

岩盤の浅い地下空洞を考慮した 静的および動的安定性に関する実験的研究

玉城道雄^{1*}・伊東孝²・藍檀オメル³・渡嘉敷直彦⁴

¹琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1番地)

²琉球大学 工学部工学科社会基盤デザインコース (同上)

³琉球大学 名誉教授(同上)

⁴琉球大学 島嶼防災研究センター内 (同上)

*E-mail: k208472@eve.u-ryukyu.ac.jp

近年、人工・自然空洞の安定性について注目されている。その中でも、大規模空洞は一般的に堅硬な岩盤を対象に建設されている。一方で、浅い地下空洞の耐震性を考える上では、地震などの大きな外力を考慮した研究が重要となる。そこで本研究では、模型試験を通じて様々な不連続パターンを持つ不連続性岩盤を対象に地震に伴う浅い地下空洞の崩壊状態を検討した。その結果、六角形不連続面配置パターンを考慮した重力場および動的試験による崩壊状態は同様であり、動的試験のほうが重力場より小さい空洞で崩壊することが確認できた。さらに、落とし戸試験に振動を加える新たな試みを行い、土被りが浅い場合、地震力によってグランドアーチが失われる可能性があることが分かった。

Key Words : underground cavity, subsidence, shaking table test, trapdoor test, static and dynamic stability.

1. はじめに

人工・自然空洞は安定性や環境保全などの点に着目され建設や維持管理が行われる。その中でも、大規模空洞は一般的に堅硬な岩盤を対象に建設されている^{1)・2)}。一方で、垂炭廃坑や旧鉱山での空洞が崩壊し、地上に陥没が発生したと報告されており^{3)・4)}。このような浅い地下空洞の耐震性を考える上では、地震などの大きな外力を考慮した研究が重要となる。例えば、渡嘉敷(2011)⁵⁾は、琉球諸島における自然空洞を調査し、空洞の全体破壊と局所破壊の区別ができる安定性評価の関係式を提案している。しかし、全体的に安定している空洞でも地震による局所的な破壊から全体的な破壊に変化する可能性がある。近年、大規模な地震に備えた対策事業も計画されている⁶⁾。

本研究では、模型実験を通じて様々な不連続パターン(六角形パターン、千鳥状、方眼状、破碎された琉球石灰岩、球形など)を持つ不連続性岩盤を対象に地震に伴う浅い地下空洞の崩壊状態を検討する。また、落とし戸試験に振動を加える新たな試みを行い、既存の考えを含めて振動や不連続面の方向などを再検討する。

