

トンネル掘削手順の地山エネルギー解放に基づいた比較評価

EVALUATION OF TUNNELING PROCESSES BASED ON EXCAVATION-INDUCED ROCK ENERGY RELEASE

西村正夫*・増井 仁**

Masao NISHIMURA and Hitoshi MASUI

The instability of rock mass due to rapid unloading of the initial rock pressure in tunneling is analyzed statically by taking the excavation-induced energy into consideration. The released energy, named dissipation energy, causes the ground vibration in the vicinity of the tunnel face, and is possible to have adverse effects upon the surrounding rock mass. Therefore it is preferable to minimize the dissipation energy in order to preserve the rock mass from loosening. The some numerical results show that the amount of dissipation energy is a good measure for the evaluation of excavation processes at tunneling.

Key Words: tunnel excavation, rapid unloading, dissipation energy minimization, finite element analysis

1. まえがき

地下深部の地山内にトンネルや空洞を掘削すると、急激な初期地圧解放によってその周辺近傍の地山では切羽崩壊・すべりなどの破壊現象や潜在亀裂の開口・新たな亀裂発生などのゆるみ現象のほかさまざまな地圧現象が誘起される。この事前予測のために掘削時安定性の定量的評価が望まれる。そこで、トンネル掘削手順を検討する場合、各掘削段階の地山エネルギー収支に基づいて求められる、地山エネルギー解放の相違に着目して、トンネル掘削地山の安定性解析・評価を試みてきた^{1), 2), 3)}。発破掘削時など潜在する地圧の急速除荷によって生じる地山振動の発生・伝播⁴⁾によって、掘削面に近いほど地山振動や応力変動の発生が大きく掘削面近傍の地山損傷を引き起こす誘因になる可能性を示した⁵⁾。本報では、このように地山から解放され動的に地山を損傷するとみなせるエネルギーを散逸エネルギーと呼称し、その各掘削段階の総和を求め、その最小化を地山安定性の評価指標として有限要素法による逐次掘削解析を試みたのでその結果を示す。

2. 散逸エネルギー

発破掘削時には図-1に示すように、掘削面で爆薬の衝撃的な膨張圧が地山側を押し付けて生じる発破エネルギーによる地山直接損傷と、同時に潜在する地圧が急速除荷され、地山エネルギー解放による動的な除荷振動に伴う地山損傷が考えられる。地下深くなると高地圧になり、除荷に伴う動的挙動が相対的に大きくなると予想される。ここでは後者のエネルギーにのみ着目し、図-2に示すような地山エネルギー収支から各掘削段階で解放される散逸エネルギーの和 W_{dsp} を求める。

