

32. 大規模災害に対応するサイフォン排水技術の開発

—河道閉塞部の緊急排水対策—

国土交通省 関東地方整備局 関東技術事務所 武田 直人

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-1¹⁾）は、湛水部の水位が上昇し決壊などによる被害が想定されるため、仮排水路を設置するまでの間の緊急排水対策が必要となる。

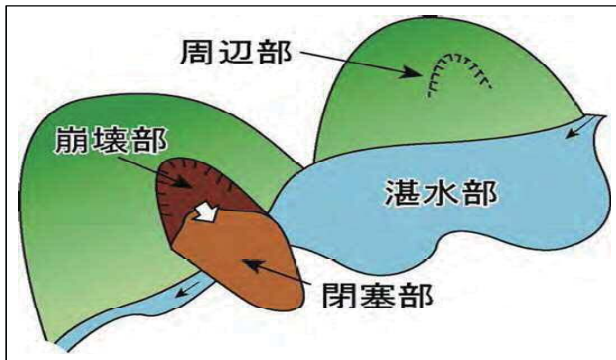


図-1 河道閉塞状況の例

2. 開発の背景と目的

仮排水路設置までの緊急排水は、これまでポンプ排水で行ってきたが、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り、被災現場では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）」²⁾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。

そこで、これまでの事例から災害現地の状況などを調査・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った。

3. サイフォン排水技術の導入検討

3.1 サイフォン排水技術の特徴と導入課題

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での課題を解消できるといえる。

これまでもサイフォン排水は、河道閉塞が発生した場合に実施要望はあったが、実際の設置・排水運転の知見がなく、まだ現場導入の実績はなかった。

3.2 サイフォン排水技術の適用限界

サイフォン配管内の圧力は、配管頂部で最低

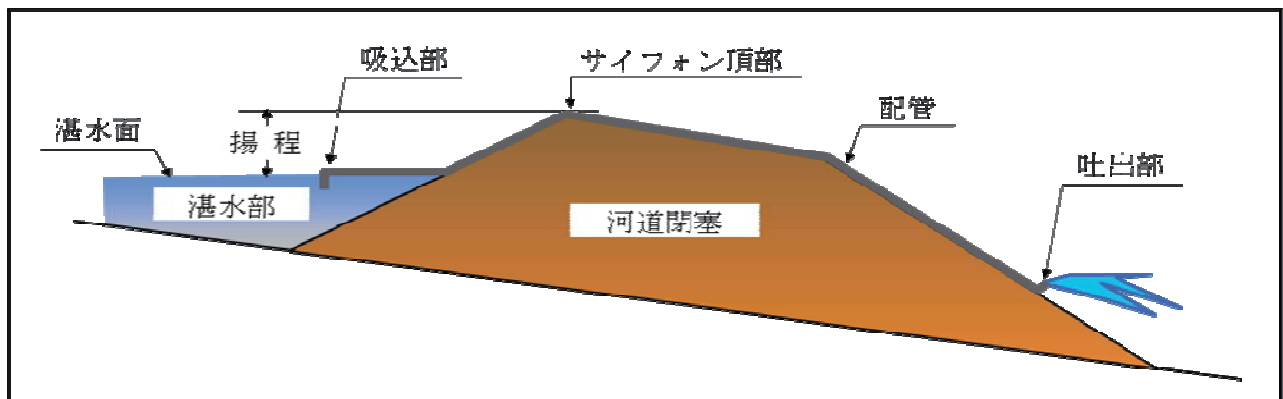


図-2 サイフォン排水のイメージ図

(最大負圧) となり、その限度は理論上-10.3m までとされるが、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³⁾。

しかし、これまで河道閉塞での実績がないことから、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 を適用限界の条件として設定した。

