

琉球石灰岩内空洞モデルの破壊時の 多重パラメータ応答

渡嘉敷 直彦^{1*}・アイダン オメル²・大洞 光央³・赤木 知之¹

¹ 琉球大学 工学部 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

² 東海大学 海洋学部 (〒424-8610 静岡県静岡市清水折戸3-20-1)

³ 東海大学大学院 海洋学研究科海洋工学専攻 (〒424-8610 静岡県静岡市清水折戸3-20-1)

* E-mail: tokasiki@tec.u-ryukyu.ac.jp

地下空洞の安定性評価・破壊予測は、空洞の安定性を管理するための重要な検討課題となっている。本研究は、空洞破壊を予測する手法の基本的な検討として、琉球石灰岩を用いた空洞モデルの一軸圧縮载荷実験を行って、変形・破壊過程で発生する加速度応答、AE 応答および電位応答を測定し、岩盤空洞の破壊を予測するパラメータとしての有効性について検討を行った。

実験の結果、一軸载荷過程における亀裂や塑性域の発生と、電位応答、AE 応答および加速度応答の間には、密接な関係が認められ、これらの応答パラメータは、地下空洞周辺岩盤の短期的な安定性の評価に有効であることが明らかになった。

Key Words : *underground opening, prediction of failure, model test, electrical potential, acoustic emission*

1. はじめに

土木や鉱山の分野において、地下空洞の安定性は、重要な工学的問題の一つになっている。地下空洞の安定性評価および破壊の予測は、空洞の安定性を管理するための重要な検討課題である。しかしながら、地下空洞周辺岩盤の破壊の予測は、現在もなお困難であり、破壊の予測手法は、まだ十分に確立されていない。

岩盤の変形と破壊過程において、AE が発生することが知られており¹⁾、また、岩盤が破壊する際に、電位が発生することが、筆者らの研究²⁾で明らかになっている。筆者らは、これまでの観測を通して、空洞掘削にともない、周辺岩盤における電気抵抗、電位、温度、AE、間隙水圧および変位などのパラメータに変化が生じると考えている。

本研究は、地下空洞周辺岩盤の破壊を予測する手法の基本的な検討として、琉球石灰岩による空洞モデルを用いた一軸圧縮载荷実験を行って、変形、破壊過程で発生する加速度応答、AE 応答、電位応答、温度変化と、载荷過程における変形および荷重を測定し、岩盤空洞の破壊を予測するパラメータとしての有効性について検討を行った。

変形、破壊過程で発生する各応答の波形は、岩石の種類によって異なることが予想され、種々の岩石を用いた空洞モデルの载荷実験による応答パラメー

タについて検討する必要がある。本研究では、堆積岩の一つである琉球石灰岩の空洞モデルにおける破壊時の応答パラメータについて検討を行う。

2. 琉球石灰岩空洞モデルと一軸圧縮载荷実験の概要

(1) 琉球石灰岩空洞モデル

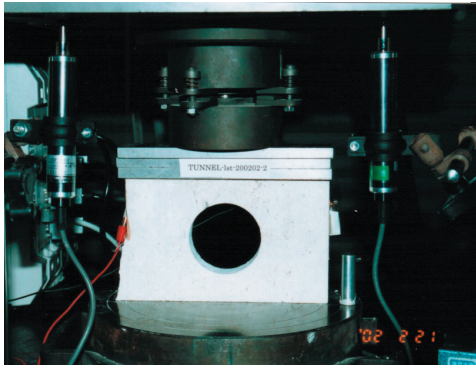
実験に用いた空洞モデルは、表-1に示す材料特性を有する琉球石灰岩による2種類の角柱ブロックを用い、地下空洞に見立てた円形の空洞をブロック中央部に配置した。空洞モデルは、ブロック形状寸法の異なる2種類を用意し、形状寸法の小さいモデルを、No.1 および No.2 と呼ぶ。また、形状寸法の大きいモデルを、No.3、AE-5、BE-2 および CE-2 と呼ぶ。各空洞モデルの形状寸法を、表-2に示す。

