

琉球石灰岩層を支持層とする杭基礎の 支持力特性評価

藍檀 オメル^{1*}・伊東 孝¹・渡嘉敷 直彦²・首里 勇治³，長堂 優人³

¹琉球大学工学部 社会基盤デザインコース（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1）

²地殻工学防災研究所 琉球大学島嶼防災研究センター内（〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原 1）

³（株）朝日建設コンサルタント（〒901-2133 沖縄県浦添市城間 3 丁目 9-1）

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

琉球石灰岩層と下部の島尻泥岩層からなる地盤において、琉球石灰岩層を杭基礎の支持層とすることが避けられてきた。琉球石灰岩層が厚い場合には、基礎工の工費や工期の面で問題があり、琉球石灰岩層を支持層とする合理的な設計、施工法を確立することが求められている。本研究は、琉球石灰岩層を杭の支持層として採用するための基本的な検討を行い、室内試験による琉球石灰岩の物性値、琉球石灰岩と杭のせん断特性を把握するとともに、杭基礎モデルによる解析的検討、杭の原位置載荷試験計測データと数値解析結果の比較検討、および光弾性モデル実験を行って杭直下の空洞の有無による杭基礎の応力場について検討した。これらの検討から、琉球石灰岩層が杭の支持層として有効であることが明らかになった。

Key Words : pile foundation, Ryukyu limestone formation, shear behaviour of the interface, cavity

1. はじめに

琉球層群と下部の島尻層群からなる地盤に杭基礎を設置する際、石灰岩層の状態に関わらず、杭が石灰岩層を貫いて、下部の島尻層を支持層とする先端支持杭の採用が一般的であった。石灰岩層を杭の支持層として採用しない理由は、複雑な過程を経て形成された石灰岩層の空洞・空隙の有無や、岩盤としての物性値や杭基礎の支持力特性を十分に把握することができず、設計上のリスクを回避していることにある。最近、橋梁基礎として、部分的に琉球石灰岩層を杭基礎にする事例¹⁾も見受けられるが、構造物の基礎を琉球石灰岩層で支持する合理的な設計・施工法を確立することができれば、基礎工の工費減や工期の短縮が可能となる。

本研究は、琉球石灰岩層を杭基礎の支持層として採用するための基礎的な検討を行うものであり、杭基礎材料の室内試験、光弾性モデルによる光弾性試験、杭基礎モデルの解析を行って、琉球石灰岩層の物理・力学特性の評価、杭のせん断特性（周面摩擦特性）、先端支持力の評価、および空洞の有無の確認と支持力に与える影響について検討する（図-1）。また、既設の橋梁基礎工事で実施された杭の支持力載荷試験結果と本研究による支持力評価の比較検討を通して、琉球石灰岩層を支持層とする杭基礎支持力評価手法の妥当性を検証する。

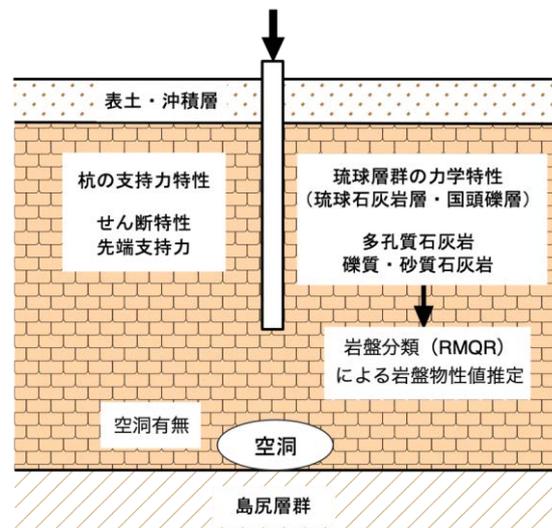


図-1 琉球石灰岩層を支持層とする杭基礎の基礎的検討事項

2. 琉球石灰岩、島尻層群の物理・力学特性と岩盤物性値の評価

(1) 琉球石灰岩と島尻層群の物理・力学特性

杭基礎の支持層となる琉球石灰岩および下層の島尻層群（泥岩、砂岩、凝灰岩）の力学的特性に関する実験

表-1 琉球層群琉球石灰岩の力学特性

Type	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	σ_{ii} (MPa)	C (MPa)	ϕ_i
サンゴ質	19.6-23.4	20 - 34	2.5 - 4.1	3.6 - 5.2	50 - 56
砂質	8.0 - 18.2	0.7 - 2.2	0.14 - 0.25	0.2 - 0.5	37 - 44

