

散逸エネルギーによるトンネル掘削手順の新しい評価法

西村正夫* 増井 仁** 北角 哲***

1. まえがき

トンネル掘削後の地山安定性が検討されるとき、応力、ひずみ、変位を用いた安全率、破壊規準への接近度、塑性域やゆるみ域の大きさや程度といった地山状態のさまざまな評価はすべて静的な釣合い問題とみなして検討されてきた。新たに地山掘削時のエネルギー収支に着目して、従来の静的解析では無視されてしまう地山解放エネルギーの視点で解析評価することを試みてきた^{1),2),3)}。地山を発破掘削する場合、掘削面において潜在地圧の急速除荷に伴って発生する地山振動などの動的な挙動⁴⁾に着目し、その最小化を図ることのできる掘削手順の工夫評価を有限要素解析例で示した^{5),6)}。掘削手順が異なっても線形弾性解では静的には最終状態は同一結果になるが、動的に解放されるエネルギーの総量は異なるため、この相違するエネルギー量から比較評価が可能になる。解析対象への初期地圧や重力などによる外部仕事(エネルギー流入)がない場合には、掘削搬出したずりに蓄積されていたひずみエネルギーの総量と、地山振動を引起すエネルギー解放の総量との和は掘削手順が異なっても一定になるところが本解析上のキーポイントになる。

2. 地山エネルギー収支と散逸エネルギー

トンネルや地下空洞などを構築するために地山を発破掘削したとき、地山のエネルギー流出と流入に伴うエネルギーの授受は図-1に示すような収支図で表せる。掘削によって地山が変形した結果、地山内に誘起され蓄積されて増加するひずみエネルギーと同時に、掘削自由面で潜在する初期地圧の急激な解放によって地山振動が発生(最終的に地山内部へ伝播して消散)した結果、地山からの解放エネルギーが存在する。流出するエネルギーにはさらに地山掘削で系外へ搬出したずりに内在していたひずみエネルギーが含まれる。ここでは地山掘削時の動的挙動として地山振動を引起して消散する解放エネルギーを散逸エネルギーと呼称する。散逸エネルギーの算出は掘削自由面での解放地圧(掘削相当外力)とその押し出し変位増分の積(ベクトル内積)を全変形過程で積分してから全掘削面での総和(面積分)をとれば求められる。

掘削時の外部仕事に重力と潜在初期地圧を考えると、

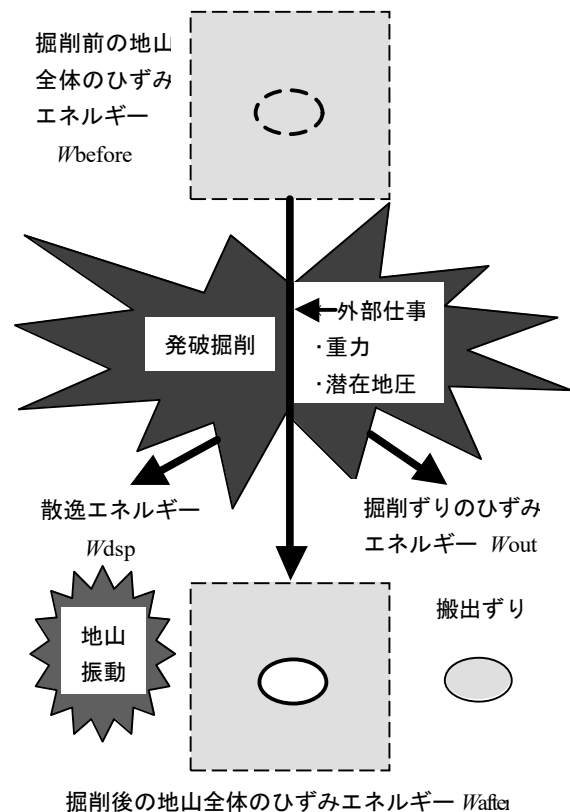


図-1 発破掘削前後の地山エネルギー収支

重力については、掘削によって地山が重力の作用方向と同じ向きに変位(沈下)すれば対象系内へのエネルギー流入になって地山に蓄積され、重力と逆向きに変位(隆起)すればエネルギー流出になって地山から解放される。一方、潜在初期地圧については、掘削によって掘削空洞へ向かって地山全体が変位することから一般にエネルギー流入になって地山に蓄積される。発破掘削前後の地山のエネルギー収支は次式のように表せる(図-1参照)。

