

波方LPG岩盤貯槽におけるキーブロック 安定性評価

中岡 健一^{1*}・畑 浩二¹・市川 雅之²・小笠原 光雅²・前島 俊雄³・山本 浩志³

¹株式会社大林組 技術研究所地盤技術研究部（〒204-8558 東京都清瀬市下清戸四丁目640）

²株式会社大林組 波方ブタンJV（〒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）

*E-mail: nakaoka.kenichi@obayashi.co.jp

液化石油ガス (LPG) の安定供給を図るため、愛媛県今治市波方町に地下岩盤貯槽を建設中である。地下150m以深に構築された大断面空洞は、常温高压の状態でLPGを地下水圧で封じ込める水封貯蔵方式を採用している。地下水位は貯槽掘削中も管理値を保持し続けなければならないため、岩盤に設けた水封ボーリングから水封水を加圧供給しながら掘削が進められた。このため、貯槽掘削においては水圧を考慮した空洞の安定性の評価が必要であり、さらに、完成後は永久構造物としての性能が求められる。そのため、当サイトでは地下水圧と地震荷重を考慮したキーブロック解析システムを開発し実施した。その結果、本システムは施工に遅れることなく運用でき、キーブロックの安定性評価に適用できることが確認された。

Key Words : key block, underground cavern, water-seal system, underground water pressure

1. はじめに

国家石油ガス備蓄波方基地は、愛媛県今治市波方町に、エネルギーの国家備蓄計画の一環として建設が進められており、岩盤内部に建設した貯槽に、45万tの液化石油ガス (LPG) を常温かつ液体状態で貯蔵するものである。LPG貯槽はブタン・プロパン兼用貯槽1基、プロパン貯槽2基であり、2002年10月に地上から作業トンネルの掘削を開始し、2007年6月に全ての貯槽の掘削を完了した。

ガスを液体状態で貯蔵するには、プロパンでは0.97MPa、ブタンでは0.24MPa以上 (20°C) の高水圧を維持することが必要であり、それを水封方式によって実現する計画である。水封方式は人工的なライニングなどを使ってガスの漏出を防ぐものではなく、岩盤内に存在する地下水の水圧を利用するものであり、その機能を発揮するためには周辺岩盤の地下水圧をガス圧よりも高い状態に維持することが必要である。

建設中においては地下水位の低下を防ぐため、貯槽周辺に施された水封ボーリングから水封水を加圧供給するとともに、貯槽周辺の必要な部分にはプレグラウトを実施し、掘削を進めた。その結果、貯槽周辺岩盤には地下水圧が絶えず作用する状態であるため、キーブロック安定性評価には水圧を考慮することが必要であるが、水圧を考慮したキーブロック安定性評価の例は今までにない。

さらに、掘削を完了した大空洞自身が永久構造物としての岩盤構造でなければならないため、地震荷重を考慮する必要があることから、水圧に加えて地震荷重を考慮できるキーブロック解析システムを構築した。

すでに筆者らは、「3次元亀裂可視化システム」¹⁾を構築している。このシステムはパソコンのモニタ上に複数の切羽画像を取り込み、亀裂の位置を指定することにより、自動的に亀裂の三次元的配置の計算、キーブロックの検出、可視化を行なうものである。通常のトンネルではこのシステムを適用することとなるが、本件は大規模空洞かつ亀裂性岩盤であり、詳細な壁面のスケッチなど亀裂の配置に関する調査がなされているため、その調査結果を基に亀裂の位置情報を設定する。

2. 安定性評価のための条件

(1) 貯槽の概要

対象とするブタン・プロパン兼用貯槽の本体は図-1に示すような卵型断面の空洞であり、高さ30m、幅26m (断面積650m²)、長さは430mで、貯槽天端の深度は150m、底盤の深度は180mである。貯槽天端より25m上方に設けられた水封トンネルから、空洞の上部と側部を取り囲むように、水封ボーリングが標準ピッチ10mで設けられて

いる。まず、水封ボーリングから水圧を加え、水圧を維持した状態で貯槽の掘削が進められた。掘削は、アーチの作業トンネル取り付け部(頂設トンネル)から南北両方に向かってアーチ部を掘削し、その後、本体ベンチ掘削を進めた。貯槽周辺の地質は花崗岩であり、大部分は波方花崗岩で、北側の一部には高縄花崗閃緑岩が分布している。