表-2 島尻層群砂岩、泥岩の力学特性

Type	γ (kN/m ³)	σ_c (MPa)	C (MPa)	ϕ_i
砂岩	17.6 - 22.6	0.34	0.1	34 - 38
泥岩	14.7 - 18.5	1.2 - 3.6	0.4 - 1.1	24 - 28

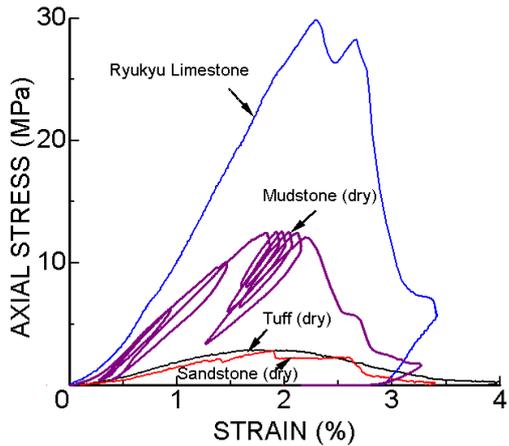


図-2 琉球石灰岩・島尻層群岩石の圧縮応力・ひずみ関係

は、多くの報告^{2),3)}がある。これらの力学的特性を表-1 および表-2に示す。琉球石灰岩および下層の島尻層群（泥岩、砂岩、凝灰岩）の乾燥状態の圧縮応力・ひずみ関係を図-2に示す。琉球石灰岩の圧縮強度に比べ、乾燥状態の島尻層泥岩の圧縮強度は約 1/3 で、自然含水比における圧縮強度は、3 - 5 MPa 程度であり、琉球石灰岩の圧縮強度の 1/6 - 1/7 程度である。また、島尻層砂岩の圧縮強度は、琉球石灰岩の圧縮強度の 1/10 程度となる。従来、杭基礎の支持層とされている島尻層と比べて、琉球石灰岩層は、強度的に十分支持層となることを示している。

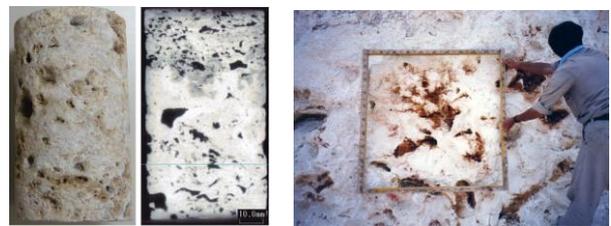
琉球石灰岩層は、一般的に多孔質性岩盤であり、母岩の供試体レベルと岩盤において空隙・空洞が存在している（図-3）。琉球石灰岩の空隙率と幾何学的形状の分布は、琉球石灰岩層の力学的特性に大きく影響する。図-4に、乾燥状態の琉球石灰岩供試体の一軸圧縮強度と空隙率の例を示す。琉球石灰岩の一軸圧縮強度と同様に、ヤング率、ポアソン比の変形・強度特性は、空隙率の増加とともに減少傾向を示す³⁾。

(2) 琉球石灰岩層の岩盤物性値の評価

著者らは、新たな岩盤分類法である岩盤クオリティ評価システム (RMQR) を提案⁴⁾し、岩盤の状態をRMQR値として点数化し、岩盤を構成する母岩の各物性値に対する岩盤の物性値の比を統一的に評価する関係式を示した。

$$a = a_0 - (a_0 - a_{100}) \frac{RMQR}{RMQR + b(100 - RMQR)} \quad (1)$$

ここで、 a_0, a_{100}, b は、表-3に示す値を用いる。対象となる岩盤の岩盤分類と母岩の物性値を求めて、表-3に示す係数とともにRMQR値を式(1)に代入することにより、



