

空気弁の地震被害要因に関する振動実験

石田 明久¹・玉瀬 充康²・宮島 昌克³

¹正会員 金沢大学大学院自然科学研究科，博士前期課程

E-mail: akihisa-2507-in-maine@hotmail.co.jp

²正会員 金沢大学大学院自然科学研究科，博士後期課程

E-mail: mitsuyasu_t77@yahoo.co.jp

³正会員 金沢大学理工研究域環境デザイン学系，教授 工博

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

過去の地震において空気弁が破損するという被害事例が多く報告されている。この破損原因については管路内の急激な水圧変化が1つの要因として考えられているものの、どのような地域で空気弁被害が集中し、どういった要因により急激な水圧変化を引き起こしているか、明確な原因が分かっていないのが現状である。そこで本研究では管路模型を作成し振動実験を行い、どのような振動特性、管路形態が急激な水圧変化に起因しているか定量的に評価し考察を行った。

Key Words: 空気弁, 管路形態, 水圧変化, 振動特性

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。このマグニチュード9.0というのは日本の観測史上最大となり、震源域は岩手県沖から茨城県沖までの南北500km, 東西200kmと広範囲に及んだ。水道施設については、震源地に近い岩手県、宮城県、福島県の沿岸部における被害が特に大きく導水管や配水管などの破損等により宮城県県を中心に約257万戸の断水被害が発生した¹⁾。多くの被害が挙げられる中、本研究では空気弁の被害に着目する。空気弁とは管内にたまった空気を自動的に吸排気する機能を有する弁である。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つの事業

体では148箇所被害が発生し、被害率は約2%となった。また、管路附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。管路附属設備の被害数・被害率を表-1に示す²⁾。このような空気弁被害は規模が小さい地震では影響も少ないが、家屋から火災が発生する可能性がある規模の地震においては、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箇所に及ぶと予想されており、震災後の給水活動や復旧活動に大きな影響を与えると考えられている³⁾。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。

表-1 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
空気弁	合計	3631	394	533	815	3254	-	8627
	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	43039	162	368	12609	90166	12682	159026
	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	0.043
消火栓	合計	14760	0	0	2496	34965	3749	55970
	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	0.032

2. 被害の要因と特徴

過去の研究において、空気弁被害は地震時に発生する水圧変化が一つの主な原因と考えられているものの、この水圧変化の明確な原因が解明されていないのが現状である。

表-2 に東日本大震災における各水道局における空気弁被害の特徴を示す²⁾。地震発生直後、仙台市水道局ではポンプの急停止、送水管の大規模漏水が確認された。また、千葉県水道局でも送水管のポンプ急停止が確認されている。空気弁被害が発生した箇所の周辺環境を見ると、下流の管路形態が片落ち管であったり、空気弁が7.85mほど立ち上がった場所に設置されていたりしたケースもあり、これらの周辺環境・管路形態やポンプの急停止等が影響したことにより、急激な水圧変化を招き、空気弁が破損したのではないかと推察される。以上のことから、

考えられる要因をまとめると①管路漏水による急激な水圧変化による影響②配水池流出口におけるポンプ急停止による急激な水圧変化の影響²⁾③受水槽のスロッシングによる急激な水量増加に伴う水圧変化現象⁴⁾⁵⁾④空気弁下流の急縮・曲管路や急激な高低差に伴う地震時の水圧変化の4つが挙げられる。①では、地震により配水管に亀裂等の欠陥が生じることによって漏水し、水圧が低下したと考えられる。②では、ポンプが急停止することで、管内に負圧が生じ水圧が変動したと考えられる。③では、スロッシング現象が発生することで受水槽内の水位センサーが誤作動を起こし受水槽に水が一斉に供給される。多くの受水槽に水が供給されることで、管内の水圧が低下すると考えられる。④では、管路の形状が異なることにより、地震時に管内の水が異型管に繰り返し衝突し水圧が大きく変動したと考えられる。

