

セメントの使用を極力抑えた岩石利用セグメントの曲げ特性に関する検討

清水建設(株) 正会員 ○齋藤 亮 多田 浩幸 中谷 篤史 熊坂 博夫
 (独)日本原子力研究開発機構 正会員 林 克彦* 野口 聡 岸 裕和 中間 茂雄
 (*現・前田建設工業)

1. 目的 地層処分の地下施設における支保材料あるいはグラウトに用いられるセメントは、地下水と反応して高アルカリ環境を生じさせる。地層処分の安全評価においては、高アルカリ環境が、人工および天然バリアが有する長期性能に大きな不確実性を及ぼすことが懸念されている。著者らはセメントの使用を極力抑えた坑道の構築方法の一つとして、低アルカリ性セメントモルタルを用いた岩石利用セグメントを提案している^{1),2)}。この岩石利用セグメントには組み上げたときの自重、偏圧が作用することによって、曲げモーメントが作用する。本報では、セグメント組み立て時の自重により生じる曲げモーメントの特性を把握するための試験を実施したので報告する。

2. 岩石利用セグメントの曲げ試験方法 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に形成される隙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となっている。これに関して、図-1 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り曲げモーメントが発生するので、セグメント単体の基本的な曲げ特性を把握する必要がある。本試験では、図-2 に示す2種類の岩石ブロックの配列でセグメントを作製した。曲げ試験は、図-3 に示すような内空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通りの载荷条件で行った。試験体は、正曲げ、負曲げ各3体で行った。载荷方法は、単純支持で支間中央部において2箇所への集中载荷を行い、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-1 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³⁾を参考にすると式(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 : セグメントの単位体積重量、 R_c : セグメントの半径、 θ : セグメント上端からの角度である。

曲げモーメントの計算結果を図-4 に示す。図-4 に示されるように、正曲げ（内引張り）の最大曲げモーメントはAにおいて12.2

($\text{kN}\cdot\text{m}$)、負曲げ（外引張り）の最大曲げモーメントはBにおいて5.21 ($\text{kN}\cdot\text{m}$) となった。図-3 で示した試験方法で、その最大曲げモーメントに相当する载荷荷重は、正曲げで106kN、負曲げで43kNとなる。（以下、それぞれ「参考値」という。）なお、単体の岩石ブロック、低アルカリ性モルタルについて円柱供試体を作製し、圧裂引張試験を実施した。

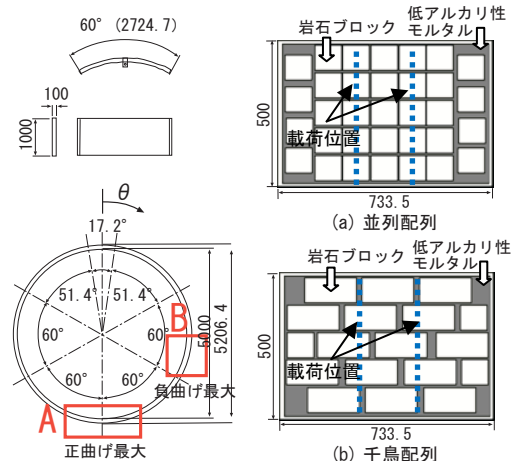
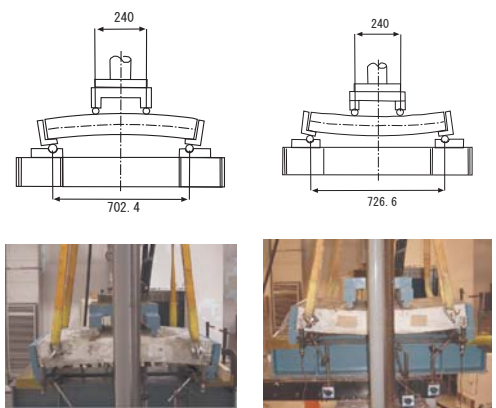


図-1 セグメント概要

図-2 模擬セグメントの岩石ブロックの配列



(a) 正曲げ試験

(b) 負曲げ試験

図-3 試験方法概要図

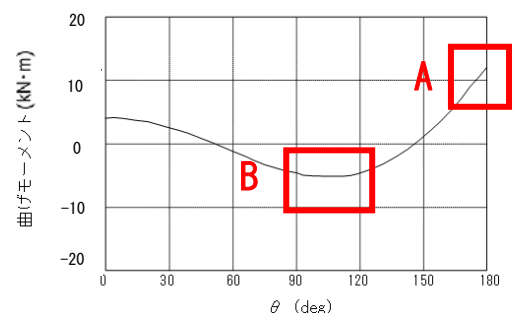


図-4 自重により生じる曲げモーメント分布

キーワード 高レベル放射性廃棄物、セグメント、支保工、低アルカリ性セメントモルタル、曲げ試験

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3丁目4番17号 清水建設(株) 技術研究所 TEL 03-3820-5504

