

節理・へき開の発達した堆積岩中に掘削された大深度地下空洞の変形特性

東電設計（株） 正会員 鈴木康正 石橋勝彦 田坂嘉章

東京電力（株） 正会員 小山俊博

1. はじめに

わが国における高レベル放射性廃棄物地層処理では、土被り500m付近の地下深部に、処分坑道や連絡坑道等が多数連設する坑道群を掘削する計画になっている。このような坑道を力学的に安定で、安全かつ経済的に掘削するためには調査・設計から施工に至る幅広い技術の体系化が必要とされるが、その中でも岩盤物性の評価技術は地点選定および坑道群のレイアウトや支保設計等に関わる重要な技術の一つと考えられる。

本稿は、地下深部における発電所の設計時に実施した岩石・岩盤試験による岩盤の変形性と、掘削による岩盤変位から評価した変形性を比較すると共に、変形異方性が予想される岩盤における変形性評価手法の適用例を示すものである。

2. 地点概要

対象とした地点は葛野川発電所(所在地：山梨県大月市)である。当発電所は地下500mに位置し、空洞規模は長さ210m、高さ54m、幅34mであり、空洞の長軸方向は南北である。

地質は中生代白亜紀後期から新生代古第三紀に堆積した「小仏層群」の泥岩と砂岩の混合層からなる。発電所近傍の岩盤は節理・へき開が著しく発達しており、特に発電所横断面方向(N88E)の走向で北急傾斜(76N)の節理(へき開と同一の走向傾斜)が空洞全体にわたって高い密度(5～35本/m)で分布していた。

当空洞ではこの地質上の特徴より設計当初から岩盤の変形異方性が想定され、空洞の長軸方向の検討や支保設計に変形異方性を考慮することが求められた。

3. 岩石・岩盤試験による変形性の事前評価結果

岩石試験、平板載荷試験および孔内載荷試験の結果を載荷方向と節理・へき開のなす角度との関係で図-1～3に示す。また図-4に調査坑で実施した坑間弾性波速度の測定結果を示す。

孔内載荷試験結果には明確な変形異方性が認められないが、他の試験結果にはバラツキはあるものの、表-1に示す変形異方性が認められた。

表-1 試験結果の変形異方性

試験種別	弾性係数(MPa)		
	E ₁	E ₂	E ₁ /E ₂
岩石試験	82,000	60,000	1.4
平板載荷試験	24,000	13,500	1.8
弾性波速度測定	*68,000	*52,300	1.3

