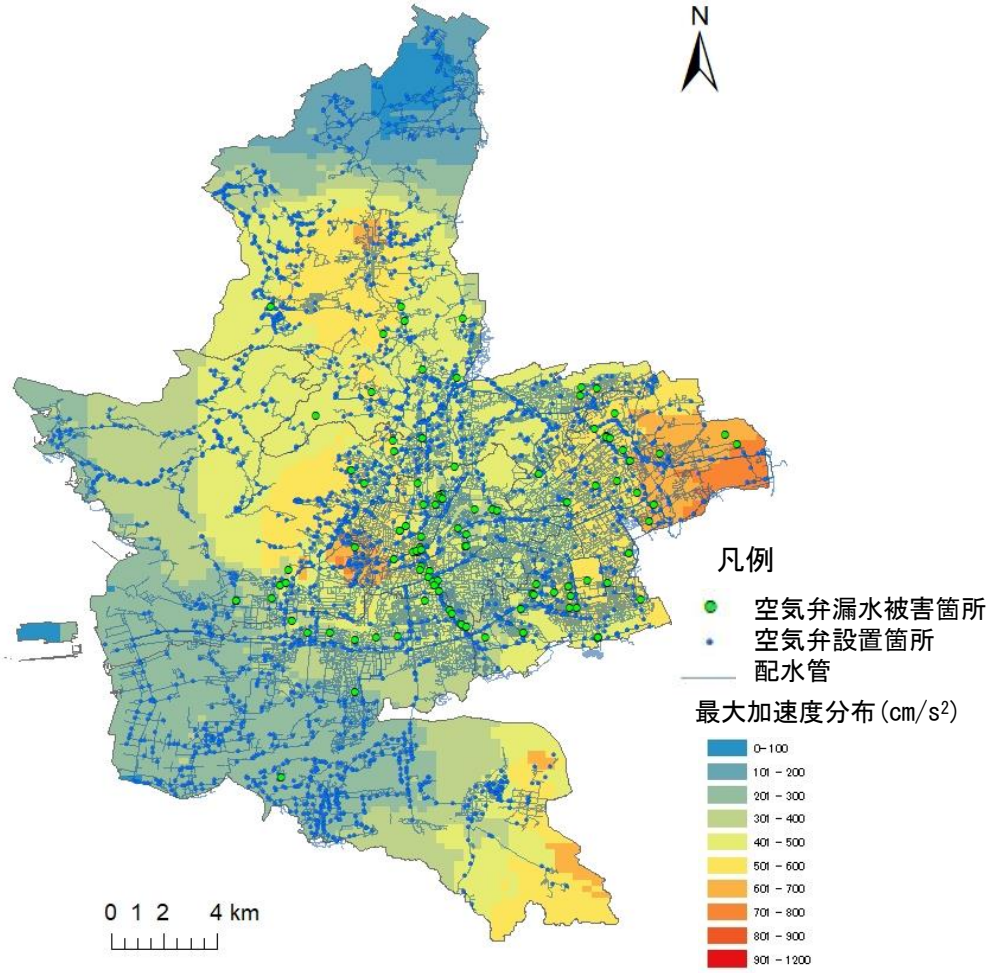
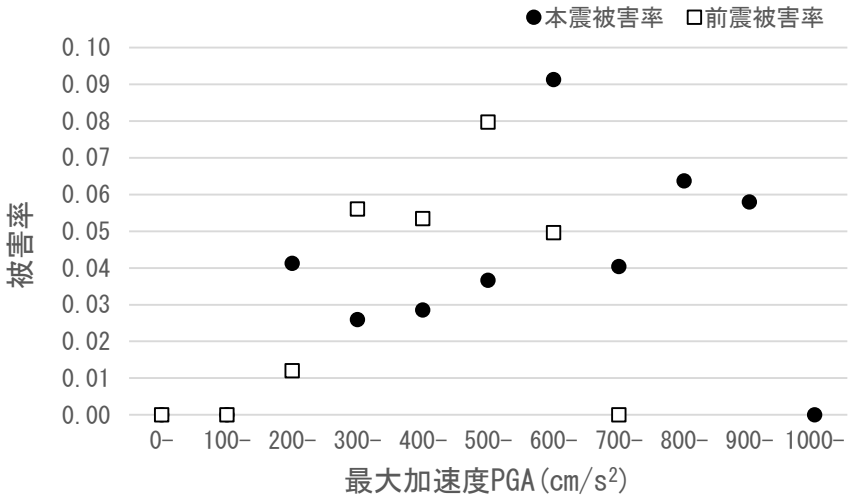


図-2.20　最大加速度と空気弁の漏水被害分布（前震）



※被害率は空気弁設置箇所数に対する漏水被害箇所数の割合

図-2.21　最大加速度別の漏水被害率の内訳

以上の結果から，最大加速度と被害率の関係に比べて，最大速度と被害率の関係の方が相関の良い結果となった．空気弁自体は，地盤中ではなく弁室空間内に設置されており，直接，地盤の動きの影響を受けず，外力として弁自体には地震時に慣性力が加わるため，加速度の影響を受けて，フランジ継手部や T 字部に破損被害が生じるものと考えられる．しかしながら，本結果では，最大速度と被害率に相関が確認された．この理由として，空気弁と管路は一体構造を成しており，この管路は地盤ひずみに追随して動き，地表面速度と地盤ひずみは比例関係にあることから地表面速度の影響を受ける．そのため，空気弁側でもこの管路の動きに伴う，何らかの影響を受けたものと考えられる．これらのことを踏まえ，次に，最大速度に焦点を絞り，破損被害の要因との関連について調べた．

(3) 空気弁破損被害の要因と最大速度の関係

熊本市上下水道局から提供いただいた，破損部位・原因等が特定された 8 か所の破損空気弁の詳細なデータを基に，その地点での最大速度と破損被害の要因との関連を調べた．前述の漏水被害箇所のうち，地図上にそれらの空気弁の抜粋した位置と最大速度の分布を示したものを**図-2.22** に示す．同図によれば，8 か所の空気弁は最大速度が 41cm/s 以上の比較的大きい地点に分布している．その破損要因は，水圧変動による破損が 4 か所，地震の揺れによる外力に伴う破損が 3 か所，両方が 1 か所という内訳であり，水圧変動による破損が多かった．これらのことから，空気弁破損の要因として，地震の揺れによる直接的な外力に限らず，地震時に発生する水圧変動の影響を大きく受けていることが明らかになった．

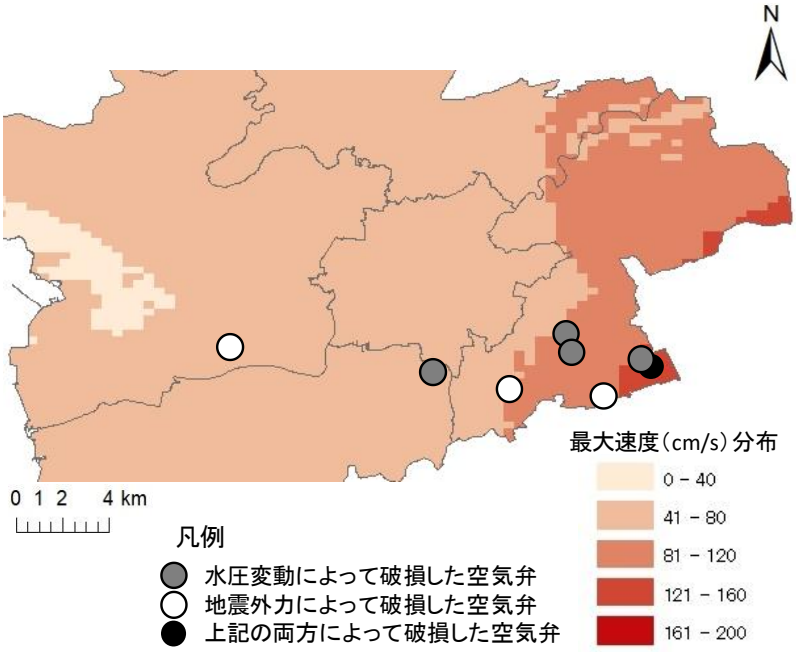


図-2.22　空気弁破損の要因と最大速度の関係

(4) 空気弁設置管路の口径別の漏水被害の特徴

図-2.23 に，空気弁設置管路の口径別に空気弁の漏水被害率（空気弁設置箇所数に対する漏水被害箇所数の割合）を整理したものを示す．この結果からφ400mm 以上の中大口径管に空気弁の漏水被害が顕著であることが分かる．被害が顕著であった中大口径管路は，水源である配水池流出部に近い管路，または，上流側の基幹管路であり，下流側の小口径管路に比べて水圧・水量も大きく，その変化の影響を受けた可能性が考えられる．

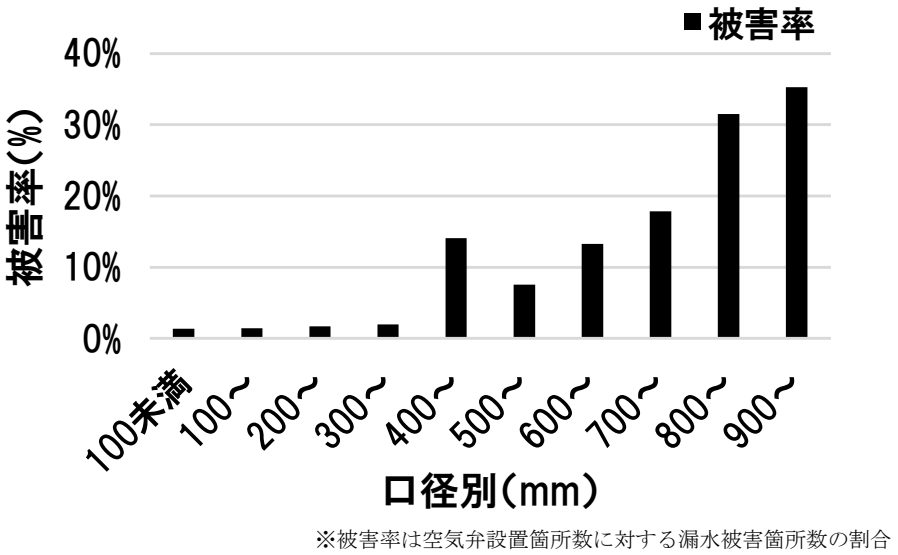


図-2.23　空気弁設置管路口径別の漏水被害率

(5) 配水池の配水方式の違いによる空気弁漏水被害への影響

配水池の配水方式別の空気弁漏水被害の状況とその内訳について**表-2.12** と**表-2.13** に示す．表より，配水方式は，自然流下方式又はポンプ加圧方式に大別されるが，それぞれの漏水被害について，その違いによる大きな差は見られず，配水方式の違いと漏水被害との相関は確認できなかった．

表-2.12　配水方式別の空気弁漏水被害数と被害率

配水方式	漏水被害数	空気弁母数	漏水被害率
自然流下	57	1059	**0.054**
ポンプ加圧	64	1437	**0.045**

表-2.13　配水区域別の空気弁漏水被害数と被害率の内訳

配水区域	配水方式	漏水被害数	空気弁母数	漏水被害率
岩倉山	自然流下	2	140	0.014
徳王	自然流下	10	186	0.054
城山	自然流下	9	49	0.184
万日山	自然流下	1	82	0.012
川尻	ポンプ加圧	1	45	0.022
健軍・秋田	ポンプ加圧	57	669	0.085
立田山	自然流下	11	81	0.136
小山山・高遊原	自然流下	20	268	0.075
和泉	自然流下	3	75	0.040
河内	自然流下	1	178	0.006
改寄	ポンプ加圧	1	19	0.053
鶴羽田	ポンプ加圧	0	23	0.000
西梶尾	ポンプ加圧	1	18	0.056
飛田	ポンプ加圧	1	12	0.083
富合	ポンプ加圧	1	300	0.003
植木	ポンプ加圧	2	351	0.006
その他	不明	0	11	0.000
合計		121	2,507	0.048

以上の結果からまとめると，水圧変動が空気弁の被害に影響を及ぼす一つ目の要因として，管内の動水圧変化の影響が考えられる．破損箇所付近では，地震時に動水圧変化が生じやすい管路形態であったものと考えられる．加えて，空気弁の漏水被害率については，最大速度との関係性があることから，この速度の影響を受けて被害に至ったものと推察される．

二つ目の要因として，配水池流出部付近の水圧変動の影響が考えられる．口径別の漏水被害の特徴から，被害が顕著であった中大口径管路は，配水池等の水源に近い上流側の基幹管路であり，下流側の小口径管路に比べて水圧・水量も大きく，その変化の影響を受けやすいことから，これらの管路で急激な水圧変動が生じたことが，多くの被害を顕在化させたものと考えられる．

2.7　急激な水圧変動をもたらす要因分析

前述の分析結果から，地震時の急激な水圧変動が空気弁破損・漏水を引き起こすことが示唆された．ここでは，被害空気弁付近における管路形態や水圧記録等から被害の特徴について，さらに詳細に調査・分析を行う．

2.7.1　空気弁の破壊形態とその要因

2011 年東北地方太平洋沖地震，2016 年熊本地震の弁体被害の特徴を踏まえると，地震時の急激な管内水圧変動に伴う，①空気弁内の弁急閉に伴う水撃圧の発生，②圧縮空気によるフロート弁体の上昇の 2 つの可能性が考えられる．①では**図-2.24** に示すとおり，フロート弁体，遊動弁体急閉止に伴って発生する水撃圧が作用する際，ガイドの構造上からガイド外部には逸散されにくい状況が想定され，ガイド内部に留まり，その内部で局所的に圧力が増幅して遊動弁体とガイドの破損を招いたものと考えられる．なお，フロート弁体については，ゴム製のタイプであったものについては，大きな被害が見受けられなかったが，中空タイプのものは凹み（圧縮）が発生している．②では，管内水圧の上昇に伴う混入空気の排気の際に，排気が十分にできない状況となり空気が圧縮されることでフロート弁体が跳ね上がるとともに，ガイド自体にも空気の圧縮力が作用することで破壊に至ったものと推察される．

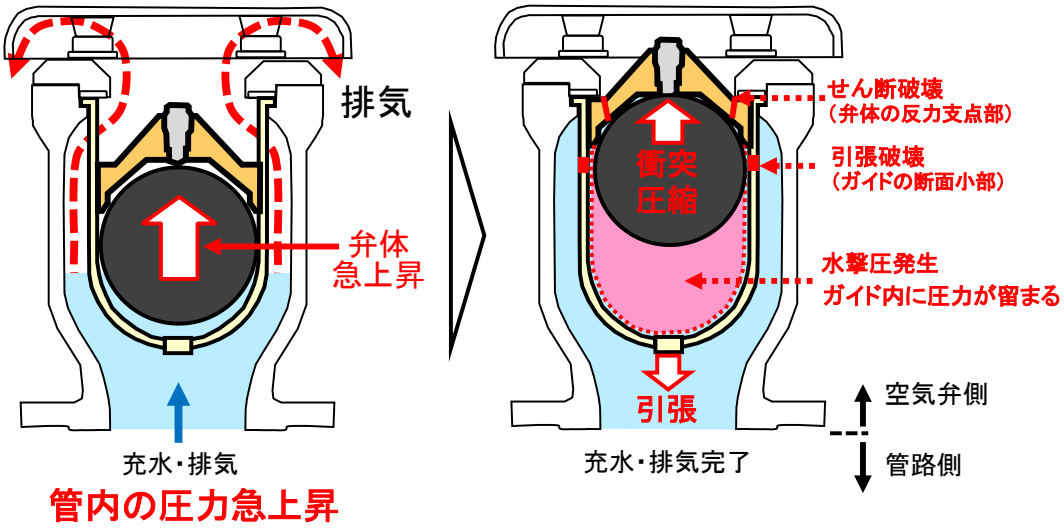


図-2.24　空気弁内の部品の破壊と想定される要因

2.7.2　管路形態の変化がもたらす管内動水圧変化

(1) 2016 年熊本地震における被害事例

空気弁内の部品が破損した箇所では比較的大きな揺れが生じていたことから，地震の揺れによる管内の水圧変化が生じたものと想定される．その一つの要因として，異形管等が存在する管路形態の変化点で正負交互の地震時動水圧が発生し，その圧力変化が空気弁付近にも伝わったものと考えられる．

前述の空気弁破損の要因が水圧変動と特定された 4 か所のうち，破損箇所付近の配管図面のあった，**図-2.25** の熊本市内東部に位置する 3 か所（図の破線囲み部）について，その破損内容と管路形態を**表-2.14** に示す．表より，破損箇所の直近に異形管等の変化点が存在していることが分かる．

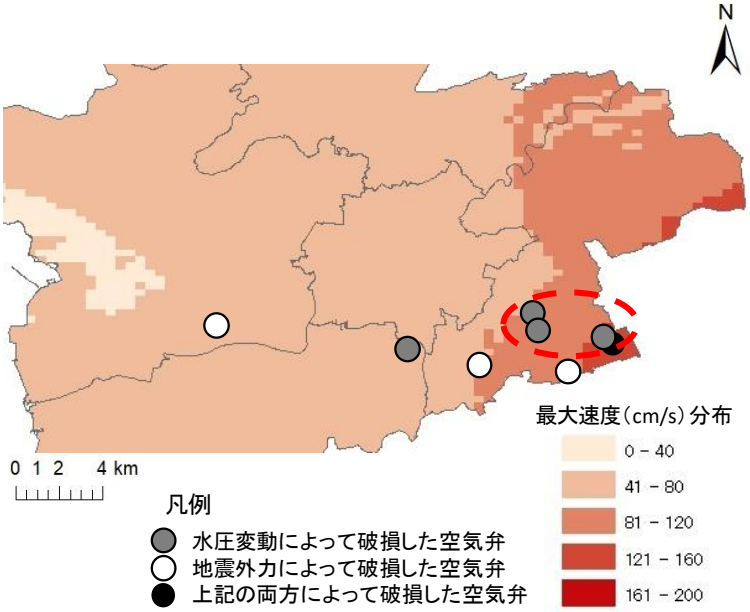


図-2.25　空気弁破損の位置と最大速度

表-2.14　空気弁の破損内容と直近の管路形態

No	弁破損内容	直近の管路形態
1	フロート弁体	90 度水平曲がり変化点付近
2	フロート弁体案内	45 度上下曲がり変化点付近
3	遊動弁体・カバー	45 度水平曲がり変化点付近

(2) 2011 年東北地方太平洋沖地震における被害事例

1) 概要

2011 年東北地方太平洋沖地震において空気弁被害の多かった茨城県における水資源機構の一部の用水施設を対象に，調査した．気象庁 HP の 2011 年東北地方太平洋沖地震における地震波形記録[11]より，当該施設付近（茨城県土浦市）の

土浦市常名観測所において，震度 6 弱，最大加速度 856.9gal，卓越振動数約 4Hz，地震時の NS 成分，EW 成分共にそれぞれの水平最大速度 30 cm /s（水平成分合成 45cm/s），水平最大変位 7 cm が観測されている．

被害の状況について，水資源機構からの提供データを基に，**表-2.15** のとおり整理した．全空気弁の内，7%の空気弁が破損しており，その特徴として，全て空気弁の内部部品の破損であった．なお，破損した空気弁は 1982 年から 1993 年に設置されており，比較的新しいものも多くあった．**図-2.26** に示すとおり，空気弁内部の主な構造は，フロート弁体案内（ガイド），遊動弁体，フロート弁体等で構成されており，これらのうち，破損した部品の状況を**写真-2.4**，**写真-2.5** に示す．

表-2.15　空気弁の被害箇所数

全設置箇所数	破損箇所数		
	計	ガイド	遊動弁体
244	17	13	4

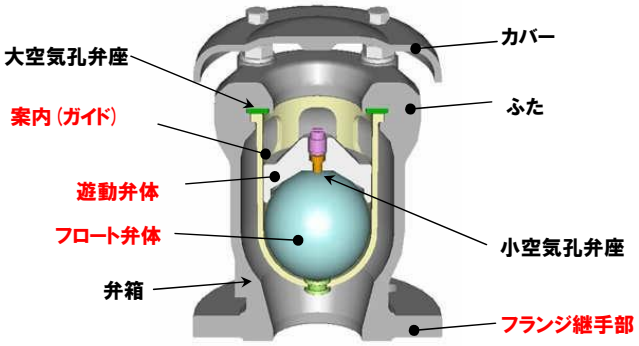


図-2.26　空気弁の構造 [3]（再掲）

写真-2.4　案内（ガイド）の破損状況（水資源機構より提供）[12]

写真-2.5　遊動弁体の破損状況（水資源機構より提供）[12)]

2）被害の特徴

この水圧変動を引き起こした要因について，空気弁の設置状況，管路形態の関係から分析する．まず，水資源機構の提供データを基に，全管路の内，被害が顕著であった送水区間における空気弁の被害の状況を**図-2.27** に示す．図より，2 条管路φ2200 区間上にある空気弁 11 か所が破損しており，被害箇所の特徴として標高 20m 未満の空気弁に被害は生じていないものの，20m 以上の比較的高所の空気弁に被害が集中していることが分かる．これらの空気弁の設置位置と付近の配管形態について整理したものを**表-2.16** に示す．表より，被害のあった空気弁の多くは下り勾配付近に設置されていること，また，曲管により管路の形態が変化していることが分かる．高所かつ下り勾配付近では空気が留まりやすく，これらの空気弁に集中して空気が排気されたものと考えられる．また，これらの空気弁は，比較的高所で位置水頭が高く，管内水圧が低いこと，さらに管路形態変化に伴う地震時動水圧の発生等も相まって，負圧が発生し得る環境であったものと考えられる．

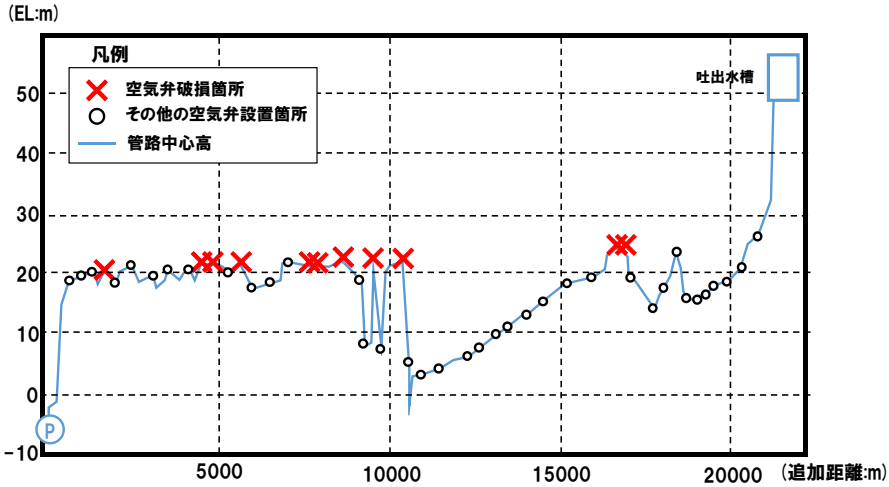


図-2.27　一部区間における管路の被害状況

表-2.16　空気弁被害箇所付近の状況

No	空気弁の設置位置		空気弁付近の配管形態
	箇所	標高(m)	
1	下り勾配手前	21	20度曲がり変化点付近
2	下り勾配手前	21	12度曲がり変化点付近
3	上り勾配直後	22	20度曲がり変化点付近
4	下り勾配	21	17度曲がり変化点付近
5	下り勾配手前	23	32度曲がり変化点付近
6	下り勾配手前	23	32度曲がり変化点付近
7	下り勾配	22	45度曲がり変化点付近
8	下り勾配手前	20	31度曲がり変化点付近
9	下り勾配手前	21	40度曲がり変化点付近
10	下り勾配手前	25	14度曲がり変化点付近
11	上り勾配直後 下り勾配手前	25	14度曲がり変化点付近

2.7.3　配水池流出部の水圧変動の影響

(1) 配水池流出部の水圧変動

・2016 年熊本地震による事例

前述の空気弁破損の要因が水圧変動と特定された 4 か所の空気弁は，健軍配水池と秋田配水池を水源とする配水区域における管路上に位置している（図-2.28）.

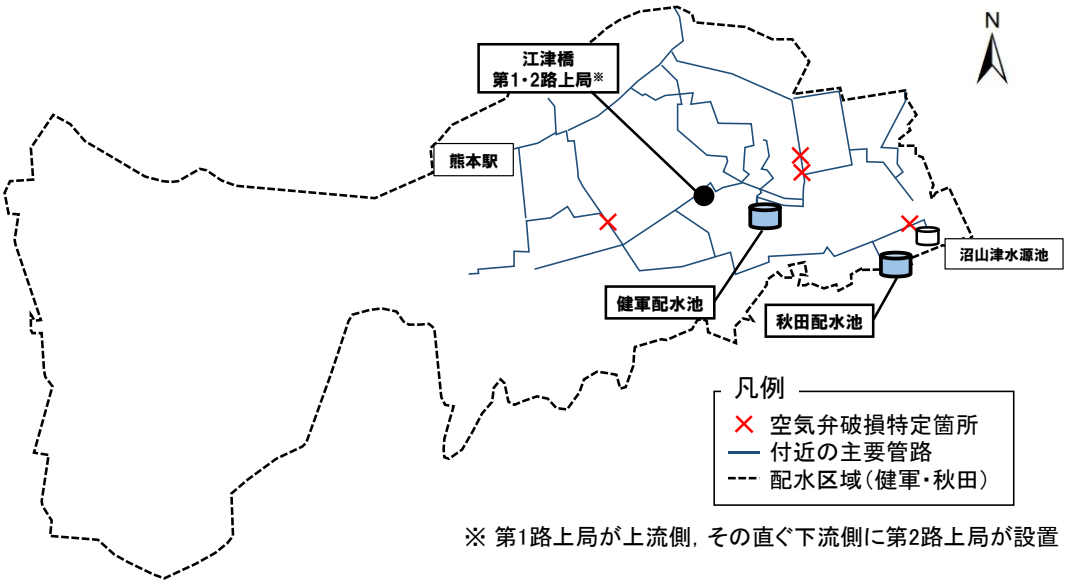


図-2.28　配水池と空気弁破損箇所の位置関係

なお，空気弁の破損は，前震によるものか，本震によるものか，特定されていないため，前震と本震のそれぞれの場合の現象を調査した．

前震発生前後の熊本市上下水道局秋田配水池及び健軍配水池における水圧・流量の変動記録を**図-2.29**，**図-2.30** に，本震発生前後の同箇所における水圧・流量の変動記録を**図-2.31** に示す．なお，本震時の健軍配水池の記録は不明であるため，掲載していない．

前震の場合において，**図-2.29**，**図-2.30** より，地震発生直後，数秒で約 0.5MPa から 0.1MPa に大幅な水圧低下が生じ，その後，水圧・水量が回復の動きを示していることが分かる．さらに，その後，地震の揺れに伴う下流側管路・空気弁等の漏水発生により地震直前の水圧に比べて低下が継続したものと考えられる．本震の場合も前震と同様に，**図-2.31** より，地震発生直後，約 0.3MPa から 0.1MPa に大幅な水圧低下が生じ，その後，水圧・水量が回復の動きを示している．なお，前震と本震のいずれの場合も，地震発生直後，配水池流出管において，水撃圧に相当する圧力低下が生じており，この原因については，図に示す水圧を記録している配水池流出管が，配水池ポンプ設備（ポンプ，バルブ等）の下流側に位置していることから，地震時初期に負の動水圧が発生したものと想定されるが，詳細は不明である．