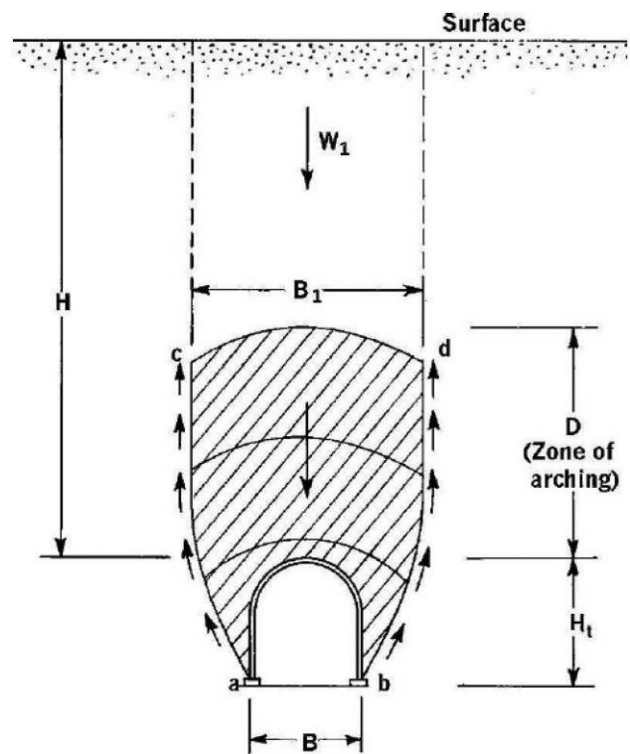


図-1 Terzaghiによるアーチング理論⁸⁾

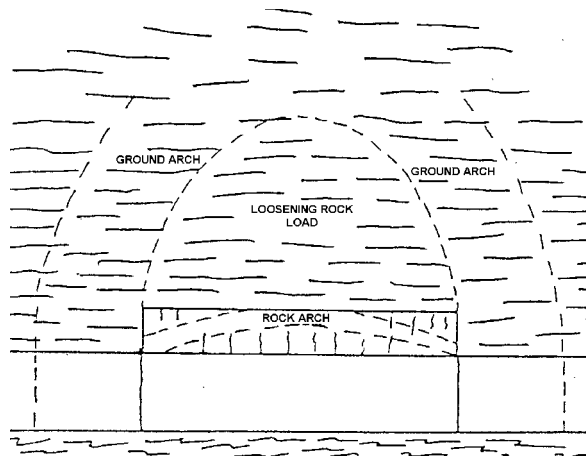


図-2 グランドアーチ概念⁹⁾

2. 岩盤力学のアーチング理論

図-1にTerzaghi (1946) ⁹⁾が用いたトンネル支保に作用する荷重の考え方を示す。トンネルの天端および側壁は、高さDに等価な荷重をバランスさせるのに必要な支保の反力が要求されており、動きが生じる岩盤幅B_iは岩盤特性、トンネルの寸法Hおよび幅Bで決まるといわれている。また、地下空洞の上部にアーチが形成され、アーチ作用によってトンネル周辺にできた圧縮領域はグランドアーチと呼ばれている。図-2に示すように、グランドアーチと空洞上部との間にゆるみ地帯 (Loosening zone) が現れると想定されている⁹⁾。一方でグランドアーチは土被りの低さや岩盤条件などによって形成されないこともあり、空洞内部では掘削後に落石が起こる可能性がある。

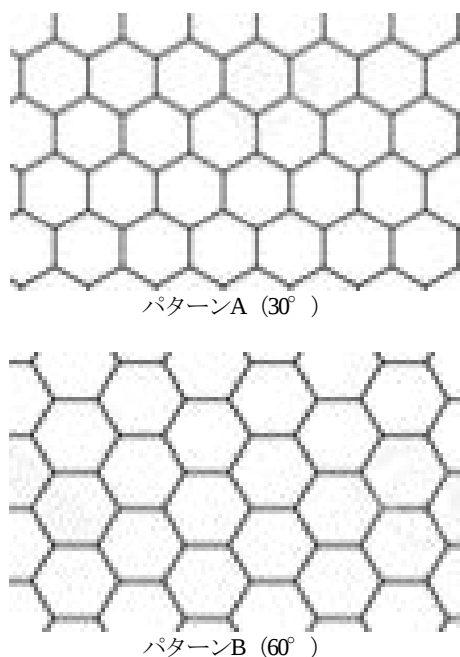


図-3 六角形ブロックの配置パターン

表-1 六角形アルミニウムの材料特性

特性	六角形アルミニウム ¹⁰⁾
弾性係数 (GPa)	68.0
ポアソン比	0.33
単位体積重量 (kN/mm ³)	26.89
静的摩擦角 (°)	15-15.9
動的摩擦係数 (°)	14.1-14.54

3. 模型材料および実験方法

(1) 重力場および動的模型実験

浅い地下空洞の模型に用いた材料は奥行50mm、一辺の長さ6mmのアルミニウム六角形ブロックであり、アルミニウムの材料特性¹⁰⁾を表-1に示す。また、図-3に示すように六角形不連続面配置パターンとして、パターンAおよびパターンBを採用した。パターンAの場合、アルミニウムのブロックを高さ約236mmと27段、472個使用した。パターンBの場合、アルミニウムのブロックを高さ240mmと24段、470個使用した。実験方法として、下端中央付近から積み木崩しのように六角形ブロックを取り除き、地表面に向けて徐々に空洞化した。なお、六角形不連続面配置パターンの違いによる空洞化は実験を通じて異なることが観察されている¹¹⁾。パターンBでは空洞幅に変化はみられなかったが、パターンAの場合、一部の滑り落ちから空洞幅の拡大がみられた。

