

山岳トンネル変形予測システムの機能拡張 Extension of the system for mountain tunnel deformation prediction

瀬瀬 善孝*

Yoshitaka Koketsu

要 約

トンネル変形予測システム「PAS-Def」は、切羽前方探査の結果を活用して数値解析を行うことで未掘削区間の定量評価を行う技術であり、過年度の開発以降、複数の山岳トンネル現場へ適用されてきた。本稿では、システムの概要を紹介するとともに、解析モデル作成や解析精度を改善するために開発した線要素機能と、操作の煩雑さや属人化を低減するために開発した自動化機能について述べる。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. トンネル変形予測システム「PAS-Def」
- § 3. 拡張機能
- § 4. おわりに

§ 1. はじめに

山岳トンネルでは、施工前に支保パターンや補助工法を計画するにあたり、弾性波探査や電磁探査等の事前地質調査を実施することによって地山性状を把握している。しかし、これらの探査法は広範囲の地山を間接的に評価する手法であり、局所的な地山性状の変化を捉えることは難しいため、掘削時には事前の計画と乖離した性状の地山に遭遇する場合が多い。地山性状が想定よりも良い場合には、必要より重い支保パターンが採用されることによって工事費用の増大が懸念される。一方、地山性状が想定よりも悪い場合には、必要より軽い支保パターンが採用されることで、切羽崩落による労働災害や内空変位の増大による縫い返しの発生リスクが懸念される。事前地質調査の実施回数や質を上げるという対応策も考えられるが、山岳トンネルが線形構造物であるため、高い費用対効果を得ることは困難であると考えられる。

そのような事情から、切羽観察による地山性状の評価や、内空変位計測による支保パターンの妥当性の確認等、施工の最中にも再評価が行われている。ただし、それらの評価の際には、観察者の主観が影響するとともに評価

対象となる地山が既掘削区間の直近範囲に限られてしまう。そこで、切羽前方探査の結果を活用して数値解析を行うことで未掘削区間の定量的な評価が可能な「PAS-Def (Prediction and Analysis System for Tunnel Deformation, パスデフ)」を過年度に開発し、これまでに複数の山岳トンネル現場へ適用してきた。

本稿では、システムの概要および、2015 年の報告¹⁾以降に開発した拡張機能である線要素機能と自動化機能について述べる。

§ 2. トンネル変形予測システム「PAS-Def」

2-1 システムの概要

PAS-Def は、DRISS (Drilling Survey System)²⁾ による切羽前方探査データと計測 A による内空変位計測データを活用してトンネル掘削時の変状を事前予測する数値解析システムであり、「変形予測サブシステム」と「変形評価サブシステム」により構成されている。変形評価サブシステムの結果を用いて解析パラメータを更新することで変形予測サブシステムによる予測精度の向上を図る仕組みになっており、掘進に伴って前方探査を行うたびに両サブシステムを運用して変位や応力・ひずみ状態の予測を行う(図-1、図-2)。

本システムは、前方探査の実施後に迅速に変位を予測できるように、数値解析を専門としない現場職員でも解析の実施が可能となることを目指して開発されている。そのため多くの解析パラメータやスペックの高いパソコンを必要としない比較的簡便なシステムになっているが、現場適用時にはいくつかの留意点がある。

* 技術研究所 土木技術グループ

(1) 2次元解析

一般にトンネル軸方向変位が横断面内の変位と比べて微小であることから、軸方向変位がゼロである平面ひずみ状態とみなして2次元解析を行っている(図-3)。掘進に伴って地山性状が変化するような複雑な地質条件を考慮できないものの、解析モデルの作成が容易になるとともに、解析のために要求されるパソコンのスペックや時間が低減される。

(2) 弾性体解析

地山や支保を弾性体とみなしている。すなわち、物体の変形量は作用した応力と比例関係にあるという考えに基づいて解析を行っている。塑性挙動や時間依存性挙動を考慮できないが、解析パラメータのうち必要な材料物性値が変形係数とポアソン比と単位体積重量に限られるため、解析の実施が容易になる。

