

地震時の水道管内の水圧変化による空気弁被害に関する一考察

玉瀬 充康¹・宮島 昌克²・乾 太一郎¹

CONSIDERATION OF FACTORS OF SEISMIC DAMAGE TO WATER AIR VALVE CAUSED BY WATER PRESSURE CHANGE IN THE WATER PIPE

Mitsuyasu TAMASE¹, Masakatsu MIYAJIMA² and Taichiro INUI¹

Abstract

Many damages to water air valves have been reported in the past earthquakes, but the cause of the damage has not been clarified. Therefore, in order to investigate the actual condition and its cause of water air valves damaged by the 2016 Kumamoto Earthquake, we conducted a questionnaire survey on the damage to water air valves of waterworks bureaus in Kyushu region, and analyzed the damage factors of water air valves in Kumamoto City. As the results, it was confirmed that abrupt water pressure change occurring immediately after the earthquake had a great influence on these damage. As the mechanism of abrupt water pressure change, the water hammer occurs by aeration in the air valve which is caused by dynamic pressure at deformed pipe etc. As a result, the air valve can be damaged.

キーワード：空気弁，熊本地震，管路形態，急激な圧力変化

Key words: air valves, Kumamoto Earthquake, abrupt water pressure change

1. はじめに

2011年3月11日に宮城県牡鹿半島沖を震源とするマグニチュード9.0の東北地方太平洋沖地震が発生した。日本の観測史上最大のマグニチュード

となり，震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北500 km，東西200 kmの広範囲に及んだ¹⁾。水道施設については，岩手県，宮城県，福島県を中心に導水管や配水管などの破損等により約257万

¹ 金沢大学大学院自然科学研究科
Graduate School of Natural Science and Engineering,
Kanazawa University

² 金沢大学地球社会基盤学系教授
School of Geosciences and Civil Engineering, Kanazawa
University

本論文に対する討議は2019年11月末日まで受け付ける。

戸の断水被害が発生し、被害が顕著であった²⁾。また、水道施設以外にも、水道用水・工業用水・農業用水を供給する用水施設や工業用水道施設についても同様に、管路や管路付属設備の破損等により断水被害が発生し、市民生活だけでなく産業活動に影響を及ぼした。

水道施設の内、空気弁等の管路付属設備に着目して、仙台市水道局を例にみると、口径400 mm以上の基幹管路上で41件も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。基幹管路上の管路破損等の管路自体の被害件数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²⁾。

これらのことを踏まえ、本論文では空気弁被害に注目する。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。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³⁾。

これらの被害率は、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。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に示す²⁾。

空気弁被害は漏水や断水をもたらし、市民生活等への影響が生じるとともに、震災後の応急復旧作業、消火活動に支障をきたすなど、二次被害へ繋がる恐れがある。また、首都直下地震が発生した場合、空気弁からの漏水被害は2,700箇所に及ぶと想定されており⁴⁾、震災後の給水・復旧活動に大きな影響を与えられられている。そのため空気弁の破損原因の究明及び対策が必要不可欠である。

2. 空気弁被害の特徴と要因の推察

管路付属設備である空気弁の被害形態²⁾とその主要因については、表2、図1に示すとおりで

あり、フロート・遊動弁体等の弁内部の破損については、管内水圧の急激な変動が要因になっているものと考えられる。

既往の調査研究^{5,6)}においても、空気弁被害は地震動による直接的破損に加えて、地震時に発生する管内の急激な水圧変動等が一つの要因と考え

表1 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²⁾

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	合計	3,631	394	533	815	3,254	-	8,627
	被害件数(件)	56	12	17	22	41	2	148
	被害率(%)	1.54	3.05	3.19	2.70	1.26	-	1.72
仕切り弁	合計	43,039	162	368	12,609	90,166	12,682	159,026
	被害件数(件)	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	合計	14,760	0	0	2,496	34,965	3,749	55,970
	被害件数(件)	7	0	0	5	6	0	18
	被害率(%)	0.05	0.00	0.00	0.20	0.02	0.00	0.03

