トンネル変形予測システム「PAS-Def」の開発と適用事例 Development and application of a prediction and analysis system for tunnel deformation "PAS-Def"

山下雅之* 作 Masayuki Yamashita Li 杉本拓也*** 言 Takuya Sugimoto Ki 前田 薫 *** Kaoru Maeda

竹村 いずみ** Izumi Takemura 吉永 浩二 *** Kouji Yoshinaga

要 約

山岳トンネル掘削時の変形挙動を精度よく予測することを目的に、トンネル変形予測システム 「PAS-Def」を開発した.本システムは、①切羽前方探査(DRISS)、②現場計測および③数値解析の 3要素を効果的に組み合わせて運用するもので、専用ソフトで計測データ処理や数値解析を一括処理 することにより、探査・計測から変形予測までの一連の作業を迅速かつ簡便に実施することが可能と なった.今回、開発したシステムを大規模断層の出現が予想されている山岳トンネル現場において初 適用し、本システムの有効性について評価した.

目 次

- §1. はじめに
- §2. トンネル変形予測システム (PAS-Def)
- §3. 適用事例
- §4. おわりに

§1. はじめに

山岳トンネルの事前設計では,限られた地質調査情報 を用いた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.したがって,トンネル掘削時において事 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, 山岳トンネルが地中線状構造物であるという特性から費 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、山岳トンネルでは情報化施工を 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ことにより、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

- ** 本社土木設計部設計二課
- *** 西日本(支)瑞穂トンネル(出)

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. さらに, このような方法では既掘削部の情報と切羽 観察からの地山情報のみに依存するため, 切羽前方の評 価・予測が困難であり, 対応策が後手に回る傾向が強い. そこで今回, 図-1に示すような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「安全で経済的な 合理的設計施工の情報化施工」を支援するための情報化 施工管理システム『PAS-Def』の開発を進め, 上記の問 題を解消することを試みた.

本稿では、開発したシステムの概要と大規模断層の出 現が予想されたトンネルへの適用事例について報告する.



図-1 施工中の探査・計測・解析の要素技術とその効果

^{*} 技術研究所土木技術グループ

§2. トンネル変形予測システム (PAS-Def)

2-1 システムの概要

本 システム (PAS-Def: Prediction and Analysis System for tunnel Deformation)¹⁾は、切羽前方探査、坑内 変位計測および数値解析の3つの要素技術を組み合わせ て、掘削時の変形挙動を事前に把握するものであり、図 -2に示すように『変形予測サブシステム』と『変形 評価サブシステム』で構成されている.

2-2 システム構成

(1) 変形予測サブシステム

ここでは、切羽前方探査により未掘削区間の地山物性 値を定量的に評価し、それを用いた数値解析(順解析) によって、トンネル掘削時の地山の変形挙動や支保の応 力状態を予測する.

切羽前方の地山物性については、さく岩機のさく孔 データを利用した切羽前方探査手法(DRISS)により推 定する. DRISS で得られる穿孔エネルギー(掘削体積 比エネルギー)と岩盤強度の間には図-3のような非 線形の関係が認められ、穿孔エネルギーは岩盤強度のべ き乗に比例するとされている²⁾.本サブシステムもそれ に従い、下式により岩盤強度を換算する.

 $S_{\rm E} = C_1 \times \sigma_{\rm c}^{\rm b1} \tag{1}$

ここに、 S_E : 穿孔エネルギー (J/cm³, MPa) σ_c : 岩盤強度 (MPa) C_1 : 定数 (デフォルト値: $30 \sim 40$) b1: 乗数 (デフォルト値: 0.5)

さらに、以下の既往の関係式³⁾を用いることにより、 岩盤強度から順解析に必要な物性値である弾性係数(E₁) を得ることができる.

log(10.2 × E₁) = 1.088 × log(10.2 × σ_c) + 2.166 (2a) ここで,式(2a) をべき乗の関係式で表すと下式のよう

になる.

$$\mathbf{E}_1 = \mathbf{C}_2 \times \sigma_{\mathbf{c}}^{\mathbf{b}2} \tag{2b}$$

なお, 順解析には一般的な2次元弾性 FEM 解析コードを採用し,得られたトンネル変形量や地山せん断ひずみ量,支保工応力等の予測結果を用いて,支保構造の妥当性や掘削工法・補助工法の検討を行う(図-2,図-4参照).



