

大型構造物基礎としての琉球石灰岩層の力学的 安定性と杭基礎の支持力特性の評価

田口輝^{1*}・藍檀オメル²・渡嘉敷直彦³・伊東孝⁴

¹琉球大学大学院・社会基盤デザインプログラム修士1年

²琉球大学・名誉教授

³地殻工学防災研究所（琉球大学島嶼防災研究センター研究開発室）

⁴琉球大学・工学部社会基盤デザインコース

Key Words : Ryukyu limestone, creep, unconfined compression strength, FEM Analysis, shear resistance

1. はじめに

琉球諸島には琉球石灰岩が広く分布しており、琉球石灰岩層内には、鍾乳洞などの大小の地下空洞が数多く存在している。以上を踏まえて、従来から大規模構造物を建造する際には、琉球石灰岩を支持層とはせず、その下層の島尻層群泥岩を支持層とするのが一般的である。そこで、琉球石灰岩を支持層として用いるためには、長期的な琉球石灰岩の力学特性を把握することと杭の支保メカニズムの解明が重要になってくる。

本研究では、琉球石灰岩を用いたクリープ試験及び、琉球石灰岩層における杭基礎の支持力特性について、模型実験及び解析を行った。クリープ試験では琉球石灰岩の時間依存特性の評価を行った。模型実験では、琉球石灰岩と杭基礎間のせん断抵抗を評価するため、琉球石灰岩を用いたロックボルト押し抜き試験を行った。また解析では、有限要素法におけるロックボルト押し抜き試験の数値解析的検討を行い、杭とグラウト間のせん断応力の評価を行うことにより、杭の支保メカニズムの検討を行った。

2. 琉球石灰岩と島尻層群泥岩の時間依存特性

(1) 実験概要

供試体に一定の荷重を長期間加えることで、供試体に生じる変形量及び破断までの時間を測定するクリープ試験を行った。しかし、琉球石灰岩からクリープ破壊を得るのは脆性的な特徴があるため困難である。そこで荷重を多段階的にかけて、クリープ破壊を再現した²⁾。それと併用して、琉球石灰岩にAE検出機を供試体に付

表-1 クリープ試験で用いた供試体のデータ

| 材料 | 高さ (mm) | 直径 (mm) | 質量 (g) | 密度 (g/cm ³) | 含水比 (%) |
|--------|------------|------------|-----------|----------------------------|------------|
| 琉球石灰岩 | 65.1 | 37.5 | 153.8 | 2.14 | |
| 島尻層群泥岩 | 100 | 50 | 335.6 | 1.71 | 21.71 |

着し、AEを測定した。AE(Acoustic Emission)とは、材料が変形あるいは亀裂が発生する際に、材料に蓄えられていたひずみエネルギーを弾性波として放出する現象である。ここでは、ひずみとAEの関係について示す。表-1にクリープ試験で使用した供試体データを示す。

(2) ひずみとAEの関係

図-1と図-2に琉球石灰岩と島尻層群泥岩のクリープ試験の結果を示した。はじめにひずみに関して、琉球石灰岩が破断するまでのひずみは約0.13%とごく少量しか現れなかった。このことから琉球石灰岩はほとんど変形せず、突然破壊することから、脆性的な特徴を持つことが確認された。また、島尻層群泥岩の破断するまでのひずみは約1.5%あり、さらに時間経過とともに1次から3次までのクリープ過程の変化が確認された。このことから、島尻層群泥岩は琉球石灰岩に比べて延性的な特徴を持つことが確認された。

また図-3に琉球石灰岩のひずみとAEの関係について示した。ひずみに対してAEが一定に増えていかないことから、AE発生速度には増減があることが確認された。また、AEの発生挙動が、クリープの変形過程によって変化することが確認された。第1次クリープでは大量のAEが検出され、第2次クリープではAEの発生が減少し、第3次クリープでは破壊直前に大量のAEが検出された。

