

## 地中式配水タンク的设计・施工

### Design and Construction of Water-Distribution Tank

河村真次\*・和田孝秀\*\*・関野英男\*\*\*・武藤直樹\*\*\*\*

Shinji KAWAMURA, Takahide WADA, Hideo SEKINO and Naoki MUTO

This Rock Cavern is a water-distribution tank, located 30m underground in Mt.Kinka. This shape is a warhead cylindrical with domed roof, diameter 30m × height 30m and 20,000m<sup>3</sup> in volume. This ground condition is RQD 20 ~ 30 which has two faults. We report the design, the excavation and measuring result of construction. Based on the construction results, we describe the possibility that RMR index can appreciate a condition of rock. This RMR value which quantitatively evaluated the rock mass, the followings were proven, that could become an index for the setting of the ground physical property and for estimating the future of primary support. By repeating storage and verification of data, it seems to clarify the effectiveness.

*Key word : water resource, underground, rock cavern, RMR*

#### 1. はじめに

岐阜市の中心より北東方向 5 km に位置する金華山地中に建設している地下大空洞は、金華山周辺の豊かな自然環境を守り、安定した供給と災害に強い都市機能としての水道施設の充実に貢献するための「水瓶」としての貯水タンクである。この貯水タンクは、災害時や異常時の飲料水確保と安定給水、安価な夜間電力の利用による運転コスト削減を目的としており、給水する区域は岐阜市長良川以南の鏡岩水源地エリアの 114,800 人を対象に計画され、最大貯水量約 20,000m<sup>3</sup> が確保できる。

この貯水池が地下に計画された理由は、地下に設置することによる周辺の自然景観への影響を軽減する目的が大である<sup>1)</sup>。特に、本水源地を含む金華山周辺は、風致地区、特別鳥獣保護区、林木遺伝資源保存等景観や自然保護のための規制が多いため、水源地に最も近接し、自然流下可能な配水池高さを満足させるためには金華山山中に計画することが最適であると判断した。このような理由を基に計画された地下配水池の地下大空洞は、直径 30m × 高さ 37.55m の弾頭型地下空洞であり、我国でも珍しい地中式配水タンクである。周辺地盤は、比較的硬質であるが、亀裂指数を示す RQD が 20 ~ 30 とかなり低くクラッキーな岩盤であり、2 条の連続した断層を有し、最小土被り厚が約 30m と浅い、地下空洞の建設条件としても実績の少ない珍しい地盤条件である。また、タンクの計画位置近傍には金華山トンネルがあり、トンネルへの影響も考慮して位置を選定した。ここでは、鏡岩配水池地下空洞掘削工事の設計や施工についての概略を報告するとともに、RMR を用いた地盤評価に対する考察を行った結果を報告するものである。

---

キーワード：水資源、地下貯水池、地下大空洞、RMR

- \* 岐阜市水道部水道施設課 副主査
- \*\* 大日本土木(株)名古屋支店土木工事部 課長
- \*\*\* 技術士 大日本土木(株)技術研究所 主任研究員
- \*\*\*\* 技術士 国際航業(株)道路交通部 主任

## 2. 地下空洞の形状概要

地下空洞の形状は、図-1に示すように、直径30m×高さ30mの円筒形状の貯水部と、貯水部の天井を形成する高さ7.55mのドーム型の天井アーチ部からなる弾頭型である。最終構造は、天井アーチ部が27cmの吹付けコンクリート、貯水部が50cm厚の鉄筋コンクリートであり、一次支保工はロックボルトと吹付けコンクリート、永久アンカーにより構成されている。また、地下空洞への進入路は、坑口から空洞外壁面より30m離れた位置を螺旋状に上部トンネルでL=312m、H=43m上り、貯水部最上部へ至る経路と、坑口から下部トンネルL=129.6m、H=18m上り、貯水部最下部へ至る経路とがある。この上部トンネルは地質調査坑を兼ねており、空洞掘削中は資機材の運搬用として利用し、完成後は一定の制限のもとで見学通路を予定している。下部トンネルは、空洞掘削中は掘削残土搬出用であり、完成後は配管用として使用する。また、深さ7mの坑口は機械棟を設置した後、埋め戻して地上を公園として利用する計画である。

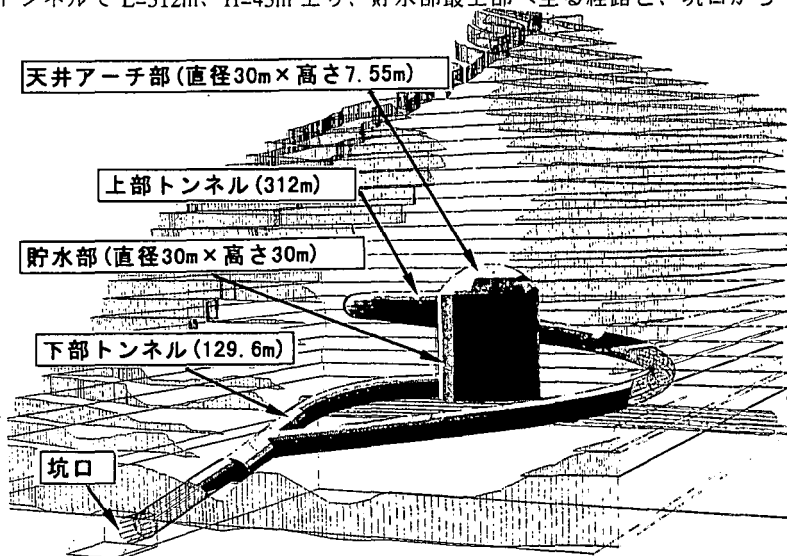


図-1 鏡岩配水池の概要図

## 3. 地下空洞の設計施工の概要

### 3.1 地質構造概要

地下空洞周辺地盤は、地表地質精査、坑内観察、調査ボーリングとポアホールテレビ観察、弾性波探査等の結果を総合的に検討することで、図-2に示すような地質構造図を推定した。図中には後述するRMRによる岩盤区分(Ⅲ~Ⅴ)も併記している。

