

# 逆解析適用結果に基づく 岩盤安定性予測解析法の開発

武内邦文<sup>1</sup>・志村友行<sup>1</sup>・芥川真一<sup>2</sup>・桜井春輔<sup>3</sup>

<sup>1</sup>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)

<sup>2</sup>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)

<sup>3</sup>正会員 工博 Ph.D 広島工業大学学長 (〒731-5193 広島市佐伯区三宅 2-1-1)

本論文は、地下空洞のように多段ステップ掘削が行われる工事において、アーチ部等の掘削途中段階で計測された変位に逆解析を適用して岩盤安定性を定量的に評価するとともに、それを利用して岩盤の応力-ひずみ関係の非線形パラメーターを適切に推定し、その後の掘削段階における岩盤安定性をその非線形性も考慮して推定する方法を開発したものである。この方法は、Duncan-Chang の非線形弾性構成則が岩盤に適用できるものと仮定して、著者が先に開発した非均質挙動を考慮可能な逆解析の適用結果から、この非線形パラメーターを適切に推定し、その後の掘削解析では Duncan-Chang の非線形弾性解析を行うものである。この方法を実際の地下空洞掘削に適用した結果、従来の予測解析法よりも早めの掘削段階で岩盤が不安定化する可能性のある領域を適切に予測できることが判明した。

**Key Words** : *a new prediction method of rock mass stability, Duncan-Chang, non-linear elastic, cavern construction, back analysis, displacement measurements, reduction factor of elastic modulus*

## 1. はじめに

トンネルや地下空洞のような岩盤内構造物の建設に際しては、原位置での岩盤構造の複雑さに起因して、事前調査段階で初期応力や岩盤としての力学特性を適切に把握することが困難なことが多い。そのため、現場での観察や計測を活用して、安全性を確認しながら経済的な工事を行う情報化施工の採用が一般的である。その1つの有効な方法として、著者の1人が提案した直接ひずみ評価法<sup>1)</sup>が成立することを前提に、現場計測変位から種々の逆解析を駆使して岩盤安定性を迅速かつ定量的に評価する手法があり、これらは最近の論文でも紹介されている<sup>2)</sup>。この中では、地盤工学を対象とした情報化施工における逆解析には、力学モデルをも未知数として求めなければならないことが強調されており、これは岩盤安定性予測解析について考える場合に重要な指摘である。以下では、まず、岩盤内構造物の分野におけるこれまでの逆解析手法開発の経緯について少し俯瞰してみる。

最初に開発された直接逆解析法(以下、DBAP[Direct Back Analysis Program]と呼ぶ)<sup>3)</sup>は、地山を等質等方弾性体と仮

定し、現場で計測された変位を入力として、初期応力パラメーター(初期応力と地山弾性係数の比)を未知数に、最小二乗法を適用して計測変位に適合する解を同定する手法であった。

その後、桜井らは力学モデルを設定する必要がない逆解析法として、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<sup>4)5)6)</sup>(以下、N[Non-linear strain]-DBAPと呼ぶ)を開発した。この方法の特徴は、非弾性ひずみも逆解析の未知数として取り込むため、一般には未知数が計測変位数を上回り、その最適解をノルム最小化により推定するもので、そのため、計測点における観測変位と順解析による変位分布は完全に合致することになる。

この方法を高度化したものが、筆者らにより最近開発された、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非弾性ひずみを考慮した直接逆解析法<sup>7)</sup>(以下、非均質 N-DBAP と呼ぶ)である。この手法では、計測された変位を可能な限り忠実に再現する初期応力パラメーター、非弾性ひずみ分布、弾性係数低減率等を適切に推定する、言い換えれば、岩盤変位の主たる発生原因を非均質性

も含めて可能な限り究明するもので、大規模地下空洞のように断層や破碎帯等の弱層の力学挙動が卓越する場合に威力を発揮する。

このような逆解析により評価された結果を用いて、その後の掘削が進行した段階における岩盤安定性を適切に予測することは、特に、地下空洞工事のように多段ベンチ掘削を伴う場合には重要である。通常、このような予測解析を行う方法として、DBAPを適用した場合には、同定されたパラメータを入力として最終掘削時までの線形弾性解析を実施する。また、N-DBAPや非均質N-DBAPの場合には、同定した初期応力パラメータと推定した非弾性ひずみ分布を用いて最終掘削時までの予測解析を実施する。その際の問題点としては、既掘削の空洞周辺部においては局所的な非弾性ひずみも適切に推定されているが、その後の掘削周辺部の予測には同定した均質な弾性係数を用いるしかなく、したがって、その後の掘削周辺には卓越した非弾性ひずみ分布は発生しえないことである。

片山らは、このDBAPを地下発電所空洞の情報化施工に本格的に採用し、掘削途中の逆解析結果からその後の予測解析を詳細に実施した<sup>9),9),10)</sup>。この論文では、岩盤のはくりやすさが適切に考慮されたが、ある断面ではベンチ掘削に伴い地質状況が大きく変化し、そのため岩盤変位が急激に増大し、その箇所での予測解析の精度はあまり良くなかったと報告されている。また、小山らは、断面積約1,500m<sup>2</sup>の大規模地下空洞工事において、キंक帯を考慮した異方性不均質モデルによる逆解析を実施し、その結果から、掘削完了時の変位およびひずみを予測解析し、良好な施工管理結果を得た<sup>11)</sup>。

