

LPG貯蔵空洞周辺岩盤の3次元異方媒体による 水理構造のモデル化について

鈴木健一郎^{1*}・宮崎裕光²・山本浩志³・小笠原光雅²・前島俊雄³・青木謙治⁴

¹株式会社 大林組 地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸4-640）

²大林組・飛島建設・鴻池組JV 波方基地ブタン貯槽工事事務所（〒799-2104 愛媛県今治市波方町宮崎甲147）

³独立行政法人石油天然ガス・金属鉱物資源機構（212-8554 神奈川県川崎市幸区大宮町1310）

⁴京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻（〒615-8540 京都市左京区京都大学桂）

*E-mail: suzuki.kenichiro@obayashi.co.jp

わが国初の人工水封式 LPG 貯蔵空洞の掘削が 2006 年に掘削終了した。人工水封方式は、LPG を貯蔵するために、貯蔵圧より高い水封水圧を人工的に負荷して、LPG の気密・液密性を確保する方式である。貯槽空洞周辺岩盤の飽和状態を確保するために、水封ボーリングから注入しながら水理挙動の監視を行い、計測値と予測値との比較により管理と対策を実施した。同時に掘削過程で得られる情報と計測値から水理モデルも更新して行った。

ここでは、最終的に掘削時の亀裂情報とグラウト時の透水試験結果から 3 次元異方媒体として水理モデルを作成する方法を示し、掘削過程での間隙水圧挙動を反映できることを示すことで、その妥当性を示した。

Key Words : LPG Storage Cavern, permeability tensor, joint geometry, hydrogeological modeling

1. はじめに

わが国初の人工水封式 LPG 貯蔵空洞の掘削が 2006 年に終了した。人工水封方式は、LPG を貯蔵するために、貯蔵圧より高い水封水圧を人工的に負荷して、貯蔵空洞の気密性・液密性を確保して貯蔵する方式である。LPG 貯蔵時の空洞への地下水の流れを確保することが、空洞の品質として要求される。周辺岩盤の飽和状態を維持しながら掘削を進めるために、事前に空洞周りに水封ボーリングを設け、注水しながら湧水量および間隙水圧の挙動を監視した。掘削が完了すると空洞周りのポストグラウトが難しくなり、水封トンネルを水没させると、追加の水封も困難になるため、各掘削段階で対策を実施するための水理挙動の評価が不可欠である。

このような背景の下、水封トンネル、アーチ掘削、各ベンチの掘削段階毎に、空洞周辺の間隙水圧の挙動を再現する水理モデルを作成し、計測結果と比較しながらグラウトおよび追加水封の検討を行い、掘削を進めた。各掘削段階で得られる情報は、掘削領域の湧水量変化、周辺の間隙水圧の変化、掘削領域の亀裂状況、先進ボーリングでの透水試験結果およびプレグラウト実施時のグラウト孔での透水試験結果である。貯槽掘削前の情報は、

水封トンネルでの透水性の状況、水封ボーリングでの透水試験の情報である。これらの情報の蓄積により空洞周辺岩盤の水理挙動を再現するようモデルを更新しながら、管理を行った。

ここでは、水理モデルの更新過程と、最終的に周辺岩盤を異方媒体としてモデル化する方法について述べる。亀裂の情報と透水性に関する情報とにより、等価多孔質媒体として岩盤の等価な透水テンソルを決定する方法のひとつにクラックテンソルを用いる方法がある。多孔透水試験結果から主軸の決定なしに透水テンソルを決定する Hsieh ら方法があるが、亀裂情報からクラックテンソルにより透水テンソルの主軸を推定し、単孔での透水試験結果を用いて異方透水テンソルを決定した。最終掘削段階での情報から更新された異方媒体水理モデルにより、各掘削段階での水理挙動を反映できることを示すことで、モデルの妥当性を評価した。

2. ブタン/プロパン貯槽の概要

(1) ブタン/プロパン貯槽

ブタン/プロパン兼用貯槽の概要を図-1に示す。ブタン/プロパン兼用貯槽は、天端深度GL-150mに設置され、その寸法は、高さ30m、幅26m、長さ430m、容量30万m³

