

大谷採石地下空間の地震時安定性と 安心感との関連について

加藤 俊紀¹・程 伝涛²・清木 隆文³

¹非会員 さいたま市 北区役所 (〒331-8586 さいたま市北区宮原町一丁目 852 番地 1)

²学生会員 早稲田大学 理工学部 (〒169-8555 東京都新宿区大久保三丁目 4 番地 1)

³正会員 宇都宮大学 地域デザイン科学部 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東七丁目 1 番地 2)

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

栃木県宇都宮市では、栃木県の石にも指定されている大谷石を石材として産出し、その後の広大な地下空間の扱いについて検討が進んでいる。本研究では、大谷採石地下空間と支保工が設置されている箇所 1 つであるその入口部に着目し、地下空間の安全性と支保工の有効性を数値解析によって、漸増動的解析手法を適用のうえ検討した。その結果、現状で適用されている支保工について効果を改善する必要性が明らかになった。また、地下空間内における安心感に定義を行い、一般の訪問者を想定した大学生を対象とした地下空間のイメージに関するアンケート調査を実施し、大谷採石地下空間の安全性と安心感からなる総合評価手法を提案して確認を行った。

Key Words: Oya tuff, underground quarry, seismic stability, sense of security

1. はじめに

栃木県宇都宮市大谷町には、大谷石(おおやいし、火山砕屑軽石凝灰岩)を石材として採掘した後、広大な地下空間が生まれた。この地下空間の利用が検討進められてきたが、平成元年から 3 年の大規模な陥没事故でその動きが止まり、また東日本大震災以降、地震時の挙動について注目されて来た。著者らは、この地下空間(以下、大谷採石地下空間)の安定性や地震時の挙動に注目し、これらの状況を把握した¹⁾うえで、有効利用の可能性について検討を進めて来た。また、ハードの視点からの地下空間の有効利用の可能性を構造的な視点から探るだけでなく、ソフトの視点から安心感など感性の観点からの有効利用への課題についても検討をすすめて来た^{2),3)}。

本研究では、大谷採石地下空間における安全性と安心感を評価することを目的として、数値解析、アンケート調査を行い、その評価手法を検討した。大谷採石地下空間においては、安全性に不安があるとされている箇所については、支保工による補強がなされており、安全性の向上が期待されている。地震時、入口が崩壊した場合、地上とは異なり、地下空間では、避難する手段が失われてしまう。そのため、本研究では、大谷採石地下空間と支保工が設置されている箇所 1 つであるその入口部とに着目し、地震時の地下空間の安全性と支保工の有効

性を 3 次元有限差分法による数値解析ソフトウェア FLAC3D (Itasca 社)による解析によって検討する。また、地下空間内における安心感について、アンケート調査を基に評価し、最終的には、大谷採石地下空間の安全性と安心感からなる総合評価を行う。

2. 大谷採石地下空間の動的解析

表-1 解析に用いた 2019 年に発生した地震

	震源	マグニチュード (J)	観測日
CASE1	茨城県南部	3.3	7月13日
CASE2	茨城県南部	2.6	7月15日
CASE3	埼玉県北部	3.2	7月16日

表-2 大谷石の試験結果
(現地調査報告書から引用)

大谷石の物性値	
体積弾性係数(MPa)	1.38×10^3
せん断弾性係数(MPa)	0.91×10^3
内部摩擦角(°)	30
粘着性(MPa)	2.10
引張強度(MPa)	1.08
密度 (kg/m ³)	1.77×10^3

