

## 29. シールドトンネル点検システムの開発

国土交通省 関東技術事務所 ○渡部 修  
(現 国土交通省 江戸川河川事務所) 二瓶 正康  
(社)日本建設機械化協会 施工総合研究所 安井 成豊

### 1. はじめに

首都圏外郭放水路は、市街地を流れる中川流域の洪水対策を目的とした大深度地下の大断面トンネル(内径φ10.6m)であり、「洪水に対応する地下河川としての機能の維持」、「国道16号線直下に位置し、構造上の安全性と耐久性の維持」等が求められる。

そこで首都圏外郭放水路トンネルの機能維持を図るため、トンネルの点検システムについて開発検討を行ったものである。

トンネルは地下鉄や下水道など多くの施工実績があるが、点検方法や点検項目、点検基準などは統一されたものは無いため、点検システム開発にあたり、放水路を管理する事務所と想定される点検の種類、点検項目、点検精度等、提示された開発条件に基づきトンネル内部の変状を確認するシステムを検討し、実現にむけた要素技術の調査・試験を行った。

### 2. 点検システムの検討

トンネルの点検では大きく分けると以下の2つの点検がある。

- ①出水期前後の定期点検
- ②地震や異状発生時などの緊急点検

点検実施にあたっては、有毒ガスや内部状況が不明等の問題があり人間が直接入ると危険を伴う「緊急点検」について検討することとした。

今回の開発条件は、

- ①内部の変形と亀裂が確認できる
- ②リアルタイムで状況を確認したい
- ③トンネル内に手を加えない

との3つの要望により、作業員が入れる環境にあるのか、インバート上はどのような状況になっているのか等を考慮して点検装置の検討を進め、また、詳細な点検時に必要とされる非破壊検査技術や無人調査のため

のデータ通信技術を調査し、実現場において要素試験をおこなった。

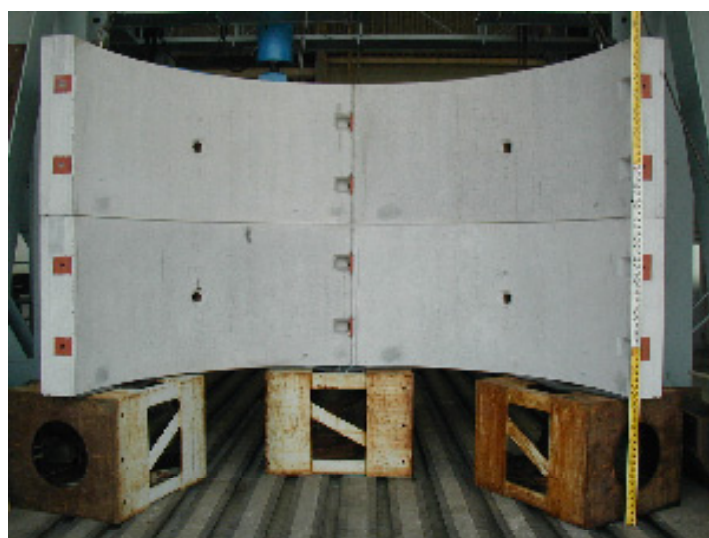
### 3. 要素試験

#### 3.1 クラック計測技術

トンネル内部の異状確認として発生クラックの発見は重要であり、点検担当者が交代しても、変状箇所と現況が把握できるように、画像として記録し保管する必要がある。

また、当初から特殊な検査装置を持つよりも、今後の検査技術の進歩(カメラ画像、情報処理速度の向上)に応じて装置を導入し、徐々に精度を向上させる等、汎用製品を活用した方が装置の発展性の上で有効である。

汎用のデジタルカメラ及びデジタルビデオカメラを用いたひび割れ検出装置について要素技術の試験を行うとともに当該トンネル内において模擬点検作業を行い、点検に必要な設計条件(照度、移動速度)等を確認した。



写真－1 試験体

試験体は外径φ3450mmのRCセグメントを用い、事前に0.02~0.8mmの幅のひび割れを発生させ、撮影幅、カメラ仕様(38万画素、140万画素等)、照度を変えて撮影した。

