

菊間地下石油備蓄基地建設工事での 空洞掘削に伴う地下水挙動に関する検討

岡本 淳*・有元 平**・山本和彦***・
大津宏康****

菊間地下石油備蓄基地建設時の、岩盤タンク掘削時の地下水挙動について検討を加えた結果、空洞掘削時の地下水挙動は、岩盤中に分布する亀裂帯に支配されることが明らかとなった。また、クラックテンソルの概念は、亀裂の三次元的な分布状況と地下水挙動を関連付けるための目安を与える指標として適用できる可能性が有ることを示した。さらに、亀裂帯を高透水性を示す領域とした等価多孔質体モデルにより、計測結果の地下水位分布を評価できることを示した。

Key Words : aquifer sealing method, groundwater, fracture, crack tensor

1. 序 論

日本における国家石油備蓄は、1970年代後半に勃発した中東戦争に伴うオイルショックを教訓としてその計画が開始された。当時、石油の貯蔵方式としては、いわゆる陸上タンク方式が主体であったが、石油備蓄計画の開始段階で、国土の有効利用、環境保全、経済性等の観点から従来の方式に加えて、新たな貯蔵方式の適用性の検討がなされた。この検討段階で、新たに取り上げられた貯蔵方法は、半地下タンク貯蔵方式、海上貯蔵方式、地下岩盤タンク貯蔵方式等であった。

この内、岩盤タンク貯蔵方式は、地下に燃料貯蔵タンクを建設し、地下水の流動特性を利用し燃料の漏洩を防ぐものであり、国土の有効利用、環境保全の観点から有効な方式であると判断された。しかし、この貯蔵方式は、安定した硬質岩盤が主体である北欧諸国で開発された方法であり、地震国であり亀裂性の岩盤からなる日本での適用性について多くの課題が挙げられた。このため、日本での岩盤タンク方式の適用の可能性をさぐるための様々な検討が実施された後、昭和54年に愛媛県越智郡菊間町において実証プラント建設工事が開始された。菊間実証プラント工事では、構造上の安定性、水封機能性、操作性、環境に対する影響等を実証項目とした様々な実験が実施された。実証プラントでの実験結果の中で、地下水挙動の観測結果については、これまでに多くの研究成果^{1)~3)}が報告されている。

菊間実証プラントでの試験結果を受けて、岩手県久慈市、愛媛県菊間町、鹿児島県串木野市の3地点を候補地とした、事前調査およびフィージビリティスタディーを実施した後、各地点が正式に建設拠点として選定された。これに伴い、地下備蓄工事の建設母体として、昭和61年に日本地下石油備蓄株式会社が設立され、3地点での地下備蓄基地建設工事が、国家備蓄の一環として開始された。

菊間基地での土木工事は、昭和62年の作業トンネル工事着手後、昭和63年12月より岩盤タンク本体の掘削工事に取り掛かり、平成4年2月に岩盤タンクとしての空洞掘削工事を終了した。

本工事は、地下に岩盤タンクという巨大な空洞とそれに付随した様々なトンネルを構築するという点では、従来の鉱山開発あるいは、地下発電所の建設工事等と同等である。しかし、水封式燃料貯蔵方式は、燃料の漏洩に対する水封機能性（気密性・液密性）を維持するため、地下水の安定した供給および地下水の制御が重要な検討課題となる。したがって、掘削に伴い岩盤の安定に加えて、岩盤タンクとしての水封機能性維持という施設面からの要求のために、地下水挙動の監視が重要な検討項目となった。これが、従来の地下空洞の掘削工事と本工事が決定的に異なる点である。つまり、従来の工事のように、水はただ単に湧水があった場合に排水するあるいは止水するという受動的な姿勢に対して、水封機能性維持という目的のために、能動的かつ人為的に地下水を制御しようとするのが、本工事の特徴として位置づけられる。このような地下水挙動を制御しようとする設計思想は、今後都市部での地下空間開発に伴う地下水環境への影響を軽減するために不可欠であり、重要な検討課題となると推定される。

岩盤タンク工事は、上記のような地下水制御の概念に基づき空洞掘削が進められたが、実施工に伴い明らかと

* 正会員 日本地下石油備蓄(株) 菊間事業所 調査役
(前 日本地下石油備蓄(株) 菊間事業所 副所長)

** 正会員 住友金属鉱山(株) 資源事業部 技術部 参与
(前 日鉱資源工営・電源開発共同企業体 菊間管理事務所 所長)

*** 正会員 大成建設(株) 土木技術部部长
(前 菊間地下石油備蓄基地作業所 所長)

**** 正会員 工博 大成建設(株) 土木設計部
(〒163 新宿区西新宿1-25-1)

なった課題の一つとして、岩盤内の亀裂の地下水流動特性に及ぼす影響の評価が挙げられる。

また、水封式燃料貯蔵施設としては、現状の原油に加えて、LPGの貯蔵タンクの計画が進められつつあるが、前者が常圧貯蔵方式であるのに対して、後者は加圧貯蔵方式となる。これに伴い、水封式燃料貯蔵方式を適用するためには、より高い精度での地下水制御の評価技術が必要となり、岩盤内の亀裂の地下水流動特性に及ぼす影響の評価はさらに重要な検討課題となる。

このような観点から、本報告では、空洞掘削に伴う地下水挙動と空洞内で観察された亀裂の分布状況との相関について検討を加える。また、この亀裂の分布状況と地下水挙動の相関についての検討では、亀裂の三次元的な分布状況を定量的に評価するために、小田ら⁹⁾により提案されているクラックテンソルの考え方を適用する。

さらに、地下水挙動についての検討結果を踏まえて、空洞掘削に伴う地下水位の変化を数値解析により検討を加える。

2. 菊間基地建設工事の概要

菊間基地の建設工事概要⁹⁾は、表-1に示すように陸上タンクを含めて、150万klの備蓄容量を有する原油貯蔵施設を建設するものである。菊間基地は、図-1に示すように愛媛県越智郡菊間町に位置し、実証プラントに隣接した地点に建設された。地形は瀬戸内海斎灘に面した標高10~70mの丘陵地であり、河谷による開折は小規模である。河川は、東側を南北に流れる種川、西側を南東から北西方向に流れる高田川などがあり、周辺に沖積低地が発達している。

