

地下空洞掘削時におけるキーブロック解析の適用について

KEY BLOCK ANALYSIS DURING EXCAVATION OF UNDERGROUND ROCK CAVERN

大西 有三*・手塚 昌信**・田中 誠***・○西村 毅****
Yuzo OHNISHI, Masanobu TEZUKA, Makoto TANAKA and Tsuyoshi NISHIMURA

Block Theory, which can find falling or sliding blocks by intersecting structural discontinuity, was applied for an excavation of large scale underground rock cavern. This paper proposed the procedure how to observe the excavation surface, to search key blocks and then to design support system. This method was executed during the excavation of Okutataragi underground power station, and detected key blocks were supported by shotcrete, rock bolting or rock anchor. It is shown that the proposed method based on block theory can help to reduce an amount of supporting system and to design the structures of rock cavern properly in discontinuous rock mass.

1. ま え が き

我が国では過去数十年に渡り、地下発電所空洞や石油備蓄基地などの大規模地下空洞が岩盤中に多数建設されている。これらの地下空洞の安定性を確保し、かつ経済的、合理的な施工を実施するための研究も実施され、多くの実績をあげている。しかしながら、岩盤構造の複雑さから事前に予想しなかった空洞の変形や支保の変状が施工中に生じ、追加の補強対策工の実施を余儀なくされた事例も多い。その原因としては、岩盤中には断層・破砕帯や節理などの様々な規模の不連続面が多数存在し、これらの不連続面の分布形態やその力学的な性状を、事前調査の時点で十分に把握し対策を講じることが困難であることが考えられる。この岩盤の不連続性に関する研究は、岩盤力学の中でも重要な分野であるといえる。

このような不連続性岩盤の力学的な安定性を論じる手法として Shi と Goodman¹⁾によりキーブロック理論が提案されている。これは岩盤中に存在する不連続面と掘削面により囲まれ、滑動あるいは崩落する可能性のある岩盤ブロックを見つけ出し、そのブロックの安定性を論じ必要ならば補強工の設計を行うものである。

本研究は、キーブロック理論を施工現場において日常的な施工管理手法として用いるための、切羽観察からキーブロックの検索、安定計算に至る一連のシステムを開発し、そのシステムを実際の地下空洞の施工現場において運用した結果について述べたものである。

2. キーブロック解析システムの運用方法

2.1 運用実施地点の概要²⁾

今回キーブロック解析を適用した地下空洞は、関西電力株式会社奥多々良木発電所増設工事の地下発電所空洞として建設されるものである。奥多々良木発電所は昭和49年に運転を開始した最大出力121.2万kWの純揚水式発電所であり、今回建設されるのは既設の水路・発電所に隣接した増設の水路および地下発電所（出力72

* 正会員 工博 京都大学教授 工学部土木システム工学科

** 正会員 関西電力株式会社 奥多々良木発電所増設工事建設所 所長

*** 正会員 京都大学助手 工学部土木システム工学科

**** 正会員 ハザマ 技術研究所

万 kW) である。増設発電所地下空洞の断面図を図-1に示す。発電所空洞は幅 25m、高さ 47m の弾頭型形状の断面を有し、支保工は NATM の設計手法によっており、吹き付けコンクリートとロックボルトおよび PS アンカーにより実施している。キープロック解析と観察、計測による情報化施工により、施工中に必要な応じてロックボルトや PS アンカーで補強を行い、必要最小限の設計を行うことを基本としたため、PS アンカーの必要本数と導入力は、従来の地下発電所空洞に比べて大幅に減少したものとなっている。

2.2 地質調査、試験結果

地下発電所周辺の地質は大部分が流紋岩類で一部に流紋岩質凝灰岩およびひん岩の岩脈が見られる。断層、破碎帯は比較的小規模なものしか確認されておらず、破碎帯幅は最大で 60cm 程度であるが平均すると 1～10cm である。岩盤等級は概ね B～C₄ 級と良好であり、ひん岩岩脈の貫入面近傍や、破碎帯や変質を受けた狭い範囲に、C₄ 級以下の劣化した岩盤が分布している。

事前の不連続面調査は、空洞建設地点周辺の試掘坑および換気立坑において実施し、不連続面の幾何学的特性（方向性、長さ、間隔、粗度、亀裂の分布密度や卓越方向）について調査した。その結果、不連続面の分布は、傾斜角は鉛直に近く、走向は南北系と東西系の 2 種類からなる卓越方向が存在することがわかった。