デジタルビデオカメラ及びデジタルカメラとも、撮影幅の変化に伴い検出可能となるひび割れ幅が変化することが確認され、特に照度の変化がひび割れ検出に大きく影響することを確認し下記のことが明確になった。

- ・撮影に必要な照度は500ルクス以上
- ・ビデオカメラによる移動点検時の速度は、2km/hr程度が望ましい。
- ・比較的大きなひび割れや欠け等の認識には14万画素以上で5m未満の距離で十分確認できる。
- ・ひび割れ幅等の確認を行うためには、258万画素以上のデジタルカメラにて近づけて撮影することが必要

また、民間で既に開発され、適用の可能性が考えられるレーザー式トンネル点検車を放水路トンネルに投入し、約100mの区間について点検作業を行い、点検方法としての有効性について検討し以下の結果を得た。



写真-2 点検車

- ・トンネル内部の状況を(欠け等を)確認可能。
- ・100m程度内面の画像を出力し検証、解析に要する期間は2週間。
- ・電子データとしてのボリュームは10m当たり約

14MB (9GB/6.3km)

- ・印刷出力は幅500mm用紙で100m当たり約1.4m (90m/6.3km)

### 3.2 内空断面変形計測技術

トンネル内面にターゲットを設置することなく、内空断面の形状変化が計測可能な技術として、レーザー方式を用いた計測技術について既存技術の調査を行った。調査の結果、1cm以下の精度にて計測可能な技術を採用し放水路トンネル内にて現地計測試験を実施した。

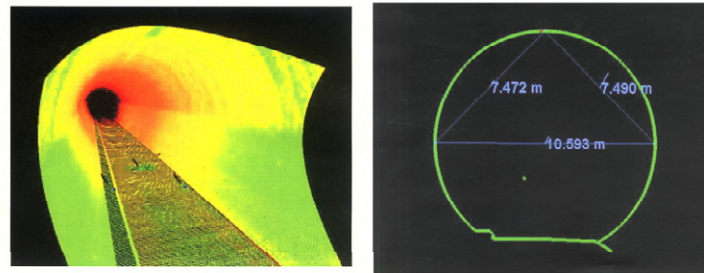


図-1 計測結果

試験結果は以下のとおりである。

- ・レーザー方式を用いた技術について、内空断面形状を必要な精度で計測可能。
- ・計測精度は11mの構造物で、約2mmの精度が確認された。
- ・内空断面の経時的変化を確認するためには、同位置断面を計測することが必要であり、そのために固定点となるポイントを設置する。

### 4. 初動点検システムの検討

緊急時はトンネル内に点検員に先駆けて入坑し内部確認を行う必要性があり、トンネル下部には河川からの流入土砂の堆積や流木等による走行移動の困難性が想定されるため飛行船方式を提案することとした。

飛行船にはビデオカメラを搭載し、運行させて内部の状況を収録し回収後、ビデオの再生画像によりトンネル内部の状況を速やかに把握して次の対応を判断しようとするものであり、初動点検試験用の飛行船の設計製作を行い、放水路トンネル内にて現地飛行試験を実施した。現地試験の結果、以下の内容が確認された。

- ・風向等の変化に伴い、飛行安定性が損なわれ風速

2～3 mが坑内に吹いた場合には飛行が困難となる状況が生じた。

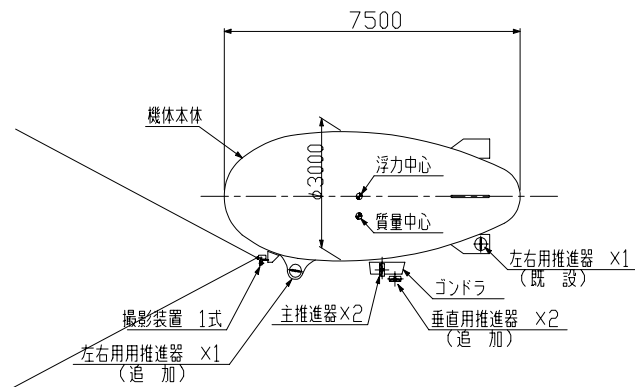
- ・曲線部等で、上部を接触しながらトンネルに沿って向きを変えることは、困難であることが確認。



