

倉敷LPG備蓄空洞における気密性を考慮した 配管堅坑プラグの施工

森 孝之^{1*}・高岸哲哉¹・手塚康成¹・宮嶋保幸¹・前島俊雄¹・金戸辰彦²

¹鹿島建設株式会社（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²(独)石油天然ガス・金属鉱物資源機構（〒105-0001 東京都港区虎ノ門二丁目10-1）

*E-mail: moritakayuki@kajima.com

LPG岩盤備蓄における配管堅坑プラグは貯蔵気密システムにおいて重要な構造体である。配管堅坑プラグの気密性に関する課題としては、プラグの力学的安定性、プラグ近傍岩盤のゆるみによる漏気、プラグコンクリートと岩盤の境界部の間隙を経路とした漏気、プラグコンクリート内のひび割れによる漏気などが想定される。本論文では配管堅坑プラグにおける気密性を確保するための技術的課題に対する解決策の立案と施工への適用について報告する。

Key Words : LPG, storage cavern, operation shaft, plug, airtightness, excavation damaged zone

1. はじめに

LPG岩盤備蓄(常温式)では貯蔵ガスは著しく高い圧力となり、安定した貯蔵機能を維持するためには貯蔵空洞全体の気密性を確保することが重要となる。貯蔵空洞に加えて配管堅坑プラグは貯蔵気密システムにおいて重要な構造体である。

本論文では配管堅坑プラグの気密性に関してガスの漏洩リスク事象を想定し、配管堅坑プラグにおける気密性を確保するための技術的課題に対する施工上の解決策の開発と施工への適用について報告する。

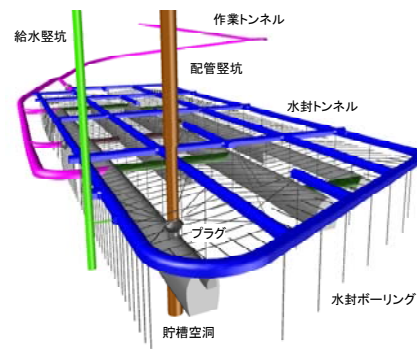


図-1 倉敷LPG地下貯蔵施設の鳥瞰図

2. 貯蔵ガスの漏洩リスクの想定と対策

倉敷LPG地下貯蔵施設の鳥瞰図を図-1に、貯蔵空洞と配管堅坑設備を写真-1に示すが、配管堅坑は地上と接続しているため、配管堅坑の周辺やプラグ部の周辺が漏気経路になる可能性がある。そこで、LPGを高圧状態で岩盤空洞に貯蔵する場合、想定される漏気リスク事象¹⁾を整理して図-2に示す。

漏洩経路-1は配管堅坑周辺の掘削損傷領域に沿う経路である。経路-2はプラグコンクリートと岩盤の境界部を通る漏気経路である。経路-3はプラグコンクリート内の貫通ひび割れを通る漏気経路である。経路-4は貯蔵空洞周辺の高透水ゾーンや掘削損傷領域に沿う漏気経路である。

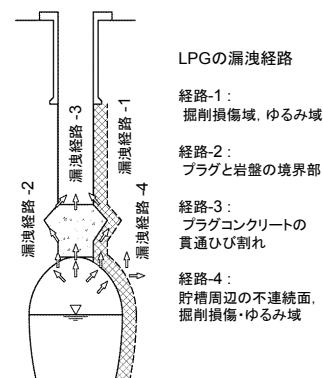


図-2 配管堅坑における想定ガス漏洩経路

これらの想定リスクに対してそれぞれ解決策を表-1に示す。漏気経路-1に対する解決策は、機械掘削工法の採

用，プラグ部の制御掘削，堅坑周辺のグラウトである．漏気経路-2に対する解決策はコンタクトグラウトとコンソリデーショングラウトの実施，漏気経路-3に対する解決策はプラグ構造の確実な安定性設計，そしてパイプクーリングの実施である．最後に漏気経路-4に対する解決策は水封システムの採用と貯槽空洞周辺のグラウトである．以後にそれぞれの解決策を示す．