そこで、本論文では、このような逆解析を利用して掘削途中段階の岩盤安定性を定量的に評価するとともに、その結果を適切に利用して、その後の掘削段階における岩盤安定性を予測する解析法について考えてみる。具体的には、DBAP、N-DBAP、および非均質N-DBAPの適用を前提にした場合の、現状の岩盤安定予測解析法の問題点についてまとめるとともに、それらを解決できる予測解析法を提案し、実際の地下空洞問題に適用することにより、開発した手法の妥当性を検証する。

## 2. 岩盤安定性予測解析法について

多段ステップ掘削が実施される地下空洞工事では、例えば、アーチ掘削段階で計測されたデータをもとに、最終ベンチ掘削完了時の岩盤安定性を適切に予測する解析手法が必要となる。本章では、このような掘削工事を念頭に、まず現状技術の問題点を明確にし、それを解決するために開発した岩盤安定性予測解析法について述べる。

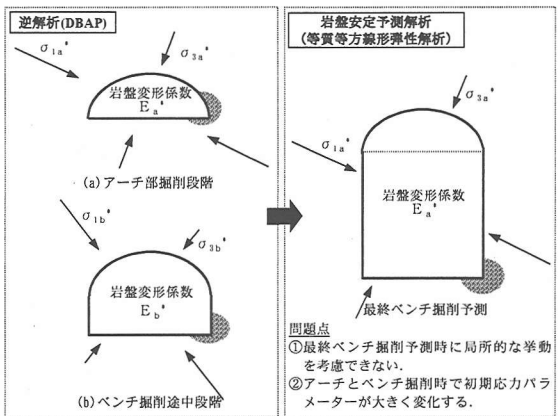


図-1 DBAPに基づく岩盤安定予測解析とその問題点

### (1) 現状の岩盤安定予測解析の問題点

前述の通り、地山を等質等方弾性体と仮定したDBAPを利用して、次ステップ以降の岩盤安定性予測解析を実施した場合の問題点について考えてみる。この方法では、図-1に示すように、例えば、アーチ部掘削段階で計測された変位を用いて逆解析し、初期応力パラメータを同定する。そして、この同定された初期応力パラメータを利用して、最終ベンチ掘削時の岩盤安定性を予測するため、線形弾性解析を実施し、得られたひずみ分布と限界ひずみを比較することで定量的評価に資する。この方法の問題点としては、岩盤変位が発生するメカニズムを全て巨視的な初期応力パラメータに負担させてしまう(モデルの制約)ため、岩盤中の局所的な挙動(例えば、破碎帯等の非均質層、すべり/はくり、緩み領域等)を適切に考慮できないことである。さらに、実際の地下空洞掘削へ適用した際の問題として、同定した初期応力パラメータの値が、アーチ掘削時からベンチ掘削へ移行するに従い、大きく変化したことである<sup>9),9),10)</sup>。これが意味することは、DBAPの場合には、初期応力パラメータは計測変位に対して敏感に変化し、すなわち、各ステップで行う最終ベンチ掘削予測解析の結果が異なるのが通常であり、したがって、最終ベンチ掘削時の予測解析に対する信頼性は比較的低いと考えられる。

次に、N-DBAPおよび非均質N-DBAPを利用して岩盤安定性予測解析を実施する場合には、図-2に示すように、アーチ掘削段階で計測された変位を用いて逆解析し、初期応力パラメータ、アーチ周辺の非弾性ひずみ分布、および非均質N-DBAPの場合には弾性係数低減率分布が適切に推定される。これらを用いて最終ベンチ掘削時の岩盤安定性予測解析を行う方法としては、初期応力パラメータからベンチ部の掘削相当外力を算定し、同定された岩盤弾性係数を用いてベンチ掘削時のひずみ増分解析を実施し、アーチ掘削時に推定されたひずみ分布に足し合わせる。この方法の問題点としては、アーチ部周辺岩盤では計測変位に応じた非弾性ひずみや非均質層の影響が適切に考慮さ

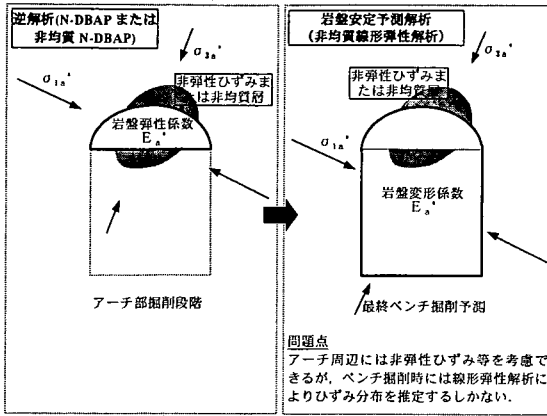


図-2 N-DBAP および非均質N-DBAPに基づく岩盤安定予測解析の問題点

れて、ひずみ分布が推定されているのに対して、最終ベンチ掘削周辺岩盤では非弾性ひずみを考慮できなく、したがって、ベンチ掘削時のひずみ増分解析としては、線形弾性解析にならざるを得ないことである。言い換えれば、現状の逆解析手法の延長線でその後の岩盤安定性予測を行えば、計測変位が存在する周辺岩盤では非弾性や非均質性が適切に評価されるが、その後の掘削解析においては力学モデルを固定せざるを得ないことになり、この問題を解決可能な予測解析法の開発が望まれる。

