

残柱の短期および長期的力学挙動に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SHORT AND LONG-TERM BEHAVIOR OF PILLARS

渡嘉敷直彦*・アイダン オメル**・赤木知之***・伊東 孝****
Naohiko TOKASHIKI, Omer AYDAN, Tomoyuki AKAGI and Takashi ITO

The subsidence and collapses are of great concern and cause severe problems in urban areas, which are located above the abandoned mines or quarries in which the extraction of ore or stones was carried out using room and pillar mining method. Particularly the stability of pillars is one of the most important elements in their overall stability. An experimental study is performed to obtain some fundamental data on the variations of multi-parameters on Ryukyu limestone pillar samples during deformation and failure for assessing actual performance of pillars in the field in short and long term. Various parameters such as load, displacement, electrical field, temperature and acoustic emissions are measured during tests. Authors report the results obtained from this experimental study and discuss their applicability in geo-engineering field.

Key Words: pillar, experiment study, short and long term behavior

1. はじめに

鉱山や採石場廃坑の上に位置する住居地域では、地盤沈下や陥没の発生が大きな社会問題となっている。鉱石や石材の採掘では、岩盤中に空洞部屋や残柱を設ける手法が用いられるのが普通であるが、廃坑の空洞は、時間の経過とともに、空洞天端の破壊や残柱の破壊が進行して、さらなる空洞が形成され、陥没の発生に至ると考えられる。図-1 は、大谷石採石場跡地で発生した陥没の事例を示す。

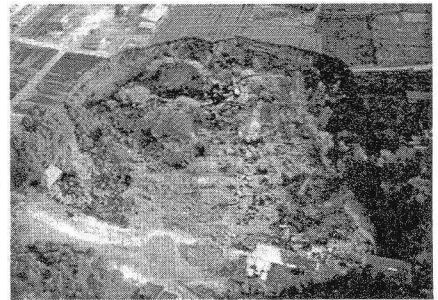


図-1 大谷石採石場跡地の陥没

また、エジプト・ルクソール、王家の谷にあるファラオの墳墓は、軟質石灰岩の岩盤内に設置され、その多くが約三千年前に造られている。これらの墳墓は、現在に至るまでに長期の荷重を受けて、クリープ破壊が著しい例も見られ、早急な補修・保存が求められている。これら墳墓の力学的安定性を検討するために、周辺岩盤の短期的および長期的挙動を把握しようとするプロジェクトが計画されている¹⁾。

本研究は、空洞残柱の短期および長期的力学挙動を把握する基礎的な検討として、琉球石灰岩による残柱模型を用いて、短期の载荷による応力、変位、加速度、電位、AE および温度の測定を行い、変形過程におけるこれらのパ

*正会員 琉球大学工学部 環境建設工学科

**正会員 工学博士 東海大学海洋学部 海洋土木工学科

***正会員 工学博士 琉球大学工学部 環境建設工学科

****正会員 博士(工学) 豊田工業高等専門学校 環境都市工学科

ラメーターの関係について検討を行った。また、材料の長期的応答を調べるため、琉球石灰岩円柱供試体によるクリープ試験を行い、時間、変位、応力の応答を求めた。ここでは、これらの実験結果を示し、鉱山や採石場廃坑などの安定性をモニタリングする観測パラメーターの有効性を示す。

2. 実験概要

実験は、残柱の短期の変形過程における応力、変位、加速度、電位、AEおよび温度の観測パラメーターを測定する残柱模型載荷実験と、残柱模型に用いた琉球石灰岩のクリープ試験を実施した。実験に用いた琉球石灰岩残柱模型の形状を図-2に示す。また、模型材料である琉球石灰岩の材料特性を表-1に示す。残柱模型は、図-2に示すような岩石ブロックを切り出した一体型の模型(タイプ2)と、柱と上下部別々のブロックからなる模型(タイプ1)を製作し、両模型の変形過程における観測パラメーターの応答に相違が生じるかを確認した。これら両模型の形状寸法を表-2および表-3に示す。