図-4 PAS-Def 実施フロー



図-5 PAS-Def 専用ソフトのメイン画面例

(2) 変形評価サブシステム

ここでは,既掘削区間の内空変位計測(A計測)結果 等を基にした数値解析(逆解析)を用いて地山の変形や 支保の応力状態を定量的に再現し,変形予測に使用した 物性値の妥当性を評価する.なお,本サブシステムの逆 解析には櫻井・進士⁴⁾らが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ている.

具体的な評価手法として、変形予測サブシステムの順 解析で予測した地山弾性係数(E₁)と、予測区間の掘削 後に逆解析で求めた地山弾性係数(E₂)を適宜比較する. その際、両者の値が大きく乖離する等、変形予測で使 用した E₁の値が妥当でないと判断された場合には、(2) 式の係数 C₂ および乗数 b2 を見直す.

このように、実際のトンネル変形挙動から得られた知 見を変形予測サブシステムへ継続的にフィードバックさ せることにより、システム全体の予測・評価精度や信頼 性の継続的な向上が期待できる(図-4参照).

2-3 一元管理・処理ソフトの概要

先に述べたサブシステムにおける計測・探査データの 蓄積や数値解析等の一連の予測・評価作業は,独自に開 発した専用ソフトにより一元管理・処理することができ る.専用ソフトのプログラム構成および動作環境を表-1,表-2にそれぞれ示す.

図-5にソフト起動時に表示されるメイン画面を示 す.図のように,画面上には切羽前方探査(DRISS)デー タ,それに基づく地山物性推定値,施工情報,A計測デー タ,数値解析結果等,必要な情報が可視化情報として集 約されており,各断面の計測データや解析結果画面を拡 大表示させることもできる.また,メイン画面に表示さ れている各種データは数値データとして一覧表示させる こともできる(図-6参照).一覧データは,CSVファ イルへ変換出力することで,市販の表計算ソフトを使用 した二次データ処理も可能となっている.

表-1 ソフトのプログラム構成

名称	プログラムファイル名	主な機能
PAS-Def	PAS-Def.exe	メインプログラム(データ管理/表示ユー ザーインターフェース等)
DBAD2012	dbapx.exe	逆解析ソルバープログラム
DDAFZUIZ	dbapxf.exe	順解析ソルバープログラム
A計測データ変換	AMeasTools.exe	A計測データ変換プログラム

表-2 ソフトの動作環境

CPU	IntelPentium™シリーズ または、それらと互換性のあるCPU (推奨:Intel Pentium™ 1.2GHz以上)
メモリー	実装 1GB 以上 (推奨:実装4GB以上)
ハードディスク	20MB以上の空き容量
ビデオカード	Microsoft® Windowsロゴ取得済みビデオカード
OS	Microsoft® Windows XP / Vista / 7 (各日本語版)
その他	キーボード・マウス・ディスプレイ (またはそれらと互換性のあるデバイス) CD-ROMドライブ(ソフトウェアインストール時のみ)

