

大谷採石地下空間における残柱の 安全性と安心感との関連について

Huy Thanh BUI¹・Tumelo DINTWE²・清木 隆文³

¹前田道路株式会社 研修センター (〒300-4111 茨城県土浦市大畑 208)

²学生会員 九州大学大学院 地球資源システム工学部門 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744)

³正会員 宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

栃木県宇都宮市大谷町には大谷石を地下採石場から採掘した結果, 広大な地下空間が多数現れた。大谷採石地下空間を空間資源として有効利用するために, 地下採石空洞で様々な施設を実施する計画が考えられている。特に平成元年に発生した陥没事故以来, 大谷採石地下空間を有効利用を動きは活発になって来て入る。本研究では, 大谷採石地下空間の安全性を確認することを第一の目的として, 残柱式の大谷採石地下空間を構造的に支える残柱をモデル化して行われた室内試験を数値解析で再現を試み, 残柱の安全性を考察した。さらにアンケート調査を通して, 残柱のキズの支保を利用者が安心できる対策案について考察する。

Key Words: Oya tuff, underground quarry, pillar model, structural stability, sense of safety

1. はじめに

大谷石とは栃木県宇都宮市の西北方向に約 8 km 離れている大谷町の中心で集まって, 大谷町付近の東西約 4 km, 南北約 6 km の範囲に分布している凝灰岩のことである。軽く軟らかいため加工しやすく, さらに防音性と耐火性に優れているので防音と防火のため建築用石材によく使用されている。最近では, 内装材・オブジェ等にも広く用いられている。最近では, 平成 25 年(2013 年)2 月に, 南北 55 m, 東西 85 m, 深さ 6 m の浅所陥没事故が発生している。陥没は大谷石採石跡地下空間を有効利用する際に大きな課題で, 地下空間の安全性が理解を得られない大きな要因である。この陥没事故を予防する対策として, 大谷石地下採石空間の安全性を評価する研究が近年促進されている^{1)~3)}。本研究では大谷石の掘削により形成された無数の地下採石空洞に残っている残柱を対象として, 実験とモデル再現によって地下構造の安全性と有効利用を図る研究である。FLAC3D による数値解析によって, 残柱の静的及び動的な実験を再現し, この結果をもとにして室内試験で測ったデータと比べて大谷地下採石現場の安定性評価を検討する。通常大谷採石地下空間で使われているキズなどが見られる部分を補強する支保工の補強効果について数値解析で検証する。一方

で不特定多数の訪れる採石地下空間の残柱にキズ(不連続面)が見える場合, 支保工が見える場合の安心についての感覚をアンケートで確認した。

2. 残柱に注目した大谷石地下採石空間の安定解析

(1) 地下空間内残柱モデル化について

本研究では, 柱房式の地下採石場を支える残柱を対象にして, 3次元有限差分法解析ソフトFLAC3Dを用いて大谷地下採石空間の残柱モデルを再現する。具体的には, 残柱に存在するキズ(節理)の角度を変えて, 残柱の構造安定性に対する節理の影響を検討した。これを琉球大学工学部で実施した室内試験の結果²⁾と比較し, モデル化の整合性及び残柱の安全性について確認する。

a) 解析概要

本研究で実施した解析は残柱モデルを作成して, 境界条件, 材料定数を設定した。大谷石の採石によって生れる地下空間の残柱とその上にある土被りをFLAC3Dで再現する。この構造の天部頂上に荷重を載荷することによる残柱の応力-ひずみ関係を確認する。なお, 本研究では, 節理を設定するために成層構造を再現するユビキ

表-1 解析で用いた大谷石と琉球石灰岩の物性値²⁾

物性値	大谷石	琉球石灰岩
体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3	10.87×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3	7.33×10^3
粘着力(MPa)	2.1	21
内部摩擦角(°)	30	30
引張強度(MPa)	1.08	1.08
密度(kg/m ³)	1.73×10^3	2.4×10^3

表-2 節理の物性値²⁾

物性値	節理
体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3
粘着力(MPa)	30×10^{-2}
内部摩擦角(°)	30
引張強度(MPa)	1.0×10^{-2}
密度(kg/m ³)	1.73×10^3

