

新技術開発探訪

道路トンネル無人調査ユニットの開発

1. はじめに

新潟県中越地震では震源に近い国道17号線の和南津トンネル（延長300m）が被災し、覆工コンクリートのクラウン部で長さ約20m、幅約2m、重量約50tが剥落し、側壁は内側へ押し出され、路側排水溝が変状し、全面通行止を余儀なくされた。また、近くを通る県道も被災したことから交通網が寸断され、災害の復旧・支援に大きな障害となった（写真－1）。



写真－1 コンクリートの剥落

トンネル被害の早期復旧のためには、被災状況を速やかに把握し、的確な復旧活動を実施する必要がある。しかし、本震後にも大きな余震が多発する場合には、さらに崩落・崩壊の危険性が高まり、入坑調査は二次災害の恐れがあるため、余震が落ち着くまでは調査に入らず、迅速な被災状況

把握や災害復旧活動が困難な状況となる。

本開発は、被災後に二次災害の危険のあるトンネルにおいて、無人で坑内の状況を確認できる映像情報の収集を可能とする装置を開発し、安全で迅速な復旧活動の支援に資することを目的として取り組んだものである。

2. 地震発生から詳細調査までの経緯

道路トンネル無人調査ユニット（以下「本ユニット」という）の開発に当たり、本ユニットが装備すべき機能の抽出を目的として、和南津トンネルの被災後の初動点検から復旧工事までの点検および調査に関して道路管理者、施工業者にヒアリング調査を実施した。

2004年10月23日（土）17：56の地震発生後の余震（震度5弱以上）の発生状況は表－1のとおり、また、復旧工事着手に至るまでの点検および調査の実施者と目的については表－2のとおりで

表－1 余震発生回数

	7	6強	6弱	5強	5弱
10月23日	1	2	1	4	3
10月24日				1	
10月25日				1	1
10月27日			1		
11月4日				1	
11月8日				1	
11月10日					1
12月28日					1

表－２ 地震発生後の点検および調査

点検 調査	10月										11月		実施者	目 的
	23	24	25	26	27	28	29	30	31	1	2			
	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火			
被災	●											(17：56 地震発生)		
パト ロール	◎											道路管理者	通行可否の判断 被災状況の把握	
第1回 調査			◎									道路管理者 専門家 (土木研究所)	被災状況把握 復旧可能か否かの判断 大まかな復旧工法の選定	
第2回 調査				◎								施工業者	被災の範囲と程度の把握 復旧箇所と範囲の設定 復旧工法の選定	
第3回 調査					◎	→						施工業者	工事数量の把握 工法の適正性確認	
復旧 工事				→								(11/ 2：片側交互通行開始) (11/26：2車線開通)		

ある。

(1) パトロール

〔目的〕 通行可否の判断，被災状況の把握。

〔実施内容〕 目視確認，写真撮影。

※地震発生当日は，被災した和南津トンネルには19:30に到着し，入坑による目視での被災状況の確認を試みたが余震が続いたため入坑を断念した。そのため，トンネル坑外より目視確認のみ実施した。

(2) 第1回調査(10月25日)

〔目的〕 被災状況の把握，復旧可能か否かの判断，大まかな復旧工法の選定。

〔実施内容〕 目視確認，写真撮影。

※地震発生当日，翌日と入坑できず，この調査で初めて入坑し，被災状況の把握，復旧可能か否かの判断，大まかな復旧工法の選定を行うための目視判断，映像情報の収集を行った。

(3) 第2回調査(10月26日)

〔目的〕 被災範囲と重度の把握，復旧位置と範囲の設定，復旧工法の選定。

〔実施内容〕 写真撮影，被災位置と範囲の作図。

※復旧工事の位置と範囲の設定，工法選定の判断材料となる映像情報の収集を行った。また，こ

の調査結果を基に復旧工事に着手した。

(4) 第3回調査(10月27日)

