

# 衝撃荷重下における岩石の動的変形・破壊特性 に関する実験的研究

神立 晋弥\*<sup>1</sup>・藍檀 オメル<sup>2</sup>・富山 潤<sup>3</sup>・堀内 浩貴<sup>4</sup>・Tumelo Kgetse M  
Dintwe<sup>5</sup>

\*<sup>1</sup> 琉球大学 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒901-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1 番地)  
E-mail:k198472@eve.u-ryukyu.ac.jp

<sup>2</sup> 琉球大学教授 工学部社会基盤デザインコース (同上)

<sup>3</sup> 琉球大学准教授 工学部社会基盤デザインコース (同上)

<sup>4</sup> 琉球大学 理工学研究科環境建設工学専攻 (同上)

<sup>5</sup> 九州大学 地球環境工学科建設都市工学コース (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

近年、土木構造物の設計段階において、予想を大幅に上回るような衝撃荷重下での構造物の安全性評価が求められている。安定性評価をするにあたり、構造物の挙動や耐衝撃性を評価することは重要な課題である。また、構造物の基盤となる岩盤およびそれを構成する岩石の動的力学特性を把握する必要もある。しかし、岩石の衝撃荷重下での変形や破壊特性は、静的荷重下と比べ試験方法が複雑で計測が困難である。そこで本研究では、衝撃荷重下での岩石の動的変形・破壊特性を検証するために、重錘を供試体に落下させ、衝撃荷重を測ることができる「落下衝撃試験機」を開発し岩石供試体を用いて室内試験を行った。

**Key Words:** shock test, drop-weight technique, rock, fracture characteristic, dynamic deformation

## 1. はじめに

近年、土木構造物の設計段階において、予想を大幅に上回るような衝撃荷重(ここでの衝撃荷重とは作用速度が  $10^0 \sim 10^2 \text{ m/s}$  以下のことを示す。)下での設計方法が最近の課題として存在する。衝撃荷重が起因する構造物の被災事例として、地震時の断層運動による地上橋脚桁のひび割れ、台風による飛来物の衝突、落石によるロックエドの破壊、津波による消波ブロックのケーソン壁への衝突などが上げられる<sup>1)</sup>。

構造物の設計にあたり、衝撃荷重を考慮した構造物の挙動や耐衝撃性の検討ならびに構造物の安定性評価が求められている。また、構造物の基盤となる岩盤およびそれを構成する岩石の動的変形・破壊特性を把握する必要もある。ここで述べる岩石の動的変形・破壊特性とは、衝撃現象に伴い発生した衝撃荷重が、岩石に対して作用した時、その力と作用時間との関係を示す力学的性質である。しかし、岩石の衝撃荷重下での動的変形・破壊特

性を調べるにあたり、静的荷重下と比べ、供試体の変形から破壊に至るまでの時間応答が非常に早く、それに伴う荷重やひずみ応答などを計測することが難しい。代表的な動的試験方法である SHPB (Split Hopkinson Pressure Bar) 法でも同様の点が懸念されている<sup>2,3)</sup>。

本研究では、衝撃荷重下での岩石材料の動的変形・破壊特性を検証するために、重錘を供試体に落下させる単純な仕組みを持つ「落下衝撃試験機」を開発した。

本研究の当初は、この試験機の以前の初期型である落下衝撃試験機での実験を行い、その後、新たな試験機の開発、ロードセルや変位計、加速度計、ひずみゲージ等、計測機器の調整も行い実験を進めた。実験に使用した供試体は、一般的な軟岩から硬岩までの岩石を使用し実験を行った。以下、実験概要、結果および考察を述べる。