の空洞である。貯槽軸方向は、N37° E方向である。高さ7.25m、幅10mの頂設および底設作業トンネルで貯槽に取り付く。

(2) 水封カーテン

貯槽空洞天端から25m上方に水封トンネル（高さ6m、幅6.5m、延長1190m）を設け、10m間隔を基本に、水封トンネル掘削時の低透水区間では20mまたは40m間隔で計200本の鉛直および水平水封ボーリングを図-1のように貯槽周辺に配置して、掘削中から注水を行なった。

(3) 貯槽掘削段階での管理の概要

水封カーテン施工後、貯槽空洞掘削前に、水封トンネルの掘削時の湧水状況から貯槽を低透水、中透水、高透水の領域にグラウト区間の分割を行った。

この掘削前の初期状況では、対象岩盤はこれまでの透水試験結果の幾何平均値（ $1 \times 10^{-8} \text{m/s}$ ）を持つ均質な岩盤であると仮定し、2次元浸透流解析により、アーチから各ベンチ掘削時の図-2に示す監視点の間隙水圧の変化を予測した。掘削の進行に伴い、頂設トンネル、底設トンネル、配管堅坑などのトンネルの影響を無視することができなくなったので、均質の3次元モデルで周辺の水圧の状況を再現した。

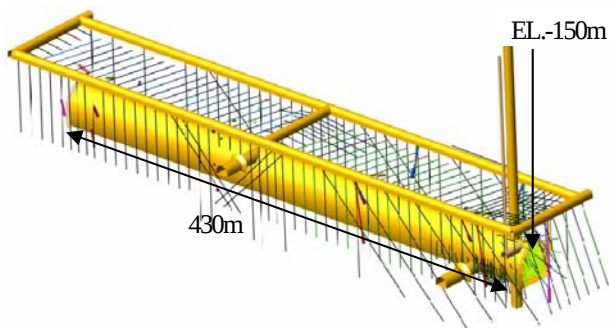


図-1 ブタン/プロパン兼用貯槽

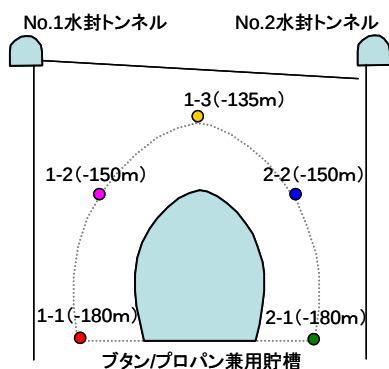


図-2 間隙水圧監視点の例

3. 貯槽周辺岩盤の水理挙動

(1) 掘削時の周辺間隙水圧挙動

ここでは、堅坑側妻部から40mにある断面Dについての挙動を例に述べる。

未掘削の段階からアーチ、1～4段ベンチ掘削までの図-2に示した位置での間隙水圧の挙動を図-3に示す。点線は水封水圧の全水頭表示である。以下にこれらの挙動の特徴を述べる。

D1-1：GL-180m、貯層底盤深度で、底設作業トンネル側壁から水平距離20mに位置する。掘削前はほぼ水封水圧であったが、1ベンチ掘削時から低下が始まる。この時、底設作業トンネルは貯槽から20mの位置まで掘削が進行し、底設作業トンネルから湧水が生じた。このため水封ボーリングの追加、底設作業トンネル周辺のグラウトを行った。2ベンチから4ベンチ掘削までは低下傾向は緩くなった。

D1-2：GL-150m、貯槽天端深度で、底設作業トンネル壁面から水平距離10m、鉛直距離22.5mの離れである。D1-1同様、アーチ掘削と同時に底設作業トンネルの接近に伴い大きく低下し、その後低下傾向は小さくなったものの、3ベンチ掘削まで低下し、4ベンチ掘削時には、貯槽周辺グラウトの実施および水封水圧の増加により数m回復した。

