

# 大規模災害に対応するサイフォン排水技術の開発 — 河道閉塞の緊急排水対策 —

武田 直人

関東地方整備局 関東技術事務所 施工調査課（〒270-2218 千葉県松戸市五香西6-12-1）

地震や豪雨により生じた大規模な土砂崩れで河道閉塞が発生した場合は、湛水部の水位上昇による決壊などを防ぐため緊急排水が必要となる。これまでポンプ排水により実施してきたが、ポンプ運転には大量の燃料が必要となることから、これを軽減することが可能な技術が求められている。

今回、動力を必要としないサイフォン原理を河道閉塞の排水に応用できると考えて実大規模のモデル実験を行った結果、サイフォン排水技術が適用可能であるとの結論が得られたので報告する。

キーワード 災害復旧，河道閉塞，サイフォン，緊急排水

## 1. はじめに

2004年（平成16年）新潟県中越地震，2008年（平成20年）岩手・宮城内陸地震などでみられたように，地震により生じた大規模な土砂崩落で河道閉塞が発生した場合（図-1<sup>1)</sup>）は，上流側で湛水による水没被害が起こり，下流側では湛水部水位上昇による決壊に伴う土石流・洪水による氾濫や土砂堆積が起こるなど，住民の生命・財産に壊滅的な被害を及ぼす可能性がある。

この様な上流部および下流部の住民に対し甚大な被害が想定される場合には，河道閉塞部の決壊を防止するため，仮排水路を開削し設置するまでの間の緊急排水対策が必要となる。

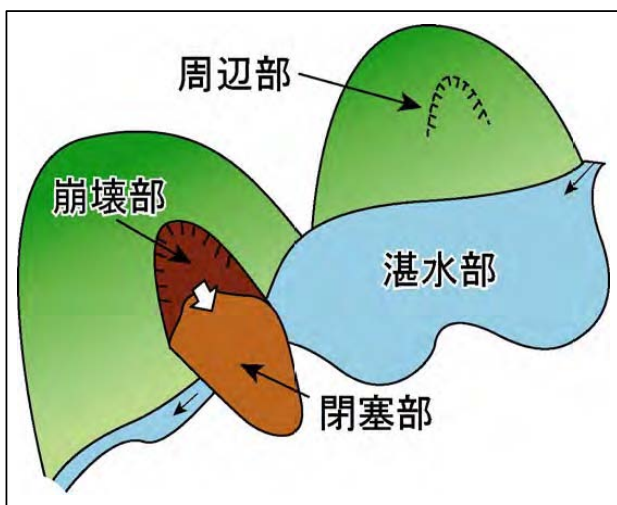


図-1 河道閉塞状況の例

## 2. 開発の背景と目的

仮排水路設置までの緊急排水について，これまで一般的には，湛水部の水位上昇による決壊を防ぐためポンプ排水で行ってきた。

事例として，災害現場におけるポンプ排水は，2004年新潟県中越地震の芋川（旧山古志村 東竹沢地区）で発生した河道閉塞において，湛水部の水位上昇による越流を防ぐため，緊急対策としてのポンプ排水（ $0.5 \text{ m}^3/\text{s} \times 12$ 台）を24時間体制で実施している<sup>2)</sup>。

このときの排水ポンプ運転は，日当たりドラム缶40本分（8,000リットル）<sup>3)</sup>の燃料を輸送し1ヶ月以上に渡る排水運転をする必要があった。

### (1) 背景

ポンプ排水では，前述のとおり長期に渡る排水作業を求められた場合，排水ポンプ運転には大量の燃料が必要となり，燃料輸送には大きな手間とそのコストがかかる。また，被災現場は山岳地であり輸送路確保が困難な場合も多いことから，これを軽減する新たな排水方式が求められている。

これを受けて，2009年（平成21年）3月に公表された「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」<sup>4)</sup>においても，大容量排水技術（サイフォン等）について開発・検討を進め，実用化の際には適用範囲を明確化すべきであるという考え方が組み込まれた。

