自動空気排除装置を用いた長距離サイホン管における水理性能の現地検証

高橋研二¹・小倉邦雄²・稲垣仁根³

Field Verification of Hydraulic Performance in Long-distance Siphon Pipe using Automatic Air Evacuation System

Kenji Takahashi¹, Kunio Ogura² and Hitone Inagaki³

Abstract: Using a siphon to transfer water along a dike out of a reservoir is an extremely economical water intake method. However, because the pressure at the top of the siphon is less than atmospheric pressure, air released from the water collects at the top. The accumulation of air reduces the pipeline's capacity to transport water. In the worst case scenario, the water flow in the siphon stops completely. Therefore, a new automatic air evacuation system to remove air from the siphon pipe that does not use the safety flow pump was developed.

In pipeline systems connected with 5 irrigation reservoirs in the M irrigation project of Okinawa Prefecture, siphon pipe systems equipped with automatic air evacuation were used. Through the use of this system, the pressure in the long distance siphon pipes decreased, and as a result, the system was unable to maintain a consistent flow. Measurement instruments including a pressure gauge and a flow meter installed in the system verified hydraulic performance in long distance pipes that were using automatic air evacuation. The results revealed that when the equipment was operating normally, the siphon flow formed temporarily, but over time the siphon flow degraded and finally ceased. It is hypothesized that the cause of this is related to the longitudinal profile design of the long distance pipes. Important points to consider in the design of future siphon pipe systems that are equipped with automatic air evacuation are discussed.

Keywords: Automatic air evacuation system; Long-distance siphon pipe; Pump; Irrigation reservoir; Hydraulic performance; Field verification

1 はじめに

全国には約21万カ所のため池があり、その約75%は築造後100年以上を経過し、老朽化が原因で堤体や取水施設の改修を必要としているものが多数存在する。ため池における取水は一般に斜樋や取水塔で行われ、堤体の底樋管から堤外に導水されている。これら取水施設の改修を行う場合は、堤体を掘削してパイプを布設替えるなど大規模な工事となり、多額の工事費を必要としている。

堤体に関わる改修工事を回避する方法として、堤防の上をサイホン管で越える方式がある。このサイホン管方式は、揚水ポンプを使用する方法に比べて、施設費と電気料金が安価であり、きわめて経済的な方法である。しかし、通水時にはサイホンの頂部が負圧となるため、空気が逸出して、頂部に空気塊が停留し、これが通水を阻害することが課題となっており、本方式の普及を妨げる要因となっていた。そこで、姜ら(1994a,1994b)は、通常の家庭用ポンプを用いたサイホン管内自動空気排

除装置を開発し、サイホンにおける空気逸出量や装置を構成する要素の諸元と空気排除体積の関係について、詳細な実験を行って、設計の基礎資料を示した。

このサイホン管内自動空気排除装置を設置することにより、ポンプにより自動で空気排除を行いながら、通水能力を維持することが可能となり、香川県において、ため池からの取水方式として、先端的に採用されている(西山, 2000)。

沖縄県南大東島のM地区においては、地区内に点在する5ヶ所の貯水池を畑地灌漑の水源とし、各貯水池の間は、自動空気排除装置を装備したサイホン管により接続している。最終的に、4カ所の貯水池の水源水は、1カ所の貯水池に集められ、揚水ポンプによりファームポンドまで圧送され、一旦貯留された後、自然圧式パイプラインで受益地区に配水する畑地灌漑システムとなっている。

当該地区において、ため池間を結ぶサイホン管の実運用を開始したところ、送水開始時には充水により満水状態を確保しているが、サイホン管が長距離となる場合、通水開始後に圧力が低下し、サイホン現象が短時間で維持できなくなる現象が、繰り返して発生した。対応策としては、再充水を行い、灌漑システムの稼働の維持を図っていたが、再充水に多大な時間と労力が必要な割に、通水時間が極端に短いため、システムの運用に支障を来していた。

