

琉球石灰岩地下空洞で行った安定性評価について

(株)南城技術開発 井上 英将
 琉球大学 伊東 孝
 島嶼防災研究センター 渡嘉敷 直彦
 琉球大学名誉教授 藍檀 オメル

1. はじめに

糸数アブチラガマは、沖縄島の南部、南城市内、琉球石灰岩段丘に位置する石灰洞で戦時中壕として活用された。現在は、平和学習の場として利用されている。

平成 22 年頃より、降雨後、壕天端からの流入水の増加傾向が指摘され、入壕者の安全確保の観点より、壕の安全性の評価が必要となった。これを受け、各種観測の他、藍檀ら(2014)¹⁾が提起した新しい岩盤評価手法(RMQR)、および岩盤の地下空洞の経験的・解析的安全性評価手法等を利用し、本壕の状況評価を行った。ここではその内解析的安全性評価方法とその結果について紹介する。

2. 壕の状況

糸数アブチラガマは、延長約200m、地表からの深度6～17m、空洞幅は12～30mである。戦時中は、現存する洞窟内の概ね全体が壕として活用されていた。これより、洞窟内の概ね全てが入壕者が回るルートとなっている。解析は、壕の形状、天端厚等を勘案し7つのエリアに区分し、任意の解析断面を設け行った(図-1)。ただしエリア6はエリア5と類似した空洞幅、天端厚でありエリア5の評価結果が準用されるものとし、解析断面は非設定とした。

3. 解析の手法について

地下空洞の天端の支保は、渡嘉敷(2011)²⁾により、支保の状態を単純梁と両端固定梁、アーチ構造の3つのモードで定式化されている(図-2)。解析的評価では、地下空洞がどのモードで支保されているのかを判定する。

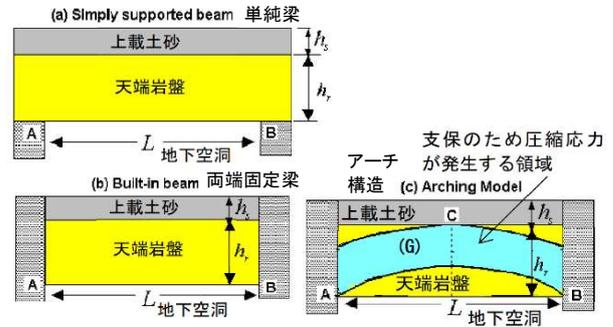


図-2 地下空洞の天端の支保のモード²⁾

以下に解析的評価の大まかな方法を示す。

(STEP1)解析対象とする地下空洞断面位置の設定，図化
 (STEP2)調査ボーリングコア等を利用した各断面の天端岩盤のRMQR値の設定

(STEP3)室内試験で得た岩盤の引張・圧縮強度(σ_{ti} , σ_{ci})に，STEP2で設定したRMQR値を利用し，下式³⁾より算出される低減係数 α を乗じ，解析箇所の天端の強度(σ_{tm} , σ_{cm})を算定する。→Aとする。

$$\alpha = \frac{RMQR}{RMQR + \beta(100 - RMQR)} \cdot (\alpha_{0-} - (\alpha_{0-} - \alpha_{100-}))$$

[α : 母岩に対する現地岩盤の強度の比(低減係数)

$\alpha_{0-}, \alpha_{100-}, \beta$: 実験定数(特性値)]

$$(\sigma_{tm}, \sigma_{cm}) = (\sigma_{ti}, \sigma_{ci}) \times \alpha$$

[σ_{tm} : 現地岩盤の推定引張り強度(MPa),

σ_{cm} : 現地岩盤の推定圧縮強度(MPa)]

