

排水ポンプ用逆流防止弁の動特性*

溝端一秀^{*1}, 杉山 弘^{*1}, 大谷清伸^{*2}
大石聖史^{*3}, 佐々木悠二^{*4}
武者裕之^{*5}, 三輪俊夫^{*5}

Dynamic Characteristics of a Check Valve for Drain Pumps

Kazuhide MIZOBATA^{*6}, Hiromu SUGIYAMA, Kiyonobu OHTANI,
Takashi OHISHI, Yuji SASAKI,
Hiroyuki MUSA and Toshio MIWA^{*6} Muroran Institute of Technology, Department of Mechanical Systems Engineering,
27-1 Mizumoto, Muroran, Hokkaido, 050-8585 Japan

Check valves for checking reverse water flows in drainage systems sometimes make large impacts through their sudden closure caused by accidental cutoff of drain pumps. In order to characterize such phenomena and to find design criteria for impactless check valves, we observed the motion of a check valve and measured its impact acceleration and pressures in the drainage pipe, using a subscale drainage system. Two peaks of impact acceleration were observed; The first one seemed due to collision of the check valve and the valve seat, whereas the second one did due to water column separation and recombination caused by the low pressure during the closure state of the valve. The former can be reduced by adding mass to the check valve and by setting an appropriate valve-seat angle. The latter possibly can be reduced by relaxing the low pressure during the closure. Subsequently, the check valve opened through the water-column recombination impacts and sometimes showed opening-closing oscillation.

Key Words: Pipe Flow, Multi-phase Flow, Bubble, Check Valve, Drainage, Water Column Separation

1. 結 言

河川支流から本流への排水のために河川合流点に設置される排水機場や、都市の雨水を河川に排水するためのポンプ場においては、排水管吐出口に逆流防止弁が設けられる。定常排水時には、排水流れから受ける力と自重とが釣り合う位置まで弁が開き、排水流れが減速・停止すると自重によって弁が閉じる。これによって、水位の低い側から高い側への排水の途中で排水流れを止める場合に、高水位側から低水位側への逆流を防止する事ができる。通常の運転では排水流れは充分ゆっくりと減速・停止され、従って逆流防止弁もゆ

っくり閉じる。一方、停電等の不測の事態によってポンプが急停止して排水流れが急減速・急停止すると、逆流防止弁は急閉鎖する。これによって、不快な騒音が発生するだけでなく、弁体、弁座、配管継手、および基礎構造体に大きな衝撃力が働き、場合によってはこれらを損傷することがある。このような逆流防止弁急閉鎖時の衝撃発生メカニズムについては、これまで専ら経験的・定性的な研究⁽¹⁾⁽²⁾がなされてきているだけであり、急閉鎖衝撃を低減するための設計基礎データは充分には蓄積されていない。

そこで本研究では、逆流防止弁急閉鎖時の衝撃を緩和・抑制する手段を見出し一層適切な逆流防止弁設計法を探ることを目標にして、弁急閉鎖時の弁体と周囲の水流の挙動・様相を詳細に調べ衝撃発生メカニズムを解明する事を狙う。

2. 実験装置と実験方法

実験装置の概略を Fig. 1 に示す。また、逆流防止弁周辺の機器の概略を Fig. 2 に示す。上流側タンクと下

* 原稿受付 2001年7月19日。

^{*1} 正員, 室蘭工業大学機械システム工学科(☎050-8585 室蘭市水元町27-1)。^{*2} 学生員, 室蘭工業大学大学院。^{*3} 室蘭工業大学大学院[現: 室蘭市役所]。^{*4} 室蘭工業大学大学院[現: (株)荏原製作所]。^{*5} 正員, (株)荏原製作所(☎144-8510 東京都大田区羽田旭町11-1)。