著者らは、本地区の自動空気排除装置を装備したサ

¹ (株)横田製作所技師, Engineer, Yokota Manufacturing CO., LTD, 1-3-6 Minamiyoshijima, Naka-ku, Hiroshima 730-0826, Japan

² (株)横田製作所元技術部長, Former Chief Engineer, Yokota Manufacturing CO., LTD, 1-3-6 Minamiyoshijima, Naka-ku, Hiroshima 730-0826, Japan

³ 宮崎大学農学部教授, Professor, Faculty of Agriculture, University of Miyazaki, 1-1 Gakuen Kibanadai-nishi, Miyazaki 889-2192, Japan (Corresponding Author) E-mail: a03221u@cc.miyazaki-u.ac.jp

イホン管に圧力計や流量計などの計測機器を設置して、機能検証を行った。本報では、サイホン管が水理的に機能しない原因を探り、今後のサイホン管の設計への対策を検討した結果を報告する。

2 畑地灌漑システム

2.1 パイプラインの概要

本地区の畑地灌漑システムは、図 1の平面図に示すように4カ所の貯水池を自動空気排除装置（封水装置）を装備したサイホン管で結び、各貯水池の貯留水を3-1号貯水池に集め、ポンプでファームポンドに送水して、受益地区へ配水するシステムになっている。

図 1: 畑地灌漑システムの概要図

また、各調整池、封水装置および送水路の標高を図 2の縦断図に示す。縦断図には、各貯水池のLWLを始点とする動水位を示し、さらに、この動水位と送水路の中心高との差（負圧）を示す。貯水池がLWLで計画流量が流下する場合は、サイホン管の全体で最大9mに達する負圧が発生する。サイホン始点には、貯水池の水位変化に対応して取水するために、フロート式の取水装置（写真 1）を設置した。また、封水装置（写真 2）は各サイホン管において最も標高の高い地点に設置した。さらに、通水時には、送水路末端（写真 4）の貯水池流入点に設置した調整弁（写真 3）を操作して、サイホンの流れを制御している。

サイホン管（送水路）の諸元を表 1に、貯水池の諸元を表 2に示す。

図 2: 貯水池間送水管の縦断図

写真 1: 取水装置

写真 2: 封水装置

ると、自動制御装置の制御により電動注水弁と排気弁2が閉鎖する。

サイホン管内空気が全部排除され、サイホン管内が満水状態になるまで、①～⑧の過程を自動的に繰り返す。

3 サイホン管の現状と課題

3.1 通水の状況

6号送水路については、通常は2～3時間でサイホンが切断され、これまでの実績でサイホンが形成された最長の時間は、約5時間ぐらいである。さらに、5号送水路については、サイホン現象は全く形成できない結果となっている。また、4号送水路については、縦断線形が一山であり、延長も短く、封水装置は吸い込み側の3-2号調整池に近接しており、サイホン現象は容易に形成でき、切断もなく運用には支障は生じていない。

3.2 充水の状況

通水開始前にサイホン管を満水にするために、始点の取水装置と末端の調整弁を閉鎖して、充水作業を行う必要がある。封水装置は、通水中にサイホン内で発生する空気を、給水タンク（容量80リットル）の水で置き換える装置であるが、給水タンクの容量は、初期充水に必要な水量に不足する。そこで、写真 5に示すように、送水路の途中の空気孔からタンク車で充水しているが、作業が非常に困難であり、人員を2～3人、作業時間として4～5時間を要するため、マンパワーの極めて少ない島嶼地域において、充水作業の負担が大きくなっている。

写真 5: 空気孔からの充水作業

このような充水作業によっても、サイホン内の空気を完全に排出することができないため、サイホンの形成に障害となっている。そこで、6号送水路では、充水作業を軽減するために、図 3に示すように封水装置の横にスタンドを設置して、畑かん用水ラインから水を確保し、水位差により注水できるようにしている。しかし、サイホン現象が通水開始後に短時間で切断されるため、サイホン管への充水作業を繰り返す必要があり、畑地灌漑システムの維持管理に支障を来している。また、サイホン管の途中で制水弁がないことも、充水作業を困難にしている要因となっている。

