

グリーン公式を用いた浸透流解析法による大規模な岩盤タンクの基礎的検討

清水建設㈱ 土木設計部 正員 ○百 田 博 宣
清水建設㈱ 計算センター 正員 楠 本 太

1. 緒言

著者らは¹⁾これまで、透水性に関して均質等方性の地下水場でラプラス方程式を満足する2次元定常飽和浸透流問題は、小線分に分割された境界上のポテンシャル値 $\phi = -k h$ (k ; 透水係数 h ; 水頭)とその外向き法線微分値 $\bar{\phi} = \partial\phi/\partial\nu$ に関する連立一次方程式(グリーン公式²⁾)に、境界条件を与えることによって容易に数値解が得られることを示した。更に、その応用として、有限要素法解やHele-Shawモデル実験結果と本法による解との比較検討を通じて、本法の岩盤タンクへの適用性を確認した。

本文では、大規模な岩盤タンクの浸透流解析上重要な、タンクからの漏気を防止する気密構造とタンク間の貯蔵油の混合防止構造に関する資料を得るため、タンク設置深度、離間距離および人工地下水を供給する水封ボーリング位置などをパラメーターとして、グリーン公式による浸透流解析を実施した。ここで、気密構造には、Åberg³⁾や駒田ら⁴⁾の研究よりタンク周辺の地下水の鉛直方向動水勾配 I_0 、混合防止構造には、Åberg⁵⁾の研究より地下水の水平方向動水勾配 I_H を判定指標とした。

2. グリーン公式¹⁾²⁾とタンク壁面の動水勾配(I_0 , I_H)の算定法

閉曲線上の任意点のポテンシャル $\phi(i)$ は、 N 個に分割された境界線上の当該線分において $\phi(j)$ と $\bar{\phi}(j)$ を一定と仮定すると、幾何形状に関する係数 E_{ij} , $\bar{E}_{ij}$ を用いて次のグリーン公式で示され、境界条件を代入すれば、全ての $\phi(j)$ と $\bar{\phi}(j)$ が確定できる。

$$\phi(i) = \sum_{j=1}^N [E_{ij} \phi(j) - \bar{E}_{ij} \bar{\phi}(j)] \quad (i = 1 \sim N) \quad (1)$$

岩盤タンク壁面の動水勾配(I_0 , I_H)は、当該線分上の境界条件 $\phi(j)$ が一定の場合には、 $\bar{\phi}(j)$ が合成流速となり、 $\bar{\phi}(j)$ の成分を求めることによって、 I_0 , I_H は容易に算定できる。一方、タンク壁面のペーパー部分のように、 $\phi(j)$ が一定でない場合には $\bar{\phi}(j)$ は合成流速とはならず、図-1のモデルを設定し、 I_0 , I_H を算定する。すなわち、合成流速は図中の法線方向流速 $V_\nu = \bar{\phi}$ と接線流速 V_s のベクトル和で、 V_s は要素端点の水頭値 h_s , h_e より求められる。よって、 I_0 は $V_{\nu z}$ と $V_{s z}$ 、 I_H は $V_{\nu x}$ と $V_{s x}$ を用いて算定することができる。

上述した I_0 , I_H の算定法の検証として、図-2に示す円形暗きょモデル(壁面は等圧力線、斜線部分是不透水層)で、有限要素法と本法による I_0 の分布を求めた。この結果を図-3に示す。これによれば、本法による I_0 の値は、有限要素法に比較してやや大きい値を示すが、概ね両者の値は定量的且つ定性的に一致する結果が得られた。

