

岩盤の非均質性を考慮した 逆解析手法の開発とその適用性

武内邦文¹・志村友行¹・芥川真一²・桜井春輔³

¹正会員 工修 (株)大林組東京本社 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

²正会員 Ph.D 神戸大学助教授 工学部建設学科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台 1-1)

³正会員 工博 Ph.D 広島工業大学学長, 神戸大学名誉教授 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

本論文では、地下空洞のように周辺岩盤の緩み域や破砕帯等の非均質層挙動が卓越する場合に適した逆解析手法を開発し、数値実験により解析精度を検討するとともに、これを実際の地下発電所空洞の掘削時に得られた計測変位に適用し、その実用化に向けた適用性を評価した。本手法は、初期応力パラメーターと非弾性ひずみを未知数としてノルム最小化により解を同定する逆解析により推定した岩盤ひずみを用いてその弾性係数低減率を定義し、繰り返し計算により非均質層の広がりや特性を定量的に同定するものである。数値実験および実工事に適用した結果、本手法は従来の逆解析よりも計測変位により適合した変位とひずみ分布を推定でき、かつ適切に非均質特性を同定できるとともに、計算自体は線形問題のため、繰り返しも含めて迅速に処理可能であることから、現場への適用性に優れていることが判明した。

Key Words : *underground cavern, jointed and inhomogeneous rock mass, displacement measurements, back analysis, non-elastic strain, reduction factor of elastic modulus*

1. はじめに

岩盤内に建設される地下構造物の支保設計では、岩盤の複雑さのため設計荷重である地山の初期応力や構造物の規模に対応した適切な力学特性等を事前調査で精度良く把握することが困難な場合が多い。したがって、実務的な観点から、安全かつ経済的に地下空洞を建設するには、施工中の岩盤観察や現場計測結果を適切に設計や施工へフィードバックする情報化施工技術が重要となる。

岩盤の安定性を迅速かつ定量的に評価する 1 つの方法として、筆者の一人が提案した直接ひずみ評価法¹⁾を前提とし、現場計測変位から逆解析を駆使して岩盤に発生したひずみを推定した上で、それを限界ひずみと比較する方法がある。これを用いれば、リアルタイムに岩盤安定性を評価できるとともに、以降の掘削時安定性を適切に予測することが可能となる^{2,3,4,5,6)}。これらの逆解析は、基本的に、計測変位を入力し、それと近似する変位を生じる地山応力および力学特性等を有限要素法の定式化を用いて逆算するものである。最初に開発された直接逆解析法 (以下、

DBAP[Direct Back Analysis Program]と呼ぶ)²⁾は、初期応力パラメーター (初期応力と地山弾性係数の比) を未知数として最小二乗法を適用するもので、トンネルのように比較的断面が小さい場合を対象に良好に適用されてきた。

一方、大規模地下空洞のように断層、破砕帯または不連続面等の挙動が卓越する場合には、地山を等方等質の弾性体と仮定する DBAP を適用するのには問題があったため、局所的に異方性パラメーターを導入して適合させる手法が提案された³⁾。その後、ノルム最小化法により解を同定する非弾性ひずみを考慮した直接逆解析法^{4,5)} (以下、N-DBAP と呼ぶ) が開発され、その地下空洞への適用性に関して有効な手法となり得るという知見を得た^{7,8)}。この手法は、計測点に解析モデルの節点を設け、要素に生じる全ひずみ成分を弾性と非弾性ひずみの足し合わせと仮定し、弾性ひずみに対応する初期応力パラメーターと非弾性ひずみを未知数として同定する逆解析である。したがって、その特徴は、一般に未知数が方程式数より多くなり、計測変位と逆解析パラメーターを用いた順解析変位は計測点で完全に合致する。さらに、最近では、地下空洞を対象と

して、計測変位から岩盤不連続面に沿うすべり変位を未知数として逆算する手法も開発されている⁹⁾。

大規模地下空洞の掘削問題においては、断層や破碎帯等の弱層、すなわち非均質層の挙動が支配する場合が多いことを念頭に、本論文では、その影響を適切に逆解析モデルに取り込むことが可能な新しい逆解析手法を提案し⁹⁾、数値解析によりその適用精度について考察する。その特徴としては、基本的にはN-DBAPの定式化を利用しながら、非均質層の広がりや力学特性を定量的に同定することが可能なことで、DBAPでは全域を等方等質の弾性体と仮定した点と大きく異なるものである。さらに、この手法を用いて実際の地下空洞工事で得られた計測変位を評価することにより、その実務的な観点からの有用性を確認した結果を報告するものである。

2. 逆解析の定式化

ここで提案する逆解析は、特に地下空洞のように断層や破碎帯等の非均質層の挙動が卓越する場合への適用性を向上させるため、計測変位から初期応力パラメーターだけでなく、非均質層の広がりとその材料特性をも逆解析の未知数として求めるものであり、以下にその逆解析手法の概要を述べる。

掘削により生じる全ひずみ増分 $\Delta \epsilon$ は式(1)で一般的に表わされ、そのうち弾性成分 $\Delta \epsilon_e$ は式(2)のようにフックの法則で応力増分と関係づけられる。

$$\Delta \epsilon = \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p \quad (1)$$

$$\Delta \sigma = D_e (\Delta \epsilon - \Delta \epsilon_p) \quad (2)$$

ここに、 $\Delta \epsilon_p$: 塑性、不連続、ゆるみ等の非弾性ひずみ
 D_e : 弾性応力-ひずみマトリックス
 $\Delta \sigma$: 弾性応力増分

ここで、有限要素法の剛性方程式のうち非弾性挙動分を右辺に移項し、付加外力として取り扱えば、式(3)に示すように線形問題として非弾性ひずみを未知数化することが可能となる⁹⁾。

$$[K^*] \{\Delta u\} = \{R_1^*\} \{R_2^*\} \cdots \{R_n^*\} \{x\} \quad (3)$$

ここに、 $[K^*]$: 弾性剛性マトリックス ($= [K]/E$)
 $\{\Delta u\}$: 節点変位ベクトル
 $\{x\}$: 初期応力パラメーターと非弾性ひずみの未知ベクトル ($= \{\sigma_{\alpha}/E, \sigma_{\beta}/E, \tau_{\alpha\beta}/E, \Delta \epsilon_{px}^1, \dots, \Delta \gamma_{py}^N\}^T$)
 $\{R_i^*\}$: i 番目の未知パラメーターが1の時の節点荷重ベクトル

したがって、計測点の変位を $\{\Delta \hat{u}\}$ とすれば、観測方程式は次式となる。

$$\begin{aligned} \{\Delta \hat{u}\} &= [A] \{x\} \\ &= [\{A_1\} \{A_2\} \cdots \{A_n\}] \{x\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{ここに、} \{A_1\} &= [K^*]^{-1} \{R_1^*\} \\ &\vdots \\ \{A_n\} &= [K^*]^{-1} \{R_n^*\} \end{aligned}$$

