減量通水条件での水路トンネル調査診断技術の開発

A NEW AND MORE EFFICIENT SYSTEM FOR ASSESSING AGING WATER TUNNELS WHILE MAINTAINING LIMITED OPERATION

藤原鉄朗 *・小谷　拓 *・永吉洋之 *・吉田典明 *
Tetsuro FUJIWARA, Taku KOTANI, Hiroyuki NAGAYOSHI and Noriaki YOSHIDA

A large number of water tunnels for supplying industrial and city water were constructed during the period of high economic growth. Water tunnels are a very important component of social infrastructure, but it is rare for them to be inspected or investigated since the inspection works require suspension of the water supply. Therefore, a new inspection method was required that does not involve supply interruption so that repair and maintenance can be achieved more efficiently. This paper considers an inspection method for water tunnels under reduced water supply with a newly developed inspection vehicle.

Keywords : *reduced water supply, water tunnels, inspection method, laser scanning technology, radar scanning technology*

1.　本研究開発の背景

平成 18 年 8 月広島県工業用水道事業において発生した隧道の崩落は、約 3 週間にわたる給水制限により工業生産や市民生活に大きな損害をもたらした。工業用水道の施設には、トンネル構造を有するものが多くある。今回の事故は、トンネル覆工背面の空洞や断層部が、経年的にトンネル構造の不安定化をもたらし、最終的に崩落を生じさせる可能性があることを知らしめた。

これらのトンネルの経年的な変状の把握には、トンネル内部からの点検が不可欠であるが、現在のトンネル診断技術においてはトンネルの断水が不可欠であり、年間通水が一般的な工業用水道においては、代替水源を有しない限りこれらの点検や診断が実施できないという問題点がある。

本研究開発は、上記の問題点に対し、減量通水（通常時の通水量に比べて流量を制限した通水状態）を実施しながらトンネル点検調査を実施する技術を開発するものであり、これらの技術開発によりトンネルの崩落事故等を未然に防ぎ、トンネルの長寿命化に資することを目的として実施した。

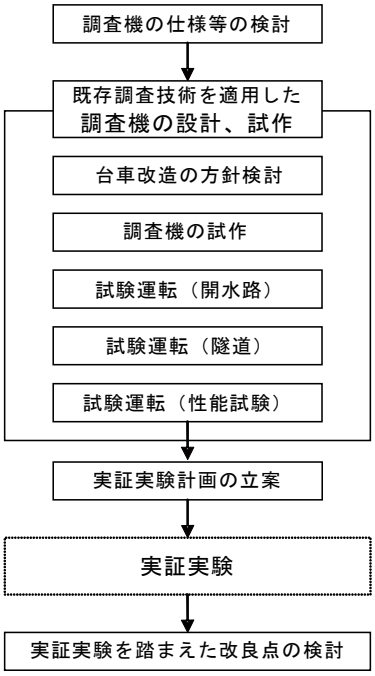
図－1　崩落した水路トンネル

2.　研究の実施体制と検討内容

本研究開発は、（独）水資源機構との共同研究として、以下の内容で実施した。

① 調査機（有人自走台車）の仕様等の検討
② 既存調査技術を適用した調査機の設計、試作
③ 付帯機能の検討、技術開発
　③-1　調査時における通信・連絡手段
　③-2　調査時における位置確認手法
　③-3　トンネル内中心線の測量手法
④ 実証実験の計画立案および実施
⑤ 実験の結果を踏まえた改良点の検討

* コンサルタント国内事業本部 社会システム事業部 インフラマネジメント部



図－２　減量通水条件の診断技術開発フロー

3.　調査機仕様の検討および自走台車の開発

(1) 調査項目の検討

トンネルの調査を通水状態で行う場合、配水池等の運用を考慮して減量通水を行うこととなるが、調査作業の前後にかなりの時間をかけた減水操作と復水操作を行う必要がある。このため、調査作業に許容される時間は短時間に制限されるので、調査方法としてもトンネル全体を効率的にスクリーニングして調査できる方法を考えなければならない。

トンネル変状形態の既往の調査結果[1),2),3)]によると、外力により発生する変状はアーチ部に何らかの形で発生することが分かる。また、突発性崩壊の場合は、アーチ部の覆工背面に発生した空洞が原因で、崩壊が発生することもある。これらのことから、トンネルの健全性はアーチ部の状況に代表されるといえる。したがって、減量通水状態でアーチ部の状態を把握するための調査対象として、トンネル覆工表面の「ひび割れ」、覆工の「巻厚・背面」に着目することが重要である。