4. サイフォン排水モデル実験の内容

4.1 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。

4.2 モデル実験設備

実験設備(図-3・写真-1)は、多摩川の二

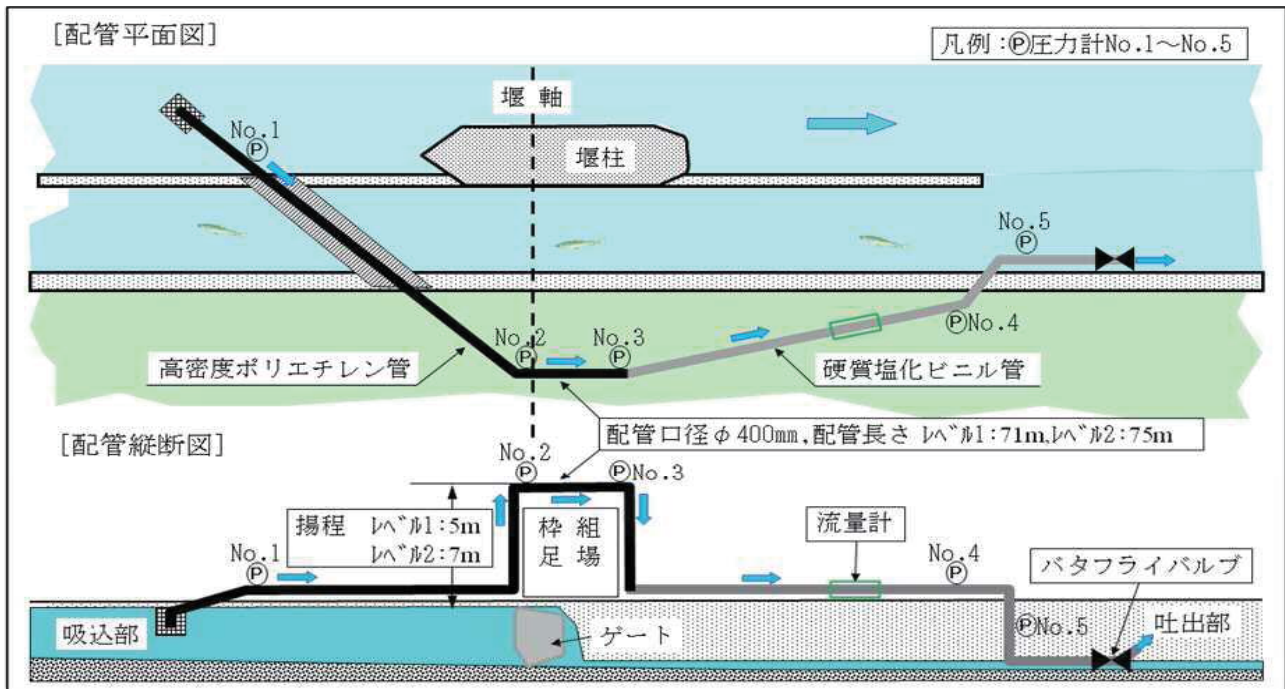


図-3 モデル実験の配管図



写真-1 モデル実験設備

ヶ領宿河原堰の湛水を河道閉塞で生じた湛水部に見立て、枠組足場で河道閉塞部を模擬し、これ乗り越えて下流側の河床に排水するものとした。河道閉塞部を乗り越える配管の水面からの高さは 5m（レベル 1：配管長 71m）と 7m（レベル 2：配管長 75m）の 2 条件を設定した。

配管の 5 箇所（No.1～No.5）に圧力計を設置し、吐出部にバタフライバルブ（以下バルブとする。）を設置した。また、配管材料は現場条件などにより選択することを考慮して、今回の実験では、吸込部から枠組足場を乗り越える間には高密度ポリエチレン管とし、それ以降吐出部までは硬質塩化ビニル管を用いた（図-3）。

5. サイフォン排水モデル実験の結果

5.1 サイフォン形成試験（レベル 1）

この試験は、サイフォンを形成する手順の習得及び排水時の流量と配管各部圧力の関係を把握するために行った。サイフォン排水は、まず吐出側バタフライバルブを閉じて真空ポンプ（排気能力 $1\text{m}^3/\text{min}$ ）により配管内の空気を排出して管内を充水した後、バタフライバルブを段階的に開放することでなめらかに排水が始まることを確認した。

真空ポンプで充水作業を行いサイフォンを形成させた後、バルブを段階的に開けて排水しながら計測した各部（No.1～No.5）圧力と流量の記録を図-4 に示す。バルブを開き流量の増加につれて配管内の各部圧力は低下し、最大流量時点で各部の圧力は最小（最大負圧）となる。配管頂部の No.3 の圧力は約-63kPa となった。

