

等価連続体解析手法による 塩原発電所空洞掘削時挙動の比較検討

堀井秀之¹・宇野晴彦²・吉田秀典³・芥川真一⁴・打田靖夫⁵・
森川誠司⁶・山辺正⁷・多田浩幸⁸・京谷孝史⁹・伊藤文雄¹⁰

¹正会員 Ph.D 東京大学大学院工学系研究科社会基盤工学専攻(〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

²正会員 工修 東電設計(株)技術開発本部土木技術部(〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

³正会員 工博 香川大学工学部安全システム建設工学科(〒760-8526 香川県高松市幸町1-1)

⁴正会員 Ph.D 神戸大学工学部建設学科(〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

⁵正会員 工博 (株)ニュージエック技術開発部(〒542-0082 大阪府大阪市中央区島之内1-20-19)

⁶正会員 工修 鹿島建設(株)情報システム部(〒107-8502 東京都港区元赤坂1-2-7)

⁷正会員 工博 埼玉大学工学部建設工学科(〒338-8570 埼玉県浦和市下大久保255)

⁸正会員 工修 清水建設(株)技術研究所土木研究開発部(〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)

⁹正会員 工博 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉)

¹⁰正会員 工修 大成建設(株)技術研究所岩盤研究室(〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町344-1)

本研究では、不連続性岩盤の力学挙動を表現する解析手法として、代表的な不連続性岩盤モデルを選定し、既設の揚水式発電所大規模地下空洞掘削時の岩盤計測挙動を対象として、各解析手法から得られる壁面変位の時刻歴挙動、岩盤変位分布について、実測結果を踏まえ比較検討を行った。この解析結果に基づき、各解析手法から得られる岩盤挙動について、各々の構成則との関係を考察し、岩盤挙動の特徴が現れるメカニズムについて論じた。さらに、これらの結果から各解析結果の共通性や相違点を明らかにし、大規模空洞掘削時の岩盤挙動表現の特徴・差異について論じた。

Key Words : *jointed rock masses, FEM analysis, large-scale cavern, underground excavation*

1. はじめに

近年、揚水式地下発電所空洞は、スケールメリットの観点から大規模化しているが、良好な岩盤での建設地点の減少による複雑な地質状況下における空洞の成立性、施工性を評価するため、信頼性の高い解析手法の確立が望まれている。そのような解析手法が確立されれば、その入力データを与えるために行われる調査・試験法も進歩し、その解析手法に基づいて実施される設計・施工管理法の改善につながる事が期待される。このような認識に基づき、著者らは、不連続性岩盤の力学挙動を表現する最新の等価連続体解析手法として、節理の破壊を考慮したひずみ軟化モデル¹⁾(NAPIS: Non-linear Analysis Program Including Softening)、マイクロメカニクスに基づく連続体モデル²⁾(MBC: Micromechanics-Based Continuum Model)、ロックボルト効果を考慮可

能な等価連続体モデル³⁾(EQR: Equivalent Rock-bolt Model)、複合降伏モデル⁴⁾(MYM: Multiple Yield Model)、クラックテンソルモデル⁵⁾(CTM: Crack Tensor Model)および損傷テンソルモデル⁶⁾(DTM: Damage Tensor Model)を取り上げ、不連続性岩盤を対象として実施された大規模空洞掘削時の変形挙動を最も良く表現し得る物性値を各解析手法毎に抽出し、各解析モデルに組み込まれた構成則による一要素解析を実施し、得られた応力～ひずみ関係を比較することにより各解析手法の特徴、相互の関係についてまとめた⁷⁾。

本研究では、東京電力塩原発電所地下空洞の掘削時岩盤挙動を対象として実施した前述の6解析手法による変形挙動を最も良く表現した時の側壁相対変位の時刻歴、岩盤変位分布を実測結果に基づき比較検討した。さらに、破壊領域および各種解析結果の比較を行い、各解析手法の共通性や相違点を明らか

にし、解析手法に組み込まれた構成則と解析結果に現れる岩盤挙動の特徴・差異について検討した。

2. 塩原発電所概要

塩原発電所の地下空洞掘削時に岩盤変位計により計測された変形挙動に基づき、各解析手法により掘削時変形挙動をシミュレーションし、各解析手法による挙動表現の可能性を評価するとともに、実岩盤での掘削変形挙動を最も良く表現し得るパラメータの抽出を実施した。

(1) 地点概要⁸⁾

対象とした塩原発電所地下空洞の周辺地盤の地質は、流紋岩類を主体としており、これに凝灰角礫岩が混在分布している。流紋岩および斑状流紋岩は、岩質境界面(WNW-ESE走向・南傾斜)と平行な板状節理とこれと直交する柱状節理が発達しており、板状節理の間隔は、50~200cm、柱状節理の間隔は、5~100cmであり、特に流紋岩は柱状節理の発達が顕著である。図-1に当該発電所周辺の流紋岩類の節理密度分布を示す。

地下発電所地下空洞は、図-2に示すように高さ51m、幅29mおよび長さ163mの規模を有し、天端にアーチコンクリートを配したきのこ型空洞であり、被り厚さ200mの地下に位置している。鉛直方向の地圧は、4.7MPaでほぼ被り圧相当となっている。当該地点の初期応力は、第1主応力:5.0MPa(N167W, 下向き61°)、第2主応力:3.9MPa(N3W, 下向き28°)および第3主応力:2.8MPa(N91W, 下向き7°)である。

岩石・岩盤の力学特性としては、岩石試験(一軸圧縮試験)および原位置岩盤試験(平板載荷試験, 原位置岩盤せん断試験)から表-1に示す値が得られており、各解析手法においてそれぞれの物性設定手法に基づき適切な値を設定した。

(2) 地下空洞周辺岩盤の挙動計測⁸⁾

塩原発電所の地下空洞掘削は、施工時の安全性確保と空洞の安定性確認の観点から周辺岩盤に計測装置を埋設した情報化施工⁹⁾が実施されている。当該地点では、図-3に示すように空洞長軸方向20m間隔に8断面(A~H)の主計測断面が配置されており、その間に7つの補助計測断面が設けられている。日常管理計測項目は、全ての主計測断面、補助計測断面で多段式岩盤変位計(L=15~25m)による周辺岩盤変位測定が実施されている。また、最大掘削断面となる発電電動機室断面(B,C,D:3断面)では、弾性波速度測定、ポアホールTV観測、岩盤内応力変化測定(振動弦型地圧計, 埋設ひずみ計)、内空変位計測などのステップ管理計測が実施されている。なお、D断面の鉄

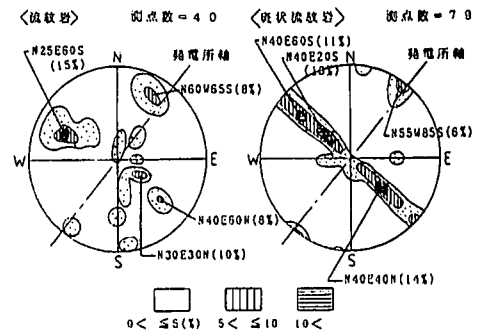


図-1 流紋岩類節理密度分布⁸⁾(南半球投影)

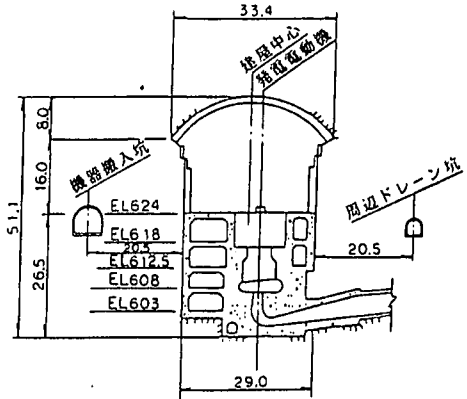


図-2 塩原地下発電所横断面図⁸⁾

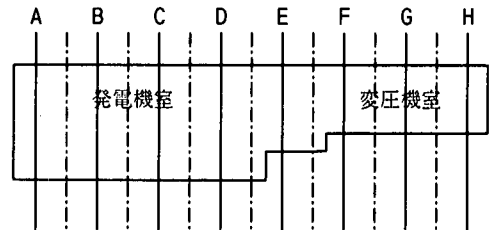


図-3 縦断面計測線位置図

表-1 当該地点の岩石・岩盤物性

	項目	物性値
岩盤	弾性係数(GPa)	2.9(C _M)~4.9(C _H)
	強度定数(MPa)	$\tau = 1.0 + \sigma \tan 45^\circ$
	残留強度(MPa)	$\tau = 0.5 + \sigma \tan 35^\circ$
岩石	一軸圧縮強度(MPa)	58.8~137.2(平均83.3)
	弾性係数(GPa)	25.5~69.6(平均42.1)

管路側側壁部では、掘削が終了した時点で球状孔底ひずみ法による絶対応力測定が実施⁹⁾されている。

本論文では、破碎帯・シーム等の弱層ゾーンが少ないB断面の掘削時岩盤計測挙動を対象として、側壁の相対変位時刻歴挙動、岩盤変位分布について解

表-2 変形挙動に影響する節理群

	走向・傾斜	解析断面での傾斜	節理間隔
1	N30E30N	左落ち30°	100cm
2	N40E60N	左落ち60°	100cm
3	N25E60S	右落ち60°	30cm

析結果と比較検討し、D断面の応力測定結果を参考までに応力解析結果と比較した。

3. 空洞掘削挙動解析仕様

(1) 初期応力および対象節理群

解析で適用した初期応力は、当該地点の3主応力を発電所断面（空洞軸直交方向）の二次元面内に変換した最大主応力4.7MPa、最小主応力3.5MPaであり、最大主応力方向は、鉛直方向より反時計回りに15°の方向である。なお、解析領域内においては、深さ方向への自重による応力の増加はないものとして一律に与えた。

解析モデルの節理の設定には、対象としたB断面の主体岩盤が流紋岩であることから図-1に示した節理密度分布のうち空洞掘削時に面内挙動に影響すると考えられる節理走向が発電所軸とほぼ平行となる表-2に示すような3セットの節理群を対象として、解析手法毎に考慮する節理群を選定することとした。

