

琉球石灰岩岩盤に対する岩盤分類の適用と その力学的特性の評価

渡嘉敷 直彦^{1*}・藍壇 オメル²

¹琉球大学工学部 環境建設工学科 (〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)

²東海大学海洋学部 海洋建設工学科 (〒424-8610 静岡県静岡市清水区折戸三丁目20-1)

*E-mail: tokasiki@tec.u-ryukyu.ac.jp

琉球諸島に分布する琉球石灰岩岩盤の力学的特性を評価するため、琉球石灰岩岩盤を岩盤工学的な立場から再評価し、代表的な岩盤分類である RMR および Q 値を用いて、岩盤分類を行う。その岩盤分類 RMR と Q 値による岩盤物性値の評価法について、著者らの提案を含めた経験式を示し、本手法を用いて琉球石灰岩岩盤の岩盤物性値を評価する。

本研究では、岩石の物性値を総合的に評価する関係式を提案し、琉球石灰岩の岩盤分類に基づいて、自然岩盤構造である空洞、崖、自然護岸などの安定性評価に必要な岩盤物性値の評価について、各物性値に対する提案式のパラメータを示す。

Key Words : Ryukyu limestone, rock mass classification, rock mass properties, natural rock structures

1. はじめに

琉球諸島の多くの島々が、島全体あるいは大部分が琉球石灰岩で構成されており、琉球石灰岩層が分布する海岸周辺や内陸部には、自然岩盤構造物と呼ばれる大小の自然空洞や海食崖が多数存在している。近年、都市化に伴う開発や遺跡保存の面から、これらの自然岩盤構造物における岩盤の陥没や崖の崩壊に対する安定性の評価が問題となっている^{1,2)}。

図-1に示すように、文化財に指定されている具志川城址の修復保存に際して、城址直下に位置する2つの自然空洞と城址先端にある海食崖を有する基礎岩盤の安定性の評価が求められている。石垣島では、新空港の建設が進められているが、空港滑走路および着陸帯の直下を横切る数条の鍾乳洞の存在が確認されている。図-2のように、空港完成後、航空機が滑走路を離着陸し、また、緊急時には着陸帯に航空機が進入する可能性があり、琉球石灰岩層直下の浅所空洞の陥没問題や航空機離着陸時の衝撃荷重に対する支持力の評価および対応策が問題となっている。

これらの事例に代表される琉球石灰岩層の自然岩盤構造物の安定性評価に際しては、岩盤の岩盤物性値の評価が必要となるが、従来より、地質調査、ボーリング調査、原位置試験の結果から、N値に基づいた評価が行われている。しかしながら、このような岩盤に対するN値

による評価には限界があり、琉球石灰岩岩盤の力学的特性を、岩盤工学的な立場から再評価することとする。



図-1 自然空洞と海食崖の安定問題 (具志川城址)

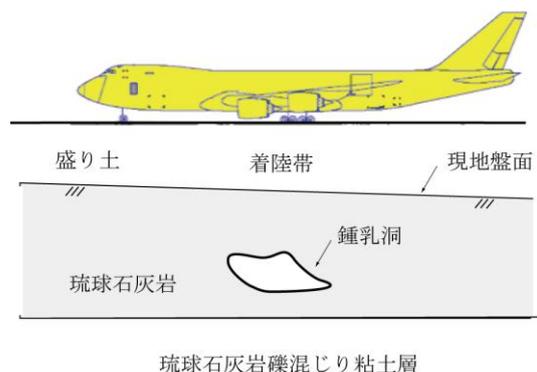


図-2 空港建設における空洞安定問題

本論文では、代表的な岩盤分類であるRMR (Rock mass rating) およびQ値 (Quality Value) を用いて、琉球諸島の琉球石灰岩岩盤の岩盤分類を行う。その岩盤分類 RMR およびQ値による岩盤物性値の評価法について、著者らの提案を含めた経験式を示し、本手法を用いて琉球石灰岩岩盤の岩盤物性値を評価する。評価された各種の岩盤物性値を総合的に評価できる関係式を提示し、各物性値に対する提案式のパラメータの値を示す。なお、参考のため、島尻層群に関する岩盤分類も併せて示す。