そこで、これらの対象に関してアーチ部の状況を正確に把握できる点検調査方法として、以下の２つの計測手法を実現できる減量通水調査方法を検討するものとした。

①　覆工表面を連続的に撮影するレーザースキャニング

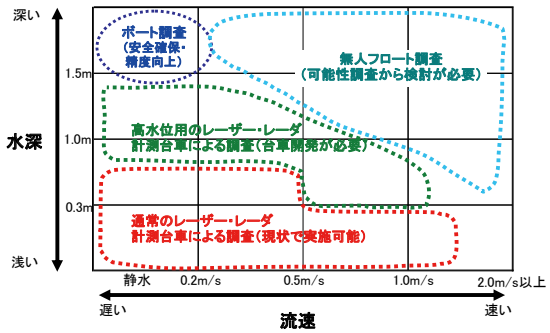
②　覆工厚や背面空洞を調査するレーダー探査

(2) 調査台車の開発目標とベースマシンの選定

通水中の水路トンネルにおいて上記のレーザー・レーダ計測を実現するためには、計測装置を搭載するプラットフォーム（台車や台船）が必要である。

既往の実績を踏まえると通常のレーザー・レーダ計測における実施可能な条件は、**図－３**に示す赤破線の範囲である。しかし、工業用水や上水用の水路トンネルについては水深が 0.5 ～ 1.0m で通水しながら点検診断が可能なことが求められていた。そこで、本研究開発では、**図－３**における緑破線の範囲の条件で使用可能なプラットフォームとして、有人自走台車の開発を行うものとした。

当然ながら、現行では水深が 1.0m 程度ある水路トンネルに対して、自在に進入可能な自走台車は市販されていない。



図－３　流量・水位と調査診断手法の関係

また、１から新たな台車を設計し、開発するには時間的にも費用的にも困難であった。そこで、現在市販されている台車のうち、最も深い水深に対応できると考えられる台車を改造する形で開発するものとした。

本検討では、多様な台車の仕様を整理し、水路トンネルへの適用性を検討した。**表－１**にこのうち最終的に案として抽出された台車の例を示す。

本開発では、**表－１**に示す台車候補の中から、最も深い水深に対応できる可能性があり、かつ軽量であることから「①高床式運搬車」を採用候補とし、ベースマシンとして、水路トンネル内への進入が可能なように改造を行うものとした。

表－１　自走台車のベースマシンの検討

自走台車候補	対応水深（予想）	大きさ 駆動装置	コスト	備　考
①高床式乗用台車	1,000mm	長1,900mm 幅1,800mm 高1,600mm 重 420ｋｇ ｶﾞｿﾘﾝｴﾝｼﾞﾝ	車両標準 250万円	現行では計測員は同乗不可 計測員同乗の可能性を検討
②農耕用乗用管理車	720mm	長3,600mm 幅1,700mm 高1,830mm 重975ｋｇ ﾃﾞｨｰｾﾞﾙｴﾝｼﾞﾝ	車両標準 270万円	重量975kg 一人乗り 堆積土砂にも強いと思われる
③小型不整地運搬車	670mm	長2,420mm 幅1,050mm 高1,490mm 重1100ｋｇ ﾃﾞｨｰｾﾞﾙｴﾝｼﾞﾝ	車両標準 500万円 以上	本例最小の１ｔサイズ １名操縦荷台あり 他に２ｔ、３ｔと多品種だが地上高はあまり変化なし

(3) ベースマシンの改造

ベースマシンは、農業用の高床式の運搬車であるため、このまま水路トンネルに導入することはできない。

本開発では、ベースマシンを水路トンネルに導入するために、主に以下の改造を行った。

① ガソリンエンジンからディーゼルエンジンへの換装
② 牽引治具（牽引台車の連結部）および座席の設置
③ 水中カメラによる水中監視装置の装備

1) エンジン形式の変更

現行の高床式運搬車は、ガソリンエンジンを搭載している。しかし、小断面トンネルでは換気が悪くなるため、ガソリンエンジンを動力源として使用した場合にトンネル内に一酸化炭素の濃度が上がる可能性があり、危険である。

これに対して、ディーゼルエンジンは、燃料に対する空気の比率が大きく、酸素不足による不完全燃焼が起こりにくいため、二酸化炭素（CO_2）、一酸化炭素（CO）と炭化水素（HC）の排出が少ない。