剛性マトリックスを算定するには、一般に、要素中に設定したガウスポイントを代表点として積分を行う必要があり、そのポイントで要素ひずみも定義される。したがって、非弾性領域内のガウスポイント総数を N とした場合の式(4)の未知数は、2次元問題の場合、3個の初期応力パラメーターとガウスポイントでのひずみ3成分、すなわち $n=3(1+N)$ 個となるため、変位計測数は未知数より少ないのが一般的である。このような場合には、解の組合わせが無限に存在するため、特別な制約条件を設けず、未知パラメーターの重み付きノルム二乗和を最小にするノルム最小化法により最適解を求める方法が式(5)である⁹⁾。

$$\{x\} = [W]^{-1} [A]^T ([A][W]^{-1}[A]^T)^{-1} \{\Delta \hat{u}\} \quad (5)$$

上式において、 $[W]$ は対角重み付きマトリックスであり、その値は未知パラメーターが定義されている領域の体積を表わす⁹⁾¹⁰⁾。この定式化によれば、計測変位と逆解析結果に基づく変位算定結果は計測点において完全に合致することになるが、その際の適用上の問題点としては以下の事項が挙げられる。

- ① 地山中に存在する非均質弾性層の影響をも非弾性ひずみに包含される。
- ② 元来ばらつきのある計測変位に合致するように非弾性ひずみが柔軟に生じるため、物理的にはあまり意味がないひずみを同定している可能性がある。

これらの問題を解決するため、ここでは、前述のN-DBAPに、より一般性を持たせる方法として、非均質層の存在を推定するための逆解析手法を提案する。すなわち、N-DBAPの未知数として得られるひずみをもとに、非均質層を各要素毎に等方弾性体と仮定し、その弾性係数低減率 A_i を適切に算定する逆解析法である。したがって、異方性は考慮できないが、 A_i は等方弾性体である各要素の変形のしやすさを表わす指標となり、その算定方法を図-1に示す単純化した概念図で説明する。

図-1の上図はトンネル掘削問題を単純化したもので、応力 σ が作用しているところを掘削面とみなし、中央の非弾性部分が非弾性ひずみを考慮する領域と考える。この材料がもし完全弾塑性体ならば、その中央部分の応力ひずみ

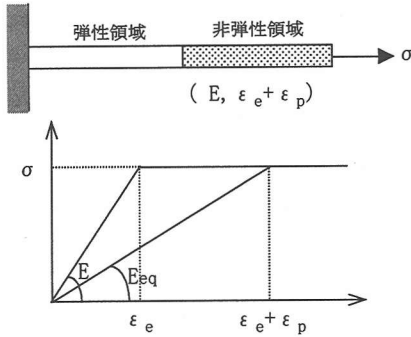


図-1 弾性係数低減率Ai 算定法の概念図

関係は図-1の下図のようになり、等価な弾性係数Eeqに
関しては以下の式が成り立つ。

$$\sigma = E \varepsilon_e = E_{eq} (\varepsilon_e + \varepsilon_p) \quad (6)$$

したがって、非弾性ひずみ部分の弾性係数低減率Aiは
次式で求めることができる。

$$A_i = \frac{E_{eq}}{E} = \frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_e + \varepsilon_p} \quad (7)$$

N-DBAP の出力結果である初期応力パラメーターを用
いて順解析を行えば各要素の弾性ひずみは全て推定でき、
また、非弾性ひずみも求められているため、ここでは、式
(7)を考慮して、各要素のAiは次式の最大せん断ひずみ比
で表わせるものと仮定した。

$$A_i = \frac{E_i}{E} = \frac{G_i}{G} = \frac{\Delta \gamma_{max}^i}{\Delta \gamma_{max}^i} \quad (8)$$

ここに、E：堅岩部弾性係数 G：堅岩部せん断弾性係数

Ei：非弾性ひずみ考慮領域中i番目要素の等
価弾性係数

$\Delta \gamma_{max}^i$ ：i番目要素の弾性最大せん断ひずみ

$\Delta \gamma_{max}^i$ ：i番目要素の全最大せん断ひずみ

ここで提案する非均質性を考慮した逆解析手法(以下、
非均質N-DBAPと呼ぶ)の具体的な手順を図-2に示す。

すなわち、現場計測変位が得られた場合に、ポアソン比
および非弾性ひずみ考慮領域を仮定し、通常のN-DBAP
を適用する。その出力として得られる初期応力パラメータ
ーと非弾性ひずみから対象領域内の各要素で最大せん断
ひずみを計算し、それぞれの弾性係数低減率Aiを式(8)
により算定する。それから、算定されたAiを式(3)の剛性マ
トリックス[K*]に取り込んで非均質N-DBAPを行い、
パラメーターとしてのAiが工学的に十分な精度で収束し

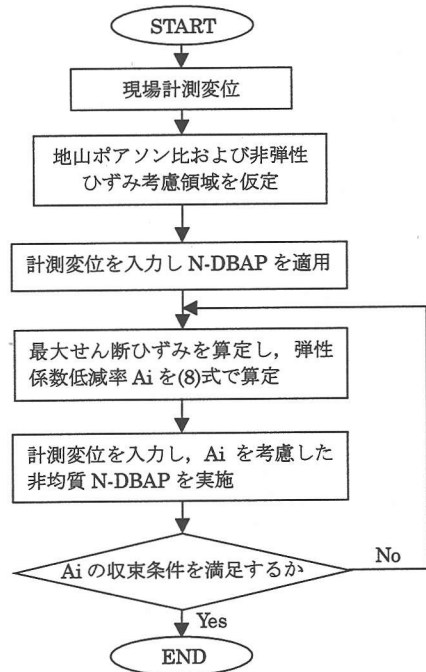


図-2 非均質N-DBAPのフローチャート

たかどうかを判断し、必要ならば上記のフローを繰り返す。
つまり、従来のN-DBAPは、弾性ひずみが等方等質な岩
盤材料に初期応力パラメーターが载荷され生じていると
しているのに対し、非均質N-DBAPは等方非均質を仮定
し、繰り返し計算により最適なAi分布を同定しようとす
るものである。

その際重要なポイントは、式(8)は除算式であるため、分
母である全最大せん断ひずみ増分 $\Delta \gamma_{max}^i$ が仮に十分小さ
くて物理的意味に乏しい場合でも、分子の弾性最大せん断
ひずみ $\Delta \gamma_{max}^i$ との兼ね合いでパラメーターAiが大き
くばらつく場合があることである。それを避けるため、ひ
ずみが一定の閾値以下の場合には、物理的に無意味とい
うことでAiを1.0のままにする必要があり、本研究ではこ
のひずみの閾値として対象領域内の平均最大せん断ひ
ずみを用いることとした。

パラメーターAiの収束条件としては、繰り返し計算を
通じて、計測変位に極力近似する最適なAi分布に安定的
に収束していくものと仮定して、式(9)に示すように、対
象領域内のAiの平均値が一定値に安定するまで非均質
N-DBAPを繰り返すこととした。

$$\delta = \left| \frac{1}{M} \sum \frac{A_i(m) - A_i(m-1)}{A_i(m)} \right| < \varepsilon \quad (9)$$