	K TDIm	STA	沈下景(天唱)	法下量(左肩)	法下量(右肩)	沈下景(左脚)	沈下景(右脚)	内空素位A	内空流位8	内空无位C	内空麦位0 ~	6239182347
37	696.01	NO.790+19.200	-19.82	-6.50	-6.10	0.80	0.10	-17.62	-17.62	-25.34	-22.81	managera
38 🗆	701.01	NO 798+3.208	-16.87	-5.54	-5.54	0.90	0.90	-15.65	-15.85	-22.48	-28.08	
39 🗆	705.01	NO.798+8.208	-7.48	-2.41	-2.41	0.71	0.21	-6.93	-6.93	-9.98	-8.61	
40	710.03	NO.789+18.2E0	-5.26	-1.70	-1.70	0.55	0.55	-4.87	-4.87	-6.95	-6.00	
41	714.51	NO.789+17.7E0	-3.27	-1.06	-1.16	0.26	0.16	-3.02	-3.82	-4.31	-3.70	
12	724.51	NO.789+7.703	-15.14	-4.94	-4.94	0.98	0.98	-14.05	-14.05	-20.14	-17.88	
43	731.01	NO.788+18.280	-5.22	-1.68	-1.58	0.55	0.55	-4.83	-4.83	-6.89	-5.95	
44	740.01	NO 788+3 208	-10.16	-3.29	-3.29	0.85	0.15	-9.43	-9.43	-13.48	-11.82	
45	751.01	NO.787+18.2E0	-4.55	-1.47	-1.47	0.49	0.49	-4.28	-4.23	-6.02	-5.20	
16	770.01	NO.786+13.280	-5.93	-1.91	-1.91	0.60	0.60	-5.50	-5.50	-7.84	-6.80 =	
17	791.01	NO.785+13.280	-6.09	-2.08	-2.88	0.74	0.74	-6.18	-6.08	-8.13	-6.06	
48	818.03	NO.784+18.280	-7.80	-2.85	-2.15	0.84	0.84	-6.89	-6.19	-9.28	-6.86	
49	828.08	NO 784+3 203	-13.23	-3.55	-3.95	1.41	141	-11.71	-11.71	-15.62	-11.65	
50	830.01	NO.789+18.2E0	-5.63	-2.01	-2.01	0.70	0.70	-5.85	-5.85	-7.82	-5.83	79(8出力
51	851.01	NO.782+18.280	-7.04	-2.13	-2.13	0.75	0.75	-6.20	-6.20	-8.30	-6.19	-
52	861.01	NO 782+3 208	-10.89	-3.12	-3.12	1.12	1.12	-9.18	-9.18	-12.28	-9.13	
53 🗆	878.03	NO.781+18.280	-24.75	-7.83	-7.13	2.88	2.18	-21.93	-21.98	-23.23	-21.97	
54	835.01	NO 781+9 203	-14.81	-4.80	-4.10	1.14	1.14	-18.75	-18.75	-19.67	-17.32	
	033.03	110 235 - 15 250	10.00	0.50	0.50	1.00	1.80	46.28	40.76	04.00	20.05	

§3. 現場適用事例

3-1 現場概要

今回 PAS-Def を導入した瑞穂トンネルは,京都縦貫 自動車道(京都府宮津市〜久世郡久御山町に至る全長約 100 kmの高規格幹線道路)の丹波綾部道路に属し,京 丹波わち IC ~ 瑞穂 IC 間に位置する.本トンネルの全 長は 2,906 m であり,当工区は終点側より 1,506 m を NATM(発破掘削方式)で施工する.

トンネル周辺の地質は、中~古生代の丹波層群が広く 分布している.とくに、トンネル区間の丹波層群はチャー トを主体とする地層および頁岩・砂岩を主体とする地層 からなり、これらは「本庄スラスト」と呼ばれる大規模 断層(衝上断層)が境界に位置する(図-7参照).

3-2 開発システム適用の背景

本庄スラストはチャート主体で頁岩を含み,地表部で は変質・劣化が進んだ岩盤が大規模に露出している.ト ンネル掘削時にそのような地山に遭遇した場合,トンネ ル切羽の安定性が著しく低下することが懸念されていた. そこで本工事では,本庄スラストの出現区間およびその 周辺の地下水状況をより早い段階で正確に把握すること を目的に,切羽前方探査(DRISS)の連続適用が計画さ れていた.また,本庄スラストの出現が想定される区間 の土被りが 200m を超えることから,掘削時におけるト ンネル変形に対する迅速な対応も求められていた.