(3) 連続体解析

地山や支保を連続体とみなしているため、岩塊の抜け落ちや亀裂の開口等の挙動を考慮できないが、解析モデルの作成や解析パラメータの設定が容易になる。

(4) 地山物性値の分布

解析モデル内の地山の物性値を均一であるとみなしているため、補助工法による地山の補強効果や異なる性状の地山の分布を表現することはできないが、多くの解析パラメータを必要としないため、設定が容易になる。

(5) 高次要素

解析モデルの作成の際には、三角形要素と四角形要素の両方を使用することが可能である。また、3節点三角形要素と4節点四角形要素で構成した解析モデルをソフトウェアに読み込ませると、自動的に中間節点が生成されて6節点三角形要素と8節点四角形要素に変換されるため、解析モデル作成のための手間を軽減しながら高精度な解析を行うことが可能である。

2-2 システム構成

(1) 変形予測サブシステム

変形予測サブシステムでは、切羽前方探査の結果を基に未掘削区間の地山物性値を算出して順解析を行うことによって、トンネル掘削に伴う内空変位や、地山と支保の応力・ひずみ状態を予測する。なお、順解析には一般的有限要素法の解析コードを採用している。

地山物性値の具体的な算出手法として、まずは式(1)を用いて岩盤強度を算出する。この式は、削岩機の削孔データから算出される穿孔エネルギー(掘削体積比エネルギー)と岩盤強度が両対数グラフ上で線形関係にある²⁾ことから導かれている。

$$SE = C_1 \times \sigma_c^{b_1} \quad (1)$$

ここで、 SE : 穿孔エネルギー (J/cm³)

C_1 : 定数 (デフォルト値: 30 程度)

■ 変形予測サブシステム(未掘削区間)

