個別要素法による大規模地下空洞の 変形挙動特性の評価

山下 裕司1*・江藤 芳武1・鶴田 正治2・蒋 宇静3・澤田 昌孝4

¹九州電力株式会社 総合研究所(〒815-8520福岡市南区塩原二丁目1-47)
²九州電力株式会社 土木部(〒810-8720福岡市中央区渡辺通二丁目1-82)
³長崎大学 工学部(〒852-8521長崎市文教町一丁目14)
⁴電力中央研究所 地球工学研究所(〒270-1194千葉県我孫子市我孫子1646)
*E-mail: yuuji_yamashita@kyuden.co.jp

大規模地下空洞の変形挙動と安定性を評価するにあたっては、節理、断層などの不連続面を適切にモデル化することが重要である。不連続性岩盤内に空間の立地を考えた場合、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ダイレーション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に基づくのが主流である。そこで、本稿では、不連続面の力学的挙動を的確に表現できる 個別要素法を用いて、施工過程における地下空洞の挙動を予測し、実計測との比較により個別要素法の有用性を検証する。

Key Words : distinct element method, discontinuity, large underground cavern, deformation

1. はじめに^{,3),4)}

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、岩盤中に存在する 節理や断層などの不連続面の幾何学的分布および力学的 特性(変形性や破壊特性)の評価が必要である.したが って、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・管理を行う上で課題 となっている^{1,2}.

大規模地下空洞の実施設計においては、適用実績の面 もあるが、解析作業時間の短縮や効率化などの観点から、 不連続体解析法よりも連続体解析法を用いることが多い. しかし、不連続性岩盤を取り扱う場合、連続体解析法は 構造物の全体挙動が把握できるが、局所的挙動の把握に は至らないという問題点がある^{3,4}. すなわち、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ダイレーションに起因することが多 いと認識されていながらも、設計の現状は割れ目の挙動 を等価的に取り扱っている連続体解析法が主流であると いう矛盾があった.

本論文では, 宮崎県に建設中である小丸川揚水発電所 の大規模地下空洞掘削時の技術データを活用し, 複雑な 不連続面の幾何学的分布のモデル化が容易で, 不連続面 の力学的挙動を表現できる不連続体解析法(個別要素 法)を用いて,施工過程における地下空洞の挙動を予測 し,実計測との比較により個別要素法の妥当性および有 用性を検証する.

2. 小丸川揚水地下発電所の地下空洞の概要 5,6,7

(1) 空洞周辺の地質

水路ルートの地質は、新生代古第三紀始新世〜漸新世の日向層群(砂岩,頁岩)と、これにルート中央部でほぼ直交する形で貫入している木城花崗閃緑岩の岩脈状岩体(幅約300m)を基盤とする.図-1 に発電所周辺の地質断面図を示す.本体空洞はこの花崗閃緑岩の岩脈中に位置する.また、本体空洞周辺の岩級区分は電中研式で概ねC_H級であり、節理間隔5~15cmの細区分AIIIa岩盤を主体とし、その中に、節理間隔15~50cmの細区分AIIIa 岩盤)が分布する.

図-2 に地下空洞のレイアウト,図-3 に主要な監視断面とされた A, B, C 断面の地質断面図を示す.北側(A 断面, C 断面に対応)では NW/SW 系の割れ目が卓越するのに対して,南側(B 断面に対応)では,分布が分散し,第一卓越方向は NS/急傾斜方向となる.

(2) 地下空洞の施工

本体地下空洞は, 掘削幅 24.0m, 掘削高さ 48.1m, 最 大長さ 188.0m, 総掘削量約 16 万 m³, 最大断面積約 1,000m²の規模であり, 単機出力 30 万 kW の発電機 4 台 (計 120 万 kW), 変圧器 2 台を空洞内に設置する予定であ る. 当地点では, 大断面 NATM 工法の設計思想に基づ き,支保部材には吹付けコンクリート, ロックボルト および PS アンカーを用いた.本体空洞の掘削は, 天井 アーチ部の掘削と鉛直壁をなす盤下げ部の掘削に大別 され, 天井アーチ部の 3 ステップと盤下げ部の 13 ステ ップの計 16 ステップで掘削した.