E-mail: mizobata@mmm.muroran-it.ac.jp

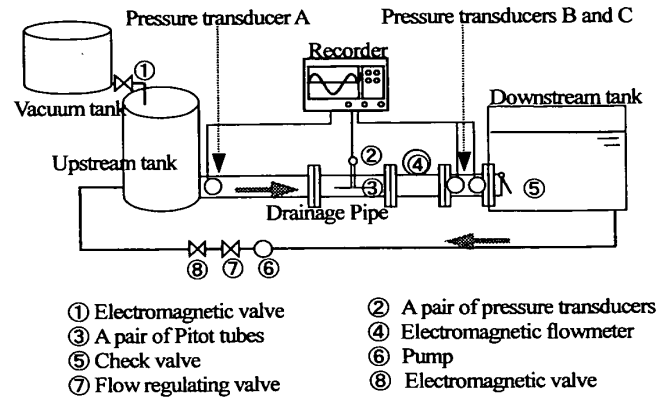
流側タンクを長さ 2,440mm、内径 100mm の排水管でつなぎ、排水管末端の吐出口に逆流防止弁を取り付ける。排水管内の水は、Fig. 1(a)中の太い矢印で示されるように上流側タンクから下流側タンクへ向かって流れ、実験装置内を循環する。排水管中央部には、排水管内の流れ方向を検出するために 2 本のピトー管③を取り付ける。これは、Fig. 1(b)に示されたように外径 $\phi 3\text{mm}$ 、内径 $\phi 1\text{mm}$ の SUS 管 2 本を束ねたものであり、一方の管の検出口を上流方向に向け、もう一方の管の検出口を下流方向に向けてある。これら 2 本のピトー管は側面フランジを介して排水管の外へ導かれ、ピトー圧は圧力変換器②によって電気信号に変換される。また、排水管内の圧力変動を調べるために、弁座直前の 2 カ所 (Fig. 1 中の B, C)、および上流側タンク直後の 1 カ所 (Fig. 1 中の A) に圧力変換器を設置する。これらの圧力変換器はすべてゲージ圧を検出する。さらに、逆流防止弁が急閉鎖する際に生じる衝撃加速度を測定するために、弁体と下流側タンク壁面に加速度計(a), (b)を取り付ける。逆流防止弁の開き角はポテンシオメータによって検出される。

実験手順は次の通りである。まず、流量調整弁⑦により、実験装置内を循環する水の流速を一定にする。このとき、流れから受ける力と自重とが釣り合う開き角で弁体は静止する。その後、流入遮断弁⑧を閉じ、同時に真空開放弁①を開く。これによって上流側タンク内が負圧になり、排水管内の流れが減速し、さらに逆流する。(このとき、真空開放弁①の開度を大きく設定すれば排水管内流れの減速率が大きくなり、開度を小さく設定すれば減速率は小さくなる。) このような流れの変化と弁体の自重により、弁体は閉鎖する。このように弁体が閉鎖する際の流れ方向の変化をピトー管③で測定し、同時に、排水管内の圧力変動や弁体および下流側タンク壁面に生じる衝撃加速度を圧力変換器 A, B, C および加速度計(a), (b)で測定する。また、弁体が閉鎖する様子を高速ビデオカメラで撮影する。

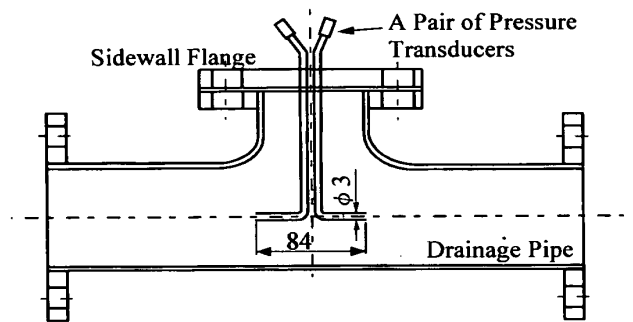
各種センサーの応答周波数を Table 1 に列記する。センサーからの信号は A/D 変換され多チャンネル高速データローガに記録される。そのサンプリング周期は 10kHz である。

3. 実験結果と考察

3.1 逆流防止弁急閉鎖時の流れの時間変化 逆流防止弁が急閉鎖する際の、排水管中央部における流れのピトー圧 (ゲージ圧) の代表的な履歴を Fig. 3 に示す。併せて逆流防止弁の開き角の履歴も示してある。



(a) Overall view.



(b) Zoomed-in view of the pair of Pitot tubes.

Fig.1 The experimental apparatus.

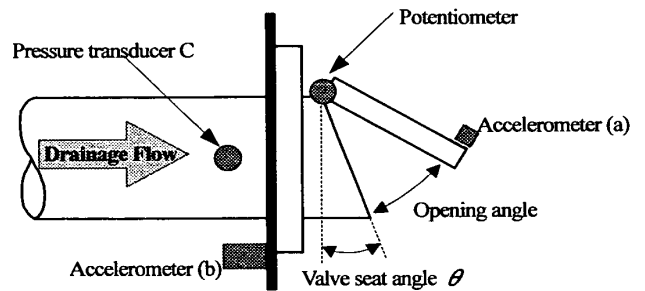


Fig.2 Zoomed-in view of the apparatus around the check valve.

