高圧気体貯蔵時のアップリフトに対する岩盤の安定性検討

(社)日本ガス協会	正会員	澤 一男		
清水建設(株)	フェロー会員	石塚与志雄、	正会員	延籐 遵
(株)大林組	正会員	武内 邦文、	正会員	志村 友行

1.はじめに

(社)日本ガス協会では経済産業省より委託を受け、平成12年度より都市ガスの岩盤貯蔵技術調査事業を行っている。高圧気体の岩盤貯蔵においては、経済的な観点から極力浅い深度での立地が好ましい。設置深度は、運用時の高内圧による岩盤のアップリフトに対する安定性と貯槽構造(ライニング構造)の安定性の両面から規定される。後者は岩盤の初期地圧(鉛直圧、水平圧)を条件として検討する必要がある。本検討では、前者のアップリフトに対する岩盤の安定性について、数値解析により想定されるすべり面と全体破壊に対する安全余裕度の検討を行い、極限平衡状態に基づく設計法の考え方、安全率と比較検討を行った。また、これらの結果を踏まえて岩盤貯蔵の必要設置深度について検討した。

2.数値解析によるすべり面、全体破壊の検討

岩盤貯蔵の空洞は図1に示すように上部と下部が半球、直胴部が円筒 からなる形状で、運用最大圧は9~20MPa(岩盤条件に依存)が想定され ている。ここでは、検討例として、貯槽が1万m²(高さ33.3m,内径22.2m) 立地岩盤:中硬岩(変形係数8GN/m²,粘着力 C=3.0MN/m²,内部摩擦角 =45°)、運用最大圧12MPa、設置深度80mを取り上げた。なお、初期地 圧は等方地圧(鉛直圧は土被り圧)と仮定した。

(1) すべり破壊開始位置の検討

貯槽を連続体軸対称モデルとし、空洞掘削後に内圧を順次載荷する FEM 解析を行い貯槽周辺岩盤の局所安全率(Lsf)を算定した。なお、 内圧が作用すると貯槽周辺に引張応力が発生するため岩盤を No-tension材とモデル化した。図2に運用最大圧12MPaと15.6MPa(運 用最大圧の1.3倍)時点の局所安全率の分布を示す。貯槽上部のLsf は頂部0~45°で小さくなる傾向を示す。最小値は頂部から約45°の 付近であり、この位置がすべり破壊の開始位置と想定される。

(2) すべり面の検討

想定すべり面は、地下空洞の側壁等の設計で用いられているスリッ プライン法における設定方法に準拠するものとする。局所安全率 Lsf が 最小となる角度(_____:最小すべり安全率の方向)は次式で求められる。 すべり面は各要素の____。方向を連ねることにより決定される。

$$\theta_0 = \frac{1}{2} \cos^{-1} \frac{(\sigma_1 - \sigma_2) \cdot \tan \phi_r}{2C_r - (\sigma_1 + \sigma_2) \cdot \tan \phi_r} \qquad \text{if } 1$$

図3に。方向と想定すべり面を示す(連続体解析で得られた結果を波線で示す)。すべり面は貯槽上部で閉合する形となる。実際のすべり破壊は 貯槽からの進行性破壊により逐次進展するため、すべり面の形状も変更







図3 想定すべり面

するものと考えられる。この影響を調べるために一部すべり面を考慮した解析を行った。すべり面は図3に 示すように連続体解析によるすべり面が内側に変曲する点までを不連続面とモデル化して解析を行い、上記 と同様にスリップライン法によりすべり面を決定した。破壊を考慮したすべり面はやや外側に広がる傾向と なる。このことから、実際のすべり面はより鉛直方向に漸近するものと想定される。

キーワード: 高圧気体貯蔵、岩盤貯蔵、アップリフト、数値解析、限界平衡状態 連絡先: 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 TEL 03-3820-5287, FAX 03-3820-5959 (3) 全体すべりに対する安定性検討

上記の検討結果を踏まえ、アップリフトによる全体すべり破壊の検討で は、すべり面を図4に示すように変曲点から地表面まで鉛直方向に延伸し た形状を想定した。すべり面は不連続面とモデル化して FEM 解析を行った。 不連続面の強度特性は、粘着力Cを健全部と同様、健全部の0.3 倍および 全く期待しない C=0.0 の3ケースを設定した。

解析では(1)の連続体解析と同様に順次内圧を増加させ(26.4MPa:運用 最大圧の2.2倍。限界平衡状態による設計における安全率2.0を考慮)内 圧(P)に対する不連続面の破壊長さ(Lf)を算定した。リガメント残存 率(R)を以下のように定義して全体すべりに対する安全余裕度を検討し た。式中のLは想定すべり面の全長である。

リガメント残存率(R)=1-Lf/L 式2

図5に内圧とリガメント残存率の関係を示す。R=1.0ではすべりが全く 発生しないことを、R=0.0では全面ですべり破壊していることを意味する。 これによるとC=0.0で内圧が運用最大圧の2倍作用してもRは約0.5とな り十分安定と判断される。

3.限界平衡状態に基づく検討

上記の数値解析による検討結果を踏まえて、簡易設計法として岩盤のせん断抵抗力と重量を考慮した限界平衡状態に基づく設計法を検討した。以下に考え方を示す(図6参照)。

(a) 想定すべり面(抵抗岩盤範囲)の設定 貯槽上部肩部から鉛直方向に地表面まで(数値解析による想定すべり 面を考慮して安全側に設定) すべり面の範囲(長さ):貯槽天端から地表面間と設定(貯槽周辺は内 圧により引張応力状態となりせん断抵抗が期待できない想定)

- (b) すべり破壊に対する抵抗力 岩盤のせん断抵抗力:岩盤の残留強さ 水平方向土圧:水平方向土圧は初期地圧を考慮
- (c) 安全率:2.0(全体すべりに対する既往設計法(トンネル アンカレイジ)に準拠

これらの前提を数値解析の検討条件・結果と比較すると、簡 易設計方法で算定される必要設置深度は工学的に安全側の結果 (土被り厚さが厚くなる)になる。

この方法により、表1に示す岩盤貯蔵の基本タイプ(A,B,C,D) について必要設置深度を算定すると表2のようになる。なお、 各タイプの運用最大圧はそれぞれ20,12,9,9MPaとした。

4.まとめ

高圧気体貯蔵時のアップリフトに対する岩盤の安定性に関して、数値 解析によりすべり面の形状と全体すべり破壊に対する安全余裕度につい て検討し、限界平衡状態に基づく設計法が設計上安全側であることを示 した。アップリフトに関する検討(必要設置深度)は、基本設計として は限界平衡状態に基づく設計法を原則とし、地質条件等で簡易設計法が

適用できない場合は今回検討したような解析により想定すべり面、安全余裕度が検討できるものと考える。 謝辞:本検討に際し、東京大学大学院工学系研究科の堀井秀之教授にご指導を賜りました。ここに謝意を 表します。



図4 全体すべり検討モデル



図5 内圧 - リガ メント残存率関係



図6 限界平衡状態に基づく検

表1 検討例(基本タイプA,B,C,D)

	岩盤重量 (kN/m ³)		残留せん断強度定数 (健全部)	
	風化部	健全部	粘着力 (MN/m ²)	内部摩擦角 (°)
Α	19.6	26.0	1.05	50
В	19.6	25.5	0.9	45
С	19.6	26.0	1.05	50
D	19.6	25.0	0.45	40

表2 検討結果(必要設置深度)

タイプ	今回の手法による試算値(m)		
917	計算結果	設定値	
А	116.8	120	
В	85.0	90	
с	59.1	60	
D	78.4	80	