山岳トンネルにおける施工型CIMから 予測型CIMへの転換

畑 浩二¹・中岡 健一²・藤岡 大輔³

1正会員	大林組 技術研究所 地盤技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)			
E-mail:hata.koji.ro@obayashi.co.jp				
2正会員	大林組 技術研究所 地盤技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640) E-mail:nakaoka.kenichi@obayashi.co.jp			
3正会員	大林組 技術研究所 地盤技術研究部(〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640)			

E-mail:fujioka.daisuke@obayashi.co.jp

国交省のCIM構想に基づき、山岳トンネルにおける設計、施工、維持管理に至る取得情報の一元化を目 指したシステムの開発を行っている.施工段階では、トンネル切羽前方の地質変化を評価し支保選定や対 策工選定に活用することが重要である.

そこで、ノンコア削孔切羽前方探査とボーリング孔内観察から得られる地質情報を元に、地山性状変化 や崩落可能性岩塊の予測を取り込んだCIMシステムを開発した. CIMは発注者と施工者間での情報共有化 の促進ならびに意思決定の迅速化に繋がることから、工期遵守、工費削減さらに安全安心施工に寄与でき る技術になると期待できる.

Key Words : tunnel, predictive CIM, geological profile, exploration drilling, borehole scanner

1. はじめに

インフラ構造物の CIM (Construction Information Modeling/Management) が注目を集める中, 著者ら¹⁾は山 岳トンネルを対象にした CIM システム開発を推進し、 近畿地整見草トンネルで我国初の CIM による統一デー タを電子納品した.これらデータは試行工事とは別で, 自主的判断から実施したものである.開発に際しては、 運用する上での効率化とシステム変更時における容易 性に特に注目し, 使用する各種ソフト群とデータ間の 結合や紐付け方法に考慮した。具体的には、地形モデ ルやトンネル形状モデル作成には AutoCAD Civil3D[®]を, 地質構造モデル作成には GEORAMA®を, 切羽観察・ 各種計測結果・支保工情報には CyberNATM[®]と Excel[®] を使用した.属性データの紐付けは Navis+®で行い,全 ての要素を Navisworks[®]で統合し管理している.施工段 階で得られた情報が主体的であることから「施工型 CIM」と称した.著者ら¹⁾が開発した施工型 CIM の全 体像を図-1に示す.

ところで、山岳トンネル施工では、切羽前方の未掘削 領域における地質の構造や力学・水理特性を掘削前に把 握しておくことが施工の良否や安心安全に役立つ.事実、



図-1 開発済み施工型CIMの全体像

切羽前方探査と称して種々な技術が開発され,実施工に 供されていることから,その重要性や注目度が高い事が わかる.著者らは,低コストでかつ高精度で切羽前方の 地質評価が可能なノンコア削孔切羽前方探査技術(以下, ノンコア削孔探査)²³⁹を開発し,多くの山岳トンネル現 場で使用されている.また,ノンコアにて削孔した穴の 壁面を簡易に観察できる装置⁴を開発し,併用して利用 している.

本報では、これら2つの方法から得られた計測情報を

CIM システムに取り込み, さらなる情報の共有化と地 山の可視化を高度化する新たな展開について述べる.上 述の2種類の情報は切羽前方の地質予測という位置付け であることから, CIM に取り込んだシステムを「予測 型 CIM」と称することにした.

2. 切羽前方探查技術

山岳トンネルが他のインフラ構造物と大きく異なるの は、性状や構造が不明な地質場を掘削しなければならな いことにある.当初設計段階において、弾性波探査等の 物理探査により施工全線における大まかな地質構造(断 層の有無や湧水の可能性)や、適する支保規模が選定さ れる.しかし、物理探査技術の適用限界や地山の特徴に よって、必ずしも十分な情報を得られているとは限らな い.事実、予想とは異なる脆弱な地質や突発的な湧水に 遭遇し、掘削進行が極端に低下したり、場合によっては 地山崩落などの事故に遭遇することが過去何度もあった. そこで、施工に際し切羽前方の地質構造や性状を精度良 く予測し、施工の合理化や安心安全に寄与すべく種々な 予測技術が開発され実用化されてきた.