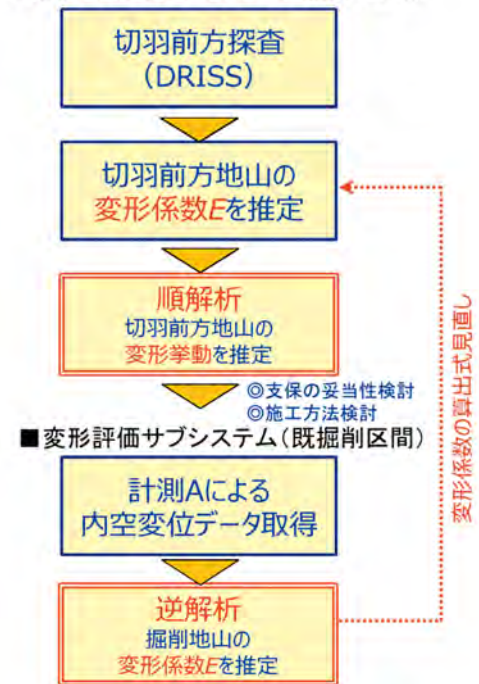


図-1 PAS-Defの実施フロー

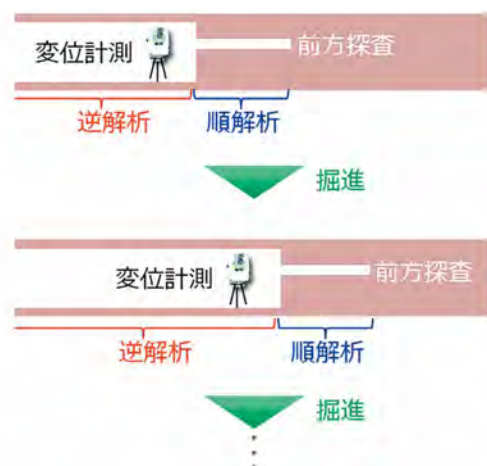


図-2 PAS-Defの実施イメージ

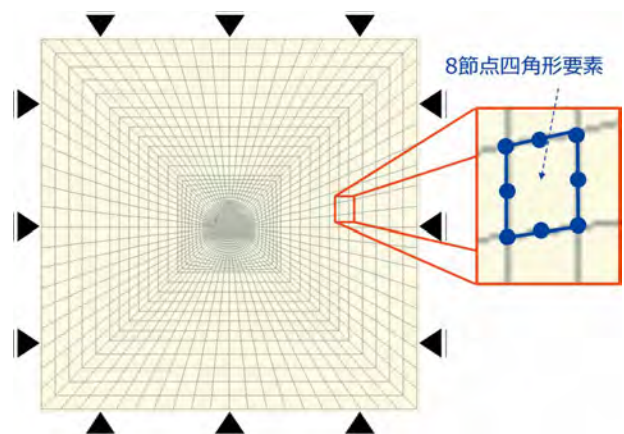


図-3 解析モデルの例

σ_c ：岩盤強度 (MPa)

b_1 ：定数 (デフォルト値：0.5)

さらに、弾性係数と一軸圧縮強度が両対数グラフ上で線形関係にある³⁾ことから、式(2)により地山変形係数を算出して順解析に用いる。なお、ポアソン比と単位体積重量は一般的な値を用いる。

$$E = C_2 \times \sigma_c^{b_1} \quad (2)$$

ここで、 E ：地山変形係数 (MPa)

C_2, b_2 ：変形評価サブシステムにより算出される定数

(2) 変形評価サブシステム

変形評価サブシステムでは、計測 A で得られた既掘削区間の内空変位を用いて逆解析を行うことによって、トンネル掘削に伴う地山や支保の変状を再現するとともに変形予測サブシステムで用いる地山変形係数を更新する。逆解析には、櫻井⁴⁾が提案した直接逆解析法によるコードを採用している。

地山変形係数の更新は、変形予測サブシステムによる内空変位の予測値が実測値と乖離する等、値が妥当でないと判断された場合に行う。具体的には、複数断面を対象に地山変形係数 E と岩盤強度 σ_c を式(2)に代入し、最小二乗法を適用することで定数 C_2 と b_2 を決定する。掘削開始直後や地山性状が変化した直後には係数を決定するための断面数が少ないため変位予測の精度が低くなりやすいが、掘削が進むと断面数が増えるため精度の向上を図ることができる。

2-3 ソフトウェアの概要

ソフトウェアの構成を表-1に示す。データの蓄積や解析のための操作は、独自に開発したメインプログラムである PAS-Def.exe にて行われる。順解析や逆解析を実行する際には、ソルバープログラムである dbapxf.exe や dbapx.exe をメインプログラムから自動で呼び出して用いる。他社の計測システムで得られた内空変位データを読み込む際には、AMeasTools.exe を用いて PAS-Def の

表-1 ソフトウェアの構成

名称	主な機能
PAS-Def(PAS-Def.exe)	データ蓄積・操作 UI (メインプログラム)
DBAP2012 (dbapxf.exe)	順解析ソルバー
(dbapx.exe)	逆解析ソルバー
A 計測データ変換 (AMeasTools.exe)	内空変位データ変換

表-2 ソフトウェアの動作環境

CPU	Intel Pentium™ 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	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® ログ取得済み ビデオカード
OS	Microsoft® Windows® 7 以降 日本語 Microsoft® Windows® 7/10/11 Professional(64bit)にて動作確認済み
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 (インストール時のみ)