解析で用いた空洞形状は、図-2に示した天井にアーチコンクリートを配したきのこ型とし、発電所空洞周辺（左右離間20.5m）に隣接する馬蹄形の機器搬入坑（以降、周辺坑と呼ぶ）掘削も考慮した。周辺坑の規模は、鉄管路側が高さ5.5m、幅6.0m、放水路側が高さ3.6m、幅3.2mである。解析領域は、幅275m、高さ280mとし、周辺境界を固定条件とした。解析に用いた有限要素メッシュは、要素数1466、節点数1354である。

発電所空洞の掘削ステップは、アーチ部の天端に位置する頂設導坑(56m²)と周辺坑を同時掘削し、続いて、アーチ部掘削、アーチコンクリート打設およびアーチ側壁コンクリート打設の後、2.5m毎のベンチ掘削を考慮し、PS工導入力については、解析手法毎にPS工の考慮、未考慮および導入方法（PS工モデル）を設定した。

(2) 各解析手法の解析用物性値

地質概要および力学特性試験結果に基づき、各解析手法毎に地下空洞掘削解析を行い、実岩盤の変形挙動を最も良く表現し得るパラメータを抽出した。各解析手法毎に得られた物性値を表-3に一覧表に示す。

各解析手法の物性設定について以下に述べる。なお、ここでは、各解析モデルで定義している不連続面を統一的に節理と呼ぶことにする。また、表-3には、解析手法毎に岩盤の基質部の弾性係数Eを示しているが、対象とした解析手法では、この基質部に対して、卓越節理を除くランダムな微小クラックを含む岩盤部と節理を含まないインタクトな岩石部の2種類で定義している。各解析手法の基質部を特定して示す場合には、前者を“基質岩盤”、後者を“岩盤基質部”と呼ぶこととする。

①NAPIS

節理は、空洞断面の変形に最も寄与すると考えられる節理間隔が30cmの右落ち60°の節理のみを考慮した。基質岩盤の破壊強度および残留強度は、岩盤せん断試験の平均値を採用し、応力～ひずみ関係は、破壊余裕度による非線形($E/E_0=AR^B$ 、R:破壊余裕度、 $A=B=1.0$)で表現した。なお、初期接線弾性係数 E_0 は、平板載荷試験で得られた除荷時の接線弾性係数の上限値を設定した。節理特性は、岩盤せん断試験のフリクション試験結果に基づき設定し、節理の非線形パラメータは、節理の破壊強度に対する破壊余裕度($k_s/k_{s0}=aR^b$ ； k_s/k_{s0} :せん断ばね剛性比、R:節理の破壊余裕度、 $a=b=1.0$)により与えた。パラメータ設定の詳細については文献^{10), 11)}を参考されたい。

②MBC

節理は、表-2に示す3セットの節理群を全て考慮した。卓越節理を除いた連続体として扱われる基質岩盤の変形特性として、表-1より岩盤の弾性係数4.9GPa(C_H級)、ポアソン比 $\nu=0.25$ を採用した。節理特性については、過去に行った解析結果と計測値の比較および掘削規模などにより定めた²⁾。

③EQR

節理は、表-2に示す3セットの節理群を全て考慮した。岩盤基質部の物性値は、ボーリングコアの一軸圧縮試験結果の平均値42.1GPaを用いた。節理面特性は、流紋岩コア中の節理面の一面せん断試験、垂直載荷試験の結果を参考とし、空洞掘削終了時に計測された鉄管路側側壁上部(BI13測線)の岩盤変位分布に整合するように、パラメータスタディを行って設定した。なお、本解析手法では、支保工の設定も可能であるが、ここでは、ロックボルトの作用効果、PS工の導入力は考慮していない。

④MYM

節理は、表-2に示す3セットの節理群を全て考慮した。基質岩盤の物性は、卓越節理を除いた微小クラックを含んだ岩盤の弾性係数として、 $E=2.9GPa$ (C_M級)とし、強度定数は与えられた条件に基づくパラメータスタディにより決定した。

表-3 解析用物性値一覧表

解析手法		①NAPIS	②MBC	③EQR	④MYM	⑤CTM	⑥DTM	
基質部	E(GPa)	E _p =9.8 Non-linear A=B=1.0	4.9	42.1	2.9	39.2	19.6	
	E _r (GPa)	4.9	—	—	1.5	—	—	
	ν	0.25	0.25	0.14	0.25	0.25	0.25	
	ピーク強度 (MPa)	C _p =2.2 φ _p =55.3°	—	—	C=1.2 φ=45°	—	—	
	残留強度 (MPa)	C _r =0.7 φ _r =52.1°	—	—	—	—	—	
	引張強度 (MPa)	1.5	—	—	0.1	—	—	
節理特性	節理方向 節理間隔	-60° 0.3m	30° 1.0m	30° 1.0m	30° 1.0m	45°	30° 1.0m	
			60° 1.0m	60° 1.0m	60° 1.0m		60° 1.0m	
			-60° 0.3m	-60° 0.3m	-60° 0.3m		-60° 0.3m	
			-60° 0.3m	-60° 0.3m	-60° 0.3m		-60° 0.3m	
	他節理パラメータ	a=b=1.0	有効寸法 L _n , α=5°		—	—	F _p =10(節理密度)	Ω11=0.71 Ω22=0.29 Ω12=0.30
			30°	0.5m				
			60°	0.5m				
			-60°	2.0m				
	k _n (MPa/cm)	—	—	98	29.4×10 ³	19.6×10 ³ (MPa) ¹⁰	—	
	k _s (MPa/cm)	k _{sf} =10×σ _n Non-linear	—	15×σ _n	11.8×10 ³	2.5×10 ³ (MPa) ¹⁰	—	
破壊強度 (MPa)	C _j =0 Φ _j =45°	Φ _j (C _j =0)		C _j =0.1 Φ _j =35°	C _j =0 Φ _j =35°	—	—	
		30°	50°					
		60°	50°					
		-60°	35°					
支保工	PS工	PS工	—	PS工	PS工	PS工		

注)CTMのk_n,k_sは、応力の次元を持つパラメータを設定。

節理特性は、節理の初期ばね剛性を岩盤相当となるように算定し（節理厚さを1mmと仮定）、強度定数はパラメータスタディにより決定した。

⑤CTM

節理の分布特性は、パラメータスタディの結果に基づき、BI12～BI17の側壁岩盤変位分布が計測挙動に近い左落ち45°方向に卓越する節理を仮定した。岩盤基質部の弾性係数は、岩石の弾性係数の概略値39.2GPa(400,000kgf/cm²)を用い、ポアソン比は0.25とした。節理の垂直ばね剛性は基質岩盤の弾性係数の1/2、せん断ばね剛性は垂直ばね剛性の1/8とした。

⑥DTM

節理の分布特性は、表-2の3セットの節理群角度、間隔による代表寸法10m×10m領域を仮定し、重ね合わせることによって亀裂長さが10mとなるよう損傷テンソルを決定した。基質岩盤部の変形特性は、通常、主体岩盤の岩石コアの材料特性を適用するが、ここでは、パラメータスタディにより E=19.6GPa(200,000kgf/cm²)の値を用いた。

当該地点の変形挙動を表現するために考慮された節理群は、MBC, EQR, MYM, DTMは、実際の地質情報から得られている3セットの節理群であるが、NAPISは、最も節理間隔の小さい卓越節理のみを考

慮している。節理の幾何学特性を数値モデルとして与えるCTMは、当該地点の壁面変形挙動の非対称性を表現するために表-2に示した原位置での地質情報とは異なる節理方向(左落ち45°)を設定している。

NAPIS, MBC, MYMは、原位置岩盤試験結果の弾性係数に基づいた基質岩盤の物性値を用いており、EQR, CTM, DTMは、室内岩石試験結果の弾性係数に基づいた岩盤基質部(岩石コア)の物性値を用いている。岩盤自体の強度特性を解析的に扱っているのは、NAPIS, MYMであり、NAPISは、ピーク強度から残留強度への応力解放を考慮している。節理の強度特性を考慮しているのは、NAPIS, MBC, EQR, MYMであり、各モデルとも岩盤せん断試験結果の残留強度のφに基づいて設定している。また、NAPIS, EQR, MYMおよびCTMは、節理の変形特性として、ばね剛性を用いており、このうち、NAPIS, EQRのせん断ばね剛性k_sは、応力依存型の非線形特性を設定している。CTMは、垂直、せん断ばね剛性が応力の次元を持つため、同じ次元を持つコンプライアンス法のNAPIS, EQR, MYMのばね剛性を比較すると節理の垂直ばね剛性k_nは、EQRがNAPIS, MYMに比べて小さな値が設定されており、せん断ばね剛性k_sについては、NAPISとEQRは同程度の値となっているがMYMに比べて小さな値となっている。それぞれ

の基質部の弾性係数を考え合わせると、EQRはMYMに比べて、基質部の弾性係数が高い分、節理の両ばね剛性値が小さいため、変形挙動に寄与する節理の影響が大きく、節理を包含する岩盤の全体的な変形挙動が同程度になるものと考えられる。しかし、EQRとNAPISをせん断変形に関して比較すると、NAPISは基質部の剛性が小さく、せん断ばね剛性も小さいことから大きな変形挙動を示すものと考えられる。

4. 解析結果の比較

表-3に示した各解析手法の物性値は、B断面の岩盤変位計による左右側壁の相対変位挙動を対象としてパラメータを抽出したものであり、ここでは、まず、最終掘削終了時の岩盤変位分布および初期状態から最終掘削時までの側壁相対変位の時刻歴挙動について比較検討した。そして、計測挙動を最も良く表現した場合の各解析手法における岩盤内鉛直応力分布、破壊領域、節理開口分布および種々の解析結果の比較を行った。

(1) 岩盤変形挙動

表-3に示した各解析手法の物性値による最終掘削時の側壁部岩盤変位分布の解析結果と計測挙動の比較を図-4に示す。図中には、各測線毎に各解析結果の壁面相対変位量を示した。また、図-5には、解析結果の側壁相対変位時刻歴変化を計測挙動と比較して示す。以下に各解析手法の解析結果と計測挙動の整合性について述べる。

①NAPIS

解析結果による側壁部の変形挙動は、解析で設定した節理方向が鉄管路側（図中左側）側壁に対して流れ目、放水路側（図中右側）側壁に対して差し目となることから流れ目方向のせん断弾性係数が低下し、鉄管路側が放水路側に比べて大きな変形挙動となっており、鉄管路側と放水路側との非対称的な計測挙動と比較的良好一致を示している。側壁相対変位の時刻歴挙動は、鉄管路側アーチ側壁直下部のBI11、BI13で盤下げ掘削が測線のベンチを離れると頭打ちになるが、他の測線では、鉄管路側、放水路側とも実挙動と類似した傾向を示し、特に、鉄管路側中央部、下部の時刻歴挙動は、計測挙動と一致している。

