

岩盤地下タンク建設工事における水封管理システム

Underground Water Control System in Construction of Underground Rock Cavern for Crude Oil

松下 健一* 児玉 直幸**
Ken-ichi Matsushita Naoyuki Kodama

要 約

本文は、地下石油備蓄基地建設工事において、NATMにより施工した岩盤地下タンク(幅18m、高さ22m、長さ540m×10本)の概要と、この地下大空洞に、地下水の水圧でバランスを保ちながら原油を貯蔵する「水封機能」の原理およびその管理システムについて述べるものである。

当工事においては、限界地下水位を確保して水封機能を満足させると同時に、最終湧水量を設計値以下に抑制するための水封管理システムを導入した。岩盤タンク施工時に本システムを適用し、安定した地下水位の確保に努めると共に、セメントグラウト注入工による過大湧水の抑制を図った。

目 次

- §1. はじめに
- §2. 概要
- §3. 水封原理および地下水理解析
- §4. 水封管理システムの概要
- §5. 水封管理システムの活用
- §6. おわりに

Table 1 日本の国家石油備蓄基地

基地名	施設容量(万kl)	貯蔵形式
むつ小川原	570(11.2万kl-51基)	地上タンク
苫小牧東部	620(11.3万kl-55基)	地上タンク
福 井	339(11.3万kl-30基)	地上タンク
秋 田	450(35.3万kl-8基, 30.5万kl-4基) (12.0万kl-2基, 10.0万kl-2基)	地中タンク
白 島	560(70.0万kl-8隻)	洋 上
上 五 島	440(第1期 88万kl-5隻)	洋 上
志 布 志	500(12.1万kl-26基, 11.0万kl-12基) (11.6万kl-5基)	地上タンク
久 慈 175..... 菊 間 150..... 串 木 野 175.....500	岩 盤 地下タンク
合 計	3,979	

§1. はじめに

1973年のいわゆる石油危機の年には、石油多消費国であるわが国は多大の影響を受けた。以来、わが国は総合エネルギー政策の抜本的な見直しを行い、併せて石油備蓄量の増加を図ってきた。

国家石油備蓄基地として現在までに全国10地点が立地されている(Table 1 参照)。備蓄方式のうち、地上タ

ンク方式は既に全世界で早くから採用されている。地中タンク方式、洋上タンク方式は日本独特のものとして新しく発達したものである。一方、岩盤地下タンク方式は、水封方式を採用することにより、原油が地上に漏洩することがなく、火災・地震・爆発に対して安全で、しかも

*東北(支)副所長
**東北(支)工事係長

環境保全性にも優れた方式である。

§ 2. 概要

2-1 工事概要

工事名称：地下石油備蓄基地建設工事

企業先：日本地下石油備蓄株式会社

設計：電源開発・日鉱資源工営共同企業体

備蓄方式：常圧貯蔵横穴水封固定水床式

備蓄容量：175万 kℓ (原油タンク×3ユニット)

備蓄タンク：幅 18m
 高さ 22m
 断面積 336㎡
 長さ 1080m
 (35万 kℓ×1ユニット)
 2160m
 (70万 kℓ×2ユニット)

掘削土量：180万㎡

支保：ロックボルト長さ 3.0~5.0m

吹付コンクリート厚さ 10~20cm

主要形状：Fig. 1, Fig. 2 および Table 2 に示す。

2-2 地質

当岩盤タンクの立地点は、北上山地の北東縁に位置し、太平洋に面した標高80~170mの丘陵地である。全体に地形は緩やかで、平坦地形面（海岸段丘）を伴い、海岸線沿いには急峻な海食崖がみられる。

本地点の地質は、北上外縁帯の田老帯に属し、基盤は

Table 2 各種トンネルの断面と延長

トンネル名	断面(巾m×高さm)	延長
非常用トンネル	5.15×5.05	710.3m
作業トンネルA	7.00×6.45	692.5m
作業トンネルB	7.00×6.05	981.7m
タンク連絡トンネルA	8.50×7.25	474.0m
タンク連絡トンネルB	8.50×6.05	474.0m
タンク連絡トンネルC	3.5×4.5	50m×5本
タンク連絡トンネルD	3.5×4.5	50m×2本
タンク(貯油槽)	18.0×22.0	540m×10本
水封作業トンネル	7.00×5.50	760.0m
水封トンネル	4.50×4.50	533.0m×6本
サービストンネル	7.10×6.70	1,018.2m

久喜花崗岩と呼ばれる白亜紀前期の花崗岩よりなる。花崗岩の表層部には一般に強風化花崗岩が認められ、その厚さは尾根部では最大約50mに達する。一方、岩盤タンクおよびタンク連絡トンネルの設置領域におけるEL=-20m(岩盤タンクの天盤高さ)以深には新鮮な花崗岩が分布する。しかし、この花崗岩には、一般に数cm~数10cm間隔で割れ目が発達していることが事前から予想されていた。実際、岩盤タンクの掘削に伴いしばしば優勢な水みちを形成した。また、タンク設置領域周辺には、小規模な断層が10条存在することが認められた。