表2 空気弁被害の要因と被害形態

主要因	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 ・ 管内の急激な水圧変動	・ 空気弁体内部品の破損・漏水 ・ 異物の挟み等による漏水

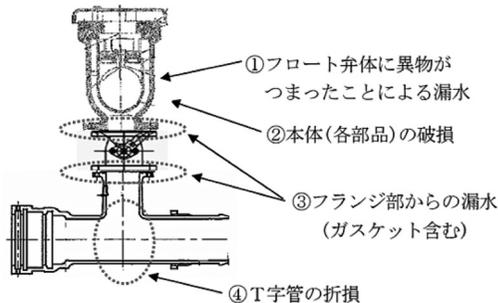


図1 空気弁の被害形態²⁾
(「平成23年(2011年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より転記)

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。

ここで、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。

2.1 地震時動水圧に関する研究

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⁷⁾。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⁸⁾。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/s² (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⁹⁾。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。

2.2 2011年東北地方太平洋沖地震における被害の特徴とその要因

表3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²⁾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ものである。

周辺環境をみると下流が片落ち管や、配管が1 m下がっているケースや、空気弁が約8 m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2.1で示したとおり、異形管等の管路形態変化といった周辺環境の影響を受け、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。

表3 2011年東北地方太平洋沖地震における主な被害内容²⁾
 (「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
	将監第一配水所	国見浄水場	南部山浄水場		沼南給水場
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	1.15 MPa	約0.9 MPa	1.15 MPa		約0.39 MPa
地震直後送水圧	0~0.1 MPa	0~0.1 MPa	0~0.1 MPa		0~0.1 MPa
管口径	Φ400 mm	Φ800 mm	Φ2400 mm	Φ700 mm	Φ500 mm
呼び径	Φ75 mm	Φ100 mm	Φ200 mm	Φ100 mm	Φ100 mm
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82 m	約73 m	約72.5 m	約66.5 m	約29.1 m
破損状況	遊動弁体が破損	案内の棧部が破断	案内棧部が破断 遊動弁体がひび割れ	フロート弁体が変形	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。	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。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Φ2400 mm×Φ1500 mmの片落管	水管橋の川岸部に設置され、すぐ下流で管は約1 m下がっている。	7.85 m程立ち上がったところに設置。

2.3 空気弁被害に起因する水圧変動

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（異形管等）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、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、水撃作用により負圧が生じ、水圧が大きく変動したものと考えられる。

以上のとおり、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の特徴と要因について、次のとおり調査を行った。

3. 2016年熊本地震における空気弁被害調査

3.1 目的

2016年4月に発生した熊本地震¹⁰⁾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。

3.2 調査方法

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¹¹⁾し、表4に示す項目について調査した。

3.3 調査結果

空気弁の破損被害が生じた事業体と震度、空気弁の破損被害数の内訳は表5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。

(1) 空気弁の破損被害の形態

空気弁の構造²⁾を図2に示し、空気弁の破損箇所の内訳と割合を表6、図3に示す。破損箇所を見ると、遊動弁体の破損が最も多く、次いでフロート弁体、フランジ継手部の順であった。

表4 調査項目

	内容
空気弁について	空気弁破損の有無
	空気弁破損箇所の数
	空気弁被害は前震、本震どちらか
	漏水の有無（空気弁破損がなかった場合）
	漏水の有無原因
	空気弁の点検・整備状況・頻度
被害のあった空気弁の特徴について	空気弁破損の原因
	空気弁の諸元（種類・機種・規格・空気弁径・配水管の口径・製造年・設置標高・使用圧力・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
空気弁破損に伴う復旧等の対策について	空気弁の設置場所
	空気弁の直下流側の配管形態
	空気弁破損に伴う断水の有無
異常挙動について	空気弁修繕までの期間
	復旧材料の手配までの期間
	水圧・流量変化の有無
	水圧・流量変化について
	流量の停止、減少の有無
	流量の停止、減少の原因
	水圧・流量変化の時間
空気弁の上流・下流側の管路における水圧・流量変化の有無	

