

## トンネル掘削解析の散逸エネルギー評価

### DISSIPATION ENERGY EVALUATION DURING TUNNELING

西村 正夫\*・増井 仁\*\*・北角 哲\*\*\*・斎藤 敏明\*\*\*\*

Masao NISHIMURA, Hitoshi MASUI, Akira KITAZUMI and Toshiaki SAITO

The stability of surrounding rock mass due to tunnel excavation is being analyzed only by taking into account the static balance of rock mass so far. Dynamic rock mass behavior, such as ground vibration caused in a rapid unloading as the blast, is being disregarded. Because such vibration energy is soon attenuated and dissipated, it is called dissipation energy. Dissipation energy is thought to have an adverse effect on the rock mass. Therefore it is more preferable to minimize the amount of the dissipation energy. A new method evaluating rock mass behavior based on the energy transfers and changes in the tunneling is proposed. As an example of the application, the optimal solution of both the divided section dimension and the excavation order is shown. *Key Words* : tunnel excavation analysis, rock mass stability, rapid unloading, elastic wave production

#### 1. まえがき

従来、トンネル掘削時の地山安定性は応力、ひずみ、変位を用いた安全率、地山破壊規準への接近度、発生した塑性域やゆるみ域の大きさや程度などすべて静的問題として比較評価されてきた<sup>1)</sup>が、発破掘削など掘削壁面での急速な地山応力の解放や地圧の除荷に伴って生じる地山振動など動的な挙動については無視され、地山から解放されるこのような運動エネルギーは考慮されていない。このエネルギーは地山を振動させ、地山内を波動伝播し、やがて減衰して消散する。この過程でトンネル周辺近傍の地山ほど振動が大きいため何らかの悪影響を及ぼす可能性があり、亀裂の発生・開口やすべりなど地山損傷にも結びついていると考えれば、できる限りこのエネルギーを小さくすることが望ましい。これを散逸エネルギーと呼称し、その発生の最小化に着目した積極的な評価<sup>2)・3)</sup>を試みている。本報ではトンネル掘削前後の地山全体のエネルギー収支分析から掘削手順の良否を散逸エネルギーの視点で解析評価することを試みた。

#### 2. 散逸エネルギーによる地山の動的挙動(球形空洞掘削に伴う地山振動発生と波動伝播の例)

地山掘削時に解放される散逸エネルギーについて、これによる地山振動発生とその波動伝播の状況は発破振動・波動伝播論から検討できる。Sharpe<sup>4)</sup>が球形の発破振源、Heelan<sup>5)</sup>が有限長さの円筒形の発破振源について、それぞれ爆圧による弾性波発生とその地山内伝播を検討し、弾性波動解を誘導している。Sharpeの理論解は球形空洞の掘削問題にも応用<sup>6)</sup>されている。掘削時の具体的な動的挙動として、掘削面での初期地圧解放を急速除荷と想定し、爆圧とは逆向きに掘削相当外力が一瞬にして作用したと考え、地山内の動的な変位、ひずみ、応力についての経時変化と掘削面で発生した振動が伝播する地山状況を例示してみる。

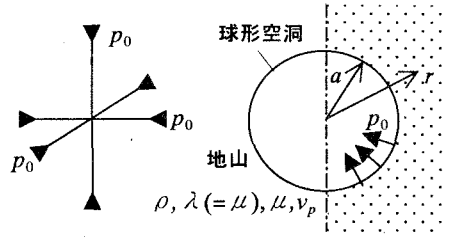
\*正会員 工博 (株)奥村組 技術研究所 地盤研究室長(〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

\*\*正会員 (株)奥村組 技術研究所 土木研究室長(〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387)

\*\*\*正会員 理修 (株)奥村組 電算センター 所長(〒545-8555 大阪市阿倍野区松崎町 2-2-2)

\*\*\*\*正会員 工博 京都大学教授 大学院工学研究科資源工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

その大きさが  $p_0$  である静水圧的な初期地圧の地山内に、半径  $a$  の球形空洞を一括掘削した場合を考える。地山は均質等方で弾性の無限媒質とし、その密度を  $\rho$ 、その弾性定数をラメの定数  $\lambda, \mu$  で表し、 $\lambda = \mu$  と仮定して式を簡略化する。地山の疎密波 (P 波) 速度を  $v_p = (3\mu/\rho)^{1/2}$  とする。座標は球形空洞の中心を極とする極座標を用いると問題の対称性から動径  $r$  だけで表される。時間は掘削除荷時からの時刻を  $t$  として、地山内  $r \geq a$  での初動到達時を 0 とするように  $\tau = t - (r - a) / v_p \geq 0$  で表せば、波動理論解 (圧縮応力  $> 0$  の表示) は変数  $(r, \tau)$  で表される。すなわち、球形空洞内壁に初期地圧と大きさが同じで逆向きの一樣な負の法線方向圧力 (掘削相当外力) を加えたときに生じる地山挙動であり、以下ようになる。なお、下添字  $t$  は等しい接線方向の 2 成分を、 $r$  は径方向成分を示す。