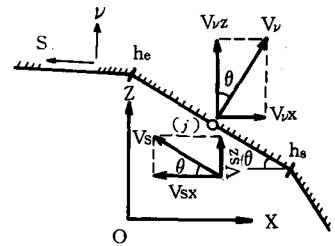


図-1 タンク壁面の流速

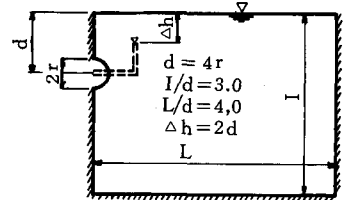


図-2 円形暗きょモデル

有限要素法 本 法

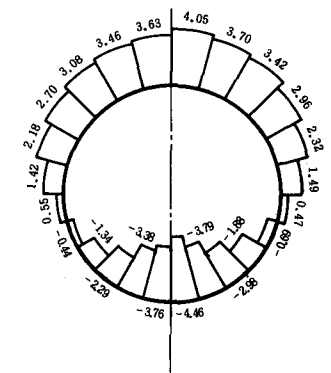


図-3 暗きょ壁面の I_0 の分布

3. 気密構造に関する基礎的検討

今回の検討では、岩盤タンクは幅15m×高さ20mで全周に幅3mのゆるみ領域をもつと仮定し、ゆるみ領域はタンクの一部とみなし⁴⁾、貯蔵油は比重 $\rho = 0.9$ の原油とした。

(1) タンク数 N の影響

タンク数 N が N=1, 2, 3, 5, 9, 15 のモデルを対象として、ペーパー部分の最低の鉛直方向動水勾配 I_o 、タンク全湧水量 Q_{total} 、側方の静水圧境界（端部タンク中心より100m、水位は水封水位と同一）の流量 Q_w を算出した。この結果を図-4に示す。本図によれば、Nの増大に伴い、 Q_{total} は直線的に増加するが、 Q_w はほぼ一定で、 Q_{total} は大部分が水平ボーリングより供給されていることがわかる。また、気密構造の判定指標 I_o は、 I_o が大きい程気密性は大きい、Nの増加に対して低下し、N=5以上になれば一定値となることが認められた。

(2) ボーリング位置 L、タンク離間距離 S、ポテンシャル差 Δh の影響

図-4の結果を基に、タンクへの地下水の供給は水平ボーリングのみの N=3 のモデルを対象として、水平ボーリングとタンク天端間距離 L、タンク離間距離 S およびポテンシャル差 $\Delta h = H - P_o/W$ (H ；タンク設置深度、 P_o/W ；ペーパーの圧力水頭) をパラメーターとして I_o を求めた。この結果を図-5に示す。本図によれば、 Δh と L が I_o に与える影響は非常に大きく、L が小さく Δh が大きいもの程 I_o が大なる値を示す。一方、S が I_o に与える影響は Δh や L に比較して小さく、S が30m以上になると I_o はほとんど増加しないことが認められた。

4. 混合防止構造に関する基礎的検討

水平および垂直ボーリングのみにより地下水が供給される原油満々とカラの2個の岩盤タンクモデルを対象として、両タンク間の液面差に対する混合防止構造を検討する。なお、この判定指標には、原油満たんのタンクに向かう地下水の最低の水平方向動水勾配 I_H を用いる。

(1) 垂直ボーリングを設置しない場合

タンク間に垂直ボーリングを設置しない場合を対象として、3(2)と同様に L, S, Δh をパラメーターとして I_H を算出した。この結果を図-6に示す。本図によれば、 I_o には影響が小さかった S も I_H には大き