これに対して、ディーゼルエンジンは、燃料に対する空気の比率が大きく、酸素不足による不完全燃焼が起こりにくいため、二酸化炭素（CO_2）、一酸化炭素（CO）と炭化水素（HC）の排出が少ない。

一方で、ディーゼルエンジンは、シリンダ内に燃料を噴射して空気と混ぜ合わせるため混合状態が不均一になり易く、粒子状物質（PM：パティキュレートマター）や窒素酸化物（NOx）を多く排出する傾向がある。しかし、これらの PM や NOx については、触媒やフィルターによる除去技術もあり、人体に対する影響を回避する対策は可能である。

このため、発電用水路トンネル内の調査では、坑内ボーリングなどを含めてガソリンエンジンの使用は認められておらず､ディーゼルエンジンは許可されている。このほか、有人自走台車の動力としてはバッテリー駆動も考えられるが、水中で重量物を運搬するための馬力を確保することは難しい。

上記の考察から、本共同研究で開発する有人自走台車については、ディーゼルエンジンを適用することとした。なお、搭載するディーゼルエンジンは、高床式運搬車（ベースマシン）が現行搭載しているガソリンエンジンの出力を勘案し、同等以上の出力性能を有するタイプを選定した。改造前後のエンジン仕様は以下のとおりである。

表－2　自走台車のエンジン変更について

	ベースマシン	改造マシン
エンジン形式	ガソリンエンジン	ディーゼルエンジン
始動方式	電動リコイル	電動リコイル
最大出力	4.0PS 2.95 kW	6.5PS 4.8kW
最大出力時回転数	1,800rpm	3,600rpm

2) 牽引治具および座席の追加

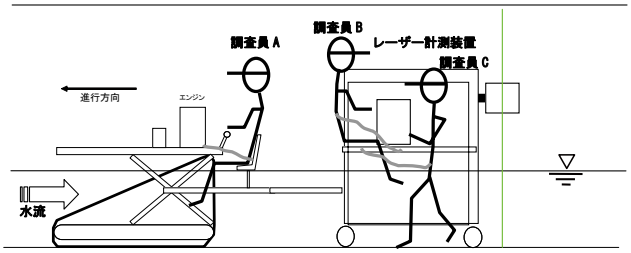
次に、レーザー壁面連続画像計測装置およびレーダ覆工背面探査装置を自走台車に搭載する方法を検討した。

振動に対する抵抗性や搭載能力から考えると調査用牽引台車を用いる方法が優位と考えられるが、台車の規模が大きくなるという欠点がある。そこで、搭載方法は、水路トンネルの搬出搬入条件および断面形状によって、以下の 2 つの方法を使い分けることとした。

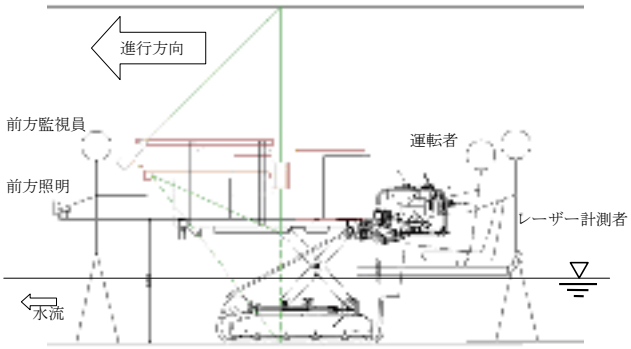
また、上記の双方の牽引方式を実現するために、牽引治具と前進･後進用の座席を自走台車に追加するものとした。なお、牽引部については、調査中の衝撃などによる破断の危険性が考えられたため、強度計算を行うとともに、充分な強度を確保するために、補強梁を追加した。

表－3　自走台車への計測装置の搭載方法の比較

計測装置の搭載方法	トンネル条件
①　調査用牽引台車方式	上下流の坑口が双方使用可能である。 もしくは、水路トンネルが直径が4.0m以上あり、水路トンネル内で自走台車のUターンが可能である。
②　自走台車搭載方式	トンネル径が2.4m程度と小さく、中で自走台車のUターンが出来ない