残柱模型の載荷実験は、容量2,000kNの万能試験機を用い、ひずみ速度0.1%/minによるひずみ制御試験と、手動による変形制御試験によって行われた。残柱模型の変形過程における観測パラメーターは、応力、変位、加速度、電位、AEおよび温度であり、図-3に示すように、残柱供試体に各センサーを取り付けた。電位の測定は、載荷方向と平行なACおよびDCの電位をボルトメーターを用いて測定した。サンプリング速度は、DCの場合、0.1秒、ACでは、1秒である。温度の測定は、残柱と上下部の石灰岩盤に直接3つの温度センサーを取り付け、1つは、供試体下部載荷盤に取り付けた。また、外気の温度を測定するために、もう1つのセンサーを下部載荷盤近くにセットした。AE測定では、AEセンサーを石灰岩盤に直接取り付けることが困難なため、下部載荷盤に取り付けた。AE発生率は、毎秒

表-1 琉球石灰岩の材料特性

Density (kN/m ³)	Elastic wave velocity (km/s)	Elastic modulus (GPa)	Poisson's ratio	Strength (MPa)
19.6 ~ 23.4	4.5 ~ 6.3	8.1 ~ 27.8	0.15 ~ 0.3	20.0 ~ 33.9

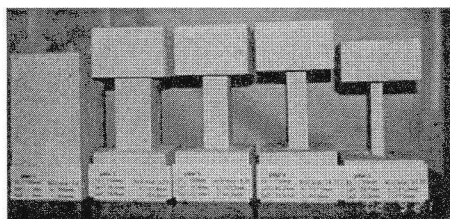


図-2 残柱模型(タイプ2)

表-2 残柱模型(タイプ1)の形状寸法

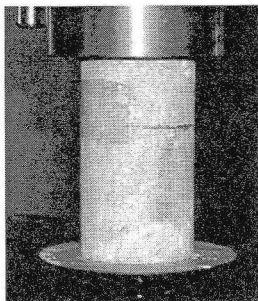
Test No.	Sample			Pillar		
	Height (mm)	Side1 (mm)	Side2 (mm)	Height (mm)	Side1 (mm)	Side2 (mm)
TP1	100	40	40	100	40	40
TP2	180	100	80	100	40	40
TP3	180	100	80	100	40	40

表-3 残柱模型(タイプ2)の形状寸法

Test No.	Sample			Pillar		
	Height (mm)	Side1 (mm)	Side2 (mm)	Height (mm)	Side1 (mm)	Side2 (mm)
RP1	300	150	150	300	150	150
RP2	350	150	150	150	75	75
RP3	350	150	150	150	50	50
RP4	350	150	150	150	38	38
RP5	350	150	150	150	25	25



図-3 残柱変形載荷試験



図－４ 琉球石灰岩のクリープ試験

測定を行い、AE 累積数をプロットした。また、2つの加速度センサーを残柱上下の石灰岩板に取り付け、載荷方向と、載荷方向に直交する2方向の加速度を測定した。

琉球石灰岩の長期的応答を調べるクリープ試験では、高さ50mm、直径25mmの円柱供試体を用いた。琉球石灰岩のクリープ試験の様子を図－4に示す。

3. 実験結果および考察

(1) 残柱の短期的載荷試験

残柱の短期の変位過程における応答を調べるため、全部で8供試体の載荷試験が行われた。図－5に、残柱TP1の載荷試験による応力－ひずみ応答、電位応答およびAE 応答を示す。また、残柱RP2の応力－ひずみ応答、電位応答およびAE 応答を図－6に示す。