最小圧力となる配管頂部の No.3 の圧力を水

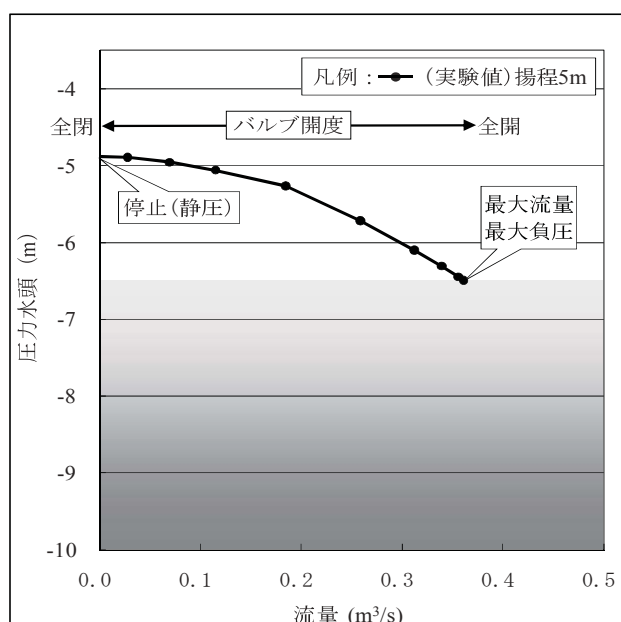


図-5 流量と配管頂部の圧力水頭（レベル 1）

柱換算でメートル表示した数値とバルブを段階的に開いた際の流量との関係を図-5 に示す。最大流量時点で最小圧力水頭が約-6.5m となった。このとき、配管頂部の透明管において気泡の発生は確認されてなかった。

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。

5.2 サイフォン適用限界試験（レベル 2）

この試験は、前述のとおりサイフォン排水では配管頂部で負圧となりサイフォン排水を形成できる圧力水頭の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）での試験を行い、気泡の発生や配管挙動について確認したものである。