2. 代表的岩盤分類法

世界的に広く用いられる定量的な岩盤分類として、RMR岩盤分類法、Q値による岩盤分類法とGSI法が利用されることが多い。RMRとは、Bieniawskiによって提案された岩盤分類法で、4つの基本パラメータ、すなわち、母岩の一軸圧縮強さ、RQD (Rock Quality Designation)、不連続面の間隔、不連続面の状態と地下水の状況のそれぞれに与えられた評価点の合計 (100点~0点) の値で点数化されるものである^{3,4)}。なお、RQDは、ボーリングコア採取率を適度に修正した値である。

Q値による分類法は、1974年 Barton らによって提案された方法^{5,6)}で、6つのパラメータ、すなわち、RQD、不連続面群数 J_n 、不連続面の風化度合 J_a 、粗さ J_r 、地下水の状況 J_w および応力集中ファクター SRF によって、下記の式よりQ値 (1000点~0.001点) として計算される。

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

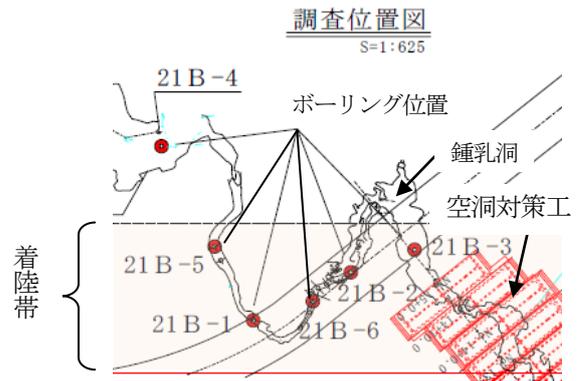
これらのRMR値およびQ値は、堅固な岩盤ほど点数が大きく、軟弱な岩盤は小さな点数となる。

GSI (Geological Strength Index) は、軟岩 (RMR<20) や砂礫混じりの軟岩など RMR で評価できないような岩盤を対象にした方法で、1993年 Hoek が提案⁷⁾したもので、種々の地質学的条件に対する岩盤強度の低減を見積もるための指標 GSI で評価している。

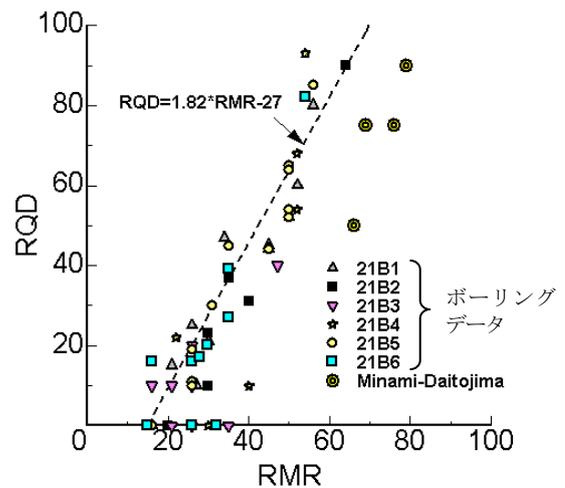
3. 琉球石灰岩岩盤に対する岩盤分類の適用

琉球石灰岩岩盤の岩盤分類を行う事例として、前章で述べた具志川城址における自然空洞と海食崖の安定性の問題と、空港建設における滑走路直下を横切る空洞の安定性の問題を取り上げ、それぞれ岩盤分類を行う。