2-3 岩盤タンクの掘削

(1) 基本方針

岩盤地下タンクは地上タンクと異なり操業開始後の開

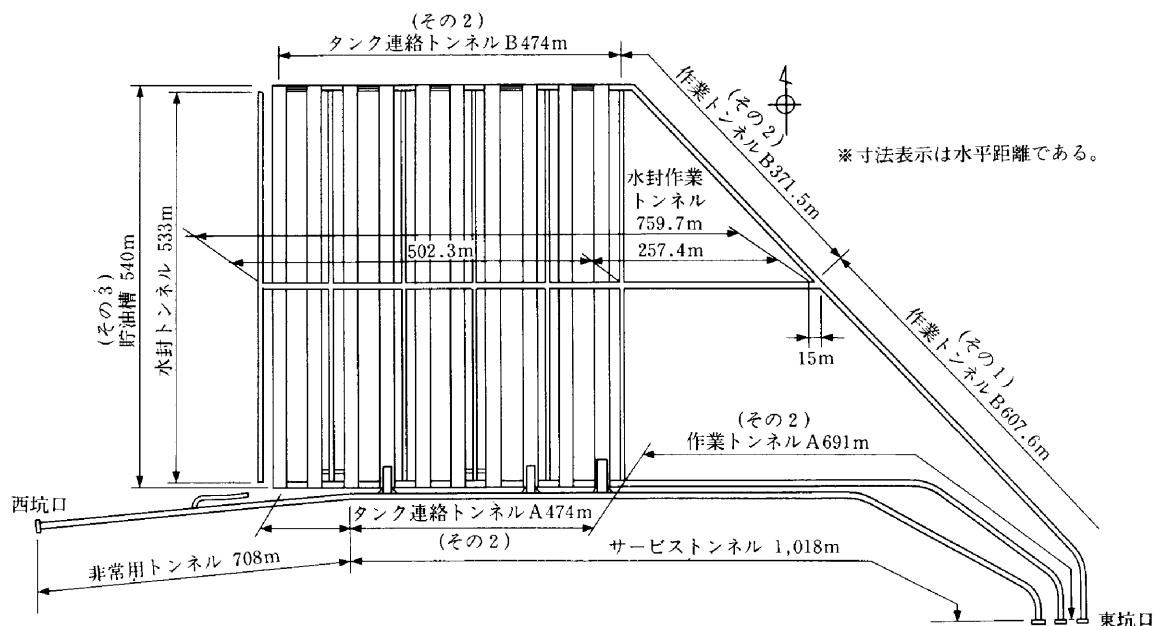


Fig.1 岩盤タンク平面図

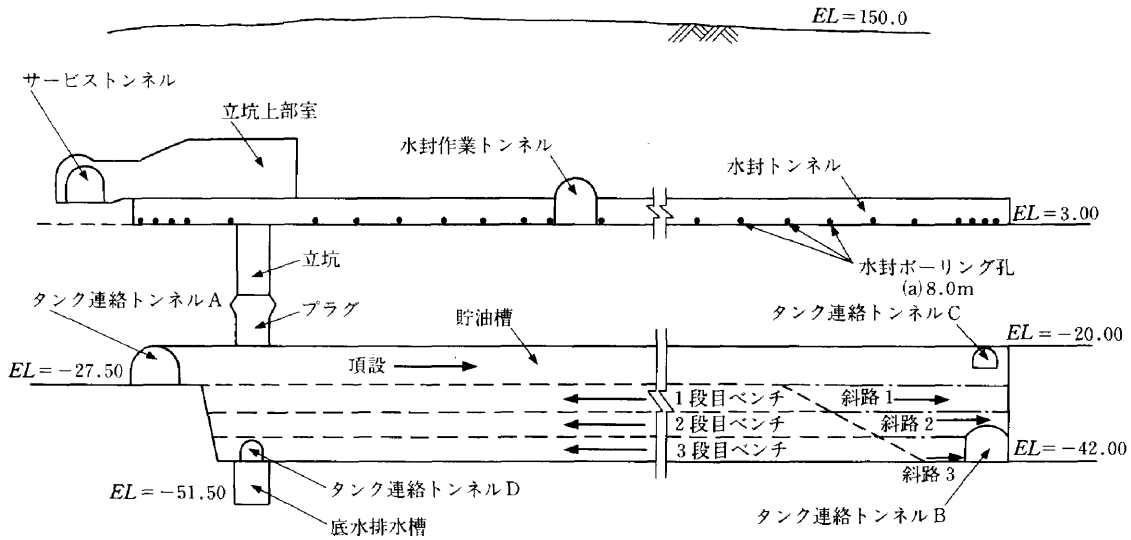


Fig.2 岩盤タンク縦断面図

放点検を実施しないことを基本条件としている。このため、可能な限り支保に依存せずに空洞の安定を確保することが基本的に要求された。今回の岩盤タンクの断面形状は、施工性を確保した上で、吹付コンクリート、ロックボルト等の支保部材が有効に作用する、安定性を重視した卵型断面が採用された¹⁾ (Fig. 3 参照)。

当工事の特徴および要求品質は、以下のとおりである。

- ① 短期間 (3年) で岩盤地下タンク (180万 m³) を掘削する大型工事である。
- ② 岩盤タンクへアプローチするための作業トンネル、配管類を収めるサービストンネル、非常時の避難用トンネル、水封トンネル、各トンネルを結ぶ立坑および連絡トンネル等多数のトンネルを掘削する必要がある。

- ③ 複数切羽の同時施工が可能である。
- ④ 岩盤は、吹付コンクリートとロックボルトで保持し、コンクリート覆工を施工しない。
- ⑤ 水封機能確保のため、限界地下水位 (EL=0 m) の保持等厳密な地下水管理が要求される。
- ⑥ 完成時点の湧水総量が制限されている。
- ⑦ 岩盤タンクの仕上り精度は±20cmである。