さらに 2003 年に発生した十勝沖地震でも地震直

表-2 東北地方太平洋沖地震における空気弁被害の特徴²⁾

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
H.W.L	71.5m	142.0m	200.1m		30.3m
L.W.L	80.0m	137.5m	195.0m		24.0m
送水方式	ポンプ圧送方式	自然流下方式	自然流下方式(高区)	自然流下方式(低区)	ポンプ圧送方式
ポンプ揚程	30.0m	—	—	—	45.0m
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
通常時送水量	10,000m ³ /日	97,300m ³ /日	5,800m ³ /h		約6,700m ³ /h
地震直後送水量	ポンプ停止により、0m ³ /hとなる。	送水管の大規模漏水のため、送水を停止した。	約70分間異常値を計測した後、30分間0～2,000m ³ /hで振幅し0m ³ /hに収束した		14:50に常用線停電により送配水ポンプ停止。 14:58に復電し、15:07に送配水ポンプ運転開始した。
管口径	Φ 400mm	Φ 800mm	Φ 2400mm	Φ 700mm	Φ 500mm
呼び径	Φ 75mm	Φ 100mm	Φ 200mm	Φ 100mm	Φ 100mm
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
距離	約0.4km	約4.5km	約11.6km	約48.3km	約6.2km
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していた。	案内の棧部が破断	案内棧部が破断 遊動弁体がひび割れ	SUS316製フロート弁体 が変形	遊動弁体・案内ガイドが こっば微塵に破損していた。
備考	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	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、Φ 2400mm×Φ 1500mm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

後に大きな水压変化を観測している。国営灌漑排水事業芽室地区の灌漑用管路の空気弁付近において、地震直前まで水压変化が記録されていたものの、地震直後では圧力センサーが故障するほどの大きな圧力変動が生じた。これは、余震時の弁体の上下動の状況から、当該地点で負圧が発生するような大きな圧力変動が要因であると推察されている⁹⁾。

本研究では前述の被害要因④を主な対象として研究を行った。そして、地震時の管内の水压変化の原因を究明するために配水管網の模型を作製し、振動実験を行うことで地震動の振動特性や配水管の管路形態が、配水管内の水压にどのような影響を与えるか実験的に分析・評価した。

3. 配水管網の振動実験

(1) 実験概要

水压変化の原因として様々な要因が考えられているが、どの要因がどの程度水压変化に影響を及ぼしているか定量的な研究は行われていないのが現状である。そこで本研究では、一般的な配水施設形態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压変動の影響を定量的に検証した。実験模型の対象範囲を図-1に示す。実験模型は配水場から給水管に至る配水管路の一部を想定し、空気弁を有する管路を模した管路模型(1/10 スケール)と模型を支えるフレームからなる実験装置を作製し振動実験を行った。加振時の管内における水压変化を計測し配水施設および振動特性の変化が管内の水压変化とどのような関係にあるか考察する。

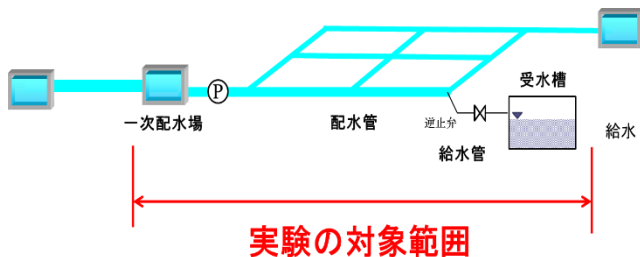


図-1 実験模型の対象範囲

(2) 実験装置

本実験では循環式の管路模型を作成し、空気弁を取り付けた配水管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、その時の管路内の影響を検討する。ここで空気弁付近に水压計①、空気弁より上流側に水压計②、空気弁より下流側に水压計③を設置して水压を測定する。図-2に実験模型の平面写真を示し、図-3に実験模型の計測箇所を示す。また、実験模型の相似比を表-3に示す。