水封式燃料貯蔵施設の建設サイトの地質状況は、上部風化帯と下部岩盤に区分される。燃料貯蔵用空洞が構築される下部岩盤は、新期領家花崗岩と呼ばれる白亜紀後期の花崗岩ないし花崗閃緑岩に属し、一部にアプライトおよびベグマタイトが貫入しているが、全般に青灰~灰色を呈し堅硬緻密である。この下部岩盤の力学的・水理学的特性についての事前調査結果は、次のように要約される。

1) 岩盤等級は、電中研式岩盤区分でC_H~C_M級(岩盤タンク岩盤等級区分⁶⁾ではH~M級に相当)に属し、コアでの一軸圧縮強度は、800~1,000 kgf/cm²の範囲にある。

2) 岩盤の不連続性を表す指数であるRQDは80~85%であり、割れ目は比較的少ない。また、その割れ目に沿った風化変色もほとんど認められない。

3) 空洞の安定性の検討段階で、岩盤は亀裂の分布状況等を考慮した等級に区分され、その平均的な巨視的変化係数は、65,000 kgf/cm²と設定された⁶⁾。

4) 破碎部を含めた岩盤の透水係数は、ボーリング孔

表-1 菊間基地の原油備蓄容量

1.	備蓄容量	150万kl
	原油タンク	地下岩盤備蓄タンク3ユニット
	陸上シフトタンク	13.6万kl
2.	地下岩盤タンク	常圧貯蔵横穴水封固定水床式
	No.1ユニット	59.3万kl(空洞4本)
	No.2ユニット	74.6万kl(空洞3本)
	No.3ユニット	2.5万kl(空洞1本)
3.	陸上シフトタンク	鋼製円筒型浮屋根式貯油槽
		3.4万kl×4基(直径46.5m,高さ21.9m)

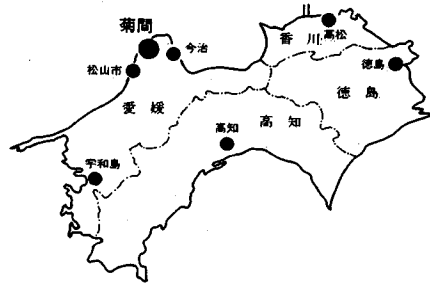


図-1 菊間基地の位置図

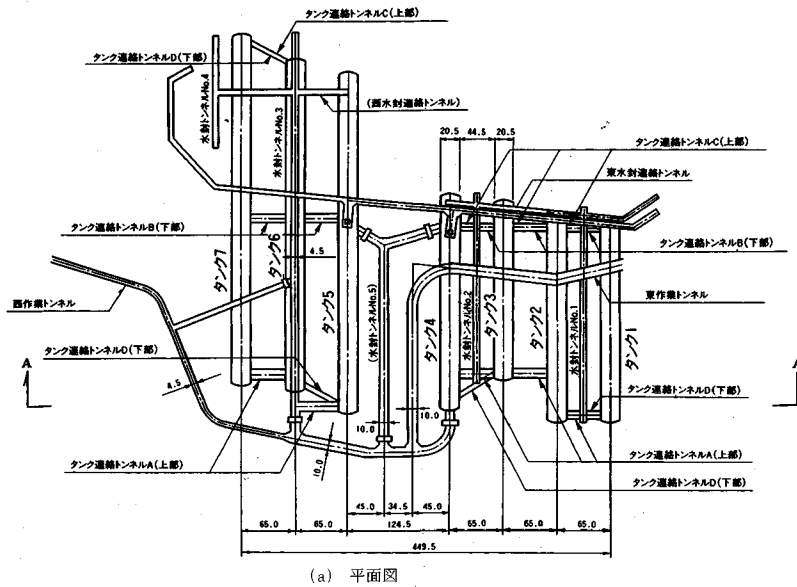
を用いた透水試験結果で、 $1 \times 10^{-6} \sim 1 \times 10^{-8}$ cm/sec程度である。

水封式燃料貯蔵施設は、図-2の平面図および断面図に示すように、幅20.5m×高さ30.0mの砲弾型断面で、長さが230m~448mの7本の燃料貯蔵用空洞と、水封トンネルおよび作業トンネル等の周辺の各トンネルからなっている。

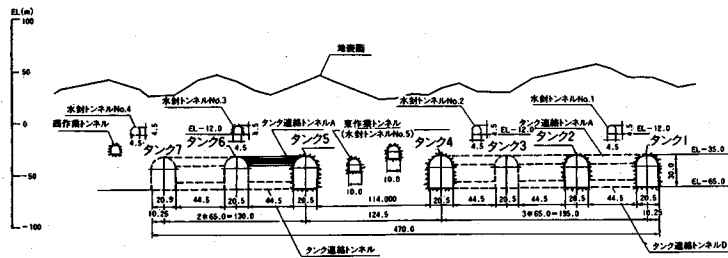
この内、燃料貯蔵空洞は、EL-65m~EL-35mに位置し、地表面からの土破りは80~100m程度である。水封トンネルは、燃料貯蔵用空洞天端から上方23mに位置し、水封トンネル側壁から各貯蔵用空洞を覆うように水封ボーリング孔が15mピッチで設置された。この水封ボーリングからの注水は、空洞掘削に伴う地下水位低下を抑制する目的で、下部の燃料貯蔵用空洞の掘削中に開始された。このため、この燃料貯蔵用空洞の掘削は、上部からの注水により地下水位を制御しながら施工が進められるという前例のないものとなった。

3. 岩盤タンク掘削時の地下水挙動解析

従来より、亀裂性岩盤では、岩盤中の亀裂の体積はごく一部であるのに、地下水の流れの大部分が亀裂に支配されることがDuguidら⁷⁾を始めとして多くの研究者により指摘されている。菊間基地での地下水挙動の観測結果でも、当サイトの地質状況がRQDが80~85%と亀裂の体積は小さく、健全部自体の透水性が低いため、空洞掘削に伴う地下水挙動は亀裂に支配される傾向が認められた。以下に、空洞掘削に伴い生じた地下水挙動と亀裂との関係について要約して示す。