表-1 配管堅坑におけるガス漏洩リスクと対策工

漏洩経路	漏気リスク現象	対策
経路-1	堅坑のゆるみ域を通る漏気	① 機械掘削(Super-RD)
		② プラグ部の制御掘削
		③ 堅坑グラウト
経路-2	プラグと岩盤の間隙を通る漏気	④ コンタクトグラウト
経路-3	プラグコンクリート内のひび割れを通る漏気	⑤ プラグの安定性設計
		⑥ 温度応力ひび割れ防止
経路-4	岩盤のゆるみや不連続面を通る漏気	⑦ 水封ボーリング強化
		⑧ 貯槽グラウト



写真-1 貯槽空洞と配管堅坑設備

3. 気密性に留意した施工の実施

(1) 縦向きTBMによる堅坑の掘削

配管堅坑の地質は図-3に示すように地表からシルト層、礫層、泥岩砂岩そして花崗岩で構成されている．花崗岩の一軸圧縮強度は69～115MPaであり，比較的硬質であるため発破掘削を適用する必要がある．しかし，発破掘削では堅坑壁面には発破損傷が生じて，ガスの漏洩経路になる可能性がある．このため，発破損傷が生じないように機械掘削工法(Super-RD: 図-4)²⁾を採用した．

Super-RD はオープンタイプのTBMであり，今回新たに改良開発した全周回転掘削機である．この機械の掘削部は写真-2に示すように，掘削の容易さとビットの交換の容易さを考慮して3段のビットで構成されている．また，写真-3に示すように掘削壁面の岩盤に損傷が無く，極めて平滑に仕上がっていることが分かる．

