

大規模な地下空洞のロックボルト補強効果に関する実験的研究

吉岡 尚也 畑 浩 二
藤原 紀夫 齋藤 二郎

An Experimental Study on the Effect of Rock Bolts on Stress Distribution Around Underground Cavern Using Scaled Model Structures

Hisaya Yoshioka Koji Hata
Toshio Fujiwara Jiro Saito

Abstract

An experimental study on the effect of rock bolts at large caverns such as of underground power stations is described. Scaled model structures were made with bentonite mortar. Mushroom-shaped cavities were provided at the centers of the model structures and loading until failure was done from the vertical and horizontal directions. The lengths of rock bolts effective on stress distributions around the caverns were 0.06 m and 0.12 m. It was found from experimental results that protective zones were greatly reduced by driving rock bolts of 0.12 m into side walls of the cavern, while the scaled model structures possessed loading capacity to 0.7 in terms of compressive strength ratio to original ground.

概 要

地下発電所のような大規模空洞をロックボルトで補強したときのロックボルト補強効果に関する実験的研究について述べたものである。試験体はベントナイトモルタルで作製し、幅 1m 高さ 1m 厚さ 0.5m の試験体中央部にきのこ型断面の地下空洞を設けて鉛直・水平の 2 方向から破壊に至るまで加圧した。補強効果に及ぼすロックボルトの長さは 0.06 m と 0.12 m の 2 種類である。

その結果、長さ 0.12 m のロックボルトを側壁部分に打設すると強度劣化域が大幅に減少することと、地山強度比的には地山強度比が 0.7 になるまで耐力を有することがわかった。

1. はじめに

近年小力電源開発の主流が揚水式に移行しており、そのために空洞規模も大型化している。このような大規模な地下空洞の掘削に際して、空洞周辺岩盤の力学的安定性を得るための手法の一つとして、空洞周辺岩盤が有している支持力を利用しようとするいわゆる吹付けコンクリートにロックボルトを併用した工法が採用される傾向にある。

そこでわれわれは大きさ 1m×1m×0.5m の試験体中央部にきのこ型断面の地下空洞（幅 0.12m, 高さ 0.24m）を設け、鉛直・水平の 2 方向から破壊に至るまで加圧して、そのときの空洞周辺の力学的挙動からロックボルトの補強効果を主に把握することとした。補強効果に及ぼ

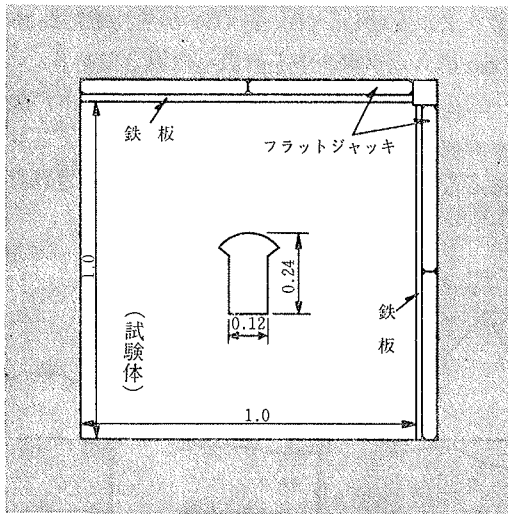
すロックボルトの長さは 0.06 m と 0.12m の 2 種類で、ロックボルトはきのこ型断面を有する地下空洞の側壁部に打設した。

2. 実験概要

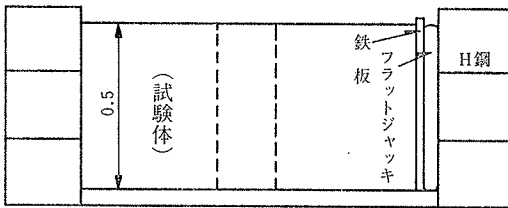
2.1. 実験装置と試験体

実験槽は図-1 に示すようなもので、最大 9800 KPa の載荷圧に耐えられるようになっている。載荷は厚さ 2 cm の鉄板を介して鉛直と水平の 2 方向からフラットジャッキで行なう。フラットジャッキの載荷能力は最大 9800 KPa である。