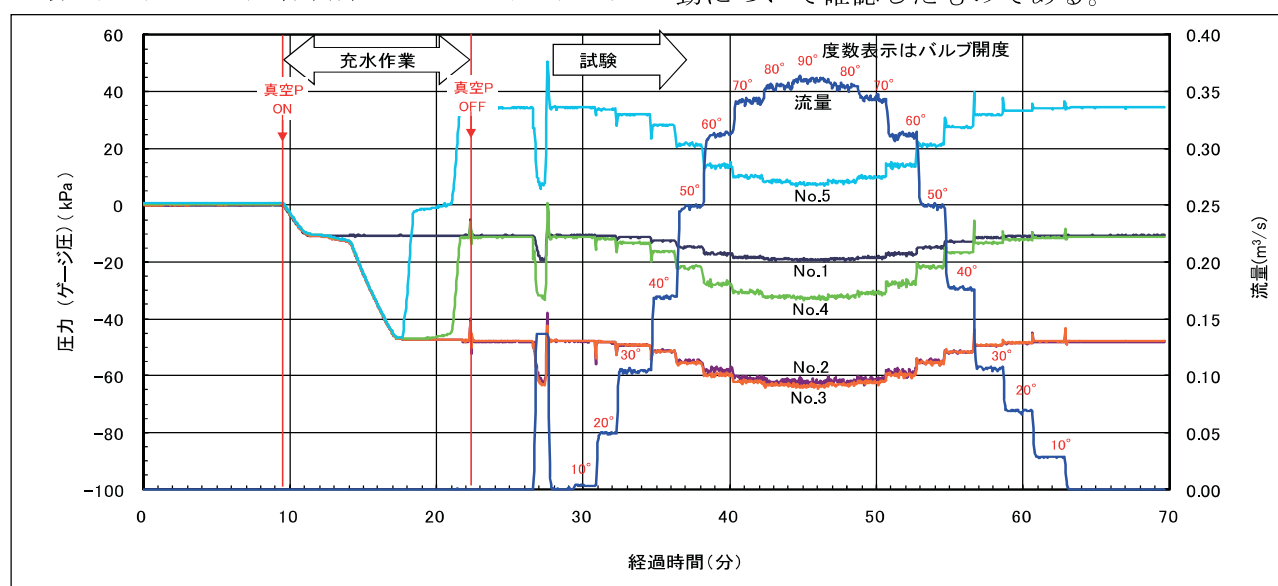


図-4 時間経過による各部圧力と流量（レベル 1）

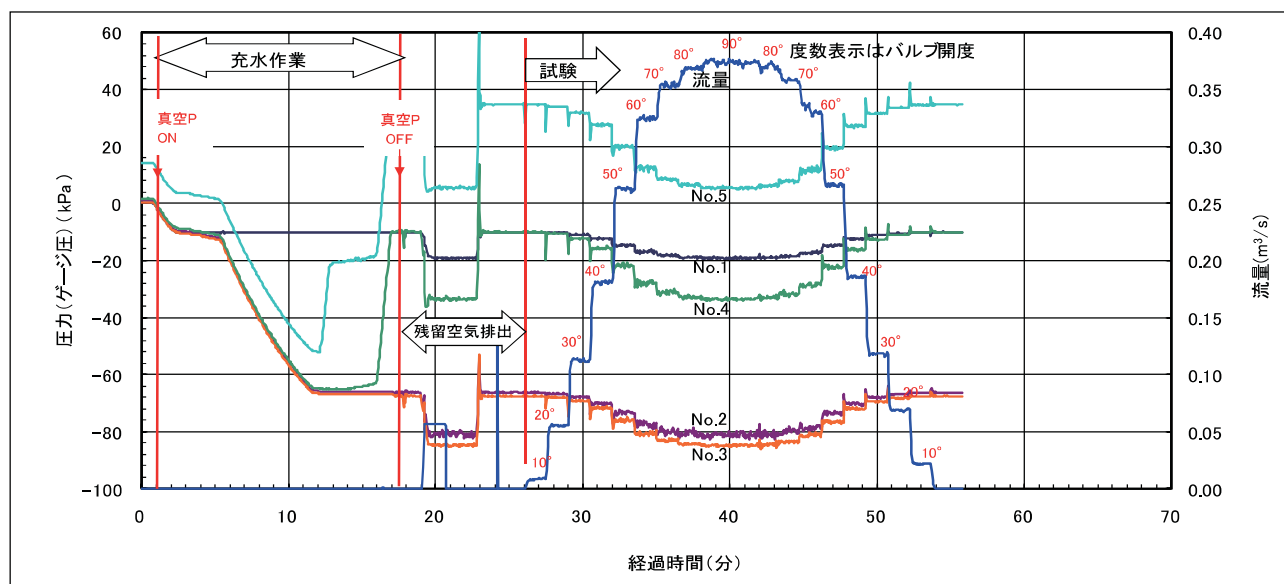


図-6 時間経過による各部圧力と流量（レベル2）

レベル1と同様な操作を行い各部圧力と流量を計測した関係を図-6に示す。残留空気を排出し管路を満水状態とした後、バルブを開き流量の増加につれて配管内の各部圧力は低下し、No.3の最小圧力は約-85kPaとなった。

レベル1と同様に水柱換算した圧力を図-7に示す。最大流量時点で最小圧力水頭が約-8.7mとなった。このとき配管頂部の透明管において気泡の発生が確認されたが、空気の滞留や配管への異常な振動などの影響が認められなかったことから、適用限界として設定した揚程7m程度が安定的な排水の限度と考えた。なお、