## (2) 開発した岩盤安定性予測解析法の定式化

上述のように、アーチ掘削時点で計測された変位に逆解析を適用して、最終ベンチ掘削時点での挙動予測を適切に行うには、線形弾性モデルよりも、岩盤挙動をより適切に表現可能な力学モデルが必要となる。これをアーチ部掘削段階で適用された非均質 N-DBAP の結果から導出する方法について考えてみる。

もともとは土質材料に対する三軸圧縮試験の結果を踏まえて、Duncan と Chang により誘導された材料の非線形弾性特性を双曲線の応力-ひずみ関係の構成則で近似したものを式(1)、(2)および図-3に示す<sup>12)</sup>。

$$\sigma = \frac{\varepsilon}{b + a\varepsilon} \quad (1)$$

$$E_t = \frac{\partial \sigma}{\partial \varepsilon} = \frac{b}{(b + a\varepsilon)^2} \quad (2)$$

ここに、 $a$ 、 $b$ ：定数

$E_t$ ：接線弾性係数

すなわち、この Duncan-Chang の非線形弾性構成則は、接線弾性係数のひずみ依存性を表したものであり、これは不連続面を有しない岩石材料に対しても一般的に成り立つものと本論文では考える。

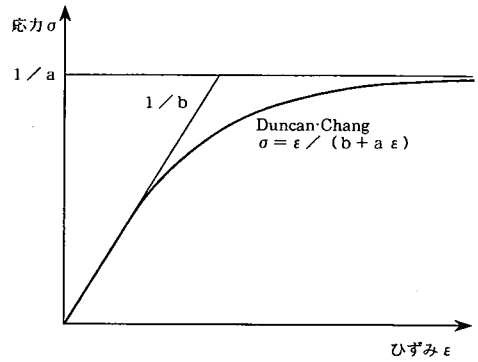


図-3 Duncan-Chang の非線形弾性構成則

ここで、アーチ部掘削段階での非均質 N-DBAP を適用した出力結果について考えてみると、初期応力パラメータとともに、非均質層を表す弾性係数低減率  $A_i$ 、そして非弾性ひずみを含む空洞周辺の最大せん断ひずみ分布が主たる成果として得られる。これは、言い換えれば、原位置の空洞掘削問題において弾性係数低減率のひずみ依存性を逆解析により検討したようなものであり、ここでは、岩盤の適切な構成則は Duncan-Chang の双曲線近似により表現できるものと仮定する。

式(1)の Duncan-Chang の非線形構成則がせん断に対しても成り立つものと仮定すると下記の式(3)、(4)が得られる。ただし、定数  $a'$ 、 $b'$  は必ずしも  $a$ 、 $b$  と等しくなるとは限らないことには注意を要する。

$$\tau = \frac{\gamma}{b' + a'\gamma} \quad (3)$$

$$G_t = \frac{\partial \tau}{\partial \gamma} = \frac{b'}{(b' + a'\gamma)^2} \quad (4)$$

ここに、 $a'$ 、 $b'$ ：定数

$G_t$ ：接線せん断弾性係数

非均質逆解析の結果得られた弾性係数低減率  $A_i$  は岩盤の巨視的な弾性係数に対する局所的な非均質層の弾性係数の比として求められるため、それを式(5)に示すように初期接線弾性係数とひずみ依存性を考慮した接線弾性係数の比で求められるものと仮定する。その式から式(6)が得られ、それを式(4)に代入すれば式(7)となる。なお、式(7)は構成則として Duncan-Chang の式がせん断に対しても成立すると仮定した場合に単純に導き出されるものである。

$$A_i = \frac{E_t}{E_i} = \frac{G_t}{G_i} \quad (5)$$

$$G_t = G_i A_i \quad (6)$$

ここに、 $E_i$ ：初期接線弾性係数

$G_i$ ：初期接線せん断弾性係数

表-1 主要な岩石および岩盤の平均的力学特性<sup>7)</sup>

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

$$G_i A_i = \frac{b'}{(b' + a' \gamma)^2} \quad (7)$$

式(7)はせん断ひずみ $\gamma$ が0のとき $A_i=1.0$ である必要があるため、次式が成立する。

$$G_i = \frac{1}{b'} \quad (8)$$

したがって、逆解析により岩盤のせん断弾性係数 $G_i$ が決まれば $b'$ は式(8)より算定され、非均質 N-DBAP の出力結果である各要素の $A_i$ と $\gamma_{max}$ が同定された場合に、それらの値を式(7)に代入して、 $a'$ は最小自乗法で最適値を同定することが可能となる。次に、せん断弾性係数は弾性係数と式(9)の関係があるため、式(1)を考慮して Duncan-Chang の定数 $a$ 、 $b$ は式(10)および(11)により算定される。

$$G_i = \frac{E_i}{2(1+\nu)} \quad (9)$$

$$a = 2(1+\nu)a' \quad (10)$$

$$b = 2(1+\nu)b' \quad (11)$$

ここに、 $\nu$ ：ポアソン比

すなわち、岩盤の構成則が Duncan-Chang の非線形弾性関係に従うと仮定すれば、非均質 N-DBAP の結果として同定されたパラメーターを利用して、Duncan-Chang の非線形パラメーター $a$ 、 $b$ を式(10)および(11)により算定し、その後の空洞掘削時に適用する岩盤構成則として採用し、その順解析では Duncan-Chang の非線形弾性解析を実施して、最終的なひずみ分布を推定できる。つまり、この開発した岩盤安定性予測解析法によれば、既掘削の部分については計測変位から適切に非線形性等が評価でき、かつその結果を踏まえて、その後の予測解析についても Duncan-Chang の構成則に従い、岩盤の非線形性を評価できることになる。

