

## Ⅱ-4 水環境・地下空洞にかかる調査検討

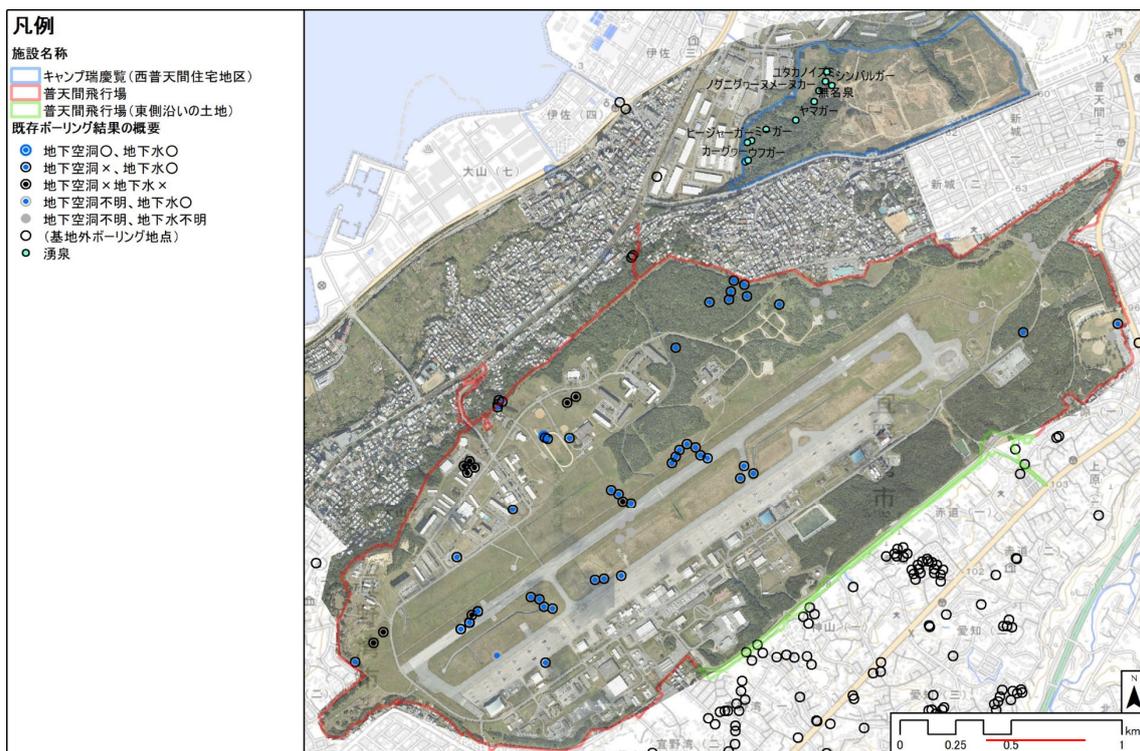
### 1. 琉球石灰岩の取扱いに係る情報収集

行程計画の「琉球石灰岩の取扱いに係る情報収集」の一部として、令和5年度は「文献資料・先行事例の調査及び情報収集」「琉球石灰岩の技術的対応策に係るヒアリング」の一部を実施した。

#### (1) 文献資料・先行事例の調査及び情報収集

##### 1) 普天間飛行場内の地下空洞ならびに地下水の確認状況

- ・『普天間飛行場地形図ビューワシステム用データ追加業務委託』データ（令和5年3月）より、柱状図（260地点分。うちJPG形式122地点、PDF形式138地点）とその位置情報を入手し整理した。
- ・全260地点のうち、普天間飛行場内のボーリング地点は77地点であった。このうち不透水層である島尻泥岩層まで掘りぬいたボーリング地点は58地点であり、うち48地点で孔内水位が観測され、さらにそのうちの1地点（画像番号「69」）では高さ75cmの地下空洞が確認されている。なお、孔底が島尻泥岩層に達していないものの孔内水位が観測された地点も1地点（画像番号「防-72」）存在する。



図Ⅱ-4-1 既存ボーリング調査時における普天間飛行場内の地下空洞及び地下水の確認状況

参考：『普天間飛行場地形図ビューワシステム用データ追加業務委託』データ  
(令和5年3月)