3-3 適用結果

(1) 切羽前方探査結果および掘削実績

本庄スラスト周辺の切羽前方探査(DRISS)結果およ び掘削実績を図-8に示す.DRISSによる地山推定は, 掘削初期段階において本トンネル用に作成した穿孔エネ ルギーと地山区分の関係(表-3参照)に基づき実施 した.この中で,穿孔エネルギーが80 MPaを下回る値 が得られた場合は,破砕帯等の「脆弱な地山」が出現す る可能性があると評価される.この基準に従い,DRISS



図-7 坑口~本庄スラスト周辺までの想定地質

表-3 地山区分と穿孔エネルギーの関係

地山区分	穿孔エネルギー(MPa)
CI	250<
СШ	150~250
DI	<150
破砕帯	<80

によって本庄スラストおよびその周辺で脆弱地山の出現 が4箇所推定された(図-8中の①~④).以下にその 4地点周辺の地山性状と施工実績について詳述する.

(a) 地点①:本庄スラスト近傍の脆弱チャート層

この付近より湧水量の著しい増加が認められるように なり,TD530付近で切羽左肩部から約400L/minの突 発集中湧水およびそれに伴う土砂流出が発生した.切 羽の安定性確保のため補助工法(AGFおよび鏡ボルト, 水抜きボーリング)を実施した.ただし,この付近の チャートは変質を受け脆弱化が認められたが,切羽不安 定化(局所的な崩落等)の大きな要因は突発湧水にあっ たと考えられる.

(b) 地点②:チャート主体層と本庄スラストの境界部

本庄スラストが想定よりも約50m進んだ地点で出現 した(写真-1参照).やや破砕を受けたチャート層で あり,切羽において小崩落が頻発した.切羽の著しい不 安定化は認められないものの,湧水による不安定化が依 然として懸念されていたため,水抜きボーリングを地点 ①から継続して実施した.



(c) 地点③:本庄スラスト内の脆弱チャート層

脆弱部が局所的に分布し、その分布域では小崩落が発 生している(写真-2参照).また、この付近で行った 水平水抜きボーリング(TD660~750m区間)では最 大2,700 L/minの湧水が発生しており、湧水に伴う切羽 不安定化も懸念されたため、水抜きボーリングに加えて AGF および鏡ボルトも実施した.

(d) 地点④:本庄スラストと頁岩層の境界部

地点③以降は比較的硬質な緑色岩が出現していたが, 本庄スラストと頁岩の境界付近に近づくと再び地山の脆弱化が認められ,天端崩落も発生した.また,頁岩層も断層の影響を受けてやや脆弱となっていた(写真-3 参照).このような地山性状下において,天端崩落の頻発や境界部における突発湧水が懸念されたため,水抜き ボーリング,AGFおよび鏡ボルトを実施した.

(2) 地山物性値の推定

図-8に示した穿孔エネルギーから式(1)および式 (2)を用いて地山物性を推定した.図-9に岩盤強度 および地山弾性係数の推定結果を示す.岩盤強度の推定 にあたっては,他トンネルの実績から式(1)の係数C₁ を30と設定した.また,掘削時には原位置において強 度試験(ポイントロード試験,ロックシュミットハン マー試験)を適宜実施し,C₁の妥当性を確認した.また, 地山弾性係数については,変形評価サブシステム(A計 測,逆解析)を用いて掘削実績による地山弾性係数を求 め,必要に応じて式(2)の係数C₂および乗数b2を見 直した.今回,図-9に示した範囲(TD200~950 m 区間)において合計4回の見直しを実施した結果,予測 値は逆解析で求めた実績値と概ね一致する傾向が得られ た.

(3) 変形予測結果

DRISS から推定した地山弾性係数を用いて順解析を 適宜実施し,掘削時の変形量を予測した. 図-10 に各



写真-1 チャート主体層と本庄スラストの境界部



写真-2 本庄スラスト内の脆弱部 (切羽右側に局所分布)



写真-3 本庄スラストと頁岩の境界部





計測断面の天端沈下量および水平変位量の予測結果および掘削時に計測された実際の変位量(実績値)を示す.