図-3(a)に、空港滑走路に隣接する着陸帯直下を横切る空洞の安定性を評価するため実施されたボーリング位置を示す。図のように、鍾乳洞に沿って、6カ所のボー



(a) 試料採取ボーリング位置



(b) RMR と RQD の関係

図-3 新石垣空港におけるボーリング位置と琉球石灰岩岩盤のRMRとRQDの関係

リングを行い、各ボーリングデータから、RQD、RMR およびQ値を求めた。得られたRQDとRMRの関係を図-3(b)に示す。なお、同図には、南大東島石灰岩岩盤におけるRQDとRMRの関係も図示されている。RQDとRMRの関係については、これまでに多くの計測データから、一般的に次式のような線形関係が示されている。

$$RQD = 1.82 \cdot RMR - 27 \quad (2)$$

この関係式を図中に重ねて示してある。図から明らかのように、得られたRQDとRMRの間には、相関性が認められ、また、式(2)に示す一般的なRQDとRMRの関係にも近似していることがわかる。

つぎに、得られたRMRとQ値の関係を、図-4に示す。RMRとQ値との相関性については、様々な国でその関係が検討されており、Bieniawski は下記の相関式を提案³⁾した。

$$RMR = 9 \ln Q + 44 \quad (3)$$

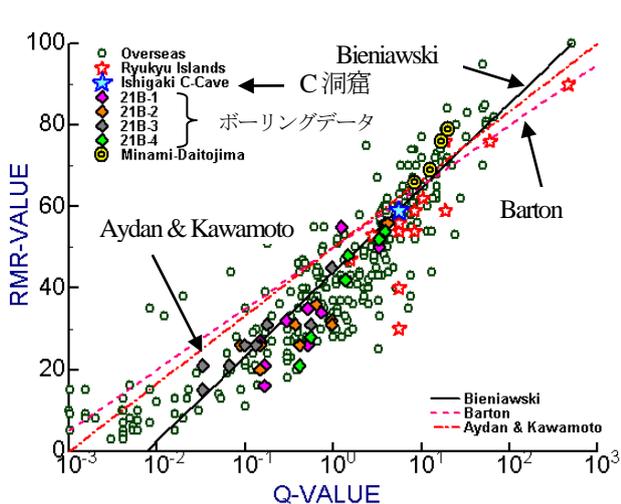


図-4 琉球石灰岩岩盤のRMRとQ値の関係

また、Bartonは、つぎのような関係式を提案⁸⁾している。

$$RMR = 15 \log Q + 50 \quad (4)$$

これらの関係式を、琉球石灰岩岩盤のボーリングコアによる実測値とともに重ねて示す。同図には、同空港建設地内にある別の鍾乳洞（C空洞）における実測値と、海外におけるRMRとQ値の関係もプロットしてある。これらの結果から明らかなように、琉球石灰岩岩盤におけるRMRとQ値の関係にも、他の海外における岩盤と同様に、相関性が認められる。これらの実測値に最小自乗法を適用すると、つぎのような関係式が得られる。

$$RMR = 16.66 \ln Q + 50 \quad (5)$$

つぎに、着陸帯直下の空洞地盤調査で実施された21B-2ボーリングコア（図-3(a)）に対するRMR値の深さ方向の変化の状況を、図-5に示す。図中には、同一コアに対し、異なる測定者が評価した3ケースのRMR値が示されている。この結果から、RMR値の判定には個人差が少ないことを示しており、RMR値判定の信頼性が確認される。

一般的にボーリングでコアを採集する際に、コアに新たな亀裂が発生することが予想される。したがって、コアを利用して求められるRMRの値は、実際のRMRの値より小さめに評価される可能性が高い。一例として、ボーリング孔21B-4（図-3(a)）のある深さのコアから求めたRMRの値は最大で44であったが、その深さに相当する空洞で求めた値は49であった。ボーリングコアによる評価の乱れを防ぐには、ボーリング孔壁面を直接観察できるボアカメラによる評価が必要となる。

