個別要素法による岩盤内大規模地下空洞の挙動解析と適用

長崎大学工学部　正会員　蒋　宇静　　長崎大学工学部　フェロー会員　棚橋由彦
長崎大学大学院　学生員　永家健司　　長崎大学大学院　学生員　李　博
九州電力㈱　　正会員○山下裕司　　九州電力㈱　　正会員　江藤芳武

1 はじめに

近年，土地の有効利用や環境問題あるいは安全性，経済性の確保などの視点から地下の利用が積極的に進められている。地下揚水発電所やエネルギー貯蔵施設などの大規模地下空洞の安定性を検討する場合には，岩盤構造の幾何学的特性とともに，力学的特性（変形性や破壊特性）の評価が重要である。したがって，岩盤中に存在する節理や断層などの大小様々な不連続面の挙動を的確に評価することが，地下空洞を始め岩盤構造物の設計・施工・管理を行う上で重要な課題となっている。

また，岩盤構造物の設計において，有限要素法(FEM)を代表とする連続体解析法が一般的に用いられている。しかし，不連続性岩盤内への立地を考えた場合，空洞の掘削に伴う周辺岩盤の変形や破壊の大部分は不連続面に沿うせん断破壊や不連続面間の開口に起因することが多いと認識されていながらも，設計の現状は連続体解析が主流である。

本稿では小丸川地下発電所空洞掘削の調査，試験，解析，計測の各段階で蓄積されたデータを活用し，複雑な不連続面幾何学分布のモデル化が容易で，不連続面の分離を表現できる不連続体解析法（個別要素法）を用いて，不連続面の影響を受けた空洞変形のメカニズムを解析的に評価・考察する。

2 個別要素法解析モデル

(1) 対象岩盤

本稿で対象とした小丸川地下発電所地下空洞付近の岩種は花崗閃緑岩，岩級は概ねC_H級で部分的にC_M級が存在する。断面形状は，幅 24m，高さ 48mの弾頭形であり，空洞の奥行きは 188mで，空洞の深度は約 400mである。また，岩盤及び不連続面の物性値を表-1 に示す。これらは原位置試験及び室内試験で求まったものである。

表-1　解析用物性値

(a) 岩盤基質部

項目	単位	物性値
単位体積重量 γ	kN/m^3	27.1
変形係数E	MN/m^2	20,000
ポアソン比 ν	－	0.23
粘着力c	MN/m^2	1.6
内部摩擦角 ϕ	deg	60
引張強度 σ_t	MN/m^2	0

(b) 不連続面

項目	単位	物性値
せん断剛性K_s	$MN/m^2/m$	5.62×10^3
垂直剛性K_n	$MN/m^2/m$	1.17×10^4
粘着力c_j	MN/m^2	0
摩擦角 ϕ_j	deg	20
引張強度 σ_j	MN/m^2	0

(2) 不連続面のモデル化

地質状況から不連続面を取り入れた解析モデルを図-1 に示す。本体空洞掘削開始前の地質調査段階におけるボーリングで確認した不連続面を図-1 に太線で示す。調査ボーリングは，鉛直ボーリングであることから，特に高角度で分布する不連続面を十分に把握したとは言い難い面もあった。このため，事前の地質調査情報に加えて，施工過程における地質観察に基づいた不連続面の情報を，施工の進捗に伴い逐次反映させることが必要となった。すなわち，施工過程においては，空洞掘削時の地山掘削面から，不連続面の状況（位置，規模，方向，密度，密着の程度，充填物の有無）を観察した結果などを基に不連続面をモデル化した。

まず，アーチ部掘削時（ステップ①～③）においては，アーチ部の周辺に，調査ボーリングで判明した不連続面に沿って卓越する方向を示す連続性のある不連続面群の分布を確認した。これらを一定の間隔，角

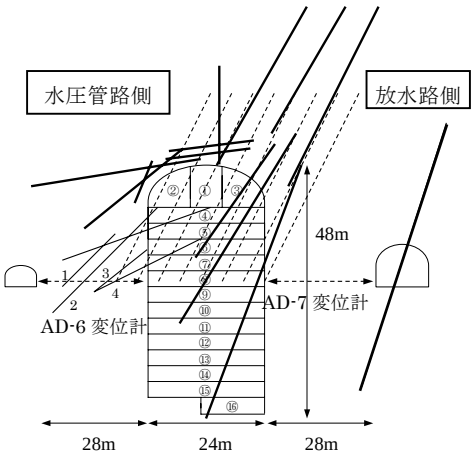

図-1　解析断面（不連続面の分布）

キーワード　不連続面，個別要素法，大規模地下空洞
連絡先　〒815-8520 福岡市南区塩原 2-1-47 九州電力㈱総合研究所土木ｸﾞﾙｰﾌﾟ　電話 092-541-2910(FAX092-551-1583)

度，長さで統一しモデル化したものを図-1 に破線で示す。

次に，側壁部掘削時（ステップ④以降）においては，空洞掘削面の不連続面状況観察結果に加えて，ボアホール TV による亀裂開口状況の観測結果を踏まえ，空洞壁面に差し目状に入る不連続面を確認した。モデル化した不連続面を図-1 に細線で示す。