実験は、模型実験で用いた振動台^{10), 12)}は、最大100kgの物体に約600galまでの加速度を与えるものであり、最大変位量は100mmで、振動台の面積は1×1 (m²)である。振動条件は、入力加速度を1分間に50galから700galまで上昇させた。本実験では、重力場および動的試験による崩

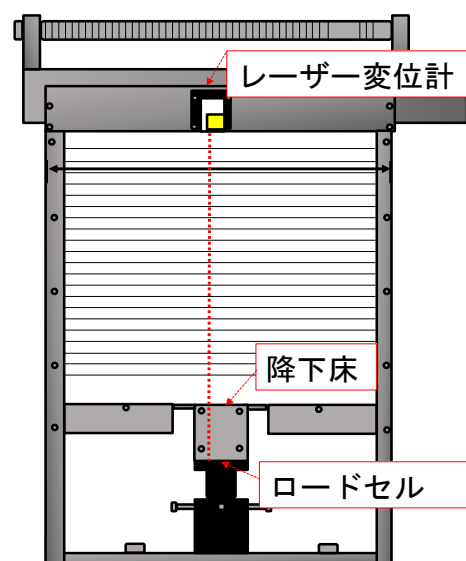
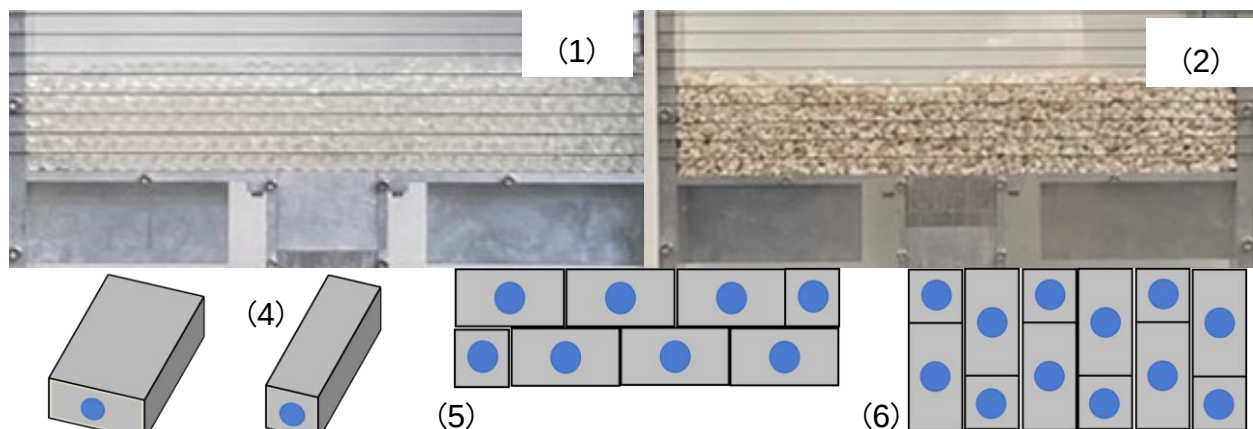


図-4 落とし戸試験装置



(1) ビー玉 $\Phi 8\text{mm}$ (2) 破碎された琉球石灰岩 (3) 1:2模型 (4) 1:1模型 (5) 千鳥状水平配列 (6) 千鳥状鉛直配列
図-5 模型材料

壊状態の差異を比較した．ここでは，それぞれ1つの実験結果を例に挙げ説明する．具体的に，パターンAは最大空洞幅 $B=11\text{cm}$ ，空洞高さ $D=15\text{cm}$ ，土被り $H=5\text{cm}$ である．パターンBは最大空洞幅 $B=3\text{cm}$ ，空洞高さ $D=15\text{cm}$ ，土被り $H=5\text{cm}$ である．

