

山岳トンネルにおける切羽前方探査の高精度化の試み

Sequential application of several survey systems in tunnelling for accurate ground classifications

原 敏昭¹⁾・熊谷成之¹⁾・木村 哲²⁾・平野 享²⁾

Toshiaki HARA, Shigeyuki KUMAGAI, Tetsu KIMURA, Toru HIRANO

The effectiveness of the combination of three methods (TDEM, TSP, and DRISS) by means of collecting the precise information on the ground ahead of the tunnel face, was estimated through application to tunnel construction projects. As a result, it was found that these methods, when used in combination, can provide higher accuracy than used separately, and can also enable safe and effective tunnel construction.

Key Word : Tunnel, TDEM, TSP survey, DRISS, Geological Inference

1. はじめに

山岳トンネルの工事において、切羽前方の断層破碎帯・帯水層・地質変化等の情報を事前に高精度で得ることは施工の安全性及び効率化の上で極めて重要である。しかし、事前調査として一般に行われている地表踏査・弾性波探査・ボーリング等の結果だけでは掘削をする上で不十分であることが多く、突発的な湧水・地質急変箇所に遭遇することがある。その対策として各種の切羽前方探査が行われているが、技術の適用・精度の上でバラツキが大きい。そこで、戸田・西松両社はトンネルの品質・安全性の向上と工事コスト削減のため、高精度で切羽前方を探査するシステムの研究を行った。

本システムに適用する探査技術とは、TDEM法 (Time Domain Electro Magnetic method : 地表からの電磁法による比抵抗調査、地表からの探査深度 700m)、TSP (Tunnel Seismic Prediction : トンネル坑内からの地震波による切羽前方 100m~150m 区間の探査)、DRISS (穿孔探査法 ; Drilling Survey System : 穿孔用ジャンボのドリフターを利用したトンネル切羽から 30m~50m のさぐり削孔) の3技術である。これらの技術について、地山状況に応じた特性や精度を検証し、有効な技術の組合せを探るとともに、各探査法によって得られた異なる物性値 (比抵抗値、弾性波反射面、穿孔油圧データ) の総合的検討により、高精度な探査システムの構築を図ることを目的に研究開発を行った。図-1に各探査法の分類と探査対象及び得られる情報についての概要を示す。

本報告では、各探査から得られる物性値と必要となる地山性状を検討し、さらに施工中のトンネル現場に適用した結果を示す。それらから得られた探査の組み合わせによる効果、定量的な地山評価について記す。

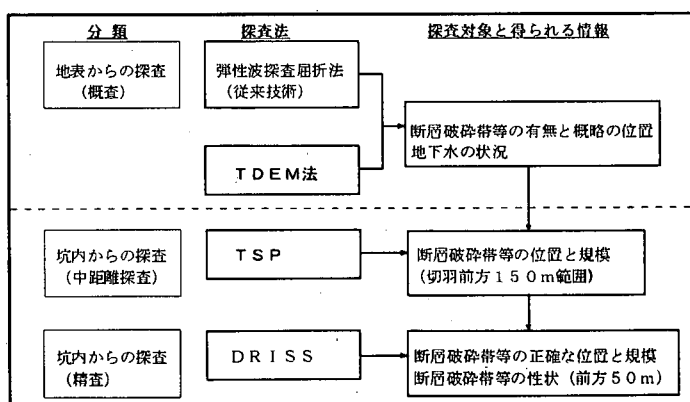


図-1 各探査法の概要と流れ

1)正会員 戸田建設(株)土木工事技術部

2)正会員 西松建設(株)技術研究所

2. 高精度切羽前方探査システムの構築

2.1 切羽前方探査の現状と課題

山岳トンネル工事では、地山や施工方法等によって必要とする情報は異なるため、合理的な設計・施工を目的に、様々な事前地山推定法や切羽前方探査技術が実施されている。例えば事前地山推定技術では、弾性波探査屈折法、高密度電気探査、電磁探査、表面波探査などがあり、また切羽前方探査技術としてはTSP法、トンネルHSP法、反射トモグラフィ法、さぐり削孔(穿孔探査)、切羽からの先進ボーリングなどが挙げられる。