(a)母岩供試体 (b)琉球石灰岩岩盤

図-3 琉球石灰岩層の空隙性状

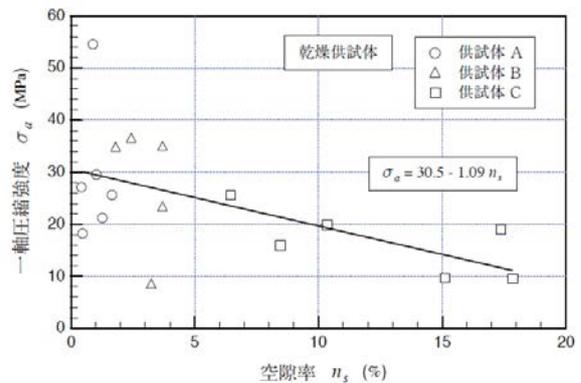


図-4 琉球石灰岩供試体の一軸圧縮強度と空隙率の関係

各種岩盤物性値を推定することができる。

杭基礎の支持層となる琉球石灰岩層は、一般に、層内に多くの空隙・空洞が存在しており、杭基礎の支持力を評価するに際し、空隙・空洞の影響を考慮に入れた岩盤物性値を評価する必要がある。多孔質岩の空隙率を考慮した引張強度の推定は、式(1)を改良した次式により求める。

$$\frac{S_m}{S_{ii}} = \frac{RMQR}{RMQR + b(100 - RMQR)} \left(1 - \frac{n}{n + a(1 - n)} \right) \quad (2)$$

ここで、 S_m :岩盤の引張強度、 n :空隙率、 b :力学的特性の実験値を近似式によって決定した実験定数である。

表-3 岩盤の各種物性値の評価式(1)における

a_0, a_{100}, b の値			
特性(a)	a_0	a_{100}	b
変形係数	0.0	1.0	6
Poisson 比	2.5	1.0	0.3
一軸圧縮強度	0.0	1.0	6
引張強度	0.0	1.0	6
粘着強度	0.0	1.0	6
摩擦角	0.3	1.0	1.0

式(2) の関係を 図-5 に示す。多孔質琉球石灰岩盤の引張強度の推定は、係数 $b=6$ の最良値を用い、該当の空隙率 n を代入することにより求められる。

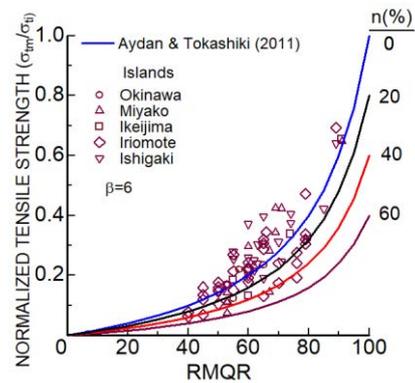


図-5 RMQR評価による多孔質琉球石灰岩層の引張強度推定

3. 琉球石灰岩と杭境界面のせん断試験

杭の支持層となる琉球石灰岩と鋼材（鋼管杭）の境界面のせん断特性を把握するため、境界面の摩擦角を求める傾斜試験と、せん断破壊に関する構成則のパラメータを求めるスティック・スリップ試験を行い、さらに、既設の振動台を利用した両振り動的せん断試験を行った。

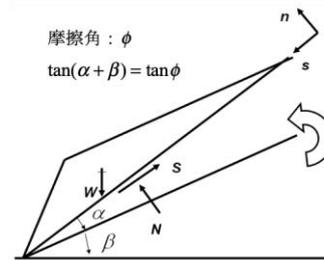


図-6 傾斜試験機による摩擦角測定

(1) 傾斜試験およびスティック・スリップ試験による境界面の摩擦角

図-6に示す傾斜試験機を用いて、境界面の静的摩擦角 f_s を求めた。鋼材表面の状態として、腐食有りと、凹凸有りの2種類の試験片を用意した。試験片が滑り出す際の静的摩擦角を表-3に示す。凹凸表面と比べて、腐食性表面を有する境界面の摩擦角が多少大きくなっている。

表-3 傾斜試験による琉球石灰岩・鉄材境界面の摩擦角

鋼材表面	摩擦角 (度)				平均値
腐食有り	19	26	23	24	23.5
凹凸有り	21	16	22	19	19.8

低垂直応力下でのせん断特性を把握するため、図-7に示すスティック・スリップ試験機を開発し、境界面のせん断試験を行った。図-8および図-9に、スティック・スリップせん断試験によって得られた腐食試験片のせん断挙動と、境界面のせん断破壊崩落線を示す。凹凸ありの摩擦角 $\phi_s = 21.49^\circ$ 、腐食有りの摩擦角 $\phi_s = 19.95^\circ$ の結果が得られ、傾斜試験によって得られた摩擦角とほぼ同様の値を示している。