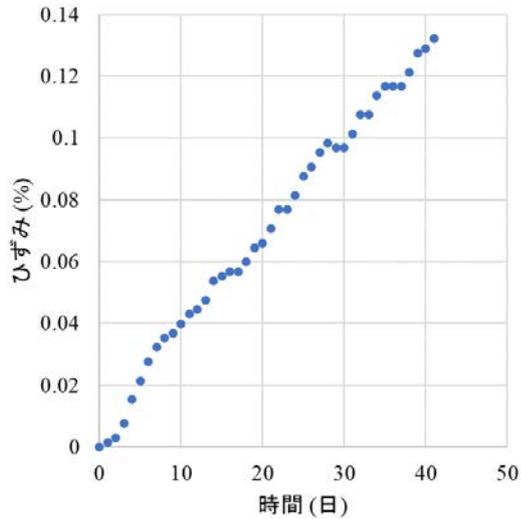


図-1 琉球石灰岩のクリープ試験結果

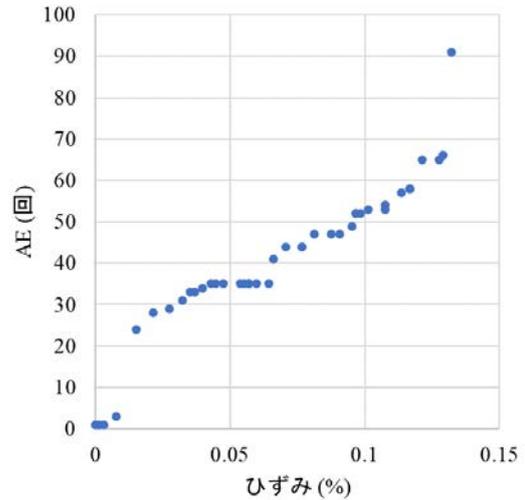


図-3 琉球石灰岩のAEとひずみの関係

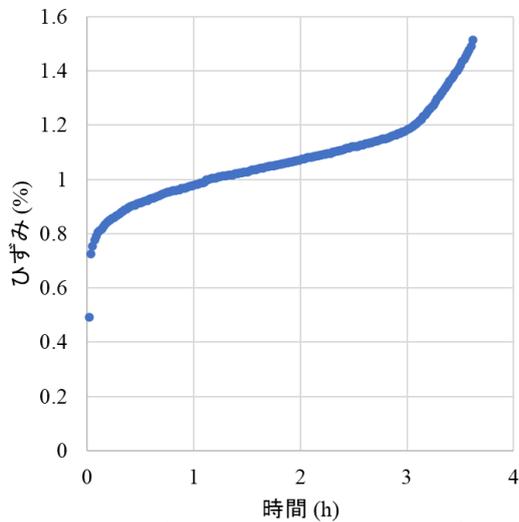


図-2 島尻層群泥岩のクリープ試験結果

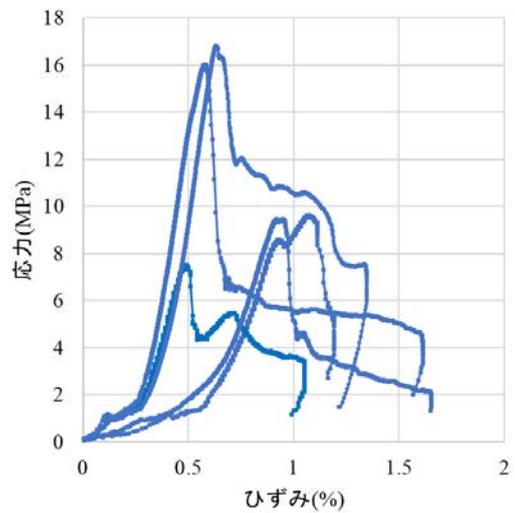


図-4 琉球石灰岩の応力とひずみの関係

(3) 一軸圧縮強度

琉球石灰岩及び島尻層群泥岩の直径50mm、高さ100mmの円柱供試体を用いて、一軸圧縮試験を行った。図-4、図-5に一軸圧縮試験で得られた琉球石灰岩と島尻層群泥岩の応力とひずみの結果を示す。それぞれ15個の供試体から一軸圧縮強度を求め、それらの平均値を求めると琉球石灰岩は10.73MPa、島尻層群泥岩は0.54MPaであった。この結果から、琉球石灰岩は島尻層群泥岩に比べて、およそ20倍の一軸圧縮強度があることが確認できた。

