

(84) 大規模地下空洞掘削時の岩盤挙動からみたFEM解析の適応性

関西電力㈱

正会員 ○ 打田 靖夫 ・ 吉田 次男

㈱ニュージェック

正会員 浦山 克 ・ 平川 芳明

Applicability of FEM analysis to behavior of jointed rock with a large underground cavern excavation

Yasuo UCHITA & Tsugio YOSHIDA, The Kansai Electric Power Co., Inc.
Masaru URAYAMA & Yoshiaki HIRAKAWA, NEWJEC Inc.

Abstract

The relationship between changes of stress state obtained by elastic FEM analysis and development of joint openings observed by borehole TV camera during a large underground cavern excavation are studied.

Then, it is clarified that the tension and shear failure of joint sets are recognized in the regions where tension and shear stress increase for the joints sets respectively.

1. はじめに

岩盤内に連続性の高い不連続面が存在する場合、地下空洞の変形形態がこれらの不連続面の性状と応力状態とに支配されることが経験的に知られている。しかし、これらの関係について検討した事例は少なく、特に大規模地下空洞において、不連続面の性状や応力状態と岩盤挙動との関連性を分析した事例はほとんどみられない。

本報告では、大河内地下発電所空洞掘削時の岩盤挙動と、通常の等方・均質のFEM解析結果とを比較し、従来の解析手法の不連続性岩盤への適応性について考察する。

2. 地下発電所空洞の概要

大河内地下発電所空洞は、兵庫県の峰山・砥峰高原の東側斜面から約 280mの地下に建設されている(図-1)。この地下空洞の断面形状には弾頭形が採用されており、その規模は幅 24m、高さ 46.6m、長さ 134.5mである。

岩盤は、中世代の生野層群に属するひん岩であり、電中研式岩盤分類でC_h、一軸圧縮強度の平均値が 2,300kgf/cm²の堅硬な性状を有している¹⁾。空洞周辺岩盤の弾性波伝播速度は、5~6 km/sである。地山初期応力は、図-1に示すように、最大圧縮主応力が 100kgf/cm²であり、その方向が空洞長軸にほぼ直交し、地表面の傾斜にほぼ平行している。

地下空洞の設計段階では、空洞横断面についての2次元FEM解析(電中研式非線形粘弾性逐次掘削解析法)が図-2に示す解析ステップで実施された。この結果をもとに、発電所空洞の側壁には、各掘削ステップの終了後に吹付けコンクリート(厚さ24cm)およびロックボルト(全長接着方式、長さ5m、1本/3m²)が、その次のステップ終了後にPS工(長さ10m、うち定着長4m、1本/12m²)が補強工として施工された²⁾。

発電所空洞の掘削は、図-2に示す①~④の順に空洞長軸方向に実施され、その後ベンチ1からベンチ10まで高さ約3m毎に盤下げ掘削が行われた。

3. 事前解析結果と測定結果の比較

図-3は、前述の事前解析²⁾による解析変位と地中変位計による測定変位³⁾とを比較して示したものであり、解析変位は、地中

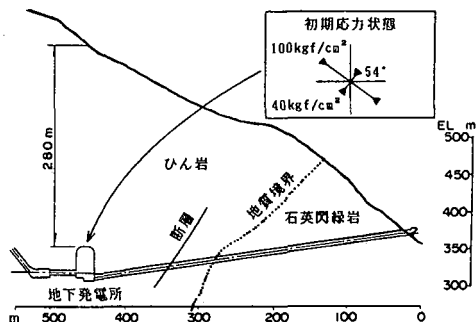


図-1 発電所空洞周辺の地質と初期応力状態

変位計による測定期間に対応している。

図より、アーチ部と水圧管路側については、解析変位は測定変位と同程度か、やや大きな値となっており、これらの部分については、ほぼ安全側の評価がなされていたといえる。しかし、放水路側については、測定変位が解析変位を大きく上回っている。これは、図-4の地質断面図³⁾に示すように、放水路側には連続性の高い流れ目のシーム群が出現したこと、シーム沿いの岩盤はやや劣化していたこと、およびシーム群と平行な方向に卓越する不連続面群が多数存在したことによって、放水路側の岩盤が空洞方向へすべり変形を生じたためであると定性的には解釈できる。この放水路側側壁岩盤の挙動を、不連続面の性状や応力状態との関連でさらに詳細に検討する。

