

(2)地下空洞における直接ひずみ評価法および 逆解析法の適用性に関する一考察

㈱大林組 正会員 ○武内 邦文
㈱大林組 正会員 志村 友行
㈱大林組 中岡 健一

NOTE ON THE APPLICABILITIES OF THE DIRECT STRAIN EVALUATION TECHNIQUE (DSET)
AND THE DIRECT BACK ANALYSIS PROGRAM (DBAP) FOR UNDERGROUND CAVERNS

Kunifumi TAKEUCHI, Tomoyuki SHIMURA and Kenichi NAKAOKA
OBAYASHI CORPORATION

ABSTRACT

The objective of this note is to study on the applicabilities of both the DSET and DBAP for underground caverns, assuming that the methodology of the CRIEPI non-linear FEM analysis is true. In a design stage of cavern supports, a numerical analysis has been done based on the stress criterion of rock mass failure. While, in a construction stage, the rock mass stability has normally evaluated by the critical strain. Thus, it is reasonable that the failure criterion should be appropriately unified through the project. In this paper, the strain criteria for design of caverns, the differences of loosened zones evaluated by stress and strain criteria, and the identification accuracies of the DBAP applying to the CRIEPI analysis were discussed.

1. はじめに

地下発電所空洞の補強工を当初設計するための解析手法としては、従来から電中研の非線形粘弾性有限要素解析¹⁾（以下電研解析と呼ぶ）が用いられ、予測された応力・変形に基づき空洞補強工が設計されてきた。その後の施工段階における岩盤安定性評価では、実用的な観点から直接ひずみ評価法（DSET）²⁾を前提とした直接逆解析法（DBAP）³⁾を駆使し、計測変位から直接かつリアルタイムに周辺岩盤の安定性を評価し、その結果を設計・施工へフィードバックする施工管理手法が一般的である。^{4) 5)}前者は応力に基づく岩盤破壊基準を設定し緩み領域を評価するのに対して、後者の基本的考え方として施工中の岩盤安定性はひずみで評価する方が有利であると捉え、実用的な施工管理手法を提案してきている。従って、現在の地下空洞工事においては、応力とひずみの破壊基準が当初設計と施工管理段階で混在するため一貫した評価が難しくなり、設計と施工管理隔絶の一因となっている。今後は、両者の合理的な融合を目指して、統一的な岩盤安定性評価指標の構築が急務であろう。

本論の目的は、地下空洞の当初設計段階でひずみにより緩み領域を評価する方法、および施工管理段階での直接逆解析法の適用性を概略検討することである。具体的には、電研解析の岩盤物性が与えられた場合に緩み領域をひずみで評価する方法について検討し、かつ数値解析を通して応力およびひずみで緩み領域を評価した場合の相違を考察した。更に、電研解析変位を計測結果と仮定し、DBAPを適用した場合の初期応力パラメーター、変位分布およびひずみ分布の相違についても考察した。

2. 直接ひずみ評価法による緩み領域の評価

(1) ひずみ破壊基準

桜井が提案したひずみ破壊基準²⁾は既に多くのトンネルや地下空洞の現場で適用され、標準的な評価指標

として確立されている。その主な特徴は、トンネル工事での適用を主眼に、寸法効果の影響を避けるべく岩石試験結果から岩盤の破壊ひずみを簡便に推定できることである。一方、地下発電所工事では事前に原位置岩盤試験が行われるため、岩石の一軸圧縮試験のみならず岩盤試験結果を適切に反映したひずみ破壊基準を設定する必要がある。そこで、電研解析の入力物性である強度定数 (τ_r 、 σ_t) および変形係数 (D) を既知とした場合のひずみ破壊基準の設定方法について検討する。