(a) 平面図



(b) 断面図 (A-A 断面)

図-2 貯蔵用空洞配置図

(1) 地下水挙動の計測結果

タンク掘削に伴う湧水の発生状況は、掘削された空洞上部からの湧水が支配的であった。この湧水の発生箇所は、図-3のアーチ部掘削終了時の湧水マップに示すように、特定の領域に集中する傾向があった。すなわち、タンク1～タンク4のグループでは、以下のゾーンでの湧水が顕著であった。

- I) ゾーン1; タンク3の南東側の端部付近
- II) ゾーン2; タンク2の中央部付近
- III) ゾーン3; タンク1の南東側の端部付近
- IV) ゾーン4; タンク1の北西側の端部付近

これらの湧水箇所は、空洞内で観察された亀裂の内、図-3に示す①および②の亀裂帯のように、空洞軸に約30度で交差する亀裂帯と明瞭な相関関係にある。また、タンク2の中央部のように、③および④の全空洞の横切る亀裂帯が①および②の亀裂帯と交差する箇所での湧水が特に顕著である。

これに対して、タンク5～タンク7のグループでの湧水は、タンク1～タンク4のグループに比べて全般的に少なかったが、以下のゾーンでの湧水が顕著であった。

- V) ゾーン5; タンク6の北西側の端部付近

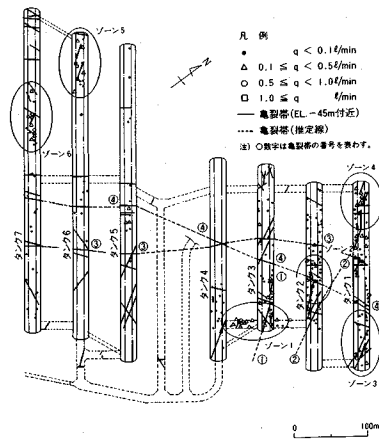


図-3 アーチ部の湧水マップ

- VI) ゾーン6; タンク7の中央部から北西側付近

これらのゾーンでの湧水も、亀裂帯に沿って発生しており、ゾーン5の湧水箇所は、①および②の亀裂帯のように、空洞軸に約30度で交差する亀裂帯と明瞭な相関関係にある。しかし、ゾーン6での湧水は、その他のゾーンと異なり、①～④ような連続性の高い亀裂帯に沿ったものでなく、小規模な亀裂が集中した箇所が生じている。

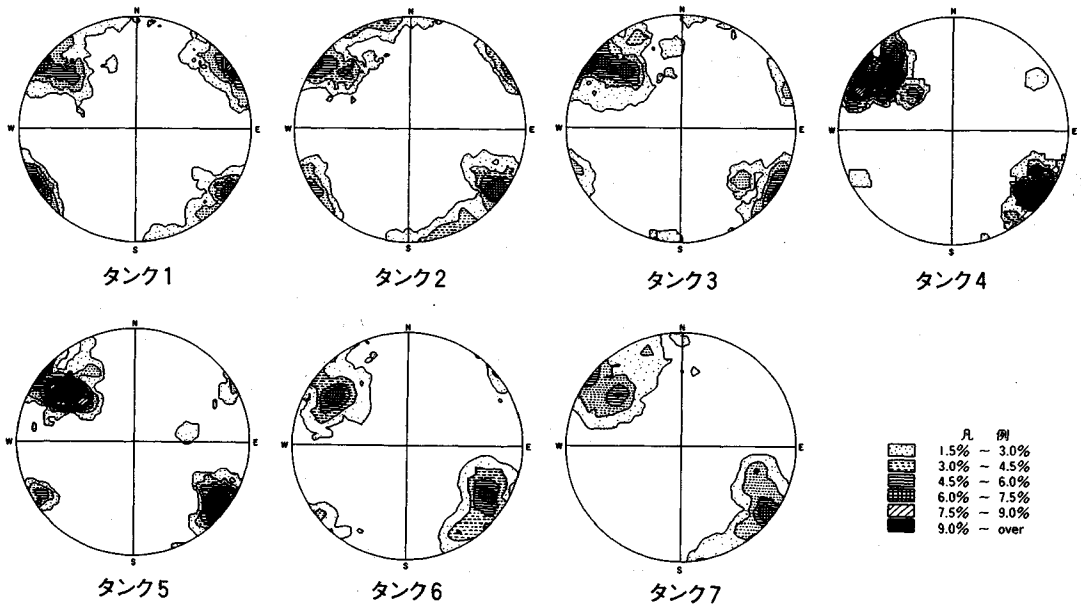


図-4 各空洞の亀裂のシュミットネット表示

以上の結果より、空洞掘削に伴い湧水の発生する領域は、概ね空洞内の亀裂帯と密接な関係にある。

(2) 地下水挙動と亀裂の分布状況との相関

空洞掘削時に切羽で観察された亀裂の分布状況の情報として、亀裂の走向・傾斜をシュミットネットにより表示した結果を、図-4 に示す。同図に示すように、亀裂の走向・傾斜のコンターは、7本の各空洞ともに二極に集中することから、当サイトに分布する亀裂は2種類の走向・傾斜を有するものが卓越する。すなわち、第一のグループは、N40E~N50Eの走向を有する亀裂であり、図-3 に示す③、④の亀裂帯のように空洞軸に対してほぼ直角に交差するものである。第二のグループは、N30W~N50Wの走向を有する亀裂であり、図-3 に示す①、②の亀裂帯のように空洞軸に対して30度で交差するものである。そして、いずれのグループの亀裂とも、傾斜角は水平方向から60~80度と急角度のものが卓越する。

次に、このような明確な方向性のある亀裂の分布と、地下水挙動の計測結果との相関について検討を加える。

図-5 は、空洞掘削開始前と空洞掘削終了後の地下水位の差分コンターとアーチ部掘削終了時の湧水マップに、亀裂帯の分布状況を合わせて示したものである。同図に示すように、顕著な地下水位の変動は、タンク2の中央部を中心とする領域と、タンク6~タンク7の北西部付近の領域の2箇所に限定されたブロック状の範囲で生じている。そして、それぞれの水位低下領域は、空洞内での湧水が顕著であった箇所と一致している。