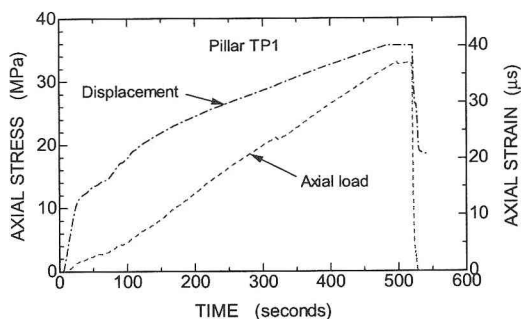
いずれの試験においても、電位は、DCによって測定された。一般的には、残柱の断面積が大きくなれば、発生する応力と変形は相対的に小さくなると考えられる。しかしながら、図－5および図－6が示すように、載荷過程における軸応力と電位の関係は、必ずしもお互いに対応する傾向が見られず、残柱内に亀裂が発生する際に、電位の急激な変化が生じていることがわかる。また、残柱が破壊する寸前には、電位が急激に変化していることがわかる。

AEの応答は、いずれの試験においても、電位の応答と良く対応していることがわかる。各残柱の載荷試験によって得られた圧縮強度と変形係数を、表－4に示す。

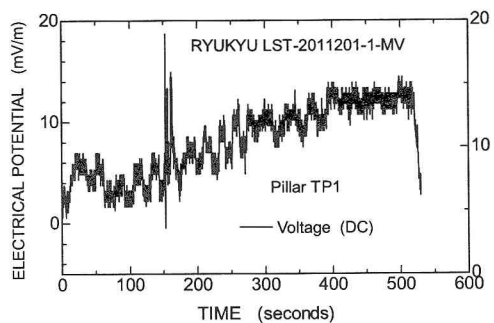
図－7に、残柱RP2の破壊過程における加速度の応答を示す。図に示されるように、残柱上部盤の加速度が、下部盤の加速度よりも大きいことがわかった。このような応答は、すでに発表されている文献(1)に示す結果と同様で

表－4 琉球石灰岩残柱の圧縮特性

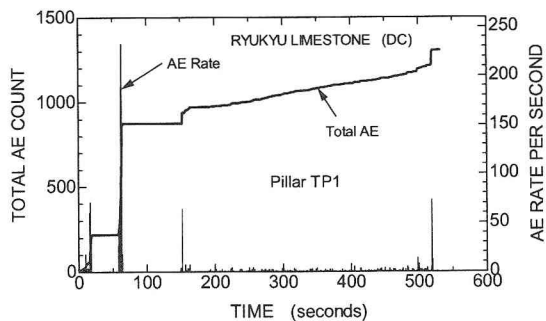
Test No.	A_t / A_p	E (GPa)	Strength (MPa)
TP1	1.00	12.4	34.6
TP2	5.00		8.35
TP3	5.00		6.04
RP1	1.00	28.2	41.1
RP2	4.00	12.4	22.4
RP3	9.00	9.12	6.12
RP4	16.6	28.0	25.2
RP5	36.6		



(a) 応力－ひずみ応答



(b) 電位応答



(c) AE 応答

図－5 残柱TP1の観測パラメーターの応答

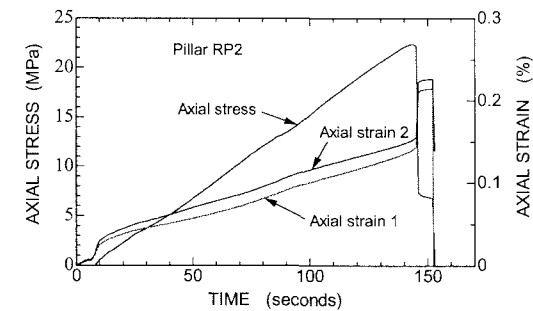
あることがわかった。

図-8は、残柱の掘削率と強度の関係を、実験結果と掘削率の理論を用いて計算した結果を比較したものである。残柱の1つの実験結果を除き、実験結果が示す掘削率と強度の関係は、掘削率の理論より計算された予測値にほぼ一致していることがわかる。この結果から、残柱の掘削率を推定する理論的手法は、残柱の安定性を評価するために有効であることがわかる。しかしながら、長期挙動の問題の観点から、考慮が必要となる。この問題を明らかにするために、いくつかの条件下でのクリープ試験の実施が必要となる。