②MBC

鉄管路側で流れ目となる右落ち60°の節理は、節理平均間隔が他の節理群より小さいことから有効寸法を大きく、摩擦角を小さく設定している。また、最大主応力の方向が右落ち60°の節理方向に近いために変形しやすく、広範囲に渡って変形が発生している。一方、放水路側の掘削に伴う側壁相対変位の

変化は穏やかであり、盤下げ掘削の進行に伴い、上部に位置する計測線では変位が収束し、当該地点の左右側壁の非対称性が表現できている。側壁相対変位の時刻歴挙動は、鉄管路側では、一旦、変形が生ずると密度（有効寸法/平均間隔）が大きいため、岩盤はより軟らかくなる傾向を示し、盤下げ掘削が測線のベンチから下方に離れても継続的に変形が発生する。側壁相対変位の時刻歴挙動についても、計測挙動を良く表現できている。

③EQR

掘削終了時の岩盤変位分布の解析結果は、鉄管路側のBI13を除いて、計測挙動との整合性はあまり良くない。他測線の側壁岩盤変位分布、特に、空洞下部の解析値は計測値よりいずれも大きい。この結果から推察すると、パラメータスタディの対象としたBI13付近は局所的な構造的不連続面の影響を受けた特異点の可能性もあり、対象岩盤全体の解析結果には節理面の変形特性を小さく評価して、全体の物性値を設定した結果が岩盤変位分布に表れていることも考えられる。鉄管路側の岩盤変位が放水路側に比べて大きくなる傾向は、空洞下部の掘削時の右落ち60°節理の流れ目の影響が表れており、計測挙動の傾向と一致している。

側壁相対変位の時刻歴挙動は、節理面の変形特性の影響により掘削直後の過大な変位の発生やその後の増分変位の大きさに現れている。解析結果では、空洞下部掘削に伴い空洞上部の側壁相対変位が減少しているが、これは相対変位計算起点の節点変位が壁面付近より大きくなるためである。

④MYM

岩盤変位分布は、鉄管路側では、BI17およびBI19で解析値と計測値はほぼ一致した結果となっているが、計測線BI11、BI13およびBI15の解析値は計測値と一致していない。放水路側では、解析値は全体的に計測値とほぼ一致している。また、計測挙動で鉄管路側が放水路側よりも全体的に変位が大きくなる傾向は、解析結果で表現されている。

側壁相対変位の時刻歴挙動は、計測値は全体的に盤下げ掘削が進んでも上方の変位が増加する傾向を示しているが、解析値は計測開始直後のベンチ掘削による変位が最も大きく、その後の盤下げ掘削が進むと次第に収束する傾向を示す。

⑤CTM

先の表-3に示すようにCTMでは、節理方向を実岩盤での節理方向とは異なる左落ち45°に設定しているが、岩盤変位分布は、鉄管路側が放水路側に比べて大きくなり、実岩盤の変形挙動の傾向と一致している。しかし、鉄管路側の岩盤変位分布傾向は、壁面近傍の変位が深部の変位より小さくなる傾向を示している。

鉄管路側

放水路側

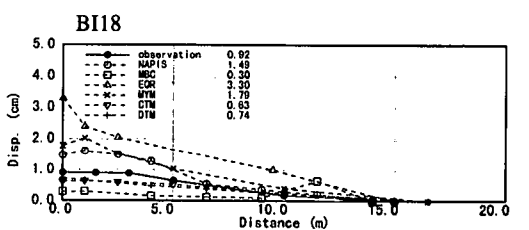
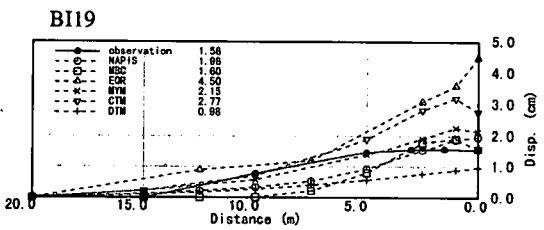
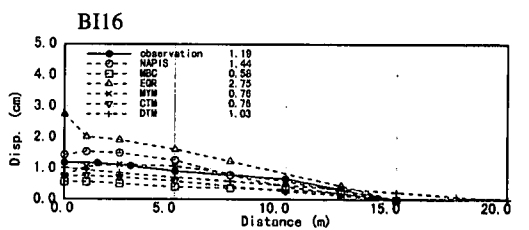
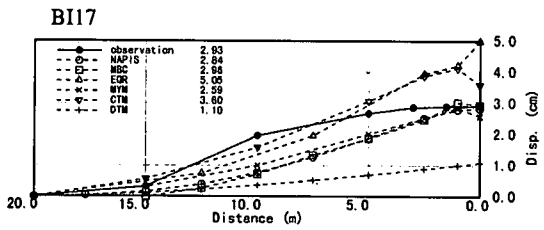
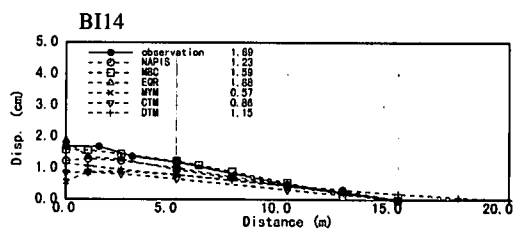
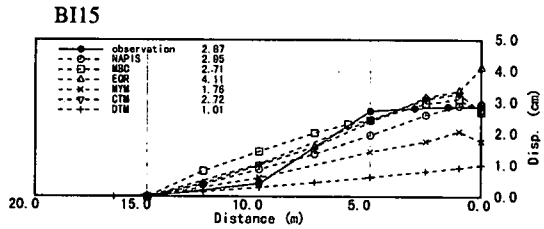
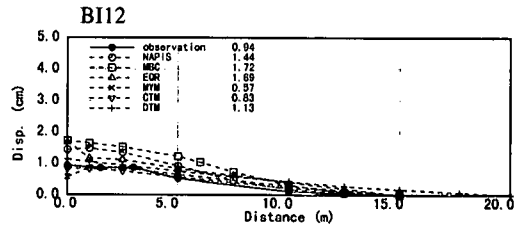
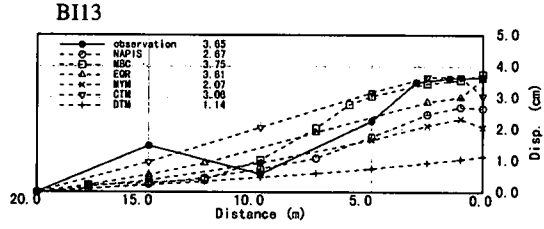
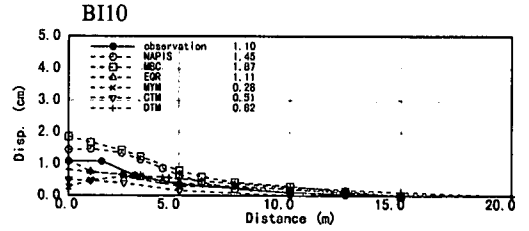
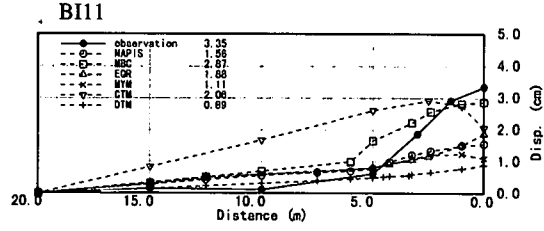
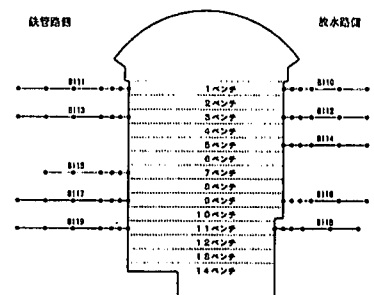