式 (1) は電研解析に用いられている岩盤の応力破壊基準であり、その一例を図-1 に示す。電研解析における応力-ひずみ関係の非線形性は岩盤破壊基準への接近度を表す緩み係数 R の関数として式 (2) のように規定される。

$$(\tau/\tau_r)^a = 1 - (\sigma/\sigma_t) \quad (1)$$

$$(D/D_0) = R^{1/a} \quad (2)$$

τ_r 、 σ_t : 岩盤せん断強度、引張強度
 a : 包絡線指数、D : 変形係数
 R : 緩み係数、 k : 緩み定数

この場合のひずみ破壊基準値を算定するため、表-1 に示す2種類の岩盤物性を設定し、仮定の岩盤一軸圧縮試験の結果として得られた非線型応力-ひずみ関係を図-2 に示す。なお、この岩盤物性は限界ひずみの定義に従い ϵ_c が等しくなるように設定したもので、算定した岩盤の限界ひずみ・破壊ひずみおよび限界せん断ひずみを表-2 にまとめた。ただし、限界せん断ひずみの算定は桜井らの論文⁶⁾ に示された方法をそのまま用いた。結果として、破壊ひずみは C_H と C_M 級岩盤で等しくなるが、限界せん断ひずみは変形係数の影響を受けるため大きく異なることが判明した。

この応力-ひずみ関係の非線型性のため、破壊ひずみは応力経路に依存する。この依存性を検討するため、図-3 に示す岩盤三軸圧縮試験の載荷・除荷応力経路を設定し、破壊ひずみの拘束圧依存性を算定した結果が図-4 である。この結果より、除荷時破壊ひずみは載荷時より常に小さくなり、また一軸状態の場合には C_H および C_M 級岩盤とも破壊ひずみが等しいにもかかわらず、三軸拘束圧下では C_H 級より C_M 級岩盤の破壊ひずみが増大することが判明した。

表-1 岩盤入力物性一覧

項目		C_H 級岩盤	C_M 級岩盤
変形係数	D_0	15,000MPa	6,500MPa
	D_r	$1/10 \times D_0$	$1/10 \times D_0$
ポアソン比	ν_v	0.25	0.25
	ν_r	0.45	0.45
破壊包絡線	τ_r	2.1MPa	0.91MPa
	σ_t	0.21MPa	0.091MPa
	a	2	2
	k	3	3
クリープ係数	α	0.3	0.3
	β	1.0 / day	1.0 / day

表-2 ひずみ破壊基準値算定結果

項目	C_H	C_M
限界ひずみ ϵ_c	0.17%	0.17%
破壊ひずみ ϵ_r	0.56%	0.56%
限界せん断ひずみ γ_r	0.22%	0.42%

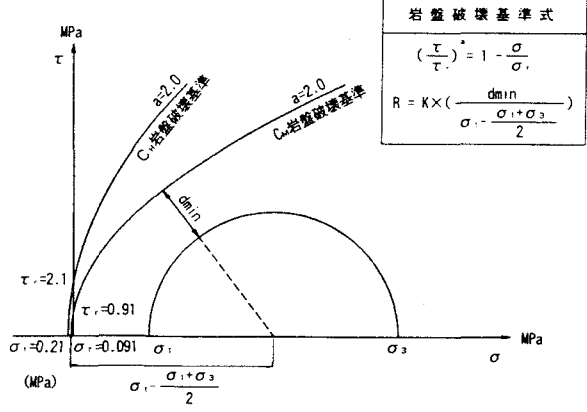


図-1 電研解析の岩盤破壊基準

図-2 に示す。なお、この岩盤物性は限界ひずみの定義に従い ϵ_c が等しくなるように設定したもので、算定した岩盤の限界ひずみ・破壊ひずみおよび限界せん断ひずみを表-2 にまとめた。ただし、限界せん断ひずみの算定は桜井らの論文⁶⁾ に示された方法をそのまま用いた。結果として、破壊ひずみは C_H と C_M 級岩盤で等しくなるが、限界せん断ひずみは変形係数の影響を受けるため大きく異なることが判明した。