事前地山推定法の探査技術としては、一般的に弾性波探査屈折法が行われ、地表踏査、ボーリング結果とあわせて設計が行われる。この弾性波探査屈折法は、岩盤や土砂地盤の物理的性質や力学的特性をよく反映されると方法として古くから土木地質調査、特にトンネル調査では多く用いられてきた。しかし、速度逆転層(上層が硬岩で下層が軟岩の場合)は探査不可能であること、探査深度が100m程度であることなどの探査限界もよく知られている。これらの速度逆転層や探査深度の問題点を解決する探査法として、最近では電気・電磁探査などの比抵抗調査が行われるようになってきた。

一方、切羽前方探査技術として、最も確実に直接的な方法として先進ボーリングが挙げられる。この技術は、オールコアリングにより地質区分を行うと同時に、削孔スピード、トルクから岩盤状況の推定も可能であり、最も実際の地山状況に近い情報を得ることができる。この方法を用い、1回の切羽からの先進ボーリングで100m程度を目標にして行い、これを繰り返すことによりトンネル全線を対象に実施している。しかしコストが高いこと、ボーリングマシンが施工中は切羽を占有し、他の切羽作業ができないことなど問題点も多い。この先進ボーリングの経済性や施工性を解決する技術としてTSP法、トンネルHSP法、反射トモグラフィ法、さぐり削孔(穿孔探査)などが行われている。

3.2 高精度切羽前方探査システムの提案

前節で述べた通り、これらの新しい事前地山探査法、切羽前方探査技術は、対象地山、探査深度、探査条件などに一長一短があり、一つの探査方法によりトンネルに対し必要な情報を十分に与えることはできない。そこで、トンネル施工との兼ね合い、経済性、効率性等を考慮し、トンネル施工に必要な十分な地山情報を与える探査システムの確立が望まれていた。そこで、戸田・西松両社は、研究開発分野における技術提携を機会に、各々の社内ですでに確立した保有探査技術の見直しと、相互の技術の組合せによる検討により、複数の探査法の中からの選択肢があり、かつ効率的に情報を得るための探査の組合せが可能で、地山を定量的に評価できるシステムの研究を行った。表-1にトンネル施工で必要とする地山性状に対し、地山物性をパラメーターとして、両社が保有する探査法との関係を示した。各探査は探査位置、精度、探査対象等が異なるため、各探査法の長所・短所をふまえ、図-2のフローにしたがって、適切な探査を段階に応じて選択・適用し、地山情報を得ることを提案する。また、トンネル掘削によって得られた切羽情報を探査結果にフィードバックし、再検討することにより探査結果のスパイラルアップをはかることができる。

表-1 必要とする地山の性状と、地山物性、探査法との関係

必要とする地山の性状					地山の物性		探 査 法		
岩質	地層境界	地下水	断層	変質帯	弾性波速	Vp	TDEM	TSP	DRISS
△	△	△	○	○		m/s			
△	△	△	○	○	度	Vs	-	△	-
△	△	-	○	○	密度(γ)	kN/m ³	-	△	-
○	△	-	△	○	一軸圧縮強度(q_u)	MPa	-	-	△
○	-	-	△	△	弾性定数(E, ν)	MPa	-	△	△
-	△	-	○	△	音響インピーダンス($\gamma \cdot V$)	kN/s·m ²	-	○	-
△	○	○	○	○	比抵抗値(ρ)	Ωm	○	-	-
△	△	-	○	○	穿孔エネルギー	J/cm ³	-	-	○
△	△	-	○	○	ダンピング係	MPa	-	-	○
-	△	-	△	△	回転圧	MPa	-	-	○
-	○	-	○	△	地質構造の走向傾斜	度	△	○	△

○：有効、△：有効な場合もある、-：無

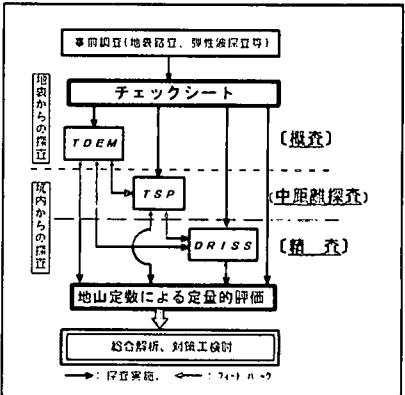


図-2 高精度切羽前方探査システムフロー

3. 現場適用

図－2に示した高精度切羽前方探査システムを構成する各探査法の適用性、相互比較、探査限界、組み合わせによる効果等を把握するため、施工中のトンネルにおいて現場適用実験を実施した。