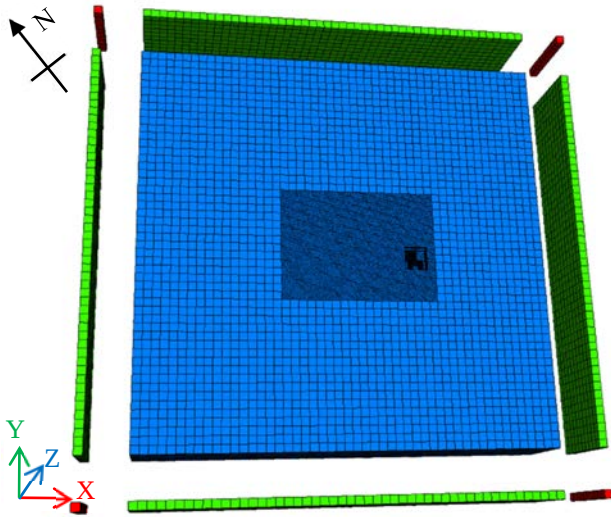


図-1 大谷採石地下空間の解析モデル（中央の色の濃い部分に採石地下空間が60mの深さに広がっている）。

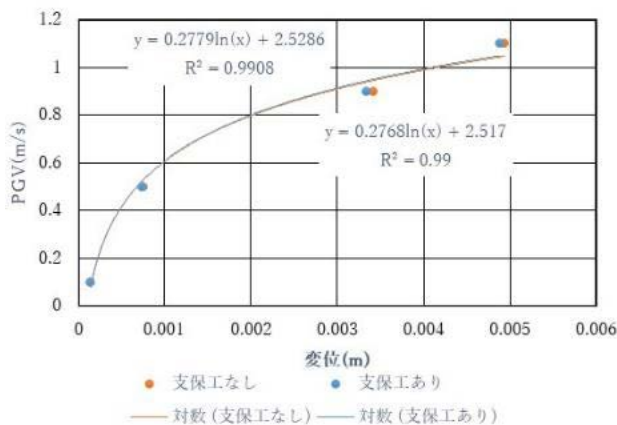


図-2 CASE2の地震動における IDA 曲線

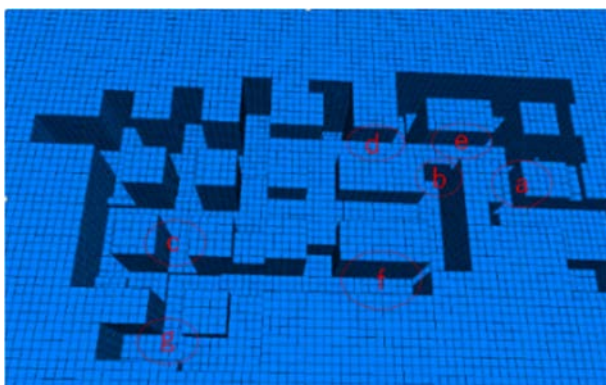


図-3 大谷採石地下空間で注目した7か所の表示

(1) 漸増動的解析手法について

対象とする構造物で想定される地震動を超える地震動に対しての損傷の大きさを単なる動的解析からは予測することはできないため、複数の地震動を用いて構造物の

耐震性を評価する漸増動的解析 (Incremental Dynamic Analysis, 以下 IDA) 手法⁴⁾を用いる。この手法は、入力地震波の強度を漸増させ、非線形時刻歴地震応答解析を行い、その地震強度と応答の関係より IDA 曲線を作成し、構造物の耐震性能を評価する。この時の解析モデルを図-1 に示す。境界条件は、側面を自由境界とし、底面から地震動を入力した。減衰は、レーリー減衰を採用し、既存の地震応答を再現する様にパラメータを設定した。

本研究では、支保工の有効性を検証するため、大谷採石地下空間に設置された地震計に観測された3種類の地震波(表-1)を用いて、入口部に支保工を設定したモデルと設定しないモデルの結果を比較した。地震強度を表面最大加速度(Peak Ground Acceleration, 以下 PGA) とし、陥没する可能性を検討するために、入口部上部の鉛直方向変位に着目して、解析を行った。なお、大谷採石などの材料物性を表-2 に示す。

(2) 大谷採石地下空間入口部の解析結果

解析を行った結果、支保工を設置したモデルにおける鉛直方向の変位は、支保工を設置していないモデルと比べて、小さくなる結果を示した。代表例として、CASE2 地震動の場合を示す。ただしその変位差は $1.019 \times 10^{-4} \text{ m}$ と非常に小さいことから、IDA 曲線では、大きな差異が現れなかった(図-2)。そのために、大谷採石地下空間の入口部の支保工の耐震性能の観点からの有効性はそれほど大きくないと考えられる。