(2) 計測センサーの配置と载荷方法

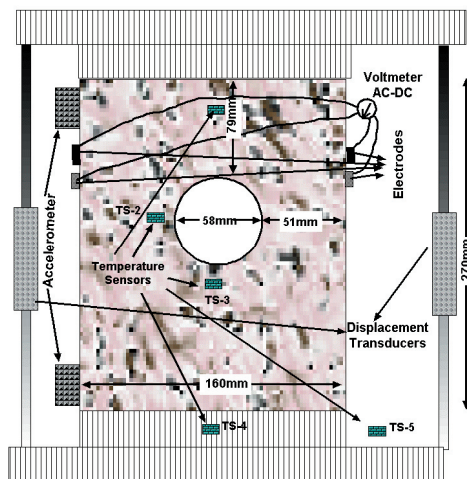
各空洞モデルの载荷過程における応答パラメータとして、加速度応答、AE 応答、電位応答、温度変化、変形および荷重を計測することとし、各空洞モデルに計測センサーを配置した。図-1 および図-2に、空隙モデルにおける計測センサーの配置状況を示す。また、空隙モデル (No.3, AE-5, BE-2, CE-2) の形状寸法と計測センサーの配置位置の模式図を、

表－１ 琉球石灰岩の材料特性

γ_d (kN/m ³)	V_p (km/s)	E (GPa)	ν	σ_c (MPa)
19.6~23.4	4.5~6.3	8.1~43.5	0.15~0.3	20.0~37.7



図－１ 空洞モデル（No.1, No.2）と計測センサー配置状況



図－３ 空洞モデル（No.3, AE, BE, CE）の寸法と計測センサーの配置

図－３に示す。ここで、加速度応答は、破壊にともなって発生する加速度を、载荷方向、空洞直径方向および空洞軸方向について測定する。なお、空洞モデル No.1 および No.2 の载荷実験では、加速度応答は測定していない。

空洞モデルの载荷の方法は、圧縮試験機（容量 2000kN）を用いた一軸圧縮定荷重制御により、手で载荷を行った。载荷後の変形、破壊過程で発生する各応答は、载荷と同時に空洞モデルに配置したセンサーを用いて計測を行った。

表－２ 琉球石灰岩空洞モデルの寸法

Model No.	Height (mm)	Width (mm)	Thickness (mm)	Opening diameter (mm)
1 & 2	100	160	113	57
3, AE-5, BE-2 & CE-2	270	160	140	57



図－２ 空洞モデル（No.3, AE, BE, CE）と計測センサー配置状況

３．実験結果と考察

（１） 空洞モデル（No.1, No.2）の応答

空洞モデル No.1 および No.2 の一軸圧縮载荷実験（図－１）を行い、変形、破壊過程における荷重、変位、電位および AE 応答を測定した。電位の測定は、ボルトメータを用いて、载荷方向と直交する点間における AC および DC の電位を同時に測定した。測定間隔は、DC 測定で、0.1 秒、AC 測定で、1 秒である。

図－４に、No.1 空洞モデルの応答を示す。各応答は、経過時間の関数として示している。電位（AC）の応答は、载荷荷重および変位の変化と連動していることが認められ、荷重が急速に変化すると、電位が急激に変化する。また、岩石の破壊が始まると、電位の変化が大きくなる傾向を示している。AE 発生 の累積は、明らかに、岩石内の破壊に関係していることがわかる。

図－５に、No.2 空洞モデルの応答を示す。図－４と同様に、各応答は、経過時間の関数として示している。ここでは、DC による電位応答を示しているが、载荷・破壊過程を通して、電位に大きな変化は見られず、電位の振幅が小さくなっている。AE 発生 の累積は、No.1 空洞モデルと同様に、岩石内に発生する亀裂の進展と関係していることがわかる。空洞周辺の破壊状況を、図－６に示す。円形空洞の両側壁に圧縮破壊による剥離が現れ、天端に引っ張り亀裂

