

切羽前方地山でのトンネル変形予測システム『PAS-Def』の概要と適用事例

西松建設株式会社 正会員 ○亀谷英樹 山下雅之 竹村いづみ

1. はじめに

一般的に、山岳トンネルの事前設計では、限られた地質調査情報を用いて標準設計により支保構造や補助工法が計画される場合が多い。しかしながら、実際にトンネル掘削を開始すると、事前設計と乖離した地山条件に遭遇する場合も多く、予期せぬ工費増大や工程遅延等に陥るリスクがある。事前設計段階での地質調査の質や量を増強する考え方もあるが、山岳トンネルが線形構造物である特性から費用対効果に見合った成果が得られない場合が多い。

このような現状から、山岳工法では情報化施工を基本として、坑内の変位計測や切羽観察によって、切羽や支保部材の安定性を施工中に評価するにより、事前設計の不確実性を補っている。しかし、これらの観察・計測による評価は、経験的または主観的要素が強いため、定性的で客観性が低いことも事実であり、必ずしも安全で経済的かつ合理的な施工が実施されているとは言い難いことも指摘される。さらに、この従来方法では、既掘削部の情報と切羽観察からの地山情報にのみ依存するため、切羽前方の評価・予測が困難であり、対応策が後手に廻る傾向が強い。筆者らは、切羽前方探査と現場計測工および数値解析を組み合わせた情報化施工管理システム『PAS-Def』を開発し、上記の問題を解消することを試みた。本稿では、当該システムの概要と適用事例の概略について報告する。

2. 切羽前方変形予測システム『PAS-Def』の概要

本システム(PAS-Def: **P**redictive and **A**nalysys **S**ystem for tunnel **D**eformation)は、『切羽前方探査』、『現場計測工(A・B等)』および『数値解析』の3つの要素技術を組み合わせた山岳トンネル工事の情報化施工管理システムである。図-1は、これらの各要素技術を個々にまたは全て組み合わせて得られる効果を示す概念図である。

すなわち、切羽前方探査から切羽前方の地山物性値等を穿孔データから定量的に評価し、その物性値を反映した数値解析(順解析)で、トンネル掘削時の地山や支保の変形や応力状態を予測する。一方、既掘削区間については、A計測結果等を基にした数値解析(逆解析)を用いて、地山や支保の変形や応力状態を定量的に再現する。さらに、順解析と逆解析の比較・検証およびB計測結果等との比較・検証を行って両者の関係を適宜補正することにより、システム全体の予測・評価の精度や信頼性を向上させる(図-2,3参照)。この一連の予測・評価作業は、A計測工等を実施する全ての任意断面において、汎用PCにより自動的に管理・制御する。本システムの切羽前方探査には、ドリルジャンボを用いた穿孔探査 DRISS¹⁾を採用した。また、数値解析の順解析には一般的な2次元弾性FEM解析コードを採用し、逆解析には、櫻井・進士²⁾らが