$$W_{before} + W_g + W_{str} = W_{after} + W_{out} + W_{dsp}$$

ここに、

W_{before} : 掘削前の地山全体のひずみエネルギー

W_g : 掘削時に重力がなす外部仕事(+:沈下、-:隆起)

W_{str} : 掘削時に潜在初期地圧がなす外部仕事

W_{after} : 掘削後の地山全体のひずみエネルギー

W_{out} : 掘削ずりに蓄積されていたひずみエネルギー

*技術課 **土木研究室 ***本社情報システム室

W_{dsp} : 掘削面の潜在地圧解放による散逸エネルギー
 なお、重力を考慮せず、外部境界をすべて変位拘束してエネルギー流出入をなくすと $W_g = W_{str} = 0$ であり、掘削前後の地山内エネルギーの増加は、粘性他の時間依存性によるエネルギー消費を無視すると次式ようになる。
 $\Delta W = W_{after} - W_{before} = -W_{out} - W_{dsp} = \Delta W_{els} + \Delta W_{pls} < 0$
 ここに、 ΔW_{els} : 弾性ひずみエネルギーの増加分 (< 0)
 ΔW_{pls} : 塑性ひずみエネルギーの増加分 (≥ 0)

3. 地山掘削時の動的挙動とゆるみ現象

地山掘削時の動的挙動とこれに起因したゆるみ現象について要約する。機械掘削では連続して逐次切削を繰返す機械自身が地山の解放地圧に対して反力役を受け持ち、急激な地圧解放にならず、準静的除荷とみなせる。一方、発破掘削では地山内部まで一括して爆破するため、掘削予定面が一瞬にして自由面となり地山は爆圧で圧縮後、反力を失い自由振動を引起し急速除荷になるとみなせる。このように発破掘削では地山振動が発生し⁴⁾、図-2に示すように発破の爆圧によって地山を圧縮する方向の押しの波に、掘削自由面での潜在初期地圧の解放に伴う地山膨張方向の引きの波が加わり、2つに起因した地山振動が発生することになる。地山振動は急激に減衰するとともに地山内部へ伝播して消散する。掘削面近傍で過渡的に引張りひずみや大きな応力集中が動的に発生することから近傍地山のゆるみ現象に繋がる誘因と考えられる。

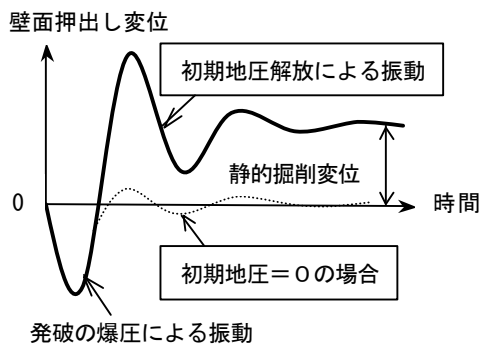


図-2 発破掘削時における掘削壁面の動的挙動

4. トンネル掘削理論解からの知見

前報¹⁾で示した弾性および弾塑性地山のトンネル掘削解析の理論解から得られる知見として、静水圧的な初期地圧の下で、2次元円形断面のトンネル掘削で同心円状の分割掘削における最適分割は掘削断面積比で与えられる。同様に、3次元球形空洞でも同心球状の分割掘削の最適分割は掘削体積比で与えられ、ともに同一値になる。各分割掘削段階での掘削量比で示すと次のようである。

2分割で 1:1 (=0.5:0.5)、

3分割で 5:5:6 (=1:1:1.2 =0.3125:0.3125:0.375)、
 4分割で 445:445:534:624 (=1:1:1.2:1.4022...
 =0.2172...:0.2172...:0.2607...:0.3046...)