Table 1 Response of the sensors.

sensor	response
pressure transducers ②, A, B, and C	10 kHz
electromagnetic flowmeter ④	14 kHz
potentiometer	> 100Hz
accelerometer (a)	10 kHz
accelerometer (b)	7 kHz

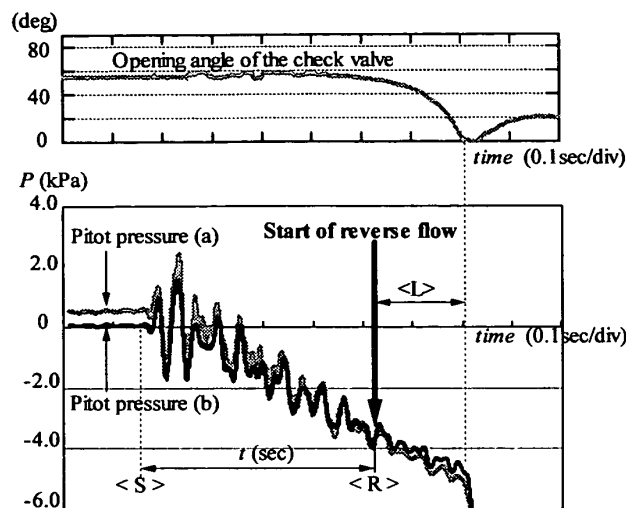


Fig.3 Typical histories of the Pitot pressures(gauge values) in the drainage pipe and of the opening angle of the check valve.

流入遮断弁を閉じる前では、上流側タンク方向に向けられたピトー管(a)のピトー圧が下流側タンク方向に向けられたピトー管(b)のピトー圧より大きいことから、管内流れは下流側タンク方向に向いていることが分かる。図中<S>点で流入遮断弁を閉じ真空開放弁を開くと、その後、ピトー圧(a)とピトー圧(b)の差は徐々に小さくなってゆく。これは管内流れの減速に対応する。やがて、図中<R>点においてピトー圧(a)とピトー圧(b)の大小が逆転する。この時点以降は管内に逆流が生じているものと考えられ、逆流防止弁が閉じてゆく。

ここで、逆流防止弁が急閉鎖する際の流速の全体的減少率を dv/dt と記す。Fig. 3 のピトー圧履歴からわかるように、流入遮断弁を閉じた後、管内流速は増減振動しながら全体的にはほぼ直線的に減ずる。このため、流入遮断弁を閉じる前の流速を V 、管内の流速がゼロになるまでに要した時間を t とし、 $dv/dt \approx V/t$ と近似することができる。その値は、前述のように真空開放弁 (Fig.1 中の①) の開度によって調節される。また、Fig.3 中<L>は、管内に逆流が発生してから逆流防止弁が完全に閉じるまでの時間遅れであり、以下「閉まり遅れ時間」と呼ぶことにする。

3.2 逆流防止弁急閉鎖時に生じる衝撃加速度 逆流防止弁が閉じる際に加速度計(a)で検出された弁体に生じる衝撃加速度、および弁開き角の代表的な履歴を Fig. 4 に示す。衝撃加速度は重力加速度 $G(=9.8\text{m/s}^2)$ の倍数として表してある。実験条件は排水管内初期流速 $V=0.72\text{m/s}$ 、流速減少率 $dv/dt=2.39\text{m/s}^2$ である。2つ

の加速度ピークが捉えられており、弁開き角の履歴を考え合わせると以下のようにメカニズムの概略が推察される。まず、管内の逆流により逆流防止弁が急閉鎖し、弁体と弁座が衝突する。このときに発生するのが一つ目の加速度ピークである。逆流防止弁が閉じた後も、排水管内の流れは慣性により逆流し続けようとするために、逆流防止弁直近の管内に急激な圧力低下が起こり、水柱分離が生ずる。これに引き続いて発生する水柱再結合によって二つ目の加速度ピークが生ずると考えられる。一つ目の加速度ピークに比べて二つ目は小さいので、弁体構造の保守に関連しては、弁体・弁座の衝突による衝撃を主に考慮すれば良いと考えられる。

なお、この二つの加速度ピークの大小関係は、初期流速や dv/dt を変えても概ね常に観察されたが、配管系の寸法等の条件が本実験装置と異なる場合には水柱分離の程度が変わって大小関係が変わる可能性がある。

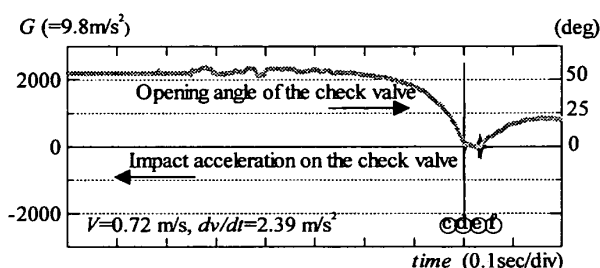


Fig.4 Histories of the impact acceleration and the opening angle of the check valve.