写真－3 初期試験機

- ・風の影響がない場合には、飛行中はカメラのぶれ等の問題は生じないことが確認。
- ・必要推進力の確保とトンネル中心付近を飛行する制御方式の採用が必要。

上記課題に対する対策案を検討し、「推進器の出力アップ(推進器の増設)」「非接触自律飛行システム(超音波距離センサーを利用した制御)検討」飛行船の改造を実施した。



図－2 改造後試験機

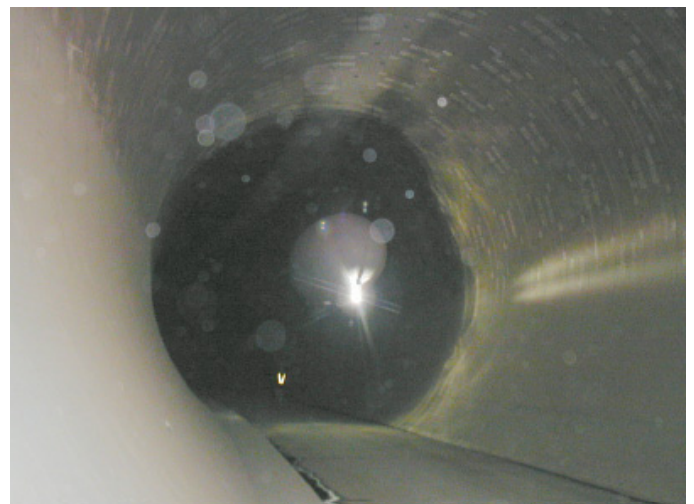
飛行船は理論的に前後の推進器を制御しても姿勢制御が困難である、最適なフィードバックゲイン(距離

のずれを元にどの程度制御をかけるか)について各種試行し、曲線部を含むトンネル内の自律飛行を可能とした。



写真－4 改造後試験装置

- ・追い風0.3～1.0m/sの条件下において直線区間と曲線区間においてトンネル中心から上下左右1 m程度の範囲内にて自律制御して飛行を可能とした。
- ・飛行船に搭載したデジタルビデオカメラ(60万画素)にて撮影された画像にてトンネル前方全面の状態が把握可能であった。
- ・ただし、向かい風では安定性が損なわれ、自律飛行が困難であった。



写真－5 自律飛行状況

そこで、追い風や向かい風の多少の乱流が発生して  
た際にも安定して自律飛行が可能となるための飛行船  
形状や尾翼の影響等の最適化を図り、またリアルタイム  
で画像が見られるシステムについて改良した。

- 船首形状は、一般的な飛行船と同様に船首の曲率  
Rを大きい方が安定する。
- L/D（船体長/船体直径）にて安定な領域が多  
いケースは、2.0と3.0であった。
- 尾翼サイズが大きいほど安定性を増し、飛行船断  
面積の12%以上にて安定が確保される。