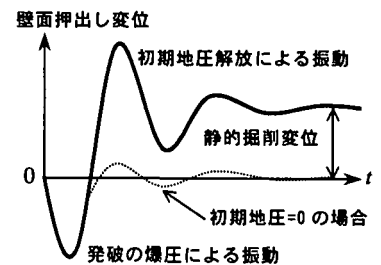


図-1 発破掘削時の壁面動的挙動

* 正会員 工博 ㈱奥村組 技術研究所 主席研究員

**正会員 ㈱奥村組 技術研究所 土木研究室長

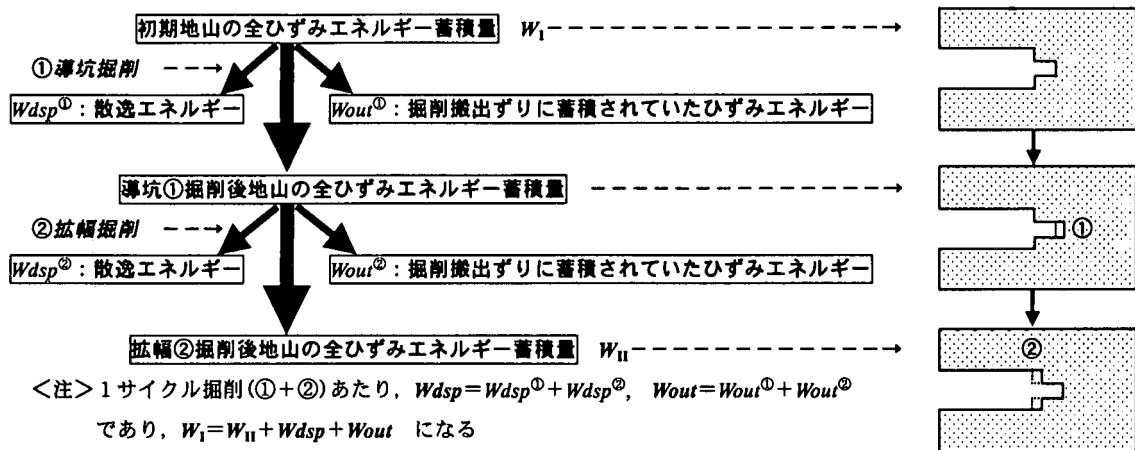


図-2 トンネルの導坑-拡幅 2 段階分割掘削に伴う地山エネルギー収支

3. 掘削手順の比較評価例

トンネル掘削工事に於いて、発破掘削など初期地圧の急速除荷によって生じる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、分割掘削各段階の散逸エネルギーの和を求め、その最小化の視点で比較評価した最適な掘削手順を検討してみる。

数値解析例として、図-3 に示すように中央導坑を先進掘削し、後続して円環状に拡幅掘削する 2 分割同心円状のトンネル掘削を有限要素法で解析した。トンネル軸に対称な回転体の中空円柱状地山モデルを対象にした弾性地山解析とし、初期地圧設定後、外部境界は変位拘束（ローラー支承）で掘削相当外力による導坑-拡幅の 2 段階分割掘削を実施した。

円形断面（半径 $R=6\text{m}$ ）トンネルの 2 段階の分割掘削手順において、図-4 に示すように中央導坑①（半径 $r=1.5\text{m}/3.0\text{m}/4.5\text{m}$ の 3 ケース）を先進掘削後、引続き後続切羽の拡幅掘削②（仕上がり半径 $R=6\text{m}$ ）をそれぞれ一掘進長 $s=1.5\text{m}$ ずつの掘削サイクル（①+

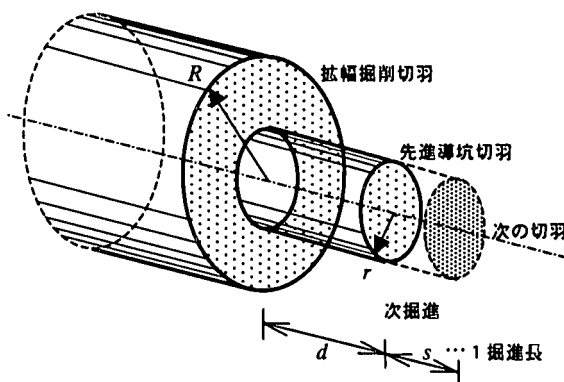


図-3 導坑先進-円環状拡幅の 2 段階分割掘削モデル

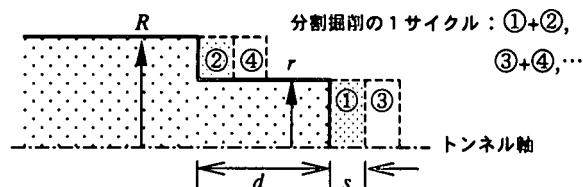


図-4 トンネル導坑-拡幅の 2 段階分割掘削サイクル

②) で交互掘削する場合、すなわち、1 サイクルでの合計掘削体積 $V = \pi r^2 s + \pi(R^2 - r^2)s = \pi R^2 s$ の地山を掘削する場合、各掘削段階で解放された散逸エネルギー量の総和を求め、その最小化の評価から掘削時のエネルギー解放に起因して発生しうる地山のゆるみについてその低減化を比較検討してみた。考慮した影響要因は次の 4 つの変数とし、その組合せからいくつかの解析ケースを考えてみる。