つぎに、図-1に示した具志川城址基礎岩盤を構成するサンゴ礁琉球石灰岩と砂質石灰岩のボーリングコアか

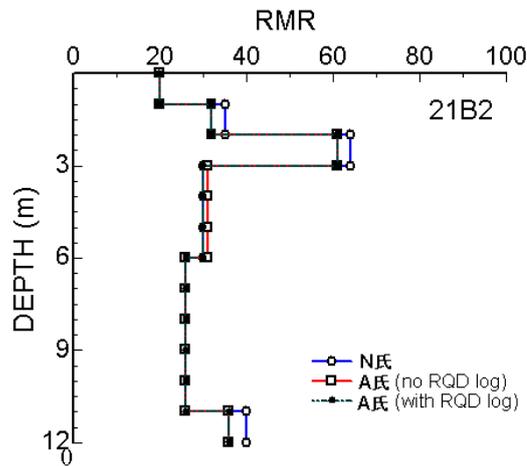


図-5 ボーリングコア（21B2）のRMR値の深度変化

表-1 具志川城址ボーリングコアに対する岩盤分類

電研分類	RMR	Q-値	GSI
DL (砂質)	15-16	0.025	15
DH (砂質)	32-34	0.333	30
CL (サンゴ礁質)	45-49	1.563	50
CM (サンゴ礁質)	60-64	10.42	60

表-2 琉球諸島における代表的な鍾乳洞・空洞における岩盤分類の評価

空洞名	状況	RMR	Q-値
	破碎帯	49	8.33
石垣鍾乳洞	一般	76	60.0
中原鍾乳洞	一般	54-59	5.6-8.8
金武鍾乳洞	一般	59	5.6-8.3
普天間鍾乳洞	一般	55-60	5.6-8.3
具志川	一般	50-55	2.8-5.6
砂山	一般	53-55	2.8-5.6

表-3 島尻層群に対する岩盤分類による評価

岩種	RMR	Q-値	GSI
泥岩(北上原)	32-38	0.8-2.1	40
泥岩(識名)	39-44	2.7-5.5	4.5
砂岩(北上原)	32-42	0.8-2.1	4.5

ら評価したRMR、Q値およびGSIの評価値を表-1に示す。また、琉球諸島における代表的な鍾乳洞・空洞の岩盤分類を表-2に示す。参考のため、琉球諸島における代表的地層である島尻層群に対する岩盤分類の評価を表-3に示す。これらの岩盤分類による評価値は、次章に示す岩盤分類による岩盤物性値の評価を行うことにより、岩盤分類に基づく安定評価手法⁹⁾を用いて、岩盤構造物の安定性を評価することが可能となる。

4. 岩盤分類による岩盤物性値の評価

一般的に、岩盤構造物の安定性を評価する際、簡単な弾性解析や極限解析手法が利用されることが多い。弾性解析においては、応力分布、変位および安全率の評価のため、岩盤の変形係数、Poisson比、圧縮強度、せん断強さ（粘着力および内部摩擦角）が必要となる。これらの値は、一般的に現位置試験を行って決定すべきである。しかし、重要構造物以外に現位置試験を実施するのは希であり、通常は岩盤の物性値を求めるために、既存のデータをもとに提案されている近似式を用いることが多い。これらの関係式は、RMR、Q値あるいはGSIの値をパラメータにしている。これらのパラメータと物性値を関連づけた関係式には、直接に関連づける直接関係式と、母岩の物性値で岩盤の物性値を除いた無次元物性値と関連させる無次元化関係式の2つの考え方がある。これらの関係式について、筆者らの提案式を含めて簡単に示す。

(1) 直接関係式

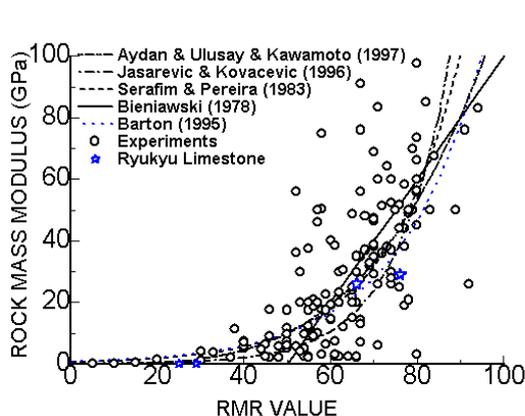
岩盤の評価点と物性値を直接関連させた関係式は、従来より多くの提案が行われている。図-6に、提案されている岩盤の変形係数 E_m および一軸圧縮強さ σ_m と、RMR、Q値の関係式を示す。同図には、一般の岩盤における実験値および琉球石灰岩岩盤における実測値を示してある。変形係数および一軸圧縮強さに対するAydanの提案式^{9),10)}は、つぎの通りである。