試験体は実験槽の耐力を考慮して一軸圧縮強度が 4900 KPa になるような配合のベントナイトモルタルで作製した。しかし、実験ケースによって試験体の一軸圧縮試



平面図(単位:m)



断面図(単位:m)

図-1 実験装置

験結果には表-1に示すようなバラツキを生じている。試験体に開削する地下空洞は図-2に示すようなきのこ型の断面を有しており、またロックボルトはその側壁部に打設する。ロックボルトは径 8×10^{-3} m のアルミ棒を使用する。

2.2. 実験方法

まず、試験体を養生させたのちひずみゲージ(東京測器研究所製 PC-20, PR-20)と変位計(東京測器研究所

実験ケース	ロックボルト	一軸圧縮強度	割線弾性係数
1	なし	5929KPa	$237 \times 10^3 \text{KN/m}^2$
2	あり(長さ0.06m)	4998KPa	$188 \times 10^3 \text{KN/m}^2$
3	あり(長さ0.12m)	4253KPa	$198 \times 10^3 \text{KN/m}^2$

表-1 各試験体の一軸圧縮試験結果

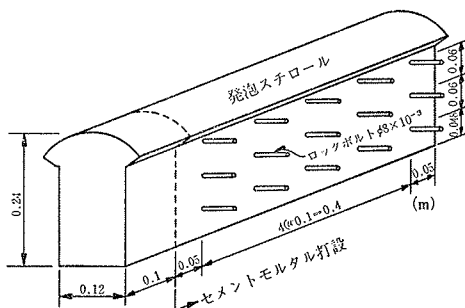


図-2 地下空洞模型とロックボルト打設パターン

製 CDP-25) を図-3に示した位置に設置する。つぎに、フラットジャッキにより試験体が破壊するまで鉛直と水平の2方向から载荷する。ただし、水平圧はポアソン比が0.25であることから鉛直圧の1/3とした。なお、実験は

- (1) ケース1: ロックボルトなし
- (2) ケース2: ロックボルトあり(ボルト長0.06m)
- (3) ケース3: ロックボルトあり(ボルト長0.12m)

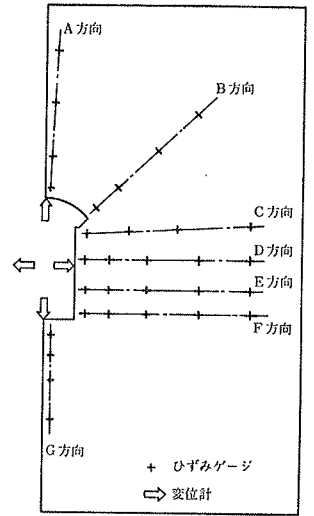


図-3 ひずみと変位の測定位置

3. 実験結果および考察

図-4はロックボルトがない場合の破壊時における空洞周辺の主ひずみ分布を縦軸に主ひずみ、横軸に空洞壁面からの距離をとって描いたものである。 ϵ_1 が最大主ひずみ、 ϵ_2 が最小主ひずみを意味している。なお、同図に記入しているA~F方向は図-3のA~F方向に対応するものである。つぎの図-5は、長さ0.06mのロックボルトを図-2のような位置に打設したときの破壊時における主ひずみ分布を図-4に描いたものと同じ要領で図示したものである。そして、図-6は長さ0.12cmのロックボルトを打設した場合の主ひずみ分布を図示したものである。

平面応力状態の場合、主ひずみと主応力の間には

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= E \cdot \epsilon_1 / (1 - \nu^2) + E \cdot \epsilon_2 \cdot \nu / (1 - \nu^2) \\ \sigma_2 &= E \cdot \epsilon_1 \cdot \nu / (1 - \nu^2) + E \cdot \epsilon_2 / (1 - \nu^2) \end{aligned} \quad \dots \dots \dots (1)$$

の関係がある。式中の σ_1 と σ_2 はそれぞれ最大主応力と最小主応力を、 ϵ_1 と ϵ_2 はそれぞれ最大主ひずみと最小主ひずみを、Eは弾性係数を、そして ν はポアソン比を意味している。