(2) 岩盤の物性および支保工の仕様

キーブロックの落下やすべりに対する抵抗力として、亀裂のせん断強度、ロックボルトの引張強度、そして、吹付けコンクリートのせん断強度を考慮する。亀裂については、粘土介在の有無の2つに分類し、それぞれの亀裂のせん断試験から表-1のように物性を定めた。吹付けコンクリートおよびロックボルトの仕様を表-2に示す。

(3) キーブロックに作用する荷重

荷重として、常時の場合は地下水圧とキーブロックの重量、地震時の場合は、地震による水平および上下震度を静的に考慮する。水圧はブロックを構成する亀裂面に対し、垂直に作用する荷重として考慮する。その大きさを設定するために別途、定常浸透流解析を行ない、貯槽壁面からの距離と水圧の関係を求め、亀裂面の面積と、得られた関係から水圧荷重を計算した。浸透流解析には水封ボーリングから操業時の1.3MPaの加圧給水を考慮した。地震時の水圧は常時と同じとする。図-2に安定性評価に用いた貯槽壁面からの距離と、水圧の関係を示す。

設計用の水平方向地震荷重 K_H および鉛直方向地震荷重 K_V は以下のように設定した²⁾。

$$K_H = 0.150\alpha_0\alpha_1\alpha_2\alpha_3 \quad (1)$$

$$K_V = 0.075\alpha_0\alpha_1\alpha_2\alpha_3 \quad (2)$$

ここに、 α_0 は地震動のレベル係数(レベル2地震動とし、2とした)、 α_1 は構造物の重要度係数(最も重要なグループIaとし、1とした)、 α_2 は地域係数(地域区分表²⁾より0.7とした)、 α_3 は表層地盤割増し係数(基盤入力のため割増しなし、1とした)。この結果、 $K_H=0.21$ 、 $K_V=0.105$ とした。

3. キーブロック解析の概要

キーブロックとは亀裂によって空洞壁面に形成される岩塊のうち、幾何的に他のブロックに妨げられることなく、空洞の方向に移動、落下できるものを言う。

キーブロック安定性評価システムは領域を分割するコードと、生成されたブロックからキーブロックを抽出し、安定性を計算するコードからなる。システムはエクセル

に組み込まれているビジュアルベーシックを利用し、ワークシート上から外部プログラムを作動させる方法とした。データ入力および出力のほとんどをエクセルのシートで行い、ブロックの形状はdxfファイルで出力するようになった。