(1) ノンコア削孔探査

古くから,探り削孔により切羽前方の数 m~数十 m の地質の硬軟や分布する岩質を判断する方法が利用され ることはあったが、感覚的で定性的であった. そこで、 現場に常駐するジャンボに搭載された削孔装置の機械デ ータを元に、地山を削孔するために必要なエネルギー (掘削体積比エネルギー)を算出し、地山の定量評価を 試みる先駆的な研究が行われ、実績を積んできた. 打撃 系の削孔装置で地山を削孔する場合、装置のフラッシン グ、回転圧、フィード圧および打撃圧が大きく削孔効率 に影響する.一方、上述した掘削比体積エネルギーを利 用して地山を定量評価する場合、フィード圧は一定であ ることが望ましいが、現実はジャーミングの危険回避や 削孔時間短縮からフィード圧は適宜変化している. した がって,機械データを利用した地山評価ではフィード圧 変動を考慮することが地山の適正評価に繋がると考えら れる. そこで, 著者ら²³³は, フィード圧の変動影響を 排除した削孔速度変換解析方法を開発し、最適支保工規 模を評価するノンコア削孔探査技術「トンネルナビ[®]」

(NETIS: KT-120035-A) に繋げた. 詳細は既往文献に譲 るが,基本的な考え方は、3次の多項式で定式化したフ ィード圧と削孔速度の関係を基に、フィード圧を一定と 仮定した削孔速度に換算(以下,換算削孔速度)し, 地山の定量評価を行う. なお、実評価に関して、地質の 異なる山岳トンネルでも共通な地山指標とすべく換算削





図-3 削孔速度変換解析による地山評価の一例

表-1 正規化削孔速度比による地山等級区分案

道路トン

ネル案	鉄道トンネル案

正規化削孔速度比	地山等級	正規化削孔速度比 地山等級
$0.45\sim$	Dπ	0.425 ~ I $_{\rm L}$
0.40~0.45	DI	$ \begin{array}{ c c c c c c c c c c c c c c c c c c c$
0.35~0.40	Сп	0.340~0.380 II _N
0.30~0.35	С	0.290∼0.340 Ш _N
~ 0.30	В	~ 0.290 IV_N

孔速度の最大値と最小値の差分で正規化し利用している.

図-2 に探査概要を示す.削孔時に取得するデータは, 削孔深度,削孔速度,打撃圧,回転圧,フィード圧等で ある.原位置では,削孔状況をモニターで確認しながら 大まかな地山状況を把握する.データ取得後,削孔速度 変換解析ソフトにかけることで,10分程度で詳細な結 果出力を可能にしている.図-3 に地山評価の一例を示 す.図中,縦軸の正規化削孔速度比が大きくなるという ことは,削孔速度が速くなるので地山が硬質から軟質に 変化することを示す.計測例では,網掛を施した2ヶ所 で削孔速度の上昇が顕著になり,局所的な脆弱性を予測 した.トンネル断面掘削時に確認した結果,断層破砕帯 と亀裂集中帯が確認され,予測とよく整合した.また, 正規化削孔速度比と地山等級の関係を精査し,表-1に示 すように道路・鉄道トンネル種別に合わせた地山等級区 分案を提案している.

本技術は,現在までに当社の22現場で活用し,探査 延長は約30kmに達している.その結果を整理し,掘削 時の切羽観察による定量評価を仮に正解値とすると,予 測による適合率は80%程度となっている.したがって, 上述した削孔速度変換解析方法による地山予測性は高精 度であると考えられる.

(2) 簡易型ボーリング孔内観察装置

上述のノンコア削孔探査の基本は、削孔機械による物 理的な岩盤破壊に伴う強度や剛性および脆弱性の判断と なる. したがって、岩盤中に内在する割れ目や風化変質 などの情報は機械データに含まれているものの、単独で 情報取得することは難しい.例えば、同じDクラス岩盤 と言え、亀裂が細片状になった脆弱性なのか、風化変質 が進み強度が低下した状態なのかの正確な分類までは困 難である. また、切羽前方の割れ目による不連続性を評 価し、施工中の岩塊滑落や岩盤崩落等を掘削前段階で予 測するには至っていない. 切羽観察を通して、割れ目を 抽出し崩落可能性岩塊を予測する解析手法はあるものの, 切羽掘削前の段階で予測するための割れ目系の基本情報 を取得することは簡単ではない. そこで、ノンコア削孔 探査完了後の削孔穴を直接観察し、割れ目系の走向傾斜 データを取得することで、崩落岩塊の掘削前予測を展開 することを考えた.

従来から、鉛直ボーリングを対象にしたボーリング孔 内観察技術は種々ある.しかし、水平孔を対象にした孔 内観察は、装置の移動操作に難があることから一般的で はない. そこで, 著者ら⁴は, 削孔したボーリング孔の 側壁状況を簡易なビデオカメラで観察できる装置を開発 し、ノンコア削孔探査と併用し現場展開している. 図-4 にボーリング孔内観察装置の外観を示す.本装置は, LED照明付き防水型工業用ビデオカメラを改良し利用す ることで低価格に抑えた. ビデオカメラ部分には、ボー リング孔内でのスムーズな移動(排泥効果の工夫)とオ フセット防止を目的にした突起状治具を取り付けている. カメラ部が装置の最大径となり、ノンコア削孔径に合わ せている. ボーリング孔内への挿入は、出力映像をノー トPCで確認しながら、適宜塩ビパイプを継ぎ足し実施 する. 図-5にボーリング孔内観察画像の一例を示す. 孔 壁面の凹凸、粗さ具合、風化変質および割れ目の認識は 可能である.

