

4. 水環境・地下空洞にかかる調査検討

普天間飛行場地下には琉球石灰岩の空洞等の脆弱地盤や水脈があり、都市建設上の環境保全・安全面・経済面等の課題がある。このため、本パートでは琉球石灰岩に係わる情報収集・空洞分布想定・調査手法検討・技術指針上の課題整理等を行った。

(1) 琉球石灰岩の取扱いに係る情報収集

琉球石灰岩の取扱いに係る継続的な情報収集や地下空洞の分布状況を想定することで、その対応策の具体化を図る。

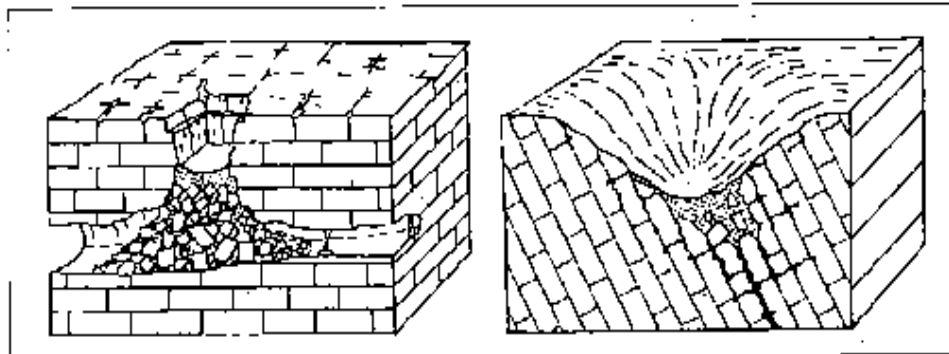
1) 既存資料等による情報収集

①「宜野湾市史 第九巻資料編八自然」による普天間飛行場一帯の地盤状況

琉球石灰岩は隙間が多く水を通しやすい性質を持っており、雨水や地下水に溶けやすく、溶けた炭酸カルシウムが再び結晶になったりすることで形成される。宜野湾市には、石灰岩堤や円錐カルスト、ポノール、ドリーネ、ウバーレ、自然橋、鍾乳洞などのカルスト地形が発達している。

ドリーネの下には鍾乳洞が多く、何らかの原因によって、鍾乳洞の天井が陥没することがあり、昭和 58（1983）年 9 月 26 日に、豪雨に伴う大量の地下水が噴出して洞口付近が崩れ落ち、住宅の基礎の一部が宙に浮くという災害が発生している。

また、普天間飛行場の建設時にはしばしば滑走路の一部が陥没したという報告もある。

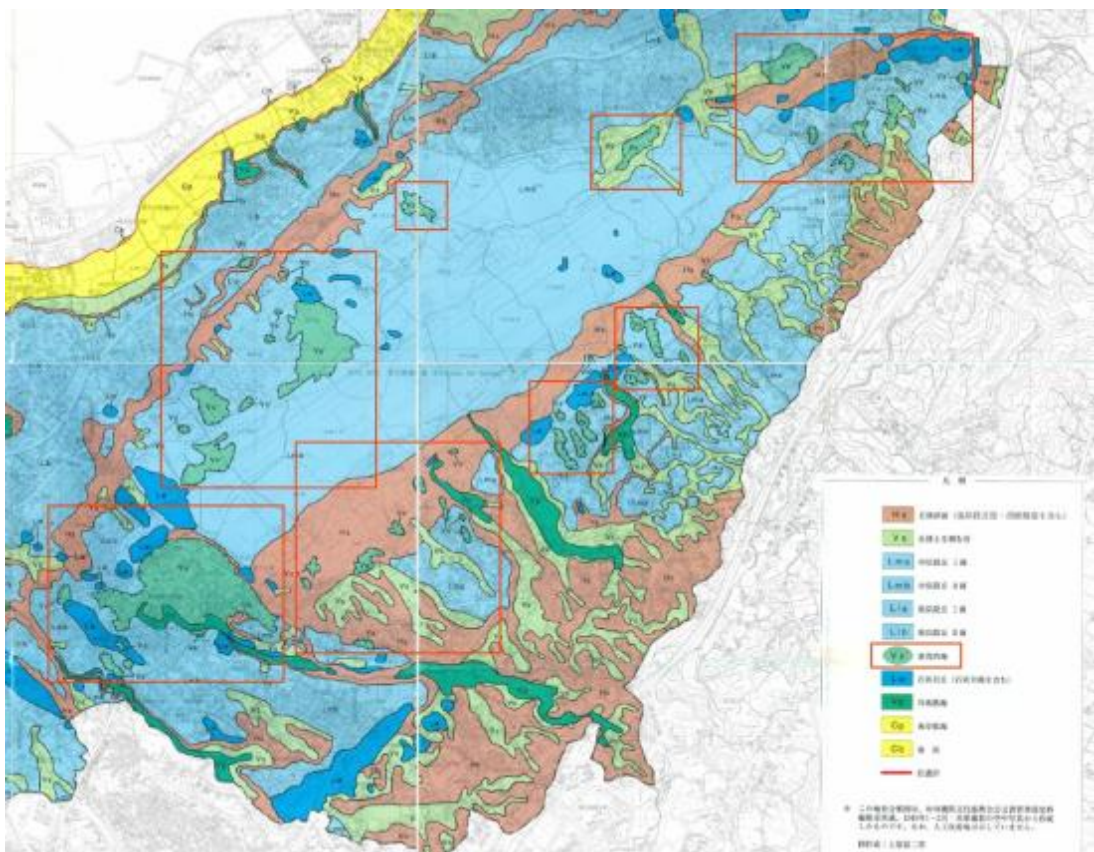


図Ⅲ-4-1 陥没ドリーネ（左）と溶食ドリーネ（右）模式図

出典：宜野湾市史 第九巻資料編八自然

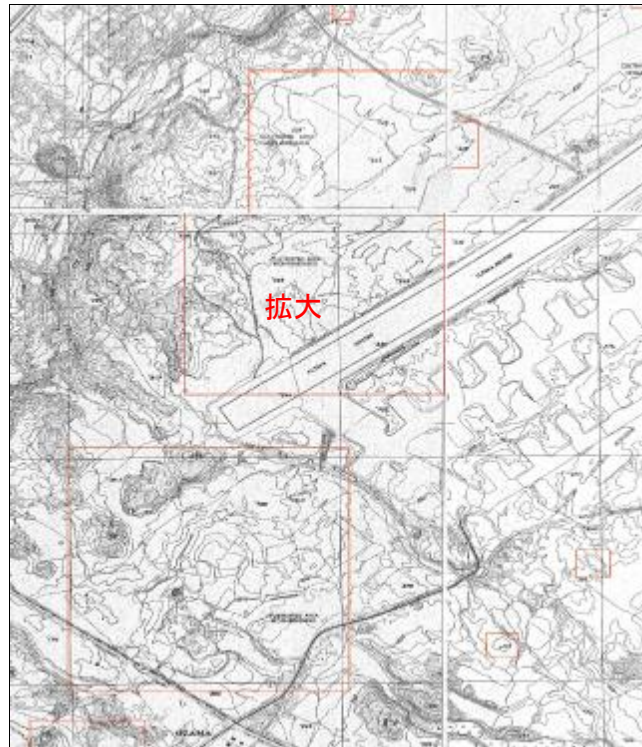
②宜野湾市史地形分類図や米軍地形図によるドリーネ等のくぼ地の情報収集

前述したように、宜野湾市史では「ドリーネの下には鍾乳洞が多く、何らかの原因によって、鍾乳洞の天井が陥没することがあり」と述べていることから、鍾乳洞(空洞)等の位置把握のための現地調査等が必要である。しかし、現状では米軍からの駐留軍用地内立入許可が得られず現地調査ができない状況である。このため、間接的ではあるが、鍾乳洞(空洞)等の位置想定として、ドリーネ等のくぼ地(凹地形)調査を行った。調査方法としては、土地改変の影響が少ない戦後昭和20(1945)年～昭和23(1948)年の米軍撮影空中写真判読による宜野湾市史の地形分類図(図Ⅲ-4-2)や米軍地形図(図Ⅲ-4-3、4)を入手し、普天間飛行場一帯の凹地形の調査を行った。