4. FEM解析結果と岩盤の変形挙動の関連性

(1) 掘削に伴う岩盤不連続面の進展

大河内地点では、図-2に示すように、空洞の掘削に先立って放水路側の併設トンネルから空洞に向けてボーリング孔を穿孔し、空洞掘削に伴う孔壁の状況をボアホールテレビ（以下、BTV）で観察した⁴⁾。この測定断面は、上述の地中変位測定断面から空洞長軸方向に約22m離れた位置に設定してある。

図-5(a)は、初期状態（サイドパイロット坑（図-2中の①部）掘削後）の孔壁の状況を撮影し、得られた画像から不連続面の走向と傾斜を読み取り、極密度コンター図で示したものである。不連続面は、合計198本であり、平均すると10本/mの不連続面が存在することになる。

空洞掘削時には、アーチ切上げ後、ベンチ2, 3, 7の掘削後およびベンチ10掘削後（掘削完了後）にBTVによる観察を行った。図-5(b)は、空洞掘削中に進展した不連続面の走向・傾斜を極密度コンター図として示したものである。ここで進展した不連続面とは、掘削中に新たに発生した亀裂と、開口幅が変化した既存の亀裂を意味している。

図-5(a)と(b)を比較すると、両者は非常によく一致しており、卓越した方向の不連続面やそれと平行な潜在的な弱面が掘削中に進展したことを示している。

図-6は、主要な掘削段階におけるBTV展開画像から不連続面の水平方向の開口幅を読み取り、併設トンネル壁面を起点とした初期状態からの開口幅増分の累計値を、累計開口変位として示したものである。図より、ベンチ7までの累計開口変位は10mm程度であるのに対して、その後の掘削で50mm程度にまで増大していることがわかる。このように、掘削終盤に大きな変化を示したことは、地中変位の測定結果の傾向³⁾と一致している。また、累計開口変位（約50mm）は、図-3の測定結果（約64mm）にほぼ対応している。

図-7は、掘削に伴う不連続面の進展状況を、空洞壁面からの距離における頻度分布図として示したものであり、空洞側壁に対する不連続面の見かけの傾斜方向に区分して表示している。図より、盤下げ掘削の進行に伴い、不連続面の進展位置は徐々に岩盤深部に及ぶ傾向がうかがえる。また、空洞に対して流れ目となる不連続面と、さし目となる不連続面がほぼ同程度進展している。

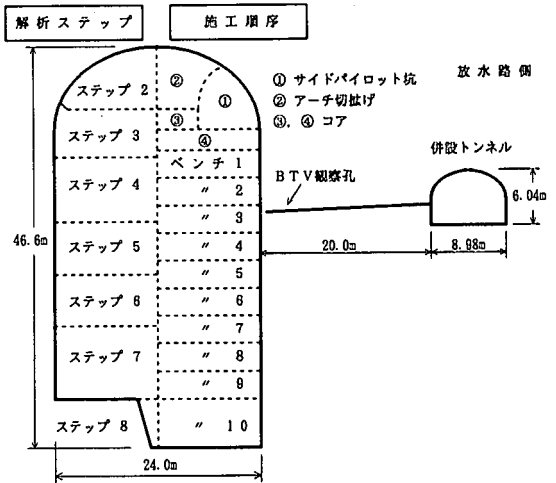


図-2 空洞の横断形状、事前解析の掘削ステップ、施工順序およびBTV観察孔の位置

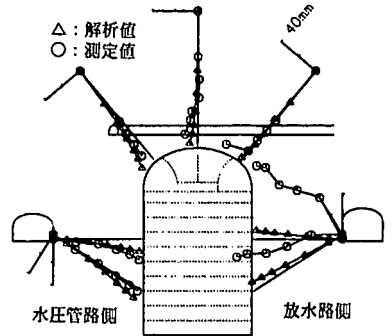


図-3 解析変位と測定変位の比較（ベンチ10）

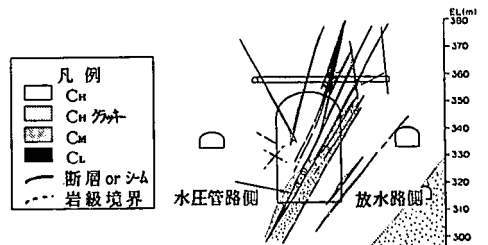


図-4 地質断面図

(2) 線形FEM解析による応力状態の変化と不連続面の進展との関係

次に、掘削に伴う不連続面の進展をFEM解析による応力状態の変化との関連で考察する。比較検討するFEM解析の構成則は、最も汎用的に用いられている線形弾性とし、空洞周辺の地山は均質とした。地山の初期応力は、図-1に示した値とし、地山の物性は事前解析²⁾で用いた値(弾性係数 130,000kgf/cm²、ポアソン比 0.25)とした。