(1)式を用いて図-4~図-6の主ひずみ分布を主応力分布に直したものが図-7~図-9である(ただし、ポアソン比は0.25、弾性係数は表-1に示した割線弾性係数を用いて計算している)。図-7はロックボルトのない場合、図-8と図-9はそれぞれ長さ0.06mと0.12mのロックボルトを打設した場合にあたる。 σ_1 が最大主応力、 σ_2 が最小主応力である。ここで、例えば図-7のCあるいはD方向の主応力分布に注目すると、主応力差にピーク点が表われている。このように主応力差にピーク点が表われているということは、空洞壁面からピーク

ク点までの範囲が強度劣化域に入っていることを意味している。このような現象は図-8、図-9にも見られる。図-10 (A), (B), (C) は各実験ケースにおける破壊時の主応力分布 (図-7~図-9) から、主応力差のピーク点を結んで強度劣化域を破線で描いたものである。(A)

がロックボルトなし、(B) と (C) がそれぞれ長さ 6 cm と 12 cm のロックボルトを打設した場合である。

図-10から側壁部に打設されたロックボルトが長くなるほど強度劣化域が減少し、ロックボルトによる補強効果のあることがわかる。しかも側壁部に打設されたロッ

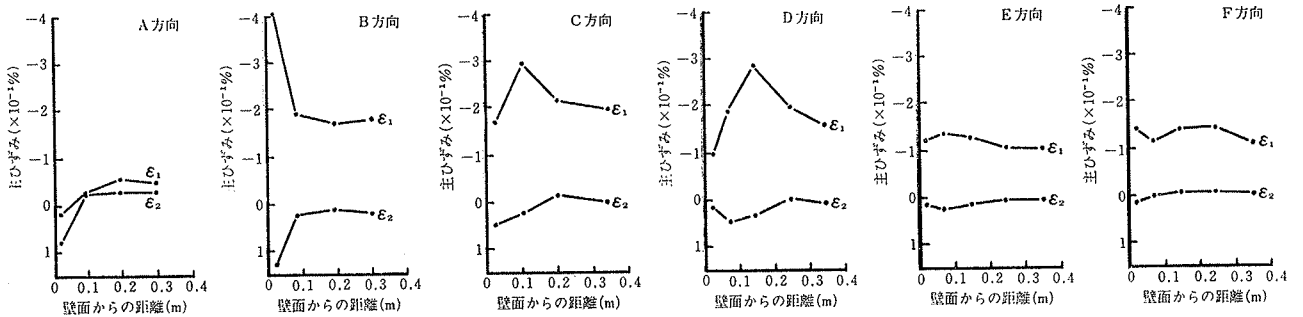


図-4 空洞周辺の主ひずみ分布 (ロックボルトなし)

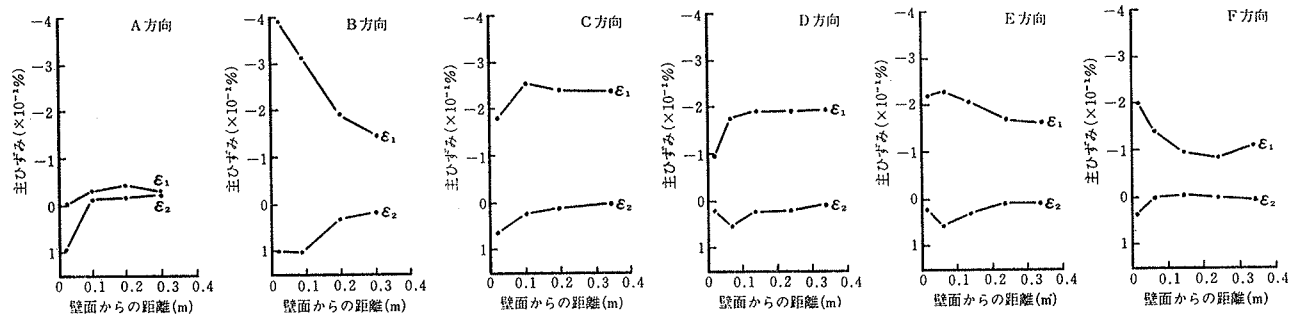


図-5 空洞周辺の主ひずみ分布 (長さ 0.06m のロックボルト打設)

