

琉球大学工学部 正会員 ○ 渡嘉敷直彦
 同 上 正会員 上原方成
 名古屋大学工学部 正会員 市川康明
 同 上 正会員 川本 眺 万

1. まえがき

琉球石灰岩は、琉球列島に分布する第四紀に形成された礫性の堆積岩岩盤であり、砕屑岩を含めて琉球層群と呼ばれる。琉球石灰岩は、沖縄本島では泥岩からなる島尻層群の上に堆積しているが、一般に構造物の支持層としては、島尻層群が良好な基盤として扱われている。近年、琉球層群への構造物建設の機会が増え、琉球層群の基盤としての見直しが必要になっている。しかしながら、琉球層群は、大小の空洞および砂、レキ層が内在し、その力学的挙動は、まだ十分に解明されていない。

本報告は、琉球層群の力学特性を明らかにする基礎的資料を得るため、まず琉球石灰岩の地質的・物理的特性を概観する。次いで、ひめゆり平和祈念資料館壕展示室建設の事例を取り上げ、工事計画の概要を紹介し、琉球石灰岩層の空洞掘削に伴う地下壕周辺の力学的安定性について検討するものである。ここでは、琉球石灰岩を含む構成地盤材料を弾性体として扱い、ボーリングコア試料による力学試験に基づいて、有限要素法による二次元弾性解析を実施する。

2. 琉球石灰岩の地質・物理的特徴¹⁾

琉球石灰岩は、島尻層群および先新第三紀を不整合におおひ、段丘堆積物、沖積層・現世さんご礁堆積物におおわれる第四紀更新世の地層であり、平均層厚40~50mで基盤岩上に広く分布している。琉球石灰岩には、砕屑性泥質石灰岩、砕屑性礫質石灰岩、有孔虫を主とした砂質石灰岩、石灰薄球石灰岩、サンゴ石灰岩からなる琉球層群中のものと中・低位段丘を作る細礫~粗粒サイズの砂質石灰岩(栗石灰岩)とがある。したがって、その物理・力学的特性もかなりのバラツキがあり、一軸圧縮強度も60~580kgf/cm²、90~140kgf/cm²などの報告がある。琉球石灰岩の岩盤区分は、C₁₁、C₁₂に相当するものもあるが、多くはC₁、Dに属する。沖縄本島南部における琉球石灰岩の分布状況、地質層序については、図-1および表-1を参照されたい。

図-1 沖縄島南部の地質図²⁾

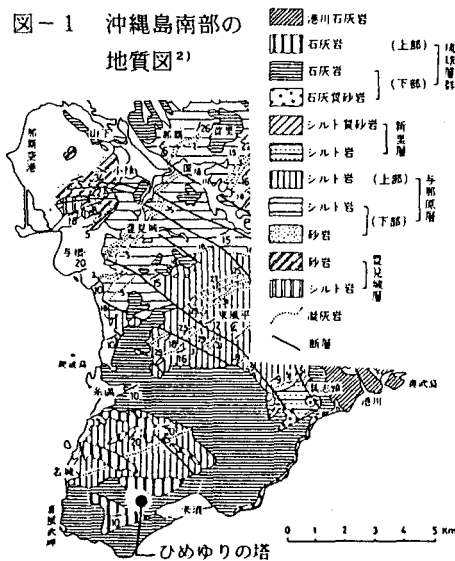


表-1 沖縄島南部の地質層序

時代	地質区分	岩種・構造	地形
新世	現代サンゴ礁堆積物	サンゴを主体とする珊瑚・有孔虫類の堆積物の結晶・シルト・砂・礫を主体とする無組織	サンゴ礁地形
	新期砂丘砂層	石灰質砂層 断層層上に堆積	砂丘
第四紀	沖積層	礫質・砂質・シルト質・粘土質の堆積物を主体とする	沖積低地
	段丘石灰岩	礫質・砂質・シルト質の堆積物を主体とする	段丘 (中位段丘) 60~50m
	赤褐色土	礫質・砂質・シルト質の堆積物を主体とする	石灰岩台地 (断層プロックによって断層多し)
新第三紀	琉球石灰岩	礫質・砂質・シルト質の堆積物を主体とする	石灰岩台地 (断層プロックによって断層多し)
	知念砂層	石灰質砂層	
中新世	新期層	砂質 (主としてシルト質) と泥質 (主としてシルト質) の堆積物を主体とする	地形面なし 小起伏丘陵 面および急傾斜面
	島尻層群	砂質・泥質・シルト質の堆積物を主体とする	
中新世	豊見城層	小粒砂質の主層、泥質が下部	