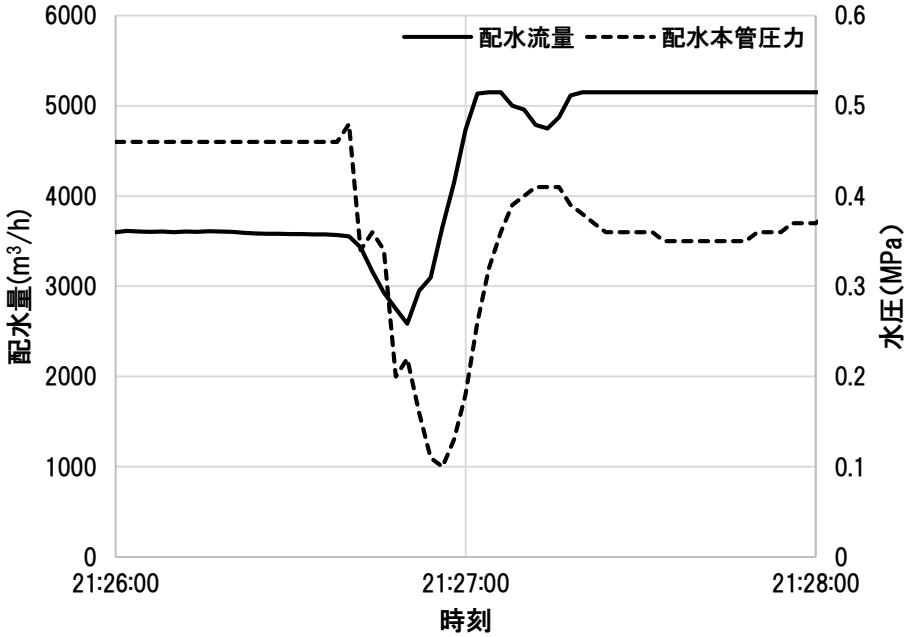


図-2.29　前震発生前後の秋田配水池流出管の水圧・流量記録

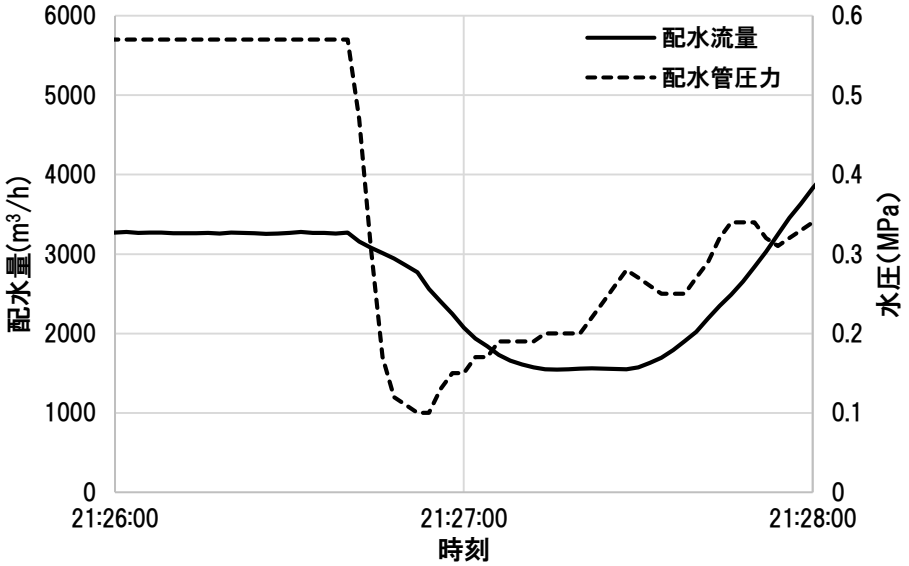


図-2.30　前震発生前後の健軍配水池流出管の水圧・流量記録

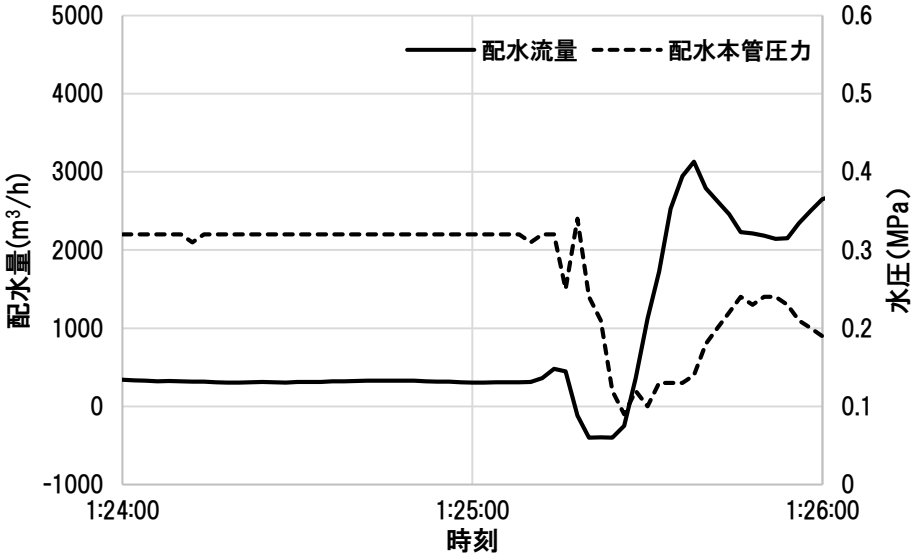


図-2.31　本震発生前後の秋田配水池流出管の水圧・流量記録

次に，同配水区域内の下流側管路で計測された水圧・水量変動について前震の場合を**図-2.32** に，本震の場合を**図-2.33** に示す．

図より，前述の配水池流出部の水圧変動と同様に，当該配水池から供給される下流側管路の水圧において，急激な圧力低下後，圧力回復といったように同じ傾向を示していることから，地震直後の配水池流出部の急激な水圧変動の影響を受けたことが明らかである．また，水圧が計測下限値 0 を示していることから，下流側管路内において負圧発生により空気が混入したものと考えられる．

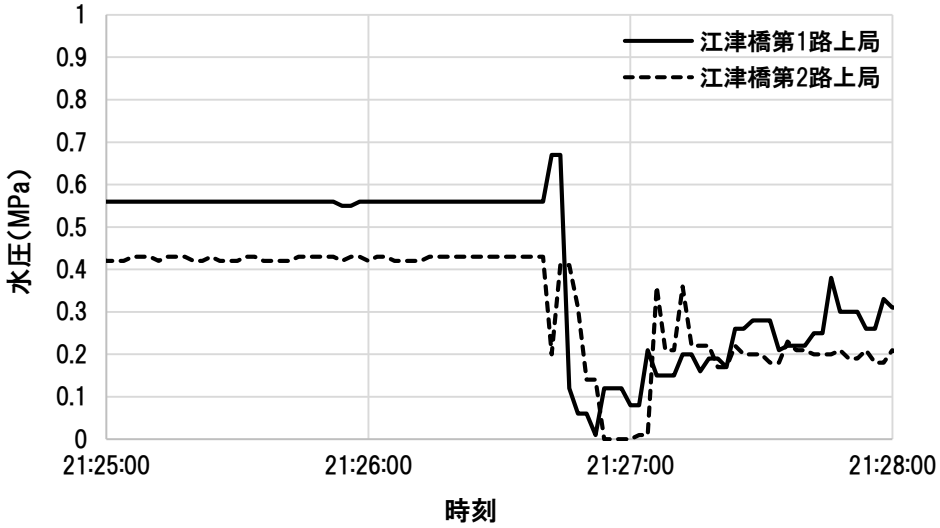


図-2.32　前震発生前後の健軍・秋田配水区域の管路（江津橋第 1・2 路上局）の水圧記録

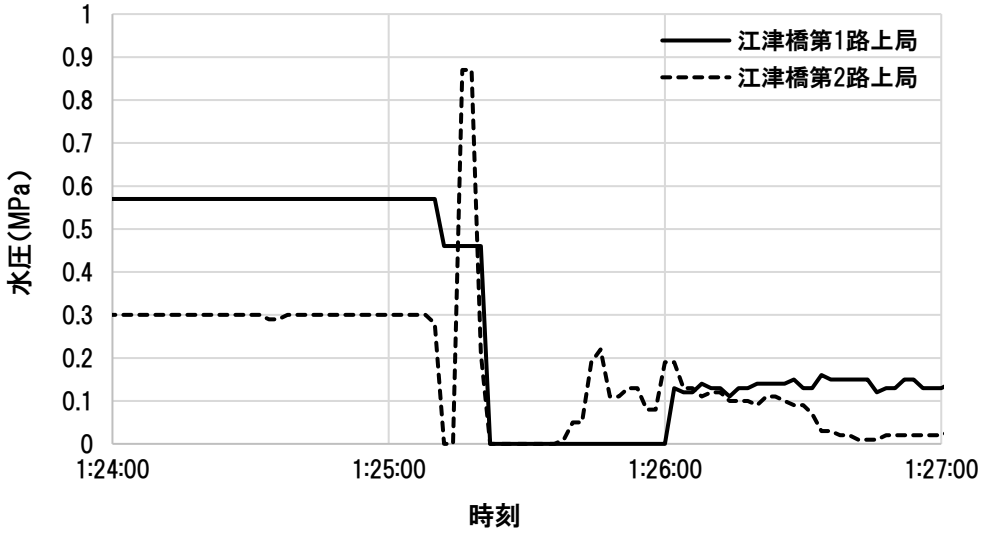


図-2.33　本震発生前後の健軍・秋田配水区域の管路（江津橋第 1・2 路上局）の水圧記録

以上のことから，急激な水圧変動をもたらす要因の一つ目に，管路形態の特徴として，異形管が多く存在し，比較的高所で位置水頭が高く，初期の管内水圧が低いことが挙げられ，地震時動水圧が発生した場合，負圧が発生し得る状況であったと考えられる．二つ目に，地震直後の配水池流出部及び，下流側管路内の水圧記録から，急激な圧力低下後，圧力回復傾向を示し，地震直後の配水池流出部の急激な水圧変動の影響を受けたことが明らかであり，下流側管路内において負圧発生により空気が混入する状況であったと考えられる．

2.8　まとめ

本章では，地震時に破損した空気弁の被害要因に係る調査と分析を行い，その結果，被害の特徴と要因について，次のとおり明らかになった．

- 空気弁の破損部位として遊動弁体やフロート弁体といった空気弁内部の破損の割合が多く，これらの被害には地震直後に発生する急激な水圧変動が大いに影響する．
- 地震による直接的な外力の他に，地震によって発生する水圧変動がきっかけとなって空気弁の破損や漏水被害を引き起こしていることが明らかになった．
- 最大速度及び最大加速度の増加に伴って漏水被害率も上昇する傾向であり，これらのうち最大速度と漏水被害率との相関がある．
- 破損した空気弁の周辺状況や被害の特徴から，異形管が存在し，管内の水圧変動の影響を受けやすい環境に設置されていた．また，位置水頭が高い，もしくは，管内の初期水圧が低いことから，地震時動水圧が発生した場合，負圧が発生し得る可能性がある．
- これらの特徴を踏まえ，空気弁に影響を及ぼす一つ目の要因として，管路形態の変化，地表面速度の影響によって管内の動水圧変化が生じ，被害に至ったものと推察される．二つ目の要因として，地震直後の配水池流出部の急激な水圧低下・回復といった水圧変動が生じ，被害に至ったものと推察される．

第 2 章の参考文献

1) グーグルマイマップ（2016 年 12 月 23 日アクセス）
2) 気象庁 HP：http://www.jma.go.jp/jma/press/1605 /14a/201605141000.html （2016 年 12 月 10 日アクセス）
3) 社団法人日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書，pp.109-119，2012.
4) 熊本県上下水道局：2016 年熊本地震における修繕依頼兼精算書，2016.
5) 石田明久：上水道の配水管網における空気弁の地震被害要因に関する研究，平成 27 年度（2015 年）金沢大学修士学位論文，2015.
6) 気象庁ホームページ,「平成 28 年（2016 年）熊本地震」について（第 38 報），(2016 年 12 月 10 日アクセス)
7) 気象庁ホームページ，地震・津波の観測・解析データ，（2016 年 12 月 10 日アクセス）
http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/2011_03_11_tohoku/index.html
http://www.jma.go.jp/jma/press/1605/14a/201605141000.html
8) 国立研究開発法人防災科学技術研究所 HP：
J-SHIS ハザードステーション，J-SHIS Map,
http://www.j-shis.bosai.go.jp/（2016 年 12 月 25 日アクセス）
9) 国土交通省国土技術政策総合研究所 HP：
http://www.nilim.go.jp/lab/rdg/eq/16km/16km.htm（2017 年 9 月 10 日アクセス）
10) 気象庁 HP：http://www.data.jma.go.jp/svd /data/kyoshin/jishin /1604160125_kumamoto/index2.html（2018 年 3 月 30 日アクセス）
11) 気象庁 HP：http:// www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/kyoshin/jishin /110311_tohokuchiho-taiheiyouoki/index.html（2017 年 10 月 30 日アクセス）
12) 水資源機構：2011 年東北地方太平洋沖地震における提供データ，2017.

第 3 章

実験による管内水圧変動に伴う影響の検証

第 3 章　実験による管内水圧変動に伴う影響の検証

3.1　はじめに

前章の分析結果から，地震時の急激な水圧変動が空気弁破損・漏水を引き起こすことが明らかとなり，その要因として，管内水圧の状況，管路形態の変化の影響と配水池流出部の水圧・流量変動の影響を受ける可能性が示唆された．管内動水圧の変化の影響と配水池流出部の水圧変動の影響のそれぞれの側面から，模型実験により再現を行い，その影響について検証する．

3.2　管路の振動に伴う管内動水圧変化

3.2.1　実験概要

前章の分析結果を踏まえ，空気弁破損被害の要因として，管路内の常時水圧の状況や管路形態の変化の影響を受けることが示唆されたことから，そのメカニズムを明らかにすることを目的として，管路模型による振動実験により，再現を行うこととした．

実験では，単一の配水管路を例に実験模型を作製し，実験的手法により配水管内の水圧変動の影響を定量的に検証した．実験模型は配水池から流出後の単一配水管路部を想定し，**図-3.1** に示すとおり，空気弁を有する管路模型(1/10)を作製し振動実験を行った．加振時の管内における水圧変化を計測し，**図-3.2** に示す各管路形態における，振動特性の変化と管内の水圧変化との関係について考察する．なお，本実験の模型管路については，**表-3.1** のとおり設定した．

表-3.1　実験模型管路の設定

諸元	実験	実際
管材質	ポリ塩化ビニル	鋳鉄・鋼
管口径(m)	0.08	0.3～2.2
空気弁口径(m)	0.02	0.08～0.2
設定水圧(MPa)	0.01～0.05	約 0.2

3.2.2　実験装置

本実験では管路モデルを作成し，空気弁を取り付けた配水管路を振動台上に設置する．そして振動台を管軸方向に振動させ，その時の管路内の水圧変動の影響を検証する．ここで空気弁付近に圧力計①，空気弁より上流側に圧力計②，空気弁より下流側（管路形態変更箇所付近）に圧力計③を設置して水圧を測定する

（図-3.1）．また，空気弁付近の管路に加速度計を設置し加速度を計測する．空気弁の性能は，表-3.2 に示すとおりであり，弁体フロート型の小型急速空気弁を使用した．

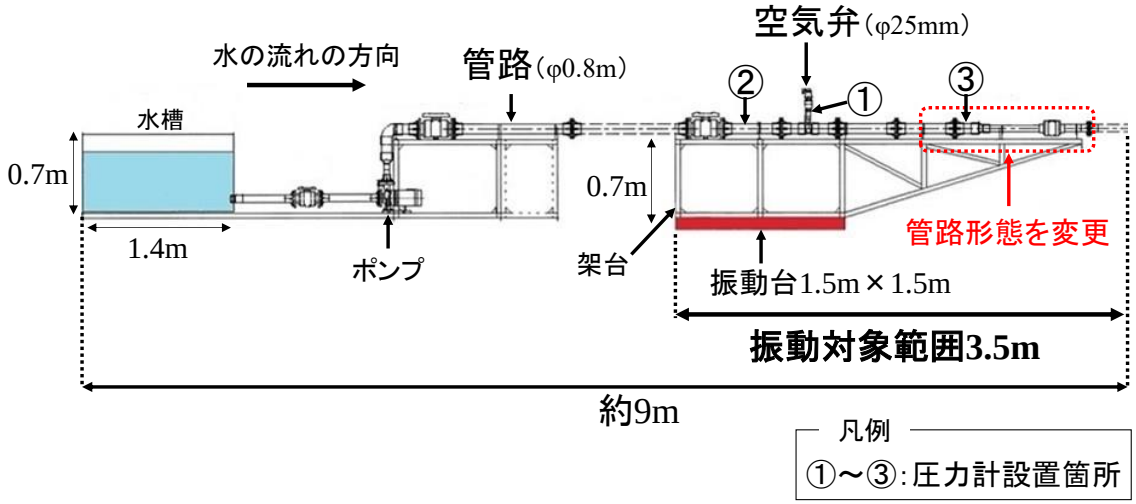


図-3.1　実験模型の概略図

管路形態	概略図
直管	φ75mm
曲管（90度）	φ75mm
片落ち管（φ40or50mm）	φ75mm　φ50mm or φ40mm

図-3.2　管路形態の概略図

表-3.2　空気弁の性能

呼び径	25mm
機能	急速吸気排気機能 排気量 1.6m^3/min 以上（+5kPa 時） 吸気量 1.0m^3/min（−5kPa 時）
耐圧	1.75MPa 以下

3.2.3　実験条件

本実験において加振加速度，加振振動数，管内流速，管路形態を変え，それぞれの影響を定量的に分析する．入力波は正弦波で，加振加速度を 80gal，120gal，150gal，300gal，継続時間を約 30 秒，振動数を 0.5Hz，1Hz，5Hz，10Hz，15Hz，20Hz と変化させ加振する．管路形態は末端の配管形態を直管，曲管，片落ち管(40mm)，片落ち管(50mm)の 4 通りとし，管内流速は 21cm/s，流速 42cm/s の 2 通りのそれぞれについて水圧変動を計測し，どのような要素が水圧変化に影響を及ぼしているか調べた．主な実験条件を**表-3.3** に示す．

表-3.3 実験条件

管路		入力波形	
管路形態	流速(cm/s)	加速度(gal)	振動数(Hz)
直管	21 42	80 120 150 300	0.5 1 5 10 15 20
曲管(90 度)			
片落ち管 (40or50mm)			

※300galについては，圧力計の計測限界を振り切ったため，一部実施
その他，空気弁の開閉や初期水圧の条件変更により実施

3.2.4　実験結果及び考察

(1) 空気吸排気に伴う水圧変動による影響

空気吸排気に伴う水圧変動による影響の確認にあたって，空気弁の開・閉，管内初期圧力の高・低，振動数の高・低のそれぞれの比較条件に基づき，次のとおり比較する．なお，比較にあたっての基本ケースとして，空気弁の下流側の配管に曲管を設置した場合で，空気弁を開けた状態（吸排気できる状態），初期圧力が低い状態(10kPa)，振動数を 5Hz の状態で加振した時の圧力の時系列変化を，**図-3.3** に示す．

・空気弁開閉による水圧変動

曲管を設置した場合で，**図-3.3** に空気弁を開けた状態（吸排気できる状態），**図-3.4** に空気弁を閉めた状態（吸排気できない状態）の水圧と時系列変化を示す．これらの図から，空気弁を閉めた場合はどの計測地点においても水圧変動に大きな違いはない．空気弁を開けた場合，閉じた場合に比べて，圧力計②，③における圧力振幅は同様であるものの，空気弁付近の圧力計①では圧力が正側に

突出しており異常圧力が発生していることが分かる．空気弁を開けた場合，空気弁付近で圧力が急増するがその影響は他へは伝わりにくく，弁付近の局所に留まっている．空気弁付近では振動による圧力上昇に加えて，振動に応じて空気の吸気と水の充水・排気を交互に繰り返し，弁付近では異常圧力が発生している．前述で考察したように，急激な空気の吸・排気に伴って水撃圧が作用したものであり，地震時には空気弁付近は強い衝撃を受けたことが考えられる．

・初期水圧を変化させた場合の水圧変動

曲管を設置した場合で，**図-3.3** に初期圧力が低い状態（10kPa）での圧力変化を，**図-3.5** に，初期圧力が比較的高い状態（20kPa）での圧力変化を示す．**図-3.5** より，初期圧力が比較的高いケースでは各計測地点での圧力変動が同じ動きを示しており，負圧が発生せず，管内に空気が混入していないが，**図-3.3** の初期圧力が低いケースでは負圧が発生し，振動に応じて管内に空気が吸排気され，正側に突出した異常圧力が発生している．これらの図より，前述の空気弁の開閉状況による水圧変動と同様に，負圧が発生する場合，空気弁付近では振動による圧力上昇に加えて，振動に応じて空気の吸気と水の充水・排気を交互に繰り返し，弁付近では異常圧力が発生している．なお，初期水圧の低い条件において，曲管のほかに，動水圧変化が生じやすい片落ち管について加速度を変化させて実験を行ったところ，振動時の動水圧変化によって負圧が発生し得る状況では，上述と同じ結果となった．

・高振動時の水圧変動

曲管を設置した場合で，**図-3.6** に加振加速度 120gal，加振振動数 10Hz の場合の圧力変化を示す．**図-3.3** の加振振動数 5Hz の場合に比べて，加振時の圧力振幅がやや小さいが，5Hz の場合と同様に空気弁付近の圧力計①では圧力が正側に突出しており異常圧力が発生している．このことから，振動数の大小によらず，圧力振幅が大きく管内が負圧になる状況であれば，空気弁付近で異常圧力が発生するものと考えられる．

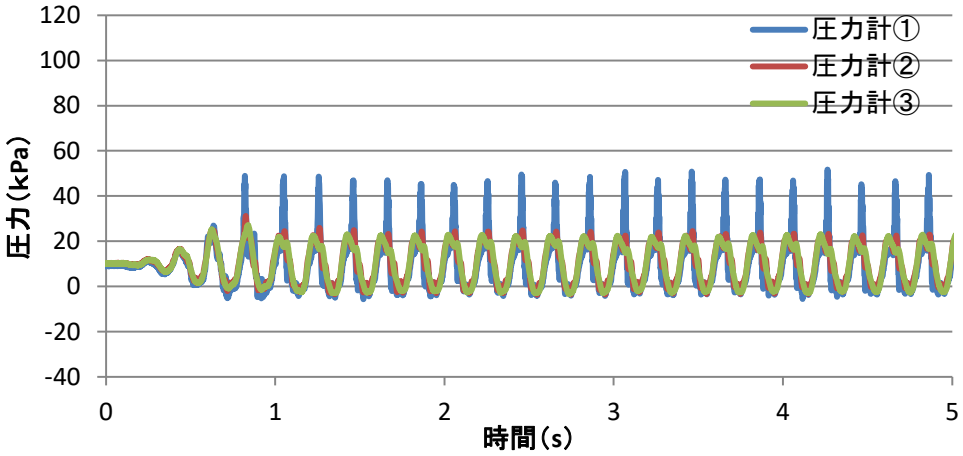


図-3.3　「空気弁:開，初期圧力:低」の水圧変動（120gal，5Hz）

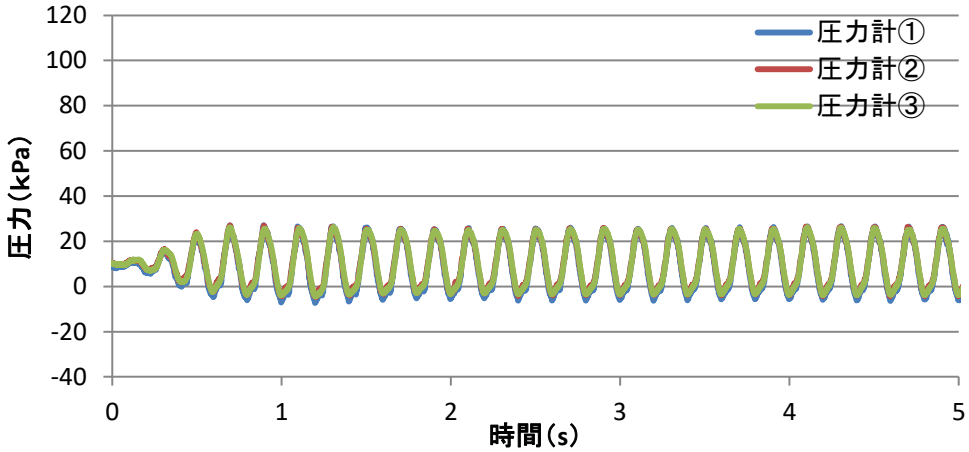


図-3.4　「空気弁:閉，初期圧力:低」の水圧変動（120gal，5Hz）

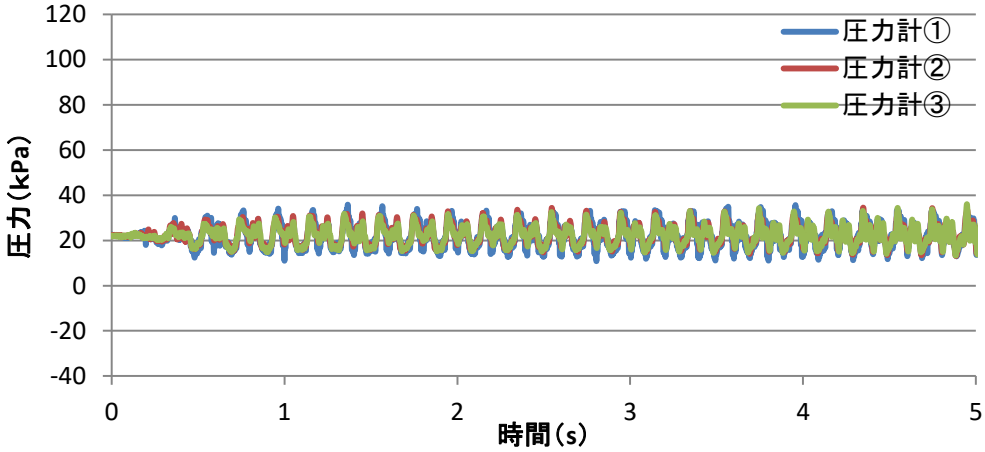


図-3.5　「空気弁:開，初期圧力:高」の水圧変動（120gal，5Hz）

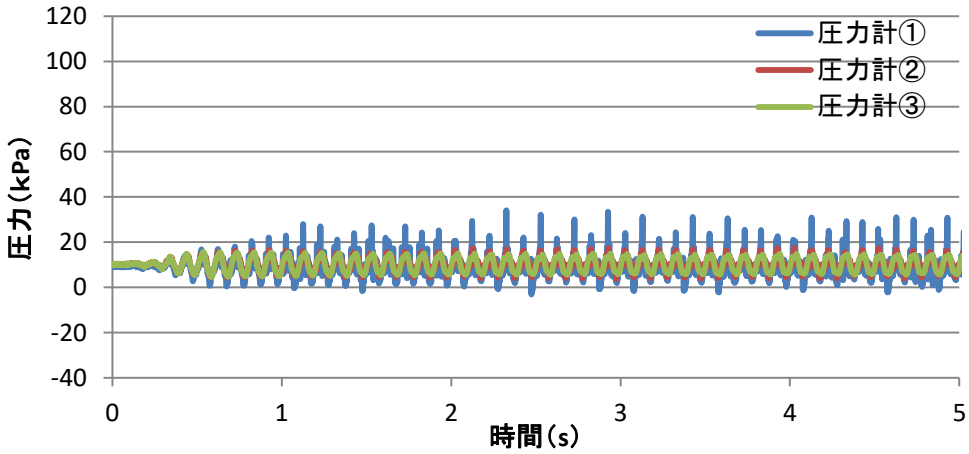


図-3.6　「空気弁:開，初期圧力:低」の水圧変動（120gal，10Hz）

(2) 管路形態の違いが及ぼす影響

図-3.7，3.8，3.9 に加振加速度 150gal，加振振動数 5Hz の場合の直管と異形管（曲管，片落ち管(40mm)）のそれぞれの圧力変化を示す．図より，直管では動水圧変化が小さいのに対して，異形管では増加・減少の動水圧振幅が大きく，その結果，異形管においては負圧に転じている．これに伴い，異形管においては空気弁付近の圧力計①で，前述の初期水圧が低い状況（**図-3.4**）と同様に圧力が突出していることが分かる．

また，異形管部（圧力計③）での圧力変動の影響が空気弁付近（圧力計①）に伝わるものの，弁付近の突出した圧力は弁付近の局所で留まる傾向を確認した．なお，他の実験ケースにおいて，加振加速度が 80，120，150gal の順に大きくなるほど，圧力の振幅が大きくなり，負圧が発生しやすく，空気弁付近において異常圧力が発生する傾向を確認した．

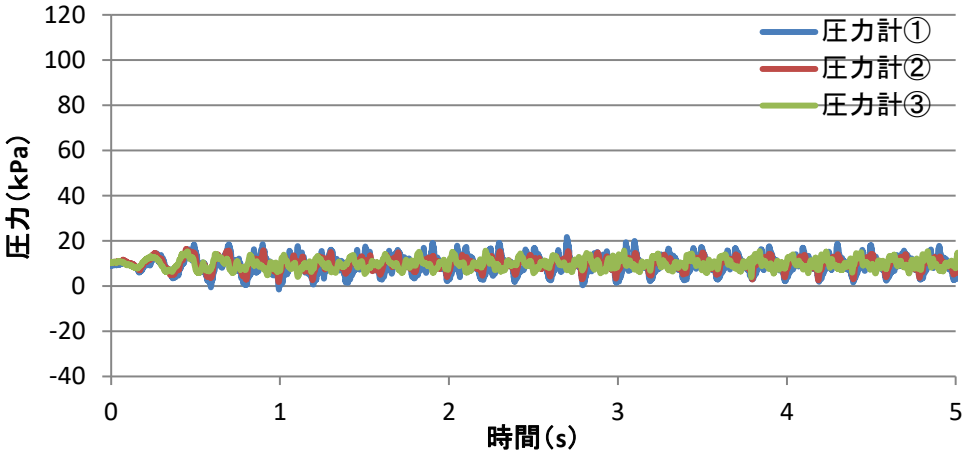


図-3.7　直管の場合の水圧変動（150gal，5Hz）

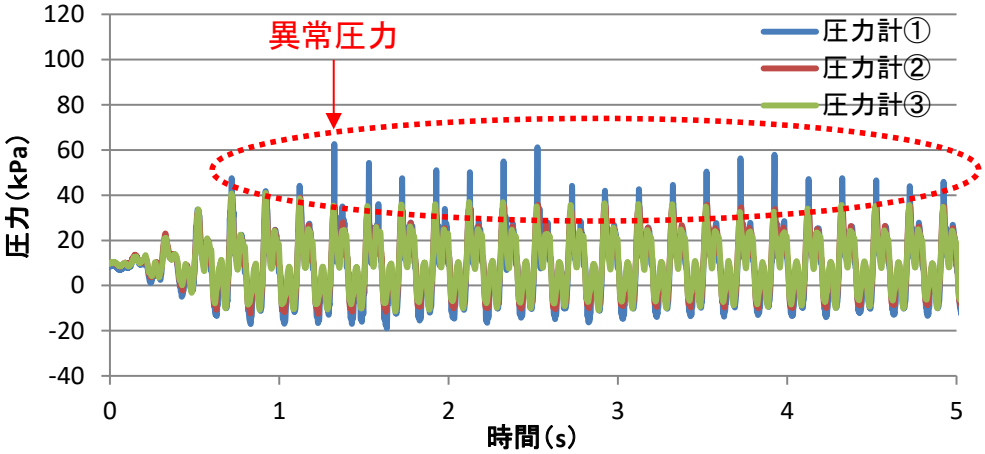


図-3.8　曲管の場合の水圧変動（150gal, 5Hz）

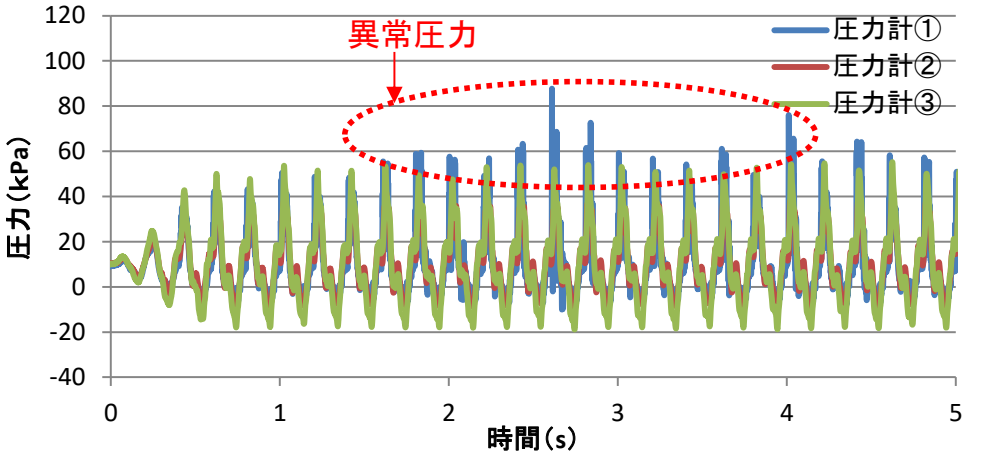


図-3.9　片落ち管の場合の水圧変動（150gal, 5Hz）

次に，**図-3.11** に管内に負圧の発生しない初期圧力が高い場合における直管と曲管における加振時の速度と動水圧振幅の関係を，**図-3.12** に直管と片落ち管(40mm)における加振時の速度と動水圧振幅の関係を示す．

ここで，管路形態の変化を有する場合の管内の地震時動水圧は以下のとおり，理論的に導き出される．例えば，曲管部の場合（**図-3.10**）の地震時動水圧変化は次の式 [1] で表され，地震時の振動数に応じて正負交互の圧力変化が生じ，振動数が大きく，管軸方向地動変位が大きいほど，圧力変化が大きくなることが分かる．言い換えると，管軸方向の速度の大きさに比例して，地震時動水圧が大きくなる．

$$P_0 = \pm \frac{\omega \rho a z}{(1 + Q^2/\omega^2)^{1/4}} \cdot 2\cos\frac{\theta}{2} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2} - \alpha\right) \tag{3-1}$$

ここで, P_0 : 曲管部の地震時動水圧 (Pa) , ω : 角振動数, ρ : 水の密度(1,000kg/m^3), a : 圧力伝播速度(m/s), Q : 管摩擦による抵抗係数, z : 管軸方向地動変位(m)

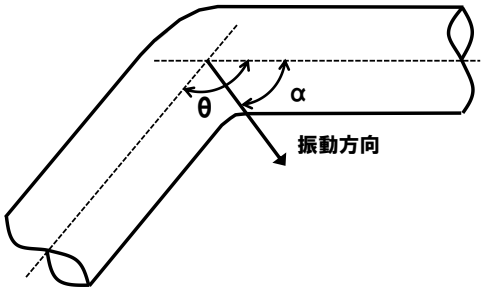


図-3.10　曲管部

これらのことを踏まえ, 実験の各ケースにおいて, 実験管路に設置した加速度計により測定した最大加速度値を, 各ケースの加振振動数により速度に換算し, その値（最大速度）を横軸に, 各ケースにおける管内の動水圧振幅を縦軸にプロットした. ここで, 動水圧振幅とは, 加振前の初期水圧を基準として加振時に振幅した水圧の大きさ（加振時水圧－初期水圧）を表す.