図のように、予測値は実績値と概ね同様の傾向を示し ている.今回のシステム適用対象である本庄スラストの 変位量に注目すると、DRISS 結果から抽出された本庄 スラストにおける脆弱地山推定箇所(図-8の地点②~ ④に相当)において、相対的な変位量の増加が予測され た.図-11および図-12に本庄スラストが出現しは じめた地点②の順解析結果(TD610m断面)を例示する. ただし、これらの変位量は事前に設定したDIパターン の管理基準値(表-4)のレベルI~Iの範囲であった ため、当該個所においては計測体制を強化し、必要に応 じて対策工の検討(もしくは軽微な対策工の実施)を行 うこととした.

それに対して実績値は、地点②および④において予測 値とほぼ同様の変位傾向(とくに水平変位)が認められ た.これらの地点では、DRISSで予測した局所的な地 山性状が実際の切羽全体の地山性状と概ね一致しており、 それが比較的精度よく変形予測が行えた理由の一つと考 えられる.地点③については、17 mmを超える天端沈 下および 20 mmを超える水平変位の発生が予測された が、実際はいづれも10 mm以内の変形に収まった.該 当する計測断面の切羽において実際の地山性状を確認し たところ、予測した脆弱層がDRISS探査孔周辺の切羽 右側部に限られており、その他の領域は比較的硬質で安 定した地山性状であった(**写真-2**参照).このような"不 均質"な地山性状が、予測値と実測値が一致しなかった 一因であったと考えられる.

本節(1)で述べたように、地点②~④では、湧水を 伴う脆弱層の出現による崩落等の不安定化の対策として AGF・鏡ボルトや水抜きボーリング等が実施された.し かし、本システムの予測結果を考慮して計測体制を強化

表-4 A計測の管理基準値

支保パターン	計測位署	管理基準値(mm)				
(標準断面部)	前期位直	レベルI	レベルⅡ	レベルⅢ		
СІ,СП	天端沈下	6	12	18		
	内空変位	12	24	36		
DI	天端沈下	9	17	26		
	内空変位	17	34	51		
D∭a-1	天端沈下	15	30	45		
	内空変位	30	60	90		



図-11 地点②の順解析結果(内空変位予測結果)



図-12 地点②の順解析結果(最大せん断ひずみ予測結果)

しながら掘削を進めた結果,変形増大の対策工を実施す ることなく本庄スラスト区間を無事通過することができ た.

§4. おわりに

今回, 掘削時の計測・切羽前方探査データをもとに, トンネル内空の変形挙動を数値解析により原位置で逐次 予測し, 適切な対策を変形発生前(または初期段階)に 実施可能とするようなトンネル変形予測システム『PAS-Def』を開発し,大規模断層の出現が想定される現場に おいて試験適用を行った.とくにシステムの構築に関し ては,汎用 PC ですべての計測データ・解析結果を一元 管理・処理可能な専用ソフトを開発し,実施工への適用 を通して適宜ソフトの改良を行った.

その結果,ソフトの操作性・システムの運用に大きな 問題はなく,10~30 mm 程度の変形挙動についても比 較的精度良く変形挙動を予測することができた.ただ し,切羽前方探査(DRISS)による切羽の局所的な地山 評価結果と切羽全体の地山性状が異なる"不均質"な地 山では,変形挙動の正確な予測が困難な場合も確認され た. このような地山に対しては, DRISS を複数個所実施して切羽全体の平均的な地山性状を把握する等, システム運用面における検討を更に進めていく必要がある.

今後は、適用事例の蓄積と継続的なシステム改良を通 じて本システムの有用性をさらに向上させていくととも に、維持管理段階における変状原因の推定や対策工検討 の基礎資料としての活用も図っていきたい.

参考文献

- 1) 亀谷英樹、山下雅之、竹村いずみ: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、土木学会第69回年次講演会, pp. 41-42, 2014
- 山下雅之,石山宏二,木村哲,福井勝則,大久保誠 介: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.661–662,2006
- 3) 菊池宏吉:地質工学概論, 土木工学社, p. 104, 1990
- 進士正人: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, 1985