第Ⅱ章：「目標を定め重点的に取り組む項目」の計画検討の深化

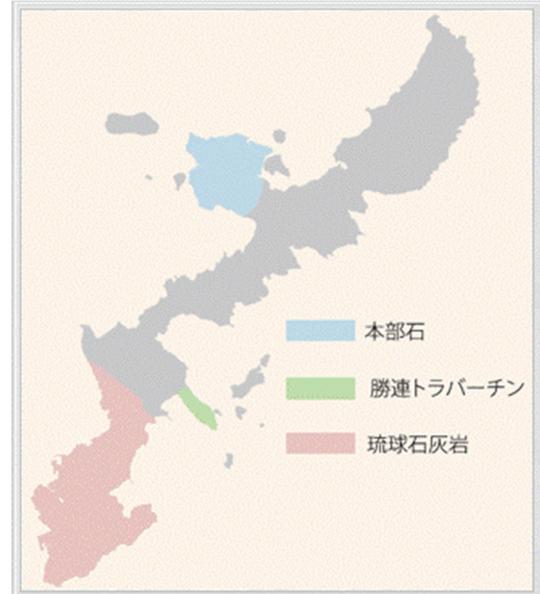
表Ⅱ-4-1 普天間飛行場内における柱状図を確認できる既存ボーリング調査地点の概要

画像番号	同一場所	島尻泥岩	地下空洞	天井標高	床標高	空洞高	水位標高
沖-1			無し				10.74
沖-2			無し				13.43
沖-3			無し				15.59
沖・建-2			無し				34.02
沖・建-3			無し				25.83
沖・建-4			無し				25.28
沖・建-5			無し				16.39
沖・建-6			無し				13.85
沖・建-7			無し				17.54
沖・建-8			無し				58.41
沖・建-9			無し				62.03
防-2			無し				39.07
防-3			無し				36.71
防-4			無し				29.03
防-21			無し				41.6
防-22			無し				47.8
防-23			無し				44.23
防-24			無し				44.38
防-43	119		無し				37.43
防-44	120		無し				未確認
防-45			無し				35.39
防-46	122		無し				37.17
防-56			無し				32.35
防-57			無し				36.02
防-58			無し				37.48
防-59	宜-13		無し				31.72
防-60			無し				32.15
防-61			無し				36.68
防-62			無し				36.58
防-63			無し				31.32
防-64			無し				33.11
防-65			無し				未確認
防-66			無し				36.14
防-67			無し				45.29
防-68		未達	不明				不明
防-69		未達	不明				不明
防-70		未達	不明				不明
防-71		未達	不明				不明
防-72		未達	不明				43.87
宜-1		未達	不明				不明
宜-2		未達	不明				不明
宜-3		未達	不明				不明
宜-4		未達	不明				不明
宜-5		未達	不明				不明
宜-6		未達	不明				不明
宜-7		未達	不明				不明
宜-8		未達	不明				不明
宜-9		未達	不明				不明
宜-10		未達	不明				不明
宜-11			無し				未確認
宜-12			無し				未確認
宜-13	防-59		無し				31.72
宜-67	宜-85	未達	不明				不明
宜-85	宜-67	未達	不明				不明
宜-86			無し				45.07
宜-87			無し				43.16
宜-89			無し				未確認
宜-90			無し				未確認
宜-91			無し				未確認
宜-92			無し				未確認
3			無し				46.38
4			無し				44.36
5			無し				未確認
6			無し				未確認
69			有り	17.36	16.61	0.75	16.36
70			無し				16.451
71			無し				16.246
75			無し				98.75
77		未達	不明				不明
78		未達	不明				不明
113			無し				14.28
114			無し				12.37
115			無し				15.44
119	防-43		無し				37.43
120	防-44		無し				36.61
121			無し				35.39
122	防-46		無し				37.17