図-4 側壁岩盤変位分布比較図



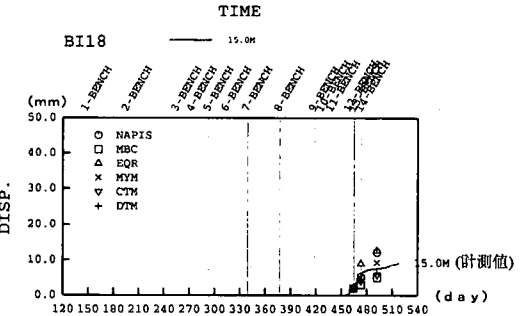
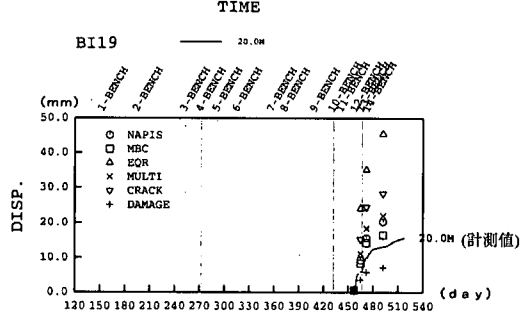
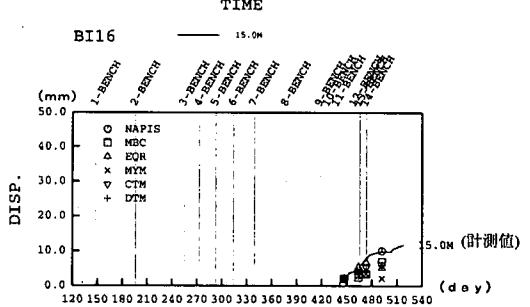
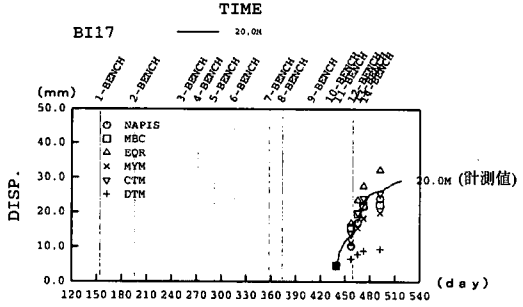
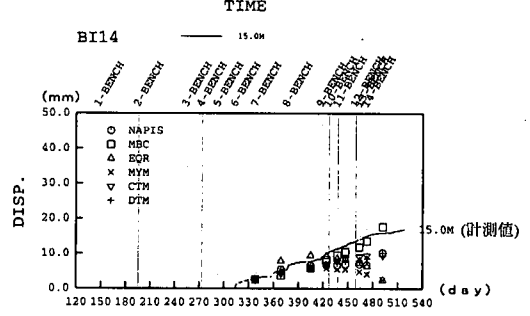
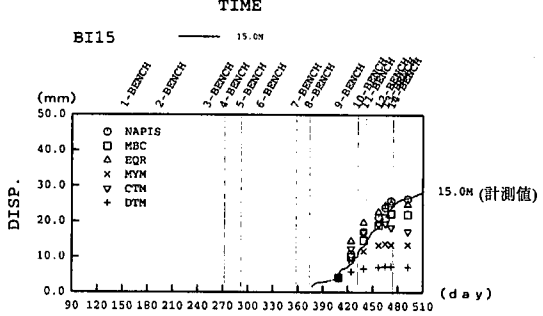
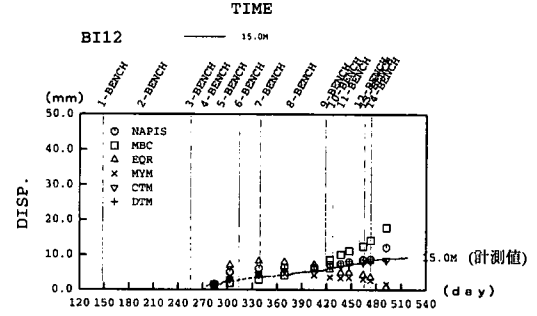
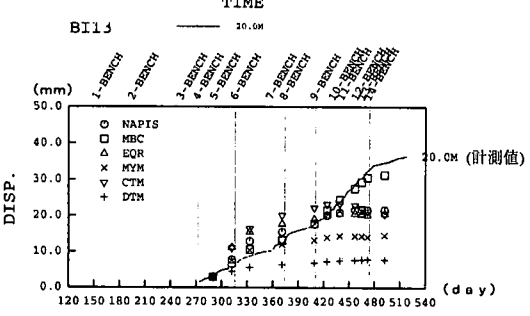
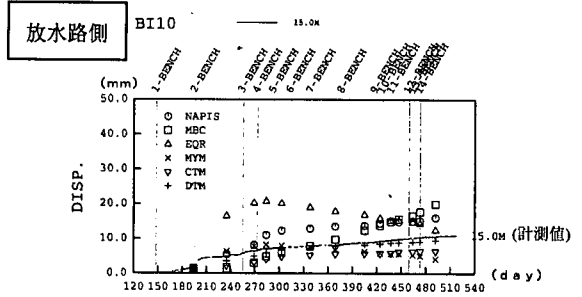
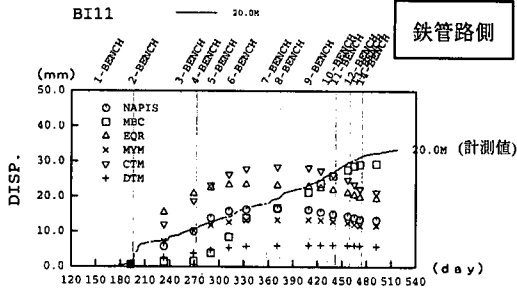


図-5 岩盤内相対変位の時刻歴比較

側壁相対変位の時刻歴挙動は、放水路側は、計測挙動とはほぼ一致しているが、鉄管路側は、中央部より上部の測線で最終掘削前に相対変位のピークが現れ、その後、相対変位が戻る傾向を示し、計測挙動と異なっている。

⑥DTM

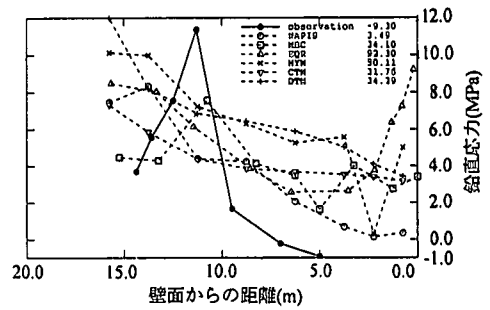
掘削終了時の岩盤変位分布の解析結果は、放水路側ではほぼ一致するが、左右側壁の非対称的な変形挙動が表現できておらず、鉄管路側では計測結果に比べて小さな値となっている。壁面相対変位の時刻歴挙動は、鉄管路側、放水路側壁部とも掘削に伴って緩やかに変位が発生しており、放水路側の上側では、計測挙動に近い傾向を示している。

各解析手法の結果を比較すると岩盤変位分布の左右側壁の非対称性は、DTMを除いて表現されている。計測挙動との比較では、NAPIS、MBCが比較的良好一致を示しており、EQRは、BI11、BI13を除いてやや大きめ、MYMは、鉄管路側で小さめの値を示している。岩盤変位の分布性状は、MBCがいずれの測線においても計測挙動の分布傾向と一致している。鉄管路側アーチ側壁下部のBI11、BI13の計測挙動は、3～5m区間で急激な区間変位が発生しており、この分布傾向は、MBCを除く解析では表現できていない。なお、この位置近傍では、破砕帯が確認されており、局所的な不連続挙動が計測されている可能性もあり、先述したEQRのBI13付近の不連続挙動の原因になっていることも考えられる。また、岩盤変位分布の計測挙動は、壁面近傍で変位増分が少なくなる傾向を示しているが、実際には、壁面から5m付近までは、ロックボルトが施工されており、この作用効果が現れていることも考えられる。

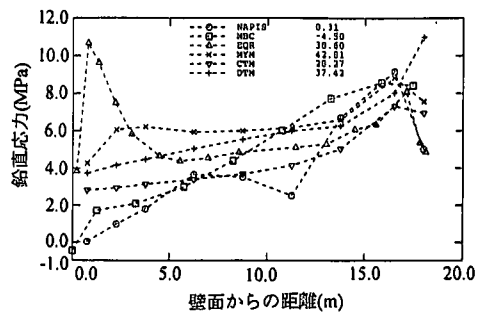
側壁相対変位の時刻歴挙動は、放水路側では、NAPIS、MBC、CTM、DTMが計測挙動と比較的一致しているが、ほぼ弾性的な挙動を示しているものと考えられる。鉄管路側では、MBCは、側壁相対変位の時刻歴の計測挙動といずれの測線においてもほぼ一致しているが、それ以外の解析手法の結果は、BI11、BI13の測線で10ベンチ掘削以後、変位増分が頭打ちとなる。また、EQR、CTMは、測線のベンチ掘削時に大きな変形が発生し、その後の盤下げ掘削で相対変位増分が小さくなる傾向を示しており、計測挙動と異なる結果となっている。これらの解析結果の比較によれば、側壁相対変位挙動については、MBCは、岩盤変位分布、時刻歴挙動共に良好一致を示しており、BI11、BI13の挙動を除けば、NAPISが比較的良好一致する結果が得られている。

(2) 空洞側壁の鉛直応力挙動

図-6に各解析結果の空洞側壁中央部の鉛直応力分



(a) 鉄管路側鉛直応力分布



(b) 放水路側鉛直応力分布

図-6 側壁中央部鉛直応力分布比較図。

布の比較を示す。図中には、最終掘削終了時に鉄管路側で計測された球状孔底ひずみ法による岩盤内応力(鉛直応力成分)を示した。計測された鉛直応力は、壁面より11m付近で初期最大主応力の3倍程度の最大値を示し、壁面から5m付近で0以下の値となる。また、壁面11mのピーク応力位置から深部方向には、応力低下が大きく周辺坑掘削の影響が含まれているものと考えられる。解析結果の評価については、紙面の関係で最終掘削時の鉛直応力分布のみを示したが、いずれの解析手法においても最終掘削に至るまでのアーチ掘削時、盤下げ掘削時に空洞底盤の隅角部に応力集中領域が発生する。

各解析手法による空洞周辺の鉛直応力分布に着目する。

NAPISは、基質部あるいは節理の破壊基準に抵触した場合に応力再配分の収束計算を行うため、要素が破壊した領域では鉛直応力が低下しており、壁面近傍では要素の応力は0に近い値となっている。鉄管路側の鉛直応力分布は、壁面から14m程度で最大応力を示し、壁面近傍では、他の解析手法に比べて最も低い鉛直応力を示している。

MBCは、空洞近傍は節理の変形が生ずるため、その岩盤から周囲の健全な岩盤に荷が移る、いわゆる応力再配分が起こって、周方向においても応力が減少する。鉄管路側では、計測結果と同様の壁面から11m程度で最大応力を示し、計測結果の定性的な傾向と一致している。放水路側では、壁面に近づくのに伴って、徐々に応力が低下しており、壁面では、NAPISと同様にほぼ0の値となっている。また、各掘削段階の応力状態の変化は、アーチ切り抜け後は、掘削断面が横長になるため、アーチアバット部近傍の隅角部で大きな応力集中(圧縮応力)が生じるが、こうした応力集中によって、この付近において節理は大きく変形する。そして、盤下げ掘削が下方へ進むとそれよりも上部の箇所ではほとんど応力状態は変化しない。ベンチ掘削においても応力集中は空洞底盤隅角部に生じ、その周辺で節理が大きく開口する。こうして節理が変形した領域は岩盤の剛性が低下するため、掘削が進むにつれて応力が再配分され、荷を受けない領域となる。

EQRは、不連続面が破壊しているにもかかわらず空洞壁面近傍の最大主応力の減小程度が小さく、最小主応力が引張状態となる。鉛直応力分布は、鉄管路側、放水路側とも壁面から5m程度が最も低い値を示し、壁面近傍では、10MPaの応力が発生している。この理由については、後述の最大主応力分布で述べる。

MYMは、壁面近傍では、基質岩盤の破壊強度を越えないように剛性が低下し、応力再配分が行われているため、応力が低下している。また、アーチ部の形状効果によりアーチアバット部直下で応力低下が見られ、初期地圧の傾斜の影響も加わって放水路側より鉄管路側の応力低下が著しい。