4 実験施設および実験内容

4.1 実験施設

サイホン管におけるサイホン現象の生成と崩壊についての現地試験は、サイホン現象が一時的に形成できる6号送水路を対象とした。6-1号貯水池の取水装置については、貯水池の水位が常時低く、充水や初期通水に使用できないので、VU管を送水路から分岐させて、堤体に露出配管し（写真 6）、始点に流入弁（写真 7）を設置した。この流入弁を充水時には閉鎖し、初期通水時には全開操作した。

写真 6: 6号送水路バイパス管(6-1号貯水池)

写真 7: 流入弁(6-1号貯水池)

4.2 計測装置

図 4に計測装置の設置位置を示す。管路の圧力を計測する圧力トランスミッタKH-15（長野計器）を、封水装置内の空気孔に設置し（写真 8）、ADコンバータでアナログ・デジタル変換を行い、パソコンに記録した。さらに、6-1号貯水池から780m下流と末端の調整弁の直上流（始点から935mの地点）にある空気弁に、圧力トランスミッタを設置して（写真 9）、圧力の計測を行った。また、写真 10に示すように、ポータブル超音波流量計UFP-20（東京計器）を6号送水路始点（6-1号貯水池）

に設置し、流量を計測した。

図 4: 計測装置の配置

写真 8: 圧力計測(封水装置)

写真 9: 圧力計測(空気弁)

写真 10: 流量計測(6-1号貯水池)

4.3 実験内容

本実験は、6号送水路が通水を停止し、管内の水が始点と末端から流出し、封水装置の上流側と②地点の下流側の管内が空になり、空気が充満している状態から開始する。最初に、入りの流入弁と末端の調整弁を閉鎖し、封水装置の空気孔から充水を行う。この充水により、管内の空気を十分に排除したことを確認して、空気孔と空気弁に圧力計を設置する。

その後、圧力と流量の計測を開始し、封水装置の電源を入れ、流入弁を開操作する。一定時間の経過後、末端の調整弁を開操作し、サイホン流を生じさせる。実験条件に応じて、末端の調整弁の開度を調整して、サイホン流の制御を行う。

実験については、表 3 に示すように、調整弁の操作条件を変更して2回実施した。ケースAでは、末端の調整弁を一度に全開操作したが、サイホン流が短時間で切断された。そこで、ケースBでは、サイホン流をできるだけ長く維持するために、調整弁の設定開度を5%および10%の中間開度に絞って実験を行った。実験の結果、通水開始後において計画流量程度の流量は発生しているが、10分程度経過すると、ケースAと同様にサイホン流が切断された。実際の運用では、2～5時間程度の通水時間は確保できているので、調整弁は実験より小さい開度に設定し、設計流量以下の小さい流量で運用されているものと推察される。

表 3: 流入弁・調整弁の操作開始時間

実験ケース	A	B
流入弁 0→100%開度	140s	
調整弁 0→100%開度	340s	
流入弁 0→100%開度		380s
調整弁 0→ 10%開度		1080s
調整弁 10→ 5%開度		1860s

5 実験結果

5.1 サイホン管の圧力と流量の変化

ケースA, Bについて、上流側の封水装置(①)と下流側の空気弁2カ所(②, ③地点)の圧力標高および流入弁の直下流における流量の時系列変化を図 5, 7に示す。

さらに、ケースA、Bの管路圧力標高縦断を図 6, 8に示す。

5.1.1 ケースA

ケースAについては、実験開始時点では、管路の圧力は①地点の空気孔からの充水作業により、封水装置の標高EL47.0m程度で静止している。140秒において、入り口の流入弁を全開した後、管路の圧力が6-1号貯水池の水面標高EL42.0m程度に全体的に低下し、上流部で負圧状態となっている。その後、340秒の時点において、末端の調整弁を全開することにより、サイホン流が発生し、管路圧力が低下して、動水勾配が形成されている。さらに、350秒において、末端側の③地点で管路圧力標高が計画動水位を下回る結果となっている。