## 2) 県内の琉球石灰岩層に伴う公共事業・調査事例

### ①琉球石灰岩層に係る事例調査

- ・県内地層は、南西諸島中部から南部にかけて広く分布し、多くの気孔を含んでおり、大量の地下水を浸透させる性質がある。
- ・沖縄に広く分布する琉球石灰岩層は、強度のばらつきが非常に大きく、また空洞が存在することから工学的な取り扱いが難しく、橋脚基礎等の構造物を構築する際には、琉球石灰岩層よりさらに深層に位置する島尻層群泥岩層を支持層とすることが一般的であるが、琉球石灰岩層を支持層とすることができれば、コスト縮減に大きく寄与するため、琉球石灰岩層を支持層とする可能性について検討を行う必要がある。
- ・琉球石灰岩層を支持層とする公共事業としては、古宇利大橋や若狭高架橋の事例がある。



引用：沖縄県都市計画・モノレール課

表Ⅱ-4-2 琉球石灰岩層に係る公共事業及び文献

琉球石灰岩層に伴う公共事業・調査事例		発注者	関連業者・研究者
古宇利大橋	基盤岩である本部層が 90～120m と深いことから通常、支持層として採用しない「琉球石灰岩層」を支持層とする必要があり、鋼管杭打撃工法の独自の施工管理手法を確立した。	沖縄県	(設計業者) 千代田コンサルタント、大東エンジニアリングJV (施工業者) ピー・エス、オリエンタル、武国JV/オリエンタル、ピー・エス、北部JV/富士ピーエス、安部、平安名JV/大成、住友、武国JV/安部、富士ピー・エス、国場JV/住友、富士ピー・エス、武国JV
若狭高架橋	那覇西道路若狭高架橋の琉球石灰岩層を打抜いて島尻泥岩層に根入れした鋼管矢板基礎の施工を実施。	内閣府沖縄総合事務局	(設計業者) (株)総合技術コンサルタント (施工業者) 不明
特殊土と基礎工 琉球石灰岩における調査事例と設計・施工への反映(論文)	沖縄地方の琉球石灰岩層の支持力の検討を目的とし、平成 23 年那覇港内で行われた地質調査と杭の衝撃載荷試験、およびその結果を基にした設計・施工への適用を紹介。	—	小海尚文(基礎地盤コンサルタント)、與那嶺和史(内閣府 沖縄総合事務局)、池内章雄(沿岸技術研究セ)

