

1. まえがき

土かぶりの大きい膨張性地圧の作用するトンネルを対象として、3次元模型実験を行った。2×2×2mの模擬地山供試体に、推進工法によって鑿削製の模型トンネル（径30cm）を推進する実験手法を用いた。載荷圧をパラメーターとして、切羽付近の応力面配分の状況を観察した結果、地山の1軸圧縮強度の4倍に達する載荷圧に対しても、応力解放された切羽面近くで地山応力が低下しないという現象が観察された。こうした現象の原因を検討するため、以下のようなトンネル施工におけるエネルギー収支を考えてみた。

2. トンネル施工におけるエネルギー収支 1)

まず初期条件として、掘削領域を含む直方体の地山供試体を考える。直方体の面は主応力 σ_1 , σ_2 , σ_3 に直角とする。簡単のため σ_1 , σ_2 , σ_3 を σ で代表させる。

この状態に対して、系1として掘削状況を再現するため、掘削面に初期応力と同じ大きさで符号が反対の応力 σ' （掘削相当外力）を作用させる。この際の掘削面の変位を u' 、供試体表面の変位を v' とする。

系2として供試体の載荷以前の状況を再現するため、初期応力 σ を解除するための応力 σ'' を掘削面と供試体表面に作用させる。この時の掘削面の変位は u'' とする。供試体表面の変位は、不明のまき「？」とする。

上記の系1と系2に対して相反作用の定理を適用する。エネルギーの流出側を+、流入側を-として、応力変位を整理すると、

	応力		変位	
	掘削面	供試体面	掘削面	供試体面
系1	σ'	0	u'	$-v'$
系2	σ''	σ''	$-u''$	?

da を、掘削面積成分とし、 dA を供試体表面積成分として、相反作用の定理を用いると、

$$-\int_a \sigma' u' da = \int_a \sigma'' u' da - \int_A \sigma'' v' dA \cdots \cdots (1)$$

となる。

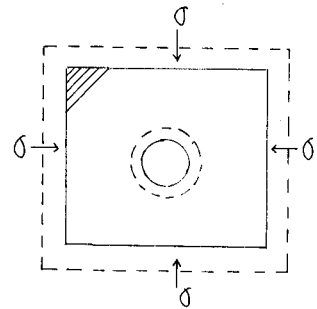


図-1 初期条件

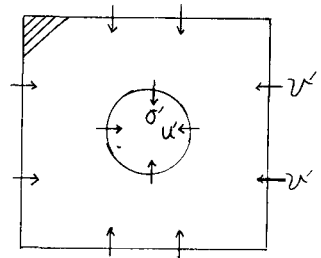


図-2 系1の応力と変位

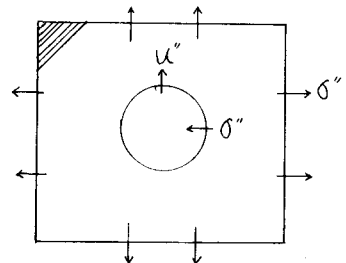


図-3 系2の応力と変位

ここで以下のようなエネルギーを考える(図-4)

W_H = 供試体外側の載荷板が変位することによって地山へ流入するエネルギー

W_i = 内部ひずみエネルギー

W_R = 掘削によってとり除かれる地山に含まれる、初期地圧によるひずみエネルギー

W_R = 地山が掘削される際に解放されるエネルギー

Loveの定理(ある仕意の力の下でつりあい状態にある物体の全ひずみエネルギーは、その力がひずみのない状態からつりあい状態に達するまでの変位を通して行う仕事量の $\frac{1}{2}$ である)を考えると、(1)式は

$$-2W_R = W_R - W_H \cdots \cdots (2) \quad \text{となる。}$$

解放エネルギー W_R は支保圧と地山強度によって変化するが、(2)式の W_R は解放エネルギーの最大値を示す。地山が弾性体の場合、Loveの定理によって解放エネルギーは最大値の $\frac{1}{2}$ 、すなわち $\frac{1}{2}W_R$ となりその残りは、内部ひずみエネルギー W_i として地山内に残留する。すなわち(2)式は

$$-2W_R = (\frac{1}{2}W_R + W_i) - W_H \cdots \cdots (3) \quad \text{となる。}$$

弾性体でない場合には、 $\frac{1}{2}W_R$ よりも大きいエネルギーが解放されると考えられる。

3. エネルギー収支の漸化式

解放エネルギーを変数としてとらえて一般的に、 W_R と記することになると(3)式より

$$W_i = W_H - (W_R + 2W_R) \cdots \cdots (4) \quad \text{となる。}$$

(4)式の右辺第1項は、流入エネルギー、第2項は流出エネルギー、左辺は内部(残留ひずみ)エネルギーを示す。図-4を参考に掘進長あたりのエネルギー収支を考えると(4)式は、

$$\Delta W_i = \Delta W_H - (\Delta W_R + 2\Delta W_R) \cdots \cdots (5)$$

となる。ここで Δ は、ある掘進長におけるエネルギー収支を示す。 n をある掘進長の段階を、 $n-1$ を1つ前の掘進長の段階を示すことにすると、(4)式は

$$W_{in} - W_{in-1} = \Delta W_H - (\Delta W_R + 2\Delta W_R) \cdots \cdots (5')$$

となる。初期条件を解析対象の条件に合うように定めて、(5)式を、逐次適用すれば、任意の掘削段階の内部ひずみエネルギーを求めることができる。模型実験の場合、事前に地山内部に設置した土圧計により内部ひずみエネルギーを計算することができ、逐次的に求めた内部ひずみエネルギーと比較し、相互の妥当性を検討する。このようにして、まえがきに述べたような現象を定量的に説明することができる。

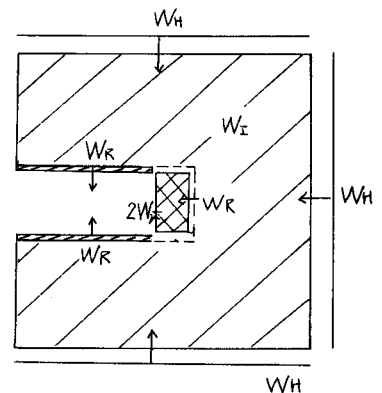


図-4. 各種エネルギー

4. まとめ

トンネル工圧、応力再配分、トンネル周辺の土圧の現象を説明するための、トンネル施工におけるエネルギー収支の考え方を示した。

文献 1) J. C. Jaeger, Fundamentals of Rock Mechanics, PP470 ~ 482