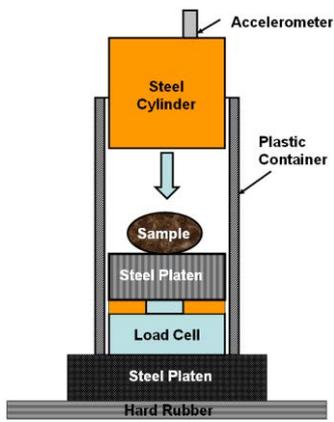


図-1 初期の落下衝撃試験機

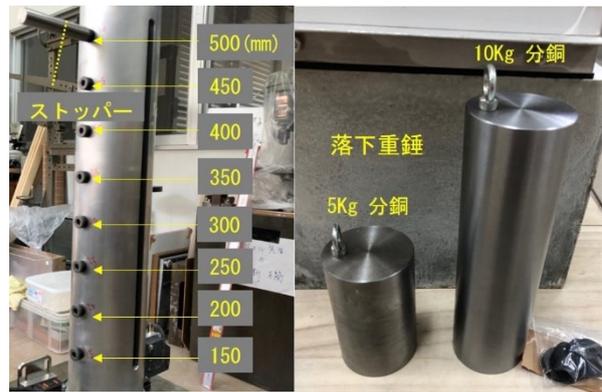


図-4 落下高さおよび落下重錘

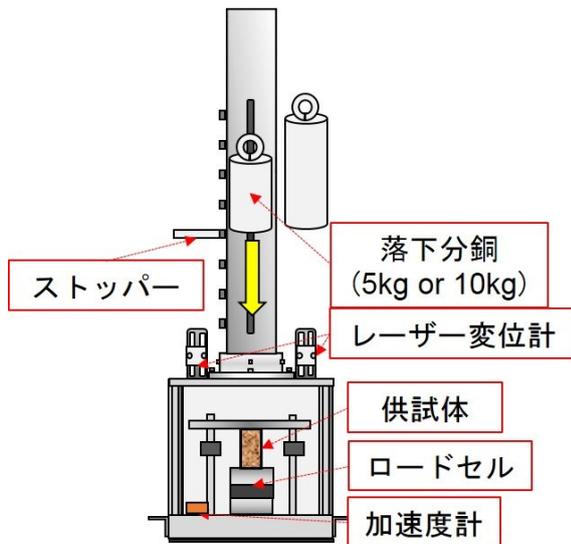


図-2 新たに開発した落下衝撃試験機 (OA-STD500X)

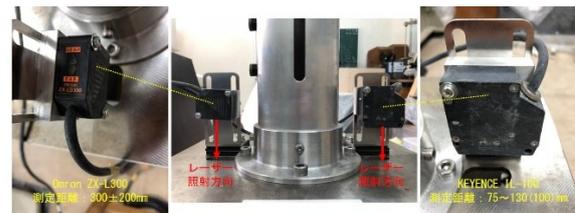


図-5 非接触型レーザー変位計の配置図

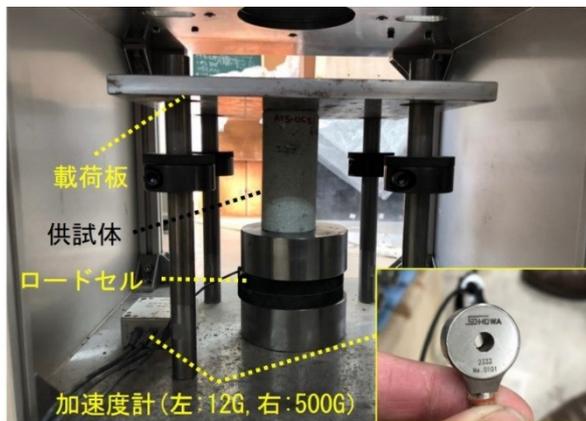


図-3 加速度計およびロードセルの配置図

## 2. 試験機および実験概要と岩石供試体の特徴

### (1) 落下試験機および実験概要

著者らは、岩石の動的変形・破壊特性を調べるため衝撃試験機を考案した。以下、初期の落下衝撃試験機および新たに開発した落下衝撃試験機および計測機器の概要について述べる。初期の落下衝撃試験機(図-1)は、質量 8.3kg、直径 87mm のスチール製円柱落下重錘、ロードセル