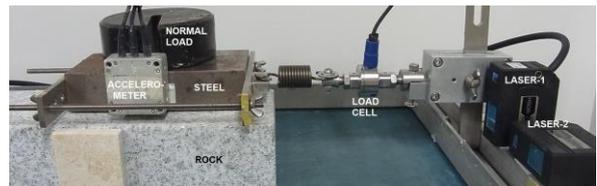


図-7 スティック・スリップせん断試験機と試験の状況

(2) 大型振動台を用いた両振りせん断試験

既設の大型振動台を利用して、境界面の両振り動的せん断試験を行った。図-10に、両振りせん断試験装置と、2009年岩手宮城内陸地震の東西(EW)成分を載荷した試験結果の例を示す。垂直荷重は、39.2N+自重であり、振動台のせん断荷重の応答が示されている。

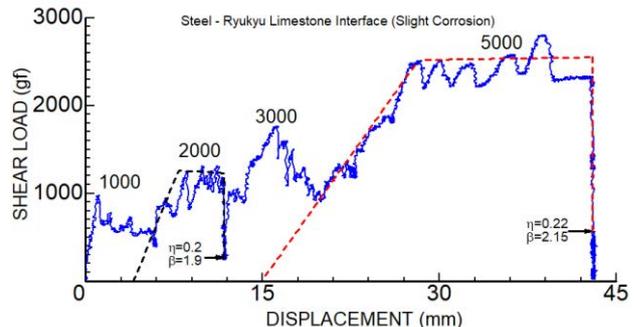


図-8 スティック・スリップせん断試験によるせん断挙動

境界面や不連続面の動的せん断挙動を検討する際の評価法の1つになると思われる。

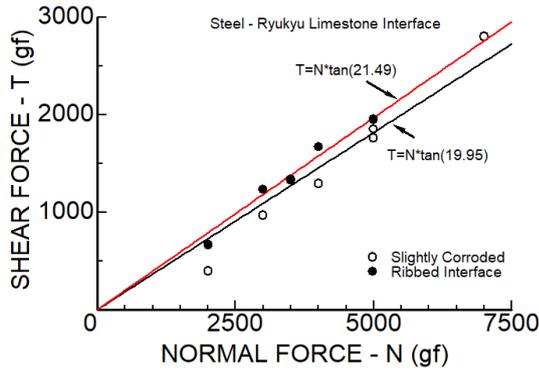


図-9 スティック・スリップせん断試験による境界面のせん断破壊崩落線

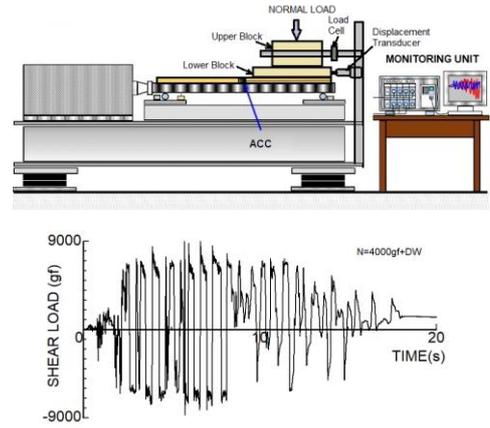


図-10 大型振動台を用いた両振りせん断試験装置と試験結果

4. 解析による杭基礎の支持力特性評価

(1) 杭基礎モデルの解析解と既設杭基礎の事例解析

岩盤を支持層とする杭基礎の変形・応力挙動に関する理論的検討は、藍檀が提案⁵⁾した杭基礎の理論解を利用する。図-11に示す杭基礎の力学モデルにおいて、杭先端の支持を考慮した境界条件下で、杭の軸変位 w_b 、軸応力 S_b 、境界面のせん断応力 t_b は、次のようになる。

a) 杭の先端が剛体支持されている場合 ($w_e = 0$)

$$w_b = \frac{S_0}{E_b a} \frac{e^{a(L-z)} - e^{-a(L-z)}}{e^{aL} + e^{-aL}} \quad (3)$$