3. 大谷採石地下空間の安全性評価

本研究では、大谷採石地下空間の大谷採石地下空間内の天端を取り去り、空洞の内部を俯瞰的に見た図に本研究で検討を進めた7か所(図-3)a～gを示す。これらの地点は、安心感の妥当性を確認するため、距離や形状が類似している空間だけにならぬように選定した。この安定性をみるために、内陸部の地震を想定して、立川断層でレベル2の地震が発生したとして人工地震を作成し、想定した震源から大谷までの距離を考慮することで対象とした大谷採石地下空間の安定性を確認した。

本研究においては、安全性評価は、局所的な安全性を判定するために、最大せん断ひずみの許容値として、限界せん断ひずみ γ_0 ⁵⁾を用いた。着目した箇所の壁面の最大せん断ひずみ γ_i を γ_0 で除した値を危険指数 m として、 m の値によって評価を行った。限界せん断ひずみは、(1) 式

$$\gamma_0 = \varepsilon_0(1 + \nu) \quad (1)$$

表-3 m値の評価基準

m < 1		m ≥ 1
0.5未満	0.5以上1未満	1以上
A	B	C

表-4 安全性評価結果

箇所	a	b	c
壁面のせん断最大ひずみ	6.845×10^{-4}	1.021×10^{-4}	2.882×10^{-4}
危険指数m	0.15	0.23	0.65
評価	A	A	B

箇所	d	e	f	g
壁面のせん断最大ひずみ	1.290×10^{-4}	1.739×10^{-4}	3.154×10^{-4}	9.178×10^{-4}
危険指数m	0.29	0.39	0.71	0.21
評価	A	A	B	A

より、 4.442×10^{-3} とした。なお、この計算を行うために用いたポアソン比 ν は、0.23とした。採石地下空間全体において、最大のせん断ひずみが、 3.156×10^{-3} であった。限界せん断ひずみを超える最大ひずみが現れる壁面はみられなかった。危険指数 m をもとにした評価を表-3 の様に決めて、対象7か所(図-3)の評価を表-4 に示す。

4. 大谷採石地下空間の安心感の評価

(1) 地下空間のイメージ把握について

a) 安心感の枠組みについて

本研究では、まず安心感を考慮する枠組みを定義した(図-4)。

b) 潜在的な地下空間イメージの確認

本研究では、地下空間における安心感を調査するために、3種類の地下空間(地下トンネル(図-5)、地下駐車場、地下道)について、その空間の写真あり・なしの2パターンの地下空間に対する印象の調査を2020年11月13日に実施した(表-5)。アンケート回答者は宇都宮大学社会基盤デザイン学科の1年生を中心とした49人で、年齢構成は偏るものの特に土木工学に深い知識がない一般人の意識及び感覚が反映されることを期待した。本研究では、アンケートを実施するための写真として、大谷採石地下空間を示すことが最適であるが、回答者が大谷採石地下空間を十分認識していない可能性が高いため、回答者に認識されている可能性が高い地下空間3種類を例として用いた。アンケート結果からは、地下空間の種類によって、写真あり・なしの間で回答に差異が生ない事が確認された。このことから、一般の人々は写真を直接見なくとも地下空間とその特徴をある程度認識できていると考える。



安心とは、自分の予想できる範囲の事象しか発生しない状況で感じるもの

図-4 安心感の枠組み



図-5 アンケートで用いたトンネルの写真

表-5 地下空間の印象アンケートに用いた質問と配点

	思う/ある 是 思わない/ない					
歩きやすいと思いますか?	6	5	4	3	2	1
解放感がありますか?	6	5	4	3	2	1
方向感覚はつくと思いますか?	6	5	4	3	2	1
空気の流れは良いと思いますか?	6	5	4	3	2	1
頑丈だと思いますか?	6	5	4	3	2	1
避難はしやすいと思いますか?	6	5	4	3	2	1
滑りにくいと思いますか?	6	5	4	3	2	1
暖かいと思いますか?	6	5	4	3	2	1
声は聞こえやすいと思いますか?	6	5	4	3	2	1