a) 掘削相当外力:  $p(t) = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ -p_0 & (t \geq 0) \end{cases}$

b) 発生する波動の角振動数:  $\omega = \frac{2\sqrt{2}v_p}{3a}$

c) 地山変位のスカラーポテンシャル (波動関数):

$$\Phi = \frac{a^2 p_0}{4\mu} \left(\frac{a}{r}\right) \{-1 + F_1(\tau)\}$$

d) 径方向地山変位 (掘削後の変化  $u$  と掘削前初期状態  $u_0$ ):

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{ap_0}{4\mu} \left[ \left(\frac{a}{r}\right)^2 \{1 - F_1(\tau)\} + \left(\frac{a}{r}\right) F_2(\tau) \right] \rightarrow \frac{ap_0}{4\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^2 \quad (t \rightarrow \infty)$$

$$u_0 = r \cdot \varepsilon_{t0} = \frac{p_0}{5\mu} \cdot r$$

e) 地山ひずみ (掘削後の変化  $\varepsilon$  と掘削前初期状態  $\varepsilon_0$ ):

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r} = \frac{p_0}{4\mu} \left[ \left(\frac{a}{r}\right)^3 \{1 - F_1(\tau)\} + \left(\frac{a}{r}\right)^2 F_2(\tau) \right] \rightarrow \frac{p_0}{4\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^3 \quad (t \rightarrow \infty)$$

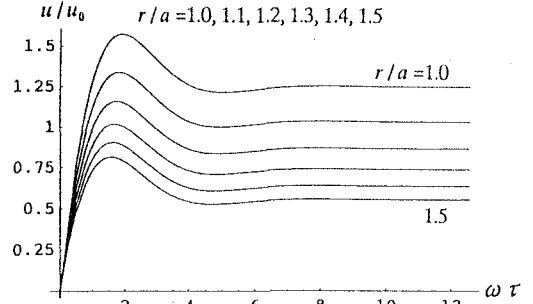
$$\varepsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{p_0}{2\mu} \left[ -\left(\frac{a}{r}\right)^3 \{1 - F_1(\tau)\} - \left(\frac{a}{r}\right)^2 F_2(\tau) + \left(\frac{a}{r}\right) F_3(\tau) \right] \rightarrow -\frac{p_0}{2\mu} \left(\frac{a}{r}\right)^3 \quad (t \rightarrow \infty)$$

$$\varepsilon_0 = \varepsilon_{t0} = \varepsilon_{r0} = \frac{p_0}{5\mu}$$

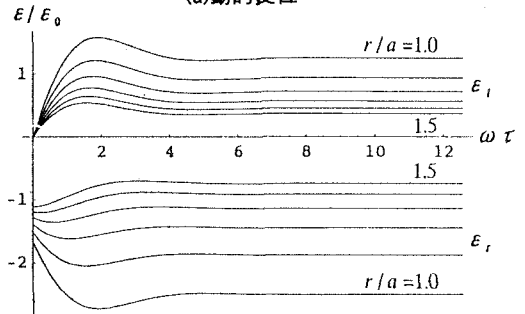
f) 地山の体積ひずみ (掘削後の変化と掘削前初期状態):

$$\varepsilon_{vol} = 2\varepsilon_t + \varepsilon_r = \frac{p_0}{2\mu} \left(\frac{a}{r}\right) F_3(\tau) \rightarrow 0 \quad (t \rightarrow \infty)$$

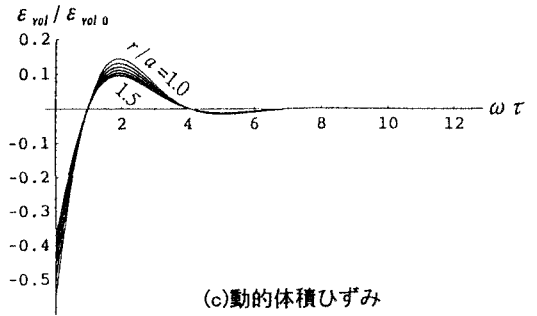
$$\varepsilon_{vol0} = 2\varepsilon_{t0} + \varepsilon_{r0} = \frac{3p_0}{5\mu}$$