(3) 計測概要

空洞掘削における岩盤挙動の管理手法として、施工に 伴う地山の挙動変化を観察・計測し、その結果を分析し て設計・施工に反映させる情報化施工管理システムを採 用した.

埋設計器による計測管理では、空洞全体の岩盤挙動を 把握するために、図-2に示すように空洞長軸方向にほぼ 均等に計測断面を設け、断面毎に地中変位計、アンカー 荷重計およびロックボルト軸力計を設置し計測を行った. なお、掘削高さと掘削断面積が最大で、変形が大きくな



図-1 発電所周辺の地質断面図



図-2 地下空洞のレイアウトと計測断面

ると予測したA, B断面および断面形状が異なるC断面の 3断面を主計測断面とし、計器を密に配置した.

(4) 特徴的な変形挙動

当地点で発生した特徴的な変形挙動を以下に示す[®]. ・アーチ部掘削段階での変位の相違(有限要素法による



当初予測 10mm程度→計測值 33mm)

・側壁部掘削段階での変位の相違(有限要素法による当 初予測 10mm 程度→計測値 68mm)

・不連続面の分布が差し目構造を示す水圧管路側の変形 が流れ目構造を示す放水路側に比べて大

・側壁部設置変位計の先行変位の発生

3. 個別要素法と解析パラメータの決定

(1) 個別要素法の特徴

個別要素法は、1971年に不連続性岩盤に対する数値 解析手法として発表された.岩盤を不連続面に囲まれた 分離ブロックの集合体として表現し、不連続面は材料間 の境界面とみなし、与えられた境界条件のもとで、運動 方程式に従い時々刻々と並進・回転挙動を追跡する解析 手法である⁹.

最近では、不連続性岩盤に対する個別要素法の適用例 が多数報告され、その過程で剛体ブロックからブロック 内部を要素分割することによる変形体ブロックへ、また、 2次元ブロックから3次元ブロック、さらには、擬似静 的問題から動的問題へと適用範囲が拡大されてきた.

(2)不連続面および岩盤の物性値

周辺を岩盤に拘束されている不連続面の力学的特性を 適切に求めるには、せん断過程における垂直変位(ダイ レーション)に対して垂直応力を変化させるせん断試験 を行う必要がある.溝上ほか^{10,10}は、垂直応力一定 (CNL)制御のみならず、垂直剛性一定(CNS)制御もコ ンピュータにより自動的に行える不連続面せん断試験装 置を開発して、不連続面のせん断強度およびダイレーシ ョン挙動の実験を行い、せん断特性の評価を実施してい る.変形挙動を大きく支配する接触バネの変形剛性(kn, ks) ほかの不連続面の物性値は、一面せん断試験から得 られた(**表**-1).なお、**表**-1 には、原位置試験等によ って求めた岩盤基質部の物性値と初期応力も併記してい る.

(3) 不連続面の幾何学的分布のモデル化

地質状況の調査結果から不連続面の分布を表現したA 断面の解析モデルを図-4 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 は太線で示している(Casel).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がたい面もあった.こ のため,事前の調査情報に加えて,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 遂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の分布モデル を修正した.不連続面で区切られた岩盤基質部は弾塑性 変形体とみなし、ゾーン毎に要素分割を行った.

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 分布が観察され,それをCase1の解析モデルに追加した (Case2, 図-4中の破線).

次に、側壁部掘削時(ステップ④以降)の水圧管路側 においては、空洞掘削面の不連続面状況の観察結果に加 えて、ボアホールTVによる亀裂開口状況の観測により、 空洞壁面に差し目状に入る不連続面が確認されたため、 これもCase2の解析モデルに反映した(Case3,図-4中の

表-1 解析用各種パラメータ

パラメータ		単位	物性値
岩盤基質部	単位体積重量γ	kN/m ³	27.1
	弾性係数 E	MPa	20,000
	ポアソン比ν	-	0.23
	粘着力c	MPa	1.6
	内部摩擦角↓	deg	60
	引張強度 σ_t	MPa	0.16
不連続面	せん断剛性 k _s	MPa/m	5.62×10^{3}
	垂直剛性 k _n	MPa/m	1.17×10^{4}
	粘着力 c _i	MPa	0
	摩擦角 φ _j	deg	20
	引張強度 σ_j	MPa	0
初期応力	水平成分 σ_x	MPa	5.89
(空洞中央)	垂直成分 σ_z	MPa	10



実線).