表5 各事業体の空気弁の被害箇所数

都道府県	事業体名	震度（本震）	空気弁破損被害数
佐賀県	A	5強	3
	B	5弱	2
熊本県	C	6強	8
	D	6強	1
	E	6強	9
	F	5強	1
	G	7	1
	H	6弱	1
大分県	I	5弱	4
	J	5弱	2
宮崎県	K	5弱	1
合計			33

(2) 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4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、古い年代では被害がや

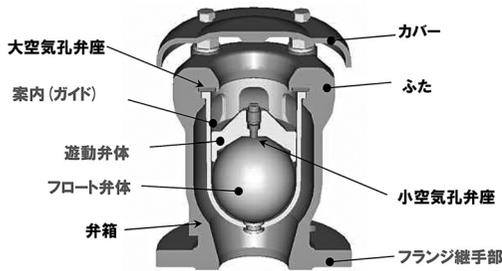


図2 空気弁の構造²⁾
 (「平成23年(2011年)東日本大震災における管本体と管路付属設備の被害調査報告書」より転記)

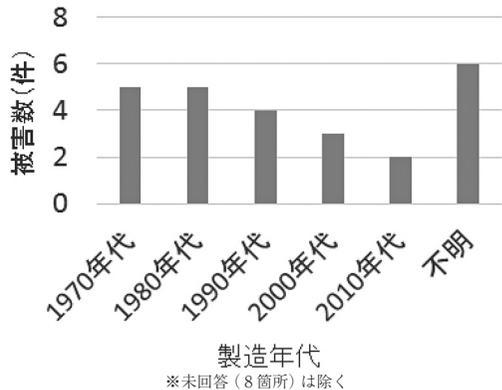


図4 破損した空気弁の製造年

表6 空気弁の破損箇所内訳

被害箇所	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

表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

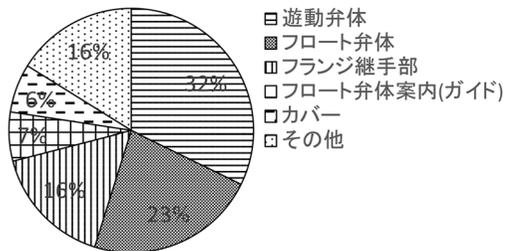


図3 空気弁の破損箇所の割合

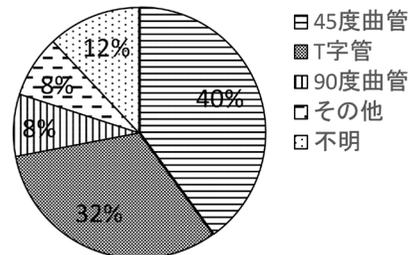


図5 空気弁付近の管路形態の割合

や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。

(3) 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7, 図5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。

なお、空気弁の設置母数は非常に多く、事業者

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ることとした。

3.4 考察

(1) 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、管路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、管路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、今回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、今回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。

(2) 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。

(3) 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。

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。

4. 被害要因の分析

4.1 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6)。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7に示す。

4.2 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¹²⁾と国土交通省国土技術政策総合研究所の提供データ¹³⁾(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

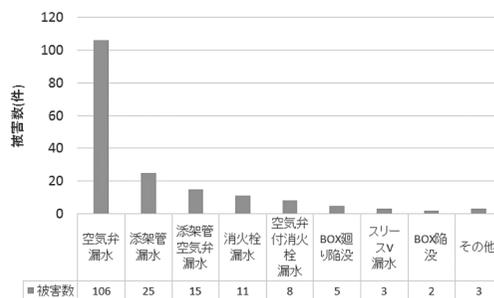


図6 項目別の被害数

を含む250 m 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。

4.3 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8に、前震の場合を図9に示す。これらの図より、熊本市の中央及び東部を中心にほぼ全域で被害が発生しており、最大速度(PGV)が40 cm/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10に示す。図より本震では、最大速度40 cm/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20 cm/sより、その増加に伴い被害率の増加の傾向を確認した。

