

高レベル放射性廃棄物処分におけるセメントの使用を極力抑えた岩石利用セグメント支保工

多田 浩幸 (技術研究所) 熊坂 博夫 (技術研究所) 齋藤 亮 (技術研究所) 中谷 篤史 (技術研究所) 郷家 光男 (土木技術本部) 石井 卓 (技術研究所)

Rock Segments for Reducing the Amount of Cement Used on High-level Radioactive Waste Disposal

by Hiroyuki Tada, Hiroo Kumasaka, Akira Saito, Atsushi Nakaya, Mitsuo Gohke and Takashi Ishii

Abstract

Methods for constructing tunnels using the minimum quantities of cement-type support materials in high-level radioactive waste disposal facilities have been developed. Research and development concerning the technical aspects of the formation of rock segments using low alkali mortar have been conducted. This study examined the mechanical characteristics of rock segments and backfill materials and analyzed the stability of the drift that is supported by the rock segments and gravel backfill. The results confirmed the technical aspects of the formation of the rock segments and the effectiveness of the planned efforts to further reduce the amount of cement used.

概要

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設に関し、セメント系材料の使用を極力抑えた坑道の支保工として、低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工を提案して、その成立性や有効性を示すための研究開発を進めている。本報では、低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工と裏込め材の力学特性値を室内試験により取得し、得られた物性値を用いて坑道の安定性に関する検討を実施した。検討結果より、従来の吹付けコンクリートを主体とした支保工に対して、セメント使用量を大幅に低減し、かつ低アルカリ性モルタルを利用することにより、セメント影響のさらなる低減化を図った岩石利用セグメント支保工の力学的な成立性、有効性を確認した。

§1.はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分施設において、支保工やグラウトに用いられることが想定されているセメント成分は地下水に溶出し高アルカリ環境を生じさせる。このような高アルカリ環境は緩衝材や埋め戻し材に使用されるベントナイトや周辺岩盤に変質を生じさせ、水みち形成や地下水の組成変化など長期のバリア性能に影響を及ぼすことが懸念されている。このため、そのような影響を低減する新たな支保材料の開発やセメントの使用量を低減する施工方法等の開発が必要となってきている。

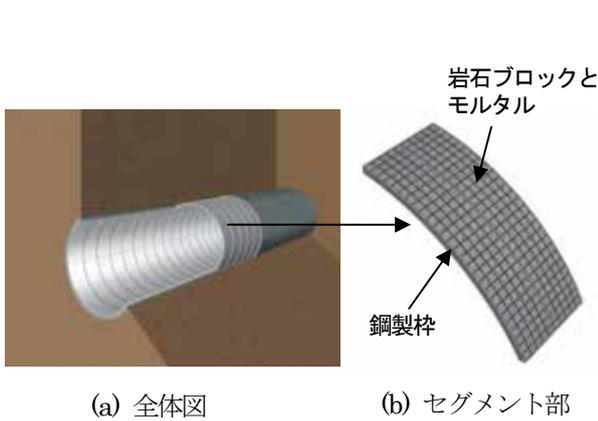
著者らは、セメント系支保材料の使用を極力抑えた坑道の新しい構築方法として、低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工の開発に取り組み、その成立性や有効性に関する検討を進めている。本報

では、室内試験により取得した低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工および坑道とセグメントとの間に充填される裏込め材の力学特性値を用いて行った坑道の安定性の検討結果を報告する。

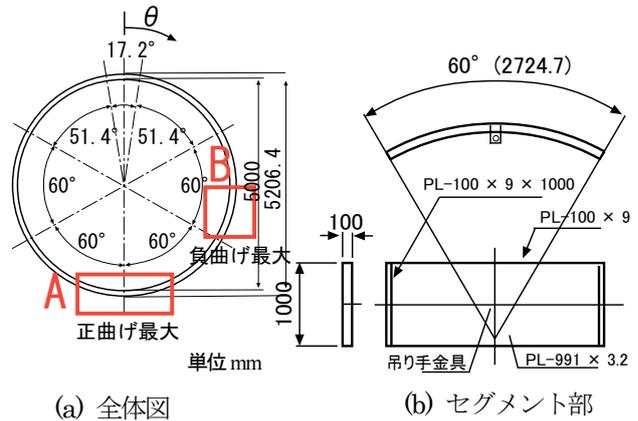
§2.岩石利用セグメント支保工の特長

岩石利用セグメント支保工は図-1に示すように鋼製枠と花崗岩等の岩石ブロックと、その間をモルタルで充填した複合セグメントを利用した支保工である。その特長は以下のようである。

- ①主要な材料として岩石ブロックを利用することよりセメント使用量を低減することが可能である。
- ②岩石の高剛性を活かしたセグメントであることから設置直後から大きな支保効果が期待でき、軟岩系岩盤