表-3 琉球石灰岩物性値²⁾

琉球石灰岩	物性値	物性値の平均値
ρ_d (kN/m ³)	19.6 - 23.4	21.5
V_p (km/s)	4.5 - 6.3	5.4
E (GPa)	8.1 - 27.8	17.95
ν	0.15 - 0.3	0.225
σ_c (MPa)	20.0 - 33.9	26.95

タスジョイントモデルを採用した。解析で用いた物性値を表-1と表-2に示す。また、参考にした琉球石灰岩の物性値を表-3に示す。これらの値をもとに体積弾性係数、せん断弾性係数を算出する。境界条件は実験条件を再現するものとする。なおFLAC3Dのグローバル座標系(x, y, z)はそのままとした。残柱の鉛直方向の中心で切って1/4の残柱モデルを再現するのでx方向とy方向の変位を0に設定した。z方向の下向きに重力加速度を9.81 m/s²と設定した。1.0×10⁻⁶ m/sの速度でモデルの上部に定速で载荷される。

b) 解析再現モデル

本研究で参照した室内試験の一軸圧縮試験は、試験供試体の幅/高さの比は0.5で、供試体の高さは100 mmである(図-1)。この試験では、残柱に節理が入っている場合の実験も実施した。その傾斜角は、残柱試料の水平面から見下げる傾き(傾斜角)で整理し、その角度を0°, 45°, 60°, 75°, 90°と変化させた。解析モデルは、計算時間を短縮するために、1/4モデル(図-2)として室内試験の残柱をモデル化した。なお、寸法は、実験供試体

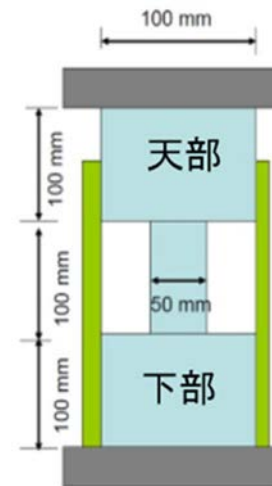


図-1 室内試験の残柱モデルの概要図



図-2 残柱モデルの3D差分メッシュ

(図-1)に準じており、柱部分の中心部を周囲よりも細かいゾーンとなる様に工夫した(図-2)。

(2) 地下空間内残柱モデルの解析結果

a) 結果の概要

節理が存在しない場合の残柱の最大応力を確認するために、モールクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを適用した。図-3は節理のない場合の幅(W)と高さ(H)の比がW/H=1/2である柱の応力分布を示す。解析結果は残柱の最大強度が7.3 MPaとなった。図-4は柱上の節理の角度がそれぞれ45°, 60°, 75°の応力-ひずみ曲線を示している。節理の傾斜角別の最大応力は、45°の場合3.4 MPa, 60°の場合、0.7 MPa, 75°の場合、2.7 MPaとなった。図-5は、節理の角度を0°と90°に加えて整理すると最大荷重とせん断応力の関係として、良く知られたU字型曲線の一部を示した⁴⁾。