ここに、M:非弾性ひずみ考慮対象領域要素数

Ai(m):m回目の逆解析により得られるi番目要
素の弾性係数低減率

この手法は、繰り返し計算により各要素の弾性係数低減率 A_i を計測変位分布に可能な限り適合するような組合わせに収束させていくもので、例えば、許容誤差 δ を 5% 程度に設定した場合には、経験的に数回程度で収束することが判明している。その際、各要素の A_i は、その値の大きさに関係なく安定的に一定値に収束していくことが確認されている。したがって、計算時間も線形問題に置き換えているので比較的短くて済み、この方法の計算は、現場に設置されたパソコン程度で十分処理可能であり、計測変位を迅速に評価できるという利便性を損なうことなく岩盤安定性を定量的に評価できる。

3. 数値実験による解析精度の検討

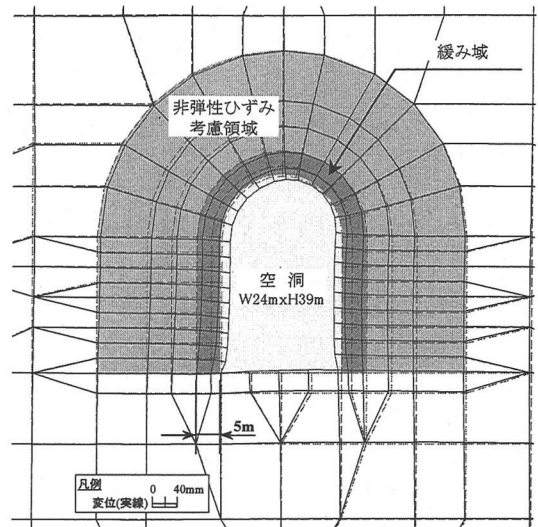
ここで提案した非均質 N-DBAP の解析精度について検討するため、地下空洞掘削問題を対象とした数値実験を行った。図-3(a)に示すように、ケース1が弾頭型空洞を対象とし非均質層として空洞周辺 5m 部分が緩み域となった場合、ケース2が図-3(b)のように非均質層として空洞左側上部から側壁にかけて卓越した破砕帯が存在する場合を想定したモデルである。なお、これらの図中には、非均質 N-DBAP を行うのに必要な非弾性ひずみの発生を考慮する領域、変位を比較する位置として Line-1~Line-3 (ケース2のみ)、および順解析の結果得られた変位分布(逆解析の入力変位)もあわせて示している。

まず、逆解析に必要な入力(計測)データを得るために、岩盤を完全線形弾性体と仮定した空洞掘削解析を実施した。その解析入力条件が表-1であり、一般性を持たせるため地山初期主応力に傾きを与え、堅岩部の弾性係数 24GPa に対して非均質層としての緩み域はその 1/4 の 6GPa、破砕帯は 1/10 の 2.4GPa の物性を当初から有しているものと仮定した。

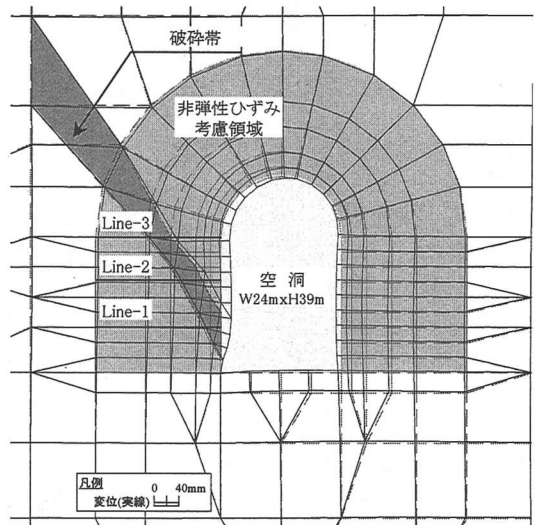
上記の順解析で得られた節点変位のうち、逆解析の入力変位として用いたのは非弾性ひずみ考慮領域内の xy 方向成分の全変位とした。これは、計測変位的な相対変位入力による誤差を取り除き、可能な限りこの逆解析手法の解析精度を明確にするために仮定したものである。

最初に、検証用として、均質モデルを対象とし、非均質 N-DBAP を適用した結果、順解析入力である初期地山応力や弾性係数とはほぼ同じ値が逆解析でも得られ、 A_i の平均値もほぼ 1.0 で収束し、したがって、本手法の解の安定性は良いことが判明した。次に、ケース1および2の各解析モデルについて、図-3の変位を入力し、非均質 N-DBAP を適用して、得られた初期応力等と最大せん断ひずみ分布を順解析結果と比較したものが図-4および5である。