### (2) 目的

これまでの事例から災害現場の状況などを調査・検討するとともに，河道閉塞における湛水部の水の位置エネ

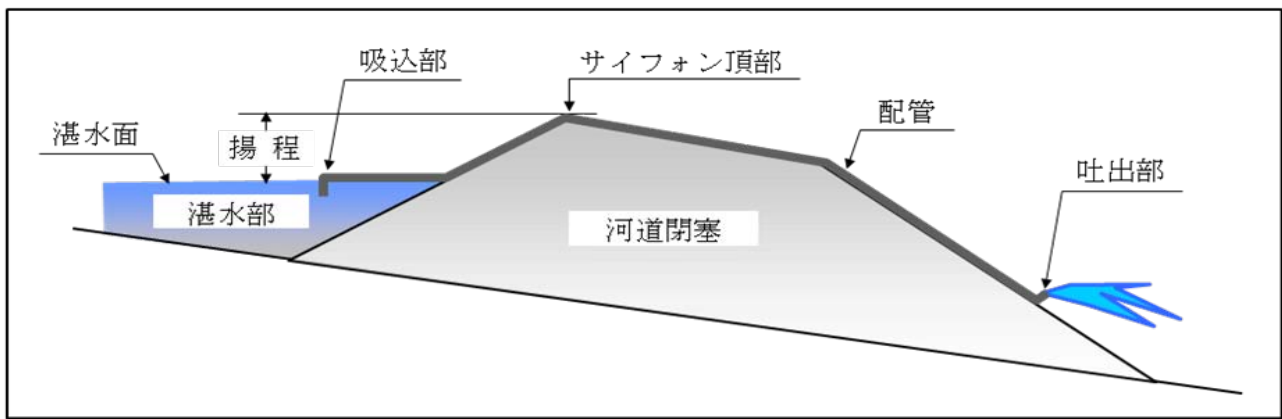


図-2 サイフォン排水のイメージ図

表-1 排水方式の比較

| 排水方式    | 配管と口径         | ポンプ仕様   | 備考                  |
|---------|---------------|---|---------------------|
| 排水ポンプ   | ホース, φ400mm   | 揚程 8m<br>排水量 0.5m <sup>3</sup> /s<br>電動機出力 60kw | ポンプ仕様は現状のメーカー仕様による  |
| サイフォン排水 | 樹脂製配管, φ400mm | 動力不要  | 動力は起動時(真空ポンプ)のみ使用する |

ルギーを利用するサイフォン排水(図-2)の適用性の判断をするため大口径(φ400mm)の実験管路によるモデル実験を行い、それらの成果をもとに「河道閉塞に対応するサイフォン排水導入マニュアル(案)」をとりまとめたものである。

### 3. サイフォン排水技術の導入検討

#### (1) サイフォン排水技術の特徴と導入課題

##### a) 特徴

サイフォン排水の性能を検討するため、2004年新潟県中越地震の芋川河道閉塞への対応を例として、配管口径φ400mm、配管長250m<sup>2</sup>のポンプ排水とサイフォン排水の排水能力比較を行いその特徴を整理した。両方式の諸元を表-1に示す。

##### ① 揚程が低いほど有効

同じ口径でサイフォン排水の流量とポンプ排水の流量を計算により求めて比較した結果(図-3)、概ね同程度の能力が得られるが、サイフォン排水の特徴として、揚程が低い場合にはポンプ排水より流量が大きい傾向がみられる。すなわち、湛水部水位が高くなり決壊の危険が迫ったとき(実揚程が低いとき)ほど流量が多く、新たな排水方式としての活用が期待される。

##### ② 燃料輸送の手間の軽減

ポンプ排水は、排水運転の間に継続して発電機の燃料補給を必要とするが、サイフォン排水は、サイフォン起動時に真空ポンプを短時間運転するのみで、それ以降は動力を必要としないことから燃料輸送の手間はかからないため、燃料輸送に苦慮したと言われているポンプ排水における課題を解消できるといえる。