b) 考察

室内試験では、節理のない無傷な残柱モデルの供試体は、最大強度が8.8 MPaであった。一方、数値解析では

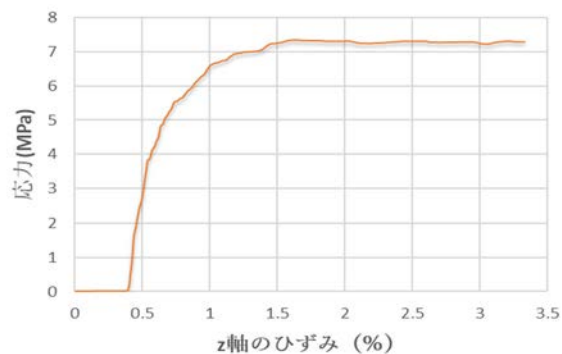


図-3 節理は存在しない柱モデルの応力 — ひずみ関係

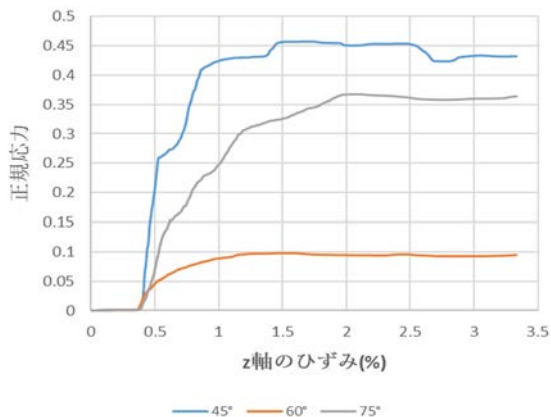


図-4 異なる傾斜角を持つ節理の残柱モデルの応力 — ひずみ関係

最大強度は7.3 MPaであった。数値解析の方が約1.5 MPa低く安全側の傾向を示す。節理の傾斜角が60°の時には室内試験の結果と同様に数値解析の最大強度がもっとも低く、無傷な場合に比べて90%ほど低下した。また、節理の傾斜角が60°の残柱モデルの強度は、傾斜角が45°の場合の約1/4となった。一方で、実験の結果は、ほぼ1/2であり、数値解析の結果の方が、かなり極端な変化を示した。節理の傾斜角度が異なる残柱モデルの強度を無傷な残柱モデルの強度で正規化した残柱モデルの強度比と節理傾斜角との関係(図-5)は、実験の結果と同様にU字型曲線を示している。

3. 残柱の節理補強鉄筋の補強効果の確認

(1) 節理補強鉄筋の残柱補強効果の確認

本研究では、実際の鉄筋で補強されている残柱をFLAC3Dで残柱の強度を解析した。残柱はモールクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを適用した。節理はコビキタスジョイントモデルを再現し、節理の傾斜角を変化させるものとした。解析に用いた材料定数は前章と同様である。残柱を補強する鉄筋は、現場の調査結果をもとに、異形鉄筋D38とした(表-4)。境界条件は実験を再現する。モデル化に際して、FLAC3Dのグローバル

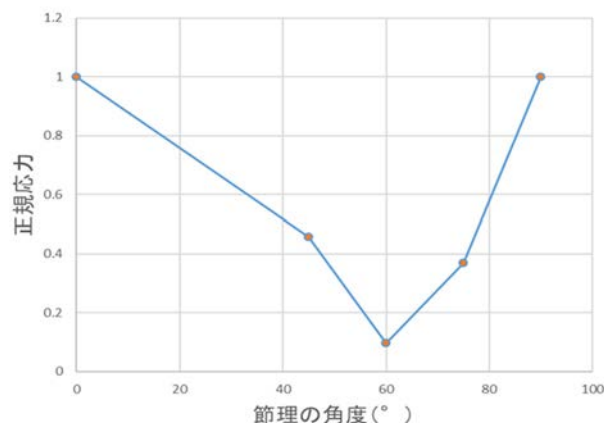


図-5 節理の角度と正規化した応力の関係

表-4 鉄筋(D38)の材料定数

ヤング係数 (N/m ²)	2.05×10^{11}
ポアソン比	0.3
断面積 (m ²)	11.4×10^{-4}
y軸に関する断面2次モーメント (m ⁴)	1.034×10^{-7}
Z軸に関する断面2次モーメント (m ⁴)	1.034×10^{-7}

座標系 (x, y, z) にはそのまま従うとした。したがって、鉛直方向z, 互いに直交する水平の2方向をxとyとした。自重解析の後、 1.0×10^{-4} m/sの変位速度で、モデルの上部を強制的に変位させる。

(2) 残柱の鉄筋による補強の再現モデル

モデルは3つの部分に分けられて、天部と下部では高さ40 mで幅の18 m、柱の部分では高さ30 mで幅の10 mである。対象とした採石地下空間を支える残柱の平均高さは約30 mであるので高さが約10 mのところで鉄筋が差し込まれるとした。残柱の底面から高さ10 mのところに、残柱の両端から2 mの奥行き一本ずつ、さらに1.5 mの間隔を置いて2本、真ん中に1本、合計5本差し込むことを想定した。本章では、実際の節理の角度が60°の残柱が5本の鉄筋で支えられている場合(支保あり)と支えられていない場合(無支保)で残柱の強度の一軸圧縮試験がどの程度異なるか比較した(図-6)。