4. 解析結果と考察

(1) 不連続面分布モデルの違いによる比較

水圧管路側の変位計 AD-6 について,事前地質調査に 加えて,アーチ部掘削および側壁部掘削の各段階で判明 した不連続面を解析モデルに反映させた解析結果と計測 データの比較を図-5 に示す.現場における変位計測は, 空洞上方と左右に設けた調査坑などの壁面と,本体空洞 の壁面から1,3,5,7,10,15mの箇所に設置した測点 との間の相対変位で表される.相対変位量は,いずれも 空洞全断面掘削完了時のものである.

事前地質調査段階で判明した不連続面のみをモデル化 した場合(Casel),解析値と計測値には大きな違いが みられる.また,アーチ部掘削過程の観察で判明した不 連続面を考慮しても(Case2),相対変位は Casel とほと んど変わらない.

次に、側壁部掘削過程の観察で判明した不連続面も解 析モデルに反映したものがCase3である. Case3では、解 析値と計測値を比べると、後者の方が若干(10~15mm 程度)大きい値を示している. この原因は空洞壁面から 15m以深の変位差にある. 15m以深での変位差の原因は 不明であるが、ここでの変位量を同じとして解析値を補 正(15m地点の解析値を15mmと仮定して各点を平行移 動)すると、両者は非常に良い一致を示す.

すなわち,個別要素法は,不連続面の分布が正確にモ デル化できれば,実際の挙動を高い精度で予測できる解 析手法であることを示している.

(2) 掘削過程における変形挙動の比較

図-6 に A 断面の解析結果 (Case3) を示す. アーチ部 が AD-1, AD-2, AD-3 測線, 側壁部が AD-6, AD-7 測線 である. アーチ部については, アーチ掘削後のステップ ③から掘削完了後のステップ ()における壁面付近の変位 増分は, 計測値ではいずれの測線も3~5mm 程度, 解





析値で 15mm 程度となっており、変位の絶対値でみると 若干の差が認められる. しかしながら、ステップ③→⑧、 ステップ⑧→⑯での変位増分を比較すると、計測値、解 析値とも、 [(⑧—③)の変位量]: [(⑯—⑧)の変 位量] = 1:1程度の値を示しており、掘削過程におけ る変位の増加傾向について、解析値は計測値を良く再現 できているといえる.

側壁部については、AD-6、AD-7 測線ともに各掘削過 程における変位の分布形状でみると、掘削中期以降、計 測値と解析値は比較的良い一致を示している. 壁面付近 での変位増分でみても、AD-6 測線の場合、ステップ® →⑩で計測値 11.3mm、解析値 12.8mm、ステップ®→⑥ で同じく 27.0mm と 28.5mm であり、両者は良い一致を 示す. この傾向は AD-7 についても同様であり、側壁部 についても、各掘削過程における変位発生状況を解析に より再現できることを確認した.

(3) 空洞周辺の不連続面の分布性状による挙動の比較

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(図-3).

有限要素法による予備解析段階では、差し目側より流 れ目側の変位が大きくなることが予測されていたが、実 際の計測値は、差し目側の水圧管路側が流れ目側よりも 3倍程度大きくなった. 個別要素法による解析では, AD-6 測線(差し目側), AD-7 測線(流れ目側) ともに 計測値との再現性も良好で、壁面付近では差し目のほう が流れ目よりも約3倍の変位を示しており、実際の現象 と良く一致している. すなわち, 個別要素法は, 流れ目, 差し目という不連続面の分布性状に起因した特徴的な変 形挙動についても的確に予測できる手法であるといえる. なお, AD-7 測線上の計測値が小さかったもうひとつの 理由として測線上の不連続面がもともと少ないことも考 えられる. すなわち, AD-6 測線(差し目側) における 不連続面の分布数が AD-7 測線上(流れ目側)より多か ったことが影響要因として無視できないため、変形挙動 に対する不連続面の分布性状と分布密度の影響について は、パラメータスタディを実施し究明を進めている 12.