D1-3：貯槽天端から15m、水平水封ボーリングから10mに位置するため、貯槽掘削の影響は1ベンチまで、その後は水封水圧に対応している。

D2-1：GL-180m貯槽底版に位置する。貯槽掘削の影響を受けず、水封水圧にほぼ対応した挙動を示した。

D2-2：貯槽天端深度にあり、アーチ掘削の影響で5m程度低下したが、その後は水封水圧に対応した挙動を示した。

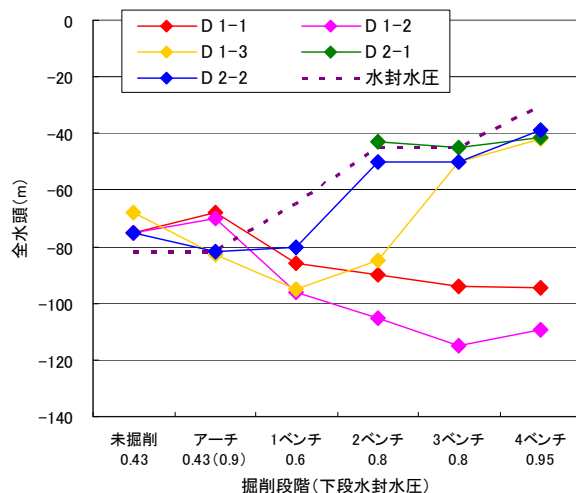


図-3 D断面周辺間隙水圧の挙動

(TP0を位置水頭の基準とした全水頭：以下同様)
(未掘削段階から4段ベンチ掘削まで)

これらの挙動を再現する水理構造をモデル化することで、LPG貯蔵時の気密性・液密性を確保するよう管理した。

(2) 掘削時の周辺間隙水圧挙動の再現

貯槽全体の周辺岩盤は領家帯の花崗岩類で波方花崗岩と花崗閃緑岩で構成される。両者において明瞭な透水性の違いは認められなかったため、事前調査ボーリングでのルジオン試験の対数平均 (0.1Lu) を用いた均質状態を想定し、各掘削過程での間隙水圧の挙動を図-4に示す解析メッシュを用いて再現した。再現結果を計測結果との差で図-5に示す。均質モデルでは、D1-1のみが再現され、他の挙動は再現されない。図中の網掛け部は、計器設置誤差などを考慮した±10mの範囲を示しており、この範囲で水理挙動を管理しながら掘削を進めた。

掘削進行とともに、大きな地質構造として図-6に示す分帯中のⅡ'-4が遮水性を有するものであると判明したので、それを考慮した結果を同様に計測値との差で図-7に示す。その結果は、西側のD2-1およびD2-2について若干の改良があった。掘削進行に伴い明らかになった透水性の異なる区分に図-6のように分割され、それぞれの領域で得られたグラウト孔での水押し試験結果などから平均透水係数を設定し、挙動を再現したのが図-8である。透水係数にコントラストがつくこと、グラウトが考慮されることで再現性は大きく改良される。しかし、30m以上の違いは気密性・液密性にリスクが大きいため、さらに異方性の透水性を考慮し、再現した結果は、図-9に示す