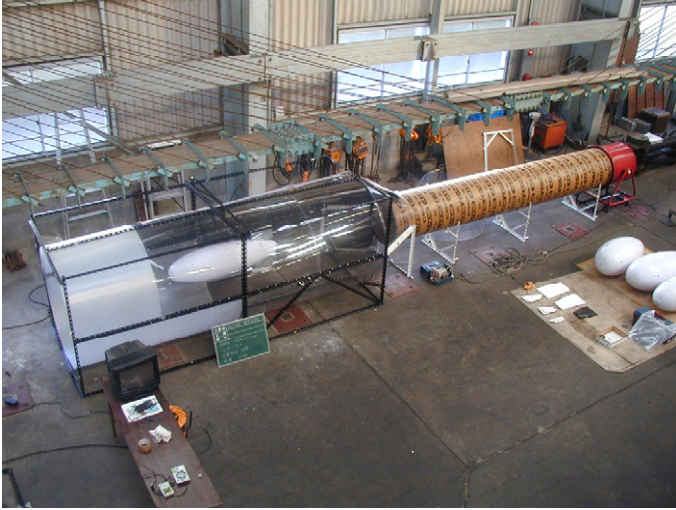


写真-6 風洞実験装置

縮小モデルを用いて、簡易な風洞実験を行った結果、  
下記の内容が確認された。



写真-7 改良後の試験装置

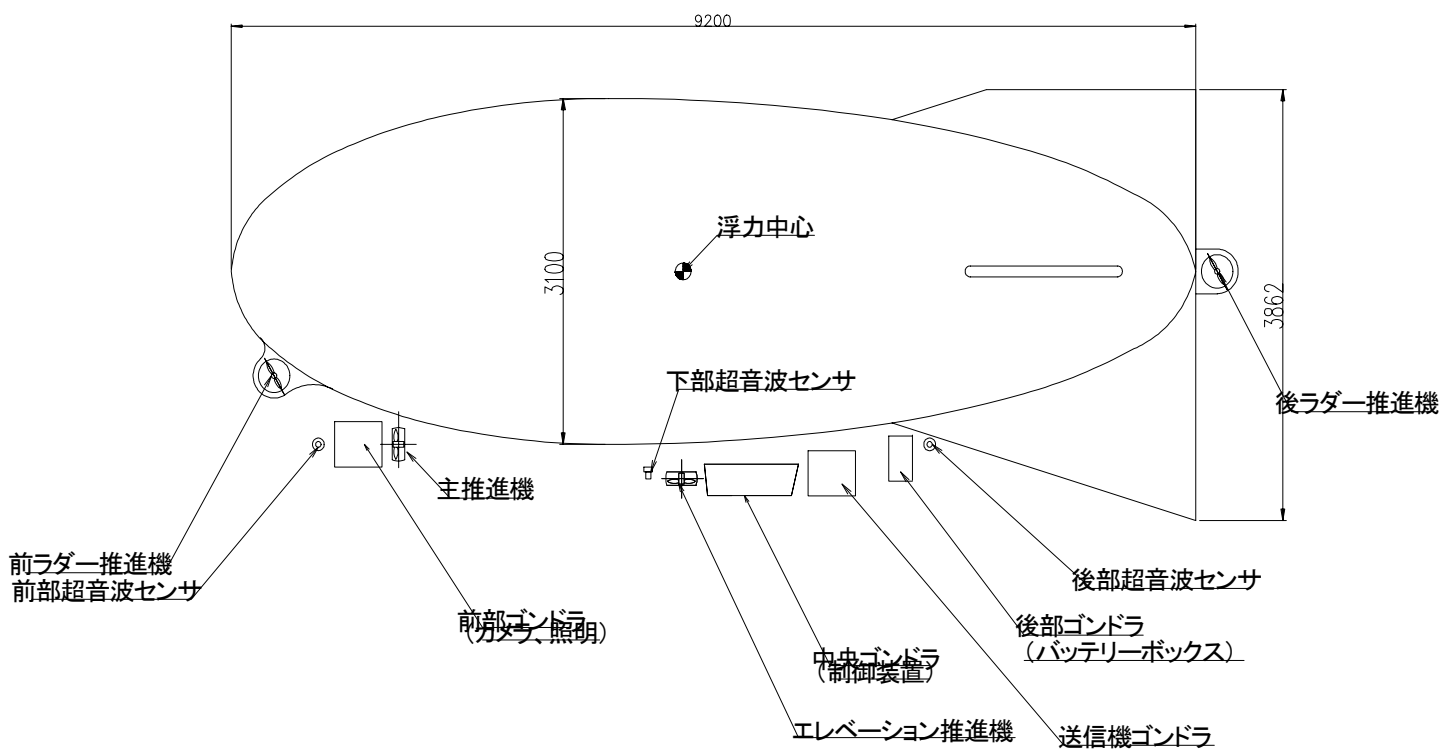
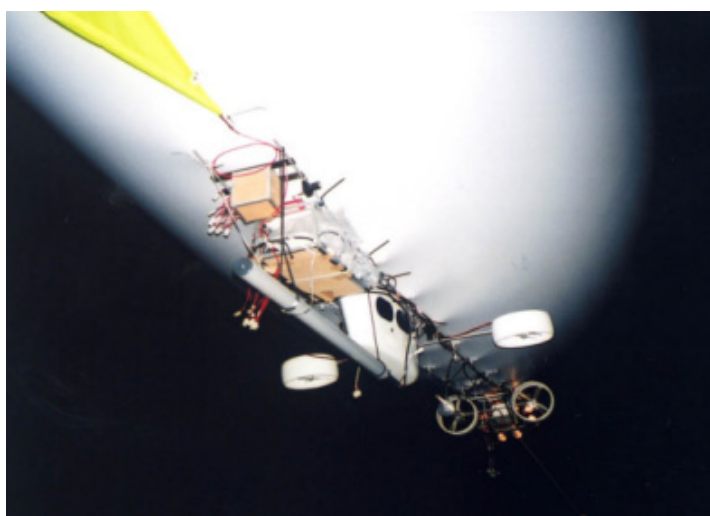