- ・中央導坑の半径: $r=1.5\text{m}/3.0\text{m}/4.5\text{m}$ の 3 ケース（トンネル半径 $R=6\text{m}$ として、 $r/R=0.25/0.5/0.75$ の 3 ケース）
- ・導坑-拡幅掘削の 2 切羽間距離: $d=0\text{m}/2s/3s/\infty=0\text{m}/1.5\text{m}/3.0\text{m}/4.5\text{m}/\infty\text{m}$ の 5 ケース
- ・トンネル横断面内の初期地圧に対するトンネル軸方向の初期地圧比: $k=\sigma_{z0}/\sigma_{r0}=0.5/1.0/2.0$ の 3 ケース
- ・地山のポアソン比: $\nu=0.2/0.4$ の 2 ケース

ここで、切羽間距離 $d=0$ とは一掘進長 s を断面の 2 分割で掘削するが、結果として先進導坑部の外側をその後すぐに拡幅掘削するため、常に一切羽に戻るような分割掘削法であり、全断面一括掘削を単純に 2 分して掘削

前進するケースである。一方、切羽間距離 $d \rightarrow \infty$ とは導坑部をトンネル全区間について掘削完了後に拡幅掘削を始めるような独立した 2 分割掘削法であり、通常の 2 次元モデルにおけるトンネル横断面を対象にした平面ひずみ解析モデルに相当する。その他共通の定数は、地山のヤング率 $E = 1 \text{ GPa}$ 、一掘進長 $s = 1.5 \text{ m}$ 、トンネル仕上がり半径 $R = 6 \text{ m}$ とし、FEM 解析対象地山を半径 50 m 、長さ 100 m の円柱領域とし、その中心軸方向にトンネルを 2 分割して同心円状に掘進する軸対称回転体モデルとする。各ケース間で比較するエネルギー量は、トンネル全断面の一掘進長相当分を掘削する 1 サイクルの間に、解放・蓄積される地山エネルギー量 $[\text{Nm/cycle} = \text{J/cycle}]$ である。FEM 解析ケースの総数は 4 つの変数の組合せから、分割掘削モデル 90 ケース ($= r:3 \times d:5 \times k:3 \times \nu:2$) と、比較のための全断面一括掘削モデル 6 ケース ($= k:3 \times \nu:2$) の合計 96 ケースになる。

4. 解析結果とまとめ

解析結果を比較するため、総散逸エネルギー量 W_{dsp} は全断面一括掘削時の散逸エネルギー量で除して正規化して図-5 に示す。導坑半径比 r/R 、軸方向初期地圧比 k 、ポアソン比 ν の相違によって描いた図-5 の各図中に共通の 3 つの棒グラフは導坑掘削時①の $W_{dsp}^{\textcircled{1}}$ 、拡幅掘削時②の $W_{dsp}^{\textcircled{2}}$ 、その合計①+②の W_{dsp} であり、これらを 2 つの切羽間距離 d の相違を横軸にして示している。各要因の影響をまとめると次のようになる。

(1) 導坑の断面積 πr^2 の影響

トンネル半径 $R = 6 \text{ m}$ に対して、先進導坑半径を $r = 1.5 \text{ m}$, 3.0 m , 4.5 m と大きくすると総散逸エネルギー量 W_{dsp} は小さくなっていく。すなわち、導坑はその断面積の大きい方が結果的に W_{dsp} は小さくなり有利になる。ただし、先進掘削した導坑部の外周をその後すぐに拡幅掘削する場合 ($d = 0$) では逆に W_{dsp} は全断面一括掘削の場合よりも大きくなる。すなわち、導坑を先行させないで単純に分割掘削する場合には、全断面一括掘削の方が W_{dsp} は小さくなり有利になる。分割掘削する場合には、必ず掘進長分は導坑を先進させておかねば有利にならない。

導坑半径を大きくすると、 W_{dsp} に占める導坑掘削時分の比率は当然ながら大きくなるが逆に拡幅掘削時分の比率がそれ以上に小さくなるため、結果的には 2 つの和である W_{dsp} は小さくなる。なお、導坑半径を 4.5 m よりさらに大きくすると W_{dsp} は逆に反転して大きくなると予想されるが現実的ではないので算出していない。最適な 2 分割半径については、切羽を有するトンネル軸対称問題では次の 2 次元と 3 次元の理論解の間に最適な導坑半径が存在するものと推測される。すなわち、理論的には相似状 2 分割掘削として、3 次元球状空洞では掘削体積半分に相当する $r/R = \sqrt[3]{0.5} = 0.7937 \dots$ が最適解であり、 $r = 4.76 \text{ m}$ になる。一方、2 次元円形トンネルでは掘削断面積半分に相当する $r/R = \sqrt{0.5} = 0.7071 \dots$ が最適解であり、 $r = 4.24 \text{ m}$ になる^{1), 2)}。