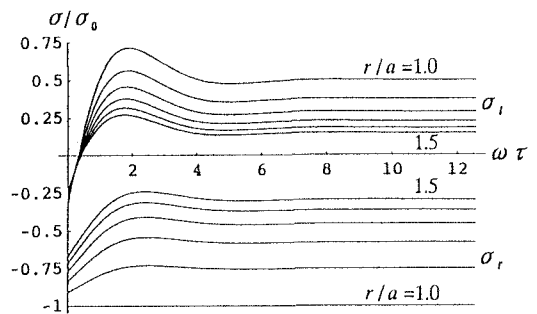
(a) 動的変位



(b) 動的ひずみ



(c) 動的体積ひずみ



(d) 動的応力

図-1 球形空洞掘削時の地山振動・波動伝播の状況

g) 地山応力(掘削後の変化  $\sigma$  と掘削前初期状態  $\sigma_0$ ) :

$$\sigma_t = \mu(4\varepsilon_t + \varepsilon_r) = \frac{p_0}{2} \left[ \left(\frac{a}{r}\right)^3 \{1 - F_1(\tau)\} + \left(\frac{a}{r}\right)^2 F_2(\tau) + \left(\frac{a}{r}\right) F_3(\tau) \right] \rightarrow \frac{p_0}{2} \left(\frac{a}{r}\right)^3 \quad (t \rightarrow \infty)$$

$$\sigma_r = \mu(3\varepsilon_r + 2\varepsilon_t) = p_0 \left[ -\left(\frac{a}{r}\right)^3 \{1 - F_1(\tau)\} - \left(\frac{a}{r}\right)^2 F_2(\tau) + \frac{3}{2} \left(\frac{a}{r}\right) F_3(\tau) \right] \rightarrow -p_0 \left(\frac{a}{r}\right)^3 \quad (t \rightarrow \infty)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{t0} = \sigma_{r0} = p_0$$

ここに,  $F_1(\tau) = \sqrt{\frac{3}{2}} \exp\left(-\frac{\omega\tau}{\sqrt{2}}\right) \sin(\omega\tau + \tan^{-1}\sqrt{2})$

$$F_2(\tau) = \sqrt{2} \exp\left(-\frac{\omega\tau}{\sqrt{2}}\right) \sin(\omega\tau)$$

$$F_3(\tau) = \sqrt{\frac{2}{3}} \exp\left(-\frac{\omega\tau}{\sqrt{2}}\right) \sin(\omega\tau - \tan^{-1}\sqrt{2})$$

以上の理論式を用いて、初動到達後の時刻  $\tau$  を無次元化した  $\omega\tau$  [rad.] を横軸にして、変位、ひずみ、応力の経時変化を描き図-1に示す。同図は地山内の地点  $r/a=1.0\sim 1.5$  におけるそれぞれの振動状況の経時変化を示しており、地山振動の急激な減衰とともに地山内へ放射状に波動伝播して幾何減衰する状況を示している。地山振動の発生は掘削直後の短時間内かつ空洞の近傍で顕著であることがわかる。初期地圧の急速な掘削除荷によって空洞周辺では壁面に近いほど地山振動や応力変動の発生がより大きく、地山振動は掘削面近傍の地山損傷を引起す誘因になる可能性を示唆している。そこで、このような地山振動や応力変動を引起す散逸エネルギーについて、トンネル掘削前後の地山エネルギー収支の視点で分析し、定量化する。

### 3. 分割掘削に伴う散逸エネルギー量の変化

トンネル掘削後、静的には掘削壁面が内空へ押出され、地山全体がトンネル中心に向かって変位している。したがって、十分遠方の地山から内空側へ向かって順次地山エネルギーが移動し、掘削によって地山には外部仕事としてのエネルギー  $W_{ext}$  が供給されることになる。まず図-2に示すように、その大きさが  $p_0$  である静水圧的な初期地圧の地山内に、半径  $a$  の円形トンネルを一括掘削した場合を考える。地山が弾性的場合には、この  $W_{ext}$  の半分は弾性ひずみエネルギー  $W_{els}$  (同図上半分の三角形に相当) として地山内に誘起蓄積されて増加する<sup>6), 7)</sup>。残り半分は解放エネルギー (同図下半分のトーンを付けた三角形に相当) であり、前節で示した地山振動を引起すエネルギーになる。この場合には、発生した振動が最終的に無限の彼方へ弾性波動として伝播し、すべてが減衰して消散する散逸エネルギー  $W_{dsp}$  になる。同図では、横軸にトンネル壁面の押し出し変位  $u_{ra}$  にトンネル円周長を掛けて求めた押し出し体積  $\Delta v_a = 2\pi a u_{ra} (= 2\pi r u_r)$  をとり、縦軸にトンネル壁面の径方向応力  $\sigma_{ra}$  をとり、図中でエネルギー量  $W$  が面積で表されるようにした。