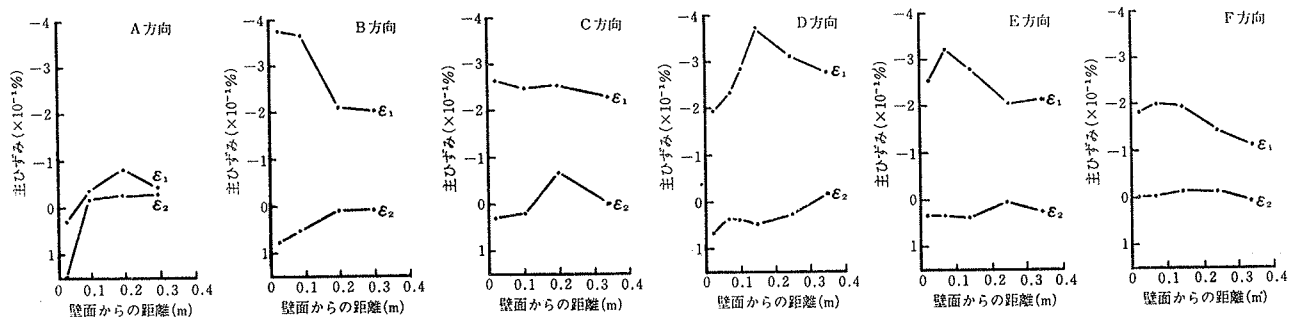


図-6 空洞周辺の主ひずみ分布 (長さ 0.12m のロックボルト打設)

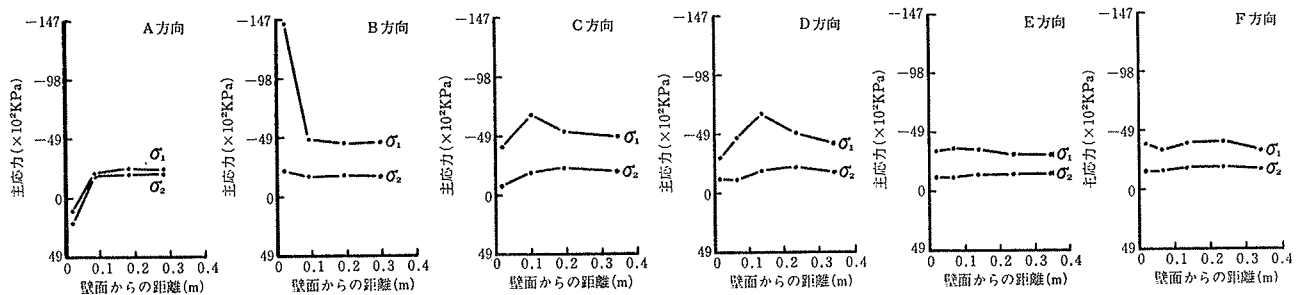


図-7 空洞周辺の主応力分布 (ロックボルトなし)

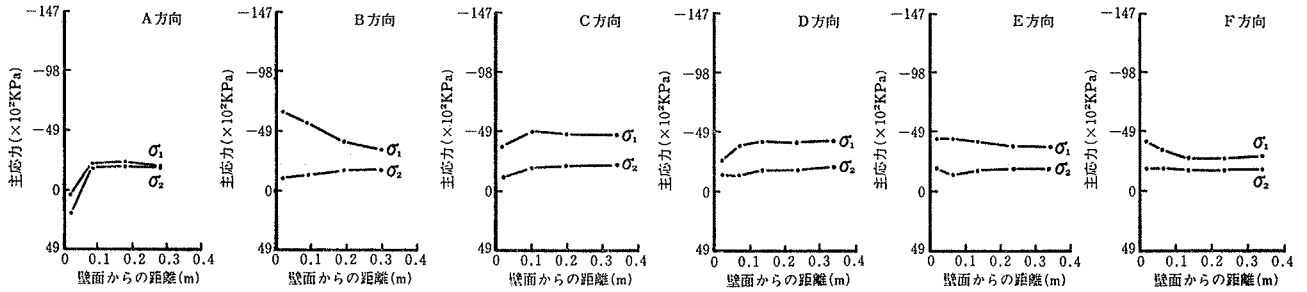


図-8 空洞周辺の主応力分布 (長さ 0.06m のロックボルト打設)