CTM、DTMの鉛直応力分布は、ほぼ同様の傾向を示しており、鉄管路側、放水路側とも周辺坑から空洞壁面に向かって緩やかに低下する。CTMは、壁面で鉄管路側3.1MPa、放水路側2.8MPa、DTMは、鉄管路側、放水路側とも3.4MPaの鉛直応力値を示し、弾性的な応力分布となっている。

以上の解析結果によれば、MBCの側壁部の鉛直応力は、鉄管路側の鉛直応力の計測結果と定性的に一致しているが、壁面近傍で2MPa～3MPaの鉛直応力が発生しており、計測結果に見られるピーク応力から壁面近傍までの応力低下傾向はNAPISの解析結果が比較的近い挙動を示している。放水路側は、鉛直応力の計測が行われていないがNAPISとMBCは、壁面近傍で0までの応力低下が見られる。この壁面近傍で応力低下するNAPIS、MBCは、一要素解析⁷⁾において、急激なひずみ増加を示す解析モデルであり、前

者は、基質岩盤が破壊後、強制的に応力を解放し、後者は、節理が破壊強度に抵触後、急激な剛性低下を示す解析手法である。

(3)破壊領域および節理開口分布

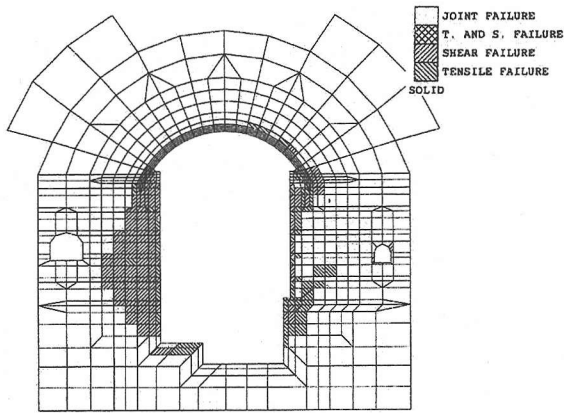
NAPIS、MBC、EQR、MYMは、基質岩盤、岩盤基質部および節理の破壊基準を設定した逐次非線形解析であり、それぞれの解析モデルの特徴として、破壊領域分布、節理開口分布が解析結果として得られる。図-7にNAPIS、MBC、EQRおよびMYMの各解析結果の破壊領域および節理開口分布を示す。なお、紙面の関係で最終掘削時の結果のみを示したが、掘削過程での挙動も含め各解析結果の特徴について述べる。

①NAPIS

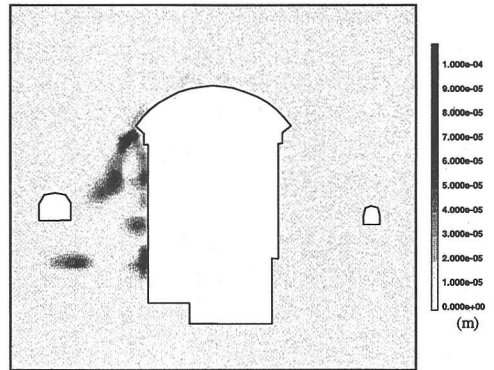
図-7(a)に示す岩盤および節理の破壊領域図によると、解析で設定した節理方向(右落ち60°)が流れ目となる鉄管路側では、初期地圧の傾きにより左下方向および右上方向に掘削に伴うせん断応力の大きな領域が発生する。鉄管路側では、基質岩盤のモビライズド方向が節理方向に近いために、節理の破壊と、その後、基質岩盤の残留強度にモールの応力円が抵触する破壊がほぼ同じ掘削ステップで発生し、空洞壁面から深部に拡大する。一方、放水路側では、掘削に伴うせん断応力の大きな領域は右上方向に発生するため、空洞側壁部の同レベルでは鉄管路側に比べてモールの応力円が相対的に小さく、節理の破壊は盤下げ掘削により右上方向に進展する。さらに、節理方向が基質岩盤のモビライズド方向と直交方向に近いことから、節理の破壊は、空洞側壁部の同レベルでは鉄管路側よりも遅延し、最終ベンチ掘削時の節理の破壊領域は鉄管路側と同程度となっているものの、その後の基質岩盤の破壊は空洞壁面近傍に留まる。

②MBC

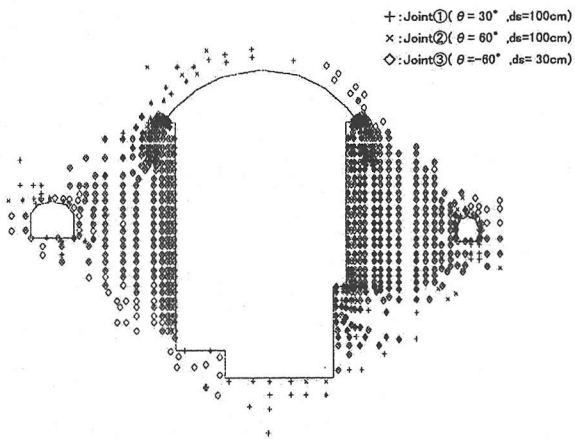
MBCでは、岩盤の変形挙動と節理の変形挙動は強い相関性がある。図-7(b)は、設定した3つの節理方向の節理開口量(m)を示したものである。最終掘削時の節理開口分布は、鉄管路側で流れ目となる右落ち60°の節理開口が著しく大きい。左落ちの両節理が流れ目となる放水路側では、両節理の摩擦角が高いため壁面近傍しか節理は変形しておらず、特に左落ち30°の節理はほとんど変形していない。掘削過程における節理の開口挙動は、鉄管路側では、流れ目の右落ち60°の変形が当該ベンチ掘削と同時に起こるが、鉄管路側で差し目となる左落ち節理は、第7ベンチを掘削することで、アバット付近から周辺トンネル方向かけて、両節理は変形を生じており、それ以降の掘削でもその変形領域は大きくなる傾向にあり、上部の測線においても下盤掘削時に差し目



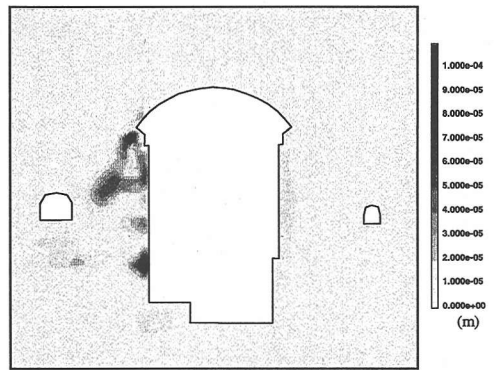
(a)破壊領域図(NAPIS)



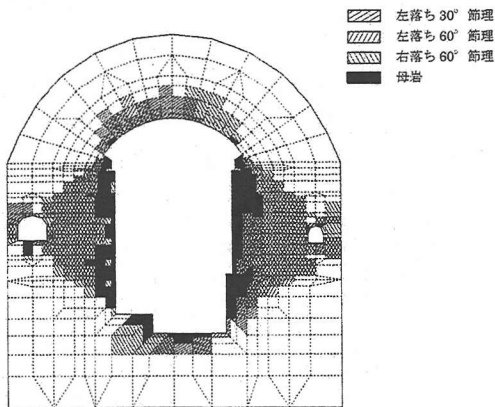
(i)左落ち 30°



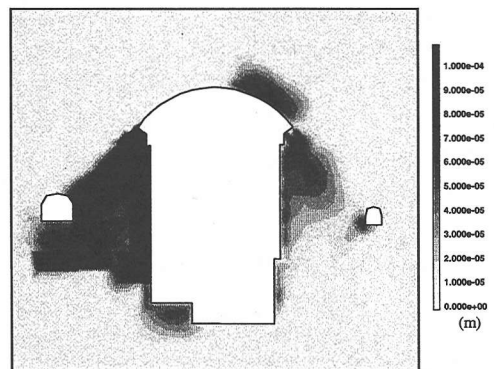
(c)破壊条件に抵触した不連続面分布図(EQR)



(ii)左落ち 60°



(d)節理破壊図(MYM)



(iii)右落ち 60°

(b)節理開口変位分布図(MBC)

図-7 岩盤・節理の破壊領域および節理開口変位分布図

の節理が変形することで再び大きな変位が生ずる可能性を示唆している。

最終掘削時における岩盤内変位は、鉄管路側では、壁面近傍では3方向全ての節理が変形しており、大きな変位を呈している。一方、放水路側は、流れ目となる右落ちの両節理の密度が小さいことなどに起因して、いずれの計測線においても変位は小さなものとなっている。また、先の図-4の側壁岩盤変位分布でBI11, BI13の壁面近傍で見られる岩盤変位の不連続は、こうした複数の節理の変形の有無に大きく依存しているものと思われる。

③EQR

掘削過程では、破壊条件に抵触した不連続面の分布は、盤下げ掘削に伴ってアーチバット部から併設空洞まで広がる。図-7(c)に示す最終掘削時の破壊領域は、鉄管路側、放水路側の側壁部間に大差が見られないが、左落ち30°の節理が放水路側の広い領域で破壊している。岩盤の平均水平ひずみが0.1%以下で連続的な挙動を示す計測変位分布を参考にするると、破壊領域が実態よりも過大のように見える。この結果は、岩盤深部のような不連続面の噛合せ効果が期待できる拘束応力状態では、せん断強度(C_f)をインタクトな岩石の強度を上限とし、大きく設定する必要があることを示唆している。

④MYM

図-7(d)に示す最終掘削時の側壁部では、右落ち60°の節理と左落ち60°の節理の破壊領域は、鉄管路側、放水路側で左右の周辺坑近傍まではほぼ対称に広がっている。一方、左落ち30°の節理の破壊は、鉄管路側ではほとんど生じておらず、放水路側の側壁近傍で発生している。これは、60°の節理が初期の最大主応力方向に近いと、全体的にすべり破壊しやすく、左落ち30°の節理は、初期応力の最小主応力方向に節理面方向に近いと、流れ目となる放水路側壁面付近を除いてすべり破壊しにくいとある。

基質岩盤の破壊領域は、節理の破壊領域ほど広範囲ではなく、放水路側、鉄管路側の壁面付近に同程度発生している。基質岩盤の強度は、節理の強度に比べかなり大きいと、MYMで用いている岩盤の物性値は、節理破壊後も各要素の主応力方向の剛性をある程度保持しているため、荷重が作用する方向によっては節理が破壊した要素であってもひずみの発生によって応力は漸増し、このために壁面付近では基質岩盤の強度特性に応力が達した要素が生じたものと考えられる。

