

Study on fluctuation of water pressure in water pipe and damage to air valve during earthquake

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2020-01-09 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: メールアドレス: 所属:
URL	http://hdl.handle.net/2297/00056497

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



学位論文要旨

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

Study on fluctuation of water pressure in water pipe and damage
to air valve during earthquake

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

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, the purpose of this study is to clarify the factors and mechanism that water pressure fluctuation in the pipe causes damage to the air valve.

First, we investigated the characteristics of the air valve damage and the surrounding environment of the damaged area and factors of the water pressure fluctuation in the pipe in past earthquakes, and analyzed the causal relationship between the earthquake motion and the damage. As the results, parts inside air valves were damaged at high rate, and sudden water pressure change occurring immediately after the earthquake had a great influence on these damage. And it was confirmed that there was a correlation between PGV and the leakage damage rate.

Secondly, by simulating the model experiment, we clarified the phenomena and characteristics such as the fluctuation of water pressure in the pipe during the earthquake. As the results, about the mechanism of water pressure change in the pipe, aeration caused by dynamic pressure change at the changing point of the pipe shape or water pressure change of the distributing reservoir just after the earthquake. And the water hammer occurs by the exhaust of the air valve, the air valve can be damaged.

Finally, based on these inspection results, we proposed the measures at the time of the earthquake in consideration of a factor and a characteristic of the damage.

1. 序論

水道は、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、これまでの地震では、管路施設被害による断水被害、漏水発生に伴う道路冠水・陥没、交通障害、家屋浸水など、市民生活や産業活動に大きな影響を及ぼしてきた。過去地震における管路施設の被害分析において、主に管路を対象に管路被害予測手法構築等の研究が精力的に進められてきた一方で、空気弁等の管路附属設備の被害について分析された事例は少なく、空気弁被害の原因が明らかになっていない。本研究は、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したものである。

2. 空気弁の被害要因に係る調査と分析

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した。

2.1 アンケート調査

2016年4月に発生した熊本地震について、九州地方の209の水道事業体を対象に、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して、アンケート調査を行った。

2.2 主な調査結果

(1) 空気弁破損被害の発生状況

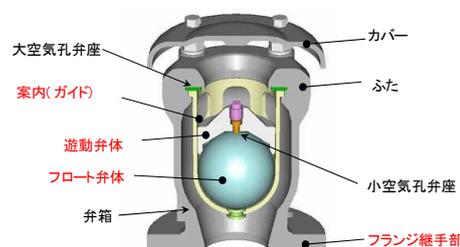
空気弁の破損被害が生じた事業体と震度、空気弁の破損被害数の内訳は表-2.1に示すとおりであり、11事業体で合計33箇所の破損被害が発生した。被害は震央付近の熊本県と大分県に集中している。

表-2.1 各事業体の空気弁の被害箇所数

都道府県	事業体	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

(2) 空気弁の破損被害の形態

空気弁の構造を図-2.1に示し、空気弁の破損部位の割合を図-2.2に示す。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。



(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割合を図-2.3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た。

図-2.1 空気弁の構造

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

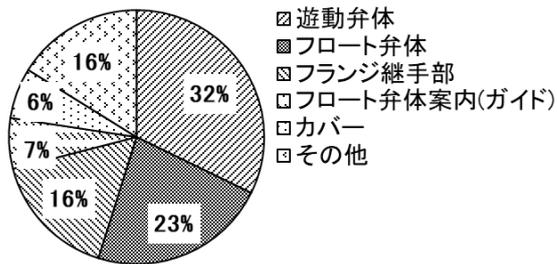


図-2.2 空気弁の破損部位の割合

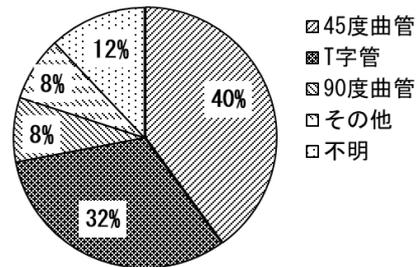


図-2.3 空気弁付近の管路形態の割合

以上のことから、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、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。また、破損した空気弁付近の管路形態から、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。