ル、加速度計(測定可能領域 12G)で構成されている。分銅を支えるプラスチック製のパイプは直径 100mm、高さ 500mm である。手で重錘の落下高さを調整する。

次に図-2-図-5に示す新たに改良・開発した落下衝撃試験機(OA-STD500X)は、直径 79mm、質量 5kg/10kg のスチール製円柱落下重錘、ロードセル、加速度計(始めは 12G、後に 500G のものを使用)、非接触型レーザー変位計で構成されている。供試体と重錘の接触段階にあたり均一に荷重が伝わるように、厚さ 10mm の載荷板を設置した。この載荷板は供試体の高さ及び直径を考慮し、20mm 前後の稼動が可能である。また、載荷板の左右にレーザー変位計の照射位置がくるように設置している。落下させる重錘はストッパーで支え、その落下高さは 150mm から 500mm まで 50mm 間隔で調整可能である。そのため供試体に与えるひずみ速度の調整が容易に行える。

動ひずみアンプとして YOKOGAWA-WE7000(以下、WE7000)あるいは YOKOGAWA-SL1000(以下、SL1000)を用いた。サンプリング率は当初 1 milisec、後に 10microsec で計測を行った。SL1000 を導入した実験では、試験前に供試体の弾性波速度を弾性波速度計測器において計測した。

### (2) 岩石供試体の特徴

本実験で用いた岩石の供試体は、落下衝撃試験機の衝突台と載荷板内に収まる(直径 80mm 及び高さ 100mm 以内)寸法の供試体を選定した。供試体の形状は、直円柱型や直四角柱までである。

使用した供試体の岩石は、石灰岩、凝灰岩、砂岩、泥岩、安山岩、花崗岩、石炭石である。それぞれの岩石の供試体の寸法・形状に合わせて試験を行った。後の供試体番号にも示すが、本研究で行う落下衝撃試験機による試験の名称をそれぞれ一軸圧縮衝撃試験(Uniaxial Compression Shock test : UCS)または圧裂引張衝撃試験(Brazilian Shock test : BRS)と定義した。

試験方法としては両試験ともに供試体に向け重錘を落下させ破壊させる単純な方法だが、落下高さは各供試体の静的試験における強度を参考に、確実に供試体が破壊に至るであろう高さを設定した。破壊しきれない場合は再度、落下高さまたは重錘の重さを変えて試験を行う。圧裂引張衝撃試験については供試体の方向を変えることにより試験を行う。

### 3. 実験結果および考察

本章では、琉球石灰岩、大谷石、御嵩地区の泥岩について結果および考察を述べる。また、計測における供試体への作用速度とひずみ速度は以下の式で定義する。

$$V_{\max} = \sqrt{2gH_d} \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}_{\max} = \frac{V_{\max}}{H} \quad \text{or} \quad \dot{\epsilon}_{\max} = \frac{V_{\max}}{D} \quad (2)$$

ここで、式(1)、(2)はそれぞれ岩石の供試体が破壊した際の最大速度  $V_{\max}$  (cm/s) また最大ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_{\max}$  (s<sup>-1</sup>) で算出し、g、H<sub>d</sub>、H、D はそれぞれ重力加速度(=9.80665m/s<sup>2</sup>)、重錘の落下高さ(mm)、供試体の高さ(mm)、供試体の直径(mm)である。

#### (1) 琉球石灰岩

琉球石灰岩は、日本の南西諸島を中心に広く分布している堆積岩で、特に沖縄県では基盤地層となる島尻層泥岩層の上に乗上げる形で覆い石灰岩を構成とした琉球層群と呼ばれる台地を形成している。

実験は、初期の落下衝撃試験機、WE7000を用いて行った。サンプリング間隔は1milisecである。

表-1 および図-6～図-8 にそれぞれ琉球石灰岩の測定結果、一軸圧縮衝撃試験の時間応答、圧裂引張衝撃試験の時間応答、圧裂引張試験後の静的条件および動的条件下での供試体の破壊状態の違いを示す。