弁体に生じる一つ目の衝撃加速度ピーク値に及ぼす初期流速、弁体質量、および弁座角度の効果を Fig. 5 に示す。(a) は初期流速の効果、(b) は弁体におもりを付け質量を増すことの効果、(c) は弁座に角度をつけることの効果を示している。また、(d) は定常吐出時の弁開き角に及ぼす弁体質量の効果、(e) は弁座に衝突する直前の弁体の角速度に及ぼす弁体質量の効果を示している。

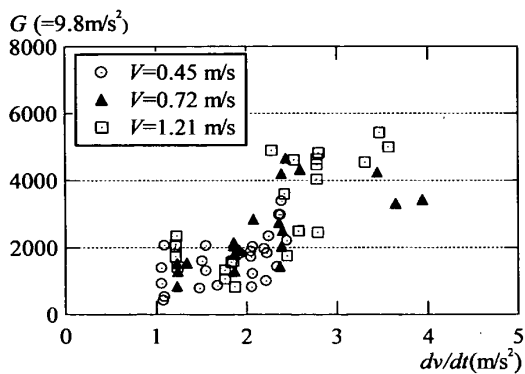
Fig. 5 (a) より、逆流防止弁急閉鎖の際、弁体に生じる衝撃加速度最大値は初期流速によってはあまり影響されない、ということがわかる。また、いずれの流速条件においても、 dv/dt を増やすに従って $dv/dt=2.5\text{m/s}^2$ のあたりで衝撃加速度最大値が急増する。

Fig. 5 (b) より、逆流防止弁の弁体におもりを付けることによって衝撃加速度が低減されることがわかる。弁体単独の質量は 0.265kg であり、おもりの質量は 0.188kg 、すなわちおもりを付加したときの弁体総質量は 0.453kg である。弁体の質量が増すことにより正流

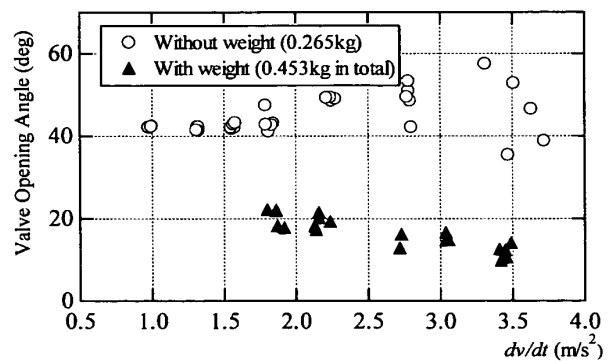
すなわち定常吐出の際の弁開き角は Fig. 5 (d) のように小さくなり、閉まり運動の加速距離が短くなって弁体と弁座との衝突速度は Fig. 5 (e) のように低減する。このことが原因となって Fig. 5 (b) のように衝撃加速度が低減するものと考えられる。なお、Fig. 5 (e) の衝突角速度データに弁体質量を乗ずればデータ点の分布は Fig. 5 (b) に似かよってくる。本研究では弁体の重心位置は弁体重量によらずほぼ固定されているので、このことから、弁体に生じる一つの衝撃加速度ピーク値は弁体の衝突直前の運動量に対応していると言える。また、(a) の場合と同様に、 $dv/dt = 2.5 \text{ m/s}^2$ より大きい領

域では衝撃加速度最大値が大きくなっている。

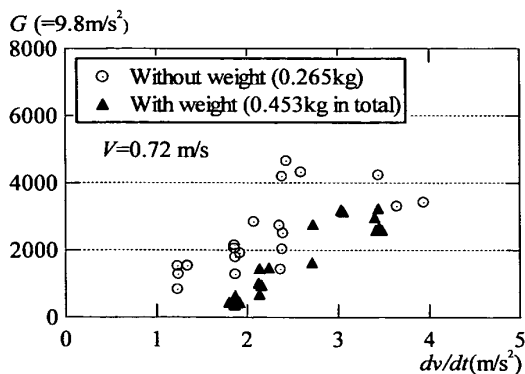
Fig. 5 (c) より、逆流防止弁の弁座に角度をつけることによって衝撃加速度が低減されることがわかる。これについても、弁座に角度をつけることによって正流すなわち定常吐出の際の弁座に対する弁体の相対的開き角が小さくなり、閉まり運動の加速距離が短くなって弁体と弁座との衝突速度が低減するためと考えられる。特に、弁座に 15° の角度をつけると dv/dt が 2.5 m/s^2 より大きな場合でも衝撃加速度は小さく抑えることができる。