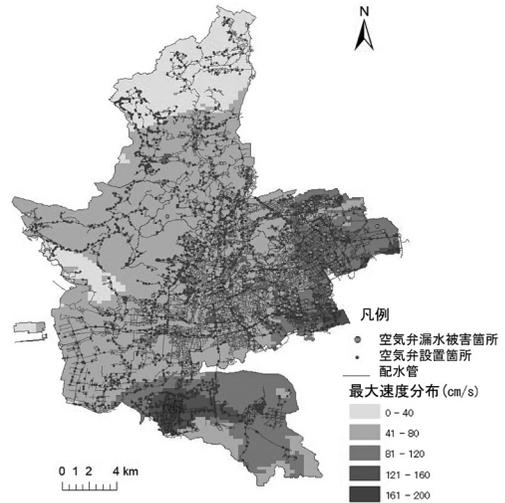


図8 最大速度と空気弁の漏水被害分布(本震)¹³⁾
(国土交通省国土技術政策総合研究所 HP
のデータを使用)

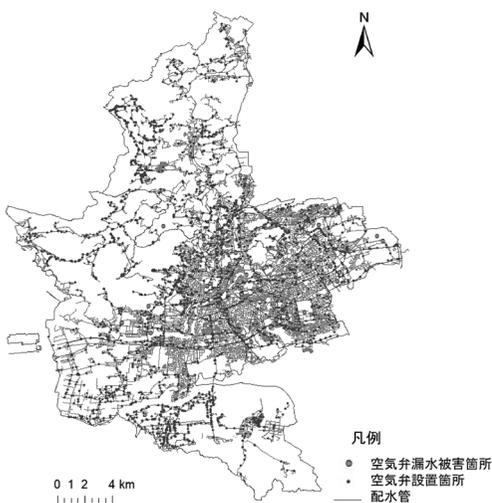


図7 熊本市内の配水管網及び空気弁の漏水被害箇所

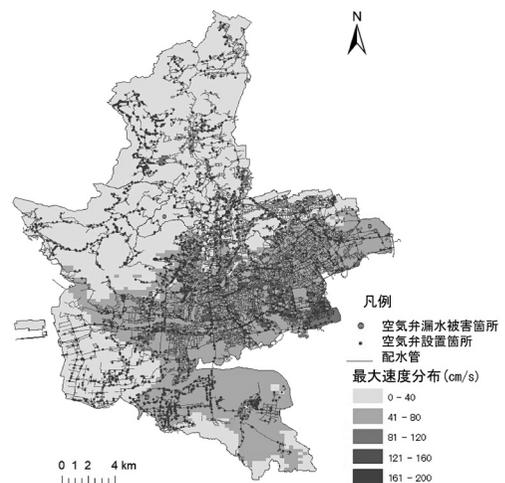


図9 最大速度と空気弁の漏水被害分布(前震)¹³⁾
(国土交通省国土技術政策総合研究所 HP
のデータを使用)

(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11に、前震の場合を図12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200 cm/s²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13に示す。図より本震では、最大加速度200 cm/s²以上において被害率が急増し、その後増加傾向となった。