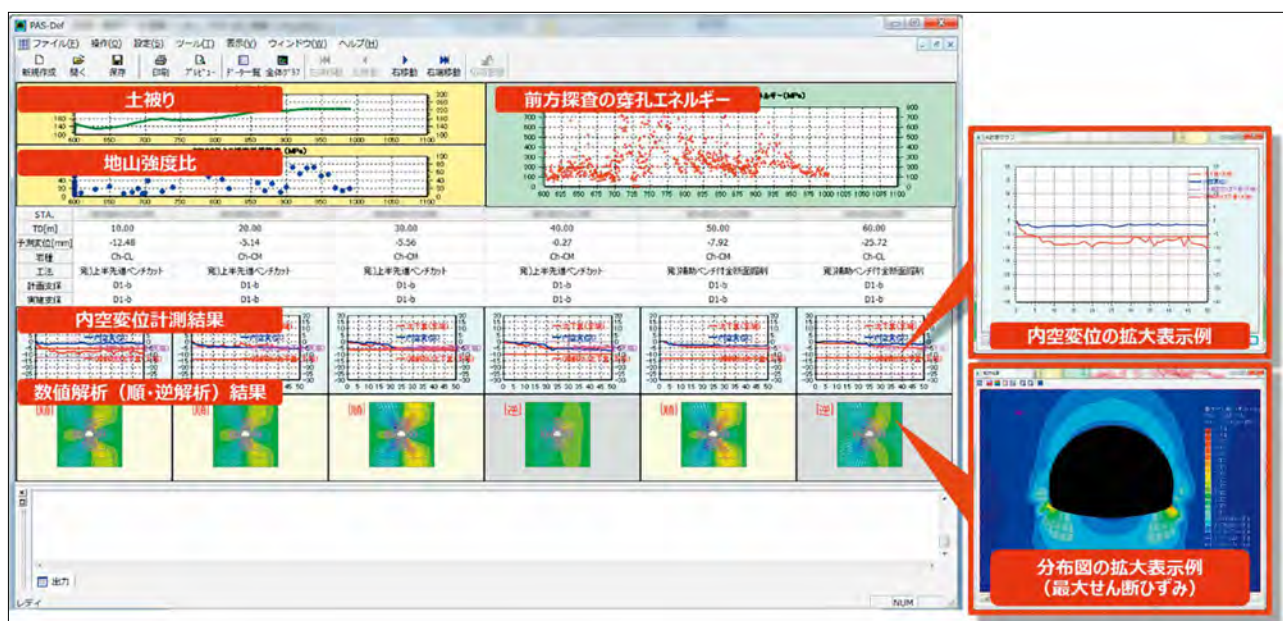


図-4 ソフトウェアのメイン画面

様式に変換することができる。なお、ソフトウェアの動作環境は、表-2に示すように一般的なパソコンの性能の範囲である。

メイン画面のキャプチャを図-4に示す。メイン画面には、土被り、地山強度比、前方探査データ、内空変位等のグラフや数値解析の結果が可視化されており、情報を一元管理できる。また、各種データは表形式で一覧表示することや(図-5)、csv形式で出力して市販の表計算ソフト等で整理することが可能である(図-6)。

§ 3. 拡張機能

3-1 線要素機能

従来のシステムで扱える要素は面要素のみであったため、鋼製支保工や吹付けコンクリートを細長い面要素で表現することになり、解析モデル作成のための労力が増加するとともに、解析精度の低下が懸念されていた。また、ロックボルトは面要素での表現が困難なことから、解析モデルへ反映されていなかった(図-7)。