### 3. 実際の地下空洞掘削への適用結果

#### (1) 地下空洞工事の概要

対象とした地下空洞は、土盛り約 300m、 $C_H$ 級の良好な岩盤中に、スパン 24m、高さ 47m、長さ 135m 規模の弾頭型空洞を掘削した工事である<sup>8),9),10)</sup>。岩石および岩盤の主な平均的物性値を表-1に、逆解析を適用した箇所の大略地質断面を図-4に、また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-5に示す。図-5には地下空洞の掘削順序を、図-6が逆解析の有限要素メッシュで、計測された変位分布を図-7に示している。

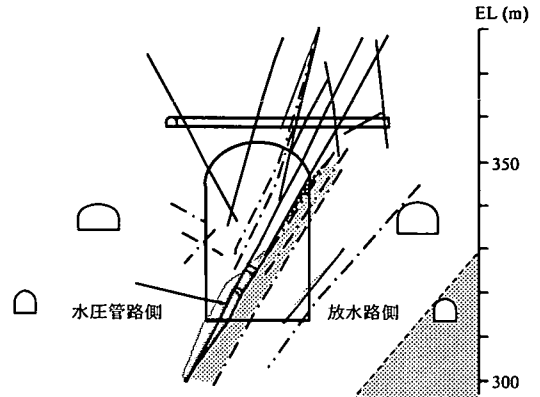


図-4 概略地質構造図<sup>7)</sup>

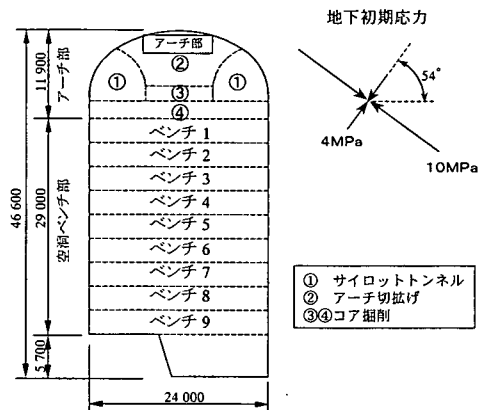


図-5 地下空洞掘削順序と地山初期応力<sup>7)</sup>

#### (2) 岩盤安定性予測解析法の適用結果

まず、図-7に示す地下空洞掘削時に計測された変位に逆解析である非均質 N-DBAP を適用した結果についてまとめる。具体的には、アーチ部とベンチ 1, 3, 5, 7 掘削時点での内空および地中変位分布を入力条件として、非均質 N-DBAP を適用した結果として得られた初期応力パラメーターが表-2に示されている。また、図-5に示す計測された垂直方向初期応力を正と仮定して算定した岩盤の巨視的な初期接線せん断弾性係数 $G_i$ 、式(8)により算定したパラメーター $b'$ 、そして逆解析結果から同定された各要素の最大せん断ひずみ $\gamma_{max}$ および $A_i$ 分布から、式(7)に代入して最小二乗法により同定したパラメーター $a'$ を表-2に載せている。なお、パラメーター $a'$ は図-8に示す