##### b) 導入課題

これまでサイフォン排水は、河道閉塞が発生した場

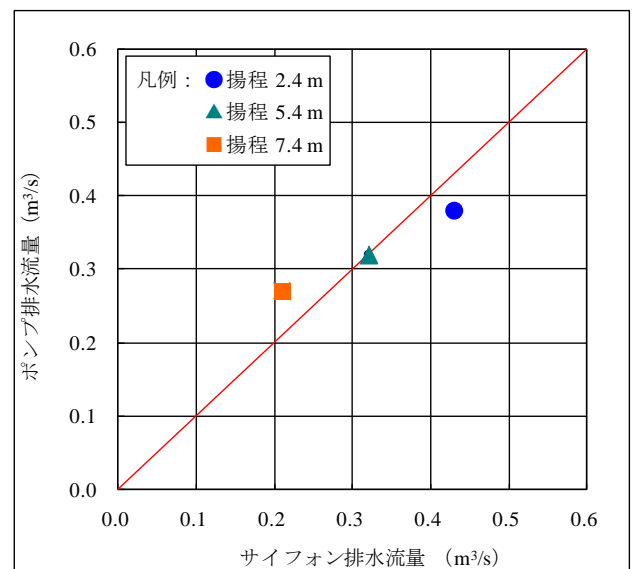


図-3 排水流量の比較

合に実施要望はあったが、実際の設置・排水運転の見聞がなく、まだ現場導入の実績はなかった。

#### (2) サイフォン排水技術の適用限界と限界条件

##### a) 適用限界

サイフォン配管内の圧力は、配管頂部で最低(最大負圧)となり、理論上は-10.3mまでと考えられるが、実際には、圧力が下がると、水中から気泡が発生し頂部に溜まってしまうので、サイフォン頂部の限界圧力水頭は-7m~-8.5mにとるのが実用的とされている<sup>9)</sup>。

したがって、サイフォンでうまく水が流れるどうか調べるには、エネルギー式を用いて、サイフォン頂部の圧力水頭を求め、その値が-7m~-8.5m以上であるかどうかチェックすれば良いと考えられる。

##### b) 限界条件

しかし、これまで河道閉塞での実績がないことから、

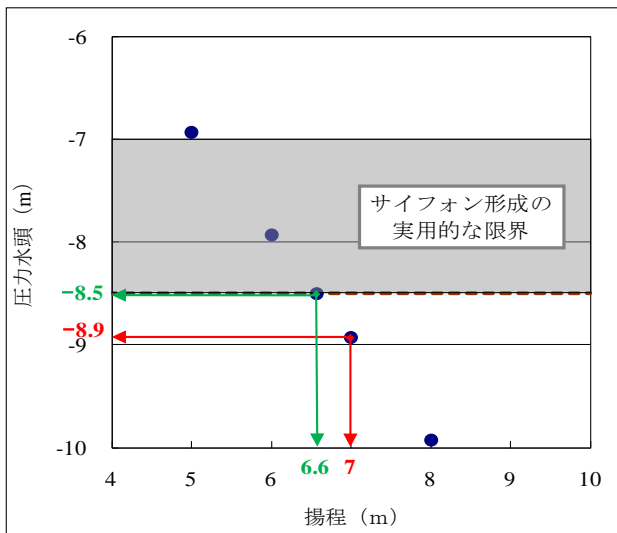


図-4 揚程と圧力水頭の関係

前述のサイフォン形成の実用的な限界を適用することが可能であるかを確認する必要があった。そこで、揚程に対する圧力水頭を計算し、水理計算上で限界圧力水頭-8.5mを越え十分な負圧を得られる条件として、圧力水頭-8.9mが得られる揚程7mを今回の実験の条件として設定した(図-4)。

圧力水頭については、一般的なサイフォン排水モデル(図-5)を使い、次に示すエネルギー式<sup>9)</sup>(1)~(3)で求めることができる。

$$H_A = H_B + \left\{ K_e + (n_1 + n_2) \cdot K_b + K_v + 1 + f \frac{(L_1 + L_2)}{D} \right\} \left( \frac{v^2}{2g} \right) \quad (1)$$

$$= Z_c + \frac{P_c}{\rho g} + \left( 1 + K_e + n_1 \cdot K_b + f \frac{L_1}{D} \right) \left( \frac{v^2}{2g} \right)$$

$h = H_A - H_B$ と表せば、(1)式から管内流速  $v$  は、(2)式となる。

$$v = \sqrt{\frac{2gh}{K_e + (n_1 + n_2) \cdot K_b + K_v + 1 + f \frac{(L_1 + L_2)}{D}}} \quad (2)$$

配管頂部C点の圧力水頭  $\frac{P_c}{\rho g}$  は、(1)式に(2)式を代入

して得られる(3)式で求める。

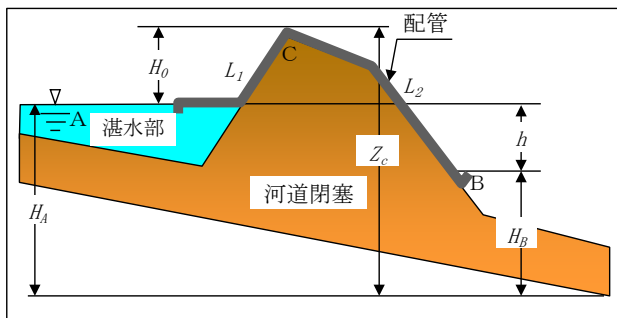


図-5 サイフォン排水モデル

$$\frac{P_c}{\rho g} = (H_A - Z_c) - \left\{ \frac{1 + K_e + n_1 \cdot K_b + f \frac{L_1}{D}}{K_e + (n_1 + n_2) \cdot K_b + K_v + 1 + f \left( \frac{L_1 + L_2}{D} \right)} \right\} h \quad (3)$$

