

穿孔エネルギーを活用したトンネル掘削解析の高精度化検討

鹿島建設(株) 正会員 小泉 悠 福島大介 宮石雅子 升元一彦 宮嶋保幸 ○稲葉武史

1. はじめに

山岳トンネル工事において、コンピュータジャンボの普及に伴い、ドリルジャンボの穿孔に要するエネルギー（穿孔エネルギー、図-1）が座標とともに記録され、地山性状の評価等への活用が進められている。例えば、統計解析によりコンター表示された穿孔エネルギー分布を工事関係者で共有し、施工の安全性・合理性の向上に結び付けた実績が報告されている¹⁾。本報では、トンネル掘削の数値シミュレーションの高精度化を目的に、切羽崩落が発生したトンネルを対象とし、穿孔エネルギー分布を数値解析のモデル作成に活用して地山変位等の解析を行った検討事例について報告する。

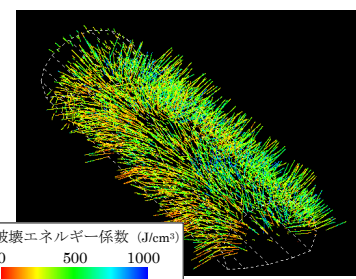


図-1 穿孔エネルギーデータ（生データ）

2. 穿孔エネルギーの解析活用フロー

穿孔エネルギーの解析活用フローを図-2に示す。コンピュータジャンボにより取得された穿孔エネルギーを統計解析（データの内挿および外挿）し、作業前に工事関係者で穿孔エネルギー分布を確認しながら、より安全かつ合理的な施工に向けた討議がなされるようになってきた。ただし、穿孔エネルギー分布は、定量的・客観的なデータであるが、工事関係者の施工判断の精度が十分でなかったり、時機を逸する可能性が考えられる。そのような場合、切羽崩落等の施工の安全性に重大な影響を及ぼす事象が発現したり、またそれを回避するために過度に高い安全率で施工が進められることが課題となる。そこで、より合理的で精度の高い施工判断ができるよう、穿孔エネルギー分布を取り込んだトンネル掘削解析技術の開発に着手した。図-2に示すように、作成したメッシュを統計解析処理ソフトで読み込み、穿孔エネルギーの内挿および外挿処理を行った。計算された要素ごとの穿孔エネルギーを解析物性値へ変換し、有限要素解析にて各要素に割り当て、トンネル掘削解析を実施した。

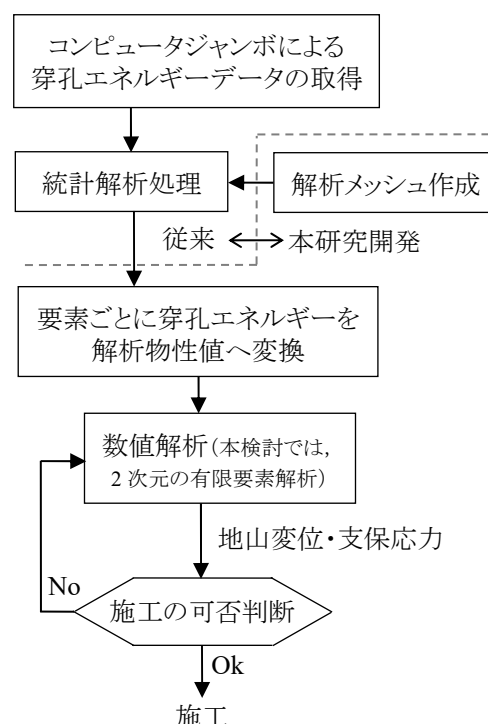


図-2 穿孔エネルギーの解析活用フロー

3. 切羽崩落地点を対象とした掘削解析

研究対象としたトンネルは粘板岩地山であり、図-3に示すように、穿孔エネルギーを日々評価していたものの、断層破碎帯出現に伴う地山性状の急変に支保パターン変更や補助工法の適用が間に合わず、天端～右肩で切羽崩落が発生した。崩落発生後、先受け工や削孔検層を行うことで、副次的に穿孔エネルギーが蓄積され、それらのデータから解析された穿孔エネルギー分布を図-4に示す。

本研究において、図-2に記したフローに従って、有限要素解析の各要素（1,107要素）に穿孔エネルギーに基づく解析物性値を割り当て

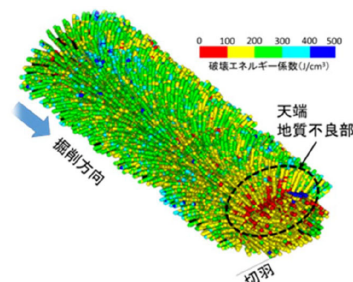


図-3 切羽崩落地点到達までの穿孔エネルギーデータ

キーワード：穿孔エネルギー、数値解析、支保パターン、崩落

連絡先 〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島技術研究所 岩盤・地下水 Gr. TEL 042-489-6646

た結果を図-5 に示す。図-4 と図-5 はよく整合しており、適切にデータ処理されたことが確認できた。穿孔エネルギーを解析物性値に変換するに当たっては、当社のデータベース²⁾を用いて、穿孔エネルギーを弾性波速度、そして地山等級へと変換した。そして、地山等級ごとの一般的な地山物性値³⁾より、表-1 に示す 10 段階に区分した解析物性値を設定した。土被りが約 200m であったことから、初期地圧は水平・鉛直とも 4MPa とした。応力解放率は支保設置前で 40%，設置後で 60%とした。