2.3 被害要因の分析

空気弁の漏水被害の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、熊本市水道の空気弁漏水等の管路付属設備の被害のデータを基に、防災科学研究所と国土交通省国土技術政策総合研究所のデータを用いて、最大速度及び最大加速度による分析を行った。

2.4 主な分析結果

(1) 空気弁の漏水被害と最大速度又は最大加速度との関係

最大速度及び空気弁の漏水被害の分布について、本震の場合を一例として、図-2.4 に示す。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と、最大加速度毎に集計した結果を図-2.5 に示す。

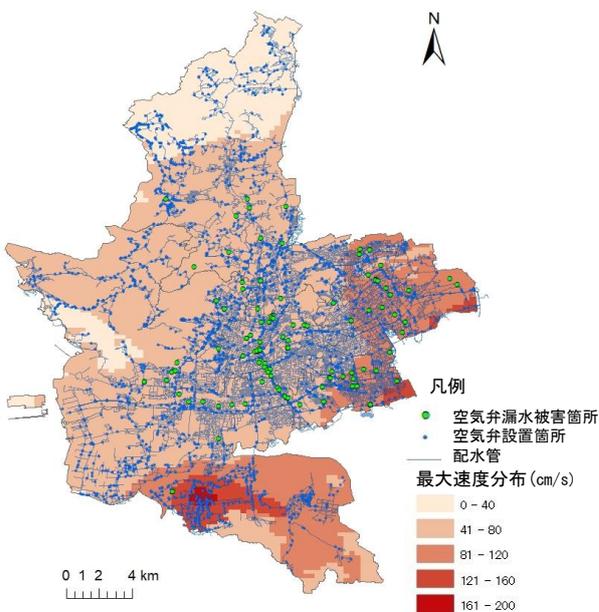


図-2.4 最大速度と空気弁の漏水被害分布（本震）

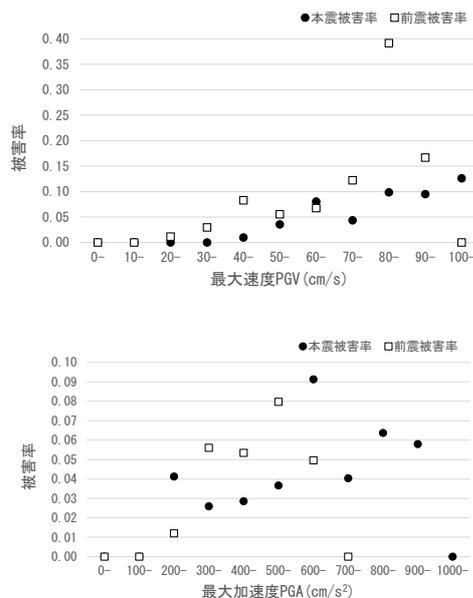


図-2.5 最大速度又は最大加速度別の漏水被害率の内訳

図より本震の場合、最大速度 40cm/s 以上、また、最大加速度 200cm/s² 以上で、それらの増加に伴い被害率が徐々に増加傾向となり、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。

(2) 空気弁破損被害の要因と最大速度の関係

破損部位・原因等が特定された 8 か所の破損被害の要因と最大速度の分布を図-2.6 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おり、破損要因として水圧変動による破損が 4 か所と多く、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。

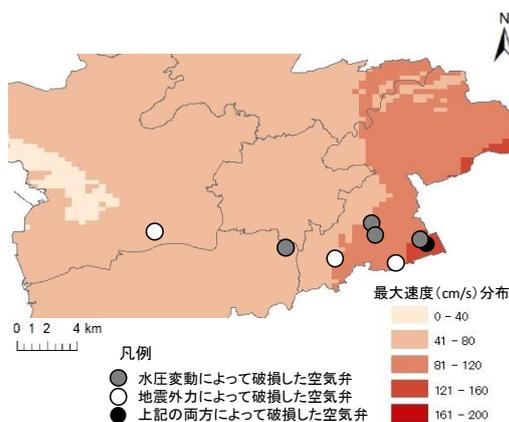


図-2.6 空気弁破損の位置と最大速度

2.5 急激な水圧変動をもたらす要因分析

(1) 管路形態の変化をもたらす管内動水圧変化

2016 年熊本地震における被害事例から上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を調査した結果、破損箇所の直近に異形管等の変化点が存在していた。異形管等の管路形態の変化により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に影響を与えた可能性が考えられる。