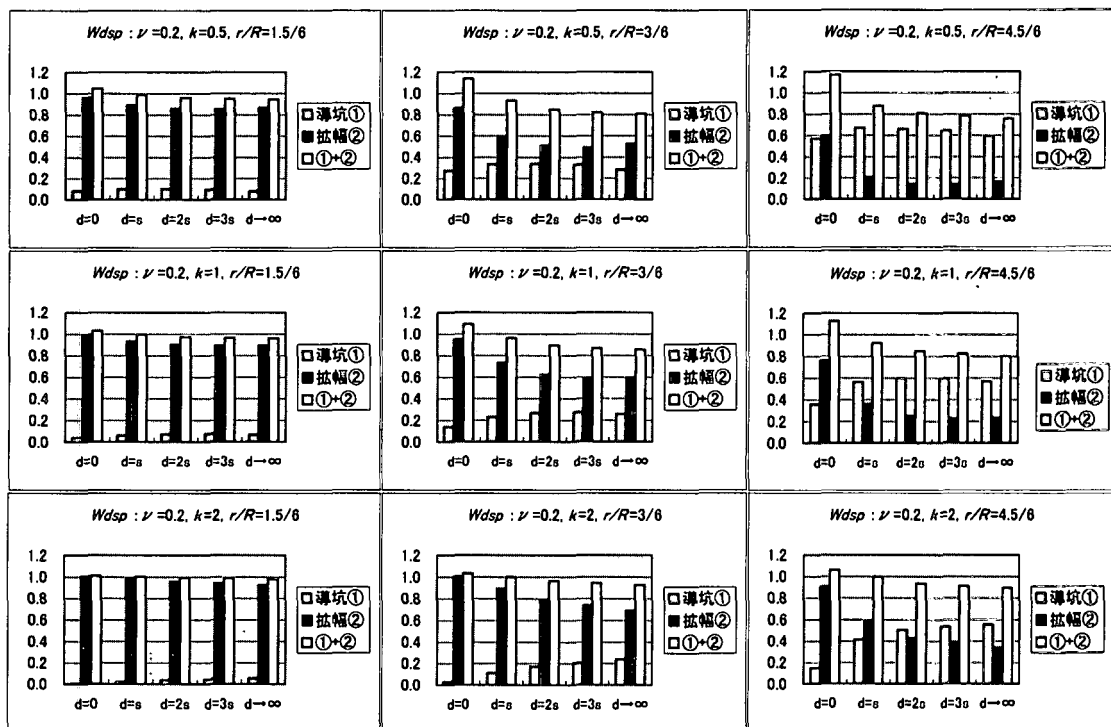
(2) 切羽間距離 d の影響

切羽間の距離 d を長くにとって 2 つの切羽をできるだけ離れた方が結果的に W_{dsp} は小さくなり、有利になる。全断面一括掘削と比べて分割掘削の場合には、先進掘削した導坑部の外側をその後すぐに拡幅掘削する場合 ($d = 0$) にのみ W_{dsp} は大きくなるが、常に導坑部が先進していて拡幅掘削が後方から追いかけるような場合 ($d = 1.5, 3.0, 4.5, \infty$) には W_{dsp} は d が長くなるとともにより小さくなっている。