1) 引張主応力とさし目の不連続面の進展との関係

図-8は、BTV観察位置における主応力状態のうち、最小主応力が引張となるもののみに着目し、空洞壁面からの距離と最小主応力のX軸からの角度との関係を示したものである。盤下げ掘削がBTV観察標高に達するベンチ3では、壁面から0.5mの範囲で引張側の主応力が発生する。その後、ベンチ7では3.5mまで、ベンチ10(掘削完了時)には、壁面から13m付近まで引張領域は拡大する。一方、引張応力の作用方向は、ベンチ3以降ではX軸から5~30°の角度にある。この方向は、空洞に対してさし目となる不連続面の法線方向にほぼ一致している。

図-9は、図-6の累計開口変位のうち、空洞に対してさし目となる不連続面のみに着目して示したものである。ただし、ここでは空洞長軸方向に対して、±45°の走向を有するさし目の不連続面のみに限定した。同図より、ベンチ10掘削後では、壁面から11mの位置付近から不連続面の開口が顕著となっており、解析における引張応力の範囲とよく一致している。また、掘削の進行に伴う引張領域の拡大とさし目の不連続面の進展(図-7)の傾向とは同一である。これらのことは、掘削の進行に伴い水平方向の圧縮応力が減小して引張方向に転じた領域内では、引張方向に法線ベクトルを有する不連続面が拘束力の減小により、はく離や開口幅の増大を生じる可能性が高いことを示している。

2) せん断応力と流れ目の不連続面の進展との関係

図-10は、図-9と同様な方法で、空洞に対して流れ目となる不連続面に着目して、累計開口変位を示したものである。流れ目の不連続面も、ベンチ10掘削時には深度12m付近から顕著に開口しており、岩盤の変形形態を上述の拘束力の減小のみでは十分説明できない。したがって、流れ目の不連続面に沿うせん断すべりが生じ、ダイレイタンス効果で流れ目の不連続面が開口した可能性が考えられる。

図-11は、解析で得られた主応力状態を流れ目の不連続面の方向に座

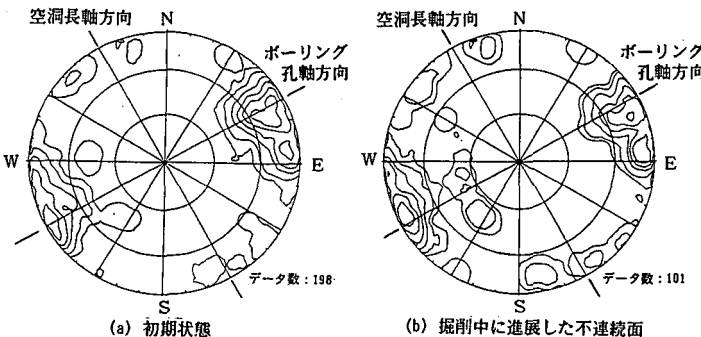


図-5 不連続面の極密度コンター(下半球投影、コンターは2%ピッチ)