Super-RDによる掘削速度の推移の実績を図-5に示すが，

深度が深くなり岩盤が硬質になるに従い，掘削速度が低下しており，特に，新鮮花崗岩部では掘削速度0.05m/hrが実績である．

以上より，配管堅坑は機械掘削の適用によって掘削損傷の発生を抑制することが出来た．

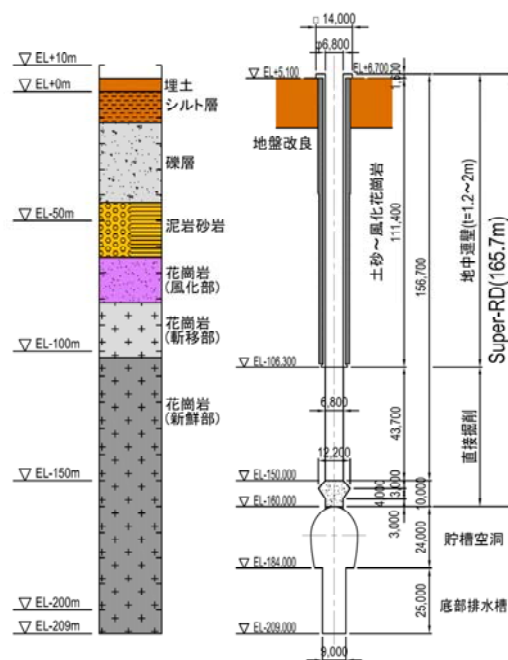


図-3 配管堅坑の地質断面図

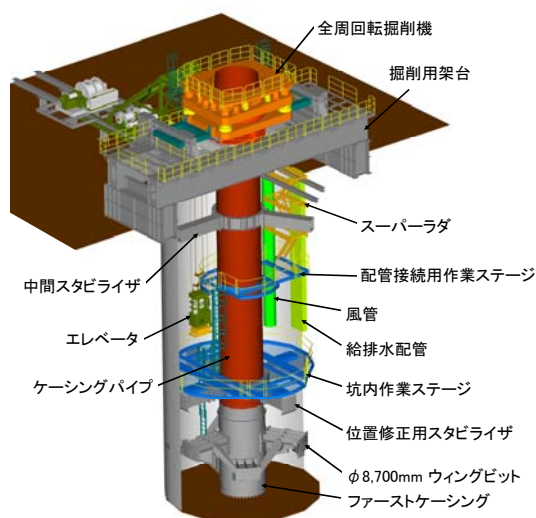


図-4 Super-RD 鳥瞰図



写真-2 ウイングビット



写真-3 Super-RD による掘削壁面状況

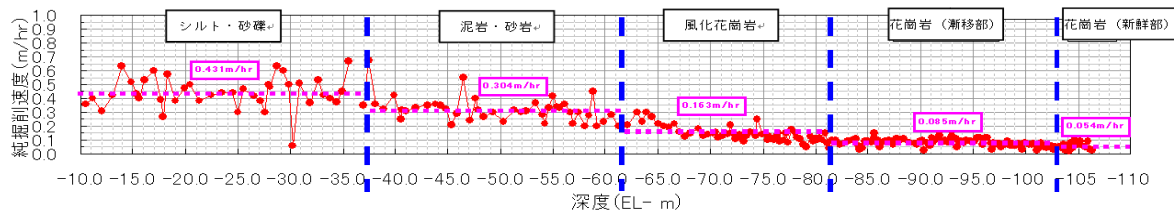


図-5 地質別の純掘削速度の推移

(2) プラグ部の制御掘削

プラグ部の拡幅掘削では岩盤に損傷を与えないように、ブレーカ、静的破砕剤や制御発破を適用した。プラグ部の掘削要領を図-6に示す。まず、Super-RDにより貯槽空洞に貫通する直前のプラグ部まで竖坑を掘削した(手順①)。そして、最初にプラグ中央部に自由面を形成するために芯抜き発破を実施した(手順②)。次に、静的破砕剤とブレーカによりプラグコンカル上面を仕上げた(手順③)。さらに、緩め発破とブレーカによりコンカル下面の掘削を行い(手順④)、最後にブレーカ掘削によりコンカル下面を仕上げた(手順⑤)。そして、プラグの下の部分は薬量制限発破により貫通させた(手順⑥、写真-4)。

以上より、プラグ部の岩盤に対してガス漏洩経路となるゆるみを生じないように慎重な掘削を実施した。

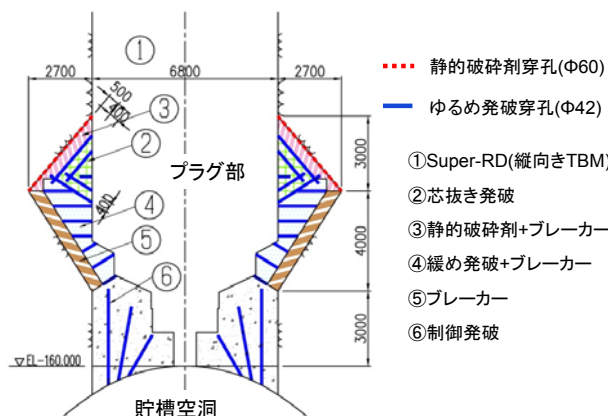


図-6 配管竖坑プラグ部の掘削方法



写真-4 竖坑プラグと貯槽空洞天端の接合部の掘削

(3) 竖坑周辺のグラウト

図-7に示すように、配管竖坑では竖坑一般部とプラグ部を対象としてグラウトを実施した。

グラウト孔は同図のように放射状に配置して、グラウトによる注入改良範囲は掘削直径相当の深さとした、すなわち竖坑部では7m、プラグ部では10.7mとした。

グラウト実施要領と基準を表-2に示す。最初にルジオン試験を行い、ルジオン値に応じてグラウト材の濃度を選定した。注入材は超微粒子セメントを用いたセメントミルクとし注入圧4.2MPaで実施した。

注入の手順はセメントミルクの濃度を段階的に濃くしていった。例えば、最初にセメントミルク濃度 $CW=1/6$ で注入量800Lを注入したら、次に、濃度 $CW=1/4$ で注入量1200Lを注入し、最後にセメントミルク濃度 $CW=1/1$ の注入を実施した。注入実績例を図-8に示すが、基本配置孔に加えてルジオン値(0.5Lu)や湧水量(1.0L/min/m)に応じてグラウト孔を追加している。

また、図-9に示すように竖坑やプラグと接続する貯槽空洞の周辺岩盤に対してもグラウトを実施して、漏気経路の防止を図った。このように、グラウトによって配管竖坑やプラグ周辺岩盤の透水性を改良し、漏洩経路の発生リスクの低減を図った。