実施された CII 支保パターンと、切羽崩落後に採用された DII a-1 支保パターンの仕様の差異を表-2 に示す。本検討では、これら 2 種類の支保パターンで 2 次元掘削解析を実施した。それぞれの合成変位コンターを図-6 に示す。CII パターンの場合、天端～右肩にかけて、最大 250mm 程度の過大な変位が発生している。天端～右肩および底盤部で地山の塑性化も顕著であり、天端～右肩で崩落が発生した事実と調和的である。一方、DII a-1 支保パターンが実施されたと仮定した場合、右側壁部の変位が相対的に大きくなるが、天端～右肩にかけての変位は最大 130mm 程度に抑制され、崩落が発生しなかった可能性が考えられた。なお、クリギング解析に要した時間は 10 分程度、2 次元トンネル掘削解析に要した時間は 1 分/ケースであった。メッシュや解析物性値を事前に準備しておくことで、施工判断に活用できるリアルタイム性を有するといえる。

4. まとめ

穿孔エネルギー分布を数値解析に取り込み、天端～右肩で切羽崩落が発生した事例を対象に掘削解析を実施した。再現解析においても、天端～右肩で過大な変位が発生しており、高い崩落の可能性が示唆された。一方、支保の規模を大きくすることで変位や塑性領域が抑制された。このように、穿孔エネルギー分布をモデルの精度向上に活用し、数値解析上で多数のシミュレーションを行うことで、安全性・合理性の観点からトンネル掘削の最適化が図れると期待できる。今後、不均質な地山を掘削するトンネル工事について 3 次元解析を適用する等、さらなる解析精度の向上を図るとともに、現場適用に向けた解析の高速化等に取り組んでいく所存である。

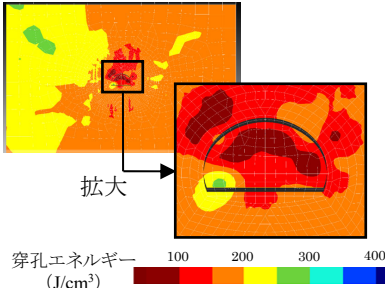


図-4 切羽崩落地点の穿孔エネルギー分布

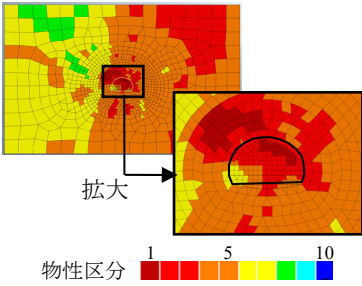
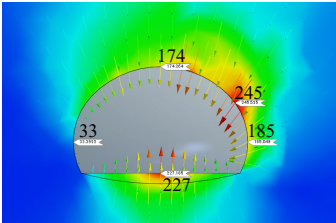
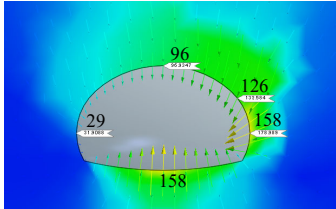


図-5 解析モデルへの物性値割当て結果



(a) CII 支保パターン(実施)



(b) DII a-1 支保パターン(仮定)

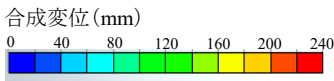


図-6 合成変位コンター

表-1 穿孔エネルギーごとの解析物性値

物性区分	表示色	穿孔エネルギー (J/cm ³)	P波速度 _推定 (km/s)	地山等級 _推定	変形係数 (MPa)	粘着力 (kPa)	内部摩擦角 (deg)
1		0 ~ 100	2.11	DII	150	200	30.0
2		100 ~ 125	3.02	DI	357	378	33.0
3		125 ~ 150	3.30	DI	468	473	34.5
4		150 ~ 175	3.55	DI	638	638	36.4
5		175 ~ 200	3.78	CII	822	822	38.2
6		200 ~ 225	3.99	CII	992	992	39.9
7		225 ~ 250	4.19	CII	1,304	1,304	41.5
8		250 ~ 300	4.47	CI	1,750	1,750	43.7
9		300 ~ 350	4.81	CI	2,294	2,294	46.5
10		350 ~	5.12	CI	2,793	2,793	49.0

表-2 支保パターンによる仕様の差異

項目	単位	CII	DII a-1
工法	—	補助ベンチ付 全断面	早期閉合 (ストラット有)
吹付けコン クリート	—	—	—
厚さ	mm	150	250
設計基準強度	N/mm ²	18	36
弾性係数	N/mm ²	4000	6000
鋼製支保工	—	150H	200H
サイズ	—	—	—
長さ	m	4	6
ロックボルト	本	21	12
補助工法	—	無	長尺鋼管先受け 鏡ボルト

参考文献

1) 宮嶋ら：山岳トンネル工事における地山の 3 次元可視化システムの開発，基礎工，pp.60～62，2018

2) 白鷺ら：削孔検層と速度検層によるトンネル切羽前方の弾性波速度分布の予測，土木学会第 71 回年次学術講演会，pp.787～788，2016

3) 土木研究所：トンネル掘削時地盤変状の予測・対策マニュアル，pp.17～21，1994