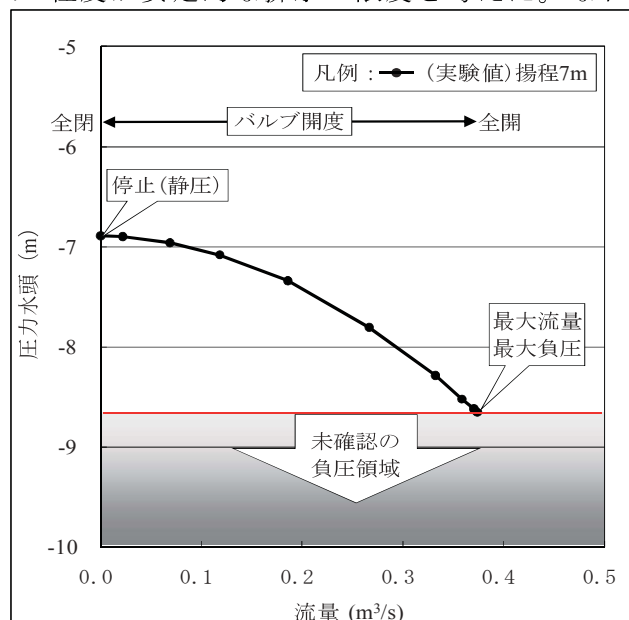


図-7 流量と配管頂部の圧力水頭（レベル2）

参考にバルブ開度の各段階毎のNo.3の水柱換算値を表-1に示す。

5.3 滞留空気の排出試験（レベル2）

配管頂部が負圧となるサイフォン配管では、気泡が発生し空気の滞留があると流れが分断されることが懸念されている。その配管頂部に空気が滞留する原因としては、サイフォン形成する際、配管内を満水にする操作で空気排出が不十分であった場合や、配管にわずかに空気漏れがあるため排水停止状態で放置している間に溜まる場合などが想定される。

しかしながらこの試験では、圧力水頭が約-6.9mのとき、配管頂部に空気が滞留している状態でも、排水を開始すれば空気塊は流れに乗って排出されることを確認した（写真-2）。また、試験では管断面の半分程度まで空気が溜まった状態においても排水できることを確認している。

5.4 モデル実験結果の考察

(1) 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を越えないように設定すること

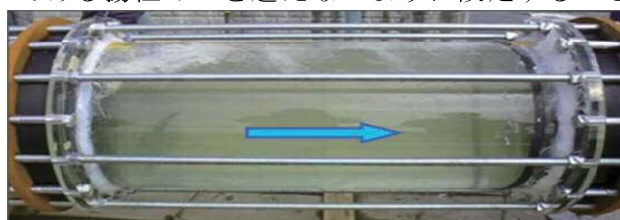


写真-2 滞留した空気が流される状況

表-1 （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

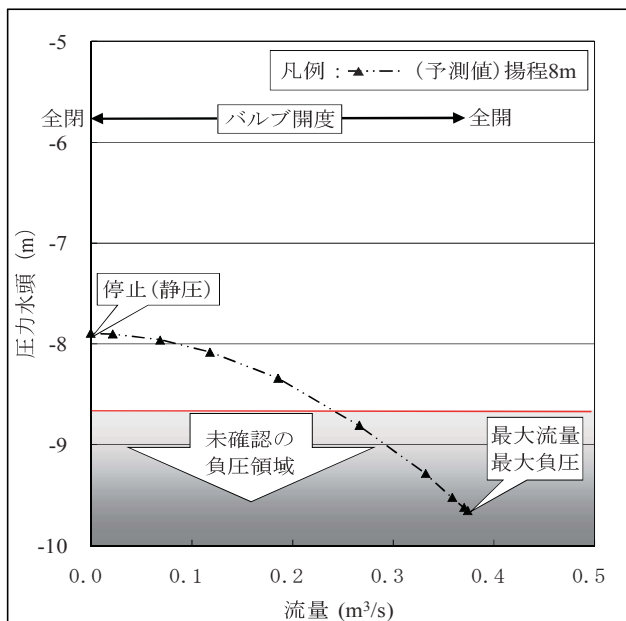


図-8 予測値 流量と配管頂部の圧力水頭（レベル2）

が難しい場合もある。

そこで図-8 は、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示す。

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気泡の発生はさらに激しくなるものと予想される。このとき、排水に不都合を生じるようであればバルブ開度を閉じ加減にして流量 $0.25\text{m}^3/\text{s}$ 程度を維持すれば、圧力水頭は適用限界試験で確認した値（約-8.7m）まで回復し、流量は減少するものの安定して排水できることが推測される。

(2) 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、圧力水頭・流量を計算すると次のようになる（表-2）。

