

八重山諸島・黒島および竹富島に分布する琉球石灰岩の 物理・力学的性質

Physical and Mechanical Properties of Ryukyu Limestone in Kuro-shima and Taketomi-jima
in Yaeyama Islands, Okinawa, Japan

小暮 哲也*

Tetsuya KOGURE*

I はじめに

琉球石灰岩は第四紀更新世に形成され、琉球列島を構成する主要な岩石として広く分布する。そのため、土木や応用地質などの分野において琉球石灰岩の物性についての情報が必要となる 경우가多く、いくつかの研究が行われている（たとえば、新城・中村, 1975; Maekado, 1989; Maekado, 1991; 小暮ほか, 2005; Kogure *et al.*, 2006）。特に、Kogure *et al.* (2006) は、沖縄島の琉球石灰岩には強度の寸法効果が存在することを示し、その寸法効果を加味した数メートル～数十メートルの大きさの岩塊の強度に関する推定式を提案している。この式は、たとえば高さが数メートル以上の海食崖などのように、直接強度を測定することができないほど大きな対象物の強度を推定する際に利用できる。しかし、この式を用いて沖縄島以外の琉球石灰岩の強度を推定するためには、それぞれの現地の琉球石灰岩の強度や密度が、沖縄島の琉球石灰岩の物性値とほぼ同じである必要がある。現在、琉球列島の主要な（大規模な）島における琉球石灰岩の物性が明らかにされつつあり、沖縄島、宮古島、石垣島における琉球石灰岩の物性はほぼ等しいことがわかってきた（たとえば、

新城・中村, 1975）。

近年、琉球列島において津波による崖の崩壊の可能性が指摘され、小規模な島においても安定解析を行うために琉球石灰岩の物理・力学的性質に関するデータが必要となる場面が増えている（たとえば Kogure and Matsukura, in press）。しかし、小規模な島々に分布する琉球石灰岩の物性については情報が全くないため、Kogure *et al.* (2006) の式が適用可能であるかの判断も困難である。そこで本研究では、これまで情報がなかった琉球列島の小規模な島々に分布する琉球石灰岩の物性を調べるため、八重山諸島の黒島および竹富島を選び、それらの島々の琉球石灰岩の物理・力学試験を行った。

II 供試体の採取・整形および物理的性質

八重山諸島は、石西礁湖と呼ばれる水深 20 m 以浅の大サンゴ群集を挟むように東西に位置する石垣島および西表島と、石西礁湖に囲まれた小浜島・竹富島・黒島などの中・小規模な島々から構成されている。石垣島の琉球石灰岩については、前述したように、その物理・力学的諸性質が沖縄島や宮古島の琉球石灰岩の値と等しいことが新

* 筑波大学陸域環境研究センター

城・中村（1975）によって示されている。黒島および竹富島は島の大部分が琉球石灰岩からなり、海岸には琉球石灰岩からなる海食崖が発達している。海食崖にはしばしば崩壊の跡が見られ、崖の前面や周囲には崖を構成していた琉球石灰岩の岩塊が点在している。そこで、これらの岩塊の中から適度な大きさのものを選り、試験用に採取した。粉碎した岩石の密度をピクノメータによって測定する「土粒子の密度試験（JIS A 1202）」によって、真比重を測定したところ、黒島・竹富島の岩石ともに 2.70 であった。

岩石の一軸圧縮試験および圧裂引張試験は以下のようにして行った。岩塊はそれぞれの試験用に円柱の供試体に整形され、その寸法は一軸圧縮試験用では直径 70 mm、高さ 35 mm、圧裂引張試験用では直径・高さともに 35 mm とした（第 1 図）。供試体は、黒島の岩石から一軸圧縮・圧裂引張試験用に 12 本（第 1 表中 K1-K12 および第 2 表中 k1-k12）作成し、竹富島の岩石から一軸圧縮試験用に 12 本（第 1 表中 T1-T12）、圧裂引張試験用に 11 本（第 2 表中 t1-t11）作成した。