②公共事業・調査事例の概要

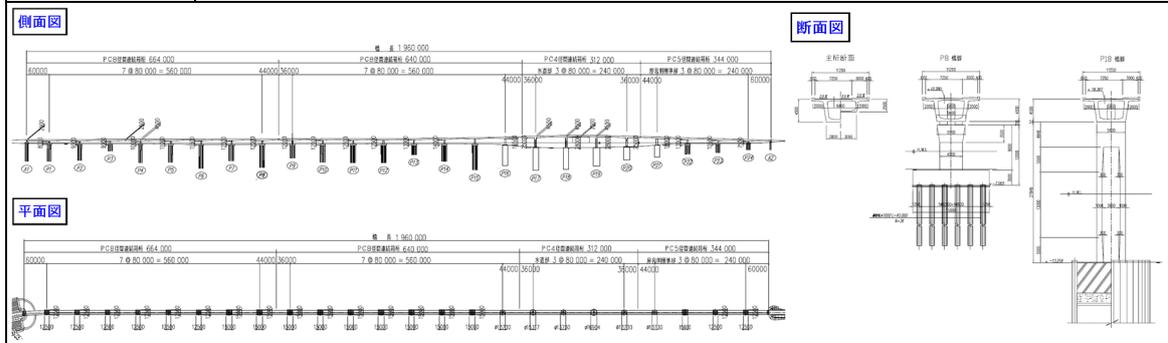
ア)公共事業：古宇利大橋

《事業概要》

路線	一般県道古宇利屋我地線
規格	第3種3級
架橋位置	起点側：今帰仁村古宇利（古宇利島）
	起点側：名護市済井出（屋我地島）
事業費	約270億円



橋種	PC8径間連続箱桁橋、 PC4径間連続ラーメン箱桁橋	橋格	1等級
		橋長	1,960m
有効幅員	車道7.250+歩道3.0 (m)	設計速度	40km/h
支間割	60.0+7@80.0+44.0+36.0+7@80.0+44.0+36.0+3@80.0+44.0+36.0+3@80.0+60.0 (m)		
平面線形	A=160m~R=∞	架設工法	大型架設桁による バランスドカンチレバー 工法
クリアランス	W=45.0m H=14.8m (50t漁船対象)		
設計荷重	B活荷重	塩害区分	A-(I)
上部工形式	航路部：PC4径間連続ラーメン箱桁 標準部：PC8径間連続箱桁2連 PC5径間連続箱桁	下部工形式	逆T式橋台 (A1、A2) 航路部：ラーメン橋脚4基 標準部：壁式橋脚20基
	基礎工形式		航路部：鋼管矢板井筒基礎φ1000 標準部：鋼管杭基礎φ1000、鋼管/場所打ちコンクリート複合杭基礎φ1000



《対処法・特色》

○琉球石灰岩層を支持層とする基礎工法

基盤岩である本部層が90~120mと深いことから通常、支持層として採用しない「琉球石灰岩層」を支持層とする必要があり、鋼管杭打撃工法の独自の施工管理手法を確立。具体的には、杭周グラウトを行うことで、周面摩擦力度の変更・増加を図った。

○橋梁の高耐久化と新技術の採用

維持管理費の低減と長寿命化を図るため、50年耐用が標準である時代に「100年耐用」の塩害対策等を講じ高耐久化を図るとともに、上部工の内・外ケーブル併用方式の採用、エポキシ樹脂塗装PC鋼材やポリエチレンシースの採用など、新技術を積極的に活用。

○コスト縮減

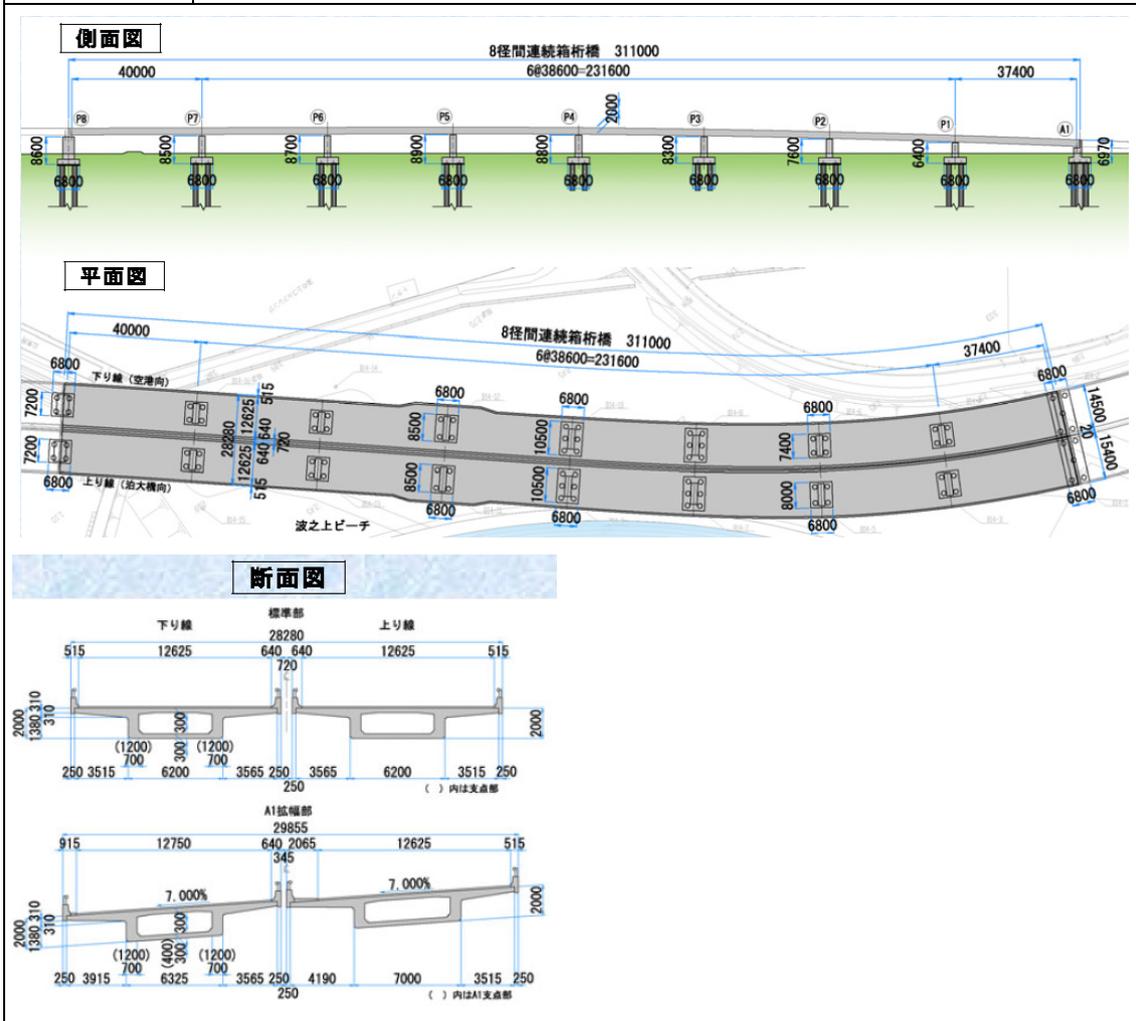
事業費の削減を図るため、上部工橋種の見直し、琉球石灰岩層を支持層とする基礎工法の採用、上部工内・外ケーブルの併用による桁製作費の低減等、コスト縮減策により約37億円のコスト縮減。