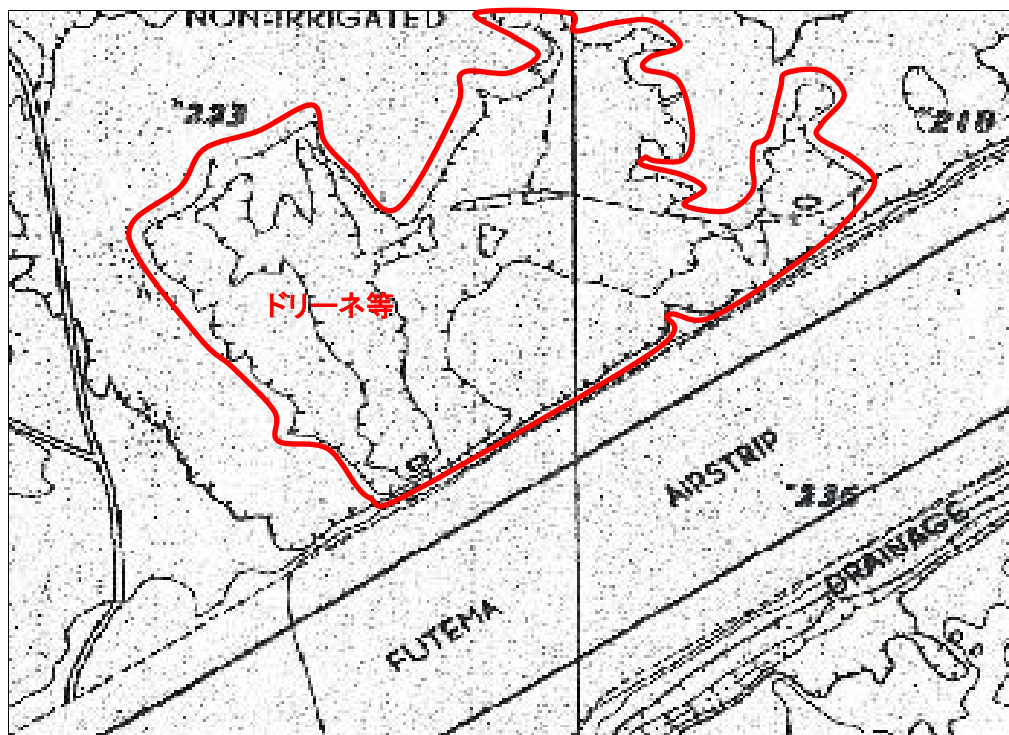


図Ⅲ-4-2 地形分類図

出典：宜野湾市史 第九巻資料編八自然

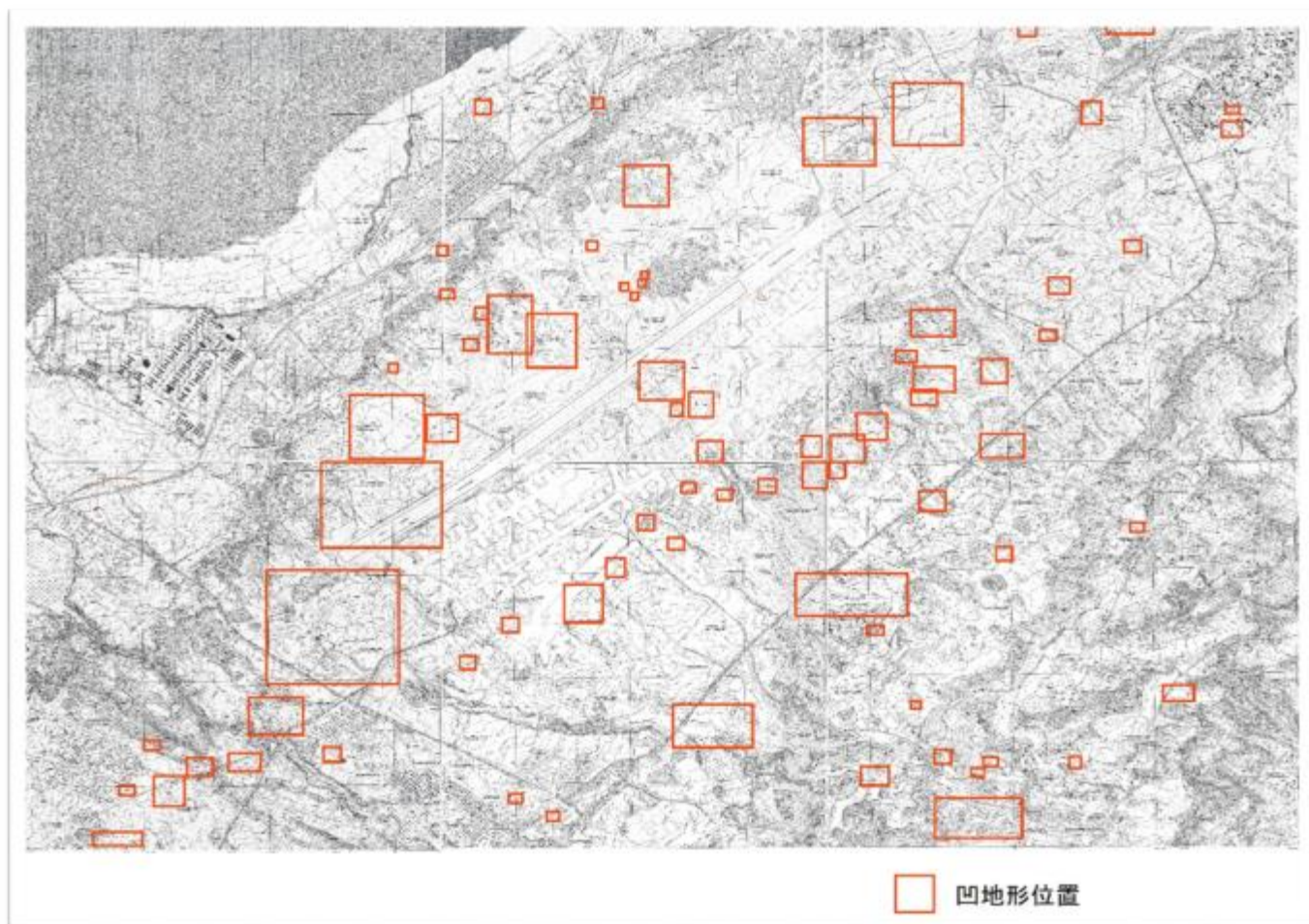


↓ 拡大



図Ⅲ-4-3 米軍地形図からの凹地形判読方法例

出典：米軍地形図（沖縄公文書館から入手）



図Ⅲ-4-4 昭和22(1947)年～昭和23(1948)年の米軍地形図(沖縄公文書館)

読取りによる凹地形位置

出典：米軍地形図(沖縄公文書館から入手)

③琉大病院移転に係る基礎形式や調査手法等の情報収集

西普天間住宅地区の琉球大学病院一帯（図Ⅲ-4-5）の地盤は普天間飛行場一帯の地盤と同様な地盤状況と想定されることから、地盤状況、空洞、杭の種類及び杭工法の選定条件等の情報を収集した。

「平成 30 年度 琉球大学（西普天間）移転用地地盤調査業務」

（琉球大学施設運営部、平成 30 年 11 月）

- ・ボーリング（建築） 41 地点

「平成 30 年度 琉球大学（西普天間）地下水調査業務」

（琉球大学施設運営部、平成 31 年 3 月）

- ・観測孔 6 地点
- ・ボーリング（建築） 7 地点



出典：国土地理院 電子国土 Web

図Ⅲ-4-5 調査位置図

○地盤状況

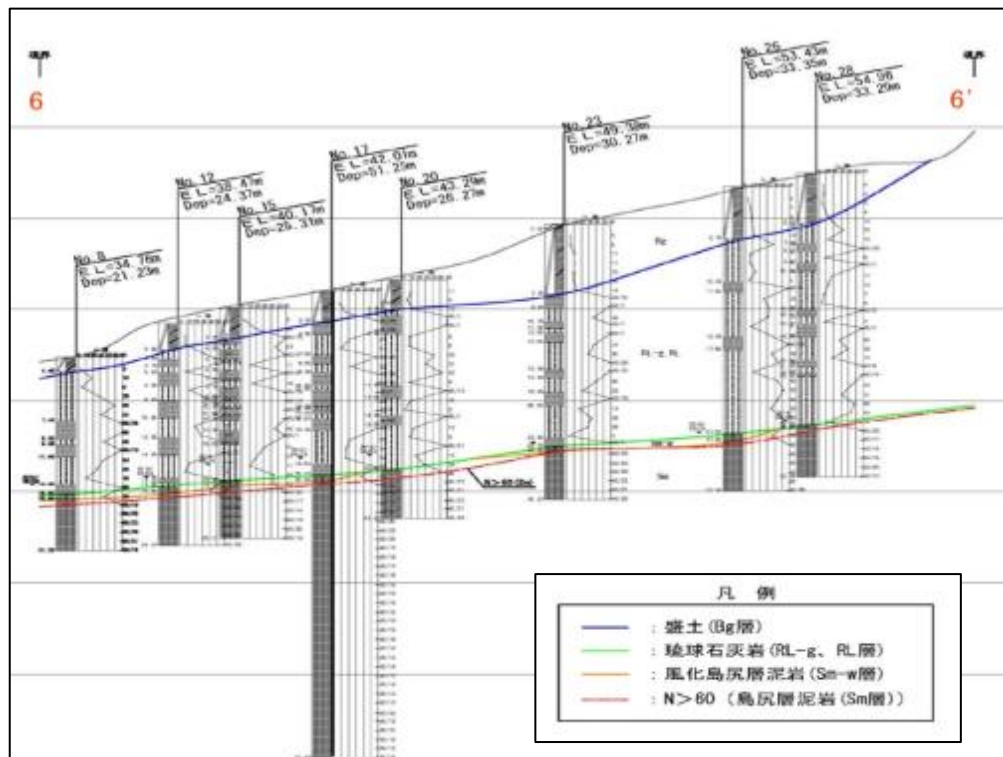
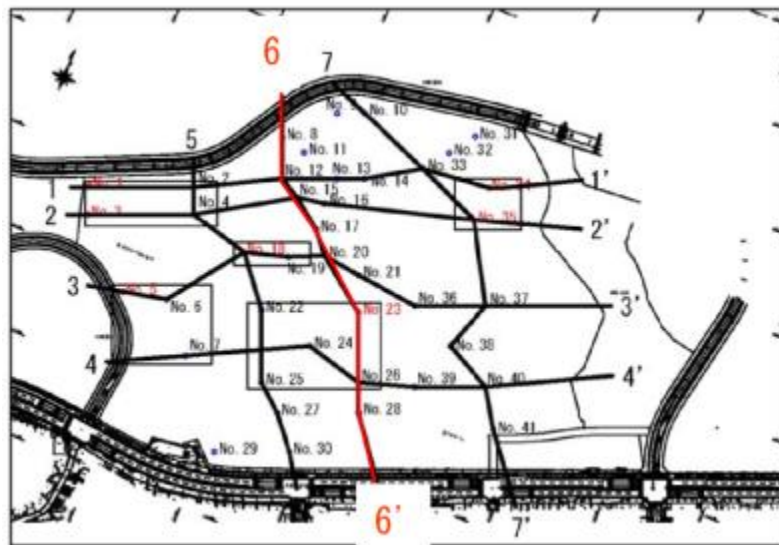
- ・上位より、盛土、琉球石灰岩、島尻層群泥岩となる。以下に代表的な地盤状況（図Ⅲ-4-6）を示す。