(2) 落とし戸および動的实验

落とし戸試験は一般的に土質地盤を考慮した模型材料の利用が多い^{13), 14)}．図-4に示す本実験で使用した落とし戸試験は粒径 1mm 未満の模型材料を使用すると，降下床の隙間に模型材料が入り降下に支障をきたす．従って，本実験では粒径 1mm 以上の図-5に示す模型材料を採用した．具体的に，粒径の大きい順から，直方体アルミニウムブロック（図-5の(3)および(4)）や破碎された琉球石灰岩⁴⁾，ビー玉（ $\phi 8\text{mm}$ ）と計3パターンである．1:2模型（幅 20mm ，高さ 10mm ，奥行き 50mm ）は幅 260mm と固定し，隙間を埋めるため形状が異なる1:1模型を使用した．直方体アルミニウムブロックの並べ方として，青色の○マークを試験装置から見えるように配列を行うと千鳥状の形状にパターン化することができた¹⁵⁾．そして，千鳥状配列の方向として水平及び鉛直（図-5の(5)および(6)）を考慮した．さらに，柱状に立てて配列を行うと方眼状の形状にパターン化することができた¹⁵⁾．以上から千鳥状と方眼状との比較検討した．

本実験では，降下床（幅 50mm ，奥行き 50mm ）を1Bとし，土被り比 H/B の差異による荷重の変化を検討する落とし戸試験に振動を加え，土被りの影響および振動前後の荷重の変化に着目した．次に，落とし戸および振動実験の実験手順を記述する．①降下床を 10mm 程度降下させる．②振動を加えた．③再び降下床を 10mm 程度降下させる．④振動を加えた．実験中に，振動台の加速度，降下床直下の荷重および変位を同時に記録した．加速度の計測は，東京測器の加速度センサーを使用し，降下床