ここに、 $H_A$ : 河道閉塞部湛水面標高 (m)、 $H_B$ : 吐出口標高 (m)、 $Z_c$ : 配管頂部標高 (m)、 $h$ : 河道閉塞部湛水面と吐出口の標高差 (m)、 $H_0$ : 揚程 (m)、 $L_1$ : 吸込み側配管長 (m)、 $L_2$ : 吐出側配管長 (m)、 $D$ : 配管径 (m)、 $K_e$ : 入口損失係数、 $K_b$ : 曲部損失係数、 $K_v$ : 吐出バルブ損失係数、 $f$ : 管摩擦損失係数、 $n_1$ : 吸込側の曲部の数、 $n_2$ : 吐出側の曲部の数、 $v$ : 管内流速 (m/s)、 $P$ : 水圧 ( $\text{kgf/m}^2$ )、 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )、 $g$ : 重力加速度  $9.806 \text{ (m/s}^2)$  とする。

#### 4. サイフォン排水モデル実験の内容

##### (1) モデル実験の目的

前述のとおりサイフォン排水技術の導入課題を解消するため、サイフォン排水の適用条件を確認する必要がある。そこで、サイフォン排水の限界条件が正しいかどうか、実大規模のモデル実験で確かめてみることにした。

今回の実験では、(1) サイフォン形成の確認、(2) サイフォン適用限界の確認、(3) 気泡発生時における気泡の解消の確認を行うため、サイフォン排水技術検証に必要となる知見、情報の収集を行った。

##### (2) モデル実験設備

実験設備は、多摩川の河口から22.4km地点に位置する二ヶ領宿河原堰の湛水を河道閉塞の湛水部に見立て、枠組足場で河道閉塞部を模擬し、水面から7m(揚程)の高さを乗り越えて下流側の河床に排水するものとした。

##### (図-6および写真-1)

次に、実験する上で留意し施工した点を述べる。

##### a) 配管の口径と材質

延長75mの配管には、2004年新潟県中越地震の芋川河道閉塞部で実績のあるポンプ排水の口径 $\phi 400\text{mm}$ を選択した。また、材質は可撓性・強度に優れる樹脂製の高密度ポリエチレン管(HDPE)を主要部に使用した。

##### b) 吸込部

吸込部は、表面取水となる配置とし、ゴミの吸込防止を目的としたスクリーンを設けた。

##### c) 配管頂部

配管の最も高くなる位置には、最大負圧の状態における管内の様子を目視するため、長さ1mの透明管を挿入した。

##### d) 吐出部

吐出部には、サイフォン形成や起動・停止・流量制御のためのバタフライバルブ(以下バルブとする。)を吐出端に設けた。また、吐出部の配管をV字形状としているのは、サイフォン形成後の排水している途中で、管端

から空気を吸い込んでサイフォン機能を果たせず排水できなくなることを防ぐ機能を持たせるためである。

## 5. サイフォン排水モデル実験の結果

### (1) サイフォン形成試験

配管口径  $\phi 400$  mm, 配管長 75m の実験管路において、まず吐出側のバルブを閉じ、排気能力  $1\text{m}^3/\text{min}$  の真空ポンプで配管内の空気の排気を行うことにより、約 12 分

で満水状態となった。その後、バルブを開けていくとあらかじめ排水できることを確認した。

このような排水までの操作手順を習得してから次に示す試験を実施した。

### (2) サイフォン適用限界試験

サイフォン排水では、前述のとおり配管頂部で負圧となりサイフォン排水を継続できる限界があると考えられることから、水理計算上で限界と考えられる条件（揚程 7m）でのモデル実験を行い流れの状態を観測した。