○支持層

- ・N値 60 以上の島尻層群泥岩
- ・支持層傾斜は 6 ～ 7°

○地下水位

- ・0.5～3.5m程度でほとんどは 1.0m前後となる



図Ⅲ-4-6 琉球大学（西普天間）の地盤状況（一部加筆）

○空洞が確認されたボーリング調査孔

以下の各業務について空洞の有無・数量を調査した（表Ⅲ-4-1）。

「平成30年度 琉球大学（西普天間）移転用地地盤調査業務」

（琉球大学施設運営部、平成30年11月）

- ・ボーリング41地点中 4地点で空洞が確認された
- ・最大空洞は0.70mであった

「平成30年度 琉球大学（西普天間）地下水調査業務」

（琉球大学施設運営部、平成31年3月）

- ・ボーリング13地点中 4地点で空洞が確認された
- ・最大空洞は0.37cmであった

上記の2業務における空洞が確認されたボーリングは54地点中8地点で空洞が確認され、最大空洞は0.7mであった

表Ⅲ-4-1 空洞調査結果表

業 務 名	孔番	空洞	
		深度GL-(m)	規模 (m)
平成30年度琉球大学（西普天間）移転用地地盤調査業務	NO.10	6.85～7.55	0.70
	NO.17	13.40～14.00	0.60
	NO.18	13.70～13.90	0.20
	NO.30	14.70～14.80	0.10
平成30年度琉球大学（西普天間）地下水調査業務	NO.52	14.73～15.10	0.37
	NO.54	19.80～20.13	0.33
		24.50～24.70	0.20
	NO.55	19.80～19.90	0.10

○杭の種類及び杭工法の選定条件

杭の種類及び工法の選定条件については、「平成 30 年度 琉球大学(西普天間)移転用地地盤調査業務（琉球大学施設運営部、平成 30 年 11 月）」を参考とした。

- ・ 支持層深さ

全体的に5～25m程度

- ・ 中間層の状態

中間層は琉球石灰岩が分布する。琉球石灰岩は層相が安定せず、礫、粗石、巨石 15cm 以上が分布する。

- ・ 支持層の状態

杭基礎の支持層は、島尻層群泥岩で $N>60$ の安定した地盤が5m以上分布する。

杭基礎の種類及び杭工法は、場所打ちコンクリート杭のオールケーシング工法、全周回転式を提案している。

2) 技術指針を適用した際の課題整理

建設上の課題は図Ⅲ-4-8 フロー図に示す「基礎工の課題」と「地下水保全の課題」からなり、技術指針を適用した際の課題を以下に示す。

①地盤状況に応じた基礎形式の想定が困難

- ・ 普天間飛行場内全般に共通することであるが、特に滑走路付近は建設時に空洞やドリーネ等の脆弱箇所について埋め戻し等の対策を講じている可能性があるが、現状では駐留軍用地の立入りができない状況であることや米軍からの地盤情報の入手も困難な状況となっている。
- ・ このように現状では地盤状況が不明であることから基礎形式の設定が困難な状況にある。
- ・ 安定した地盤の場合は滑走路を使用した直接基礎の採用も考えられ、建設コストの縮減が期待できるが、不安定な地盤の場合は島尻層群や琉球石灰岩を支持層とする支持杭や摩擦杭となり、直接基礎に比べて建設コスト高となる可能性がある。

②基礎下に空洞が確認された場合の安全な支持層距離の設定が困難

- ・ 琉球石灰岩地盤における空洞天井は崩落が進行している状況であるため、建設時には技術指針上の支持層厚さ（例. $N > 50$ 以上 5 m）で問題なくとも将来的に空洞天井崩壊が進行すると支持層厚さが 1～3 m と薄層となる可能性がある。よって、琉球石灰岩地盤における構造物の安全性を確認する地盤調査については、指針上の支持層厚さ+ α の深い位置まで空洞の有無を確認することが必要と考える。

※「建築基礎設計のための地盤調査計画指針」では、支持層の目安及び支持層の深さは以下のとおり。

- ・ 直接基礎
支持層の目安：砂質土・礫質土 N 値 50 以上（または 60）以上、粘性土 N 値 20～30 以上
支持層深さ：建物幅の 1.5～2 倍程度
- ・ 杭基礎
支持層の目安：砂質土・礫質土 N 値 50 以上（または 60）以上、粘性土 N 値 20～30 以上
支持層深さ：5～10m 程度

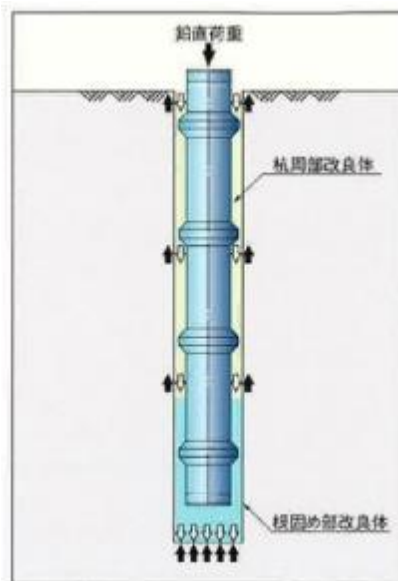
③構造物を建設する場合の地下水保全

- ・ 構造物直下に地下水流路が存在する場合は、地下水保全を考慮した基礎形式・工法の検討が必要と考える。

○杭打ち込みの内周面抵抗の増加が生じない課題（令和 5 年度業務）への対処

- ・ 令和 5 年度業務において、「琉球石灰岩地盤は N 値が小さくてもある程度団結した性状であり、杭の打ち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）」という課題があった。
- ・ 内周面抵抗の増加が生じない対応策として、島尻層群を支持層とした支持杭が考えられるが、この場合支持層深度が深くなるとコスト高となることが懸念される。
- ・ 中間層の琉球石灰岩を支持層とした場合、コスト縮減が可能となるため、琉球石灰岩地盤で近年多く採用されている摩擦杭の節付杭工法の事例調査を行った。
- ・ 以下、節付杭工法の「HF 工法ホームページ」より

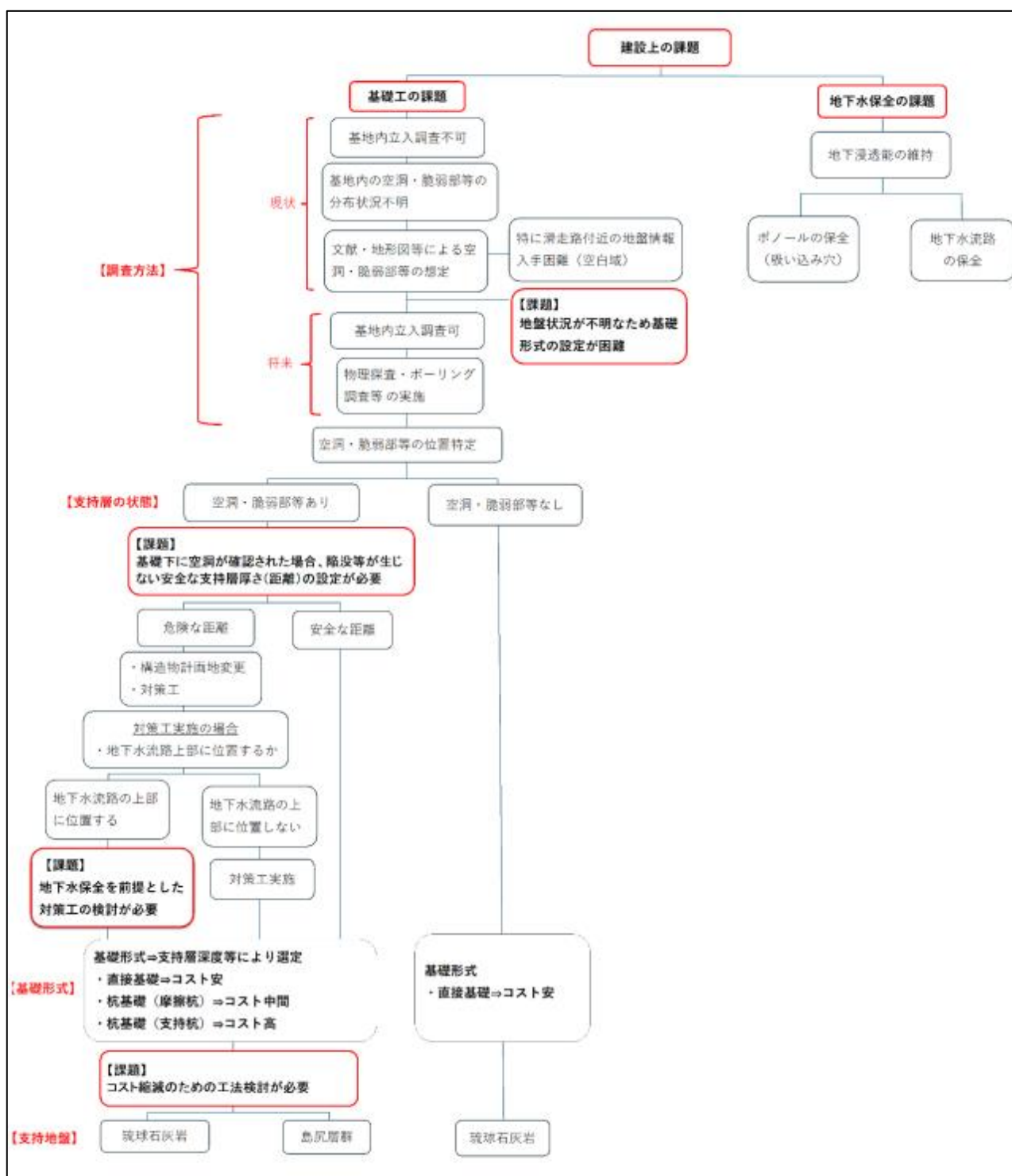
節付杭は大きな周面摩擦力が発現できる工法で、杭頭部に作用した鉛直荷重は、杭周面部において杭周部改良体を介して地盤に伝達され、杭先端部では杭先端根固め部改良体を介して先端地盤に伝達される支持力機構となる（図Ⅲ-4-7）。



図Ⅲ-4-7 節付杭工法

出典：HF 工法ホームページ

- ・ 本工法は大きな周面摩擦力となるため、島尻層群を支持層とした支持杭に比べ、杭長が短くなりコスト縮減が期待できる。また、直下に空洞が存在する場合でも支持杭に比べて空洞上部への上載荷重が小さくなることが期待できる。
- ・ 今後は石灰岩地盤に対応したその他の工法についても調査が必要と考える。