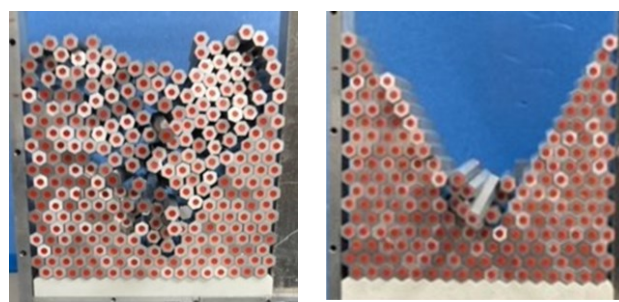


図-6 重力場（左）および動的实验（右）による崩壊状態（パターンA）

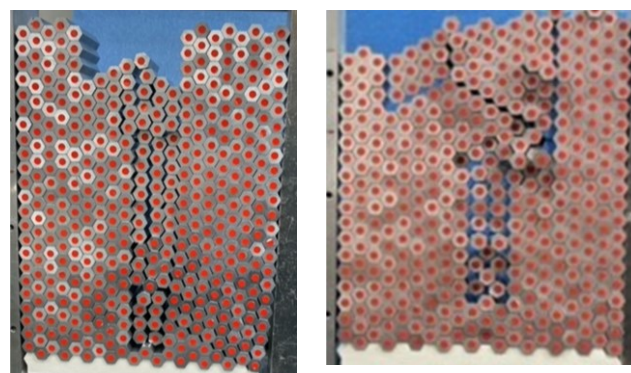


図-7 重力場（左）および動的实验（右）による崩壊状態（パターンB）

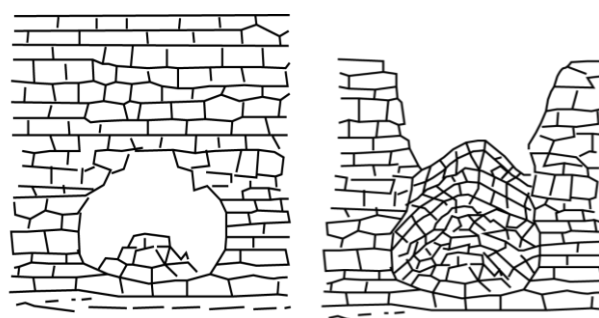


図-8 各領域の空洞の状態⁹⁾（左）領域II （右）領域IV

直下にロードセルを取り付けた。降下床を移動する際に変位を調べる目的で、レーザー変位計を使用した。振動計測には、YOKOGAWA SL1000を使用し、10msでサンプリングを行った。振動条件は、入力加速度を約45秒間に50galから約300gal（振動回数約150回）まで上昇させた。なお、前後アクリル板を用いて固定して行った。ここでは、ビー玉、千鳥状、方眼状および破碎された琉球石灰岩の実験結果を例に挙げ説明する。

4. 実験結果および考察

(1) 重力場および動的模型実験

図-6および図-7に重力場および動的試験による崩壊状態を示す。実験結果から六角形アルミニウムブロックの場合では同様な崩壊状態で地表面沈下に影響を及ぼすことがみられた。また、動的試験のほうが重力場より小さい空洞で崩壊することが観察された。パターンAは入力加速度が約330galで、パターンBは入力加速度が約380galでそれぞれ崩壊し始めた。パターンAの動的試験では、概ね一部の滑り落ちから始まり、続いて空洞上部からブロックの落下がみられ、地表面全域に沈下が生じた。一方で、図-6より空洞幅や土被り比が小さい場合、側壁からブロックの転倒や空洞上部からブロックの落下がみられたが、空洞は全体的に安定している結果もあった。パターンBの動的試験では、概ね空洞上部からブロックの落下から始まり、続いて側壁からブロックの転倒がみられ、最後に一部の滑りから上部の地表面に沈下が生じた。一方で、図-7より土被り比が小さい場合、側壁からブロックの転倒や空洞上部からブロックの落下がみられたが、空洞は全体的に安定している結果もあった。渡嘉敷(2011)⁹が定義した琉球諸島の自然空洞について、全体破壊と局所破壊を区別し各領域に判定した事例を一部図-8に示す。その結果、パターンA（図-6）およびパターンB（図-7）の崩壊状態では領域IVに判定される。また、空洞幅や土被り比が小さい場合、ブロックの落下などがみられ空洞領域が拡大したが空洞は全体的に安定している場合は領域IIと判定した。本実験では、動的試験による崩壊状態として領域Iである局所的・全体的に安定な空洞の状態はみられなかった。

(2) 落とし戸および動的試験

図-9から図-13にビー玉を対象とした振動前後の加速度および変位、荷重の変化をそれぞれ示す。さらに、土被り比の違いによる荷重の変化を図-14に示す。実験結果から、振動によって作用する荷重が増加した。また、図-9および図-10の低土被りでは荷重が初期状態まで戻っており、グラウンドアーチが形成されずにビー玉の質量