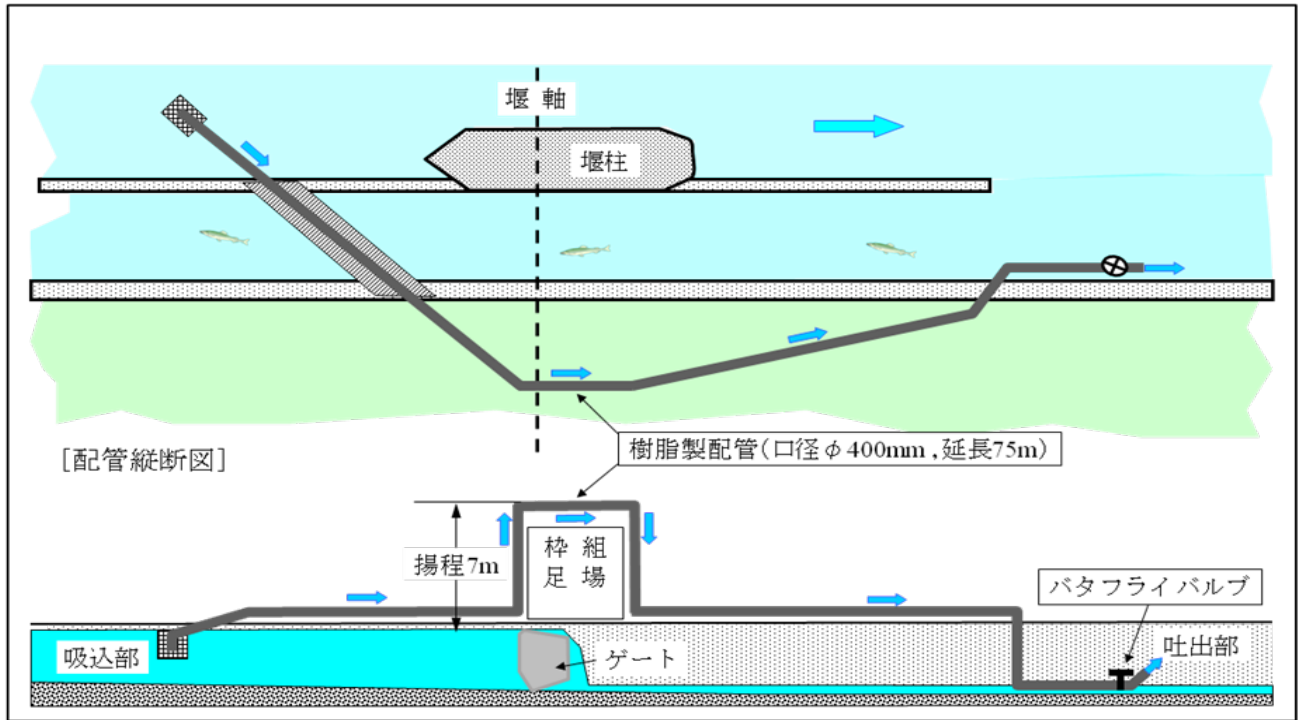


図-6 モデル実験の配管図

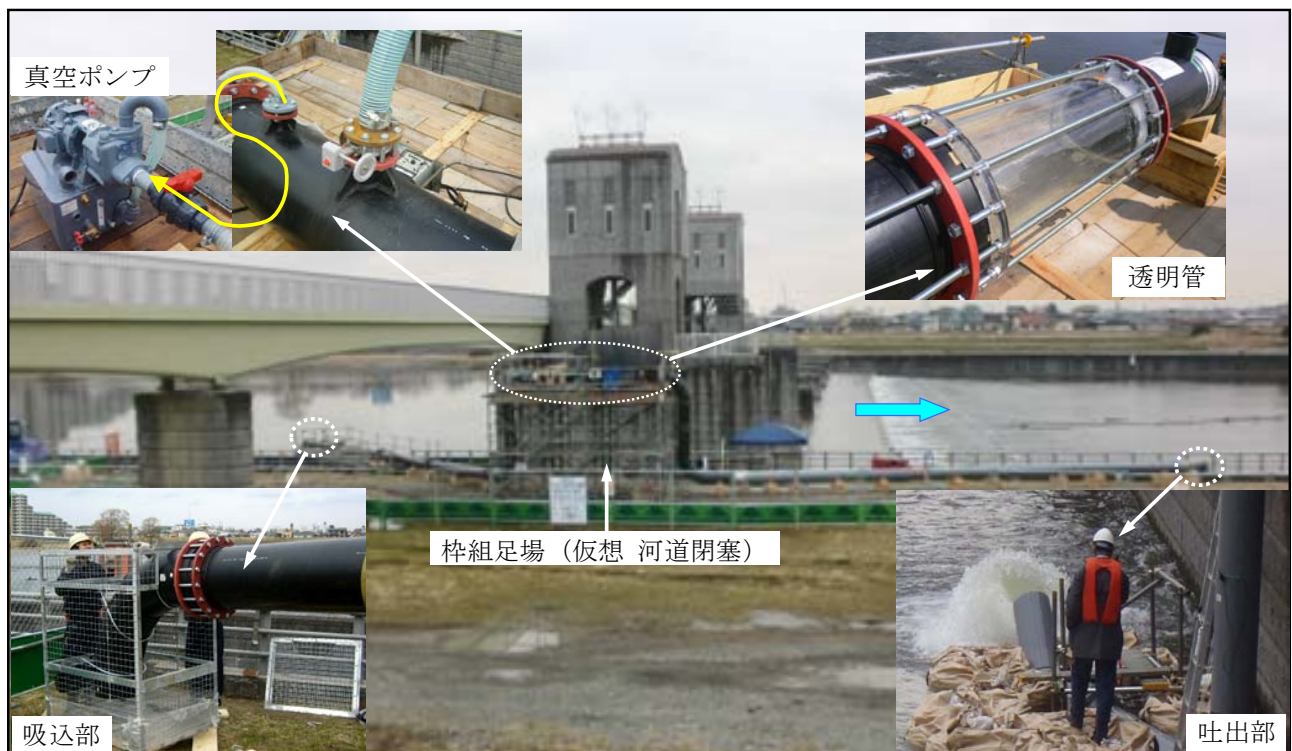


写真-1 モデル実験設備

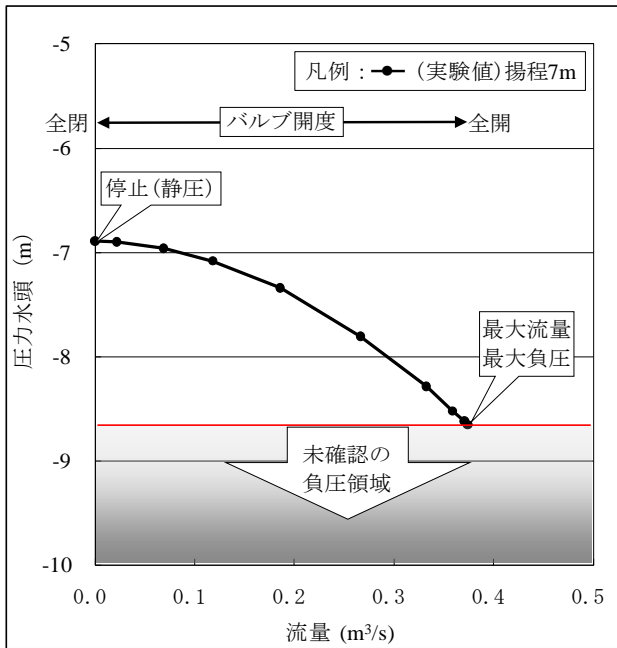


図-7 (実験値) 流量と配管頂部の圧力水頭

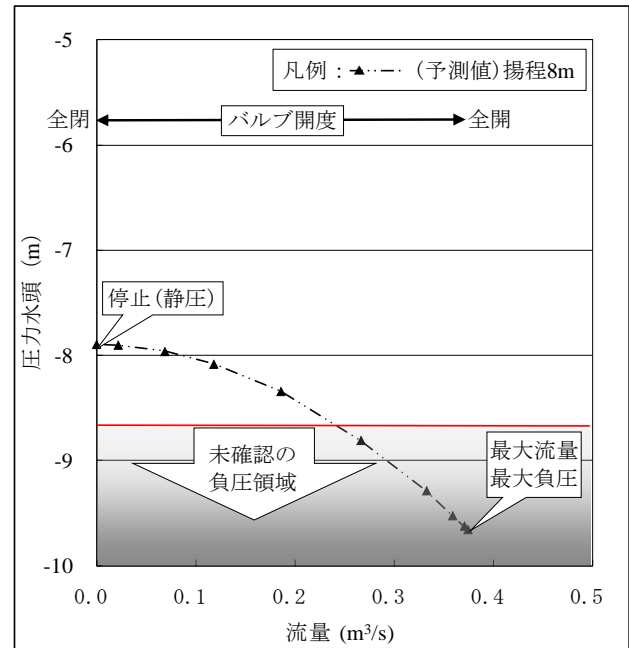


図-8 (予測値) 流量と配管頂部の圧力水頭

表-2 (実験値) バルブ開度による流量と配管頂部の圧力水頭

| バルブ開度 (°) | 0(全閉) | 10    | 20    | 30    | 40    | 50    | 60    | 70    | 80    | 90(全開) |
|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 圧力水頭 (m)  | -6.89 | -6.90 | -6.96 | -7.08 | -7.34 | -7.81 | -8.28 | -8.52 | -8.62 | -8.65  |
| 流量 (m³/s) | 0.00  | 0.02  | 0.07  | 0.12  | 0.19  | 0.27  | 0.33  | 0.36  | 0.37  | 0.37   |