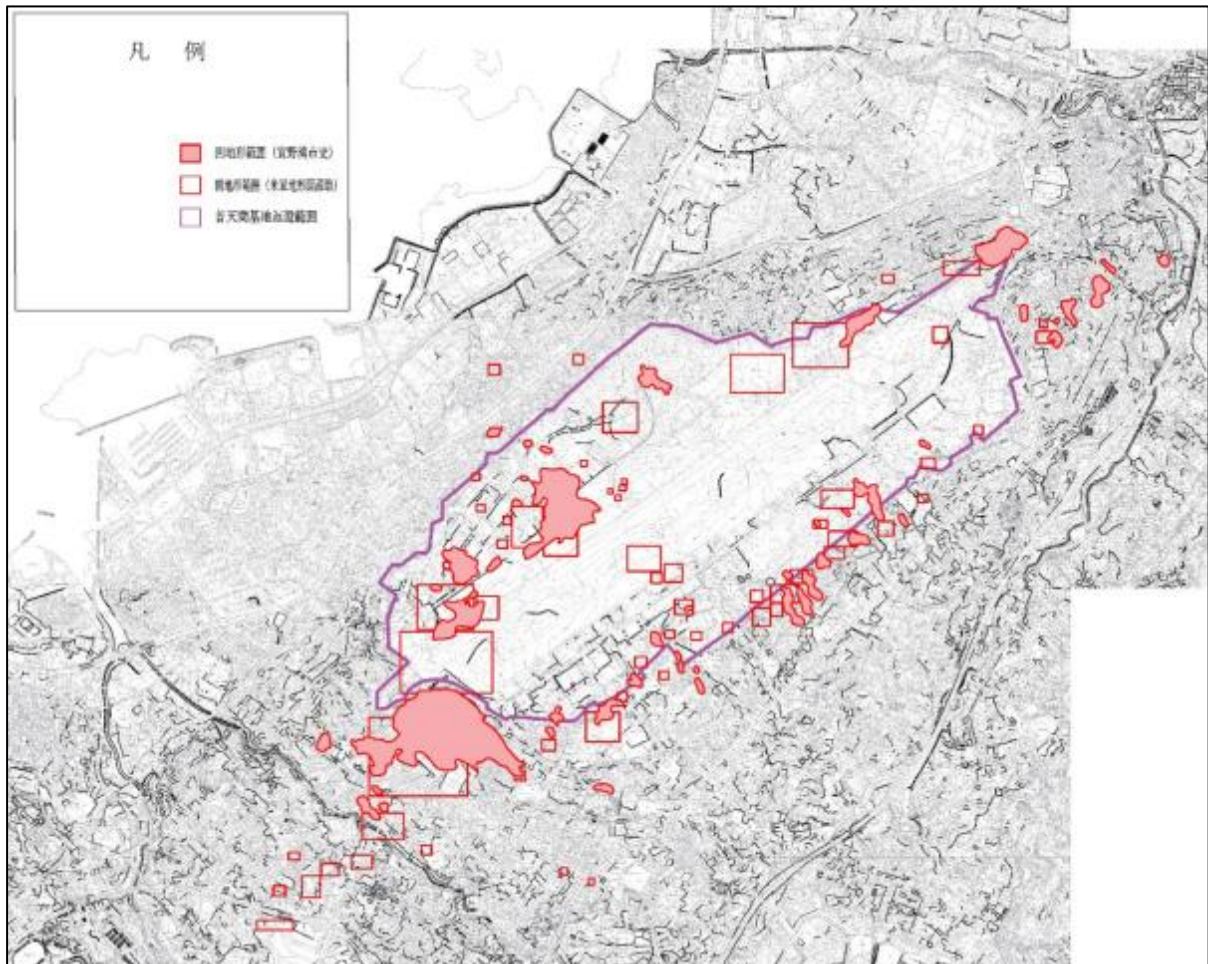


図Ⅲ-4-8 検討内容の見取り図（空洞・脆弱地盤の状態を踏まえた検討フロー）

(2) 水脈と連動した地下空洞の位置の把握

1) 空洞分布想定図の作成

(1)-1) で収集した宜野湾市史地形分類図や米軍地形図等を基に、普天間飛行場一帯の凹地形から、図Ⅲ-4-9「空洞・脆弱地盤の分布想定図」の作成を行った。



図Ⅲ-4-9 空洞・脆弱地盤の分布想定図

2) 専門家へのヒアリング調査概要

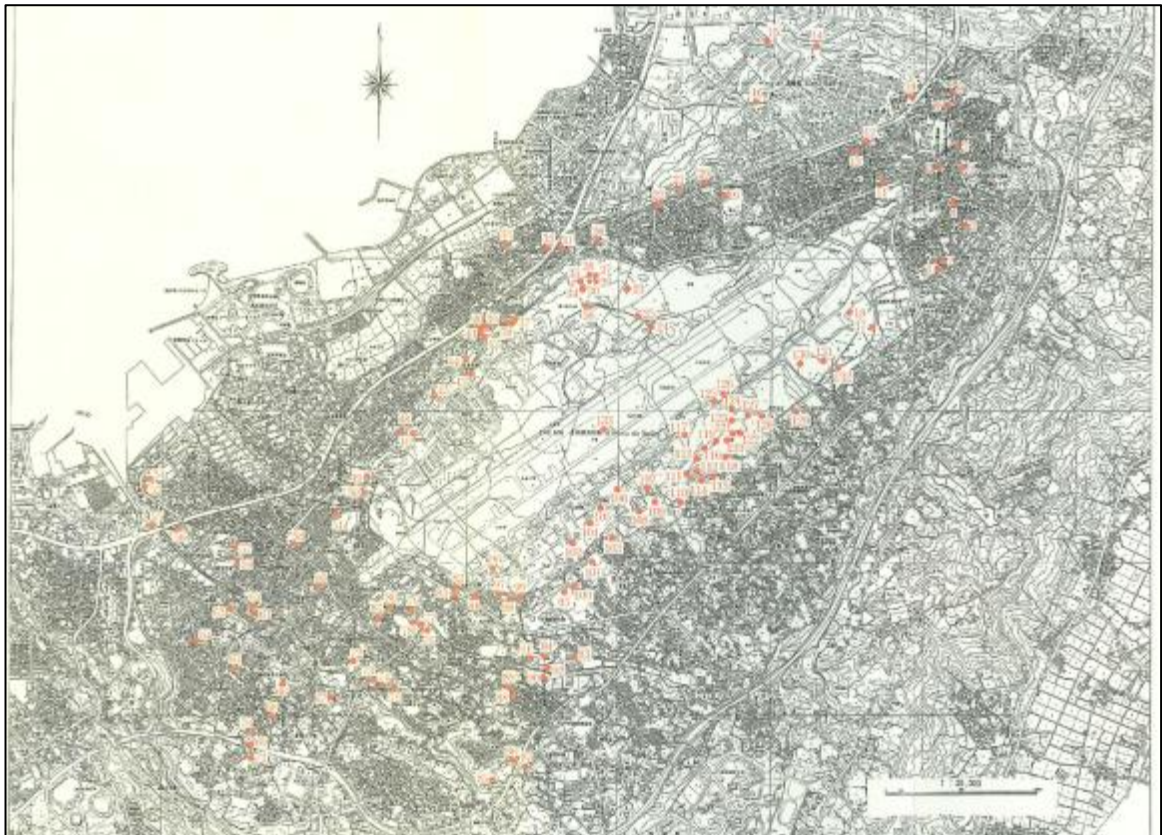
①空洞調査や対策工について

- ・空洞の有無を正確に確認する方法は現在ボーリング調査のみと考えられる。首里城の第32軍壕の調査では、物理探査だけでは確認することができず、物理探査であたりを付けてボーリング調査で空洞を確認した。物理探査のみでは、空洞の有無を確認することは困難だと考える。
- ・空洞の確認については、地下水の把握が有用であり、トレーサー試験等を検討した方が良いと考える。
- ・空洞対策については、ボーリング孔を利用してセメントミルクを流し込み、地下ダムのような堤防を地下に作成し、その上流側の空洞を埋める方法等が考えられる。

②洞窟（空洞）の場所や内部構造について

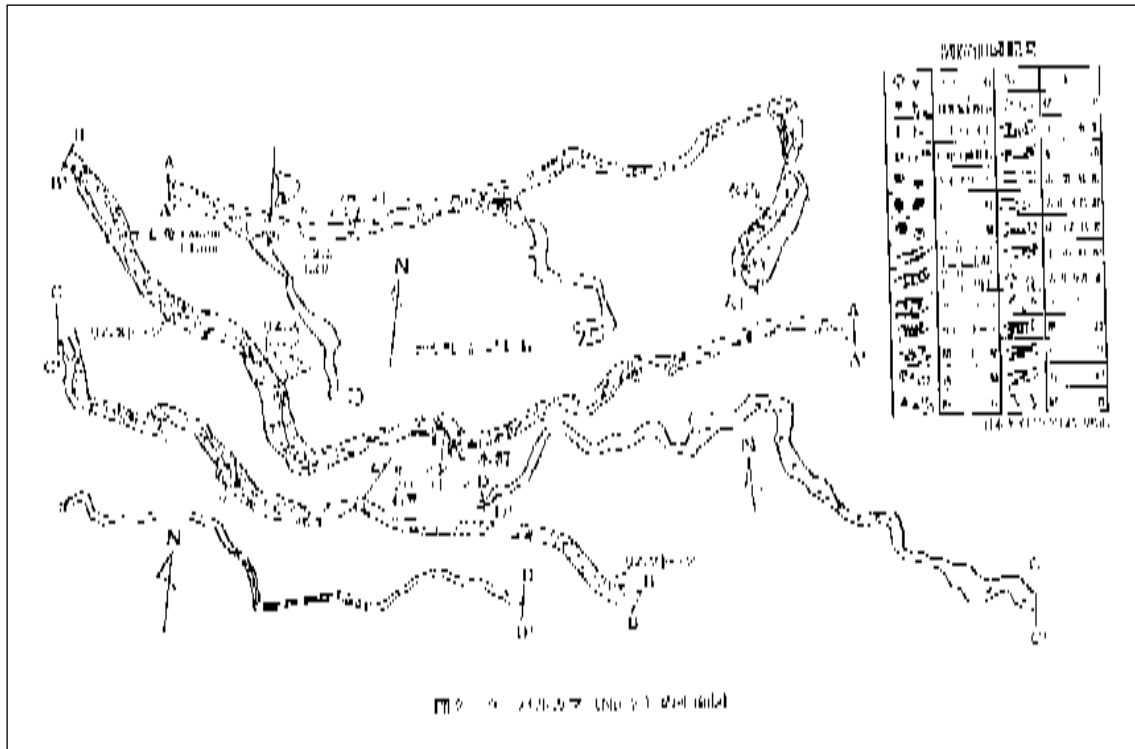
- ・洞窟の位置や方向性については「宜野湾市史」に記載されているため参考になる。なお、宜野湾市史に記載されていない洞窟も複数あると考えられる。