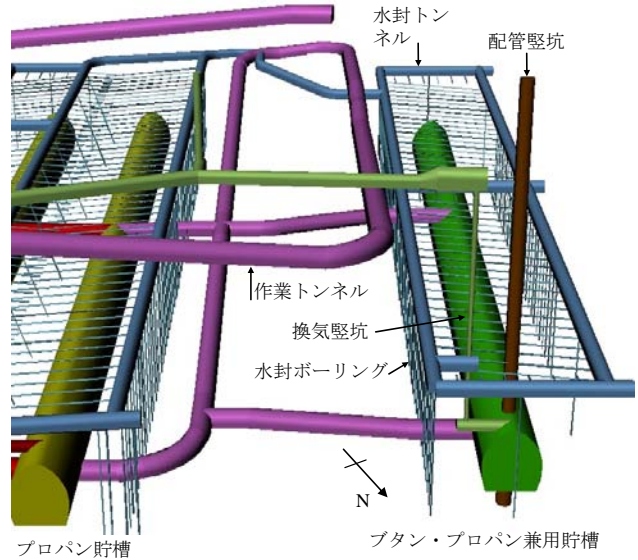


図-1 波方ブタン・プロパン兼用貯槽の概要

表-1 亀裂の強度定数と岩盤の密度

粘土介在	粘着力 (MPa)	摩擦角 (°)	岩盤の密度 (kg/m ³)
なし	0.16	40	2750
あり	0.0	30	

表-2 支保工の仕様

支保工	仕様
ロックボルト	直径: 24mm, 降伏強度: 227kN
吹付けコンクリート	厚さ: 12cm, せん断強度: 0.5MPa

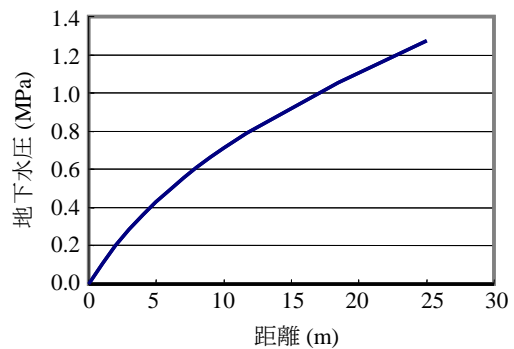


図-2 浸透流解析による壁面からの距離と地下水圧の関係

(1) 領域の分割

数値モデルは、貯槽周辺岩盤が亀裂によって分割された複数の岩盤ブロックとする。まず、初期モデルとして亀裂なしの貯槽モデルを作成し、考慮する亀裂平面によって初期モデルを分割する。亀裂平面で構成されるブロックを、ある平面で分割することを数値的に取り扱うことが出来れば、ブロックの数が増えても同じ方法で分割を繰り返し、考慮する全ての亀裂で分割された数値上のブロックモデルを得ることが出来る。

岩盤ブロックを構成する各面は、ブロックを構成する面を左回りあるいは右回りの順番で付された頂点の座標で認識される。モデルには貯槽があるので、ブロックを貫通する穴（貯槽）が開いている状態も考慮する必要がある。面に穴が開いている場合は、穴の形状を面と同じように記憶し、それが属する面の番号とそれが穴であることを併せて記憶する。数値上のブロックモデルは面のみで構成され、体積に関するデータは持たない。図-3を参考に、領域の分割の基本的な流れは以下のようなものである。

- ・ 亀裂面で、ブロックの各面を分割する (1→1a, 1bなど)。
- ・ 新たな平面群を、分割されたそれぞれのブロックに所属させる。
- ・ 亀裂面と元のブロックと交わる断面を、新たな面としてそれぞれの領域に追加する。

図-4に分割前の貯槽アーチモデルと4本の亀裂で分割した後のモデルを示す。

(2) キーブロックの抽出

最初のステップとして、貯槽に接しているブロックを抽出する。抽出されたブロックを、ブロックに含まれる全ての辺に沿って正方向および逆方向に移動させることを考える。移動させた後、他のブロックに干渉しているか否かを数値的に判断し、他のブロックと干渉しない方向が一つでも存在するブロックをキーブロックとする。

(3) キーブロックの安定性評価

まず、キーブロックのすべり線の方向を求める。すべり線の方向は、キーブロックが空洞側に、他のブロックに干渉されることなく移動できるベクトルの方向のうち、荷重ベクトルと最も近い角度の方向とする。荷重ベクトルは、重力と、キーブロックに作用する全ての面に垂直に作用する水圧力、地震時の場合は、それらに地震による慣性力(以下、地震荷重と呼ぶ)を加えた力の合力である。図-5に示すように、キーブロックの移動モードは落下、ブロックのすべりが1つの亀裂面上で生じる1面すべり、および2つの亀裂面上で生じる2面すべりに分類できる。すべり線が求まると、それに沿った力の釣り合いか

らブロックの安定性を評価する。

a) すべり力の計算

ブロック重量と地震荷重(地震時)のすべり線方向成分と、水圧の合力のすべり線方向成分の和とする。

$$F = F_m + F_w \quad (3)$$

$$F_m = W \cos \theta_1 \quad (4)$$

$$F_w = \sum_{i=1}^n P_i \cos \theta_2^i \quad (5)$$

ここに、 F はすべり力、 F_m はブロックの重量と地震荷重(地震時)のすべり線方向成分、 F_w は水圧の合力のすべり線に沿った成分、 W はブロックの重量と地震荷重との和、 θ_1 はすべり線と重力方向との角度、 P_i は亀裂面 i に作用する水圧、 θ_2^i は亀裂面 i に作用する水圧の方向(亀裂面 i の法線方向)とすべり線との角度である。

考慮する地震の方向は、水平方向については 360° を 10° 間隔で36方向について計算し、最も小さい安全率を地震時安全率とする。上下方向については下向きのみ考慮する。

b) 抵抗力の計算

抵抗力 T は亀裂の強度 T_c 、ロックボルトの強度 T_r 、および、吹付けコンクリートのせん断強度 T_s の和とする。また、亀裂の強度は式(7)で計算する。