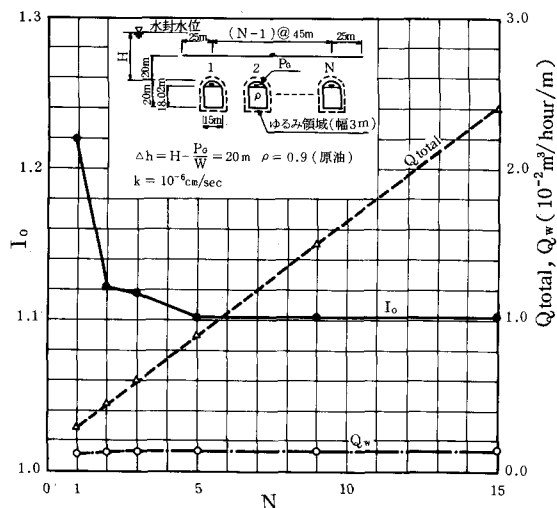


図-4 Nと I_o , Q_{total} , Q_w の関係

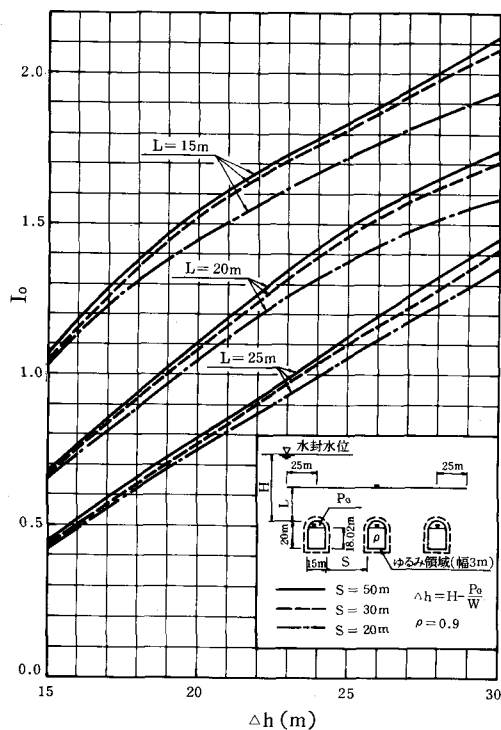


図-5 Δh , L, S と I_o の関係

く影響し、 S 、 Δh が大きく L が小さいもの程 I_H が増大し、混合防止機能が高いことが認められた。ここで、Åberg⁵⁾ が提示した $I_H \geq 0.0$ で混合防止構造を判定すれば、 $L = \Delta h = 20$ m の条件下では、 $S \geq 50$ m にすればよいことがわかる。

(2) 垂直ボーリングの効果

$\Delta h = L = 20$ m、 $S = 30$ m の条件下で、タンク間中央に設置された垂直ボーリング長さ S_v をパラメーターとして、 I_H 、 I_0 および原油満タンとカラのタンクの湧水量 Q_1 、 Q_2 を求めた。この結果を図-7に示す。本図によれば、 S_v の増大に伴い、 I_H 、 Q_1 、 Q_2 は大幅に増加するが I_0 はそれ程変化しないことが認められた。いま $I_H \geq 0.0$ で混合防止構造が確保される場合には、 $S_v = 32$ m でよく、解析上垂直ボーリングはタンク底盤位置まで設置する必要はないことがわかる。

5. 大規模な岩盤タンクの解析例

本法を用いて、図-8に示す対称な16個の岩盤タンク（幅15m×高さ20m、天端レベル $\nabla E L - 25$ m、ゆるみ領域幅3m）モデルを種々の貯蔵条件下で解析し、有限要素法との比較検討を実施した。（有限要素法の節点数952、本法の境界要素数298）

表-1に流量 Q およびタンク天端の鉛直方向動水勾配 I_M の算出結果を示す。本表によれば、 Q 、 I_M とも本法の値は有限要素法解より幾分大きい値を示すが、全体として十分な合致性を示し、最大の Q はモデル3より10万 kl 当り（タンク長400m）概ね1.2 m^3 /hour/10万 kl であった。ここで、気密構造の判定指標 I_0 は、モデル1において本法と有限要素法より1.68、1.49、図-6を用いた補間計算より1.67であった。よって、Åberg³⁾ の提示した $I_0 \geq 1.0$ で気密性を判定すれば十分な気密性が確保されていると判断できる。また、混合防止構造の確認を I_H で行なえば、モデル2による本法と有限要素法による値は0.57、0.52で、Åberg⁵⁾ の提示した $I_H \geq 0.0$ に対して十分安全で、垂直ボーリングを設置しない構造でも混合防止上の問題は生じなかった。

以上の結果、本法は複雑な貯蔵条件を有す大規模な岩盤タンクモデルにおいても、データー作成が容易で且つ計算精度が高いという点において、その有用性が確認された。また、図-6のような基礎的な検討結果の有用性が認められた。