チャートの層理面は、走向NW-SE、傾斜SW落ちと、走向NE-SW、傾斜NW落ちの構造を示し、半波長1~2mの開いた褶曲や、完全に閉じて折りたたまれた褶曲がみられる。珪質部と泥質部が互層をなす層状チャートと、石英脈を伴い層構造の不明瞭な塊状チャートに大別され、層状チャートの単層の厚さは3~5cm程度で、これに直交するヘアクラックが発達している。切羽ではハンマーの打撃により、数cm~10数cmの大きさに分離しやすい。また、露頭では褶曲軸面に平行な節理に沿って数m大のブロックに分離しているのが認められる。

2条の断層(F-1, F-2)は、地表部・作業坑・調査横坑・ボーリングでの調査結果から検出した走向傾斜を、図-3に示すように3次元グラフィックス化することで、走向NE-SW、傾斜NW方向に連続性のあることを確認した。この断層は、約20cm程度の破碎帯と断層粘土を伴っており、断層下盤側は鏡肌と条線が認められ、条線の方向は断層の最大傾斜方向と一致する。また下盤側には、カタクレサイト(固結した断層岩)を伴い、これらの断層がジュラ紀の付加帯形成時とほぼ同時期に形成されたものであることを示唆している。活動度を示唆する変位基準が確認できないため、死断層もしくは極めて活動度の低い断層と思われる。

図-2に示す断層の上盤側にある低速度帯は、弾性波トモグラフィー(地表面~空洞内)により検出されたものであり、断層に対して交差し、山側に向かって傾斜している。地表地質精査の結果では、この低速度帯に調和的な断層や強風化帯は認められないことから、野外で確認した数m規模のブロック化によって割れ目が開口した部分(サギング)と考えた。

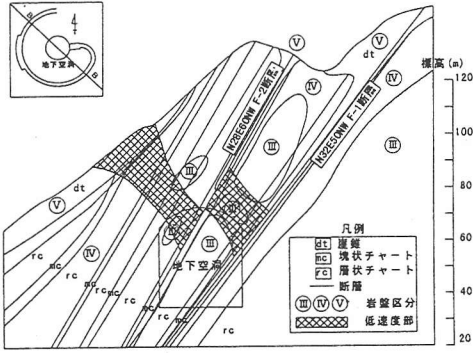


図-2 地質構造図 (B-B'断面)

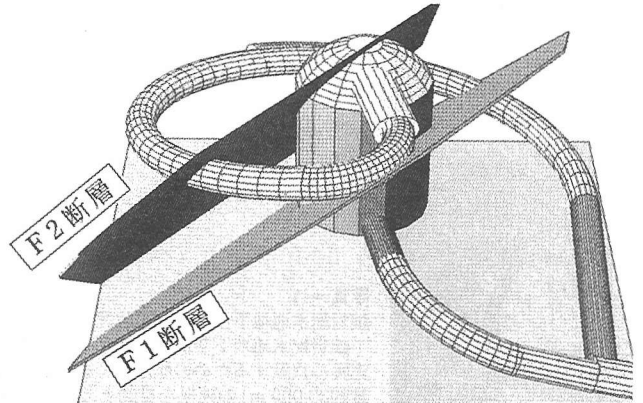


図-3 連続した2条の断層

### 3.2 一次支保の設計概要

#### (1) 設計方法<sup>2)</sup>

一次支保工の補強領域は、有限要素法による二次元弾塑性逐次掘削解析により、無支保での周辺岩盤のゆるみ領域を推定し、発破の影響範囲も考慮して設定した。補強領域の安定に必要な支保部材の数量は、釣合い法で算出し、支保の配置を設定し、同有限要素解析により各支保に発生する応力度を照査した。また、断層や亀裂の走向傾斜が壁面に流れ目となる弱部の箇所には、局所的な強度低下や応力集中を防ぐために、ロックボルトの配置を一般部より密にして、一般部と同等に扱えるようにした。算定方法は、崩落ブロックを仮定した安定計算により行った。

設計モデルを図-4に示す。強度定数と変形係数は、原位置試験結果と Bieniawski の RMR をもとに設定した。尚、図中の数値は、ゆるみ領域推定のための物性値である。材料モデルは、Drucker-Prager の破壊基準に基づく完全弾塑性体モデルを選択した。また、解析手法は、岩盤試験結果にクリープ的な挙動が少ないことや、土被りが比較的浅いが周辺地盤が比較的良好であること、側圧係数が 1.0 程度であることを考慮して、弾塑性有限要素法解析を選定した。解析次元は、地下空洞が弾頭型形状であるため、三次元とするべきであるが、掘削荷重開放率を補正することで、等価な二次元モデルを設定することにした。この開放率 44.4% は、二次元解析における掘削相当外力に乗ずる定数で、アーチ天端や空洞隅角部の変位量を三次元解析結果 (図-5 参照) によるものとほぼ等しくなるようにしている。初期応力は自重解析により推定した。