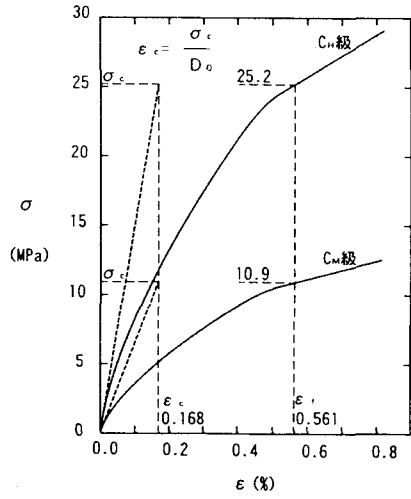


図-2 非線型応力ひずみ関係とひずみ破壊基準

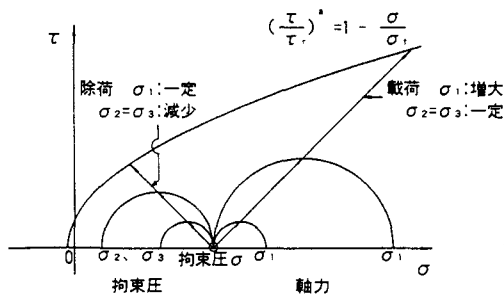


図-3 岩盤三軸圧縮試験の载荷・除荷応力経路

(2) 応力およびひずみによる緩み領域評価結果の比較

空洞支保工の当初設計段階で用いるべきひずみ破壊基準について検討するため、電研解析の応力破壊基準に基づく緩み領域の評価結果とひずみ基準によるそれを比較した。図-5が電研解析による緩み領域(局所安全率が1.0以下の領域)と限界ひずみ ε 。以上のひずみが発生している緩み領域を比較した結果であり、図-6は限界せん断ひずみ γ による緩み領域と比較した結果である。なお、この空洞周辺のひずみ分布の算定に際してはクリープを考慮した電研解析の結果をそのまま用いている。

これらの結果より、 C_H 級岩盤の場合には緩み領域が小さいため明瞭な結論を導くには至らなかったが、 C_M 級岩盤での比較結果から判断して、クリープの影響を受けるものの、当初設計段階での緩み領域は限界せん断ひずみで評価した方が電研解析の緩み領域と良好に合致する傾向がある。これは岩盤材料のせん断破壊説からも妥当と判断される。