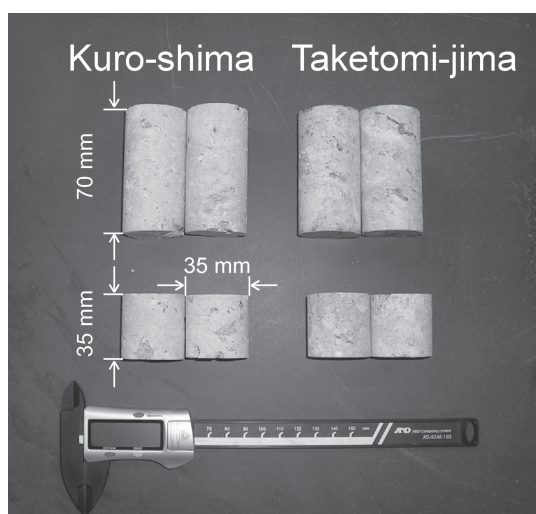
一軸圧縮試験用供試体を用いて計測した物理・力学的性質を第 1 表にまとめた。測定項目は、密

度、間隙率、弾性波速度である。間隙率は、真比重と密度の値を用いて計算した。また、弾性波速度の測定には、超音波式品質試験機パンジットプラスを用いた。黒島および竹富島から採取した一軸圧縮試験用供試体の物理的性質は、密度がそれぞれ 2.23-2.44 Mg/m³（平均：2.35 Mg/m³）、2.25-2.36 Mg/m³（平均：2.30 Mg/m³）、間隙率が 9.8-17.4%（平均：13.1%）、12.8-16.7%（平均：14.8 %）、そして弾性波速度が 4.7-5.7 km/s（平均：5.4 km/s）、4.9-5.2 km/s（平均：5.1 km/s）であった。データのばらつきは竹富島の琉球石灰岩の方がやや小さいものの、両島の石灰岩の物性値には大きな差は認められない。同様に、圧裂引張試験用の供試体を用いて計測した密度および間隙率を第 2 表にまとめた。黒島および竹富島の岩石の密度はそれぞれ 2.29-2.44 Mg/m³（平均：2.37 Mg/m³）、2.14-2.38 Mg/m³（平均：2.26 Mg/m³）、間隙率は 9.8-15.1%（平均：12.2%）、12.0-20.7%（平均：16.1%）であり、一軸圧縮試験用の供試体の値にほぼ等しかった。なお、圧裂引張試験用供試体の弾性波速度の測定は行っていない。

一軸圧縮試験および圧裂引張試験には、前川試験機製作所の油圧式 MS 型耐圧試験機（MS-20-c 型、最大圧縮荷重容量 20 t）を使用した。この試験機は手動制御方式であり、载荷速度をコントロールすることができない。そこで圧縮をする際には、個々の試験ごとに加圧速度がなるべく一定になるように試験を行った。その結果、竹富島の岩石を用いた一軸圧縮試験では载荷速度が 0.08-0.16 MPa/s、圧裂引張試験では 0.02-0.05 MPa/s であった。黒島の岩石を用いた試験では载荷速度は測定されていない。