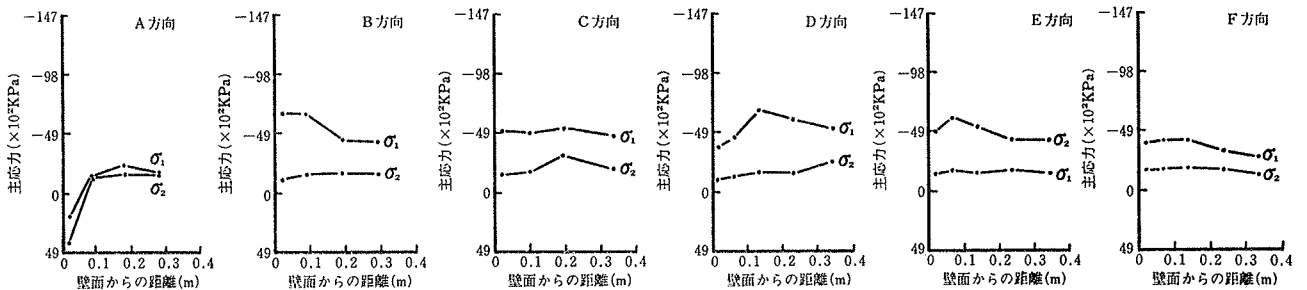


図-9 空洞周辺の主応力分布 (長さ 0.12m のロックボルト打設)

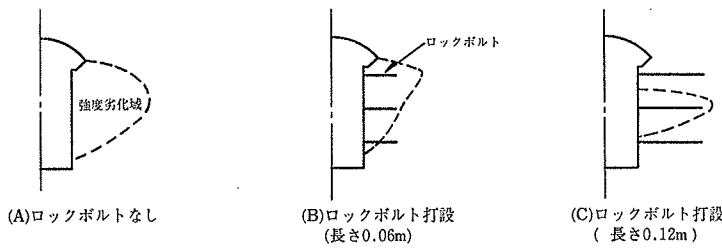


図-10 (A), (B), (C) 強度劣化域

	ロックボルト なし	ロックボルト 打設(0.06m)	ロックボルト 打設(0.12m)
破壊強度 (KPa)	5390	4410	5880
一軸圧縮強度 (KPa)	5929	4998	4253
地山強度比	1.1	1.1	0.7

表-2 各実験ケースの地山強度比

クボルトの長さが 0.12 m (空洞掘削幅) になると側壁中央部附近にのみ強度劣化域が生じるのも特徴の一つと考えられる。

また、各実験ケースの地山強度比 (一軸圧縮強度を試験体の破壊時の載荷圧で割った値とする) は表-2 のようになる。

4. おわりに

大規模な地下空洞の力学的安定性を検討する一例として、ここではきのこ型断面を有する空洞模型の側壁にロックボルトを打設したときのその補強効果に関する実験的研究を行なったものである。実験結果から以下のようなことが言える。

(1) 隅角部となる空洞アーチの支点部には応力が集中する (とくに無支保の場合は顕著である (図-7 の B 方向参照))。

(2) 無支保の場合に生じる強度劣化域は側壁部の奥深くまで及ぶ。

(3) しかし、長さ 0.12 m (空洞掘削幅) のロックボルトを側壁部に打設すると強度劣化域は大幅に減少する。

(4) 長さ 0.12 m のロックボルトを打設すると地山強度比が 0.7 程度になるまで耐力を有する。このことから空洞掘削幅程度のロックボルトを打設すればその補強効果が顕著に表われてくるものと考えられる。

ただし、ここに述べたことがらは地山の初期応力状態が空洞断面の中心線に一致しているものと仮定して行なった一例の実験結果であることを汲みとっていただきたい。

なお、実験は恩田 章君 (現(株)大林組東京本社土木設計部勤務) に御協力いただいた。ここに記して感謝の意を表します。