この内、タンク2の中央部付近の地下水位低下領域は、

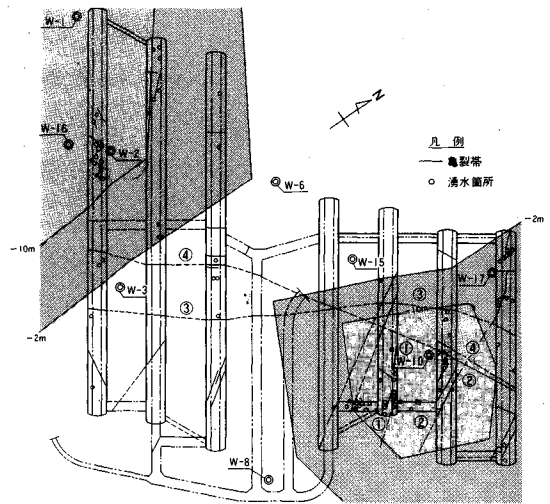


図-5 地下水位差分コンターと湧水マップとの相関

図-5 に示す①、②のような N30W~N50W の走向を有する亀裂帯と、③、④のような N40E~N50E の走向を有する亀裂帯が交差する箇所をほぼ中心として発生している。これに対して、タンク6~タンク7の北西側の地下水位低下領域は、タンク2の中央部付近のように、連続性の高い亀裂帯とは明確な相関がない。

次に、亀裂帯と地下水挙動の相関が明確である、タンク1およびタンク2の上部に位置する水封ボーリング孔を用いて実施した原位置透水試験結果を図-6 に示す。ここで、原位置透水試験の方法は、試験区間を5mとしたダブルパッカー式の試験と、試験区間を55mとしたシングルパッカー式の試験を併用した。また、図-

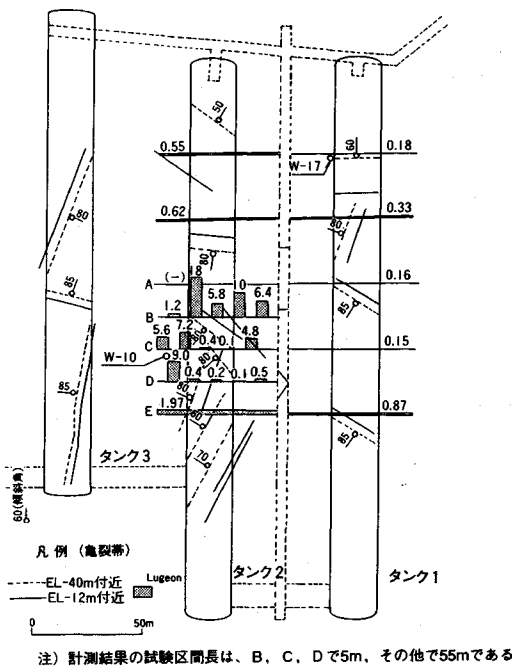


図-6 原位置透水試験結果

6に示す亀裂帯は、空洞のアーチ部の掘削時に確認された亀裂帯を、その走向・傾斜に基づいて水封ボーリングのレベルに投影したものである。

図-6に示すように、ダブルパッカー式の透水試験結果では、高い透水性を示す箇所と、低い透水性を示す領域との相違が顕著であった。また、図中に示すW-10の観測井戸に近接した領域の水封ボーリング孔B、C、Dで、透水係数が $10^{-5} \sim 10^{-4}$ cm/secの範囲(1~10ルジオン程度)の高透水性領域の存在が確認された。この高いルジオン値を示す箇所は、走向がN30W~N50Wのグループの亀裂帯と、走向がN40E~N50Eのグループの亀裂帯がともに交差する領域に含まれる。

一方、シングルパッカー式の透水試験結果では、試験区間長が55mと長いために、算定される透水係数は、亀裂帯の影響が極端に薄められた値となる。

例えば、水封ボーリング孔Eは、隣接する水封ボーリング孔Dで9ルジオンを示した亀裂帯と交差していると推定されるが、試験結果のルジオン値は2ルジオンとなっている。なお、水封ボーリング孔Aでは、注水時に所定の圧力が逸水のために維持することができなかったため、ルジオン値が算定不能であった。しかし、この逸水現象は、隣接する水封ボーリング孔Bで10ルジオンを上回る高透水領域が確認されていることから、水封ボーリング孔Aも高い透水性を示す亀裂帯と交差していることによるものと推定される。

以上の計測結果より、空洞掘削に伴う水位低下や湧水等の地下水挙動は、亀裂帯の影響を強く受けていること

が明らかである。ただし、ここに示した地下水挙動と亀裂の分布状況との相関についての検討は、空洞掘削後の計測結果の事後解析に過ぎない。つまり、ここでの議論は、どのような亀裂の分布状況の下で、限定した範囲で空洞掘削に伴い顕著な水位低下や湧水が発生するかについて、明確に関連づけたものではない。このため、この検討で得られた地下水挙動と亀裂との関係についての知見は、今後の亀裂性岩盤での空洞掘削に伴う地下水挙動評価の事前解析へ反映することはできない。

したがって、地下水挙動と亀裂の分布状況の因果関係を明確にするためには、シュミットネット、亀裂間隔とその頻度の関係等の従来の亀裂の評価方法のみでは不十分である。すなわち、亀裂性岩盤中での空洞掘削に伴う地下水挙動を評価するためには、事前に顕著な水位低下や湧水等の地下水挙動が発生する領域を特定できる、新たな亀裂評価の概念を適用する必要がある。