弾性地山内に円形トンネルを同心円状に3段階に断面分割して順次切拡げ掘削する場合について、各掘削段階の地山エネルギーの授受の関係を図-3に示す。全断面を一括掘削する場合に比べて分割掘削する場合には、先行掘削によって後続切拡げ掘削部の地山は初期状態より増加し、大きなひずみエネルギーを蓄積した状態 (同図の  $W_{els}^*$  がその増加量に相当) で掘

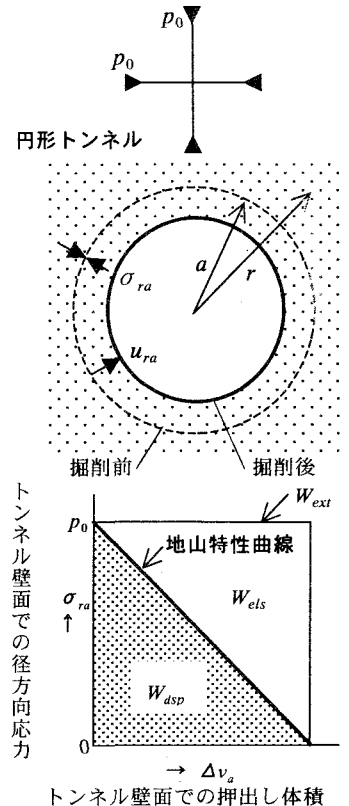
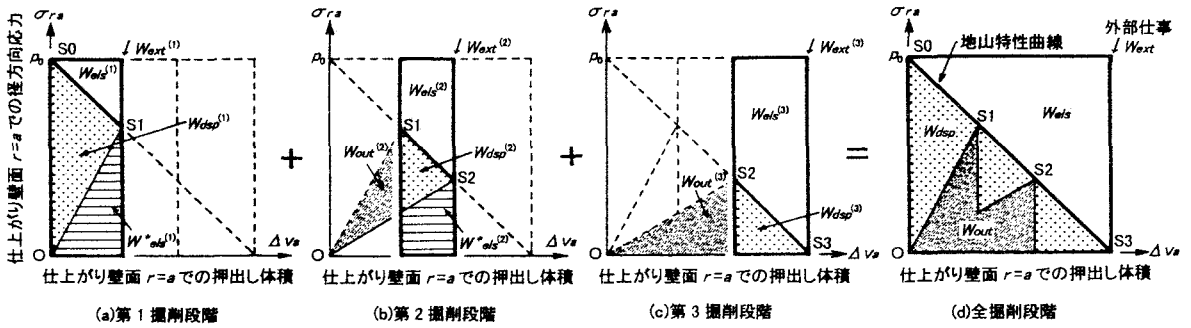


図-2 円形トンネル掘削時の弾性地山におけるエネルギー収支



$W_{ext} = W_{els} + W_{ois} + W_{dsp} = W_{els} + W_{out} + W_{dsp}$ ,  $W_{els} = W_{out} + W_{dsp} = W_{ext} / 2$ ,  $W_{dsp} \leq W_{els} = W_{ext} / 2$ ,  $W_{ext} = W_{ext}^{(1)} + W_{ext}^{(2)} + W_{ext}^{(3)}$   
 $W_{els} = W_{els}^{(1)} + W_{els}^{(2)} + W_{els}^{(3)}$   
 $W_{ois} = W_{ois}^{(1)} + W_{ois}^{(2)}$   
 $W_{out} = W_{out}^{(1)} + W_{out}^{(2)} + W_{out}^{(3)} = W_{ois}$   
 $W_{dsp} = W_{dsp}^{(1)} + W_{dsp}^{(2)} + W_{dsp}^{(3)}$

S0, S1, S2, S3 : 地山特性曲線における初期状態, 第1, 第2, 第3(最終)掘削段階後の仕上がり壁面での平衡状態

図-3 各掘削段階における地山エネルギー収支(弾性地山内の円形トンネルの同心円状3分割逐次掘削)

削されることになり、3段階に分割して搬出されるずに蓄積されていたひずみエネルギーの総和は一括掘削の場合より増加する。同図(d)で地山特性曲線下の三角形の内、濃いトーンを付けたM字状部の面積  $W_{out}$  がその増加量に相当する。一括掘削、分割掘削いずれの場合も、掘削完了後の弾性地山状態は全く同一であり、地山に蓄積されたひずみエネルギー  $W_{eis}$  と地山から解放されたエネルギー  $W_{dsp} + W_{out}$  は同じ大きさ(同図(d)の上半分および下半分の各三角形に相当)である。分割掘削するとこの解放エネルギーの内、一部が後続掘削部のひずみエネルギー増加  $W_{ois}$  となって蓄積され、後の掘削でずりとして搬出  $W_{out}$  されることから、散逸エネルギーの総和は同図(d)の薄いトーンを付けた3つの三角形の面積の和  $W_{dsp} = W_{dsp}^{(1)} + W_{dsp}^{(2)} + W_{dsp}^{(3)}$  となり、一括掘削の場合(図-2参照)より小さくなる。これは先行掘削によって応力やひずみエネルギーが掘削壁面近傍に再配分されて蓄積され、後続掘削で取り出す地山部分(搬出ずり)のひずみエネルギーが増大するからである。なお、図中で太線の矩形枠は外部仕事  $W_{ext}$  を示す。また、先行掘削で蓄積された後続掘削部地山のひずみエネルギーの増加量は、掘削前から設置されていた仮想的支保と考えると同図で示すと、原点Oを始点とする支保特性曲線OS1, OS2を描き、これを斜辺とする下半分の直角三角形に相当する。

