

Ⅲ - B81

トンネル掘削時の散逸エネルギー解析

（株）奥村組 技術研究所 正会員 西村 正夫，正会員 増井 仁

1. はじめに

トンネル掘削後の地山安定性は従来応力，ひずみ，変位を用いた安全率，地山破壊規準への接近度，塑性域やゆるみ域の大きさ程度などすべて静的な釣合い問題として評価されてきた。しかし，地山掘削は本来動的な問題であるのに発破掘削時のような掘削予定面での急速除荷によって生じる地山振動など運動エネルギーの影響は考慮されてこなかった。この運動エネルギーは減衰して消散する過程で周辺地山へ何らかの悪影響を及ぼすと考えられる。これを散逸エネルギー W_{dsp} と呼称し，地山掘削時のエネルギー収支解析から掘削後の地山エネルギー状態を分析し， W_{dsp} 最小化に着目して掘削工法や地山安定性の新しい比較評価を試みる。

2. 散逸エネルギー解析

トンネル掘削によって，地山全体がトンネル中心に向かって移動することになり，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。弾性地山では，この W_{ext} の半分は弾性ひずみエネルギー W_{els} として地山に誘起蓄積される。

残り半分はエネルギー解放され，地山を振動させ，散逸エネルギー W_{dsp} として最終的には消散する¹⁾。この地山振動は，図-1に示すように壁面近傍に損傷（過度の応力集中や引張り応力発生によるすべりやクラック発生など）を与えたりしながら，熱エネルギーや表面エネルギーに変わり，やがて地山全域へ伝播し，減衰する。 W_{dsp} は地山が降伏して塑性流動する場合の塑性ひずみエネルギー W_{pls} とは異なり，静的な釣合いでは考慮できない動的なエネルギーであり，地山掘削時に解放される。掘削解析で算出される，掘削予定面での掘削（応力解放）相当外力とこれに基づく掘削過程での壁面変位挙動の関係から全掘削面での積分によって掘削仕事（解放エネルギー）が求められるため， W_{dsp} は従来の静的な掘削解析からも容易に算出できる^{2),3)}。

3. 弾性地山，弾塑性地山のエネルギー収支

弾性地山内に円形トンネルを同心円状に3段階に分割して掘削する場合について，エネルギー授受とその地山分布の関係を図-2に示す。一括掘削に比べて分割掘削では，導坑など先行掘削によって後続切上げ掘削部の地山