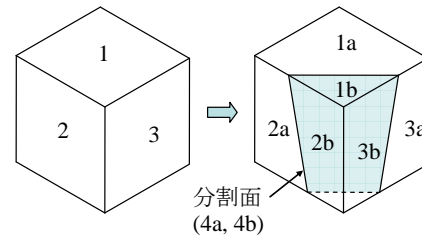


図-3 領域分割の例

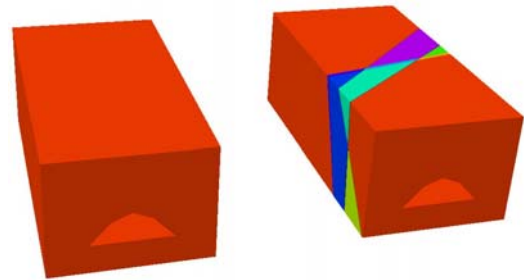


図-4 貯槽アーチモデルを4本の亀裂で分割した例

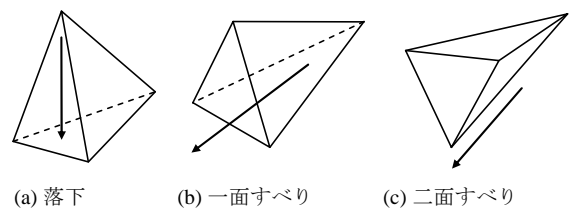


図-5 キーブロックのすべりモード

$$T = T_c + T_r + T_s \quad (6)$$

$$T_c = \sum_{i=1}^m A_i (q_i \tan \phi_i + c_i) \quad (7)$$

ここに、 A_i は亀裂面 i の面積、 q_i は垂直応力、 θ_i は摩擦角、 c_i は粘着力、 m は強度を考慮する亀裂面の数である。強度を考慮する亀裂面はすべり面のみとする。それ以外の亀裂面はブロックの移動に伴って開口するために考慮しない。亀裂面 i の垂直応力は式(8)によって計算する。

$$q_i = \frac{W \cos \theta_3^i + V_w \cos \theta_4^i}{A_e} \quad (8)$$

ここに、 θ_3^i は亀裂面 i の法線と重力方向との角度、 A_e は強度を持つ亀裂面の面積の合計、 V_w はブロック全体に作用する水圧の合力、 θ_4^i は亀裂面 i の法線と V_w との角度である。図-6に上式で用いた記号の説明を示す。

吹付けコンクリートの強度は式(9)により計算する。

$$T_s = L \tau_c t \quad (9)$$

ここに、 L は貯槽壁面に現れるブロックの周辺長、 τ_c は吹付けコンクリートのせん断強度、 t は吹付けコンクリートの厚さである。

ロックボルトの強度は表-2に示した一本あたりの強度に、キーブロックのすべりに対して有効なパターンボルトおよび増し打ちロックボルトの本数を乗じた値とする。キーブロックの安全率 F_s は式(10)で表される。

$$F_s = \frac{T}{F} \quad (10)$$

4. キーブロック安定性評価結果

(1) 評価の流れ

キーブロック安定性評価および対策の検討の流れを図-7に示す。評価の対象とする亀裂は、壁面に現れた長さが3m以上のものとした。これは、一辺3m以下の正四面体のキーブロックは吹付けコンクリートの支保のみで必要な安全率を満足することによる。本システムは入力した全ての亀裂でモデルを分割する方法であるため、ブロックは最小単位に分割され、複数のブロックが一体となった大きなブロックは抽出されない。そのため、このような複合したブロックが発生しそうな亀裂を抽出し、別途キーブロック解析を実施した。亀裂の抽出方法について図-8に示す。図は3本の亀裂の抽出方法について示しているが、検討においては4本の亀裂でキーブロックが発生することも考慮し、同じように抽出方法についてまとめて使用した。現場での壁面スケッチが終わると速

やかに亀裂展開図を作成し、全ての亀裂の走向傾斜および座標を入力するとともに、図-8の方法で亀裂を抽出し、キーブロック解析を実施した。

亀裂面は全て平面と仮定しているため、検出されたキーブロックと実際の亀裂展開図が整合しない場合がある。そこで、入力する亀裂の座標を検出されたキーブロックの位置に近付けるなどの検討を加え、亀裂展開図に整合したキーブロックを求めた。