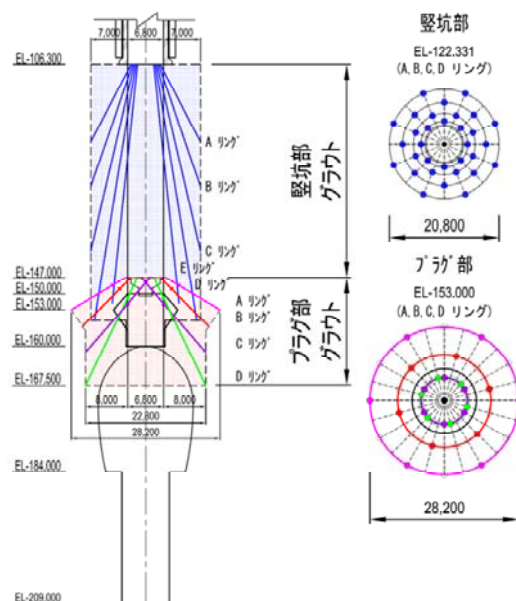


図-7 配管竖坑のグラウトパターン

表-2 配管堅坑のグラウト手順

ルジオン試験	注入圧力 P=水圧+1(MPa), P=2.4MPa以下				
注入材料	セメントミルク(超微粒子セメント)				
注入開始配合	K < 1Lu のとき C/W=1/6				
	K > 1Lu のとき C/W=1/4				
配合の切換え基準					
初期 ルジオン値	配合(水セメント比), 注入量Q(L)				
	C/W= 1/6	C/W= 1/4	C/W= 1/3	C/W= 1/2	C/W= 1/1
	K<1Lu	800	1200	1200	1200
K>1Lu	—	1200	1200	1200	完了まで
注入圧力		注入圧力 P=水圧+3(MPa), Pmax=4.2MPa			
注入速度		30L/min			
注入完了基準		注入速度1L/min以下で30min経過			

表-3 プラグ部のコンタクトグラウトの手順

水押し試験	P=水圧+1(MPa), P=1.8MPa以下		
注入材料	セメントミルク(超微粒子セメント)		
注入開始配合	q > 0L/min のとき C/W=1/4		
	q = 0L/min のとき C/W=1/1		
配合の切換え基準			
水押し試験 注入量(q)	配合(水セメント比), 注入量Q(L)		
	C/W=1/4	C/W=1/2	C/W=1/1
	q>0L/min	200	200
q=0L/min	—	—	完了まで
注入圧力	主要部 Pmax=1.5MPa 上下端部 Pmax=1.0MPa		
注入速度	5L/min		
注入完了基準	注入速度 0L/min		

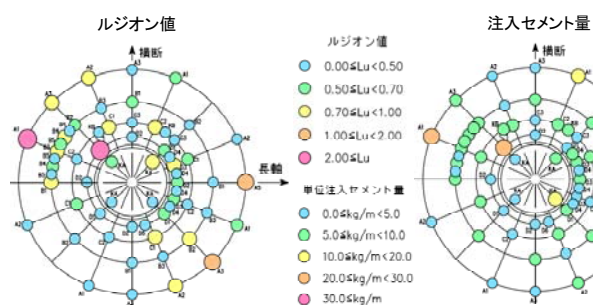


図-8 配管堅坑グラウトの実績例

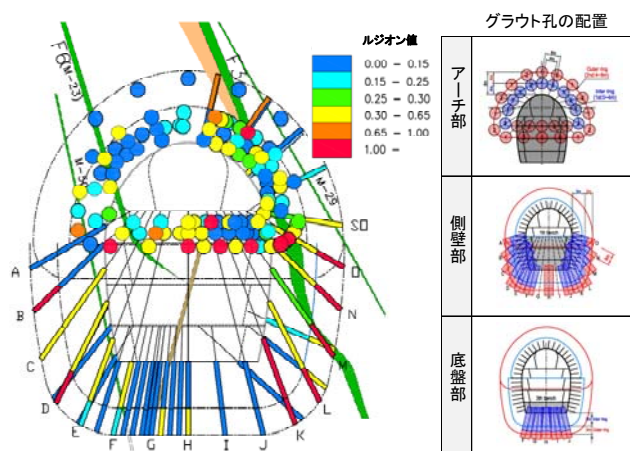


図-9 貯槽グラウトの実績例

(4) 境界部へのコンタクトグラウト

プラグコンクリートと岩盤の間隙を充填するためコンタクトグラウトを実施した。コンタクトグラウトの実施要領と基準を表-3に示す。同表に示すように、グラウト手順は最初に水押し試験を行い、通水量に応じて注入濃度を決定した。