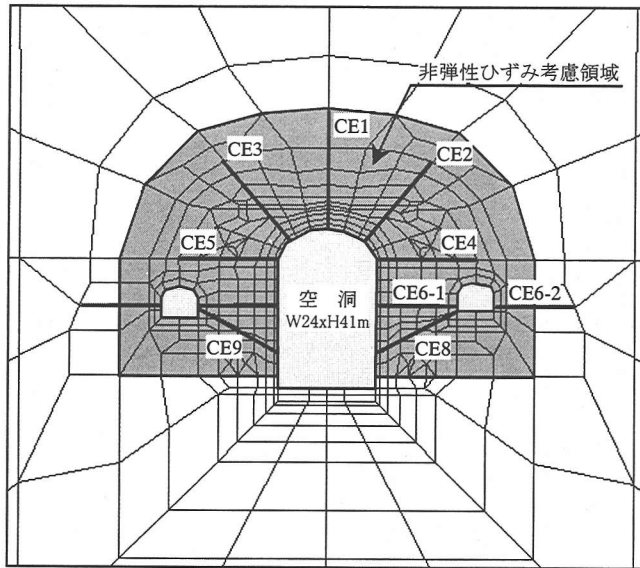


図-6 有限要素メッシュと非弾性ひずみ考慮領域<sup>7)</sup>

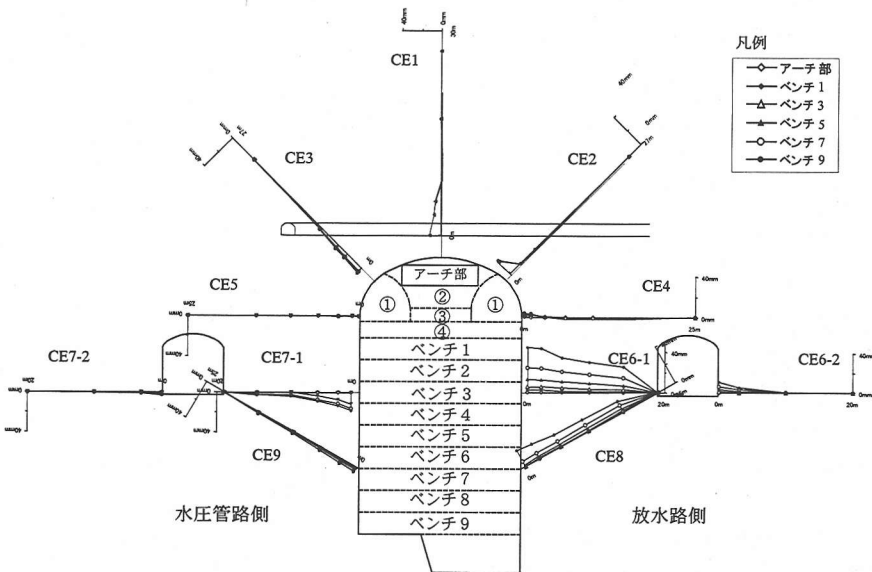


図-7 地下空洞掘削に伴う計測変位<sup>7)</sup>

ように各掘削段階で最小二乗法により推定したものである。さらに、それらの  $a'$ ,  $b'$  を式(10)および(11)に代入して算定した Duncan-Chang の非均質弾性定数  $a$ ,  $b$  をまとめた結果をも表-2の右端に示している。なお、これらの算定過程で岩盤のポアソン比は全て 0.25 としている。図-8 (a)~(e) は、式(7)に示した縦軸に  $G_i A_i$  を、横軸に  $\gamma_{max}$  をとってパラメーター  $a'$  を最小二乗法によりフィッティングし、表-2に示したように  $a'$  の同定結果とそのばらつき程度をまとめたものである。

表-2に示した通り、同定した初期応力パラメーターとせん断弾性係数  $G_i$  の掘進に伴う変化がかなり小さいことから、非均質 N-DBAP の出力結果は掘進に伴い一部の変位が局所的に増大しているにもかかわらず、その影響を非均質層の広がりにとらえてフィッティングしたため、初期応力パラメーターへの影響が小さかったと判断される。この解の安定性はこの逆解析手法の利点であり、もともと開発された等質等方弾性体を仮定する DBAP とは大きく異なる点である。

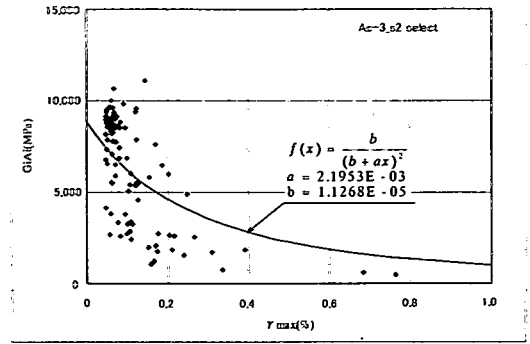
表-2 地下空洞掘削時の非均質 N-DBAP 適用結果と Duncan-Chang 定数の推定結果総括表

掘削段階	初期応力 パラメータ	Gi (GPa)	b'	b	
			a'	a	
アーチ	$\sigma_x/Ei$	-2.06E-4	8.9	1.13E-5	2.82E-5
	$\sigma_y/Ei$	-4.15E-4		2.20E-3	5.49E-3
	$\tau_{xy}/Ei$	-2.31E-4			
ベンチ1	$\sigma_x/Ei$	-2.02E-4	9.5	1.05E-5	2.63E-5
	$\sigma_y/Ei$	-3.88E-4		3.02E-3	7.55E-3
	$\tau_{xy}/Ei$	-1.22E-4			
ベンチ3	$\sigma_x/Ei$	-1.95E-4	10.8	9.30E-6	2.33E-5
	$\sigma_y/Ei$	-3.43E-4		3.53E-3	8.83E-3
	$\tau_{xy}/Ei$	-1.12E-4			
ベンチ5	$\sigma_x/Ei$	-2.69E-4	11.1	9.04E-6	2.26E-5
	$\sigma_y/Ei$	-3.33E-4		3.57E-3	8.92E-3
	$\tau_{xy}/Ei$	-1.18E-4			
ベンチ7	$\sigma_x/Ei$	-3.43E-4	11.1	8.99E-6	2.25E-5
	$\sigma_y/Ei$	-3.31E-4		3.50E-3	8.74E-3
	$\tau_{xy}/Ei$	-1.03E-4			

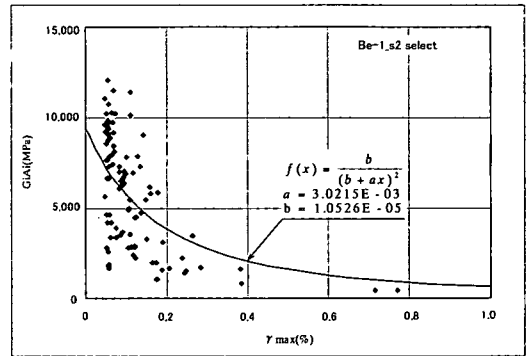
また、Duncan-Chang のパラメーター a, b も掘進に伴う変化が比較的小さいことから岩盤構成則の非線形性を表す同定解の安定度が高く、実際の地下空洞への適用上問題が少ないと考えられる。ただし、岩盤の弾性係数のひずみ依存性については、図-8 のようになかなか大きくばらつくものを概略的に Duncan-Chang の構成則が成立するものとして最小二乗法で決めたもので、より適切に適合可能な関数型については今後の課題として残る。なお、本研究では、この関数を採用したため、予測解析の精度に関してはこのばらつき程度の誤差を内包するものと考えなくてはならない。