図より, 曲管や片落ち管は直管に比べ, 振幅が大きくなり, 速度が大きくなると, 振幅が大きくなる傾向を確認できた. 図-3.11 より, 曲管の場合の実測値は, 式(3-1) の計算値より小さい値となったが, これは前述と同様に, 管内の微量の空気泡等により圧力伝播速度が低下したためと考えられ, 各実験ケースで, その空気の混入状況が一律ではなく, 測定値もばらついたものと考えられる. また, 後述のとおり, 振動数が小さいケースにおいては, 管内の摩擦の影響により動水圧が低下した可能性がある.

(3) 加振時の速度と加振振動数が及ぼす影響

加振振動数 1Hz～20Hz の実験ケース別に加振時の速度と動水圧振幅の関係について調べた. 図-3.13 に, 管内に負圧の発生しない初期圧力が高いケースで曲管における加振振動数別の加振時の速度と空気弁付近の動水圧振幅の関係を示す. 同図によれば, 数値が右肩上がりに伸びており, 速度が増加すると動水圧振幅も上昇する傾向にある. また, 振動数別の状況を見ると, 10Hz 以上において, 速度増加に比例して動水圧振幅が上昇している一方で, 5Hz, 1Hz と振動数が低

くなるにつれて，動水圧振幅の上昇幅が小さくなっている．これは，振動数が小さい場合，管内の摩擦の影響により動水圧が低下したものと考えられる．

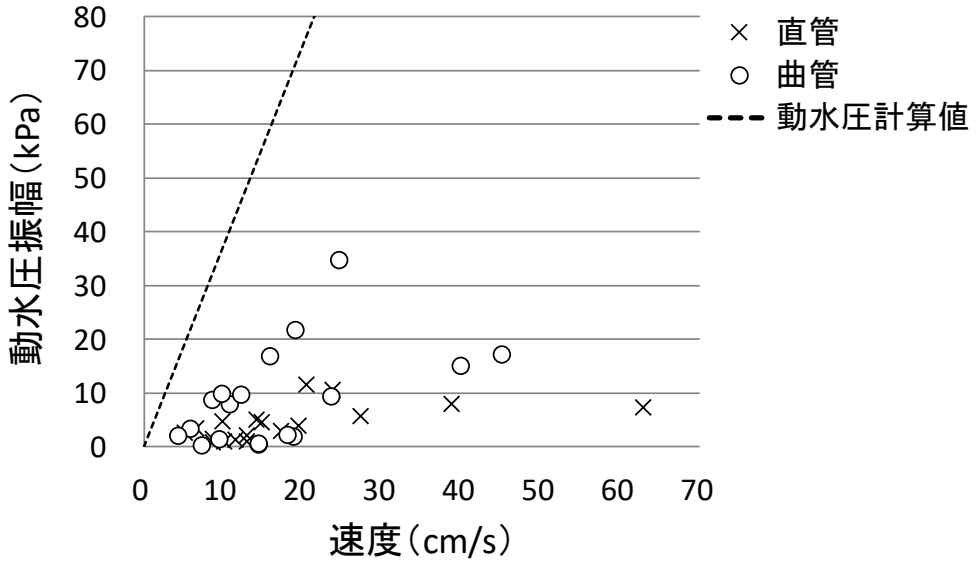


図-3.11　直管と曲管における速度と動水圧振幅の関係

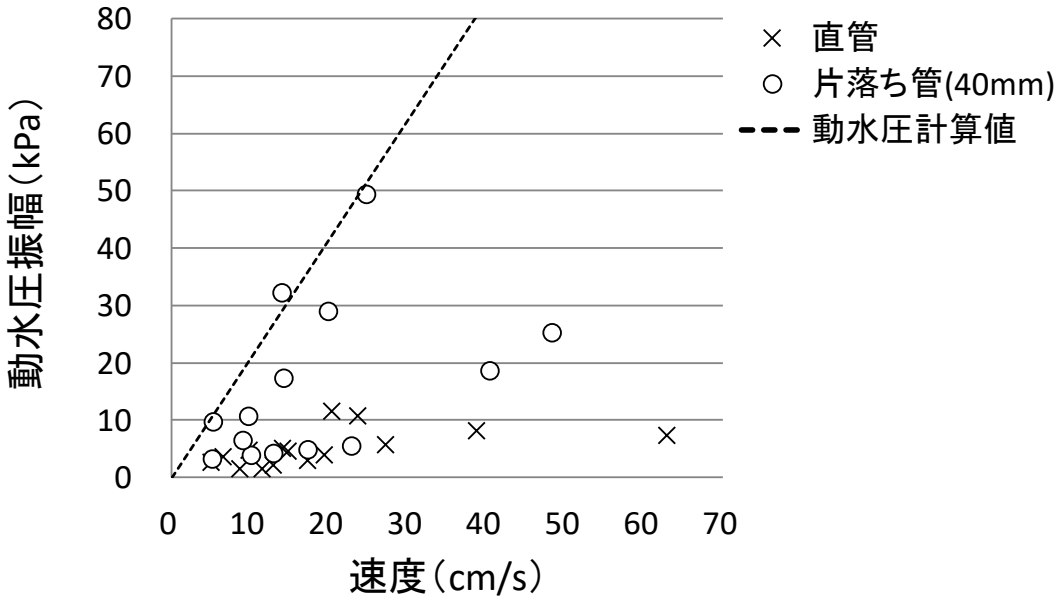


図-3.12　直管と片落ち管（40㎜）における速度と動水圧振幅の関係

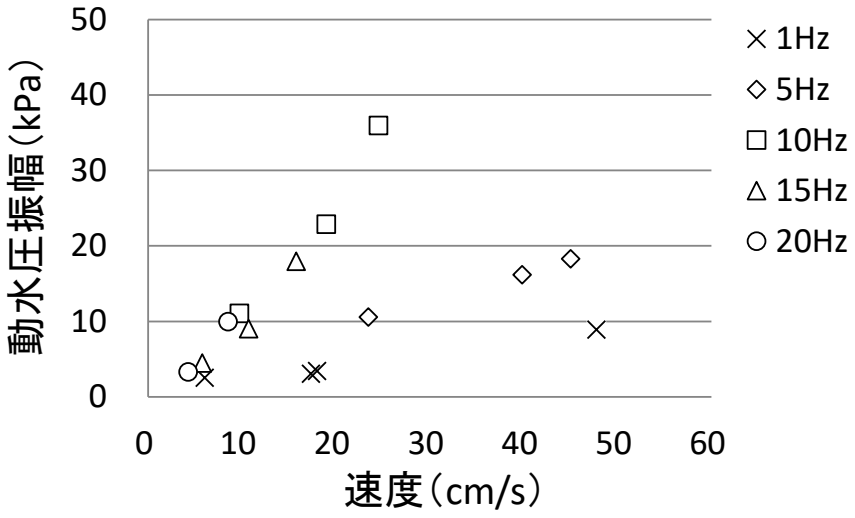


図-3.13　速度と動水圧振幅の関係

(4) 管内流速が及ぼす影響

管内流速の違いについて調べた結果，**図-3.14** に直管における 120gal 加振時の流速 21cm/s と流速 2 倍の 42cm/s における動水圧振幅と加振振動数の関係を示す. 図を見ると，管内流速が速いほどやや動水圧振幅が大きいことを確認できる.

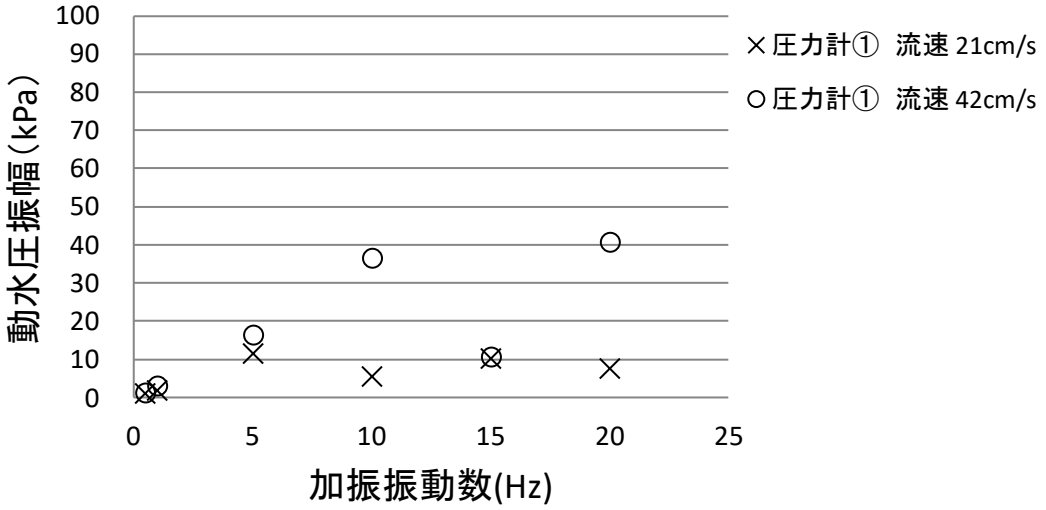
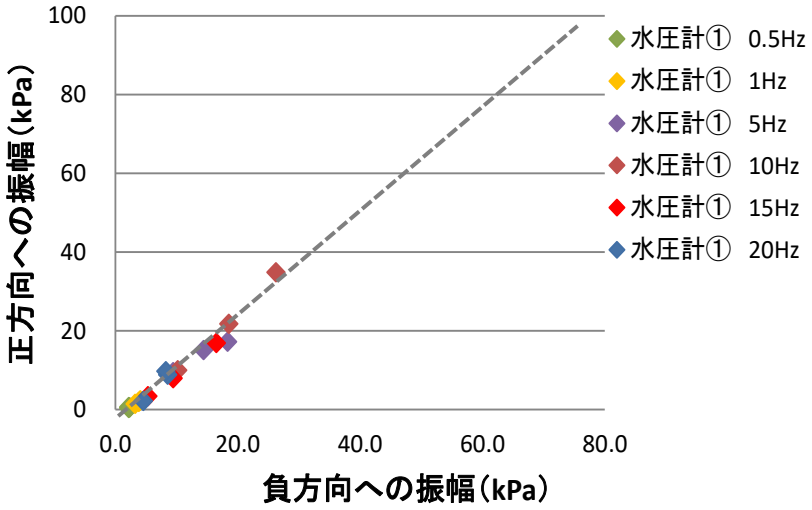


図-3.14　120gal 加振時の各管内流速における加振振動数と動水圧振幅の関係

(5) 負圧発生に伴う水圧変動量の増加

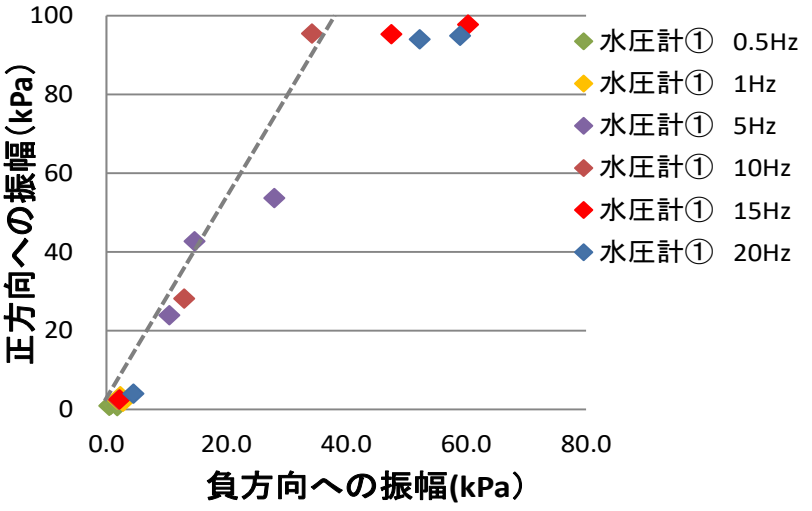
負圧発生の有無に伴う正方向への動水圧振幅の状況について，**図-3.15**，**図-**

3.16 に示す. 図-3.15, 図-3.16 に示すとおり, 初期水圧が高いケースに比べて, 低いケースでは負方向への振幅が大きくなるほど, 正方向への振幅の増加幅が大きくなる傾向を確認した. このことから, 負方向への低下幅が大きくなるほど, 空気の混入量も多くなり, この空気の排出過程で圧力上昇に影響を及ぼした可能性がある.



初期水圧：高（負圧発生なし）

図-3.15　初期水圧高い場合の正・負方向への振幅の関係



初期水圧：低（負圧発生あり）

※圧力計器の計測限界が 100kPa まで

図-3.16　初期水圧低い場合の正・負方向への振幅の関係

3.2.5　結果まとめ

・初期水圧の低い管内では，空気弁付近では振動による圧力上昇に加えて，振動による急激な空気の吸排気に伴って異常圧力が発生した．

・空気弁付近における異常圧力の影響は他へは伝わりにくく，弁付近の局所に集中し留まる傾向を確認した．

・管路形態について，直管に比べて異形管において水圧変動が生じることを確認できたことから，異形管部付近では，より負圧が発生しやすい環境であることが言える．

・加振時の速度が増加すると動水圧振幅が大きくなり，初期圧力が低い状況では管内で負圧が発生し得る．

・初期圧力が低い場合，負方向への振幅が大きくなるほど，正方向への振幅の増加幅が大きくなる．このことから，空気の吸排気過程で水圧上昇に影響を及ぼした可能性が考えられる．

3.3　配水池の振動に伴う水圧変動

3.3.1　実験概要

前章において，熊本地震時の配水池における水圧・流量の変動記録を整理した結果，地震発生直後に大幅な水圧低下が生じたことを確認した．その際に，配水池流出管において，水撃圧に相当する圧力低下が生じていた．また，その下流側管路内においても，これと同じような圧力変動を示しており，この現象は，空気弁に影響を及ぼし，破損及び漏水に至ったものと考えられる．地震発生直後に発生した配水池流出部の水圧変動の原因を明らかにするため，また配水池内の水の振動が管内水圧に与える影響を確かめるため，管路・配水池（水槽）一体の装置による模型振動実験を行った．

3.3.2　実験方法

図-3.17 に実験装置の概略図を示す．また，振動装置に入力する波形及び実験の条件を**表-3.4** に示す．

図-3.17 に示すとおり，水槽と管路が一体となって振動するよう，架台に水槽及び管路を固定し，振動台に設置した．管路には，バルブを 2 箇所設置し，バルブの開閉によって管内の流量を調節する．計測にあたって，加速度計（赤丸印 4 箇所），圧力計（青丸印 3 箇所），流量計（緑丸印 1 箇所）を設置し，加速度，水圧，流量を計測する．

実験条件については，**表-3.4** に示すとおり，配水池からの流量をバルブで制御するケースを想定し，3 つの条件を設定した．条件 2 では上流側バルブの制限を行わない場合（全開），条件 3 では上流側バルブの制限を行った場合で，バルブ制御が与える下流側の水圧変動に与える影響を確認することを目的とした．なお，条件 1 については，バルブを全閉とした場合，水槽における圧力変化と管路内のバルブ付近での圧力変化と圧力伝播の状況を比較するために設定した．各条件において，水槽内に水を流入させながら水深を 25 ㎝に保ちつつ，水槽から管路へ自然流下で送水を継続した状態で，実験装置をそれぞれの正弦波により加振した．なお，振動数は，2Hz 以下の設定も予定していたが，水槽内の水の溢水等，実験装置上の問題より本実験では検証していない．

また，加振終了後に，実際の水圧記録の形跡を確認するために，バルブ操作（上流側バルブ閉による制御）により水圧変動の状況を確認した．なお，バルブの開閉操作はどの条件においても急な操作とする．

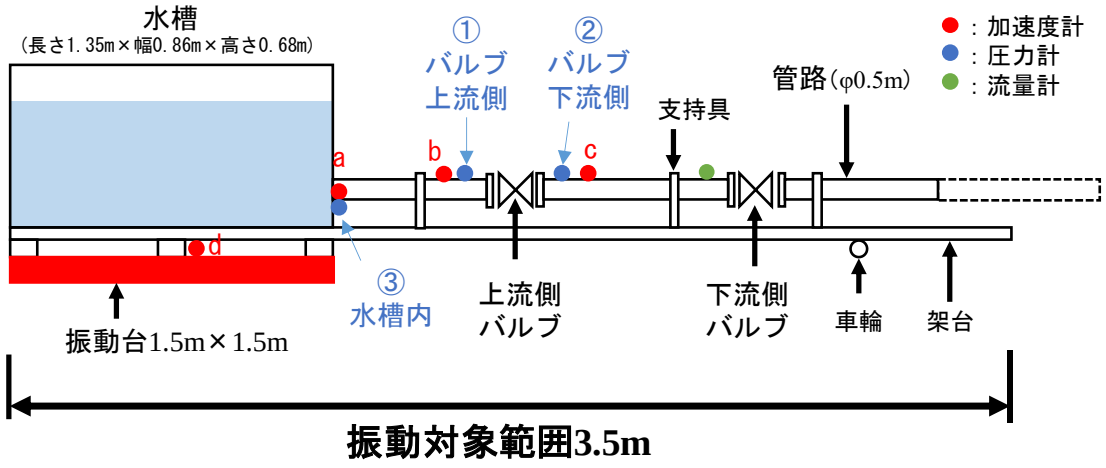


図-3.17　実験装置概略図

表-3.4　実験条件

水位 (cm)	入力 加速度 (gal)	入力 振動数 (Hz)	バルブ開閉条件		
			条件 1	条件 2	条件 3
25	80 120 150 200 300	2 5 10 15	上流側：開 下流側：閉	上流側：開 下流側：開	上流側：1/2 閉 下流側：開

3.3.3　実験結果及び考察

(1) 水槽内の水の振動による圧力伝播状況

図-3.18，図-3.20，図-3.22 に条件 1～3 において，入力加速度 150gal，入力振動数 5Hz の正弦波を入力した際の水圧の時系列変化を示す．横軸は，測定開始からの経過時間を表す．また図-3.19，図-3.21，図-3.23 にそれぞれの振動台における加速度波形を示す．

まず，振動時の圧力変化に着目する．同図によると，条件 1 では，水槽の圧力振幅に対し，管路の圧力振幅が大きくなっており，入力振動数が変わっても同じ傾向が確認できた．これは，管内において，下流側のバルブ閉弁に伴って発生した動水圧が卓越したものであり，その圧力変動の影響は上流側の管路まで伝わるものの，水槽内ではその圧力が消散している．条件 2 では，水槽内での圧力変動に対して，下流側の管路においても同程度の圧力変動が確認された．条件 1 と比較して，管路の圧力はバルブが開放状態であることから，管路内での大きな動水圧の発生はないものの，水槽内での加振振動数による動水圧が，下流側の管路へは，圧力が増幅することなく，水槽内の動水圧と同程度で，伝播していくこと

が分かった．条件 3 では，振動時の圧力変動は条件 2 とほぼ同様な変化が確認され，管路内において，上流側バルブの制限に伴う動水圧の発生は確認されなかった．

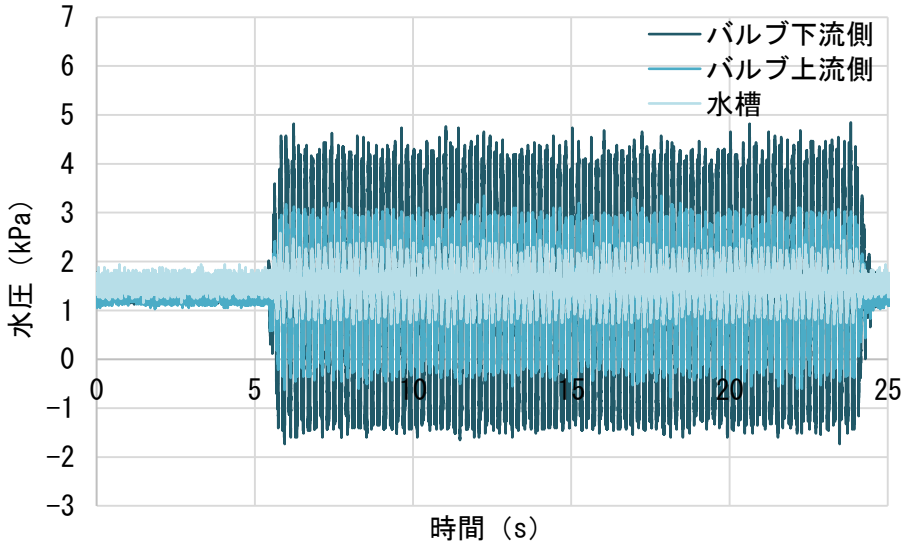


図-3.18　水圧の時系列変化（条件 1）（150gal，5Hz）

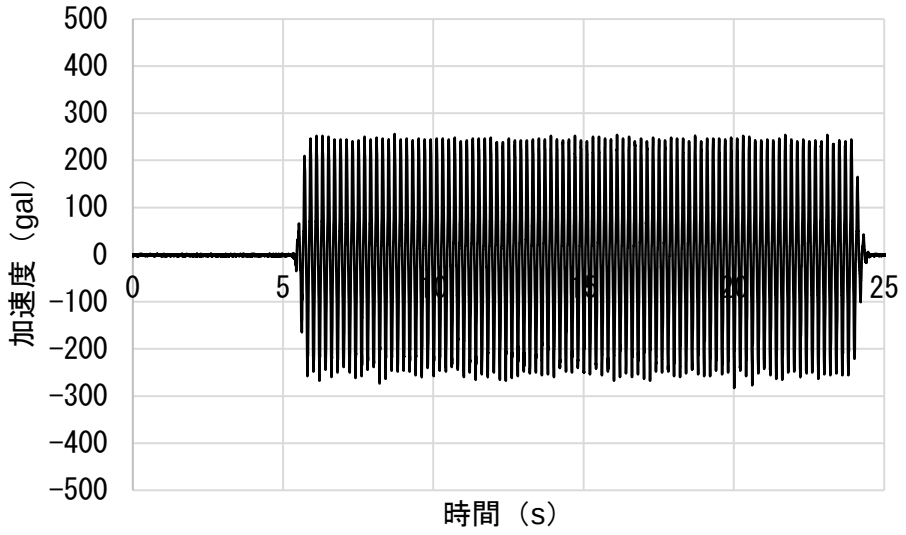


図-3.19　振動台の加速度波形（条件 1）（150gal，5Hz）

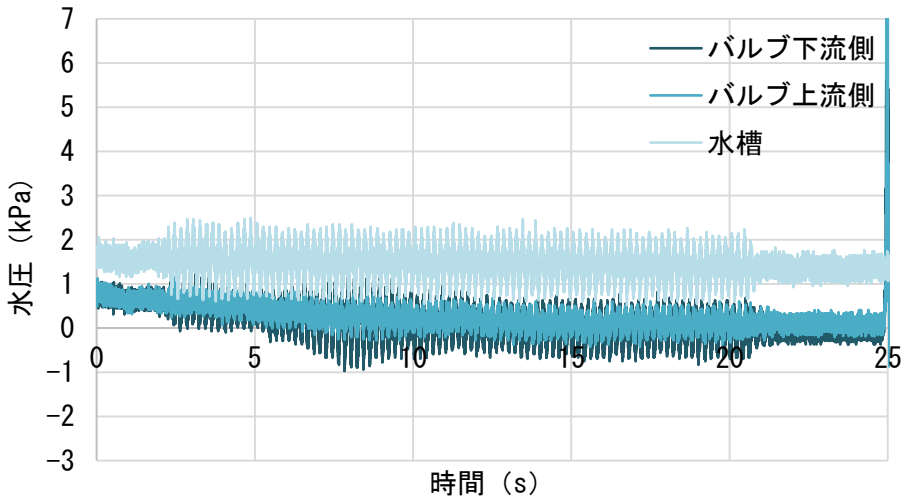


図-3.20　水圧の時系列変化（条件 2）（150gal，5Hz）

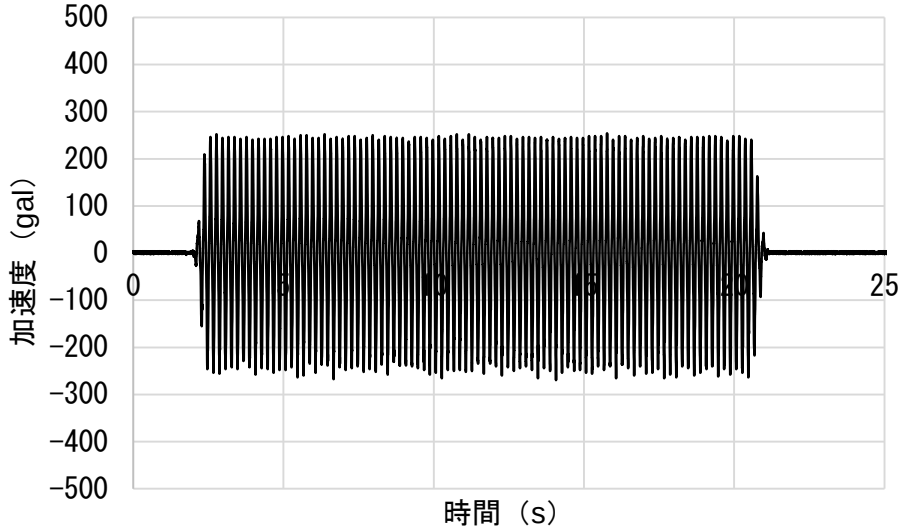


図-3.21　振動台の加速度波形（条件 2）（150gal，5Hz）

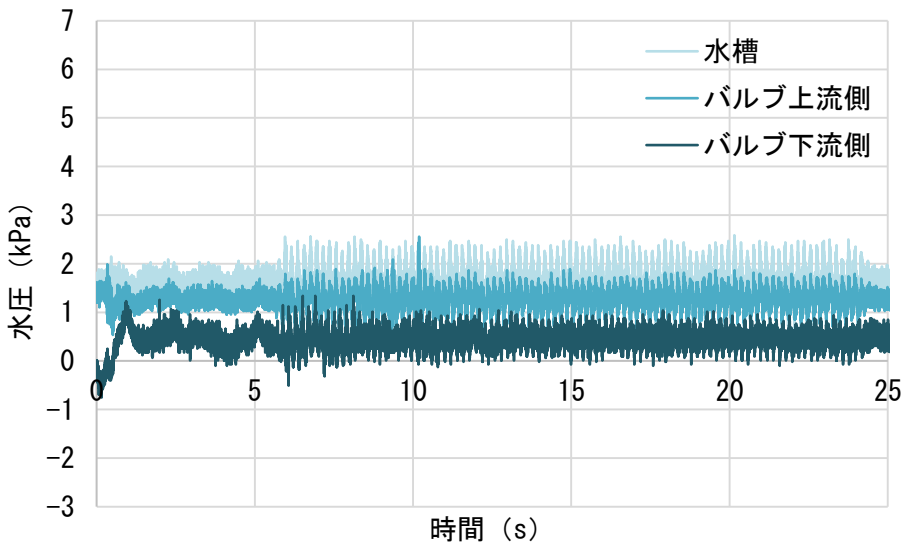


図-3.22　水圧の時系列変化（条件 3）（150gal，5Hz）

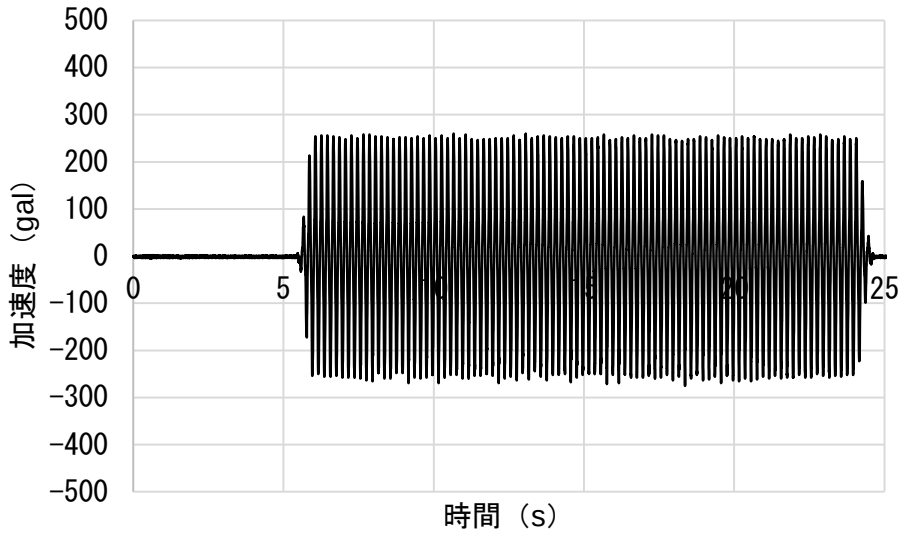


図-3.23　振動台入力波形（条件 3）（150gal，5Hz）

(2) 振動に伴う水位変動と水圧変動との関係

図-3.24 に振動台加速度に対する水槽の最大水位の図を示す．同図より，5Hz，10Hz，15Hz の場合は，加速度の上昇に応じて，最大水位も高くなっている．一方，2Hz の場合は最大水位がばらつく結果となった．また，**図-3.25** に水槽での応答加速度に対する水槽の最大水位を示す．結果は，**図-3.24** と類似しており，振動台加速度と水槽の応答加速度で大きな差はない．