セメントミルクの配合は $C/W=1/4 \sim 1/1$ 、注入圧力は1～1.5MPaである。コンタクトグラウトのために岩盤に直径 $\Phi 46$ 、深さ500～800mmの削孔を行い、グラウト管($\Phi 19$)を挿入して設置した(図-10, 写真-5)。

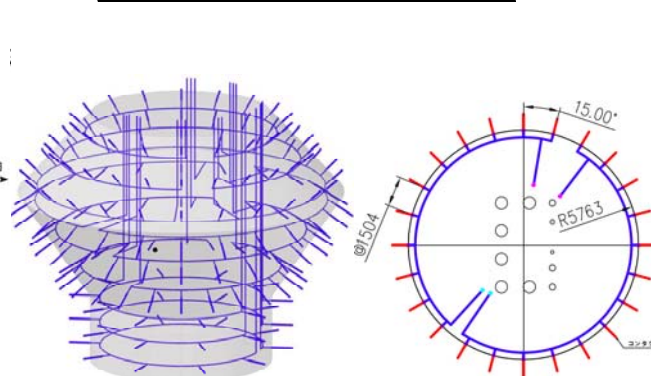
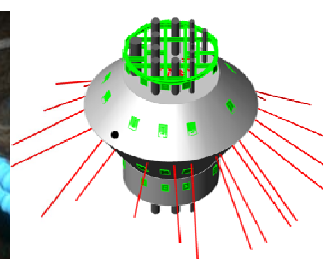


図-10 コンタクトグラウト管の配置

写真-5 コンタクトグラウト
配管の配置状況図-11 コンソリデーション
注入孔の配置図

また、プラグ部の岩盤の耐力を改善するために、図-11に示すようにコンタクトグラウトに加え、プラグ下面側から10m程度の深い削孔を行いプラグ周辺岩盤に対してコンソリデーショングラウトを実施した。

コンソリデーショングラウトの実施要領は配管堅坑のグラウト手順(表-2)とほぼ同様であり、注入圧力は最大 $P=2.0MPa$ として、各段階の注入量は400Lとした。これは、先行して実施した堅坑グラウトにより岩盤の透水性がある程度改良されているためである。

以上よりプラグコンクリートと岩盤の隙間や周辺岩盤におけるガス漏洩経路の発生リスクの抑制を図った。

(5) プラグコンクリートの安定性

プラグコンクリートはLPGを貯蔵するための重要な構造体であり、構造的な安定性が損なわれるとガスの漏気が発生する可能性がある。プラグコンクリートの構造検討のモデルと項目を図-12に示す。

検討項目としては①コンクリートのせん断、②岩盤の支圧耐力、③岩盤のせん断、④プラグ自身の耐力である。プラグの安定計算に用いる設計荷重は、下向きに作用する水圧、配管重量、地震力(下向きのみ)である。

①～③の検討によりプラグの形状と寸法を決定し、④の検討により鉄筋コンクリートの設計が行われた。また、④の検討に加えて図-13に示すように設計荷重(外力)と温度応力を考慮した三次元FEM解析によりコンクリート応力を予測した。

これらの設計計算により決定されたプラグの構造を図-14に、鉄筋の施工状況写真を写真-6に示す。なお、鉄筋は海水の塩分による腐食を考慮しエポキシ塗装の鉄筋を採用した。以上より、プラグコンクリートは外力によって破損しガスの漏洩を避けるため構造の健全化を図った。