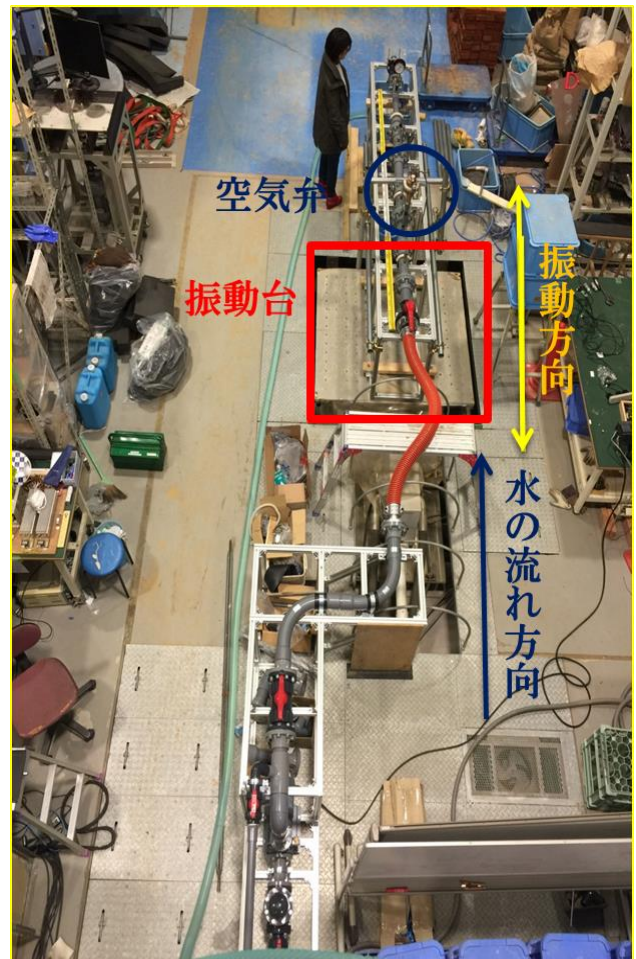


図-2 実験模型の平面図

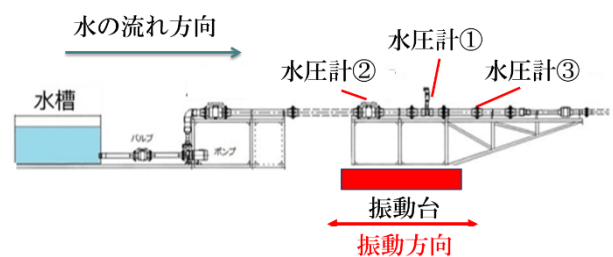


図-3 実験模型と計測箇所

表-3 実験模型の相似比

項目	実際	実験	縮尺	相似比
管径(m)	0.8	0.08	1/10	1/a
流速(m/s)	0.67	0.21	6/19	1/a ^{0.5}
流量(l/分)	16.667	50	1/316	1/a ^{2.5}
水の粘性係数 (cm ² /s)	0.01	0.01	1	1/a ⁰
レイノルズ数 Re	442097	13980	3/95	10 ⁴ 以上で安定
圧力水頭(m)	40	4	1/10	1/a
粗度係数(cm)	0.026(鑄鉄)	0.015(塩ビ)	1/6	1/a ^{0.1}
通常水圧(MPa)	0.4	0.04	1/10	1/a
最大水圧(MPa)	0.75	0.075	1/10	1/a

(3) 応答倍率

本実験では加振振動数をパラメータとするため、まず水を流した状態で実験模型全体での共振曲線を求めた。測定方法として空気弁付近の水圧測定箇所と管路上に加速度計を設置し、振動数を変えて加振し、応答倍率を求めた。図-4に加振振動数と応答倍率の関係を示す。1Hz 間隔で実験を行い、その後応答が最も大きかった振動数の前後を 0.1Hz 間隔で入力し、各振動数での応答倍率を算出することで、実験模型の詳細な固有振動数を求めた。6Hz, 10Hz, 15Hz 辺りで大きなピークが見られ、それぞれ振動の 1 次モード、2 次モード、3 次モードと推定される。この図から 15.1Hz においてその応答倍率が最大となることが明らかとなった。

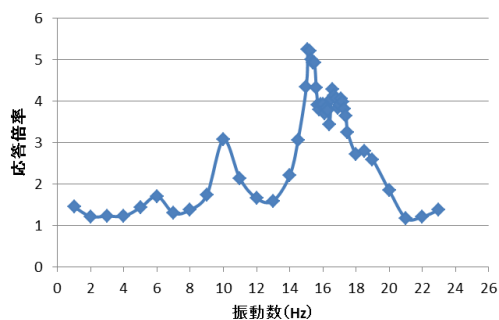


図-4 実験模型における応答倍率と振動数

4. 研究結果

(1) 振動実験パターン

本実験において地震動加速度、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、入力加速度を 80gal, 120gal, 150gal, 300gal, 継続時間を 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, 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検討する。振動実験パターンを表-4 に示す。

表-4 振動実験パターン

配水施設		入力波形	
管路形態	流速(cm/s)	加速度(gal)	振動数(Hz)
直管			0.5
曲管		80	1
片落ち管 (40mm)	21	120	5
片落ち管 (50mm)	42	150	10
		300	15
			20

(2) 空気弁に与える影響

本研究では地震動が空気弁にどのような影響を与えているか明らかにするため、空気弁を閉めた状態で加振させた時と空気弁を開けた状態で加振した時の水圧変動を計測した。図-5に空気弁を閉めた状態の水圧の時系列変化を示し、図-6に空気弁を開けた状態の水圧の時系列変化を示す。これらはいずれも 5Hz, 150gal の正弦波で直管を加振したケースであり、流速は 21cm/s である。両図を見ると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。しかし空気弁を開けている場合は水圧計②や③に比べて空気弁付近に設置した水圧計①において数値が突出している。空気弁を閉めた場合の最高水圧 39.5 kPa に対して開けた場合は 62.6 kPa と高く、空気弁付近において異常圧力が発生していることがわかる。以上のことから、振動時には空気弁における空気の出入りの影響を受けて、空気弁付近では強い衝撃を受けていることがわかった。