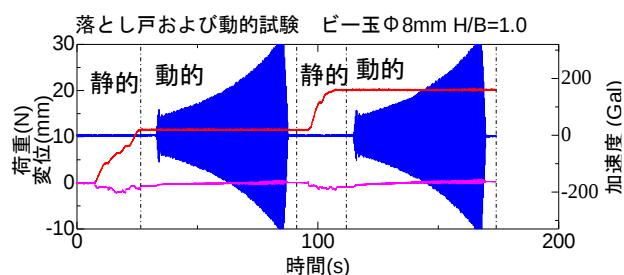


図-9 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=1.0）

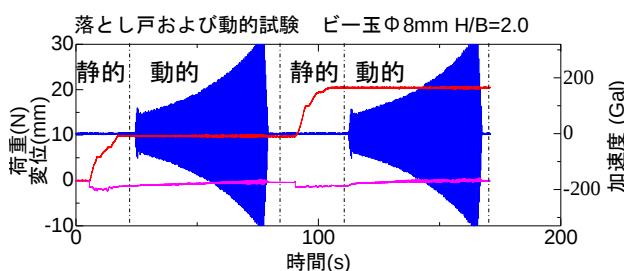


図-10 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=2.0）

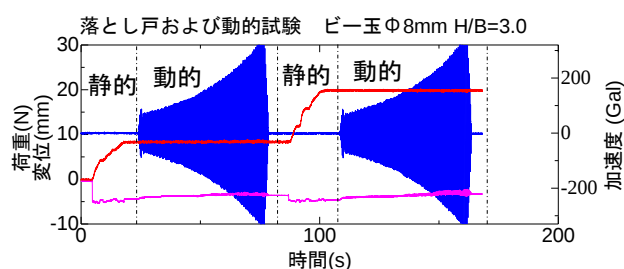


図-11 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=3.0）

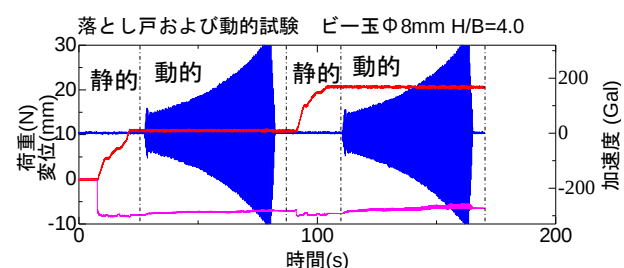


図-12 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=4.0）

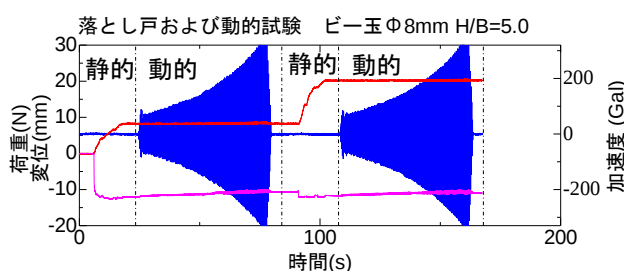


図-13 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=5.0）

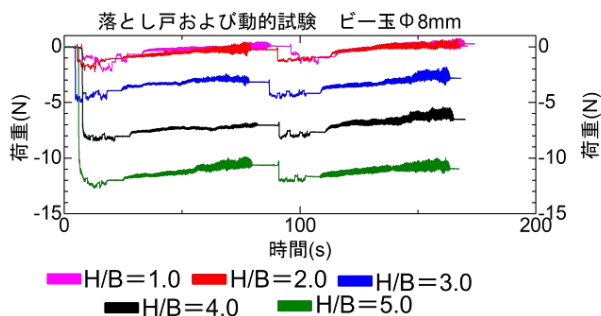
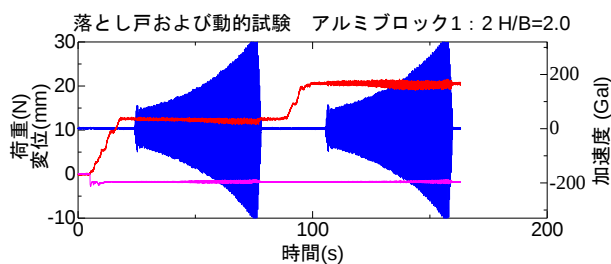