これらの値は理論的に最適な分割掘削比として、有限要素法による数値解析結果を分析する上での目安になる。

5. 有限要素法によるトンネル掘削の数値解

トンネル掘削解析における散逸エネルギーの試算結果として、いくつかの2次元および3次元有限要素解析例からその概要を要約して解析結果をまとめる。

5.1 2次元解析例 1

2次元平面ひずみ場のトンネル掘削を対象に掘削手順としては図-3に示す基本モデルについて散逸エネルギー解析⁵⁾を実施した。解析領域は図-4に示すように 100 m×100 mの地山内に 12 m×12 mの正方形断面トンネルを鉛直・水平方向に2~4分割して掘削するモデルである。掘削手順モデルは加背割りと掘削順序の異なるモデルA, B, C, D, E, F, G, b, c, d, e, f, gの13通りである。大文字は鉛直縦割りの、小文字は水平横割りの加背割りモデルを示し、対称性から上下および左右の区別はなく同一モデルになる。また、Aは全断面一括掘削モデルである。解析条件は表-1に示すように水平・鉛直方向の初期地圧比である側圧係数 k [MPa/MPa] と地山ポアソン比 ν の組み合わせの内3ケースだけを示す。なお、地山ヤング率は $E=1$ [GPa] で一定とした。

解析結果は図-5に示すように、分割掘削の各段階における散逸エネルギー量の総和(同図で白抜き棒の積み棒)の小さい方が有利であり、要約すると次のようである。

鉛直と水平分割について、分割断面形状の縦横比が初期地圧の鉛直・水平地圧の大きさの比に近いほど、総散逸エネルギー量は小さくなる傾向を示す。すなわち、掘削面近傍全周の応力集中が平均化され小さくなるような最適な断面形状と同じ傾向を示し、結果も符合している。

地山ポアソン比については、小さくなるに従って、掘削手順の相違による総散逸エネルギー量の変化が大きくなる。逆に、ポアソン比が大きくなり 1/2 に近づくに従って、掘削による地山体積変化がなくなって形状変化のみになり、総散逸エネルギー量の変化も小さくなる。

内側・外側の掘削順序については、原則として、先行掘削後に掘削面近傍に蓄積されたひずみエネルギーを含む未掘削地山部分を次に掘削すると、多くのひずみエネルギーが掘削ずに含まれて搬出され望ましい。しかし、

表-1 初期地圧設定による解析ケース

| 要因 | ケース 1 | ケース 2 | ケース 3 |
|-----------------|----------|--------|----------|
| 初期地圧比(側圧係数) k | 2.5 / 10 | 5 / 10 | 7.5 / 10 |
| 地山ポアソン比 ν | 0.2 | 0.3333 | 0.4286 |