また、安定計算に用いる不連続面の物性値を決定するために、現場におけるブロックサンプリングならびにボーリングコアを用いて多段圧縮三軸試験、一面せん断試験を実施した。それとともに各試験結果の妥当性を評価するために、傾斜試験および研磨した流紋岩の一面せん断試験を補助的に実施した。これらの試験結果から安定解析に用いる物性値として、粘着力(c)を 0.0Pa、内部摩擦角(ϕ)を 32.4° とした。

2.3 キープロック解析の運用体制

キープロック解析を効率的に実施するために、日常管理とステップ管理という 2 つの手法を導入した。これは、キープロック解析を実施工で運用する場合における、解析の迅速性と正確性に対応した考え方に基づくものである。

切羽近傍に出現するキープロックは、掘削直後の状態が最も危険であり、施工が進み、吹き付けやアンカー等の補強工が実施されるに従い安定性は高まると考えられる。従って、切羽近傍に存在するキープロックに対しては、その存在をできるだけ早く察知することにより、補強対策を行う必要がある。このため、日常管理においては 1 回分の切羽観察結果を基に、切羽と切羽周辺の空洞部分の解析を実施する。解析は数時間程度で終了し、掘削サイクル内あるいは次掘削サイクル中に対策が実施できることを目標とするものであり、リアルタイムの管理手法となる。

一方、ステップ管理は、日常管理によって作成された不連続面データを統合して解析を行い、日常管理では検出できない空洞全体に対する比較的大規模なキープロックを検出するためのものであり、空洞掘削におけるいくつかの段階において実施される。図-2 は、これら日常管理とステップ管理のフローを示したものである。

地質観察は、発破の後のズリ出し、こそくが終了した時点で実施される。微小なブロックは掘削直後の 1 次吹き付け程度で十分な安全率を有し解析する必要がないことから、数 m 規模以上の主要な不連続面につい

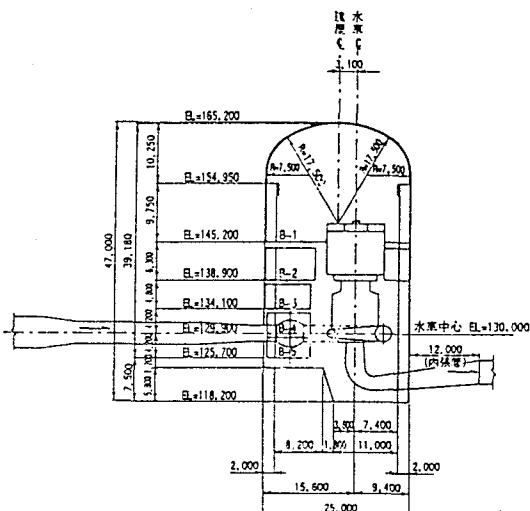


図-1 発電所空洞の断面図

てのみ、スケッチと走向傾斜の測定を実施する。

各不連続面は、観察シートより始点、終点の座標と走向傾斜を読みとり、入力データを作成し、キーブロック解析プログラムを実行する。プログラムは、切羽面でのキーブロックを検出する平面用プログラムと、アーチ面を含んだ空洞周囲のキーブロックを検出するトンネル用プログラムからなっている。いずれのプログラムもすべての処理がパソコン画面を見ながら対話形式で実施できるようになっており、現場事務所において解析することができる。

キーブロック解析プログラムにより、移動可能ブ

ロックを検出し、ブロックの大きさ、形状等の幾何学情報を計算する。移動可能ブロックのうち、安定計算をする必要のない安定ブロックおよびブロックの掘削面の面積が 1m^2 以下あるいはブロック重量が 3t 以下のものを除いたブロックについてキーブロックの安定解析を実施する。

図-2におけるキーブロック判定フローの詳細を図-3に示した。図-3の各ステップでの安定計算の内容は表-1に示してある。ここに示すように安定解析は、考慮する抵抗に応じた実施されるが、安定計算の各段階において安全率の計算結果に対する判断基準により打ち切られ、必要ならば対策工が実施される。

安定計算①では、不連続面抵抗のみでの安全率とこれに吹き付けのせん断抵抗を考慮した場合の安全率が計算される。ここで必要安全率を満たしていないものは、追加補強の対策を必要とするキーブロックであり、次の項目へ進む。安定計算②と③は、対策工として追加の増し吹き付けを実施する場合と、追加のロックボルト工を実施する場合である。どちらの対策工を実施するかは、例えば多数のキーブロックが集合体で存在する場合には増し吹き付け、ブロックが単体で存在する場合にはロックボルトを用いるというように使い分ける。また、施工サイクルのなかで次工程として実施しやすい方法を選ぶこともできる。安定計算⑤は吹き付け、あるいはロックボルトでは対応できない場合であり追加のPS工に対する安定計算を実施する。