#### 4. 有限要素解析を用いたトンネル掘削手順評価への応用

従来の有限要素法を用いたトンネル掘削解析に、地山のエネルギー変化も検討できるようにその各算出ルーチンを付け加えるだけで、一般的なトンネル掘削に伴う全対象地山のエネルギー収支が求められる。解析例として、正方形断面のトンネルを対象にその掘削手順(加背割りと掘削順序)の相違による地山のエネルギー解放を定量的に比較・評価した結果について述べる。

##### a) 地山エネルギー算出

地山が弾性的な場合には、散逸エネルギー  $W_{dsp}$  は掘削面上の各節点の掘削相当外力とその変位との内積の1/2をとり、該当する掘削面上の全節点についてその総和をとれば求められる。地山が弾塑性など非線形になる場合には増分解析になり、掘削予定面での増分解析ごとに未解放地圧に相当する掘削相当外力を求め、これとその変位増分との内積の総和から散逸エネルギー増分を求める。さらに増分解析ごとの総和をとれば総散逸エネルギー  $W_{dsp}$  が求められる。その他のエネルギー算出として、地山に新たに蓄積される総弾性ひずみエネルギー  $W_{eis}$  は掘削前後の応力と弾性ひずみの内積から、総塑性ひずみエネルギー  $W_{pls}$  は降伏後の応力と

塑性ひずみ増分の内積について各増分解析ごとの総和から、また、外部仕事  $W_{ext}$  は対象地山の外周境界節点での外力とその変位の内積から、自重による仕事  $W_g$  は重力と掘削による地山鉛直変位の積を対象地山全体で積分すれば求められる。掘削時に搬出されるずに新たに蓄積され増加した総ひずみエネルギー  $W_{out}$  を考慮すると、トンネル掘削前後の全地山エネルギー収支の関係は次式のように表される。

$$W_{ext} + W_g = W_{els} + W_{pls} + W_{dsp} + W_{out}$$

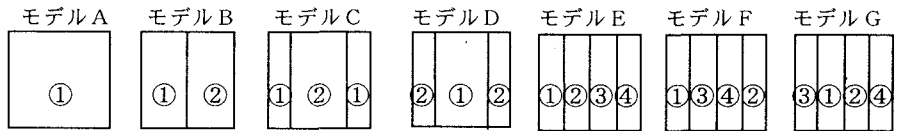
### b) 数値解析モデル

正方形断面トンネルを水平か鉛直方向に最大4分割できる基本的加背割りモデルを選び、初期地圧の卓越方向の相違(水平卓越と鉛直卓越)によって、またこのような加背割りをどのような掘削順序で進める掘削手順が最良なのかを、掘削途上で解放された総散逸エネルギー量  $W_{dsp}$  の大小で優劣評価を試みる。座標系を水平方向  $H$ (左右方向  $x$ )、鉛直方向  $V$ (上下方向  $y$ )、トンネル軸(紙面直交)方向  $z$  とし、平面ひずみ場において初期地圧の側圧係数  $k$  を変更して解析する。解析領域は  $100\text{m} \times 100\text{m}$  の地山とし、図-4に示すように  $1\text{m}$ 、 $1.5\text{m}$ 、 $2\text{m}$  ピッチで上下左右にトンネル近傍ほど細かくした矩形要素に分割した。掘削トンネルは  $12\text{m} \times 12\text{m}$  の正方形断面  $144\text{m}^2$  であり、 $3\text{m}$  ピッチ(3要素幅)で上下左右に分割可能な多段階掘削を考える。その掘削手順の各モデルは図-5に示すように、トンネル断面の加背割りとその掘削順序の異なる7種類のモデルA, B, ..., Gを選び、同図に示す縦割りに対して同様な横割りのモデルを a, b, ..., g とする。これらの各モデルについて、異なる地山条件(初期地圧とポアソン比)で実施した解析ケースを表-1に示す。影響要因の複雑さを避けるために重力場(地山自重)を無視( $W_g=0$ )し、弾性解析( $W_{pls}=0$ )とした。初期地山条件として全領域に一樣な鉛直および水平の初期地圧  $\sigma_{v0}$ 、 $\sigma_{H0}(=k\sigma_{v0})$  をまず設定した後、掘削解析時には外周境界をローラー支承で変位拘束( $W_{ext}=0$ )する。ここでの地山エネルギー収支の関係は次式のように表され、地山の全弾性ひずみエネルギー( $W_{BEFORE}$ :掘削前,  $W_{AFTER}$ :掘削後)は掘削進行に伴い減少( $W_{els}<0$ )することになる。