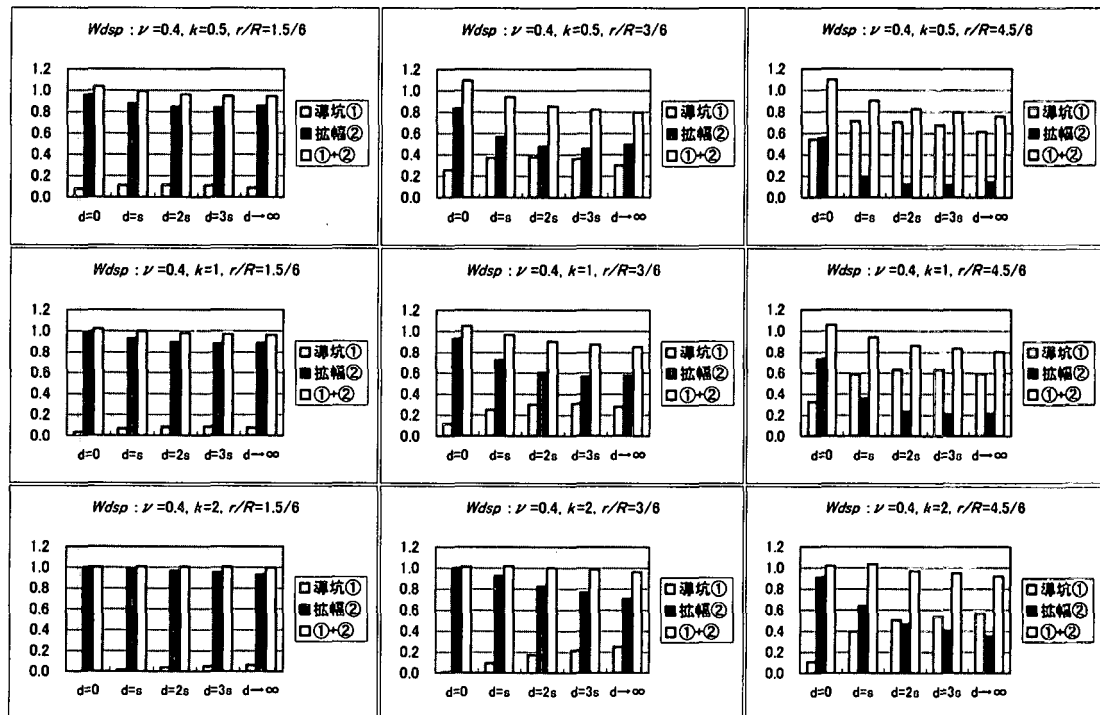
(3) トンネル軸方向の初期地圧比 k の影響

トンネル軸方向初期地圧 σ_{z0} が大きくなり、トンネル横断面内の径方向初期地圧 σ_{r0} に対する初期地圧比が $k = \sigma_{z0} / \sigma_{r0} = 0.5, 1.0, 2.0$ と大きくなるとともに導坑半径 r の相違 (小→大) や切羽間距離 d の相違 (小→大) による W_{dsp} の変化の傾向 (大→小の減少傾向) は同じであるといえるが、その変化の程度が小さくなっている。すなわち、トンネル軸方向初期地圧比 k が大きいほど W_{dsp} の変化の程度が小さくなっている。

導坑掘削時①には、軸方向初期地圧比 $k = 0.5$ では切羽間距離が $d = s$ か $2s$ で $W_{dsp}^{\textcircled{1}}$ は最大になるような上に凸の傾向、 $k = 1$ (静水圧的な初期地圧) では切羽間距離 $d = 3s$ 前後で最大になるような上に凸の傾向、 $k = 2$ では切羽間距離 d が大きくなるとともに単調増加するような傾向となり、 k によって $W_{dsp}^{\textcircled{1}}$ の増減傾向が変化



(a) 地山ポアソン比 $\nu=0.2$



(b) 地山ポアソン比 $\nu=0.4$

図-5 円形トンネル2分割(中央導坑-拡幅)掘削時の総散逸エネルギー量(全断面一括掘削に対する比率)

する。しかし、拡幅掘削分も加えた総量(①+②)である W_{dsp} は k にはかかわらず常に単調減少傾向を示す。

(4) 地山のポアソン比 ν の影響

地山のポアソン比を $\nu=0.2, 0.4$ と 2 ケースで比較したが W_{dsp} の変化の傾向は同じである。全断面一括掘削の場合に対する W_{dsp} で比率の変動の程度でみると、 $\nu=0.2$ の方がやや W_{dsp} のケース間の相違量が大きくなる。ポアソン比 ν が大きくなるとともに掘削に伴う地山の体積変化が小さくなり、体積一定での変形状態になるが、このことが掘削時のエネルギー解放量の解析条件変化による相違を小さくしたものと類推できる。