サイホン内が水で満たされている時には、吸い込み側の6-1号貯水池の水面には大気圧が作用しているため、貯水池の水面の圧力がサイホン内の水圧より高くなり、サイホンの水は押されて貯水池には逆流しないため、サイホン現象が働くことになる。

通水開始後の①地点の圧力標高は封水装置地点により、EL42.0m程度に維持されているが、400～560秒にかけて、末端水位が計画動水位を大きく下回っており、動水勾配が急勾配となり、過剰な流量が発生している。従って、管路圧力の均衡が崩れ、下流側の管路圧力が大きく低下したため、標高の高い②地点の負圧が増加し、この間に末端側からサイホン流が崩壊したものと推察される。その後、560秒付近で管路の圧力が上昇に転じており、600秒では③地点で圧力がほぼゼロになり、空気が末端部分から管内に入り、この時点でサイホン流は、崩壊していると考えられる。

図 5: 6号管路の圧力・流量変化図(ケースA)

図 6: 圧力標高縦断図(ケースA)

サイホン流が切断された原因は、サイフォンにおいて、標高の高い地点に進むに連れて管路圧力が低下していく、水中に溶け込んでいる空気が気化しやすくなるため、この空気が下流部で標高の高い②地点に滞留し、水の流れを分断してサイフンの動きを停止させてしまったものと考えられる。

また、管路の流量は、計測機器の不具合のため、900秒までデータが取得できていないが、サイホン流がすでに壊れていると推測される900秒時点において、1.9L/sの流量が記録されている。従って、340秒で末端弁を開操作した後、600秒までの間に、計画流量に近い流量のサイホン流が過渡的に形成されるが、安定した通水が維持されることなく、300秒程度の短時間にサイホン流の崩壊に至ったと推定される。

1000秒以降は、サイホン流が完全に崩壊し、流量が増減しながら漸減して、通水が停止している。管路の圧力は、管路内が大気に解放された通水停止状態に徐々に収めらる。封水装置地点の圧力標高は、②地点の管心高EL42.0m+1.0m程度になる。また、②、③地点の圧力標高は、末端の管心高EL38.0m+1.0m程度になっており、③地点では、圧力は1m程度になっている。

5.1.2 ケースB

ケースAにおいて、6号送水路末端の調整弁を一回の操作で全開にしたため、急激な圧力低下を招き、圧力の均衡を維持できずに、サイホン流が短時間で消失する結果となった。そこで、ケースBにおいては、調節弁の弁開度を段階的に0→10→5%と変化させる操作を行った。さらに、ケースAで流量計の不具合により約900秒までデータが記録できなかったため、計測機器の再設定を行った。

通水停止の状態から、380秒において、流入弁を全開した後、1000秒までの間は、管路の圧力が全体的に6-1号貯水池の水面標高EL42.0m程度に低下し、上流部で負圧状態となっている。その後、400～460秒の間、流入側の6-1号貯水池と封水装置の間で流量1.9L/s程度の

逆流が生じている。流入弁を閉鎖している状態では、貯水池とサイホンが遮断されているので、サイホンには充水後の静水圧が作用しているが、流入弁を開操作した直後では、貯水池とサイホンの圧力が連続し、サイホン部分が負圧になるので、一時的な逆流を生じている。この流入弁開操作直後の一時的な逆流現象は、ケースAにおいても生じていたと推定される。

その後、1080秒の時点で末端の調整弁の開度を10%に操作すると、サイホン流が発生し、管路圧力が低下して、動水勾配が形成されている。1000~1900秒の間は、送水路下流側の②、③地点の圧力標高がEL37.0m程度に低下するが、封水装置地点における圧力標高は、封水装置が作動して負圧により逸出する空気を水で置換するため、通水開始後は、EL42.0m程度に維持されている。従って、上流から下流にかけての動水勾配が形成され、計画流量に近い8.2~5.2L/sの流量が生じており、サイホン流が保持されている。写真 11に、1380秒における2号貯水池流出口（6号送水路末端）の状況を示すが、サイホン流が形成されているため、送水路末端から勢よく流出している。