図-3.26～図-3.34 に各条件及び各計測箇所における水槽の最大水位に対する

動水圧振幅の関係を示す．図中の①～③は，圧力計①～③を示す．

水槽における圧力（③）に着目すると，最大水位の増加に応じて動水圧振幅はほぼ変わっておらず，全ての条件において，水槽内の動水圧振幅は，水槽の振動に伴う水位変動の大小によらず同程度であることが確認できる．また，条件 1 から 3 のどの条件においても，水槽内では同程度の圧力変動を示している．このことから，下流側の管路のバルブ開閉条件の影響を受けないことが分かる．

これに対して，管内圧力（①，②）に着目すると，バルブ開の条件 2 では管内の動水圧振幅は，大きな変動はなく，水槽内の動水圧振幅（③）と同程度の値を示している．一方で，バルブ全閉にした条件 1 では，水槽の最大水位の上昇に応じた，水槽内の動水圧振幅（③）の増加幅が小さいのに対し，管路内（①，②）では動水圧振幅の増加幅が大きい．これは，振動に伴って管路内の水が，バルブ閉部に衝突することで発生した動水圧によるもので，加速度の増加に伴い，この圧力が増加したものであり，水槽内の動水圧の伝播によるものではないと考えられる．なお，5Hz，10Hz，15Hz の場合は，水槽の最大水位の上昇に応じて，動水圧振幅も上昇する傾向が確認されたが，2Hz の場合は，結果にばらつきがあり，その傾向が確認できなかった．また，振動数別に着目すると振動数が小さくなるほど最大水位が大きくなり，2Hz で最大となった．これは，スロッシングによるもので，一般に矩形水槽におけるスロッシング固有振動数は，次の理論式[2)]で表される．式(3-2)から，本実験における水槽内水の固有振動数（4 次）は 2Hz であり，この値に近づくにつれて大きくなる傾向が確認できる．なお，加振振動数が小さいほど最大水位も高くなる傾向から，これに応じて，水槽内の動水圧振幅も大きくなると考えられるが，これらの図から確認できなかった．

$$f(Hz) = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{(2n-1)\pi g}{L}\tanh\left[\frac{(2n-1)\pi H}{L})\right]} \tag{3-2}$$

ここで，f：固有振動数(Hz)，H：水深(m)，L：水槽の長さ(m)，g：重力加速度(9.8m/s^2)，n：モード

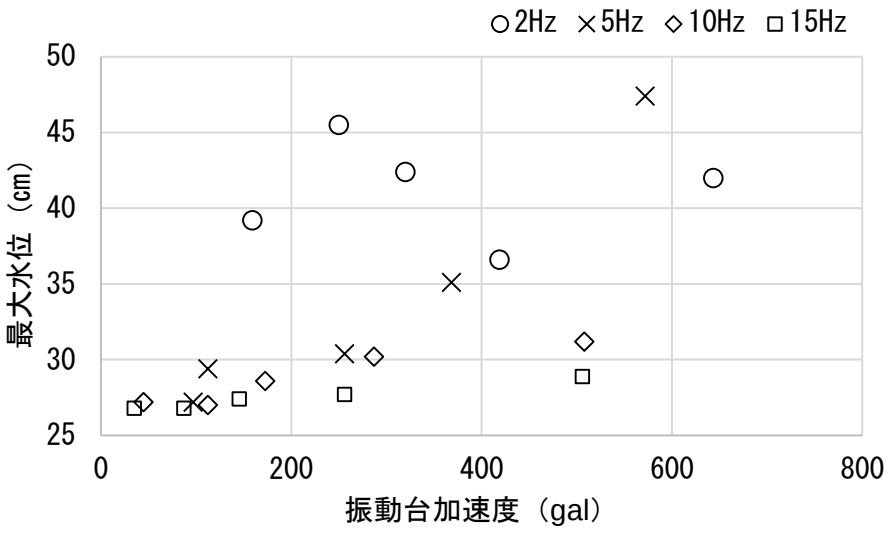


図-3.24　振動台加速度に対する水槽の最大水位

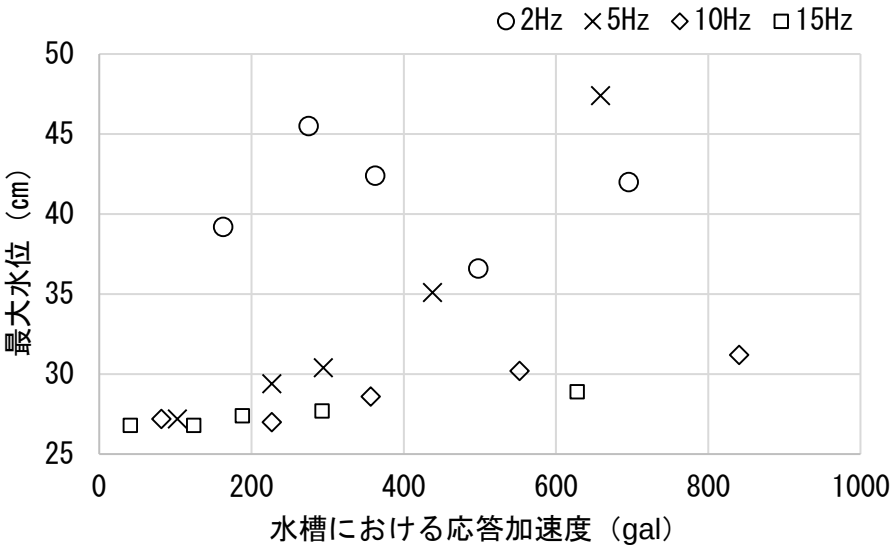


図-3.25　水槽における応答加速度に対する水槽の最大水位

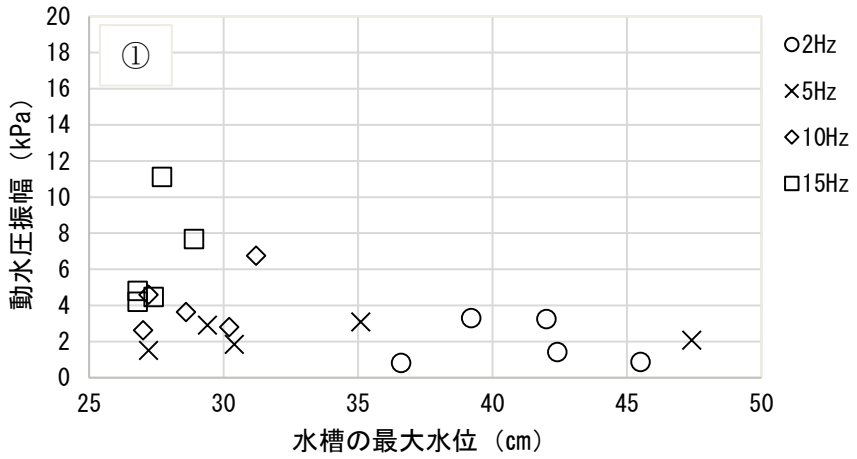


図-3.26　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 1・圧力計①）

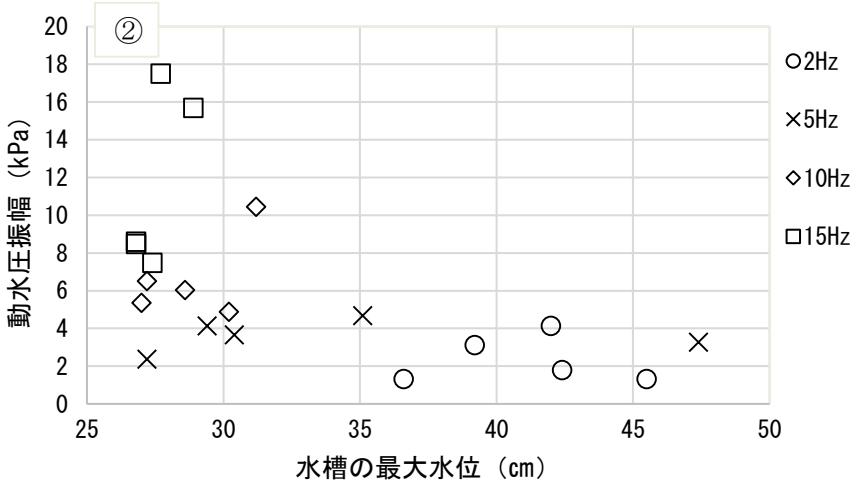


図-3.27　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 1・圧力計②）

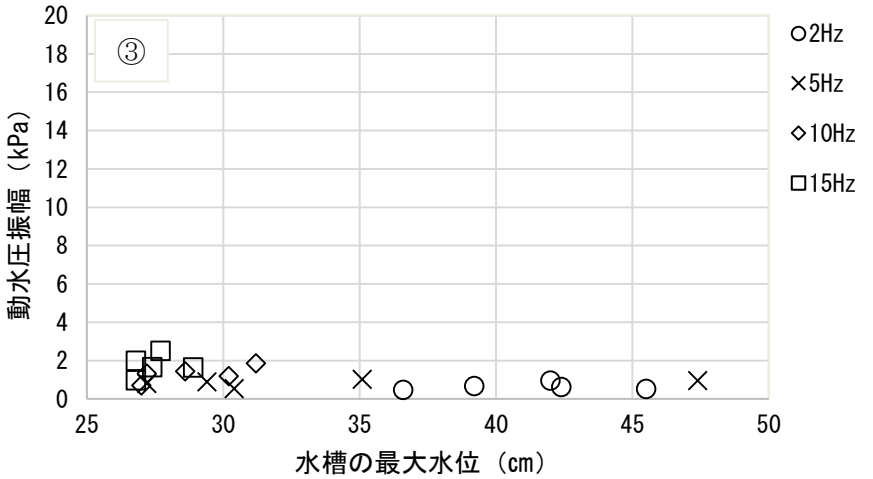


図-3.28　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 1・圧力計③）

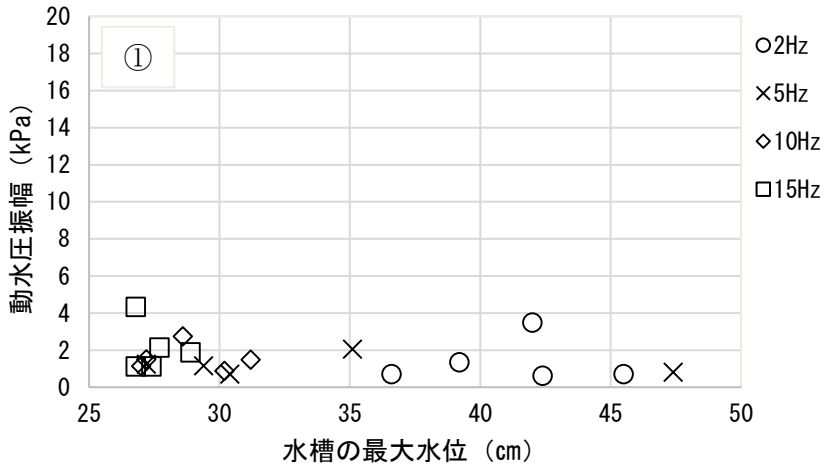


図-3.29　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 2・圧力計①）

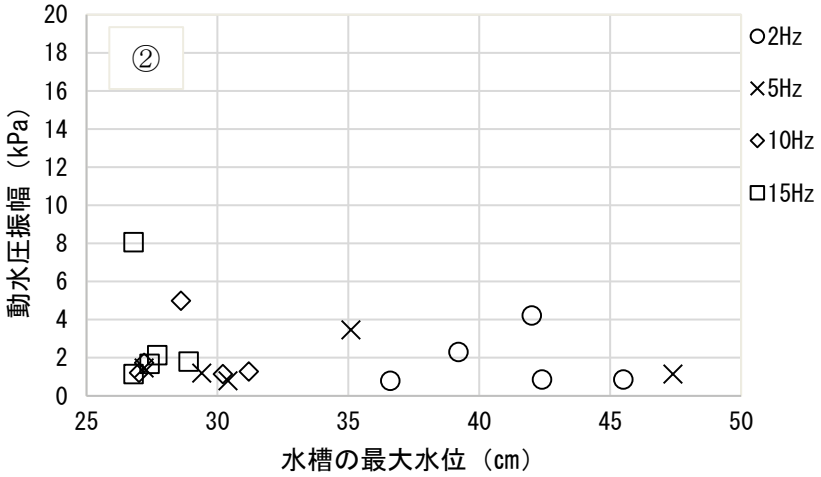


図-3.30　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 2・圧力計②）

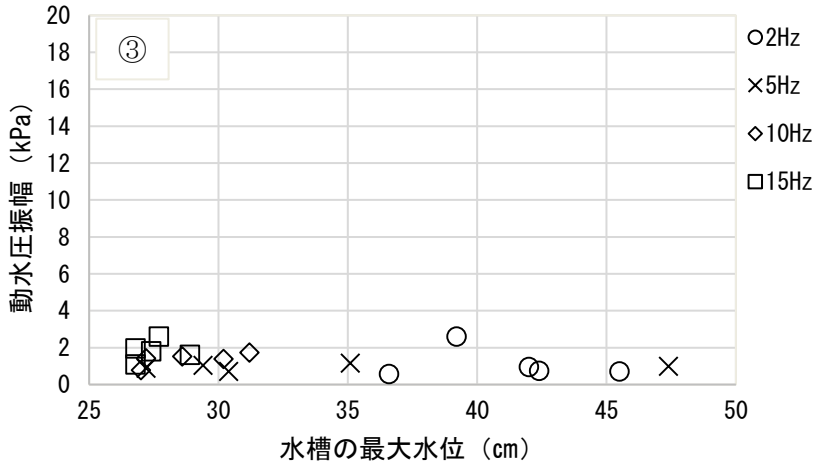


図-3.31　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 2・圧力計③）

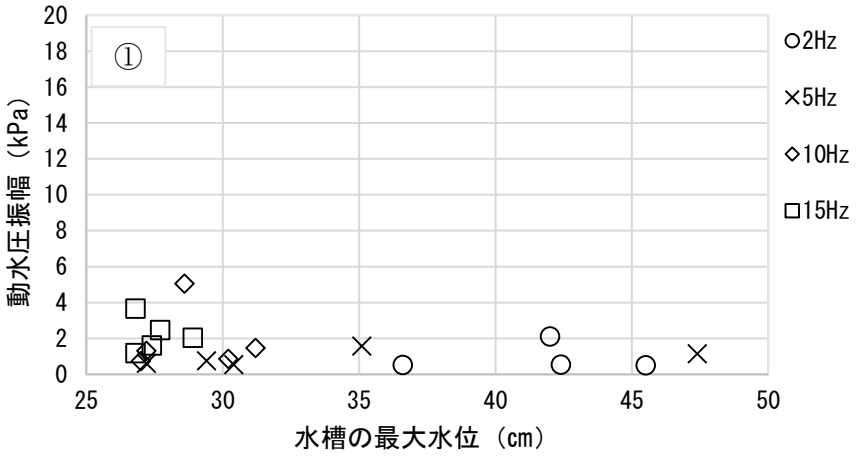


図-3.32　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計①）

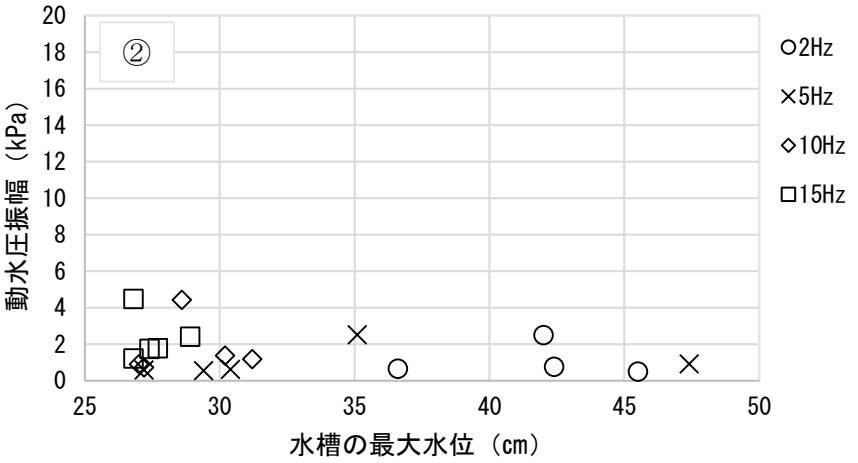


図-3.33　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計②）

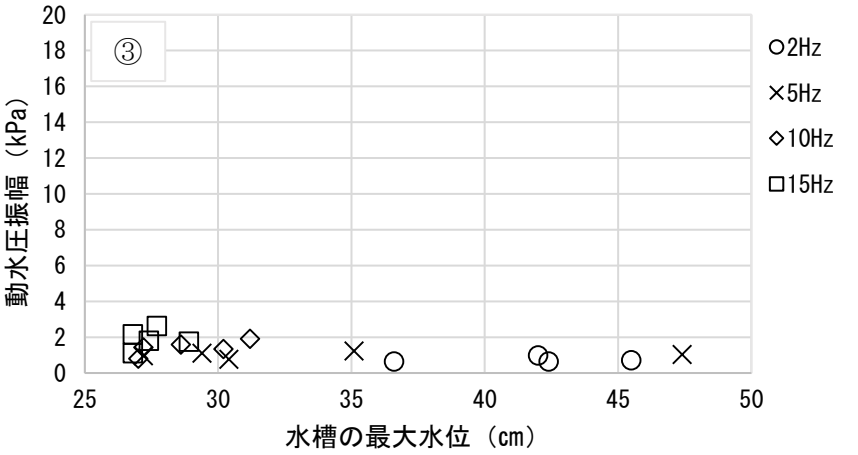


図-3.34　水槽の最大水位に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計③）

(3) 加速度と動水圧振幅との関係

図-3.35～図-3.43 にそれぞれの圧力計の設置位置に対応する加速度計の応答加速度と動水圧振幅の関係を示す．同図によると，水槽内（③）では，応答加速度と動水圧振幅の正の相関関係が確認できる．また，管内（①，②）においても加振振動数別で着目すると，応答加速度の増加に伴い，動水圧振幅も大きくなる傾向が確認できる．

バルブの開閉条件による比較に着目すると，下流側バルブを全閉とした条件 1 では，**図-3.35～図-3.37** より，水槽内の動水圧振幅（③）に比べて，管内の動水圧振幅（①，②）が大きくなっており，加振振動数別においても同じ傾向が確認できた．これは，管内において，下流側のバルブ閉弁に伴って発生した動水圧が卓越したものである．また，管内動水圧振幅が，下流の②に比べ，上流の①では低下しており，さらに水槽部③では管内動水圧の影響を受けていないことから，管内の動水圧変化は，上流側の管路まで伝わるものの，水槽内ではその圧力が消散することが分かる．その一方で，下流側バルブを全開とした条件 2，3 では，**図-3.38～図-3.43** より，条件 1 と比べると，水槽内の動水圧振幅（③）に対して，管内の動水圧振幅（①，②）も概ね同程度であり，管内の動水圧の発生の影響もほぼないものと考えられる．また，条件 2, 3 のそれぞれで比較すると，比較的似た結果を得ている．上流側バルブの制限状況によって，そのバルブ前後の圧力計②と③の間で，バルブ部での振動による動水圧発生に伴って圧力に差が生じるものと想定していたが，条件 2 と条件 3 の間で，明確な差は確認できなかった．

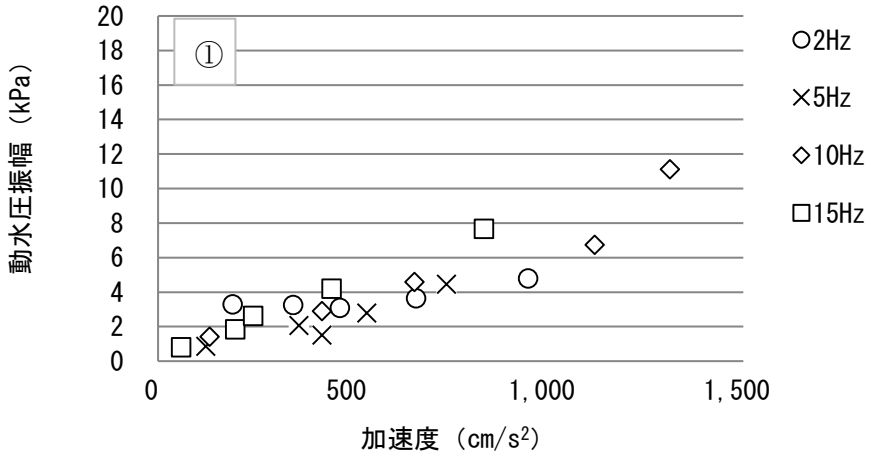


図-3.35　応答加速度に対する動水圧振幅（条件１・圧力計①）

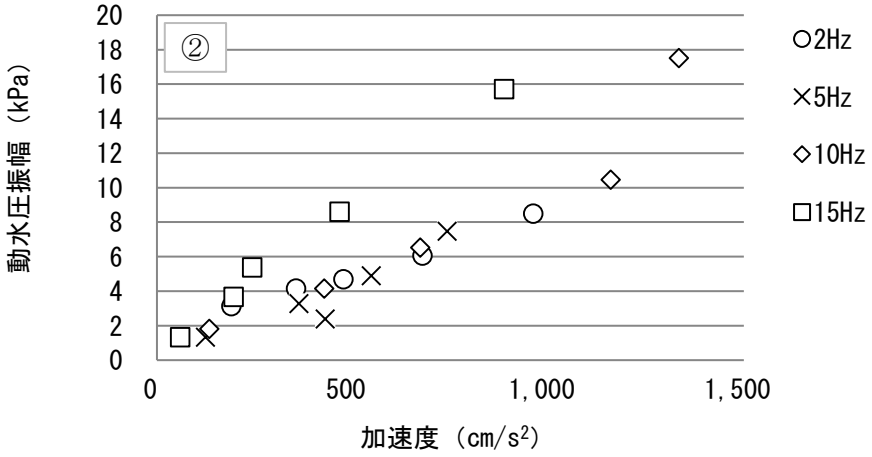


図-3.36　応答加速度に対する動水圧振幅（条件１・圧力計②）

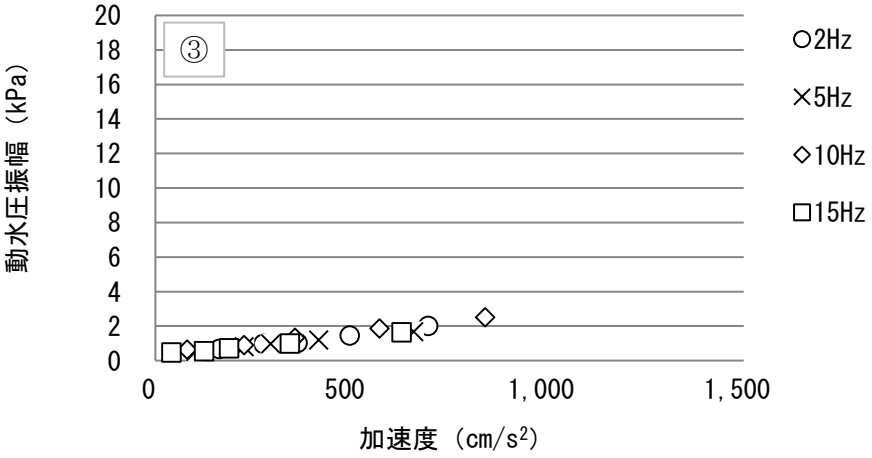


図-3.37　応答加速度に対する動水圧振幅（条件１・圧力計③）

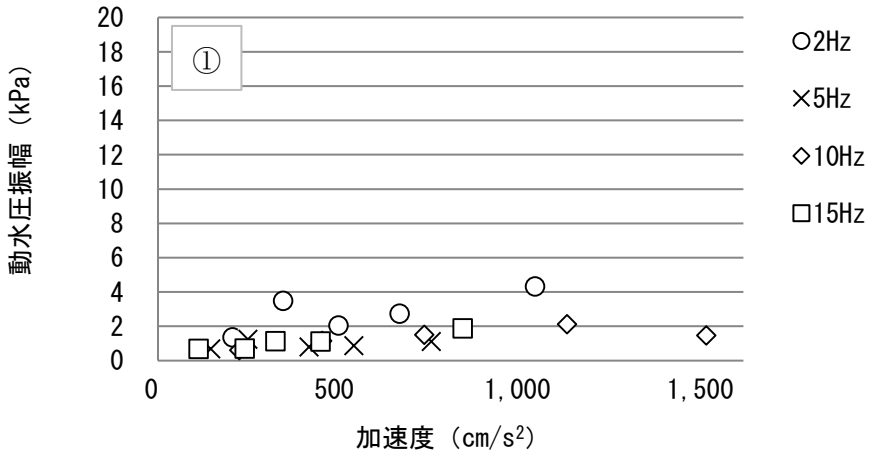


図-3.38　応答加速度に対する動水圧振幅（条件２・圧力計①）

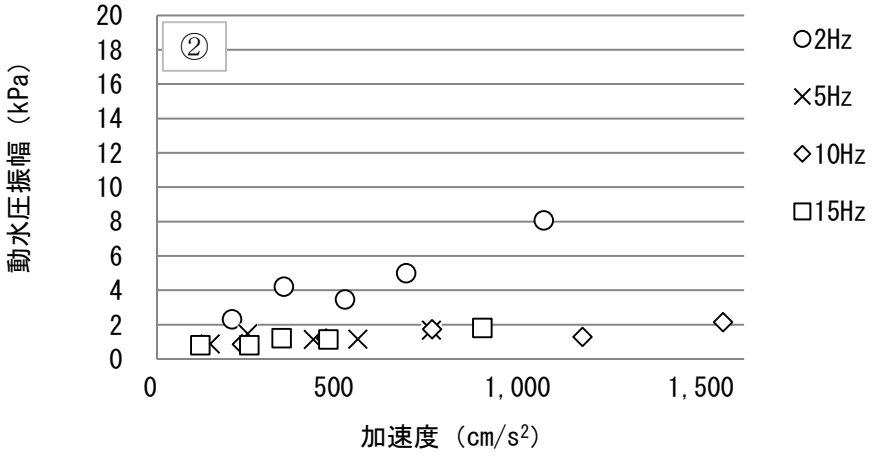


図-3.39　応答加速度に対する動水圧振幅（条件２・圧力計②）

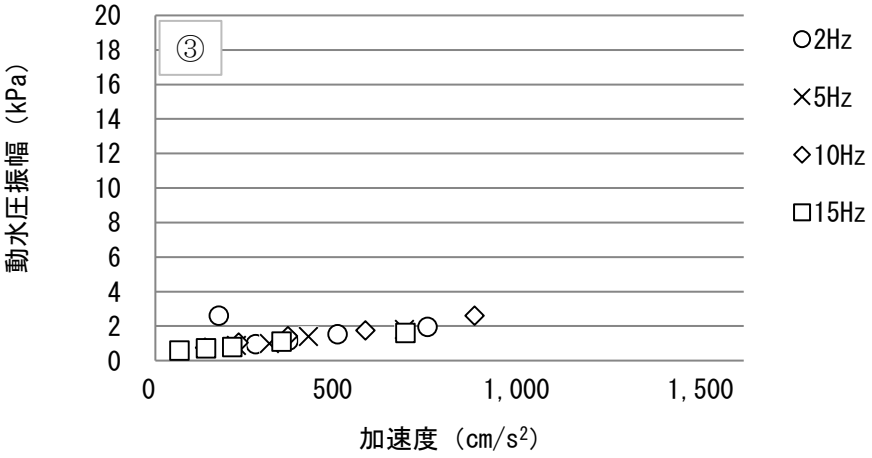


図-3.40　応答加速度に対する動水圧振幅（条件２・圧力計③）

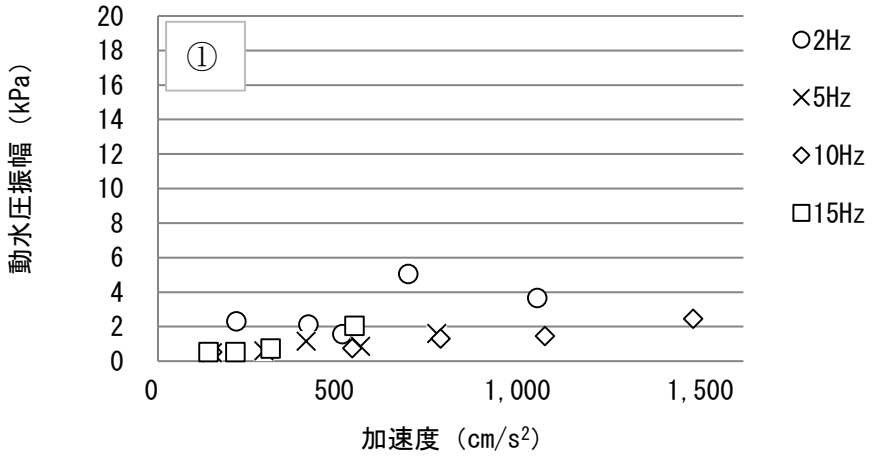


図-3.41　応答加速度に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計①）

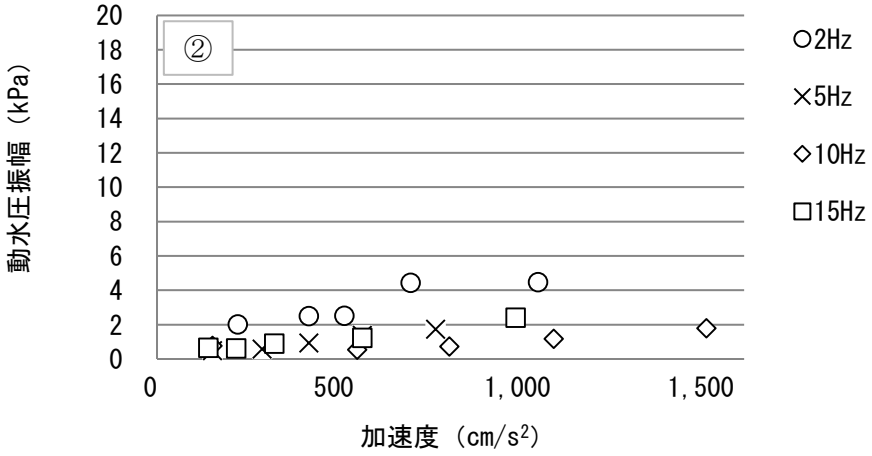


図-3.42　応答加速度に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計②）

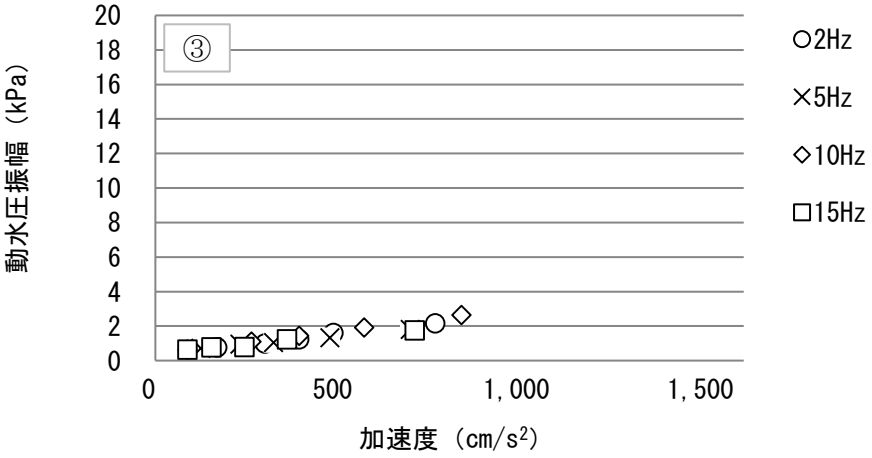


図-3.43　応答加速度に対する動水圧振幅（条件 3・圧力計③）

(4) スロッシングによる動水圧の影響

水槽における応答加速度に対する水槽の最大水位について，**図-3.44** に示す．同図では，振動数が小さくなるほど，最大水位が増加しており，2Hz 付近で水位が大きく上昇している．