(3) クラックテンソルによる亀裂分布の解析と考察

ここでは、新たな亀裂の分布状況の評価する手法として、小田ら⁴⁾により提案されているクラックテンソルの考え方を適用する。この手法により、空洞掘削時に観察された亀裂の分布を解析し、地下水挙動の計測結果との相関について検討する。なお、この検討では、小田により示されたクラックテンソルの算定方法の中で、次式に示す露頭で観察された亀裂の分布状況に基づきクラックテンソルを算定する方法⁵⁾を適用した。

$$F_{ij} = \frac{3\pi}{8} \frac{\langle t^2 \rangle}{\langle t \rangle} \frac{N^{(q)}/h}{\langle |n \cdot q| \rangle} N_{ij} \quad \left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

$$N_{ij} = \int_{\Omega} n_i n_j E(n) d\Omega$$

ここに、 F_{ij} はクラックテンソルの各成分、 t は亀裂のトレース長さ、 $n_i(n_j)$ は法線ベクトル、 $E(n)$ は亀裂の法線方向の確率密度関数を表す。また、 $N^{(q)}/h$ は、 q 方向の長さ h の法線を張った時に測線と交わる単位長さ当りのクラック数、 $|n \cdot q|$ はクラック方向 n と測線の方向 q の内積の絶対値を表す。そして、 $\langle \rangle$ は各数値の平均値を表す記号である。

具体的には、空洞を20mに区分した各区分毎の空洞壁面での亀裂の観察結果に対して、式(1)を適用しクラックテンソルの値を算定した。なお、小田らは、この手法に基づき、数値実験により亀裂の分布、亀裂の長さおよび亀裂幅をパラメーターとして透水係数を算定している。ただし、この透水係数の算定過程では、亀裂の性状は一定と仮定されている。これに対して、原位置での亀裂の性状は、粘土、シルトを介在する亀裂、開口性の亀裂あるいは密着性の亀裂等様々であり、その亀裂幅の定義を数値実験と同等に設定することはできない。このため、現状ではクラックテンソルの考え方にに基づき、原位置での亀裂の分布状況から、透水係数を定量的に評価

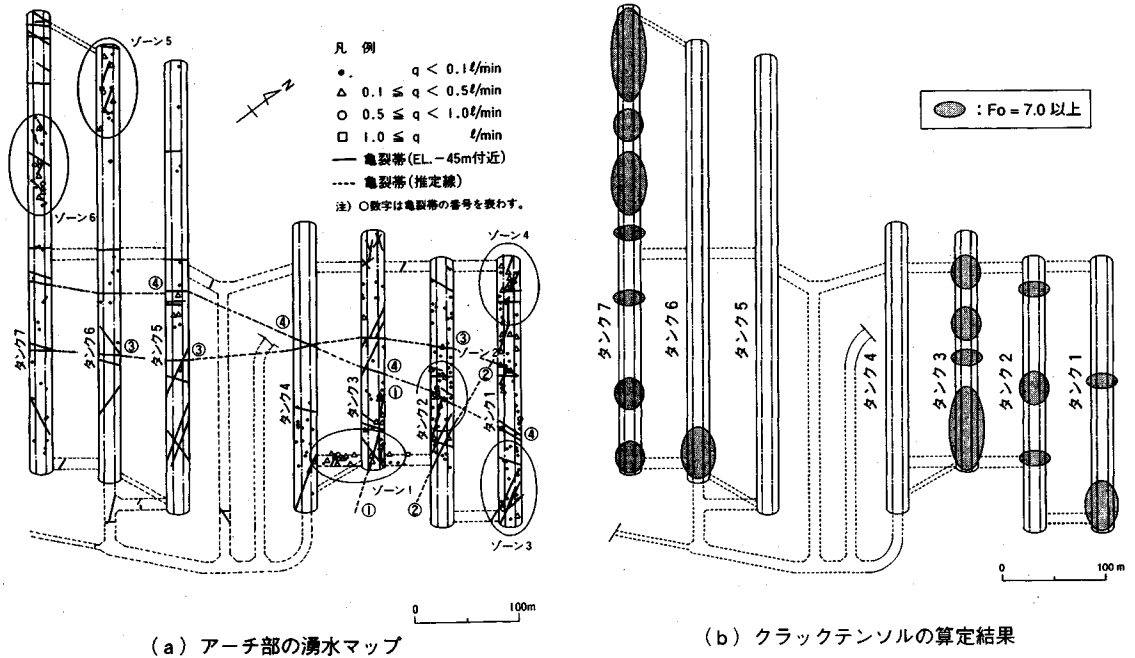


図-7 クラックテンソルの算定結果と湧水管所との相関

することは適当でない。そこで、この検討では、次式に示すある体積中の岩盤内の亀裂による空隙量を統計的に表すクラックテンソルの第一次不変量である F_0 を、亀裂分布とその亀裂の存在に伴う透水性の相関を表すパラメーターとして採用した。

$$F_0 = F_{11} + F_{22} + F_{33} \dots\dots\dots (2)$$

小田ら⁹⁾は、数値実験結果に基づき、地下水流れに影響を及ぼす亀裂の連続性すなわち、亀裂が通水性を示す指標を、クラックテンソルの第一次不変量 F_0 値が7.0以上であることを指摘している。ここでは、この研究結果に従い、空洞内で観察された亀裂分布から式(1)～式(2)に基づき F_0 値を算定した結果で、小田の研究により亀裂の連続性が高いと判定される F_0 値が7.0以上の領域の分布を図-7に示す。なお、同図には比較のために、アーチ部の湧水マップを併せて示した。

同図に示すように、この F_0 値が7.0以上の領域の分布は、アーチ部での湧水管所と概ね良好な一致を示している。特に、図-7(a)に示す湧水が顕著であった領域の内、タンク1～タンク4でのゾーン1からゾーン3およびタンク7のゾーン6は、いずれも F_0 値が7.0以上の亀裂の連続性が高いと判定される領域に含まれている。

ただし、タンク1の北西側端部付近のゾーン4および、タンク6の北西側端部付近のゾーン5では、アーチ部で顕著な湧水が認められたにもかかわらず、その領域での F_0 値は7.0以上となっていない。また、タンク3の北西側端部付近およびタンク6の南東側端部付近のよう