[注] 2方向の水平初期地圧を等しくする条件設定: $\nu=k/(1+k)$

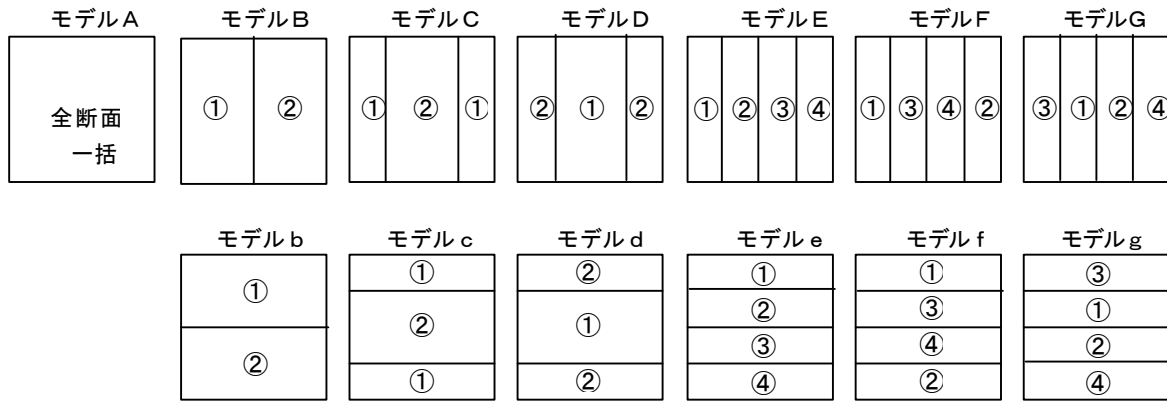


図-3 トンネル掘削手順の基本モデル(①, ②, … : 掘削順序)

今回の掘削解析例では、地圧に依存する最適分割の掘削断面形状とも絡んでその影響が必ずしも顕著には現れず、逆の結果もあった。さらに詳細な比較解析が必要である。

断面分割数については、分割した断面形状が初期地圧比に応じた望ましい形状ならできるだけ分割数を増やす方が総散逸エネルギー量は小さくなる。結果的に、理想的な断面形状に近い分割断面形状にすることが重要であり、分割数を単に増やすだけではその減少効果は小さい。

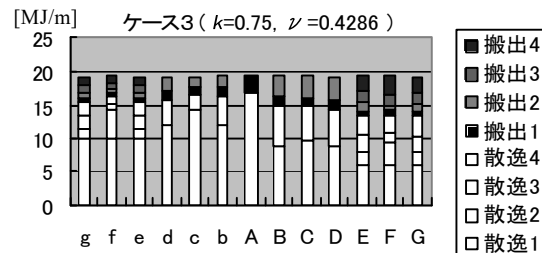
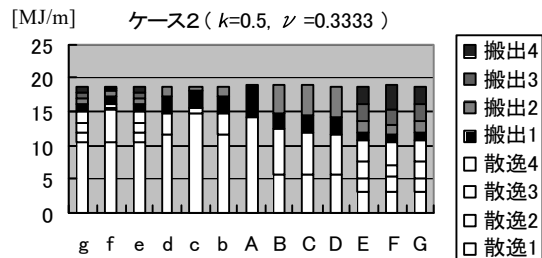
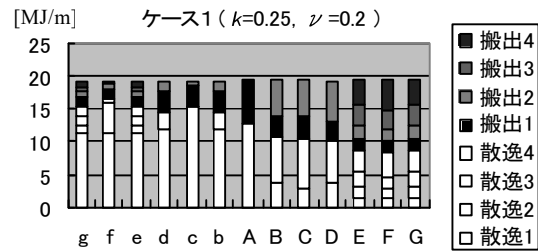
エネルギー収支の相補規準について、地山掘削時に重力や初期地圧による外部仕事がなく、総散逸エネルギー量と搬出ずりの総ひずみエネルギー量の総和は一定である(図-5参照)。すなわち、総散逸エネルギー量の最小化規準はずりの総ひずみエネルギー量の最大化規準と置き換えても同じ意味であることが数値的に確認できた。

5.2 2次元解析例2

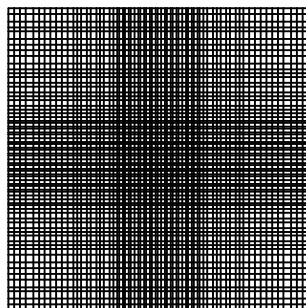
2次元平面ひずみ場のトンネル掘削を対象にした基本モデルの縦・横分割などを組み合わせた応用として、加背割りと掘削順序を変えて設定した種々の掘削手順 39モデル例についての散逸エネルギー解析の結果を示す。解析ケースは解析例1と同一条件であり、 $k=0.25, 0.5, 0.75, 1$ の各初期地圧条件について比較解析を行った。

解析結果の一例として、 $k=0.25$ の場合の散逸エネルギー算出値を一覧にして表-2に示す。分割掘削の各段

階(順序①, ②, ③, ④)における散逸エネルギー量を求め、その累計である総散逸エネルギー量の大きさを基準にして、小さい値の掘削手順モデルから昇順に列挙した一覧として、加背割りとその掘削順序のモデル図を添えている。側圧係数 k が異なると順位も変動するので他の解析結果すべての傾向もまとめて要約すると次のようである。