断層の評価は、断層部の試料を採取して室内試験で求めた断層の物性値を幅 1 m の Solid 要素で評価する方法に選定した。

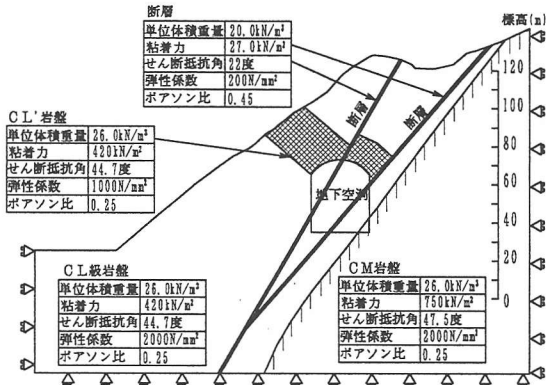


図-4 設計モデル図

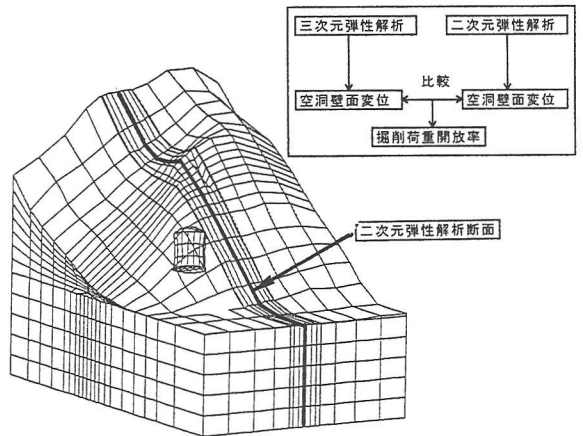
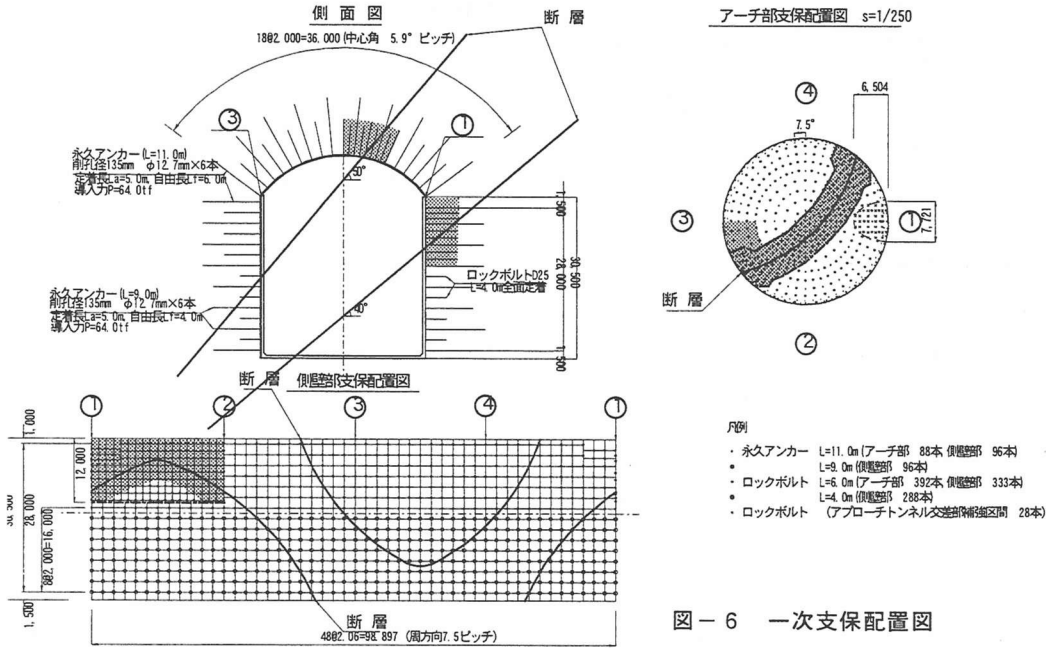


図-5 3次元解析モデル図

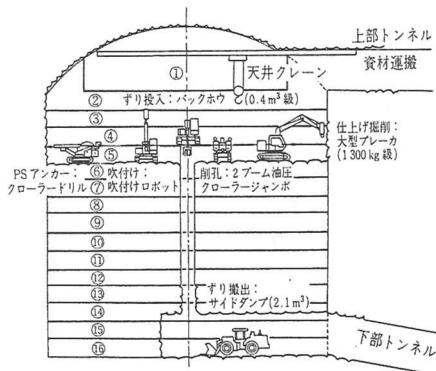
## (2) 設計結果

一次支保の配置図を図-6に示す。図中には事前に予測した断層位置も併記している。また、図中に網掛けした範囲は、ロックボルトを一般部(2mピッチ間隔)より密に配置(1.27,1.36mピッチ間隔)した断層部周辺やアーチ部の弱部である。この一次支保部材は、逐次掘削過程時や掘削完了時ならびに、二次覆工の自重と満水時水圧作用時において、有限要素法により応力度照査を行っている。その結果、どの状態においても一次支保部材が許容応力度以下であることを確認した。



## 3.3 施工概要

地下空洞の掘削は、図-7に示すような①~⑯段の加背割とした。空洞上部から下部に向かって、発破と機械掘削を併用して行っている。また、地盤の緩みを極力抑えるために、1段(2m)を放射方向に36分割したブロックを1施工サイクルとして、迅速に一次支保工を施している。掘削残土は、空洞中央に設置した直径φ1.75mの立坑に落として下部から搬出する方法を選定した。施工中には、情報化施工のための地盤変位、ロックボルト軸力、吹き付けコンクリート応力、アンカー軸力等の計測を行い、リアルタイムで管理基準と比較することで、施工安全管理を行った。