データ一覧/編集

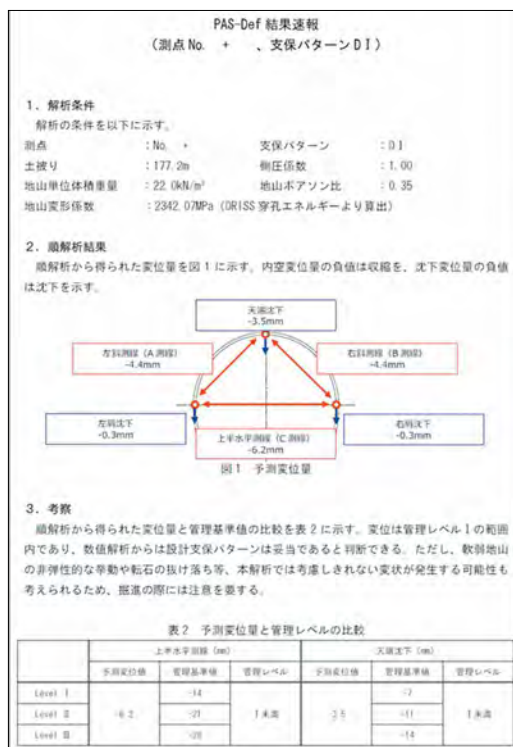
施工 A計測 DRISS 順解析 逆解析

選択	表示	TD[m]	STA	内空A[mm]	内空B[mm]	内空C[mm]	天端沈下[mm]	左肩沈下[mm]	右肩沈下[mm]	左
0	☒	10.50	No. +	-0.21	-0.21	0.30	-0.80	-0.35	-0.35	
1	☒	20.50	No. +	-0.82	-0.82	0.59	-2.33	-0.88	-0.88	
2	☒	30.50	No. +	-1.43	-1.43	0.20	-3.53	-1.41	-1.41	
3	☒	35.50	No. +	-1.71	-1.71	-0.20	-3.72	-1.40	-1.40	
4	☒	40.50	No. +	-1.70	-1.70	-0.20	-3.70	-1.39	-1.39	
5	☒	60.50	No. +	-2.47	-2.47	-1.59	-4.60	-1.90	-1.90	
6	☒	65.50	No. +	-3.02	-3.02	-2.84	-5.19	-2.34	-2.34	
7	☒	80.50	No. +	-4.58	-4.58	-7.76	-6.04	-3.44	-3.44	
8	☒	95.50	No. +	-4.82	-4.82	-8.48	-6.55	-3.97	-3.97	
9	☒	100.50	No. +	-5.08	-5.08	-7.81	-9.77	-6.49	-6.49	
10	☒	120.50	No. +	-3.81	-3.81	-3.44	-13.15	-8.91	-8.91	
11	☒	125.50	No. +	-4.42	-4.42	-5.92	-10.86	-7.36	-7.36	
12	☒	140.50	No. +	-5.87	-5.87	-12.47	-7.63	-5.56	-5.56	
13	☒	155.50	No. +	-5.86	-5.86	-12.36	-7.89	-5.77	-5.77	
14	☒	160.50	No. +	-5.45	-5.45	-10.77	-7.23	-4.91	-4.91	
15	☒	180.50	No. +	-5.35	-5.35	-10.47	-6.89	-4.56	-4.56	

解析実行(S) ファイル出力(E)

選択行表示(S) エクスポート(E) データ追加(A) データ反映(B)