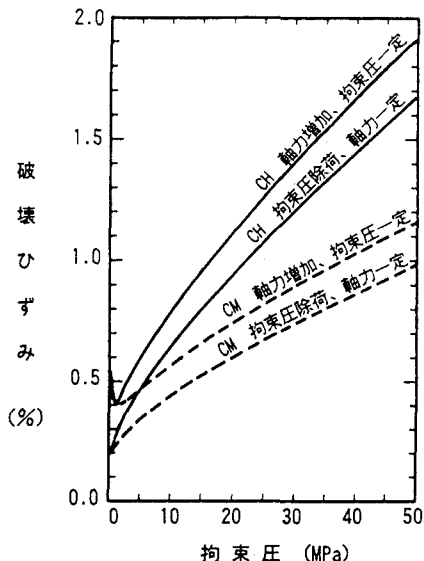


図-4 破壊ひずみの拘束圧依存性検討結果

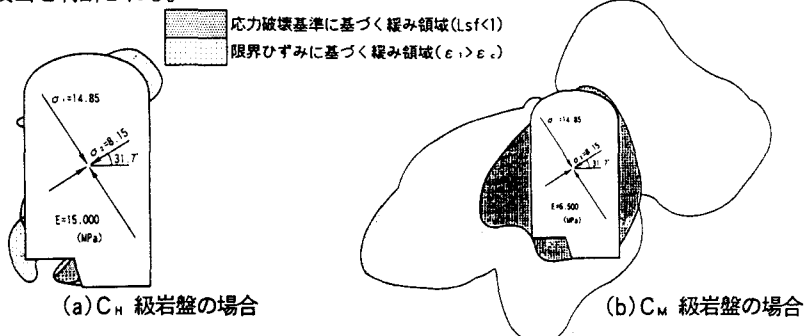


図-5 電研解析と限界ひずみによる緩み領域の評価結果の比較

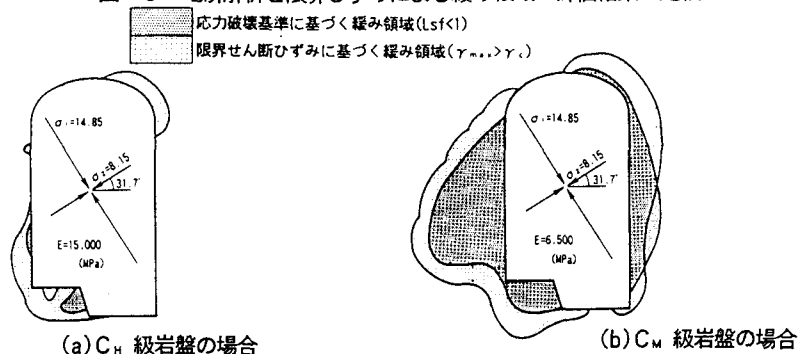


図-6 電研解析と限界せん断ひずみによる緩み領域の評価結果の比較

3. 非線形粘弾性解析変位への逆解析の適用性

(1) 等方等質モデル逆解析の適用性

地下空洞施工段階における岩盤安定性評価手法として用いられるDBAPの適用性を、クリープを考慮した電研解析変位を計測変位と仮定して検討する。この逆解析で用いた力学モデルは等方等質とし、同じく表-1の2種類の岩盤物性を検討対象とした。

表-3にDBAPにより得られた出力パラメーターの比較結果を、また図-7にC_H およびC_M 級岩盤の場合の入力変位とDBAP出力変位結果の比較を示す。クリープ効果にもかかわらず、C_H 級岩盤の場合の変位分布は入力変位と出力変位が良好な一致を示す。しかし、C_M 級岩盤の場合の一致度は低下し、特に塑性領域が大きく広がる空洞左側壁でこの相違が顕著である。

表-3 逆解析結果

	C _H 級岩盤		C _M 級岩盤	
	電研解析	DBAP	電研解析	DBAP
σ_{10}/E	-0.000667	-0.000890	-0.001539	-0.002724
σ_{10}/E	-0.000867	-0.001267	-0.002000	-0.003323
σ_{10}/E	0.000200	0.000227	0.000462	0.001220
σ_{20}/E	-0.000990	-0.001375	-0.002285	-0.004280
σ_{20}/E	-0.000543	-0.000784	-0.001253	-0.001767
θ (°)	31.7	25.2	31.7	38.1

図-8はC_H およびC_M 級岩盤のDBAPによる緩み領域を電研解析結果と比較したものである。C_H 級岩盤の場合、緩み領域の分布形状は異なるものの、両者とも緩み領域がほとんど発生していないという点では一致する。一方、C_M 級岩盤の場合、DBAPでは空洞右上部および左下部に緩み領域が広がる傾向がみられるが、クリープの影響は大きくないことが判明した。

等方等質モデルDBAPの適用性を検討した結果、空洞周辺の塑性領域が大きく広がる場合には、その影響を強く受けてDBAPによる同定精度は低下する。この結果は、岩盤の塑性挙動を弾性挙動も含めて一様化する等方等質モデルDBAPの特質を反映したものである。

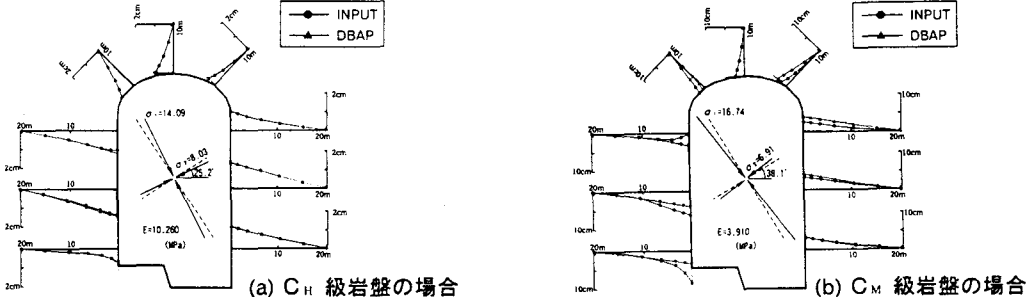


図-7 電研解析と DBAP による変位分布の比較

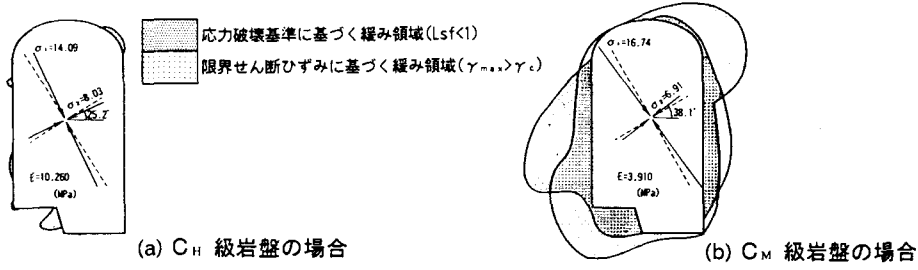


図-8 電研解析と DBAP による緩み領域の比較

(2) 異方性パラメーターを導入した逆解析の適用

DBAPにおいて岩盤の非線形性または不連続性を簡便に表現する一手法として、逆解析の力学モデルに異方性パラメーター m, n を導入し、入力変位と解析変位との残差二乗和が最小になるように m, n を最適化する方法がある⁵⁾。ここではC_M 級岩盤について異方性パラメーターを導入したDBAPを実施し、その結果について考察する。