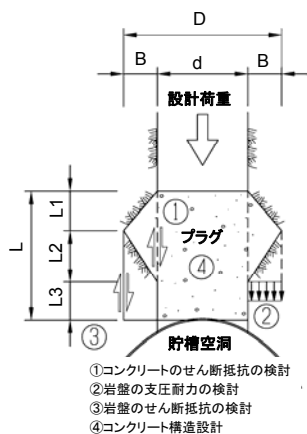


図-12 プラグの設計

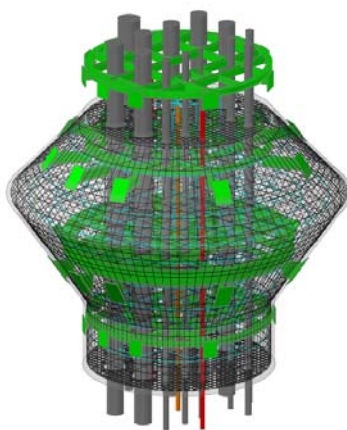


図-14 配管縦坑プラグの3D構造

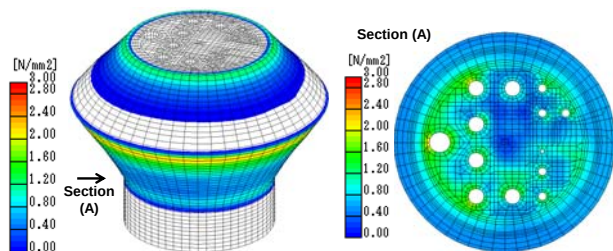


図-13 プラグの三次元応力解析結果(温度応力と内外圧考慮)

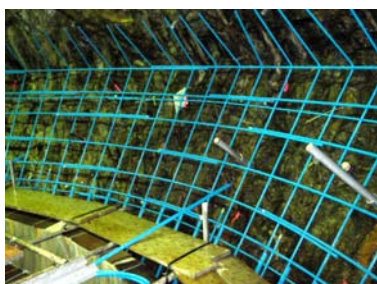


写真-6 防食鉄筋組立状況

(6) 温度応力ひび割れの防止

プラグコンクリートは体積 620m^3 のマスコンであるため、温度応力によりひび割れが発生する可能性がある。特に貫通ひび割れはガスの漏洩経路のリスクとなる。

そこで図-15に示すように三次元温度応力解析によりひび割れ発生の予測を行った³⁾。この結果、ひび割れを防止するため、目安としてひび割れ指数 $I_c=1.75$ となるようにクーリングパイプを配置した(図-16)。同図に示すようにクーリングパイプは渦巻き状に配置し、上下ピッチ $900\sim 1,400\text{mm}$ の8段で構成した。クーリングパイプの総延長は 950m であり、冷却水を循環させ、コンクリートの打設(写真-7)に伴う急激な発熱を抑制した。図-17に予測温度と実測温度を示すが、ほぼ温度は管理されておりひび割れ発生を防止できた。

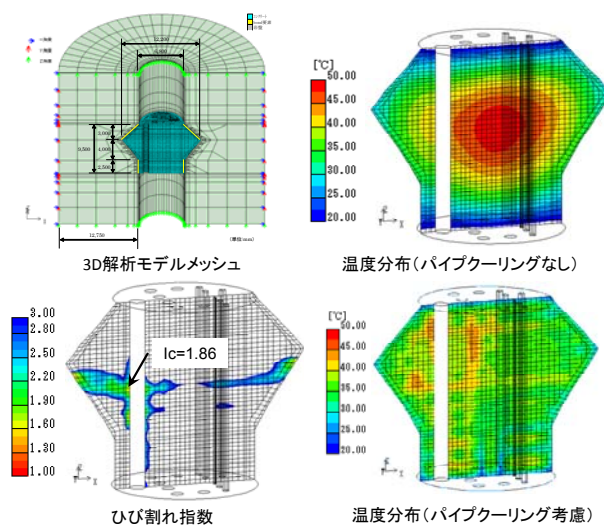


図-15 温度応力解析モデルと解析結果

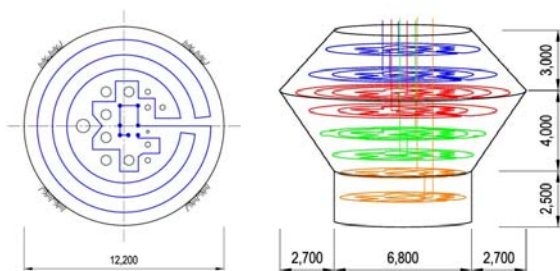


図-16 クーリングパイプの配置



写真-7 コンクリートの打設状況

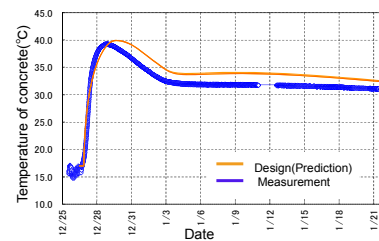


図-17 プラグコンクリート温度の解析値と測定値

(7) 水封システムによるガス漏洩の防止

倉敷LPG貯蔵の貯蔵システムの原理は図-18に示すように、高圧のLPGを周辺岩盤の水圧によって貯槽空洞の中に閉じ込める方法が採用されている。

具体的には自然地下水に加えて水封トンネルと水封ボーリング(写真-8)により人工的に水圧を与えるものである。水平水封ボーリングのピッチは10mが基本であるが、特に図-19に示すように、配管堅坑やプラグ部周辺では水封ボーリングを密に配置して水封圧を確実に作用させ、ガスの漏洩防止策を強化した。