III 圧縮強度と引張強度の試験結果および過去の試験結果との比較

一軸圧縮試験の結果を第 1 表に、圧裂引張試験の結果を第 2 表に示す。一軸圧縮強度は黒島・



第 1 図 試験に用いた供試体

第 1 表 一軸圧縮試験用供試体の物理・力学的性質

| No. | Diameter | Height | Weight | Density | Porosity | Longitudinal wave velocity | Uniaxial compressive strength |
|----------------------|----------|--------|--------|-------------------|----------|-------------------------------|-------------------------------------|
| | mm | mm | g | Mg/m ³ | % | km/s | MPa |
| <i>Kuro-shima</i> | | | | | | | |
| K1 | 35 | 71 | 154.4 | 2.33 | 13.8 | 5.4 | 17.9 |
| K2 | 35 | 71 | 156.1 | 2.34 | 13.3 | 5.3 | 23.8 |
| K3 | 35 | 71 | 158.4 | 2.38 | 11.9 | 5.5 | 18.8 |
| K4 | 35 | 69 | 150.2 | 2.32 | 14.2 | 5.3 | 24.1 |
| K5 | 35 | 70 | 157.1 | 2.39 | 11.4 | 5.3 | 29.4 |
| K6 | 35 | 69 | 156.0 | 2.43 | 10.0 | 5.5 | 37.9 |
| K7 | 35 | 68 | 149.2 | 2.34 | 13.4 | 5.5 | 22.6 |
| K8 | 35 | 70 | 158.6 | 2.44 | 9.8 | 5.7 | 34.1 |
| K9 | 35 | 70 | 152.5 | 2.32 | 14.2 | 5.5 | 16.4 |
| K10 | 35 | 70 | 157.0 | 2.37 | 12.2 | 5.4 | 23.5 |
| K11 | 35 | 66 | 138.4 | 2.23 | 17.4 | 4.7 | 5.4 |
| K12 | 35 | 70 | 149.4 | 2.28 | 15.6 | 5.2 | 11.2 |
| Max. | 35 | 71 | 158.6 | 2.44 | 17.4 | 5.7 | 37.9 |
| Min. | 35 | 66 | 138.4 | 2.23 | 9.8 | 4.7 | 5.4 |
| Average | 35 | 70 | 153.1 | 2.35 | 13.1 | 5.4 | 22.1 |
| SD* | 0.04 | 1.5 | 5.7 | 0.06 | 2.2 | 0.2 | 9.1 |
| <i>Taketomi-jima</i> | | | | | | | |
| T1 | 35 | 69 | 146.1 | 2.25 | 16.7 | 4.9 | 18.0 |
| T2 | 35 | 70 | 152.4 | 2.34 | 13.5 | 5.2 | 24.5 |
| T3 | 35 | 70 | 148.1 | 2.26 | 16.3 | 5.0 | 10.6 |
| T4 | 35 | 70 | 153.2 | 2.35 | 13.0 | 5.2 | 22.6 |
| T5 | 35 | 70 | 155.3 | 2.36 | 12.8 | 5.1 | 22.9 |
| T6 | 35 | 70 | 152.0 | 2.31 | 14.5 | 5.1 | 18.1 |
| T7 | 35 | 70 | 147.8 | 2.27 | 16.1 | 5.0 | 24.4 |
| T8 | 35 | 70 | 150.4 | 2.29 | 15.1 | 5.2 | 23.0 |
| T9 | 35 | 70 | 152.5 | 2.32 | 14.2 | 5.2 | 21.2 |
| T10 | 35 | 70 | 148.8 | 2.28 | 15.6 | 5.1 | 24.2 |
| T11 | 35 | 70 | 149.9 | 2.29 | 15.1 | 5.2 | 26.1 |
| T12 | 35 | 69 | 148.0 | 2.29 | 15.0 | 5.1 | 18.8 |
| Max. | 35 | 70 | 155.3 | 2.36 | 16.7 | 5.2 | 26.1 |
| Min. | 35 | 69 | 146.1 | 2.25 | 12.8 | 4.9 | 10.6 |
| Average | 35 | 70 | 150.4 | 2.30 | 14.8 | 5.1 | 21.2 |
| SD* | 0.00 | 0.4 | 2.7 | 0.03 | 1.3 | 0.1 | 4.3 |

* Standard deviation

竹富島それぞれの岩石について 5.4–37.9 MPa (平均: 22.1 MPa), 10.6–26.1 MPa (平均: 21.2 MPa) であった。また、圧裂引張強度はそれぞれ 3.0–7.3 MPa (平均: 5.4 MPa), 2.1–7.3 MPa (平均: 4.2 MPa) であった。一軸圧縮強度について

は、竹富島の岩石の方がばらつきは小さいものの、平均値はほとんど変わらず、圧裂引張強度は両島の岩石でばらつき・平均値ともほぼ等しい。一軸圧縮強度および圧裂引張強度について t 検定を行った結果、有意水準 5% で差がないことが示