(5) その他の影響

中央導坑を TBM など機械掘削する場合には準静的な除荷になるため、散逸エネルギーは発生せず地山へ影響を及ぼさなくなる。TBM で導坑を先進掘削し、後方から発破で拡幅掘削するような場合を想定すると、2 分割掘削時の合計である散逸エネルギー W_{dsp} (①+②) は拡幅掘削分②だけになる。すなわち、FEM 解析結果から導坑分①を除いた拡幅分②だけで評価すればこの場合にも掘削手順の比較評価が可能になる。

TBM 導坑先進-発破拡幅掘削の 2 段階分割掘削法においても、TBM 導坑を先に全区間掘削完了するかできるだけ先行させた方がよく、導坑断面積は大きい方がよい。また、 W_{dsp} の比率でみると、そのケース間の相違はトンネル軸方向地圧が大きくなると差がなくなって小さくなり、ポアソン比が大きくなっても小さくなる傾向を示している。留意点として、トンネル径方向の初期地圧が大きく、トンネル軸方向初期地圧が小さいような地山におけるトンネル工事の場合には、ケース間で W_{dsp} の相違が大きく現れることから、さらに詳細な検討をしてエネルギー論的にトンネル掘削地山を評価する価値が大きくなるものと思われる。

(6) まとめ

- ・先進導坑の断面積は現実的に可能な範囲内でできるだけ大きい方がよい。
- ・先進導坑切羽と後続拡幅切羽の間の距離はできるだけ長くして離れた方がよい。
- ・トンネル軸方向の初期地圧は相対的に小さい場合の方が、また 地山のポアソン比も小さい場合の方が掘削手順による散逸エネルギーの相違やその影響が大きく現れる。
- ・先進導坑を TBM などの機械掘削として拡幅掘削のみを発破掘削とした場合も、拡幅掘削分だけの散逸エネルギー量で比較できるが、導坑・拡幅ともに発破掘削である場合の総量比較の結果とほぼ同じ傾向になる。

5. あとがき

トンネル掘削時の初期地圧解放において、その急速除荷に伴う地山の動的挙動を評価するため、従来の静的な掘削解析に付加して地山エネルギー収支も求め、地山エネルギー解放量の相違に着目した掘削手順の比較例を示した。掘削時の散逸エネルギー量を算出することで定量的な比較評価が可能になったが、実際のトンネル工事中のゆるみ現象の各種調査^{6), 7)}等から、その妥当性や検証手段を検討することが今後の課題である。

参考文献

- 1) 西村正夫, 蛭子清二, 浅野 剛: トンネル掘削時の地山エネルギー解析と評価, 奥村組技術研究年報, No.23, pp.31-36, 1997.
- 2) 西村正夫, 蛭子清二, 浅野 剛, 斎藤敏明: トンネル掘削時の地山エネルギー収支の解析, 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: トンネル掘削時の散逸エネルギー解析, 土木学会第 53 回年次学術講演会概要集, Ⅲ-B81, pp.162-163, 1998.
- 4) 西村正夫, 北角哲, 棚山長一: 空洞掘削に伴う球状振源からの地山振動発生・伝播解析, 奥村組技術研究年報, No.26, pp.13-18, 2000.
- 5) 西村正夫, 増井 仁, 北角 哲, 斎藤敏明: トンネル掘削解析の散逸エネルギー評価, 土木学会第 30 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.1-7, 2000.
- 6) 蛭子清二, 浅野 剛, 西村正夫, 牧野卓三, 大塚勝司: 山岳トンネルにおけるゆるみ現象の調査-舞子トンネル中南工事の分析例-, 奥村組技術研究年報, No.22, pp.19-24, 1996.
- 7) 西村正夫, 蛭子清二, 岩垣富春, 斎藤敏明: 山岳トンネルにおけるゆるみ現象の調査-舞子トンネル中南工事の分析例-, 土木学会第 28 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.149-153, 1997.