興味深いことに、Tokashiki & Aydan(2010)<sup>4)</sup>が行った静

表-1 琉球石灰岩の測定結果

供試体番号	A <sub>max</sub>   (G)	ε̇ <sub>max</sub> (cm/cm/s)	動的強度 (MPa)	静的強度 (MPa)	W <sub>d</sub> (kg)
					H <sub>d</sub> (m)
UCS1	6.2	45.7	23.7	20.0–33.3 <sup>4)</sup>	8.3
					170
BRS1	8.8	32.6	3.8	2.4–5.3 <sup>4)</sup>	8.3
					170

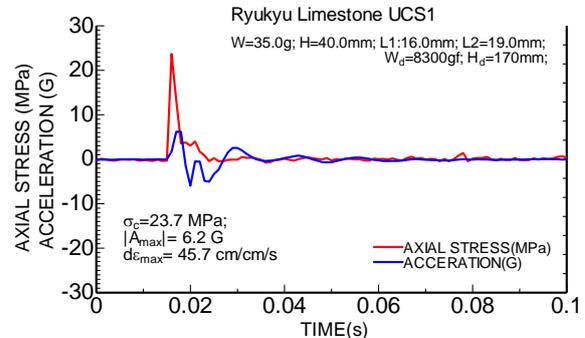


図-6 琉球石灰岩の一軸圧縮衝撃試験における動的応答 (WE7000; 1milisec, ACC=12G)

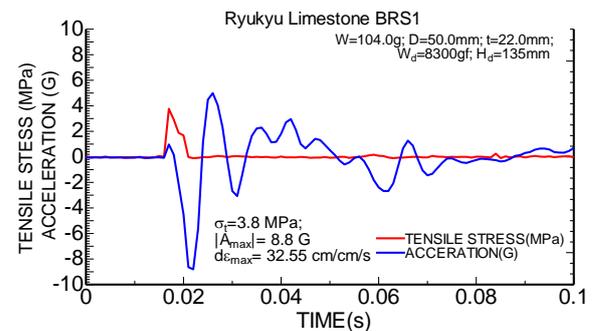


図-7 琉球石灰岩の圧裂引張衝撃試験における動的応答 (WE7000; 1milisec, ACC=12G)

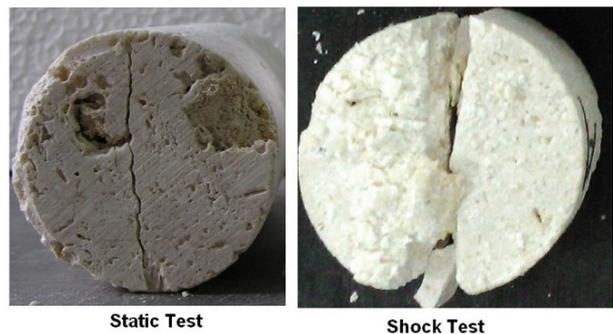


図-8 琉球石灰岩の圧裂引張試験における静的条件および動的条件下での破壊状態の違い

的試験の結果と比較すると、圧縮・引張強度伴に差異はほとんど見られなかった。また、静的試験と動的試験それぞれの試験後の供試体の破壊状態を比較してみると、明らかに動的試験の方が静的試験より破壊領域が大きいことが分かる。静的試験の場合、徐々に荷重を供試体に作用させて、脆性破壊が観察された瞬間に除荷するため、動的試験時のような荷重状況は発生しない。これは、

