

高水圧下における水封式LPG岩盤貯槽の空洞安定性検討 —倉敷国家石油ガス備蓄基地—

清水建設株式会社 土木技術本部 正会員 ○矢部幸男・小島英郷・福田毅・征矢雅宏
独立行政法人 石油天然ガス・金属鉱物資源機構 正会員 前島俊雄

1. はじめに

倉敷国家石油ガス備蓄基地では、LPG(プロパン)の内圧より高い地下水圧となる岩盤内に、常温高压で40万tのLPGを貯蔵する水封式地下岩盤貯槽を建設している(図-1)。貯槽の掘削断面積は374m²、総体積は約85万m³となる。その建設に当っては、貯槽空洞の力学的安定性を検討するために、FEMによる全応力解析に加え、水一応力連成解析による検討も実施した。本稿では、図-1に示すNo.3貯槽(3PC)・No.4貯槽(4PC)の掘削開始から掘削完了およびその後の水封昇圧までの空洞安定性について検討した結果を報告する。

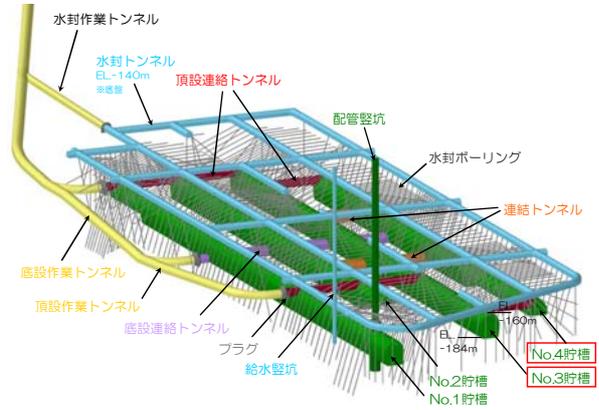


図-1 トンネル構造と水封ボーリング鳥瞰図

2. 検討位置

貯槽は、図-2に示すように花崗岩新鮮岩盤内に位置するが、一部で断層等の特殊地山が出現し、空洞安定性に関して詳細検討が必要となった。特殊地山は、3PCで断層部1箇所(F3)と非常に微細な割れ目から構成されるマイクロフラクチャー部2箇所(WT①, WT②)の計3箇所、4PCでは1箇所(WT②)出現した。特殊地山部では、A計測(内空変位)に加えB計測(ロックボルト軸力, 吹付けコンクリート応力)と貯槽周辺の間隙水圧の計測を行った。

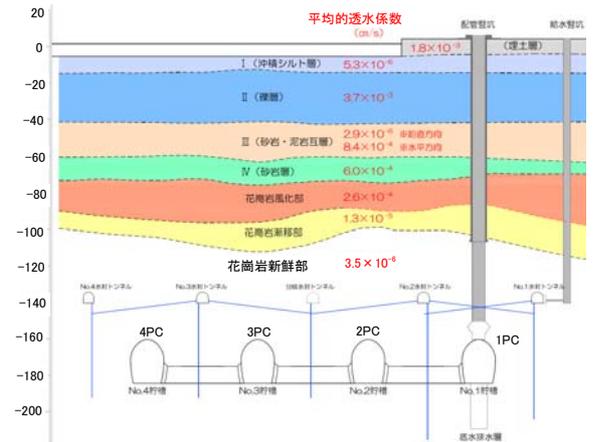


図-2 代表的な地質断面図

3. 検討概要

空洞安定性の検討は、基本的には全応力解析と浸透流解析の再現・予測解析の繰返しで行った。図-3は、検討を実施した特殊地山部(WT②)の一例で、B計測断面の地質構造、ロックボルト軸力計位置と計測結果および空洞安定性検討に基づいて打設した増しロックボルトを示したものである。各施工段階において、A・B計測結果を再現するための全応力解析と貯槽周辺の間隙水圧を再現するための浸透流解析を実施し、再現可能な解析条件が得られた後に後続施工段階の予測解析を行って空洞の安定性を評価した。全応力の再現解析においては、岩盤モデル、変形係数、強度定数(c, φ)、側圧係数等を、また浸透流の再現解析では透水係数とその範囲および境界条件等を試行錯誤的に設定した。空洞安定性評価では、全応力予測解析による支保部材の発生応力照査と岩盤のゆるみ領域評価だけでなく、浸透流予測