ここで，地震時の動水圧の作用について補足する．構造物の加速度の大きさに比例して作用する慣性力的な作用（流力弾性振動（バルジング））と，自由液面がある場合に液面が自由振動（揺動）を起こしたときに生じる二次的な動水圧作用（液面揺動（スロッシング））とがある[3)~7)]．バルジングは構造物本体と内部液体が一体となって運動する短周期的応答で，スロッシングは主として内部液体の運動が卓越する長周期的応答とされている[3)~7)]．

これのことを踏まえると，本実験では，振動数が小さくなるにつれ（水槽の固有振動数（4 次）2Hz に近づくほど），最大水位が大きくなったことから，水槽内の水のスロッシングによる影響を受けたものと考えられる．このスロッシングによる動水圧作用が，慣性力的な作用に加わるため，同じ加速度の場合でも，最大水位が大きいほど，水槽内の動水圧振幅も大きくなるものと想定される．

しかしながら，**図-3.45** より，水槽流出部（水槽内の圧力計③（水深 0.13m 地点））においては，応答加速度と動水圧振幅は比例関係となっており，同じ加速度で見ると，振動数の大小に関わらず，同程度の値となった．このことから，水槽流出部の水圧変動において，スロッシングによる動水圧の影響は小さく，慣性力による作用が支配的であると考えられる．一般的に，スロッシングによる圧力分布について，水深方向に行くのに従い，圧力が低減される[8)]．配水池の基本構造として，配水池流出管は池の底部付近に存在するため，スロッシングによる動水圧変化の影響を受けにくいと考えられる．また，加振終了後の圧力変動を**図-3.46** に示す．同図より，加振終了後も，水槽内において水圧変動が継続していることから，スロッシングの影響を受けているものと考えられる．この圧力変動は，管内のバルブ上流側から下流側に向け，減衰して伝播している状況が確認できる．

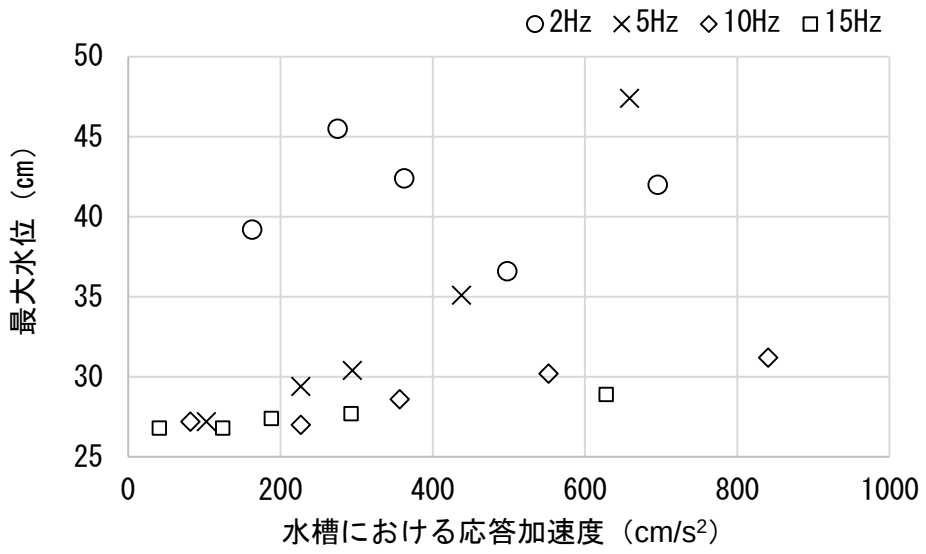


図-3.44　水槽における応答加速度に対する水槽の最大水位【再掲】

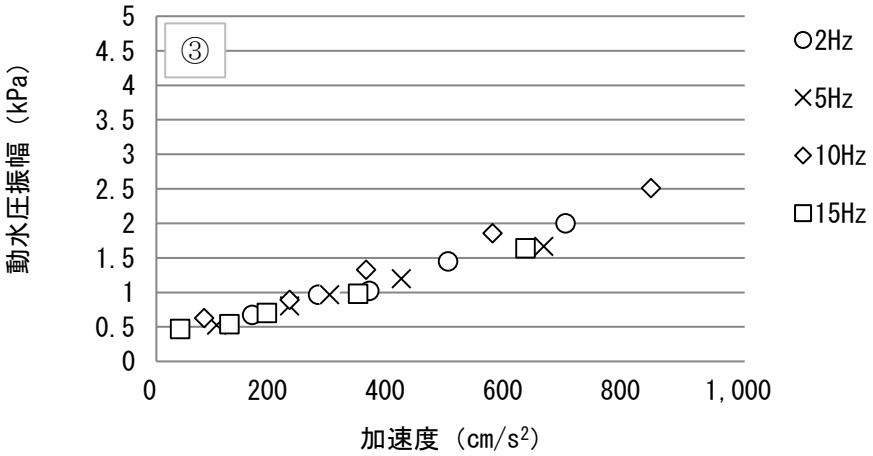


図-3.45　応答加速度に対する動水圧振幅（条件 1・圧力計③）【再掲】

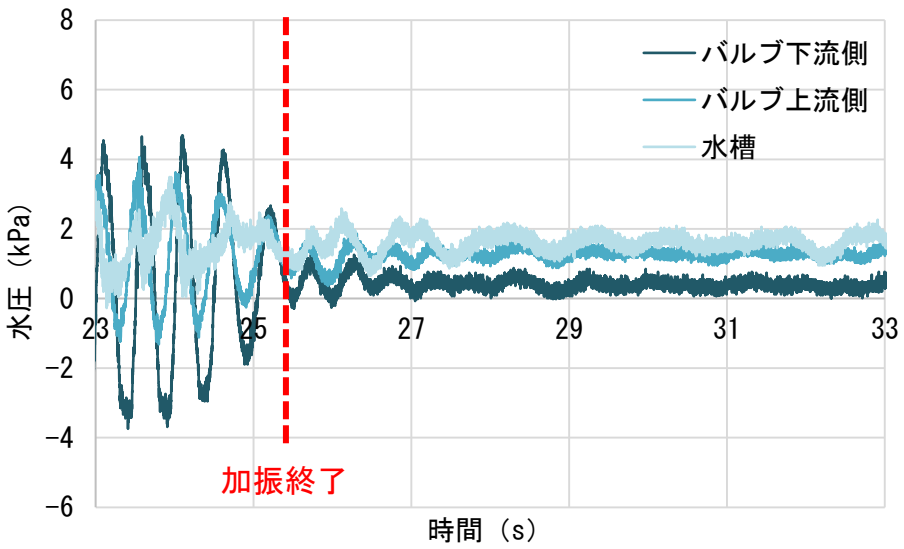


図-3.46　加振終了後の水圧の時系列変化（条件 3）（300gal，2Hz）

(5) 実験における水槽内の動水圧と実施設で想定される地震時動水圧

矩形水槽内における地震時動水圧は，次の Housner の理論式[9)]で表される．

$$P_W = \sqrt{3}\gamma k_H h\left\{\frac{Z}{h} - \frac{1}{2}\left[\frac{Z}{h}\right]^2\right\}\tanh\left[\sqrt{3}\frac{l}{h}\right] \tag{3-2}$$

ここで，P_w：圧力，　γ_w：水の単位体積重量(9.8kN/m^3)，　h：全水深，Z：計算位置の水深，l：水槽幅の 1/2，k_H：設計水平震度

図-3.47 に加速度と動水圧振幅における実験値と式(3-2) の計算値を比較したものを示す．同図より，動水圧振幅（実験値）は，計算値と同程度となっており，この水槽内の動水圧は，前述の結果で示したとおり管路内に同程度の値で伝播していく．

次に，実施設の規模を想定した場合の動水圧について考える．例えば，矩形配水池（長さ 20m，深さ 10m）に加速度 800cm/s^2 の地震動が作用した場合において，式(3-2) から地震時動水圧を算定すると 65kPa となる．この値は通常時の管内水圧（0.3～0.5MPa 程度）に比べて 1/10 程度と小さい．このように，実施設における動水圧は通常時の管内水圧に比べて小さいこと，また，前述のとおり同程度で管路内の水へ伝播することを踏まえると，配水池の振動により発生する動水圧が，管路内の水圧変化に与える影響は小さいものと考えられる．

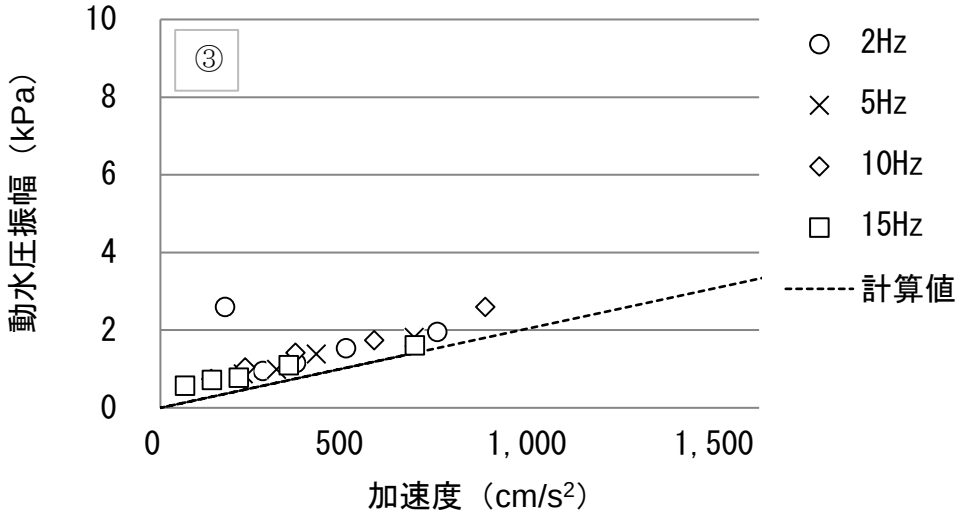


図-3.47　動水圧振幅の実験値（条件 2・圧力計③）と計算値の比較

(6) バルブ操作による水圧変動

次に，バルブ操作時の圧力変動に着目する．**図-3.48** に加振終了後，上流側バルブを閉めた際の水圧変動に着目した図を示す．

条件 2，条件 3 では，上流側バルブを閉めた際に，管路において大きな圧力変動が確認された．バルブを閉めた直後にバルブ下流側において圧力が低下した後，上昇，再び低下と上下を繰り返している．また，その後回復しているが，これは水が流れていない状態であるため，無視する．この条件では，下流側で漏水し，水圧が急激に低下する場合を想定したものであるが，この場合，**図-3.49** の熊本地震時の秋田配水池の水圧記録と同じように急激に低下し，再び圧力が回復しており，同じ傾向を示している．これは，流速の急激な変化により管内圧力が過渡的に下降する水撃現象によるものと考えられる．この原因として，一つ目に配水ポンプや上流側においてポンプの吐出圧が一時的に低下した可能性があること，二つ目に下流側での配水管漏水等に伴う圧力低下に対して，配水圧を回復，配水量を増大させようと制御が働いたことが考えられる．

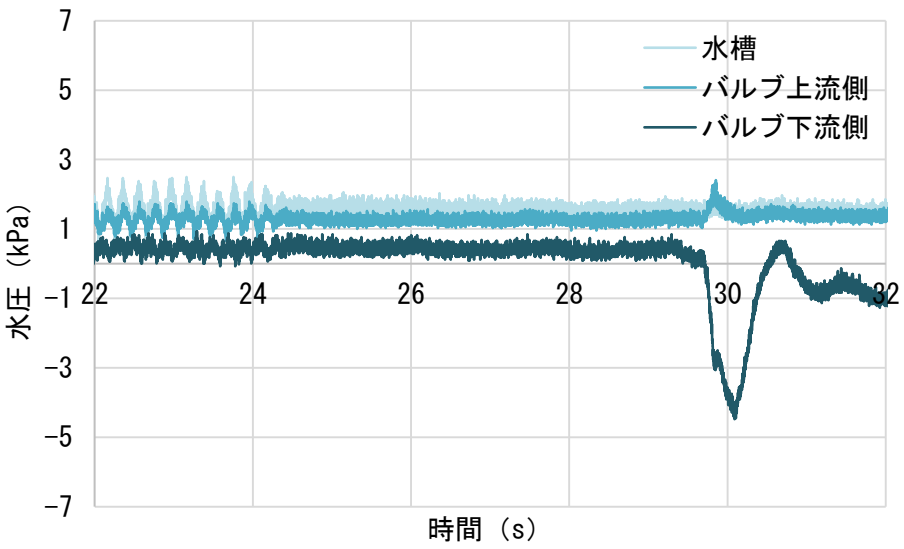


図-3.48　バルブ操作時の水圧変化（条件 3）

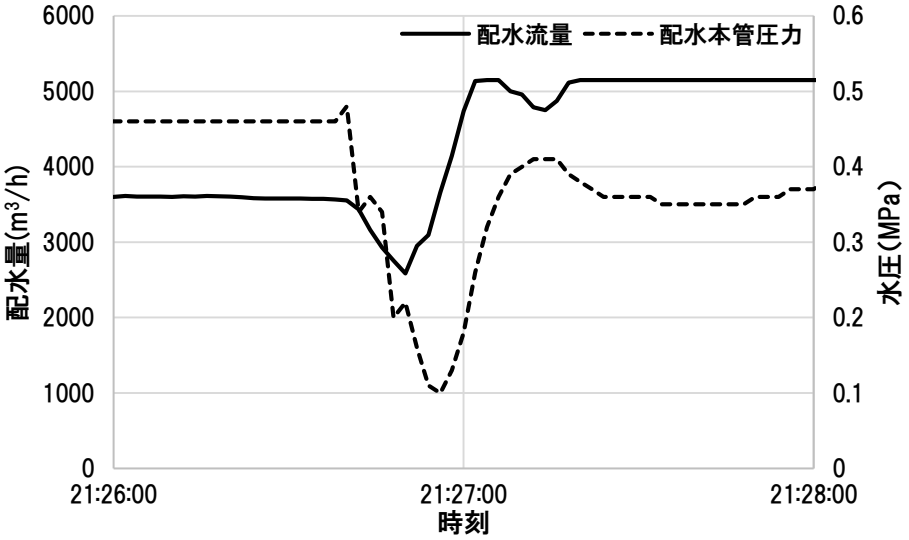


図-3.49　熊本地震時の秋田配水池流出管の水圧・流量記録（前震）【再掲】

3.3.4　結果まとめ

- 水槽内での圧力変動に対して，バルブ閉弁による制限をしない場合の下流側の管路において同程度の圧力変動が確認された．水槽内における動水圧が管路で増幅することなく，下流側の管内に同程度の圧力が伝播していく．
- しかしながら，実験結果を基に，実施設の規模において算定した地震時動水圧は，通常時の管内水圧に比べて小さい．
- 水槽内の動水圧振幅は，水槽の振動に伴う水位変動の大小の影響を受けず，加速度（慣性力）の影響が支配的である．
- 水槽内では，応答加速度の増加に伴い，動水圧振幅も比例して大きくなる傾向があるが，管路内のバルブ制限に起因する動水圧振幅と比べて小さい．
- 以上のことから，管内の水圧変動において，水槽内の水の振動による影響を受けるものの，その値は，管路内閉弁等のバルブ制限に起因する動水圧変化に比べると小さく，実際の配水池流出部における急激な水圧変動の原因として，配水池内の水の振動による圧力変動の影響とは考えにくい．
- 本実験のうち，バルブ操作試験による配水池流出部の水圧変動の形跡が，実際の水圧変動記録と同様の傾向を示したことから，ポンプの一時的な吐出圧の低下や下流側での配水管等の漏水に伴う急激な圧力低下に対して，配水圧を回復，配水量を増大させようとする一連の制御によるものと考えられる．

3.4　地震直後の下流側管路の水圧変動

3.4.1　実験概要

前述の 3.3 の結果から，配水池付近における急激な水圧変動の原因として，配水池内の水の振動の影響は考えにくく，ポンプの一時的な吐出圧の低下や下流側での配水管等の漏水に伴う急激な水圧低下に対して，配水圧を回復，配水量を増大させようとする一連の制御の働きによる影響の可能性が示唆された．

具体的には，地震直後に想定される事象について**図-3.50** に，実際の水圧記録について**図-3.51** に示す．地震直後の下流側での管路からの漏水等に伴う急激な水圧低下に対して，配水圧を回復，配水量を増大させようとする一連の制御の働きにより，配水池からの流出量が下流側の流量増加に追随しようとするものの急激な増加には追随できず，管内圧力が低下する．この時，上流側にある空気弁付近の圧力が低下，負圧が発生し，空気が管路内に吸気される．その後，配水池からの流量が下流側の流量増加に追随し，空気弁付近の圧力が回復する．この圧力回復時に，空気弁から急激に空気が排気されることで空気弁が破損したものと考えられる．

以上のことを踏まえ，**図-3.50** に示す想定事象を実験により再現することで，地震直後の空気弁付近における圧力変動の形跡を明らかにし，空気弁の破損に影響を及ぼすかどうか検証する．

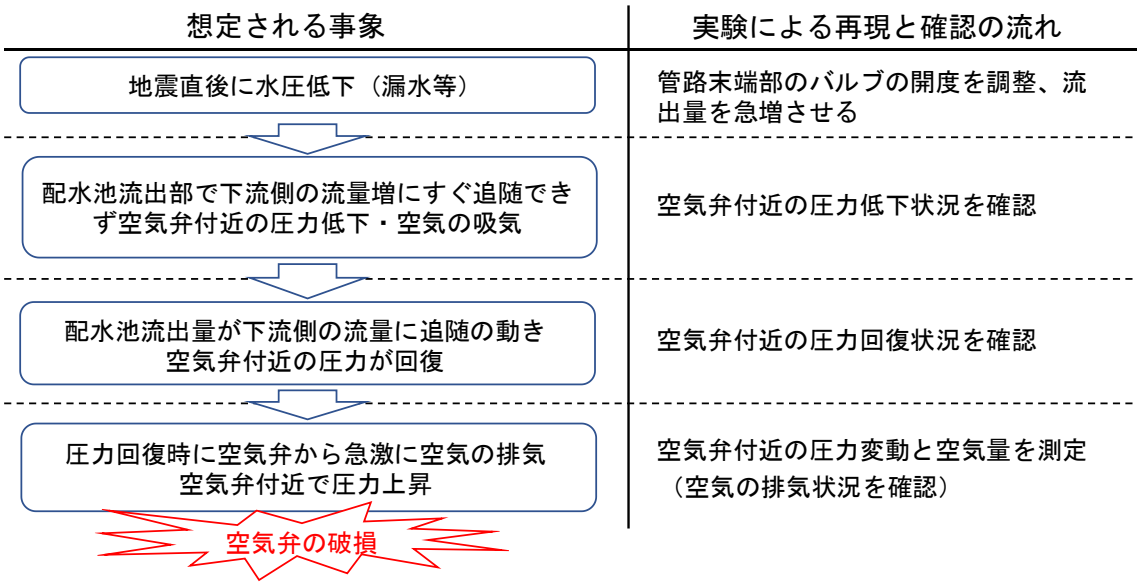
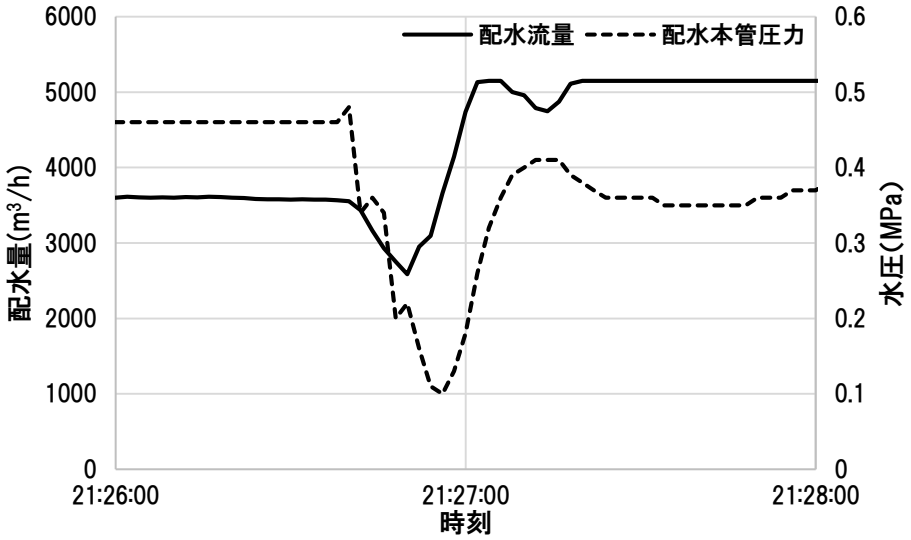
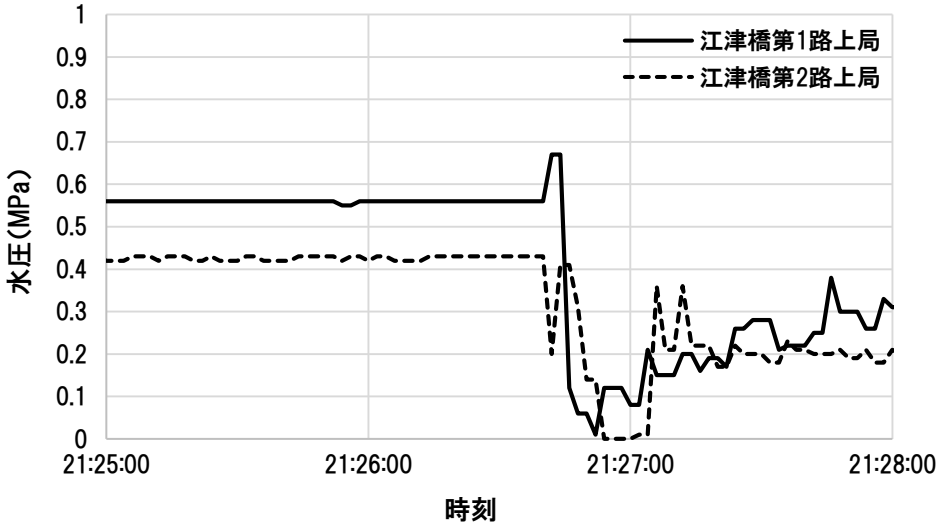


図-3.50　想定事象と実験による再現・確認の流れ



【秋田配水池流出管】



【下流側管路】

図-3.51　熊本地震発生前後の水圧記録（前震）【再掲】

3.4.2　実験方法

図-3.52 に示すように，水槽出口に設置した配水ポンプにより常に送水しておき，管内の初期有圧状態から，バルブ操作による，急激な圧力低下と水圧回復（使用水量又は漏水量の急増）を次の手順により再現する．

イ）管内末端バルブを制限し，ポンプを送水し，管内を有圧に保っておく．

ロ）管路末端バルブを全開にし，管内の圧力を低下させる．

ハ）圧力低下後，安定状態を保つ．

ニ）管路末端バルブを元の制限位置（所定の開度）に戻し，管内圧力を回復さ

せる．この時，空気の排気状況についても合わせて確認を行う．

3.4.3　実験装置及び実験条件

実験模型は，**図-3.52** に示すとおりであり，前述の実験方法のとおり，管路内をポンプにより送水を継続，管内を有圧に保ちながら，上流側バルブ及び下流側バルブを調整，下流側バルブを開閉することにより，圧力低下・回復事象を再現した．実験条件は**表-3.5** に示すとおりとし，実験装置の各箇所（①空気弁付近，②空気弁上流側管路，③空気弁下流側管路）に設置した圧力計，空気流量計により，圧力変動記録と空気弁から排出される空気流量を測定した．

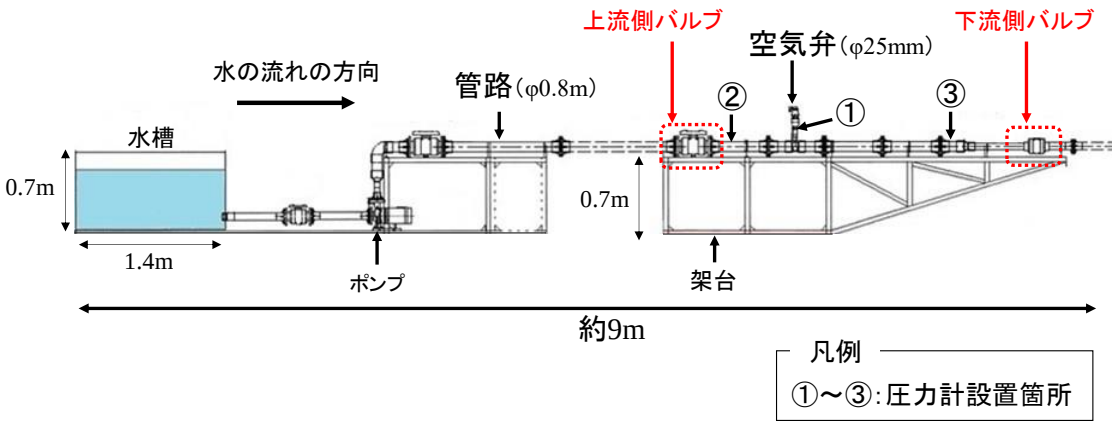


図-3.52　実験模型の概略図

表-3.5　実験条件

初期圧力	流速(m/s)	空気弁開閉	上流側バルブ（試験時開閉操作なし）	下流側バルブ（試験時開閉操作あり）
高（80kPa） 低(40～50kPa) （※1）	低（0.1） 高（0.3）	開 閉	1/2 開～1/3 開 （※2）	半開→全開→半開 （半開は開度 7/18 程度） （※3）

※1　圧力は，実際の管内圧力の約 1/10 に設定
※2　上流側バルブは，各実験ケースにおいて管内の初期圧力を所定値に設定するため，開度を 1/3～1/2 の間で調整
※3　下流側バルブは，全開→半開の操作において急閉操作と緩閉操作の 2 パターンを実施

3.4.4　実験結果及び考察

水圧変動による影響の確認にあたって，空気弁の開・閉，管内初期圧力の高・低，下流側バルブの急・緩閉等の各条件において，次のとおり実験結果を比較する．なお，比較にあたっての基本ケースとして，空気弁を開けた状態（吸排気できる状態），初期圧力が低い状態（40～50kPa），下流側バルブの急閉の場合の圧力の時系列変化と，この記録のうち，圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時を対象とした圧力変動記録を**図-3.53** に示す．また，この時の空気弁からの排気の状況を**図-3.54** に示す．

(1) 空気排気による影響

1) 空気弁開閉による比較

空気弁閉の場合の圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時を対象とした変動記録を**図-3.55** に示す．