岩盤の変形係数 E_m (MPa) :

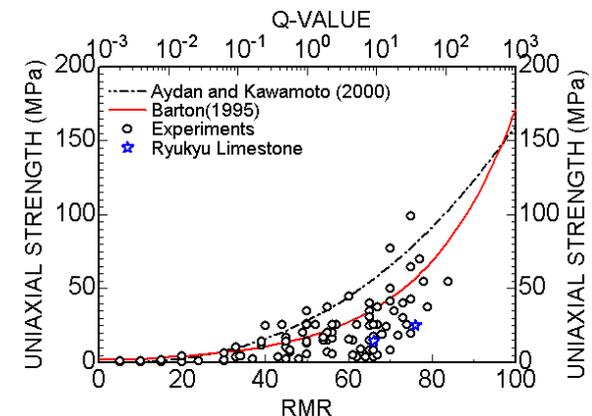
$$E_m = 0.0097RMR^{3.54} \quad (6)$$

岩盤の一軸圧縮強さ σ_{cm} (MPa) :

$$\sigma_{cm} = 0.0016RMR^{2.5} \quad (7)$$



(a) 変形係数



(b) 一軸圧縮強さ

図-6 変形係数と一軸圧縮強さに対する経験式と実測値の比較

筆者らは、新たに既存のデータを整理し、図-7に示す岩盤のポアソン比 ν_m とRMRの関係を得た。図の破線で示されるポアソン比の平均値を表す提案式は、つぎの通りである。

$$\nu_m = 0.5 - 0.2 \frac{RMR}{RMR + 0.2(100 - RMR)} \quad (8)$$

図中に示すA、Bおよび β の係数値は、式(8)における各係数を示しており、式(10)の係数に対応している。

琉球石灰岩岩盤の変形係数、一軸圧縮強さおよびポアソン比は、図-6および図-7に示すAydanの提案式、あるいはその他の提案式によって評価が可能である。

(2) 無次元化関係式

岩盤の物性値を岩石の物性値で除して無次元化された関係式がいくつか提案されている。表-4にこれまでに提案された経験式と琉球石灰岩に関する提案式を示す。なお、表-4において、パラメータの下添え字 i は、母岩 (intact rock) を意味し、また、下添え字 m は、岩盤 (rock mass) を表している。表-4で示した経験式を、沖縄