図-14 土被り比および荷重の関係（ビー玉）



実験後の様子（千鳥状, H/B=2.0）

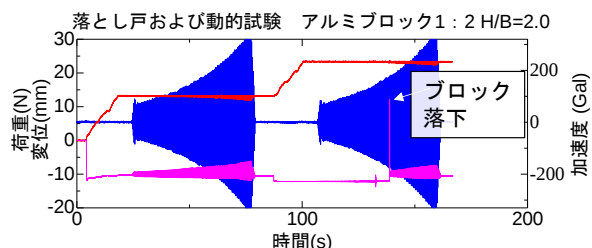


実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=2.0）

図-15 千鳥状水平配列



実験後の様子（方眼状, H/B=2.0）



実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=2.0）

図-16 方眼状鉛直配列

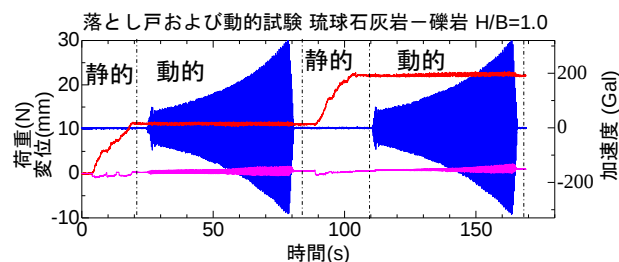


図-17 実験時間および加速度（青）、変位（赤）、荷重（ピンク）の関係（H/B=1.0）

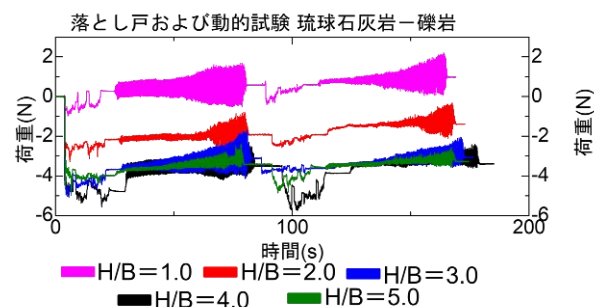


図-18 土被り比および荷重の関係（破碎された琉球石灰岩）

が降下床に負荷したと考えられる。一方で、崩壊状態は落とし戸試験と同様に地表面沈下などの変化はみられなかった。

次に、千鳥状および方眼状を考慮した落とし戸および動的試験を行った。図-15および図-16に実験結果を示す。千鳥状に配列した場合、グラウンドアーチが形成されているため降下床との接触がなく、深い土被りを考慮しても荷重が増加する傾向はみられなかった。また、図-16に方眼状に配列した実験では、土被り比H/B=2.0以上とした場合、振動によるブロックの落下が生じ、荷重増加がみられた。しかしながら、鉛直に配列した場合、側面の拘束が不十分なため、落とし戸試験中に降下床と一緒に降下する場面がみられた。一方で、拘束を解除する際に降下床上部ではブロックの落下が観察された。実験結果から1:2模型および1:1模型の配分や不連続面における方向の差異でグラウンドアーチが形成し、あるいはグラウンドアーチが失う可能性があることを示した。しかし、再現性を得るための課題として、側面の拘束が不十分であるため試験装置の改良が課題となった。

最後に破碎された琉球石灰岩を対象とした落とし戸および動的試験の実験結果を図-17および図-18に示す。実験結果からビー玉と同様に振動による荷重増加がみられた。また、図-18に示すように土被り比H/B=1.0では荷重の増減幅も拡大している。一方で、土被り比H/B=3.0以上だと荷重に差異はみられなかった。

5. まとめと今後の課題

本研究では、不連続性岩盤の浅い地下空洞を対象とした静的・動的安定性を検証するため、崩壊状態の比較検討および振動を作用させた落とし戸試験を行った。以下に得られた知見と考察および今後の課題を述べる。

六角形不連続面配置パターンを考慮した重力場および動的試験による崩壊状態および領域は同様であり、動的試験のほうが重力場より小さい空洞で崩壊する傾向が確認できた。しかし、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、動的実験後において空洞が全体的に安定している事例も観察された点から空洞の幅や高さ、土被り比などに着目し、今後も試験を重ね崩壊状態の判定精度を高めることが課題となった。

落とし戸試験に振動を加える新たな試みとして、荷重の変化に着目した結果、振動によって作用する荷重が増加した。また、模型材料の形状や配列によって降下床と一緒に沈下せず荷重が作用しないことも分かった。そして、土被りが浅い場合、地震力によってグラウンドアーチが失われる可能性があることが分かった。しかし、側面の拘束が不十分であるため試験装置の改良が課題となった。今後、振動による影響を考慮した実験や解析を行い、検討する予定である。