(STEP4)各モードの天端の支保を表す式²⁾を用い，解析断

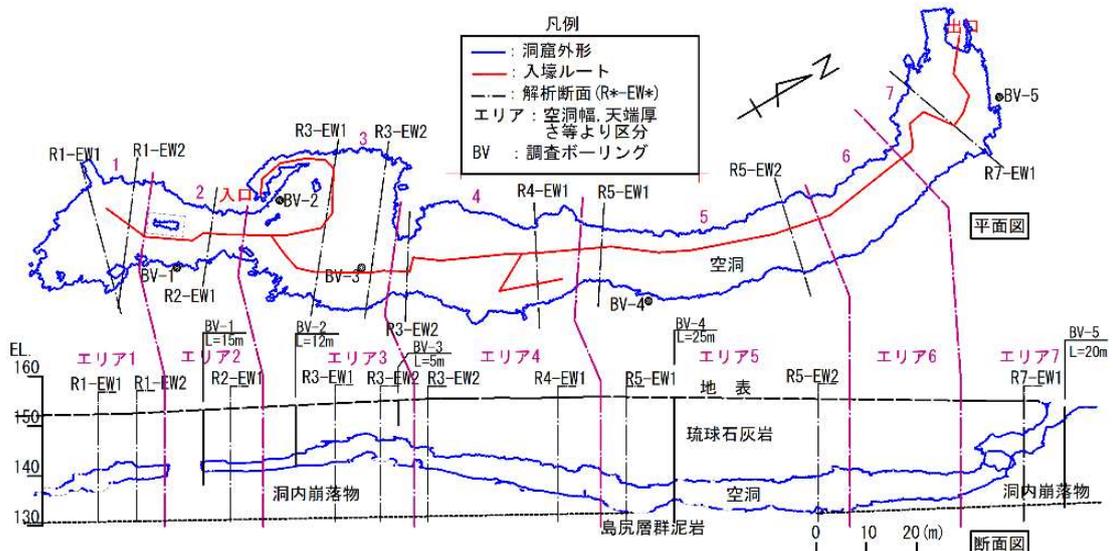


図-1 糸数アブチラガマの地下空洞平面図・断面図

面の地下空洞幅(L), 天端の岩盤厚さ(h_r)等で天端が支保されるために必要な天端岩盤の強度(σ_t, σ_c)を各モード毎に算定する。→Bとする。

○単純梁, 両端固定梁での天端の支保を表す式

$$\frac{L}{h_r} = \sqrt{\beta \frac{\sigma_t}{(\gamma_r h_r + \gamma_s h_s)}}$$

単純梁 β=2/3, 両端固定梁 β=2

○アーチモデルでの天端の支保を表す式

$$\frac{L}{h_r} = \sqrt{\beta \frac{\sigma_c}{(\gamma_r h_r + \gamma_s h_s)}}$$

アーチモデル β=4/3

[L: 地下空洞幅, h_r: 天端石灰岩厚さ, h_s: 上載土砂厚さ, γ_r: 天端石灰岩の単位体積重量, γ_s: 上載土砂の単位体積重量]
(STEP5)STEP3 と STEP4 で算出した強度を対比し, A≧B となる支保のモードを把握する。

4. 解析に利用する RMQR 値の算定方法

調査ボーリングコアで判定した岩の RMQR 値を用い, 解析断面の天端岩盤の地層序毎に RMQR 値の設定を行った(表-1)。琉球石灰岩は, 塊状~砂礫状まで多様な様相を呈す。地下空洞の天端岩盤は, RMQR 値としては幅を持った層序で構成されていることがわかる。解析では, 現地地下空洞の安定との整合性を図るため各層序の RMQR の内最大値を利用した。

表-1 解析断面・地層序毎に算定した RMQR 値一覧

代表断面		表土					
		1層	2層	3層	4層	5層	6層
R1-EW1	a) 層厚(m)	1.2	4.1	3.4	2.1		
	b) RMQR値	31	58	49			
R1-EW2	a) 層厚(m)	0.8	3.7	3.4	2.5		
	b) RMQR値		31	58	60		
R2-EW1	a) 層厚(m)	0.4	1.0	2.0	3.4	2.7	0.4
	b) RMQR値		29	21.0	36	63	53
R3-EW1	a) 層厚(m)	1.0	0.8	1.6	1.8	1.7	1.2
	b) RMQR値		43	58	43	60	61
R3-EW2	a) 層厚(m)	0.5	1.4	1.9	1.8	2.1	
	b) RMQR値		43	57	48	60	
R3-EW3	a) 層厚(m)	0.5	1.5	1.8	1.9	2.5	1.5
	b) RMQR値		45	42	38	49	39
R4-EW1	a) 層厚(m)	0.9	1.3	1.7	1.8	2.4	1.3
	b) RMQR値		45	42	38	49	39
R5-EW1	a) 層厚(m)	0.9	1.6	1.6	1.8	2.4	1.2
	b) RMQR値		46	31	35	49	39
R5-EW2	a) 層厚(m)	1.0	1.7	1.5	1.8	2.3	1.2
	b) RMQR値		38	38	41	51	35
R7-EW1	a) 層厚(m)	1.3	1.8	1.5	1.8		
	b) RMQR値		36	49	40		

