Outline of Underground Oil Storage Plant

by Toshiaki MAKITA¹

1. Japan Underground Oil Storage Co., Ltd., Shibadaimon, Minato-ku, Tokyo 105

1. は じ め に

1973年の第4次中東戦争が引き金となった第1次石油危機は、石油不足が国民生活や経済に大きな影響を与えるかを証明した。これにより石油備蓄の必要性が認識され、昭和50年12月「石油備蓄法」が制定された。この石油備蓄法に基づき、90日分の民間石油備蓄が義務づけられ、昭和55年度末には目標の90日分備蓄を達成し、56年度以降90日分の水準を維持している。

一方、政府は昭和53年6月「石油公団法」を改正し、石油公団による国家備蓄として昭和63年度末までに、3,000万kl規模の原油貯蔵を目的とした国家備蓄基地を建設することを決定した。

国家備蓄基地は現在までに全国10地点で立地決定がなされ、この内、3基地は完成、ほかは目下建設中であるが、昭和63年度末で3,000万klの備蓄を完了した。なお、今後の石油備蓄は1990年代半ばを目途に国家備蓄5,000万klの目標に向かって備蓄増強を進めている。

2. 地下備蓄基地の建設に至る経緯

石油の地下備蓄方式は、安全性、維持管理の容易性、環境保全、土地の有効利用等、多くの面で利点があり、北欧においては40年以上前から実用化され、現在ではアメリカ、フランス、ドイツ、韓国等においても実用プラントが稼働している。しかし、我が国は地質構造上、広範囲に安定した地質が得られることは稀であり、大規模空洞を建設することは技術的・経済的に困難であると考えられていた。

その後、1979年から石油公団の手によって太陽石油(株)菊間製油所の敷地内に容量25,000klの実証プラントが建設され、そのプラントにおける実証実験によって貯油槽の安定性、水封機能の確認のほか、常圧貯蔵、加圧貯蔵における原油運転をはじめとする各種の実験・計測が行われ、地下方式による原油の地下備蓄が、我が国の地質条件下でも可能であることが確認された。

次いで、石油公団の手によって地下備蓄方式による国家備蓄基地の建設をはかるため、1981年から岩手県久慈地区、愛媛県菊間地区、鹿児島県串木野地区の3地点について立地可能性を探るための基礎的な調査が行われ、引続き1985年からは現地における地質調査、水文調査、調査用の横坑における原位置試験およびこれらの調査に基づく基本設計が実施され、1986年4月までの間に順次立地決定がなされた。

図1 水封式地下備蓄の原理

3. 水封式地下備蓄の原理と特徴

水封式地下備蓄方式の最大の特徴は、地下水面下の岩盤内に空洞を掘削し、スチールあるいはコンクリートなどのライニングを行うことなく、自然または人工の地下水位により漏気・漏油を防止する水封システムを採用していることである。

地下水位以下の岩盤では、その岩盤の持っている節理、割れ目等の間隙は地下水によって満たされており、このような岩盤中に岩盤タンクを掘削し設置すれば、周囲の岩盤からタンク内への地下水の浸透が起こり、タンクは地下水によって満たされる。このタンクから排水を行い、この中に石油を貯蔵すると石油はタンク底部の水床上に浮き、更にタンク周辺から浸透してくる地下水に押し包まれて漏油することなく安全に貯蔵できる。これを水封システムと呼んでいる(図1参照)。

水封システムの性能は、岩盤の水理特性や隣接空洞の有無等の空洞のレイアウト、および地下水涵養量等の水文条件に大きく左右される。水封方式としては、自然な状態で一定の地下水位が確保される自然水封方式とトンネル、ボーリング孔等の水封設備を設けて水を供給し、一定の地下水位を確保する人工水封方式がある。今回の地下備蓄では久慈、菊間基地は人工水封方式、串木野基地は自然水封方式を採用している。

4. 基地の概要

地下備蓄基地は図2に示す通り、岩手県の久慈市、愛媛県の菊

* 1991年9月3日受付 11月13日受理

1. 日本地下石油備蓄(株)常務取締役建設部長
キーワード：地下、石油備蓄、岩級区分

間町、鹿児島県の串木野市において貯油容量合計500万klの計画で建設が進められている。それぞれの基地の立地概要を表1に示す。

5. 設計概要

5.1 岩盤タンク貯蔵所に関する消防法の規制

岩盤タンクは、消防法上は屋外タンク貯蔵所として位置づけられ、その位置、構造および設備の技術上の基準、完成検査前検査、保安検査等について昭和62年5月に定められた「岩盤タンクに係る屋外タンク貯蔵所の規制に関する運用基準等について」(以下、運用基準と呼ぶ)の中で、規定されている。