トンネルは、延長約3,000mの道路トンネルで、地質は主に溶結凝灰岩と、同時期の貫入岩である花崗斑岩からなる。溶結凝灰岩は塊状硬質岩で、垂直性の節理が発達しており、強風化部では軟質化し、粘土質砂状を呈する。貫入する花崗斑岩は硬質岩であるが、亀裂が発達し、強風化部ではタマネギ状風化が著しく、表層崩壊が見られる。一軸圧縮強度は、軟質部で3.6～6.7N/mm²、硬質部で36.7～41.6N/mm²を示し、貫入する花崗斑岩部においても81～121N/mm²を示す。断層破碎帯は、工区全体でF1～F6まで6ヶ所所推定され、一軸圧縮強度51N/mm²、弾性波速度 $V_p=3.4\sim5.2$ km/sの中硬岩～硬岩の地山である。本トンネルで、断層の位置及び性状、地下水状況等を把握するため、トンネル掘削前にTDEM法探査を、掘削中にTSP、DRISSを実施した。図－3に測点NO.215～NO.190区間の事前調査結果を、図－4に3探査法を適用した箇所での各探査法の探査位置、探査結果及びトンネル掘削結果、湧水状況を示す。図－3の事前調査に示したとおり、3探査法を実施した当該区間では、NO.197～NO.194区間(NO.197～NO.196+10：断層、NO.196+10～NO.194：断層に伴う破碎ゾーン)にF5断層の出現が予想されていた。3探査の実施結果とトンネル掘削結果との対照および、得られた知見及び効果について以下に示す。

(1) TDEM法探査

TDEM法探査は、地表から比抵抗構造を調査した。図－4に示した当該区間においては、比抵抗値は100～1,000 Ω mを示し、特にNO.210～203付近及びNO.194～191付近はトンネル掘削高さ付近で周囲と比較して比抵抗値が低下しており、亀裂の発達或いは湧水の発生が予想された。この予想に対し、図－4に示したトンネル掘削結果では、NO.208～204付近は湧水量が2,500 μ l/分と、前後区間の約2,000 μ l/分に対し明らかに多い。また、NO.195+06～NO.190+18区間は粘土、湧水を伴うF5断層が出現した。探査で得られた比抵抗値は、地下水、亀裂質岩盤、挟在粘土等の影響により低下したものと考えられ、探査結果と掘削結果は概ね一致していることが判明した。

(2) TSP

TSPは切羽位置が、①NO.199+02及び②NO.195+14の2地点で、主にF5断層をとらえることを目的に探査を行った。探査実施位置及び探査結果の概要を図－6に示す。なお、探査器械は、①探査は二次元探査機、②探査は二次元探査機及び三次元探査機の両方を用いた。

①切羽位置NO.199+02からの探査結果

NO.198+16(探査切羽から6m)に薄い弱層、NO.196+04(切羽から58m)から弱くなるという結果が得られた。掘削結果から、NO.196+00周辺から一部変質した花崗斑岩が出現し、反射面はこの境界を捉えたものと考えられる。NO.198+16では、明瞭な反射面と推定されるような地質変化はなかった。

②切羽位置NO.195+14からの探査結果

反射面密集ゾーンがNO.195+06～NO.195+00付近の1箇所(切羽から8m～14m)、弱層がNO.193+11(切羽から43m)とNO.193+05(切羽から49m)の2地点が得られた。探査結果の解釈としては、この反射面密集ゾーンをF5断層の始まりに相当すると推定した。また弾性波速度としては、 $V_p=4.0$ km/sが得られた。掘削結果からは、最初の反射面密集ゾーンはF5断層の始まりを示していると考えられる。その後の弱層は、F5断層の区間中に存在した。2回の探査結果は、切羽から50m前後までの比較的明瞭な断層、弱層の始まりをほぼ捉えているが、反射面が明瞭でない(薄い弱層部)ところは地質変化点としてはトンネル切羽で認められなかった。またTSPによる弾性波速度と、割れ目の状態、粘土の挟み状況等DRISSの情報とを併せてDI地山と推測したところ、掘削結果と一致し探査の組み合わせの効果による精度のよい地山評価を行うことができた。

(3) DRISS

事前調査、TDEM法及びTSPにより、F5断層と推定される地質構造を捉えるため、4地点(NO.197+3.0、NO.195+15.5、NO.194+10.5、NO.193+5.1)でDRISSを行った。探査実施位置及び探査結果の概要を図－6に示す。