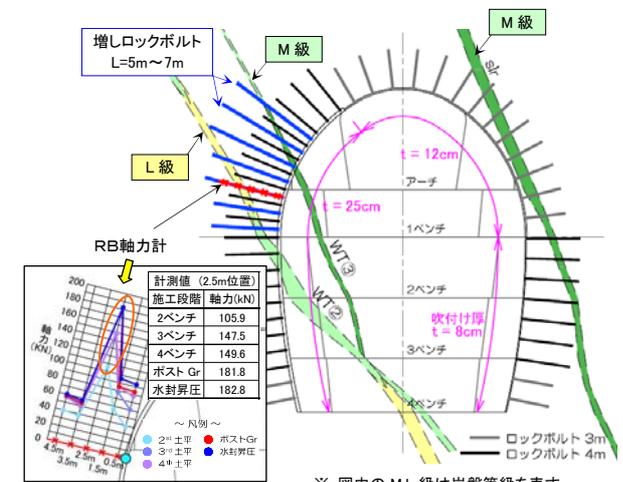


図-3 特殊地山部の一例(3PC WT②部)

キーワード:LPG, 水封式, 岩盤貯槽, 空洞安定性, 水一応力連成解析
連絡先: 〒104-8370 東京都中央区京橋2丁目16-1 清水建設株式会社 土木技術本部 TEL:(03)3561-3887

解析による水圧分布も考慮し、また必要に応じてグラウトや増しボルト等の対策工についても検討した。その際に、空洞安定性にはグラウト改良部の水圧が大きな影響を及ぼすため、改良部の透水係数を改良目標値と同じとした標準モデルと、局部的に高透水の未改良部が存在するリスクモデルの2ケースを設定して解析を行った。

貯槽掘削後、水封作業トンネルにプラグコンクリートを打設し、貯槽内外の計測を継続しながら水封トンネルの圧力水頭を125mまで上昇させた(水封昇圧)。この水封昇圧時の間隙水圧の変動と、それに伴う岩盤変位やロックボルト軸力等の挙動を全応力解析と浸透流解析では予測することが困難ため、間隙水圧の変動による岩盤の応力・変形を考慮できる水-応力連成解析(非定常、弾塑性)に解析手法を変更した。水-応力連成解析は、工事開始前を初期状態として図-4に示す解析ステップで行い、水封昇圧時の空洞安定性の検討と管理基準値の設定も行った。

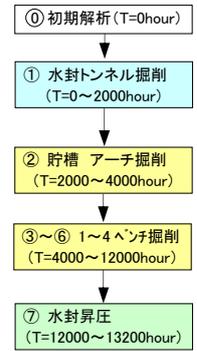


図-4 解析ステップ

4. 解析結果と考察

水-応力連成解の一例として、図-3に示した3PCWT②部の解析モデルを図-5に、また地山物性値を表-1に示す。解析モデルおよび物性値は、地山等級(H級~L級)とグラウト領域(損傷領域1.5m, 内リング2.5m, 外リング4m)による区分を行った後、透水係数とその分布範囲、水封ボーリングの水封水圧をパラメータとした再現解析を繰返し行って、内空変位、支保部材応力、間隙水圧の全てを最もよく再現できたものである。再現解析の繰返しにおいて、リスクモデルの外リングの高透水層およびその影響範囲を0.65Luまで改良を行えば、空洞安定性に支障をきたすような水圧増加は発生しないことを確認し、改良不足が懸念される箇所はポストグラウトを追加し、空洞安定性に対して十分な安全性を有するものとした。

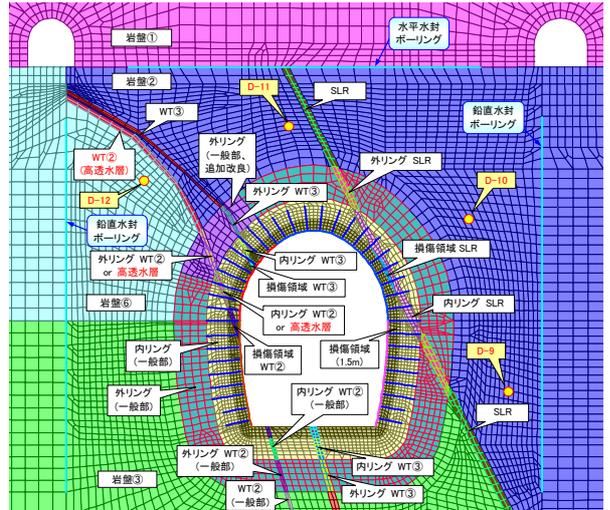


図-5 解析モデル図(3PC WT②部)