(4) 空洞周辺岩盤解析結果の比較検討

各解析手法による解析結果の特徴・差異を検討するため、表-4に各解析手法の最終掘削終了時の等価

弾性係数分布図、最大主応力分布図、最大せん断応力分布図および最大せん断ひずみ分布図を一覧表にして示す。各解析結果毎に解析過程での結果も含め考察する。

a) 等価弾性係数分布

NAPISの等価弾性係数は、天端付近で剛性の小さな領域が局所的に存在するが、剛性の低い領域の広がりには、設定した節理方向(右落ち60°)の直交方向となっており、比較的遠方まで剛性低下の大きな領域が分布している。特に、鉄管路側は、岩盤深部まで剛性の低い領域が分布している。

MBCでは、最大主応力方向の要素接線剛性を算出したが、節理の起伏角が小さく、開口変形よりせん断変形が卓越している場合、節理が傾斜している方向に岩盤の剛性は低下するが、それと直交する方向には、開こうとする節理に抵抗するため、それほど剛性は低下しない。そのため、必ずしも節理の変形した領域と要素接線剛性が低下した領域が対応していない。ただし、主応力のコンター分布と照らし合わせると、要素接線剛性が低い箇所では荷をあまり負担しておらず、その近傍の健全な岩盤部で応力レベルが高くなっている。

EQRの岩盤基質部の弾性係数は、42.1GPaであるが、最終掘削時の各要素の主応力方向の接線弾性係数は、2GPa~3GPaの値となる。接線弾性係数2GPaのゾーンは、初期応力の最大主応力方向に分布しており、左落ち30°の k_n の影響で剛性が低下しているものと考えられる。

MYMでは、初期の接線剛性に対して剛性が低減している領域は、岩盤および節理破壊域図(図-7(d)参照)とはほぼ整合している。基質岩盤が破壊した場合に剛性の低減率が最も大きい。節理については、3セットとも節理の破壊した領域では剛性の低減率が大きく、例えば左落ち30°節理のみが破壊した領域では低減率は小さい。

CTMは、左落ち45°の節理による直交異方性の変形特性をモデル全体に与えることとなり、表に示すような最大弾性係数 $E_1=22.6\text{GPa}$ 、最小弾性係数 $E_2=0.5\text{GPa}$ の値を設定した。

DTMは、不連続面による有効断面の減少で岩盤の劣化を定義しているため、等価弾性係数分布図は示していない。

上述の等価弾性係数の比較によれば、NAPIS、MBCの側壁近傍の等価弾性係数は、鉄管路側で小さく、放水路側で若干大きくなる傾向があり、いずれも節理密度の高い右落ち60°節理のせん断方向に変形が発生するメカニズムが構成則に組み込まれているためと考えられる。また、両解析モデルの等価弾性係数の低下領域は、NAPISでは、周辺坑の外側まで緩

表-4(1) 解析結果一覧表

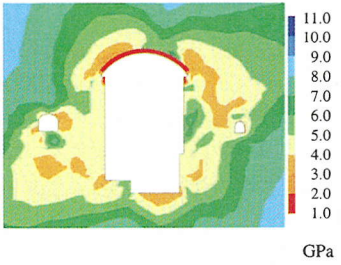
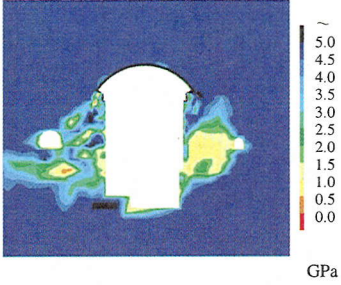
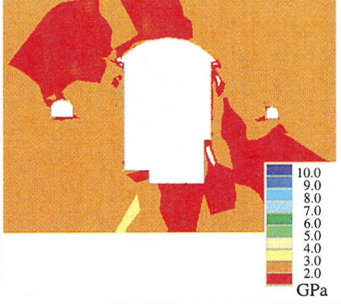
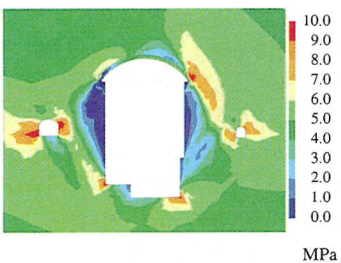
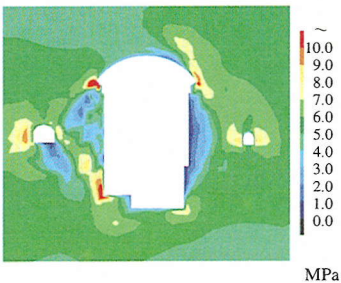
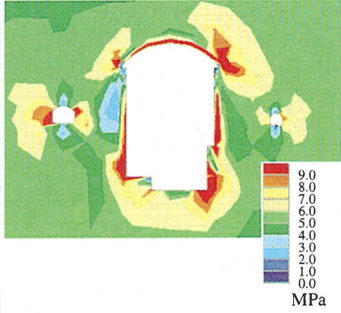
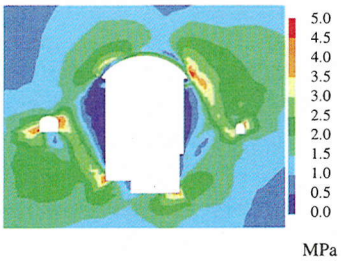
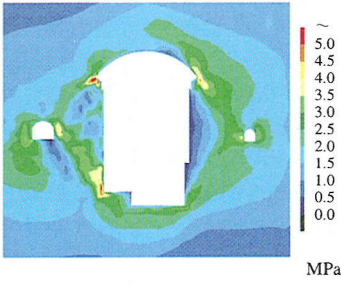
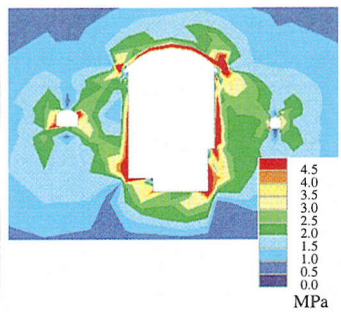
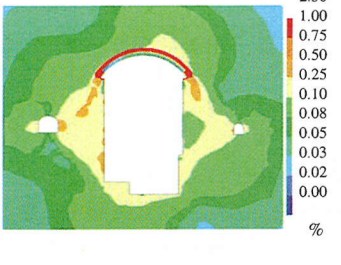
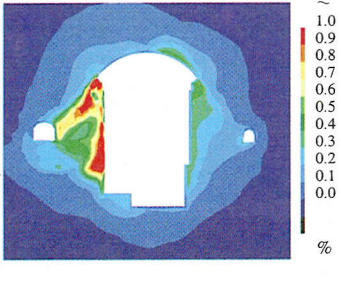
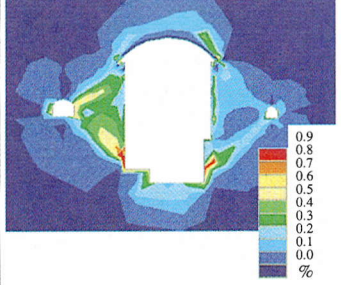
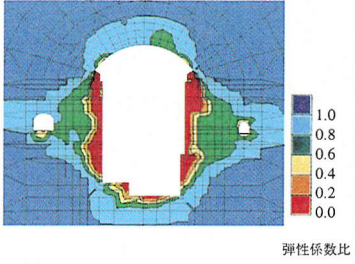
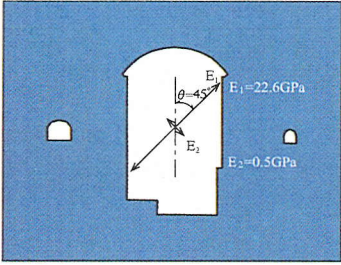
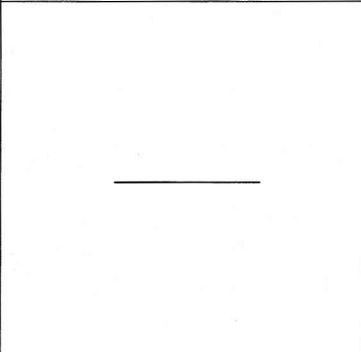
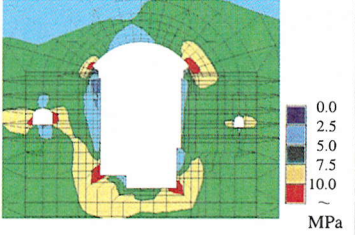
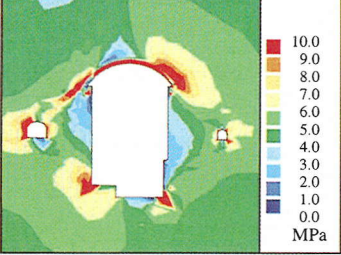
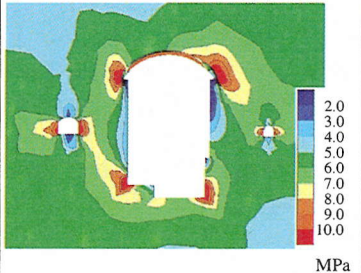
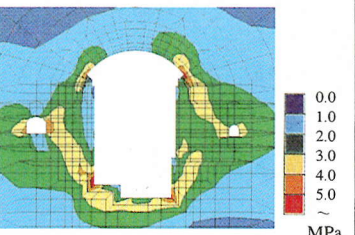
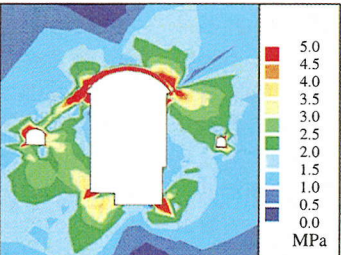
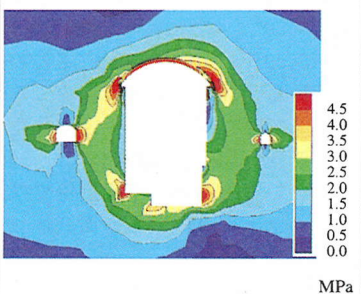
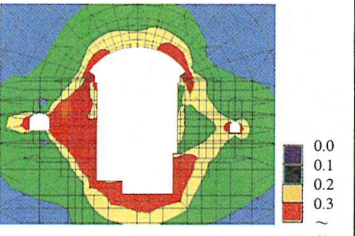
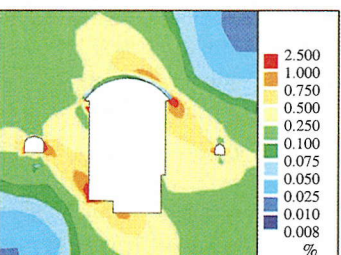
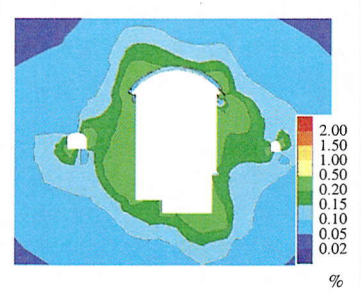
	NAPIS	MBC	EQR
等価弾性係数分布図	 <p>11.0 10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0</p> <p>GPa</p>	 <p>5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.5 0.0</p> <p>GPa</p>	 <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0</p> <p>GPa</p>
最大主応力分布図	 <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>MPa</p>	 <p>10.0 9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>MPa</p>	 <p>9.0 8.0 7.0 6.0 5.0 4.0 3.0 2.0 1.0 0.0</p> <p>MPa</p>
最大せん断応力分布図	 <p>5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.5 0.0</p> <p>MPa</p>	 <p>5.0 4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.5 0.0</p> <p>MPa</p>	 <p>4.5 4.0 3.5 3.0 2.5 2.0 1.5 1.0 0.5 0.0</p> <p>MPa</p>
最大せん断ひずみ分布図	 <p>2.50 1.00 0.75 0.50 0.25 0.10 0.08 0.05 0.03 0.02 0.00</p> <p>%</p>	 <p>1.0 0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.0</p> <p>%</p>	 <p>0.9 0.8 0.7 0.6 0.5 0.4 0.3 0.2 0.1 0.0 %</p>