図-3 改良後試験機

画像送信方法としては、免許を必要としない特定小電力データ通信となる2.4GHzSS無線機を使用し、各種無線装置タイプ、アンテナ、画像圧縮方式を組合せ予備試験を行った結果、1000m以上の通信距離を確保できるのは、下記に示す組合せが最適であった。

- ・超長距離タイプ無線機
- ・27素子八木アンテナ
- ・MPEG4, 2（画像圧縮方式）

上記の結果、試験装置に無線機、アンテナ等を搭載し外郭放水路トンネル内において、飛行試験を行った。試験の結果、以下の内容が確認された。



写真－8 アンテナ等の搭載状況



写真－9 通信機搭載後の飛行状況

#### ①自律飛行について

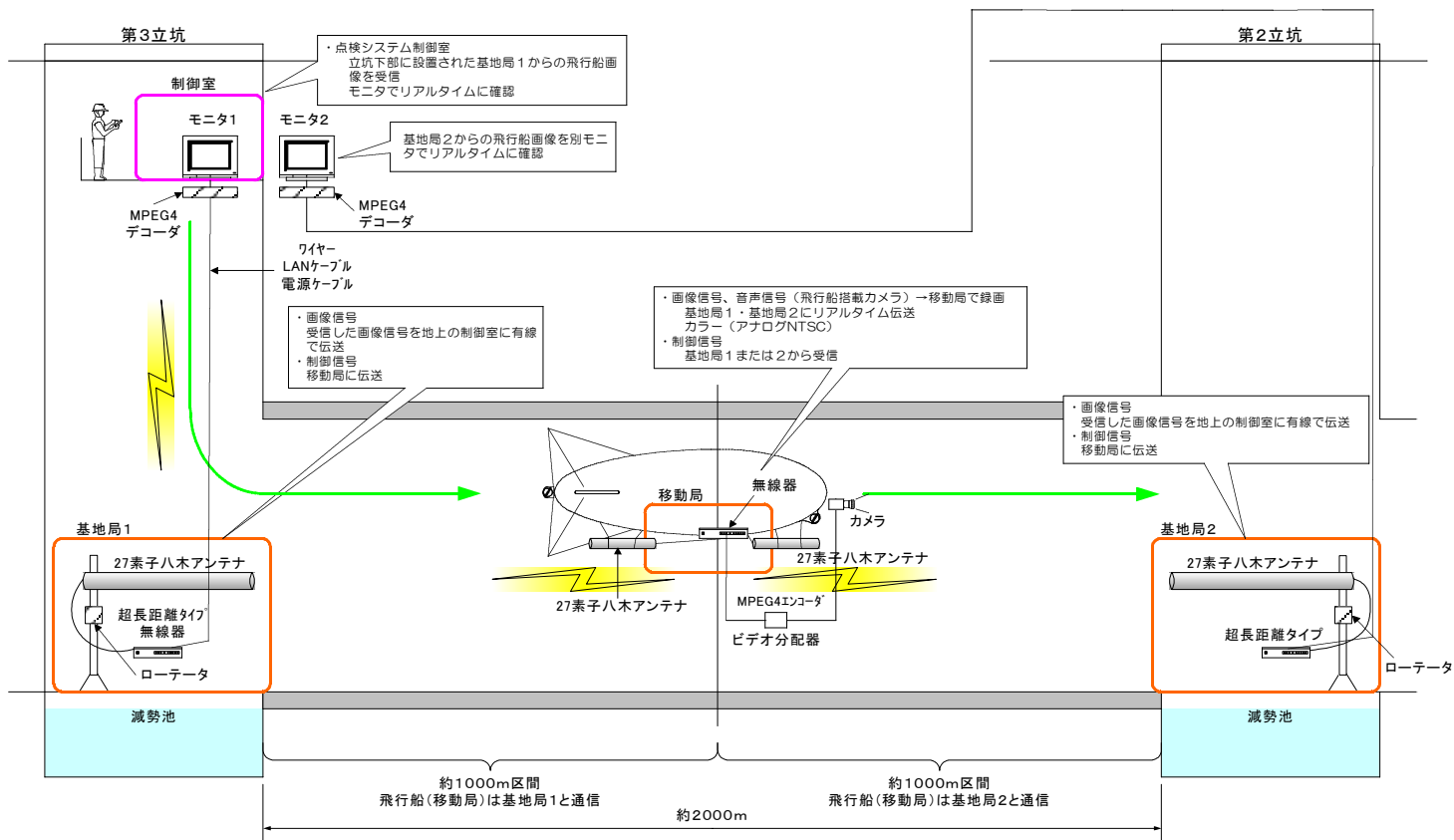
通信機搭載後、第3立坑から第2立坑に向かって自律飛行を実施した。その結果、追い風及び向かい風0.2～0.5m/sの条件下において直線区間と曲線半径250mのS字カーブを含む曲線区間においてトンネル中心から上下左右1m程度の範囲内にて自律制御を行いながら、立坑間距離約2kmを30分前後にて飛行可能とした。