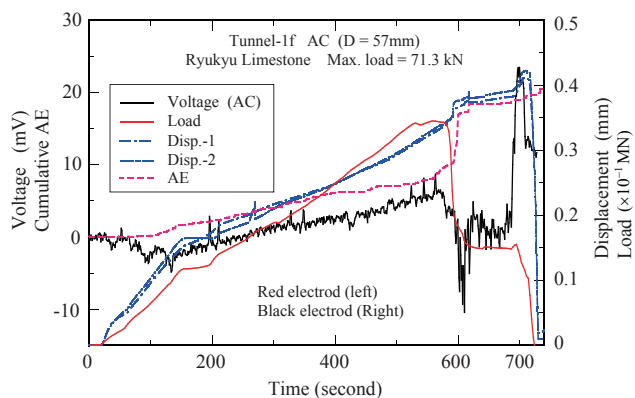


図-4 空洞モデル (No.1) の荷重, 変位, 電位および AE 応答

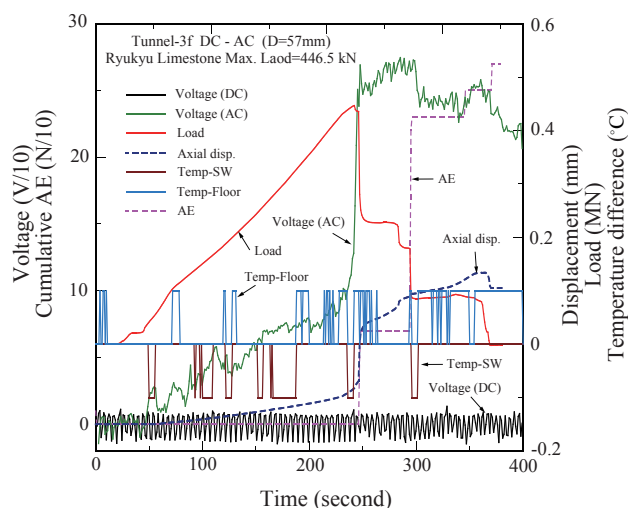


図-7 空洞モデル (No.3) の荷重, 変位, 電位, 温度および AE 応答

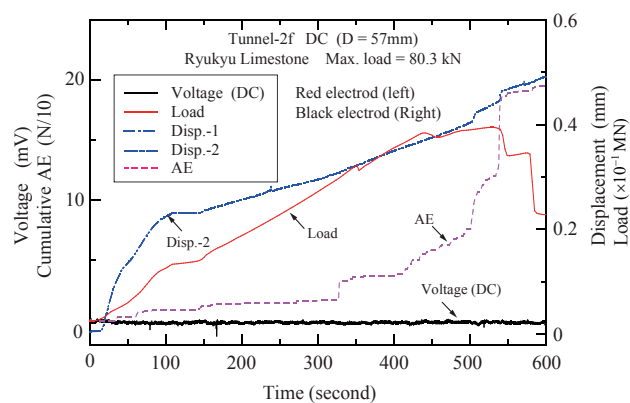
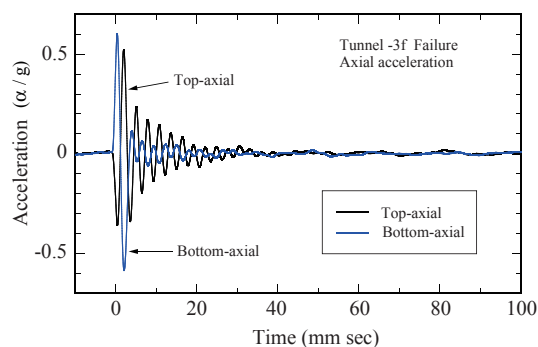
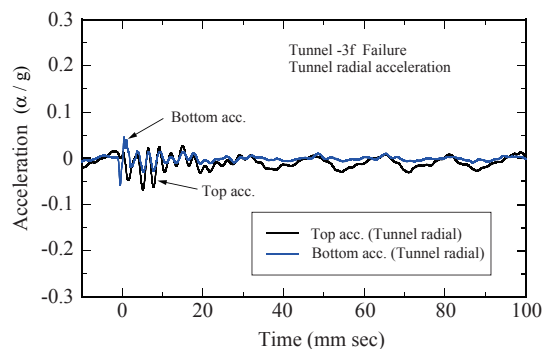