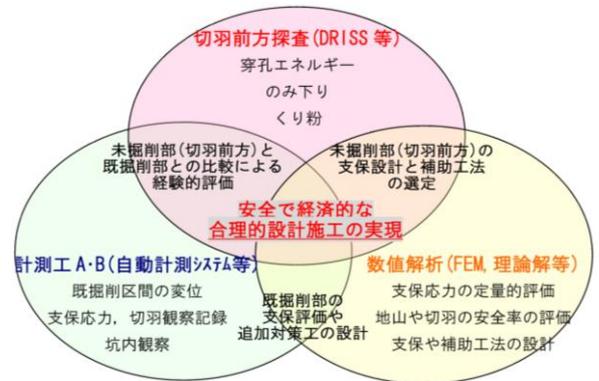


図-1 施工中の調査・計測・解析の要素技術とその効果

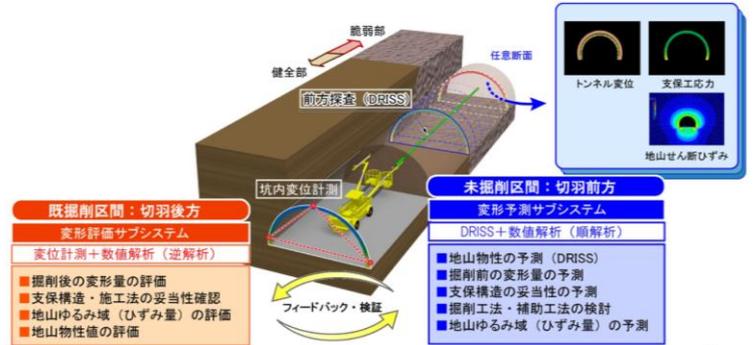


図-2 PAS-Defのシステム概念図

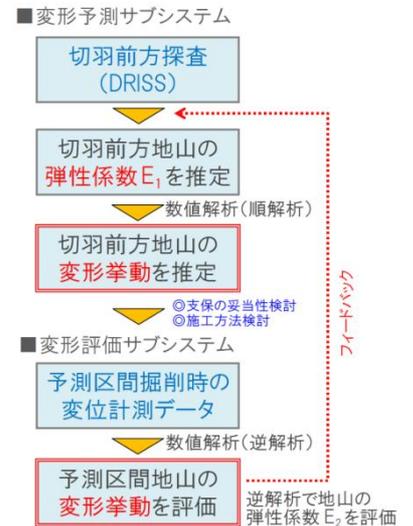


図-3 PAS-Defの概略フロー図

キーワード：トンネル変形予測システム『PAS-Def』, 切羽前方探査『DRISS』, 逆解析, 順解析, 現場計測工

連絡先：〒105-8401 東京都港区虎ノ門1-20-10 西松建設株式会社 土木事業本部 土木設計部 TEL 03-3502-7637

定式化した直接逆解析法による 2 次元弾性 FEM 逆解析コードを採用した. A 計測工は光波測距儀を用いた自動計測システムを採用した. また, これらの全データを制御・管理するプログラムは独自に開発を行った.

3. 実現場への適用事例

(1)適用現場の概要

本システムを適用した工事は, 2 車線道路トンネル(トンネル幅 D: 約 13m)を NATM で建設する工事の一部区間である. 主要地質は三畳紀チャートまたは頁岩であり土被り H は最大約 160m である.

(2)切羽前方探査 DRISS と FEM 逆解析により得られた地山弾性係数の比較

DRISS の穿孔エネルギー S_E および岩盤強度 σ_c とトンネル坑口距離との関係を 図-4 に示す. ここで, 穿孔エネルギー S_E (J/cm^3) と岩盤強度 σ_c (N/mm^2) との関係は既往の研究¹⁾から $S_E = 30 \sigma_c^{0.5}$ として計算している. また, 穿孔エネルギー S_E から予測した地山弾性係数 E_r -DRISS およびトンネル掘削後の A 計測結果から

FEM 逆解析により得られた地山弾性係数 E_r -DBAP と坑口距離との関係を 図-5 に示す. ここで, 地山弾性係数 E_r -DRISS (MPa) と岩盤強度 σ_c (N/mm^2) との関係は, $\log([E_r\text{-DRISS}]/10) = P_1 \times \log(10 \sigma_c) + P_2$ として算出した³⁾. 本適用事例において, 同式中的変数 P_1, P_2 はトンネル測点 100m 毎に, DRISS による岩盤強度 σ_c と FEM 逆解析による地山弾性係数 E_r -DBAP の両データから最小二乗法で同定し(図-5 中の白抜きマーカー), 次区間 100m では, それらの変数と DRISS による岩盤強度 σ_c を用いて地山弾性係数の予測を行った(図-5 中の点線区間). 図-5 より, DRISS 等から予測した地山弾性係数(図-5 中の点線)は, FEM 逆解析による E_r -DBAP(図-5 中の青丸印)よりも全体的にやや小さいものの, 地山硬軟の程度やその挙動を良好に予測できていると考えられる. なお, 上式中的変数 P_1, P_2 の同定結果は 図-6 に示す.

4. まとめ

情報化施工管理システム『PAS-Def』は, 現場適用試験結果より, 切羽前方の地山弾性係数をおおむね予測することができることから, 切羽前方の支保パターンや補助工法を合理的に計画することが可能であるとともに, トンネル掘削後の A 計測結果等からその妥当性を客観的かつ定量的に評価できるものと考えられる. そのため, 本システムの導入により, 山岳トンネル工事の安全かつ合理的な設計施工の実現および設計根拠や対策工の必要性と妥当性の明確化を行うことができると期待される.