まず、図-4の結果から明らかな通り、緩み域を想定したケース1の場合には順解析で得られた最大せん断ひず



(a) ケース1：空洞周辺緩み域存在モデル

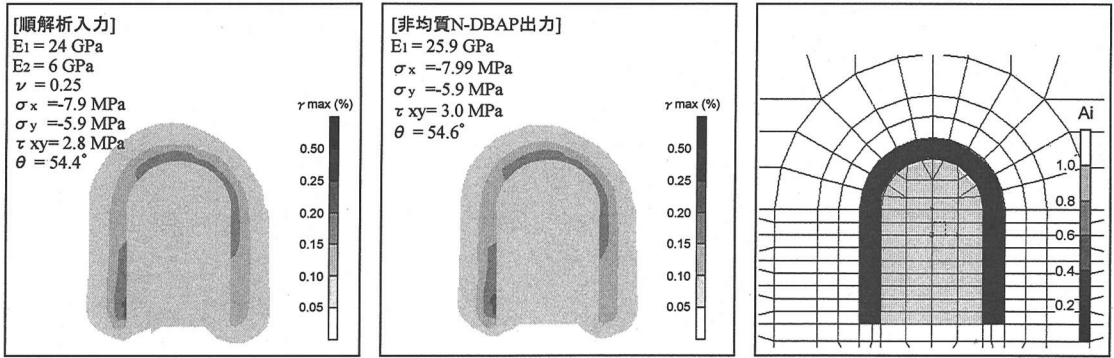


(b) ケース2：空洞側壁部破砕帯存在モデル

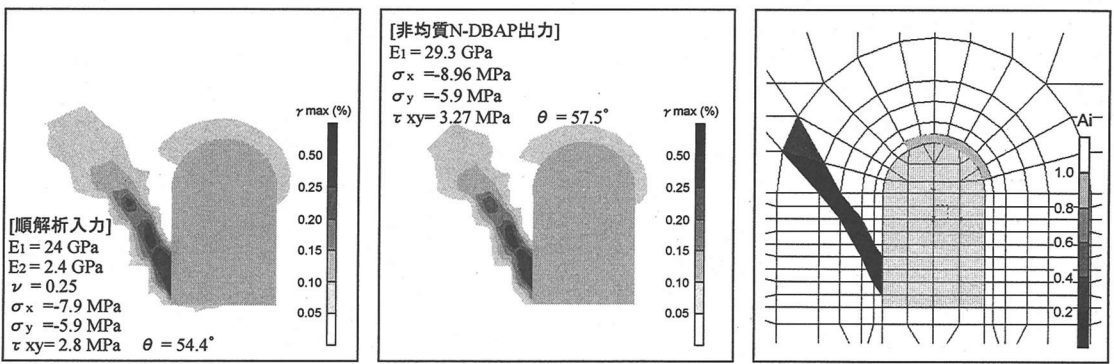
図-3 数値実験用解析モデル

表-1 数値実験用解析条件一覧

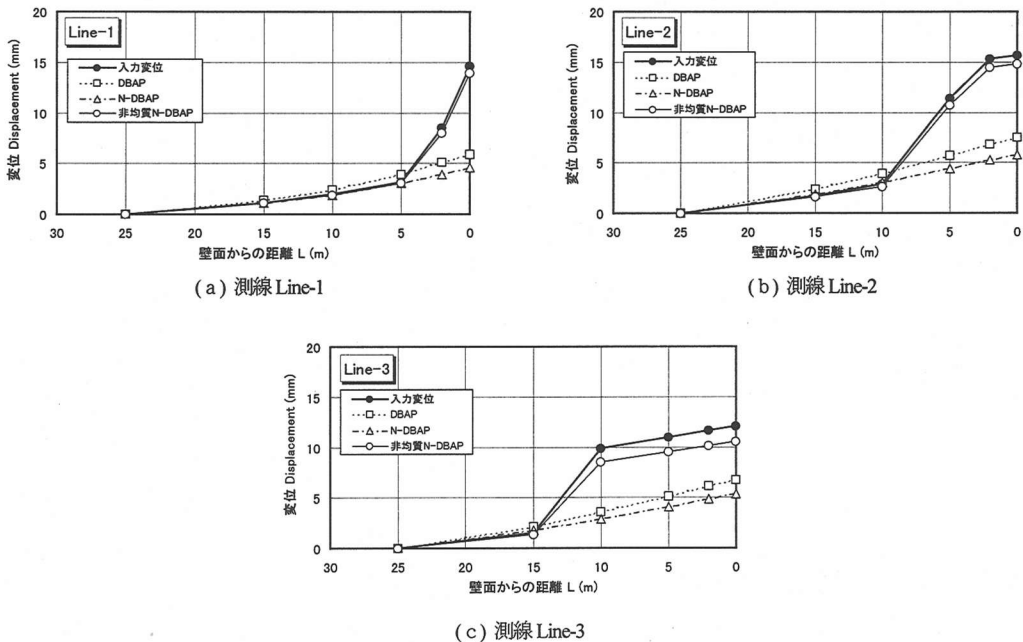
項目		解析入力値		
地山初期 応力	σ_x MPa	-7.9		
	σ_y MPa	-5.9		
	τ_{xy} MPa	2.8		
	傾き θ °	54.4		
力学定数		堅岩部	緩み域	破砕帯
弾性係数	E GPa	24	6	2.4
ポアソン比	ν	0.25	0.25	0.25



(a) 順解析による γ_{\max} 分布 (b) 非均質 N-DBAP による γ_{\max} 分布 (c) 非均質 N-DBAP による A_i 分布
 図-4 順解析および逆解析の結果得られた最大せん断ひずみ γ_{\max} 分布の比較と弾性係数低減率 A_i 分布 (ケース 1)



(a) 順解析による γ_{\max} 分布 (b) 非均質 N-DBAP による γ_{\max} 分布 (c) 非均質 N-DBAP による A_i 分布
 図-5 順解析および逆解析の結果得られた最大せん断ひずみ γ_{\max} 分布の比較と弾性係数低減率 A_i 分布 (ケース 2)



(a) 測線 Line-1 (b) 測線 Line-2 (c) 測線 Line-3
 図-6 順解析および逆解析の結果得られた変位分布の比較 (ケース 2)

み分布と全く同じひずみ分布が非均質 N-DBAP の結果として推定できること、および初期応力パラメーターとしては、例えば、入力弾性係数 $E=24\text{GPa}$ に対して、逆解析の出力結果は $E=25.9\text{GPa}$ と工学的に十分な精度で推定可能であることが判明した。なお、図-4(b)に示す非均質 N-DBAP のひずみ出力は弾性ひずみと逆解析の未知数として同定された非弾性ひずみを足しあわせた全最大せん断ひずみ分布である。また、図-4(c)に示す通り、同定された緩み域の弾性係数低減率 A_i 分布は、その領域内で概ね 0.25 程度となり、したがって本逆解析の解析精度は極めて優れていることがわかる。

次に、図-5の結果から、破碎帯を想定したケース2の場合にも同じく、順解析による最大せん断ひずみ分布と全く同じひずみ分布が非均質 N-DBAP の結果として推定でき、初期応力パラメーターとしては、例えば、入力弾性係数 $E=24\text{GPa}$ に対して、逆解析の出力結果は $E=29.3\text{GPa}$ と工学的に十分な精度で推定できた。さらに、図-5(c)から、同定された破碎帯の弾性係数低減率分布は、その広がりをほぼ正確に推定でき、しかも A_i は概ね 0.1 程度となり、したがって、ここでの数値実験のように、かなり多くの変位が計測された場合には、非均質 N-DBAP の精度は優れて安定しており、数回の繰り返し計算で収束していることから実用的な方法といえる。

図-6は、ケース2の破碎帯モデルの場合に関する左側壁部の測線Line-1~Line-3部分における変位分布について、順解析の結果得られた入力変位と逆解析手法として DBAP, N-DBAP, および非均質 N-DBAP の結果得られた変位分布を比較したものである。なお、N-DBAP および非均質 N-DBAP の変位は弾性成分のみを示している。この結果から、3本の測線とも入力変位に最も近似しているのは非均質 N-DBAP による出力変位であることがわかる。この理由は、非均質 N-DBAP が弾性係数低減率により変形性能を柔軟に表現できることから、計測変位に対する追従性に極めて優れているため考えられる。

図-7は緩み域存在モデルであるケース1に関する非均質 N-DBAP の緩み領域部における A_i 収束状況であり、最初に仮定した $A_i=1.0$ から、数回程度の繰返し回数で正解値である $A_i=0.25$ 程度に安定的に収束している様子がわかる。また、図-8は、同じく、ケース2の破碎帯部における A_i 収束状況であり、正解値 $A_i=0.1$ に収束している。したがって、提案した非均質 N-DBAP の解析精度は工学的に十分な信頼性を有することが判明した。