〔目的〕 工事数量の把握，復旧工法の妥当性確認。

〔実施内容〕 被災箇所の寸法把握，亀裂の詳細調査，打音検査，背面目視確認。

※復旧工事と並行して，選定した工法が適切に実施できるかを判断するために，寸法計測や打音検査，覆工背面目視確認等を実施した。

3. 装備すべき機能の抽出

ヒアリング調査の結果より，復旧工法の検討を行うためには少なくとも第2回調査の内容が必要と判断した。

第2回調査で実施した「写真撮影，被災位置と範囲の作図」であれば動画撮影など既存技術を使い比較的容易に無人化が可能であり，また，「写真撮影」など映像情報取得が可能となれば専門家による「復旧可能か否かの判断，大まかな復旧工法の選定」が行え，さらに映像情報を活用した展開写真を作成することで「被災の範囲と程度の把握，復旧位置と範囲の設定，復旧工法の選定」が可能となり，復旧工事に着手できるため，本ユニ

ットが装備すべき機能は映像情報取得までとした。

なお、装備すべき機能を満たす機器は、早期完成とコスト削減のため、すべて既存技術より選定し、技術が陳腐化した場合はその機器だけを入れ替えられるようユニット化する構造とした。

各機能と選定した既存技術は以下のとおり。

(1) 無人走行機能（台車ユニット）

無人での映像情報取得には、遠隔操縦式走行台車に映像情報取得機器を搭載しなければならないが、災害時における迅速な手配、搬入路が被災した場合の輸送の容易性を考慮し、ヘリコプターや道路巡回用パトロールカーに積載可能なサイズで市販されている小型遠隔操縦ロボットを台車として採用。

(2) 遠隔操縦機能（通信ユニット）

遠隔操縦の方式は、見通しが効く範囲であれば落下物等に操作ケーブルを絡ませる危険がない無線LAN（2.4GHz帯）を使った無線操縦と、見通しが効かない範囲での確実なデータ送受信が行える光ファイバーケーブル（ $\phi 2.5\text{mm}$ ）による有線操縦の2系統を装備。

(3) 映像情報取得機能（撮影ユニット）

映像情報の取得は動画とし、トンネル内全景の様子を見るカメラと、壁面（アーチ、側壁）のひび割れや剥離などの状況と範囲を見るカメラの2種類を装備することとし、カメラはバッテリーと記憶媒体を個別に装備しているデジタルハイビジョンハンディカム（200万画素）を搭載。

(4) 照明機能（照明ユニット）

災害で照明がダウンした場合でも撮影が可能なように照明にHIDランプ（4300K）を装備。

(5) 位置把握機能（位置計測ユニット）

トンネル内における映像情報取得の位置を把握するため、距離を測るロータリーエンコーダーと方角を計る磁気方位計を装備。

4. 道路トンネル無人調査ユニットの概要

試作したユニットは、トンネル坑内の全景およ

び壁面の映像情報をリアルタイムに基地局に伝送する「移動局」（写真－2参照）と、坑口付近において移動局の操作と伝送された映像を表示し記録する「基地局」からなり、基地局は、移動局の操作、トンネル内全景の映像の表示と記録、壁面映像の記録を行う「移動局コントローラ」、壁面の映像を表示する「壁面調査用モニタ」、無線操縦用のアンテナで構成される（写真－3参照）。



写真－2 移動局



写真－3 基地局

表－3 移動局の仕様

【台車ユニット】	
寸 法	L975×H680×W500mm
バッテリー	リチウムイオン電池（2時間）
走行速度	計測時0.96km/h，帰還時1.2km/h
【通信ユニット】	
[光ファイバーケーブル] L=300m， $\phi 2.5\text{mm}$	
[無線] 2.4GHz帯，コーリニア型アンテナ×2本	
【撮影ユニット】	
デジタルハイビジョンカメラ 200万画素	
[走行用（全景）×1台] [壁面調査用×4台]	
記録容量	8GB（メモリースティック）
記録時間	2時間55分
【照明ユニット】	
HIDランプ（メタルハライド4300K）	
[走行用×1灯] [壁面調査用×2灯]	

表-4 基地局の仕様

【移動局コントローラ】	
外形寸法	L464×H442×W477mm
バッテリー	リチウムイオン電池（2時間）
モニタ	12.1インチ（80万ドット）
記録容量	160GB（ハードディスク）
記録時間	約40時間
【無線】2.4GHz帯，バッチ型4素子アンテナ×1本	
【壁面調査用モニタ】	
外形寸法	L350×H165×W450mm
モニタ	12.1インチ（80万ドット）