3. ひめゆり平和祈念資料館建設計画の概要と地質状況

先の大戦で犠牲となったひめゆり学徒隊の碑、ひめゆりの塔敷地内に、ひめゆり平和祈念資料館の建設が予定されている。祈念資料館は、本体の資料館と、ひめゆりの壕（ガマ）を直接見せる展示室、資料館と展示室を結ぶ通路（トンネル）で構成される。その平面計画図を図-2に示す。ガマ展示室は、幅8m、高さ1.6mのガラス窓を設け、壕全体が見わたせる。ガマ展示室の掘削寸法は、8.00m × 8.50m の楕円形型である。展示室のガマ側から見た計画寸法を図-3に示す。また、通路の掘削断面は、4.20m × 2.50m の馬蹄形であり、資料館、展示室間の全長35.265m が掘削される。本資料館は、沖縄本島南部、糸満市伊原地内に施工されるものであり、琉球石灰岩層内でガマ展示室、通路の掘削施工が行なわれる。ガマ内部と地表付近を自然に保ったまま施工する必要があるため、NATM工法が採用され、資料館と展示室両方向から掘削が行なわれる。

図-2に示す位置でボーリング調査を実施し、地質の全体的な把握とサンプルコアを採取して地盤材料の力学試験を行なった。図-4に解析断面における地質状況を示す。本断面は、地表面より深度方向に琉球石灰岩層、島尻泥岩層よりなる。一部石灰岩が変質して粘性土化した礫混り土層がある。石灰岩は、中、下部において緻密な岩質と砂礫質のコーラルが互層する岩層である。N値は4~50の間でバラツキが見られた。泥岩は、第三紀鮮新世の与那原累層に属する泥岩である。泥岩層は、標高約30mのところでのゆるい勾配で分布している。N値は7~26である。礫混り土は、展示室付近の石灰岩層下部にやや厚く分布している。N値は0~9 と非常に軟らかいものと、やや硬いものがある。ボーリングの結果、石灰岩層に局部的に空洞の存在が確認されたが、三次元的な分布の確認が困難であり、推定を行なった。