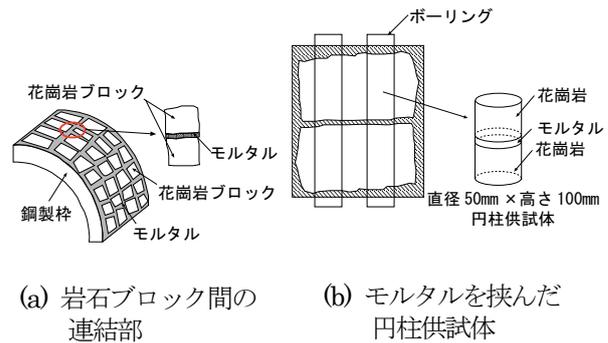
(a) 全体図 (b) セグメント部
図-1 岩石利用セグメント支保工の概要図



(a) 全体図 (b) セグメント部
図-2 岩石利用セグメント支保工の断面仕様

における大深度の坑道建設に有効である。

- ③高剛性のセグメントであるから部材厚を薄くすることができ、掘削量の低減と施工速度の向上が期待できる。
- ④一般に流通している安価な岩石材料を使用することによりコストの縮減が期待できる。



(a) 岩石ブロック間の連結部 (b) モルタルを挟んだ円柱供試体
図-3 岩石・モルタル複合材料の概要図

§3.支保部材仕様の事前検討

軟岩系岩盤の地層処分施設に適用した場合を想定した。図-2 に示すように、セグメントの部材仕様を鋼製枠の主桁高さ 100mm、スキンプレート厚 3.2mm、幅 1,000mm とし、セグメントの断面仕様を内径 5,000mm、幅 1,000mm、厚さ 100mm に設定した。この断面に対し、坑道の安定解析を行った。解析条件は「第 2 次取りまとめ」¹⁾の軟岩系岩盤の地山条件の SR-C の物性値を設定した。深度は 500m とした。セグメント物性として岩石とモルタルの等価弾性係数を岩石単体の弾性係数に対してモルタル単体の弾性係数の影響を考慮して 10GPa と仮定し、セグメントに発生する軸力を求めた。その結果、セグメントの圧縮強さは 21.5MPa 以上が必要であることが示された²⁾。

§4.低アルカリ性モルタルを用いた複合材料試験

4.1 岩石・モルタル複合材料の試験方法

岩石利用セグメントは、鋼製枠にレンガ状の岩石ブロックを配置して岩石ブロック間のすき間にモルタルを充填することでセグメントとして一体化を図る構造である(図-3)。この構造について、モルタルを介在した岩石ブロックが§3 で述べた支保部材仕様の検討で得られた所要の圧縮強さ(21.5MPa)と弾性係数(10GPa)を有していることを明らかにする必要がある。

表-1 試験ケース

ケース No	モルタル配合ケース	W/B (%)	水 W	単体量 (kg/m ³)			砂 S	減水剤
				結合材 : B				
				OPC	SF	FA		
ケース 1	普通モルタル	65%	240	369	0	0	1685	3.69
ケース 2	低アルカリ性モルタル	45%	400	356	178	356	638	17.78
ケース 3		45%	400	356	178	356	638	7.11

る。

本試験では、モルタルを介在させた岩石の一軸圧縮試験を行い、強度・変形について調べた。また、一軸圧縮試験と同時にモルタルの pH 測定も実施した。

一軸圧縮試験では、図-3 に示すような岩石ブロック間の連結部を対象として、モルタルを挟んだ円柱供試体(直径 80mm、高さ 160mm)を作製して試験を行った。試験ケースは、モルタルの種類を条件として設定した。モルタルは、普通モルタルと低アルカリ性モルタルを用いた。試験ケースを表-1 に示す。ケース 1 は普通ポルトランドセメント(OPC)と砂(S)による普通モルタルで、セメントと砂の配合比を容積比で 1:4 とした。ケース 2 と 3 は低アルカリ性モルタルを用いた場合で、シリカフェーム(SF)とフライアッシュ(FA)を加え、ポズラン反応によるセメント水和物の低アルカリ性を指向したものである³⁾。ケース 2、3 はそれぞれ減水剤を結合材(B)に対して 2%、0.8%とした。また、pH については、粉碎したモルタルを蒸留水に浸漬し、浸漬液からガラス電極法にて測定した。