4. 実際の地下空洞掘削問題への適用結果

本章では、ここで提案した非均質挙動を考慮可能な逆解析手法を用いて、実際の地下発電所空洞掘削時に得られた

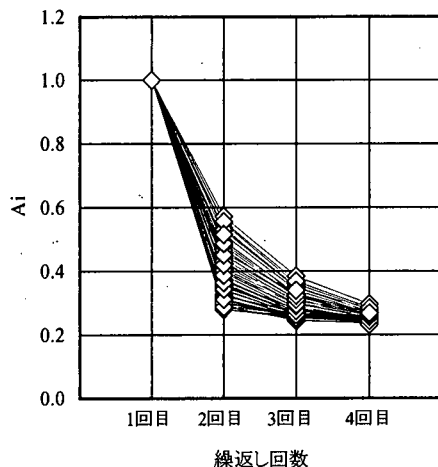


図-7 非均質 N-DBAP の A_i 収束状況 (ケース1)

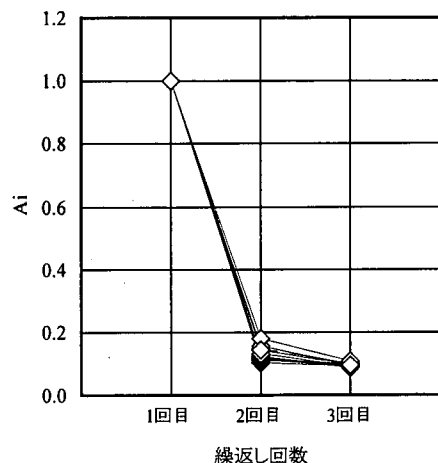


図-8 非均質 N-DBAP の A_i 収束状況 (ケース2)

変位データに適用し、その実用性について検討する。

(1) 地下空洞工事の概要

この逆解析手法を適用した地下発電所は、土被り約 300m、電中研式岩盤分類で C_H 級の良好な岩盤中に、アーチスパン 24m、高さ 46.6m、長さ 134.5m 規模の弾頭型空洞を掘削した工事である^{11), 12), 13)}。岩石および岩盤の主な平均的物性値を表-2に、また逆解析を適用した箇所の大略地質断面を図-9に示す。これから分かるように、水圧管路側ではき裂帯が比較的少なく良好な岩盤状況であるのに対し、放水路側ではアーチから側壁にかけて流れ目のき裂帯が多く存在し、岩盤が劣化している。応力開放法により計測された地山の初期応力の 2 次元成分を図-10に示しており、発電所長軸方向にほぼ直交した最大主応力は 10MPa (圧縮)、傾斜は水平から右回りに 36 度下向き

表-2 主要な岩石および岩盤の平均的力学特性

岩石供試体	平均値	岩盤試験	平均値
一軸圧縮強度	240MPa	変形係数	24GPa
弾性係数	75GPa	ポアソン比	0.25
ポアソン比	0.25	せん断強度	2.4MPa