第2表 圧裂引張試験用供試体の物理・力学的性質

| No. | Diameter | Height | Weight | Density | Porosity | Tensile strength |
|----------------------|----------|--------|--------|-------------------|----------|------------------|
| | mm | mm | g | Mg/m ³ | % | MPa |
| <i>Kuro-shima</i> | | | | | | |
| k1 | 35 | 35 | 78.2 | 2.42 | 10.5 | 5.2 |
| k2 | 35 | 35 | 80.5 | 2.44 | 9.8 | 7.3 |
| k3 | 35 | 34 | 78.3 | 2.43 | 10.2 | 6.4 |
| k4 | 35 | 35 | 74.9 | 2.31 | 14.3 | 5.4 |
| k5 | 35 | 35 | 78.1 | 2.37 | 12.0 | 6.4 |
| k6 | 35 | 34 | 74.8 | 2.32 | 14.2 | 3.0 |
| k7 | 35 | 35 | 78.0 | 2.37 | 12.2 | 3.3 |
| k8 | 35 | 35 | 78.7 | 2.41 | 10.7 | 6.4 |
| k9 | 35 | 35 | 78.0 | 2.39 | 11.3 | 6.8 |
| k10 | 35 | 35 | 78.0 | 2.36 | 12.6 | 5.2 |
| k11 | 35 | 34 | 72.7 | 2.29 | 15.1 | 4.5 |
| k12 | 35 | 34 | 74.1 | 2.33 | 13.7 | 4.9 |
| Max. | 35 | 35 | 80.5 | 2.44 | 15.1 | 7.3 |
| Min. | 35 | 34 | 72.7 | 2.29 | 9.8 | 3.0 |
| Average | 35 | 35 | 77.0 | 2.37 | 12.2 | 5.4 |
| SD* | 0.00 | 0.5 | 2.3 | 0.05 | 1.8 | 1.4 |
| <i>Taketomi-jima</i> | | | | | | |
| t1 | 35 | 34 | 73.5 | 2.29 | 15.2 | 4.3 |
| t2 | 35 | 35 | 70.5 | 2.18 | 19.4 | 2.6 |
| t3 | 35 | 34 | 70.1 | 2.18 | 19.2 | 3.2 |
| t4 | 35 | 36 | 75.2 | 2.24 | 17.1 | 4.3 |
| t5 | 35 | 35 | 69.2 | 2.14 | 20.7 | 2.1 |
| t6 | 35 | 36 | 75.3 | 2.23 | 17.3 | 3.4 |
| t7 | 35 | 34 | 73.9 | 2.35 | 13.1 | 7.3 |
| t8 | 35 | 34 | 74.1 | 2.31 | 14.5 | 3.9 |
| t9 | 35 | 35 | 74.5 | 2.27 | 15.8 | 3.4 |
| t10 | 35 | 34 | 76.5 | 2.38 | 12.0 | 6.3 |
| t11 | 35 | 34 | 74.7 | 2.35 | 12.9 | 5.7 |
| Max. | 35 | 36 | 76.5 | 2.38 | 20.7 | 7.3 |
| Min. | 35 | 34 | 69.2 | 2.14 | 12.0 | 2.1 |
| Average | 35 | 35 | 73.4 | 2.26 | 16.1 | 4.2 |
| SD* | 0.00 | 0.7 | 2.4 | 0.08 | 2.9 | 1.6 |

* Standard deviation

された。したがって、黒島および竹富島に分布する琉球石灰岩の力学的性質はほぼ等しいと考えられる。

今回の試験結果を、従来報告されている他の試験結果とともに第3表にまとめた。一軸圧縮強度については、新城・中村（1975）と Kogure *et al.*（2006）がそれぞれ試験を行っているが、

強度のばらつきの幅は今回の試験結果より大きい。これは、試験に多くの供試体を用いていることが原因であると考えられる。また、Kogure *et al.*（2006）の場合は大きさの異なる供試体、特に、小さい供試体（縦横 10 mm、高さ 20 mm の角柱）を用いて試験を行っており、このことが最大値を大きくし、ひいてはデータのばらつきを大きくす

第3表 試験結果と既存の研究結果との比較

| Sampling locations | Specimen shape | Size | Number of specimens | Bulk density, Mg/m ³ | | | UCS or St, MPa | | | Reference |
|--|----------------|---|---------------------|---------------------------------|---------|-----------------|----------------|---------|-----------------|-----------------------------|
| | | | | Range | Average | SD ^a | Range | Average | SD ^a | |
| <i>Uniaxial compressive strength (UCS)</i> | | | | | | | | | | |
| Okinawa, Miyako and Ishigaki Island | Cylinder | Diameter, 50 mm Height, 100–120 mm | 74 | 1.89–2.56 | – | – | 6.1–59.2 | – | – | Shinjo and Nakamura (1975) |
| Okinawa Island | Square pillar | Side length, 10–100 mm Height, 20–200 mm | 50 | 1.72–2.45 | 2.17 | 0.17 | 3.5–61.3 | 25.5 | 16.1 | Kogure <i>et al.</i> (2006) |
| Kuro-shima | Cylinder | Diameter, 35 mm Height, 70 mm | 12 | 2.23–2.44 | 2.35 | 0.06 | 5.4–37.9 | 22.1 | 9.1 | Present study |
| Taketomi-jima | Cylinder | Diameter, 35 mm Height, 70 mm | 12 | 2.25–2.36 | 2.30 | 0.03 | 10.6–26.1 | 21.2 | 4.3 | Present study |
| <i>Tensile strength (S)</i> | | | | | | | | | | |
| Okinawa Island | Cylinder | Diameter, 30 mm Height, 30 mm | 4 | – | 2.1 | – | 3.3–4.0 | 3.9 | – | Maekado (1991) |
| Kuro-shima | Cylinder | Diameter, 35 mm Height, 35 mm | 12 | 2.29–2.44 | 2.37 | 0.05 | 3.0–7.3 | 5.4 | 1.4 | Present study |
| Taketomi-jima | Cylinder | Diameter, 35 mm Height, 35 mm | 11 | 2.14–2.38 | 2.26 | 0.08 | 2.1–7.3 | 4.2 | 1.6 | Present study |