以下に「宜野湾市史」による宜野湾市内の洞窟分布図 133 箇所（図Ⅲ-4-10）や洞窟ルートマップの例を示す（図Ⅲ-4-11）。また、洞窟場所と洞窟ルートを合成した位置図を図Ⅲ-4-12 に示す。



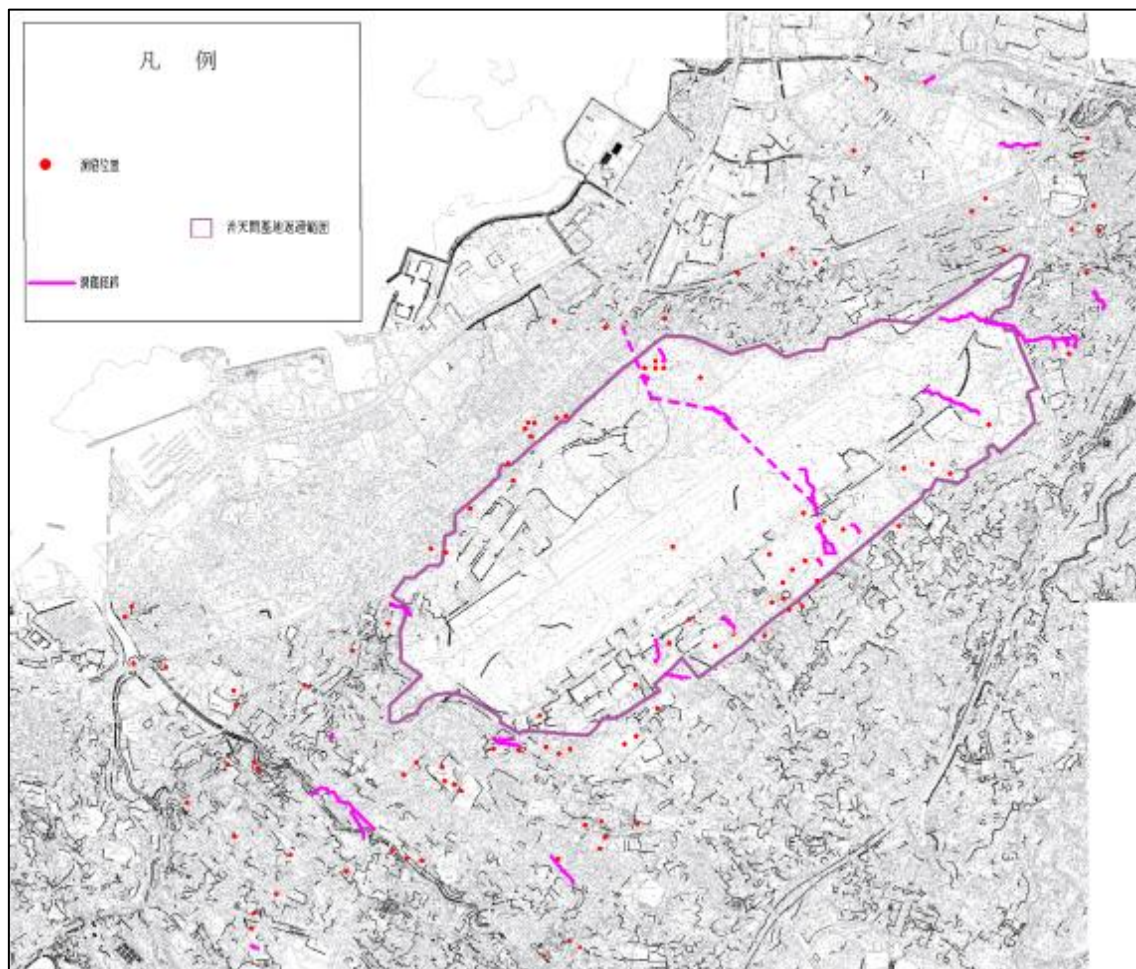
図Ⅲ-4-10 宜野湾市内の洞窟分布図 133 箇所

出典：宜野湾市史 九 資料編八 自然



図Ⅲ-4-1 1 洞窟ルートマップの例

出典：宜野湾市史 九 資料編八 自然



図Ⅲ-4-1 2 洞窟場所・洞窟ルート位置図

③琉球石灰岩地盤における空洞探査手法について

- ・物理探査手法には表Ⅲ-4-2に示すように様々な種類がある。

表Ⅲ-4-2 地盤調査に用いられる物理探査手法

探査名	測定する物理量	着目する物理量	調査される情報	対応深さ			探査効率	主な対象	備考
				～10 m	～100 m	100 m～			
弾性波探査	伝播時間	弾性波速度	断面層構造	○	◎	○	○	トンネル、ダム、法面等 主な構造物基礎調査	岩盤分類等の力学的特性 の評価
浅層反射法	弾性波動	音響インピーダンス	断面 地層境界		○	○	△	構造物周辺の基礎・断層 調査と地盤性状調査	S波の利用で耐震性評価
表面波探査	表面波	表面波速度	断面 層構造	◎	○		◎	構造物地盤、液状化予測、 堤防診断、空洞調査	起源群利用と多チャンネルの2方式
常時微動	地盤振動	振動特性 地盤構造	面的	○	○	△	○	地盤の振動特性評価、構 造物周辺地盤構造	構造物の振動特性評価に も応用
電気探査 (比抵抗法)	人工電場	比抵抗	断面	○	◎	○	○	地下水、埋すべり、トン ネル路線調査	比抵抗以外にIP、自然電 位に着目する手法あり
地中レーダ	電磁波	電磁波形	断面 異常抽出	◎	△		◎	空洞、埋設管、埋設物お よび遺跡調査	車両搭載型等の特化した 機器も開発
電磁探査	誘導電磁場	比抵抗 電気伝導率	面的 異常抽出	△	△	●	○	地下水、埋すべり、断層 調査の調査	空中探査等の多くの手法 が開発
音波探査	音波	音響インピーダンス	断面 層境界		○	△	○	堆積物、新層等の水透地 盤構造	海上（水上）のみ
（海上） 磁気探査	磁場	磁気異常	面的 異常抽出	○	△	●	○	爆弾等の金属埋設物調査	陸上でも適用可
（精密） 重力探査	重力加速度	密度	面的 異常抽出	△	△	●	○	空洞調査、構造物周辺の 基礎・断層調査	補正に用いる水準測量や 数値標高図が重要
地温探査	地温	地温異常	面的 異常抽出	△	△		○	温泉、地下水調査 法面裏の地盤性状	赤外線熱映像法も含む
放射能探査	ガンマ線	ガンマ線 強度	面的 異常抽出	△	△		○	地下水調査、断層等	空中探査、自動車探査も 可
ジオトモグラフィ	弾性波伝播 人工電場 電磁波	弾性波速度 比抵抗 電磁波速度	断面		○	○	△	近接施工目的をはじめと する地盤の調査	医療用X線CTの考え 方を拡張 複数のボーリング孔が必 要

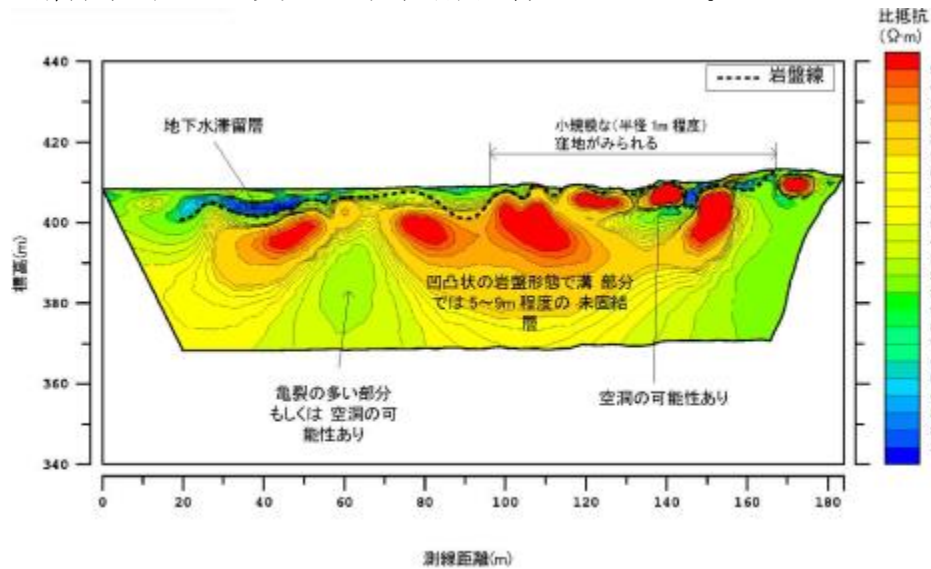
注1）対応深さ ○：鋭直、○：適、△：適用可、●：主として音響探査で適用
注2）探査効率 ◎：手帳に測定、○：普通、△：大がかりに測定

