

花崗岩地域における地下施設建設時のリスクマネジメント手法の開発

大成建設 正会員 下野正人 本島貴之 井尻裕二

京都大学国際融合創造センター 正会員 大津宏康

京都大学大学院 学生会員 境亮祐 坂井一雄

核燃料サイクル開発機構 正会員 ○見掛信一郎 佐藤稔紀

1. 目的

深部岩盤中の地下施設の建設においては、施工前に予見できない岩盤の不均質性に起因した建設コストの不確実性（リスク）は非常に大きいと予想される。また、長期的に経済的な見通しを得るとともに建設コストを縮減する方策を考えておくことが重要な課題である。こうした課題に対応するため、本研究ではリスクマネジメント手法の開発を目的として、瑞浪超深地層研究所周辺で取得された岩盤の不均質性データを利用して、花崗岩を対象とした岩盤の不確実性を考慮した建設コスト評価法を開発したので報告する。

2. 花崗岩における不均質性評価モデルと建設コスト評価

地下深部で坑道を建設する際、建設コストに影響する費用として、坑道の支保パターンによる掘削費や補助対策費および湧水対策費などが挙げられる。図1のように支保パターンによる掘削費に影響を及ぼす地山強度特性の不均質性は、確率論的な地球統計学手法によりモデル化し、補助対策や湧水対策に大きな影響を及ぼす大規模な断層破砕帯の不均質性は、割れ目ネットワークによりモデル化した。

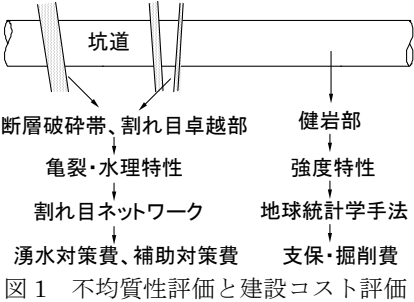


図1 不均質性評価と建設コスト評価

3. 地球統計学手法による掘削費評価

岩盤の強度特性のモデル化にあたっては、連続的なデータが取得され、かつ一軸圧縮強度と相関のある弾性波速度のデータを用い、地球統計学手法（GAUSSIAN シミュレーション）により確率論的に弾性波速度分布モデルを作成した。電力中央研究所式の岩盤分類に基づき、作成した弾性波速度分布モデルに応じて支保パターンを設定した。各岩級の支保パターンは、小口径TBM（φ2.2m）の事例を参考に理論解析により空洞安定性を評価して表1のように設定した。なお、CL～D級の出現頻度に関しては1つの鉛直ボーリング孔から得られた局所的なデータを用いたため、断層破砕帯や割れ目卓越部に起因して分布する弱部のデータがモデル化に反映されていないと考えられる。そこでCL～D級は、次の割れ目ネットワークモデルにより算定し、その延長は坑道2km当り平均値16mとなった。地球統計学手法により得られた支保パターンと合わせるとB：CH：CM：CL～D級=1785m：159m：40m：16mという比率となった。

表1 岩級区分と支保パターン

閾値-弾性波速度	岩盤等級	支保工	頻度
3.7km/s 以上	A～B	吹付コンクリート5cm	90%
3.0～3.7km/s	CH	吹付コンクリート5cm+溶接金網+フラットバー+アンカーボルト	8%
1.5～3.0km/s	CM	吹付コンクリート14cm+鋼製支保工	2%
1.5km/s 以下	CL～D	スチールゲート+充填セメント	0%

4. 割れ目ネットワーク手法による補助対策費・湧水対策費評価

上述のCL～D級の支保では何らかの補助対策が必要になることから坑道を横断する断層破砕帯幅の延長にしたがって費用を計上した。また、花崗岩中では、主に断層破砕帯や割れ目卓越部で突発的な湧水が発生すると想定し、湧水量にしたがって湧水対策費を計上した。補助対策費および湧水対策費は、断層破砕帯や割れ目卓越部の分布に影響を受けることから、これらの費用算定に必要な断層破砕帯のモデル化では、瑞浪地域の地表調査やボーリング調査により取得されたりニアメントや割れ目データに基づいて割れ目特性を導出し、割れ目ネットワーク手法により確率論的に不均質な割れ目構造を作

表2 湧水対策シナリオ

閾値-湧水量 (m³/min)	対策工／対策費 (円/箇所)
0.0～1.5	対策なし／対策費用0円
1.5～3.0	湧水処理／100万円
3.0～5.0	湧水処理+水抜ボーリング／1,000万円
5.0～	湧水処理+水抜ボーリング+排水トンネル／5,000万円

キーワード 花崗岩，リスクマネジメント，地球統計学手法，割れ目ネットワーク，リスクカーブ

連絡先 〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター TEL0572-66-2244

成した。補助対策費に必要な $C_L \sim D$ 級支保パターンへの延長は、大野・小島の断層破碎帯の破碎幅と大きさの相関式を用いて算定し、一方、湧水対策費に必要な湧水量は、確率論的に作成した複数の割れ目ネットワークモデルに対して地下水流動解析を実施して算定した^{1), 2)}。補助対策費および湧水対策費は、算定した支保延長、湧水量に対し、表2、表3の対策シナリオを適用して算定した。なお対策シナリオ（閾値）は、既往の文献、専門家へのヒアリングをもとに設定した。