3. 押し抜き試験

(1) 実験概要

ロックボルト押し抜き試験における供試体は岩石（琉球石灰岩、大理石）、鉄筋（丸棒、異形鉄筋）及びモルタルにより構成されている（図-6、図-7）。供試体の作製手順は琉球石灰岩中央部の削孔に鉄筋を挿入後、空隙

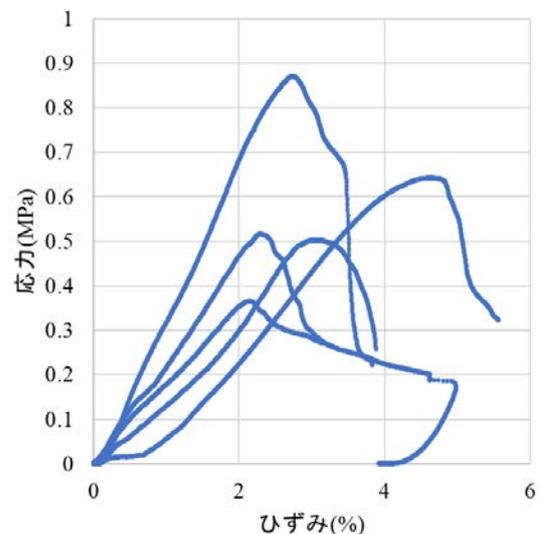


図-5 島尻層群泥岩の応力とひずみの関係

ができないように、鉄筋の周りをモルタルで充填し作製した。また、削孔後あらかじめ底面に厚さ 10mm の発泡スチロールを埋め、押し抜き試験の際に最大 10mm の変位ができるように鉄筋を配置した。また、図-8 に示す通り丸棒・異形鉄筋には中央部にひずみゲージを貼り付け、さらに载荷付近にもひずみゲージを貼り付けた。中央部から得られたひずみを下部ひずみ、载荷付近から得られたひずみを上部ひずみとする。



図-6 ロックボルト押し抜き試験供試体

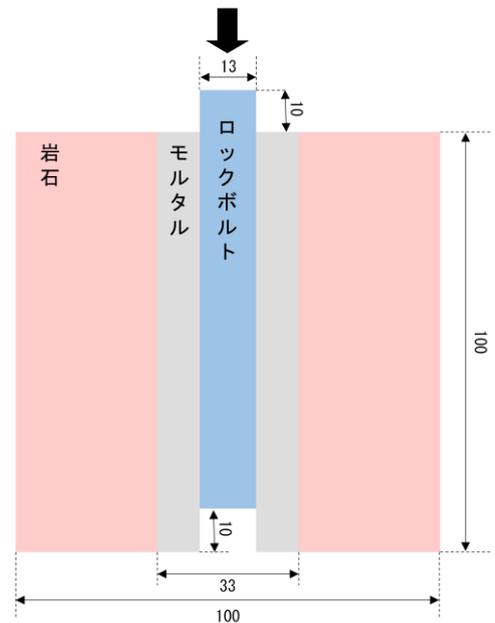


図-7 ロックボルト押し抜き試験供試体の断面図

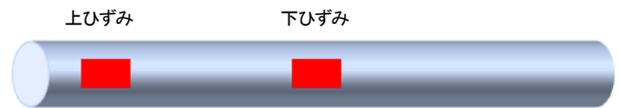


図-8 ロックボルトのひずみゲージ貼り付け位置

(2) ひずみ分布の傾向

押し抜き試験について静的条件における軸方向ひずみ及び付着応力（せん断抵抗力）の観点から実験結果をまとめ考察を述べる。

図-9、図-10 に丸棒・異形鉄筋の押し抜き試験の静的条件におけるひずみ-時間歴応答を示す。丸棒・異形鉄筋ともに上部ひずみに比べて下部ひずみの値が小さくなること確認された。このことから、ロックボルトの軸応力はせん断抵抗力により、下部に近づくにつれて小さくなると思われる。