### 3.4 安定性評価

#### (1) 計測器による計測結果の一例

空洞掘削に伴う各計測値は、管理基準値Ⅰ（増支保の検討）～Ⅱ（増支保の実施）の範囲に至っているものもあるが、全体的に管理基準値Ⅰ以下であり、地下空洞の安定性は良好な状態と判断している。管理項目の中の地中変位の管理基準値Ⅰは FEM 解析値、管理値Ⅱは 17mm としている。計測結果の一例として、金華山地表から地下空洞アーチ部天端までの区間で計測している地中鉛直変位の経時変化を図-8に示す。図に示すように、アーチ部壁面から6 m 以浅の空洞近傍の鉛直変位が、②ブロック掘削まで増加するものの、その後の盤下げには影響されず、ほぼ一定状態になる傾向にある。

断層の影響は、図-9に示すように地中変位分布とロックボルト軸力分布に生じている。図はF-1断層が流れ目で露出するアーチ肩部周辺の計測分布を示しているが、計測測線と断層が交差する箇所地中変位の増加が顕著であり、ロックボルトの軸力が最大値を示している。これは、断層に沿って上盤のブロックが変位したことによる影響と思われる。増加量を将来予測した結果、掘削の進行に伴って、管理基準値Ⅱを越えると予測されたため、ロックボルトの増し打ちを施した。対策後の計測値は、その後の盤下げの影響を小さく抑えられ、ほぼ一定値に収束する傾向にあり、地盤を安定化できたと判断した。

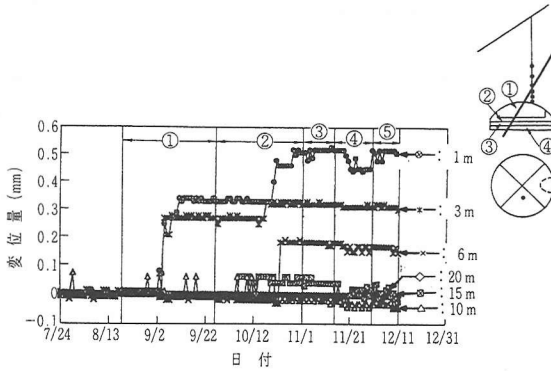


図-8 地中鉛直変位の経時変化図

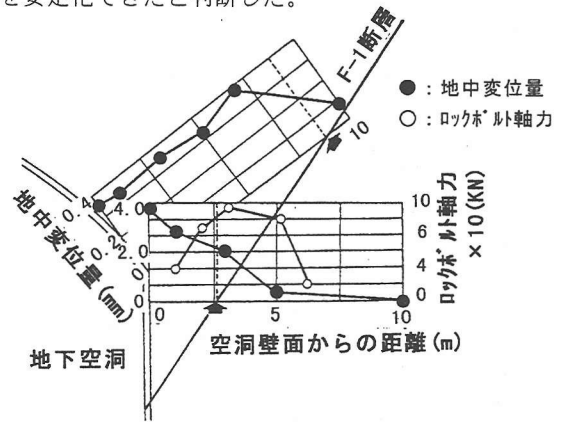


図-9 F-1断層周辺の計測値分布図

#### (2) 地質観察結果

空洞周辺岩盤は、予想されていた CL 級のチャートが主であった。掘削毎に観察した切り羽観察記録結果を連ねて作成した展開図を図-10に示す。図中には、掘削前に予測していた断層も併記している。観察された断層は、予測されていた断層とほぼ同じ位置に検出されており、周辺岩盤は劣化している。また、節理方向も断層方向である走向 NE-SW、傾斜 NW 方向に卓越しており、層状チャートの方向の妥当性が伺われる。また、地下空洞掘削中に壁面で観察された断層の写真を写真-2に示す。路頭で観察された断層と同じ、約 20 cm 程度の破碎帯と断層粘土を伴い、断層下盤側には鏡肌と条線が認められ、条線の方法は断層の最大傾斜方向と一致し、カタクレーサイトを伴っている。