運用基準の中で設計上特に関係の深い事項として下記の項目が

表1 地下石油備蓄基地の立地概要

久 慈 基 地	菊 間 基 地	串 木 野 基 地
<p>1.1 基地の概要</p> <p>1) 全般</p> <p>本企画は、岩手県久慈市に地下方式により備蓄容量約175万klの石油備蓄基地を建設するものである。貯油施設は、夏井町半崎地区の花崗岩地域に、地上施設は東坑口の南側に予定されている県の埋立造成地に設置する。受払施設は、基地の2.2km沖合に多点係留浮標式係留施設および海底パイプラインの設置を計画している。</p>	<p>2.1 基地の概要</p> <p>1) 全般</p> <p>本計画は愛媛県越智郡菊間町に地下方式により備蓄容量約150万klの石油備蓄基地を建設するものである。貯油施設は、菊間町種地区の花崗岩地域に、地上施設は地元開発公社が実施中の皆曲げ地区埋立造成地に配置し、受払施設は太陽石油㈱菊間製油所沖合いにある菊間製油所の既存施設を利用する。</p>	<p>3.1 基地の概要</p> <p>1) 全般</p> <p>本計画は、鹿児島県串木野市に地下方式により備蓄容量約175万klの石油備蓄基地を建設するものである。貯油施設は、市街地北方山地の安山岩地域に、地上施設は地域振興整備公社が現在埋立計画を進めている西薩中核工業団地内に配置する。なお工業団地の埋立材は主に備蓄基地建設に伴い発生する岩砕である。</p> <p>また受払施設は、基地の2.3km沖合に、一点係留浮標式の係留設備および海底パイプラインの設置を計画している。</p>
<p>2) 位置</p> <p>本基地は図に示すように岩手県三陸沿岸の北部にある久慈市夏井町半崎および待浜町麦生地区に位置し、東側は太平洋に、南側は久慈湾に面している。</p>	<p>2) 位置</p> <p>本基地は、図に示すように愛媛県のはば中央の高縄半島西部、越智郡菊間町に位置し、菊間町の北東は大西町、西は北条市、南東は玉川町に接し、北西は瀬戸内海の斎灘に面している。愛媛県の県庁所在地松山市は、南西へ約30km、今治市は北東へ約15km、瀬戸内海を隔てた広島市は約50kmの距離にある。</p>	<p>2) 位置</p> <p>本基地は、図に示すように鹿児島県薩摩半島基部にある串木野市に位置し、西側は東シナ海に面している。市内を国道3号線が通っており、鹿児島まで約40km、熊本まで約160kmである。</p>
<p>3) 地形および地質</p> <p>(a) 地形</p> <p>本基地は久慈市の北東側、久慈湾北岸に位置し、久慈市街地周辺に平坦地より一段と高い丘陵地で、中生代の花崗岩類からなる地域である。</p> <p>北上山地東縁には海岸線に沿って平坦地形面(海岸段丘面)が発達しており、久慈地方にも3段の段丘面が認められる。また、海岸沿いには高さ70～80mの急峻な海岸崖が形成されている。</p> <p>埋立予定地の海岸線付近は岩が露頭し、また岩礁が干出する状態である。</p> <p>湾内水深測量によると、久慈湾北岸は多少起伏があり海底勾配は1/40～1/120程度である。</p> <p>(b) 地質</p> <p>本基地の対象地成には、主として白亜紀前期(1億2千万年前)の花崗岩が広く分布している。また段丘堆積層およびローム層が海岸段丘上に広く分布する。</p> <p>花崗岩体の表層部は、マサ(真砂)状風化帯を形成しているが岩体は一般に堅硬で緻密である。</p> <p>海底地質は、久慈湾内の土質調査によれば、久慈湾北部には表層0.2～2.4m厚さの砂が分布しており、その下は砂岩、礫岩、およびシルト岩で構成されている。</p>	<p>3) 地形および地質</p> <p>(a) 地形</p> <p>本基地は、高縄半島の北部、菊間町東方の丘陵地および皆曲地区埋立造成地に建設する。高縄半島は、北方に向かって瀬戸内海に張り出した半島で、東岸は緩一、西岸は斎灘に面し、周辺には小規模な海岸平野が散在している。</p> <p>埋立予定地の海底は、大部分基盤岩が海底に露出しており、平均水深は3～4m程度であるが、埋立護岸付近では局部的にCDL-8m程度のところがある。</p> <p>(b) 地質</p> <p>本基地は、白亜紀後期の貫入とされている新期領家花崗岩類からなり一部変成作用を受けている。貯油施設対象地点の基盤岩は、この新期領家花崗岩類から形成されており、地表部風化が進みマサ(真砂)化している。菊間製油所付近の海底地質は、石油備蓄研究会および海上保安庁による調査結果によると3層から構成されており、上方より、第1層は砂および泥の互層状の未固結海底堆積物により構成され、第2層は最大層厚20m程度の風化花崗岩あるいは風化状花崗岩類からなり、第3層は主として花崗岩によって構成されている。</p>	<p>3) 地形および地質</p> <p>(a) 地形</p> <p>本基地対象地点は、東北東-西南西方向に延びる丘陵性山地であり、立岩(標高275.4m)を主峰とする北東部山地と東シナ海に面して平均標高200mの南に開く馬蹄形の稜線をもつ西部山地となっている。西部山地の海岸側は、比高十数メートルの急斜面が発達し、海岸には岩礁が点在している。</p> <p>(b) 地質</p> <p>対象地域の地質は新第三紀の北薩古期安山岩類および北薩中期火山岩類ならびに第四紀の崖線堆積層と沖積地堆積層からなり北西側に北薩古期安山岩類、南東側には北薩中期火山岩類が分布している。貯油施設対象区域には、古期安山岩類のうち自破砕状安山岩が分布する。</p> <p>また地下水位は標高50～120m付近にある。</p>
<p>4) 港湾の概要</p> <p>岩手県における港湾としては、重要港湾である宮古港、釜石港、大船渡港、久慈港があり、そのほか地方港湾の八木港がある。</p> <p>久慈港は、久慈沖が船舶の遭難の多いことから、昭和26年に全国避難港19港のうちの1港として指定を受け、整備が進められてきたが、地域開発の拠点としての発展が期待され、昭和50年4月に重要港湾に指定されている。</p>	<p>4) 港湾の概要</p> <p>愛媛県における港湾としては、重要港湾である松山港、新居浜港、今治港、八幡港、宇和島港、東予港および三島・川之江港があり、そのほか地方港湾の菊間港、第1種漁港の亀岡漁港等がある。また本基地に隣接する菊間製油所には、係留施設として多点係留浮標式係留設備および固定式係留設備がある。菊間港については、具体的な港湾計画はなく、菊間製油所係留施設の規模拡大についても現在のところ計画されていない。</p>	<p>4) 港湾の概要</p> <p>鹿児島県における港湾としては、重要港湾である鹿児島港、名瀬港、西之表港、志布志港、川内港があり、その他に喜入港および本計画地点に隣接する串木野新港等の地方港湾がある。</p> <p>串木野新港は、串木野漁港に隣接して工事中であり、九州西南部の流通拠点、東南アジア諸国との貿易港を目指している。</p> <p>なお、串木野漁港は、第3種漁港であり、現在串木野漁港修築事業によって、西薩地域における漁港水産基地および避難港としての機能を有する外港建設を行っている。</p>