図－4　計測装置搭載方法①調査用牽引台車方式



図－5　計測装置搭載方法②　自走台車搭載方式

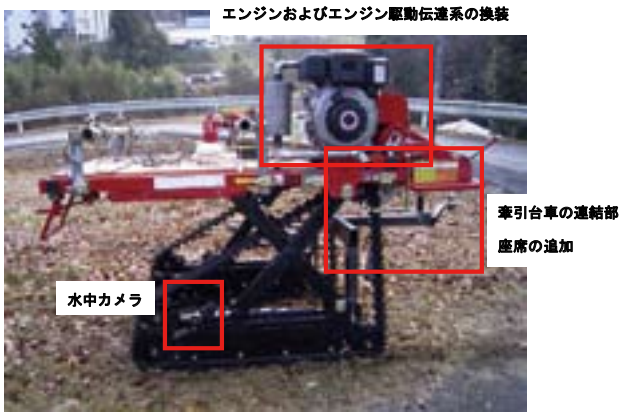
3) 前方照明および水中監視カメラの設置

暗く狭い水路トンネル内で自走台車が走行する際は、十分な前方確認が必要である。とくに、水中は調査員の目視では確認できないことから、これらを考慮した装備を自走台車に追加する必要がある。

そこで、自走台車には前方ライトと水中カメラを搭載し

た。なお、水中カメラはクローラ前方に装着し、運転者がクローラ前方に転石や土砂堆積、底版破損による窪み等がないことを確認しながら運転ができるようにした。

図－6　水中カメラの設置とカメラによる前方監視画像



図－7　改造した自走台車の外観

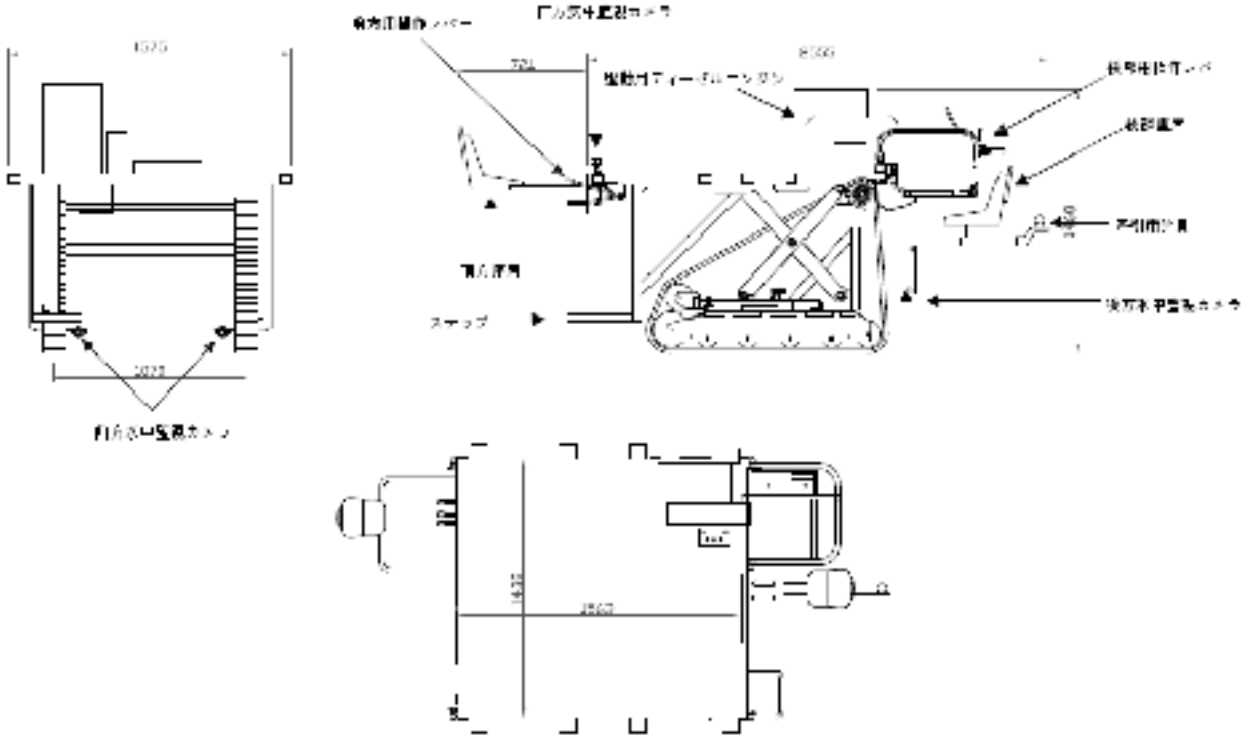
改造した自走台車の全形を図－7に示す。また、改造後の自走台車の図面を図－8に示す。