重錘の落下高さでの位置エネルギーが、衝突時に供試体にかかる運動エネルギーに加えて供試体の破壊を及ぼすエネルギーあるいは慣性力となり消散するためと考えられる。

## (2) 大谷石

大谷石は、栃木県宇都宮市の大谷町地区一帯で採掘され、新生代第三紀の前半の火山活動により噴出した火山灰が海水中に堆積して生成されたとされる軽石凝灰岩である。

表-2 および図-9—図-12 にそれぞれ、各大谷石の供試体の測定結果、大谷石の供試体(供試体番号：UCS2, UCS4, UCS1- $\Delta 45^\circ$ )の一軸圧縮衝撃試験の動的応答および大谷石(UCS1- $\Delta 45^\circ$ )の応力-ひずみ応答を示す。

応力-ひずみ応答は、はじめ、ロードセルと非接触型レーザー変位計から応力-ひずみの関係を取得しようと試みたが、変位計のレーザーは載荷版を照射していること、また照射位置からの反射波を計測するため計測時間に遅れがあることが原因で応力-ひずみ応答を計測することが出来なかった。そのため、直接、供試体の両側面中央部にひずみゲージ(ゲージ長 10mm)を取付け試験から得られる時間応答から荷重のピーク時間を読み取ることにより図-12 に示すような応力-ひずみ応答を計測することが可能となった。

供試体番号 UCS1-in,  $\Delta 45^\circ$ ,  $\Delta 60^\circ$  および  $\Delta 75^\circ$  は図-13 に示すように供試体を設定した角度( $45^\circ$ ,  $60^\circ$ ,  $75^\circ$ )に切断し、接着したものである。これらは Dintwe ら(2019)<sup>9)</sup>が行った大谷石における不連続面の存在が強度にどのような影響を及ぼすのかを目的として使用している。この不連続面は岩石用切断機により人工的に作成したものである。

測定結果から、Aydan & Ulusay (2013)<sup>7)</sup>の静的試験の結果と比較すると、全体的に強度は少し高めに表れていることが分かる。このことは、供試体への載荷速度が強度の増加に影響していると考えられる<sup>9)</sup>。

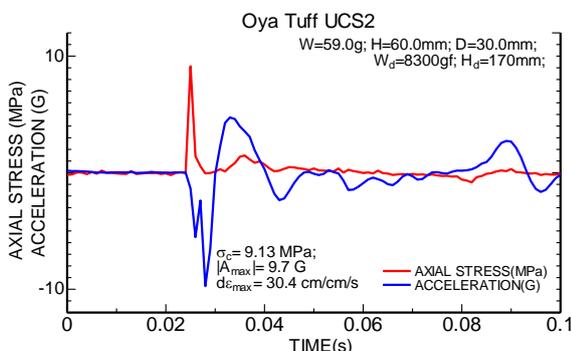


図-9 大谷石(UCS2)の一軸圧縮衝撃試験における動的応答 (WE7000; 1milisec、ACC=12G)

表-2 大谷石の測定結果

供試体番号	A <sub>max</sub>   (G)	ε̇ <sub>max</sub> (cm/cm/s)	動的強度 (MPa)	静的強度 (MPa)	W <sub>d</sub> (kg)
					H <sub>d</sub> (m)
UCS2	9.7	30.4	9.13	4.7 - 11.2 <sup>9)</sup>	8.3
					170
UCS3	8.9	31.3	8.9		5.0
					500
UCS4	12.5	28.0	5.3		5.0
					400
UCS1-in	36.9	31.3	24.6		5.0
UCS1- $\Delta 45^\circ$	30.0	31.5	16.7		10.0
UCS1- $\Delta 60^\circ$	42.8	32.6	24.9		5.0
UCS1- $\Delta 75^\circ$	42.2	31.2	21.5		10.0
					500

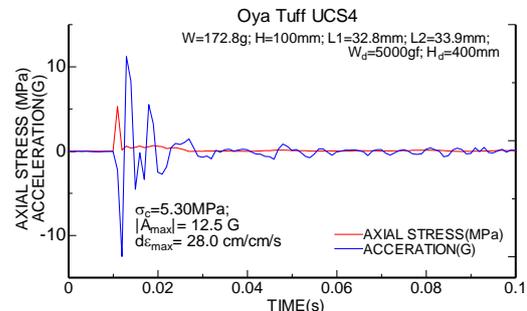


図-10 大谷石(UCS4)の一軸圧縮衝撃試験における動的応答 (SL1000; 1milisec、ACC=12G)