挙げられる。

- ① 岩盤タンク間の離隔距離の確保
 - ② 岩盤タンク周辺の安定した地下水位の確保
 - ③ 岩盤タンクの限界地下水位（漏気・漏油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）からの深さの確保
 - ④ 荷重に対する岩盤タンクの安全性の確保
- 設計上はこれらの項目について種々の検討を行った。

ダム基礎等土木構造物の基礎岩盤を評価する際には、岩盤の硬さ、割れ目間隔および風化の程度等に着目した岩盤分類を用いている。しかしながら、対象とする岩盤タンクは地下深部に設置されるものであり、風化の影響は少ないと考えられる。従って、岩盤タンクの設計に当たっては地下深部の塊状岩盤を対象とした「地下空洞の岩盤分類および岩盤総合評価の指針」（以下、地下備方式と呼ぶ）を作成した。

このように、地下備方式では現場における適用性を配慮した岩盤分類に重点をおいている。なお、「割れ目の状態」と「風化・変質」および地下空洞の安定に影響を与える「湧水状況」を補助要素に加えた。これらの各要素の判定基準は表2、3に示す通りである。

盤総合評価に際しては主要な要素として選定した「硬さ」、「割れ目間隔」の組合せを基本とし、湧水状況等の補助要素、断層の性状等も含めて総合的な判断がなされる。岩盤総合評価基準を表4に示す。

なお、主に地下深部の新鮮岩盤を対象とした地下備方式の岩盤分類は、「風化」を重要な要素として扱っている電力中央研究所の分類（電研方式）と単純には比較し難い所がある。地下備方式の岩盤分類H_V、H、M、L、L_Vは概ね電研方式のB、C_H、C_M、C_L、Dに対応するが、MにはC_L級の一部が、LにはC_L級の一部またはD級の一部が含まれる。

a) **岩盤の強度・変形特性** 空洞の力学的安定性の検討に用いる岩盤物性値は、各基地の岩種・岩質を考慮にいれ、孔内試験などの原位置試験の結果をもとに設定した。ここで、地下深部の岩盤は一般に風化の影響が少ないため、低位の岩級においても地表付近の同クラスの岩盤ほど強度が小さくない。各岩盤等級の物性値は、せん断強度と変形係数の間の相関性から設定した。表5

「硬 さ」 「割れ目間隔」

	ランク	基準	ランク	基準
硬 ↑ ↓ 軟	A	ハンマー強打でも容易に割れない。	I	100cm以上
	B	ハンマー軽打で割れない。	II	40～100cm
	C	ハンマー軽打で容易に割れる。ハンマー軽打で小岩片となっても岩片は硬い場合がある。	III	20～40cm
	D	ハンマー軽打でへこむ。岩片は手で砕くことができる。	IV	5～20cm
	E	ハンマーピックが容易に刺さる。岩片は指でつぶすことができる。	V	5cm以下

<p>割れ目の状態</p> <p>(1) 風化・変質なし</p> <p>(2) 変色あり</p> <p>(3) 鏡肌を呈する</p> <p>(4) 固結した挟在物をもつ (再固結した破砕物等)</p> <p>(5) 礫状・砂状の挟在物をもつ</p> <p>(6) 粘土状挟在物をもつ</p> <p>(7) 方解石脈・沸石脈・石英脈等を伴う</p> <p>(8) 明らかに開口している</p>	<p>湧水の状況</p> <p>①坑壁がかわいている</p> <p>②坑壁がしめっている</p> <p>③坑壁がぬれている(わずかに滴水)</p> <p>④滴水あり 天盤：小雨状 側壁：水の流れ明瞭</p> <p>⑤湧水あり(土砂降り状)</p>	<p>風化・変質</p> <p>1. 全く風化・変質が認められず、構成鉱物まで新鮮なもの</p> <p>2. 一部の鉱物・割れ目がわずかに風化・変質している</p> <p>3. 一部の鉱物が風化・変質し、割れ目沿いにも風化・変質が進む</p> <p>4. 未風化・未変質の部分が角礫～円礫状に残留している状態</p> <p>5. 構成鉱物の大部分が風化・変質し、二次鉱物に変わっている状態</p>
---	---	--

に各基地の代表岩盤の物性値を示す。

b) 岩盤の水理特性 水封機能の維持に大きな影響を与えるのは岩盤の透水性である。各基地の飽和透水係数は、岩盤透水試

験(ルジオン試験)の結果に基づき決定した。図3に久慈基地の透水係数頻度分布を示す。解析にはルジオン試験結果の平均値を用いることとし、平均透水係数の算定には部分的な異常値に支配

表4 岩盤タンクを対象とした岩盤総合評価基準(久慈・菊間)