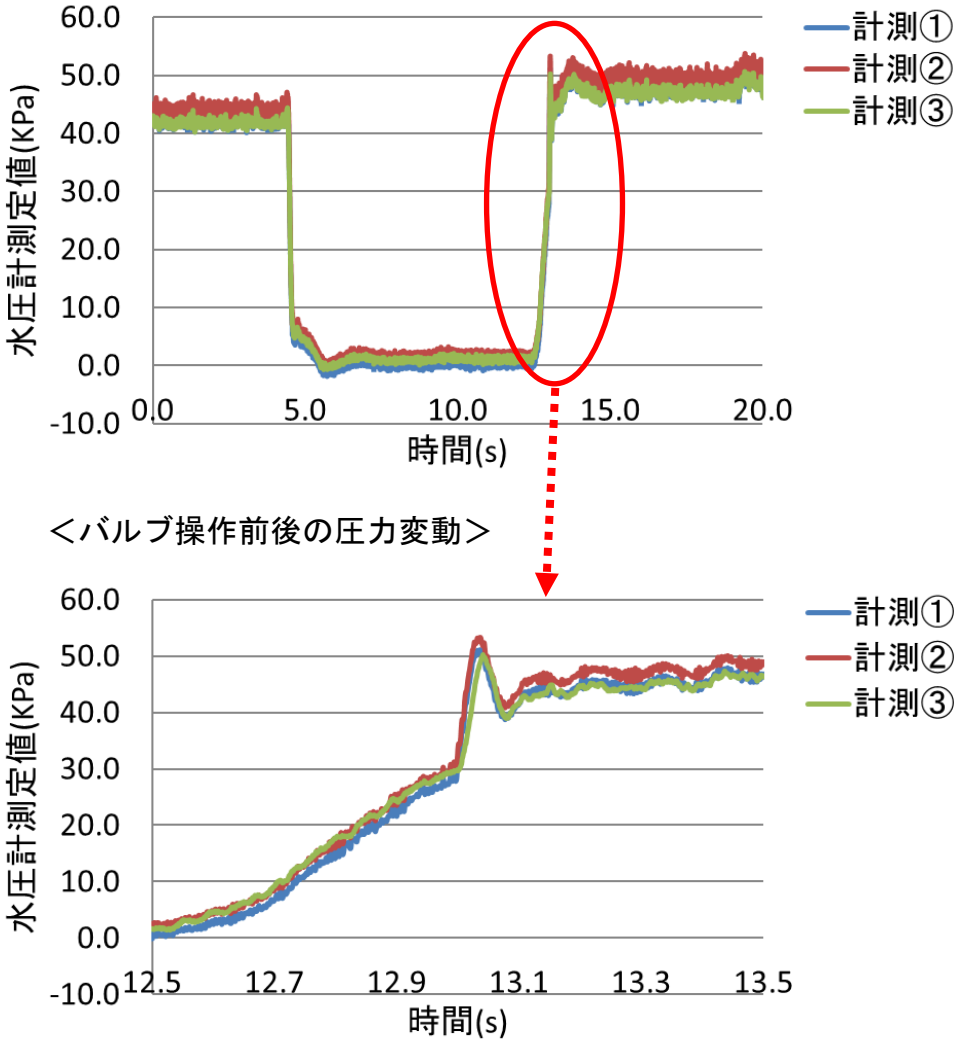
図-3.53 より，負圧から正圧への圧力回復過程（約 13 秒経過付近）において，20kPa 以上の突出した圧力上昇が発生している．これに対して，空気弁閉の場合は，**図-3.55** より，圧力回復過程で突出した圧力上昇は発生していない．これは，空気弁開における負圧状態では空気が混入し，負圧から正圧への圧力回復時に空気弁から急激な排気が起こるのに対して，空気弁閉では，空気の吸気の余地がなく，また圧力回復時に排気もなかったためである．

2) 初期圧力の違い（高・低）による比較

初期圧力の低い状況における圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時を対象とした記録は**図-3.53** に示すとおりである．初期圧力の高い場合も同様に，圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復【正→正圧】に伴う空気排気時を対象とした記録を**図-3.56** に示す．

図-3.53 より，初期圧力の低い状況では，圧力回復過程（約 13 秒経過付近）において，20kPa 以上の突出した圧力上昇が発生しているのに対して，**図-3.56** より，初期圧力の高い場合の圧力回復過程では，突出した圧力上昇は発生していない．これは，初期圧力が低い状態では空気が混入し，負圧から正圧への圧力回復時に空気弁から急激な排気が起こるのに対して，初期圧力が高い場合では，開始時から正圧状態が継続しているため，空気の吸気がなく，圧力回復時に排気がなかったためである．

以上 1)，2) の結果から，管路内が負圧状態，つまり，空気が混入された状況の下，急激な圧力回復を受けると，空気弁からの排気に伴う急激な圧力上昇が生じることが分かった．



＜圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部拡大）＞

図-3.53　「空気弁：開，初期圧力：低，バルブ：急閉」の圧力変動

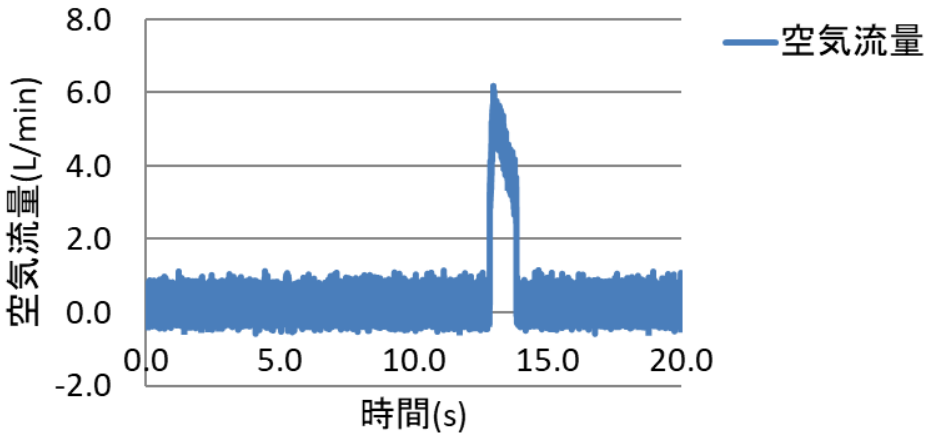
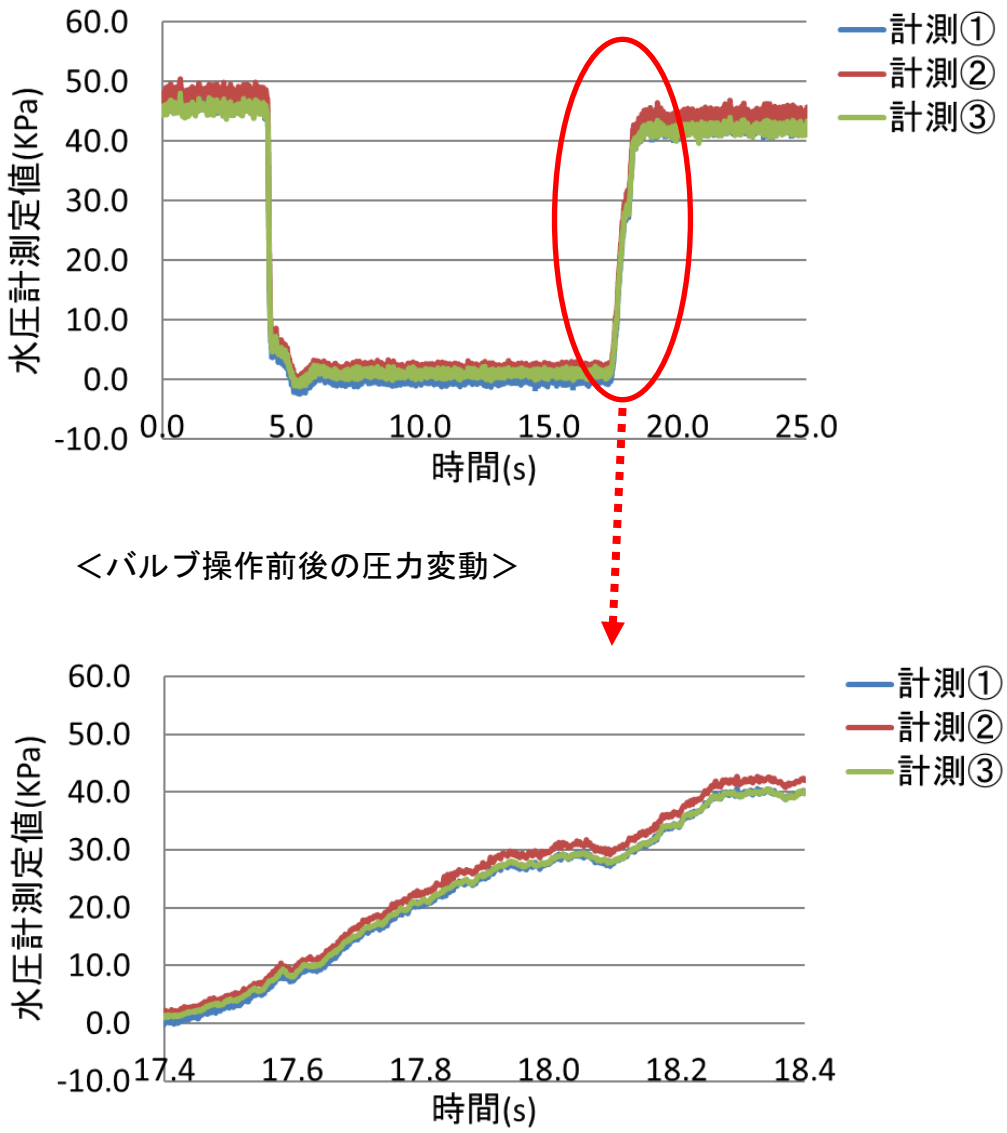
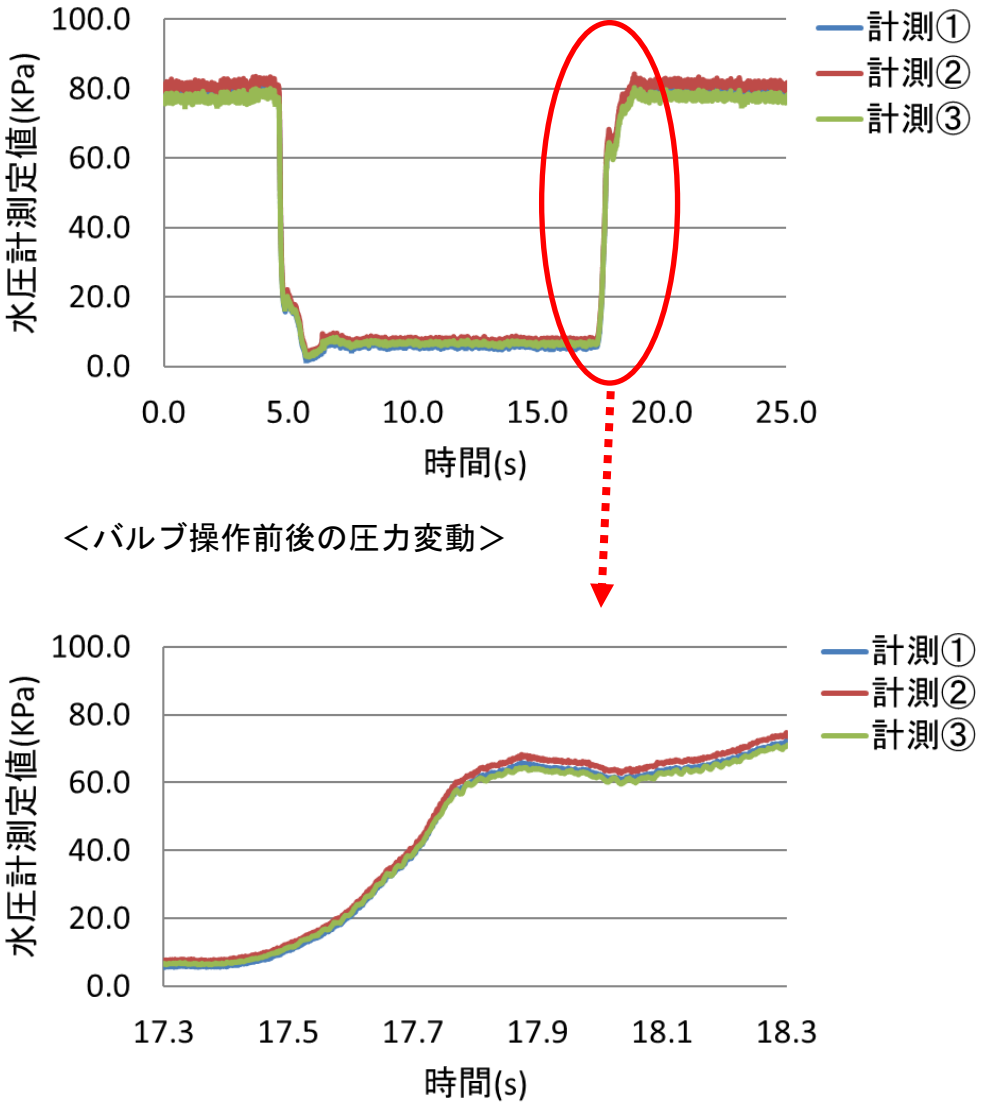


図-3.54　「空気弁：開，初期圧力：低，バルブ：急閉」の空気量の変動



＜圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部拡大）＞

図-3.55　「空気弁：閉，初期圧力：低，バルブ：急閉」の圧力変動



＜圧力回復時【正→正圧】の状況（丸囲い部拡大）＞

図-3.56　「空気弁：開，初期圧力：高，バルブ：急閉」の圧力変動

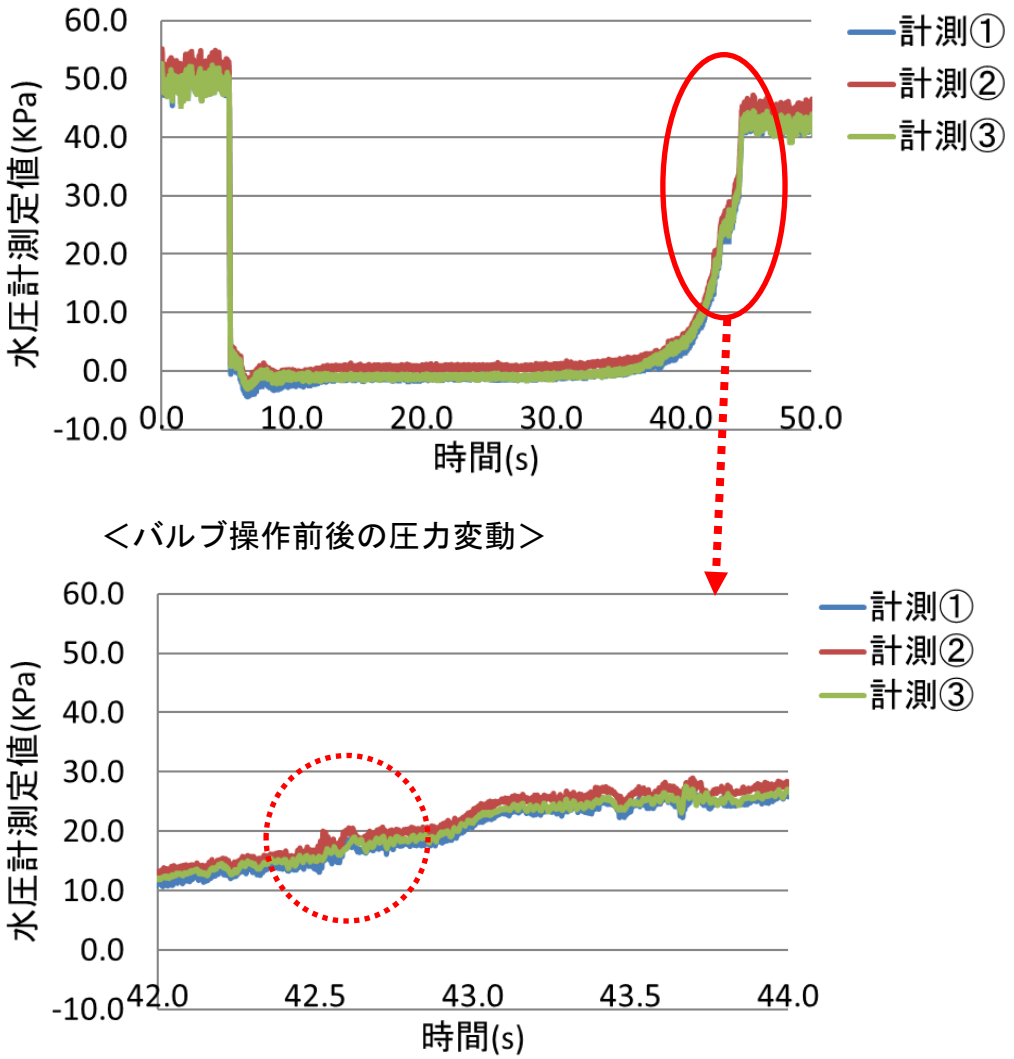
(2) 圧力回復速度による影響（下流側バルブ急閉（急回復）と緩閉（緩回復））による比較

下流側バルブを急閉した場合の圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復に伴う空気排気時を対象とした記録は**図-3.53** に示すとおりである．下流側バルブを緩閉した場合の圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復に伴う空気排気時を対象とした記録を**図-3.57**，**図-3.58** に示す．

図-3.53 より，下流側バルブを急閉した場合，つまり圧力回復速度が速い状況では，負圧から正圧への圧力回復過程（約 13 秒経過付近）において，突出した圧力上昇が発生しているのに対して，**図-3.57** より，下流側バルブを緩閉した場合，つまり圧力回復速度が遅い状況では，圧力回復過程において，比較的小さい圧力上昇（図に示す点線丸囲い部分）が確認されたものの，突出した圧力上昇は発生していない．これは，負圧から正圧への圧力回復が速い場合は，空気弁からの急な排気に伴う水撃作用が大きいのに対して，圧力回復が遅い場合では，その水撃作用が小さかったためと考えられる．

(3) 管内流速の違いによる影響

管内の流速が大きい場合（0.3m/s）の圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復に伴う空気排気時を対象とした記録は**図-3.53** に示すとおりである．流速が小さい（0.1m/s）場合の圧力変動の記録と，この記録のうち，圧力回復に伴う空気排気時を対象とした記録を**図-3.59**，**図-3.60** に示す．**図-3.53** より，流速が大きい場合，負圧から正圧への圧力回復過程（約 13 秒経過付近）において，突出した圧力上昇が発生しているのに対して，**図-3.59** の流速が小さい場合では，圧力回復過程において，圧力上昇（図に示す点線丸囲い部分）が確認されたものの，流速が大きい場合のように上昇幅の大きい突出した圧力は発生していない．



＜圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部拡大）＞

図-3.57　「空気弁：開，初期圧力：高，バルブ：緩閉」の圧力変動

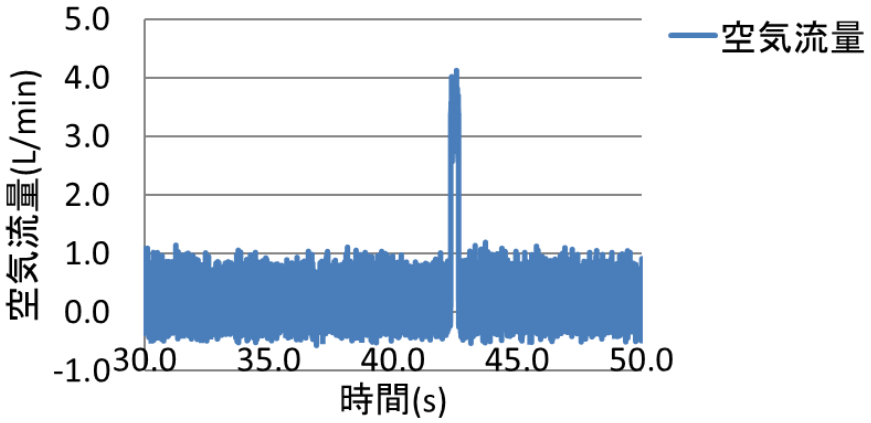
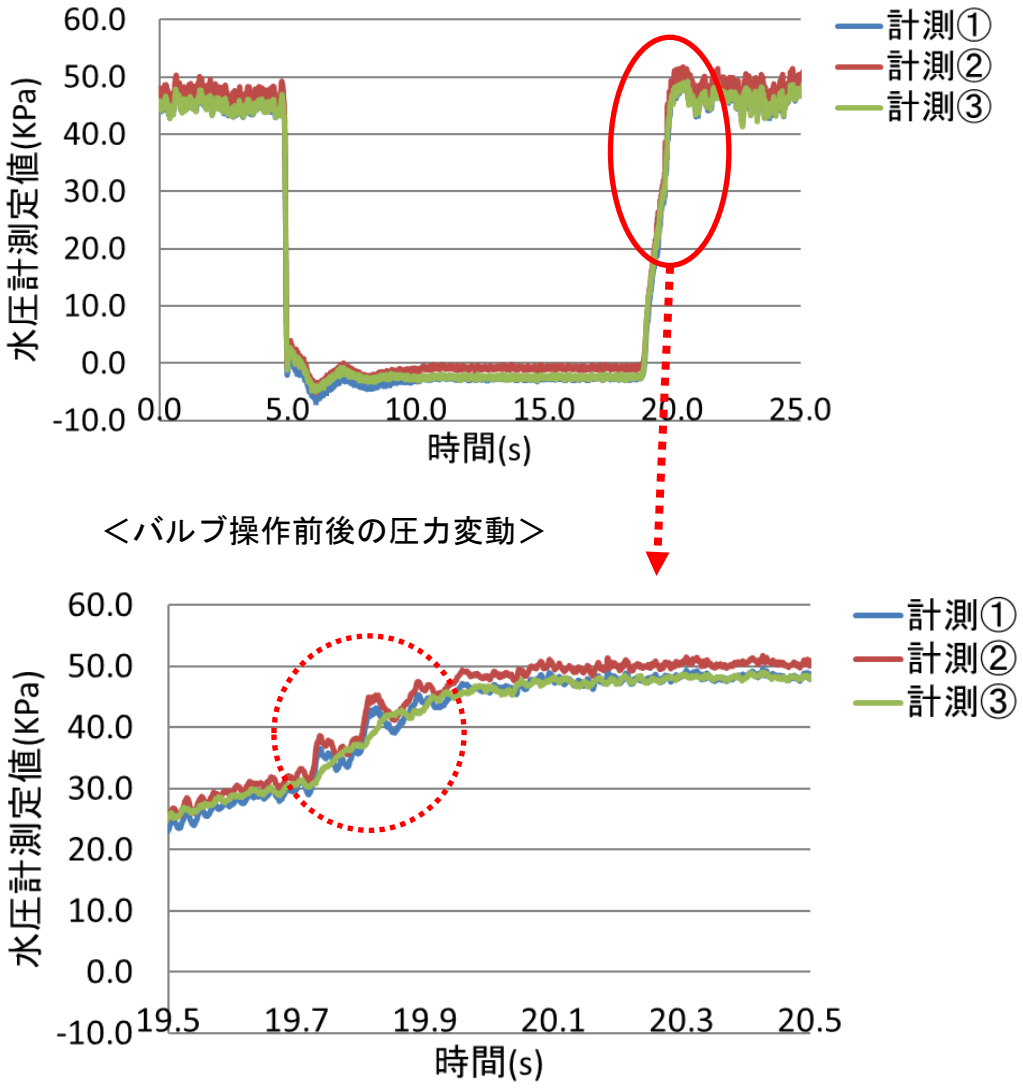


図-3.58　「空気弁：開，初期圧力：高，バルブ：緩閉」の空気量の変動



＜圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部拡大）＞

図-3.59　「空気弁：開，初期圧力：高，バルブ：急閉（流速：低）」の圧力変動

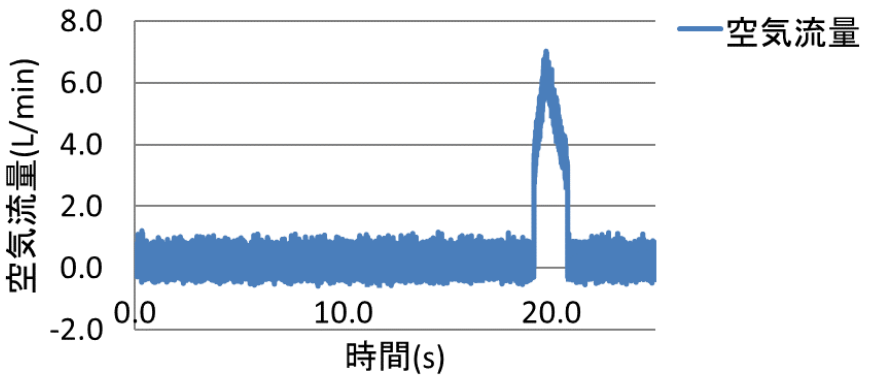


図-3.60　「空気弁：開，初期圧力：高，バルブ：急閉（流速：低）」の空気量

3.4.5　結果まとめ

- 正圧状態では，空気弁付近における圧力上昇は確認されなかったが，負圧状態からの圧力回復の過程で，突出した圧力上昇が確認された．
- 突出した圧力が発生した原因は，前述の管路振動実験と同様に負圧からの急激な圧力回復のタイミングで発生したものであり，空気弁付近で水撃作用が発生したためと考えられる．
- 下流側バルブの急・緩閉の実験結果から，圧力回復速度が速くなるほど，空気弁の排気時に大きな圧力上昇が発生したことから，空気排気時における空気弁付近での圧力上昇の大きさは，本管内の圧力回復速度に依存するものと考えられる．
- 負圧から正圧への圧力回復の過程において，本管流速が大きいほど，また，圧力回復が速くなるほど，空気弁の排気時に大きな圧力上昇が発生したことから，本管側の流速及び圧力が大きくなるほど，弁付近において大きな水撃作用が発生するものと考えられる．

3.5　まとめ

本章では，管内動水圧の変化の影響と配水池流出部の水圧変動の影響のそれぞれの側面から，模型実験により再現を行い，その影響について検証した結果，次のとおり明らかになった．

①　管路の振動に伴う管内動水圧変化

1)　管路形態等要因
- 初期水圧の低い管路内では，空気弁付近では振動による圧力上昇に加えて，負圧・正圧の交互の発生がきっかけとなって，急激な空気の吸排気に応じて繰り返し異常圧力が発生する．
- この圧力変化は他へは伝わりにくく，弁付近の局所に集中し留まる．
- 直管に比べて異形管部付近では，動水圧振幅が大きく，より負圧が発生し異常圧力が発生し得る．

2)　地震動要因
- 加振時の速度の上昇に応じて動水圧振幅が大きくなり，初期水圧が低い状況では管内で負圧が発生し異常圧力が発生し得る．

②　配水池の振動に伴う水圧変動

1)　水槽内の水の振動による管内への圧力伝播が確認されたが，その値は，バルブ制御に起因する管内の動水圧変化に比べて小さく，実際の配水池流出

部における急激な水圧変動の原因として，配水池内の水の振動による圧力変動の影響とは考えにくい．

③　地震直後の下流側管路の水圧変動

1) バルブ操作試験による管内水圧変動の形跡が，実際の水圧変動記録と同様の傾向を示したことから，その要因として，ポンプの一時的な吐出圧の低下や下流側での配水管等の漏水に伴う急激な圧力低下に対して，配水圧を回復，配水量を増加させようとする一連の制御の働きによるものと考えられる．
2) 負圧から正圧への圧力回復の過程で，空気排気の際に弁付近で突出した圧力上昇が確認された．
3) 圧力回復が速くなるほど，排気時に大きな圧力が発生したことから，排気時における弁付近での圧力上昇の大きさは，本管内の圧力回復速度に依存するものと考えられる．
4) また，圧力回復の過程で本管流速が大きいほど，空気弁の排気時に大きな圧力が発生したことから，本管側の流速及び圧力の大きさに依存して，水撃作用が発生するものと考えられる．

第 3 章の参考文献

1) 小川信行：水道管路の被害と地震時動水圧，国立防災科学技術センター研究報告，第 15 号，1976.
2) 葉山眞治，有賀敬治，渡辺辰郎：長方形容器におけるスロッシングの非線形応答，日本機械学会論文集，49 巻，437 号，1983.
3) 経済産業省原子力安全・保安院，電源開発株式会社：発電設備耐震性能調査ケーススタディ（塔型設備）（平成 21 年度～平成 23 年度）報告書，2012.
4) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009.
5) （社）日本水道協会：水道用プレストレスコンクリートタンク設計施工指針・解説，1998.
6) （社）日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針 JEAG 4601，1987.
7) （社）日本建築学会：容器構造設計指針・同解説，1996.
8) 小松敬治：スロッシング液面揺動とタンクの振動，森北出版（株），2015.
9) （社）日本水道協会：水道施設耐震工法指針・解説，2009.