(3) 補強効果の確認結果

本研究では、節理が存在しない無傷な残柱の強度を調べるためにモールクーロンの破壊基準に従うひずみ軟化モデルを採用して解析した。図-7は節理のない残柱モデルの応力分布を示す。また、この解析の応力 — ひずみ関係(図-7)より、この残柱モデルの強度が11.3 MPaとなった。図-8は節理が入った無支保の場合と節理を鉄筋で

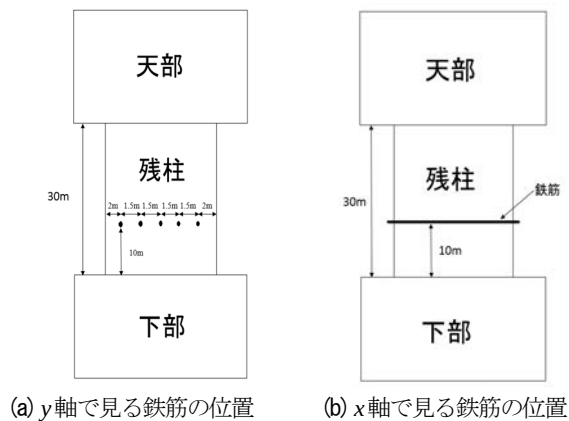


図-6 残柱モデルに鉄筋を差し込む位置

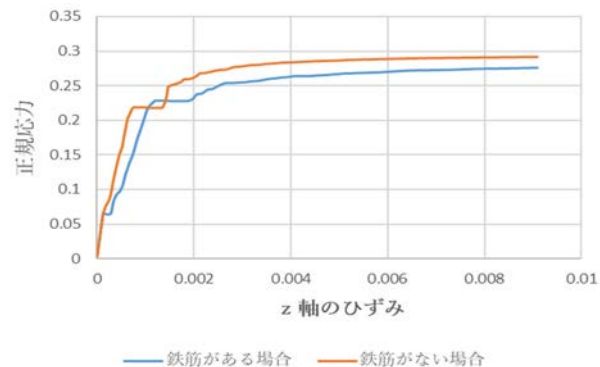
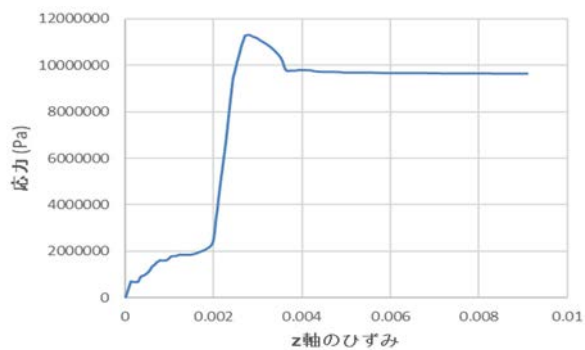


図-8 節理が入った残柱の鉄筋による支保がある場合と無支保の場合の応力 — ひずみ関係

支保した場合の応力 — ひずみ曲線を示している。節理を異形鉄筋D38で支保した場合の残柱モデルの強度は3.11 MPa、無支保の場合の残柱モデルの強度は3.31 MPaであった。図-9は節理が入った残柱に、鉄筋による支保がある場合と無支保の場合の鉄筋の頭がある平面のひずみを示している。

(4) 考察

効果確認の結果によると角度60°の節理をD38鉄筋で支保した残柱の強度が無支保の残柱と比べて、0.2 MPaを低下した。この値は無支保の残柱の強度の6%に相当する。一方、既往の研究¹⁾の結果を参考すると実際に残