(2) 配水池流出部の水圧変動の影響

2016 年熊本地震において計測された水圧・水量変動の一例を、図-2.7 に示す。図より、配水池から供給される下流側管路の水圧において、急激な圧力低下の後、圧力が回復しており、配水池流出部と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空気が混入したものと推察され、これに伴い、空気弁に何らかの影響を及ぼした可能性がある。

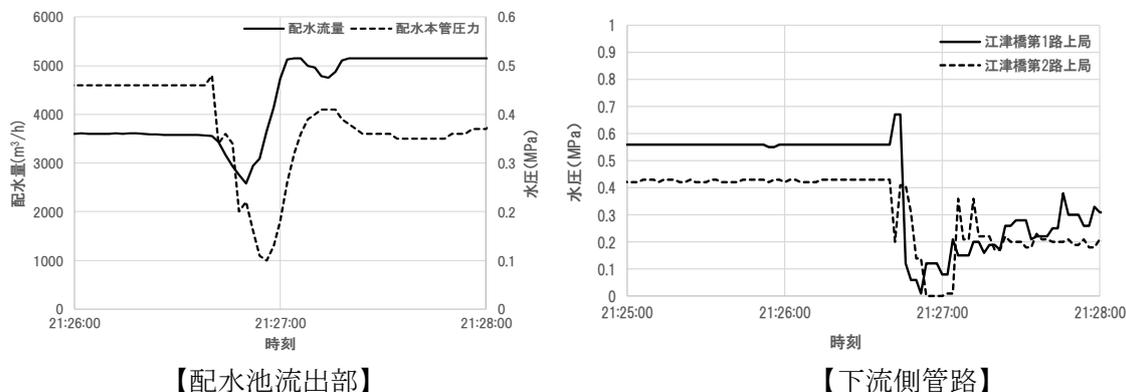


図-2.7 2016 年熊本地震（前震）発生前後の水圧記録

3. 実験による管内水圧変動に伴う影響の検証

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。

3.1 管路の振動に伴う管内動水圧変化

3.1.1 実験概要

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、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。

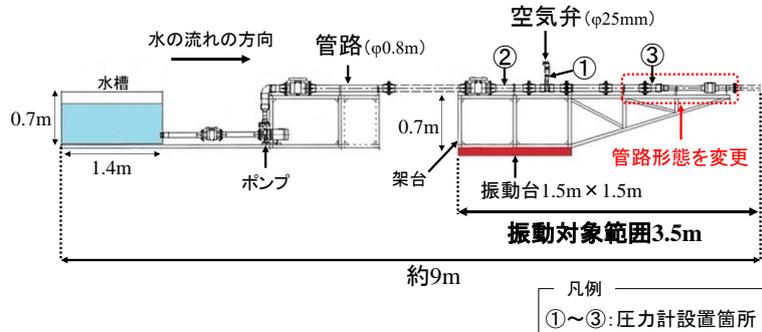


図-3.1 実験模型の概略図

3.1.2 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

空気弁の開閉や初期水圧を変化させた場合の水圧変動を確認したところ、管内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た。

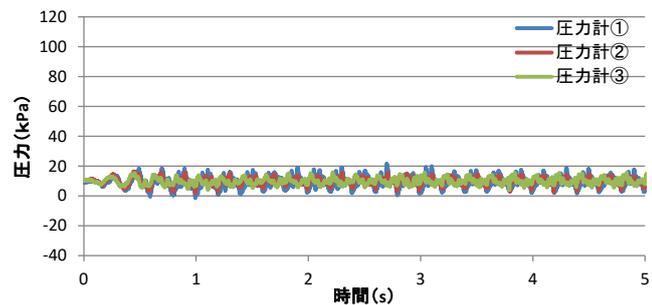


図-3.2 直管の場合の水圧変動(150gal, 5Hz)