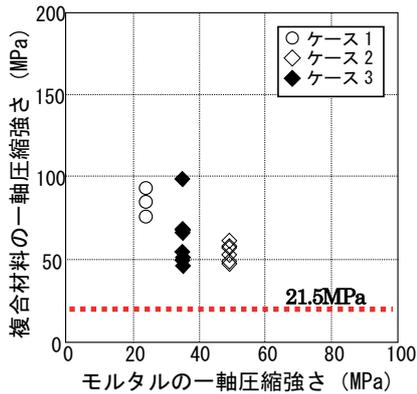


図-4 一軸圧縮強さ

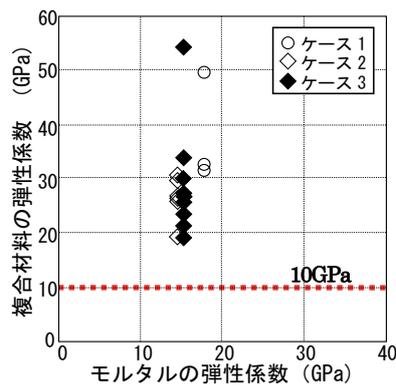


図-5 弾性係数

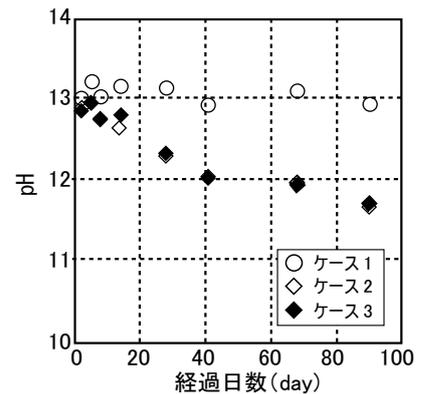


図-6 pH の変化

4.2 岩石・モルタル複合材料の試験結果

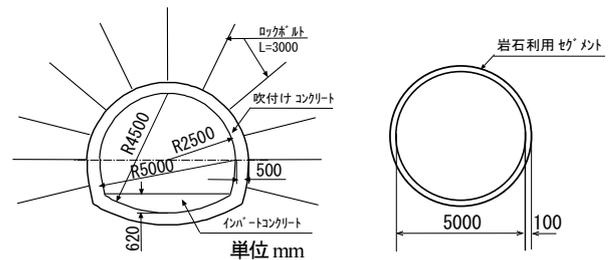
複合材料とモルタルの一軸圧縮強さの関係を図-4に、複合材料とモルタルの弾性係数の関係を図-5に示す。どのケースにおいても、所要の強度 21.5MPa と弾性係数 10GPa を上回った。次に、モルタルの pH の変化を図-6 に示す。図-6 より、浸漬 90 日経過した時点で低アルカリ性モルタルのケースの pH は 11.7 程度であり、低下傾向にあることが認められた。

4.3 セメント使用量の検討

「第2次取りまとめ」¹⁾に示された軟岩系岩盤の堅置き処分の坑道を対象にして、図-7に示す吹付けコンクリートとロックボルトによる支保工と岩石利用セグメントのセメント使用量を算定した。処分坑道の断面仕様およびレイアウトを参考にして、コンクリート使用量を算出し、吹付けコンクリートの単位セメント量を 350kg/m^3 、普通モルタルの単位セメント量を 369kg/m^3 、低アルカリ性モルタルの単位セメント量を 356kg/m^3 として、各支保工のセメント使用量に換算した。表-2にセメント使用量の比較を示す。表-2より、吹付けコンクリートとロックボルトによる支保工のセメント使用量に対して、岩石利用セグメントのセメント使用量は $1/20$ (5%) となった。なお、低アルカリ性モルタルを使用した場合、低アルカリ性モルタルの単位セメント量は普通モルタルの単位セメント量よりも少なくなる。また、図-6より低アルカリ性モルタルでは普通モルタルよりも pH が低下傾向にあることから、さらにアルカリ性の影響の低減が期待できることを示している。

§5. 岩石利用セグメントの曲げ試験

5.1 試験方法



(a) 現在検討されている支保工 (b) 岩石利用セグメント

図-7 軟岩系岩盤堅置き処分の坑道断面

表-2 セメント使用量の比較

支保形式	コンクリート使用量 (m ³)	セメント使用量 (ton)
吹付け+ロックボルト	2,861,059	1,001,371
岩石利用セグメント (普通モルタル使用)	132,822	49,011
岩石利用セグメント (低アルカリ性モルタル使用)	132,822	47,285

岩石利用セグメントを円形に組み上げた際に一時的に自重によりセグメントには曲げモーメントが発生する。このため、セグメント単体の基本的な曲げ特性の把握を目的として曲げ試験を行った。

本試験は、図-2で示した一つのセグメントの $1/8$ の寸法のセグメントを作製し、図-8に示す2種類の岩石ブロックの配列で実施した。曲げ試験は、図-9に示すような空洞側に引張り応力が生じる曲げ(以下、正曲げ)と、地山側に引張り応力が生じる曲げ(以下、負曲げ)を発生させる2通りの荷重条件で行った。試験体は、正曲げ、負曲げ各3体で、花崗岩ブロックと低アルカリ性モルタルは§4の複合材料試験で使用したものをを用いた。荷重方法は、単純支持で支間中央部において2箇所への集中荷重を行い、荷重-変位関係と最大荷重を求めた。自重による最大曲げモーメントに相当する荷重を曲げ試験時の荷重の参考値とした。図-2に示すように、セグメントを円形に組み上げた