写真-2 切羽で観察された断層

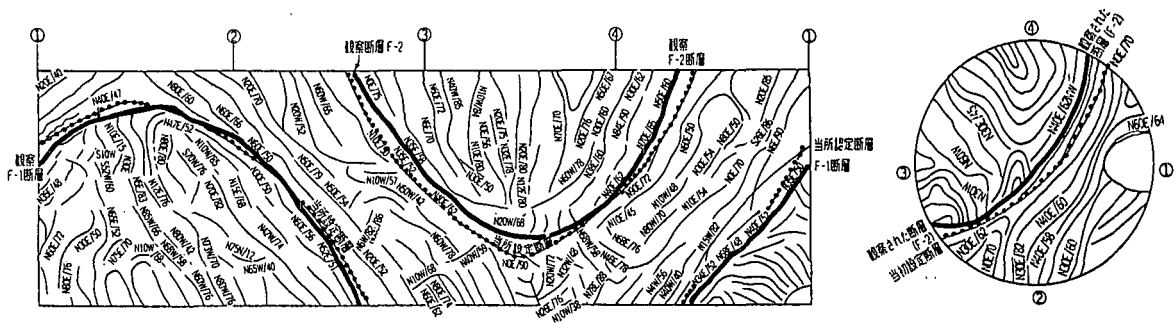


図-10 切り羽展開図

### (3) ゆるみ領域

掘削完了時の区間ひずみ分布図を図-11に示す。区間ひずみは、地中変位計により計測した変位量を各計測区間長で除して求めたひずみであり、周辺地盤のゆるみ領域の推定等に用いられる。図中には、設計時に設定したゆるみ領域(上部で6m、下部で4m)も併記している。計測された区間ひずみの最大値は、壁面のごく近傍にしか発生しておらず、その発生量も一軸状態における岩盤の限界ひずみ(0.59%)と比べて十分に小さい。そのため、地盤は安定した状態と考えられ、一次支保工がゆるみ領域抑制効果に十分機能していたことが推察される。また、掘削途中においても、ゆるみ領域が進展し、空洞の安定化が低下することはなかった。当該地盤が、RQD 20~30の亀裂性の高いCL級地盤であることを勘案すると、ゆるみによる亀裂の開口は岩塊崩落を引き起こすことになるため、極力避けなければならない。本一次支保工の配置は、その危険性を十分抑制しているものと思われる。

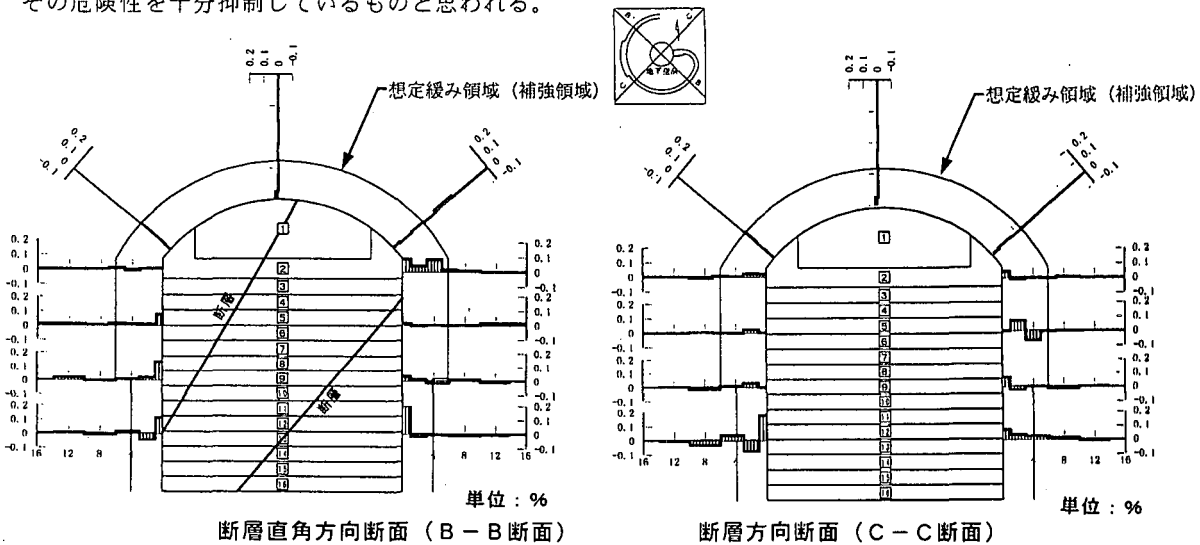


図-11 区間ひずみ分布図

### (4) 数値解析結果との比較

掘削完了時に計測した地中変位とロックボルト軸力の分布図と、部材照査のために行った先行変位量を含む有限要素解析結果を図-12に示す。計測値である地中変位量は、情報化施工で行った逆解析に使用した先行変位や絶対変位と相対変位の問題等を考慮した値ではなく、先行変位量(推定値)を含まない計測生データを示している。

計測された地中変位は、断層が交差する流れ目箇所、4 mm程度の他に比べて大きな変位が発生しているが、それ以外の箇所では概ね1~2 mm以下であり、ほとんど変形していない傾向にある。全体的には解

析値より計測値の方が低いが、ほぼ予測の範囲内と判断する。また、アーチ部には変形がほとんど発生しなかったが、浅い地下空間<sup>3) 4)</sup>では地表面近傍の地盤が塑性化することで陥没する危険性が高いことや、アーチ部からの岩塊の崩落は空洞の安全性と作業上の安全性に重要な影響を及ぼすことになることから、結果として良好であると判断した。変形が少なかった理由は、P Sアンカーの設計が1次元状態の崩落防止だけを考慮しているのに対し、実際にはアーチアクションが弾頭型空洞であることで顕著に発生したためと考えた。

計測されたロックボルト軸力も、断層が交差する流れ目箇所では、他に比べて大きな100KN程度の軸力が発生しているが、それ以外の箇所では、地盤に亀裂が多いこともあり部分的に凹凸があるものの、概ね20~40KN程度であり、予測より高い傾向にあるものの管理基準値I(108KN)以下であった。

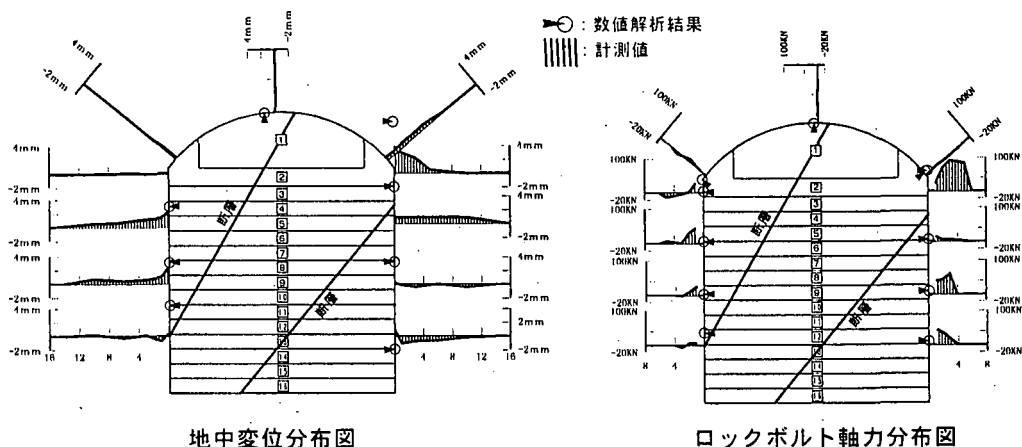


図-12 計測値と解析値との比較図 (B-B断面)