(2) 管路形態の違いが及ぼす影響

図-3.2, **3.3**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)のそれぞれの圧力変化を示す。図より、直管では動水圧振幅が小さいのに対して、異形管では振幅が大きいため、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。加えて、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。

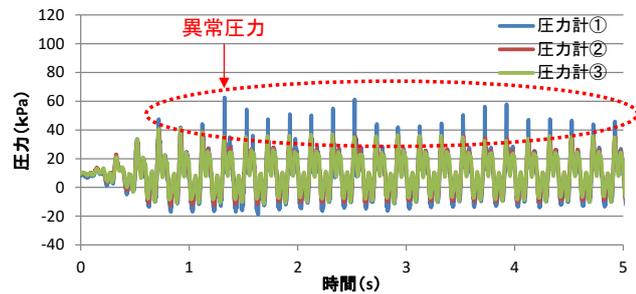


図-3.3 曲管の場合の水圧変動(150gal, 5Hz)

(3) 負圧発生に伴う水圧変動の増加

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-3.4**に示す。同図より、

初期水圧が低いケースのように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，空気の混入量が多くなり，空気の排気過程で水圧上昇に影響を及ぼしたものと考えられる．

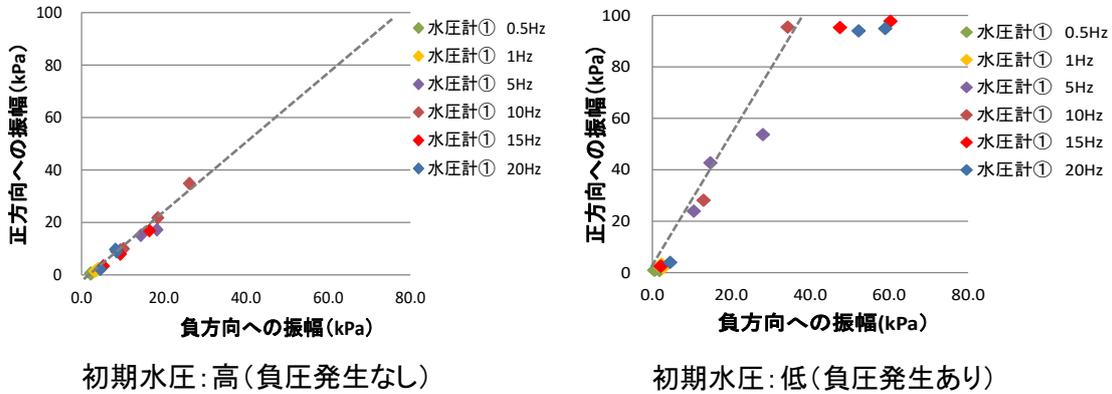


図-3.4 正・負方向への振幅の関係

3.2 配水池の振動に伴う水圧変動

3.2.1 実験概要

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・配水池一体の装置による模型振動実験を行った (図-3.5)．

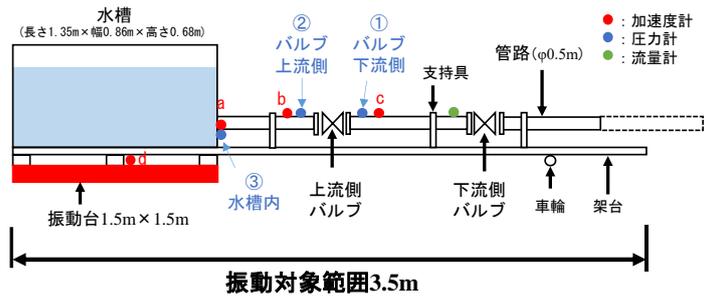


図-3.5 実験模型の概略図

3.2.2 実験結果及び考察

- ・ 加振終了後の水槽内と管内の圧力変動を図-3.6 に示す．水槽内での圧力変動に対して，下流側の管内では増幅することなく，同程度の圧力が伝播する．
- ・ 加速度と水槽内の動水圧振幅を図-3.7 に示す．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が，管路の動水圧振幅と比べて小さい．