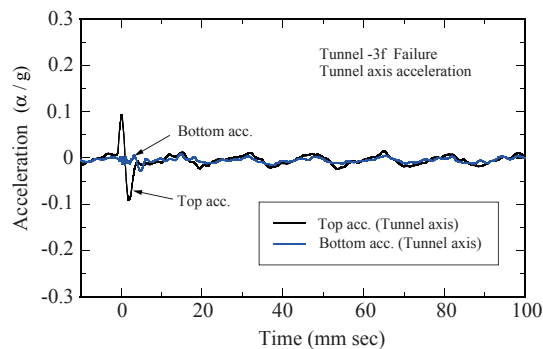
図-5 空洞モデル (No.2) の荷重, 変位, 電位および AE 応答



(a) 荷重方向の加速度



(b) 直径方向の加速度



(c) 空洞軸方向の加速度

図-8 空洞モデル (No.3) の破壊時の加速度応答

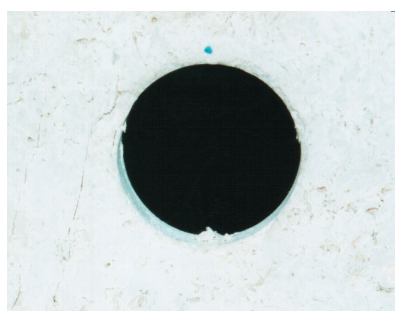


図-6 空洞モデル (No.2) の破壊状況

が生じている。

(2) 空洞モデル (No.3) の応答

つぎに, 空洞軸方向の長さがより大きい, No.3 空洞モデルの応答を, 図-7 に示す. ここでは, 荷重, 変位, 電位, AE, 温度および加速度を測定し, それぞれ, 荷重・破壊過程における応答を調べた. 電位の測定は, AC および DC の両方で同時に測定

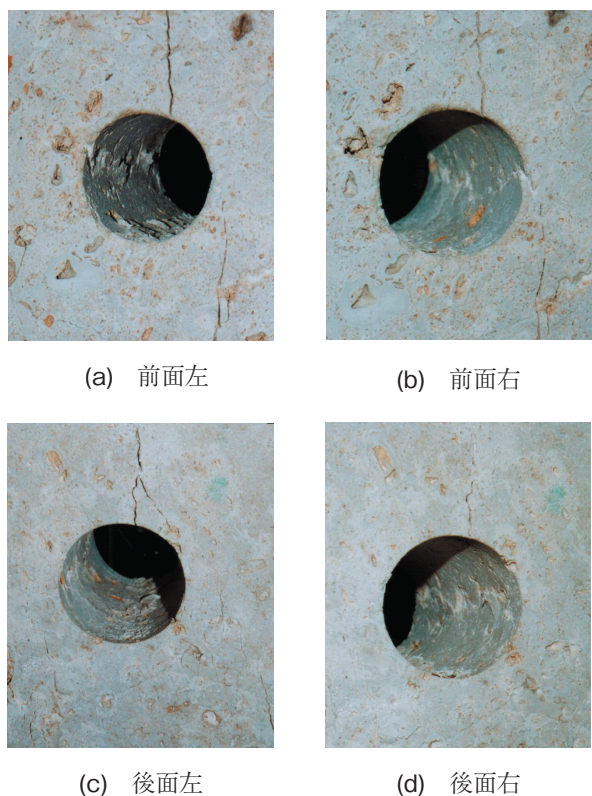


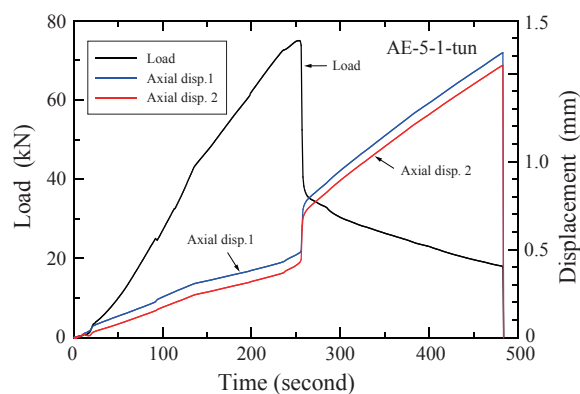
図-9 空洞モデル (No.3) の空洞周辺の破壊状況

を行った。各応答は、経過時間の関数として示している。電位の応答は、ACによる電位の変化が、載荷荷重と軸変位の応答に密接に関係していることがわかる。すなわち、荷重が急速に変化すると、ACの電位が急激に変化する。岩石内の破壊が始まると、電位の変化が大きくなる。DCによる電位の変化は、載荷・破壊過程を通して、ほとんど認められない。