1) 公共事業：若狭高架橋

《事業概要》

路線	地域高規格道路 那覇西道路
規格	第1種3級
位置	沖縄県那覇市西地先

橋種	PC8径間連続箱桁橋	支間割	40.0+6@38.6+37.4 (m)
橋長	上り線：313.238m 下り線：308.914m	総幅員	上り線：15.205~13.780m 下り線：14.600~13.780m
設計荷重	B活荷重	架設工法	固定支保工工法
基礎形式	場所打ち杭		



《対処法・特色》

- ・ 琉球石灰岩層の対処方法としては、杭周グラウトや先端閉塞工法などの支持力の増大を図るための施行手法を適用した。

ウ)論文発表：琉球石灰岩における調査事例と設計・施工への反映

《論文概要》

沖縄地方の琉球石灰岩は、構造的基礎としての観点から、①鉛直・水平方向にN値がばらつく、②団結部分層と未団結な部分が互層状に分布する多層地盤、③数多くの空隙と空洞の存在、という不確実性を有する地盤である。このような特性から、橋梁などの杭基礎は琉球石灰岩の下位に存在する比較的均質な岩盤（尻島層泥岩など）を支持層とすることが多い。以上のように、支持層として扱われることが少なかった琉球石灰岩であるが、近年では、より浅い深度に支持層を設けて事業費等の縮減を図るために、その支持力特性が明らかにされつつある。本稿は、平成23年度に那覇港内で実施された衝撃載荷試験とそれに先立つ地質調査の結果を示すとともに、それらを基にした設計・施工への適用について考察を行ったものである。

《地質調査事例についての考察》

琉球石灰岩の支持力についての検討を行うためには、N値の大きい部分と小さい部分、双方について工学的特性の評価が必要となることから、3深度（GL-26.7m、29.7m、35.45m）の高品質サンプリング試料を使用した土質試験が行われた。試料はN値が小さい深度でも、ある程度団結力のある状態となっており、粒度特性にいても深度ごとに大きな差は見受けられなかった（いずれも礫質土）。

《衝撃載荷試験による支持力の評価についての考察》

次に、上記試料を使用した衝撃載荷試験の結果を示す。各深度の予備打ちおよび静的先端支持力は  $GL-26.7m < GL-35.45m < GL-29.7m$  であった。なお、この結果は杭先端より下  $1D$  ( $D$ =杭の直径) のN値に比例しており、この部分の性状が先端支持力に対して支配的と解される。

周面摩擦力度 ( $f$ ) については、道路指示書の打込み杭で示される  $f=2N$  と異なり、深い深度になり試験回数が増すほど周面摩擦力 ( $f$ ) が低下する傾向にあった ( $f=0.2\sim 1.5N$ )。このことから、琉球石灰岩は団結状で存在することから壁面が自立し、杭の周辺摩擦力が発揮されにくい可能性がある。