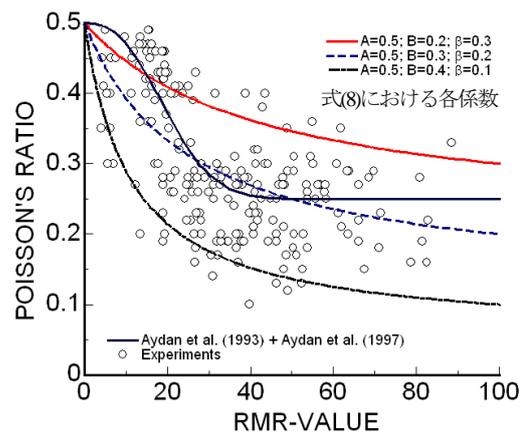


図-7 RMRとPoisson比の関係

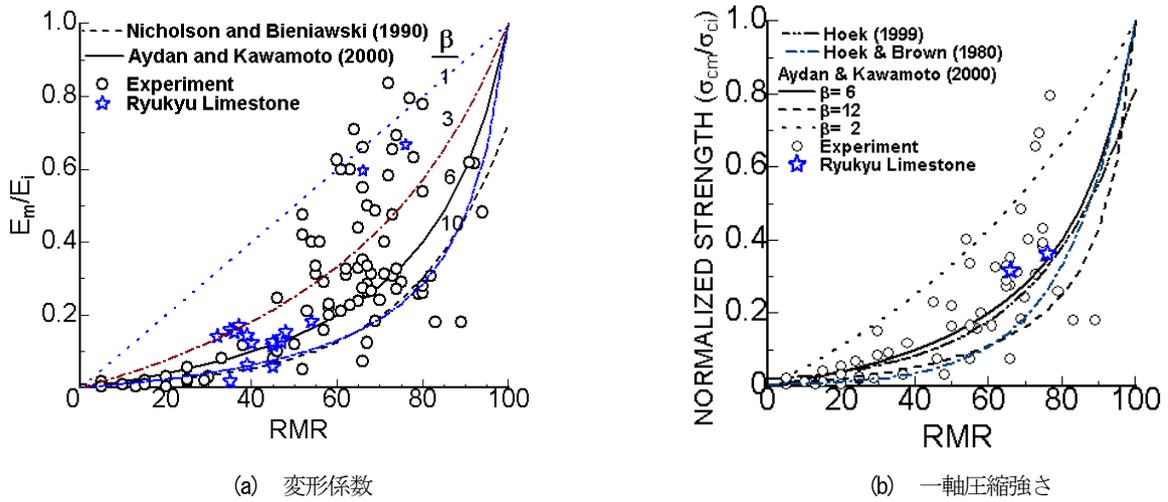


図-8 無次元化変形係数と一軸圧縮強さに対する経験式と実測値の比較

表-4 岩盤分類による岩盤物性値の無次元化関係式

岩盤物性値	経験式	提案者
変形係数 E_m (GPa)	$\frac{E_m}{E_i} = 0.009e^{RMR/22.82} + 0.000028RMR^2$	Nicolson, Bieniawski (1990)
	$\frac{E_m}{E_i} = \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)}$	Aydan, Kawamoto (2000)
一軸圧縮強さ σ_{cm} (MPa)	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = \sqrt{s} ; s = e^{(RMR-100)/9}$	Hoek, Brown (1980)
	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = 0.022e^{0.038 \cdot GSI}$	Hoek, Brown (1998)
	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = 0.5 \frac{RMR - 15}{85}$	Kalamaras, Bieniawski (1995)
	$\frac{\sigma_{cm}}{\sigma_{ci}} = \frac{RMR}{RMR + 6(100 - RMR)}$	Aydan, Dalgıç (1998)
摩擦角 ϕ_m	$\frac{\phi_m}{\phi_i} = 0.3 + 0.7 \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)}$	Aydan, Kawamoto (2000)
ポアソン比 ν_m	$\frac{\nu_m}{\nu_i} = 2.5 - 1.5 \frac{RMR}{RMR + 0.3(100 - RMR)}$	本研究にて提案

における実測値と既存の実験値と比較した結果を図-8に示す。

これらの結果によれば、琉球石灰岩盤の無次元化された変形係数は、Aydan & Kawamoto⁹⁾の式により、また、一軸圧縮強さはAydan & Dalgıç¹⁰⁾の式で、ポアソン比は、本研究で新たに提案する次式で最も良く近似できることが明らかになった。

$$\frac{\nu_m}{\nu_i} = 2.5 - 1.5 \frac{RMR}{RMR + 0.3(100 - RMR)} \quad (9)$$

5. 岩盤分類による琉球石灰岩岩盤の岩盤物性値の総合評価式の提案

Aydanらは、岩盤分類による評価値と岩盤物性値の関係を総合的に評価できる関係式をつぎのように提案した。

$$\frac{\phi_m}{\phi_i} = \alpha_0 - (\alpha_0 - \alpha_{100}) \frac{RMR}{RMR + \beta(100 - RMR)} \quad (10)$$

ここで、 φ_m および φ_i は、それぞれ、各種の岩盤物性および岩石物性値を示す。 α_0 と α_{100} は、RMR=0 と RMR=100に該当する各物性に対応する α の値である。また、 β は、実験データに対する上記の関数の最小化から決定される定数である。

本研究では、この関係式(10)を用いて琉球石灰岩岩盤の各種物性値を与える定数を求めた。得られた式(10)の定数の値を表-5に示す。必要となる琉球石灰岩岩盤の各種物性値は、式(10)と表-5の値を用いて求められる。