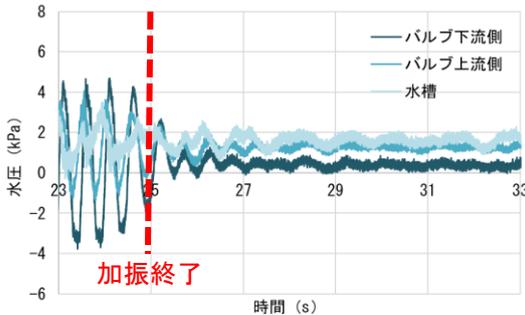


図-3.6 加振終了後の水槽内と管内圧力

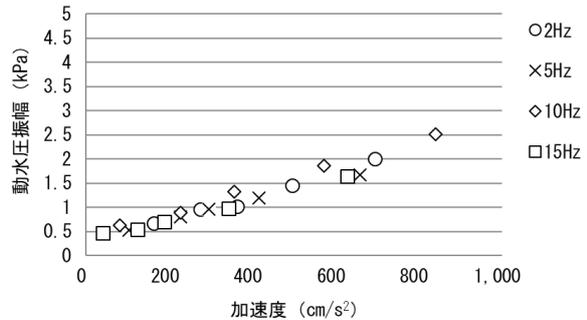


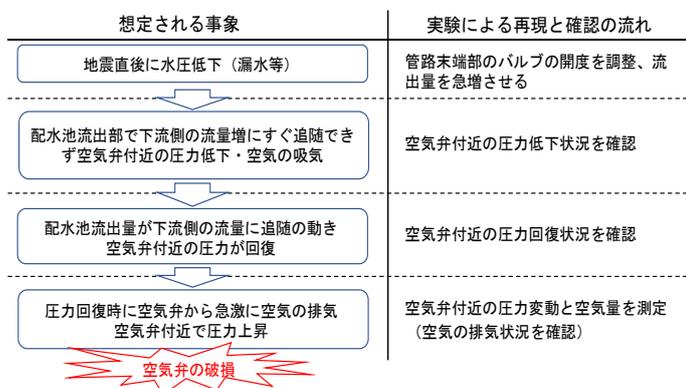
図-3.7 加速度と水槽内の動水圧振幅

- ・ 以上のことから、管内の水圧変動は、水槽内の水の振動による影響を受けるものの、その影響は小さく、急激な水圧変動の原因として、配水池内水の振動による圧力変動の影響とは考えにくい。

3.3 地震直後の下流側管路の水圧変動

3.3.1 実験概要

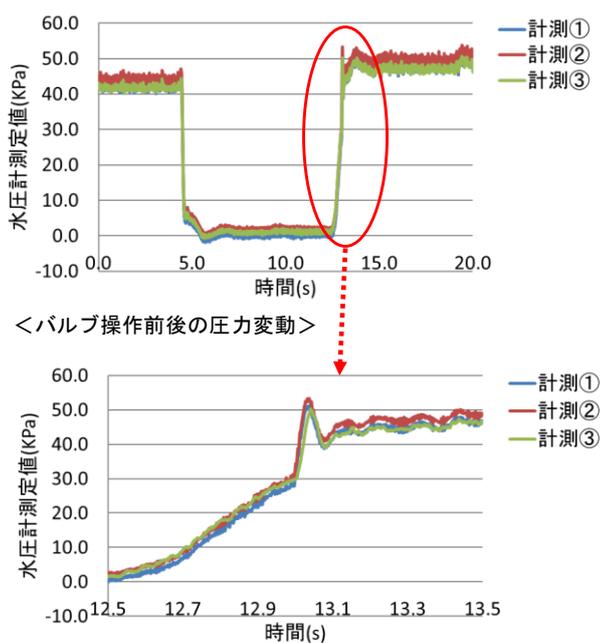
図-3.8 に示す想定事象を実験により再現し、地震直後の圧力の急低下・回復といった圧力変動の形跡から、空気弁の破損に影響を及ぼすかどうか検証した。