(2) 岩盤タンク掘削方法

岩盤タンクの掘削手順は以下のとおりである。

- ① タンク連絡トンネル A 側よりアーチ部に頂設導坑を掘削後、土平を掘削しアーチ部を完成させる。
- ② 斜路 1 のベンチ部大背および土平を掘削する。
- ③ ②と同様に斜路 2・斜路 3 を掘削し、斜路部を完成さ

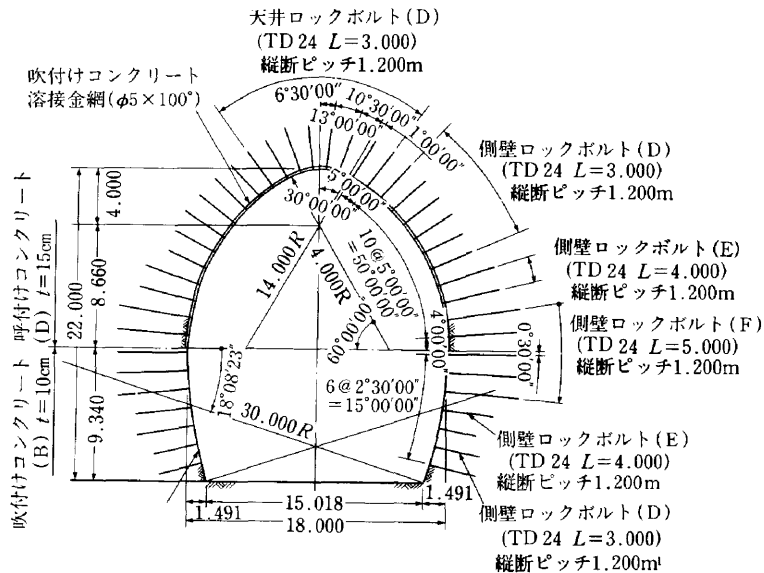
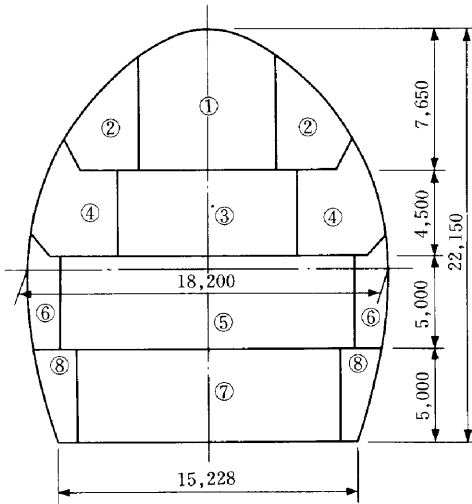


Fig.3 岩盤タンク標準断面図

- せる。
- ④その後、タンク連絡トンネル B 側よりベンチ 1 の大背を先行して掘削し、土平を掘削する。
 - ⑤④と同様にベンチ 2・ベンチ 3 を掘削する (Fig. 4, Fig. 5 参照)。
- (3) 計測
- 当該岩盤タンクは、①掘削断面積が 336m^2 と大断面で



加背割	名 称	掘削断面積 (m ²)	
①	アーチ	頂設導坑	49.92
		土 平	34.34
			86.25
③	ベンチ 1	大 背	41.40
		土 平	37.66
			79.06
⑤	ベンチ 2	大 背	75.00
		土 平	15.15
			90.15
⑦	ベンチ 3	大 背	66.14
		土 平	16.16
			82.75
合 計			336.22

Fig.4 加背割図

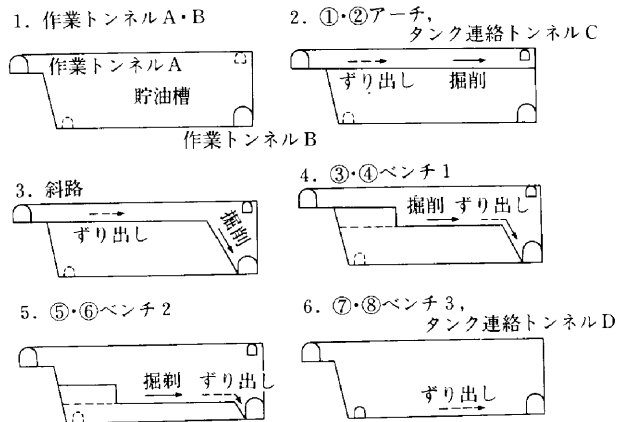


Fig.5 岩盤タンク施工順序図

あること、②10条の岩盤タンクが並設して配置されること、③多数切羽が同時に稼働すること、といった通常のトンネルとは異なる特徴をもっている。当工事においては、これらの点を考慮し、計測管理に大幅な省力化、自動化を図った。

当工事で行っている A 計測の天端沈下、内空変位計測位置と B 計測の埋設計器位置を Fig. 6 に示す。A 計測断面は、原則では 30m ごとに 1 測線を配置し、断層部等地質状況にあわせて追加した。B 計測断面は、全タンク共通に TD240m に設けた 10 断面の他、断層部を中心とした地質不良部に設けた。それぞれの計測断面図を Fig. 7 に示す。

掘削後の岩盤タンクの安定性については、アーチ部の掘削段階では切抜部の掘削に伴う天端沈下量を管理項目とし、ベンチ部の掘削段階では、ベンチ掘削直上の内空変位量を管理項目としてそれぞれの管理基準を定め施工管理を行った。吹付コンクリート面、ロックボルトのプレートの変状の有無あるいはロックボルトに発生する軸力、地中変位の状況に関しても、常時観察と計測を実施し、岩盤タンク全体の安定状況を管理した。