横軸は解析モデル名を示し、縦軸は総散逸エネルギー量と総搬出ずりエネルギー量を各掘削順(1, 2, 3, 4)に積み棒で表した
図-5 2次元解析結果の総散逸エネルギー量比較

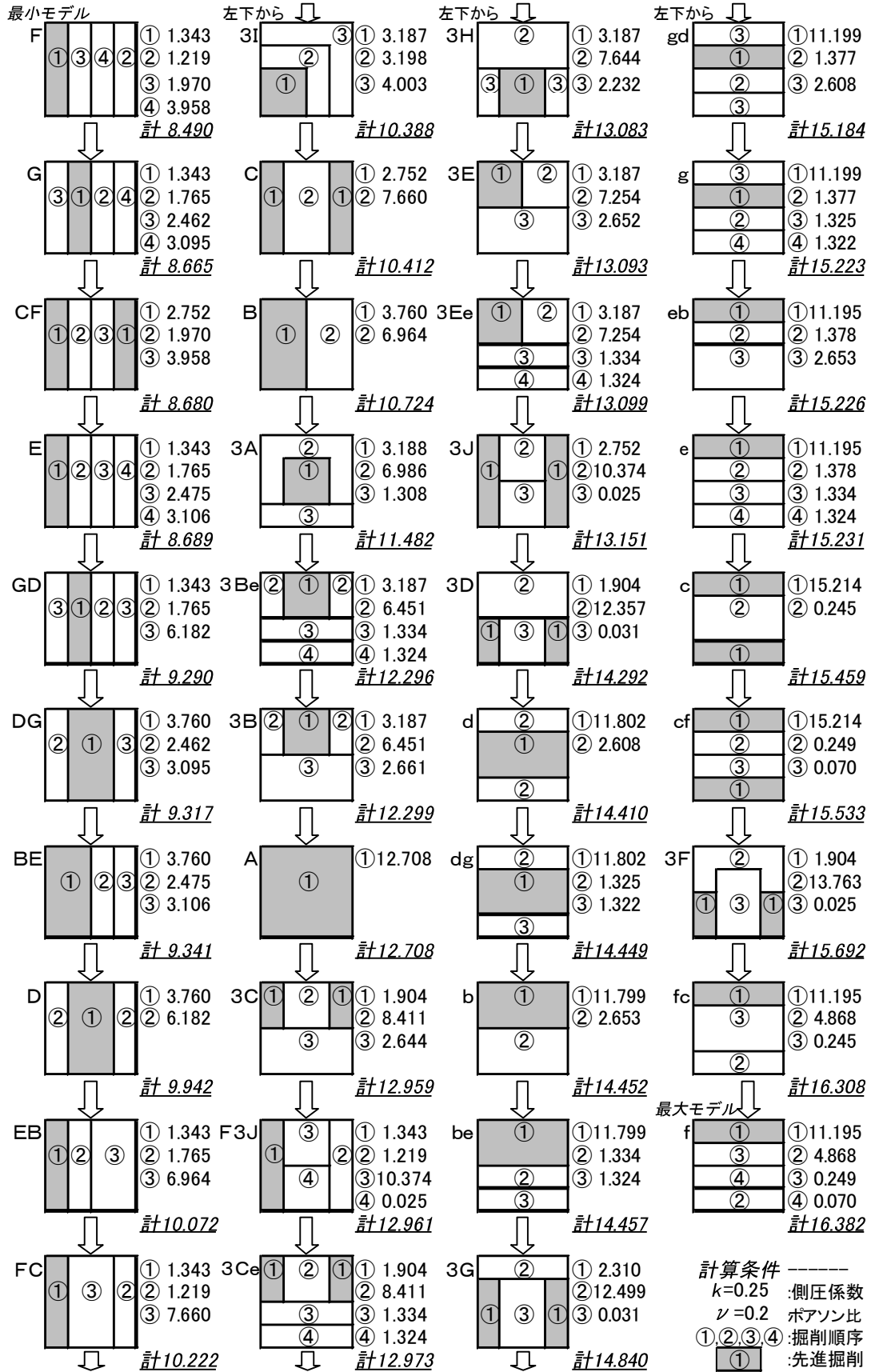


外部境界条件
: ローラー支承
メッシュ間隔
: 1m/1.5m/2m

解析領域 : 100m×100m、トンネル断面 : 12m×12m

図-4 有限要素解析の要素分割

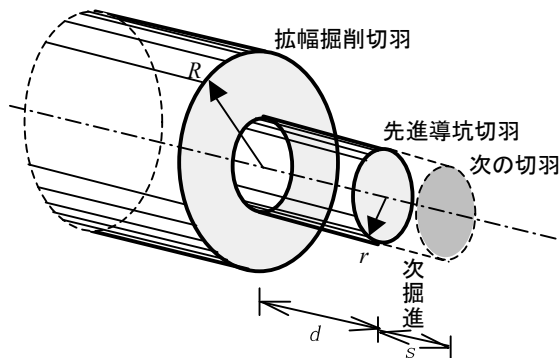
表-2 総散逸エネルギー量 W_{dsp} [MJ/m]の算出値一覧(2次元有限要素法によるトンネル掘削手順の評価例)



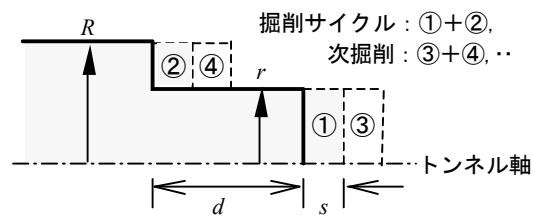
初期地圧比(側係数) k によって、最適な加背割りや掘削手順の優劣が異なってくる。すなわち、単軸的な初期地圧になると、大きな地圧方向に沿って切断分割するような加背割りが有利になり、この地圧に直交する方向に切断分割するような加背割りは不利になる。初期地圧の大きさの比と分割断面形状の比が同じになるような場合が理想的であり、比が逆の場合は分割するとかえって不利になり、分割せず全断面一括掘削の方が有利になる。