表-4(2) 解析結果一覧表

	MYM	CTM	DTM
等価弾性係数分布図	 <p>弾性係数比</p>	 <p>$E_1=22.6\text{GPa}$ $E_2=0.5\text{GPa}$ $\theta=45^\circ$</p>	
最大主応力分布図	 <p>MPa</p>	 <p>MPa</p>	 <p>MPa</p>
最大せん断応力分布図	 <p>MPa</p>	 <p>MPa</p>	 <p>MPa</p>
最大せん断ひずみ分布図	 <p>%</p>	 <p>%</p>	 <p>%</p>

やかな低下度合いで広範囲に分布しているが、MBCは、空洞側壁部に集中している。前者は、基質部・節理が非破壊の状況においても応力～ひずみ関係は非線形であるが、後者は、節理がすべり条件に抵触するまで応力～ひずみ関係は線形であり、その後、節理の変形が急激に生じる。この解析モデルの変形特性の違いが岩盤変位分布の違いとして現れているものと考えられる。

EQRは、基質部を岩盤基質部として取り扱っているが節理の影響により全体的に等価弾性係数が大きく低下しており、他の解析モデルに比べて等価弾性係数のコントラストが小さい。

CTMについては、左落ち45°の節理による直交異方性を設定しているが、掘削により最大主応力が空洞周方向に分布する場合には、この最大主応力方向の弾性係数は、鉄管路側下方および放水路側上方で小さく、それぞれの直交方向では大きくなり、NAPIS、MBCの等価弾性係数分布と傾向的には整合するものと考えられる。

MYMでは、弾性係数比60～80%の等価弾性係数の低下領域は、NAPISと同様に空洞側壁に広く分布するが左右側壁での等価弾性係数の顕著な非対称性は見られない。

b) 最大主応力分布

NAPISの最大主応力分布は、設定した節理方向の影響を受けて、鉄管路側では、空洞底盤隅角部から上方向60°、放水路側では、アーチアバット部から下方向60°の方向で最大主応力の高いゾーンが分布している。最大主応力の連なった領域は、空洞周辺に矩形で存在しており、底盤隅角部より鉄管路側では、節理方向、放水路側では、節理の直交方向に分布している。なお、壁面近傍では、鉄管路側でアーチアバット部直下から壁面全体で応力が低い領域が分布している。

MBCでは、側壁近傍では、節理の変形によって岩盤の剛性が低下し、荷は剛性の高い健全な岩盤に移動する。したがって、先にも述べたように等価弾性係数の低い領域の外側に最大主応力の高い領域が分布する。鉄管路側では、隅角部における周方向と初期最大主応力の方向がほぼ平行となるため、より大きな応力集中が起こる。こうした帯状に広がる応力レベルの高い領域は、そのすぐ近傍において岩盤の剛性が低下し、応力がその外側へと移動していくことによって形成されたものである。一方、放水路側でも類似した傾向が認められるが、応力のレベルが鉄管路側に比べれば小さく、特に、空洞底盤隅角部では大きな応力集中は見られない。全体的にみると、応力レベルの高い箇所は初期応力の最大主応力方向とはほぼ平行に分布している。なお、アーチアバット

部付近の隅角部の応力集中は、アーチ部切り抜け時に発生し、そのまま残留する。

EQRの最大主応力分布は、アーチ掘削時のアーチアバット部、盤下げ掘削時の底盤隅角部に応力集中が見られ、盤下げ掘削後も応力が残存し、最終掘削時の側壁近傍に見られる高い応力分布になるものと考えられる。等応力コンターは、節理面の傾斜方向に延びる形で分布し、不連続面の影響が現れている。

MYMは、EQRと同様にアーチ掘削時のアーチアバット部、盤下げ掘削時の底盤隅角部に応力集中が見られ、最終掘削時には、鉄管路側では、底盤隅角部から周辺坑へ応力の集中域が伸びてつながる。また、壁面付近では基質岩盤と節理の破壊に伴う応力再配分により最大主応力の小さい領域が分布しているが、鉄管路側の方が大きい。これは、鉄管路側側壁部における応力低下領域が広いいため、その外側に応力が集中したものと考えられる。

CTMは、掘削過程において、アーチ掘削時に設定した45°方向の節理に平行な方向に最大主応力の高い領域が分布し、盤下げ掘削に伴って、放水路側のアーチアバット部と鉄管路側のアーチアバット部から周辺坑に向けて応力の高い領域が広がる。最終掘削時では、空洞底盤隅角部で最大主応力の高い領域が発生し、空洞周辺には節理に平行な方向と直交する方向に最大主応力の高い領域が分布している。一方、壁面近傍では、アーチアバット部の直下と鉄管路側の側壁上部および放水路側の側壁下部に応力の低い領域が分布している。

DTMの最終掘削時の最大主応力分布は、両アーチ肩部および両底盤隅角部で応力の高い領域が発生し、鉄管路側アーチアバット部を除いてはCTMと同様の分布傾向を示す。しかし、壁面近傍の応力の低い領域は、CTMとは逆にアーチアバット部の直下と放水路側の側壁上部および鉄管路側の側壁下部に分布している。

c) 最大せん断応力

NAPISの最終掘削時の最大せん断応力分布は、鉄管路側は、底盤隅角部より周辺坑の方向に、放水路側は、アーチアバット部から周辺坑の方向に、設定した右落ち60°の節理方向に応力の高い領域が分布する。また、応力～ひずみ関係が応力レベルに依存した非線形特性を設定していることから、前述の等価弾性係数分布図と類似の傾向を示す。

MBCの最大せん断応力分布は、ほぼ最大主応力分布と同様に鉄管路側では、応力の高い領域がアーチアバット部から周辺坑に向かって広がっており、放水路側は、アーチアバット部より周辺坑の方向にせん断応力の高い領域が分布しており、NAPISと類似した分布傾向を示している。

EQRの最終掘削時の最大せん断応力分布は、空洞を取り囲むようにアーチ肩部、側壁近傍および底盤隅角部でせん断応力の高い領域が分布し、最大主応力分布と類似している。空洞周辺の最大せん断応力の高い領域の分布は、両アーチアバット部から周辺坑、両底盤隅角部から周辺坑に応力の集中域が連なっており、空洞を大きく取り囲むように分布している。

MYMの最終掘削時の最大せん断応力分布は、鉄管路側では、底盤隅角部から周辺坑、放水路側では、アーチ肩部から周辺坑に応力の集中域が連なっており、NAPIS、MBCと同様の分布傾向を示している。

CTM、DTMの最終掘削時の最大せん断応力分布は、他の解析モデルと若干異なり、鉄管路側のアーチアバット部から周辺坑に応力の集中域が分布しており、その方向は、CTMでは、設定した左落ち45°の節理方向、DTMでは、左落ち60°方向になっている。

これらの結果からNAPIS、MBC、MYMは、ほぼ同様のせん断応力分布傾向を示し、EQRは、側壁近傍のせん断応力の高い領域を除いた周辺部で同様の傾向を示す。一方、CTM、DTMは、アーチアバット部、底盤隅角部で顕著なせん断応力の集中が見られ、鉄管路側上部に最も応力の集中する領域が存在し、鉄管路側の変形挙動に寄与しているものと考えられる。

d)最大せん断ひずみ分布

NAPISの最終掘削時の最大せん断ひずみ分布は、アーチアバット部、周辺坑、底盤隅角部を結ぶ矩形領域で0.25%のひずみ領域が見られる。空洞掘削に伴う最大せん断ひずみ分布の変化は、盤下げ掘削に伴って下方に最大せん断ひずみの大きな領域が広がる傾向を示す。

MBCは、節理の変形成分が卓越節理を除いた基質岩盤の変形成分に比べてかなり大きいため、せん断ひずみの大きな領域は節理が変形した領域とほぼ一致しており、図-7(b)に示した3つの節理群の開口分布を重ね合わせると最大せん断ひずみ分布と良く対応している。右落ち60°の節理に関しては、他の2方向の節理よりも有効寸法が大きく、かつ平均間隔が小さいため、最大せん断ひずみの分布は右落ち60°の節理の開口変位分布と良く一致している。0.2~0.3%のひずみ領域は、NAPISの0.25%の領域を挟むように存在し、ほぼ同様の領域である。

EQRの最終掘削時の最大せん断ひずみ分布は、鉄管路側のアーチアバット部、底盤隅角部および周辺坑を結ぶくさび状にせん断ひずみの高い領域が存在する。放水路側は、底盤隅角部から周辺坑に向かう帯状の領域に分布している。0.2~0.3%のひずみ領域は、MBCの同ひずみ領域とほぼ一致しているが、底