5. まとめ

大規模地下空洞の変形挙動の評価へ個別要素法を適用 した結果,以下のことが明らかになった.

・不連続体解析手法である個別要素法は、事前地質調査 で確認された不連続面に加えて、空洞掘削段階で判明し た不連続面を解析モデルに入力することにより、岩盤の 変形挙動を精度よく再現できる.また、岩盤の挙動に不 連続面の分布が明らかな影響を及ぼすことを検証できた. ・掘削ステップと支保工打設ステップを現地施工に基づ き忠実に再現した個別要素法解析モデルは,空洞盤下げ 掘削進行に伴う変形挙動の推移を再現することができる.

・差し目(水圧管路側)のほうが,流れ目(放水路側) より変位が大きくなるという特徴的な変形挙動は,個別 要素法により再現することができた.

今後は、小丸川発電所の情報化施工に適用した個別要 素法の解析結果から、より精度良く空洞安定を評価する 上で着目すべき不連続面の分布等の調査・評価項目につ いて整理し、初期地質調査における着目点について提案 していく.また、大規模地下空洞掘削による局所応力集 中に起因する新たな亀裂の進展モデリングなどについて も検討を進めることにしている.

参考文献

- 大石富彦,袋井 肇,瀬岡正彦:不連続体解析を用いた情報 化施工の実際と今後の展望,電力土木, No.276, pp.24-28, 1998
- 2)藤原吉美,堀江正人,瀬岡正彦,平川芳明,森 聡:大規模 地下空洞の施工実績に基づく不連続体解析法の適用に関する 検討,第10回岩の力学シンポジウム講演論文集,pp.569-574, 1998
- 3) 櫻井春輔,清水則一:不連続性岩盤の解析手法の現状,土と 基礎, Vol.40, No.11, p.39-44, 1992
- 4) 日本材料学会編:ロックメカニクス,技報堂出版, pp.114-120, 2002
- 5) 鶴田正治,河原田寿紀,日高英介:小丸川地下発電所の設計 解析と情報化施工計画,電力土木,No.300, pp.114-118, 2002
- 6) 柏木雄二,河原田寿紀,日高英介:小丸川発電所地下空洞の 情報化施工,電力土木,No.307, pp.53-57, 2003
- 7) 柏木雄二,園田利美津,江口聡一郎:小丸川発電所新設工事 における地下発電所空洞の設計と施工,電力土木,No.319, pp.55-59,2005
- 8)山下裕司,江藤芳武,鶴田正治,蒋 宇静:個別要素法によ る大規模地下空洞の変形挙動の評価,電力土木, No.325, pp.18-26, 2006
- Cundall.P.A.: A computer model for simulating progressive, large-scale movements in blocky rock system, *Proc. of Int. Sympo. for ISRM*, Nancy, Paper No.2-8, 1971.
- 10) 溝上 建, 祐徳泰郎, 蒋 宇静: デジタル制御型不連続面 せん断試験装置の開発と応用, 電力土木, No.295, pp.14-19, 2001
- Jiang, Y., Xiao, J., Tanabashi, Y and Mizokami, T.: Development of an Automated Servo-Controlled Direct Shear Apparatus Applying a Constant Normal Stiffness Condition, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, Vol.41, No.2, pp.275-286, 2004
- 12) 山下裕司, 江藤芳武, 鶴田正治, 蒋 宇静: 個別要素法に

APPLICATION OF DISTINCT ELEMENT METHOD ANALYSIS TO LARGE UNDERGROUND CAVERN EXCAVATION

Yuji YAMASHITA, Yoshitake ETOU, Masaharu TSURUDA, Yujing JIANG and Masataka SAWADA

Excavation simulations and stability evaluation of a large underground pumped powerhouse cavern in jointed rock masses are carried out by using the distinct element method (DEM). The mechanical properties of joints are determined by using a direct shear apparatus that can reproduce various boundary conditions automatically. The geometrical distribution of joints is also considered in the modelling based on the geological investigations and modified according to the new observation during the cavern excavation process. The numerical analyses agree well with the measurements and indicated that the joint orientation around the cavern influences the deformational behaviour and stability significantly.