4.　予備試験および耐久性試験

改造した自走台車は、本来農業用の機械であることから、水流のあるところでの走行特性や水路内での耐久性については明らかではない。そこで、実際の水路トンネルに導入する前に、開水路での試走や陸上での長期耐久性試験等を実施した。図－9は、開水路での走行試験の状況である。

図－9　用水路における予備試験状況

本試験では、順流・逆流時の走行速度の違いや車体に流水が当たることによる堰上げの程度、流水中の操作性などを確認した。この結果、流速が約0.5m/sであれば、問題なく水路中の走行が可能なことを確認した。また、この場合の自走台車の走行速度は、順流・逆流時ともに時速1.0km程度であった。



図－8　改造した水中自走台車の完成図面

つぎに、水路トンネル内での長時間走行性や底版に転石等があった場合の安定性などを確認する目的で、陸上試験を実施した。陸上試験で実施した主な調査項目と試験結果を以下に示す。

(1) 台車の走行耐久性

自走台車と牽引台車に、通常計測時の重量の 1.5 倍荷重を疑似積載し、過負荷を与えた状態で長時間（走行時間：5 時間以上、走行距離：5.6km）の陸上走行試験を行った。また、走行に当たっては前後走行の切り替え運転も行い、陸上走行で十分大きな負荷が掛かるように配慮した。
この結果、上記の長時間の試験でも、故障が発生しないことを確認した。

(2) 不整地走行性能の確認

トンネル内では転石・段差が考えられるのでどこまで走行台車が走行可能なのかを実験によって確認した。この結果を**表－4** に示す。台車が乗り越え可能な段差は、前進・後進とも 100mm 程度である。ただし、転石のような凸状の障害物の場合は、クローラが自ら左右に避ける現象も認められたことから、水路中の走行には問題がないものと判断された。

表－4　自走台車の底版の段差への適用性

走行状態	障害設置	段差75mm	段差100mm	段差150mm
自走台車のみ前進	両輪	○	○	×
	片輪	○	○	○
自走台車のみ後進	両輪	○	○	×
	片輪	○	○	×
自走台車+牽引台車前進	両輪	×	×	×
	片輪	×	×	×

(3) トンネル内走行適応性能の確認

径の小さな水路トンネルの底版には曲率がある場合もあることから、これらの曲率をもった底版での自走台車の走行性能を試験的に確認した。試験状況を**図－10** に示す。

図－10　底版の曲率への適用性試験状況

上図に示すとおり、実験では鋼板で曲率を有した底版を模擬した状況をつくり走行性を確認した。この結果、底版の曲率は自走台車の走行性には支障を与えないことを確認した。

(4) 基本走行性能確認

また、陸上試験では、改造した自走台車の走行可能速度、燃料消費量、回転半径を試験し、以下の結果を得た。

表－5　自走台車の基本走行性能

走行速度	前進1速 (エンジン回転数：約 3,500rpm)	約1 km/時
	前進2速 （エンジン回転数：約2,300rpm)	約1.6 km/時
燃料消費	前進1速	約1.6 km/L
	前進1速、2速複合	約1.3 km/L
回転半径	自走台車のみ	約1.6 m
	自走台車+牽引台車	約15 m

5.　現地実証実験

上記の予備試験結果より、改造した自走台車は通水状態での水路トンネルに適用可能であると判断し、実際の水路トンネルで現地実証実験を行い、台車性能の確認や調査精度等の確認を行うとともに、課題の抽出･整理等を行った。

減量通水による実証実験を行った水路トンネルは以下のとおりである。なお、S トンネル、K トンネルとも通年通水を前提としている水路であり、断水時間の確保が難しいトンネルである。

現地実証実験では、S トンネル、T トンネルの双方でレーザー法による壁面連続画像計測とレーダ法による覆工背面探査の 2 つを実施した。双方のトンネルとも、予定の時間内で減量通水中の計測を終了することができ、その際の走行速度は約 1.0km/h であった。また、調査中、漏油等の問題は発生せず、無事作業を完了することができた。

本実証実験においては、水深が約 0.5m で流速が 1m/s 以下程度、水深 0.9m で流速 0.3m/s 以下程度であれば調査は可能であることが確認できた。しかし、本実験では確認できなかったが、流速についてはさらに高くても調査は可能であると判断される。調査状況を下図に示す。