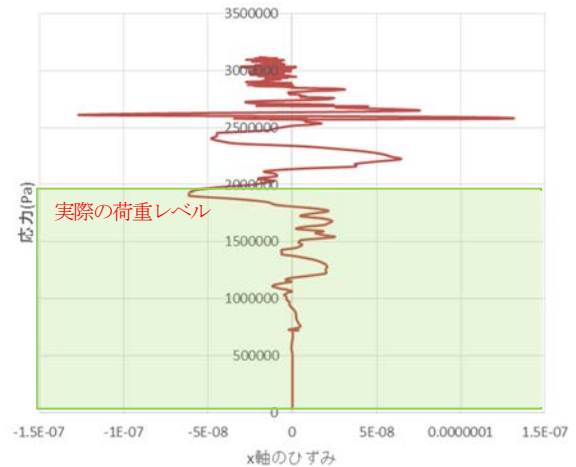
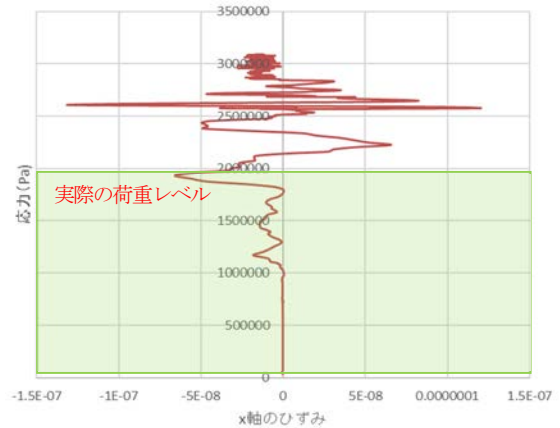


図-9 鉄筋による残柱の水平方向拘束の確認

柱に作用している上載荷重は約2 MPaであることがわかっている²⁾。この時、鉄筋による支保がある場合には鉄筋がある平面のひずみが 1.7×10^{-8} であって、無支保の場合にはひずみが 2.6×10^{-8} であった。節理を鉄筋で支保する場合、残柱の鉄筋がある周辺のひずみが 0.9×10^{-8} 小さくなっている(図-9)。この値は 9×10^{-5} mの変位量に相当する。僅かではあるが、鉄筋に残柱を水平方向に膨らもうとする変位の拘束効果が期待できる。

4. 残柱の構造安全性改善効果に関する検討

(1) アンケート調査概要

栃木県宇都宮市大谷町には大谷石の掘削により広大な地下空間が多く形成されている。その中では採石が終了した後、放置されている空間が多くを占めている。この大谷採石地下空間を貴重な空間資源として有効利用することが期待されている。現在、観光客が多く来訪する大谷石資料館の他に、観光客が回遊する施設やイベントなどを行う計画の立案が期待されている。そこで、アンケ