表-5 琉球石灰岩岩盤の各物性値に対する定数 α_0 , α_{100} , α_{100} および β の値

物性	α_0	α_{100}	β
ヤング率	0.0	1.0	6
Poisson比	2.5	1.0	0.3
圧縮強度	0.0	1.0	6
引張強さ	0.0	1.0	6
摩擦係数	0.3	1.0	1.0

6. 結論

琉球諸島の岩盤を岩盤工学的立場から再評価し、代表的な岩盤分類である RMR および Q-値システムを用いて、琉球諸島の琉球石灰岩岩盤の岩盤分類を行った。

岩盤構造物の安定性を検討する際に必要となる岩盤の変形・強度定数を評価するため、岩盤分類RMR, Q値と物性値を直接に関連つける関係式および無次元化関係式を整理した。これらの関係式には、既存の関係式とともに、本研究において新規に提案した関係式を提示した。Aydanらが提案した岩盤分類による物性値の評価式を用いて、琉球石灰岩の物性値推定に必要な評価式の定数 α_0 , α_{100} , β を決定した。本式を用いることによって、

琉球石灰岩の岩石としての物性値（ヤング率、Poisson比、圧縮強度、引張強さ、摩擦係数）を与えれば、対象とする岩盤のRMR値を評価することにより、岩盤としての各物性値を推定できる。

参考文献

- 1) 渡嘉敷直彦, アイダン オメル, 本村好彦, 照屋優, 湖城清上良卓: 琉球石灰岩層における自然岩盤構造物の安定性評価に関する研究, 第12回岩の力学国内シンポジウム, CD-ROM, 2008.
- 2) アイダン オメル, 太田良巳, 渡嘉敷直彦, 赤木知之: 琉球石灰岩空洞モデルの破壊時の多重パラメータ応答, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 土木学会岩盤力学学会, pp.103-108, 2007.
- 3) Bieniawski, Z.T.: Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, *Third Int. Congress on Rock Mechanics, ISRM, Denver, IIA*, pp.27-32, 1974.
- 4) Bieniawski, Z.T.: *Engineering rock mass classifications*, New York, Wiley, 1986.
- 5) Barton, N., Lien, R. and Lunde, I. Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6(4), pp.189-239, 1974.
- 6) Barton, N., Lien, R. and Lunde, I.: Engineering classification of rock masses for the design of tunnel supports. *Rock Mechanics*, 6(4), pp.189-239, 1974.
- 7) Hoek, E. and Brown, E.T.: Practical estimates of rock mass strength. *Int. J. Rock Mech. And Min. Sci.*, 34(8), pp.1165-1186, (1997).
- 8) Barton, N.: The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. *8th Int. Rock Mech. Congress*, Tokyo, pp.1023-1032, 1994.
- 9) Aydan, Ö. and Kawamoto, T.: Assessing mechanical properties of rock masses by RMR rock classification method. *GeoEng. 2000 Symposium*, Sydney, OA0926, 2000.
- 10) Aydan, Ö. and S. Dalgıç, T. Kawamoto: Prediction of squeezing potential of rocks in tunnelling through a combination of an analytical method and rock mass classifications. *Italian Geotechnical Journal*, Vol.34, No.1, pp.41-44. 2000.

APPLICATION OF ROCK MASS CLASSIFICATION SYSTEMS TO RYUKYU LIMESTONE AND THE EVALUATION OF THEIR MECHANICAL PROPERTIES

Nahohiko TOKASHIKI and Ömer AYDAN

For the evaluation of in-situ mechanical properties of Ryukyu limestone, which is widely distributed in Ryukyu Archipelago, rock mass classification system such as RMR and Q-value systems are applied to outcrops and borings of Ryukyu limestone at various sites. The authors also summarized available empirical relations including those of the authors for the evaluation of rock mass properties as a function of RMR and Q-Value. These empirical relations are used to obtain the in-situ properties of Ryukyu limestone as rock mass. In this article we present an unified empirical relation to obtain various mechanical properties rock mass. This unified equation is actual measurements and compared.