以上の結果から、最大速度と被害率は相関関係

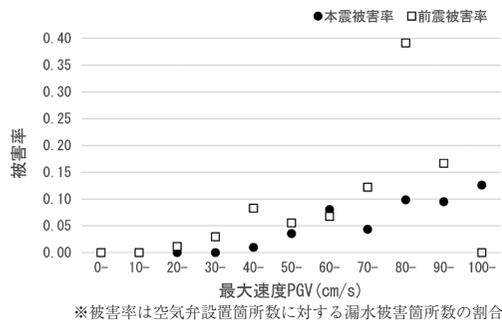


図10 最大速度別の漏水被害率の内訳

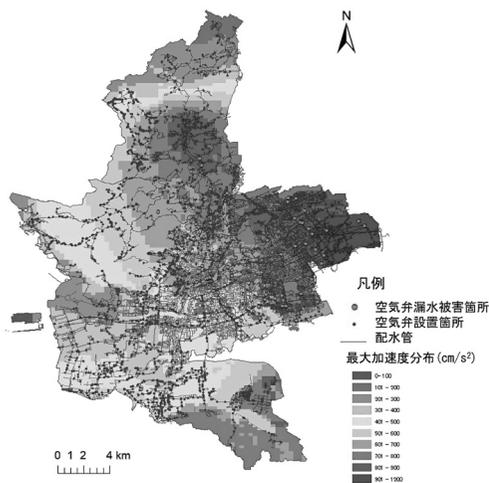


図11 最大加速度と空気弁の漏水被害分布 (本震)¹³⁾
(国土交通省国土技術政策総合研究所 HP のデータを使用)

にあるものと考えられる。これは、埋設管路の地盤に追従した動きに対し、管路と一体構造を成す空気弁も同様に、これらに追従して動くことから、地表面速度の影響を受けるためと考えられる。

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

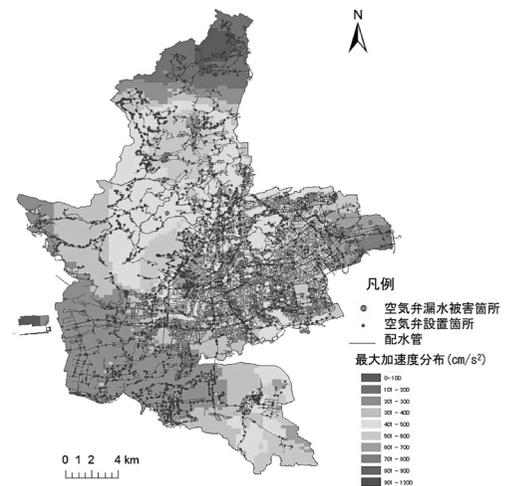


図12 最大加速度と空気弁の漏水被害分布 (前震)¹³⁾
(国土交通省国土技術政策総合研究所 HP のデータを使用)

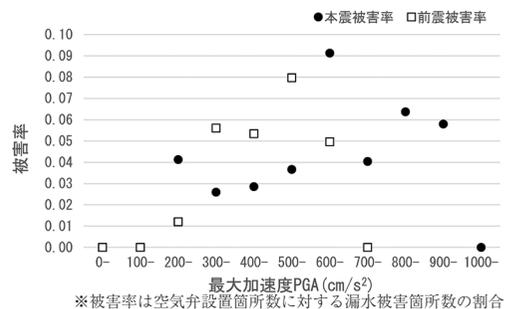


図13 最大加速度別の漏水被害率の内訳

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14に示す。

同図によれば、8か所の空気弁は最大速度が41 cm/s以上の比較的強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。

(4) 空気弁設置管路の口径別の漏水被害の特徴

図15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。この結果が

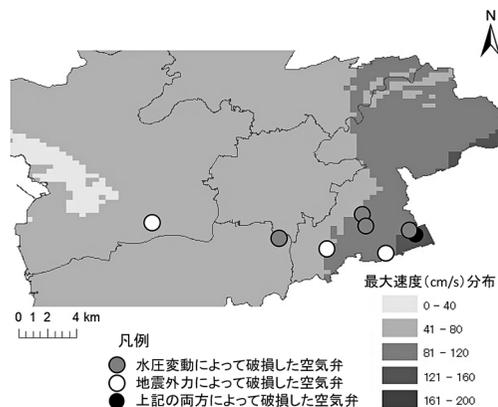
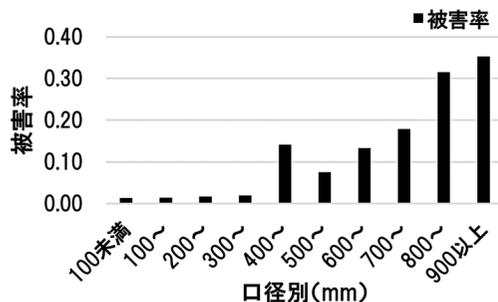