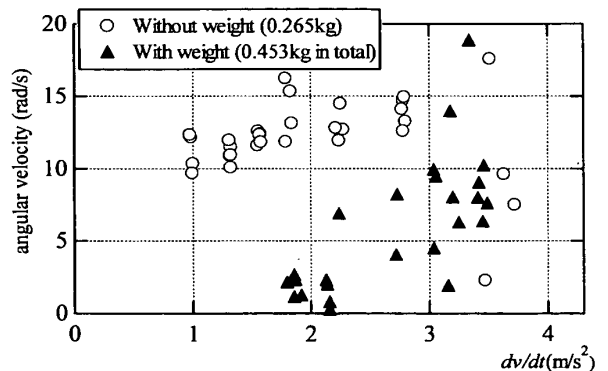
(a) Effect of the initial flow speed.



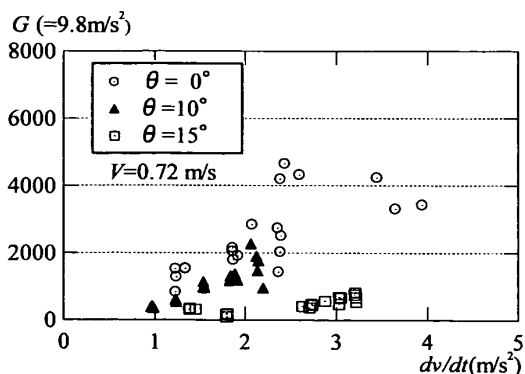
(d) Valve opening angle at steady drainage flows.



(b) Effect of the valve weight.



(e) Angular velocity at collisions with the valve seat.



(c) Effect of the valve seat angle.

Fig.5 Impact acceleration peak values on the check valve, with effects of the initial flow speed, the valve weight, and the valve seat angle.

弁体に生じる二つ目の衝撃加速度ピーク値に及ぼす初期流速、弁体質量、および弁座角度の効果は、一つ目のピーク値に関するものと同様の傾向を示した。これは、正流すなわち定常吐出の際の弁体開き角が大きいほど閉まり運動の加速距離が大きくなると同時に、閉まり遅れ時間も長くなるため、弁が完全に閉鎖する瞬間の逆流速度が大きくなって、水柱分離の激しさが増すことによると考えられる。

Fig. 6 は弁座近傍の下流側タンク壁面に取り付けた加速度計(b)によって検出された衝撃加速度の代表的な履歴である。実験条件は Fig. 4 と同じ $V=0.72\text{m/s}$, $dv/dt=2.39\text{m/s}^2$ である。Fig. 4 に示された弁体に生じる衝撃加速度と同様に、下流側タンク壁面に生じる衝撃加速度についても2つの加速度ピークが捉えられている。しかし、その大きさは、弁体に生じるものに比べて遥かに小さい。これは、弁座・タンク・配管等からなる構造系の重量が弁体に比べてはるかに大きいことによる。また、弁体と弁座の衝突により生じた一つ目の加速度ピークに比べて、水柱分離・再結合により生じた二つ目の加速度ピークは1/2~1/3程度の値になっている。従って、弁座構造、配管継手、および支持構造体等の保守の観点からみると、弁体・弁座の衝突による衝撃を主に考慮すれば良いと考えられるものの、水柱分離・再結合による第2の衝撃も完全には無視できないと思われる。

なお、弁座におけるこのような2つの加速度ピーク値の大小関係も、弁体におけるものと同様に、初期流速や dv/dt を変えても概ね常に観察されたが、配管系の寸法等の条件が本実験装置と異なる場合には水柱分離の程度が変わって大小関係が変わる可能性がある。

Fig. 7 は下流側タンク壁面に生じる一つ目の衝撃加速度ピーク値について、逆流防止弁の弁体におもりを付加する事や、弁座に角度をつける事の効果を示したものである。弁体に生じる衝撃加速度と同様に、下流側タンク壁面に生じる衝撃加速度に関しても、おもり付加や弁座角度によって衝撃加速度最大値が低減されている。