表-4は異方性DBAPの結果を等方等質DBAPと比較したものであるが、異方性パラメーターを導入すること

によりDBAPの結果はより正解値（電研解析入力値）に近づくことが判明した。また、電研解析による変位分布および緩み領域をそれぞれ図-9、図-10に示す。変位分布は空洞右側壁部で良好に一致しており、左側壁およびアーチ部についても変位の近似精度が向上し、全体として等方等質DBAPと比較すると良好な結果となった。しかし、緩み領域については初期応力パラメーターおよび変位の同定結果に比較してその推定精度はやや低下する。

表-4 逆解析結果

	電研解析	DBAP	
		等方等質	異方性
σ_{x0}/E	-0.001539	-0.002724	-0.002097
σ_{y0}/E	-0.002000	-0.003323	-0.003145
τ_{xy0}/E	0.000462	0.001220	0.001275
σ_{10}/E	-0.002285	-0.004280	-0.003999
σ_{20}/E	-0.001253	-0.001767	-0.001243
$\theta (^{\circ})$	31.7	38.1	33.8

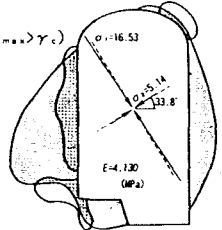
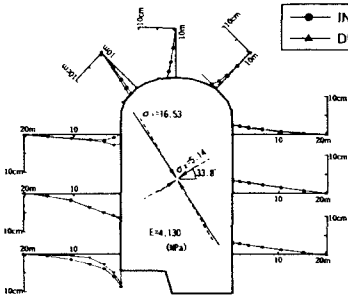


図-9 電研解析とDBAPによる変位分布の比較 図-10 電研解析とDBAPによる緩み領域の比較

4. まとめ

地下空洞の当初設計段階で用いられる電研解析に直接ひずみ評価法および逆解析法を適用した数値解析例を通して以下の事項が判明した。

- ①電研解析の入力物性値に基づき、ひずみ破壊基準値を算定可能であることを示し、またその拘束圧依存性についても検討した。
- ②当初設計段階における緩み領域の評価には、限界せん断ひずみを用いるのが妥当と判断できる。
- ③逆解析法DBAPの適用性を検討した結果、等方等質モデルの場合にはクリープおよび緩み領域の拡がりの影響を大きく受ける。また、異方性パラメーターを導入したDBAPにより、初期応力パラメーター等の同定精度は向上した。

今後は、統一的な岩盤安定性評価指標の確立を目指して、地下空洞の当初設計段階で用いるべきひずみ破壊基準について、特にクリープや塑性挙動をどのようにその基準に取り込むかについて検討を進める必要があると考えている。

謝辞：本論の着眼点は神戸大学の桜井教授との有益な討論を通じて得たものであり、ここに深く感謝の意を表します。

(参考文献)

- 例えば、林正夫・日比野敏(1976)：地下発電所の空洞掘削時の岩盤挙動解析、土木学会地下構造物の設計と施工、pp.81-113
- 桜井春輔(1982)：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
- 桜井春輔・武内邦文(1983)：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
- 桜井春輔・進士正人(1985)：マイクロコンピュータによる地下空洞掘削時の安定性の評価、土木学会論文集、第 358号、pp.37-46
- 桜井春輔・谷河正也(1989)：岩盤の不連続面の影響を考慮した大規模地下空洞の計測変位結果の逆解析、土木学会論文集、第 403号、pp.75-84
- 桜井春輔・清水則一・松室圭介(1988)：計測変位に基づく地下空洞周辺地山に発生する塑性領域の推定法、土木学会論文集、第 394号、pp.89-96