3.3.2 実験結果及び考察

- ・ 負圧から正圧への圧力回復に伴う空気排気時の圧力変動を図-3.9 に示す。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、負圧状態からの回復時に空気弁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・緩閉の実験の結果、圧力回復が速いと空気弁の排気時に大きな圧力が発生することが分かった。この圧力の大きさは、本管内の圧力回復速度に依存するものと考えられる。

図-3.8 想定事象と実験による再現・確認の流れ



<圧力回復【負→正圧】に伴う空気排気時の圧力変動（丸囲い部）>

図-3.9 管内圧力回復時の圧力変動

4. 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

管路模型実験にて圧力の急上昇が確認されたことを踏まえ、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が検証する。

4.1 管内の動水圧変化に伴う空気弁破損に至るメカニズム

4.1.1 管内の動水圧変化

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の動水圧変化は次の式で表され、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。前述の分析で空気弁破損被害と最大速度に相関があったことから、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。最大速度が大きいほど負圧が発生しやすく、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。

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

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/m³)， 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)

4.1.2 空気弁の吸排気と弁付近の圧力変化

1) 空気弁の動作と水撃作用

管内の負圧に伴う空気の混入後、地震動によって、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。この時の急激な充水速度の変化によって、弁を瞬間閉止し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、次の式で表され、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。

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

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/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)

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

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)

2) 空気弁内の充水速度と弁内の圧力上昇

図-4.1 に示すとおり、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字部) と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で表され、管内水圧の上昇に伴い、弁内の充水速度も増加する。

$$V_w = C_w \sqrt{\frac{2gp_0}{\gamma_w}} \quad (4-4)$$

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

4.1.3 実際の管内の動水圧の変化と空気弁内の圧力上昇の推定

前述の2016年熊本地震による空気弁破損の要因が水圧変動と特定された管内の動水圧変化について、式(4-1)より算出すると、地震時には通常時水圧（約0.3MPa）を下回る負の動水圧（最大約0.9MPa）が発生することから、空気弁から管内に空気が混入したものと考えられる。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。次に、弁内の圧力上昇について、本管から弁閉止部までの高さを1m、振動数2Hzの場合を例に、式(4-4)から弁閉止直前の充水速度を算出すると約19.5m/sとなり、この時の水撃圧は、式(4-2)より19.3MPaとなる。この値は、水道用空気弁規格(JWWA B 137)で定める許容値及び試験値を大きく上回る。この空気弁急閉に伴い、図-4.2に示すとおり、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、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、破損に至った可能性が考えられる。

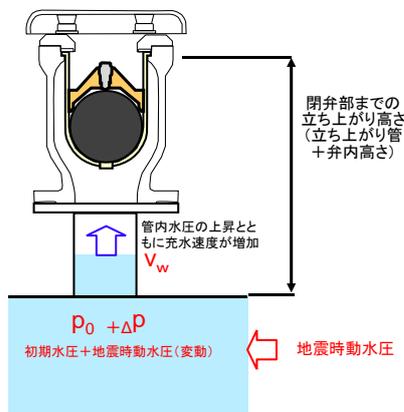


図-4.1 空気弁内の充水

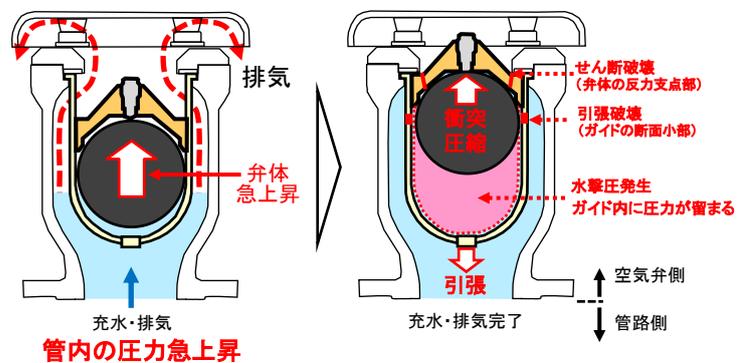


図-4.2 空気弁内部品の破壊原因想定

4.2 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

4.2.1 配水池流出部の水圧変動と空気弁における圧力変化

地震直後の配水池流出部及び、下流側管路の水圧記録（図-2.7）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ものと考えられる。配水池流出部における水圧変動を想定した実験結果（図-3.9）において、負圧からの急激な圧力回復の過程で空気弁付近での突出した圧力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。