図14 空気弁破損の要因と最大速度の関係



※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15 空気弁設置管路口径別の漏水被害率

らφ400 mm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。

以上の結果から、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。後述5にて示すが、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、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、この速度変化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、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。

5. 水圧変動の影響による空気弁破損に至るメカニズムに係る考察

前述の分析結果を踏まえ、空気弁破損に至るメカニズムについて、次のとおり、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理論的考察を行う。

5.1 管内動水圧変化の影響

(1) 管内動水圧の変化

前述の空気弁内部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。その一つ目の要因として、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4.3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、熊本市内東部に位置する3か所について、その破損内容と管路形態を表8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。管路形態の変化を有する場合の管内の地震時動水圧変化は以下のとおり、導き出される。

曲管部の場合(図16)の地震時動水圧変化については次の式(1)⁷⁾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、管軸方向の速度の増加に比例して、地震時動水圧が大きくなるものであり、前述4.3の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、この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。

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

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 (1,000 kg/m³)、 α ：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。

表8 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

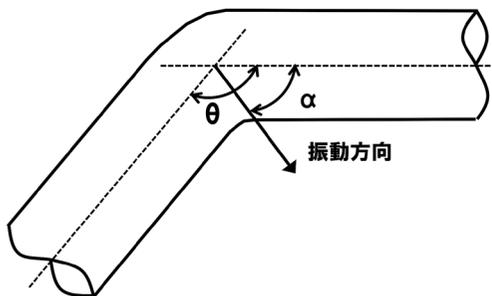


図16 曲管部

以上のことから、空気弁破損箇所における動水圧変化は以下のとおり想定される。

表8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(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9に示すとおりで、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。

(2) 空気弁の吸排気と弁内の圧力変化

空気の混入後、地震による図16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じた場合と同様の水撃現象が起こる。

この時の圧力の変化は、次の水撃作用のJoukowskyの式(式(2))¹⁴⁾で表される。

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

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 (9.8 m/s²)、 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/m³)、 γ_a ：空気の単位体積重量 (0.012kN/m³)

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

ここで、 E_w, E ：水及び管の弾性係数 (kN/m²)、 D ：管径 (m)、 e ：管壁厚 (m)

式 (2)、(3) から空気が混入した場合、充水速度が大きいほど空気の排気に伴う管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と考えられる。

以上のことから、水撃作用による水圧変化は以下のとおり想定される。

図17に示すように、前提条件として、管路が地盤と同一の動きをし、管内の摩擦抵抗が無視できるものとして仮定した場合、管内の水の管路に対する相対速度は、通常流速 V_w (約 1 m/s) に、地震に伴う管自体の軸方向への揺れとして、地表面速度 V_p (空気弁の破損箇所での最大速度約 0.8 m/s) が加わる。この場合、管路内の見かけ上の流速は約 1.8 m/s に上昇したものと想定され、当該流速により管内が充水したものと考えられる。

これらのことを踏まえ、破損空気弁が設置されていた管内では、空気弁の充水速度基準¹⁵⁾は通常流速の1/5~1/10と定められているので、通常はこのような流速で充水作業が行われるのに対し、

上述の想定では通常の流速の1.8倍の流速で充水されることになる。この値は充水速度基準の約 9~18倍の充水速度であり、式 (2) より圧力は充水速度変化に比例することから、空気弁付近の圧力も通常の約 9~18倍に上昇したものと考えられる。

以上のことから、前述の管内の動水圧変化に加えて、空気弁における圧力上昇が、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。

5.2 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

前述4.3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18)。

なお、空気弁の破損は、平成28年4月14日21時26分に発生の前震によるものか、平成28年4月16日1時25分に発生の本震によるものか、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。

平成28年4月14日21時26分地震 (以下、「前震」) 発生前後の熊本市上下水道局秋田配水池及び健軍

表9 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)	α (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											-0.2	0.8
3	45度水平曲がり 変化点付近											-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											-0.3	0.9
3	45度水平曲がり 変化点付近											-0.3	0.9