E₁:節理面方向、E₂:節理面直交方向

*:動弾性係数

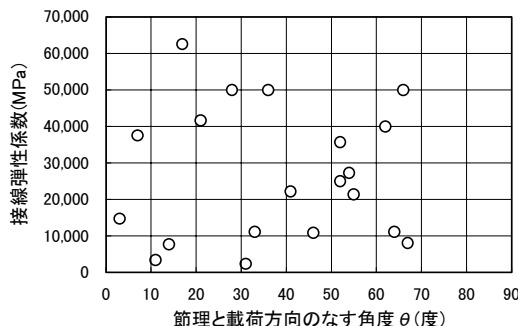


図-3 孔内載荷試験結果

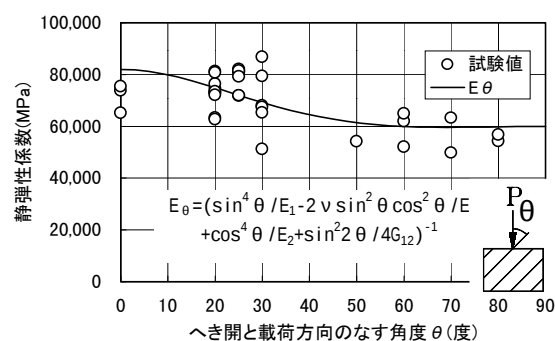


図-1 岩石試験結果

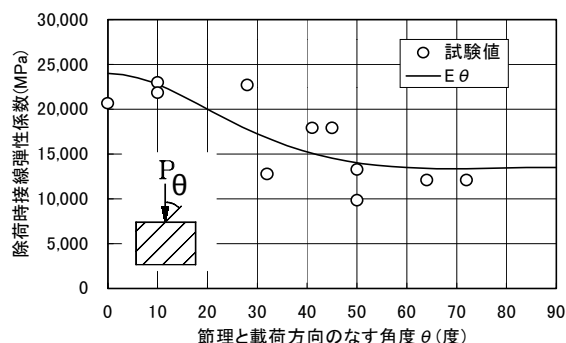


図-2 平板載荷試験結果

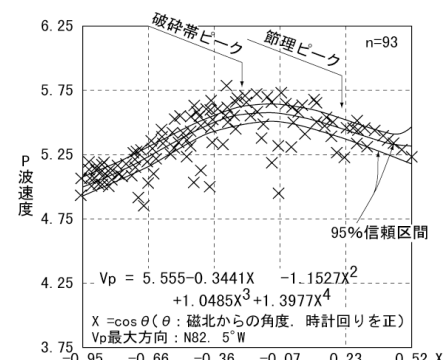


図-4 坑間弾性波速度測定結果

キーワード：大深度地下空洞、変形異方性、節理性岩盤、岩盤試験、非線形FEM解析

連絡先：〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3 Tel(03-5818-7540)、Fax(03-5818-7565)

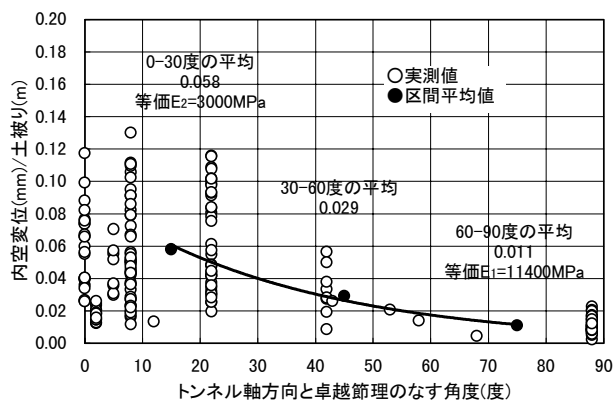


図-5 アプローチトンネルの内空変位

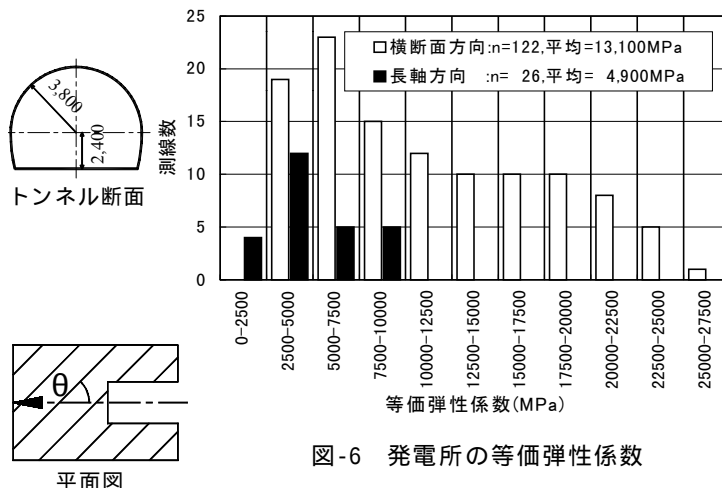


図-6 発電所の等価弾性係数

4. 岩盤変位から求めた変形性

発電所へのアプローチトンネルで計測した内空変位(土被り400m以上の区間)および発電所における岩盤変位計の計測結果を解析結果と比べることにより、実測の変位に見合う岩盤の等価な弾性係数を求め図-5、6に示す。解析に用いた3次元の地圧は調査坑において多軸ひずみ法により測定されたもの($\sigma_1=17.0\text{MPa}$, $\sigma_2=12.4\text{MPa}$, $\sigma_3=11.0\text{MPa}$)である。トンネルには2次元の発電所には3次元の弾性解析結果を適用した。また櫻井の方法による発電所横断面の逆解析では、岩盤の等価弾性係数は11.3~24.4GPa(平均18.6GPa)であった。