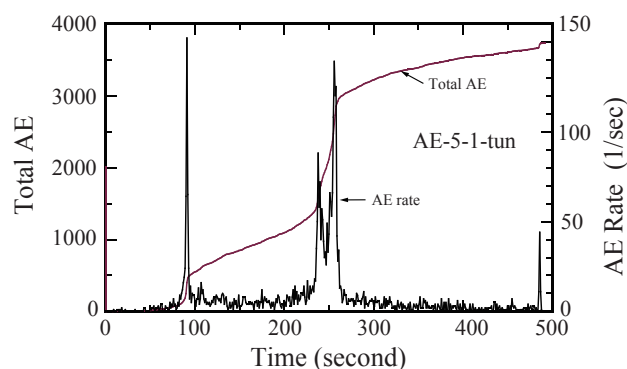
AE発生量の累積は、No.1およびNo.2の空洞モデルの応答と同様に、岩石内の亀裂の進展に関連していることが認められる。空洞モデルの表面および下載荷盤で測定された温度の応答は、AC電位の変化が大きくなるところに対応して、変化する傾向が認められる。しかしながら、その変化は、 0.1°C 以内にとどまっている。

図-8に、空洞モデルの破壊時に発生する加速度応答を示す。図の加速度応答は、空洞モデルの上、下部に取り付けた加速度計による載荷方向、空洞直径方向および空洞軸方向の加速度を示している。載荷後に発生する亀裂の進展過程で、微少な加速度が現れ、岩石の強度破壊時には、図のような加速度が生じている。加速度の振幅は、空洞直径方向、空洞軸方向に比べて、載荷方向の振幅が相対的に大きく現れている。

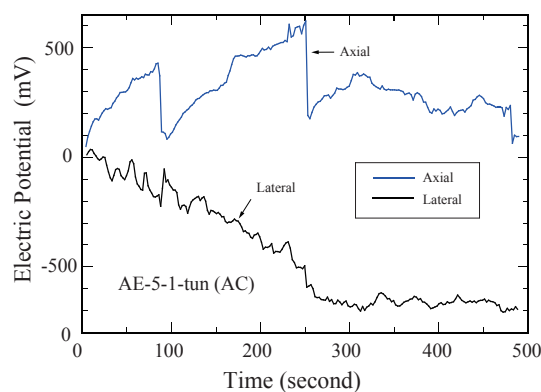
空洞周辺の破壊状況を、図-9に示す。空洞の両側壁に、圧縮による剥離が生じ、天端には、引っ張り亀裂が上部まで発生している。



(a) 荷重、変位応答



(b) AE 応答



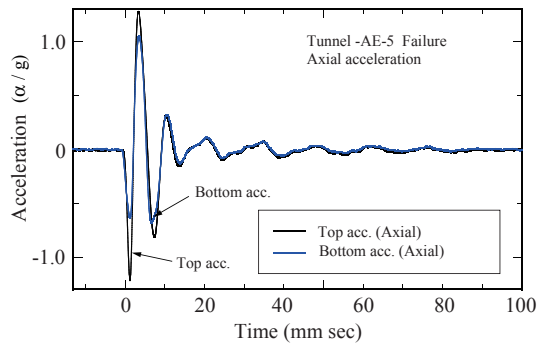
(c) 電位応答

図-10 空洞モデル (AE5) の荷重、変位、電位、AE 応答

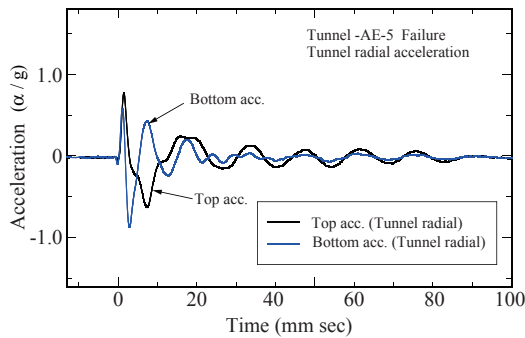
(3) 空洞モデル (AE, CE) の応答と空隙率の影響

つぎに、空隙率の異なる琉球石灰岩空洞モデルによる応答を調べるため、AE、BEおよびCE空洞モデルを用意し実験を行った。AE、BE、CE空洞モデルのおおよその空隙率は、それぞれ、3%、5%、15%である。