第 4 章

急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムの特定

第 4 章　急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムの特定

4.1　はじめに

2 章及び 3 章から，空気弁被害をもたらす急激な水圧変動の原因として，管内水圧の状況，管路形態の変化に伴う地震時動水圧の影響や配水池流出部の水圧・流量変動の影響を受ける可能性が示唆された．管路模型実験により再現を行った結果，空気弁付近における水圧記録から負圧が生じるケースにおいて，圧力の急上昇が確認された．これら一連の圧力発生に係るメカニズムについて理論的に考察を行いつつ，実際の管路において空気弁が破損に至るかどうか検証する．

4.2　管内の動水圧変化に伴う空気弁破損に至るメカニズム

4.2.1　管内の動水圧変化

(1) メカニズムに係る考察

2 章の分析結果より，空気弁内部が破損した箇所では，地震による大きな揺れが発生し，この揺れに伴い管内の水圧変化が生じたものと推察され，この要因として，破損箇所付近に曲管等の異形管が存在していたことが挙げられた．3 章の実験結果を踏まえると，異形管等の管路形態の変化点で正負交互の地震時動水圧が発生し，その圧力変化が空気弁付近にも伝わったものと考えられる．3 章で示したとおり，管路形態の変化を有する場合，例えば，地震時における曲管部の場合（**図-4.1**）の動水圧変化は次の式 [1)]で表される．式(4-1) から，地震時の振動数に応じて正負交互の圧力変化が生じ，振動数が大きく，管軸方向地動変位が大きいほど，圧力変化が大きくなることが分かる．言い換えると，管軸方向の速度の大きさに比例して，地震時動水圧が大きくなるものであり，2 章で示した空気弁破損被害と最大速度の関係性からも分かるように，地震時動水圧変化が被害に影響を及ぼしたものと考えられる．

$$P_0 = \pm \frac{\omega \rho a z}{(1 + Q^2/\omega^2)^{1/4}} \cdot 2\cos\frac{\theta}{2} \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2} - \alpha\right) \tag{4-1}$$

ここで，P_0：曲管部の地震時動水圧 (Pa) ，ω：角振動数，ρ：水の密度(1,000kg/m^3)，a：圧力伝播速度(m/s)，Q：管摩擦による抵抗係数，z：管軸方向地動変位(m)

なお，圧力変化として負に転じた際に，空気弁から空気が吸気されることとなる．

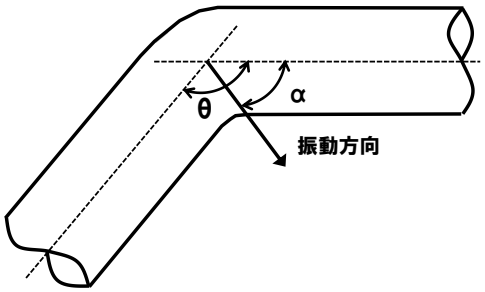


図-4.1　曲管部【再掲】

(2) 実際の管路における管内動水圧の変化の推定

空気弁破損箇所における動水圧変化は次のとおり想定される．2016 年熊本地震による被害事例から，**表-4.1** の破損要因が特定された空気弁付近の各管路形態において，管軸方向に地震による振動が加わったものと仮定し，前震と本震の場合の水圧変化について，式(4-1) に基づき算出した．なお，算出の前提条件として，管路は地盤と同一の動きをするものとし，地震動は定常正弦波と仮定した．結果は，**表-4.1** のとおり，地震時には通常時水圧（約 0.3MPa）を下回る負の動水圧が発生し，管路内に空気が混入したものと考えられる．また，本震では前震に比べて，動水圧変化が大きく，よりその影響が顕著に表れたものと考えられる．

表-4.1　各空気弁破損箇所における想定水圧

No	管路形態	条件設定								地震時動水圧 (MPa) ①	通常時水圧 (MPa) ②	想定水圧 (MPa) ①+②	
		PGA (gal)	PGV (cm/s)	ω	z (cm)	a (m/s)	Q	θ (度)	α (度)			最低	最高
○前震の場合													
1	90度水平曲がり変化点付近	500	60	8.3	7.2	1,023	0.1	90	45	± 0.9	0.3	-0.6	1.2
2	45度上下曲がり変化点付近							135	68	± 0.5	0.3	-0.2	0.8
3	45度水平曲がり変化点付近							135	68	± 0.5	0.3	-0.2	0.8
○本震の場合													
1	90度水平曲がり変化点付近	700	80	8.8	9.1	1,023	0.1	90	45	± 1.2	0.3	-0.9	1.5
2	45度上下曲がり変化点付近							135	68	± 0.6	0.3	-0.3	0.9
3	45度水平曲がり変化点付近							135	68	± 0.6	0.3	-0.3	0.9

※上表の PGA，PGV は 2 章の分析で算出したデータを採用
※上表の α は地震時動水圧の絶対値が最大となる場合を設定
※上表の ω と z は PGA と PGV からの換算値

4.2.2　空気弁の吸排気と弁付近の圧力変化

(1) メカニズムに係る考察

1) 空気弁の動作と水撃作用

空気弁の動作と水撃作用について，**図-4.2**，**図-4.3** に示す．図より，管内の負圧に伴う空気の混入後，地震による**図-4.1** に示す振動方向への振動によって，管内の動水圧が負から正に転じた瞬間，空気弁内が充水され，混入している空気が弁外に瞬時に排気されることとなる．この場合の空気弁内における圧力変化について考えると，空気弁及び管路内に混入している空気が，充水されることにより弁外へ排気される時，排気完了の瞬間に水の動きが停止し，充水速度が瞬間的に 0 になる．この急激な充水速度の変化によって，空気弁の排気孔で弁を瞬間閉止した場合と同様の水撃現象が起こる．ここで，充水速度とは，管路内の空気が排気され，満水になる過程における管路内の水の流速のことで，空気弁の充水速度基準[2)]は通常流速の 1/5～1/10 と定められている．

この時の圧力の変化は，次の水撃作用の Joukowsky の式[3)]で表される．

$$P = H \times 0.0098 = \frac{a}{g}\Delta V \times 0.0098 = \frac{a}{g}\left(V_w - \sqrt{\frac{\gamma_a}{\gamma_w}}V_w\right) \times 0.0098 \tag{4-2}$$

ここで，P：圧力の変化(MPa)，H：圧力水頭の変化(m)，ΔV：充水速度の変化(m/s)，g：重力加速度(9.8m/s^2)，a：圧力伝播速度(m/s)，V_w：充水速度(m/s)，γ_w：水の単位体積重量(9.8kN/m^3)，γ_a：空気の単位体積重量(0.012kN/m^3)

$$a = \frac{1}{\sqrt{\frac{\gamma_w}{g}\left(\frac{1}{E_w} + \frac{1}{E}\frac{D}{e}\right)}} \tag{4-3}$$

ここで，E_w，E：水及び管の弾性係数(kN/m^2)，　D：管径(m)，e：管壁厚(m)

式(4-2)，(4-3)から空気が混入した場合，充水速度が大きいほど空気排気に伴う弁内の急激な圧力上昇が生じることが分かる．地震時の振動に応じて急速に吸気，充水・排気が行われることにより，空気弁内の急激かつ相当な圧力上昇が発生したもの考えられる．

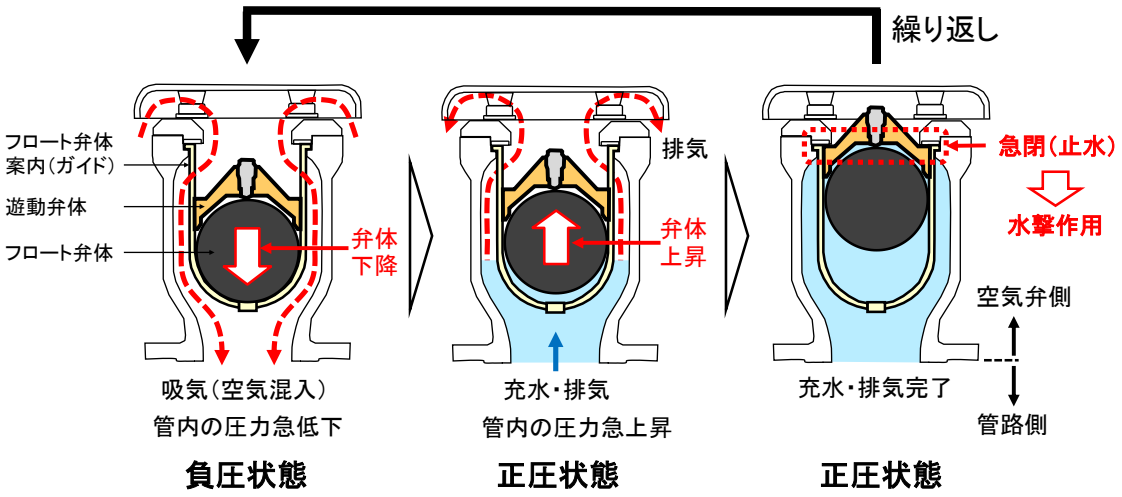


図-4.2　空気弁の動作と水撃作用

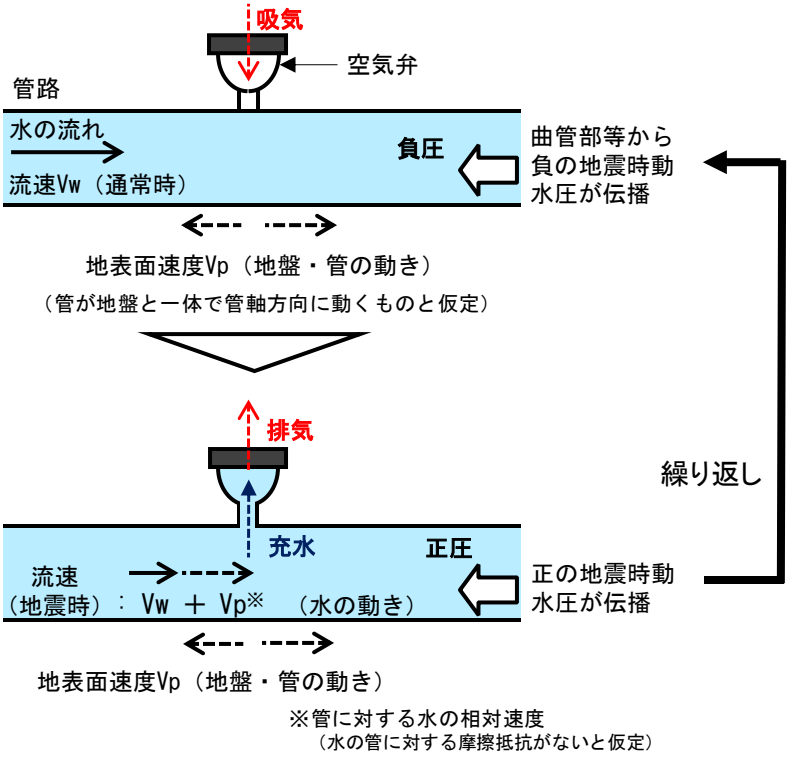


図-4.3　管内の吸排気と充水（イメージ）

2）空気弁内の充水速度と弁内の圧力上昇

管内水圧変化に伴う空気弁内の充水のイメージを**図-4.4** に示す．同図より，本管部分の地震時動水圧変化の影響を受けて，空気弁に至る立ち上がり管（T 字管部）及び，弁内が充水されることとなる．空気弁の排気孔をオリフィスに見立てると，管内の空気が排気される時，T 字管部及び弁内での水の上昇速度は次の

式[4)]で表される．式(4-4)より，実験管路と実際管路それぞれの管内水圧と弁内の充水速度の関係を表すと**図-4.5** のとおりであり管内水圧の上昇に伴い，弁内の充水速度も増加することが分かる．

$$V_w = C_w \sqrt{\frac{2gp_0}{\gamma_w}} \tag{4-4}$$

ここで，V_w：充水速度，p_0：空気弁付近の管内水圧 (Pa)，C_w：流出係数

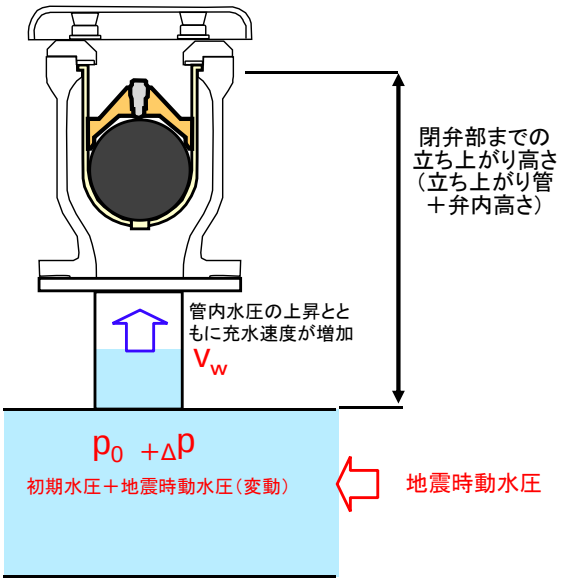


図-4.4　空気弁内の充水（イメージ）

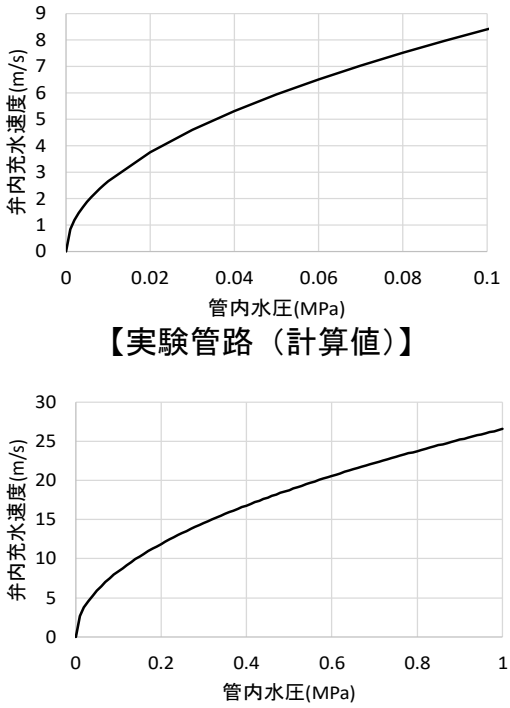


図-4.5　管内水圧と弁内充水速度

地震時には，管内水圧は通常時の初期水圧に加えて，地震時動水圧が加わる．加振加速度 120gal，15Hz の場合における 1 秒間の管内水圧変化の実験結果を**図-4.6** に，計算値を**図-4.7** に示す．**図-4.6** では，本管側（圧力計③）は曲管部の動水圧が作用して変動したものであり，**図-4.6** の実験結果における本管側の圧力変化（圧力計③）と，**図-4.7** の計算値を比較すると概ね同じ傾向を示している．その一方で，**図-4.6** の空気弁付近の圧力計①では実験で使用した計測機器の計測上限の 100kPa を上回る異常圧力が発生しており，この圧力上昇については，弁閉止時における水撃作用によるものと考えられ，前述のとおり弁内の充水速度の影響を受けたものと考えられる．

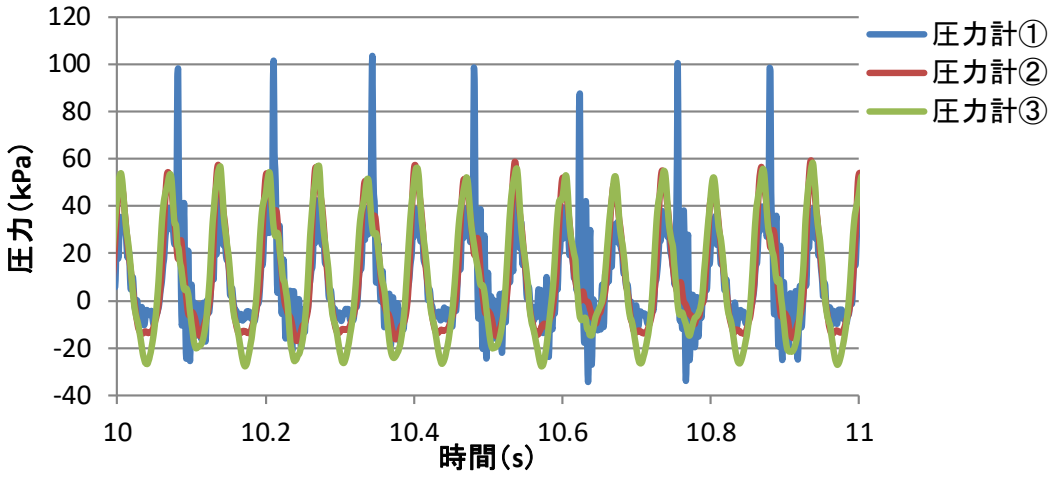


図-4.6　管内水圧変化【実験計測値】(加振加速度 120gal，15Hz)

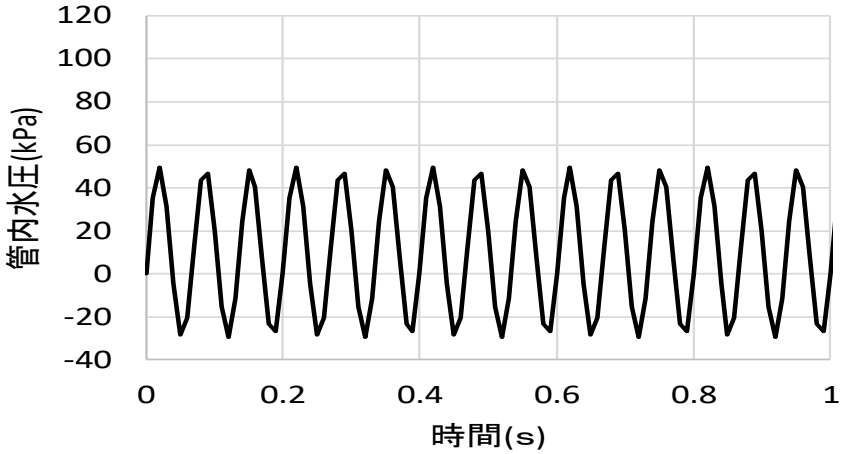


図-4.7　管内水圧変化【計算値】

前述の管内水圧と弁内充水速度の関係を踏まえ，実験管路における管内水圧変化とそれに伴う弁内充水速度（計算値）の関係について，**図-4.8** に示す．

次に弁内の充水速度から水撃圧を算定する．管内が負圧から正圧に移行するタイミングで空気の排気が始まり，T 字管部及び弁内部（高さ 0.1m）を水が上昇することとなる．この時の弁が閉止する直前の水の充水速度を式(4-4)より計算すると，**図-4.9** のとおりとなる．この時の水撃圧について，式(4-2)より，この時の空気弁内における水撃圧の計算値は，1.5MPa となる．これは，水中に気泡が混入していない状況下における値であるが，西山らによる「混入空気による異常圧力上昇を伴う水撃作用の解析方法」等 [5)6)]によると，空気が混入した状況下では，水中に気泡が発生し得るため，この気泡によって水撃圧が軽減される．気泡率が大きくなるほど，水の体積弾性率及び圧力伝播速度が低下し，これに比

例して水撃圧も低下する．今回の実験では気泡率の測定はしていないが，気泡率が 0～0.02 の範囲で変化した場合，**図-4. 10** [5)6)]より圧力伝播速度は 1/4 程度まで低下，水撃圧は 0.3MPa～1.5 MPa となる．これに対して，実験の計測値は計測上限 0.1MPa を超えたため，正確な値を把握できなかったが，上述の計算値付近まで上昇した可能性がある．

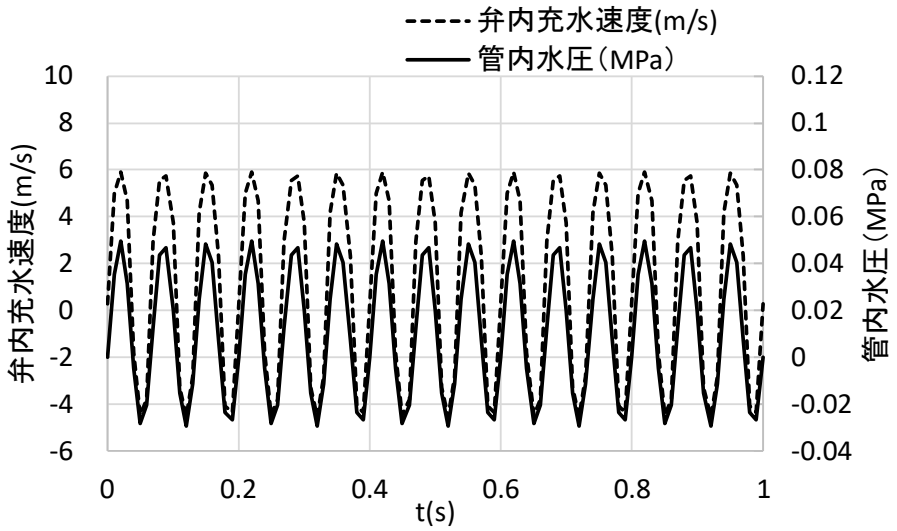
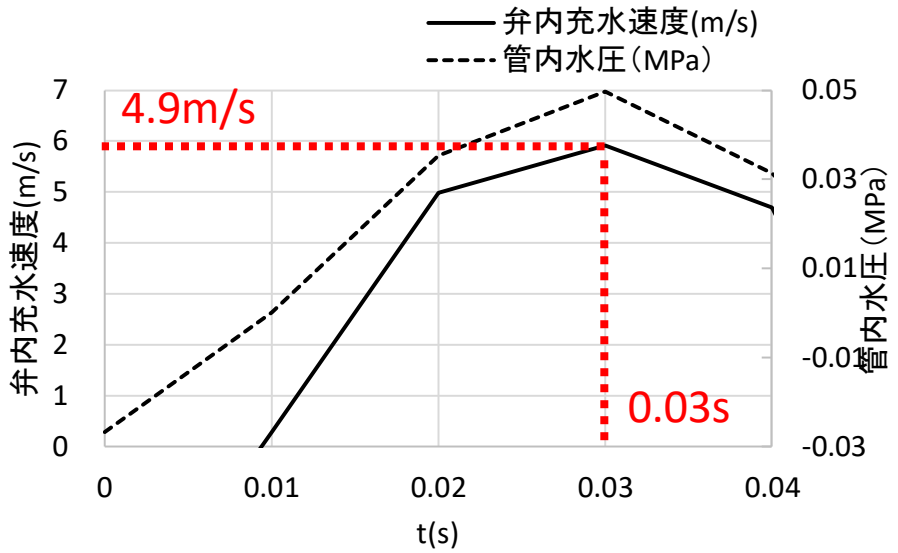


図-4. 8　管内水圧変化に伴う弁内充水速度変化【実験管路（計算値）】



※本管から弁閉止部までの高さ（空気混入高さ）を 10cm とした場合の弁閉止部までに水が到達する時間

図-4. 9 空気弁閉止直前の充水速度【実験管路（計算値）】

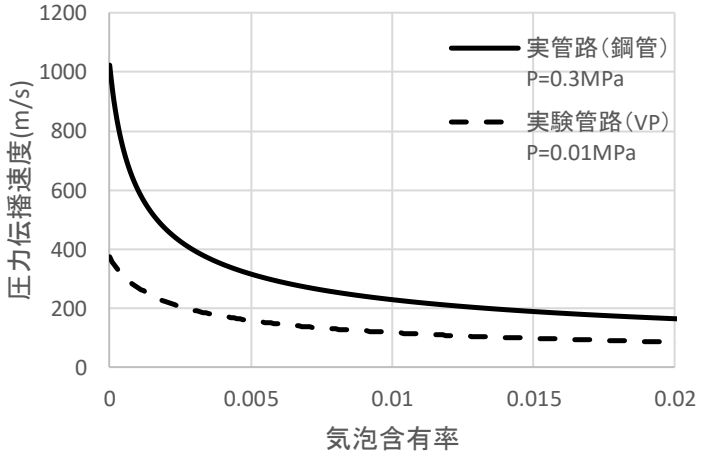
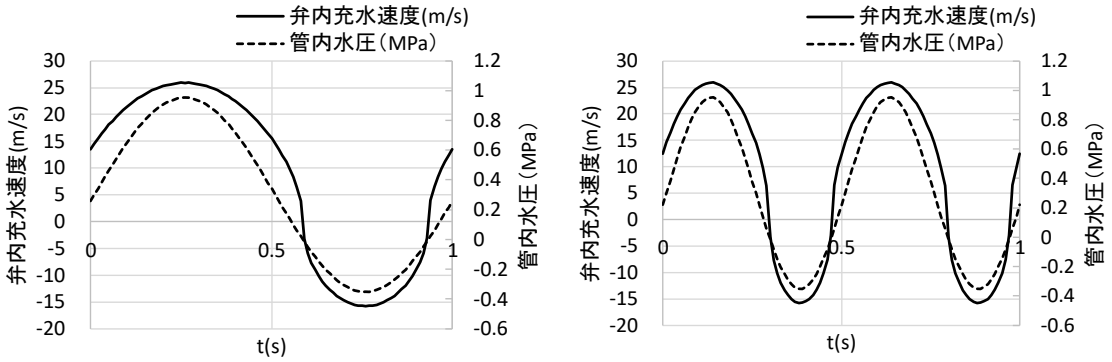


図-4.10 水中の気泡含有率と圧力伝播速度の関係 [5)6)]

(2) 実際の管路における空気弁内における圧力上昇値の推定

次に，実際の管路を想定し，水撃圧を算定する．2 章において，熊本地震における空気弁の漏水被害が，地表面速度 40～50cm/s 以上から徐々に増加していたこと，熊本市で観測された地震動の卓越振動数が 2Hz 程度であったことを踏まえて，次のとおり条件を設定し，算定する．

例えば，90 度曲管（空気弁下流の位置）を有する初期水圧 0.3MPa の管路に，地表面速度 45cm/s，振動数 1Hz または，2Hz の地震動正弦波が加わる場合の管内水圧変化とそれに伴う弁内充水速度の関係についてグラフ化したものを，一例として**図-4.11** に示す．図より，振動数が大きいほど，時間当たりの空気弁内の充水速度変化が大きくなることがわかる．このことから，振動数が大きくなるほど充水速度が大きくなり，弁閉止時に大きな水撃圧が発生する可能性が考えられる．



【1Hz】　　【2Hz】

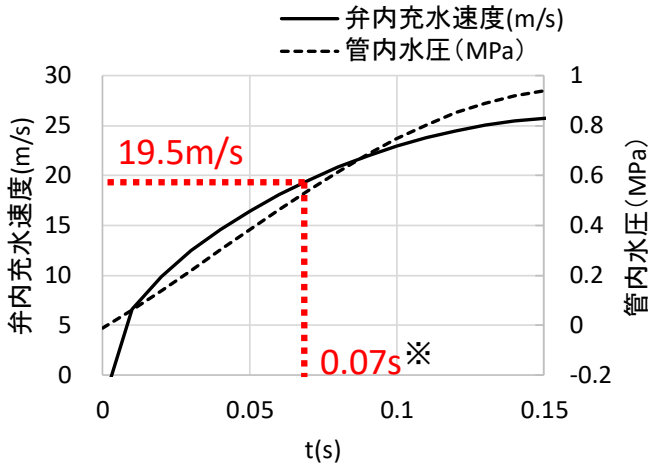
図-4.11 地震時管内水圧変化に伴う弁内充水速度変化【実際管路（計算値）】

次に，本管から弁閉止部までの高さを 1m とした場合を例として，前述と同様に水撃圧を算定する．振動数 2Hz の場合を例に，まず，弁が閉止する直前の水の充水速度を計算する．管内水圧が負圧から正圧に回復するときの管内水圧と充水速度との関係を**図-4.12** に示す．図より，時間経過に伴い，管内水圧の回復に合わせて，充水速度も初期は立ち上がりが速く，徐々に増加する．この充水速度によって，**図-4.4** に示す本管側から弁閉止部までの排気・充水が完了するまでの時間は約 0.07 秒であり，弁閉止直前の充水速度は約 19.5m/s となる．次に，この時の水撃圧について，式(4-2)に，この充水速度と圧力伝播速度（1,023m/s）などの値を用いると，空気弁内における水撃圧は，19.3MPa となる．この値は，**表-4.1** に示す，水道用空気弁の規格で定める許容値及び耐圧試験値を上回るものである．この空気弁の急閉に伴う水撃作用に伴い，**図-4.13** に示すように，フロート弁体，遊動弁体に鉛直上方向への圧縮力が作用するとともに，ガイドの構造上，外部に水撃圧が逸散されにくい状況が想定され，その内部で局所的に圧力が集中して遊動弁体とガイドに作用することで，破損に至ったものと推察される．なお，空気弁内の各部品が，規格値を超えて，実際にどの程度まで強度を有していたかは不明である．

前述と同様に，空気が混入した弁内では，水中に気泡が発生し得るため，気泡率が大きくなるほど，水の体積弾性率及び圧力伝播速度が低下し，これに比例して水撃圧も低下することから，気泡率が 0～0.02 の範囲で変化した場合，**図-4.10** より圧力伝播速度は 1/5 程度まで低下する．したがって，水撃圧も 19.3MPa から 3.9MPa まで低下する．この値は，空気弁許容値を上回るものであるが，さらに気泡が増加した場合は空気弁が破損に至らないことも考えられる．

加えて，振動数 1Hz の場合も同様に算定すると，水撃圧が 15.3MPa となり，2Hz の場合に比べてやや小さい．これは，振動数が小さくなるほど，管内の圧力回復速度が低下し，それに伴い弁内の上昇速度も低下するためである．

以上のことから，地震時の管内の動水圧変化に加えて，空気弁における急激な吸排気に伴う水撃作用が複合的に作用することによって，急激な水圧変化が生じ，空気弁の破損に至ったものと考えられる．



※本管から弁閉止部までの高さ（空気混入高さ）を 1m とした場合の弁閉止部までに水が到達する時間

図-4.12　空気弁閉止直前の充水速度【実際管路（計算値）】

表-4.1　水道用空気弁規格（JWWA B 137）で定める許容値及び試験値 [7)]

単位：MPa

種類	呼び圧力	使用圧力	最高許容圧力	耐圧試験水圧
2 種	7.5K	0.75	1.3	1.75
3 種	10K	1.0	1.4	2.3
4 種	16K	1.6	2.2	2.4

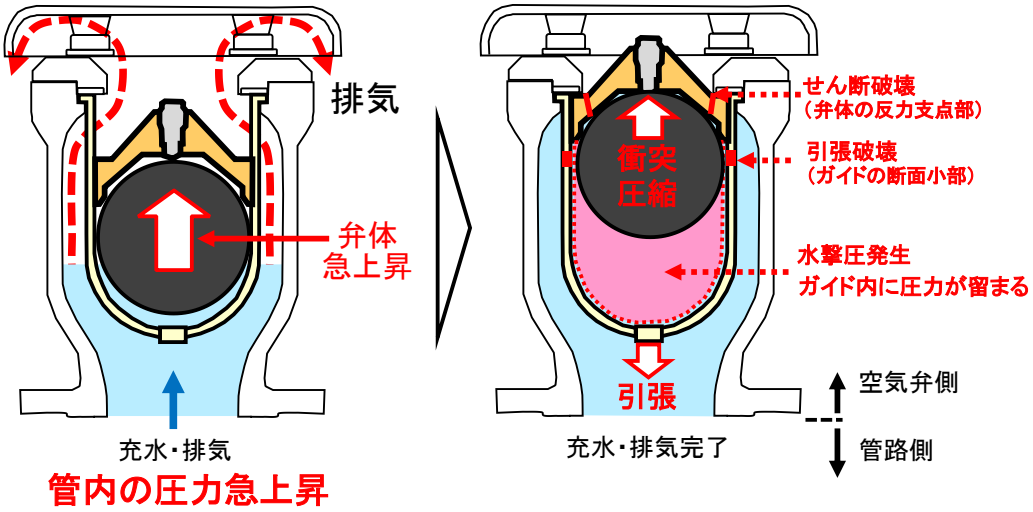


図-4.13　空気弁内の部品の破壊と想定される要因【再掲】

4.3　配水池流出部の水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズム

4.3.1　配水池流出部の水圧変動と空気弁における圧力変化

2 章の分析結果より，地震直後の配水池流出部及び，下流側管路の水圧記録（**図-4.14**，**図-4.15**）において，急激な圧力低下の後，圧力回復を示していることから，地震直後の配水池流出部の水圧変動の影響を受けたことが明らかであり，下流側管路内において負圧発生により空気が混入する状況であった．3 章の配水池流出部における急激な水圧変動を想定した実験結果（**図-4.16**）において，管路模型振動実験と同様に，負圧からの急激な圧力回復の過程で突出した圧力上昇が発生したことから，実際の空気弁において水撃作用が発生したものと考えられる．