次に、ここで開発した岩盤安定性予測解析のひずみ予測精度について検討する。アーチおよびベンチ 1~7 の各掘削段階における非均質 N-DBAP を適用した結果、予測解析として弾性モデルを用いて推定したひずみ分布、および Duncan-Chang の非線形弾性モデルで推定したひずみ分布を比較した結果が図-9 および図-10 である。図-9 は左端に掘削途中の計測変位に非均質 N-DBAP を適用し、推定した最大せん断ひずみ分布、右端に Duncan-Chang のモデル予測解析により推定した最終ベンチ掘削時のひずみ分布である。また、参考として、中央には、線形弾性解析により推定したひずみ分布を示している。

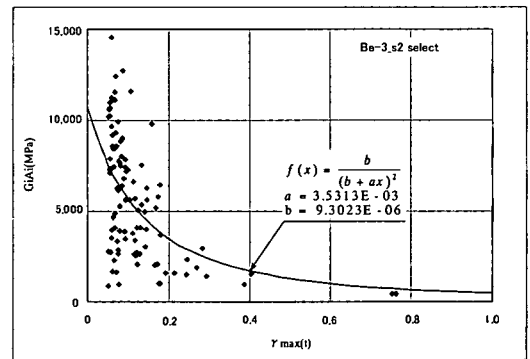
まず、アーチ掘削時の比較結果から、弾性予測解析による最終ベンチ掘削時のひずみ推定結果はベンチ周辺岩盤でかなり小さいのに対して、非線形弾性の予測解析によれ



(a) アーチ掘削時点



(b) ベンチ 1 掘削時点

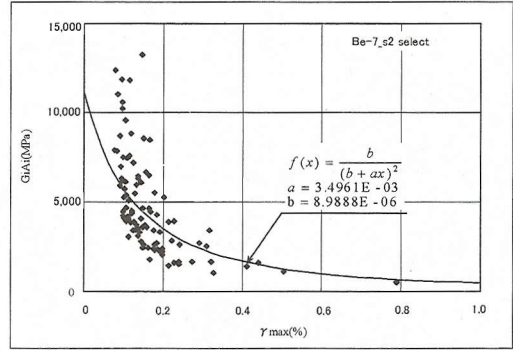
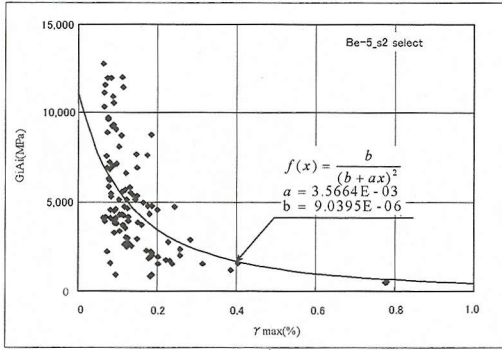


(c) ベンチ 3 掘削時点

図-8 最小二乗法によるパラメーター a' 値の同定結果

ばベンチ右側壁部分でかなり大きなひずみ発生が予測されている。このひずみ予測結果と、図-10 に示すベンチ 9 掘削時のひずみ分布を比較すると、弾性予測解析のひずみよりも良好にひずみ分布が近似していることから、開発した予測解析法は、アーチ掘削時点での情報に基づく最終ベンチ掘削時のひずみ分布を推定する適切なツールであると考えられる。





(d) ベンチ 5 掘削時点

(e) ベンチ 7 掘削時点

図-8 最小二乗法によるパラメーターa'値の同定結果(続き)