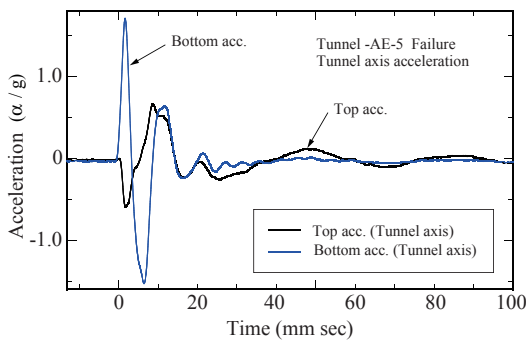
ここでは、大小の空隙率を有するモデル間の比較として、AE-5、CE-2両空洞モデルの各応答につい



(a) 荷重方向の加速度



(b) 直径方向の加速度

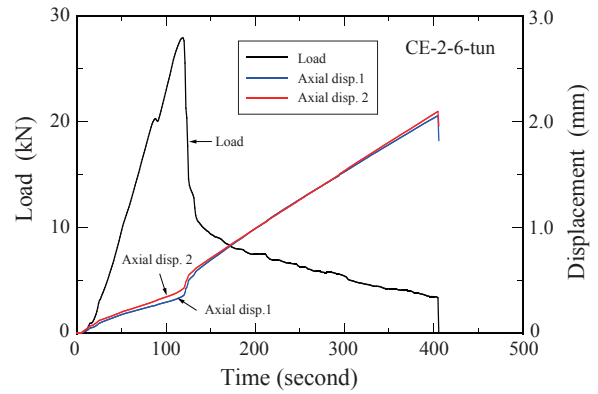


(c) 空洞軸方向の加速度

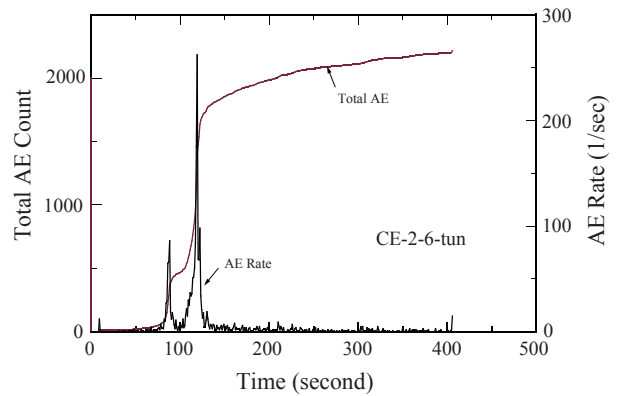
図- 1 1 空洞モデル (AE-5) の破壊時の加速度応答

て示す。図- 1 0 は、AE-5 空洞モデルの荷重、変位、電位および AE 応答を示している。いずれの応答も、荷重時の経過時間の関係で示されている。図 (a) は、荷重過程における荷重および軸変位応答である。図 (b) に示す AE 応答および図 (c) の AC の電位応答は、荷重、変位応答に比べて、岩石内に発生する亀裂とその進展に、敏感に反応している。軸方向の電位応答は、岩石内に新たな亀裂が発生するたびに、AE の応答と同様に大きな変化が見られた。

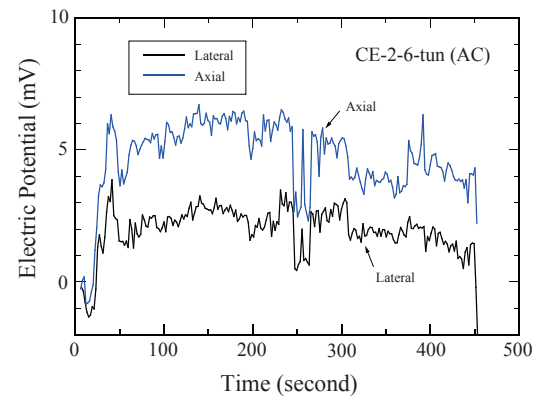
図- 1 1 に、AE-5 空洞モデルの破壊時の加速度応答を示す。空洞モデルの上、下部に配置された加速度計のいずれの加速度成分も、岩石の強度破壊時に、加速度が生じている。