時の自重による曲げモーメントは、リングの公式 4)を参考にするると式(1)により求められる。

$$M = \frac{1}{2} w R_c^2 (2 - \cos \theta - 2\theta \sin \theta) \quad (1)$$

ここで、 M : 曲げモーメント、 w : セグメントの単位重量、 R_c : セグメントの半径、 θ : 天端からの角度である。曲げモーメントの計算結果を図-10に示す。図-10に示すように、正曲げ(内引張り)の最大曲げモーメントは図-2のAの位置において 1.22×10^7 (N・mm)、負曲げ(外引張り)の最大曲げモーメントはBの位置において -5.21×10^6 (N・mm) となった。図-9に示した試験方法において、その最大曲げモーメントに相当する載荷荷重は、正曲げで 106kN、負曲げで 43kN となり、これらの値を試験における参考値とした。

5.2 試験結果

各試験から得られた荷重と変位の関係を図-11、12に示す。試験結果をまとめると次のようである。①正曲げ試験では、図-11より並列配列の荷重と変位の関係は約 60~80kN で一旦荷重が減少し、その後、参考値(106kN)を越え、210~270kN で中詰モルタルの圧壊と鋼製枠縦リブの曲げ座屈が生じた後、最大荷重に達した。一方、千鳥配列は並列配列と同様に、約 70~80kN で一旦荷重が減少した後、参考値(106kN)を超え、130~210kN で最大荷重に達した。正曲げ試験での最大荷重は、並列配列の場合、参考値(106kN)の2倍以上となるが、千鳥配列の場合は、約 1.2 倍以上となり、並列配列よりも小さく、ばらつく値となった。②負曲げ試験では、図-12より並列配列は約 24~32kN で部材中央部において中詰モルタルの引張破壊と鋼製枠との境界面での剥離がほぼ同時に発生し、一旦荷重が減少した後、40kN 程度で急激に変位が増加した。千鳥配列も並列配列と同様の破壊挙動で、約 30~38kN で一旦荷重が減少した後、約 30~40kN 程度で急激に変位が増加した。負曲げ試験での最大荷重は、

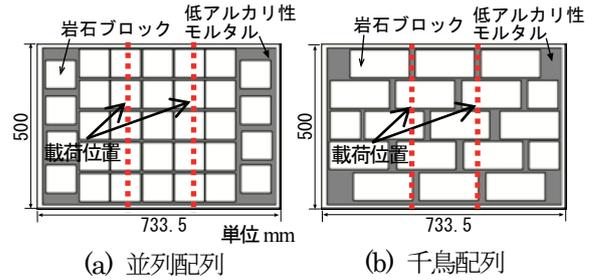


図-8 岩石ブロックの配列

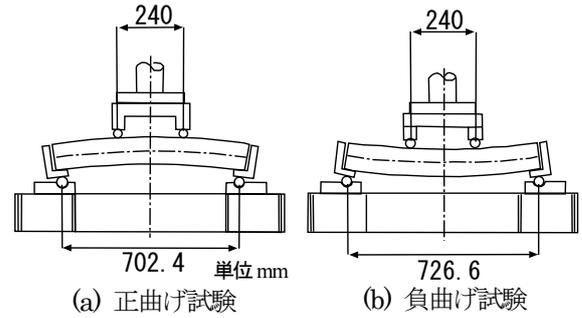


図-9 試験方法概要図

並列配列の場合、3体すべてが参考値(43kN)とほぼ同等となるが、千鳥配置では、3体のうち2体は参考値(43kN)とほぼ同等となり、他1体は参考値(43kN)を下回った。正負ともに千鳥配列の最大荷重が小さくなりばらついた理由として、図-8に示すように載荷点位置直下で岩石の占有率が並列配列に比べて千鳥配列の方が低くなりかつモルタル部と岩石部が不均等に配置されていることが影響したためと考えられる。③試験体に発生したひび割れは、並列配列の正曲げ試験では3~4本、負曲げ試験では中央部に1本が岩石ブロックとモルタルの境界面に沿って発生していた。これに対して、千鳥配列の正曲げ試験では2本、負曲げ試験では1本のひび割れが載荷点近傍の岩石ブロックとモルタルの境界面と岩石ブロック内を貫いて発生し、ひび割れの発生状況に違いがあることが確認された。