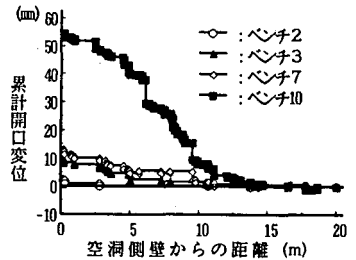


図-6 主要な掘削段階における累計開口変位

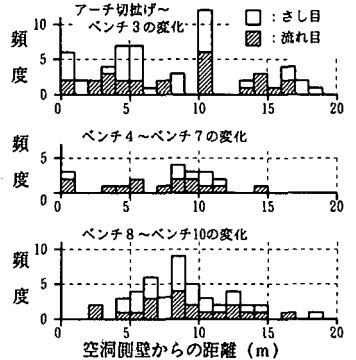


図-7 掘削の進行に伴う不連続面の進展状況

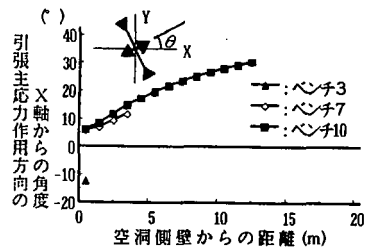


図-8 掘削の進行に伴う引張主応力の方向の変化

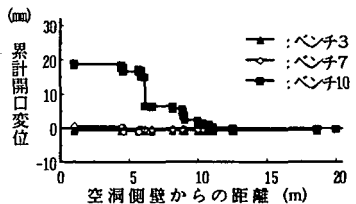


図-9 さし目の不連続面の累計開口変位

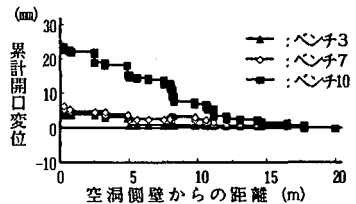


図-10 流れ目の不連続面の累計開口変位

標変換し、流れ目の不連続面に対する垂直応力(σ_n)とせん断応力(τ)の関係を掘削の進行に伴う応力履歴図として示したものである。ここで、流れ目の不連続面の角度は平均的な値(X軸から 70°)とし、圧縮応力を正、上盤が空洞側へずべる方向のせん断力を正として表示した。同図より、掘削の進行に伴い、空洞壁面に近い位置ほど早い段階で垂直応力の減小がみられ、一般的に想定される破壊包絡線に接近することが予想される。このように、空洞壁面に近い流れ目の不連続面ほど早い段階で破壊に至る傾向は、図-7と図-10に示した流れ目の不連続面の進展形態と一致している。

3) 不連続面の破壊包絡線の推定

BTVによる観察で異状が認められた位置と掘削段階を、図-11に示した応力履歴図上の位置と掘削段階にプロットし、不連続面のせん断破壊を線形FEM解析による応力状態との関連で考察する。

図-10より、流れ目の不連続面の開口が顕著となったのは、ベンチ3で5m付近、ベンチ7で11m付近、ベンチ10で12m付近である。これらの点の応力状態を図-11上で順に○, △, ×印で示した。

今、不連続面の引張強度と粘着力を零と仮定し、上記の異状(○, △, ×印)の上限値を通る直線を描くと、図-11中の破線のとおりとなり、その角度は約 40° となる。この破線は、流れ目の不連続面がせん断破壊を生じたと仮定した場合の不連続面の破壊包絡線を、線形FEM解析による応力状態と不連続面の実挙動との関係から推定したものである。発電所空洞の調査段階で、ロックせん断試験後に実施した摩擦抵抗試験(せん断破壊したブロックを再度せん断する試験)で得られた内部摩擦角は 45° 程度であり、実際の不連続面の内部摩擦角は、この値よりも小さいと推定されるため、上述の不連続面の破壊包絡線は、概ね妥当なものであると考えられる。ただし、図-11中に示した破壊包絡線以下の応力状態であっても、空洞壁面近傍の深度5m付近ではベンチ3掘削時に不連続面のせん断破壊を示す徴候がみられる。これは、発破による直接的な岩盤の損傷や不連続性岩盤に特有の局所的な応力集中等の影響により、この部分の応力状態が線形解析で推定した応力状態とはかけ離れたものとなっていることに起因する現象とも考えられるが、著者の論理の範囲では十分説明できない。

4) 岩盤の変形挙動の推定

上述の検討結果から、放水路側の岩盤挙動を次のように推定できる。すなわち、掘削の進行に伴って、水平方向の拘束力が減小し、さし目の不連続面がはく離や開口幅の増大を生じるとともに、流れ目の不連続面がせん断破壊する形態が考えられる。当地点の場合、掘削の進行に伴い、応力状態が卓越する不連続面群のはく離とすべりを同時に引き起こすように変化したため、これらの挙動が混在して大きな変形を生じたものと推定される。