また、丸棒に比べて異形鉄筋はロックボルトが押し抜かれるまでに長時間かかり、ひずみは大きい値を得た。これは異形鉄筋の表面の凹凸により、モルタルとのせん断抵抗力が大きくなったことが考えられる。

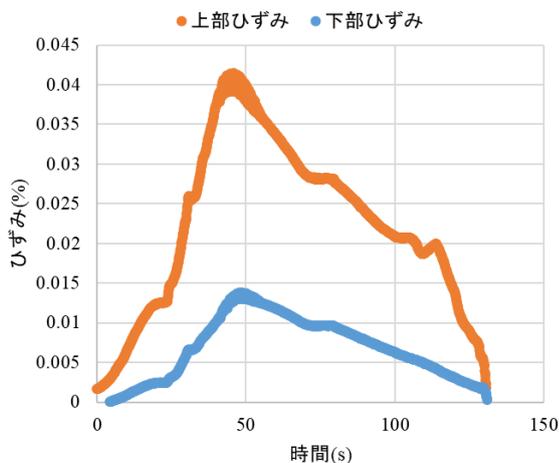


図-9 丸棒の上部ひずみ・下部ひずみの関係

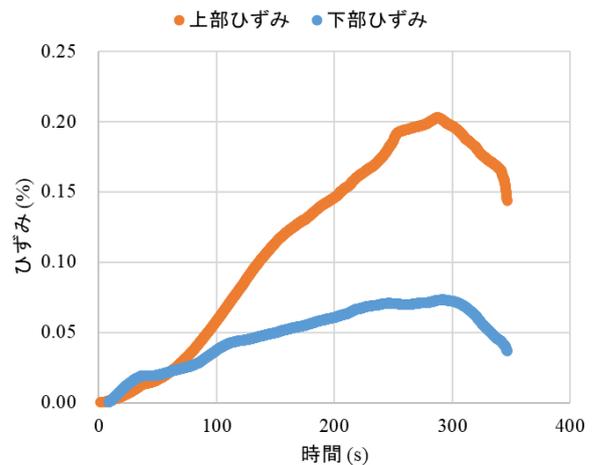


図-10 異形鉄筋の上部ひずみ・下部ひずみの関係

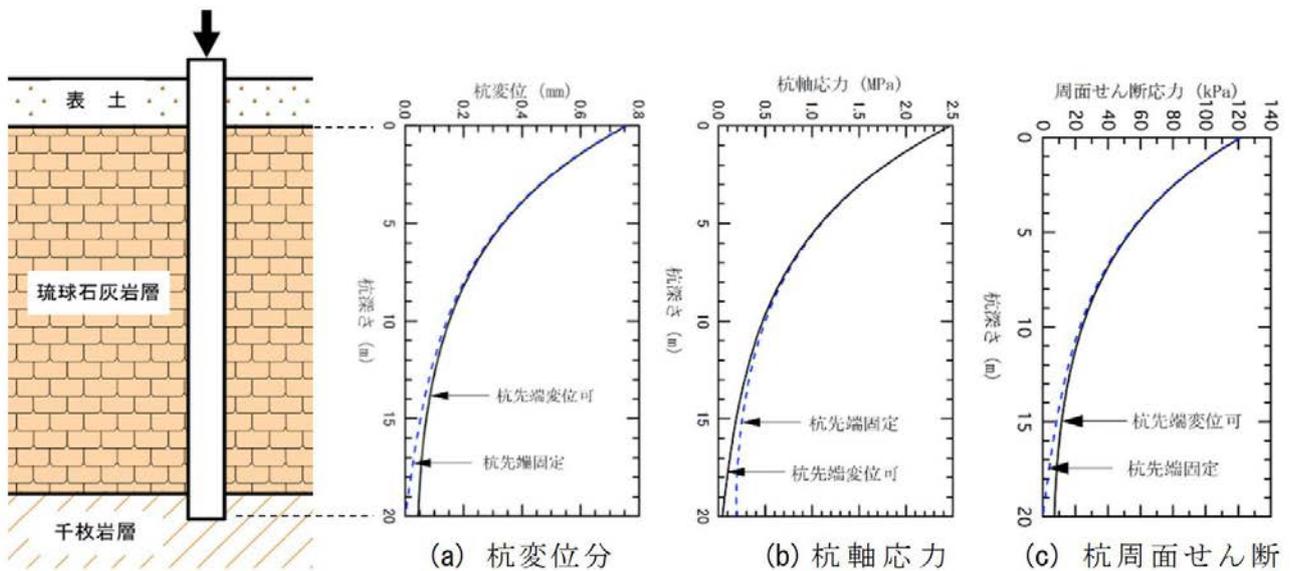


図-11 琉球石灰岩層に施工された杭基礎の変位分布，軸応力分布，周面せん断応力分布

(3) 押し抜き試験の FEM 解析

藍檀らは橋梁基礎として部分的に琉球石灰岩層を杭基礎として採用した事例において数値シミュレーションを行った³⁾。図-11 に示すように、琉球石灰岩層の下部に千枚岩層が堆積した岩盤に、直径 1m、杭長 20m の鉄筋コンクリート杭を設置した。表-2 に岩盤と杭の物性値を示す。図-11 に(a)杭変位分布、(b)杭軸応力分布(c)杭周面せん断応力分布を示す。解析結果は、杭の変位、軸応力、周面せん断応力ともに、杭上部から下部にかけて変位、応力が減少している。この解析結果から、琉球石灰岩層での支持力分担が有効に作用していることを示している。

次に、押し抜き試験の FEM 解析を図-12 の軸対象モデルを用いて解析を行った。押し抜き試験の結果より、上部ひずみの値が下部ひずみより大きい値が得られた。これを考慮して、ロックボルト上部の軸応力がモルタルと琉球石灰岩に伝わるように、下部にせん断層を設けた(モデルの赤い部分)。表-3 に軸対象モデルで使用した材料特性を示す。本解析では、モデルの高さにおける、変位、軸応力、せん断抵抗力について試験結果、また数値シミュレーションから求められた解析結果と比較検討する。