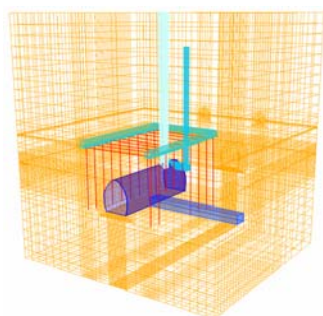


図-4 解析領域のメッシュ図

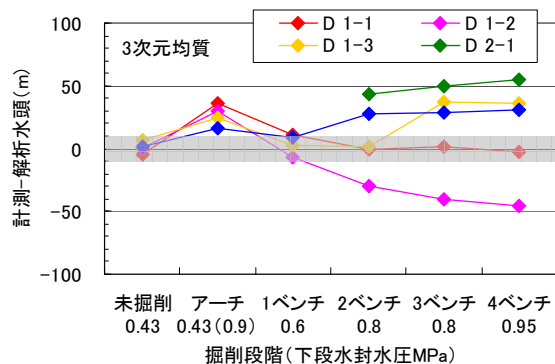


図-5 3次元均質モデルによる挙動の再現性

ようにおよそ誤差範囲内で全挙動が再現された。以下に、分帯の区分と異方性の設定について述べる。

4. 3次元異方媒体による水理モデルの構築

(1) 貯槽周辺の岩盤状況と均質領域の設定

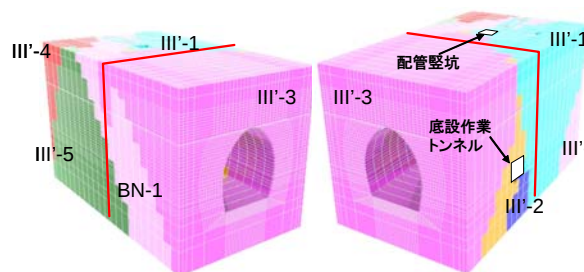


図-6 分帯区分 (赤線：対象断面)

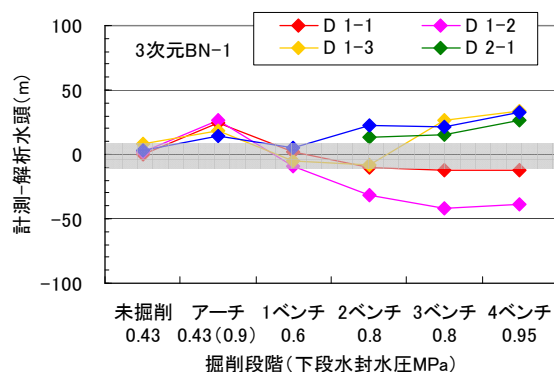


図-7 遮水帯 BN-1 を考慮したモデルの再現性

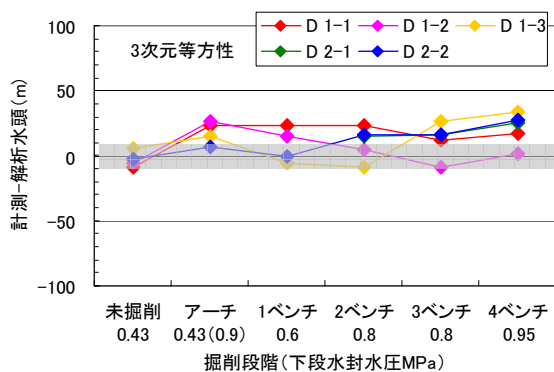


図-8 3次元等方性媒体モデルによる再現性

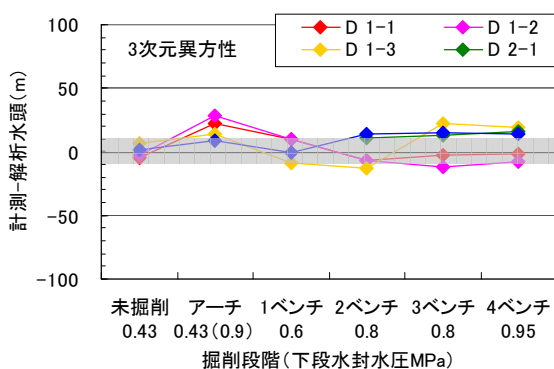


図-9 3次元異方性媒体モデルによる再現性

ここでは北妻付近を例に議論を進める．多孔質媒体の等価異方透水テンソルの決定は，均質な領域に分割することが大前提であり，分割された各領域において実施するものである．

対象領域の岩盤は亀裂の密度と方向を考慮して大きく3つの分帯に分けられた．3領域の特性を持った岩盤において，等価多孔質媒体として岩盤を近似する場合，統計的に均質と見なし得る領域に周辺岩盤を分割する必要がある．

3領域の亀裂分布をより詳細に検討すると，領域はさらに5個の分帯に分割された．分帯の分割状況は図-10のようである．各分帯の亀裂のロゼットダイアグラムを図-11に，また，これらの領域において，水封ボーリング，計器設置孔，およびグラウト時の透水試験から透水係数の分布を図-12に示す．