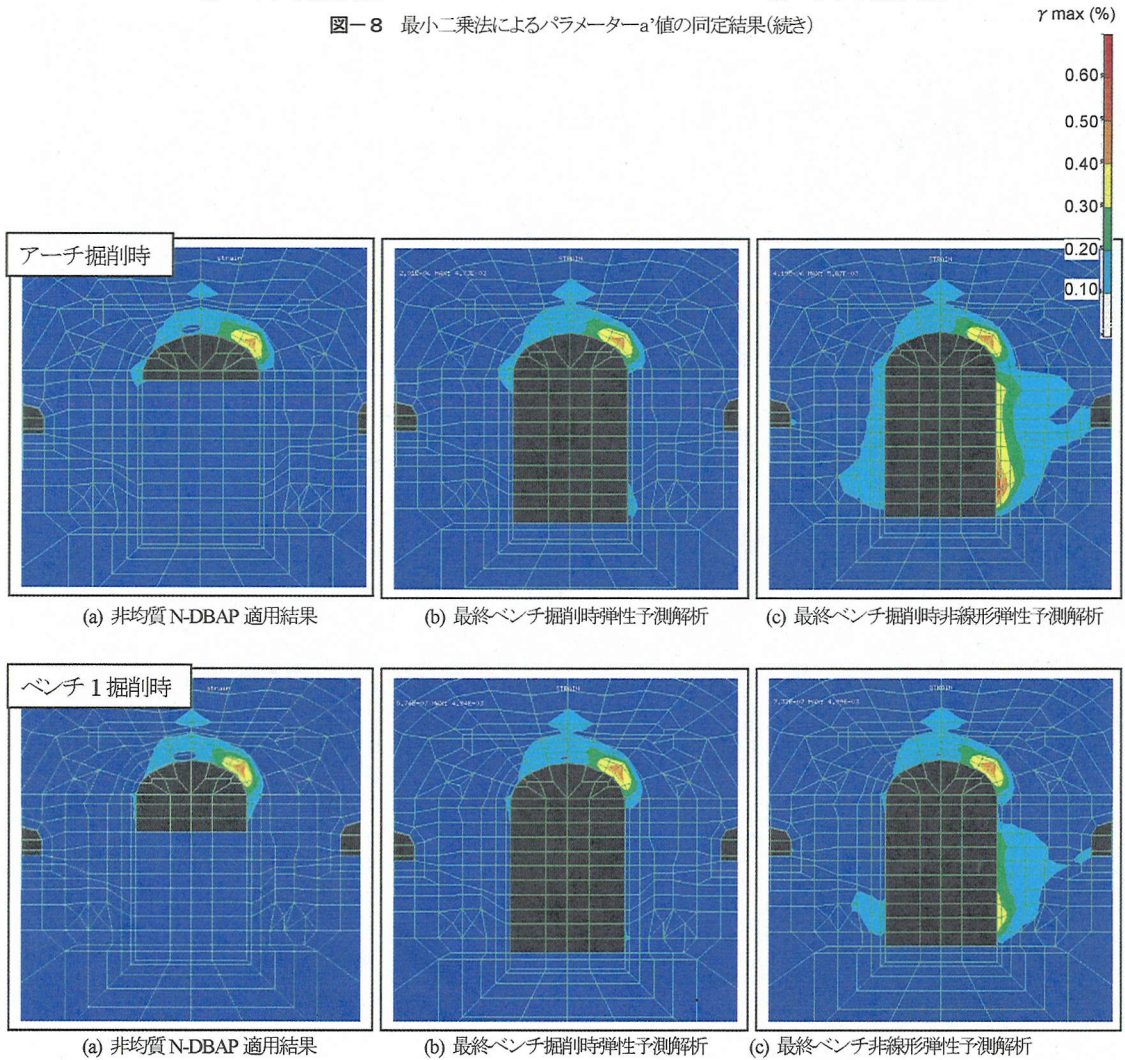
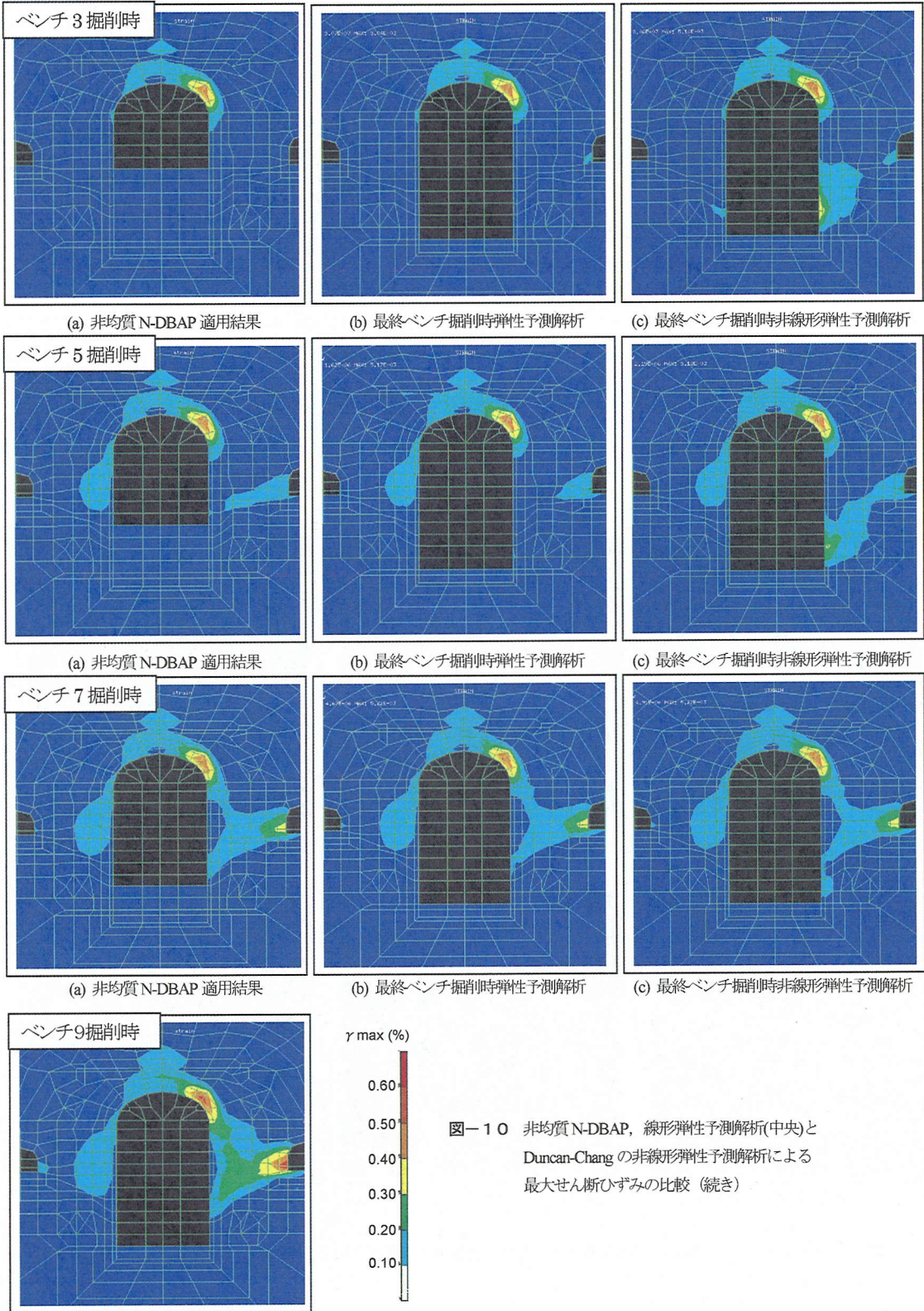