等級	基本基準		一般岩盤性状の説明				総合評価の解釈と施工への対応	
	「硬さ」と「割れ目」の組合せ () は出現頻度低い	硬さ	割れ目の状態	断層の有無	湧水状況	標準的P波速度 (4km/sec以上)	透水係数 10 ⁻⁴ 以上	
H _v	(AⅠ) (AⅡ) (BⅠ) BⅡ	ハンマー打で容易に割れない。 ハンマーによる音、感触で大変硬く感じる。	肉眼では造岩鉱物の風化・変質は判別できない。割れ目にもほとんど風化・変質は認められない。	密着し、挟在物はほとんど認められない。	密着した鋭肌の存在は認めても、粘土シームを伴うような断層は存在しない。	一般的に坑壁沿いに水の流れが明らかで、天盤からの湧水も認められる。しかし地質構造的条件下で場所によって湧水状況が変化するのが特徴である。	30以上	
H	(AⅢ) BⅢ		肉眼では造岩鉱物の風化・変質現象は半別できない。一部の割れ目には風化(茶色)や変質が認められる。	部分的開口又は挟在物あり。	擾乱帯又は亀裂帯を含めた破碎幅1m以下の断層が10m以上の間隔で存在する場合がある。			
M	(AⅣ) BⅣ (CⅢ)	ハンマー軽打で容易に割れない。又は岩片は硬いが割れ目沿いには割れ易いケースもある。					20~40	
L	(BⅤ) (CⅣ) CⅤ	ハンマー軽打で小岩片になり易く、もろい。但し岩片は硬い。	肉眼では造岩鉱物の風化・変質は判別し難い。ほとんどの割れ目に風化・変質が認められる。	ほとんどの割れ目は、開口又は挟在物あり	大小の断層がひんばんに存在する場合、又は大規模擾乱帯や亀裂帯を形成する断層が存在する。	一般的には湧水・滴水が認められる。	1.5~4km/sec未満 (2~4km/sec以上) (既存データ少ない)	10~25
L _v	(DⅣ) (DⅤ) (EⅤ)	ハンマー打でへこむか、もしくはハンマーで掘れる。軟質。	基本的には断層破碎帯や熱水変質による軟質部を示す。	断層破碎帯又は熱水変質帯	良く締った断層粘土には十分な透水性がある。しかし時間の経過に従い、軟化する。	2.5km/sec未満 (2km/sec未満) (既存データ少ない)	15未満	

* () 内の速度を示す場合が多い。

表5 3基地の代表岩盤の物性値

	久 慈	菊 間	串木野
代表岩盤等級	M	H	Hv
単位体積重量(tf/m ³)	2.75	2.7	2.5
初期ポアソン比	0.30	0.25	0.20
初期変形係数(kgf/cm ²)	3.0×10 ⁴	6.5×10 ⁴	6.0×10 ⁴
せん断強度(kgf/cm ²)	18.0	32.0	21.0
引張強度(kgf/cm ²)	3.6	6.4	4.2
初期地圧(側圧比)	0.9	1.2	1.0

図3 透水係数頻度分布(久慈基地)

されず、当該岩盤の最頻値に近い値が得られる点から対数分布平均法を採用した。

5.4 空洞安定性の検討

岩盤タンクは操業開始後の開放点検を実施しないことを基本条件としており、メンテナンスフリーの観点から可能な限り支保に依存せずに空洞安定が確保できることを基本として設計されている。こうした観点から、空洞の支保部材としてのPCアンカー等の使用は、耐久性の懸念から使用していない。従って岩盤タンクは極力空洞それ自体で安定性を保つよう空洞断面形状に留意した。また、通常のロックボルトと吹付コンクリートで補強が不足する場合には、基本的には空洞断面形状の変更や部分的な盤下げ中止によるロックストラットの形成等の方針で対処することとした。

ここでは詳細設計において重視した空洞断面形状、空洞離隔距離および支保工の検討内容について紹介する。

a) 空洞断面形状の検討 地下発電所の形状は、設置される水車、発電機等の機器の形状と寸法に影響を受けるが、岩盤タン

クの場合は単なる原油の器であり容積は100%有効に利用されるので、経済性と安定性という2条件を満たせば良い。また、岩盤タンクは耐用年数のいかにかわらず、メンテナンス無しで100年オーダの長期的な安定性が要求される。しかも岩盤タンクは水封機能を満たすため、絶えず地下水面に保持されるので、腐食する可能性のある材料への依存度を低くして形状自体が安定するように設計することが望ましい。

一方、岩盤タンクの実績が多い北欧諸国においては図4のような断面が多く用いられている。これは、北欧岩盤は数億年前の非常に良好な岩盤が多く、古くから岩盤タンクのみならず、大断面の空洞が素掘りのままで建設されてきたという経験と実績に基づくものであり、安定性よりも施工性(縦ベンチ掘削)、経済性が重視されたからであろう。

今回の岩盤タンクの断面形状は、断面積を拡大し、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(久慈、串木野:高さ22m、幅18m)を採用した。(図5~10参照)

なお、菊間地点は、実証プラントの実績があり、地質も良好なこと、また敷地の制約があることから、高さ30m、幅20.5mの卵型断面に近づけた変形食パン型断面を採用した。

b) 岩盤タンク間離隔距離の検討 連設空洞の離隔距離は、力学的条件と地下水理学的条件から決定される。前者は空洞間の空学的相互作用をある程度まで低減することを目的とし、後者は空洞間での貯蔵危険物の移流の発生を防ぐことを目的としている。力学的条件については、消防法によって岩盤タンクの空間相互間の距離は、次に定める値L以上を確保することと定められている。(図11参照)

$$L = \frac{B_1 + H_1 + B_2 + H_2}{4} + R_1 + R_2$$

ここに、L: 確保すべき距離(当該岩盤タンクの空間の内壁面から隣接する空間の内壁面までの距離)