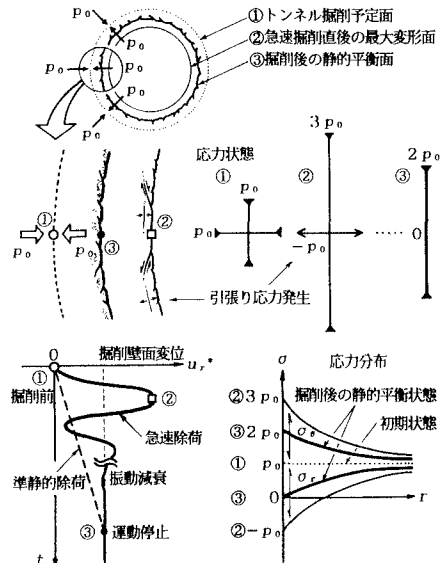


図-1 トンネル掘削時の準静的除荷と急速除荷

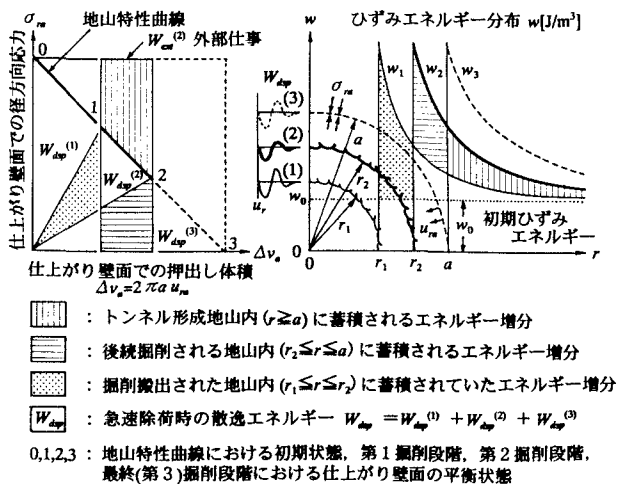


図-2 3分割掘削第2段階における地山特性曲線とひずみエネルギー分布の関係（弾性地山トンネル）

キーワード：掘削解析，地山エネルギー収支，散逸エネルギー，急速除荷，掘削手順比較

連絡先：〒300-2612 茨城県つくば市大砂 387 （株）奥村組技術研究所 TEL 0298-65-1521 FAX 0298-65-1522

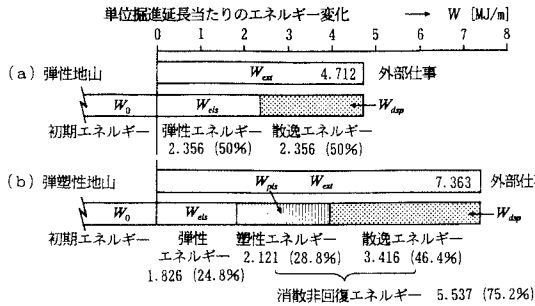


図-3 円形トンネル掘削による地山エネルギー収支

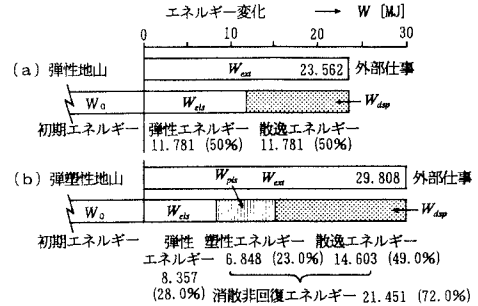


図-4 球形空洞掘削による地山エネルギー収支

は初期状態より大きなひずみエネルギーを蓄積した状態で掘削搬出されることになり、逆にその分だけ運動エネルギーである W_{dsp} の総和は小さくなる。これは先行掘削によって応力やエネルギーがトンネル近傍に再配分され、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。一方、地山内に円形トンネル、球形空洞を掘削したときの地山エネルギー収支について、トンネル半径 $a=5\text{m}$ 、等方初期地圧 $p_o=5\text{MPa}$ 、地山のヤング率 $E=1\text{GPa}$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ 、一軸強度 $S_c=2.5\text{MPa}$ 、内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ である同一条件での算出例を図-3、4に示す。弾塑性地山でも W_{dsp}/W_{ext} は弾性地山と同様 $1/2$ に近い大きな比率になる。球形空洞の地山強度によるエネルギー変化を図-5に示す。地山強度の低下とともに W_{dsp}/W_{ext} は減少し、塑性域の進展によって W_{plis}/W_{ext} は急激に増大する。

4. 結果とまとめ

- ①地山掘削時、急速除荷となる発破掘削に比べてTBMなど機械掘削では準静的な除荷に近いと推定され、 W_{dsp} は小さい。これは先行機械切削によって後続切削予定の地山部に逐次エネルギーが流入蓄積され、初期状態より常に大きなひずみエネルギーを内包した状態で地山が連続掘削され、ずり搬出されることになるからである。
- ②地山掘削時の W_{dsp} は分割した多段階掘削や先受けなど支保の早期打設によって小さくできる。これは掘削予定地山部にできる限り地山エネルギーが蓄積されるような掘削手順とするか、支保部材に分担蓄積できるような打設手順とすることで、散逸エネルギーおよび最終的なトンネル形成地山への蓄積エネルギー負担が軽減される。
- ③散逸エネルギー解析は従来の解析では区別できなかった加背割り、掘削順序など掘削工法手順の相違、支保効果の相違を地山エネルギー授受の観点で比較分析ができ、地山全体のマクロなエネルギー指標で選択判断ができる。従来の有限要素法などによる静的な掘削解析に付加して計算すれば、各解析モデル間の掘削前後における地山エネルギー状態の変化、散逸エネルギーの増減や大きさ比較が可能になり、掘削法や施工法を解析的に比較検討できる。

参考文献 1)Jaeger, J. C. and Cook, N. G. W.: *Fundamentals of Rock Mechanics*, 3rd ed., Chapman and Hall, London, pp.476-482, 1979.
2)西村, 蛭子, 浅野: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.
3)西村, 蛭子, 浅野, 斎藤: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, 85, pp.461-466, 1998.

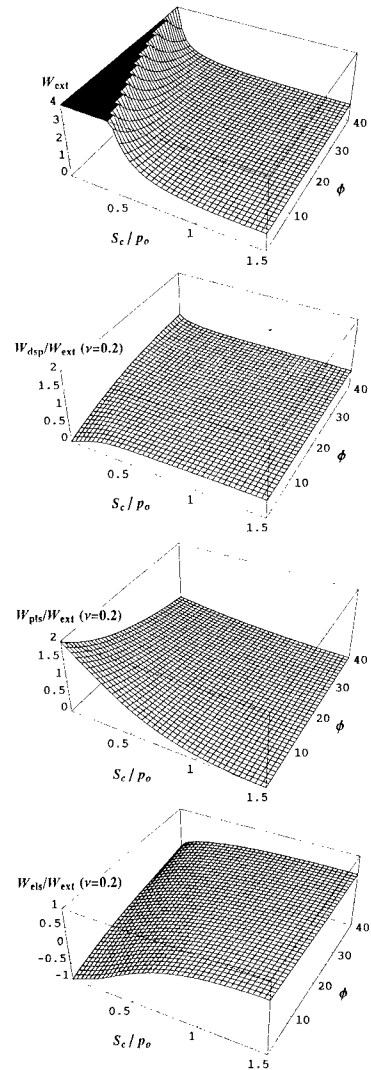


図-5 球形空洞の地山エネルギー変化