(2) 地下空間における支保工に対する安心感について

a) 地下空間を表現する形容詞対の絞り込み

本研究では、支保工に対する安心感を感性的に評価するための項目となる形容詞対の選定するための事前調査アンケートを行った。この調査では、筆者が適切と判断した地下空間の画像(図-6)を用いて、Adobe Photoshopによって、その形状と色相を変化させた計14枚の画像(図-7, 8)について、大学生を中心とした被験者10人に質問項目に回答して頂いた。この時の質問項目は、Kasmerの環境評価尺度⁹⁾と呼ばれる形容詞対と日本におけるSD法による研究分野とその形容詞対尺度構成の概観⁷⁾を参考に筆者が23個の形容詞対を選定した。それぞれの質問項目に7段階で回答を求める形式を採用した。そして、それらを用いたアンケート結果を因子分析することで、因子負荷量が多い11種の形容詞対を選定した(表-



図-6 形容詞対を絞り込むための事前調査の地下空間^{注)}

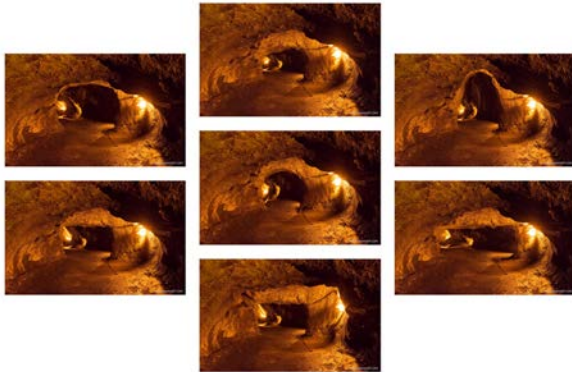


図-7 形状の影響を考慮するために加工した地下空間

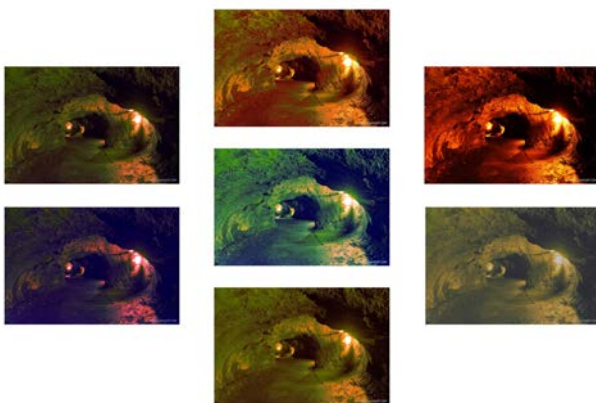


図-8 色調の影響を考慮するために加工した地下空間

表-6 絞り込んだ形容詞対一覧

	尺度
1	親しみにくい－親しみやすい
2	居心地の悪い－居心地の良い
3	軽率な－慎重な
4	不安定な－安定した
5	管理されない－管理された
6	もろい－がっしりした
7	小さい－大きい
8	緊張を強いる－くつろげる
9	不自由な－自由な
10	浅い－深い
11	陰気な－陽気な

6) . また、因子分析の結果から 6 つの因子（安定性、

快適性、開放感、明瞭性、落ち着き、管理性）を抽出した。この結果を用いて、支保工に対する安心感に関するアンケート調査を 2020 年 12 月 4 日に宇都宮大学社会基盤デザイン学科の 1 年生を中心とした 41 名を対象に実施した。

b) 支保工の安心感への影響について

支保工の心理的有効性を確認するために、「支保工あり」の回答と「支保工なし」の回答に目的変数を安心として多重比較検定を行った。その時の画像を図-9, 10 に示す。このアンケートの結果は、支保工あり・なしの間に有意差は認められないものとなったため、支保工に心理的な有効性、つまり本アンケートにおける安心感への影響は小さいと考えられる。

また、アンケート全体、支保工ありのみ、支保工なしのみの 3 種類に分けて、重回帰分析を行った。「安心感： y 」を目的変数として、「親しみ： x_1 」, 「居心地： x_2 」, 「慎重さ： x_3 」, 「安定感： x_4 」, 「管理性： x_5 」, 「頑丈さ： x_6 」, 「大きさ： x_7 」, 「くつろぎ： x_8 」, 「自由さ： x_9 」, 「深さ： x_{10} 」, 「陽気さ： x_{11} 」を説明変数に指定した(式(2)～(4))。

$$\text{支保工あり} : y = 0.4261x_1 + 0.3108x_4 + 0.1683x_5 + 0.2939x_{11} - 0.8887 \quad (2)$$

$$\text{支保工なし} : y = 0.2393x_1 + 0.3534x_4 + 0.1748x_5 + 0.2811x_{11} - 0.4773 \quad (3)$$

$$\text{総合} : y = 0.2065x_2 + 0.1989x_3 + 0.3169x_4 + 0.3217x_9 + 0.1805x_{11} - 1.0613 \quad (4)$$