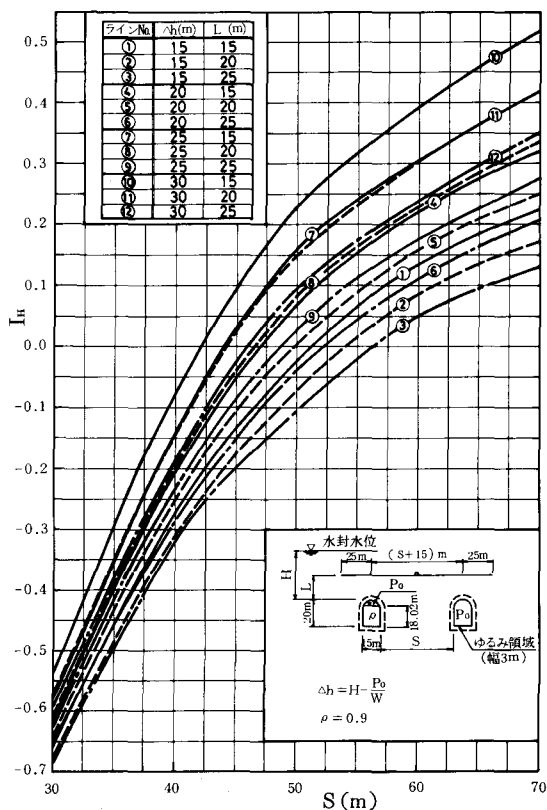


図-6 Δh 、 L 、 S と I_H の関係

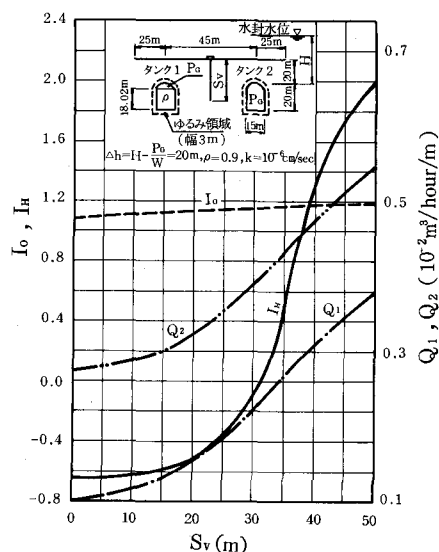


図-7 S_v と I_0 、 I_H 、 Q_1 、 Q_2 の関係

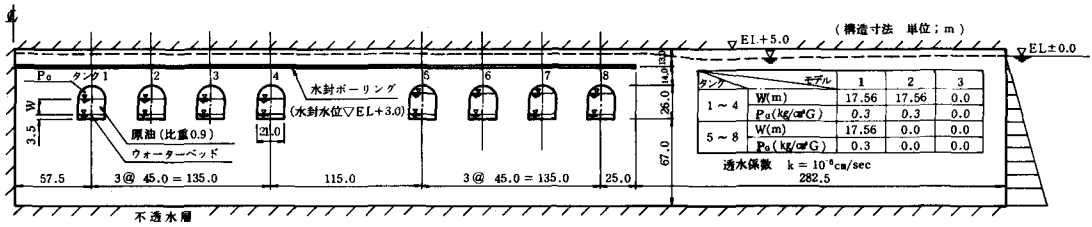


図-8 大規模な岩盤タンクモデルと解析ケース

表-1 タンク湧水量 Q (m³/hour/400m) およびタンク天端の鉛直方向動水勾配 I_v

モデル		タ シ ク							
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	本 法	1.12(1.88)	0.90(1.85)	0.89(1.85)	1.12(1.88)	1.12(1.88)	0.90(1.85)	0.90(1.85)	1.08(1.87)
	有限要素法	1.01(1.81)	0.81(1.79)	0.81(1.79)	1.00(1.84)	1.01(1.81)	0.81(1.79)	0.81(1.79)	0.98(1.82)
2	本 法	1.11(1.88)	0.89(1.85)	0.88(1.85)	1.04(1.88)	1.47(2.12)	1.09(2.09)	1.09(2.09)	1.36(2.10)
	有限要素法	1.01(1.81)	0.81(1.79)	0.80(1.79)	0.95(1.83)	1.34(2.02)	1.00(2.00)	0.99(2.00)	1.21(2.03)
3	本 法	1.39(2.12)	1.08(2.09)	1.08(2.09)	1.39(2.12)	1.39(2.12)	1.08(2.09)	1.09(2.09)	1.35(2.10)
	有限要素法	1.27(2.02)	0.98(2.00)	0.98(2.00)	1.24(2.05)	1.27(2.02)	0.98(2.00)	0.98(2.00)	1.21(2.03)