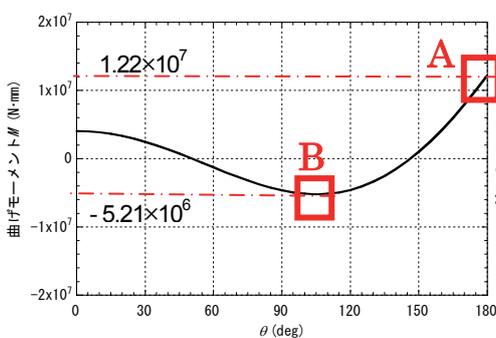


図-10 自重により生じる曲げモーメント図

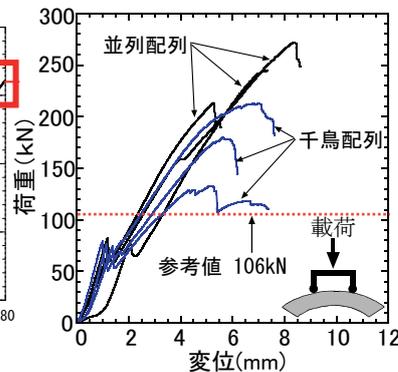


図-11 正曲げ試験結果

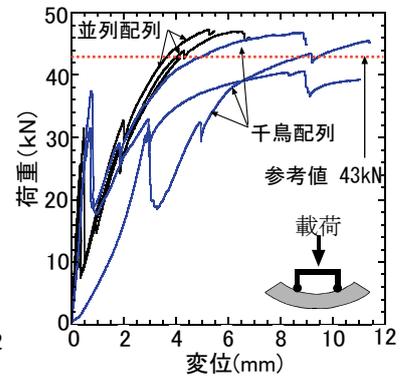


図-12 負曲げ試験結果

§6.裏込め砕石の変形特性試験

6.1 試験方法

岩石利用セグメントを用いて坑道を構築する場合、実際の施工では、坑道の壁面とセグメントとの間にはすき間があり、このすき間に対して裏込め材の充填が必要となる。この裏込め材として、セメント系材料を使用せずに砕石を用いて裏込め充填する方法を提案している⁵⁾。具体的には、**図-13**に示すように処分坑道の建設時および廃棄体の埋設時には裏込めは砕石だけとし、閉鎖時に砕石間のすき間にベントナイト系材料を注入して低透水性の裏込め材を構築する。

軟岩系岩盤の竖置き方式の処分坑道に岩石利用セグメント支保工を適用した場合の坑道断面を**図-14**に示す。ここで、すき間(余堀厚)は0.1mと想定した。

既報⁵⁾では、実規模大の坑道とセグメントを模擬した実験装置を用いて、裏込め充填密度の把握を目的に坑道とセグメントの間の空隙に砕石を吹き込み方式で充填する実験を実施した。また、支保建て込み時の安定解析に用いる砕石の変形特性を求めるため、載荷面積に比べて砕石試料の厚さが小さい条件下における砕石の円板載荷による変形試験を実施した。砕石の変形特性試験の概要を**図-15**に示す。深度500mにおける処分坑道の掘削時のセグメントと地山による高い拘束状態に近い載荷条件を模擬するため、内径303.8mm、高さ250mm、厚さ10mmの円筒鋼管内に砕石を敷き詰め、直径300mm、厚さ30mmの載荷板により2MPaまでの載荷・除荷の2回の繰り返し載荷試験を行った。載荷圧と載荷パターンを**図-16**に示す。砕石厚さはセグメントの組み立て時に必要な余堀厚(すき間)であり0.1~0.2mとした。試験では砕石の粒度分布、締固めの有無、砕石厚さをパラメータとして10ケースの試験を実施した(表-3参照)。試験に使用した砕石はJIS規格の7号砕石(粒径0.15~10.00mm)、6号砕石(粒径2.36~19.00mm)、混合5号砕石(粒径2.50~25.00mm)である。ケース1、2は7号砕石を用いて砕石厚を変えたケース、ケース3~6は7号砕石に混合5号砕石を混合しその比率を変えたケース、ケース7、9は7号砕石から4mm粒径を主体に抽出したものを、ケース8、10は6号砕石から8mm粒径を主体に抽出したものをを用いたケースである。ケース1~8は実規模充填実験時の砕石の充填密度⁵⁾を想定したケースで、円筒鋼管に敷き詰めた砕石を締固めずに試験に用いた。一方、ケース9、10は最大密度相当に締固めた状態を想定したケースで、円筒鋼管に敷き詰めた砕石をバイブレータによって締固めて試験に用いた。