盤下部方向には、同ひずみレベルの領域がMBCよりも広く分布している。

MYMの最終掘削時の最大せん断ひずみ分布は、アーチアバット部と底盤隅角部に最大せん断ひずみの大きい領域が発生し、特に、鉄管路側は、せん断ひずみの大きい領域が周辺坑まで連続して分布している。一方、放水路側では、壁面近傍にNAPISにも見られるせん断ひずみの小さい領域が存在する。鉄管路側に大きな最大せん断ひずみ領域が生じる要因としては、左落ち60°の節理よりも節理間隔が小さい右落ち60°の節理が鉄管路側の壁面に対して流れ目になっており、このすべり破壊によって大きな変位が生じるためと考えられる。

CTMの最大せん断応力分布は、鉄管路側は、底盤隅角部から、放水路側は、アーチアバット部から設定した左落ち45°の節理方向の直交方向にせん断ひずみの大きな領域が存在する。0.25%の領域は、空洞上部、底盤下部および周辺坑の外側まで広く分布している。

DTMの最大せん断ひずみの分布は、鉄管路側の側壁部と放水路側のアーチアバット部でせん断ひずみの大きな領域が存在するが、他の解析の同領域に相当するせん断ひずみは、0.15%と若干小さな値となっている。

これらの結果によれば、ひずみ分布の傾向は、解析手法毎に異なるものの0.2~0.3%の最大せん断ひずみ分布は、NAPIS、MBC、EQR、MYMでほぼ同程度の領域となっており、同ひずみレベルの最大せん断ひずみ領域は、CTMが大きく、DTMが小さくなっている。

5. まとめ

不連続性岩盤を対象とした解析手法として、6つの解析モデルを用いて、大規模地下空洞掘削時の計測挙動に基づき、解析結果について比較検討を行い、解析結果に現れる特徴・差異について以下のことが明らかになった。

①計測挙動の岩盤変位分布の非対称的な壁面変位分布は、いずれの解析手法においても表現することはできるが、最終掘削時の左右の側壁相対変位の絶対値については、NAPIS、MBC、MYMが比較的良く一致している。側壁相対変位の時刻歴については、MBCがいずれの測線においても下盤掘削まで変位が継続的に発生する計測挙動を表現できているが、他の解析手法では、B111、B113の測線で10ベンチ掘削以後、変位増分が頭打ちとなる傾向を示す。MBCでは、盤下げに伴って変形に寄与す

る節理（開口する節理）が変化しており、この変化により継続的な壁面変位の発生が表現されているものと考えられる。

- ②壁面近傍の鉛直応力分布については、壁面深部11m程度の応力集中は、MBCが定性的な応力分布を表現しているが、壁面近傍で2MPa～3MPaの鉛直応力が発生しており、ピーク応力から壁面近傍にまでの応力低下傾向はNAPISの鉛直応力が比較的計測結果に近い挙動を示している。この壁面近傍で応力低下するNAPIS、MBCは、一要素解析において、急激なひずみ増加を示す解析モデルである。
- ③等価弾性係数分布は、解析毎に組み込まれた強度・変形特性の特徴により分布領域が異なり、この違いにより各解析の岩盤変位分布の特徴が現れているものと考えられる。また、CTMでは、節理方向を左落ち45°としているが、計測挙動の左右側壁変位の非対称性が表現できているため、表-2の3方向節理の等価な節理方向が45°となっていることも考えられ、各解析手法の接線剛性の主値を比較する必要がある。
- ④最大主応力分布は、いずれの手法においてもアーチアバット部、空洞下端隅角部で応力集中が認められる。側壁近傍の最大主応力は、NAPIS、MBCが応力の低い領域が広く分布し、MYM、CTM、DTMは、応力の比較的低い領域が壁面近傍に分布し、EQRでは、側壁近傍に最大主応力の高い領域が残存する結果となっている。
- ⑤最大せん断応力分布は、NAPIS、MBC、MYMおよびEQRは、鉄管路側底盤隅角部、放水路側アーチアバット部から周辺坑に最大せん断応力の高い領域が分布するが、CTM、DTMは、鉄管路側アーチアバット部から周辺坑に最大せん断応力の高い領域が分布する異なった傾向を示す。
- ⑥各解析手法の側壁相対変位が異なるものにも関わらずDTMを除いて、 2.0×10^{-3} ～ 3.0×10^{-3} の最大せん断ひずみ分布は、ほぼ同程度の領域に分布しており、ひずみを基準としたゆるみ領域を評価する場合には、解析モデルによる差は小さく、ほぼ同様の領域となる。

上記①の結果から大規模空洞での盤下げ掘削時の変形挙動を表現するには、応力状態の変化による基質部の破壊あるいは節理のすべり等を考慮できるモデルが有効と考えられる。②の結果では、計測結果で見られるような空洞壁面近傍での0までの鉛直応力の低下は、NAPIS、MBCのように、一要素解析結果⁷⁾の応力～ひずみ関係において、破壊後の剛性が急激に低下するモデルで表現できる。また、節理情報を直接反映させたモデル、主要な節理のみを考慮し

たモデルおよび③で述べた計測結果を表現するために節理情報とは異なるパラメータを設定したモデルにより、対象地点の特徴的な最終掘削時の岩盤変位分布をある程度表現できることから、各解析手法の接線剛性の主値等について比較し、各解析手法と節理設定方向の関係について把握する必要があるものとする。④～⑥では、いずれの解析手法においても、空洞周辺の主応力、せん断応力、ひずみ等の解析結果に周辺坑掘削（存在）の影響が現れており、大規模空洞掘削に当たっては、周辺坑との位置関係、離間距離等の事前検討の必要性が示唆される。今後は、異なる空洞形状における各解析手法での解析結果の特徴について比較を行い、不連続性岩盤での各解析手法の適用性について検討を実施する予定である。

6. おわりに

本論文は、平成8年度～平成10年度に実施された土木学会エネルギー土木委員会大規模地下空洞掘削技術小委員会における研究成果をまとめたものである。本論文をまとめるに当たっては、当小委員会委員：伊藤洋氏（電力中央研究所）、浦上博行氏（中部電力）、岡本明夫氏（日本地下石油備蓄）、福原明氏（電源開発）、袋井肇氏（関西電力）、水戸義忠氏（京都大学）、南部茂義氏（東京電力）、解析検討分科会委員：武内邦文氏（大林組）、永井哲夫氏（ダイヤコンサルタント）のご助言を頂いた。また、解析に関して、中村真氏（ニュージェック）、田坂嘉章氏（東電設計）、石井大介氏（鹿島建設）のご協力を頂いた。ここに、記して感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 田坂嘉章、宇野晴彦、大森剛志、工藤奎吾：節理の破壊を考慮したひずみ軟化解析手法による地下発電所空洞掘削の解析、第10回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、pp.575-580、1998。
- 2) 吉田秀典、堀井秀之：マイクロメカニクスに基づく岩盤の連続体モデルと大規模地下空洞掘削の解析、土木学会論文集、No.553/Ⅲ-34、pp.23-41、1996。
- 3) 北條明、中村真、打田靖夫、櫻井春輔：不連続岩盤におけるロックボルトの設計法について、土木学会論文集、No.553/VI-33、pp.143-153、1996。
- 4) 佐々木猛、吉中龍之進、永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究、土木学会論文集、No.505/Ⅲ-29、pp.59-68、1994。
- 5) 山辺正、原夏生、小田匡寛：クラックテンソルによる節理性岩盤の弾性変形解析と入力パラメータの決定に

- 関する研究, 土木学会論文集, No.382/Ⅲ-7, pp.121-129, 1987.
- 6) 京谷孝史, 市川康明, 川本朧万: 岩盤の力学特性評価における損傷テンソルの適用について, 土木学会論文集, No.358/Ⅲ-3, pp.27-35, 1985.
- 7) 堀井秀之, 宇野晴彦, 吉田秀典, 芥川真一, 打田靖夫, 森川誠司, 山辺正, 多田浩幸, 京谷孝史, 伊藤文雄: 節理性岩盤を対象とした各種解析手法による要素解析結果の比較, 土木学会論文集, No.659/Ⅲ-52, pp.229-240, 2000.
- 8) 前島俊雄, 伊東雅幸: 1,500m²の大断面空洞を掘る 蛇尾川揚水式発電所, トンネルと地下, 第22巻, 8号, pp.7-15, 1991.
- 9) 前島俊雄, 伊東雅幸: 蛇尾川揚水発電所地下発電所空洞の設計と施工実績について, 電力土木, No.232, pp.25-35, 1991.
- 10) 大森剛志, 田坂嘉章, 宇野晴彦, 秋元賢吾, 工藤奎吾: 大規模地下空洞掘削解析における基質岩盤物性の設定方法の提案, 第53回土木学会年次学術講演会Ⅲ-B, pp.422-423, 1998.
- 11) 田坂嘉章, 大森剛志, 宇野晴彦, 工藤奎吾: パラメトリックスタディによる大規模地下空洞掘削解析における節理物性の評価, 第53回土木学会年次学術講演会Ⅲ-B, pp.424-425, 1998.

(1999.10.15受付)

COMPARISON AND DISCUSSION OF BEHAVIORS DURING THE EXCAVATION OF THE SHIOBARA POWER HOUSE CAVERN BY SOME NUMERICAL METHODS FOR JOINTED ROCK MASS

Hideyuki HORII, Haruhiko UNO, Hidenori YOSHIDA, Shinichi AKUTAGAWA,
Yasuo UCHITA, Seiji MORIKAWA, Tadashi YAMABE, Hiroyuki TADA,
Takashi KYOYA and Fumio ITO

In this article, some representative analysis methods for a jointed rock mass are employed as the method that can accurately reproduce the mechanical behavior of the jointed rock mass. The excavation of the Shiobara power station cavern constructed by the Tokyo Electric Power Company is analyzed by them, and results, such as a relative displacement at cavern wall as a function of time and a displacement distribution of rock mass, are compared with measurement data. Based on the numerical results, the constitutive law of each method is considered by paying attention to the mechanical behavior of the jointed rock mass obtained from each analysis, and the mechanism which gives rise to the distinctive behavior of the rock mass is discussed. Furthermore, a point common to all and a point of difference are clarified by the results, and their distinctive features and different points in terms of the mechanical behavior of the jointed rock mass during the excavation of large-scale cavern are disputed.