3.3 逆流防止弁急閉鎖時の圧力変動 排水管壁面の圧力変換器Cで測定された、逆流防止弁急閉鎖時の静圧(ゲージ圧)と弁開き角の代表的な履歴を Fig. 8 に示す。実験条件は Figs. 4, 6 と同一の $V=0.72\text{m/s}$, $dv/dt=2.39\text{m/s}^2$ である。弁体と弁座が接触している約0.03秒の間に弁近傍の排水管内はゲージ圧約-102kPa、すなわちほぼ真空状態まで圧力低下している。この圧力低下によって水柱分離が発生しているものと考えら

れる。弁体と弁座が接触し始めてから約0.03秒以降圧力ピークが数度に分かれて発生しており、その最大値は1,700kPaに達する。この圧力ピークは、分離した水柱が再結合する際に発生しているものと考えられる。複数の圧力ピークを経て弁は徐々に開いてゆく。

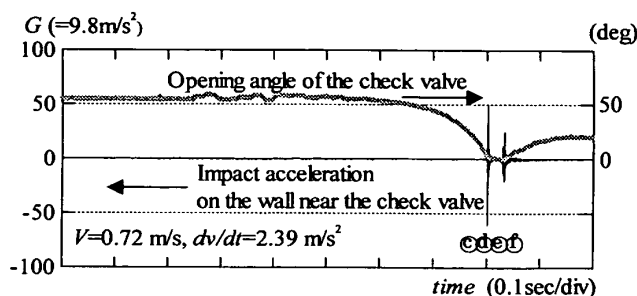


Fig.6 Histories of the impact acceleration on the wall near the valve seat and of the opening angle of the check valve.

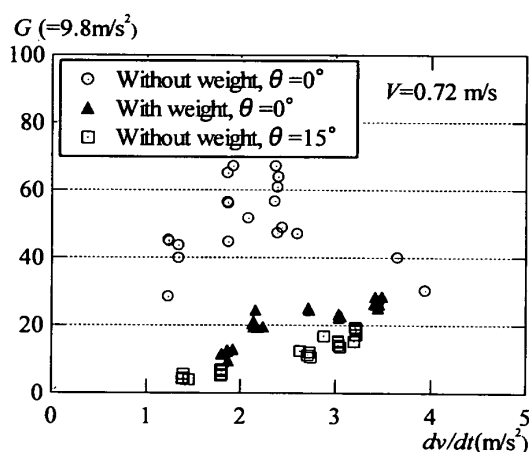


Fig.7 Impact acceleration peak values on the wall near the valve seat, with effects of the valve weight and the valve seat angle.

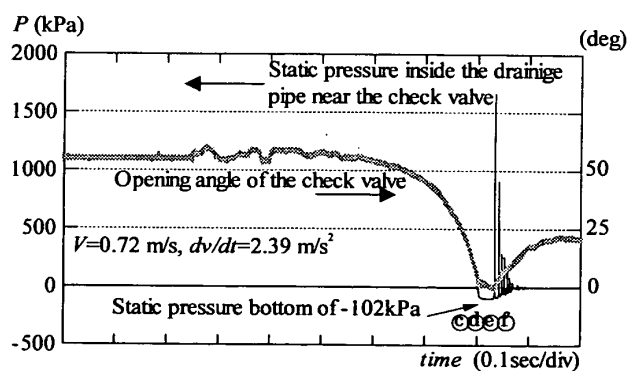


Fig.8 Histories of the static pressure(gauge value) inside the drainage pipe near the check valve and of its opening angle.

なお、圧力ピークが繰り返し発生するメカニズムとしては、水柱再結合による圧力波が排水管内を往復伝播しているか、あるいは水柱分離・再結合が反復的に発生しているものと予想されるが、今回の測定範囲のデータからはそれらのメカニズムの存否について確証は得られなかった。今後一層詳細な測定をおこなう必要がある。

弁体と弁座が接触している間の排水管内の圧力最低値およびその後の圧力ピーク値を dv/dt に対してプロットしたのが Fig. 9 である。 dv/dt が 1.5m/s^2 よりも大きい場合には弁体と弁座が接触している間の排水管内圧力が -100kPa まで減じている。同じ条件の際に、その後の圧力ピークが $1,500\text{kPa}$ 程度まで大きくなるのがわかる。このように弁体と弁座が接触している間の負圧と水柱再結合による衝撃圧力とが連動しているように見られることから、弁体と弁座が接触している間の負圧を何らかの方法で和らげることができれば、水柱再結合による衝撃を緩和できるものと予想される。