管路を満水状態とした後、バルブを徐々に開いた際の配管の流量と配管頂部の圧力水頭の関係を図-7に示す。流量の増加につれて配管内の圧力は低下し、最大流量時点で最大負圧が約-8.7mとなった。このとき配管頂部の透明管において気泡が確認されたことから、揚程7m程度が安定的な排水の限度と考えた。なお、気泡の発生による配管への損傷などの影響はなかった。

また、モデル実験では、気泡の発生や配管挙動について確認するとともに、バルブ開度を段階的に開けながら配管内の圧力と流量を計測した(表-2)。

### (3) 気泡発生時における気泡の解消試験

この実験では、写真-2に示すとおり、ある程度負圧が大きくなって気泡が発生し配管頂部に相当量の空気が滞留した場合でも、水の流れ(流量)で管内の残りの気泡を無事に排水できることを確認した。

### (4) 考察

#### a) 揚程7mを越える場合の排水方法

河道閉塞では、その規模・形態が様々であることから、モデル実験で得た安定的な排水限度である揚程7mを越

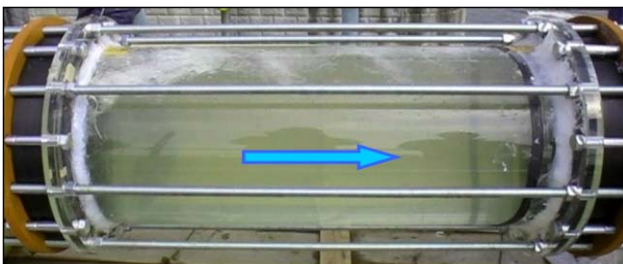


写真-2 気泡が流される状況

えないように設定することが難しい場合もある。

そこで、仮に揚程8mとして、配管の流量と配管頂部の圧力水頭の関係を手算計算により求めると図-8のとおりとなる。これによれば、バルブ全開時の最大圧力が、サイフォン適用限界の理論値-10.3m付近まで達することから、サイフォン形成を保持するため気泡の発生に注意を払いながらバルブ開度を絞ることで流量は減るが排水は継続できると推測する。

#### b) 配管条件の変更による計算結果

河道閉塞は、その規模・形態が様々であり、その数だけ配管条件が無数に存在することから、モデル実験に用いた配管の口径や長さを仮に変更した場合について、前述のエネルギー式を用いて圧力水頭・流量を計算すると次のようになる(表-3)。

- ① 配管口径を大きく(φ600mm)した場合は、流量(流速)が増加し、圧力水頭が低下(-8.97m)する。
- ② 配管長を長く(L=250m)した場合は、流量(流速)が減少し、圧力水頭が上昇(-8.57m)する。

災害現場においては、河道閉塞の規模・形態が異なることから、その都度現場に合わせて配管ルートと配管条

表-3 モデル実験の配管条件を変更したときの計算結果

| 配管条件                                | 圧力水頭(m) | 流量(m³/s) | 備考               |
|-------------------------------------|---------|----------|------------------|
| ①揚程7m, φ600mm <sup>*1</sup> , L=75m | -8.97   | 0.97     | *1国内入手可能最大口径     |
| ②揚程7m, φ400mm, L=250m <sup>*2</sup> | -8.57   | 0.26     | *2中越地震東竹沢地区のホース長 |
| 揚程7m, φ400mm, L=75m                 | -8.65   | 0.37     | モデル実験設備          |

件（口径・長さ）を決めて、配管頂部圧力や流量などの計算チェックをすることが必要になる。

## 6. 結論

これまで河道閉塞でサイフォン排水の導入実績はなかったが、今回、実大規模のモデル実験を行った結果、サイフォン排水技術が適用可能であることが解った。

このことから、河道閉塞の緊急排水対策の新たな選択肢として位置付けられるものと思料する。

### (1) モデル実験の条件

- a) 揚程7m, 配管口径φ400mm, 配管長75m
- b) 樹脂製配管, サイフォン形成時に必要な真空ポンプおよびバタフライバルブ

### (2) サイフォン排水適用性の判断

災害現場を想定し一例として、表-3の①と②の条件を組み合わせた場合には、表-4に示すとおり、圧力水頭はモデル実験で確認したサイフォン排水の実用的な限界値に達しない値であり、流量は口径を大きくしたことで増加することが解り、サイフォン排水が適用できると判断される。