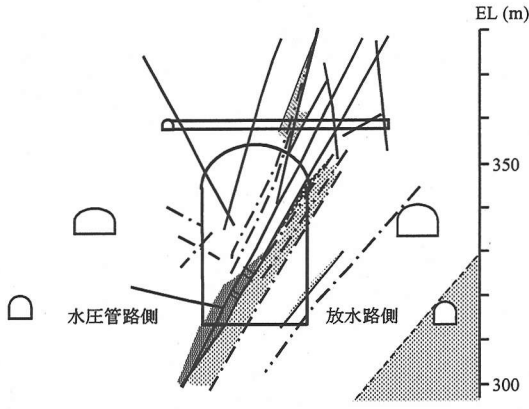


図-9 概略地質構造図

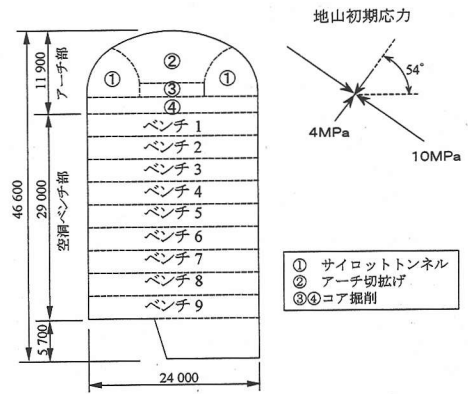


図-10 地下空洞掘削順序と地山初期応力

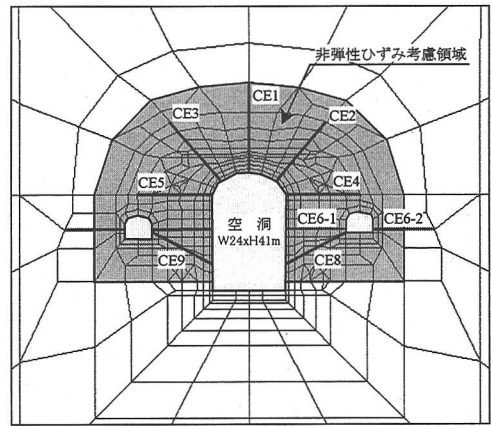


図-11 有限要素メッシュと非弾性ひずみ考慮領域

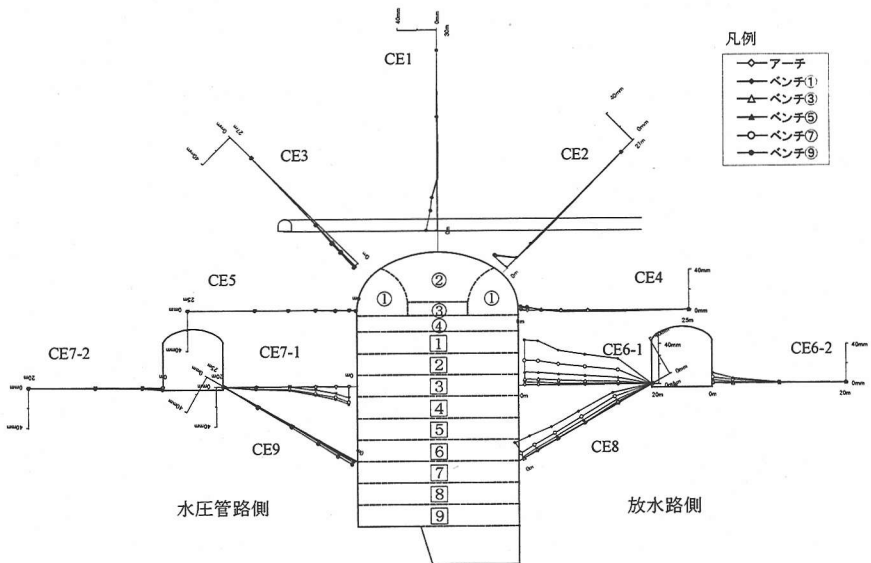
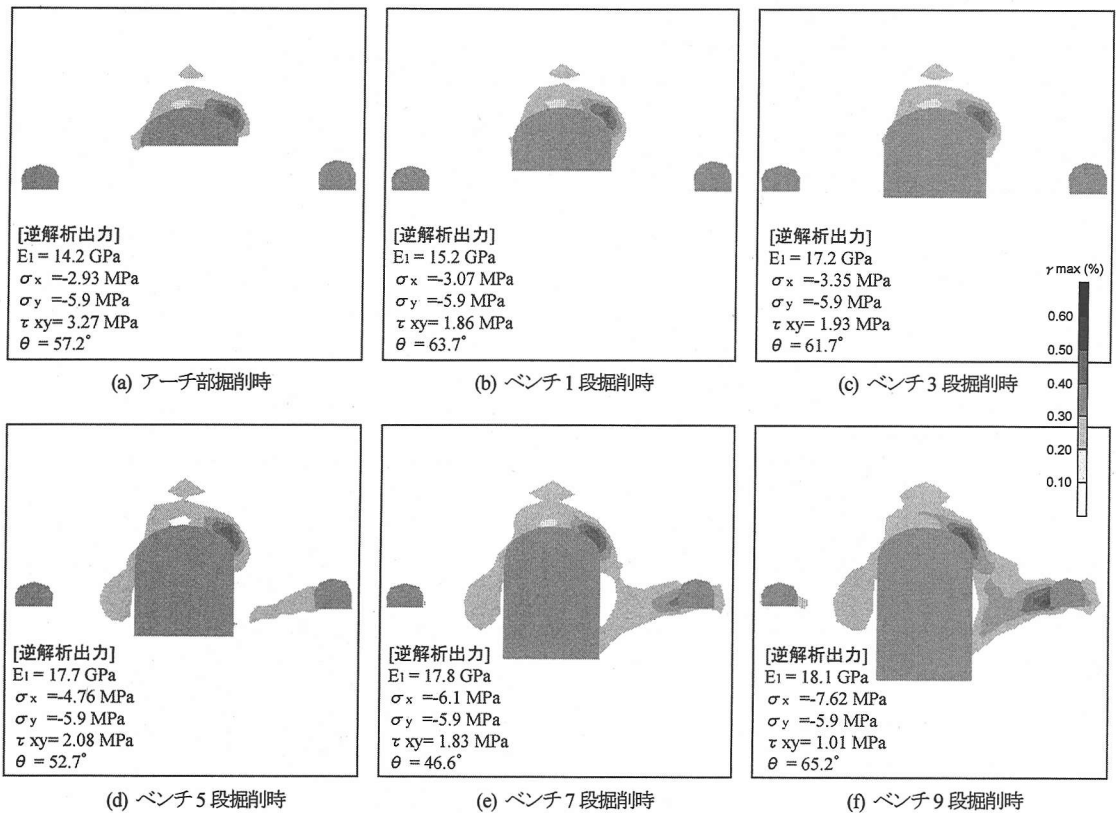


図-12 地下空洞掘削に伴う計測変位



図一13 逆解析の結果得られた最大せん断ひずみの分布 (非均質 N-DBAP)

で、最小主応力は4MPaである^{14),15)}。

図一10には地下空洞断面の掘削順序も示しており、すなわち4ステップのアーチ部掘削と9段のベンチ部掘削を順次実施した。この掘削順序を考慮した逆解析の有限要素メッシュが図一11であり、その中にはハッチで示した非弾性ひずみの発生を考慮する領域も示している。この地下空洞掘削に伴う計測された変位分布を図一12に示しており、岩盤性状が良くない放水路側ではベンチ掘削7段あたりから地中変位が急増していった様子が分かる。なお、これらの変位分布計測値が本論文で検討した逆解析に入力する変位となる。

(2) 逆解析結果とその考察

a) 掘削に伴う全ひずみ分布の推移

ここで提案した非均質 N-DBAP の結果得られたひずみについて、その全ひずみ成分(弾性ひずみ+非弾性ひずみ)を推定し、アーチ掘削完了後およびベンチ1, 3, 5, 7, 9 段掘削完了後の全最大せん断ひずみ分布を示した結果が図一13である。同図には、同じく逆解析の結果として得られた初期応力パラメーターから、計測された鉛直方向の初期応力を5.9MPaに固定し、弾性係数およびその他の初期応力を算定した結果も示している。なお、式(9)に

示した弾性係数低減率 A_i 算定のための収束条件については5%に設定し、ここでの逆解析では3~5回程度で満足したため、現場でのリアルタイム性を確保する観点からの実用性は高いことが判明した。

最大せん断ひずみの分布については、アーチ掘削初期の段階から放水路側右肩部で限界ひずみを越える大きな値が生じており、その状態はベンチ5段掘削まではほとんど変化していない。これは、アーチ掘削段階でこの部分に大きな地中変位が発生したことに対応するもので、すなわち、この逆解析によれば、そのような局所的な挙動に対して適切に評価できるものであることがわかる。この点については、他の逆解析手法との比較を踏まえて、後節において詳細に検討する。その後、ベンチ5段掘削時に放水路側の併設空洞左側壁部からひずみ集中領域が発電所空洞に向かって進展しはじめ、この傾向は、ベンチ7段および9段掘削時に、より顕著な傾向として表れている。この空洞における変位計測結果の大きな特徴としては、放水路側のベンチ7段および9段掘削時に、き裂帯が集中して岩盤条件が特に悪かった放水路側の右肩上部から側壁下部にかけて大きな変位が発生し、岩盤安定上の問題となったことである。これは、ベンチ掘削に伴い放水路側の流れ目き裂帯に沿って大きな変形が生じ、その上部の岩盤にも影響したも