#### ②画像送信について

飛行船に搭載したビデオカメラ（暗所撮影機能あり：20wハロゲンライト×8個）にて撮影された画像を第三立坑側（MPEG2圧縮）と第2立坑側（MPEG4圧縮）に無線送信した。そして、それぞれ基地局から約1km、約1.3kmの範囲でリアルタイムに画像が受信され、約300m区間のラップを含めて立坑間全線について飛行中に撮影された画像を立坑に設けた基地局にてリアルタイムに確認可能であった。

なお、第3立坑側よりも第2立坑側の方が通信距離が約300m長くなった要因として、画像圧縮方式の違い以上に電波の減衰が大きくなるR250mのカーブ区間が第3立坑寄りに集まっていることが大きく影響しているものと推定される。

飛行船の自律飛行制御の確立と、坑内無線通信システムの現段階における実現状況から下記に示すシールドトンネル点検システム構成を提案した。



機器構成(2~3立坑間の例)  
 図-4 初動点検システム案

## 5. おわりに

シールドトンネルにおいて、飛行船を用い無人にてトンネル坑内の概略状況を撮影し、リアルタイムに地上に画像を伝送するための初動点検システムを開発し、現地トンネルにて実証試験を行い、その能力を検証できた。

現時点での飛行点検可能な時間は、坑内の風向きと風速に影響され搭載重量の制限もあり、30~60分間(約2kmの第3立坑と第2立坑間の飛行可能)である。なお、飛行時間は搭載可能なバッテリー容量に左右され、今後の技術開発に伴い、飛行点検可能時間は延びるものと考えられる。