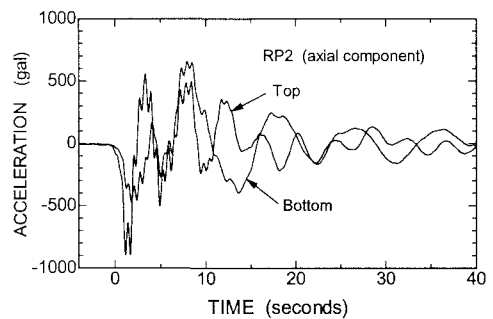
(2) 長期的载荷試験

(a) クリープ試験

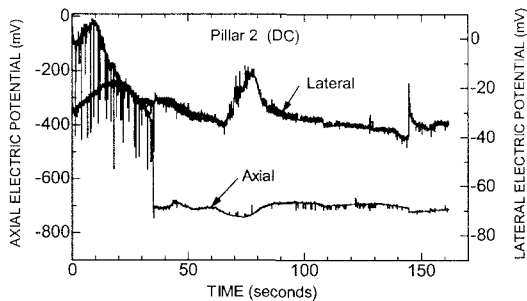
残柱模型に用いた琉球石灰岩の長期的特性を把握するために、内包する空隙率の変化を考慮に入れた琉球石灰岩



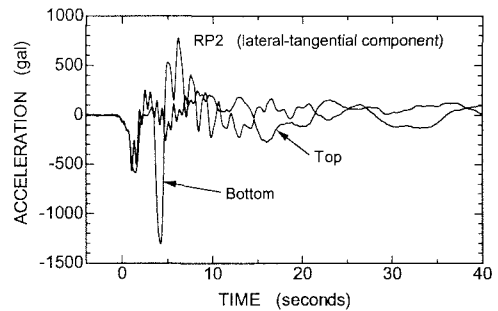
(a) 応力-ひずみ応答



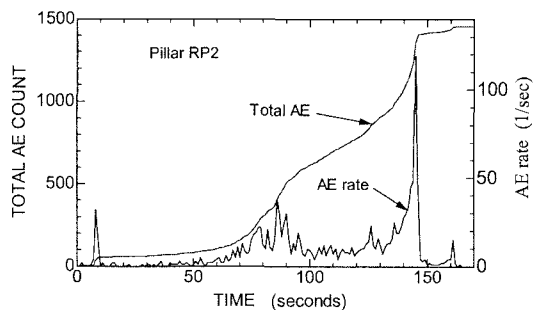
(a) Axial component



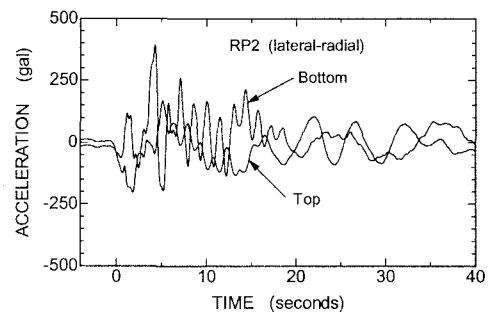
(b) 電位応答



(b) Lateral-tangential component



(c) AE 応答



(c) Lateral-radial component

図-6 残柱PR2の観測パラメーターの応答

図-7 残柱RP2の加速度応答

円柱供試体によるクリープ試験を実施した。短期的载荷試験結果の大きなばらつきから、クリープ荷重を決定することが困難であった。図-9 (a) および図-9 (b) に、2つの琉球石灰岩円柱供試体のクリープ試験の結果を示す。図には、時間経過に伴う軸応力と軸ひずみの応答が示されている。図に示されるように、クリープ荷重は段階的に増加し、ある荷重ステップで、繰り返し载荷が行われた。得られた軸ひずみ応答の結果は、明らかに、琉球石灰岩の残柱がクリープ挙動を起こすことを示している。このひずみは、クリープ荷重が大きくなるにつれて増大する。この知見は、他の岩石のクリープ試験が示す結果と同じである。図-9 (a) に示すクリープ試験に用いた石灰岩供試体の空隙率は、図-9 (b) の供試体よりも大きい。したがって、供試体のクリープ応力は、空隙率の小さい供試体のクリープ応力が大きくなることを示している。