※赤着色部: 解析に用いた各層序中の RMQR 最大値

5. 岩盤の品質評価結果

表-2 に解析的手法による各代表断面の評価結果を示す。これよりエリア 3, 7 では両端固定梁での支保は評価されず, アーチ構造で支保されているものと評価された。図-3 には表-2 に示した各解析断面をプロットした。これよりエリア 3, 7 はアーチ構造の限界線に近接しており, 区分した7エリア中, 安全性について, より注視すべき状態にあることが見て取れる。

表-2 解析的手法による安定性評価の結果

エリア	断面	幅(m)	岩盤厚(m)	RMQRによる強度(A)		各状態に必要な強度と判定(B): check(A>B)		
				σ _{cm} (MPa)	σ _{tm} (MPa)	単純梁	両端固定	アーチ
						σ _t (MPa)	σ _c (MPa)	σ _c (MPa)
1	R1-EW1	20.8	9.6	2.31	0.75	1.59 要注意	0.53 OK	0.80 OK
	R1-EW2	20.2	9.6	2.47	0.80	1.45 要注意	0.48 OK	0.73 OK
2	R2-EW1	10.5	9.7	2.73	0.88	0.38 OK	0.13 OK	0.19 OK
3	R3-EW1	28.8	7.2	2.47	0.80	4.11 要注意	1.37 要注意	2.06 OK
	R3-EW2	29.3	7.2	2.47	0.80	4.03 要注意	1.34 要注意	2.02 OK
4	R4-EW1	16.1	12.7	1.70	0.55	0.69 要注意	0.23 OK	0.35 OK
5	R5-EW1	10	16.4	1.82	0.59	0.20 OK	0.07 OK	0.10 OK
	R5-EW2	14.3	14.4	1.82	0.59	0.48 OK	0.16 OK	0.24 OK
7	R7-EW1	19.5	5.1	1.70	0.55	2.90 要注意	0.97 要注意	1.45 OK

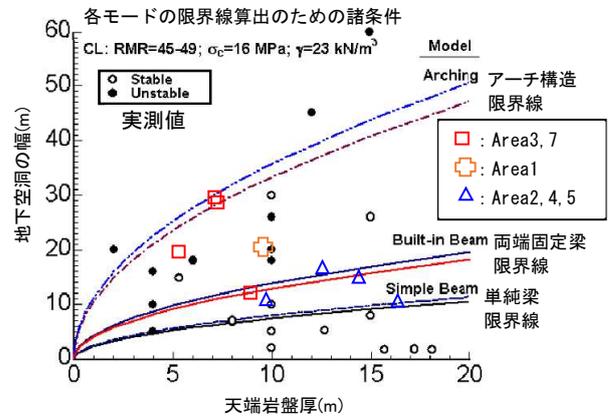


図-3 各モードで支保される地下空洞幅-天端岩盤厚さの関係の限界線と実測値との並記図²⁾へアプチャガマのデータを追記

6. まとめ

岩盤地下空洞の安定に対するより詳細な解析方法として DFEM 解析等がある。同解析ではモデルの作成等に多大の労力およびコストが必要となる。ここで紹介した解析的手法は, より少ない労力かつ短期間で定量的に地下空洞の安定性が評価できる等の利点を有す。

《引用・参考文献》

- 1) Aydan, Ö., Ulusay, R. & Tokashiki, N., A new rock mass quality rating system: Rock Mass Quality Rating (RMQR) and its application to the estimation of geomechanical characteristics of rock masses. *Rock Mech Rock Eng* 47: 1255-1276, 2014
- 2) 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評価に関する研究, 早稲田大学大学院 博士論文集, p138, 140, 2011
- 3) 藍檀オメル, 渡嘉敷直彦: 新しい岩盤クオリティー評価システム(RMQR)と琉球諸島の岩盤評価への適用, 第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, 240~245, 2016