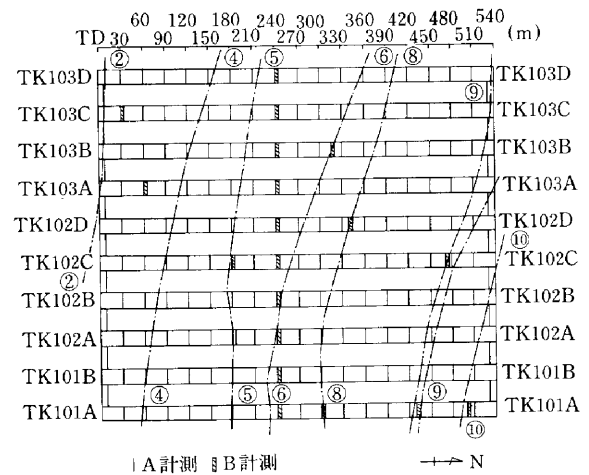


Fig.6 内空変位・埋設計器位置図

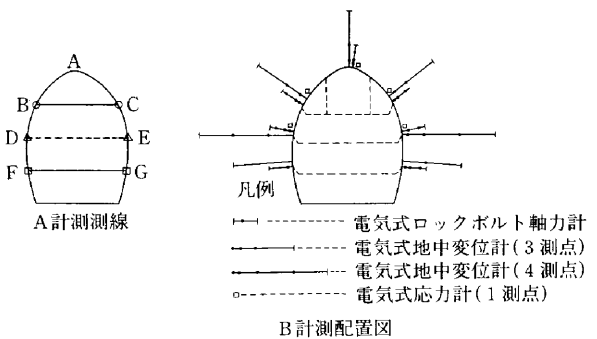


Fig.7 内空変位・埋設計器配置断面図

(4) 実施工程

工事工程表を Table 3 に示す。

Table.3 工事工程表

工事項目	1987	1988	1989	1990	1991	1992
非常用トンネル工事	○	○				
サービストンネル工事		○	○	○		
水封トンネル工事		○	○			
岩盤タンク等工事 その1 その2 その3	○	○	○	○	○	○
水封管理工事				○	○	○
プラグ工事						○
受払操油など施設設備工事 操油施設など海底配管係留設備				○	○	○

§ 3. 水封原理および地下水理解析

3-1 水封原理

地下水位以下の岩盤では、その岩盤の節理、割れ目等が地下水によって満たされている。周辺岩盤の水圧が岩盤タンク内の水圧より大きければ、タンク内への湧水を排水することによって、周辺岩盤からタンクに向う地下水流が生じる。原油や不燃性ガスは、この地下水流に押し包まれることでタンク外へ漏洩することなく安全に貯蔵することができる。これが地下水による水封原理である (Fig. 8 参照)。

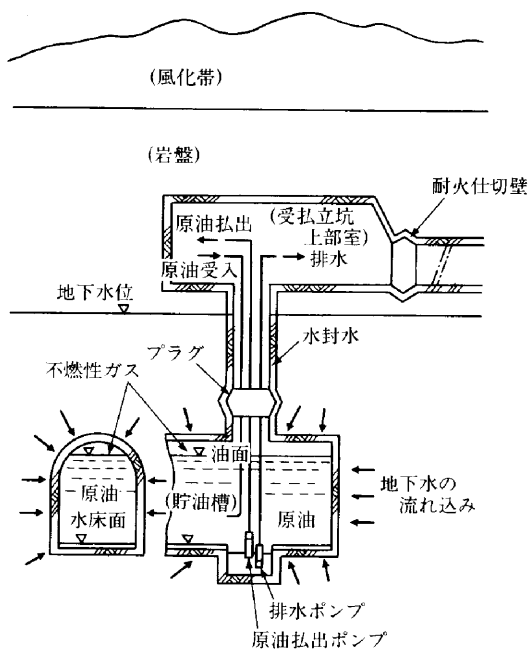


Fig.8 水封原理

3-2 地下水理解析

岩盤タンクの設計にあたって、地下水理解析は Table 4 に示す項目が実施されている。

Table 4 地下水理解析項目

1	湧水年涵養量の検討	100年確率の湧水年解析をベースとしたタンクモデルによる地下水涵養量評価
2	水封計算 (二次元鉛直断面)	飽和不飽和浸透流解析により空洞掘削前後の地下水位挙動ならびに空洞湧水量の評価
3	水封計算 (準三次元解析)	自然状態の地下水位の再現を行った後、空洞掘削による平面的な地下水位変動の評価
4	油温入計算	滴液状態の空洞と空虚な空洞が隣接している場合に滴液状態の空洞壁面から貯蔵危険物が漏出しなことを確認するための解析
5	塩水地下水計算	気液二相流解析手法を適用し、海岸近傍の地下空洞の湧水中の塩分濃度を評価する解析

(1) 地下水涵養量

消防法の基準によれば、100年確率程度の湧水年および地表形態変化時においても水封機能の健全性を確認することとなっている。今回の設計では、タンクモデル法を用いて、対応する地下水涵養量が算定されている。タンクモデル法は、雨量から河川流量を求める流出計算方法であるが、ここでは対象流域の流出機構を表現するために4段タンクモデルが採用されている。

(2) 地下水位の確保

消防法によれば、岩盤タンクの内壁から岩盤タンクの最大幅の5倍の水平距離を有する範囲の地下水位は、常に限界地下水位 (後述) 以上の水位で安定していなければならない。ここでは、岩盤タンク設置後の地下水位を検討するために浸透流解析が実施されている。Fig. 9 に地下水位検討フローを示す。