$$W_{dsp} + W_{out} = -W_{els} > 0$$

$$W_{BEFORE} = W_{dsp} + W_{out} + W_{AFTER}$$

同じ解析ケースでは掘削手順に相違があっても、全断面を掘削完了した後の地山状態(応力、ひずみ、ひずみエネルギー)は弾性解析のため、静的にはどの掘削手順モデルでも全く同一状態になる。留意すべきこととして、散逸エネルギーは地山に影響を及ぼすと考えられるが、その影響度合いはこのような静的な解析結果には反映されていない。その影響を考慮するには、掘削時の急速除荷に伴うエネルギー解放が地山を振動させ、波動伝播することによって、地山へどのように動的に関わって影響を及ぼしているのかを設定したさらに詳細な解析が必要になる。



横割り分割掘削モデル a, b, ..., g は縦割り分割掘削モデル A, B, ..., G を  $90^\circ$  回転したモデル

図-5 トンネル掘削手順モデル(①, ②, ..., 掘削順序)

表-1 解析ケース

解析ケース名	ケース 1	ケース 2	ケース 3
初期地圧 $\sigma_{H0}/\sigma_{V0}$ (MPa/MPa)	2.5/10	5/10	7.5/10
地山ヤング率 $E$ (MPa)	$10^3$	$10^3$	$10^3$
地山ポアソン比 $\nu$ (-)	0.2	0.3333	0.4286

表-2 総散逸エネルギー  $W_{dsp}$  と総搬出ずり内のひずみエネルギー  $W_{out}$  の解析結果内訳一覧

ケース1 (条件:  $k=0.25, \nu=0.2$  数値の単位: MJ/m)

	横割り分割掘削モデル						一括掘削	縦割り分割掘削モデル					
	g	f	e	d	c	b		A	B	C	D	E	F
散逸1	11.199	11.195	11.195	11.802	15.214	11.799	12.708	3.760	2.752	3.760	1.343	1.343	1.343
散逸2	1.377	4.868	1.378	2.608	0.245	2.653	0	6.964	7.660	6.182	1.765	1.219	1.765
散逸3	1.325	0.249	1.334	0	0	0	0	0	0	0	2.475	1.970	2.462
散逸4	1.322	0.070	1.324	0	0	0	0	0	0	0	3.106	3.958	3.095
$W_{dsp}$ 計	15.223	16.382	15.231	14.410	15.459	14.452	12.708	10.724	10.412	9.942	8.689	8.490	8.665
搬出1	1.620	1.620	1.620	3.240	3.240	3.240	6.480	3.240	3.240	3.240	1.620	1.620	1.620
搬出2	0.762	0.799	0.762	1.397	0.392	1.423	0	5.239	5.582	5.970	2.273	1.811	2.273
搬出3	0.703	0.195	0.717	0	0	0	0	0	0	0	2.994	2.792	2.978
搬出4	0.695	0.126	0.695	0	0	0	0	0	0	0	3.640	4.530	3.626
$W_{out}$ 計	3.780	2.740	3.794	4.637	3.632	4.663	6.480	8.479	8.822	9.210	10.527	10.753	10.497
合計	19.003	19.122	19.025	19.047	19.091	19.115	19.188	19.203	19.234	19.152	19.216	19.243	19.162

ケース2 (条件:  $k=0.5, \nu=0.3333$  数値の単位: MJ/m)

	横割り分割掘削モデル						一括掘削	縦割り分割掘削モデル					
	g	f	e	d	c	b		A	B	C	D	E	F
散逸1	10.469	10.466	10.466	11.55	14.638	11.549	14.106	5.657	5.526	5.658	3.239	3.239	3.239
散逸2	1.423	4.686	1.424	3.190	0.954	3.294	0	6.661	6.460	6.013	1.809	2.071	1.809
散逸3	1.516	0.430	1.528	0	0	0	0	0	0	0	2.475	1.733	2.459
散逸4	1.633	0.427	1.639	0	0	0	0	0	0	0	3.059	3.309	3.046
$W_{dsp}$ 計	15.041	16.009	15.057	14.740	15.592	14.843	14.106	12.318	11.986	11.671	10.582	10.352	10.553
搬出1	1.200	1.200	1.200	2.400	2.400	2.400	4.801	2.400	2.400	2.400	1.200	1.200	1.200
搬出2	0.771	0.716	0.771	1.603	0.819	1.592	0	4.187	4.539	4.755	1.792	1.423	1.791
搬出3	0.805	0.410	0.824	0	0	0	0	0	0	0	2.393	2.271	2.371
搬出4	0.883	0.508	0.886	0	0	0	0	0	0	0	2.923	3.688	2.909
$W_{out}$ 計	3.659	2.834	3.681	4.003	3.219	3.992	4.801	6.587	6.939	7.155	8.308	8.582	8.271
合計	18.700	18.843	18.738	18.743	18.811	18.835	18.907	18.905	18.925	18.826	18.890	18.934	18.824