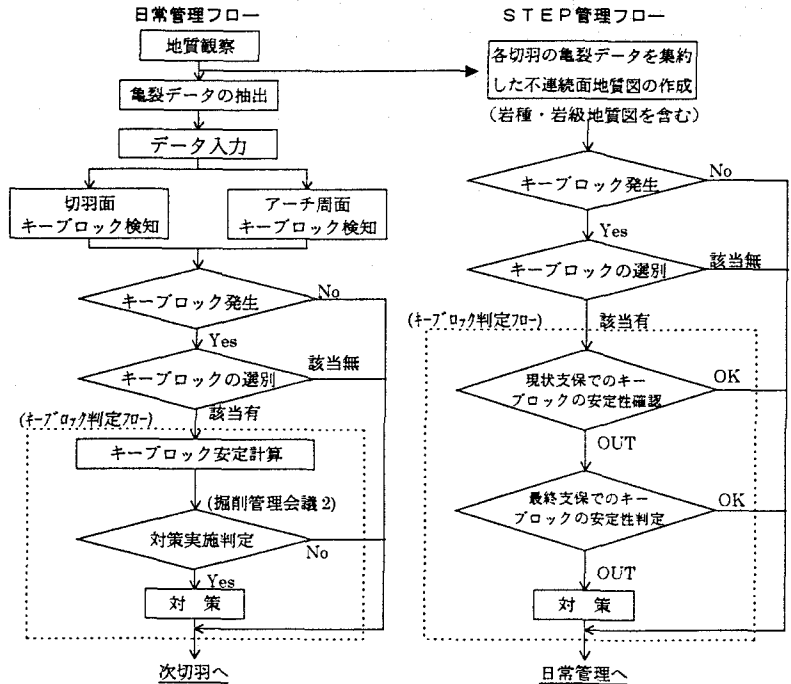


図-2 キーブロック解析のフロー

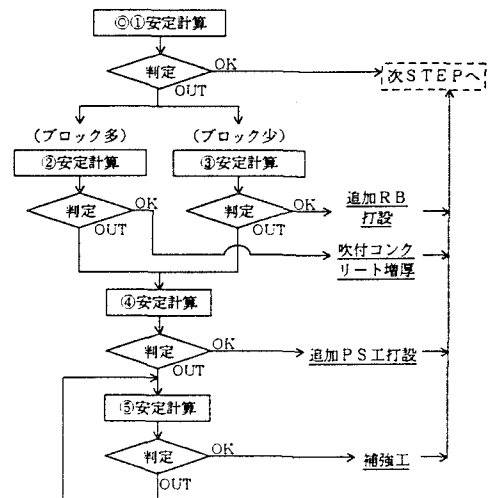


図-3 キーブロック安定判定フロー

表-1 安定解析の判断基準

対策メニュー	判定基準 (対策OKとなる基準)	物性値
◎ 吹き付けCなし	$F_s \geq 3$	$c = 0, \phi = 32.4^\circ$ *1)
① 吹き付けCのみ($t=30$ or 8cm)	$F_s \geq 3$	$\tau_c = 4.5 \text{ kgf/cm}^2$
② 吹き付けCのみ($t=16\text{cm}$)		(試験結果2時間強度)
③ 吹き付けC + 追加RB	- 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $F_t \geq 2.5$ $\min(0.6T_{tu}, 0.75T_{ty}) \geq W$ - RBと注入材との許容付着強度に対し $F_t \geq 1$	$C_t = 20 \text{ kgf/cm}^2$ *2) $\sigma_{tu} = 5,000 \text{ kgf/cm}^2$ $\sigma_{ty} = 3,520 \text{ kgf/cm}^2$ (SD35) $C_s = 16 \text{ kgf/cm}^2$ *3)
④ 吹き付けC + (追加RB) + 追加PS		$C_t = 20 \text{ kgf/cm}^2$ *2) $P_u = 98.7 \text{ t}, P_y = 84.0 \text{ t}$ (F100) $C_p = 16 \text{ kgf/cm}^2$ *3)
⑤ 補強工	- 岩盤と注入材間の極限引抜力に対し $F_t \geq 2.5$ $\min(0.6T_{tu}, 0.75T_{ty}) \geq W$ - PSと注入材との許容付着強度に対し $F_t \geq 1$	