(2) 異方透水テンソルの決定法

亀裂の情報は，水封ボーリングおよび貯槽掘削時の壁面観察からその方向と密度に関する情報が得られる．亀裂の大きさおよび開口幅に関する情報はBHTVおよび施工時の切羽観察から得られている．ここでは，亀裂の方向に関するデータを用いることとする．亀裂の大きさ，開口幅のデータは，透水性を推定するために必要であるが，透水係数を求めるためには3000点以上実施された透水試験結果を活用することが可能である．

すなわち，クラックテンソルによれば，亀裂性岩盤の等価透水係数テンソル k_{ij} は次のように表せることが知られている²⁾．

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_{kk} \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (1)$$

$$P_{ij} = \langle t^3 \rangle \frac{n(q)}{\langle |n \cdot q| \rangle} N_{ij} \quad (2)$$

ここで， λ は亀裂の連結性に依存するパラメータ， t は亀裂の水理的開口幅， $n(q)$ は単位長さの走査線に交わる亀裂の本数，それを亀裂の方向と走査線の方角に対して補正するために $(n \cdot q)$ という亀裂の法線ベクトルと走査線の方角ベクトルの内積の平均で補正する． N_{ij} は亀裂の方向テンソルで $n \otimes n$ である．水理的開口幅 t と方向は独立であるとして(2)式を(1)式に代入して整理すると

$$k_{ij} = P' (\delta_{ij} - N_{ij}) = 2P' N'_{ij} = kN'_{ij} \quad (3)$$

となる．ここで $N_{ii} = 1$ と $\delta_{ii} = 3$ から $N'_{ii} = 2$ であるが， $N'_{ii} = 1$ となるように変換したものである．このスカラー値を決定するために亀裂の密度および亀裂の開口幅に関するデータを用いないかわりに，透水試験から得られたルジオン値 (Lu) を用いて，これを補い，

異方透水係数を求めることを考える．

単孔式透水試験により得られる透水係数は，その孔に垂直な面内の透水性であり，その透水係数は面に直交する方向の透水係数に依存することが知られている．中屋³⁾は，透水係数テンソルの対角項と単孔式透水試験から得られる透水係数の関係を数値解析から次のように近似している．