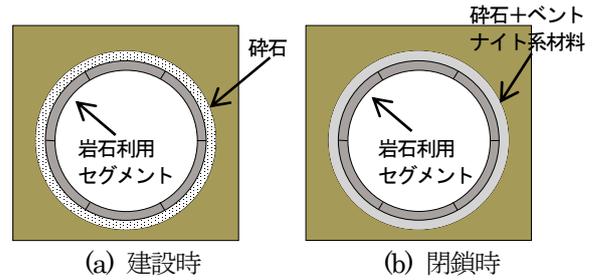


図-13 裏込め充填の概要図

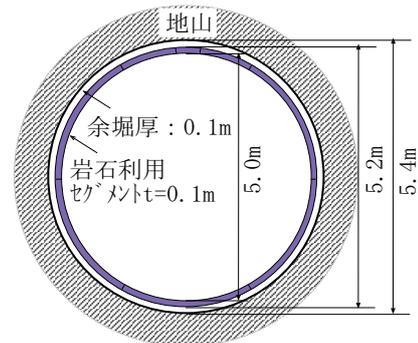


図-14 竖置き処分坑道断面図

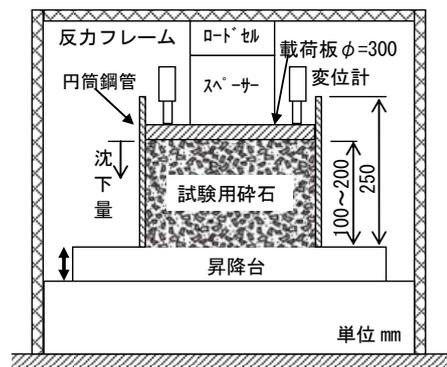


図-15 砕石変形特性試験概要図

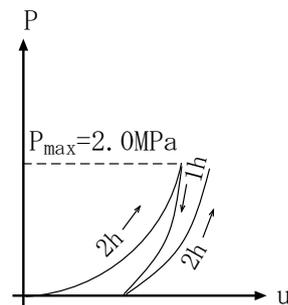


図-16 載荷圧と載荷パターンの設定

6.2 試験結果

載荷板変位と載荷板応力の関係を**図-17**に、初期載荷時の沈下量(初期変形量)を**表-3**に示す。試験結果をまとめるとつぎのようである。①締固め無しの場合1~8では初期変形量が11~24mmと大きくなり、特に初期載荷時の低応力レベルにおける変形量が大き

表-3 初期変形量

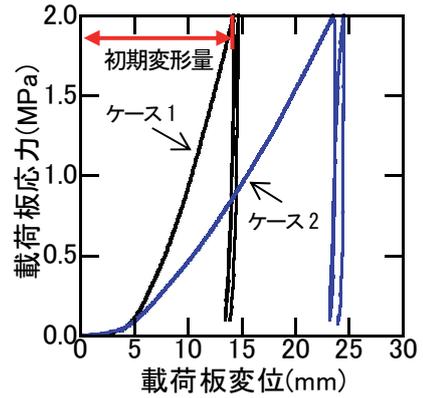
ケース	粒度分布	締固めの有無	厚さ (mm)	初期変形量 (mm)
1	7号100%	無し	100	14
2	7号100%	無し	200	24
3	混合5号100%	無し	200	11
4	混合5号70%+7号30%	無し	200	16
5	混合5号50%+7号50%	無し	200	19
6	混合5号30%+7号70%	無し	200	24
7	7号4mm 粒径主体100%	無し	100	16
8	6号8mm 粒径主体100%	無し	100	11
9	7号4mm 粒径主体100%	有り	100	7
10	6号8mm 粒径主体100%	有り	100	3

い。②一方、除荷、再載荷時の変位量は0.2~1.3mm程度と非常に小さな変形量となる。③同じ締固め状態であれば初期変形量は砕石厚さに比例する。④粒径の大きい混合5号砕石の割合が大きい方が初期変形量は小さくなる。⑤締固め有りのケース9、10では初期変形量が3~7mmと締固め無しのケース7、8よりも小さくなり、初期載荷時の低応力レベルにおける変形量も小さくなっている。これは締固めた効果と考えられる。

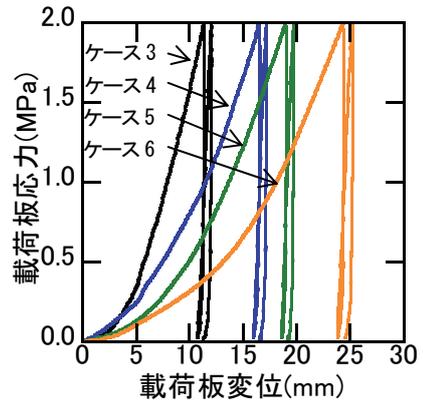
§7. 処分坑道の安定解析

室内試験より取得した低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工と裏込め材の物性値を用いて坑道の安定性の検討を実施した。図-18に示す締固め無しのケースで初期変形量が最小となったケース3を対象に、砕石の弾性係数を数値解析により同定した。解析では、図-19に示す砕石の変形特性試験を模擬した軸対称モデルを用いて、砕石のポアソン比を0.35と仮定し初期載荷時の載荷板応力1.0~1.5MPaの勾配に等しい弾性係数を推定した。その結果、弾性係数は30MPaとなった。地山条件は§3と同一の条件とし、セグメントの弾性係数は複合材料試験から得られた弾性係数の最小値に近い20GPaと平均値に近い30GPaを用いた。安定解析は、セグメントと裏込め材の二層を考慮して実施した。坑道周辺の要素分割図を図-20に、解析結果を図-21に示す。図-21中の支保反力比は支保反力 P_i と初期地圧 P_o の比であり、地山壁面ひずみは地山壁面変位 u と掘削半径 a の比で表わされる接線方向ひずみである。図には、地山特性曲線と支保特性曲線を示した。弾性係数 $E=20GPa$ と $30GPa$ のセグメントを用いた場合の数値解析から得られたそれぞれの支保特性曲線を▲と■のプロットと直線で示した。