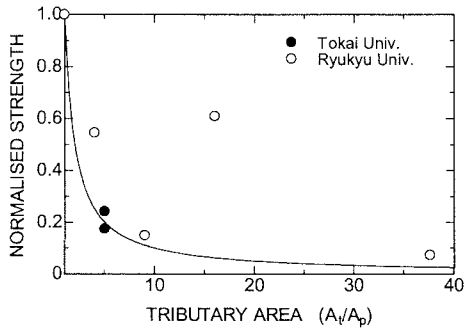
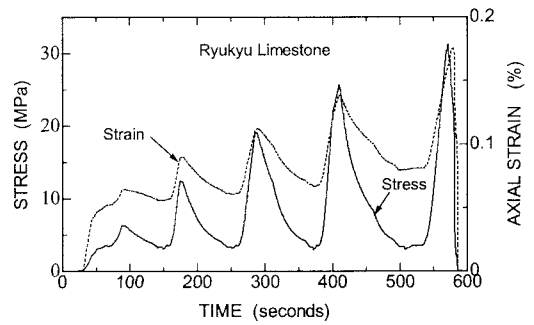
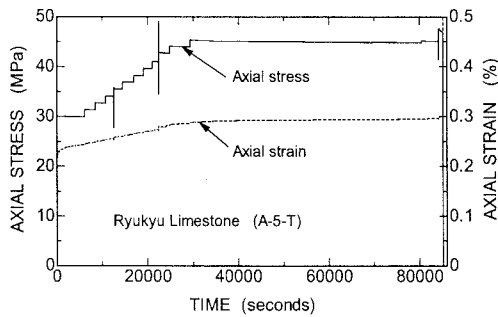


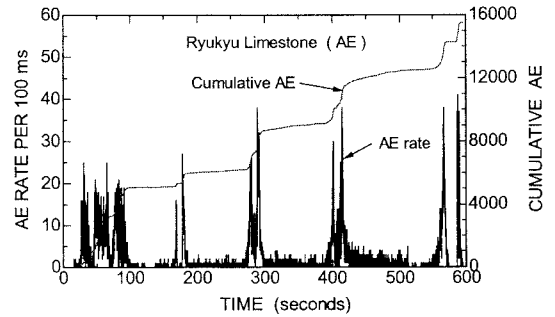
図-8 残柱の掘削率と強度の関係



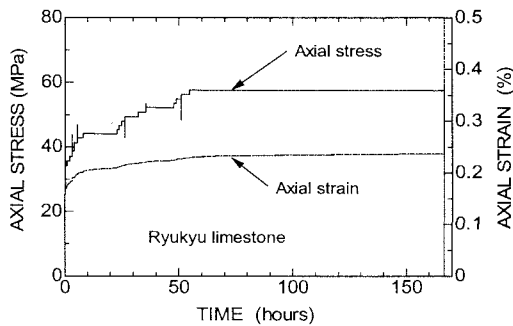
(a) 応力-ひずみ応答



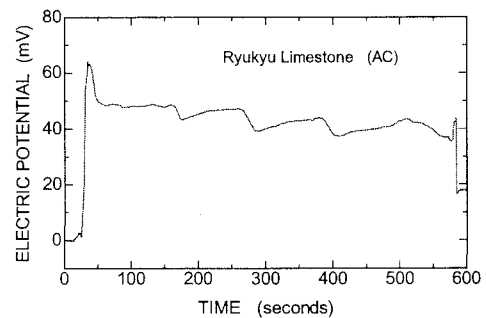
(a)



(b) AE 応答



(b)