所定の安全率を満たさないキーブロックは、安全率を満たすために必要な本数のロックボルトを安定地山に縫い付けることで対応した。必要な安全率について、地下発電所や大断面トンネルで実施されたキーブロック安定性評価では、必要な安全率を1.0または1.2と設定している³⁾⁴⁾⁵⁾。貯槽側壁部のキーブロックには、水圧の不確実性を考慮してこれらの値の大きい方として1.2、アーチ部のキーブロックには、水圧の作用によって落下モードのキーブロックが増えると予想されることから1.5とした。地震時における必要な安全率は側壁、アーチとも1.2とした。

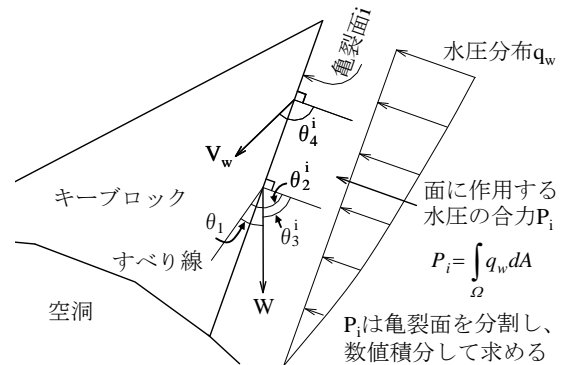


図-6 記号の説明

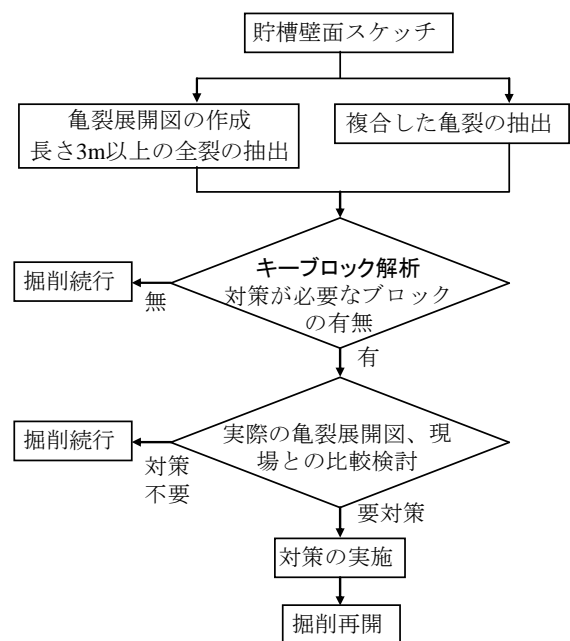


図-7 評価の流れ

(2) キーブロック解析

貯槽の北側におけるキーブロックの形状・配置を図-9に、全体のキーブロックの展開図を図-10に示す。図-10に示すように、貯槽全体で44個のキーブロックが検出された。キーブロックは北側(図-1の配管堅坑側)に多く検出され、最大のキーブロックは側壁部に検出された図-10の44番ブロックで、体積264m³、質量726tであった。このうち、所定の安全率を満たさず、増し打ちロックボルトを施したブロックはアーチ部に3つ、側壁部に1つであり、最も多くの増し打ちが必要となったブロックは上述の最大ブロックで、パターンボルト29本に加えて15本の増し打ちを施した。増し打ちロックボルトを施したキーブロックの体積および質量、増し打ち本数を表-3に示す。

5. まとめ

本検討では地震荷重および地下水圧を荷重として考慮できるキーブロック解析システムを構築し、現場にて運用した。掘削完了までに44個のキーブロックが検出され、4つのキーブロックが所定の安全率を満たさず、2つのキーブロックが安全率1以下であった。それらのブロックについては、すべりに対する耐力の不足分を、増し打ちロックボルトにより補った。その後、掘削完了に至った現在でも吹付けコンクリートに新たなクラックは見られず、安定性を維持している。

現場においては壁面観察に始まり、亀裂データの入力および亀裂の抽出、キーブロック解析、そして、その結果と実際の亀裂展開図との比較検討の流れを施工に遅れることなく実施することが出来た。以上から、本検討で開発したキーブロック安定性評価および増し打ちロックボルトの設計方法は、このような大規模地下空洞あるいは大断面トンネルの掘削に有効であると考えられる。

今後の課題として、キーブロック解析の精度は壁面観察における亀裂の位置および走向傾斜の計測に大きく依存していることから、施工サイクルを妨げることなく正確にこれらの数値を計測できる方法を開発する必要がある。