3. 結果・考察 各試験から得られた荷重と変位の関係を図-5, 6 に示す。

(1) **正曲げ試験結果** 並列配列の荷重と変位の関係は図-5 より約 60～80kN で一旦荷重が減少した後、参考値を越え、210～270kN で中詰モルタルの圧壊および鋼製枠縦リブの曲げ座屈が生じた後最大荷重に達した。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、並列配置の場合、参考値の 2 倍以上となり、千鳥配置の場合は、参考値の約 1.2 倍以上となった。ただし、並列配列よりも小さく、ばらつく値となった。

(2) **負曲げ試験結果** 並列配列は図-6 より約 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、並列配列の場合、3 体すべてが参考値とほぼ同等となったが、千鳥配置では、3 体のうち 2 体は参考値とほぼ同等となったが、1 体は参考値を下回った。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-2 に示すように載荷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) **ひび割れの発生状況** 正曲げ試験では、並列配列の場合、岩石ブロックとモルタルの境界面に沿って 3～4 本のひび割れが発生し、千鳥配列では、載荷点近傍にひび割れが 1 本ずつ発生した。一方、負曲げ試験では、並列配列の場合、中央部で岩石ブロックを避けるように 1 本のみひび割れが発生し、千鳥配列の場合、ひび割れが載荷点近傍に 1 本発生しているのを確認した。以上より、千鳥配列と並列配列でひび割れの発生状況に違いがあることを確認した。

(4) **曲げ破壊挙動の考察** 曲げ試験で得られた最大荷重から式(2)を用いてセグメントの最大引張応力を求め、圧裂引張試験から得られた材料単体の引張強度と比較した結果を表-1 に示す。

$$\sigma_{\max} = \frac{M}{I} y \quad (2)$$

ここで、 $\sigma_{\max}$: 最大引張応力、 M : 最大曲げモーメント、 I : 断面二次モーメント、 y : 中立軸から距離である。表-1 より、並列配列と千鳥配列で使用した部材の引張強度は、ほぼ同等の値になった。また、部材の引張強度とセグメントの最大引張応力を比較すると、正曲げでは、部材の引張強度以上の最大引張応力が生じていることから鋼製枠の底面鋼板とモルタルとの付着部の破壊が、負曲げではモルタルの引張強度以上岩石ブロックの引張強度以下の範囲内の最大引張応力が生じていることから部材の引張破壊がセグメントの曲げ破壊の主要な要因になっていると考えられる。

4. 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の曲げ試験を実施した。その結果、曲げ耐力は岩石ブロックを千鳥に配列した場合、並列に配列するより小さくなった。並列配列と千鳥配列ではひび割れの発生状況にも違いがあった。その理由として、載荷点直下で岩石の占有率と岩石部とモルタル部の不均等な配置が影響していると考えられる。また、正曲げでは鋼製枠の底面鋼板とモルタルとの付着部の破壊が、負曲げでは部材の引張破壊がセグメントの曲げ破壊の主要な要因であると考えられる。岩石利用セグメントは現状の岩石ブロックが並列となる構造で十分な曲げ耐力を有しているとみられるが、さらに高い耐力を求める場合には曲げ荷重の作用点近傍の岩石の寸法・配列とセグメントの曲げ破壊特性との関係についてより詳細に検討する必要があると考えられる。

参考文献 1) 多田浩幸, 他: 日本原子力学会 2007 年秋の大会, J18, 2007. 2) 齋藤亮, 他: 日本原子力学会 2009 年秋の大会, L42, 2009. 3) 土木学会: 構造力学公式集, 1986.

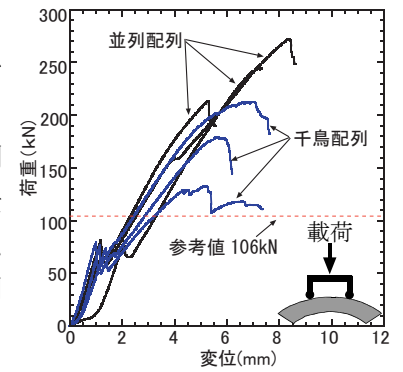


図-5 正曲げ試験結果

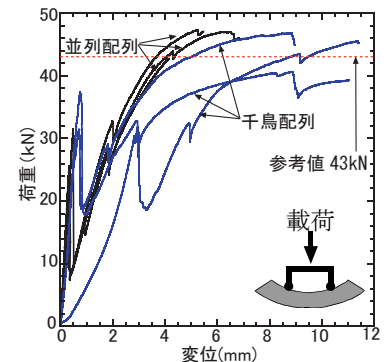


図-6 負曲げ試験結果

表-1 最大引張応力との比較

試験ケース	試験方法	最大荷重 kN	最大曲げモーメント kN・m	最大引張応力 MPa	岩石 引張強度 MPa	モルタル 引張強度 MPa
並列配列	正曲げ	245	28.3	34.0	8.36	1.69
		213	24.7	29.6		
		272	31.5	37.8		
	負曲げ	47	5.75	6.90		
		47	5.72	6.86		
		43	5.19	6.23		
千鳥配列	正曲げ	180	20.8	25.0	8.68	
		133	15.3	18.4		
		213	24.6	29.5		
	負曲げ	47	5.41	6.49		
		41	4.70	5.64		
		45	5.26	6.31		