に、アーチ部からの湧水がほとんど認められなかった領域での F_0 値は7.0以上となっている。

このような湧水管所と F_0 値との関係に相違が生じる原因として、この検討に適用したクラックテンソルの基本的な考え方が、亀裂の走向・傾斜に基づく幾何学的な情報のみを評価するものであることが挙げられる。つまり、この検討手法では、亀裂が開口性であるかあるいは、亀裂が粘土を介在しているか等の、亀裂の性状が透水性に影響を及ぼす要素について考慮していない。このため、亀裂の数自体は少ないが開口性の亀裂が存在する領域では、透水性が高くなる現象および、亀裂の数自体は多いが介在物を含んだ領域では、透水性が低くなる現象等を評価できない。

したがって、クラックテンソルの第一次不変量である F_0 値の算定結果で亀裂の連続性が高いと推定される領域は、図-7(a)に示す空洞掘削に伴う湧水の発生箇所と厳密には一致していない部分もある。しかし、 F_0 値が7.0以上の領域の分布は、アーチ部での湧水管所と概ね一致していることから、 F_0 値は亀裂の分布状況から高透水性の領域を概算的に把握する上で有効なパラメーターとなる可能性がある。

すなわち、既往のシュミットネット、亀裂間隔とその頻度の関係等の亀裂情報は、事後解析により亀裂の存在が地下水挙動に及ぼす影響について定性的な議論を行う上で補足的なデータとして利用されてきたに過ぎない。これに対して、事前調査結果での亀裂の幾何学的な情報を基にし、クラックテンソルの概念を適用することによ

り求めた F_0 値は、どのような亀裂の分布状況の場合に高い透水性を示す領域となるかの因果関係を、定量的に把握するための目安値として適用できる可能性がある。

(4) 計測結果の数値解析および考察

a) 解析条件および解析モデル

本解析の目的は、亀裂性岩盤中での地下水制御を伴う大規模地下構造物建設時の地下水挙動について、工学的な判断を加えることである。このため、本来当サイトのように急傾斜の亀裂が卓越する場合には鉛直方向の流れを評価できる解析手法を適用するべきであるが、近似的に広範囲な地下水流動を評価するものとし、菊間実証プラントでの百田ら³⁾の解析と同様に、降雨浸透を考慮した等価多孔質体モデルによる準三次元定常浸透流解析手法を適用する。そして、鉛直方向の流れについては、降雨および空洞内で観測された湧水箇所での湧水量を既知点流量として与えることで評価するものとした。また、ここでの解析検討の対象は、空洞掘削終了時の地下水位分布に限定した。

解析に用いた解析メッシュを図-8に示す。境界条件は、図-8に示す解析領域の外周部を水位固定境界とした。そして固定すべき地下水位の値は外周部に近い観測井戸の内、ほとんど変動を示さない井戸での観測結果を線形補間して設定した。

本解析では、計測結果に認められる地下水挙動を支配する亀裂帯の存在を等価多孔質体モデルとして表現するために、亀裂帯を透水性が高いゾーンとしてモデル化する。この亀裂帯による高透水性ゾーンの範囲は、以下のような手順に基づき、図-9に示すように設定した。すなわち、第一段階として図-7に示すクラックテンソルの F_0 値の分布で、 F_0 値が7.0以上でかつアーチ部からの湧水が顕著な領域を抽出する。次の段階として、この抽出した領域を図-5に示した地下水位の低下状況と比較して、高い透水性を示すと推定される領域をブロック分けした。この過程で、アーチ部の湧水マップに示したゾーン3は、湧水量は多いが水位低下が小さいため、高透水性ゾーンの範囲から除外した。

また、解析に用いた透水係数は、以下のように設定した。

- ① 風化部の透水係数は、測定点数が少なく透水性を評価することが困難であるため、風化部の透水係数は、設計に用いた 1.0×10^{-4} cm/sec とした。
- ② 新鮮岩盤部の透水係数は、透水係数の傾向を表す確率紙から求めた 5.0×10^{-7} cm/sec とした。
- ③ 亀裂の存在による高透水ゾーンの透水係数は、実測の地下水位分布に基づくパラメータスタディーの結果に基づき、それぞれタンク1~タンク4側で 4.0×10^{-5} cm/sec、タンク5~タンク7側で 1.0×10^{-5} cm/sec と設定した。