B₁: 当該空間の内壁面の最大幅

H₁: 当該空間の内壁面の最大高さ

B₂: 隣接する空間の内壁面の最大幅

H₂: 隣接する空間の内壁面の最大高さ

R₁: 当該空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

R₂: 隣接する空間を構成する岩盤のゆるみ域の幅

この基準は、ゆるみ領域の定義、評価方法、解析方法等について

図4 北欧諸国の岩盤タンク形状

図5 各基地の岩盤タンク断面形状

図6 タンク掘削状況（久慈基地）

図9 タンク最終ベンチ掘削状況（串木野基地）

図7 掘削ズリ積込状況（菊間基地）

図8 タンク最終ベンチ掘削状況（菊間基地）

てあいまいな点があるが、今回の設計においては、以下の方法で設定した。

- ・解析手法：二次元線型弾性解析。
- ・解析モデル：図12に示す並設空洞モデル。
- ・荷重条件：地圧、岩盤内間隙水圧、地震慣性力。
- ・ゆるみ域：局所安全係数 $F_S \leq 1.5$ の範囲。

検討の結果、岩盤タンク中心間の距離は久慈、串木野基地は50m、菊間基地は65mに設定した。

c) 支保工の検討 岩盤タンクの支保設計は、従来の相当数にのぼる地下発電所の設計施工実績や菊間実証プラントの実績を重視することを大前提とし、その他経験則をベースとして配置したロックボルトパターンを、現状で妥当と思われる他の手法によっても検証するという方法を用いた。

図10 完成したタンク（串木野基地）

図11 確保すべき距離概念図

設計上の前提として岩盤タンクの支保部材は、基本的に吹付コンクリートとロックボルトであるが、吹付コンクリートについては強度条件、打設条件および形状等解析上モデル化が困難な部分が多いので、空洞内壁の肌落ち防止等その効果は十分期待できるものと考えられるが、安全側をみて支保工検討から除外した。

岩盤タンクの安全性照査は、その内容により3つの部分より構成される。すなわちタンク天端や側壁における「局所安定性検討」、グラウンドアーチに関する「全体安定性検討」、そして支保部材の機能を保証する「支保部材の健全性検討」が主要検討テーマである。検討全体のフローチャートを図13に示す。

直接的にロックボルトの強度もしくは軸力による締め付けを期待するのではなく、岩盤の崩壊時のダイラタンシーを拘束すること

図13 支保解析のフローチャート

図12 串木野基地の並設空洞モデル

で岩盤内のインターロッキング効果を補強しようとするものである。この効果については明確な計算方法は存在しないが、重要なことは岩盤内の割れ目密度と比べて、十分なピッチおよび長さをもってロックボルトが配置されているかどうかの確認であろう。このために、Q値などの岩盤評価と既往の実績などを比較検討することとした。

縫い付け効果を期待する場合、通常の盤下げ掘削によって支保部材が破断等の状態に至らず、継続して同効果を発揮することを確認する必要がある。この支保部材の健全性確認フローが図13の左側に示された有限要素解析の部分である。また局所的に、空洞天端については吊り下げ計算を、側壁部についてはスベリ安全率の評価を行った。これが図13の中央に示されたフローである。さらにH. Kastner がトンネル解析に用いた弾塑性理論解を適用して空洞周辺岩盤の巨視的なグラウンドアーチの安定性を評価した。これが図13の右端に示したフローである。

なお、解析結果の評価基準は各解析手法の前提条件等と密接にリンクしているため、安全率等の評価基準値を一律に定めることは不可能である。従って、各手法における実績等を勘案し、表6のように設定した。

ここで、串木野基地の代表岩盤(Hv)に対応する支保パターンを図14に示す。

5.5 水封機能の検討

岩盤タンクは水封方式による液密・気密性の確保を基本としており、水封機能を中心とした地下水理検討は重要な課題である。今回の設計で、タンク内の貯蔵圧力より大きな間隙水圧が確保できるよう空洞の設置深度や人工水封設備の設計を行った。表7に実施した解析項目を示す。

a) 地下水涵養量 消防法の運用基準によれば、渇水年およ

表6 評価基準および設定根拠

検討内容	評価項目	評価基準値 主荷重	評価基準値 従荷重	設定根拠
ロックボルト軸力	許容軸力	12.48	18.72	消防危第39号(S.62.5.19)で示された岩盤タンクに関する運用基準の別記2第6の6に記されている許容応力に基づいて求めた。
側壁のスベリ検討	スベリ安全率	1.3	1.0	菊間基準(『岩盤タンク貯蔵所(菊間方式)の規制に関する基準』)によれば、スベリ安全率は常時で1.3以上、地震時で1.0以上とされており、ここでもこの基準値に準じた。
天端の吊り下げ検討	付着安全率 ¹⁾ ロックボルト破断に対する安全率	4.0 1.2	4.0 1.2	電力中央研究所の事例に準じた。
グラウンドアーチ検討	最小支保圧に関する安全率	1.2	---	²⁾ 弾塑性理論解による方法は、ゆるみ領域内全体を一律に降伏し、塑性化していると仮定するなど、手法自体に含まれる安全への余裕度も考慮して左記の基準とした。

注記 1) ここでいう付着とは、岩盤剪断強度または充填材の岩盤付着強度あるいはロックボルトと充填材の付着強度のうちからもっとも小さい値を示す付着状態を指すものとする。