表-1 岩盤物性値(3PC WT②部)

No.	名称	岩級	変形係数 E (MPa)	ポアソン比 ν	粘着力 C (kN/m ²)	内部摩擦角 φ (deg)	透水係数k (×10 ⁻⁶ cm/s)	標準モデル	リスクモデル
1	岩壁①	H級	12.0	0.25	3000	49	0.5	0.5	
2	岩壁②	H級	12.0	0.25	3000	49	3.5	3.5	
3	岩壁③	H級	12.0	0.25	3000	49	0.5	0.5	
4	岩壁⑥	H級	12.0	0.25	3000	49	0.2	0.2	
5	WT②-一般部(下側)	L級	1.5	0.35	700	40	3.0	3.0	
6	WT②-上部(高透水層)	L級	1.5	0.35	700	40	500.0	500.0	
7	WT③	M級	4.5	0.30	2300	46	3.0	3.0	
8	SLR	M級	4.5	0.30	2300	46	3.5	3.5	
9	内リング	H級	12.0	0.25	3000	49	0.8	0.8	
10	内リングWT②-一般	L級	1.5	0.35	700	40	0.8	0.8	
11	内リングWT②(高透水層)	L級	1.5	0.35	700	40	0.8	200.0	
12	内リングWT②	M級	4.5	0.30	2300	46	0.8	0.8	
13	内リングSLR	M級	4.5	0.30	2300	46	0.8	0.8	
14	外リング-一般部	H級	12.0	0.25	3000	49	1.0	1.0	
15	外リング-一般部(追加改良)	H級	12.0	0.25	3000	49	1.0	1.0	
16	外リングWT②-一般部	L級	1.5	0.35	700	40	1.0	1.0	
17	外リングWT②(高透水層)	L級	1.5	0.35	700	40	2.0	200.0	
18	外リングWT②	M級	4.5	0.30	2300	46	1.0	1.0	
19	外リングSLR	M級	4.5	0.30	2300	46	1.0	1.0	
20	損傷-一般部	H級	12.0	0.25	3000	49	4.0	4.0	
21	損傷WT②	L級	1.5	0.35	700	40	4.0	4.0	
22	損傷WT②	M級	4.5	0.30	2300	46	4.0	4.0	
23	損傷SLR	M級	4.5	0.30	2300	46	4.0	4.0	

計測値と水-応力連成解析値との比較の一例を図-6および表-2に示す。図-6に示す間隙水圧分布の計測値と解析値はほぼ一致しており、他の特殊地山部についても全ての計測値と解析値の差を10m未満にすることができた。表-2は、内空変位とロックボルト軸力の水封昇圧による最大増分値の比較である。計測値および解析値とも増分値が小さいため詳細な比較はできないが、解析モデルの精度や計測誤差を踏まえると、水-応力連成解で水封昇圧時の挙動をほぼ再現できたと考える。

5. おわりに

高水圧下の岩盤貯槽の安定性検討に水-応力連成解析が有効であることを確認した。今後は、他の事例の解析・設計に用いて、その有効性をより詳細に検討したい。

表-2 水封昇圧による最大増分値の比較

計測項目	計測値	解析値		
		標準モデル	リスクモデル	
内空変位 (mm) [-: 内空側]	V	-1.8	+0.9	+1.3
	H		-1.1	-1.4
	H1	-1.8	-0.9	-2.0
	H2		-0.9	-1.5
	H3		-0.9	-1.1
ロックボルト軸力 (kN) [+: 引張]	10.0	4.7	20.7	

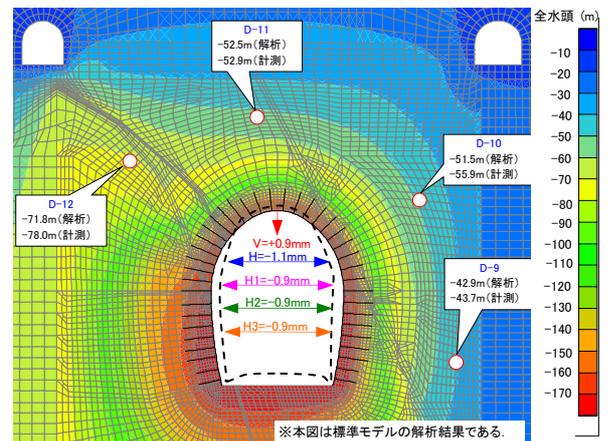


図-6 水封昇圧時の解析結果(3PC WT②部)