- ① 配管口径を大きく（ $\phi 600\text{mm}$ ）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（ $L=250\text{m}$ ）した場合は、流量（流速）が減少し、圧力水頭が上昇

表-2 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 (m^3/s)	備 考
① 揚程 7m, $\phi 600\text{mm}^{*1}$, $L=75\text{m}$	-8.97	0.97	*1 国内入手可能最大口径(調査結果)
② 揚程 7m, $\phi 400\text{mm}$, $L=250\text{m}^{*2}$	-8.57	0.26	*2 中越地震東竹沢地区のホース長
揚程 7m, $\phi 400\text{mm}$, $L=75\text{m}$	-8.65	0.37	モデル実験設備

（-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. 配管継手の要素試験の内容と結果

災害現場に配置される配管は、通常の配管と異なり不整地に設置することから、地表の凹凸に追従可能な特性を備えていることが求められる。そこで、モデル実験で取り上げた2種類の樹脂製の管について、曲げやすさと継手部の性能を把握するため曲げ試験を行った。試験体は、継ぎ手部を含む長さ 20m の管断面の 90%を水で満たした後に管の両端を閉塞させて-80kPa まで残留空気を排出した状態とし、両端をクレーンで段階的に吊り上げて、管体と継ぎ手部の状態を観察した。

6.1 高密度ポリエチレン管（HDPE管）の要素試験

高密度ポリエチレン管の要素試験状況を写真-3に示す。管端の吊り上げ高さは3.5mである。写真-3の状態における曲率半径を求めると $R=19.6\text{m}$ であった。



写真-3 高密度ポリエチレン管の継手要素試験

さらに4mまで吊り上げた結果、管の座屈が生じた（写真-4）。このときの曲率半径は $R=8.9\text{m}$ であった。



写真-4 高密度ポリエチレン管の変形状況

6.2 硬質塩化ビニル管（VU管）の要素試験

硬質塩化ビニル管の要素試験状況を写真-5



写真-5 硬質塩化ビニル管の継手要素試験

に示す。管端の吊り上げ高さは 2.5m である。塩化ビニル管は管自体の変形は僅かであり、継手の変形が著しい。

写真-6に示すように継手の下側は5cm抜け出し、上側はめくれるように変形した。このときの曲率半径は $R=13.9\text{m}$ であった。接着式は強制変位を受けたとき継手として十分でなく、吊り上げを止めたときには当該箇所でも水漏れが確認された。



写真-6 硬質塩化ビニル管の変形状況

6.3 要素試験結果の考察

高密度ポリエチレン管の継手に用いたフランジ継手は、管本体に座屈が生じても支障がなかったことから、管本体に比べて堅固であることが解った。

硬質塩化ビニル管の継手に用いた接着式継手は、管本体より先に変形を生じて気密保持が困難となった。災害現場での使用には可とう性継手を用いる必要があることが解った。

7. 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り、サイフォン排水手法を確立することができた。

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。

7.1 モデル実験の条件

- (1) 適用条件は、揚程7m、配管口径 $\phi 400\text{mm}$ 、配管長75m
- (2) 適用システムは、実験設備の機器構成である樹脂製配管、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

7.2 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-2の①と②の条件を組み合わせた場合には、表-3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分かり、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

表-3 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^3/s)	備 考
揚程7m, $\phi 600\text{mm}$, L=250m	-8.63	0.69	表-2の①と②の 組合せ
揚程7m, $\phi 400\text{mm}$, L=75m	-8.65	0.37	モデル実験設備

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、水理計算により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。

7.3 樹脂製の管の選定

災害現場の条件によりやむを得ず極端な不陸に配管を設置しなければならない場合は、曲率半径が小さくとれる配管材料を用いて曲げに対して強い継ぎ手構造を選択する必要がある。また、ある程度の整地がなされているような現場であれば配管材料の選択肢は多くなるといえる。

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、災害現場の悪条件に対して、機動的に設置することが必要であるため、機材の備蓄方法の検討や機材の改良設計の検討を進めて、災害の実例を反映して設置方法の習得をし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, p.2, 2008.12
- 2) 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
- 3) 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