①解析手法

岩盤内の浸透流解析では、一般に有限要素法を用いるのが合理的である。ここでは自由水面の取扱いが比較的簡単に自由水面上部の不飽和領域を含めた飽和・不飽和土中の浸透流解析理論を用い、鉛直断面2次元有限要素モデルによる定常浸透流解析が実施されている。

②岩盤の水理特性

岩盤の飽和透水係数は基地周辺におけるルジオンテストで求められた透水係数に対数分布平均法を適用し算出

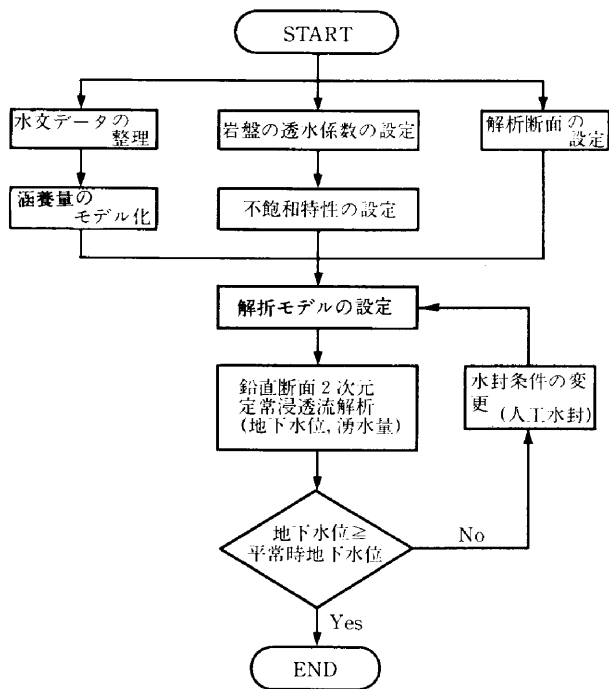


Fig.9 地下水位検討フロー

されている。また、岩盤の不飽和特性の設定にあたっては駒田の方法が適用されている。

③解析条件

空洞は、空洞安定解析より求めたL級岩盤での従荷重に対する局所安全係数(F.S) 1.5のゆりみ領域を包絡する範囲を空洞の一部としてモデル化されている。

また、上田、Muskatの理論を適用し人工水封設備の概略設計が行われ、それらの設置位置に所定の圧力が与えられている。Fig. 10に空洞掘削前後の等圧力線図を示す。

(3) 岩盤タンクの設置深さ

岩盤タンクの設置深さは、岩盤タンク運用基準により限界地下水位(岩盤タンクから漏油・漏気を防止するために保たなければならない最低の地下水位)からの深

さについて、次に定める距離 H_w 以上を確保することとしている。

$$H_w = \frac{p}{\gamma} + H_0$$

ここに、 H_w :垂直距離(m)、 p :岩盤タンクの最大常用圧力(N/m²)、 γ :水の単位重量(N/m³)、 H_0 :余裕高(=15m)である。

§4. 水封管理システムの概要

水封式岩盤地下タンクには安定した地下水の確保が必須であり、施工時から、保持すべき限界地下水位の規定と厳密な地下水管理が要求される。そこで岩盤タンクの施工に先立ち、水封トンネル施工時から水封管理システムを導入した。

水封管理システムは、Fig. 11に示したようなフローに基づき機能している。本システムはFig. 11中の*印で示す3つのサブシステムから構成され、それぞれに自動化・省力化の工夫が施されている。以下にその概要を示す。

4-1 透水試験システム

本システムは、水封ボーリング孔削孔後に実施する透水試験に際し、原位置試験の省力化および試験データ処理の自動化を目的として開発されたものである。すなわち、岩盤タンク設置深度における卓越透水ゾーンを予測するため、水封ボーリング孔での透水分布を求めるものである。特に透水試験装置は、簡単な操作で送水圧と送水量を測定することができ、データはすべてICカード(非接触型の磁気記録媒体)に自動的に記録される。したがって、データ処理もパソコン等を使用し、迅速に行うことができる。