※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

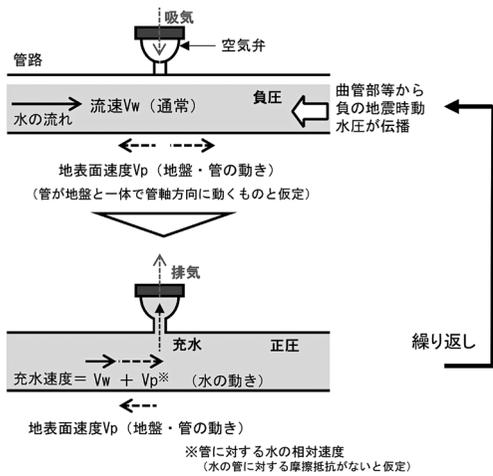


図17 管路内における充水 (イメージ)

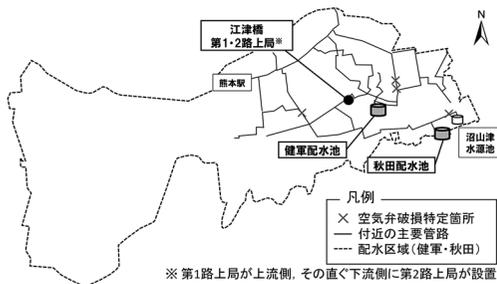


図18 配水池と空気弁破損箇所の位置関係

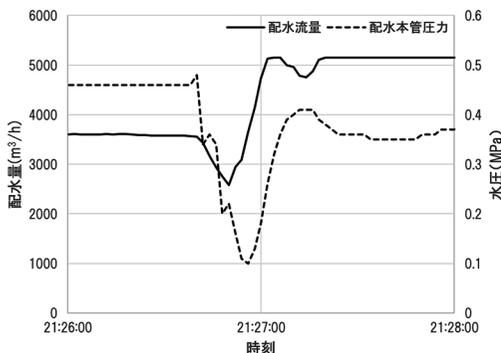


図19 平成28年4月14日21時26分地震発生前後の秋田配水池流出管の水圧・流量記録

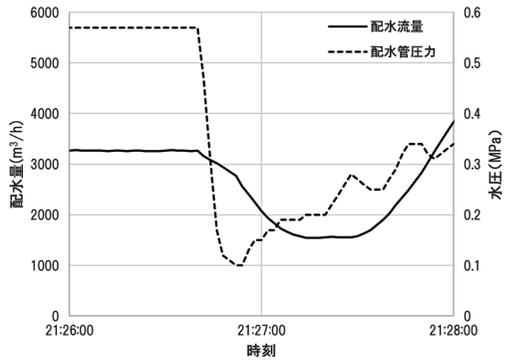


図20 平成28年4月14日21時26分地震発生前後の健軍配水池流出管の水圧・流量記録

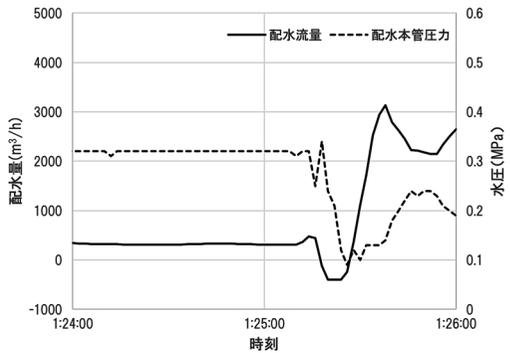


図21 平成28年4月16日1時25分地震発生前後の秋田配水池流出管の水圧・流量記録

配水池における水圧・流量の変動記録を図19、20に、平成28年4月16日1時25分地震(以下、「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21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19、20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21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