図-13、図-14 に変位分布と軸応力分布の解析結果を示す。解析結果は変位分布、軸応力分布ともにロックボルト上部から下部に行くにつれて減少している。

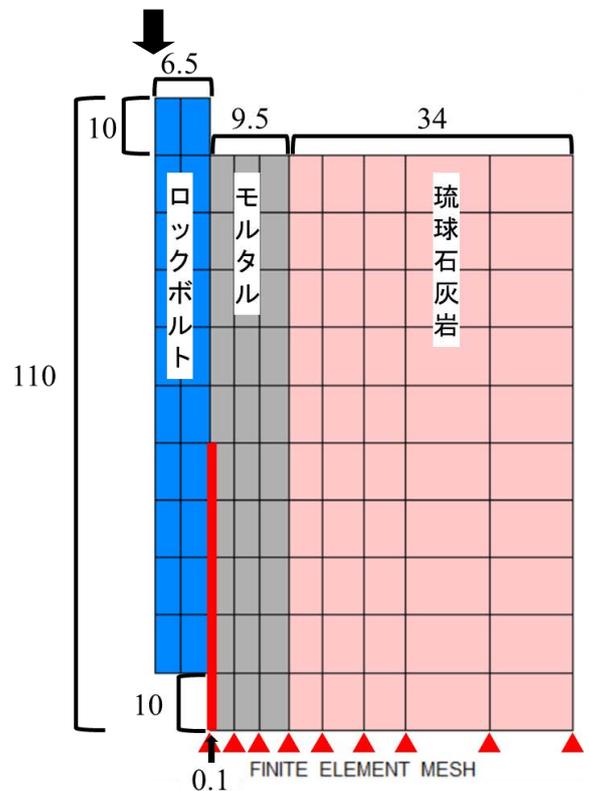


図-12 押し抜き試験の軸対象モデル

表-3 押し抜き試験の軸対象モデルの材料特性

| 材料特性 | ポアソン比 | 弾性係数 (kN/mm ²) |
|----------------------|-------|----------------------------|
| 琉球石灰岩 | 0.25 | 0.72 |
| モルタル ⁴⁾ | 0.2 | 18 |
| ロックボルト ⁵⁾ | 0.3 | 200 |
| せん断層 | 0.3 | 0.0007 |

表-2 琉球石灰岩層に施工された杭基礎の物性値

| 琉球石灰岩物性値 | | コンクリート杭物性値 | | | |
|------------|-------|------------|--------|--------|----------|
| 弾性係数 (MPa) | ポアソン比 | 弾性係数 (GPa) | 半径 (m) | 長さ (m) | 応力 (MPa) |
| 720 | 0.25 | 20 | 0.5 | 20 | 2.476 |

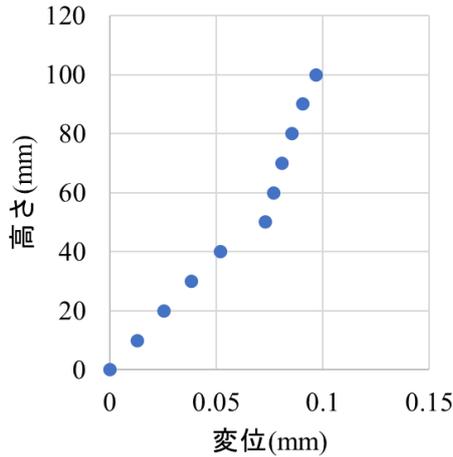


図-13 変位分布

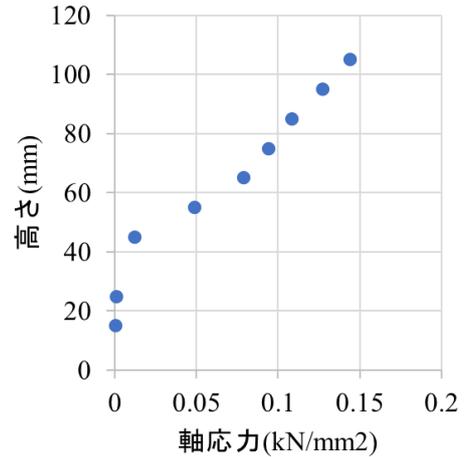


図-14 軸応力分布

図-15 に周面せん断応力分布の解析結果を示す。解析結果はモルタル上部からせん断層に向けて周面せん断応力は減少したのちに増加した。その後せん断層がある部分では周面せん断応力の変化はあまり見られなかった。この結果は藍檀らが行った、数値シミュレーションの結果と異なる。この原因として境界条件の違いが考えられる。押し抜き試験の場合、モデル底辺の Y 軸を固定しているが、数値シミュレーションのモデルは琉球石灰岩層と島尻層群泥岩の間の Y 軸は固定されていない。これにより押し抜き試験の周面せん断応力は増加したと考えられる。

