

地下空洞工事における逆解析の観点からの変位計測に関する検討

APPLICABILITY OF BACK ANALYSIS CONSIDERING NON-ELASTIC BEHAVIORS IN UNDERGROUND CAVERN PROJECTS

志村 友行* 武内 邦文* 中岡 健一*

Tomoyuki SHIMURA, Kunifumi TAKEUCHI and Kenichi NAKAOKA

This paper aims to investigate the applicability of the new back analysis method, which is able to consider non-elastic ground behaviors, to underground cavern projects. The shortcoming of the original Direct Back Analysis Program (DBAP) is to assume homogeneous and linear-elastic rock mass media and this new back analysis method was developed to overcome this problem. Elasto-plastic and discrete element analyses (UDEC) were performed to set the input displacement data for back analysis. As a result within this paper, it is evaluated that this new method will reasonably apply to cavern excavations indicating non-elastic and discontinuous behaviors.

1. はじめに

地下空洞掘削中の岩盤安定性を定量的かつリアルタイムに評価し、迅速に施工にフィードバックするには、計測変位を利用した直接ひずみ評価法(DSET)¹⁾と直接逆解析法(DBAP)²⁾を用いる方法が実用的である。従来のDBAPにおいては地山を等方等質の線形弾性体と仮定して初期応力パラメーターを評価していたため、大規模地下空洞のように断層・破碎帯等地山の不連続挙動が卓越し、空洞挙動を支配する場合には、このDBAPの適用には限界があった。³⁾ その問題点を克服し、地下空洞への適用性向上を目指して開発されたのが、地山の非弾性挙動を力学モデルを仮定することなく考慮可能な非弾性ひずみ考慮直接逆解析法(以降 N-DBAP と呼ぶ)である。^{4),5)} この方法によれば、DBAP の利点を損なうことなく地山の複雑な挙動を考慮可能となり、地下空洞への適用性向上が期待できる。

本論文では、この N-DBAP の地下空洞工事における計測変位への適用性検討を目的として、塑性挙動が卓越する地山の場合と不連続挙動が卓越する地山の場合を対象に、前者においては非弾性ひずみの考慮方法および変位計測パターンの違いが逆解析精度に及ぼす影響について、後者においては不連続面の形状および力学特性の相違により生じる影響について検討した。最後に、空洞掘削途中での逆解析結果をもとに最終ベンチ掘削完了後のひずみ分布による岩盤安定性を予測する場合の予測精度と問題点について考察を加えた。

2. 非弾性ひずみ考慮直接逆解析法(N-DBAP)の概要^{4),5)}

N-DBAP は、従来の DBAP の未知パラメーターである初期応力パラメーターに加えて、ある仮定した領域における地山の非弾性ひずみも未知パラメーターとして定式化し、計測変位を入力として地山の巨視的な変形係数、初期応力および非弾性ひずみを同時に求める手法である。その特徴は、逆解析に際して力学モデルを仮定することなく地山の非弾性挙動を考慮可能なこと、および同定すべきパラメーターが線形関係に定式化されているため計算量が少なく、したがって現場でのリアルタイムな評価に適していることである。また、一般に、未知パラメーターの数が現場で得られる計測変位の数より多くなるため、そのような場合にはノルム最小化法により解を最適化する方法を用いている。これを用いることにより、計測変位すなわち入力変位と逆解析によ

* 正会員 (株大林組 東京本社)

る計算変位は測定された場所においては完全に一致することになるが、それ故逆解析時の解の不安定性につながる可能性があるため、本論文においては数値解析によりその影響把握を試みた。

3. 塑性挙動が卓越する地山の場合の逆解析の適用性

塑性挙動が卓越する地山への逆解析の適用性を検討するため、表-1 に示す CH 級相当の岩盤物性を用いた弾塑性解析を実施し、それを計測変位と仮定して逆解析を実施した(図-1 参照)。なお、逆解析の適用は大規模地下空洞の中間ベンチ掘削時とした。

(1) 非弾性ひずみ考慮領域の影響

N-DBAP において非弾性ひずみの発生を考慮する領域の相違が解析精度に及ぼす影響について検討するため、非弾性ひずみ考慮領域として、弾塑性解析結果による塑性領域とほぼ等しい領域を仮定した場合(CASE-1A)と、地中変位計の埋設範囲を包括する領域を仮定した場合(CASE-1B)の 2 ケースを設定し逆解析を実施した。これらの入出力結果の比較、および等方等質 DBAP(CASE-1C)と比較した結果を図-2 にまとめる。