$$S_b = S_0 \frac{e^{a(L-z)} - e^{-a(L-z)}}{e^{aL} + e^{-aL}} \quad (4)$$

$$t_b = \frac{S_0 K_r}{E_b a} \frac{e^{a(L-z)} - e^{-a(L-z)}}{e^{aL} + e^{-aL}} \quad K_r = \frac{G_r}{r_b \ln(r_0/r_b)} \quad (5)$$

b) 杭の先端の変位が弾性沈下する場合

$$w_e = \frac{(1+\eta_r)}{E_r} r_b P_e \quad (6)$$

ここで、 $a = \sqrt{2K_g/E_b r_b}$ 、 E_b, E_r, η_r は、杭および岩盤の弾性係数とポアソン比である。 P_e は、杭先端の応力であり、杭先端と地盤が連続的に変形する条件から反復解析法により求められる。

岩盤に設置した杭の支持力（軸応力）に関わる杭・岩盤の杭打設長比 (L/R) および剛性比 (E_s/E_r) の影響を図-12および図-13に示す。杭および岩盤は、弾性体と仮定し、岩盤物性値は、琉球石灰岩を対象としている。これらの物性値を図中に示す。図-12は、杭直径 $R=1\text{m}$ 、打設長 L とし、打設長比 (L/R) の変化による杭の軸応