出典：地盤調査の方法と解説（地盤工学会）

- ・この中で実績等から琉球石灰岩の評価に必要な調査手法の選定基準は「①層厚 30mの琉球石灰岩を透過して島尻層群泥岩の起伏を把握する」「②鍾乳洞やドリーネ等の弱部を検出する」等があげられる。
- ・一方で、琉球石灰岩と島尻層群泥岩について過去に物理探査を実施した場合、「弾性波探査（屈折法）を実施した場合、表層の琉球石灰岩再結晶部分は地震波が屈折せず深部の速度構造を検出できない、何れの地層も $V_p \approx 2.0 \text{ km/sec}$ 程度で近似しており地層境界を検出できない」や「地中レーダや高密度表面波探査は必要な探査深度を満たさない」等の事例がある。
- ・よって実績を含めて検討した結果、物理探査手法として実施すべき手法は「反射法地震探査」、「比抵抗法2次元探査」の2種類が最適と考える。

【比抵抗法 2 次元探査】

比抵抗法 2 次元探査とは、電気探査の 1 手法で、地表に設置した多数の電極より電流を流して電位を測定し地下水分布や風化岩深度や断層破碎帯の位置、空洞等周辺と異なる地盤情報をとらえる手法である。電気探査 h1 次元的な情報を得られるが多チャンネルの測定、ソフトにより解析等を行ない 2 次元の比抵抗断面を得ることができる。

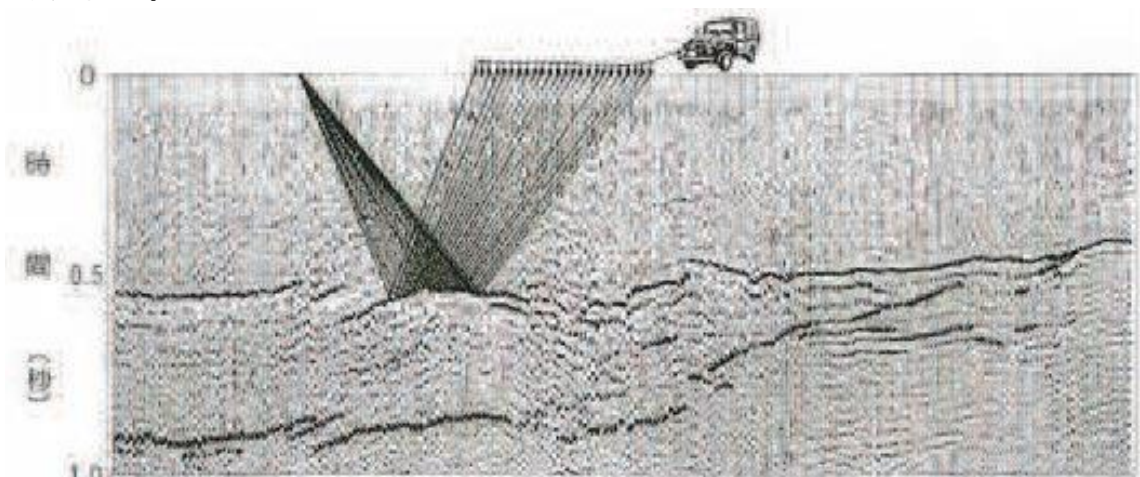


図Ⅲ-4-13 比抵抗断面図例

出典：日本物理探査株式会社

【浅層反射法地震探査】

浅層反射法地震探査とは地表の起震点より発した地震波が地層の境界から反射してくる波動を多チャンネルの受震器でとらえ専用ソフトで処理を行ない、地層構造を推定する手法である。ボーリング調査と併用することにより精度よく地層構造を把握でき、屈折法では検出できない低速度層を含む地層や硬軟互層でも適用が可能で、分解能の高い震源として S 波を用いた手法もある。



図Ⅲ-4-14 陸上部浅層反射法地震探査の測定概念と波形処理結果例

出典：日本物理探査株式会社

3) 地域区分及び区分毎の特徴整理

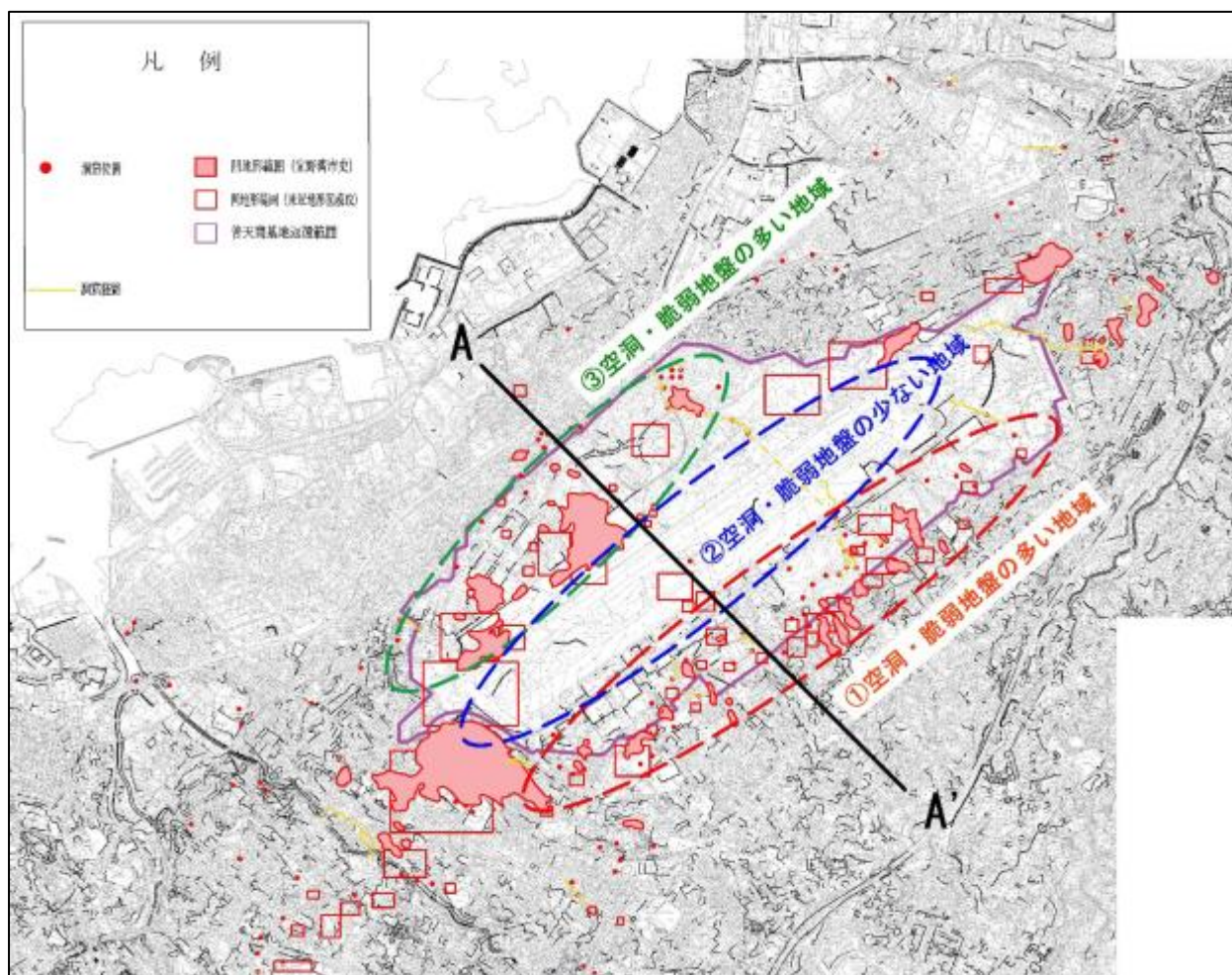
前述した「空洞・脆弱地盤の分布想定図」より、空洞・脆弱地盤の多い地域・少ない地域の区分を行った。その地域毎に「道路橋示方書・同解説（日本道路協会）」における表Ⅲ-4-3「各基礎形式の適合性の目安」を参考に「地域毎の特徴と基礎形式」を整理した。

①地域区分の設定

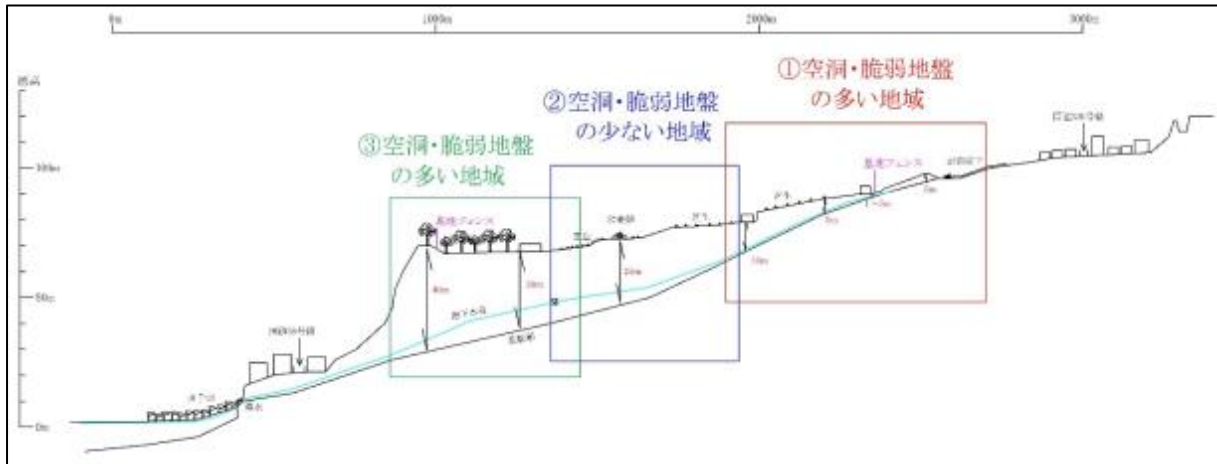
空洞・脆弱地盤が多い地域・少ない地域の区分図（図Ⅲ-4-15）及び模式断面図（図Ⅲ-4-16）を以下に示す。また、地域毎の特徴を述べる。

区分した地域は以下の3地域からなる。

- ① 空洞・脆弱地盤の多い地域(赤文字)
- ② 空洞・脆弱地盤の少ない地域(青文字)
- ③ 空洞・脆弱地盤の多い地域(緑色文字)