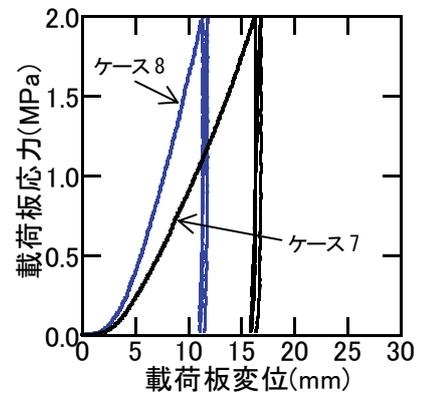
支保設置時の地山の安定性は、軟岩SR-Cの桜井による限界ひずみ(平均)より0.44%以下となることを



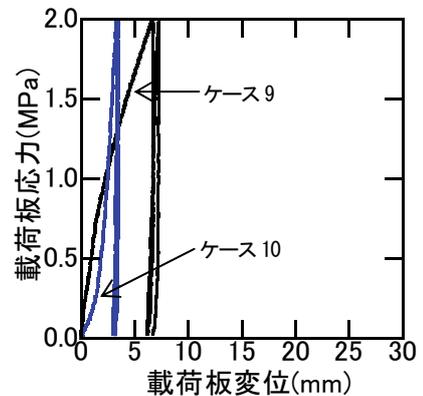
(a) ケース 1、2



(b) ケース 3~6



(c) ケース 7、8



(d) ケース 9、10

図-17 載荷板変位と載荷板応力の関係

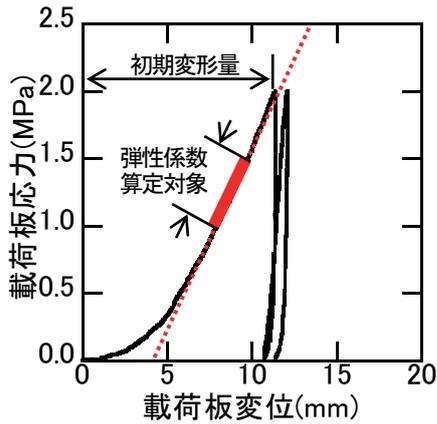


図-18 ケース3の試験結果

判定条件として評価した。図より岩石利用セグメント ($E=20\text{GPa}$, 30GPa) による地山のひずみは 0.44% 以下であり、砕石を利用した裏込め材の影響を考慮しても地山の安定性が確保できている。

また、岩石利用セグメントに生じる軸応力は $25\sim 30\text{MPa}$ となった。低アルカリモルタルを使った複合材料の一軸圧縮強さは $55\sim 60\text{MPa}$ 程度であることから、部材としての安全率(強度/発生応力)でみると $1.9\sim 2.2$ 程度が確保できていて、支保構造体としても安定した結果が得られている。

§8.まとめ

低アルカリ性モルタルを用いた岩石利用セグメント支保工と裏込め材の力学特性値を室内試験により取得し、得られた物性値を用いて坑道の安定性の検討を実施した。検討結果をまとめると以下のようである。

- 1) 岩石ブロック間の連結部を対象とした岩石・モルタル複合材料の一軸圧縮試験を行った。試験結果より、普通モルタルと低アルカリ性モルタルの両者ともに所要の強度と弾性係数を有することを確認した。また、同時にpH測定を行った結果、普通モルタルよりも低アルカリ性モルタルのほうがpHが低くなることを確認した。
- 2) 岩石利用セグメントのセメント使用量について検討した。その結果、現在検討されている吹付けコンクリートを主体とした支保工に対して、セメント使用量を大幅に低減できるとともに、低アルカリ性モルタルを使用することによりさらにアルカリ性の影響を低減できることを示した。
- 3) セグメントに中詰めする岩石ブロックの寸法・配列を変えた曲げ試験を行った。試験結果から最大曲げ荷重は、自重による曲げ荷重に対して十分な曲げ耐力があることを確認した。また、岩石ブロ