2) この検討は弾塑性理論解を用いて行いが、従荷重に対する計算は理論展開上、不可能なので省略する。

図14 H級岩盤の支保工

び地表形態変化時における水封機能の健全性を確認することになっており、特に自然水封方式を採用している串木野基地では地下水涵養量の推定が重要な課題であった。地下水涵養量評価の基礎データとなる各基地における水文資料は数年分しかなく、涵養量の長期変動予測は困難である。ここでは年降水量の確率処理を行い、対象渇水年がどの程度の頻度で出現するかを検討し、対象渇水年の降水量データにタンクモデル法を適用して渇水年の地下水涵養量を推定した。なお、地表形態変化時については、山火事等によって樹木が焼失した場合を想定し、焼失後の流出率の変化を考慮することによって涵養量を評価した。

b) 地下水位の確保 気密・液密構造を形成するには、少なくともタンク内最高液面を周辺岩盤中の地下水位より低く保つように設計する必要がある。消防法では、岩盤タンクからの漏気・漏油を防止するために保たなければならない最低の水位として限

表7 詳細設計における解析項目

種 別	解 析 項 目	解 析 内 容
岩 盤 安 定	(1) 初期地圧の検討	山岳地形における平均地圧モデルを設定するための三次元線形弾性解析
	(2) 空洞離隔距離検討	空洞間距離設定のための解析(線形弾性解析)
	(3) 各掘削ステージの安定性検討	非線形弾性逐次解析により各掘削段階の空洞挙動を詳細にシミュレートした解析
	(4) 断面縮小の検討	岩盤不良部における断面形状変更に関する検討
	(5) 端部形状の検討	三次元境界要素法による空洞端部形状の検討
	(6) 支保工の検討	種々の手法による支保工解析
	(7) 爆発圧力耐圧性検討	空洞内爆発を想定した岩盤の安定性検討(線形および非線形弾性仮定の静解析)
地 下 水 理	(1) 渇水年涵養量の検討	100年確立の渇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) 油混入計算	満液状態の空洞と空虚な空洞が隣接している場合に満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

界地下水位を設定し、完成後の岩盤タンク周辺(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)の地下水位は涵養量の変動および予想される周辺状況の変化に対しても常にこの水位以上の安定した地下水位を確保することを規定している。

各基地での地下水位の安定性は涵養量を前項で述べた方法で推定し、それを用いて有限要素法による浸透流解析を実施することにより確認した。図15に地下水位検討フローを、図16に久慈基地における有限要素法による浸透流解析の例を示す。

c) 動水勾配の確保 空洞に貯蔵されたガスは、岩盤の亀裂を通して上昇しようとするが、亀裂内地下水の鉛直方向動水勾配がある程度大きくなると気泡の上昇は生じなくなる。従って、気密性の判定にはB. Abergの提唱する空洞天端の鉛直動水勾配(I)を用いることとし、安全審査においては菊岡実証プラントの実績を踏まえ、鉛直動水勾配(I) ≥ 0.8 を気密確保の判定条件とした。

図15 地下水位検討フロー

d) 人工水封設備の設計 水封システムとしては自然水封方式と人工水封方式があり、前者は岩盤内の自然地下水による貯蔵方式で、後者は岩盤タンク上部に水封トンネルを掘削し、このトンネルから水平の水封ボーリング孔を介して岩盤内に人工的に水を供給する方式である。いずれの水封方式を採用するかは岩盤の透水性と地下水涵養量の大きさに依存しており、岩盤の透水係数が極めて小さく、比較的涵養量の豊富な串木野基地は自然水封方式、地下水涵養量はある程度期待できるが岩盤の透水係数が大きい久慈基地と岩盤の透水係数は比較的小さいが地下水涵養量が極めて小さい菊岡基地については人工水封方式とした。

人工水封設備の設計においては理論解(上田の理論, Muskatの理論)により水平水封ボーリング孔のピッチおよび孔長の概略設計を行った後、有限要素法を用いて水封機能の詳細確認を実施した。

6. 施 工 概 要

岩盤タンクの掘削工事では、複数切羽の同時施工による大断面の大規模急速施工を行っており、それを可能にしているのは、大型機械の導入とその合理的な配置、施行管理の合理化、能率的な計測システムの開発である。

6.1 工事工程

表8に工事工程表を示す。

6.2 加背割・施工順序

加背割は図17に示す通りである。掘削はアーチ部の頂設導坑掘削、切上げ、第1段ベンチ、第2段ベンチ、……の順序で行われる。

頂設導坑の幅、各ベンチの高さは、安全に岩盤タンクの掘削を行うために各掘削段階での内空変位量と管理基準値との比較を行う必要があるため、あらかじめ設計時点で決められている。

6.3 建設機械

工事の最盛期には、1日当たり約3,000~4,000m³の岩盤を掘削するために大規模な機械化施工を行っている。

7. 施 工 管 理

(1) 計測管理

NATM工法においては、計測は施工中の安全管理や施工管理

図16 久慈基地における有限要素法による浸透流解析

表8 工事工程表

	工 事 項 目	87	88	89	90	91	92	93
久 慈	作業トンネル等工事							
	サービストンネル等工事							
	水封トンネル等工事							
	岩盤タンク工事							
	プラグ工事 設備関連工事							
菊 間	作業トンネル等工事							
	サービストンネル等工事							
	水封トンネル等工事							
	岩盤タンク工事							
	プラグ工事 設備関連工事							
串 木 野	作業トンネル等工事							
	サービストンネル等工事							
	水封トンネル等工事							
	岩盤タンク工事							
	プラグ工事 設備関連工事