5) 線形FEM解析結果に基づく安定性評価

図-12は、ベンチ10掘削時の解析で得られた応力状態をモールの応力円で示したものである。

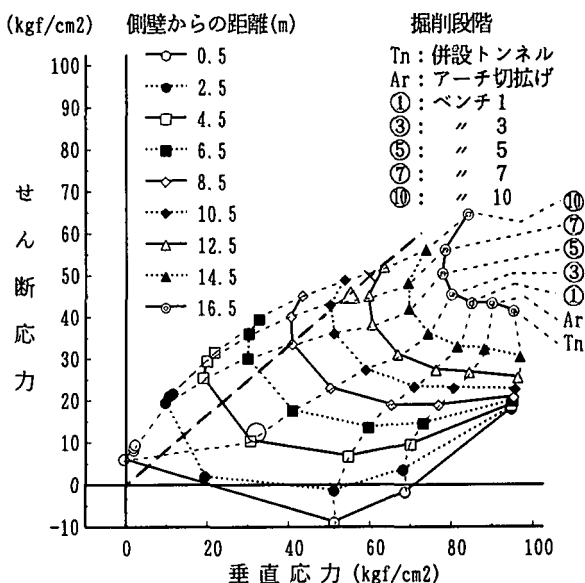


図-11 掘削に伴う流れ目の不連続面の応力状態の変化

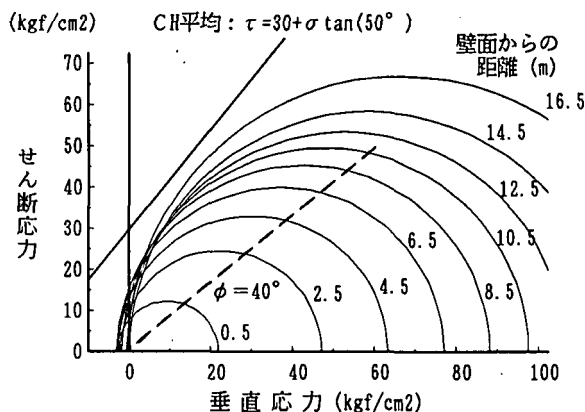


図-12 ベンチ10掘削時のモールの応力円

図中には、図-11で推定した不連続面の破壊包絡線、およびC_{II}級岩盤の強度⁵⁾の平均的な値($c=30\text{kgf/cm}^2$, $\phi=50^\circ$)を併記して示した。同図より、C_{II}級岩盤の強度を従来の岩盤試験から求め、線形FEM解析における局所安全率で空洞の安定性を評価した場合には、不連続面の破壊を予測できない可能性がある。したがって、空洞の安定性を阻害する不連続面が存在する場合には、不連続面を対象とした詳細調査と試験を実施して解析結果を評価する必要がある。

5. まとめ

不連続性岩盤の変形形態と、線形FEM解析による応力状態の変化とを詳細に検討した結果、次のような知見を得た。

- ① 引張主応力が作用する領域内に、その作用方向にほぼ直交する不連続面が存在する場合には、拘束力の減少によってこれらの不連続面がはく離や開口幅の増大を生じる可能性がある。
- ② 掘削の進行に伴う応力状態の変化により、せん断破壊を生じる可能性のある不連続面群が存在する場合には、その不連続面を対象とした詳細な調査や試験を行う必要がある。
- ③ 上記試験から得た不連続面の破壊包絡線と、FEM解析による不連続面上の応力状態とを比較・検討することにより、現行のFEM解析手法でもある程度不連続面の破壊状況を推定できる可能性がある。

本論文では、不連続面周辺の応力状態が、空洞周辺岩盤全体を線形連続体と仮定したFEM解析結果に従うと仮定して議論を進めた。これは、不連続面周辺の応力状態が連続体解析でもかなりの精度で近似されていると考えたからである。もちろん、不連続面近傍の応力状態は不連続面の存在によって乱されており、厳密な意味での応力状態を得るためには、さらに高度な解析的研究を今後行う必要があると考えている。また、今回推定した不連続面の破壊包絡線の妥当性を検討するために、今後、不連続面の一面せん断試験やBartonらの強度算定式を用いて不連続面の強度特性を再評価する必要がある。

謝 辞

本論文を執筆するにあたり、山口大学の石田 毅助教授より貴重な助言を頂いたことを記し、ここに深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 宮腰勝義・伊藤久敏：大河内揚水地点の地質・建設工事に伴う地質工学的検討，電力中央研究所報告，依頼報告U93504，1993. 7.
- 2) 原田稔・片山武・矢田篤：大河内水力発電所地下発電所空洞の設計と施工，電力土木，No. 230，pp. 46～57，1991.
- 3) 片山武・矢田篤・平川芳明：大河内水力発電所地下発電所空洞掘削時の情報化施工，電力土木，No. 237，pp. 97～107，1992.
- 4) 打田靖夫・吉田次男・浦山克・平川芳明：空洞掘削時の岩盤不連続面の進展性状に関する一考察，第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 713～718，1994.
- 5) 菊池宏吉・斉藤和雄・楠健一郎：ダム基礎岩盤の安定性に関する地質工学的総合評価について，第14回国際ダム会議提出論文，1981.