(c) 電位応答

図-9 クリープ荷重を受ける琉球石灰岩円柱供試体の応力・ひずみ応答

図-10 繰り返し荷重を受ける琉球石灰岩角柱供試体の観測パラメーターの応答

(b) 繰り返し載荷試験

一般に、岩石の強度は、繰り返し載荷の影響を受けて、強度低下を生じることが知られている。本研究における繰り返し載荷試験は、まだ、予備段階であるが、琉球石灰岩の角柱供試体を用いて、二、三の繰り返し載荷試験が行われた。単調載荷による供試体の強度は、約40MPaである。繰り返し荷重の載荷方法は、繰り返し載荷時に荷重増分を行って、6回の繰り返し荷重を供試体に載荷した。繰り返し載荷の間、電位とAEを計測した。

繰り返し載荷による琉球石灰岩供試体の応答を、図-10に示す。繰り返し載荷による供試体の圧縮強度は、約32MPaであり、単調載荷による圧縮強度のおよそ80%となり、繰り返し荷重を受けることによって、圧縮強度が減少していることがわかる(図-10(a))。また、ひずみの応答から、各繰り返し載荷後に、塑性ひずみが生じていることが認められる。

図-10(b)に示すAE応答では、最初の載荷時に、AEの発生が頻発していることがわかる。これは、供試体の設置状態と、供試体と載荷盤の間に挟み込んだアイソレータと電極の変形によって生じていると思われる。最初の繰り返し載荷における第2、第3のAE発生のピークは、供試体がすでに受けている応力履歴に関係しているものと推察される。試験に用いた琉球石灰岩は、AEの発生数を測定し、岩石採取地点の地圧の大きさを推定する方法の原理となっているカイザー効果が生じていることが認められる。また、前段階の圧縮強度のレベルを超えた軸応力が生じた後でAE発生のピークが認められる。しかしながら、低い軸応力レベルにおけるAE応答は、文献(1)で検討したAE応答に比べて明確でない。

繰り返し載荷による琉球石灰岩のAC電位応答を検討した。図-10(c)に、AC電位応答を示す。AC電位応答も、同様に繰り返し荷重の影響を受けることがわかる。また、載荷盤が最初に接触した際に、急激な電位の変化が現れたあと、荷重の増加にともない、電位が高いレベルで発生し、荷重が減少しても、荷重増加時の電位レベルを保つ傾向が認められる。

4. 結論

鉱山や採石場廃坑の地盤沈下や陥没の防止や、エジプトの墳墓などの古代遺跡の劣化や崩壊に対する補修・保存が課題となっている。本研究は、空洞残柱の短期および長期的力学挙動を把握する基礎的検討として、琉球石灰岩の残柱模型による短期の載荷実験、円柱供試体によるクリープ試験および角柱供試体を用いた繰り返し載荷試験を実施し、変形過程における応力、変位、加速度、電位、AEおよび温度を測定し、その応答を検討した。検討結果を要約する。

- 1) 残柱模型による短期の載荷実験から、鉱山や採石場などに適用される掘削率の概念は、初期応力状態が単純に重力場を条件とする場合には、短期の残柱の安定性を評価するために有効であることが確認された。
- 2) 琉球石灰岩のクリープ試験および繰り返し載荷試験から、クリープ強度および繰り返し強度は、短期の載荷試験で得られた強度よりも小さくなることが明らかになった。
- 3) 長期挙動を評価する破壊時間-応力比や繰り返し回数-応力比などの関係を明らかにすることが必要であり、また、琉球石灰岩の長期的力学特性の把握をさらに深めるために、今後、同様の実験を多数行うことが必要である。
- 4) 短期および長期の載荷実験で測定した応力、変位、加速度、電位、AEおよび温度の測定項目は、空洞や遺跡構造物などの力学的安定性を評価する基本的観測パラメーターとして有用であることが確認された。

参考文献

- 1) Aydan, O. : An experimental study on dynamic responses of geo-materials during fracturing, Journal of the School of Marine Science and Technology, Vol.1, No.2, pp.1-7, 2004.