図17 各基地の空洞断面形状および加背割

のために重要な項目であるが、今回の岩盤タンクのように盤下げにより断面を拡大していく掘削工法においては、各掘削ステージ毎に空洞の安定性をチェックし、変状がある場合にはその都度対策を施すことが出来るので極めて有効である。

計測の中心となるのは内空変位の計測であるが、計測断面は標準30m毎に設定されている。またB計測としてロックボルト軸力、岩盤内変位および吹付コンクリート応力を測定する埋設計器が、久慈・串木野で1キャバン当たり2断面(計20断面)、菊間で1~2断面(計10断面)に設置されており、それぞれ坑外の計測室で任意の時間に測定、記録することが可能である。

(2) 既施工区間変状観察

上記のように、計測は重要な項目であるが、計測断面は30mピッチで設けられているので、その間の変状を確認するためにパトロールによる変状観察が義務づけられている。地山に異常が発生した場合には、吹付コンクリート面に割れ目が発達したり、ロックボルトの頭部がめり込む等の現象が発生するが、これを早期に発見し、変状の発達を観察することによって遅滞なく対策工を施工することが必要である。

通常のトンネル工事では、日常の観察が重要であると言われていたが、今回のような大断面の空洞においては日常の観察では十分なチェックが困難であるから、3名以上のパトロール隊による1~2回/月の定期的な観察(詳細パトロール)によって、変状の発見を行い、その変状の追跡観察を日常パトロールによって行う体制としている。

(3) 施工管理基準

岩盤タンク本体の掘削における施工管理は、30m毎に設けられる計測断面での内空変位と天端沈下の測定値とそれに対する管理基準値を比較することによって行う。管理基準値は、各掘削段階毎に設定し、それぞれを大きく2つの管理レベルに分ける。注意レベルにある場合は主として観察、計測を強化することで対応し、警戒レベルに入った場合は増しボルト、断面形状の変更等の対策

工を行う。

頂設導坑を掘削した後、切羽の観察から掘削位置の岩盤等級を決定し、天端沈下の測点を設置する。次に切詰め掘削後の天端沈下を測定し、管理基準値と比較する。警戒レベルを越えた場合には、ロックボルト頭部や吹付コンクリートの亀裂等変状の状況を詳細に観察するとともに坑壁からボーリングを行い、このボーリング孔を利用した孔内載荷試験を行う。孔内載荷試験からは、主に岩盤の変形係数、地山応力、クリープ特性を求め、必要に応じて解析等を行い変状原因の把握を行う。また、以後の掘削段階毎の変位予測を行い、増しボルト等の対策工の検討を行う。対策工を施しても変位が増加する場合には、断面形状の変更、盤下げ中止等の対策の検討を行うものとする。

ベンチ掘削においては、直上の計測線の内空変位量を用いて施工管理を行う。警戒レベル1を越える場合には、切詰め時と同様に孔内物性試験を実施し変状原因の把握を行い対策工を施す。警戒レベル2を越える場合には、断面形状の変更や場合によっては盤下げ中止の検討を行う。

ここで、管理基準値は天端沈下については連設空洞を、内空変位は単設空洞を対象として設定されているが、岩盤タンクが多連空洞であり、掘削時の変位は隣接空洞の掘削ステージによって大きな影響を受ける。従って測定値を管理基準値と比較する場合には、計測値を補正する必要がある、その補正のための換算テーブルも用意されている(単設空洞においては、天端沈下はアーチ切詰め時にほぼピークに達し、それ以後の盤下げ時には内空変位が増大するが、連設空洞においては盤下げに入ってから天端沈下が進行し、内空変位は隣接空洞の影響で単設空洞の場合よりも小さくなる)。

(4) 逆解析

地下空洞の挙動を支配する境界条件、力学定数、初期応力場などを設計段階で厳密に把握することは困難であり、解析予測と実際の挙動は一致しないのが普通である。このため、施工中のできるだけ早い時期から岩盤挙動を計測し、その結果を評価し、設計に用いた力学モデルや力学定数などの妥当性を再検討し、より合理的なものに修正する手続きが必要となる。そのための手法として逆解析手法がある。今回岩盤タンクの施工管理に用いた逆解析プログラムは神戸大学校井⁶⁾の提案する逆定式化の手法に基づいており、その開発に当たっては次の点を配慮した。

- a) 連設空洞としての挙動が把握できること。
- b) 逐次掘削過程が表現できること。
- c) 基本的に内空変位の計測データだけで解析できること。
- d) 現場のパーソナルコンピュータで解析でき日常管理に適用できること。

ここでは、材料の非線形性、不均質性および不連続性等を考慮する必要のある空洞周辺の領域には有限要素法を、また、等質弾性体とみなせる空洞遠方の領域には境界要素法を適用した境界要素-有限要素結合法による逆解析プログラムを開発した。

各基地ではこのプログラムを用いて逆解析を実施し、その結果を施工管理に反映させている。図18に串木野基地において、アーチ掘削時の計測データに基づき、完成時のひずみ分布を推定した例を示す。

8. 開発された新技術

今回の岩盤タンクの建設に当たって新たな技術開発がなされた

図18 串木野基地逆解析例

ので紹介したい。

(1) 内空変位計測システム

計測の中心となるのは30mピッチで行われる内空変位の計測である。一般に、この種の計測にはコンバージェンスメジャーが用いられているが、今回の大断面トンネルの掘削においては、従来の方法では高所作業が多くなり、安全性、施工性に問題があることからトータルステーション（光波測距儀）を用いる計測システムが開発され、使用されている。