《設計・施工への反映についての考察》

上記の地質調査ならびに衝撃載荷試験の結果から、琉球石灰岩を支持層とする場合、次に示す課題への対応手法を検討する必要がある。

- a.設計段階：設計支持力の評価 ⇒ 周辺摩擦力と先端支持力の算出式の検討
- b.施工段階：支持力増大手法 ⇒ 周辺摩擦力・先端支持力増大手法の検討
- c.施行段階：施工の品質確保 ⇒ 空洞充填方法・杭周グラウトの方法・先端閉塞方法の検討

a.については、本稿では港湾基準の式と安福の支持力推定式を用いて推定を行っている。その計算結果と前述した試験の実測値との比較から、琉球石灰岩はN値が小さく

でもある程度団結した性状であり、杭の打込みに応じて内周面抵抗の増加が生じない（杭の先端が閉塞しない）と推察される。なお、支持力の算出式として、実測値と比較的整合性が高かったものが、解端杭を条件とした安福の式であった。

b.については、支持力評価・施工の課題としては、杭先端を閉塞させる支持力増大工法の検討が重要といえる。例として、先端中詰めコンクリートの打設が挙げられるが、琉球石灰岩内へのコンクリート流失やスライム処理の状況等により極限指示力が異なる可能性がある。

c.については、那覇港内で実績の多い先端拡大ビットを用いた拡大削孔では、周辺摩擦力度の改善は期待できない。しかし、古宇利大橋のように、杭周辺グラウトを行うことで周辺摩擦力度が改善された事例も散見されるため、杭の種類や施工方法等の慎重な検討が求められる。

### 《施工における琉球石灰岩の対処方法のまとめ》

本稿の要点は以下の通りである。

- ・ 琉球石灰岩の硬軟に係らず、1 m 程度の最終打撃では先端閉塞は殆ど見られない。また、その先端支持力は、先端閉塞を考慮しない安福の式の適用性が比較的よい。
- ・ 琉球石灰岩の周辺摩擦力度  $f$  は道路指示書の打込み杭で示される  $f=2N$  より小さい。
- ・ 支持力増大手法については、杭周グラウトや先端閉塞工法の検討が重要である。

## (2) 琉球石灰岩の技術的対応策に係るヒアリングの実施

「琉球石灰岩層の技術的対応策に係るヒアリング」として、宜野湾市域における普天間飛行場跡地調査や琉球石灰岩に係る施工工事、地盤調査等に造詣の深い学識者を対象にヒアリングを実施した。

### ①地下水トレースによる地下空洞の把握方法

(質問)

- ・ 普天間飛行場跡地では、以前蛍光物質を用いたトレース法による調査が実施されたと聞いている。水脈調査に関しては、小野委員にも相談を行い、精度の高い超高感度トレース法を用いた調査方法について探っているところである。
- ・ 衛星リモートセンシングデータを用いた調査については、NTT DATA が公表している資料を添付しているが具体的な調査方法は把握しておらず、超高感度トレース法と衛星リモートセンシングデータを用いた方法のうち、費用面や精度面を含めて調査方法を検討している状況にあり、これらの調査方法に関する知見を伺いたい。
- ・ 普天間飛行場跡地では、地下水盆が存在するため、投入したものが出口から出てくるまでに想定を超えた時間を要する可能性があるため、トレース法が適した調査地点かどうかは判断が必要である

(回答)