これらの式に選択されなかった説明変数は、目的変数 y に与える影響が小さいため、モデルに取り込まれなかった。重相関変数 R がどの式も 0.6 を超えていることから、ここで求められた重回帰式が説明する内容の妥当性は高いと考えられる。因子分析の結果をもとにして、因子ごとに選択された説明変数をみると、3 つの式には、「安定感」と「開放感」の因子が共通しており、安心感を構成する因子として、重要であるといえる。また、支保工ありの式だけに「管理性」の因子が選択されており、これは鉄骨による工事現場などの管理された場所での用途が先入観としてあるためだと考えられる。支保工なしの式は、「快適性」の因子が 2 つ選択されており、より快適性が安心感に強い影響を与え、支保工があると快適性が損なわれると考えられる。また、対象とした画像が入口部であると説明したことも、アンケート結果に影響を与えたと考えられる。入口は、人が頻繁に行き来する場所であり、利用者が一定時間滞在する空間ではない場

注) How to Explore Hawaii Volcanoes National Park in One Day, <https://jannaonajaint.com/explore-hawaii-volcanoes-national-park-one-day/> (閲覧 2021 年 9 月)。



図-9 大谷採石地下空間入口部の支保工(左図)とその拡大部(右図)



図-10 支保工を削除した大谷採石地下空間入口部(左図)とその拡大部(右図)

合アンケート結果に、差異が生まれた可能性が考えられる。以上のことから、支保工は安心感について、大きな違いを生み出す程影響を与えるものではないが、少なくとも空間に与える上記の説明変数に対する影響があると考えられ、その空間の用途や目的に沿って、隠すのか、あえて隠さずにそのままにするのかを検討するべきである。具体的には、人々が憩うような空間においては、支保工を隠す。地下シェルターなどの安全性をより印象づけたい場合には、支保工を隠さないという案が考えられる。また、既往の研究³⁾での、残柱に節理が存在する場合、鉄筋での支保が安心感の評価が高めたという結果からも、今回の支保工の調査結果には、意義があると考えられる。

(3) 安心感の評価について

本研究では、対象とした地下空間の構造や雰囲気の特徴から、地下空間の対する印象や安心感は、高さ、幅、奥行き、明るさ、その対象とする空間の種類によって変化すると考えられた。そこで地下空間の対する印象や安心感は、高さ、幅、奥行き、明るさ、その対象とする空間の種類によって変化すると考えられる。そこで、それらの結果を用いて、一般的に地下空間になじみの浅い人々にも伝わりやすく、判断しやすい評価基準、評価項目を評価項目として3段階の基準を設定した(表-6)。これにより合計点から、安心感をA、B、Cと区分した。また、周囲を広く確認できないという状況で、高い安心感を得るとは考えにくいいため、明るさの項目において、0点がついた場合、合計点が8点だったとしても、A判定とはしないこととした。

5. 大谷採石地下空間の安全性と安心感の総合評価

本研究における総合評価の方法としては、安全性と安心感の評価から、その評価の組み合わせによって、基準を作成した。また、安全性がC評価の場合は、安心感がA評価であっても、総合B評価とはせず、総合C評価とする。これは、安全性が低い箇所に、過大な安心感を抱くことが、利用者を危険にさらすことに繋がると考えたからである。7か所についての評価を試行した結果を表-7に示す。

6. まとめ及び今後の課題

(1) まとめ

a) 大谷採石地下空間における動的解析

本研究では、大谷採石地下空間の入口に注目し、3つの地震動によって漸増動的解析手法に基づいた動的解析を行い、IDA曲線を描いた。その結果をもとにして支保

表-6 大谷採石地下空間の安心に関する評価項目と基準

	2点	1点	0点
幅	大人5人以上が両手を広げることができる	大人4人が両手を広げることができる	大人2人が両手を広げることができる
高さ	天盤の模様や汚れがぼんやりと見える	天盤が模様や汚れが見える	天盤を模様や汚れがはっきり見える
入口からの距離	入口周辺がはっきりと見える距離	入口周辺をはっきりとは見えないが目視することができる距離	入口周辺を目視することができない距離
明るさ	足元、奥行きがはっきりと見える	足元ははっきりと見えるが、奥行をはっきりと見るが出来ない	足元がはっきりと見えない
節理の有無	節理を確認できない	小さな節理を確認できる	大きな節理を確認できる