表-3 増し打ちロックボルトを施したキーブロック

キーブロック番号	体積(m ³)	質量(t)	増し打ちボルト(本)
3(アーチ)	45	124	2
6(アーチ)	3.5	9.63	1
32(アーチ)	11.9	32.7	2
44(側壁)	264	726	15

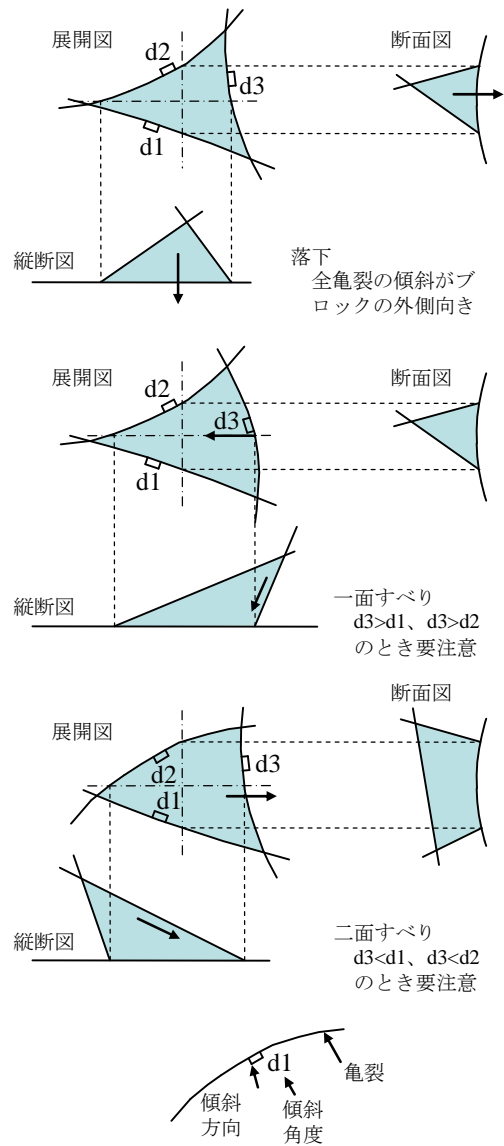


図-8 亀裂の抽出方法(3本の場合)