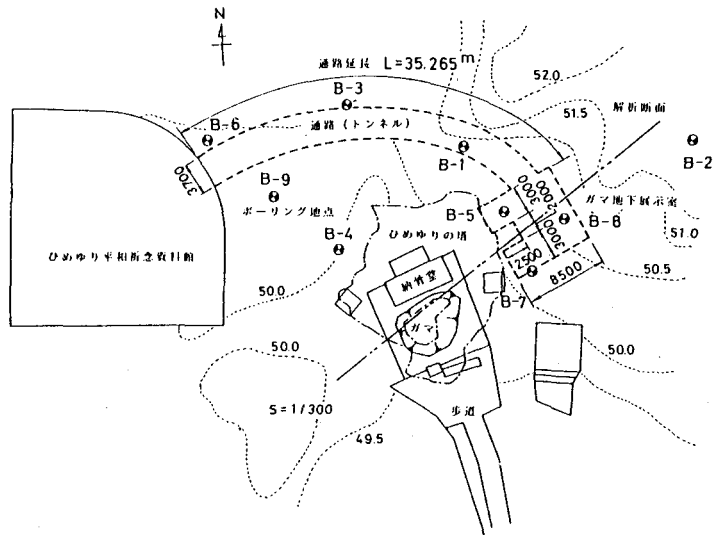


図-2 ひめゆり平和祈念資料館平面計画図

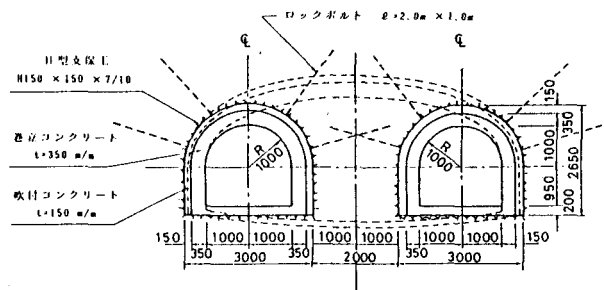


図-3 ガマ展示室

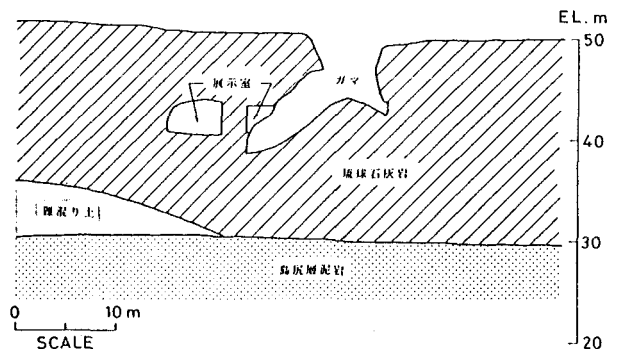


図-4 解析断面の地質状況

4. 材料試験の概要

図-2に示すボーリング地点から採取した琉球石灰岩および島尻層泥岩のコアサンプルを用いて、物理試験、一軸・三軸圧縮試験を実施し、地盤構成材料の力学特性を調べた。

4. 1 琉球石灰岩の力学特性

石灰岩層の比較的浅い領域にガマ展示室、通路トンネルが設置されることから、主として一軸圧縮試験を実施した。試験に用いた琉球石灰岩の物理的性質は、比重 2.72、湿潤密度 2.21gf/cm³、単位体積重量 2.21gf/cm³ である。供試体は、直径 5cm、高さ 10cm の円柱形とし、一軸圧縮試験用 17 本、三軸圧縮試験用 4 本を準備した。高剛性圧縮試験機を用いて、載荷速度 0.1%/min の変位速度制御試験を行なった。一軸圧縮試験の結果、強度定数にかなりのバラツキがあったが、平均的な値をまとめると次の通りである：一軸圧縮強度 236kgf/cm²、初期接線弾性係数 183,000kgf/cm²、ポアソン比 0.297。

図-5に、一軸・三軸圧縮試験結果の代表的な応力・ひずみ曲線を示す。本石灰岩は、おもにサンゴなどの遺骸が集積した礁性の石灰岩からなり、多孔質の岩石であるため、複雑な変形破壊挙動を示す。初期接線弾性係数、圧縮強度は拘束圧とともに増大する傾向が見られる。

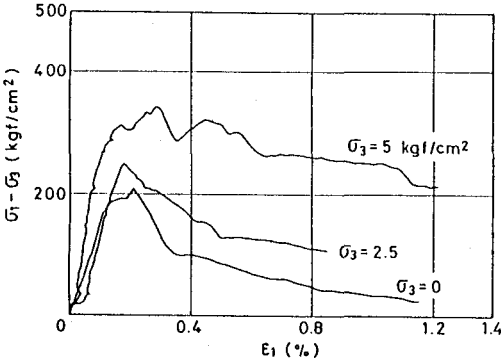


図-5 応力-ひずみ曲線（琉球石灰岩）

4. 2 島尻層泥岩の力学特性

本試験は、新城³⁾が行なったものであり結果の一部を述べる。試料は、ボーリング孔 B-6、B-7 の地点から採取したものを用いて試験を実施した。泥岩の物理試験結果は、比重 2.67~2.77、間隙比 0.77~0.85、湿潤密度 1.95~2.00 であり、N値は 20 前後である。せん断試験は、三軸圧縮試験機を用いて直径 4.5cm、高さ 10cm の供試体について実施した。試験は、UU試験、CU試験、CD試験を実施し、ひずみ速度は、それぞれ、0.5/min、0.05/min、0.005/min である。CD試験によって得られたヤング率、ポアソン比と側圧の関係を図-6に示す。ヤング率は、拘束圧とともに増大するが、ポアソン比は拘束圧の大きさによらず一定値を示している。一方、CU試験による非排水ヤング率は圧密圧力とともに増大し、拘束圧依存性を示した。有効応力解析に用いる強度パラメータは、最大強度に対して C=0.3kgf/cm²、φ=26.5°、残留強度に対して C_r=0、φ=23° が得られた。

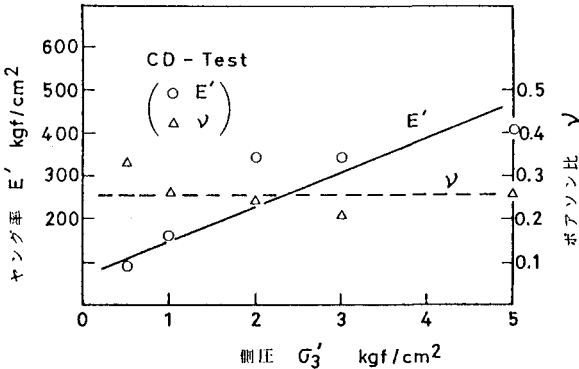


図-6 ヤング率、ポアソン比と側圧の関係（島尻層泥岩）

表-2 地盤の材料定数

材 料	単位体積重量 γ (tf/m ³)	弾性係数 E (tf/m ²)	ポアソン比 ν	側圧係数 K ₀
琉球石灰岩	2.21	1.83 × 10 ⁶	0.297	0.42
島尻層泥岩	2.00	1.50 × 10 ³	0.270	0.37
礫混り土	2.00	1.00 × 10 ³	0.300	0.43
砂質粘土	—	2.10 × 10 ⁷	0.300	—