3. CIMシステムへの取り込み

CIM において,最も重要な事項は,各種データの連 関と情報の紐付けである.図-6 に開発中の CIM におけ るモデル間結合を示す.図中,施工時データの作成と追 加や更新のカテゴリーの中で,切羽前方探査結果を組み 込んでいくことになる.

開発に当たりコストの低減は言うまでもなく,種々な データの可能な限りの 3D 可視化,システム変更の容易



図-4 簡易型ボーリング孔内観察装置



図-5 ボーリング孔内観察の一例



図-6 CIMのモデル間結合

性,運用に際しての現場技術員の負担軽減,国際標準化 を見据えたプロダクトモデルへの対応可変性等に配慮し たシステム構成を念頭に置いた.特に,3D可視化と現 場技術員の負担軽減は重要であり,CIMを普及させるに



図-7 ノンコア削孔探査解析結果とボーリング孔内観察画像の一例

は必要不可欠と考えられる.現場での観察,計測のほとんどがExcelをベースにしてデータ整理がなされており、できるだけ少ない操作でCSVデータをCAD変換することが望まれる.

(1) ノンコア削孔探査解析結果のCAD化

図-7に通常使用におけるノンコア削孔探査解析結果を 示す. 図中の下段に削孔距離と正規化削孔速度比の関係 を単位時間当たのヒストグラムで整理し示した. 得られ た解析結果から,表-1に基づき地山等級(支保工規模) を明示している. これは,機械データ1秒毎の計測結果 に対する解析予測値である. したがって,探査区間にお ける地山等級の変化状況を勘案し,実質的な最適支保工 規模を選定することになる.

ここで示す正規化削孔速度比のトレンドカーブでも地 山等級の推移状況は見て取れるが、より認識度を高め発 注者と施工者間で情報の共有化を促進するためには、 CAD表現が都合良いと考えた.そこで、正規化削孔速 度変化から評価される地山等級で色分けした円柱状の 3D-CADモデルをExcel内で変換できる仕組みを作成し、 CIMシステムの中で描画できるようにした.ただし、切 羽断面積に比較してボーリング断面積は非常に小さく、 実寸では認識上不都合があるため、ボーリング孔径を拡 大デフォルメして描画することにした.上記データを CAD変換し、CIMに取り込んだ結果を図-8に示す.ノン コアボーリング削孔位置と方向を実態に合わせることで、 状況判断がより正確になる.一方、当初段階における地 質構造モデルを設定し、CIMに組み込んでおくと、図-9 に示すような描画も可能であり、当初設計の地山等級と



図-8 地山等級のCAD化とCIM描画例



図-9 当初地質構造モデルへのCIM描画例 (ジャンボ、切羽画像、予測図は貼り込み)



図-10 ボーリング孔内における割れ目系の走向傾斜判定

予測との整合もしくは乖離が瞬時に判別できる.

(2) キーブロック予測

著者ら⁵は、切羽画像を基に割れ目系を取得し、連続 する切羽でこの割れ目系の連関と同定を行う事で幾何学 的な分布を求め、トンネル周辺に生じる崩落可能性岩塊 (以下、キーブロック)を予測するシステムを既に開発 し、山岳トンネルや波方国家石油ガス備蓄基地現場等で 実用化⁶している.この技術は、比較的大きな掘削面を 対象にして割れ目系を取得しているが、切羽での割れ目 系発現情報に依存するため切羽周辺地山でのキーブロッ ク予測に位置付けされる.一方、ボーリング孔内部で観 察された情報を用いることができれば、切羽前方のキー ブロック予測が可能になると考えられる.そこで、ボー リング孔内の壁面画像から、図-10に示すような赤点線 の割れ目系が認識されたら、走向傾斜は割れ目系の上 端・下端・左端・右端を基に算定することができる.

図-7に示す区間での孔内観察画像から10本の割れ目系 を抽出した.図-11に抽出の一例を,表-2に推定した走 向傾斜と観察された割れ目の状態を示す.割れ目系を円 盤モデルとしてトンネル断面に描画したものが図-12(a) である.円盤モデルはトンネル断面中心と一致させ描画 した.ついで,トンネルを掘削するとトンネル断面が自 由面となり,その面と円盤モデルで構成された三角錐形 状のキーブロックが天端部に発現した.このキーブロッ クを構成する円盤モデルのみを描画したものが図-12(b) であり,キーブロックのみ描画したものが図-12(c)であ る.いずれもCIMシステムと連動し,統合化できる.