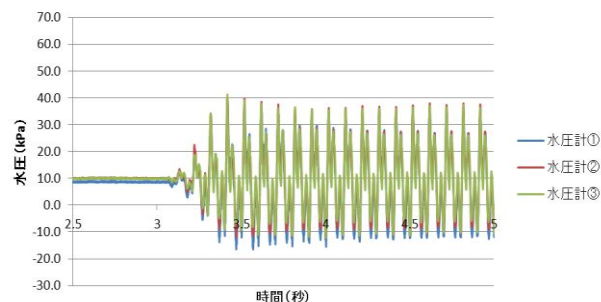


図-5 空気弁を閉めた時の水圧変動
(加速度 150gal, 振動数 5Hz)

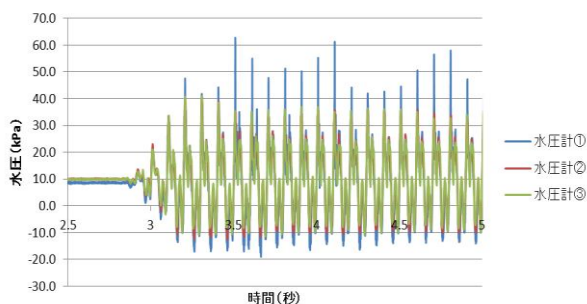


図-6 空気弁を開けた時の水圧変動
(加速度 150gal, 振動数 5Hz)

(3) 地震動の加速度と周期が及ぼす影響

これらの実験結果から、まず地震動の加速度、振動数と水圧変化量の関係について検討した。図-7に直管における加振振動数別の加速度と水圧変化量の関係を示す。本研究では水圧変化量を、加振を始めてから30秒間の最高水圧と最低水圧の差と定義する。また計測地点の中でも空気弁へ与える影響を考察するため、空気弁付近に設置されている水圧計①の結果を示す。図-7によると、加速度が増すごとに水圧変化量が上昇する傾向にあることがわかる。本実験においては15Hzの時に最も水圧変化量が大きく、0.5Hzや1Hzでは水圧変化量が小さいことが確認できた。これらの結果から応答倍率が最も大きくなる振動数で加振した時に水圧変化が最も大きくなることを確認した。

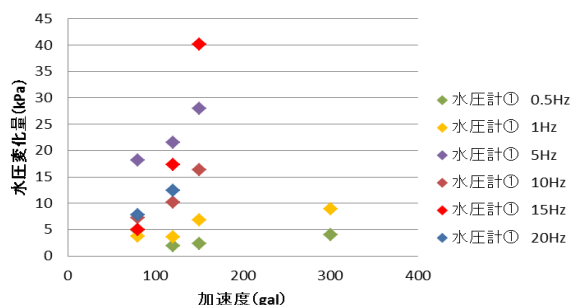


図-7 加振振動数別の加速度と水圧変化量の関係

(4) 管路形態の違いが及ぼす影響

管路形態の違いが水圧変化にどのような影響を与えているか検討した。図-8に120galで加振した時の直管、曲管における振動数と水圧変化量の関係、

図-9に120galで加振した時の直管、片落ち管(40mm)における振動数と水圧変化量の関係。両図より、曲管や片落ち管は直管に比べると水圧変化が大きくなることが確認できた。また水圧変化量は直管、曲管、片落ち管(50mm)、片落ち管(40mm)の順に大きくなり、片落ち管(40mm)において水圧変化が最も大きくなることがわかった。