ートの対象者に採石地下空間(図-10)を訪れる観光客の立場を想定して頂き、大谷石地下空間残柱にキズがある場合、その安心に対する感覚と、改善の手法について確



図-10 アンケートの説明に用いた採石地下空間

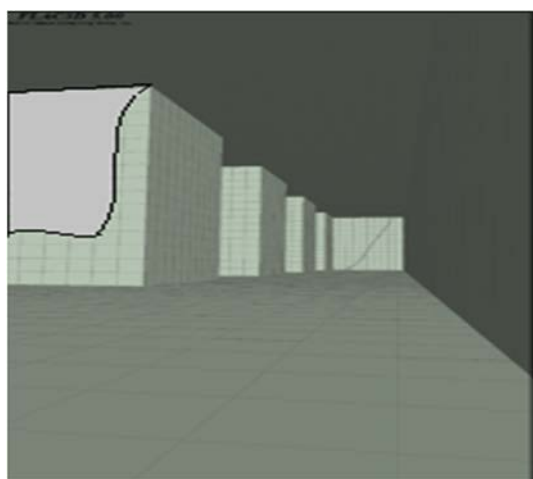


図-11 場合1の例：(対策1.1)残柱の節理を黒い布や大谷石の色合いを持った安全及び安心感に対する比較

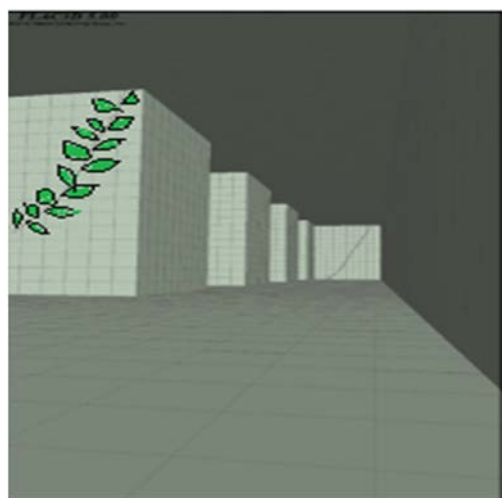


図-12 場合1の例：(対策1.3)節理に沿ってビニール製の葉っぱなどで装飾

認した。

本研究では対策についての安全・安心感を確認するために、安全—危険と安心—不安を5段階に分けて分析し、状況に対する安心感をアンケートの採点結果で表現してもらった、本研究で設定した各対策は

(a) 鉄筋だけで補強する場合(場合1)：

(対策1.1) 残柱の節理を黒い布や大谷石の色合いを持った布などで完全にカバー(図-11)，

(対策1.2) 周りの環境と同化する様にペンキなどで着色，

(対策1.3) 節理に沿ってビニール製の葉っぱなどで装飾(図-12)，

(対策1.4) 節理がある周辺の明度を落とす，

(対策1.5) そのままで何もしない(無対策)ことを候補した。

(b) 節理に鉄筋を差し込んで支保する場合(場合2)：

(対策2.1) キズを補強する鉄筋をコンクリートでカバー，

(対策2.2) 大谷石や大谷石採掘の歴史など紹介するポスターや写真などで鉄筋の頭を隠す(図-13)，

(対策2.3) 鉄筋の頭をきれいな形に装飾して、灯りをつける(図-14)，

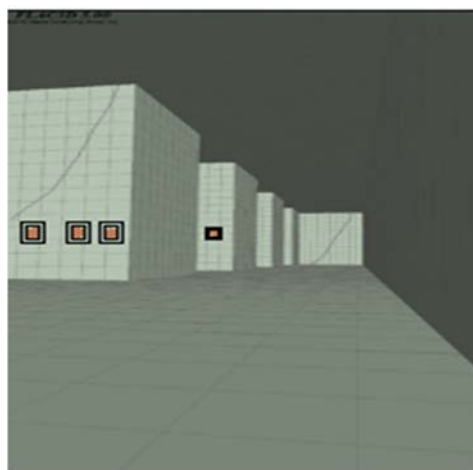


図-13 場合2の例：(対策2.2)大谷石や大谷石採掘の歴史など紹介するポスターや写真などで鉄筋の頭を隠す

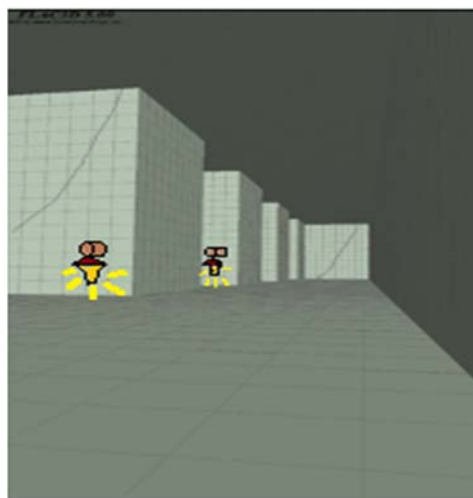


図-14 場合2の例：(対策2.3)鉄筋の頭をきれいな形に装飾して、灯りをつける

(対策2.4)鉄筋の頭が出たまま(無対策)である。とした。

(2) アンケート調査内容

アンケート調査の対象は、宇都宮大学地域デザイン学部社会基盤デザイン学科1年生37名、2年生2名、3年生3名及び土木技術者8名であった。紙面の関係でアンケートの説明の詳細を掲載する事は割愛するが、大谷採石地下空間跡において、地下空間を利用して観光に入る観光客の立場で、節理がある場合と節理を鉄筋で支える場合を例に取り、安全及び安心に対する感覚を確認するために、構造的あるいは心理的な観点から安全及び安心と思われる対策案を図示した。この他に、回答者の属性、