4-2 削孔検層システム

本システムは、水封ボーリング孔削孔時に、油圧ドリルによる削孔データ(削孔速度、打撃エネルギー等)を解

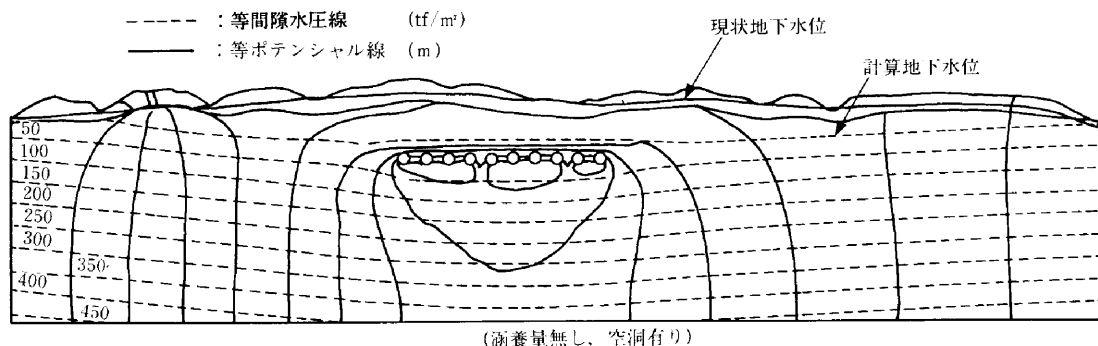


Fig.10 空洞掘削後の等圧力線図

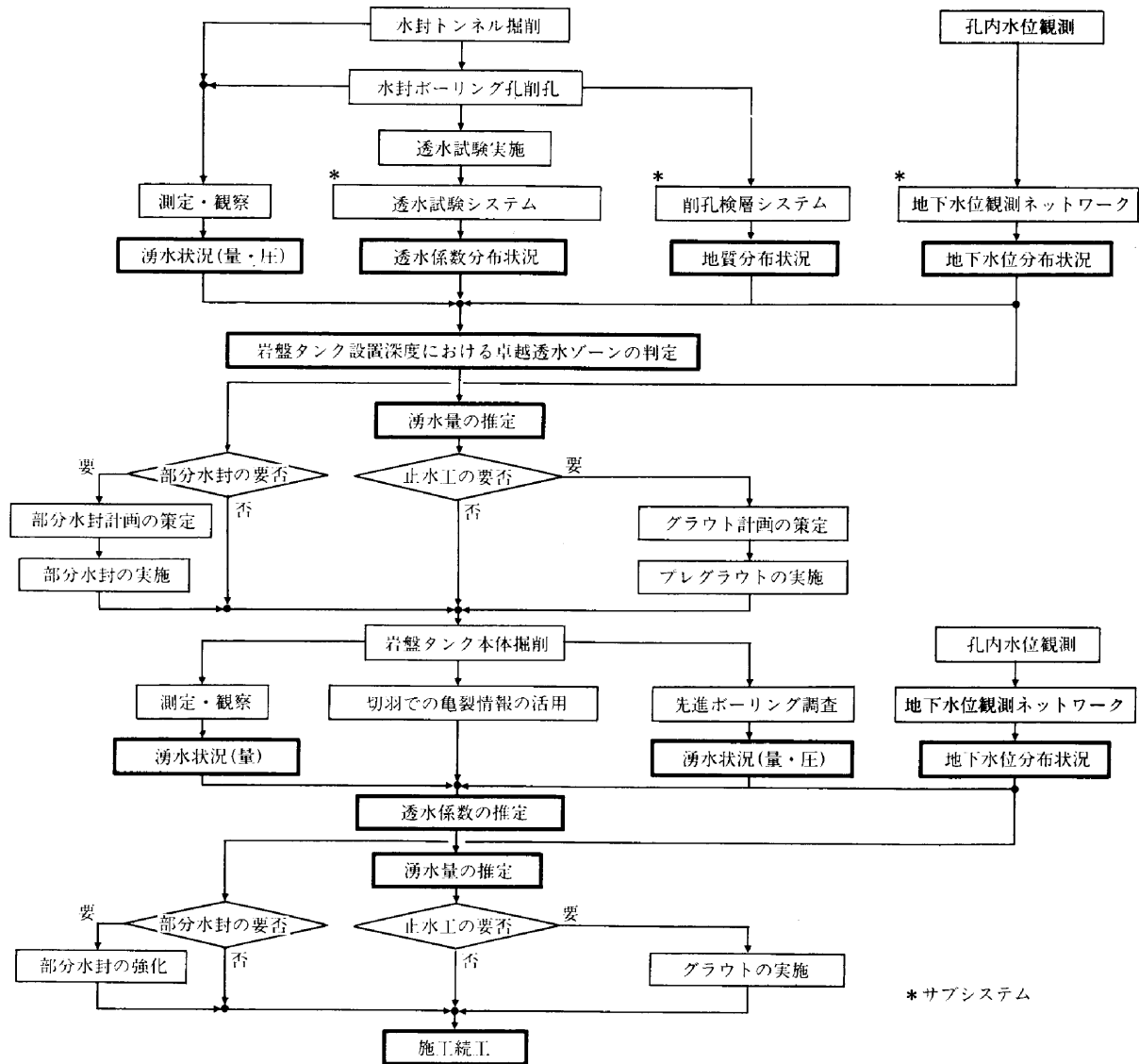


Fig.11 水封管理システムのフロー

析し、岩盤評価および地質分布予測に供することを目的として開発したものであり、Fig. 12 に示すフローに基づいている。測定データを処理することによって、Fig. 13 に示すように、弱層の分布を明確に把握することができる。

4-3 地下水位観測ネットワークシステム

岩盤タンク周辺に設置した地下水位観測孔を、有線テレメータによりネットワーク化することによって、随時周辺地下水位の観測が行えるシステム (Fig. 14 参照) である。各観測孔での孔内水位をもとに、自動的に地下水位コンター図を得ることができ、施工の進歩に伴う地下水位の変動をリアルタイムに監視できる特徴がある。

§ 5. 水封管理システムの活用

5-1 卓越透水ゾーンの予測

水封トンネルおよび水封ボーリング孔施工時に得られた各種データ (透水試験システム、削孔検層システムおよび地下水位観測ネットワークシステムの計算結果) をもとに、岩盤タンク設置深度における卓越透水ゾーンの予測を行った。予測に際しては、弱層の傾斜や深度方向への連続性および低透水係数エリアの連続性等を勘案するだけでなく、水封トンネル等の地質スケッチ、湧水量、湧水圧等も踏まえて総合的に判断し、Fig. 15 中に示した箇所を卓越透水ゾーンと予測した。