ケース3 (条件:  $k=0.75, \nu=0.4286$  数値の単位: MJ/m)

	横割り分割掘削モデル						一括掘削	縦割り分割掘削モデル					
	g	f	e	d	c	b		A	B	C	D	E	F
散逸1	9.847	9.845	9.845	11.807	14.258	11.806	16.799	8.779	9.610	8.779	6.116	6.116	6.117
散逸2	1.608	4.543	1.609	4.019	2.220	4.368	0	6.199	5.063	5.563	1.872	3.254	1.872
散逸3	1.844	0.775	1.852	0	0	0	0	0	0	0	2.403	1.461	2.391
散逸4	2.055	1.061	2.066	0	0	0	0	0	0	0	2.845	2.540	2.829
$W_{dsp}$ 計	15.354	16.224	15.372	15.826	16.478	16.174	16.799	14.978	14.673	14.342	13.236	13.371	13.209
搬出1	0.643	0.643	0.643	1.285	1.285	1.285	2.571	1.285	1.285	1.285	0.643	0.643	0.643
搬出2	0.884	0.556	0.884	2.046	1.477	1.824	0	3.066	3.361	3.577	1.369	0.906	1.369
搬出3	1.026	0.741	1.061	0	0	0	0	0	0	0	1.822	1.684	1.784
搬出4	1.200	1.122	1.208	0	0	0	0	0	0	0	2.192	2.735	2.177
$W_{out}$ 計	3.753	3.062	3.796	3.331	2.762	3.109	2.571	4.351	4.646	4.862	6.026	5.968	5.973
合計	19.107	19.286	19.168	19.157	19.240	19.283	19.370	19.329	19.319	19.204	19.262	19.339	19.182

c) 数値解析結果

2次元平面ひずみ場で重力を考えない基本的な掘削手順モデルの相違について各ケースごとに、一括掘削A、縦割り分割掘削B、C、…、Gおよび横割り分割掘削b、c、…、gの計13モデルについて掘削解析を行い、各エネルギーを算出した。一括掘削から2回および最大4回の分割掘削の各掘削段階において、散逸エネルギー  $W_{dsp}$  および搬出ずり内エネルギー(掘削直前に蓄積していたひずみエネルギー)  $W_{out}$  を各モデルで求め、一覧にして表-2に示している。 $W_{dsp}$  の総量と  $W_{out}$  の総量の合計はエネルギー算出上の数値積分誤差などによって数%程度の誤差を生じているが、同一ケースでは等しくなる。これは対象地山の掘削による全ひずみエネルギーの減少量に相当する。棒グラフで示した図-6では、散逸エネルギー  $W_{dsp}$  を白抜きで示し、搬出ずり内エネルギー  $W_{out}$  を種々のトーンの黒塗りで示す。各モデル間で  $W_{dsp}$  の総量に相違が現れているのがわかる。総散逸エネルギー  $W_{dsp}$  最小化で解析結果を評価すると、最適な掘削手順は次のように要約できる。

全断面一括掘削と比較して、地圧の卓越する方向に切断するような断面分割の加背割りをすれば、総散逸エネルギー発生を小さくでき、掘削時の周辺地山振動が小さくなり、振動に起因すると考えた地山損傷を抑制できる。逆に、卓越地圧に直交する方向に切断するような断面分割の加背割りをすれば、総散逸エネルギー発生は大きくなり、地山損傷を助長することになる。

鉛直方向初期地圧が卓越する場合、望ましい掘削手順モデルの順位は  $F > G > E > D > C > B$  (以上は縦割り分割)  $> A >$  (以下は横割り分割)  $d > b > g > e > c > f$  となり、横割り分割(上下に分割)はしない方

がよいことがわかる。一方、水平方向初期地圧が卓越する場合、相似性から縦横の分割を逆に考えれば、望ましい掘削手順モデルの順位は  $f > g > e > d > c > b$  (以上は横割り分割)  $> A >$  (以下は縦割り分割)  $D > B > G > E > C > F$  となり、縦割り分割(左右に分割)はしない方がよいことがわかる。