$$k_L = \sqrt{(k_{xx} * k_{yy})_{\max}} \times k_{zz}^{0.128} \quad (4)$$

ここで， k_{xx} ， k_{yy} ， k_{zz} は透水係数テンソルの対角項の

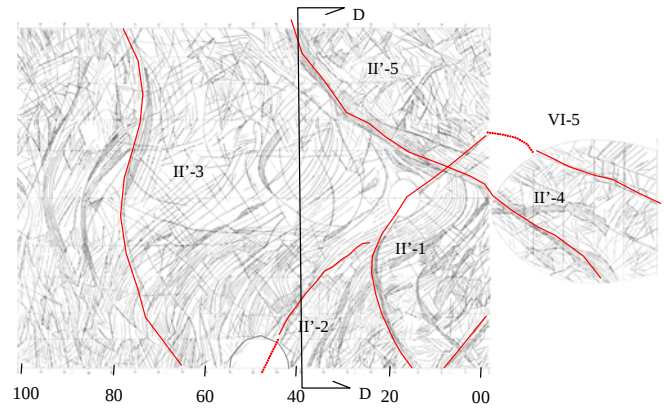


図-10 北妻付近 D断面の空洞壁面亀裂状況と分帯分割

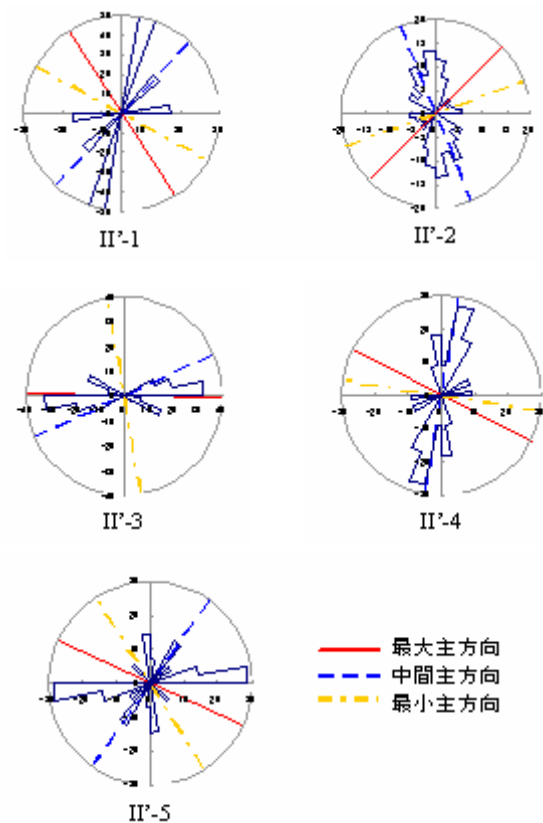


図-11 各分帯の亀裂のロゼットダイアグラムと透水係数テンソルの主軸方向

成分である。(3)式を利用して(4)式を書き直すと

$$k_L = \sqrt{(N_{11}k^*N_{22}k)_{\max}} \times (N_{33}k)^{0.128} \\ = (N_{11}N_{22})^{0.5} N_{33}^{0.128} k^{1.128}$$

さらに整理してスカラー値 k は亀裂の方向テンソルの成分と透水試験結果 k_L から

$$k = (N_{11}N_{22})^{-1/2.256} N_{33}^{-0.128/1.128} k_L^{1/1.128} \quad (5)$$

と表せる。この式をルジオン試験結果に適用し、各領域を代表する透水係数と亀裂の方向テンソルから透水係数テンソルを決定した。各分帯の透水係数の頻度分布に示した幾何平均を k_L に用い、亀裂の方向テンソル N_{ij} から(3)式と(5)式より透水係数テンソルを求めた。結果は表-1のようである。各分帯の番号にGが付いているのはグラウト領域を示しており、またBN-1は境界領域である。ここで決定された透水係数テンソルの主軸方向と亀裂の方向との関係を図-11のロゼットダイヤグラムに併記した。透水係数テンソルの最小主軸の方向（一点鎖線）はどの分帯においてもほぼ亀裂の卓越方向に対して直交に近い方向である。

(4) グラウト部透水テンソルの決定

異方性のある岩盤に対してグラウトが実施された場合の異方性の変化についても考慮した。ベンチ掘削時の亀裂調査とその後に実施した斜水封ボーリングにおけるBHTV観察によりグラウトが注入されている亀裂とされていない亀裂を分類した。観察されたグラウトが入っている亀裂のロゼットダイヤグラムとグラウトが入っていない亀裂のそれぞれのロゼットダイヤグラムを図-13に示す。両者を比較すると明らかに、グラウトの詰まっている亀裂の方向は貯槽軸（N37E）に対して角度のついたもので、グラウト後にも湧水がある亀裂は、

貯層軸と平行なものであることがわかる。したがってグラウトの透水テンソルは若干貯層軸に平行、すなわちY軸方向の透水性が大きくなっている。

表-1 各分帯の透水係数テンソル一覧

II'-1	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.06 & -0.01 & 0.04 \\ -0.01 & 0.09 & 0.00 \\ 0.04 & 0.00 & 0.06 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-2	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 2.00 & -0.39 & -0.14 \\ -0.39 & 1.67 & -0.24 \\ -0.14 & -0.24 & 2.30 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-3	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.13 & 0.08 & -0.04 \\ 0.08 & 0.14 & 0.02 \\ -0.04 & 0.02 & 0.20 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-4	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.01 & -0.01 & -0.01 \\ -0.01 & 0.03 & 0.00 \\ -0.01 & 0.00 & 0.03 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-5	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.17 & 0.04 & -0.06 \\ 0.04 & 0.25 & 0.01 \\ -0.06 & 0.01 & 0.32 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-1G	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.07 & -0.01 & 0.01 \\ -0.01 & 0.08 & -0.01 \\ 0.01 & -0.01 & 0.05 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-2G	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.36 & -0.08 & -0.01 \\ -0.08 & 0.31 & -0.06 \\ -0.01 & -0.06 & 0.36 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
II'-5G	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.05 & -0.01 & 0.00 \\ -0.01 & 0.08 & -0.01 \\ 0.00 & -0.01 & 0.05 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$
BN-1	k_{ij}	$= \begin{bmatrix} 0.04 & 0.03 & 0.03 \\ 0.03 & 0.08 & -0.02 \\ 0.03 & -0.02 & 0.08 \end{bmatrix} \times 10^{-7} \text{m/s}$