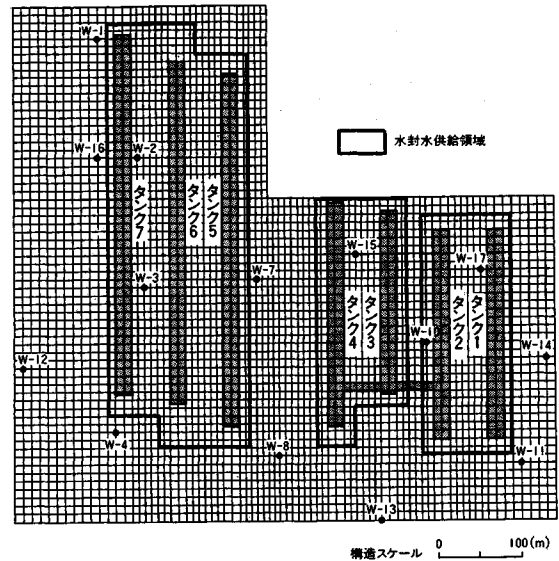


図-8 解析メッシュ図

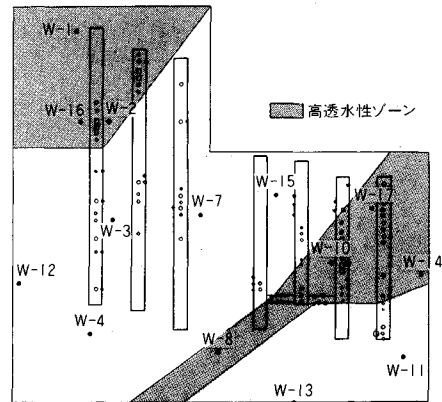
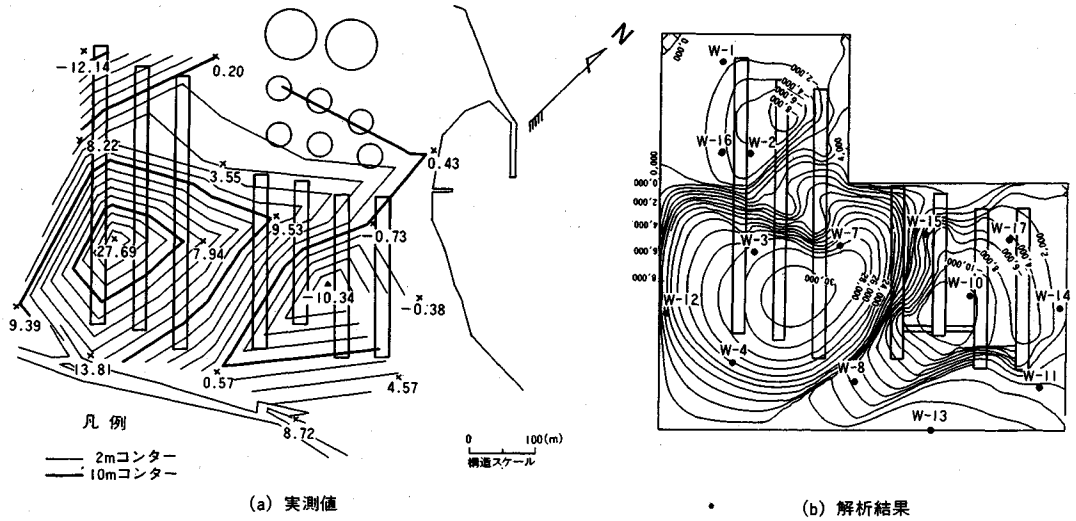


図-9 解析上の高透水性ゾーン

この解析での各湧水点の湧水量は、表-2に示す各空洞で計測された湧水量を、湧水マップでの湧水強度に基づき配分して与えた。水封水供給量は、水封トンネルNo.1~No.3からの各水封ボーリング長さおよび、実測総供給量に基づき、表-2に示す水封水供給量を、図-8に示す水封ボーリング設置領域に均一に供給されるものとして与えた。また、過去3年間の降雨の平均値 0.957 mm/day を基に、降雨が地下に浸透する割合を表す地盤の浸透能 α ($0.0 < \alpha \leq 1.0$) を $\alpha = 0.5$ とし、降雨による単位面積当たりの地下水涵養量を 0.479 mm/day とし、解析領域全域に供給されるものとして与えた。

b) 解析結果および考察

等価多孔質体モデルを適用した解析結果と計測結果との比較を、図-10、図-11に示す。これらの図に示すように、このモデルでの解析結果は、計測結果の地下水位の分布状況と平面的にも概ね良好な一致を示してい



図一10 地下水位コンター図

表一2 空洞内湧水量および水封水供給量

タンク内湧水量 (m ³ /day)		タンク内湧水量 (m ³ /day)			涵養量 (m ³ /day)
タンク 1~4	タンク 5~7	水封 T No.1	水封 T No.2	水封 T No.3	
216.0	85.2	15.6	15.2	41.3	4.79×10 ⁻⁴

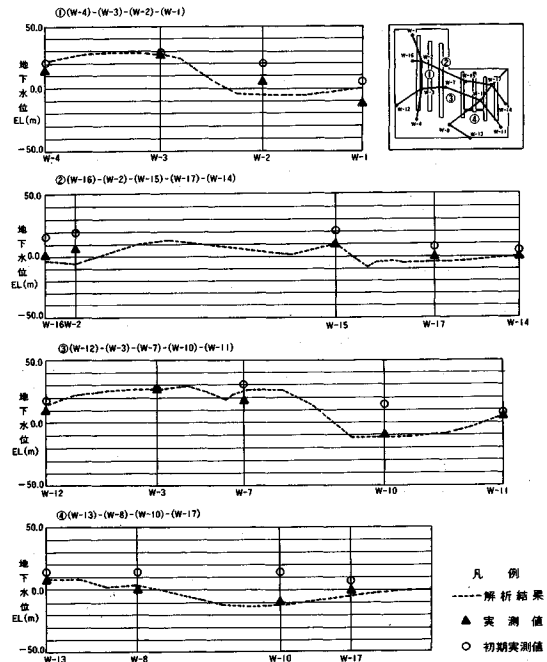
る。

特に、この解析結果では、計測結果のタンク1～タンク4とタンク5～タンク7での水位低下の領域が、それぞれ独立しているような地下水位の低下状況が表現されている。

この結果より、亀裂性岩盤中での地下水制御を伴う大規模地下構造物建設時の地下水挙動は、菊間実証プラントで得られた知見と同様に、等価多孔質体モデルにより評価できる可能性があることが明らかとなった。

ただし、高い透水性を示す亀裂帯の影響を強く受ける地下水挙動を、等価多孔質体モデルを適用して評価するためには、この亀裂帯をモデル化する高透水性ゾーンの範囲をどのように設定するかが重要な検討課題となる。また、高透水性のゾーンの範囲を設定するためには、従来の菊間実証プラントの解析に用いられたような、ルジオン試験結果を対数平均するのみでは不十分である。すなわち、等価多孔質体モデルを適用するとしても、亀裂性岩盤での地下水挙動を支配する亀裂帯の三次元的な分布状況を考慮することが必要である。

このような観点から、等価多孔質体モデルを適用する上で、亀裂帯の三次元的な分布状況を考慮し、高透水性ゾーンの範囲を設定するための目安値として、クラックテンソルによるF₀値が挙げられる。すなわち、図一7に示したように、F₀値が7.0以上の領域は、空洞掘削



図一11 地下水位断面図

時の湧水箇所と概ね一致している。このため、本解析で適用したように、F₀値が7.0以上でかつアーチ部からの湧水が顕著な領域を抽出して、その抽出した領域を計測結果に示した地下水位の低下状況と比較して、高い透水性を示すと推定される領域をブロック分けすることで、ある程度の精度で高透水性ゾーンの範囲を設定することが可能であると推定される。