表-1 弾塑性解析入力条件一覧		
項 目		解析入力値
初期応力	σ_x (MPa)	-7.7
	σ_y (MPa)	-5.8
	τ_{xy} (MPa)	2.8
	θ (°)	54.4
弾性係数	E (MPa)	2.35E4
粘着力	C (MPa)	1.0
内部摩擦角	ϕ (°)	45.0

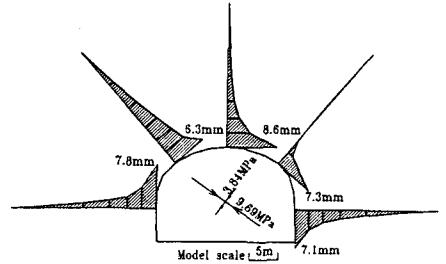


図-1 逆解析用計測変位

	弾塑性解析	Case-1A (非弾性ひずみ適用領域小)	Case-1B (非弾性ひずみ適用領域大)	Case-1C (等方等質逆解析)
初期応力 パラメーター	$\sigma_{xo}/E = -0.0003281$ $\sigma_{yo}/E = -0.0002477$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0001178$ $\theta(^{\circ}) = 54.4$	$\sigma_{xo}/E = -0.0004475$ $\sigma_{yo}/E = -0.0003461$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0001438$ $\theta(^{\circ}) = 54.7$	$\sigma_{xo}/E = -0.0003760$ $\sigma_{yo}/E = -0.0004528$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0000703$ $\theta(^{\circ}) = 30.7$	$\sigma_{xo}/E = -0.0006744$ $\sigma_{yo}/E = -0.0006459$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0000801$ $\theta(^{\circ}) = 50.0$
主応力 及び 最大せん断 ひずみ分布				

図-2 非弾性ひずみ考慮領域の違いによる逆解析結果の比較

CASE-1A,1B の N-DBAP の結果は、CASE-1C の等方等質逆解析に比較して初期応力パラメーターの同定精度が向上している。主応力については CASE-1B は CASE-1A より若干同定精度が低下しているが、最大せん断ひずみ分布に関しては両者とも顕著な違いはなく弾塑性解析結果と良好に一致している。

(2) 変位計測パターンの影響

地中および内空変位の計測パターンの違いによる N-DBAP の解析精度への影響を検討するために、地中変位計の測線長と内空変位計測の有無に着目し、8 ケースの計測パターンを作成して逆解析を実施した。解析に際して非弾性ひずみ適用領域は順解析における塑性領域とほぼ等しいと仮定した。

図-3 に計測パターンと逆解析の結果をまとめる。全体的な傾向として、逆解析の精度は地中変位計の測線長が長く、また内空変位の計測数が多いほど向上する。また、初期応力の同定精度については、CASE-3A と 4A の比較から斜め方向のせん断的な挙動を考慮可能な地中変位計測の有無が影響し、また CASE-5A～8A の比較より地中変位計が短い場合には内空変位の測線数が大きく影響することが判明した。ひずみ分布の推定精度については、CASE-1A～3A において空洞天端から側壁部分については概ね順解析結果と一致している。一方、掘削底盤部に発生するひずみが大きな領域を再現できたのは CASE-1A のみであり、主に内空変位測線数がこの部分における解析精度に影響していると推定される。