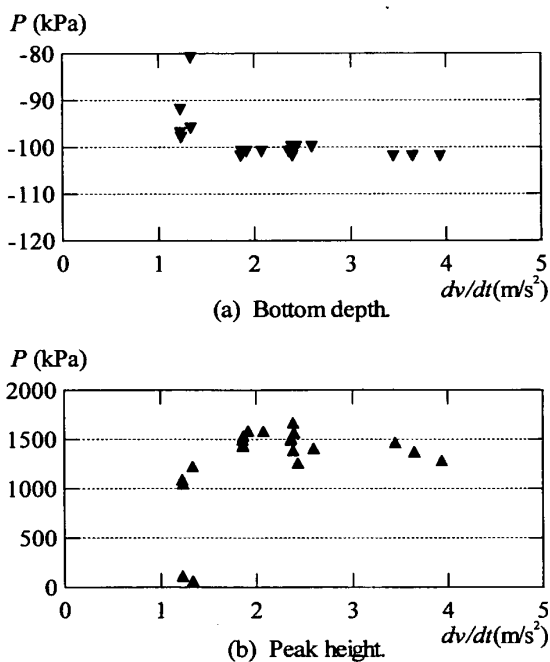


Fig.9 The bottom depth and the peak height of static pressure(gauge value) histories in the drainage pipe near the check valve.

3.4 逆流防止弁急閉鎖時の流れ場の様相 Fig.10 は逆流防止弁急閉鎖の際の弁近傍の流れの様相を高速ビデオカメラで撮影した映像である。弁座厚みを極力小さくし、弁座とタンク壁面との間に透明アクリル管を挟むことによって、できるだけ弁座直近の流れを撮影できるようにしてある。ここに掲載した写真の時

間間隔は $1/30$ 秒である。なお、弁体が閉鎖する直前から開き始めた直後までの写真③, ④, ⑤, ⑥に対応する時刻を Figs. 4, 6, 8 中に記号で示してある。

はじめ、排水管端から流れ出る水流の力と自重とが釣り合う位置で弁体が静止している。排水管内の水流が減速し始めるとこの釣り合いが崩れ、弁体が閉じ始める。やがて管内流れは逆流となり、これに引きずられて弁体は写真③~⑤のように急速に閉じる。弁体が弁座に接触した直後には、写真⑥のように弁体裏面に大小さまざまな気泡からなる気泡群が発生することが明瞭に捉えられており、水柱分離が起きているとの我々の予測を支持している。その後、写真⑦, ⑧のように、水柱が再結合するに従って気泡は細かくなり、また融解して少なくなる。弁が再び開くまでに気泡は完全には消滅せずに、写真⑨, ⑩のように開いた弁から排出される。

この後、弁体が自励振動的に開いたり閉じたりする様子が観察された。これは、排水機場・ポンプ場での実機においてはあまり報告されていない現象であり、本研究の実験装置に固有の現象とも考えられるが、今後一層詳細な解析を要する。

4. 結 言

本研究では、逆流防止弁急閉鎖時の衝撃を緩和・抑制する手段を見出し一層適切な逆流防止弁設計法を探ることを目標にして、弁急閉鎖時の弁体と周囲の水流の挙動・様相を実験的に調べた。排水機場施設を模擬する小型実験装置を用いて、逆流防止弁急閉鎖時の排水管内圧力変動、弁体に生じる衝撃加速度、および弁座近傍の壁面に生ずる衝撃加速度を測定した。定常排水流れの流速、弁体の重量、および弁座角が衝撃加速度に及ぼす効果を調べた。また、弁座直近の排水管内流れの様相を高速ビデオカメラにより撮影した。

これらの測定・撮影結果から以下のことが判明した。

- (1) 逆流防止弁急閉鎖の際には 2 つの加速度ピークが発生する。1 つ目は弁体と弁座の衝突によるもの、2 つ目は水柱分離・再結合によるものと考えられる。
- (2) 弁体と弁座の衝突による衝撃を緩和するには、弁体重量を大きくすること、および弁座に角度をつけることが有効である。弁座角については 15° 程度で十分な効果が得られる。
- (3) 水柱分離・再結合による衝撃を緩和するには、逆流防止弁急閉鎖時の排水管内の圧力低下を何らかの方法で和らげることが有効と予想される。
- (4) 水柱再結合による一連の衝撃によって弁体は弁座

から離れるが、実験装置ではその後弁体が自動的に開閉した。実機ではあまり報告されていない現象であり、そのメカニズムについて今後詳しく調べる必要がある。

(2) Kruisbrink, A. C. H., "Check Valve Closure Behaviour; Experimental Investigation and Simulation in Waterhammer Computer Program," 2nd International Conference on Developments in Valves and Actuators (March 28-30, 1988, Manchester, UK).