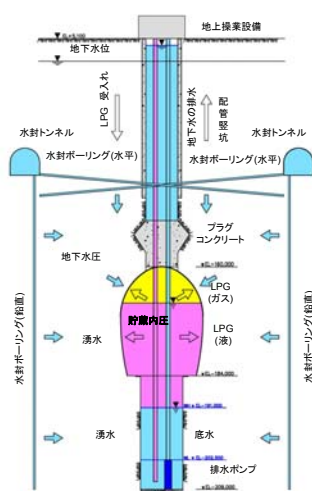


図-18 水封方式によるLPG貯蔵原理



写真-8 水封トンネルと水封ボーリング

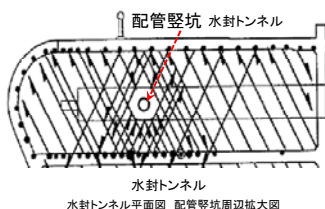


図-19 配管堅坑周辺の水平水封ボーリングの強化

4. おわりに

LPG岩盤貯蔵の建設において、ガスの漏洩リスクに注目して、これを防止するための施工上の対策を立案して実際の施工に適用した。それぞれの課題において最新の理論と技術を適用し、これらの成果はプラグの耐圧試験⁴⁾や貯槽空洞の気密試験⁵⁾によって健全性が検証され気密性に寄与している。

参考文献

- 1) T.Mori, Y.Tezuka, K.Masumoto, T. Takagishia, Y. Miyajima, T.Maejima and T.Kaneto : Construction of Operation Shaft and Plug to Secure Airtightness in The Kurashiki Underground LPG Storage Cavern, 8th ARMS, 2014
- 2) 平田周作, 綱川浩文, 大津啓介, 高岸哲哉 : 全周回転掘削機(スーパーRD)による大深度大口径堅坑の施工ー倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その2)ー, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-207, pp.413-414, 2013
- 3) 柳井 修司, 渡邊賢三, 森 孝之, 手塚康成, 秋田 伸, 前島俊雄 : 配管堅坑プラグコンクリートの施工実績ー倉敷国家石油ガス備蓄基地(配管堅坑工事その3)ー, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-208, pp.415-416, 2013
- 4) 森 孝之, 手塚康成, 宮嶋保幸, 村上浩次, 高岸哲哉, 藤井宏和, 町島裕一, 金戸辰彦 : 大深度高水圧下の岩盤地下空洞への光ファイバ式 AE モニタリングの適用ー倉敷国家石油ガス備蓄基地(貯槽工事その5)ー, 土木学会第 68 回年次学術講演会, VI-204, pp.407-408, 2013
- 5) 前島俊雄, 岡崎百合子, 金戸辰彦, 森 孝之, 征矢雅宏, 黒瀬浩公 : 倉敷基地 LPG 岩盤貯蔵の気密試験方法と試験結果の評価について, 土木学会第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.44-49, 2014

CONSTRUCTION OF OPERATION SHAFT PLUG TO ENSURE AIRTIGHTNESS IN THE KURASHIKI UNDERGROUND LPG STORAGE CAVERN

Takayuki MORI, Tetsuya TAKAGISHI, Yasunari TEZUKA,
Yasuyuki MIYAJIMA, Toshio MAEJIMA and Tatsuhiko KANETO

The purpose of the study is application for construction and development of solutions to technical problems in order to ensure airtightness around the operation shaft plug. The technical problems on airtightness of the operation shaft plug are divided into the several risks as follows. These are (1) Gas leakage through excavation damaged zone of the operation shaft, (2) Gas leakage through contact zone of rock and concrete plug, (3) Gas leakage through cracks in the concrete plug itself and (4) Gas leakage through discontinuity or excavation damaged zone around the storage cavern. The specific solutions focusing on the airtightness of the operation shaft and plug are discussed in this paper.