- ・ 衛星リモートセンシングは、熱を放射することによる温度変化を赤外線カメラで把握するものと思われるが、どの程度の深さまで把握できるかは不明。立ち入り調査ができない状態では、正確なデータ把握は期待できない。トンネルでの衛星を活用した調査は、岐阜県で実施されている事例は知っている。トンネル内の吹付コンクリートが剥離する要因として、トンネル外側の空洞の発生が原因となっており、衛星リモートセンシングを用いて調査したものである。ただし、衛星調査では、北側斜面地では把握できない場所が発生する。
- ・ 衛星による調査は、赤外線カメラで把握できるものなので、これまでの技術で実施できる。
- ・ トレース法に関しては、沖縄でトレース試験をやっても、水の流れは分かるが空洞は把握できないと聞く。普天間飛行場跡地でトレース法を実施しても、水脈は分かるかもしれないが空洞は難しい。
- ・ SAR は、10 年前から 8 年間の地形データの変化を調べられるものだが、現在はデータ計測しておらず、直近の 2 年間はデータがない。現在は、JAXA しか持っていないので購入するしかない。SAR による地形変化は、上下方向、水平方向の両方でミリ単位の把握が可能であるが、地形を意図的に変更したり、建物を壊したり、外的要因が発生したものは大きな変化として出てしまう。
- ・ 様々な場所で、立ち入りができない場所での地盤の把握方法について尋ねられるが、やはり実際に入ってみないと正確な判断はできない。あくまで予測のレベルである。

## ②既存資料の調査・琉球石灰岩の情報収取等

(質問)

- ・既存ボーリング調査結果は、県内部にあった資料を集約したものであるが、基地内の地質調査結果を情報収集することは可能か。

(回答)

- ・米軍（海軍ではなく陸軍）は、基地内の地質調査を数多く実施している。米軍が所有する調査結果があれば、普天間飛行場跡地の地質の状況は概ね把握できると考える。ボーリング調査の結果は、横須賀基地が所有している。
- ・横須賀基地にあるデータや米軍基地内の調査結果資料は、情報開示請求による許可が必要と考えられるが、どれくらいの期間を要するののかも不明である。
- ・米軍と契約している受託企業に情報提供が可能かどうか、どのような手続きが必要かについて確認を行う必要がある。基地内の調査は継続して実施している。
- ・沖縄県で公共工事を行うと琉球石灰岩によって基礎部分の工事費が増大すると聞く。瀬底大橋に携わった企業は工事で大変苦勞されており、琉球石灰岩の研究に瀬底大橋の調査結果を役立ててもらいたいと報告書を提供いただいている。また、古宇利大橋の報告書も琉球石灰岩の研究のために県から借用しているものである。

(質問)

- ・琉球石灰岩がある場合は、通常の地盤調査よりも調査費用や期間が多く掛かるのか。
- ・ボーリング調査の数が増えれば、琉球石灰岩の空洞などは把握できるのか。

(回答)

- ・各工事現場では、載荷試験を行ってそれぞれで分析・研究を行って対策を考えており、実物大の模型で試験を行っている。
- ・調査地点が増えれば、概ねは把握できると考えるが、琉球石灰岩にも弱い部分や空洞がある。また、琉球石灰岩の周りにある泥岩が悪影響を及ぼし、地盤が変化する場合もある。
- ・石垣島の工事では、N値は高いのに平板載荷試験では低いという結果となっており、琉球石灰岩がある場合には詳細な地盤調査を行わないと原因が分からない場合がある。

(質問)

- ・行程計画（案）の更新では、R9年度までの目標を記載しているが、話を聞いている限りでは深化の到達点まで行きつけないように感じた。跡地利用を検討する前までに、他事例で発生している工事後の地形変化など、琉球石灰岩がある場合に考慮しなければならないことを整理しておく必要がある。

(回答)

- ・以前実施された米軍基地の候補地選定調査では、地盤的には飛行場に適していないといった調査結果があったと記憶している。インターネットでも見ることができる（okinawa military geology で検索）。VOL 1～4 までである。
- ・普天間飛行場がある場所は津波災害リスクが低いので確保されている場所と聞いて

いる。

- ・琉球石灰岩の工事事例としては、西普天間地区（大学病院）や沖縄国際大学、セーファーウタギの施工例も参考になる。
- ・現時点における琉球石灰岩の整理としては、空洞や劣化の状況を把握し、建造物に適しているか適していないかを跡地利用の観点で整理するなど、県内の施工実績を収集し、今後の工事のために工事史としてまとめることが有効と考える。
- ・地下空洞などは充填すれば良いと考えていたが、地下水脈の活用という観点が提示されているため、既存の地盤を活かして公園にするとか考える必要があり、そのような整理の仕方であれば可能である。
- ・普天間飛行場周辺の地下空洞に関しては、普天間宮の宮司などが詳しいと聞いたことがある。