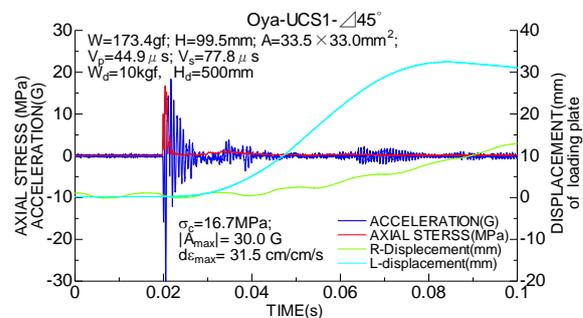


図-11 大谷石(UCS1- $\Delta 45^\circ$ )の一軸圧縮衝撃試験における動的応答(SL1000; 10microsec、ACC=500G, V<sub>p</sub>およびV<sub>s</sub>:弾性波速度, ひずみゲージ取付)

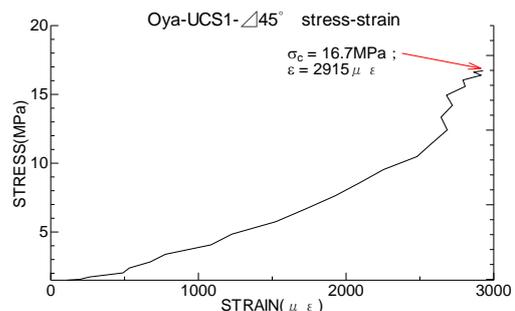


図-12 大谷石(UCS1- $\Delta 45^\circ$ )の一軸圧縮衝撃試験における応力-ひずみ応答

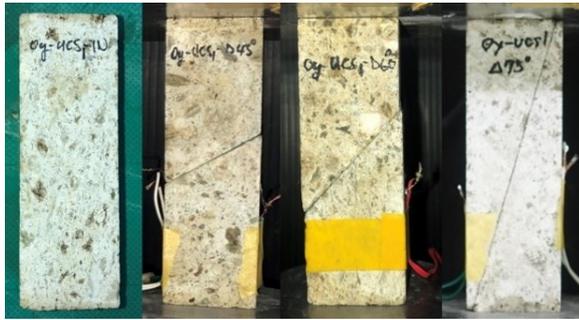


図-13 大谷石の供試体(左から UCS1-intact,  $\Delta 45^\circ$   
 $\Delta 60^\circ$ ,  $\Delta 75^\circ$ )

### (3) 御嵩地区の泥岩

岐阜県御嵩地区の砂質泥岩の供試体を使用し静的および動的の一軸圧縮試験を行った。以下、表-3 および図-14 - 図-16 にそれぞれ、御嵩地区の泥岩の測定結果、静的および動的の一軸圧縮試験の強度応答、応力-ひずみ応答の比較(供試体番号:M-MST1 static および M-MST6 UCS)を示す。

測定結果から静的試験での 9.5 MPa と比較し、動的試験では 16.5 MPa(M-MST2), 14.4 MPa(M-MST6)と大きく示された。また、応力-ひずみ応答からも破壊に至るまでのひずみが静的試験と比較して動的試験のほうが大きく表れていることが分かる。大谷石の実験結果と同様、供試体への载荷速度が強度の増加に影響していると考えられる<sup>9)</sup>。また、図-17 の静的試験および動的試験後の供試体の破壊状態を比較すると、どちらも似たようなコーン状の割れに加え、動的試験のほうが静的試験より破壊領域が大きいことが観察された。