上記を考慮して新たに図-11 のモデルを参考にし、押し抜き試験のモデルの下部に島尻層群泥岩層が堆積した場合の軸対象モデルとして図-16 のモデルを作成した。境界条件は藍檀らが行った解析モデルを参考にした。表-4 にモデルで使用したそれぞれの材料特性を示す。図-17 にモルタル変位分布、ロックボルト軸応力分布、ロックボルト周面せん断応力分布を示す。結果はどの分布も藍檀らが行った解析と同様に、ロックボルト上部から下部に行くにつれて、値が減少していく傾向を示した。この解析結果から、琉球石灰岩層での支持力分担が有効に作用していることを示している。

表-4 杭基礎の軸対象モデルの材料特性

| 材料特性 | ポアソン比 | 弾性係数 (kN/mm ²) |
|----------------------|-------|----------------------------|
| 琉球石灰岩 | 0.25 | 0.72 |
| モルタル | 0.2 | 18 |
| ロックボルト | 0.3 | 200 |
| 島尻層群泥岩 ⁶⁾ | 0.3 | 0.015 |

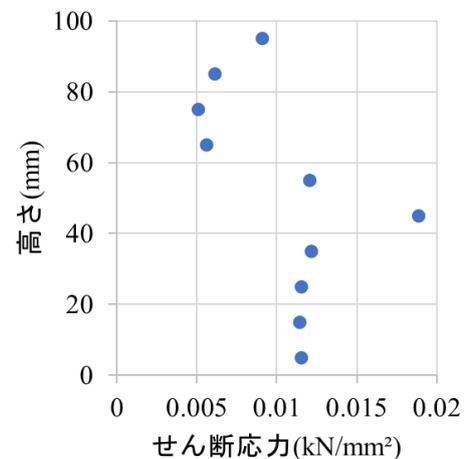


図-15 周面せん断応力分布

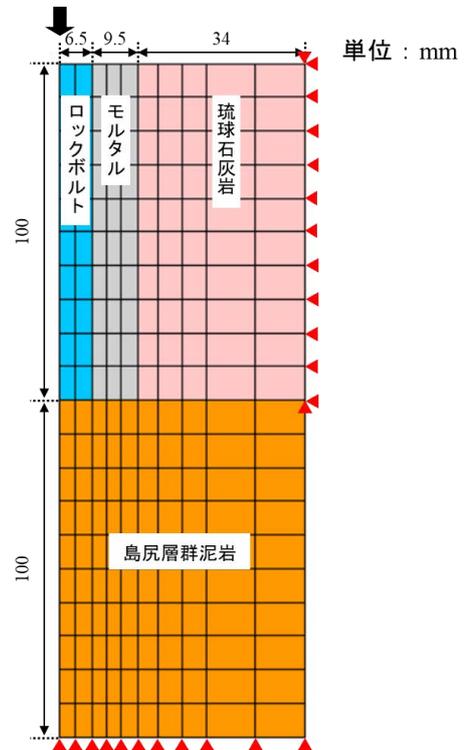


図-16 杭基礎の軸対象モデル

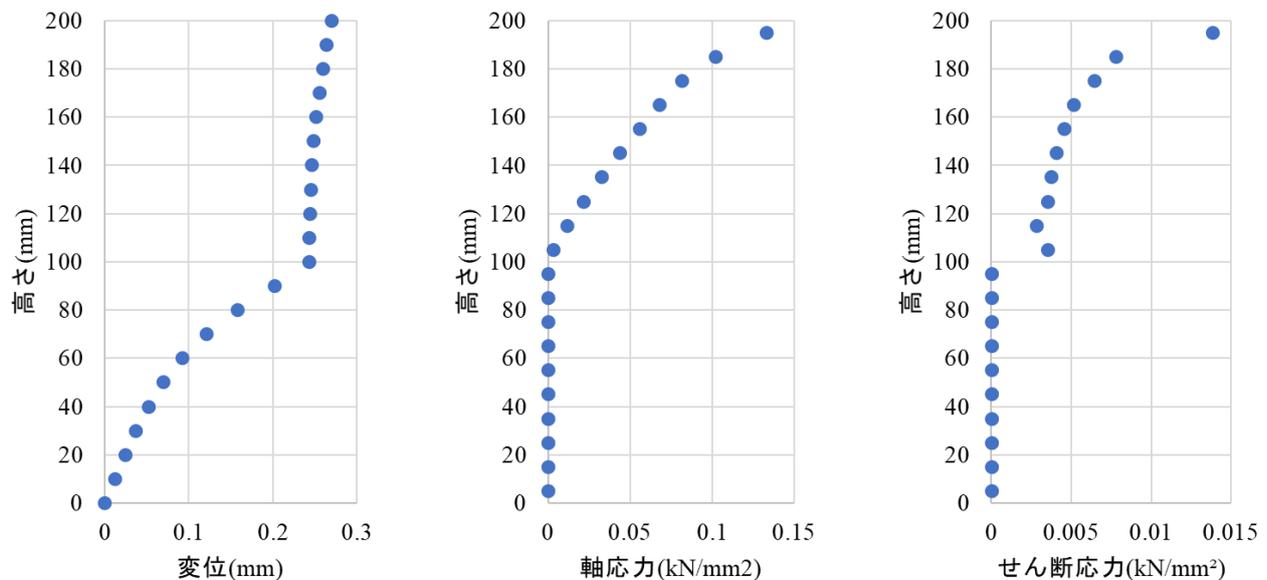


図-17 変位分布，軸応力分布，周面せん断応力分布

4. まとめ

琉球石灰岩層を支持層とするために，クリープ試験，一軸圧縮試験，押し抜き試験及び FEM 解析を実施した。その結果以下のことがわかった。

- ①クリープ試験の結果，琉球石灰岩は島尻層群泥岩に比べて，ひずみは小さい値をとった。このことから脆性的な特徴を持つことが確認された。
- ②AE の発生挙動はクリープの変形過程によって変化することが確認された。
- ③一軸圧縮試験の結果，琉球石灰岩の一軸圧縮強度は島尻層群泥岩に比べておよそ 20 倍であることが確認された。