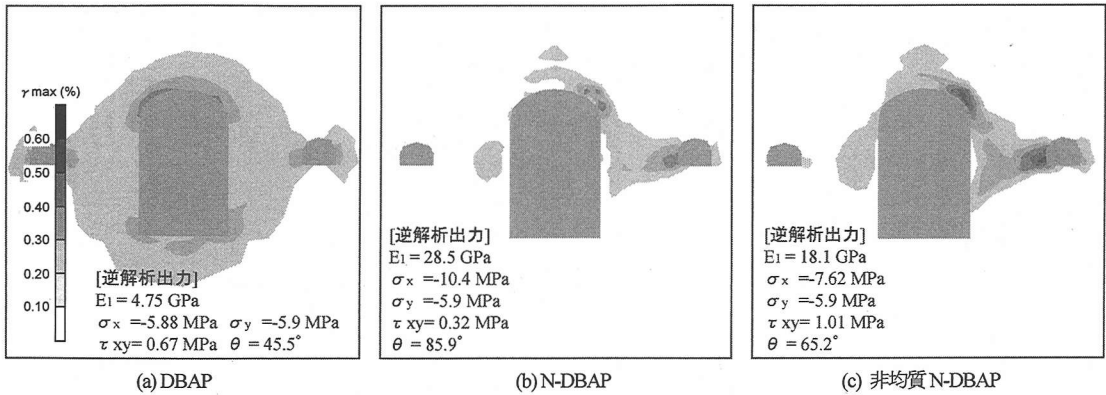


図-14 他の逆解析手法により得られた最大せん断ひずみ分布（最終ベンチ掘削時）の比較結果

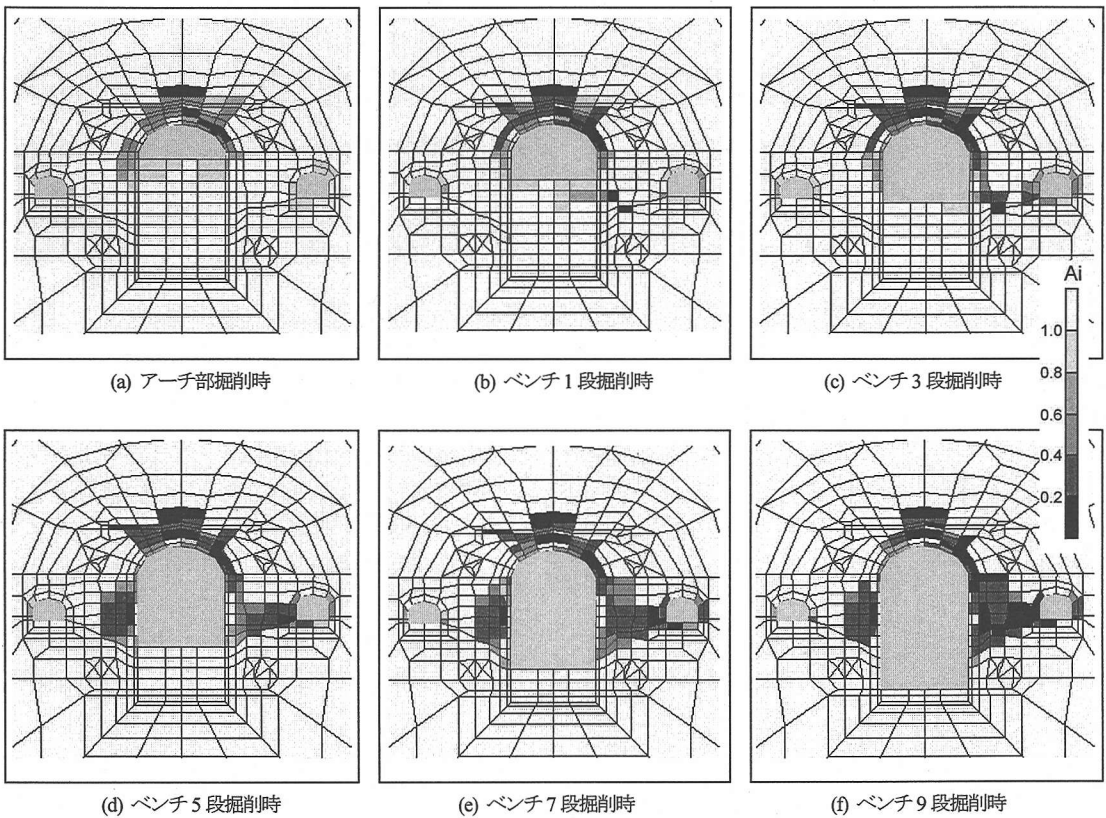
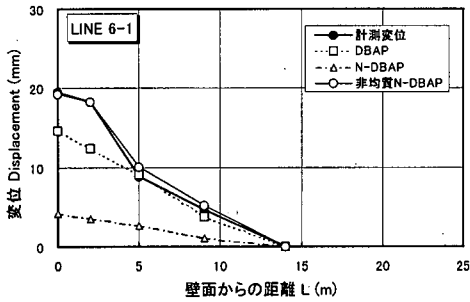


図-15 逆解析の結果得られた弾性係数低減率 A_i の分布（非均質 N-DBAP）

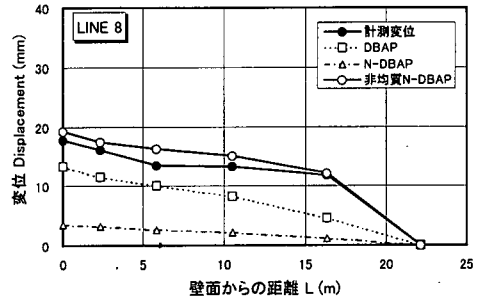
のと推定され、図-13のベンチ7段および9段掘削時の逆解析によるひずみ分布は、流れ目き裂帯に沿ったひずみ集中領域とともに、側壁中段部と右肩上部のひずみ増大も適切に推定できており、したがってこの逆解析の精度は十分高いと判断できる。

比較対象として、図-14は全く同じ計測変位を入力として、等方等質を仮定したDBAP²⁾とノルム最小化法を用いたN-DBAP⁴⁾により推定した最終ベンチ掘削完了後の全最大せん断ひずみ分布である。この場合にも、同じ

く初期応力パラメーターから推定した弾性係数およびその他の初期応力も示している。この比較結果から、前者の逆解析結果は等方等質を仮定した制約から、放水路側の局所的な岩盤挙動を的確に表現できておらず、したがって、この方法を局所的な不連続や非均質挙動が卓越する場合には問題があることがわかる。後者のN-DBAPでは、ひずみ分布の評価結果はかなり改善されるが、その値としては図-14(c)に示す非均質N-DBAPの方が大きくなることが判明した。この原因は、弾性係数低減率



(a) 放水路側 CE6-1 測線



(b) 放水路側 CE8 測線

図-1 16 計測変位と逆解析により算定した変位の比較

という変形特性上の自由度を大きくしたことにより、計測変位により適合する非均質弾性モデルを適切に探し出したためであり、特に、ベンチ 7 段および 9 段掘削時の結果を比較すれば、放水路側の側壁岩盤の不安定性を明確に評価できていることがわかる。また、両手法から得られた弾性係数 E を比較すれば、N-DBAP ではアーチ掘削時に 15GPa であったものが、掘削とともに増大し、最終的には 29GPa 程度になるのに対して、非均質 N-DBAP では 14~18GPa と比較的安定した解となっている。これは、前者では初期応力パラメーターと非弾性ひずみを同じ重みで一度に同定しているのに対して、後者では弾性係数低減率により可能な限り計測変位に適合する弾性解を同定し、最後に残る相違のみを非弾性ひずみで適合させるため、得られた基岩部の弾性係数として、より適切な値が安定して推定できるものと考えられる。

b) 掘削に伴う弾性係数低減率の推移

図-1 15 は、非均質 N-DBAP の大きな特徴である逆解析の結果として得られた各要素の弾性係数低減率 A_i 分布の掘削進行に伴う推移である。掘削当初からアーチ部上部の岩盤では A_i が 0.1~0.4 程度と大きく低減しているとともに、その後のベンチ掘削に伴って発生する局所的な変位増大またはひずみに呼応するように、安定的かつ比較的妥当に A_i 分布が求められていることがわかる。なお、アーチ部掘削時点で天端直上の壁面から離れた岩盤で A_i が低減しているのは、この部分で比較的大きな変位が局所的に計測されたことに対応するものである。このように、 A_i は変位に敏感なパラメーターであることや、それにより、ひずみよりも A_i 分布のほうが大きく広がっている傾向があることは、岩盤安定性を可能な限り早期に予知するために重要となる兆候として利用できることを示唆していると考えられる。例えば、アーチ部掘削時点で天端直上部分に A_i がかなり低減した部分がひずみ以上に広がっていることや、インバートの A_i が少し低減してい