^a Standard deviation

る原因となっている可能性がある。しかし、強度の平均値を見ると、Kogure *et al.* (2006) の試験結果と今回の試験結果に大きな差は認められず、このことから沖縄島と黒島・竹富島に分布する琉球石灰岩の強度はほぼ等しいと言える。引張強度については、Maekado (1991) が沖縄島の琉球石灰岩からなる直径・高さが 30 mm の円柱供試体を用いて圧裂引張試験を行い、3.9 MPa という平均値を得ている。この値は今回の圧裂引張試験の結果とほぼ等しいことから、圧縮強度と同様に、琉球石灰岩の引張強度も黒島・竹富島と沖縄島とではほぼ等しいと考えられる。

引張強度に対する圧縮強度の比である脆性度が大きいほど、破壊時の変形が小さい脆性破壊を起こし、小さいほど破壊時の変形が大きい延性破壊を起こす。一般的には岩石の脆性度は 5-25 の範囲にばらつき、平均としては 10 前後をとる(松倉, 2008, p.59)。今回の試験により得られた圧縮強度および引張強度の平均値を用いて脆性度を計算すると、黒島の琉球石灰岩の脆性度は 4.1、竹富島の岩石では 5.0 となった。したがって、黒島・竹富島の琉球石灰岩は他の一般的な岩石と比較してかなり小さな脆性度を示している。これは沖縄島の琉球石灰岩の物性について述べている小暮ほか(2005)の報告と一致する。

IV まとめ

今回の試験結果をまとめると、以下のようになる。黒島および竹富島に分布する琉球石灰岩の物理・力学的性質はほぼ等しい。また、従来報告されている試験結果と比較すると、黒島・竹富島の琉球石灰岩の物理・力学的性質は、沖縄島・宮古島・石垣島に分布する琉球石灰岩ともほぼ等しいと考えられる。したがって、黒島・竹富島における琉球石灰岩の強度に関する寸法効果の推定には、Kogure *et al.* (2006) が提示した式を適用することができると考えられる。

今回の調査によって、小規模な島々に分布する琉球石灰岩であっても、物理・力学的性質は沖縄島など規模の大きな島々の琉球石灰岩とほぼ等しいことがわかった。今後、琉球石灰岩の物性についての情報がない島において強度の情報が必要となる場合には、その島で採取した岩石を用いて試験を行うことが最善の方法であろう。しかし、もしそのような試験が困難である場合には、Kogure *et al.* (2006) が示した式を適用することにより、おおよその値を知ることができるのではないと思われる。

謝辞

本研究を行うに際し、平成 19 年度笹川科学研究助成の一部を使用した。

文献

- 小暮哲也・青木 久・前門 晃・松倉公憲 (2005): 琉球石灰岩の一軸圧縮強度に与える寸法効果と岩石物性の影響。応用地質, **46**, 2-8.
- 新城俊也・中村一幸 (1975): 琉球石灰岩の圧縮強度について。琉球大学農学部学術報告, **22**, 269-277.
- 松倉公憲 (2008): 「山崩れ・地すべりの力学 地形プロセス学入門」筑波大学出版会, 162p.
- Kogure, T., Aoki, H., Maekado, A., Hirose, T. and Matsukura, Y. (2006): Effect of the development of notches and tension cracks on instability of limestone coastal cliffs in the Ryukyus, Japan. *Geomorphology*, **80**, 236-244.
- Kogure, T. and Matsukura, Y. (in press): Critical notch depths for failure of coastal limestone cliffs: Case study at Kuro-shima Island, Okinawa, Japan. *Earth Surface Processes and Landforms*.

Maekado, A. (1989): Some physical and mechanical properties of the limestones in Okinawa island. *Bulletin of the Okinawa Geographical Society*, **2**, 29-33.

Maekado, A. (1991): Recession of coastal cliff made of Ryukyu limestone: Arasaki coast,

southern end of Okinawa island, Japan. *Bulletin of the Okinawa Geographical Society*, **3**, 63-70.

(2009 年 5 月 29 日受付, 2009 年 8 月 18 日受理)