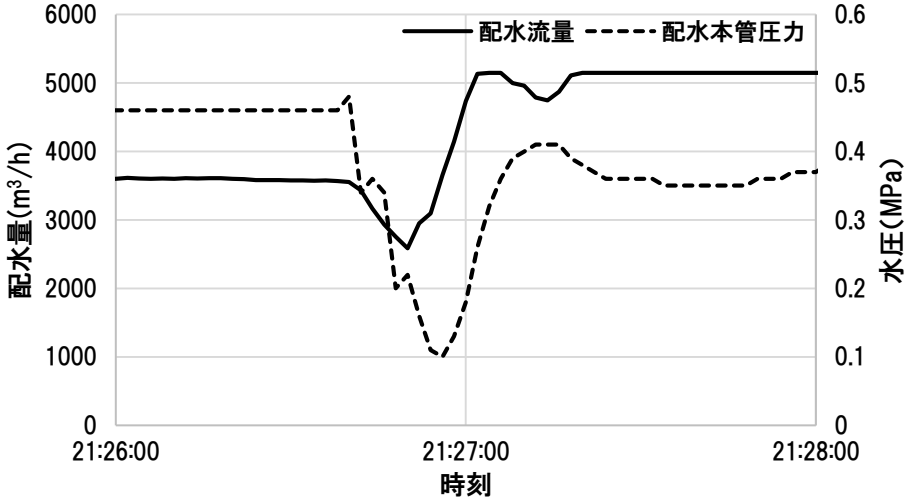


図-4.14　前震発生前後の秋田配水池流出管の水圧・流量記録【再掲】

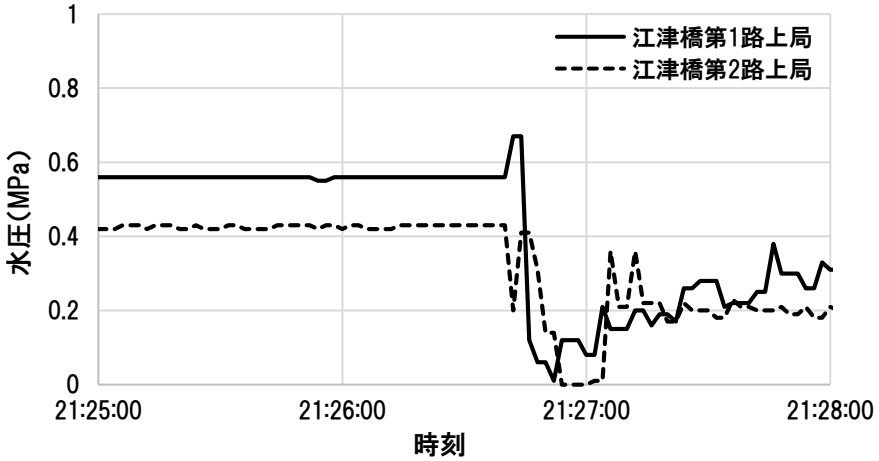
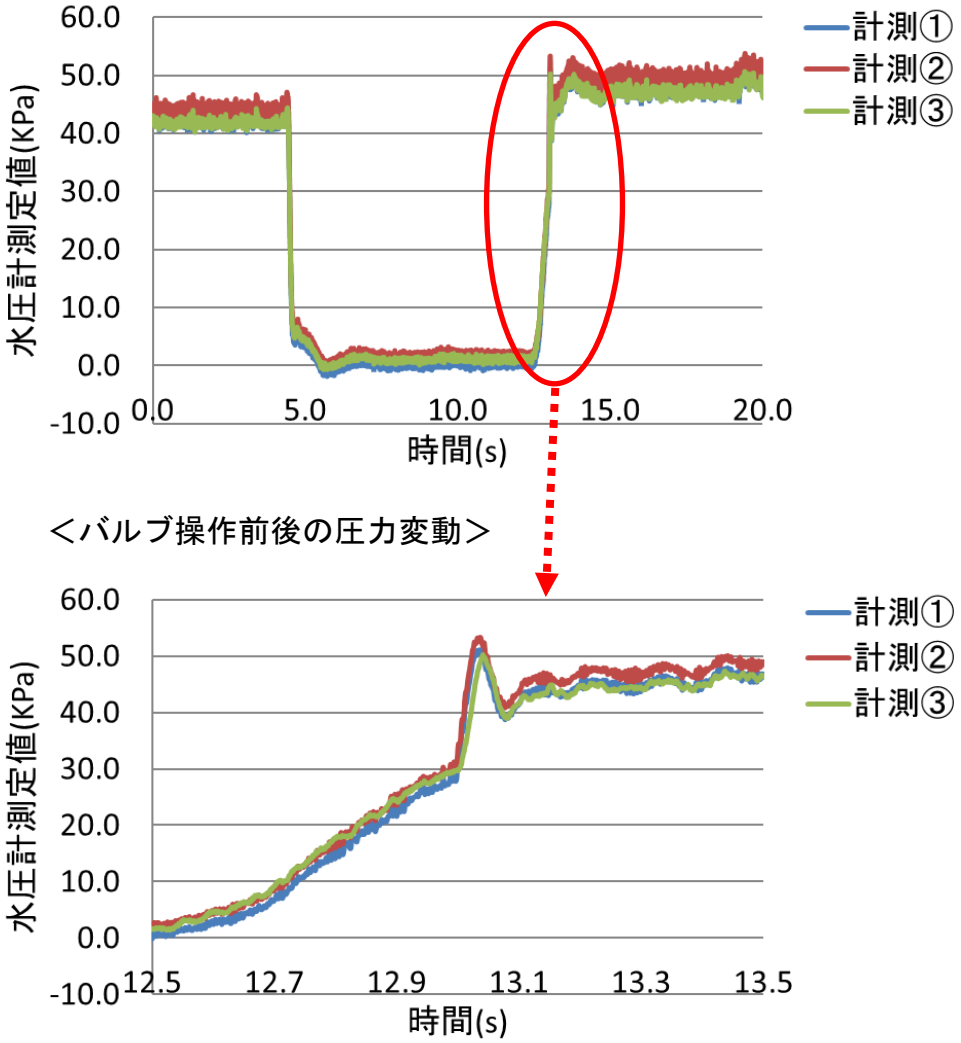


図-4.15　前震発生前後の健軍・秋田配水区域の管路（江津橋第 1・2 路上局）の水圧記録【再掲】



＜圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部拡大）＞

図-4.16　「空気弁：開，初期圧力：低，バルブ：急閉」の圧力変動【再掲】

4.3.2　空気弁の吸排気と弁付近の圧力変化

(1) 空気弁内の充水速度と弁内の圧力上昇

管内水圧変化に伴う管内の吸排気と空気弁内の充水のそれぞれのイメージを図-4.17，図-4.18 に示す．同図より，管内の負圧から正圧への圧力回復に伴い，空気弁に至るＴ字管部及び，弁内が充水されることとなる．3 章の実験結果による図-4.19 から，管内が負圧から正圧に移行する過程で空気の排気が始まり，30kPa(12.8s)付近において空気の排気に伴う，突出した圧力上昇が確認された．これは管内が 30kPa 付近に達したときに，急激な空気の排気により弁が急閉止したことで，水撃圧が発生したものと考えられる．この時（弁閉止直前）の管内

圧力における空気弁内の水の上昇速度について，前述の式(4-4)より，上昇速度を算定すると 3.4m/s となる．式(4-2) より，この時の空気弁内における水撃圧の計算値は，約 0.9MPa となる．これに対して，実験値は約 0.05MPa(50kPa)で理論値の 1/20 程度と小さな値となっており，前述で示した気泡混入に伴う圧力緩和の影響を大きく受けたものと考えられる．

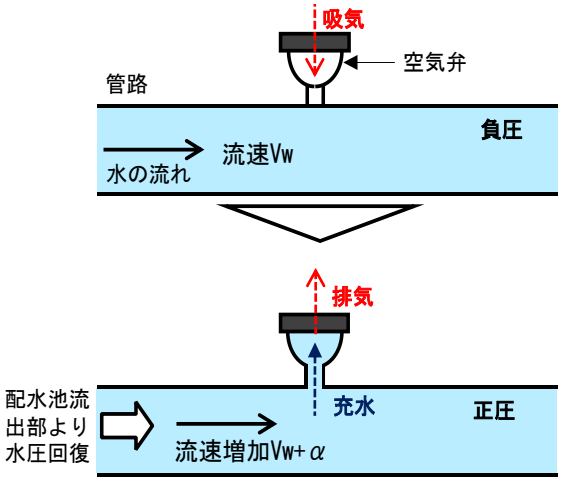


図-4. 17　管内の吸排気と充水
（イメージ）

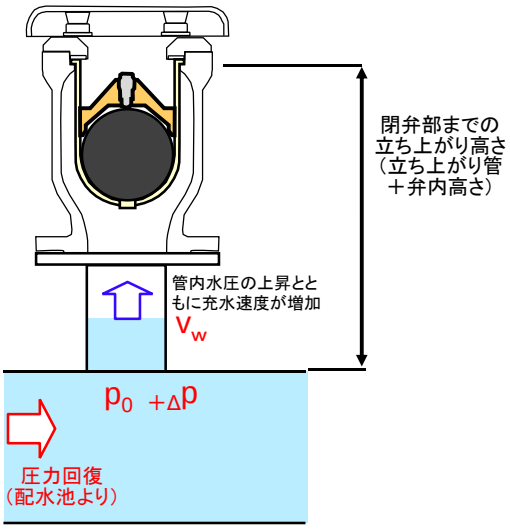


図-4. 18　空気弁内の充水
（イメージ）

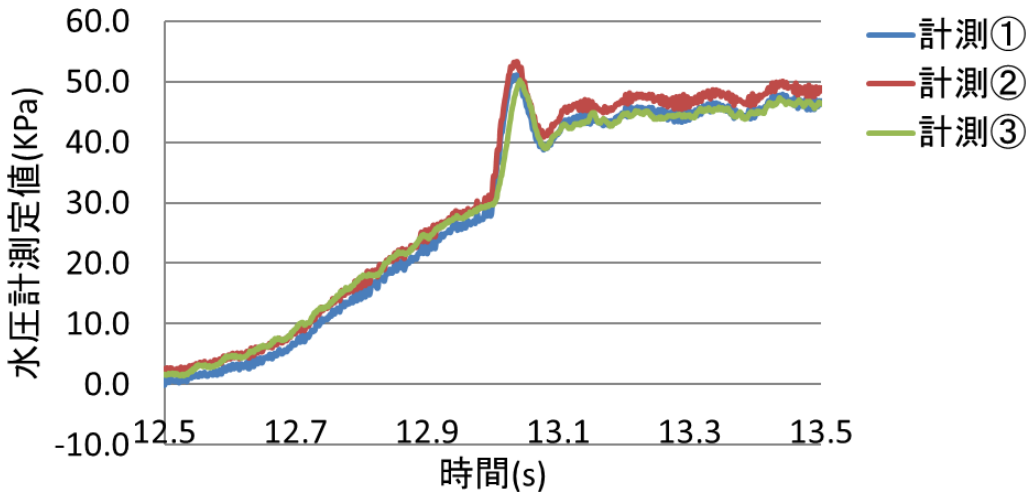


図-4. 19　管内水圧変化【実験計測値】

(2) 実際の管路における空気弁内における圧力上昇値の推定

実際の管路を想定し，2016 年熊本地震において破損した空気弁のある配水区域での管内水圧記録から，圧力上昇値を推定する．**図-4.20**，**図-4.21** に，実際の管路における水圧変動記録値とそれに伴って想定される空気弁内の充水速度（計算値）を示す．

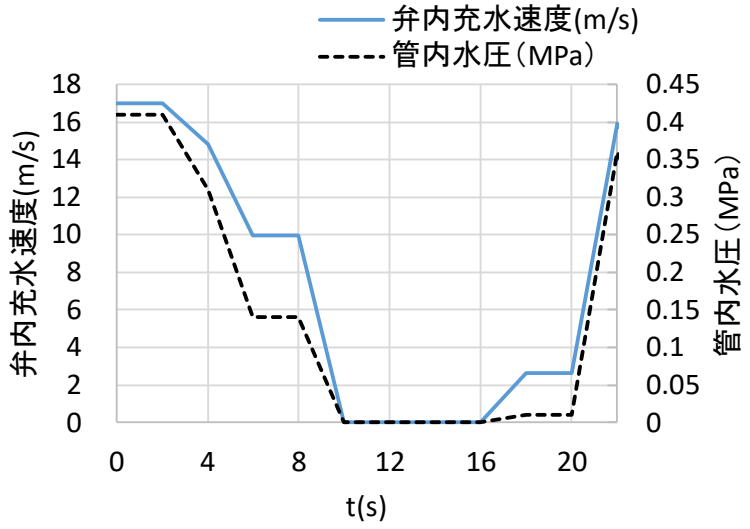


図-4.20　管内（江津橋第 1・2 路上局）水圧変化（前震発生後）に伴う弁内充水速度【実際管路（計算値）】

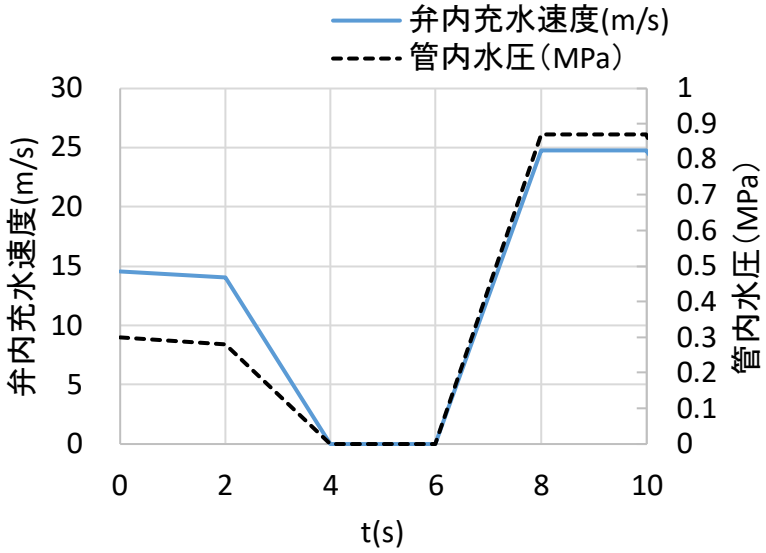


図-4.21　管内（江津橋第 1・2 路上局）水圧変化（本震発生後）に伴う弁内充水速度【実際管路（計算値）】

次に，本管から弁閉止部までの高さを 1m と仮定し，**図-4.21** の場合を例に，

前述と同様に水撃圧を算定する．弁が閉止する直前の水の充水速度を計算すると，**図-4.21** の 6.5 秒後の 3.6m/s となる．この時の水撃圧について，式(4-2) より，この時の空気弁内における水撃圧は 3.5MPa となる．この値は，**表-4.1** のとおり，水道用空気弁の規格で定める許容値及び耐圧試験値を上回り，破損に至った可能性が考えられるが，前述の管内動水圧変化に伴い発生する水撃圧（19.3MPa）と比べて小さい値となった．なお，前述と同様に，空気が混入した弁内では，水中に気泡が発生し得るため，気泡率が大きくなるほど，水の体積弾性率及び圧力伝播速度が低下，これに比例して水撃圧も低下することから，気泡率が 0～0.02 の範囲で変化した場合，**図-4.10** より圧力伝播速度は 1/5 程度まで低下，水撃圧も 3.5MPa から 0.6MPa まで低下し，気泡が増加した場合は水撃圧が規格値内に収まり，空気弁が破損に至らないことも考えられる．

以上のことから，空気弁内の各部品が，実際に規格値を超えてどの程度まで強度を有していたかは不明であるため，空気弁の破損原因として，管内動水圧変化によるものか，それとも，配水池流出部の水圧変動によるものか，特定できないが，熊本地震の場合において，それぞれ算定した圧力を比較すると，前者の管内動水圧変化による影響が大きいものと推察される．

4.4　まとめ

本章では，急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムについて理論的に考察を行いつつ，実際の管路において検証した結果，次のとおり明らかになった．

- 空気弁破損に至るメカニズムを検証した結果，急激な管内の水圧変動によって，負圧が発生し，その後の正圧への圧力回復によって，空気弁内の排気・充水によって急激な圧力上昇が発生し得ることが分かった．
- 一つ目のメカニズムとして，異形管部における管内動水圧変化に伴う負圧による空気混入，空気弁の急激な排気による水撃作用に伴う圧力上昇が，複合的に作用することによって，破損に至る可能性がある．
- 二つ目のメカニズムとして，地震直後の配水池流出部の急激な水圧低下の影響を受け，その下流側管路において負圧が発生，空気が混入し，その後の急激な圧力回復に伴い空気弁の急激な排気による水撃作用の影響により，破損に至る可能性がある．
- 上記の二つについて，実際の管路を想定して，空気弁内の圧力上昇を推定したところ，空気弁の規格値を上回る結果となり，これらの原因により，空気弁が破損したものと考えられる．

- この空気弁における急激な圧力上昇は，管内における負圧から正圧への圧力回復速度に依存し，地震時の振動数が大きくなるほど，その圧力回復速度と圧力上昇値も大きくなり，空気弁が破損し得る状況となる．
- 空気弁の破損原因として，上述の管内動水圧変化と配水池流出部の水圧変動の 2 つの場合のいずれの可能性も考えられるが，それぞれ算定した圧力では前者の方が大きく，管内動水圧変化による影響が大きいものと推察される．

第 4 章の参考文献

1) 小川信行：水道管路の被害と地震時動水圧，国立防災科学技術センター研究報告，第 15 号，1976.
2) （株）クボタ：クボタパイプシステム事業部カタログ http:// www.valve.kubota.co.jp /catalog/index.html（2017 年 10 月 30 日アクセス）
3) 椿東一郎：水理学Ⅱ，森北出版，pp.4-5，1977.
4) 長勝史，河原田 禮次郎：管水路内空気の急排による圧力上昇と管内残留空気の挙動，鹿児島大学農学部学術報告，第 39 号，pp.287-292，1988.
5) 西山壮一，弥永孝一，田地野直哉：混入空気による異常圧力上昇を伴う水撃作用の解析方法，農業土木学会誌，第 48 巻，第 6 号，pp.23～28, 1980
6) 小堀威，横山重吉，宮代裕：導水管内の圧力波の伝わり速度について，日立評論，第 37 巻第 10 号，pp.33-38，1955.
7) （社）日本水道協会：水道用空気弁規格（JWWA B 137），2013.

第 5 章

結　論

第 5 章　結論

5.1　本研究から得られた知見

(1) 空気弁の被害要因に係る調査と分析

空気弁被害の特徴と要因について，2016 年熊本地震におけるアンケート調査を行うとともに，地震動と被害の要因の分析を行った．その結果，被害の特徴と要因，地震動との因果関係について，次のとおり明らかにした．

① 空気弁の破損部位として遊動弁体やフロート弁体といった空気弁内部の破損の割合が多く，これらの被害には地震時に発生する急激な水圧変動が大いに影響していた．

② 破損した空気弁の周辺状況や口径別の被害状況から，空気弁が地震時の管内の水圧変動の影響を受けやすい環境に設置されていたものと考えられる．最大速度及び最大加速度と空気弁の漏水被害の関係に焦点を当て分析した結果，速度及び加速度の増加に伴って漏水被害率も上昇する傾向を確認した．

③ 水圧変動が空気弁被害に影響を及ぼす一つ目の要因として，管内の動水圧変化の影響が考えられる．破損箇所付近での特徴として，異形管が多く存在すること，比較的高所で位置水頭が高く，初期の管内水圧が低いことから，地震時動水圧が発生した場合，負圧が発生し得る状況であり，地震時に動水圧変化が生じやすい管路形態であった．加えて，この動水圧変化については，最大速度との関係性があることから，この速度の大きさの影響を受けて被害に至ったものと推察される．

④ 二つ目の要因として，配水池流出部付近の水圧変動の影響が考えられる．地震直後の配水池流出部及び，下流側管路内の水圧記録から，急激な圧力低下後，圧力回復傾向を示し，下流側管路内において負圧発生により空気が混入する状況であった．

(2) 実験による管内水圧変動に伴う影響の検証

地震時の急激な水圧変動が空気弁破損・漏水を引き起こす要因として，管内水圧の状況，管路形態の変化の影響や配水池流出部の水圧・流量変動の影響を受ける可能性が示唆されたことから，管路模型実験等を通じて，地震時における管内水圧の変動の要因とその特徴を明らかにした．その結果，得られた成果は，次のとおりである．

①　管路の振動に伴う管内動水圧変化

1)　管路形態等要因

(a)　初期水圧の影響

・ 初期水圧の低い管路内では，空気弁付近では振動による圧力上昇に加えて，負圧・正圧の交互の発生がきっかけとなって，急激な空気の吸排気に応じて繰り返し異常圧力が発生する．

・ この圧力変化は他へは伝わりにくく，弁付近の局所に集中し留まる．

(b)　管路形態変化の影響

・ 直管に比べて異形管部付近では，動水圧振幅が大きく，より負圧が発生し異常圧力が発生し得る．

2)　地震動要因

(a)　加振時の速度の影響

・ 加振時の速度の上昇に応じて動水圧振幅が大きくなり，初期水圧が低い状況では管内で負圧が発生し異常圧力が発生し得る．

以上の結果を踏まえ，被害箇所の周辺状況の特徴と被害の要因をまとめると，**表-5.1** のとおりである．

表-5.1　周辺状況の特徴と被害の要因

周辺状況の特徴	被害の要因
通常時水圧が低い所 標高（位置水頭）の高い所	負圧発生
管路形態の変化点が存在	動水圧変化
凸部，下り勾配付近	空気溜まり・排気の集中

②　配水池の振動に伴う水圧変動

1)　水槽内の水の振動による管内への圧力伝播が確認されたが，その値は，管路内バルブ制限に起因する動水圧変化に比べて小さく，また，実施設において水圧変化を推定した結果，実際の配水池流出部における急激な水圧変動の要因として，配水池内の水の振動による圧力変動の影響とは考えにくい．

③　地震直後の下流側管路の水圧変動

1)　バルブ操作試験による管内水圧変動の形跡が，実際の水圧変動記録と同様の傾向を示したことから，その要因として，ポンプの一時的な吐出圧の低下や下流側での配水管等の漏水に伴う急激な圧力低下に対して，配水圧を回復，配水量を増加させようとする一連の制御の働きによるものと考えら

れる．

2) 負圧から正圧への圧力回復時において，空気排気の際に空気弁付近で突出した圧力上昇が確認された．
3) 圧力回復速度が大きくなるほど，空気弁の排気時に大きな圧力上昇が発生したことから，空気排気時における空気弁付近での圧力上昇の大きさは，本管内の圧力回復速度に依存するものと考えられる．
4) 負圧から正圧への圧力回復時において，本管流速が速くなるほど，また，圧力回復速度が速くなるほど，空気弁の排気時に大きな圧力上昇が発生したことから，本管側の流速及び圧力が大きくなるほど，空気弁付近において大きな水撃作用が発生するものと考えられる．

(3) 急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムの特定

前述の実験結果において明らかになった現象と特徴を踏まえ，急激な水圧変動が空気弁に与える影響について，管内動水圧の変化と配水池流出部の水圧変動のそれぞれの側面から，空気弁破損に至る可能性について定量的に検証した．その結果，得られた成果は，次のとおりである．

① 異形管等の管路形態変化点における管内の動水圧変化に伴う負圧発生による空気混入と空気弁の急激な排気による水撃作用に伴う圧力上昇が，複合的に作用することによって，破損に至る可能性がある．
② 地震直後の配水池流出部の急激な水圧低下の影響を受け，その下流側管路において負圧が発生，空気が混入し，空気弁の急激な排気による水撃作用の影響により，破損に至る可能性がある．
③ これらの急激な圧力上昇は，負圧から正圧への圧力回復速度に依存する．地震時の振動数が大きくなるほど，その圧力回復速度が大きくなることから，圧力上昇値も大きくなり，空気弁が破損し得る状況となる．
④ 空気弁の破損原因として，管内動水圧変化と配水池流出部の水圧変動の 2 つの場合のいずれの可能性も考えられるが，それぞれ算定した圧力値から勘案すると，前者の管内動水圧変化による影響が大きいものと推察される．

5.2　今後の課題

本研究では，空気弁被害の特徴とその要因，急激な水圧変動に伴う空気弁破損に至るメカニズムについて，重点を置いて研究してきたが，実際の空気弁において，破損に至る可能性を正確に把握していくうえで，次の課題が残っている．

(1) 管路内の動水圧変化の評価方法の検討

本研究では，空気弁破損に至る管内の動水圧変化の推定にあたって，地震波を正弦波と仮定した点，曲管モデルにおいて動水圧が大きくなる方向に振動すると仮定した点など，前提条件として，危険側（被害が生じる側）の評価とした．また，単一の異形管部を対象として評価を行ったが，異形管が複合した管路の場合においては，地震時動水圧が増加する場合，もしくは減少する場合もあるため，複合管路によるモデルケースを設定するとともに，実際の地震動波形を用いて，地震時動水圧を精緻に推定できる方法を検討していく必要がある．

(2) 空気弁内の圧力評価方法の検討

本研究では，理論式に基づき，管内の水圧変動から水撃圧を推定したが，実際は，これらの値が水中の気泡の割合によって変わる可能性があるため，実際の管路における気泡の状況，管内圧力と弁内の水の上昇速度の関係性について，さらに正確に把握を行ったうえで，精緻に推定できる方法を検討していく必要がある．

5.3　今後の展開

空気弁の主な目的は日常の断通水作業を円滑に進められるよう，空気を適切に排除することであり，その目的から，現状の設計指針等において，設置間隔やおおよその設置場所について定められているものの，地震時における空気弁の動作等に伴う留意事項やその対策については明確に定められていない．

本研究で得られた知見は，空気弁の取替え等の対策を進めていくにあたって，**表-5.1** に示す該当箇所において優先的に取替えを検討するなど，効果的な更新・耐震化計画の推進に寄与するものと考える．

空気弁における具体的な地震対策として，ハード面では，空気弁内部の部品（フロート，遊動弁体，ガイド）が弱点となることから，改良部品（例えば，ガイドの材質強化（FRP 製，PVC 製→青銅製等），フロートの形状変更（中空（球殻）→中実）等）への取替えなどの検討を進めていくことが必要である．取替えに当たっては，各事業体において相当の数の空気弁が設置されていることから，管路の更新・耐震化に合わせて取替えるだけでなく，水運用上の重要管路や災害時の交通障害や消火活動への影響も考慮し，優先順位を定めて進めていくことが重要である．

ソフト面では，各事業体で GIS 等の技術も活用しながら，地震動予測データ，空気弁の標高，その前後の管路形態・高低差や水圧に関する情報等のデータを蓄積・整理・可視化することにより，予め地震時に弱点となる可能性の高い空気弁

を抽出しておくことや，空気弁の漏水が生じないよう適切に水圧を設定するなど，日常の維持管理や地震時の応急復旧活動に役立てていくことが期待される．

水道システムの安定供給を念頭に置き，今後切迫する南海トラフ地震等の大規模地震に備え，これらの取組みを精力的に進めていくことが重要であると考える．

謝　辞

本研究を進めるにあたり，ご多忙にもかかわらず，終始ご丁寧なご指導をいただきました，金沢大学理工研究域地球社会基盤学系宮島昌克教授には，心より厚く御礼申し上げます．社会人として家庭を持ちながら，研究を進めていく中で思うように進まないことも多々ありましたが，宮島先生から多くの激励，前向きで的確なご意見をいただいたことで本研究を遂行できたものと実感しています．先生よりいただきました様々なアドバイスは，私自身の貴重な財産となるとともに，今後役立てて参りたいと思います．また，本研究を進める中で，国際シンポジウムでの発表は，初めての海外発表であり，国内の防災分野における著名な先生方や海外の研究者の方々にお会いできたこと，また，国内外の先進的な研究事例や知見を得られたことは，自身にとって刺激になるとともに，大変貴重な経験となりました．このような機会を与えていただき，深く感謝いたします．

金沢大学理工研究域地球社会基盤学系池本良子教授，深田宰史教授，池本敏和講師におかれましては，ご多忙の中，論文審査をお引き受けいただくとともに，予備審査会におきましても貴重なご意見をいただきました．東洋大学理工学部都市環境デザイン学科鈴木崇伸教授におかれましては，ご多忙の中，論文審査をお引き受けいただくとともに，遠方にもかかわらず，予備審査会と公聴会にお越しいただき，論文内容の充実に向けた貴重なご意見と激励をいただきました．ここに厚く御礼を申し上げます．

研究を進める中で，金沢大学理工研究域地球社会基盤学系村田晶助教から，実験装置の準備等にあたって，いろいろとご指導，ご支援いただきましたこと，深く感謝いたします．アンケート調査や実験を進めるにあたり，研究室卒業生の石田明久氏，今川雅之氏，乾太一郎氏には共同で研究いただき，成果をあげることができました．深く感謝いたします．また，本研究において，アンケート調査の回答や管路図面，震災時の情報等，各種データを提供いただくなど，ご協力いただきました水道事業体の職員の方々には深く感謝いたします．

社会人大学院生の先輩で博士後期課程を修了されました，大阪市水道局の村田幸一氏には，過去の研究に係る材料・情報の提供をいただくとともに，激励をいただきました．同じく社会人大学院生の先輩で博士後期課程を修了されました，大阪市水道局の中井正人氏には金沢大学で研究を進めるきっかけを作っていただき，また，業務多忙にもかかわらず，研究の進め方，様々な着想等，多数のご助言をいただきました．心より感謝申し上げます．

最後に，仕事をしながら大学での研究生活を過ごすことに理解を示し，陰ながら支えてくれた家族に心より感謝いたします．