このように、災害現場でモデル実験に用いた条件を変更して適用する場合でも、配管の口径や長さなどの要素から前述のエネルギー式を用いて、圧力水頭を求めて検討を行うことにより、サイフォン排水適用性の判断ができると考える。

## 7. サイフォン排水導入マニュアル（案）の作成

「大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方（提言）」<sup>4)</sup>で述べられている事項およびサイフォン排水モデル実験で得られた知見を活用して「河道閉塞に対応するサイフォン排水導入マニュアル(案)」を作成した。

これは、河道閉塞が発生した場合の災害現地の指揮官あるいは応急施工責任者が使用することを想定したもので、国土交通省関係部局および地方整備局で構成する検討会の技術的助言を得てとりまとめた。

構成内容としては、サイフォン排水を円滑・確実にを行うため、サイフォン排水適用性の判断方法とサイフォンを用いるにあたり必要となる技術的要点をとりまとめたもので、次に主な項目を示す。

### (1) サイフォン排水導入フロー

サイフォン排水導入の流れは、サイフォン排水適用性の判断から始まり、現地調査を基に具体的な施工方法・配管材などを決定し、河道閉塞の湛水部への流入量など

から十分な排水量が得られるかを確認する。

### (2) サイフォン排水適用性の判断

河道閉塞対策として、揚程 7m 以下などの条件からサイフォン排水が適しているかを判断する。

### (3) 配管材・口径の選定

現場条件（凹凸など）や被害の危険性が切迫する状況に応じて、管材入手までの時間を考慮して選定する。

### (4) サイフォン排水適用のシミュレーション

河道閉塞への対応要請があった時点から排水開始までの作業内容と必要な日数を模擬した。

## 8. おわりに

サイフォン排水技術は、まだ現場に導入された実績はないが、大規模な河道閉塞が発生した際には、本技術を適用することで、災害現場において燃料輸送を行うことなく排水作業が可能になると考えられる。特に長期に渡る排水作業が必要となる現場では、その効果が大きくなるものと期待される。

今回は実大規模のモデル実験を行った結果、サイフォン排水技術が適用可能であることを報告することができた。今後は本技術が災害現場の悪条件においても速やかに設置可能な機材の設計検討を進めるとともに、機材の備蓄方法や本技術を適用する際の運用方策などを明らかにする必要がある。そのために、実験の積み重ねや本技術の実働経験を反映させていきたいと考えている。

謝辞：本論文の作成にあたり、関東地方整備局京浜河川事務所の方々にはモデル実験の現場提供に御協力頂きました。ここに謝意を表します。

### 参考文献

- 1) 独立行政法人土木研究所:天然ダム監視技術マニュアル(案), 土木研究所資料第4121号, p2, 2008.12
- 2) 新田恭士：新潟県中越地震の災害復旧現場から「芋川河道閉塞対応におけるポンプ排水」、ぽんぷ（社団法人河川ポンプ施設技術協会）、No.33, p43, 2005.3
- 3) 国土交通省北陸地方整備局：新潟県中越地震-北陸地方整備局のこの一年-, 第7章参考資料 第4節ヘリコプター・災害対策用建設機械等の出動状況 2災害対策用建設機械等 3-b電源確保の重要性, 2009.12
- 4) 国土交通省 大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理に関する検討委員会：大規模な河道閉塞（天然ダム）の危機管理のあり方について（提言）、3.天然ダムの危機管理のあり方 3-5対策工事 (2)排水対策, 2009.3
- 5) 社団法人土木学会：土木工学ハンドブック第四版 I ,p491, 1989.11
- 6) 井上和也, 澤井健二, 後野正雄, 石垣泰輔, 戸田圭一, 綾史郎：図説 わかる水理学, 株式会社学芸出版社, pp.82-84, 2008.9

表-4 配管条件を組合せたときの計算結果

| 配管条件                 | 圧力水頭(m) | 流量(m <sup>3</sup> /s) | 備考          |
|----------------------|---------|-----------------------|-------------|
| 揚程7m, φ600mm, L=250m | -8.63   | 0.69                  | 表-3の①と②の組合せ |
| 揚程7m, φ400mm, L=75m  | -8.65   | 0.37                  | モデル実験設備     |