*1) 試験結果より *2) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」 硬岩の平均値より

*3) 「グラウンドアンカー設計・施工基準」より

3. キーブロック解析結果

アーチ掘削時においては、導坑掘削および側壁拡張の各サイクルにおいて切羽観察を実施し、前述のフローにしたがってキーブロック解析を実施した。切羽観察は、施工に関わる地質状況の把握とキーブロック解析のための不連続面データの取得の両方に主眼をおいて実施した。作業は、発破・ずり出し・姑息作業が終わった後30分程度で実施し、施工工程を妨げないようにした。

切羽観察シートからキーブロック解析の入力データとして不連続面の座標と走向傾斜を求める。キーブロック解析の結果、補強対策工が必要なものに対しては安定計算シートが出力される。図-4に安定計算シートの例を示す。安定計算シートには、キーブロックの3次元形状が空洞上に図示され、視覚的に形状が認識できる。また、同図中にはキーブロックを形成する不連続面の情報やキーブロックの大きさ、重量等の幾何学的情報および、安定計算の結果が出力され、これをもとに補強工の種類、打設位置、本数等の検討を行うこ

	アーチ平面図 ←切羽進行方向 視点方向:010	3次元形状																																								
キー ブ ロ ッ ク 形 状																																										
キー ブ ロ ッ ク 情 報	<table border="1"> <caption>走向傾斜データ</caption> <thead> <tr> <th>不連続面</th> <th>走向 (deg)</th> <th>傾斜 (deg)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>不連続面1</td> <td>N14E</td> <td>80N</td> </tr> <tr> <td>不連続面2</td> <td>N40E</td> <td>85S</td> </tr> <tr> <td>不連続面3</td> <td>N50W</td> <td>60N</td> </tr> <tr> <td>掘削面</td> <td>導坑アーチ</td> <td>側壁()</td> </tr> <tr> <td>ナベリ方向</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	不連続面	走向 (deg)	傾斜 (deg)	不連続面1	N14E	80N	不連続面2	N40E	85S	不連続面3	N50W	60N	掘削面	導坑アーチ	側壁()	ナベリ方向			<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">ナベリモード</th> </tr> <tr> <th>○ 落 下</th> <th>平面ナベリ / くまびナベリ</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td colspan="2"> <table border="1"> <caption>キーブロック形状</caption> <tr> <td>ブロック高さ h (m)</td> <td>10.49</td> </tr> <tr> <td>ブロック体積 V (m³)</td> <td>141.36</td> </tr> <tr> <td>ブロック重量 W (ton)</td> <td>375.34</td> </tr> <tr> <td>掘削面での面積 Sb (m²)</td> <td>43.95</td> </tr> <tr> <td>掘削面での周長 L (m)</td> <td>31.00</td> </tr> </table> </td> </tr> <tr> <td colspan="2"> <table border="1"> <caption>ナベリ面面積</caption> <tr> <td>ナベリ面1 S1 (m²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ナベリ面2 S2 (m²)</td> <td></td> </tr> </table> </td> </tr> </tbody> </table>	ナベリモード		○ 落 下	平面ナベリ / くまびナベリ	<table border="1"> <caption>キーブロック形状</caption> <tr> <td>ブロック高さ h (m)</td> <td>10.49</td> </tr> <tr> <td>ブロック体積 V (m³)</td> <td>141.36</td> </tr> <tr> <td>ブロック重量 W (ton)</td> <td>375.34</td> </tr> <tr> <td>掘削面での面積 Sb (m²)</td> <td>43.95</td> </tr> <tr> <td>掘削面での周長 L (m)</td> <td>31.00</td> </tr> </table>		ブロック高さ h (m)	10.49	ブロック体積 V (m³)	141.36	ブロック重量 W (ton)	375.34	掘削面での面積 Sb (m²)	43.95	掘削面での周長 L (m)	31.00	<table border="1"> <caption>ナベリ面面積</caption> <tr> <td>ナベリ面1 S1 (m²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ナベリ面2 S2 (m²)</td> <td></td> </tr> </table>		ナベリ面1 S1 (m²)		ナベリ面2 S2 (m²)	
不連続面	走向 (deg)	傾斜 (deg)																																								
不連続面1	N14E	80N																																								
不連続面2	N40E	85S																																								
不連続面3	N50W	60N																																								
掘削面	導坑アーチ	側壁()																																								
ナベリ方向																																										
ナベリモード																																										
○ 落 下	平面ナベリ / くまびナベリ																																									