ただし、本研究に示したクラックテンソルの概念を用いた透水性の評価についての検討は、原位置での亀裂の分布状況を定量化する上での、第一ステップの検討とし

て位置付けられるものである。この理由は、現状のクラックテンソルの基本的な考え方が、亀裂の幾何学的な分布のみに着目し、亀裂の性状は一定と仮定しているためである。

一方、空洞内で観察された亀裂は、シュミットネット表示に示したように確定的な分布状況であるにもかかわらず、水位低下および湧水等の地下水挙動と有意な関係にある亀裂帯も、全く地下水挙動と無関係な亀裂帯も存在した。すなわち、図-4のシュミットネットに示すように、空洞内で観察された亀裂の走向・傾斜は、ほぼN30W~N50Wの走向を有する亀裂帯と、N40E~N50Eの走向を有する亀裂帯の2種類に限定される。この意味では、空洞内の亀裂は、確定的な分布状況であると判断される。しかし、例えば、タンク6およびタンク7の中央部に存在するN40E~N50Eの走向を有する亀裂帯のように、水位低下および湧水等の地下水挙動と、全く無関係な亀裂帯も存在する。つまり、亀裂の影響を評価する上で、力学的に問題となる亀裂帯と水理学的に問題となる亀裂帯は、必ずしも一致しない可能性があることが明らかになった。このような課題に対処するためには、原位置での亀裂の分布および性状に応じて、それぞれ力学的に問題となる亀裂帯と水理学的に問題となる亀裂帯を分離・抽出する調査・計測技術の開発が必要である。

例えば、原位置試験で水理学的に問題となる亀裂帯が抽出された場合に、その亀裂帯にクラックテンソルの概念を用いることで、本検討に示した透水性の評価と比較して、より高いレベルの情報を得ることができると推定される。

このように、亀裂性岩盤での地下構造物建設時の地下水挙動をより高い精度で評価するためには、亀裂の性状およびその特性を定量化できる、数値モデルの改良に加え原位置調査・試験方法の開発が今後の重要な検討課題となる。

4. 結 論

本報告では、施工時に水封ボーリングからの注水により地下水を制御しながら、亀裂性岩盤中に伴う大規模並設空洞を建設した際の、空洞掘削に伴う地下水挙動について検討を加えた。この検討より得られた結論は、以下のように要約される。

1) 空洞掘削に伴う地下水挙動の計測結果で、空洞掘削に伴う地下水位の低下は、特定の領域に集中する傾向にあった。そして、その空洞掘削に伴い明確な水位低下

および湧水等が発生した箇所の地下水挙動は、亀裂帯の影響を強く受けていることが明らかになった。

2) 亀裂の分布がどのような状況にある場合に、地下水挙動に影響を及ぼすかの因果関係について定量的に評価するための一手法として、クラックテンソルの考え方を適用し、原位置で観測された亀裂分布の解析を実施した。この結果より、亀裂性岩盤中の空洞掘削に伴う地下水挙動評価で、事前調査結果での亀裂分布の幾何学的な情報をクラックテンソルの概念を適用し解析することにより、概略的に高い透水性を示す領域を特定できる可能性があることが明らかになった。

3) 本検討では、高透水性の亀裂帯の影響を等価多孔質体モデルにより表現するため、亀裂帯を高透水性ゾーンとしてモデル化した。この結果として、等価多孔質体モデルによる解析結果は、計測結果と概ね良好な一致を示した。この結果より、亀裂性岩盤での地下水挙動解析に等価多孔質体モデルを適用する場合に、 F_0 値が7.0以上の領域を高透水性ゾーンと仮定することにより、ある程度の精度で顕著な地下水挙動の発生する範囲が推定できる可能性があることを明らかにした。

参 考 文 献

- 1) 宮下国一郎・青木謙治・花村哲也・田島孝也：岩盤内原油備蓄タンクの計測技術，土木学会論文報告集，No. 355/VI-2, pp. 30~37, 1985.
- 2) 下茂道人・竹田直樹・宮下国一郎・青木謙治：岩盤内空洞掘削と地下水環境—菊間実証プラント—，土と基礎，Vol. 134, No. 11, 1986.
- 3) 百田博宣・藤城泰行・青木謙治・花村哲也：降雨浸透を考慮した岩盤中の地下水挙動に関する解析的検討，土木学会論文報告集，No. 379/-6, 1987.
- 4) 小田匠寛・前浜卓郎・数納慎吾・羽出山吉裕：クラックテンソルによる岩盤透水係数の評価，第6回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，pp. 121~126, 1984.
- 5) 山本和彦・大津宏康：菊間地下石油備蓄基地の建設工事概要，地下水技術，Vol. 33, No. 6, pp. 16~35, 1991.
- 6) 宮永佳晴・福原明：地下石油備蓄基地の設計について，電力土木，No. 219, pp. 63~74, 1989.
- 7) Duguid, J. O. and P. C. Y. Lee : Flow in Fractured Porous Media, Water Resources Research, Vol. 13, No. 3, pp. 558~566, 1977.
- 8) Oda, M. : A Method for Evaluating the Effect of Crack Geometry on The Mechanical Behavior of Cracked Rock Masses, Mechanics of Materials 2, pp. 163~171, 1983.
- 9) Oda, M. : Permeability Tensor for Discontinuous Rock Masses, Geotechnique, 35 (4), pp. 483~495, 1985.
(1992. 12. 18 受付)

A STUDY ON GROUNDWATER BEHAVIOR DUE TO THE CONSTRUCTION OF LARGE-SCALE CAVERNS AT KIKUMA UNDERGROUND OIL STORAGE PLANT

Jun OKAMOTO, Taira ARIMOTO, Kazuhiko YAMAMOTO and Hiroyasu OHTSU

This paper described groundwater behavior due to the construction of large-scale caverns at Kikuma underground oil storage plant. This paper showed that groundwater behavior during cave excavation is heavily affected by discontinuity of rock masses based on field measurement results. This investigation made it clear that the concept of crack tensor has great potential to quantify the relationship between groundwater behavior and the distribution of discontinuity of rock mass by analyzing the distribution of cracks in rock masses observed at the surface of excavated caverns during construction.