#### 4. RMRによる地盤の評価方法の有効性

国外において、岩盤の状態を定量的に評価する方法として Barton によるQ値や、Bieniawski によるRMR値が提案されており、トンネル支保パターンの判断基準に利用されている。また、国内でもこれらの方法を取り入れた支保パターンの選定方法の提案がされている<sup>5)</sup>。本地下空洞築造にあたっては、RMR値で評価できるボーリングコアや、採取試料、原位置試験箇所の岩盤、切り羽岩盤等全てに対して値を付けて整理し、RMR値をベースとした岩盤評価を行い、設計や施工管理に適用した。ここでは、その利用方法と有効性について報告する。

##### 4.1 RMRによる地盤評価方法

Bieniawski が提案しているRMRによる評価方法<sup>6)</sup>を基に、本地下空洞の設計施工で使用した評価表を図-13に示す。評価項目は、点載荷の強度、RQD、不連続面の間隔、不連続面の状態、湧水状況、節理の走向傾斜(掘削作業への影響度)である。現場においては、観察作業時に該当する項目(1~6)を選択し、各項目の評点を加算することにより岩盤の総合評点を求め、岩盤等級に分類する。この評点の値をRMR(Rock Mass Rating)値として、RMR値の大きさに応じた岩盤の評価を行った。

A. 分類要因とその評点					
1 新設岩盤の強度 (点状圧縮強度)	>10Mpa	4~10Mpa	2~4Mpa	1~2Mpa	1Mpa<
評点	15	12	7	4	1
2 RQD (%)	90~100	75~90	50~75	25~50	25
評点	20	17	13	8	3
3 不連続面の間隔 (cm)	>200	60~200	20~60	6~20	6<
評点	20	15	10	8	5
4 不連続面の状態	非常に悪い状態 分離せず 未風化 連続せず	わずかに悪い 表面 分離線1m わずかに風化	わずかに悪い 表面 分離線1m 極めて風化	20分コアが 新断面土の厚さ<5mm 分離線1~5mm程度	断面土の厚さ<5mm または 分離線<5mm 連続
評点	30	25	20	10	0
5 湧水状況	完全に乾燥	湿った	ぬれた	湧水	流水
評点	15	10	7	4	0
B. 不連続面の方向に対する修正評点					
6 節理の方向傾斜	非常に有利	有利	普通	不利	非常に不利
評点	0	-2	-5	-10	-12
C. 総合評点から決められる岩盤等級					
評点	100~61	60~51	50~41	40~21	20
岩盤等級	I	II	III	IV	V
表示	非常に良好な岩盤	良好な岩盤	普通な岩盤	悪い岩盤	非常に悪い岩盤

図-13 RMRによる評価表

## 4.2 RMRと岩盤特性との関係

### (1) 室内岩石試験での傾向

ボーリングコアから採取した試料により行った室内岩石試験結果の「密度」、「一軸圧縮強度」と、試料の状態を評価したRMRとの関係を図-14（層状チャートのコアを抽出）に示す。図より、バラツキが大きいものの、RMRが大きいほど密度や一軸圧縮強度が大きくなる正の相関性が見うけられ、岩盤の特性をRMRが表現できる傾向にあることを示している。

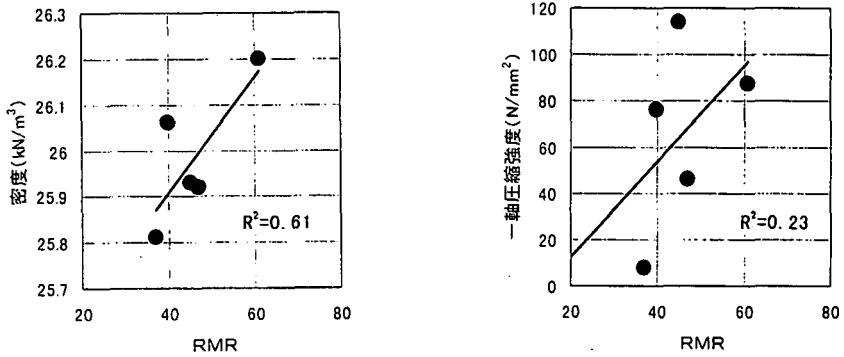


図-14 RMRとの相関関係

### (2) 原位置試験での傾向

#### ①せん断強度

原位置せん断試験の垂直応力～せん断応力（ピーク強度）関係をプロットしたのが図-15である。図中の数値はRMR値を示し、3本の点線は下式に示す Hoek and Brown の RMR による強度推定式である。それぞれの線は、原位置せん断試験箇所の RMR が 45 の場合、空洞周辺の C L 級岩盤の 30 の場合、C M 級岩盤の 50 の場合を示している。RMR と強度定数には、Hoek and Brown の強度推定式<sup>6)</sup>と比較的よい一致がみられる。そのため、設計においてはせん断強度の  $c$ 、 $\phi$  を図中の実線で求めた。