文 献

(1) 宮本・良・石川・藤原, 逆止め弁のスラミング, エバラ時報, No.128 (1967. 8), 64-68.

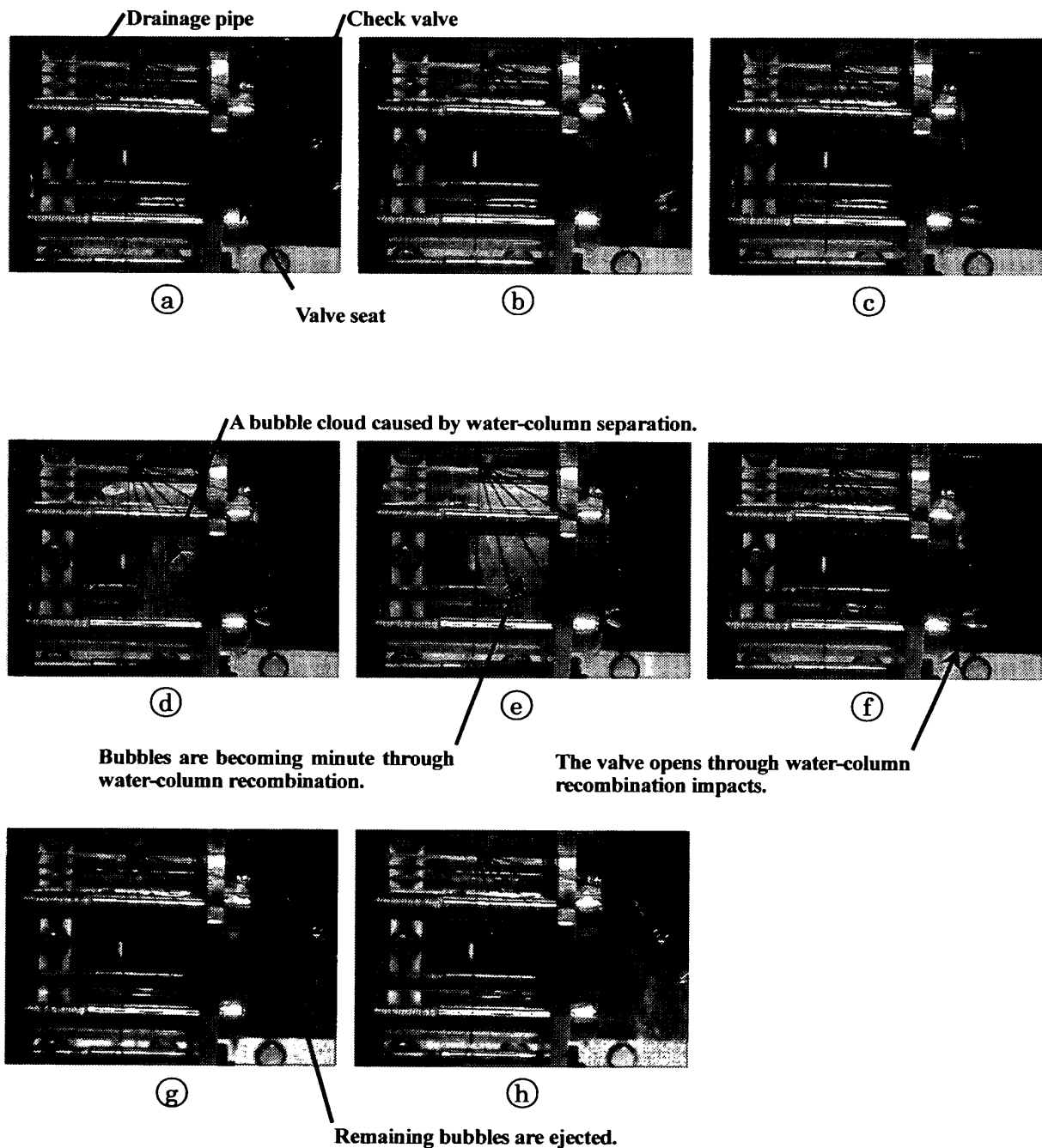


Fig.10 High speed photos of the flow field around the check valve at its sudden closure. The time interval between the photos is 1/30 sec.