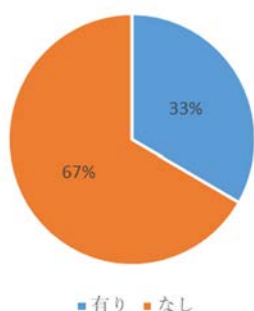
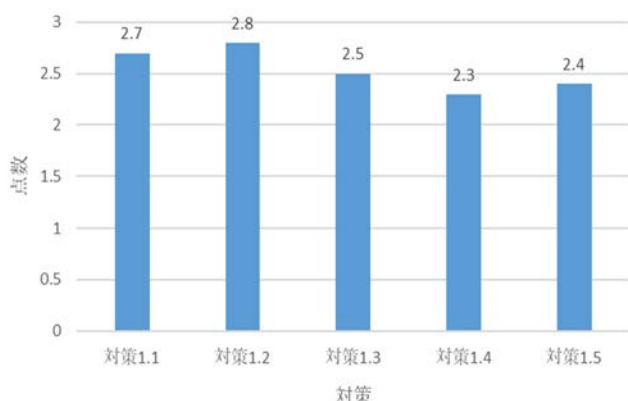
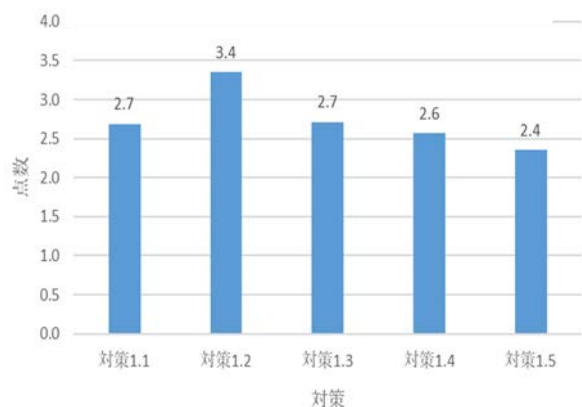


図-15 地下空間に入った経験有無の集計結果



(a) 安全に対する平均点



(b) 安心感に対する平均点

図-16 場合1の安全及び安心感に対する比較

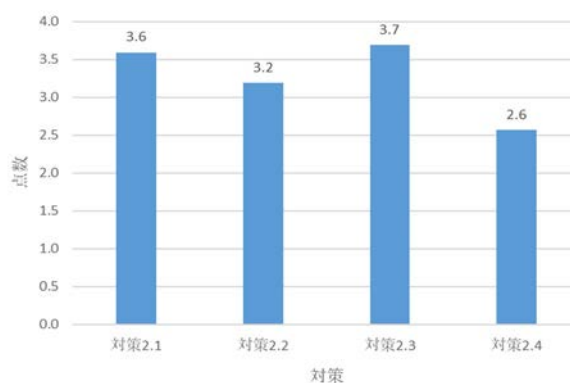
大谷採石地下空間を訪問した経験の有無を確認した。

(3) アンケート調査結果

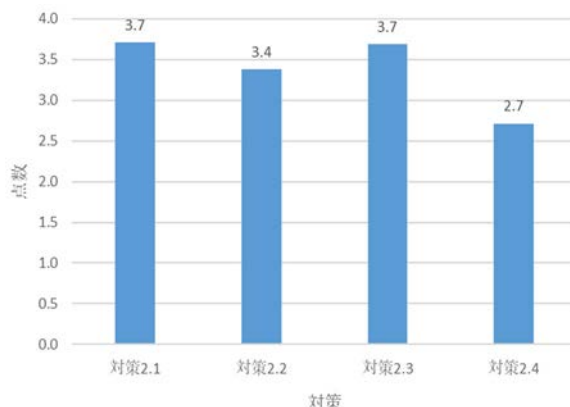
回答人数は宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科学学生42人を土木の知識の少ない地下空間の訪問者として見なした場合のアンケートに付いて、地下空間に入った経験の有無を集約した(図-15)。節理だけが存在している(場合1)の安全・安心感に対する学生の点数を図-16に示す。これは、節理無支保の場合、節理を隠すだけでも安全・安心に効果が見られるので、観光客は節理の存在を意識する傾向を示している。節理を鉄筋で支保している(場合2)の安全及び安心感に対する点数を図-17に示す。なお、これらのアンケート結果を分散分析した結果、節理無支保の場合(場合1)の安全性についての検討を除き、各平均値の定性的な比較が可能である。本研究では特に安心感について注目する。