サイホン流は約1900秒まで継続するが、送水路下流側の②、③地点の圧力標高の差が小さくなり、下流側の動水勾配が減少する結果となった。そのため、管路の圧力を維持するために、調整弁の開度を10%から5%に絞ったが、サイホン流の減衰傾向は続き、6-2号貯水池流入側（6号送水路始点）においては、1930秒から流量が発生していない。また、写真 12に、2100秒における2号貯水池流出口の状況を示すが、末端での流出は継続しているものの、流出量はかなり低下している。

図 7: 6号管路の圧力・流量変化図(ケースB)

その後、2460秒において、2号貯水池流出口から、空

気を吹き出す現象が生じ、管路内が大気に解放されて、空気が連行され、サイホン流が送水路全線で崩壊した。その結果、封水装置から上流の管内水および③地点より下流の管内水は、貯水池へ流出した。写真 13に、2520秒における2号貯水池流出口の状況を示すが、末端で空気を吐きだしている。通水停止時における封水装置地点の圧力標高は、②地点の管心高EL42.0m程度になった。また、②、③地点の圧力標高は、末端の管心高EL38.0m程度になり、③地点では、圧力はほぼゼロであった。

図 8: 圧力標高縦断図(ケースB)

5.2 封水装置の作動状況

実験結果からは、通水停止状態から段階的に通水状態に移行させれば、サイホン流が形成できることが明らかとなっている。従って、封水装置の作動機構は、正常に稼働しており、逸出する空気を水と置き換えることにより、封水装置地点の水圧の低下を防ぎ、サイホン上流部の動水勾配を形成するよう作動していると考えられる。

しかし、サイホン流の維持が長時間継続できず、ケースBにおいては10分程度の短時間で崩壊する結果となっており、封水装置の容量不足や送水路の縦断線形など、他の要因の影響が示唆される。

5.3 サイホン流が維持できない理由

通水開始後、サイホン流が形成されるが、2号調整池への出口の調整弁を開けて流量が増加すると、下流部での圧力低下が大きくなる。その状況においても、6-1号調整池から封水装置下流地点までの上流部では、サイホン流は形成されているが、送水路の下流部の②、③地点においては、流量の増加による圧力の低下が著しくなり、圧力標高が計画動水位を割り込んでいる。

その後、末端部でサイホン流の切断が発生し、これが下流側全体へ波及して、やがて送水路全体で、サイホン流が崩壊する結果となっている。サイホンの下流部で圧力標高が計画動水位より一旦低下すると、自然に回復することは難しく、短時間でサイホンの崩壊に至る

可能性が高いと考えられる。

写真 11: 2号貯水池流出口(1380秒)

写真 12: 2号貯水池流出口(2100秒)

写真 13: 2号貯水池流出口(2520秒)

また、下流側でサイホン流が遮断される原因としては、6号送水路の下流側の縦断線形が凸になっており、②地

点に空気が溜まりやすく、上流側の封水装置に集まらない状況となっていると考えられる。②地点に溜まった空気は、初期充水では空気弁②を空けることにより強制的に排除できるが、通水時には、負圧となるため通常の空気弁では排除する方法がない。

従って、流れにより空気溜まりを最下流へ持って行き、2号調整池へ吐き出す以外にはないが、流速が遅いと溜まった空気を下流へ押し出すことができない。また、逆に流速が速いと摩擦損失が大きくなり、負圧が大きくなるので、空気の分離を促進してしまうことになる。

5.4 サイホン流の崩壊を避ける方法

2号貯水池への出口の調整弁については、一度に全開すると出口で水を引っ張る状況になり、下流部での急激な水位低下を招くので（ケースA）、2号調整池の調整弁については、サイホン下流側での水位低下を防ぐために、操作時間を長くかけ、設定する開度も小さくするように配慮することが有効であると考えられる（ケースB）。

その他、②地点に新たに封水装置を追加設置して、空気の排除を行う方法が有効であると考えられるが、補給水の確保が問題となる。また、②地点でポンプにより水を注入して、強制的にサイホンを形成させる方法もあるが、経済的かつ合理的な選択ではないと考えられる。