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_c} = \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \sqrt{\exp \frac{RMR - 100}{14} \times \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + \exp \frac{RMR - 100}{6}}$$

#### ②変形係数

原位置変形試験で求めた変形係数と、原位置試験箇所の RMR 値との関係を▲印で図-16に示す。図中には Bieniawski が提案する下式の推定式（点線）<sup>6)</sup>や、原位置せん断試験の予備試験で求めた変形係数の値（■印）、データの回帰曲線（実線）も併記している。変形係数と RMR とには、良好な対応が見受けられる。

$$E_m = 10^{(RMR - 10) / 4.0}$$

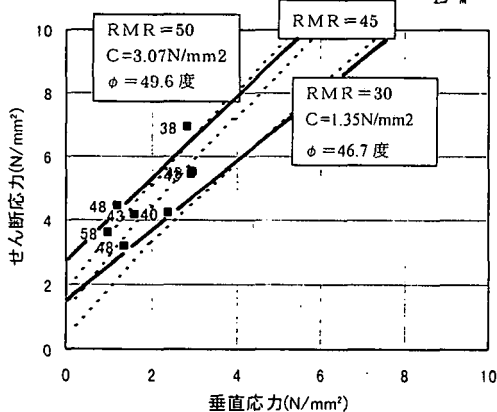


図-15 せん断強度

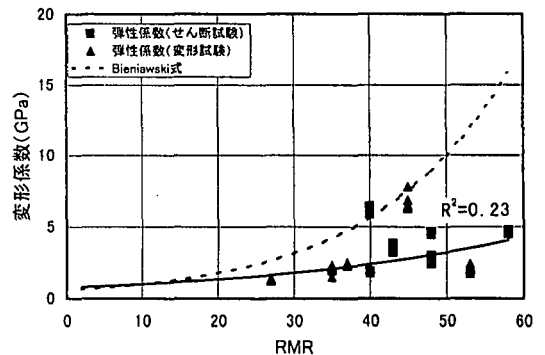


図-16 変形係数



### 4.3 RMRと地下空洞状況

#### (1) 断層位置との比較

掘削毎に切羽の岩盤を評価したRMR記録結果を連ねて作成したRMR分布を等高線で図-17に示す。図中の濃い色がRMRの高い箇所であり、薄い色がRMRの小さい箇所を示している。また、図中には観察された断層も併記している。壁面岩盤の大半がRMR 35以上を占めているのに対し、断層近傍やアーチ部でRMRが20程度と低くなっており、岩盤が悪い分布の範囲を定量的に表している。

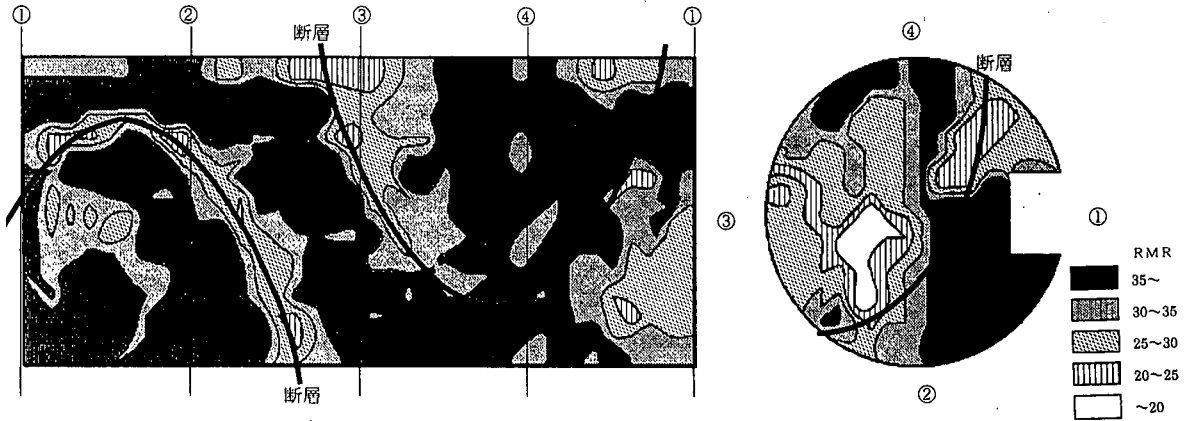


図-17 RMR等高線図

#### (2) 計測値との比較

地下空洞側壁部におけるRMR等高線と、各計測値（掘削完了時）を○の大きさで表した分布図を、図-18に示す。

地中変位に関しては、全体的に値が小さいこともあり、RMRとの関係があまり明瞭には見受けられない。これは事前に十分な一次支保を施しているためと考えているが、断層の流れ目箇所だけではなく、差し目箇所においても相対的に大きな変位が発生している傾向にある。

それに対して、ロックボルト軸力と吹付けコンクリートの応力は、RMR分布傾向との対応が明瞭に見受けられる。RMRが低く岩盤が悪い箇所ほど、ロックボルトや吹付けコンクリートに作用する力が大きい傾向にある。吹付けコンクリート応力のアーチ部が、RMRに関係なく他と比べて大きい傾向にあるのは、掘削に伴う壁面の水平方向の移動によりアーチが押されて曲げ作用を受けているためと考えられる。