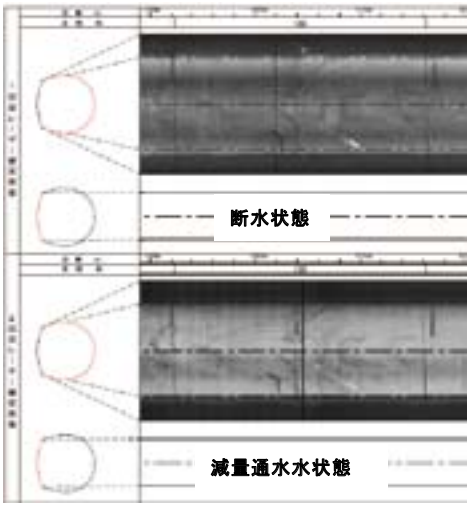
図－11　Ｓトンネル　進入前の準備状況

図－12　Ｓトンネルでの計測状況

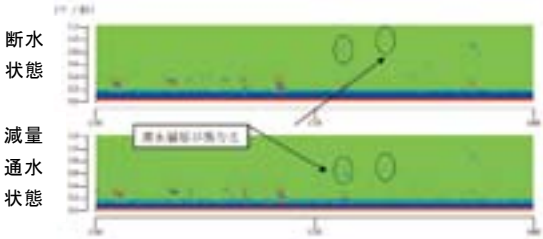
図－13　Ｔトンネル　進入前の準備状況

本実証実験で得られたレーザー法による壁面連続画像計測とレーダ法による覆工背面探査の結果例を**図－14**および**図－15**に示す。

当初、自走台車の振動の影響や流水の影響により、計測精度が低下する可能性も懸念されていたが、レーザー法・レーダ法ともに、減量通水状態であっても、断水状態の場合と同等に計測できることを確認した。



図－14　Ｔトンネル　レーザー計測結果の比較



図－15　Ｔトンネル　レーダ計測結果の比較

断水状態と減量通水状態で、一部、背面からの反射位置に差が生じているが、これは調査実施時期の違いで覆工背面の滞水量が変化していることにより、計測精度の差ではない。

6　研究開発のまとめと今後の課題

本研究開発では、減量通水条件で適用可能な診断手法を検討し、水中自走台車を開発して実際の水路トンネルで検証実験を行った。この結果、水深を 1.0m 以下に低下させることができれば、通水状態でも断水状態時と同等に水路トンネルを診断できることを確認した。自走台車への機材の搭載については、調査用牽引台車方式が振動への抵抗性や搭載能力から優れるが、台車が大掛かりになるという問題点があることが明らかになった。このため、自走台車への機材の搭載については、小断面（トンネル径 2.4m 程度）のトンネルに対しては①自走台車搭載方式、大断面（トンネル径 4.0m 以上）のトンネルに対しては②調査用牽引台車方式を適用することとした。

また、本研究開発では、通水状態における水路トンネル内外の通信手段や簡便な中心線測量手法についても同時に検討を行ったが、いずれも確実に機能する手法を提示することができなかった。

本研究開発成果を踏まえ、今後、水路トンネル診断に求められる技術について以下に整理する。

(1) 直径 2.2m 以下の小断面水路トンネル診断

今回開発した自走台車は直径 2.2m 以下の水路トンネルに適用するには大きすぎてトンネル内に導入できない。しかし、工業用水トンネルには、トンネル施工の最小断面で掘削されているものも多く、覆工の内径は 1.5m 程度ものもあり、実際にこれらの小断面の水路トンネルへの適用に関する問い合わせが多くきている。

(2) 水位 1.0m 以浅に低下できない水路トンネル診断

今回開発した自走台車は水位が 1.0m 以上ある場合には適用できない。また、台車方式では、これ以上水深がある箇所への進入は難しいと判断される。このため、これらの水深が深い箇所の診断については台船方式を適用する必要がある。ただし、通水条件での台船の使用については、安定性や安全性などに種々の問題が考えられるため、慎重な検討を要する。

(3) 水路トンネル内外の通信手法の確立

水路トンネル内外の通信手段については、通水条件下の調査で今後不可欠な技術となるため、早急に開発する必要がある。ただし、これまでの検討では、水路トンネル内では無線が適用できず、また、ダイバーが用いる水中電話も適用できないことが確認されており、新しい通信手段（簡易有線法など）の検討が必要である。

参考文献

1) 森充広、藤原鉄朗他：農業用水路機能診断における非破壊調査技術の有効性、農土論集、230、pp.123-130、2004
2) 藤原鉄朗、森充広他：壁面連続画像計測システムによる農業用水路の急速診断事例、農業土木学会講演要旨集、2006
3) 森充広、藤原鉄朗他：農業用水路変状データベース及び診断システムの開発、農土学会、2005