①DRISSの実施結果では、NO.195付近から脆弱な岩盤、粘土を挟む土砂層があり、以後硬軟を繰り返す状況

が把握された。この結果はトンネル掘削結果ともよく整合し、DRISSによる断層の位置確認が正確に行えることが確認された。

②F5断層は、トンネル掘削高さでの出現位置 NO. 195+06～NO. 195+01 区間で、暗灰色粘土と主とする破砕部が出現した。事前のDRISSの結果では、この区間は穿孔エネルギーが $50\text{J}/\text{cm}^3$ を示し、その手前の硬質部が示していた $100\sim 150\text{J}/\text{cm}^3$ に対して非常に低くなった。またクリコは粘土質であったことなどから、この区間を F5 断層の脆弱部と判断し補助工法を行うこととした。補助工法の選定にあたっては、脆弱な区間が 4m 程度と短いこと、DRISS 実施孔からの湧水が殆どなかったことなどから、シリカレジンを注入式フォアポーリングを採用した。従来の DRISS 探査では、補助工法への展開は砂岩・頁岩層への 1 例しかなく、そのケースでは、穿孔エネルギーが $100\text{J}/\text{cm}^3$ を境界として AGF の採用に活用したものであった。今回のトンネルへの探査適用では、花崗閃緑岩中の断層への先受け工実施の位置及び工法選定データの一つとして活用できた。

(4) まとめ

本現場では、断層、湧水が予想され、かつ土被りが $200\sim 250\text{m}$ と大きく、従来行われてきた弾性波探査では探査不可能とされるトンネルにおいて、弾性波探査屈折法と 3 探査法の比較を行った。F5 断層のトンネル掘削高さでの出現位置は、弾性波探査で 50m 違い、TDEM 法で 20m 違い、TS P は①探査 (F5 断層の手前 76m 地点で実施) で 18m の誤差、②探査 (F5 断層の手前 8m 地点で実施) でほぼ特定、DRISS ではほぼその位置が特定できた。また TDEM 法による比抵抗構造から判断される低比抵抗部で施工上問題となる湧水量が検出された。この結果から、大土被り・湧水地山での探査結果の有効な活用事例が示されたと考えられる。

また本探査結果によれば、実施した相互の結果を考慮して探査をすれば、実施回数を減らせるだけでなく、その精度もいちじるしく向上することが示されたといえる。また、TSP によって得られた弾性波速度、DRISS によって得られた穿孔エネルギーは補助工法採用の参考データとなる可能性も示された。