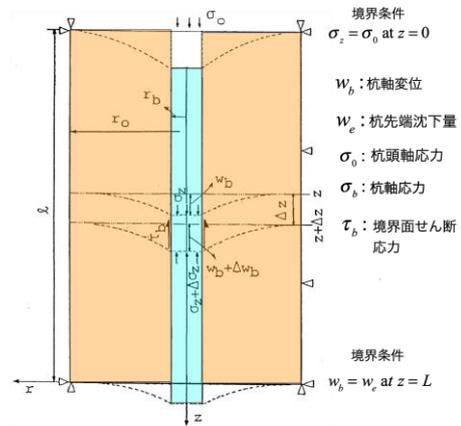


図-11 杭と基礎地盤の力学モデル

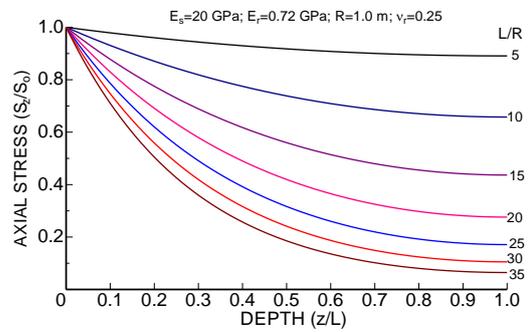


図-12 杭の軸応力分布に与える杭打設長比 (L/R) の影響

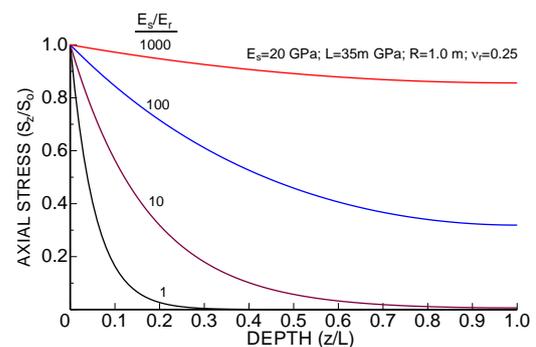


図-13 杭の軸応力分布に与える剛性比 (E_s/E_r) の影響

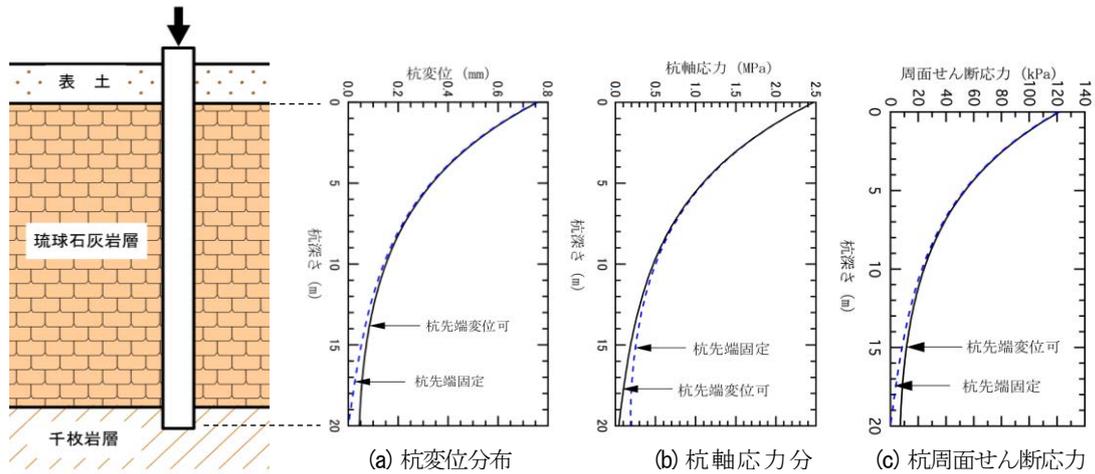


図-14 琉球石灰岩層に施工された杭基礎の変位分布，軸応力分布，周面せん断応力分布

力分布を示している。杭の岩盤への打設長が長くなるほど杭先端における軸応力が小さくなる。すなわち，杭が支える軸力の多くを打設した岩盤（琉球石灰岩層）で受けることを示している。一方，図-13は，杭長 $L=35\text{m}$ に対する杭・岩盤の剛性比 (E_s/E_r) の変化による杭の軸応力分布を示している。岩盤の剛性比が大きくなるほど，杭先端の軸応力が小さくなり，周辺岩盤のせん断による支持力が増加する。この理論解による解析例が示すように，琉球石灰岩層は，杭の支持層として支持力を十分に期待できることを示している。

つぎに，既設の杭基礎施工に適用された事例解析結果¹⁾を示す。図-14に示すように，砂質琉球石灰岩層の下部に千枚岩層が堆積し，設計では，下部の千枚岩層を支持層とする先端支持杭を採用している。杭は，直径1m，杭長20mの鉄筋コンクリート杭であり，杭と岩盤の物性値を表-4に示す。解析ケースとして，杭先端に変位がある場合と，杭先端の変位が固定された場合について解析を行った。図-14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。いずれの解析ケースにおいても，杭の変位，軸応力，周面せん断応力ともに，杭上部から先端部にかけて変位，応力が減少している。この解析例が示すように，砂質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。

(2) 既設橋梁杭基礎の原位置載荷試験の数値シミュレーション

図-11に示した杭基礎モデルについて，有限要素法による定式化を行い，杭の原位置載荷試験の数値シミュレーションを行った。図-15に，原位置載荷試験の状況を示す。原位置載荷試験に関する各種計測データおよび解析に用いた物性値の提示は省略する。解析より得られた載荷荷重と杭頭軸変位について，載荷試験結果と比較した(図-16)。載荷荷重8000kN (800tonf) までは，計

表-4 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			
E_r (MPa)	η_r	E_s (GPa)	r_s (m)	L (m)	S_0 (MPa)
720	0.25	20	0.5	20	2.476



図-15 琉球石灰岩層に施工された杭基礎の原位置載荷試験

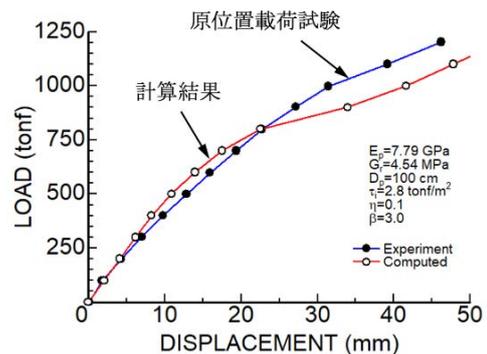


図-16 琉球石灰岩層に施工された杭基礎の原位置載荷試験による杭頭軸変位のシミュレーション結果

測結果と解析結果は類似しているが，これより高い載荷重に対する計算結果に多少差異が見られる。これは，現場における物性値にばらつきが有り，算出された物性値を用いたことによる。