図-5 表形式での一覧表示の例



(a) 断面ごとに出力される解析結果の例

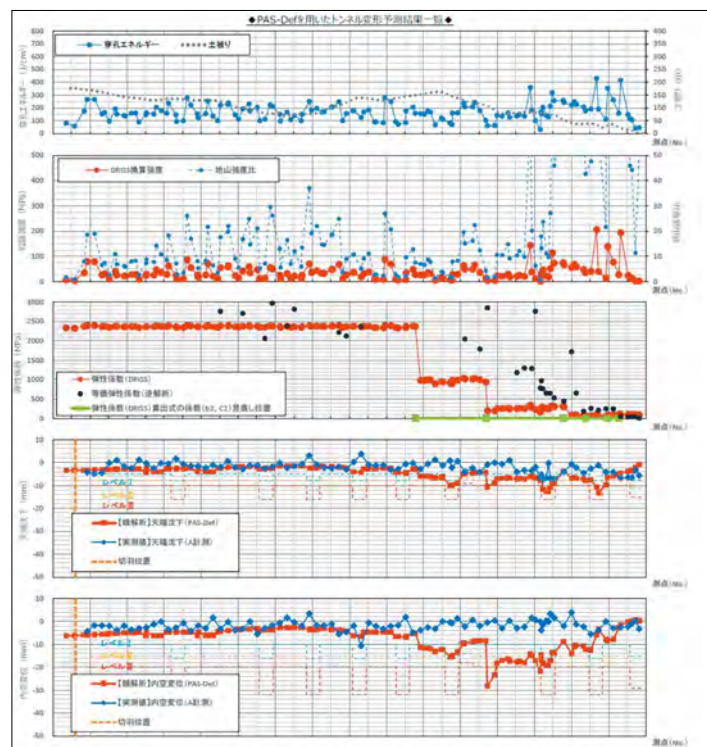


図-6 csv形式での出力結果の整理の例

そのような背景より、支保部材を解析モデル上で表現するための線要素機能を開発した。具体的には、吹付けコンクリートやロックボルトのように主に軸方向の抵抗性能を発揮する支保部材を表現するためのトラス要素と、鋼製支保工のように曲げ抵抗性能も発揮する支保部材を表現するためのビーム要素の、2種類の線要素を実装した(図一8)。これらの線要素は、面要素と面要素の間に配置される3節点で構成され、表一3に示す物性値設定して用いる。

線要素機能の導入により、ロックボルトを解析モデル上で表現することが可能になったとともに、解析モデル作成時の労力が低減された。また、線要素の応力・ひずみ状態を表示する機能も追加したことにより、従来よりも支保部材の応力照査が容易になった(図一9)。

3-2 自動化機能

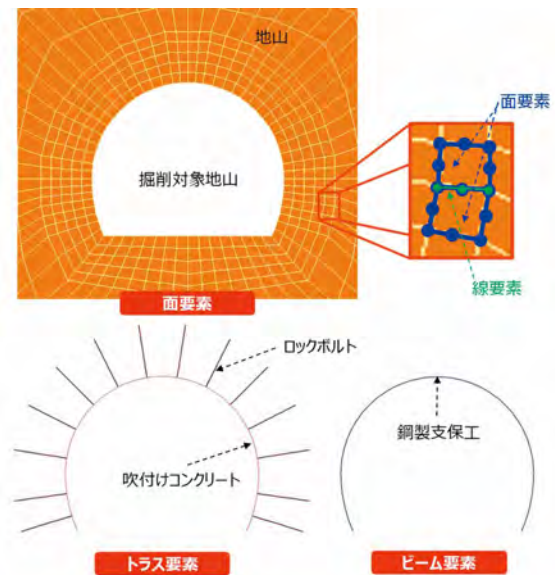
従来のシステムでは現場での運用を目指しておきながらも、実際には現場職員にソフトウェアの操作を習得する余裕がないため、限られた数値解析経験者のみで運用されており属人化が進んでいた。

そのような背景より、自動化機能を開発した。具体的には、解析に必要なデータの読み込みや解析を自動で実行する機能を実装した。土被り、内空変位データ、前方探査データ等をシステムへ反映させる際、従来はcsv ファイルを1つずつ指定して読み込みを行っていたが、事前に設定したフォルダ内にデータファイルを格納することによって自動的に読み込まれる仕様にした。また、解析実施断面を追加する際、従来はその断面のTDや支保パターンを手作業で入力していたが、解析実施断面をcsv ファイルで指定するとともに、割付表をシステムへ紐付けることによって支保パターンが自動で選定される仕様にした。これらの開発により、図一1中の「変形係数 E を推定」から「逆解析」までを自動で実行することが可能となった。すなわち、データを格納するためのフォルダを事前に設定しておくことによって(図一10)、日常の運用におけるソフトウェア上での操作を削減することができた。

自動化機能の導入により、事前の設定までを支援部署で行い、日常的な数値解析を現場で実施するといった運用方法が可能になると期待される。現時点の検証では、本機能によって解析作業の所要時間が約7割低減される見込みである。また、解析結果を確認する際や解析条件を変更して検証を行う際には支援部署における手動操作も必要になると考えられることから、UIの改善を併せて行った。具体的には、ツールバーのボタンのうち使用頻度の低いものを削除するとともに、解析の準備・実行・後処理の順番にメニューやボタンが並ぶように整理を行った(図一11)。