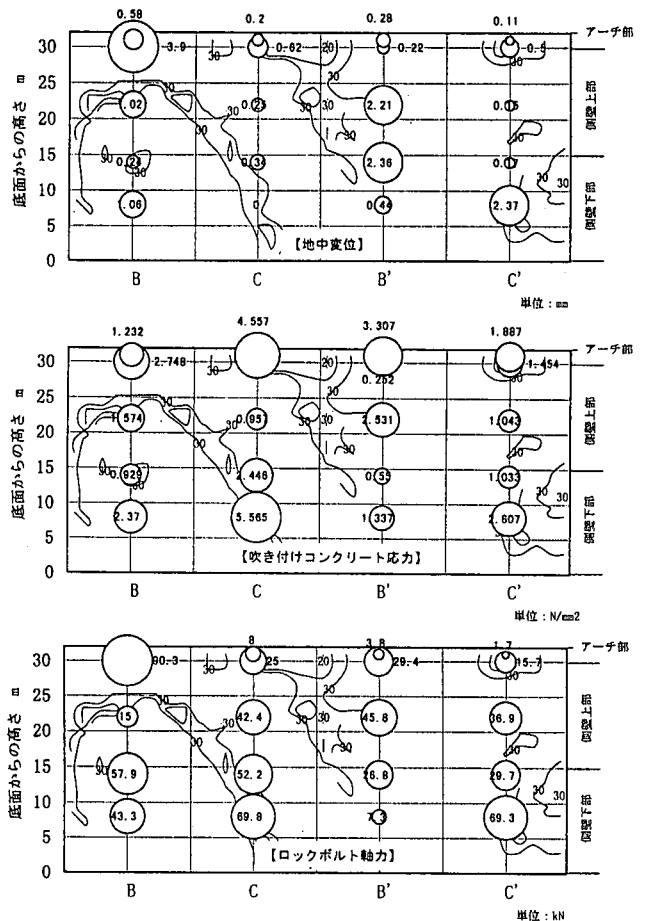


図-18 RMR分布図における計測値

図-18において、RMR分布傾向とロックボルト軸力や吹付けコンクリート応力との対応が見受けられたため、一次支保工の条件が同じ範囲の壁面下部を対象として、相互の相関関係をプロットした結果を図-19に示す。尚、ここでのRMR値は、計測設置箇所近傍の6切羽断面でのRMRの平均値を使用した。多少のバラツキが見られるが、RMR値とロックボルト軸力との間に比較的良好な負の相関が見られる。データ数が少ないため今回はその傾向だけの評価だが、この関係がより明確になれば、切羽観察で求められるRMR値が、最終掘削時でのロックボルト軸力や吹付けコンクリート応力の予測や、施工上注意が特に必要となる箇所の特定等に使用できると思われる。

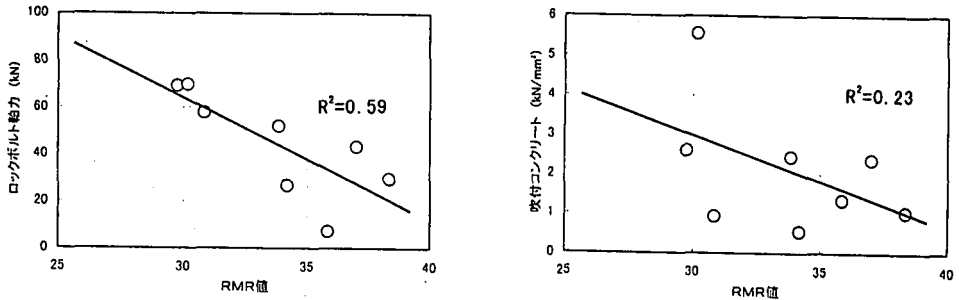


図-19 RMRとの相関関係

#### 4.5 RMRによる地盤評価の有効性について

本地下空洞において、RMR値を地盤評価の指標として使用した結果、RMR値が地盤物性値の設定のためのパラメータになり得ることや、一次支保工の評価にも使用できる可能性があることが分かった。本現場においては、事前にロックボルトを密に打設していた断層流れ目箇所、RMR値が25以下の評価となったため、他の計測結果との総合判断により、迅速に増しロックボルト対策工を施し、地盤を安定させることができた。今後、RMR値はこのような情報化施工の一判断指標としても使用可能と思われ、今後のデータの蓄積と検証を繰り返すことにより、その有効性が明確になるとと思われる。

#### 5. おわりに

本地下空洞建設工事の調査・設計・施工・管理内容は、川本眺万名古屋大学名誉教授を委員長とした技術検討会で討議しながら進められた。検討会では、正確な地質構造図を作成すること、その結果をもとに一次支保工の的確な設計を行うこと、局部的に弱い箇所はRMRを指標として補強することなど、さまざまな討議と実施を繰り返した。その成果により、掘削完了時には変形を十分に抑制することができたと考えている。最後に、川本先生をはじめとする関係各位に、多大なるご指導ご協力を頂きました。誌面を借りて深く感謝の意を表します。

#### 6. 参考文献

- 1) ガイドブック研究会：「地下空洞」利用ガイドブック、清文社、1994.
- 2) 岩盤力学委員会：大規模地下空洞の情報化施工、丸善、1996.
- 3) 江崎ら：浅い地下空間の設計とその問題点、地下空間シンポジウム論文・報告集、第2巻、pp.15-23,1997.
- 4) 近久ら：不特定多数が常時入場する文化・スポーツ施設としての岩盤地下空洞に関する考察、地下空間シンポジウム論文・報告集、第3巻、pp.167-173、1998.
- 5) 吉岡ら：トンネル支保とRMRに関する一考察、トンネルと地下、vol.30、No5、pp.43-48、1999.
- 6) Bieniawski,Z,T.:Engineering Rock Mass Classifications:A complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering, A Wiley-Interscience Publication,1989.