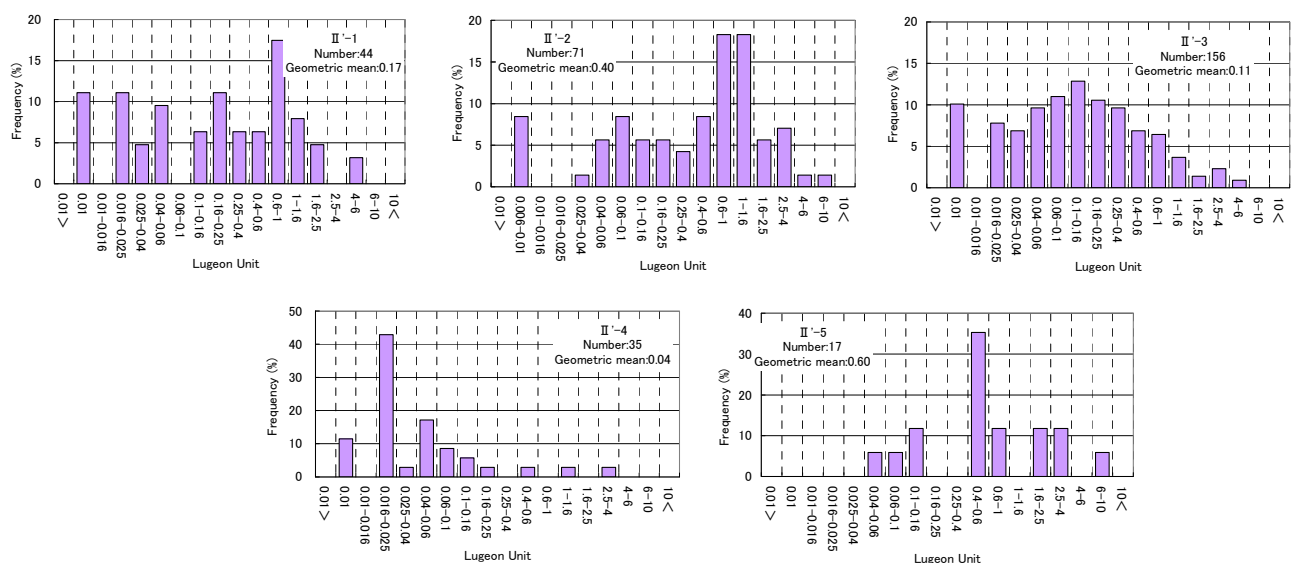


図-12 各分帯における透水係数（ルジオン値）の頻度分布

5. おわりに

LPG貯蔵空洞掘削時の水理学的安定性を掘削段階から周辺の間隙水圧他により管理しながら掘削を進めた。当初、等方均質状態で考えていた空洞周辺岩盤は、亀裂の状態により、不均質な領域に分割され、それらはそれぞれ異方的な透水性を有するものであった。これらの挙動再現に当り、以下の点が指摘される。

- ・多孔質媒体で近似した岩盤の水圧挙動は、透水係数の分布とそのコントラストに顕著に反応することが解析に認められた。

- ・透水係数の異方性の設定により方向によりコントラストが変化し、圧力分布に影響を与える。したがって、異方性を考慮することは周辺の地下水の流れを詳細に検討するために重要である。

- ・グラウトも異方性を反映し、グラウト孔と亀裂の方向により入り安い方向があることが確認された。

- ・異方性は、亀裂の幾何学的特性によって現される。しかし、掘削面に現れる亀裂の開口幅は、掘削に伴う損傷などにより大きく観測されるため、透水係数の絶対値を推定していくためには直接採用するのは困難であった。幸いここでは多くの透水試験が実施されており、その結果から、異方性の成分を決められる事を用い、透水テンソルを決定した。これらのモデルを用い、掘削過程での貯槽空洞周辺の岩盤の間隙水圧挙動を解析したものは、計測値を十分反映するものであった。