静水圧的な等方等圧の初期地圧になると、分割するに従って総散逸エネルギー量が小さくなり、かつ分割断面の内側から外側に向かって掘削する順序が有利になる。

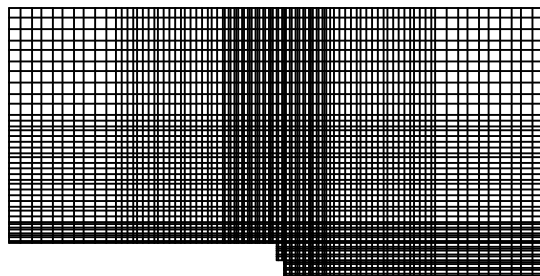
トンネルで現実実施されている加背割りでは、上半部の中央導坑先進一両側拡幅後、下半部のベンチ掘削という掘削手順が比較的有利になった。ただし、平面ひずみ問題とした解析のため、部分掘削はすべて全線掘削完了後に次の掘削段階へ進む手順になる。3次元解析で切



(a) 中央導坑先進一円環状拡幅掘削モデル



(b) 導坑先進一拡幅の掘削サイクル



上・左・右境界：ローラー支承、メッシュ間隔：0.5m/1m/2m

(c) 軸対称有限要素解析の要素分割

図-6 3次元解析例のトンネル掘削モデル

表-3 分割掘削モデルの変化要因の設定

| 掘削モデルの要因 | 各要因の設定値 |
|------------------|----------------------------------|
| 中央導坑断面の半径 r | 1.5m / 3m / 4.5m |
| 導坑・拡幅の2切羽間距離 d | 0m / 1.5m / 3m / 4.5m / ∞ |
| トンネル軸方向初期地圧比 q | 0.5 / 1 / 2 |
| 地山のポアソン比 ν | 0.2 / 0.4 |