4.2.2 実際の空気弁内の圧力上昇の推定

前述 4.1.2 と同様の方法で弁内の圧力上昇を推定する。図-4.3 に、実際の管路における水圧変動記録とそれに伴って想定される空気弁内の充水速度（式(4-4)の計算値）を示す。本管から弁閉止部までの高さを 1m と仮定すると、弁閉止直前の充水速度は、3.6m/s となり、この時の水撃圧は、式(4-2)より 3.5MPa となる。この値は、水道用空気弁規格（JWWA B 137）で定める許容値及び試験値を上回るが、前述の管内動水圧変化に伴い発生する水撃圧と比べて小さい値となった。

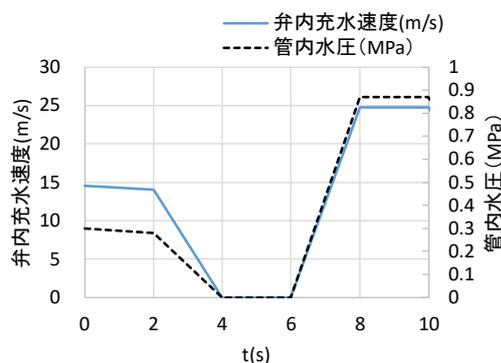


図-4.3 管内水圧記録（本震発生直後）と弁内充水速度【実際管路（計算値）】

5. 結論

本研究で得られた成果は、次のとおりである。

- ① 管路の振動に伴う管内動水圧変化に着目して調査した結果、空気弁破損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 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 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空気の混入と空気弁からの急激な排気による水撃作用が、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。
- ③ 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空気が混入し、その後の圧力回復の過程で生じる、空気弁からの急激な排気による水撃作用により、破損に至る可能性がある。
- ④ 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。例えば、地震時の振動数が大きくなると、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。
- ⑤ 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、2016年熊本地震の場合において、それぞれ算出した圧力値を比較すると、前者の管内動水圧変化による影響が大きかったものと推察される。

学位論文審査報告書（甲）

1. 学位論文題目（外国語の場合は和訳を付けること。）

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

2. 論文提出者 (1) 所 属 環境デザイン学 専攻

(2) 氏 名 玉瀬 充康

3. 審査結果の要旨（600～650字）

本学位申請論文に関し、第1回審査委員会を開催し審査方法を決定するとともに、論文の内容について検討した。さらに令和元年8月6日に行われた口頭発表後に第2回審査委員会を開き、協議の結果、以下のように判定した。

本研究は、地震時における管内水圧変動が空気弁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した研究である。まず、過去の地震における被害について、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分析を行った。これらの調査、分析結果から空気弁被害に至る原因とメカニズムについて理論的に考察し、そのメカニズムを提示したうえ、振動実験により地震時の管内水圧の変動の特徴とそのメカニズムを検証している。さらに、これらの研究成果に基づいて、被害の要因や特徴を考慮した今後の対策、留意事項について具体的に提言している。

以上の研究成果は、近年の地震被害で顕在化している空気弁被害の軽減に直接貢献するものであり、工学的価値が極めて高いと認められることから、本委員会は本論文が博士（工学）に値すると判定した。

4. 審査結果 (1) 判定（いずれかに○印） 合格 ・ 不合格

(2) 授与学位 博士（工学）

5. 学位論文及び参考論文に不適切な引用や剽窃が無いことの確認

■ 確認済み（確認方法：iThenticateによるチェックと、審査員による確認）

未確認（理由：）