4. 3 地盤の材料定数

上述の試験結果から、地盤構成材料の弾性定数を表-2のように決定した。礫混り土に

については、今回試験を行っていないが、これまで知られている資料により弾性定数を仮定した。

5. ガマ展示室掘削時の安定解析

5. 1 解析条件

ガマ展示室の掘削に伴う周辺地盤の安定性を検討するため、次の条件を設定して解析を行なった。1) 解析は、ガマ展示室のピラー部を含む断面について二次元有限要素解析を実施する(図-2 参照)。2) 琉球石灰岩層は、固結した岩と砂礫質の互層する岩層であること、また、中小の空洞を有することを考慮して実験から得られた石灰岩の初期弾性係数の1/10の変形係数を持つ均質層として扱う。3) 解析モデルを図-7のように設定する。境界条件は、側方において水平方向のみが拘束され、底面は、水平・垂直両方向拘束されているものとする。4) 地盤の初期応力は、表-2に示す側圧係数 K_0 によって評価し、この初期変形は考慮しない。5) ガマ展示室上部にロックボルトを配置し、この効果を見るため、解析は2ケースについて行なう。

5. 2 解析結果

図-7に示すロックボルトのないモデルの二次元弾性解析を行なった結果、図-8のような応力状態を得た。最大応力 18.0 kgf/cm^2 がピラー部に生じている。この応力は、琉球石灰岩の一軸圧縮強度 236 kgf/cm^2 に比べて十分に小さい。一方、引張り応力の最大値 1.1 kgf/cm^2 が展示室下部に生じている。引張り強度を圧縮強度の約1/10、 23 kgf/cm^2 とすると、この引張り応力は十分に小さい。また、引張り応力の発生した領域を図-7に示す。引張り応力は、展示室の天端、底部および展示室側地表付近に生じている。展示室のゆりみ領域にロックボルトを配置してその効果を見る解析を行なったが、ロックボルトのない応力状態とほぼ同じであった。

6. おわりに

琉球石灰岩層のガマ展示室掘削解析は、均質地盤としてモデル化したものであり、今後琉球石灰岩の岩層の状況を十分調査し、可能な限り正確にモデル化して解析を実施する必要がある。

参考文献

- 1) 木崎甲子郎編： 琉球弧の地質誌、沖縄タイムス社、1985。
- 2) 中川久夫、他： 八重山群島石垣島・西表島の地質、東北大地質古生物研邦報、NO.84、1-22、1982
- 3) ひめゆり平和祈念資料館建設委員会編： ひめゆり平和祈念資料館地下構造物に関する検討報告書

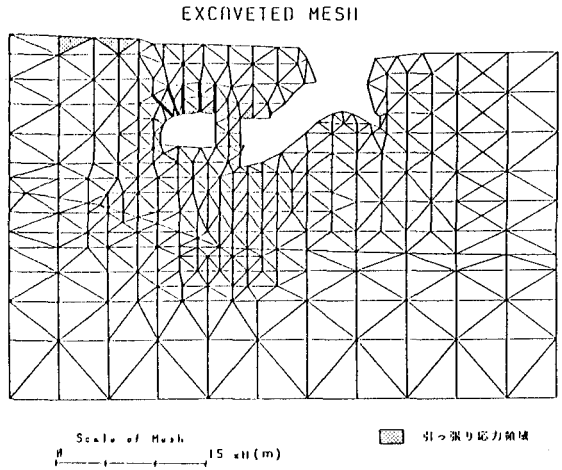


図-7 解析モデル

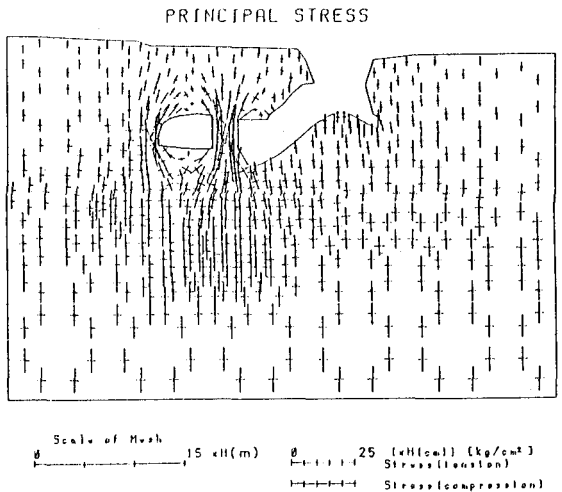


図-8 解析結果(主応力図)

(62) An Analytical Study on Cavern-Stability
in Ryukyu Limestone

by

N. Tokashiki and H. Uehara

(Faculty of Engineering, University of Ryukyus)

Y. Ichikawa and T. Kawamoto

(Dept. of Geotechnical Engineering, Nagoya University)

ABSTRACT

A construction of cavern is planned in Ryukyu limestone at the south area of Ryukyu Island. The geometrical underlay in this area is typically constituted by the Ryukyu limestone and Shimajiri mudstone.

This paper examines the stability of the cavern by using finite element analysis. The material properties of the subsurface are estimated through the laboratory test-runs by some boring core samples. This paper also introduces the geological behavior of the Ryukyu limestone.