[注] 全断面掘削モデルの要因設定：初期地圧比とポアソン比

羽の影響を考慮して解析すると、結果はやや異なる。

5.3 3次元解析例

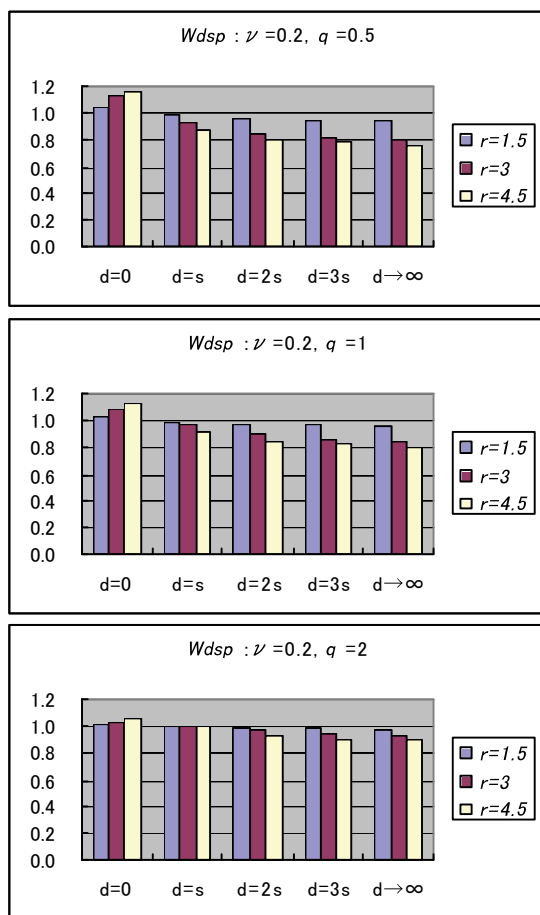
円形断面トンネル(半径 $R=6\text{m}$)を図-6(a)に示すように中央導坑先進一拡幅の同心円状に2分割で掘削する場合について、トンネル軸対称モデルの3次元散逸エネルギー解析⁶⁾を実施した。切羽の影響として、導坑の大きさ、複数切羽間距離の相互作用、トンネル軸方向と横断面方向の初期地圧の大きさ、地山ポアソン比の影響に着目して、その変化要因を表-3に示すように設定した。解析対象は半径50m、長さ100mの円柱状地山中に掘削される半径 $R=6\text{m}$ の円形断面トンネル(図-6(c)参照)であり、解析結果は図-6(b)に示すように1サイクル分と比較した。分割掘削モデルはトンネルの導坑半径 r を3種類、導坑・拡幅の2切羽間距離を5種類、トンネル軸方向の横断面方向に対する初期地圧比 q を3種類、地山ポアソン比 ν を2種類として組み合わせ、 $3 \times 5 \times 3 \times 2 = 90$ モデルになる。全断面一括掘削モデルは q と ν の組み合わせで $3 \times 2 = 6$ モデルになる。

解析結果の一例として $\nu=0.2$ の場合を図-7に示す。その他の結果も含めて全体を要約すると次のようである。

導坑断面積が小さいと総散逸エネルギー量に占める導坑掘削分の割合も小さく導坑の有利さは出ない。逆に、導坑断面積が大きくなると総散逸エネルギー量そのものが小さくなり有利に働くとともに、導坑掘削分の全体に占める割合も大きくなり導坑掘削の影響が支配的になる。

導坑切羽と拡幅切羽間の距離は離れた方が総散逸エネルギー量は小さくなり有利になる。ただし、導坑切羽と拡幅切羽に離隔距離を設けず導坑掘削後すぐ同じ進行長分の拡幅掘削をするような場合($d=0$)は、全断面一括掘削に比べると不利になっている。これは拡幅予定部の地山が先行した導坑掘削でエネルギー解放され、ほとんど無応力状態でゆるんでおり、搬出ずりになる拡幅予定部の地山にはひずみエネルギーがほとんど蓄積されていない。すなわち、その分が散逸エネルギー増加に繋がるため、不利になっている。この場合、拡幅予定部は掘削してもしなくても力学的変化がほとんどないことになる。