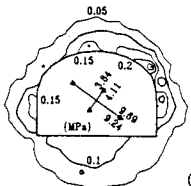
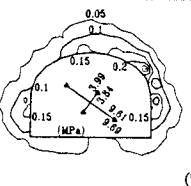
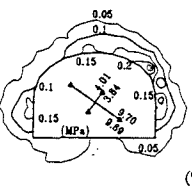
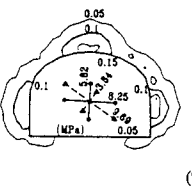
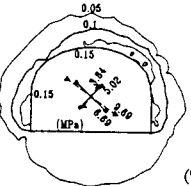
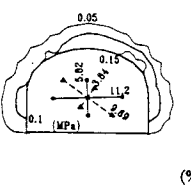
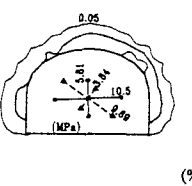
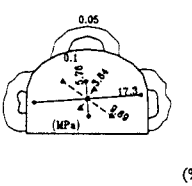
計測パターン	Case-1A	Case-2A	Case-3A	Case-4A
初期応力 パラメーター	$\sigma_{xo}/E = -0.0004475$ $\sigma_{yo}/E = -0.0003461$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0001434$ $\theta(^{\circ}) = 54.7$	$\sigma_{xo}/E = -0.0004241$ $\sigma_{yo}/E = -0.0003178$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0001439$ $\theta(^{\circ}) = 55.1$	$\sigma_{xo}/E = -0.0004282$ $\sigma_{yo}/E = -0.0003157$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0001437$ $\theta(^{\circ}) = 55.7$	$\sigma_{xo}/E = -0.0003918$ $\sigma_{yo}/E = -0.0002767$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0000604$ $\theta(^{\circ}) = 66.8$
主応力 及び 最大せん断 ひずみ分布				
計測パターン	Case-5A	Case-6A	Case-7A	Case-8A
初期応力 パラメーター	$\sigma_{xo}/E = -0.0004638$ $\sigma_{yo}/E = -0.0004590$ $\sigma_{xyo}/E = 0.0000660$ $\theta(^{\circ}) = 46.0$	$\sigma_{xo}/E = -0.0003721$ $\sigma_{yo}/E = -0.0001945$ $\sigma_{xyo}/E = -0.0000066$ $\theta(^{\circ}) = 92.1$	$\sigma_{xo}/E = -0.0003627$ $\sigma_{yo}/E = -0.0002010$ $\sigma_{xyo}/E = -0.0000065$ $\theta(^{\circ}) = 92.3$	$\sigma_{xo}/E = -0.0003020$ $\sigma_{yo}/E = -0.0001020$ $\sigma_{xyo}/E = -0.0000150$ $\theta(^{\circ}) = 94.3$
主応力 及び 最大せん断 ひずみ分布				

図-3 計測パターンの違いによる逆解析結果の比較

4. 不連続挙動が卓越する地山の場合の逆解析の適用性

空洞周辺に卓越した不連続面または断層・破碎帯等が存在する場合には、空洞掘削に伴う岩盤応答は不連続挙動が支配的となる。このような地山への N-DBAP の適用性を検討するため表-2 に示す解析条件を用いた個別要素解析 (UDEEC) を実施し、それを計測変位と仮定して逆解析を実施した。

(1) 解析モデルの設定

検討対象は 3 章と同じ空洞規模と施工段階とし、解析モデルはジョイントパターンを 2 ケース作成し、それぞれについて不連続面の力学特性を 2 ケースの計 4 ケースを設定した。なお、実施工を想定した掘削過程および PS アンカーによる緊張力導入を解析上考慮した。

(2) N-DBAP の適用結果

各ケースについて N-DBAP の入出力結果および UDEEC による岩盤変形図と比較した結果を図-4 に示す。

CASE-A,C と CASE-B,D の結果を比較すると、不連続面の力学特性を低下させた場合には初期応力パラメーターの同定精度が低下するが、主応力は CASE-A~D とともに比較的良好に一致している。

岩盤の変形係数同定結果は各ケースでかなりばらつきが見られるが、これは UDEEC による岩盤変位が不連続面の幾何学条件と力学特性に支配されるため、入力変位の大きさが直接的に N-DBAP の出力結果に影響したも

表-2 不連続解析入力条件一覧

項	目	解析入力値
地山応力	水平応力 σ_{xo} (MPa)	-7.7
	鉛直応力 σ_{yo} (MPa)	-5.8
	せん断応力 τ_{xyo} (MPa)	2.8
	鉛直よりの傾き $(^{\circ})$	54.4
岩盤物性	密度 (g/cm ³)	2.6
	弾性係数 E (MPa)	2.35×10^4
	ポアソン比 ν	0.25
不連続面 力学特性	垂直剛性 (MPa/m)	1.0×10^3 1.0×10^4
	せん断剛性 (MPa/m)	5.0×10^3 5.0×10^4
	せん断強度 (MPa)	0.4 0.4
	内部摩擦角 $(^{\circ})$	45 45
PS アンカー緊張力 (t/本)		45.0
ストランド	弾性係数 (MPa)	1.0×10^5
	降伏荷重 (kN)	844.0
	破断伸び (%)	3.5
	せん断剛性 (MPa)	2.3×10^2
	付着強さ (N/m)	4.6×10^3

のと考えられる。

最大せん断ひずみについては、4 ケース共に空洞頂部と両側壁部において相対的に大きな値を示している。これを、UDEEC による岩盤変形図と比較すると、最大せん断ひずみの大きな領域と不連続な岩盤変形が顕著なブロックは概ね良好に一致していることが判る。