<table border="1"> <caption>キーブロック形状</caption> <tr> <td>ブロック高さ h (m)</td> <td>10.49</td> </tr> <tr> <td>ブロック体積 V (m³)</td> <td>141.36</td> </tr> <tr> <td>ブロック重量 W (ton)</td> <td>375.34</td> </tr> <tr> <td>掘削面での面積 Sb (m²)</td> <td>43.95</td> </tr> <tr> <td>掘削面での周長 L (m)</td> <td>31.00</td> </tr> </table>		ブロック高さ h (m)	10.49	ブロック体積 V (m³)	141.36	ブロック重量 W (ton)	375.34	掘削面での面積 Sb (m²)	43.95	掘削面での周長 L (m)	31.00																															
ブロック高さ h (m)	10.49																																									
ブロック体積 V (m³)	141.36																																									
ブロック重量 W (ton)	375.34																																									
掘削面での面積 Sb (m²)	43.95																																									
掘削面での周長 L (m)	31.00																																									
<table border="1"> <caption>ナベリ面面積</caption> <tr> <td>ナベリ面1 S1 (m²)</td> <td></td> </tr> <tr> <td>ナベリ面2 S2 (m²)</td> <td></td> </tr> </table>		ナベリ面1 S1 (m²)		ナベリ面2 S2 (m²)																																						
ナベリ面1 S1 (m²)																																										
ナベリ面2 S2 (m²)																																										
安 定 計 算 結 果	<table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">①不連続面耐力による評価</th> <th rowspan="2">判定</th> <th rowspan="2">岩盤密度 2.6 kg/cm³ 粘着力(c) 0.0 kgf/cm² 摩擦角(φ) 32.4°</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>ブロックナベリ力(t)</td> <td>375.00</td> <td rowspan="3">✕</td> </tr> <tr> <td>不連続面耐力(t)</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td>安全率</td> <td>0.00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">②吹付コンクリート耐力による評価</td> <td rowspan="3">✕</td> <td rowspan="3">吹付厚 8.0 cm せん断強度 4.5 kgf/cm²</td> </tr> <tr> <td>吹付コンクリート耐力(t)</td> <td>112.00</td> </tr> <tr> <td>安全率</td> <td>0.30</td> </tr> <tr> <td colspan="2">③吹付コンクリート+ロックボルト</td> <td rowspan="2">21 (本)</td> <td rowspan="2">RB許容耐力 12.9 t/本</td> </tr> <tr> <td>必要導入力(t)</td> <td>283.00</td> </tr> <tr> <td colspan="2">④吹付コンクリート+PS工</td> <td rowspan="2">5 (本)</td> <td rowspan="2">PS許容耐力 59.2 t/本</td> </tr> <tr> <td>必要導入力(t)</td> <td>283.00</td> </tr> </tbody> </table> 結論：追加RBの本数が多い為、PS工の検討の必要有り		①不連続面耐力による評価		判定	岩盤密度 2.6 kg/cm³ 粘着力(c) 0.0 kgf/cm² 摩擦角(φ) 32.4°	ブロックナベリ力(t)	375.00	✕	不連続面耐力(t)	0.00	安全率	0.00	②吹付コンクリート耐力による評価		✕	吹付厚 8.0 cm せん断強度 4.5 kgf/cm²	吹付コンクリート耐力(t)	112.00	安全率	0.30	③吹付コンクリート+ロックボルト		21 (本)	RB許容耐力 12.9 t/本	必要導入力(t)	283.00	④吹付コンクリート+PS工		5 (本)	PS許容耐力 59.2 t/本	必要導入力(t)	283.00									
①不連続面耐力による評価		判定	岩盤密度 2.6 kg/cm³ 粘着力(c) 0.0 kgf/cm² 摩擦角(φ) 32.4°																																							
ブロックナベリ力(t)	375.00			✕																																						
不連続面耐力(t)	0.00																																									
安全率	0.00																																									
②吹付コンクリート耐力による評価		✕	吹付厚 8.0 cm せん断強度 4.5 kgf/cm²																																							
吹付コンクリート耐力(t)	112.00																																									
安全率	0.30																																									
③吹付コンクリート+ロックボルト		21 (本)	RB許容耐力 12.9 t/本																																							
必要導入力(t)	283.00																																									
④吹付コンクリート+PS工		5 (本)	PS許容耐力 59.2 t/本																																							
必要導入力(t)	283.00																																									