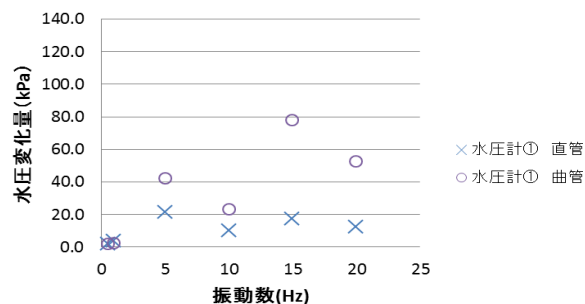


図-8 120galで加振した時の直管、曲管における振動数と水圧変化量の関係

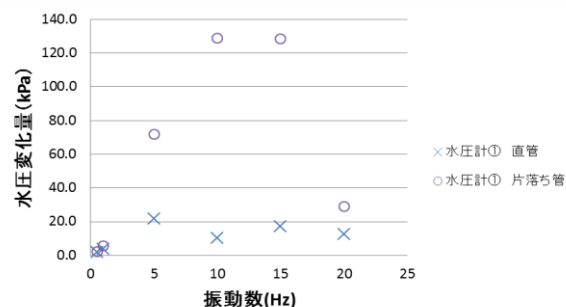


図-9 120galで加振した時の直管、片落ち管(40mm)における振動数と水圧変化量の関係

(5) 管内流速が及ぼす影響

次に管内流速の違いについて検討した。図-10に80galで加振した時の流速21cm/s、42cm/sにおける水圧変化量と地震動の周期の関係を示し、図-11に120galで加振した時の流速21cm/s、42cm/sにおける水圧変化量と地震動の周期の関係を示す。両図を比較すると、管内流速が速いほど水圧変化が大きくなることがわかる。しかし水圧変化量は管路形態の影響に比べると小さい。このことから管内流速が水圧変化の決定的な要因ではないと考えられる。

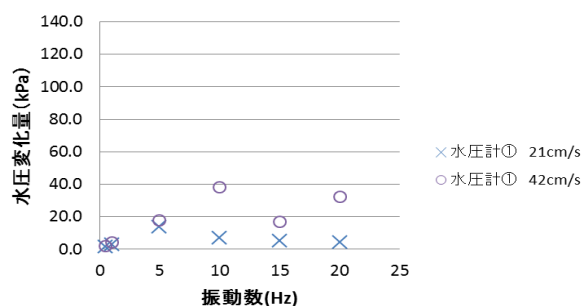


図-10 80gal で加振した時の管内流速 21cm/s, 42cm/s における振動数と水圧変化量の関係

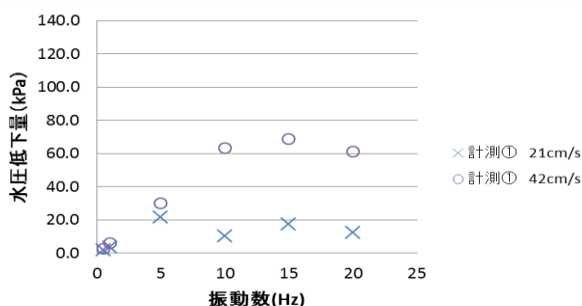


図-11 120gal で加振した時の管内流速 21cm/s, 42cm/s における振動数と水圧変化量の関係

5. 結論

本研究では空気弁破損の原因を解明するために 1/10 の管路網模型を作成して振動実験を行った。本実験では振動特性や管路形態を変えて加振時の空気弁付近の水圧を計測し、どのような要因が水圧変化に影響を与えているか検討した。その結果をまとめると以下のとおりである。

振動実験から空気弁の開閉状況により空気弁付近の圧力が大きく変化することが確認でき、空気の出入りの状況が空気弁付近における異常圧力に起因しているものと考えられる。

振動の加速度と振動数に注目すると、加速度が上昇すると水圧変化量も増加することが確認できた。また実験模型が持つ固有振動数に近い 15Hz で加振

した場合が最も水圧変化が大きくなり、水圧変化は振動特性と深い関係があることがわかった。

管路形態に注目すると、直管に比べて異型管において大きな水圧変化が発生することが確認できた。また片落ち管において最も水圧変化の影響が大きくなることが確認できた。これは通常時でも配水管内の水圧が大きく変化していることが原因であると考えられる。

管内流速については、流速が速い状態の管路において水圧変化が大きくなることが確認できた。しかし、管路形態の違いによる影響の方が強いことから管内流速の違いが水圧変化の決定的な要因ではないことがわかった。

参考文献

- 1) 社団法人日本水道協会：平成 23 年(2011 年)東日本大震災水道施設被害等現地調査団報告書，2011.
- 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附属設備の被害調査報告書，pp.109-119，2011.
- 3) 東京都水道局：第 3 章 水道事業の課題と主要施策，震災対策，pp.62-69，2013.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

(2015. 9. 11. 受付)

SHAKE TABLE TESTS ON CAUSES OF AIR VALVE DURING EARTHQUAKE

Akihisa ISHIDA, Mistuyasu TAMASE, and Masakatsu MIYAJIMA

The damage to air valves are reported in large numbers at the past earthquakes. It is thought that the rapid decrease of water pressure at water distribution stations cause this damage. However, we have never found out what kind of factors influence the decrease of water pressure. Therefore, we made the 1/10 scale model of water pipeline system and did shake table tests. We put the water pressure gauges on the model and measured water pressure while shaking. We change the factors which are dynamic characteristics of input wave and pipe forms, and investigated what kind of cause affects the decrease of water pressure.