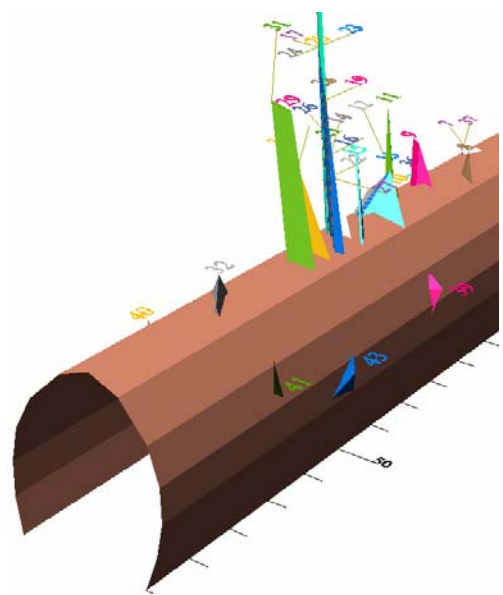


図-9 キーブロックの形状

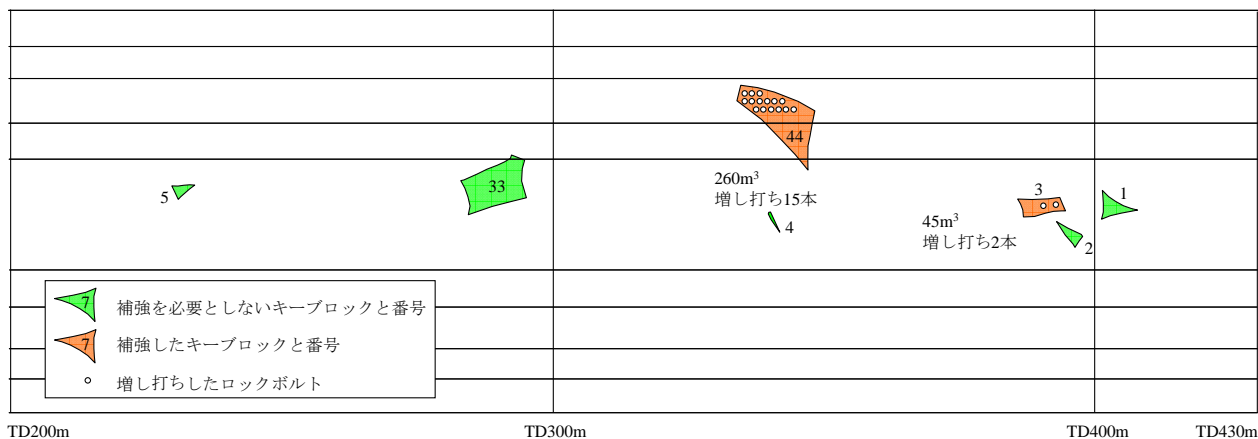
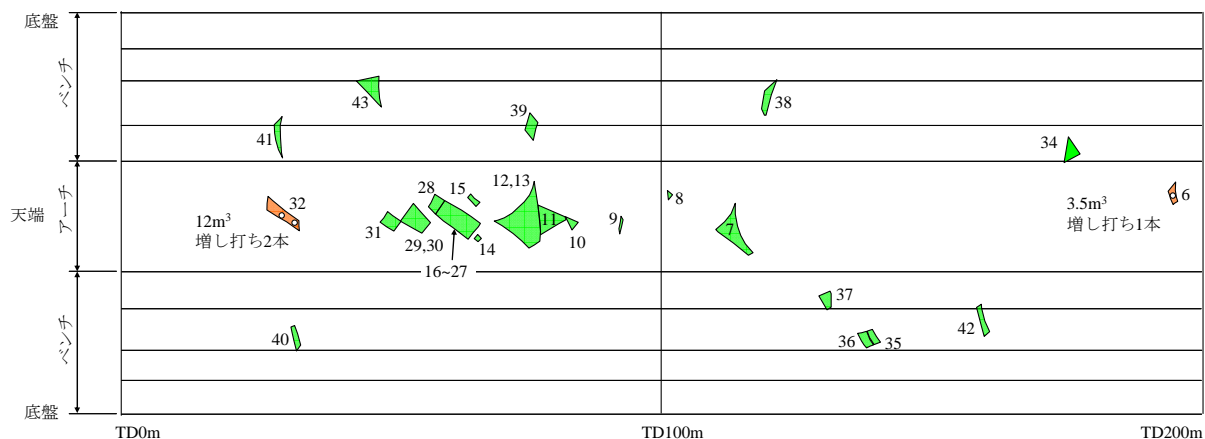


図-10 検出したキーブロックと対策工(貯槽内側から見た場合の配置, TD0mが北側)

参考文献

- 1) 畑 浩二, 中尾通夫, 北岸秀一: 岩盤内不連続面可視化システムの開発, 第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.199~204, 1998.
- 2) 日本ガス協会: 製造設備など耐震設計指針, ケーエスアイ, p.21, 1985.
- 3) 引間亮一, 山下雅之, 石山宏二, 稲葉 力, 石井洋司: トンネル坑口周辺の亀裂調査に基づいたキーブロックの抽出とその対策, 土木学会第 53 回年次学術講演会, p.194~195, 1998.
- 4) 猪阪昇治, 岩橋正規, 西村匠史, 田中義晴: 栗東トンネルにおけるキーブロック解析を用いた情報化施工, 土木学会第 55 回年次学術講演会, VI-71, 2000.
- 5) 南 浩輔, 久慈雅栄, 三宅克哉, 野村義孝: TBM 先進導坑壁面情報を用いた不連続面評価とキーブロック連続解析システムの開発, 土木学会第 56 回年次学術講演会, p.231~232, 2001.

APPLICATION OF KEY BLOCK ANALYSIS FOR EXCAVATION OF NAMIKATA LPG UNDERGROUND STORAGE CAVERN

Kenichi NAKAOKA, Koji HATA, Masayuki ICHIKAWA, Mitsumasa OGASAWARA, Toshio MAEJIMA, and, Hiroshi YAMAMOTO

We applied key block analysis system for excavation of Namekata LPG underground storage cavern. The storage facility is using the Water Sealing System, so during excavation, rock around the cavern was constantly improved by grouting to keep ground water pressure level high. It is necessary to take into account water pressure as load acting on key block when stability is evaluated. So we made key block analysis system that can consider water pressure, and applied to storage cavern excavation. As a result, 44 key blocks was detected, and 4 blocks was reinforced by additional rock bolts. The excavation was safely carried out all the whole, and it become clear that the system was applicable to large scale cavern.