図-12(c)で推定したキーブロックの体積は9.74m³,重量 は0.26MN程度である.したがって,天端直上に発現す ることから常時滑動力は落下モードと等しく0.26MNと 想定した.また,水平震度Kh=0.21と上下震動Kv=0.105 を仮定すると地震時滑動力は0.30MPaとなる.吹付けコ ンクリート抵抗力を0.945MN,割れ目の摩擦抵抗力を 0.007MN(常時,ただし地震時は0MN)とすると,常時 の安全率は3.6,地震時安全率は3.2となり,予測された



図-11 割れ目系の走向傾斜抽出例(表-2No.1)

表-2 抽出した割れ目系の走向傾斜

割れ目系 No.	走向傾斜	割れ目の状態
1	N66E69S	微小開口割れ目
2	N45E69N	微小開口割れ目
3	N78W50N	微小開口割れ目
4	N89W41N	開口割れ目
5	N15E50S	微小開口割れ目
6	N66E39S	微小開口割れ目
7	N69E86S	閉じた割れ目
8	N66E58N	微小開口割れ目
9	N36W73S	微小開口割れ目
10	N74E69N	開口割れ目

キーブロックは当該ヶ所の吹付けコンクリートで安定化 できるものと評価した.このように、キーブロックの存 在が予測されると、簡易計算によって常時および地震時 における安定性が直ちに算定できる.

4. おわりに

施工型 CIM の次なる展開として、ノンコア削孔探査 とボーリング孔内観察の結果を取り込んだ予測型 CIM を示した.予測結果を 3D-CAD 展開し CIM に取り込む ことで情報の可視化と統合化が図れる.その結果,発注 者と施工者間での情報の共有化が促進され,施工の合理 化や維持管理に繋がる地質構造モデルの整備に役立つと 期待できる.なお,ノンコア削孔探査に関しては,取得 データ解析から CIM 描画までの一連の流れはほぼ自動 化ができている.一方,ボーリング孔内観察画像から割 れ目系を抽出し,キーブロック評価に繋がる流れは現状 手動である.現場技術員の負担軽減の観点からも可能な 限り自動化を推進していきたい.

以上2方法は、地山の強度特性と幾何学特性に対応し ているが、重金属や可燃性ガス予測、突発湧水探査を含 めて、CIM システムを構成し、より良いインフラ構造 物を構築するための維持管理システムに繋げていきたい.

参考文献

- 杉浦伸哉,後藤 直美,畑 浩二,藤岡大輔:山岳トンネ ル施工 CIM から維持管理 CIM の流れ 山岳トンネル施工 CIM 納品事例,2015 年度土木情報学シンポジウム講演集, Vol.40, pp.29-32,2015.
- 2) 桑原 徹,畑 浩二,中岡健一:ノンコア削孔トンネ ル切羽前方予測技術の新展開,臨床トンネル工学, 特集号 5,平成 22 年度最新トンネル技術講演会, pp.1~10,2010.
- 3) 桑原 徹,畑 浩二,赤澤正彦:ノンコア削孔調査による山岳トンネル切羽前方探査精度の検討,第23回トンネル工学研究発表会 トンネル工学論文集,第23巻,pp.1-9,2013..
- 4) 藤岡大輔,畑浩二:簡易な孔内カメラを用いたノンコア 削孔切羽前方探査の高度化,第70回土木学会年次学術講 演会講演概要集,VI-684, pp.1367-1368, 2015.
- 5) 畑 浩二, 中尾通夫, 北岸秀一:3 次元 CAD を利用 した岩盤内不連続面の可視化, 可視化情報学会講演 論文集, pp.281~284, 1997.
- 6) 中岡健一,畑 浩二,市川雅之,小笠原光雅,前島俊雄, 山本浩志:波方 LPG 岩盤貯槽におけるキーブロック安定 性評価,第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文 集,pp.404-409, 2010.

(2016.8.5受付)



図-12 キーブロック解析結果

CONVENTION TO PREDICTION CIM FROM CONSTRACTION CIM

Koji HATA, kenichi NAKAOKA and Daisuke FUJIOKA

In recent years, there is an active movement to introduce CIM (costruction information modeling/management). CIM is important to make the maintenance of the information obtained at the time of the design and construction.

In the construction stage of the tunnel, it is important to select the optimal support-member to perceive the geological changes in the tunnel face forward. Therefore, to predict the geologica change from the non-core exploration drilling and borehole scanning, we have developed the CIM system that is capable of three-dimensional visualization.