5.5 今後の設計に向けての提案

一般的にサイホン管は大部分が負圧状態になるが、負圧状態においては、以下のような現象を生じやすい。

- ①圧力低下により空気が逸出しやすい。
- ②管の継手から空気が混入しやすくなる。
- ③管内で増加した空気は、負圧により体積が膨張するので、これが空気溜まりとなって、通水断面を阻害し、サイホン流を切断する要因になりやすい。

従って、負圧状態で通水するサイホン管においては、安定した通水を維持するために、空気の確実な排除は必要不可欠であり、サイホン内で発生する空気を管路の凸部に集めて、水と置き換えて排除するシステムが、西山らにより自動空気排除装置（封水装置）として開発されている。

著者らは、西山らが開発した封水装置を設置した長距離サイホン管について、現地試験を行ったところ、通水開始時に形成されているサイホン流が短時間で切断される現象を確認した。これは、サイホン管の構造面または運用面の理由により、封水装置による空気溜まりの自動排除がなされていないものと推察された。

そこで、サイホン管を計画・設計・運用する時には、以下に示すような配慮・対策がなされることが望ましい。

- ①負圧により逸出する空気を封水装置に集積するため、管路の縦断線形を一山とし、封水装置の設置位置は吸い込み側の貯水池に近接させ、サイホン管の延長をできるだけ短くなるように路線選定を行う。
- ②初期充水による空気の排除を確実にしたり、管内に生じた空気塊の移動を容易にするため、平面線形および縦断線形ともに、鋭角な屈曲の設置をできるだけ避ける計画とする。
- ③理論的な限界値で設計すると、現場で生じる様々な状況を吸収する余裕がなくなるので、十分な能力を有するように配慮する。
- ④初期充水作業の労力を軽減するために、サイホン管

- の中間に制水弁を設置する。
- ⑤末端弁の操作に時間をかけ、さらに設定開度を小さくするなどの調整を行って、通水時におけるサイホン管の下流側水位を維持する。

6 おわりに

自動空気排除装置（封水装置）を設置したサイホン管は、ため池の水を揚水ポンプではなく、サイホンの原理を用いて、堤防を越えさせて、堤外に運ぶことが出来ることに特徴がある。サイホン管は、経済的には非常に有効であり、島嶼や中山間地などエネルギー事情に恵まれない地域では、期待される送水システムであると考えられる。

このサイホン管をベースにした送水システムについては、水理学的に厳密に設計を行い、施設機能上は問題ないという結論が得られていても、実際の運用を始めると、本報告のように、システムが破綻する可能性を否定できない。このシステムは、外部から駆動エネルギーを投入して、揚水ポンプを用いて、動水位を強制的に押し上げるシステムではなく、自然現象を利用している。従って、本システムでは、通水時において生じる“ゆらぎ”

を駆動エネルギーではなく、施設の余裕により吸収できるよう配慮する必要がある。

今後は、封水装置とサイホン管を組み合わせた送水システムの運用実績を重ね、技術的な課題を抽出して、これを検証し、より信頼性の高い送水システムとして構築することにより、幅広い普及が期待できる。

謝辞

現地実験では、沖縄県南部農林土木事務所、アジアプランニング株式会社の本口晴年氏に多大なご援助をいただいた。ここに記して厚くお礼申し上げます。

引用文献

- [1] 西山壮一(2000): 溜池の管理・整備・保全, 農業土木学会誌, 68(6), pp.579-582.
- [2] 姜華英・西山壮一・河野広・南信弘(1994a): サイホン内エアポケットの排除と空気逸出量に関する研究, 農業土木学会論文集, 171, pp.57-66.
- [3] 姜華英・西山壮一・河野広・南信弘・満岡重一(1994b): サイホン管における自動空気排除装置の開発と作動特性, 農業土木学会論文集, 173, pp.101-109.

この論文の公開の質疑または討議は2014年6月30日まで受付けます。