図-9 非均質 N-DBAP, 線形弾性子測解析(中央)と Duncan-Chang の非線形弾性子測解析による最大せん断ひずみの比較







同じく、図-9の通り、ベンチ1掘削時と図-10のベンチ3および5について弾性予測解析のひずみ分布推定結果と非線形弾性予測解析の結果を比較してもわかるように、後者のほうが空洞右側壁下部に広がる大きなせん断ひずみ分布を適切に予測できており、これは最終ベンチである9掘削時のひずみ分布と整合的であることから、この予測解析手法は最終的に発生するひずみを適切に推定する予測性に優れていることがわかる。図-10に示すベンチ7掘削時点での比較からは、この時点では空洞掘削に伴うかなり大きな変位が右側壁部分ですでに発生しているため、逆解析の段階でその効果が取り込まれ、したがって、その後の弾性予測解析と非線形弾性予測結果に大きな相違が発生していないと考えられる。

#### 4. まとめ

本論文では、地下空洞のように、通常、多段ステップ掘削が行われる工事における情報化施工管理技術として重要な、岩盤安定性予測解析法の現状について、その内包する問題点や限界等についてまとめながら、これらを克服できる新しい岩盤安定性予測解析法を提案した。具体的には、著者らが既に開発済みの岩盤の非均質挙動を適切に考慮可能な非均質 N-DBAP をアーチ部等の掘削途中段階で計測された変位に適用し、その結果を利用して岩盤の応力-ひずみ関係の非線形構成則として Duncan-Chang の式が成立するものとして、そのパラメーター  $a$ 、 $b$  を推定する方法を提案した。そして、その後の岩盤安定性予測解析については、この逆解析結果から推定された  $a$ 、 $b$  を有する Duncan-Chang の構成則を適用し、順解析を逐次実施してひずみ分布を適切に推定するものである。

ここで開発した岩盤安定性予測解析法を実際の地下空洞掘削問題に適用した結果、まず、非均質 N-DBAP の出力結果である初期応力パラメーターは、掘進に伴い一部分の岩盤変位が急激に増大しているにもかかわらず、安定的に推移していること、そしてその結果から推定した Duncan-Chang のパラメーター  $a$ 、 $b$  も極めて安定していることから、この手法の実際の空洞への適用上は問題が少ないものと判断できる。さらに、アーチ部、ベンチ1~7掘削時点での計測変位に逆解析を適用し、その結果から、1つは従来の弾性予測解析を、もう1つはここで開発した Duncan-Chang の非線形弾性予測解析を最終ベンチ掘削時点での最大せん断ひずみの推定に採用した。その比較評価した結果から、開発した方法によりアーチ掘削の段階でベンチ右側壁部分に大きなひずみゾーンが発生する可能性が指摘されたのに対して、弾性予測解析ではそれが生じなかった。最終的に掘削された時点での岩盤ひずみ分布は、

形状は若干異なるものの、ベンチ右側壁部分で大きなひずみが発生したため、開発された非線形弾性予測解析結果は従来からの線形弾性解析よりもひずみ予測性は優れていると考えられる。

今後の課題としては、Duncan-Chang の2次双曲線関数よりも適合性の高い関数型について研究する必要がある。すなわち、本論文で提案した岩盤安定性予測解析法は岩盤の構成則が Duncan-Chang の非線形弾性関係に従うと仮定したが、本研究での適用事例が唯一であることから、その他の岩盤条件への適用性について検証する研究の余地は残されていると考えられる。

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。ここ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：情報化施工における逆解析，土木学会論文集，No.652/III-51，pp.1~10，2000.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 桜井春輔，川嶋幾夫，皿海章雄，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.
- 6) 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.
- 7) 武内邦文，志村友行，芥川真一，桜井春輔：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，土木学会論文集，No.659/III-52，pp.241~252，2000.
- 8) 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.
- 9) 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.
- 10) 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.

- 11) 小山俊博, 南部茂義, 小松崎勇一: 地下 500m の大規模空洞  
東京電力葛野川発電所, トンネルと地下, 第 28 巻 1 号, pp.37  
~45, 1991.
- 12) Duncan, J.M. and Chang, C.Y.: Nonlinear analysis of stress and

strain in soils, *Proc. ASCE*, Vol.96, SM5, pp.1629-1653, 1970.

(2001. 3. 13 受付)

## DEVELOPMENT OF A NEW PREDICTION METHOD OF ROCK MASS STABILITY BASED ON THE RESULTS OF THE BACK ANALYSIS DURING EXCAVATION

Kunifumi TAKEUCHI, Tomoyuki SHIMURA, Shinichi AKUTAGAWA and Shunsuke SAKURAI

This paper aims to develop a new prediction method of rock mass stability, which is useful in a multi-step excavation such as cavern construction, based on the results of back analysis to model out inhomogeneous rock mass behaviors during excavation. Assuming the Duncan-Chang non-linear elastic relationship for rock masses, its parameters can be determined from the results of back analysis applied during excavation and strains at the stage of further excavation can be properly estimated so as to assess rock mass stability. This method is applied to the actual cavern construction problem and the results suggest that this indicates an excellent capability to predict more reasonable strains for further excavation steps at the early stage of cavern excavation such as an arch portion.