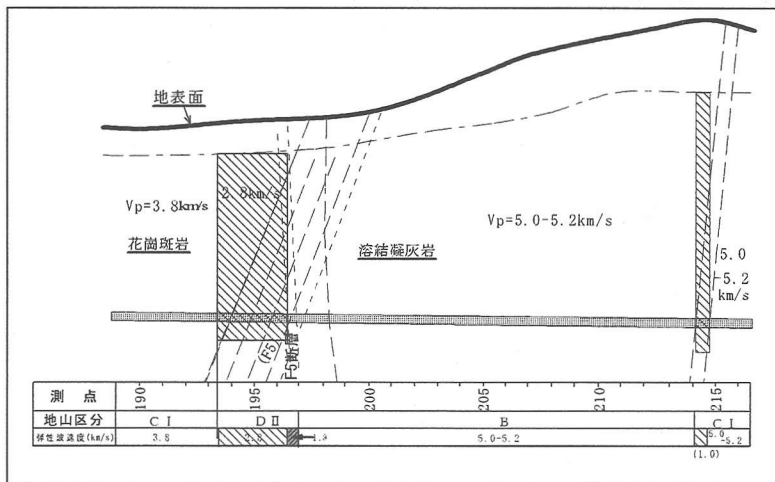


図-3 トンネル事前調査結果

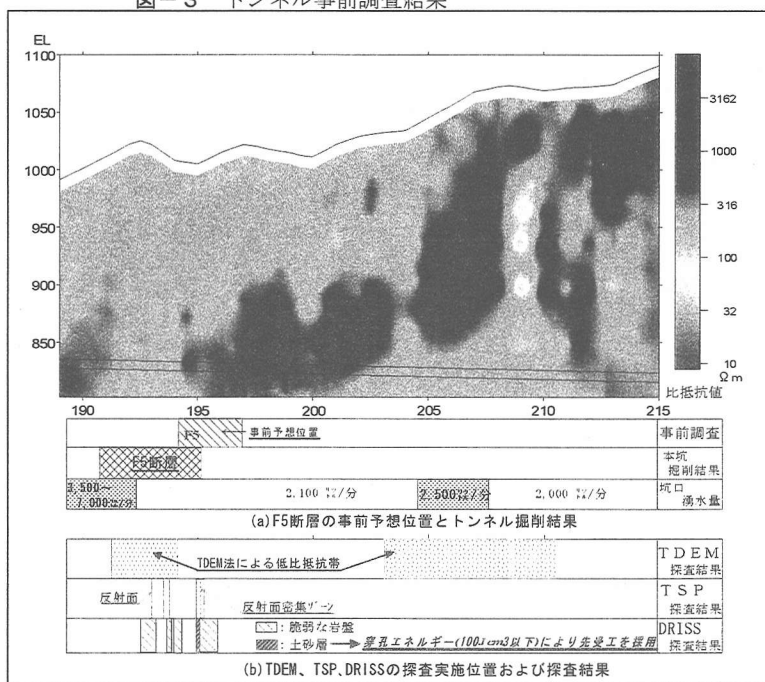


図-4 探査結果と、トンネル掘削結果

4 高精度切羽前方探査システムの効果

4.1 TDEM法、TSP、DRISSの組み合わせによる効果

図－2に示す探査システムの実施フローを用いて各探査を組み合わせることで実施することにより、実施時期、精度、得られる物性値等が異なるものを、トンネル施工により有用なものとする事ができる。

(1) TDEM法とTSPの組み合わせによる特徴

TDEM法は探査方向が地表に対して垂直方向、TSPはトンネル坑内から主に水平方向に探査を行うため、組み合わせることにより水平成層構造および鉛直地質構造の両方に対して有効な探査方向となる。また、TDEM法は工事着手早期におけるトンネル区間の概要調査をおこなうことにより、TSPがより有効となる探査位置での実施が可能となり、探査対象に対する精度が向上する。3章で示したF5断層に対するTSPも、TDEM法の概査を参考にすれば、②探査のみで有効なデータが得られたと考えられる。一方、TDEM法は比抵抗値、TSPは弾性波速度および弾性波反射面と得られる物理量が異なることにより、例えば破砕帯の評価では、岩の破砕と湧水量の変化に踏み込んだ予測を行える。

(2) TDEM法とDRISSの組み合わせによる特徴

TDEM法によって得られた地質異常帯の概査の結果を参考に用いて、DRISSによる探査をトンネル坑内からの精査として地質異常帯出現予想位置の近傍で行うことにより、DRISS実施回数の減少させ、かつ問題地質箇所の詳細な位置の判明およびTDEM法により得られた低比抵抗部が破砕帯なのか或いは湧水帯なのかを判定できる。また、TDEM法で得られた低比抵抗部に帯水層が予想される場合には、低比抵抗部手前からのDRISS実施により、水抜きがより効果的に行える。

(3) TSPとDRISSの組み合わせによる特徴

TSPとDRISSは、異なる物理量（各種穿孔反力）が得られることにより、TSPで観測可能な反射の発生が弱い対象、例えば①漸次的な地質変化、②平面境界を持たない不連続性、③局所的な脆弱層について判定が可能となる（例：花崗岩の風化帯、レンズ状に入った混在岩の調査など）。また、DRISSによる地山評価法は、穿孔エネルギー等の地山評価パラメーター値の大小で定量的に判断しているが、穿孔エネルギー値を、地山分類に用いる弾性波速度や一軸圧縮強度への換算する方法がなかった。そこでTSP203の使用により得られる切羽前方の弾性波速度分布を用いれば正確に換算できる。すなわち、直接法であるDRISSとTSPの探査結果を比較検討することによって、切羽前方の弾性波速度分布がより高精度に把握可能となり、地山分類、補助工法採用のデータとして活用できる。

(4) TDEM法、TSP、DRISSの組み合わせによる特徴

TDEM法による概査、TSPによる中距離探査、DRISSによる精査の組み合わせにより、探査対象とする地質構造の位置が絞り込まれ、TSPが有効な位置で実施でき、さらにDRISSを有効な位置のみで実施することできる。また、3探査法から得られる物性値（比抵抗値、弾性波反射面及び速度、穿孔油圧データ）はそれぞれ異なるので、データの総合的な検討により地山性状を把握することができる。