ること、および、ベンチ 1, 3, 5 段掘削の段階で、放水路側の側壁部分の A_i が、ひずみよりも先行的に低減し、結果として、かなり広い範囲で 0.1~0.4 程度になっていることから、これを岩盤安定性評価の適切な先行指標となる可能性があるかと判断できる。

c) 地中変位分布の比較結果

ここで提案した逆解析手法の有効性を検討するため、実際に得られた計測変位と解析により算定された値を比較する。最終ベンチ掘削完了時にかなり大きな変位が計測された放水路側の測線 CE6-1 および 8 に着目して、その壁面からの変位分布を比較した結果が図-1 16 である。計測変位に対する比較対象としては、等方等質の DBAP とノルム最小化法を用いた N-DBAP であり、後者およびここで提案した非均質 N-DBAP では計測変位と解析変位はその特性から完全に合致するため、全変位のうちの弾性成分のみを取り出して図に示している。

これらの図からわかる通り、等方等質の DBAP による変位は最小二乗的に近似されているのに対し、N-DBAP では空洞周辺で計測変位との差が大きく、したがって、この計測変位に合致させるために、その付近に非弾性ひずみを発生させることになる。それに対して、非均質 N-DBAP では空洞周辺の弾性係数を低減する効果により弾性変位のみで計測変位にかなり合致した結果が得られている。これは、非均質 N-DBAP は、非弾性挙動を示す地山においても等価な非均質弾性コンプライアンスを仮定して計測変位を近似するもので、従来からの DBAP や N-DBAP よりも変位追従性に優れた有効な方法であることがわかる。

5. まとめ

本論文では、断層・破碎帯等の不連続面や掘削周辺の緩み域の力学挙動が特に支配的となる大規模な地下空洞の情報化施工のための1つのツールとして用いるために、岩盤の非均質性を合理的に考慮可能な逆解析手法を開発し、数値実験により本手法の解析精度について検討するとともに、実際の地下発電所空洞の計測結果に適用し、その適用性や実用性について評価した。

その結果、緩み域および破碎帯として非均質岩盤を想定した数値実験により、この非均質N-DBAPの解析精度は、工学的に十分な精度でひずみ分布を推定したり初期応力パラメーターを同定したりできることがわかった。また、弾性係数低減率も入力条件と良好に一致した結果が逆解析から得られることから、本手法の精度は極めて優れているといえる。

さらに、実際の地下発電所空洞掘削時に計測された変位結果に適用した結果、推定されたひずみ分布は局所的に変位が大きくなり不安定化した挙動を適切に評価できることがわかるとともに、他の逆解析よりも非均質層の弾性係数を低減できることから計測変位に対する追従性に優れ、その結果として、基岩部の弾性係数として、より適切な値が安定して推定できる。さらに、この逆解析手法の特徴である弾性係数低減率は、ひずみよりも計測変位に対する感度が高いことから、掘削途中の岩盤安定性を迅速に評価し、設計・施工に迅速にフィードバックするために必要な先行指標として有用となる可能性が判明した。この先行指標としての適性については、本論文の成果のみでは明確に判断できなく、今後の研究が待たれるが、もし、これが明らかになれば、例えば、空洞アーチ掘削時点で側壁の不安定化しそうな部分を概ね事前に予想できるという極めて優れた指標となる可能性を秘めている。

謝辞: 本研究の実施にあたり関西電力(株)と(株)ニュージェックより貴重なデータを提供頂きました。関係各位に深く感謝致します。

参考文献

1) 桜井春輔: トンネル工事における変位計測結果の評価法, 土木学会論文集, 第317号, pp.93~100, 1982.

- 2) 桜井春輔, 武内邦文: トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析法, 土木学会論文集, 第337号, pp.137~145, 1983.
- 3) 桜井春輔, 谷河正也: 岩盤の不連続面の影響を考慮した大規模地下空洞の変位計測結果の逆解析, 土木学会論文集, 第403号, pp.75~84, 1989.
- 4) 桜井春輔, 川嶋幾夫, 血海章雄, 芥川真一: 地盤の非弾性挙動の逆解析, 土木学会論文集, No.505/III-29, pp.133~140, 1994.
- 5) 桜井春輔, 芥川真一, 徳留修: ノルム最小化法に基づく非弾性ひずみの逆解析, 土木学会論文集, No.517/III-31, pp.197~202, 1995.
- 6) 芥川真一, 柿原満, 武山真樹, 桜井春輔: 岩盤不連続面のすべりを考慮した逆解析手法の開発と現場への適用例, 土木学会論文集, No.589/III-42, pp.335~348, 1998.
- 7) 志村友行, 武内邦文, 中岡健一: 不連続変位への非弾性ひずみ逆解析の適用性に関する一考察, 第51回土木学会年次学術講演会講演概要集3-A, pp.818~819, 1996.
- 8) 志村友行, 武内邦文, 中岡健一: 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, 第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.73~77, 1997.
- 9) 武内邦文, 志村友行, 芥川真一: 岩盤の非均質層挙動を考慮可能な非弾性ひずみ逆解析, 第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.557~562, 1998.
- 10) Gao, Z. and Mura, T.: Nonelastic strains in solids - An inverse characterization from measured boundary data, *Int. J. Engineering Science*, Vol.30, No.1, pp.55-68, 1992.
- 11) 原田稔, 片山武, 矢田篤: 大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工, 電力土木, No.230, pp.46~57, 1991.
- 12) 片山武, 矢田篤, 木屋路豊, 福岡孝: 弾頭型大規模地下空洞の建設 関西電力・大河内水力発電所, トンネルと地下, 第22巻10号, pp.7~14, 1991.
- 13) 片山武, 矢田篤, 平川芳明: 大河内水力発電所地下発電所空洞掘削時の情報化施工, 電力土木, No.237, pp.97~107, 1992.
- 14) 打田靖夫, 吉田次男, 平川芳明, 石田毅: 微少な鉛直ひずみの測定による大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動の検討, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.19~30, 1996.
- 15) 打田靖夫, 吉田次男, 浦山克: 大規模地下空洞掘削時の不連続性岩盤の力学挙動, 電力土木, No.256, pp.65~72, 1995.

(1999. 10. 15 受付)

BACK ANALYSIS TO MODEL OUT ROCK MASS BEHAVIOUR DUE TO INHOMOGENEITY AND ITS APPLICATION TO CAVERN CONSTRUCTION

Kunifumi TAKEUCHI, Tomoyuki SHIMURA, Shinichi AKUTAGAWA and Shunsuke SAKURAI

This paper proposes an innovative back analysis method to model out inhomogeneous behaviors, which is suitable for cavern excavation in rock masses with a loosened or fractured zone. This method allows us to estimate the extent and characteristics of inhomogeneous zones with iterations, defining the reduction factor of elastic modulus by strain outputs and following the back analysis formulation to take initial stress parameters as well as non elastic strains as unknowns with minimum norm solution. It is applied to the numerical experiments and also the actual cavern construction problem and the results suggest that more reasonable strain distributions with proper reduction factors can be appropriately estimated in a reasonable calculation time.