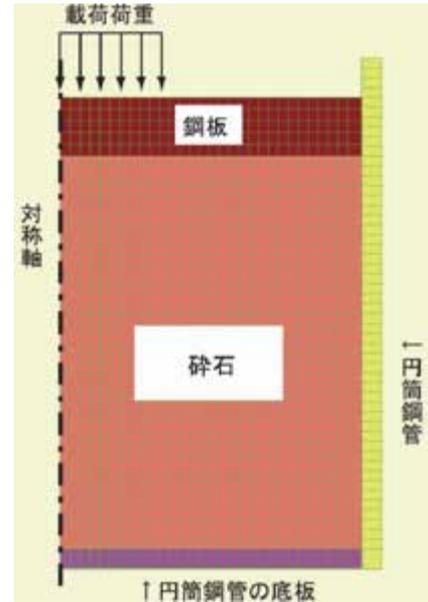


図-19 砕石変形特性試験の軸対称モデル

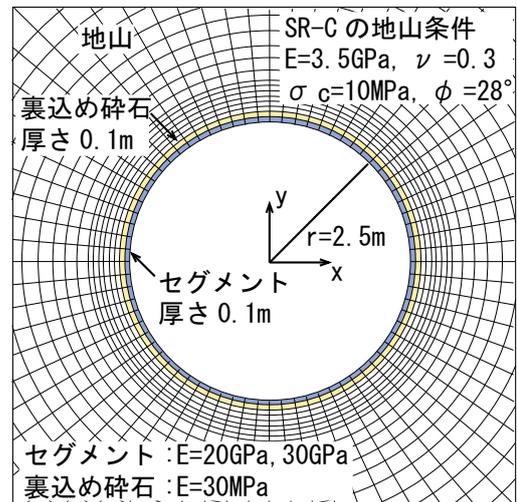


図-20 坑道周辺要素分割図

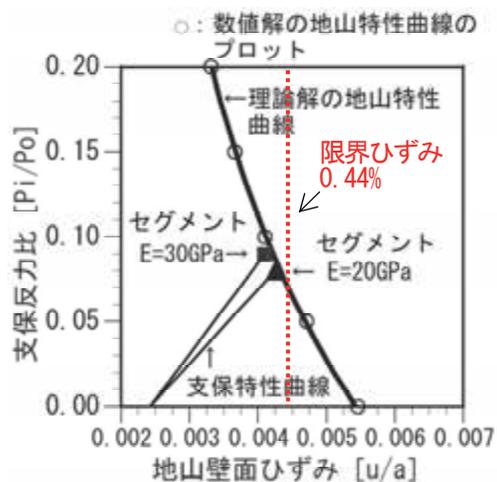


図-21 坑道安定性の検討結果

ックの配列がセグメントの曲げ耐力に影響を及ぼすことがわかった。

- 4) 裏込め砕石の円板載荷による変形特性試験を行った。試験結果より、砕石の粒度分布、締固めの有無、砕石厚さが初期載荷時の変形量に大きな影響を及ぼすことがわかった。
- 5) 砕石の円板載荷試験から得られた裏込め砕石の弾性係数を用いて、岩石利用セグメントの裏込め充填状態を考慮した地山の安定性と支保に発生する軸応力について検討した。その結果、坑道周辺の地山は、壁面ひずみが限界ひずみ以内となり安定性を確保できることおよび岩石利用セグメントに発生する応力は部材として安全率が約2倍程度確保できることを確認した。

以上の検討結果より、従来の吹付けコンクリートを主体とした支保工に対して、セメント使用量を大幅に低減し、かつ低アルカリ性モルタルを利用することに

より、セメント影響のさらなる低減化を図った岩石利用セグメント支保工の力学的な成立性、有効性を確認した。

今後は、実規模・原位置試験による実証を行い、実際の処分場環境における本支保工の適用性について確認する必要がある。

謝辞

本研究は、独立行政法人 日本原子力研究開発機構との共同研究「高レベル放射性廃棄物処分施設における坑道支保工に用いるセメント系材料の低減化技術に関する研究」において実施したものである。共同研究の実施にあたり、日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門の真田昌慶氏、野口聡氏(現: 東急建設株式会社)、岸裕和氏(現: 東京電力株式会社)、中間茂雄氏、杉田裕氏、藤田朝雄氏には多大なご協力を頂いた。ここに記して謝意を表す。

<参考文献>

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ— 分冊2 層処分の工学技術”，JNC TN1400 99-022, 1999.
- 2) 多田浩幸, 熊坂博夫, 斉藤亮, 中谷篤史, 郷家光男, 石井卓：“岩石利用セグメントによる処分坑道支保のセメント使用量の低減効果”，土木学会第62回年次学術講演会講演概要集, CS5-044, 2007.
- 3) 大和田仁, 三原守弘, 入矢桂史郎, 松井淳：“放射性廃棄物地層処分システムにおけるセメント系材料の検討—浸出液のpHを低くしたセメント系材料の施工性と機械的特性—”，JCN TN8400 99-057, 2000.
- 4) 土木学会：“構造力学公式集”，pp.412~413, 丸善, 1986.
- 5) 多田浩幸, 熊坂博夫, 斉藤亮, 中谷篤史：“岩石利用セグメント支保工の裏込め材の実規模充填実験”，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, CS05-36, 2008.