図Ⅲ-4-15 空洞・脆弱地盤が多い地域・少ない地域の区分図



図Ⅲ-4-16 空洞・脆弱地盤が多い地域・少ない地域の模式断面図

① 空洞・脆弱地盤の多い地域

- ・地質は、上位より琉球石灰岩、島尻層群が主体となる。
- ・島尻層群は深度 5 m 以下から 10m 程度と浅い深度から出現し、一部石灰岩が分布しない場所もある。
- ・地下水位が浅い地域については大雨時等では冠水する場所もある。
- ・調査結果より、空洞・ドリーネ等の脆弱地盤が多く、地下水保全で重要となるポノール（吸入口）が複数あり開発には留意が必要となる。

② 空洞・脆弱地盤の少ない地域

- ・地質は、上位より琉球石灰岩、島尻層群が主体となる。
- ・島尻層群は、深度 10m から 30m 程度とやや深く、琉球石灰岩は厚いところで層厚 30m 程度となる。
- ・調査結果より、空洞・脆弱地盤が少ない地域であるが、これは滑走路付近に位置するため建設時に空洞やドリーネ等の脆弱箇所について埋戻し等の対策を講じている可能性がある。今後は詳細な調査が必要となる。

③ 空洞・脆弱地盤の多い地域

- ・地質は、上位より琉球石灰岩、島尻層群が主体となる。
- ・調査結果より、空洞・ドリーネ等の脆弱地盤が多い地域である。
- ・島尻層群は、深度 30m から 40m 程度と深く、琉球石灰岩は厚いところで層厚 40m 程度となる。

②空洞・脆弱地盤地域毎の特徴と基礎形式

「道路橋示方書・同解説（日本道路協会）」における各基礎形式の適用性の目安（表Ⅲ-4-3）を参考に区分した地域の特徴と基礎形式を以下に述べる。

一般的に構造物の支持地盤と基礎形式の選定は、構造性能や施工性、経済性等に関する比較検討を行ったうえで、支持層までの深さを考慮し要求性能を満足する組み合わせを選定する必要がある。よって、構造物が確定していない現状においては、支持層深度から想定される一般的な基礎形式（図Ⅲ-4-17）について述べる。

① 空洞・脆弱地盤の多い地域

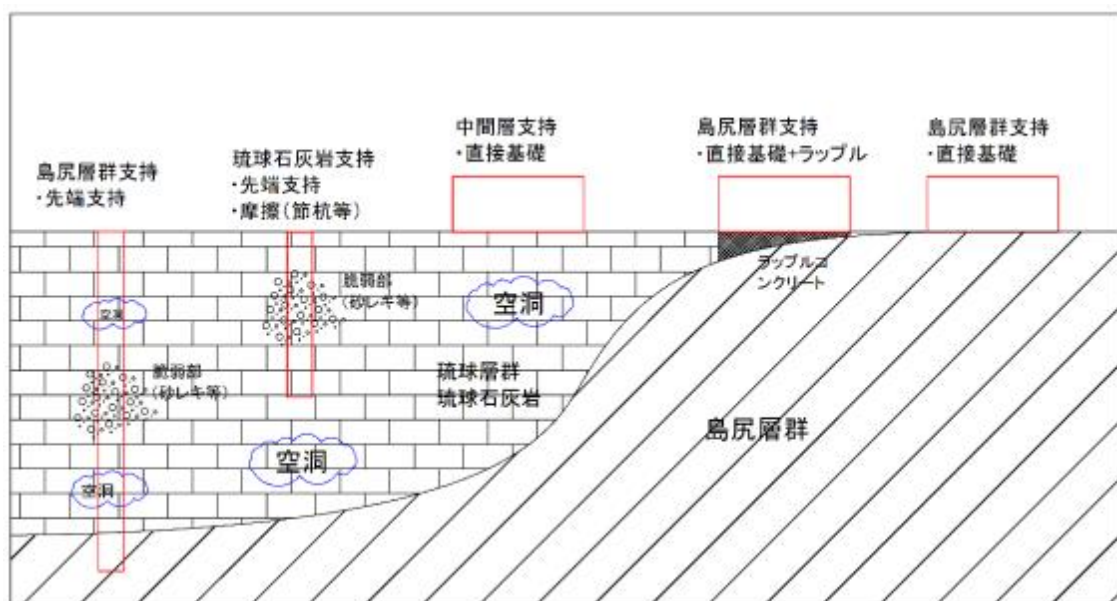
- ・本地域は空洞・脆弱地盤の多い地域となるが、安定した支持層の島尻層群が5 m未満から10m程度と浅い深度から出現している。
- ・基礎形式としては、島尻層群が5 m未満から出現する場合は直接基礎+地盤改良（ラップルコンクリート）、5～10mは杭基礎等が考えられる。

② 空洞・脆弱地盤の少ない地域

- ・本地域は調査結果より、空洞・脆弱地盤が少ない地域であるが、これは滑走路付近に位置するため、建設時に空洞やドリーネ等の脆弱箇所について埋戻し等の対策を講じている可能性がある。今後は詳細な調査が必要となる。
- ・一般的な基礎形式としては、空洞・脆弱地盤が少ない安定地盤の場合は直接基礎が可能となる。不安定地盤の場合は支持層まで10～30mと深いことから、大規模構造物等は杭基礎、中～小規模構造物の場合は琉球石灰岩を支持層とする支持杭や摩擦杭（節杭等）が考えられる。

③ 空洞・脆弱地盤の多い地域

- ・本地域は調査結果より、空洞・脆弱地盤が多い地域となり、安定した支持層の島尻層群が適しているが、支持層まで30～40mと深いことから、大規模構造物等は杭基礎、中～小規模構造物の場合は琉球石灰岩を支持層とする支持杭や摩擦杭（場所打ち杭等）が考えられる。



図Ⅲ-4-17 想定される基礎形式

表Ⅲ-4-3 各基礎形式の適用性の目安

表-参 6.1 各基礎形式の適用性の目安

基礎形式 適用条件		直接基礎	杭基礎										深礎基礎	ケーソン基礎	鋼管矢板基礎（打込み工法）	地中連続壁基礎				
			打込み杭工法		中掘り杭工法						鋼管ソイルセメント杭工法	場所打ち杭工法								
			PHC杭・SC杭	鋼管杭 打撃工法 ハンマ工法 パイプ工法	PHC杭・SC杭		鋼管杭		プレボーリング杭工法	オールケーシング工法		リースドリル工法	回転杭工法	柱状体深礎	ニューマチック					
					最終打撃方式	噴出攪拌方式	コンクリート打設方式	最終打撃方式			噴出攪拌方式					コンクリート打設方式				
地盤条件	支持層までの状態	表層近傍又は中間層にごく軟弱層がある	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	○	○	×	○	○		
		中間層にごく硬い層がある	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	△	×	○	○	△	○		
		中間層にれきがある	れき径 50mm以下	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	○	○	
			れき径 50～100mm	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○	△	×	○	○	○	△	
			れき径 100～500mm	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	×	×	○	△	×	
	液状化する地盤がある	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	支持層の状態	深度	5m未満	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	
			5～15m	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	○	○	○	△	
			15～25m	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	
			25～40m	×	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	○	
			40～60m	×	△	○	△	△	△	○	○	○	○	△	△	×	×	○	○	
		60m以上	×	×	△	△	×	×	×	×	×	△	△	×	×	×	×	△	△	
		土質	砂・砂れき (30≦N)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
			粘性土 (20≦N)	○	○	○	○	△	×	○	△	×	△	△	○	△	○	△	△	○
			軟岩・土丹	○	×	○	△	○	△	×	○	△	×	△	○	○	△	○	○	○
			硬岩	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	△	×	○	△	×
	傾斜が大きい、層面の凹凸が激しい等、支持層の位置が同一深度では無い可能性が高い		△	△	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○	○	△	×	○	
	地下水の状態	地下水位が地表に近い	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	△	○	△	
		湧水量が極めて多い	△	○	○	○	○	○	○	○	○	○	△	△	△	△	×	○	△	
		地表より2m以上の被圧地下水	×	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	△	×	
地下水流速3m/min以上		×	○	○	○	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	△	×		
支持形式	支持杭	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		
	摩擦杭	○	○	○	×	×	×	×	×	×	○	×	○	○	○	○	○	○		
施工条件	水上施工	水深5m未満	△	○	○	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×	○	△	△	×	
		水深5m以上	×	△	○	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×	○	△	△	×	
	周辺環境	作業空間が狭い	○	△	△	△	△	△	△	△	△	△	×	×	×	×	○	△	×	
		斜杭の施工	○	○	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	
		有害ガスの影響	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	×	×	○	
	振動騒音対策	○	×	×	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○	○	○	○	○	○	
隣接構造物に対する影響	○	×	△	△	△	△	△	△	△	△	○	○	○	○	△	△	△	△		

○：適用性が高い △：適用性がある ×：適用性が低い

○：適用性が高い △：適用性がある ×：適用性が低い

出典：道路橋示方書・同解説（Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編）平成24年3月

③空洞・脆弱地盤地域毎の特徴と基礎形式のまとめ

前述した空洞・脆弱地盤地域毎の特徴と基礎形式のまとめ（表Ⅲ-4-4）を以下に示す。

表Ⅲ-4-4 空洞・脆弱地盤地域毎の特徴と基礎形式のまとめ

空洞分布 区分域	石灰岩層厚	空洞・脆弱地 盤の多さ	地表面からの想 定地下水位	想定される基礎形式 及び建造物	地域の特徴
①	5m以下～10m 程度	多い	GL-1～-9m	・直接基礎 ・直接基礎+ラップル 【想定建造物】 ・道路 ・平屋（一階建て）	・本地域は空洞・ドリーネ等の脆弱地盤が多いが、支持層の島尻層群が浅い深度から出現するため直接基礎等が想定され、建設コストの縮減が期待できる ・地下水位が浅いため大雨時等では冠水に留意が必要な地域である ・地域には地下水保全で重要となるポノール（吸込口）が複数あり開発には留意が必要である
②	10～30m程度	少ない	GL-9～-25m	・支持杭 ・摩擦杭 【想定建造物】 ・道路 ・平屋（一階建て） ・規模の大きい建造物	・本地域は調査結果より、空洞・脆弱地盤が少ない地域であるが、これは滑走路付近に位置するため建設時に空洞やドリーネ等の脆弱箇所について埋め戻し等の対策を講じている可能性がある（今後は詳細な調査必要） ・安定地盤の場合は直接基礎採用の可能性も考えられ建設コストの縮減が期待できる ・不安定地盤の場合は③と同様な石灰岩を支持層とする支持杭・摩擦杭の検討が必要となる
③	30～40m程度	多い	GL-20～-35m	・支持杭 ・摩擦杭 【想定建造物】 ・道路 ・平屋（一階建て） ・規模の大きい建造物	・本地域は空洞・ドリーネ等の脆弱地盤が多い地域である。 ・島尻層群は深度30～40mと深い位置に分布することから、支持杭としてはコスト高となる。 ・今後は深さ方向の石灰岩地盤状況を詳細に検討する必要がある、良質な石灰岩岩盤が連続しているようであれば浅い深度で支持杭・摩擦杭が採用できコスト縮減につながる