移動局，基地局の仕様は表-3，4のとおり。

5. 実トンネルでの実証試験

冬期閉鎖トンネル（W8.19m×H5.75m）を使用した機能確認試験を実施し，無線・有線による稼働および映像取得において問題がないことを確認した（写真-4，5参照）。

また，この試験で取得した4台の壁面調査用カメラの映像データ（50m分）を使い，展開写真作成を行った（外注）（写真-6参照）。

データ送付後の展開写真作成までに要した時間

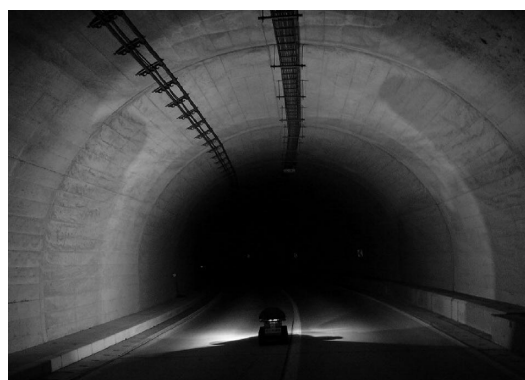


写真-4 トンネルでの機能確認試験



写真-5 無線による遠隔操作

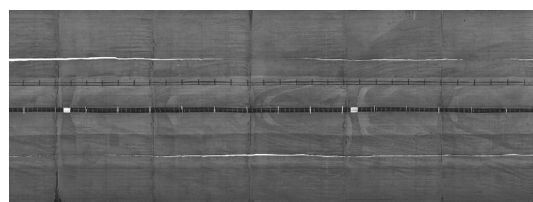


写真-6 トンネル展開写真

は，データ変換1日＋展開写真作成15時間であった。

作成した展開写真は，トンネルの壁面が綺麗であったこともあるが，コンクリートの打ち継ぎ目が判別できる精度ででき上がり，被災後の覆工コンクリートの状況も判別できると判断した。

トンネル1km分の映像情報から展開写真作成を想定した場合，壁面調査用カメラ1台のデータ量は約4GB（4台分で約16GB）になり，インターネットでのデータ送信は不可能である。また，記憶媒体による郵送では1日か2日を要してしまう。よって，早急に展開写真作成を行う必要がある場合には，損傷部のみの画像処理とするなどの対応が必要となる。

6. ヘリコプターとパトロールカーへの積載検証

本ユニットは，全国への迅速な輸送を目的として北陸地方整備局保有のヘリコプター「ほくりく号」による空輸と，現地付近ヘリポートから災害現場でのパトロールカーによる陸送を想定して設計している（図-1参照）。