このシステムでは、各計測断面の計測点にはターゲット板を有するプリズム（図19）が設置され、このプリズムをトータルステーションにより各々測定する。得られるデータはステーションからプリズムまでの距離と任意の方向からの水平角と天頂からの角度の3個であり、データは処理装置に入力され、求める2点間の距離を計算し、出力を行う。次回測定時にも同じ計測を行うことにより、前回の2点間距離との差（内空変位）が求められる。

トータルステーションは計測台車上の自動整準装置に取付けられているので、停車後アウトリガで台車を固定すれば、直ちに計測が可能な状態になるので多数のプリズムを迅速に計測すること

図19 内空変位計測用プリズム

ができる。また、計測台車は1停車ごとに3～4断面をまとめて計測できる（図20）。プリズムは直下ベンチの発破時には取り外す必要があるため、発破後精度を損なうことなくリセット可能なプリズムの取付け器具が用いられている。

図20 内空変位計測概念図

(2) 埋設計器計測システム

施工中に計測される各種埋設計器のデータは、多種多様で、その量も大量となるため、その整理には多大な労力と時間を必要とする。そこで岩盤タンクの施工に際しては、作業の省力化、迅速化をはかり安全管理にフィードバックするとともに、データ管理を確実にするために、埋設計器計測システムを導入した。その主な特徴は以下の通りである。

① 埋設計器からのケーブルを測定断面毎に集めて前処理を行い、1本の伝送ケーブルに接続するため、大量のケーブル引廻しが不要である。

② 欠測のないようバックアップ機能が考慮されており、供給電源異常時や計算機異常時でもデータの欠測がない。また、1カ所のケーブル切断があっても伝送がとだえない。

③ 伝送方式はデジタル伝送としているため、計測時間が短く、かつ雷および外来雑音の妨害を受けにくい。

(3) ファイバーメッシュ（FM）システム

水封式の岩盤タンクでは、透水量は少ないが地下水は岩盤の掘削面から吹付コンクリートを通してタンク内に流れ出るようになる。また岩盤タンクは一度建設されると安全性の面から開放点検が実施できない。それゆえ吹付コンクリート内に設置される金網は長年月の間にはコンクリートが中性化し、錆が発生、その面から吹付コンクリートが剥離、崩落する可能性があり錆びない材料に変更しておくのが望ましい。そのために開発されたのがファイバーメッシュ（FM）システムである。FMはグラスファイバー

ゾーン	
A	自然浸透量が低下
B	・ 人工水封水が低下
C	・ ・ 粘土水が低下
D	主として低ボーリングからの粘土水が低下

図21 広域グラウト断面図

性で標準が1枚2m×3mとなっており、重量は金網の約1/4と非常に軽量である。1次吹付コンクリート施工後、このFMは新たに開発されたコンクリート用のステーブル（ホッチキス）で吹付面に能率良く固定される。FMの材料費は金網より割高となるが、施工性が良く2次吹付コンクリートの余吹き、跳ね返りが節約できるので従来の金網とほぼ同等のコストで施工することが可能である。

(4) 湧水抑制広域グラウト

岩盤タンク湧水量は底水排水施設の規模および人工水封設備の補給能力に直接結びつくものであり、この湧水量を抑制することは、設備費の低減とともに操業時のランニングコストの低減に大きな影響を与える。

一般に、トンネル、地下発電所等の空洞における過大湧水個所については空洞内側からのボーリング孔によるセメントグラウトによって湧水抑制が行われている。しかし、久慈基地のように全体が亀裂性の岩盤で、高透水ゾーンと難透水ゾーンの区別が明確でない場合には、従来のセメントによるボーリンググラウトだけで対処した場合、グラウトの対象面積が膨大となり工事費および工期が大幅に増加するばかりでなくその効果にも疑問が残る。このような亀裂性岩盤を対象として考えられたのが、粘土懸濁液を用いた自然浸透方式による広域グラウトである。

ここでいう自然浸透方式による広域グラウトとは、岩盤タンクに浸透してくる地下水の上流側に微小な粘土粒子を供給してやることによって、地下水の浸透経路となる岩盤の亀裂を緩やかに、

図22 広域グラウト配管概念図

広範囲に目詰まりさせ、岩盤全体の透水係数を比較的均一に低下させ湧水量の低減を図ろうとするものである。

久慈基地では、タンク上部の水封トンネルより削孔したボーリング孔を利用して粘土の懸濁液を自然浸透によってタンク周辺岩盤に供給している。図21～23に久慈基地における広域グラウト工事の概要を示す。

このグラウト方式は、今後の大規模な地下空洞にも十分応用が可能な技術として期待される。

9. あとがき

石油地下備蓄基地の建設において開発実証された数々の技術は、大断面地下空洞を安全に、かつ経済的に掘削することを可能にした。これらの技術は、今後の地下空間利用技術、すなわちLPG地下備蓄基地、圧縮空気貯蔵空洞等の大規模・大深度地下空洞の建設にも十分応用が可能な技術として期待される。

参考文献

- 1) 三宅裕隆・黒川良則：石油地下備蓄の現況，トンネルと地下，第19巻5号，1988年5月
- 2) 蔦田敏昭：石油等地下備蓄の現状と今後，地下空間利用に関するシンポジウム，昭和63年10月
- 3) 土木学会岩盤タンク貯蔵所調査検討委員会：岩盤タンク貯蔵所の安全確保に関する調査検討報告書，昭和61年2月
- 4) 石油公団：石油備蓄技術（地下備蓄）調査報告書，昭和58年3月
- 5) 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，電力土木技術協会
- 6) Shimizu, N. & Sakurai, S.: Back Analysis Formulated by The Boundary Element-Finite Element Coupled Method for Monitoring Multi-Parallel Underground Openings, International Conference on Engineering Software, Delhi (1989)

図23 広域グラウト配管状況