(a) 荷重、変位応答



(b) AE 応答

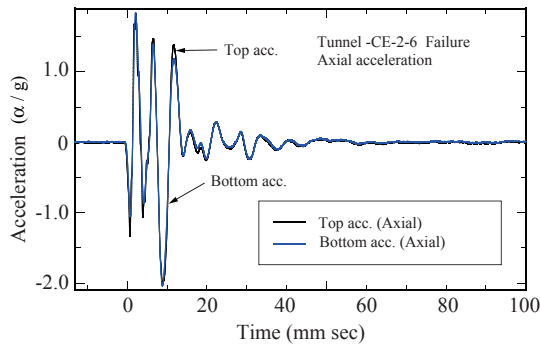


(c) 電位応答

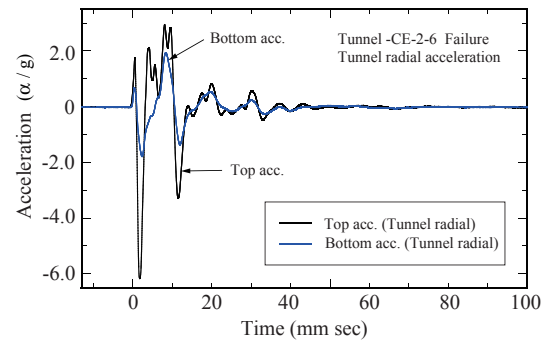
図- 1 2 空洞モデル (CE-2) の荷重、変位、電位、AE 応答

つぎに、AE 空洞モデルに比べて、空隙率の大きい CE 空洞モデルの各応答を示し、さらに、AE モデルの応答と比較し、空隙の影響について述べる。

図- 1 2 に、CE-2 空洞モデルの荷重、変位、電位および AE 応答を示す。図 (b) の AE 応答は、亀裂の発生に敏感に反応しているものの、図 (c) の電位応答は、両方向とも、急激な変化は見られない。しかしながら、岩石の強度破壊点で、ほぼピーク値



(a) 荷重方向の加速度



(b) 直径方向の加速度

図－１３ 空洞モデル (CE-2) の破壊時の加速度応答

を示している。

強度破壊時の加速度応答を、図－１３に示す。荷重方向、直径方向ともに、大きな加速度振幅が現れている。特に、直径方向の加速度振幅が大きいことが注目される。

つぎに、空隙率の異なる両空隙モデルの応答パラメータを比較し、空隙率の大小による影響を示す。空隙率の大きいCEモデルでは、AEモデルにくらべて破壊時荷重が小さくなり、一方、変形は大きくなる。AE応答は、空隙の少ないモデルにおいて、多くのAE発生が見られ、AE累積数も大きくなっている。また、電位応答は、空隙率の小さいAEモデルの場合、亀裂進展にともなう電位の変化が大きく現れている。破壊時の加速度応答は、空隙率の大きいモデルにおいて、いずれの方向の加速度振幅が大きく現れている。

4. 結論

地下空洞の安定性の管理を目的として、琉球石灰

岩による空洞モデルの一軸圧縮荷重試験を実施し、変形、破壊過程で発生する加速度応答、AE応答および電位応答を測定し、岩盤空洞の破壊を予測するパラメータとしての有効性について検討した。

一軸荷重過程における亀裂や塑性域の進展と、電位応答、AE応答の間には密接な関係があり、電位とAEの応答は、変形と比較して敏感であることが認められ、これらの応答パラメータは、地下空洞周辺岩盤の短期的な安定性を評価する有効な手段になることが明らかになった。

参考文献

- 1) 例えば、石田毅：岩盤破壊音の科学，近未来社，pp.13-26，1999。
- 2) AYDAN, Ö., Minato, T., and Fukue, M. : An experimental study on the electrical potential of geomaterials during deformation and its implications in geomechanics, *38th US Rock Mechanics Symposium*, Washington, Vol.2, pp.1199-1206, 2001.

MULTI-PARAMETER RESPONSES DURING DEFORMATION AND FRACTURING OF MODEL UNDERGROUND OPENINGS BORED IN RYUKYU LIMESTONE BLOCKS

Naohiko TOKASHIKI, Ömer AYDAN, Mitsuo DAIDO and Tomoyuki AKAGI

The prediction of the failure of underground openings as well as surface structures is quite difficult and there are no reliable techniques to do so. This experimental study is performed with a sole purpose of obtaining some fundamental data on the variations of parameters on model tests of underground openings. Tests are carried out on model underground openings bored in Ryukyu limestone blocks as natural ground material. During tests, load, displacement, electrical field, temperature, acoustic emissions and accelerations are measured. The authors report the outcomes of this experimental study and discuss their implications in geo-engineering field.