また, 近接施工等の特殊条件下においても強力な施工管理ツールとして活用できると考える. 更に, トンネル掘削後の地山の緩み状況や支保部材の応力状態を FEM 逆解析で蓄積できることから, 供用後の維持管理の面でも変状原因の推定や対策工の設計時において有効な基礎資料として活用できると考える.

参考文献 1) 山下他 4 名: 長尺さく孔データと岩盤強度に関する検討, 土木学会第 61 回年次講演会, pp.661-662, 平成 18 年 9 月
 2) 進土正人: 地下空洞掘削の情報化施工における現場計測結果の評価に関する研究, 神戸大学博士論文, 昭和 60 年 3 月
 3) 菊池宏吉: 地質工学概論, 土木工学社, p.104, 平成 2 年 3 月

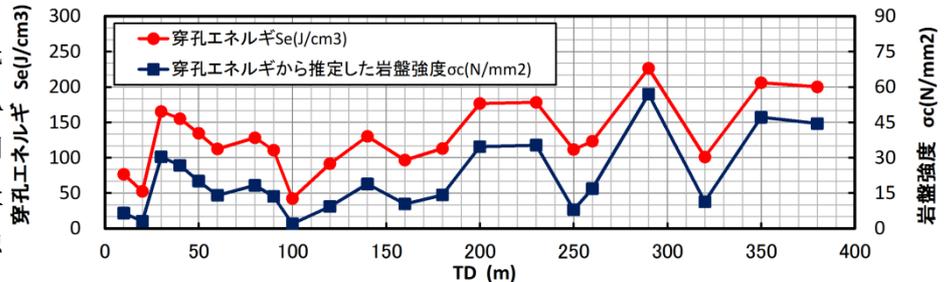


図-4 DRISS による穿孔エネルギー S_E と岩盤強度 σ_c の分布

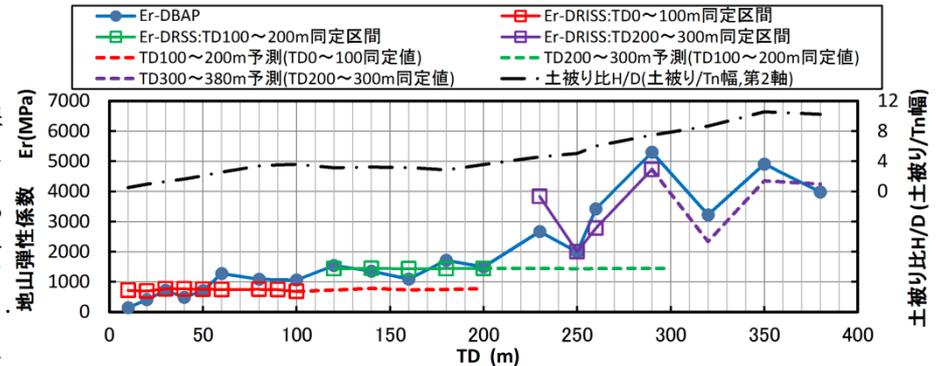


図-5 PAS-Def の切羽前方探査と FEM 逆解析による地山弾性係数の予測例

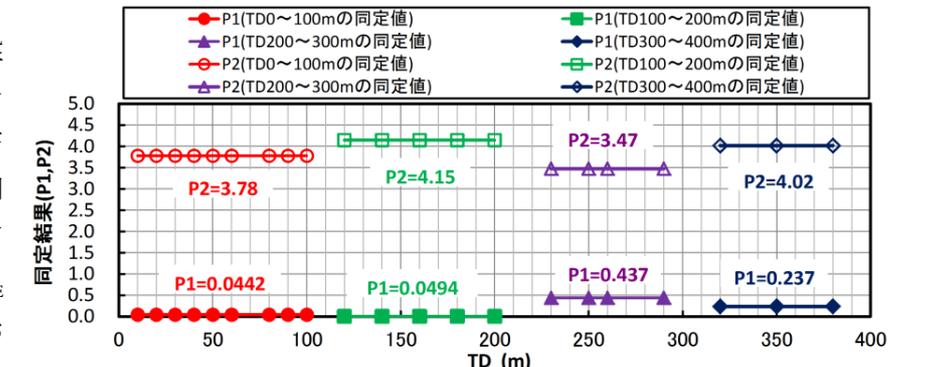


図-6 地山弾性係数の推定式の変数 P_1, P_2 の同定結果