トンネル軸方向の初期地圧が相対的に大きくなると、総散逸エネルギー量に占める拡幅掘削分の散逸エネルギーの割合が大きくなるが、総散逸エネルギー量の変化は小さくなる。すなわち、軸方向初期地圧が大きい場合には、拡幅掘削の影響が支配的になることが特徴である。



横軸は2切羽間距離 d を、縦軸は総散逸エネルギー量を全断面一括掘削に対する比率で表した (s : 一掘進長, r : 導坑半径[m])

図-7 3次元解析結果の総散逸エネルギー量比較

しかし、総散逸エネルギー量の相違や変化は小さくなるため、掘削手順を工夫する余地は少ない。逆に、トンネル軸方向の初期地圧が小さいときに、総散逸エネルギー量の相違や変化が大きくなり工夫の余地がでてくる。

ポアソン比については2次元解析の場合と同様な傾向を示し、ポアソン比が小さいほど各モデル間での総散逸エネルギー量の相違や変化が大きくなり、逆にポアソン比が大きくなって0.5に近付くとその変化は小さくなる。

5.4 その他解析例と課題

重力場においては、地山エネルギー収支式に重力による仕事の項も加わって複雑化し、掘削手順の優劣結果も掘削箇所のかぶり厚さによって変動する。掘削による地山全域へのエネルギー流入や流出を伴うため、トンネル掘削面近傍だけでなく、地山全体への影響や地表面沈下も同時に考慮したエネルギー収支の検討が必要になる。

ロックボルトや吹付けコンクリートなどの支保効果は、弾性解析の範囲の試算例ではエネルギー変化への影響が小さいため、支保効果の相違分析には適さなかった。相対的にエネルギー変化への影響が大きくなる非線形や弾塑性地山における支保解析の場合に再検討したい。

エネルギー収支の中で、地山が降伏して生じる塑性ひずみエネルギー W_{pls} と急速除荷時に地山振動を引起す運動エネルギーである散逸エネルギー W_{dsp} とは、ともに非回復のエネルギーとして直接的にまた間接的に掘削近傍地山を損傷して緩めることに繋がると考えられる。ともに小さい方が望ましいが、塑性ひずみエネルギーについては、地山が降伏しても安定していて地山強度や剛性の劣化がさらに進行しないようならば問題視されない。一方、散逸エネルギーについては、その地山振動がどの程度地山のゆるみに繋がるか不明であるが、悪影響を及ぼす可能性は十分考えられる。量的には当然小さい方が望ましいが、堅硬な地山ではこのような地山振動ではほとんど影響が現れない場合もあり、発破掘削時の地山振動の影響について今後さらに詳細な調査が必要である。

6. あとがき

総散逸エネルギー量によるトンネル掘削後の地山状態の比較評価は、逐次掘削解析の各過程において蓄積および解放される各エネルギー量を算出して追加出力するだけで従来と同一手順で解析可能になった。従来の解析と並行して、総散逸エネルギー量による比較評価を積み重ねることで散逸エネルギー最小化基準の妥当性や実務問題への適応性を検証し、従来の評価値とも比較対照しながら分析を進めたい。また、地山掘削のエネルギー評価は、スカラー量による比較のため容易になる反面、検証には地山のエネルギー変化に起因する地山振動やゆるみ状態の計測が困難であるとはいえ、重要になってくる。新しい柔軟な発想でさらに応用展開をはかりたい。

【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回年次学術講演会講演概要集、III-B81, pp.162-163, 1998.
- 4) 西村正夫、北角 哲、初山長一、「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) 西村正夫、増井 仁、「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」、土木学会31回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、pp.211-215, 2001.