5-2 止水グラウト計画および部分水封計画の策定

セメントグラウトは、岩盤タンクのアーチ部掘削時に事前に実施する卓越透水ゾーンへのプレグラウトおよび

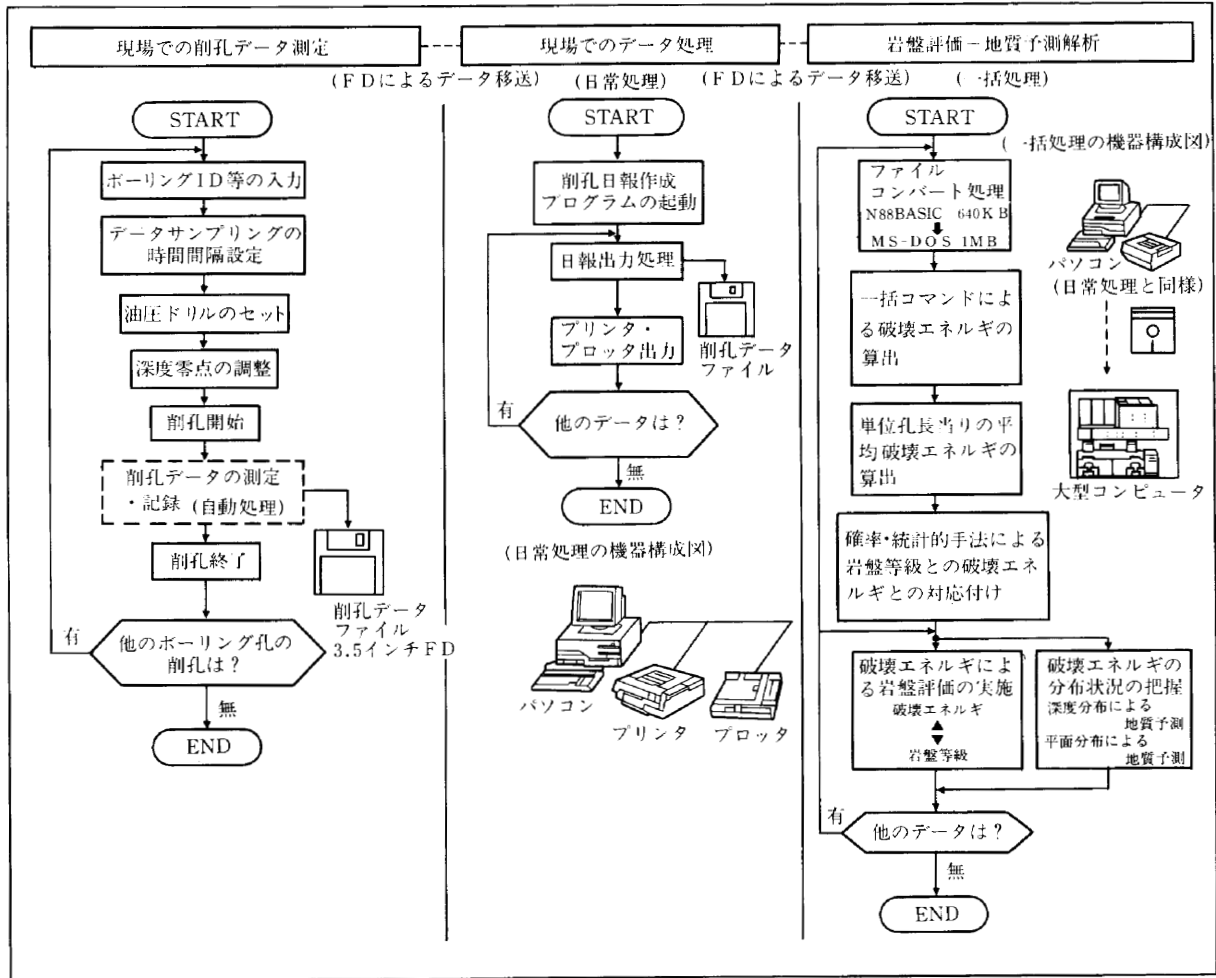
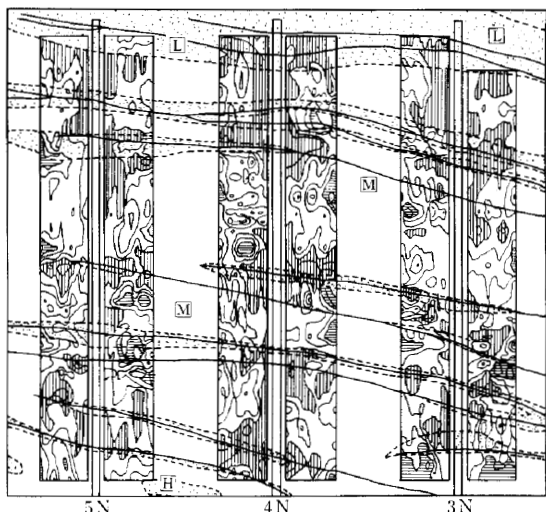


Fig.12 削孔検層システムのフロー



■■■■ : $E_r \leq 5,000$ (L級相当) コントは $1,000 \text{ kgf/cm}^2/\text{m}$ 間隔
 □ : $5,000 < E_r \leq 8,000$ (M級相当) □ □ □ : 岩級区分
 ■■■ : $8,000 < E_r$: 断層、シーム
 (単位: $\text{kgf/cm}^2/\text{m}$)

Fig.13 破壊エネルギーの分布と地質状況との関係

掘削後の岩盤タンクの過大湧水箇所に適宜実施するポストグラウトの2つとし、それぞれについてグラウト計画を策定し、Fig. 16に示した位置を計画グラウト位置とした。また、局所的な地下水位の低下を防止するために、施工時においても部分的に水封トンネルに注水する部分水封計画を策定した。具体的には、6箇所の水封トンネルの分岐部に仮設の堰を設けて、常時水封水を保持するものとした。なお、水封水の供給には、部分水封部の水位変動を自動的に測定すると同時に、一定の水位を保つように自動的に給水する部分水封システムを導入した。