5. 建設コストのリスクカーブ算定 建設コスト算定では、設定したパラメータ値の統計量に起因した不確実性をリスクカーブにより評価した。パラメータ値の不確実性評価の例として、湧水量の算定に大きな影響を及ぼす割れ目データの透水量係数（表4）に着目し、①最尤シナリオを原位置データから得た対数正規分布とし、②楽観シナリオの分布の期待値を最尤シナリオの値 $\times 0.1$ 、③悲観シナリオの分布の期待値を最尤シナリオの値 $\times 10$ と設定した。それぞれのシナリオに対して、補助対策費・湧水対策費のリスクカーブを算定した例を図2、図3に示す。健岩部支保掘削費（ $A \sim C_M$ 級）、補助対策費、湧水対策費、弱岩部支保掘削費（ $C_L \sim D$ 級）のそれぞれの悲観シナリオにおける建設コストを合算したリスクカーブを図4に示す。金融機関のリスク管理実務で最も標準的なリスク指標であるバリュアットリスク $VaR(95\%)$ 、即ち95%の信頼水準での最大損失を求めた。

健岩部支保掘削費 54.5 千万円に対して他の対策の合計は 36.6 千万円程度となり、断層破碎帯や割れ目卓越部に起因する対策費が $36.6/54.5=0.67$ (67%) と非常にリスクが大きいことが示された。

6. 建設リスク低減の方向性 花崗岩においては、健岩部における支保パターンによる掘削コストの変動は少なく、むしろ、断層破碎帯や割れ目卓越部における湧水対策費や TBM 推進のための補助対策費によるコスト変動が大きいと推定された。このことから、地上からの物理探査等による断層調査、存在が分かっている断層に対しては物性を把握するためのボーリング調査等、個々の断層の状態や規模に応じた調査を実施するとともに、リスクの大きさと調査費用から費用対効果を考慮したリスク低減が考えられる。

7. まとめ 本論で示したように地球統計学手法や割れ目ネットワーク手法を用いて、岩盤の不均質性を考慮した建設コストを評価する方法は、地下施設を建設する上で全体コストの把握や予備費の設定等の事業性検討や事前のリスク低減策策定といった意思決定のための情報を得るために有用であると考えられる。今後は、瑞浪超深地層研究所周辺で取得されている様々なデータを利用して、建設コストリスクを評価するにあたっての調査の費用対効果や、弾性波速度以外のデータを建設コストに反映する方法、坑道径や掘削工法の違いなどの建設シナリオへの影響について検討を行うとともに、地下施設建設リスクマネジメント手法を確立していく予定である。

参考文献 1) 中間, 中島, 青木, 佐藤: DH-2 号孔の岩芯を用いた力学特性調査結果, サイクル機構技術資料, JNC TN7400 (2003)., 2) 下野, 本島, 井尻, 大津, 境, 坂井, 見掛, 佐藤: 割れ目系岩盤における地下施設建設リスク評価手法の開発, 第40回地盤工学研究発表会投稿中。

表3 補助対策シナリオ (TBM 推進対策)

閾値-破碎幅 (m)	対策工/対策費 (円/箇所)
1D=2.6m	
1D 以下	対策なし/対策費用 0 円/m
1D~3D	小規模対策 (ファイバーボルト) / 20 万円/m
3D 以上	大規模対策 (迂回坑+薬液地盤改良) / 245 万円/m

表4 割れ目データの透水量係数

データ設定に用いたボーリング孔	瑞浪超深地層研究所周辺で掘削されたボーリング孔 深度 500m: 1 本 深度 1,000m: 3 本
平均 μ	-5.54
標準偏差 σ	1.51
割れ目データ数	363

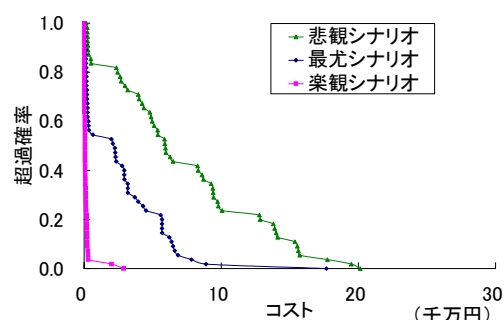


図2 補助対策費のリスクカーブ (坑道 2km)

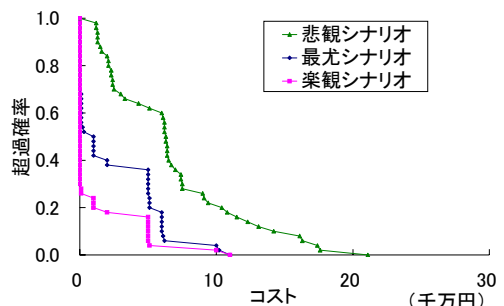


図3 湧水対策費のリスクカーブ (坑道 2km)

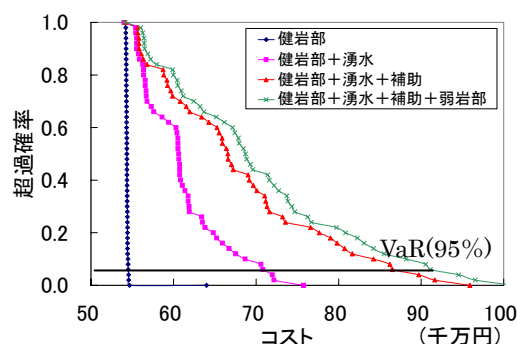


図4 建設コストのリスクカーブ (坑道 2km)