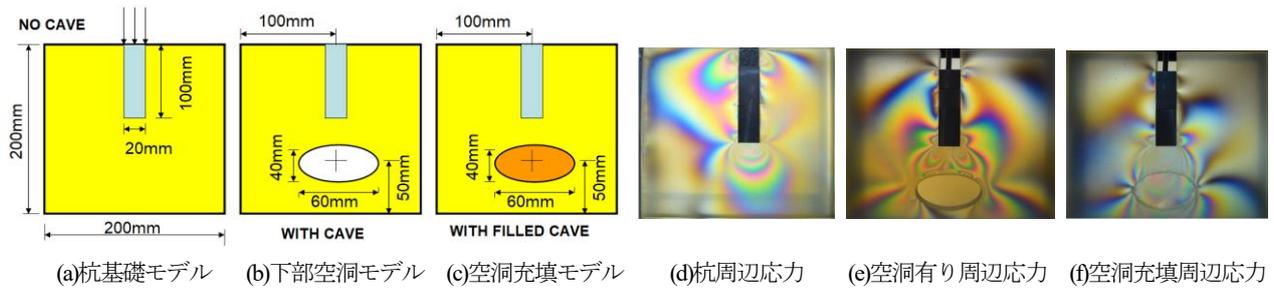


図-17 杭基礎の光弾性実験模型と載荷試験による周辺地盤の応力分布

5. 光弾性試験による杭下部の空洞の有無による応力場の検討

杭基礎下部の空洞の有無による周辺地盤の応力分布を検討するため、図-17に示すポリウレタン材を用いた杭基礎の光弾性模型を作製し、光弾性測定システムを用いて載荷実験を行った。図-17(a)-(c)に杭基礎の光弾性モデルを示す。各モデルの載荷試験結果を図-17(d)-(f)に示す。空洞の無い杭基礎モデルは、杭側方と下部の地盤に応力分布が見られ、空洞を有するモデルでは、空洞天端と周辺部にも応力の集中が認められる。空洞充填の場合、杭先端下部の地盤の応力集中がかなり改善され、充填の効果が確認できる。

6. 結論

本研究は、琉球石灰岩層を杭基礎の支持層として採用するための基礎的な検討を行い、琉球石灰岩の物性値評価、琉球石灰岩層と杭境界面のせん断特性、杭モデルによる解析的検討、原位置載荷試験計測データと数値解析結果に比較検討、および杭直下の空洞の有無による杭

基礎の応力場について、杭の支持特性を把握した。これらの検討から、琉球石灰岩層が杭基礎の支持層として有効であることが明らかになった。

謝辞：本研究は、平成30年度、（一社）沖縄しまたて協会の技術開発支援を受けて実施した。ここに、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 沖縄県土木建築部北部土木事務所，古宇利大橋載荷試験結果，1999.
- 2) Tokashiki, N. and Aydan, Ö., Characteristics of Ryukyu Limestone and its utilization as a building stone in historical and modern structures, *International Symposium on Industrial Minerals and Building Stones*, Istanbul, pp. 311-318, 2003.
- 3) Tokashiki, N. and Aydan, Ö.: The stability assessment of overhanging ryukyu limestone cliffs with an emphasis on the evaluation of tensile strength of rock mass, *土木学会論文集 C 部門*, Vol.66, No.2, pp.397-406, 2010.
- 4) 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）と琉球諸島への適用，*土木学会，第44回岩盤力学に関するシンポジウム講演集*，講演番号 43, pp.240-245, 2016.
- 5) Aydan, Ö.: The stabilisation of rock engineering structures by rockbolts, *Doctorate Thesis, Nagoya University*, 1989.

THE EVALUATION OF BEARING CAPACITY OF PILES EMBEDDED IN RYUKYU LIMESTONE FORMATION

ÖMER AYDAN, TAKASHI ITO, NAOHIKO TOKASHIKI, UJI SHURI and MASATO NAGADOU

When Ryukyu limestone formation overlays the Shimajiri formation, the common practice of pile design was to disregard Ryukyu limestone formation due to the possibility of caves and utilize Shimajiri formation. When Ryukyu limestone formation is quite thick, the design of piles result in non-economical construction.

In this study, a fundamental study is carried out how to utilize Ryukyu limestone formation as foundation rock for piles. The study involves the evaluation of properties of Ryukyu limestone, interface shear strength between pile and Ryukyu limestone, physical and numerical model studies of piles and the back-analyses of the bearing capacity of in-site piles. The authors reports the outcome of this integrated study.