表-3 御嵩地区の泥岩の測定結果

供試体番号	A <sub>max</sub>   (G)	$\dot{\epsilon}_{max}$ (cm/cm/s)	強度 (MPa)	W <sub>d</sub> (kg)	
				H <sub>d</sub> (m)	H <sub>g</sub> (m)
M-MST1 static	-	-	9.5	-	-
M-MST2 UCS	24.7	39.4	16.5	5.0	500
				10.0	500
M-MST6 UCS	25.1	45.1	14.4	10.0	500
				5.0	500

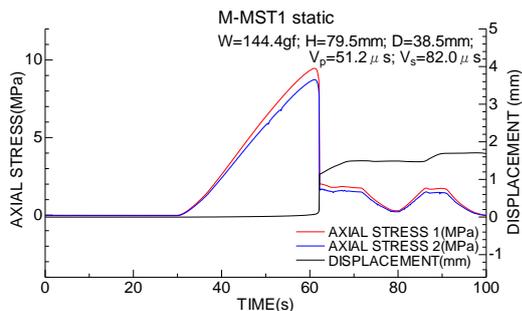


図-14 御嵩地区の泥岩(UCS1 static)の一軸圧縮試験における静的応答

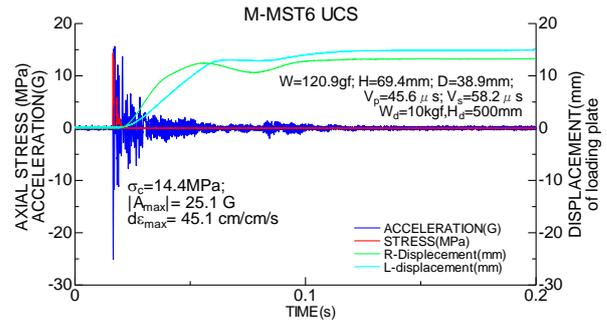


図-15 御嵩地区の泥岩(M-MST6 UCS)の一軸圧縮衝撃試験における動的応答  
(SL1000; 10microsec、ACC=500G ひずみゲージ取付)

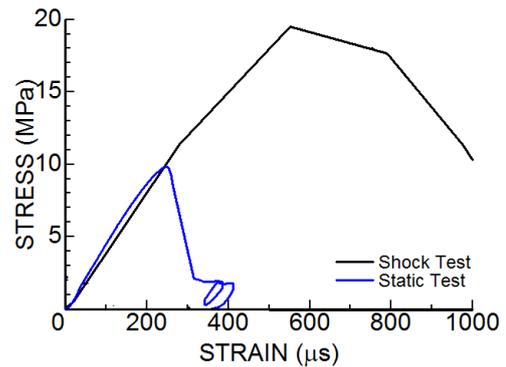


図-16 御嵩地区の泥岩(M-MST1 static および M-MST6 UCS)の一軸圧縮試験における応力-ひずみ応答の比較



図-17 御嵩地区の泥岩(M-MST1 static および M-MST6 UCS)の試験後の破壊状態の比較

## 5. まとめ

本研究では、衝撃荷重下での岩石材料の動的変形・破壊特性を検証するために、落下衝撃試験機を開発し室内衝撃試験を行った。以下に得られた知見と考察および今後の課題を述べる。

初期の落下衝撃試験機、新たな落下衝撃試験機での実験において、ロードセル、変位計、加速度計、ひずみゲージや動的ひずみアンプなど測定機器を調整した結果、加速度計に関して 12G から 500G 対応への変更、動的ひずみアンプ YOKOGAWA WE7000 から SL1000 に変えサンプリング率を 1milisec から 10microsec に細かくしたことで測定精度の高い時間応答を得ることが可能になった。

応力-ひずみ応答は、直接、供試体の両側面中央部にひずみゲージを取付け実験してみたところ、試験の時間応答から荷重のピーク時間を読み取ることで、応力-ひずみ応答を計測することが可能となった。しかし、新たな試験機の再現性を得るための課題として、サンプル数が少ないこと、衝突時の入射波および後の反射波の干渉を少なくするためにゲージ長を 10mm から 5mm に変更することなど今後も試験を重ねひずみ応答の測定精度を高めることが課題となった。