そのため「ほくりく号」の搭乗スペースに格納可能か検証を行った。検証は床の積載物固定用の



写真-7 ユニットの固縛状況

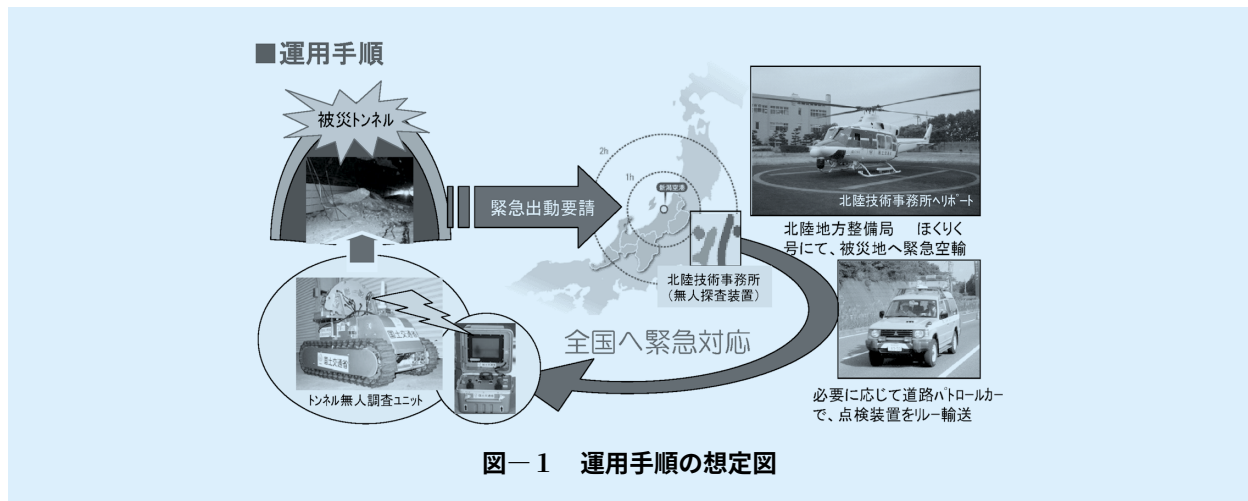


写真-8 ユニットの積載状況

固縛用リング位置、積載方法、固縛方法、固縛ベルト本数の検討を行い問題ないことを確認した（写真-7 参照）。

また、道路巡回用のパトロールカーへの積載の検証も行い問題がないことを確認した（写真-8 参照）。

7. 現場適応性試験

トンネルが被災した場合の初動調査に使用可能な試作機は完成したが、今後、さらに幅広い用途での活用を可能とするため、他の施設での適応性試験により使い勝手や機能面での不具合を抽出することとした。

試験終了後に対象施設の管理者から使い勝手や機能面に関する意見を聴取した。

(1) 新潟県長岡市山古志寺野地先

中越地震により天然ダムが形成された現場の排

水堰堤完成に伴い、それまで仮設で埋設されていた排水路（高耐圧ポリエチレン管） $\phi 1.8\text{m}$ のコンクリート充填に際して管路約200mの管内調査を行った（写真-9、10参照）。

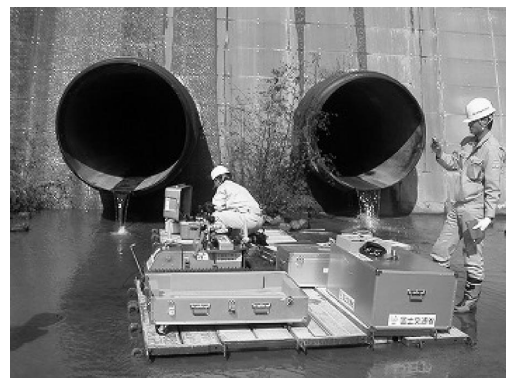


写真-9 仮排水路の出口



写真-10 管内調査

【意見】

- ・カメラはズーム操作ができた方が良い
- ・バックで帰る際のカメラが必要（管路が小断面でありUターンしての帰還が不可能なため）
- ・ある程度水に浸かっても動けるように防水性能

の強化 など

(2) 茨城県稲敷市結佐地先

茨城県の霞ヶ浦と利根川を結ぶ霞ヶ浦導水利根排水路，導水路延長2.5km，導水路内径 ϕ 4.0mの管路約300mの管内調査を行った（写真－11，12参照）。



写真－11 導水路の入口



写真－12 管内調査

【意見】

- ・カメラはズーム，パン，チルトの遠隔操作機能が欲しい

- ・後進用カメラの増設（管路底部に障害物がありUターンしての帰還が不可能なため）
- ・防水性の強化 など

8. 改 良

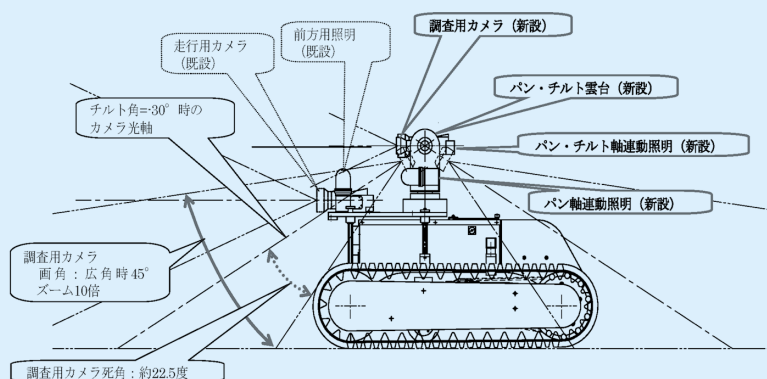
現場適応性試験で聴取した意見より改良内容を検討し，以下の改良を行った。

(1) 意見に対する検討

- ① 「カメラのズーム，パン，チルト機能の追加」「後進用カメラの追加」要望に対し，任意の位置および範囲の映像情報収集および後進用のカメラの増設を目的として，パン（360°回転），チルト（ -20° ～ 90° 俯仰），ズーム（光学 $\times 10$ 倍），後進用反転（180°反転）可能なカメラ1台とスポットライトと照明が一体となった調査用カメラユニットをアタッチメントとして増設することとした。
- ② 「防水性の強化」要望に対しては，ベースマシンに市販品を使用したことから，現段階での改良は不可能であるためこのままとした。