注) 括弧外の値は Q 、括弧内の値は I_v を示す。

6. 結論

大規模な岩盤タンクの気密構造と混合防止構造を地下水の鉛直方向動水勾配 I_v と水平方向動水勾配 I_h を判定指標とし、グリーン公式による浸透流解析を行なった結果、以下の結論を得た。

- (1) 円形暗きょを対象とし、本法による I_v の算定法を有限要素法で検証した結果、両者は定量的且つ定性的により合致性を示し、その妥当性が認められた。
- (2) タンク数 N の増大により、 I_v が低下するが、 $N = 5$ 以上になると I_v はほぼ一定値となった。
- (3) 3 個のタンクモデルについて、水封ボーリング位置 L 、ポテンシャル差 Δh およびタンク離間距離 S に関するパラメータスタディによって、 L が小さく Δh が大きいもの程 I_v は増大するが、 S の影響は L や Δh に比較して小さいことが認められた。
- (4) 垂直ボーリングを設置しない 2 個のタンクの液面差に対する混合防止構造を検討した結果、 I_h は S 、 Δh が大きく L が小さいもの程大きいことが認められた。
- (5) 垂直ボーリング長さ S_v をパラメータとした解析の結果、 S_v の増大による I_h の増大は大きい、 I_v はほとんど増大しないことが認められた。

参考文献

- (1) 百田，楠本；グリーン公式による浸透流解析法の岩盤タンクへの適用，第26回水理講演会論文集，1982年2月
- (2) 井島，周；土木学会論文報告集 第194号，pp.91～101，1971年10月
- (3) Aberg, B. ; Rock Store 77, Session 4, pp.175～189, 1977
- (4) 駒田，中川，北原，林；土木学会論文報告集 第300号，pp.69～80，1980年8月
- (5) Aberg, B. ; Rock Store 77, Session 4, pp.287～300, 1977

Study on Groundwater Flow around unlined Rock Caverns
by Means of Green's Identity Formula

by Hironobu Momota and Futoshi Kuskumoto
(Shimizu Construction Co., Ltd.)

In underground unlined rock caverns, an oil material can be stored by the aid of natural or artificial groundwater pressure around the caverns. The groundwater in the bedrock plays a role of prevention of both gas leakage from caverns and mixture of oil between two caverns. In analysis, the former can be checked by vertical hydraulic gradient (I_v) and the latter can be checked by horizontal hydraulic gradient (I_h) around caverns. In order to solve these phenomenon in seepage problem, a method of numerical analysis using boundary integral (Green's Identity Formula) have been proposed instead of FEM, because FEM is somewhat complicated in mathematical and computational technique.

In this paper, the effects of artificial groundwater on the oil-storage caverns with an array of boreholes for water supply were estimated by two dimensional steady seepage analysis using Green's Identity Formula.

As the result of analysis, conclusions are as follows.

- (1) The vertical hydraulic gradient (I_v) decreases with the increase in number of caverns (N), but it nearly constant in case of $N \geq 5$.
- (2) Among changes of the distance between two caverns (S), the distance from cavern to horizontal boreholes (L) and the difference of potential head between cavern and boreholes (Δh), changes of L and Δh are more effective to I_v than that of S .
- (3) Even in case of the flow between two caverns without boreholes, where one cavern is empty and another is full, prevention of mixture of oil between two caverns is possible if necessary condition for S , L and Δh are ensured.
- (4) The calculation for sixteen caverns with only horizontal boreholes show that the discharge and hydraulic gradient by means of Green's Identity Formula agree well to those by FEM.