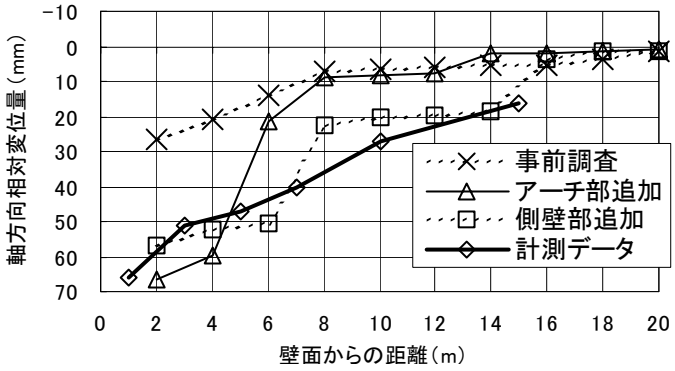

図-2　不連続面モデルによる比較

3 解析結果と考察

(1) 入力不連続面の違いによる解析結果の比較

水圧管路側の変位計 AD-6 において，事前調査，アーチ部掘削，側壁部掘削の各段階で判明した入力不連続面の違いによる解析結果と計測データとを比較したものを図-2 に示す。変位量は，いずれも空洞掘削完了時のものである。

事前調査で確認された不連続面のみを入力した場合とアーチ部掘削過程で判明した不連続面を追加した場合を比較すると，アーチ部付近の連続性のある不連続面が側壁部の挙動に影響を与えていることがわかる。また，側壁部掘削時に判明した不連続面を追加入力した場合，壁面からの距離６～８m で変位が急激に増加しているが，これは追加入力した不連続面の影響であると考えられ，この不連続面の入力により現場計測値を精度よく再現できるようになった。

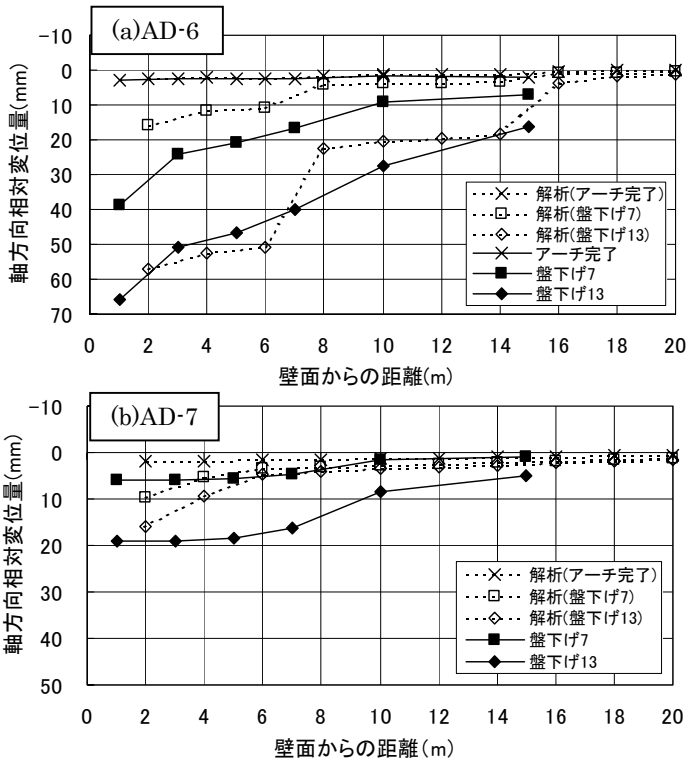

図-3　空洞側壁部変位の比較

(2) 掘削ステップの進捗に伴う解析結果の比較

AD-6 において，空洞掘削ステップの進捗に伴う変位量の解析結果を比較したものを図-3 の(a)に示す。ここで不連続面モデルは前述の側壁部掘削までに判明した不連続面を入力したモデルである。解析結果は，アーチ部掘削段階ではほとんど変位がでていないこと，側壁部掘削段階で変位が増大していることなど，掘削ステップの進捗に伴う変位データの増加を比較的よく再現できている。

(3) 差し目と流れ目からみた解析結果の比較

発電所空洞付近の不連続面は，水圧管路側で空洞壁面方向に差し目に入る地質構造，放水路側で空洞壁面方向に流れ目に入る地質構造が卓越している。AD-6（水圧管路側）の解析結果（図-3 の(a)）と AD-7（放水路側）の解析結果（図-3 の(b)）を比較すると，流れ目（AD-7）より差し目（AD-6）のほうが岩盤挙動が大きい結果となった。計測データでも流れ目より差し目のほうが変位が大きかったことから，個別要素法は，流れ目，差し目という岩盤構造に起因した現場の岩盤挙動を的確に再現していることを確認した。

4 おわりに

大規模地下空洞の現場へ個別要素法を適用した結果，空洞掘削過程で判明した不連続面を追加することにより，個別要素法は岩盤の挙動を精度よく再現できることを確認した。

今後は，さらに，地下空洞の局所的変形挙動のメカニズムを解明するために，不連続面の開口幅や差し目，流れ目による影響について解析し，より高精度に空洞安定を評価する上で着目すべき不連続面について整理し，初期地質調査における着目点について提言する予定である。