表-7 総合評価結果

場所	a	b	c
安心感	B	C	B
安全性	A	A	B
総合評価	A	B	B

場所	d	e	f	g
安心感	B	B	B	B
安全性	A	A	B	A
総合評価	A	A	B	A

工の有効性を検討した。また、選定した7か所を対象にして、限界ひずみを用いて、安全性の評価した。

b) 大谷採石地下空間における総合評価

地下空間に対する安心感を定義し、一般的な地下空間を対象としたアンケート調査に基づいて評価指標を検討した。その結果をもとに動的解析に基づいた安定性評価と組み合わせて、総合評価手法を提案し、本研究で対象とした大谷採石地下空間を対象に試行を行った。

(2) 今後の課題

安心感評価においては、大谷採石地下空間だけでなく、より多くの地下空間における実用性を高めるために、アンケート調査を様々な地下空間を対象として、実施したのちに評価し、その評価基準の再度検討と改善していきたい。また、作成した評価基準を第三者に実際に使用してもらうことで、その汎用性を確認したい。また、本研究で扱った安全性評価においては、限界せん断ひずみを用いたが、参考値を増やし、安全性をさらに詳細に検討したい。また、大谷採石地下空間において、安全性を高めることのできる支保工が必要になると考えられ、コスト面も含めた検討を行っていくことが期待される。

謝辞：本研究は、宇都宮市宇都宮市大谷特性活用補助金及び中電技術コンサルタント(株)による助成の一部によって実施された。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 例えば、岩城 笙，清木 隆文，佐藤 大地：利用者意識に基づいた大谷石採石地下空間の構造安定性に関する検討，地下空間シンポジウム論文・報告集，第23巻，土木学会 [一般投稿論文]，pp.59-64，2018.1.
- 2) Huy Thanh BUI, Tumelo DINTWE, 清木 隆文：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，地下空間シンポジウム論文・報告集，第25巻，土木学会 [一般投稿論文]，CD-ROM，2020.1.
- 3) 清木隆文，土屋友梨珠，程 伝涛：大谷採石地下空間の地震応答と避難意識の関連性について，地下空間シンポジウム論文・報告集，第26巻，土木学会 [一般投稿論文]，pp.149-154，2021.1.
- 4) Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.: Incremental Dynamic Analysis, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 31, No. 3, pp. 491-514, 2002.
- 5) 櫻井春輔，川嶋幾夫，大谷達彦，松村真一郎：トンネルの安定性評価のための限界せん断ひずみ，土木学会論文集 No.493/III-27，pp.185-188, 1994.
- 6) Osgood, C.E., Suci, G.J. and Tannenbaum, P.H.: *The Measurement of Meaning*, University of Illinois Press, pp.76-124, 1957.
- 7) 今泉 暁音：感性と力学を融合した地下空間形状のデザイン手法に関する基礎的研究，平成22年度山口大学大学院理工学研究科博士論文，2010.

STUDY OF RELATION BETWEEN SEISMIC STABILITY AND SENSE OF SECURITY IN OYA UNDERGROUND QUARRY

Toshiki KATO, Chuantao CHENG and Takafumi SEIKI

Huge space of Oya underground quarry which is excavated to produce one of the most popular building stone, Oya tuff in Utsunomiya City, Tochigi Prefecture, Japan, is considered to utilize for social facilities. This study focuses on the stability for entrance of the underground where is reinforced by a supporting instrument and considered the effect of the system by dynamic analysis employing Incremental Dynamic Analysis. The results showed that there were little effect to reinforce the entrance structure in seismic state. Secondly the authors defined the sense of security in the underground. And we have tried to evaluate the sense by the results of questionnaire and propose the integral evaluation table for structural stability in seismic state and level of sense of security. Finally the authors applied the table to quantify the structural stability and the sense for the underground quarry.