衝撃試験後と静的試験後の供試体の破壊状態を比較すると、その破壊領域の差は明らかに動的試験後の方が大きいことが観察された。静的試験の場合、徐々に荷重を供試体に作用させて、脆性破壊が観察された瞬間に除荷するため、動的試験時のような荷重状況は発生しない。これは、一軸圧縮衝撃試験のときと同様、重錘の落下高さでの位置エネルギーが、衝突時に供試体にかかる運動エネルギーに加えて供試体の破壊を及ぼすエネルギーあるいは慣性力となり消散するためと考える。

本論文の一部には、衝撃試験と静的試験の結果を比較した際に、全体的に強度は少し高めに表れる傾向があった。これは供試体が破壊する際に与えた載荷速

度、重錘の重量が強度の増加に影響していると考えられる。

今回開発した落下衝撃試験は、重錘の重さや落下高さの違いによる供試体の強度、ひずみ速度、変位等の違いを調べる必要があると考える。載荷速度と応力の増加の関係も含め、今後、有限要素法や福田ら(2017)の peridynamics 理論を用いた岩石の動的破壊プロセス解析<sup>7)</sup>等、数値解析手法を用いて再現解析を行い、検討する予定である。

## 参考文献

- 1) 大野友則：土木・建築分野における衝撃実験・計測法の現状と問題点，実験力学 vol.2, No.4, pp235-242, 2001
- 2) Aydan, Ö (2017): Rock Dynamics. CRC Press, Taylor and Francis Group, 462p, ISRM Book Series No. 3, ISBN 9781138032286
- 3) 佐藤裕久, 山下実 (2009) : SHPB 圧縮実験法標準化案の提示とその問題点-数値計算による分割ホブキンソン棒圧縮法の標準化に関する研究 3, 日本塑性加工学, Vol.50, No.584, pp842-845
- 4) Tokashiki, N. Aydan, Ö. (2010) : The stability assessment of overhanging Ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of Rock Mass. J. of Geotechnical Eng., JSCE, Vol. 66, No. 2, pp.397-406.
- 5) Dintwe, T.K.M, T. Seiki, Ö. Aydan, N. Tokashiki (2019) : The behaviour of Oya tuff pillars under static and shock loading, Proceedings of 2019 Rock Dynamics Summit in Okinawa, 7-11 May, 2019, Okinawa, Japan, ISRM (Editors: Aydan, Ö., Ito, T., Seiki T., Kamemura, K., Iwata, N.), 106-111.
- 6) Aydan, Ö. Sugiura, K., Sakamoto (2018): The quality of backfilling of abandoned lignite mines on ground settlement under static and dynamic conditions. Australian Rock Mechanics Symposium, AusRock2018, Forth Australian Ground Control in Mining Conference, Sydney, 134-141.
- 7) Aydan, Ö., Ulusay, R., (2013) : Geomechanical evaluation of Derinkuyu Antique Underground City and its implications in geo-engineering. Rock Mechanics and Rock Engineering, Springer, Volume 46, Issue 4, pp.731-754.

(2019. 9. 20 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON DYNAMIC DEFORMATION AND FRACTURE CHARACTERISTICS OF ROCK UNDER SHOCK LOADING

Shinya KODATE, Ömer AYDAN, Jun TOMIYAMA, Kouki HORIUCHI and Tumelo Kgetse M Dintwe

Recently, stability evaluation of the civil engineering structures under shock loading. In addition, it is necessary to understand the dynamic characteristic of a rock constituting bedrock becoming a base of structures and materials. However, method of shock test is more complicated than the static test, and deformation and the fracture characteristics under shock loading have difficulty in measurement. The authors devised a new experimental apparatus "the drop-weight apparatus" to investigate the behaviour of rocks under shock loading. it is possible to evaluate the mechanical behaviour and characteristics of rocks subjected to shock load during pre-failure as well as post-failure stages.