- ④押し抜き試験の結果，上部ひずみに比べて下部ひずみが小さくなることが分かった。このことから，ロックボルトの軸応力はせん断抵抗力により，ロックボルト上部から下部に近づくにつれて小さくなると思われる。
- ⑤FEM 解析の結果境界条件によってせん断抵抗力が変わってくるということが分かった。

これらの結果から，琉球諸島では構造物の基礎には泥岩層が使用されてきたが，クリープが大きいなどの問題があり，実際はせん断抵抗力，軸応力などから，琉球石灰岩層が構造物を支えていることが分かる。今後は，琉球石灰岩層内の空隙探査の方法や空洞の存在が構造物基礎に及ぼす影響などを検討していきたい。

参考文献

- 1) 具志良太：琉球石灰岩を支持層とする港湾構造物基礎の設計・施工技术について，那覇港湾・空港整備事務所(〒901-0001 那覇市港町 2-6-11)
- 2) 羽柴公博，松井裕哉，瀬野康弘，佐藤稔紀：2 種類の堆積岩の多段階クリープ試験による長期クリープ挙動の予測，第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文，pp.329-334，2007
- 3) 藍檀オメル，伊東孝，渡嘉敷直彦，首里勇治：大型構造物基礎としての琉球石灰岩層の力学的安定性と杭基礎の支持力特性の評価，第 29 回沖縄地盤工学研究発表会梗概集，pp.46-54，2020
- 4) 玉井宏樹，片岡宗太，園田佳巨，関野 勇：更生工法により補修されたマンホールの耐震性能に関する解析的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1585-1590，2006
- 5) 村上晴茂，金子哲郎，荒木繁幸，木村裕之，鏡原聖史：自然斜面における耐震治山工法の開発について，第 15 回中部地盤工学シンポジウム，No.2，pp.25-30，2003
- 6) 渡嘉敷直彦，上原方成，市川康明，川本眺万：空洞掘削による琉球石灰岩層の安定解析について，第 20 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.304-308，1998