※「建築基礎設計のための地盤調査計画指針」では、支持層の目安及び支持層の深さは以下のとおり。

- ・直接基礎

支持層の目安：砂質土・礫質土N値 50 以上（または 60）以上、粘性土N値 20～30 以上

支持層深さ：建物幅の 1.5～2 倍程度

- ・杭基礎

支持層の目安：砂質土・礫質土N値 50 以上（または 60）以上、粘性土N値 20～30 以上

- ・支持層深さ： 5～10m程度

4) 琉球石灰岩地盤を支持層とする場合の課題や対策工の課題

「宜野湾市史」によると、宜野湾市は湿潤な気候と地形及び地質の特徴から豊富な地下水があり、多数の湧水を形成している。琉球石灰岩は空隙が多く水を通しやすい透水層で、地中へ浸透した水は地下水となり基盤の島尻層群のくぼ地へ集まって流れる。その過程で地下水は鍾乳洞をつくり、鍾乳洞の天井が崩れ落ちて生じた陥没ドリーネが多数みられる。

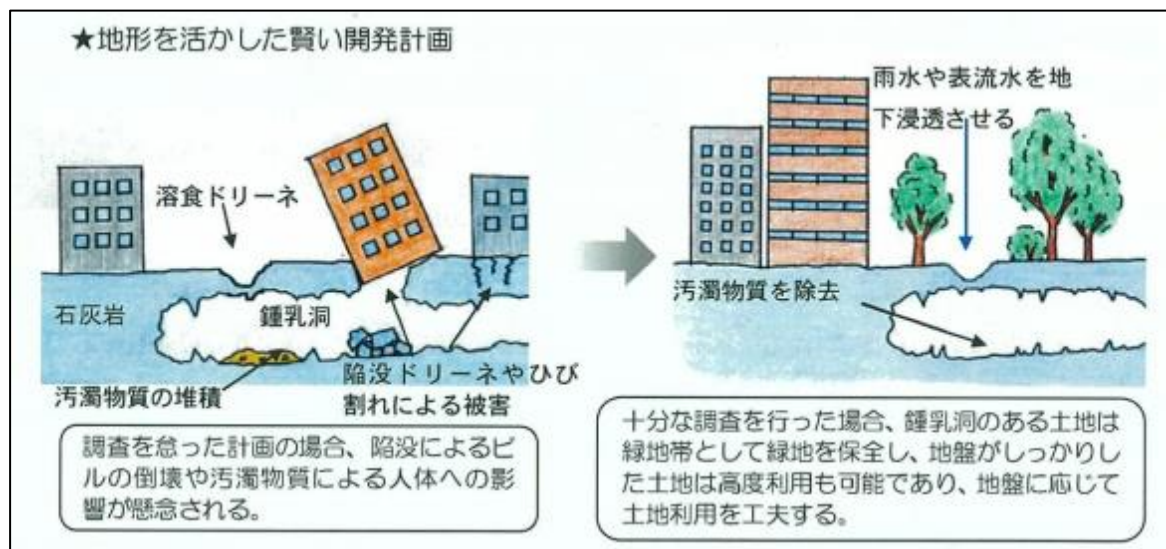
以上のような過程で生じた琉球石灰岩地盤の課題について以下に述べる。

①琉球石灰岩を支持層とする場合の空洞の取扱い

(1) - 「2) 技術指針を適用した際の課題整理」でも述べたが、琉球石灰岩地盤を支持層とする場合、基礎直下に空洞が存在すると構造物に対して以下の影響が懸念される。

○琉球石灰岩空洞の天井崩落進行による陥没

琉球石灰岩地盤における空洞天井は長い年月をかけて風化・溶食等の影響で崩落が進行している状況にある。将来的に空洞天井の崩壊が進行すると地表面の陥没など構造物への影響が懸念される。



図Ⅲ-4-18 琉球石灰岩を支持層とする場合の影響

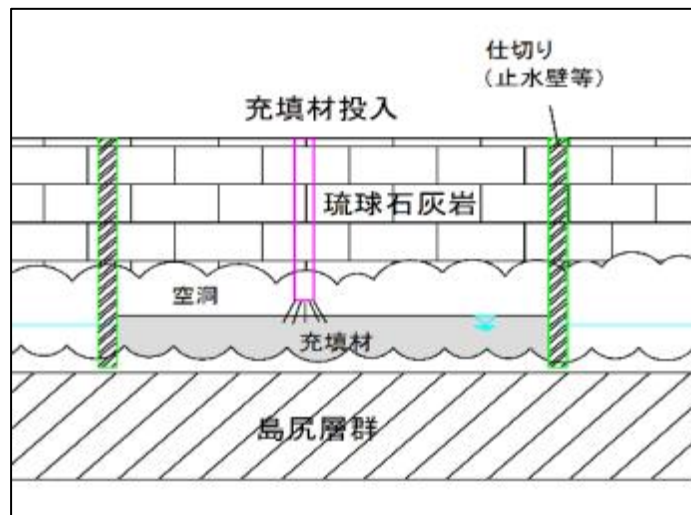
出典：平成18年度宜野湾市自然環境調査

②空洞充填工法を採用する場合の地下水への影響

空洞対策の1案として空洞充填工法があるが、直下に地下水流路が存在する場合には地下流路保全の検討が必要となる。

空洞充填工法（図Ⅲ-4-19）は固化材をスラリー状とし、ボーリング孔を通じて充填する工法であるが、空洞が連続する場合は充填量が不明となる。この対策として空洞内に隔壁を形成したのちに充填材を投入する方法がある。しかし、この隔壁が形成されると地下水流路が阻害される懸念がある。

よって、本工法を採用する場合には事前に地下水流路の把握が重要となる。



図Ⅲ-4-19 空洞充填工法概念図

5) 地下水保全上の課題

①地下水涵養を考慮した土地利用

「平成 17 年度宜野湾市自然環境調査」によると、現状は普天間飛行場のある石灰岩台地は約 7 割が樹林で覆われており、草地・樹林が多く、雨水が浸透しやすい地表の状況と、鍾乳洞など空洞が多い地質により多量の地下水を貯える「地下ダム」のような働きを持っている。また、地下水保全には、家屋建設や路面舗装などに伴う地表の浸透能力や地質の改変による水量の減少をできるだけ少なくし、まとまりのある樹林を維持することが重要と述べている。



図Ⅲ-4-20 地下水涵養を考慮した土地利用

出典：平成 17 年度宜野湾市自然環境調査

②その他地下水保全上の重要キーワード

地下水保全で重要なキーワードとしては、前述した「地表浸透能力の維持やまとまりのある樹林の維持」の他に「ポノール」や「地下水流路」の保全が重要と考える。「平成 18 年度宜野湾市自然環境調査」の水収支概念図（図Ⅲ-4-21）では、ポノールから流入した表流水は地下へ流入し湧水となるため、「ポノール」や途中の「地下水流路」を守ることが地下水保全では重要と考える。

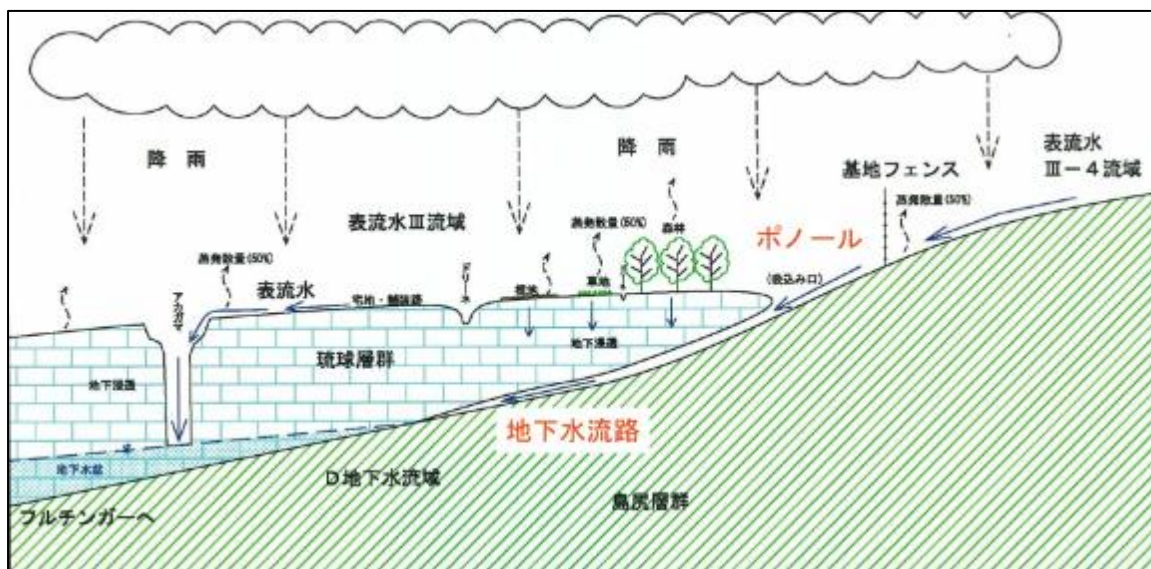


图 III-4-2 1 水收支概念图

出典：平成 18 年度宜野湾市自然環境調査（一部加筆）