5-3 岩盤タンク施工時の地下水管理状況

岩盤タンク施工開始から現在に至るまで、5-2の止水グラウトおよび部分水封を実施し、蓄積された施工実績に基づき、きめ細かな計画の見直しを行いながら、周辺地下水位を観測しつつ掘削を進めた。その結果、岩盤タンク施工に伴う湧水量を抑制し、地下水位においてもほぼ安定した状態を保持している。

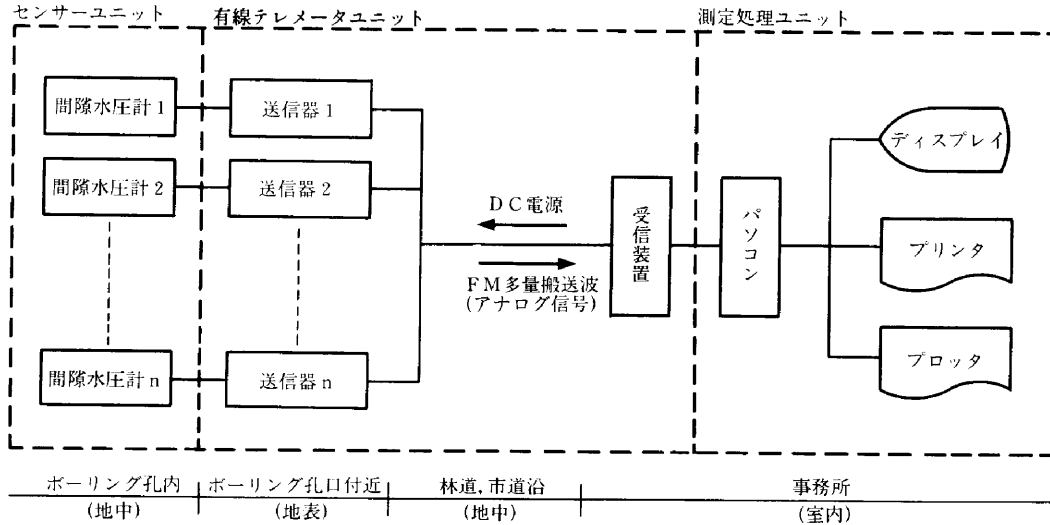


Fig.14 有線テレメータによる地下水位観測ネットワークシステム

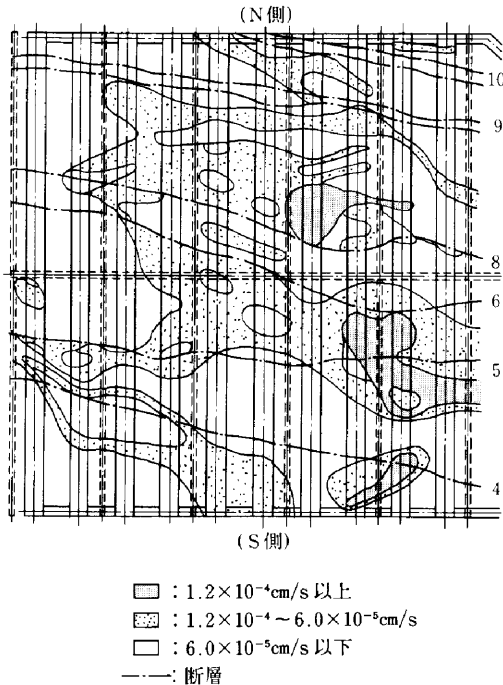


Fig.15 岩盤タンク設置深度における卓越透水ゾーン分布予想図

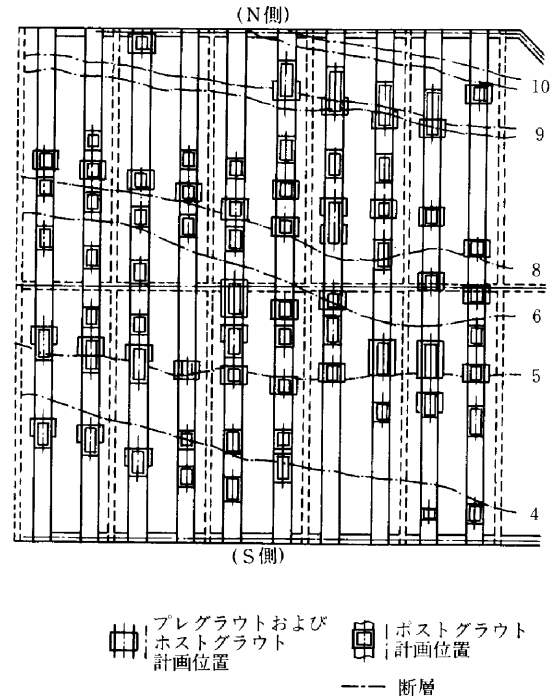


Fig.16 グラウト計画位置図

§6. おわりに

本工事は、「水封原理」に基づき、地下大空洞に原油を貯蔵させるための大規模な岩盤地下タンク工事である。岩盤地下タンクに限らず、地下大空洞やトンネルの掘削時の地下水管理は、常に課題として取り上げられるものである。当基地工事における水封管理システムによる地下水管理は、従来の受動的な地下水制御に対し、能動的

に地下水を管理した事例である。

最後に、今回工事の施工にあたり御指導いただいた関係各位に深く感謝する次第である。

参考文献

1) 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, 1989. 3.