バラツキはあるものの平均値で見た場合、節理面方向(発電所横断面方向)の弾性係数 E_1 は節理面直交方向(空洞長軸方向)の弾性係数 E_2 の3~4倍程度であった。このように当地点の空洞では岩石・岩盤試験結果から求めた事前の評価($E_1/E_2=2$ 程度)より大きめな変形異方性が認められた。

5. 節理を含む岩盤を対象とした変形性評価手法の適用例

実挙動と比べ試験の変形異方性が少なかった主な原因として、1)寸法効果の影響、2)試験と掘削との応力過程の違い、3)節理等の弱面を含んだ岩盤が掘削により緩むことの影響等が挙げられる。岩盤せん断試験から求めた当地点の岩盤強度(Mohr-Coulomb式)は $c=1.5\text{MPa}$ 、 $\phi=58$ 度であり、見かけの一軸圧縮強度 q_u' は10.5MPaである。この場合土被り400m以深は地山強度比($q_u'/\gamma h$)が1以下であり、節理等の弱面を含んだ岩盤が掘削により緩んだ影響が実測の岩盤変位に現れている可能性が高い。

節理の破壊を考慮できる非線形FEM解析手法¹⁾を用いて上記トンネルの変形を解析した。この手法は節理の強度、変形性、密度、傾斜等を基質岩盤の物性とは別に与えることができるので、地山の状況に即した変形性の評価が可能である。解析条件を表-2に解析結果を表-3、図-7に示す。試験結果に基づく直交異方性弾性解に比べ、節理の破壊を考慮することで実際の変形をより正当に評価しうるようになることが分かる。

表-2 解析条件

直交異方性弾性解析	岩盤の弾性係数	E_1	10,000 MPa
		E_2	5,000 MPa
	岩盤の弾性係数	E	40,000 MPa
	節理の初期せん断剛性	k_{so}	10 σ_n MPa/cm
節理の破壊を考慮した非線形解析	岩盤の破壊強度	c_p	1.5 MPa
	岩盤の残留強度	c_r	1.5 MPa
	節理の破壊強度	ϕ_p	58 度
	節理の残留強度	ϕ_r	50 度

表-3 解析結果(土被り460m相当)

種 別	内空変位mm		節理密度
	u ₁	u ₂	
実測値*	5	27	5.4
異方性弾性	**4.5	13.0	2.9
	**5.2	18.2	3.5
節理破壊 (非線形解析)		23.5	4.5
		36.9	7.1
			5本/m
			10 "
			20 "

u_1 =トンネル軸が節理面直交方向、 u_2 =節理面方向

*: 図-5より土被り460mとして算出

**：異方性や節理を考慮しない等方物性の解析

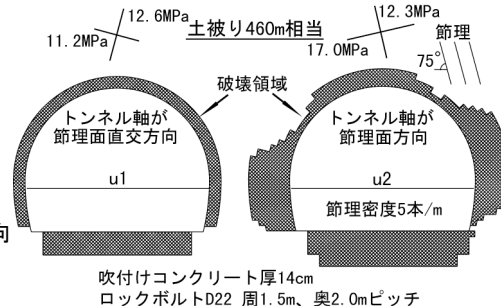


図-7 非線形解析の破壊領域

6. おわりに

節理・へき開の発達した堆積岩中に掘削された地下空洞の変形性について本稿で比較検討した。節理を含む岩盤の破壊が予想される地点ではその破壊を考慮した非線形解析が変形性評価に有効であることを示した。

参考文献 1)田坂嘉章、宇野晴彦、大森剛志、工藤奎吾；節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による地下発電所空洞掘削の解析、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.575-580、1998。