(2) 主な改良内容

- ・調査用カメラユニットの製作
- ・ソフト改良
- ・映像，音声の外部出力端子設置（リアルタイムな情報の配信が可能）
- ・光ケーブルを300mから500mに交換（図－2，写真－13，14参照）。



図－2 側面図

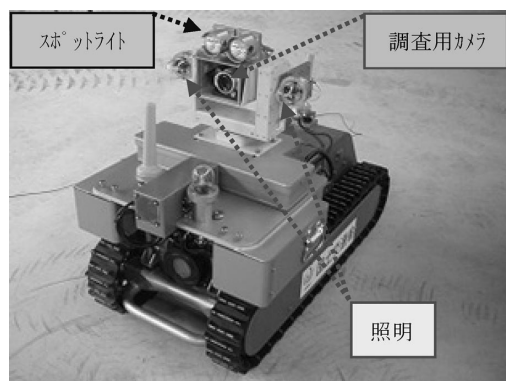


写真-13 調査用カメラユニット

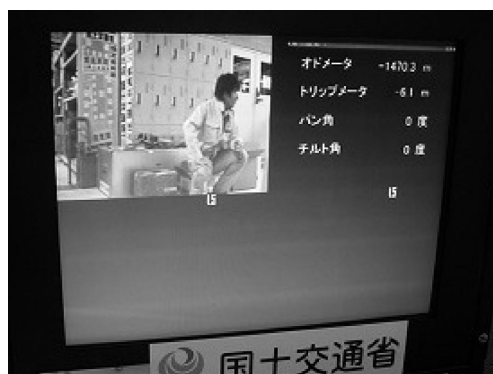


写真-14 調査用カメラのモニター

9. 運用マニュアル（案）作成

作成に際し、専門家にヒアリングを実施しマニュアル（案）を作成した。とりまとめ項目は以下のとおりである。

- ① 用語の定義
- ② 出動要請手順等
- ③ 輸送手順
- ④ 点検作業
- ⑤ トンネル展開写真作成時の注意事項

10. 主な機能

- ① トンネル内全景と壁面（アーチ、側壁）のリ

アルタイムな状況確認、映像の録画が可能

- ② 無線（小電力データ通信2.4GHz：見通しがきく施設に有効）、または有線（光ケーブル：見通しがきかない施設に有効）で、おおよそ500mの範囲で操作が可能（両坑口からの入坑で、延長1kmのトンネル調査が可能（北陸地方整備局管内のトンネルの9割をカバー））
- ③ 走行速度1km/h、稼働限界2時間（片道500mの往復を2回）
- ④ 分解能は、ハイビジョンカメラ画素数（200万画素）と撮影距離より、3mm程度のクラックが判別可能
- ⑤ 走破性能は、段差10cm程度（ピッチ角（前後）：30°程度、ロール角（左右）：20°程度）
- ⑥ 防水性能は、降雨程度の中で使用可能（水深2cm以上での使用は不可能）
- ⑦ 映像および音声の出力を情報コンセントに接続することによりリアルタイムな情報の配信が可能
- ⑧ 映像から展開写真の作成が可能（ただし、別途発注）

11. まとめ

新潟県中越地震の経験から、トンネルが被災した場合の初動調査に使用可能な試作機を完成させ、さらに他の施設における適応試験を経て、トンネル以外の施設においても使用可能な調査ユニットの開発を行った。

北陸地方整備では災害対策用機械として1台を保有し、有事の際には迅速に全国へ運搬できるよう、災害対応可能な体制を整えている。

国土交通省北陸地方整備局北陸技術事務所

施工調査課 施工調査係長

施工調査課長

施工調査課 主任

小林 弘朗
宮島 実
畑山 啓