4.2 判明する地山定数を用いた定量的地山評価

高精度切羽前方探査システムの適用によって得た地山物性値を、施工へのフィードバック情報とするためには、この物性値を根拠にした地山評価とそれに基づく補助工法や支保選定の具体的手順を作成しなければならない。従来の両社内での探査適用と今回の研究によって判明した得られた物性値と地山評価の関連について、表－2にTDEM法により得られる比抵抗値と定性的な地山状況との関連、表－3にTSPによる地山分類事例、表－4にDRISSによる穿孔エネルギーと地山状況、補助工法の適用事例をまとめた。

探査結果の定量的地山評価については、TDEM法は得られる比抵抗値を弾性波速度・ボーリング結果等との対照により地山分類が行える可能性があり、TSPは203型によって得られる弾性波速度により、従来の弾性波反射面の把握だけでなく、地山分類が行えることが示された。DRISSについては、穿孔エネルギーが補助工

法を採用する際の管理基準値の一つとなることが示され、地山分類、補助工法の施工箇所の特定、選定などの地山評価に役立つデータが掘削前に把握できるようになった。今後、探査結果による地山分類、補助工法への展開は、探査結果と施工状況の対照、探査実績の積み重ねにより、さらなる地山評価法の精度向上を目指さなければならない。

表－２　TDEM法により得られる比抵抗値と地山状況

地山比抵抗の影響因子		比抵抗値	予想地山状況
飽和度	大	小	地下水、湧水
水分含有量	大	小	破碎帯、湧水
温度	高	小	高温岩盤
間隙水の比抵抗	小	小	塩水、海水
粘土鉱物含有量	大	小	変質帯、断層

表－３　TSPによる地山分類事例（２トンネルからの実施例による）

地山分類	A	B	CⅠ	CⅡ	DⅠ	DⅡ
弾性波速度	4.8以上	4.8～4.5	4.5～4.0	4.0～3.5	3.5～3.0	3.0以下

表－４　DRISSによる穿孔エネルギーと地山状況、補助工法の適用事例

Case	削岩機	ビット	フィード圧	岩種	支保パターン	穿孔エネルギー（J/cm3）	地山状況、補助工法との関連
1	アトラス COP1238	クロス・Φ80	3MPa	砂岩・頁岩	DⅠ	>100	AGFなし
					DⅠ	≤100	AGFあり
2	アトラス COP1838	ボタン・Φ64	4MPa	花崗斑岩	DⅠ	>100	先受け工無し
						≤100	セグメント式およびシールドマシン注入式フィードリング
3	古河 HD190	ボタン・Φ64	4MPa	断層	DⅠ	>100	
						≤100	AGFおよびシールドマシン注入式フィードリング

5. おわりに

従来、単独で用いてきた探査法をシステムとして構築し、組み合わせて行うことにより、戸田・西松両社の保有技術の相互活用による開発費用の削減だけでなく、探査システムの効果として、探査性能の補完、有効な位置での探査実施による探査回数の減少、地山脆弱部に対する探査精度の向上等といった利点があり、現場適用により探査結果によって地山分類、補助工法への定量的評価が行えることが判明した。

最後に、共同研究を行うにあたり、探査システムの指導・評価をお願いした山口大学社会工学科中川教授、探査システム現場適用の際にお世話になったトンネル作業所方々はじめ、多くの方々にご協力いただいたことに感謝いたします。

【参考文献】

1) 原敏昭, 岡村光政, 木村哲, 石山宏二, 平野享：高精度切羽前方探査システムの提案, 第 56 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 2001. 10

2) 原敏昭, 熊谷成之, 木村哲, 石山宏二, 平野享：高精度切羽前方探査システムの構築, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 2002. 9(投稿中)

3) 平野享, 木村哲, 石山宏二, 堀場夏峰, 多田幸司, 熊谷成之, 石垣和明, 原敏昭：新しい反射法切羽前方探査システムの検証を目的とした現地試験, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 2002. 9(投稿中)

4) 石山宏二, 木村哲, 平野享, 山下雅之, 多田幸司, 熊谷成之, 石垣和明, 原敏昭：高精度切羽前方探査システムの適用, 第 57 回土木学会年次学術講演会講演概要集Ⅲ, 2002. 9(投稿中)