参考文献

- 1) エバート・フック, エドウィン T. ブラウン: 岩盤地下空洞の設計と施工, 土木工学社, pp. 138-247, 1985.
- 2) 川本脩万, Ömer Aydan, 土山茂希: 大規模地下空洞設計の現状分析とその考察, トンネルと地下, 第 23 巻, 第 3 号, pp.31-37, 1992.
- 3) Ömer Aydan, Yoshimi Ohta, Melih Gniş, Naohiko Tokashiki, K. Ohkubo: Response and stability of underground structures in rock mass during earthquakes, Rock Mechanics and Rock Engineering, pp.857-875, 2010.
- 4) Ömer Aydan, Naohiko Tokashiki: The effect of collapse of underground openings on ground surface through model experiments and case histories, 第 42 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.189-194, 2014.
- 5) 坂本昭夫, 杉浦乾郎, 山田紀利, 和田幸二郎, 田野久貴, 藍檀オメル: AE モニタリング法を用いた亜炭廃坑空洞充填による充填効果の検証, 第 43 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp.216-221, 2015.
- 6) 渡嘉敷直彦: 琉球石灰岩の工学的特性と琉球石灰岩盤および石積み構造物の安定性に関する研究, 早稲田大学博士論文, pp.135-141, 2011.
- 7) 経済産業省, 令和 2 年度第 3 次補正予算の事業概要 (PR 資料) pp.28, 2021. URL: hosei3.yosan.pr.pdf (meti.go.jp) 最終閲覧日 2021 年 8 月 28 日
- 8) Terzaghi K: Rock defects and loads on tunnel supports, Rock Tunneling with Steel Supports, pp.17-99, 1946.
- 9) Aydan Ömer: The stabilization of rock engineering structures by rockbolts, Doctorate Thesis Nagoya University, 1989.
- 10) 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦, 伊東孝, 村山有祈: 六角形のブロックで構成される岩盤斜面の動的安定性に関する実験および解析的検討, 第 15 回岩の力学国内シンポジウム講演集, 講演番号 80, pp.453-458, 2021.
- 11) Michio Tamashiro, Ömer Aydan, Takashi Ito and Naohiko: An Experimental Study on the Shallow Underground Openings in Rock Mass with Hexagonal Discontinuity Pattern, The 5th International Workshop on Rock Mechanics and Engineering Geology in Volcanic Fields(RMEGV2021).
- 12) 太田良巳, 藍檀オメル: 地震動に伴う岩盤斜面に近接する浅所トンネルの破壊形態と安定性の評価, 第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム, 講演番号 9, pp.44-49, 2011.
- 13) 村山朔朗, 松岡元: 砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究, 土木学会論文報告集, 第 187 号, pp.95-108, 1971.
- 14) Umair Ali, Masahide Otsubo, Hiroaki Ebizuka, and Reiko Kuwano: Particle-scale insight into soil arching under trapdoor condition, Soils and Foundations 60, pp.1171-1188, 2020.
- 15) 清水泰弘, Ömer Aydan, 市川康明, 川本脩万: 不連続性岩盤斜面の地震時における安定性と崩壊形状, 土木学会論文集, 第 400 号, III-10, pp.189-198, 1988.

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE SHALLOW UNDERGROUND OPENINGS IN ROCK MASS ON THEIR STATIC AND DYNAMIC STABILITY

Michio TAMASHIRO, Takashi ITO, Ömer AYDAN and Naohiko TOKASHIKI

In recent years, there is interest on the stability of man-made and natural cavities. Among them, large-scale cavities are generally constructed for hard rock. However, there are few studies on shallow underground openings, and it is necessary to consider seismic resistance in underground openings. In this study, the authors examine the stability of shallow underground openings in rock with different discontinuity patterns (e.g. hexagonal pattern orthogonal, crushed, spherical) through model tests. Furthermore, we have studied the effect of seismic forces on the rock load through the trapdoor testing technique, and showed that the possibility of permanent change in rock load.