側圧係数  $k$  については、等方初期地圧 ( $k = 1$ ) に近付くとともに各モデル間における総散逸エネルギー量の相違は小さくなり、このような縦横分割の相違による影響はなくなることがわかる。

## 5. まとめ

トンネルなど地下構造物となる地山部分をできるだけ傷めずに構築する目的で、掘削時の地山エネルギー収支を有限要素解析から求めてみた。その方法として、掘削除荷に伴う地山振動をできるだけ構造物側の地山に与えないように、総散逸エネルギー量の最小化の視点で評価した最適な掘削手順の検討法である。また、トンネルを掘削する場合、引き続き掘削を予定している地山部分(掘削ずりとして後で搬出される地山)は掘削で解放されるエネルギーを吸収蓄積あるいは消費しながら破壊してもゆるんでもよく、逆に最終的に構造物となりトンネルを形成

する地山部分はこのような掘削時の解放エネルギーによる動的な影響を小さくしてできるだけ地山損傷を受けないような掘削手順の工夫を解析的に見出す方法といえる。すなわち、掘削で解放されるエネルギーの内、散逸エネルギー発生を最小化することによって地山振動の及ぼす影響も最小化しようとの新しい試みである。しかし、このような評価法はさまざまな掘削要因解析の一評価法であって、現実の施工場面では施工上の種々の制約や複雑な地質や支保も考慮した分析が当然必要になる。発破掘削工法と機械掘削工法の相違は一括掘削(動的な掘削過程)と逐次分割掘削(準静的な掘削過程)と考えれば散逸エネルギー発生の有無の視点で比較評価できる<sup>2)</sup>が、地山へ働きかける発破エネルギー(発破による直接地山損傷の程度)と地山が解放する散逸エネルギーとの定量的な影響対比についてはまだ十分には明らかでない。このため、掘削前後の地山観察や実測挙動との対比・照合を積み重ねる必要があり、今後の地道な調査分析・データ収集が望まれる。

なお、査読者から関連の深い文献<sup>6)</sup>の紹介をいただいた。ご助言も含め、ここに記して感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 例えば、日本鉄道建設公団：N A T M 設計施工指針，pp.307-348, 1996.2.
- 2) 西村正夫，蛭子清二，浅野 剛，斎藤敏明：第 10 回岩の力学国内シンポジウム，No.85，pp.461-466, 1998.
- 3) 西村正夫，増井 仁：土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集，III-B81，pp.162-163, 1998.
- 4) Sharpe, J. A. : The Production of Elastic Waves by Explosion Pressures. Part I Theory and Empirical Field Observations, *Geophysics*, Vol.7, pp.144-154, 1942.
- 5) Heelan, P. A. : Radiation from a Cylindrical Source of Finite Length, *Geophysics*, Vol.18, pp.685-696, 1953.
- 6) Brady, B. H. G. and Brown, E. T. : *Rock Mechanics for Underground Mining*, Allen and Unwin, pp.240-259, 1985.
- 7) Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W. : *Fundamentals of Rock Mechanics*, Chapman and Hall, pp.476-482, 1979.

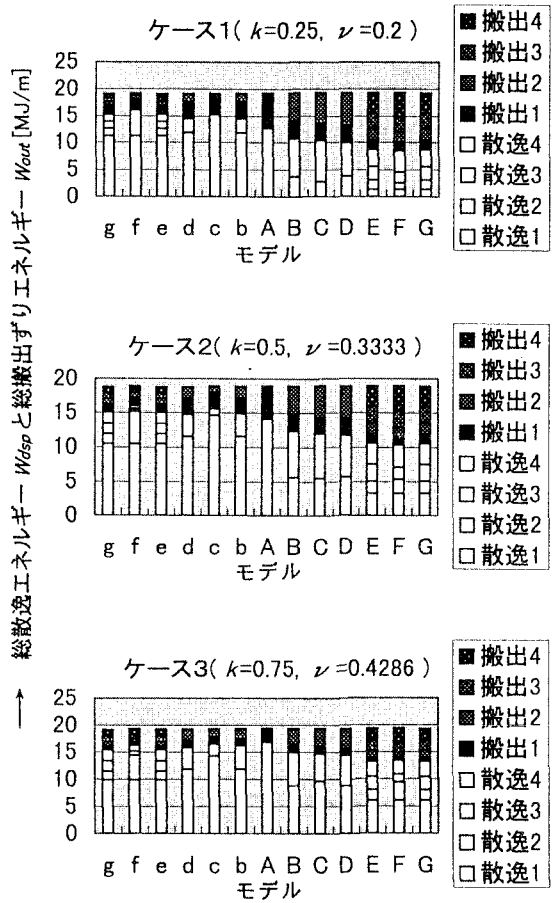


図-6 散逸エネルギー解析結果の総量比較