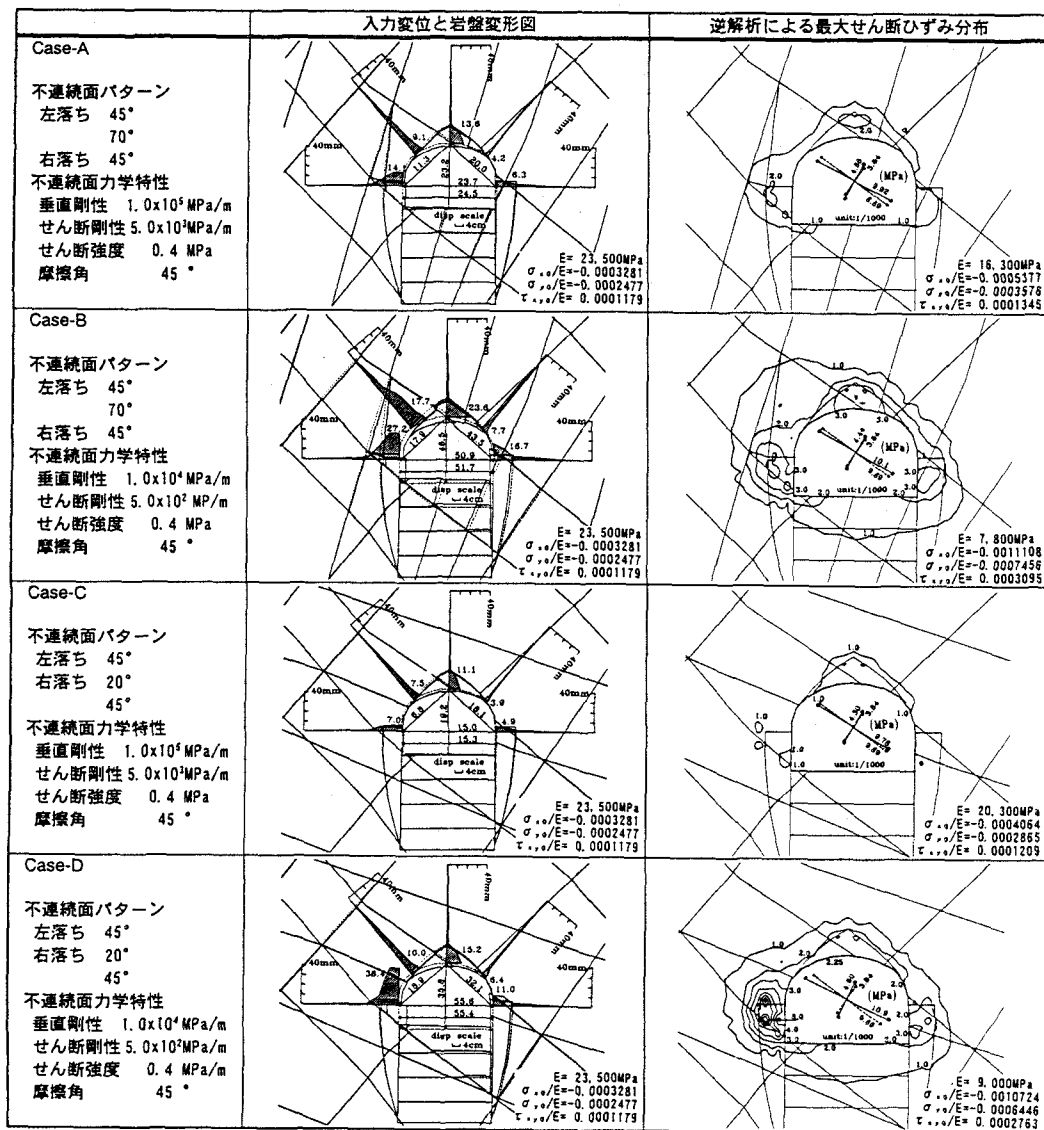


図-4 不連続変位への逆解析適用結果

5. 最終ベンチ掘削時の空洞安定性予測解析手法に関する検討

地下空洞工事における逆解析の目的は、施工途中段階で得られた計測変位をもとにその時点での地山の安定性を評価すると同時に、次の施工段階あるいは掘削完了時における空洞挙動を合理的に予測し、岩盤安定性や支保工の妥当性評価に資することである。図-5 では、弾塑性順解析、3章の CASE-1A, 1B, および 1C で同定した初期応力パラメータを用いて順解析により最終ベンチ掘削時の最大せん断ひずみ分布を予測した結果を比較した。

この結果から、N-DBAP による予測結果は等方等質 DBAP による予測と比較して弾塑性解析結果により近似しており、また非弾性ひずみを考慮する領域の大小による顕著な差は見られない。また、予測解析において