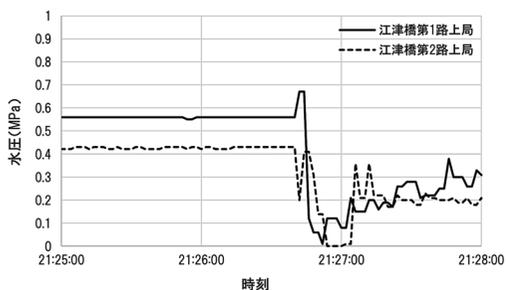


図22 平成28年4月14日21時26分地震発生前後の健軍・秋田配水区域の管路(江津橋第1・2路上局)の水圧記録

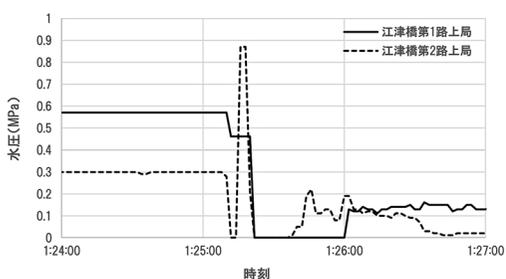


図23 平成28年4月16日1時25分地震発生前後の健軍・秋田配水区域の管路(江津橋第1・2路上局)の水圧記録

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。

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22に、本震の場合を図23に示す。

両図より、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内の水圧において、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。

(2) 空気弁の吸排気と弁内の圧力変化

管内に空気が混入された状況において、前述5.1の(2)の考察と同様の水撃現象が発生したものと考えられる。具体的には、前震の場合を例に考えると、図19から、地震後には地震前の通常流量(流速)の1.5倍近くにまで達しており、破損空気弁が設置されていた下流側の管内では、空気弁の充水速度基準(通常流速の1/5~1/10)の約8~15倍の充水速度になったものと想定される。この時の空気弁付近の圧力は、式(2)より充水速度変化に比例することから、少なくとも通常時圧力の約8~15倍程度に上昇したものと考えられる。また、本震の場合では、図21から、地震直前は深夜で使用水量が少ないため、流速が小さいものの、地震後には通常流量程度に達している。前述と同様に、破損空気弁が設置されていた下流側の管内では、空気弁の充水速度基準の約5~10倍の充水速度になったものと想定され、この時の空気弁付近の圧力は、通常時圧力の約5~10倍程度に上昇したものと考えられる。

以上のことから、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て、空気弁の破損に至ったものと考えられる。

6. 結論

地震時に破損した空気弁の被害の実態・原因について次のとおりまとめる。

- ・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していることが分かった。
- ・破損した空気弁の周辺状況や口径別の被害状況から、空気弁が地震直後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。

・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。

・これらの結果に基づき、水道管内の水圧変化に着目して、空気弁破損に至るメカニズムを検証した結果、1つ目に、管路形態変化点における動水圧変化に伴う負圧による空気混入、空気弁の急激な吸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つ目に、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、空気弁の急激な吸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ことが分かった。

謝辞

本研究において、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申し上げます。

参考文献

- 1) 気象庁 HP: <http://www.jma.go.jp/jma/press/1103/13b/201103131255.html> (2015年7月22日アクセス)
- 2) 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
- 3) 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.
- 4) 東京都水道局: 事業概要 平成28年版, pp.68-70, 2016.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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)
- 11) 水道産業新聞社: 2007年度版 水道年鑑
- 12) 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)
- 13) 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)
- 14) 椿東一郎: 水理学Ⅱ, 森北出版, pp.4-5, 1977.
- 15) 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)

(投稿受理: 平成30年4月6日
訂正稿受理: 平成30年12月2日)

要 旨

過去地震において、水道空気弁の破損が多数報告されているが、破損原因が明らかになっていない。そこで、2016年熊本地震における空気弁被害の実態とその原因を調査するため、九州地方の水道事業体を対象に、アンケート調査を実施するとともに破損要因を分析した。その結果、地震時の急激な水圧変動が、これらの被害に大きな影響を及ぼすことを確認した。急激な水圧変動のメカニズムとして、異形管等で発生する管内動水圧の変化の影響を受け、空気弁内の吸排気、水撃作用が発生することが考えられ、その結果、空気弁が破損に至る可能性が示唆された。