(4) 考察

本研究では、土木工学に関して知見の低い被験者として、宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科1年生を主体とした対象者にして、アンケート調査を実施した。回答者42人の中では地下空間に入った経験がある人は14人で約1/3(33.3%)であった。節理を無支保



(a) 安全に対する平均点



(b) 安心感に対する平均点

図-17 場合2の安全及び安心感に対する比較

とした場合、観光客は節理の存在を意識しないようにペンキで節理の色を周りの環境と同化して隠す(対策1.2)ことが一番効果であることを示す。節理を鉄筋で支保した場合、安心感及び安全の対応で評価が高いのは、(対策2.1)と(対策2.3)であった。鉄筋の頭をコンクリートで隠すか、飾って灯りで隠すなどの対策が効果的である。

5. まとめ

本研究では柱房式の大谷採石地下空間を支える残柱の強度を検討する室内試験の結果をもとにして、数値解析によって残柱モデルによる安定性評価を実施した。また大谷採石地下空間の残柱にあるキズを補強する支保工の補強効果について数値解析で検証した。一方で不特定多数の訪れる採石地下空間の残柱にキズ(不連続面)が見える場合、支保工が見える場合の安心についての感覚をアンケートで確認した。

節理の存在しない時に残柱の強度は7.3 MPaであって、実際に残柱にかかっている上載荷重を十分支えることができる。節理の傾斜角度が60°の場合には節理が存在しない残柱と比べると、強度がもっとも低く、約90%低下した。数値解析は実験値に比べて安全側にある。

節理の傾斜角度が60°の節理をD38鉄筋で支保する残

柱は支保が行われない残柱と比較すると残柱の強度が約60%下がった。節理を鉄筋で支える対策は残柱の強度を高める事を期待する事は難しいが、実際に残柱に作用している上載荷重の程度では、柱が膨れる方向の水平方向のひずみの発生を僅かに拘束する効果が期待される。

アンケートによって節理を鉄筋で支保する残柱の場合は無支保の場合と比較した結果、安全性とともに安心感の評価がより高かった。そして、鉄筋で支保する場合には鉄筋をコンクリートでカバーする対策と灯りで飾って隠す対策は評価がもっとも高かった。

今後、アンケートにより印象で評価された残柱の安心・安全の感性を具体的残柱モデルで確認することが期待される。

参考文献

- 1) 例えば、清木隆文、鮎澤淳一：採石跡地下空間の現状と有効利用に関する研究、地下空間シンポジウム論文・報告集、第7巻、土木学会[一般投稿論文]、pp.287-294,2002.
- 2) Tumelo Dintwe : *A Fundamental study on the Static and Dynamic Stability of A Room and Pillar underground quarry in Oya.*, 宇都宮大学地球環境デザイン学専攻博士前期課程論文, 2018.
- 3) 清木隆文：大谷石の紹介, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, 66巻11号 pp. 793-798,2017.
- 4) Jaeger, J. C. : *Shear failure of anisotropic rocks*, *Geol Mag* 97, pp. 65-72, 1960.

RELATION BETWEEN STRUCTURAL STABILITY FOR PILLARS OF OYA UNDERGROUND QUARREY AND ITS SENSE OF SECURITY

Huy Thanh BUI, Tumelo DINTWE and Takafumi SEIKI

Recently, a lot of huge underground spaced for Oya tuff have been excavated in Oya area, Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan. Those are regarded as plenty of space resources for re-using infrastructure to stimulate the area development after occurrence of huge collapse at the underground ruined quarry. Although the authors have tried to evaluate structural stability of the quarries, the sense of security is more important for ordinary visitors. This study focused on the influence of discontinuities to the stability of pillars and the effect of applied reinforcement in room and pillar type underground quarry by numerical analysis. And the authors considered the sense of safety in the quarry by questionnaire to the students regarded as visitors. It was clear that skew and high angle of discontinuities affects to decrease the pillar strength, and the sense of safety might be good in case of hiding the discontinuities and heads of reinforcement.