図-4 キーブロック安定計算シート

とになる。同図の例では、ロックボルトあるいは PS アンカーの補強対策が必要となっており、ブロック高さが 10m と高く、ロックボルトでは本数が多くなることから、追加 PS 工が 5 本施工された。

このようにしてアーチ部において追加対策工を必要としたキープブロックを図-5 に示す。対策したキープブロックは計 28 個あり、うち落下型は 9 個、平面すべり型は 9 個、くさびすべり型は 10 個で、それぞれ前述したフローに従い対策を実施した。キープブロック規模は平均で 70m^3 、183t、最大で 500m^3 、1,300t であった。また、対策したキープブロックは、追加ロックボルトによるものが 19 個、追加吹き付けコンクリートによるものが 7 個、追加 PS 工によるものが 1 個、追加吹き付けコンクリートと追加 PS 工の併用によるものが 1 個であり、集計すると追加ロックボルト 69 本、追加吹き付けコンクリート 486m^2 、追加 PS 工 12 本となった。

その結果、アーチ部における、PS 工軸力や地中変位計測結果は、事前の予測計算の範囲に収まっており、空洞の安定性は確保されていると判断された。

4. あ と が き

本研究の目的は大規模地下空洞の掘削時においてキープブロック解析を運用することにより、補強が必要な部分について重点的に補強工を実施し、それ以外の部分については軽い支保設計とし、全体としての支保の数量を低減し経済的かつ合理的な地下空洞の設計・施工を実現することである。そこで、キープブロック解析を運用するためのシステムの提案を行い、大規模地下空洞の実施工に適用した。その結果、発見されたキープブロックに対して、適切な補強工の設計・施工を実施することができ、より合理的な地下空洞の施工が可能となった。

今後さらに本手法を有効なものにするために以下のような課題が挙げられる。

キープブロック解析の結果は、入力する不連続面情報の精度に大きく左右される。したがって施工時の限られた時間内により正確で詳細な切羽観察を行う方法および、掘削毎に得られる観察結果からデータの追加、修正を適切に実施できる手法が必要となる。

また、安定解析の結果は不連続面の強度特性に左右されるが、現時点では標準的な不連続面の強度特性の評価手法はなく、今後試験方法とその評価方法についての手法の確立が待たれる。

参考文献

- 1) Goodman, R.E. and Shi, Gen-hua : Block Theory and Its Application to Rock Engineering, Prentice-Hall, 1985
- 2) 手塚昌信, 吉舎廣幸, 美野誠一 : 奥多々良木発電所工事の設計と施工, 電力土木, No.260, pp51-59, 1995

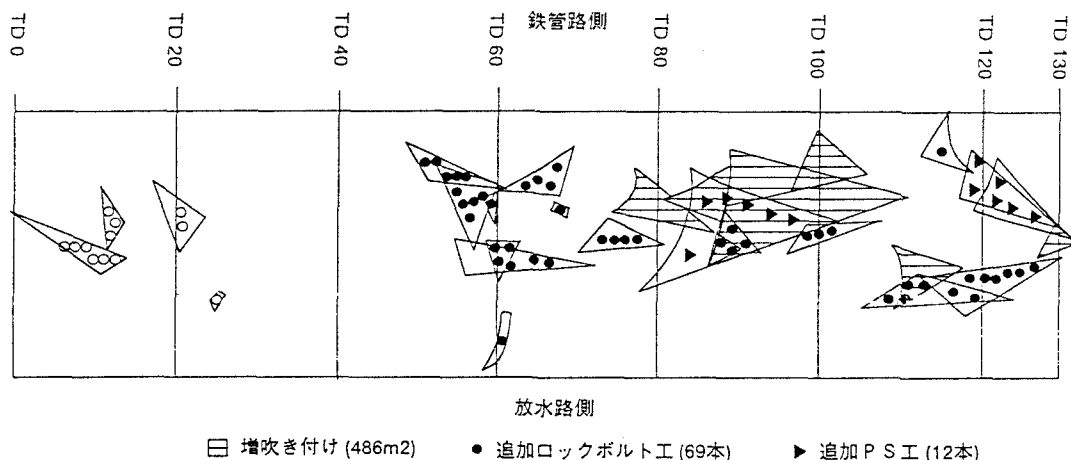


図-5 対策工を必要としたアーチにおけるキープブロック