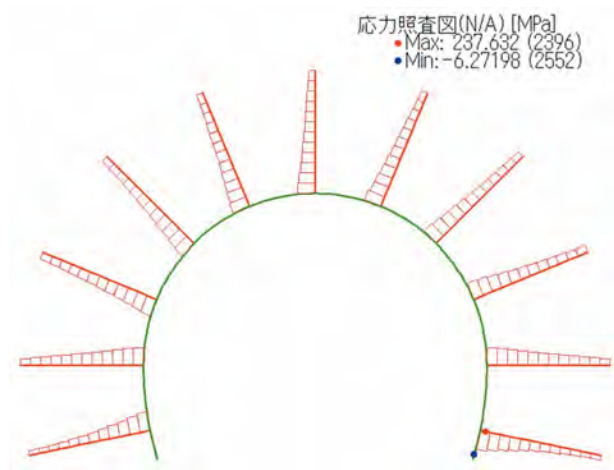
図一7 従来の解析モデルの例



図一8 線要素を導入した解析モデルの例

表一3 線要素の物性値

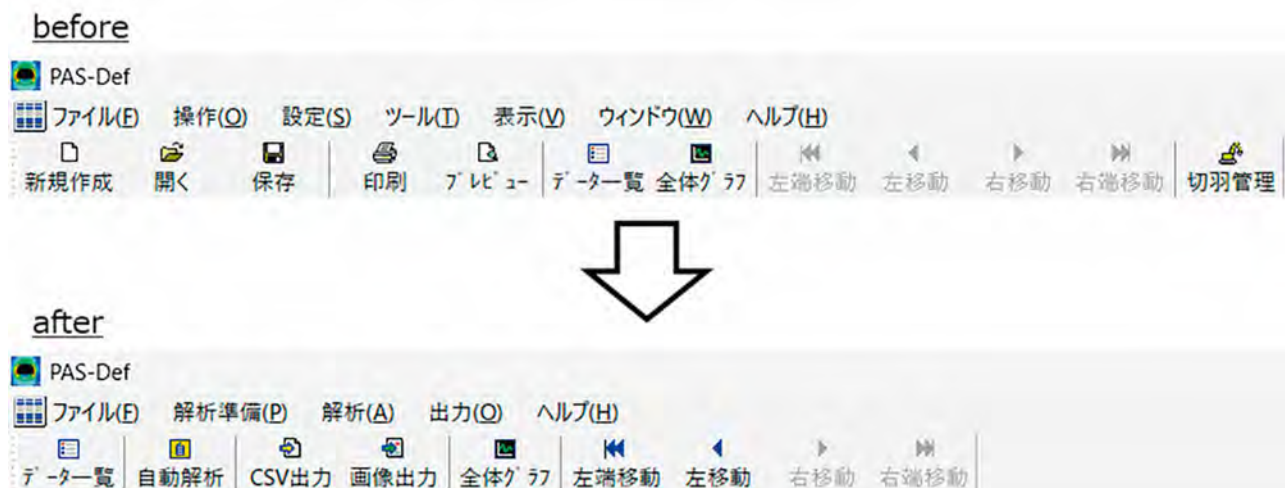
	トラス要素	ビーム要素
材料物性値	変形係数 単位体積重量	変形係数 単位体積重量 ポアソン比
幾何学的物性値	断面積 延長方向間隔	断面積 延長方向間隔 断面2次モーメント 断面係数



図一9 応力照査図の例



図ー10 自動化のためのフォルダ構成例



図ー11 UIの改良

§4. おわりに

本稿では、過年度に開発したトンネル変形予測システム「PAS-Def」の概要および拡張機能である線要素機能と自動化機能を紹介した。今後は、現場適用を通じてシステムのブラッシュアップや効果の検証を継続していく。

参考文献

- 1) 山下雅之, 竹村いずみ, 杉本拓也, 吉永浩二, 前田薫: トンネル変形予測システム『PAS-Def』の開発と適用事例, 西松建設技報, Vol. 38, 2015
- 2) 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の関係に関する検討, 土木学会第61回年次学術講演会, Ⅲ -333, 2006
- 3) 菊池浩吉: 地質工学概論, 土木工学社, 1990
- 4) 櫻井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文報告集, 第317号, pp.93-100, 1982