参考文献

- 1) 駒田広也, 中川加明一郎, 北原義浩, 林正夫: 水封式燃料貯蔵地下貯蔵用空洞周辺の浸透流に関する検討, 土木学会論文集, No.300, pp. 69-80, 1980.
- 2) Oda, M.: Permeability Tensor of Discontinuous Rock Masses, *Geotechnique*, Vol.35, No.4, pp.483-495, 1985.

- 3) 中屋真司: 亀裂性岩盤の透水性評価と岩盤浸透流に関する基礎的研究 博士論文, 1992.

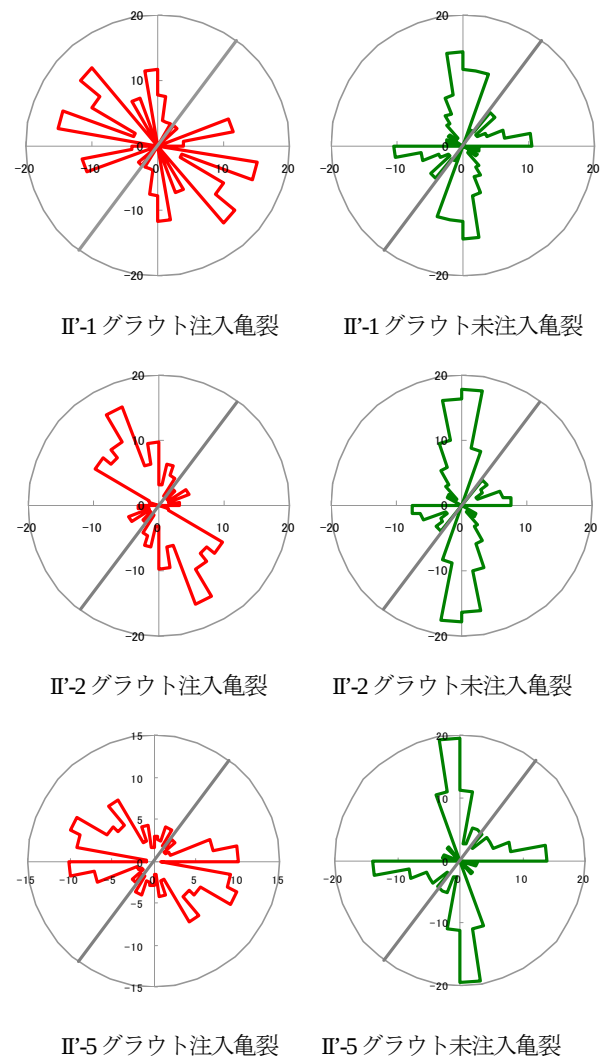


図-13 グラウト注入亀裂と未注入亀裂の方向
(直線方向: 貯槽軸方向 N37E)

HYDROGEOLOGICAL MODERING OF ROCK MASS AROUND THE NAMIKATA LPG STRAGE CAVERN AS 3-D ANISOTROPIC POROUS MEDIA

Kenichiro SUZUKI, , Hiromitsu MIYAZAKI, Hiroshi YAMAMOTO, Mitumasa OGASAWARA and Toshio MAEJIMA, and Kenji AOKI

Namikata underground LPG storage caverns with engineering water curtain have been finished the excavation in 2006. LPG storage cavern has been excavated to secure to remain saturated by supplying water through engineering water curtain and been grouted to control the inflow into the cavern. For reasons of gas/liquid tightness, it could be important to evaluate the hydraulic properties of rock around the caverns, manage the flow, and plan to the countermeasure. To create the hydrogeological model, the information obtained from many kinds of measurements during the excavation could be fully used.

In this paper, the method to evaluate permeability tensor using joint geometry and Lugeon water pressure tests data at grouting and the validity of the analytical results using the models approximated by an anisotropic porous media were discussed using monitoring results.