

那覇港内における琉球石灰岩層の支持力特性について

納見昭広*・根木貴史**

* (財) 沿岸技術研究センター 企画部 主任研究員
**前 (財) 沿岸技術研究センター 調査部 研究主幹

琉球石灰岩は、未固結の砂礫状部から固結した塊状部まで強度のばらつきが大きく、また空洞部が点在しているため工学的な取り扱いが難しい。そのため、琉球石灰岩層上に杭式の構造物を築造する際は、石灰岩層を貫通して島尻泥岩層に根入れするという考え方が一般的であった。しかし、琉球石灰岩の層厚は海域で 40～60m にも達し、貫通して杭を打設することが困難なため、支持力発現のメカニズムを解明し琉球石灰岩を支持層とすることは、施工コストの縮減、工期の短縮に有意義であると考えられる。本研究は、琉球石灰岩の特性を把握し、石灰岩層を支持層とした過去の事例の調査、施工方法の検討を行い、支持力特性を解明して設計支持力の考え方についてとりまとめた。

キーワード：鋼管杭基礎 ケーソン 石灰岩

1. 初めに

沖縄県に広く分布する琉球層群(琉球石灰岩)は、非常に複雑な成層状態をなしており、未固結の砂礫状部から再結晶作用によって堅く固結した塊状部まで、強度のばらつきが非常に大きく、また地下水の影響で所々に空洞部が存在することが知られている。それ故に工学的な取り扱いが難しく、これまで『琉球層群上に杭式基礎の構造物を築造する際には、琉球層群(琉球石灰岩)を貫通して下部の島尻層(主に泥岩)に杭を根入れし、これを支持層とする』という考え方が一般的であった。しかし、琉球層群の層厚は陸域で 5～20m、海域で 40～60m にも達するため、これを貫通して杭を打設することは非常に困難を伴う。そのため、琉球層群における支持力発現のメカニズムを解明した上で、これを杭基礎の支持層とすることは、施工コストの縮減、工期の短縮に非常に有意義であると考えられる。

2. 琉球石灰岩の性状

2.1 琉球石灰岩を支持層とする場合の問題点

琉球石灰岩を支持層にした過去の事例を見ると上記に述べた性状により、種々の問題が生じている。

(1) 明確な支持層の不在

琉球石灰岩層群には明確な支持層が存在しない場合が多く、表-1 の既往施工事例に示すように、琉球石灰岩を貫通して下位の島尻層に支持させる場合が多い。

(2) 硬質塊状部における鋼管杭の座屈

1986 年竣工の泊大橋での打込み工法による鋼管杭の座屈事例に代表されるように、鋼管杭の打込み工法の場合、座屈あるいは硬質な塊状部の打込みが不可能になるケースが多く、結果として先端拡大ビット中掘工法などの補助工法併用の施工に変更しているものが多い。

表-1 琉球石灰岩を対象とした既往橋梁施工事例

橋梁名	支持層	支持層深さ	基礎形式	施工方法
来間大橋	琉球層群 N>50 島尻層	-30m	鋼管杭 L=30～38m	プレボーリング(グ)外注入+最終打撃 →琉球層群の中間層の崩壊の可能性から、先端拡大ビット中掘工法(グ)外注入+最終打撃工法に変更
サザンゲートブリッジ(石垣港)	琉球層群 N≥30	-40m	鋼管杭 L=38.5～41.5m	先端拡大ビット中掘工法(グラウト注入)+最終打撃
瀬底大橋	琉球層群	-50m	鋼管杭・鋼管井筒・直接	打込み
古宇利大橋	琉球層群 N≥30	-30m～-50m	鋼管杭・複合杭	打込み、複合部は全周回転の場所打ち
泊大橋、波の上橋(那覇港)	島尻層	-50m	鋼管杭・鋼管井筒・直接	先端拡大ビット中掘工法(グラウト注入)+最終打撃(当初は打込み)
本部大橋	琉球層群?	-20m?	鋼管杭	打込み?
沖縄CTSシーパス	島尻層	不明	鋼管杭 L=80～90m	打込み?
池間大橋	琉球層群 N>50	不明	直接基礎	詳細不明(P3,P5のみ)
池間大橋	島尻層	-30m	鋼管杭	プレボーリング+最終打撃
運天港橋	琉球層群	不明	鋼管杭	中掘(グ)外注入+最終打撃
入江橋	島尻層	不明	鋼管杭	先端拡大ビット中掘工法(共にグラウト注入)+最終打撃
鎌辺橋	琉球層群	-15m	場所打ち杭	詳細不明
浜比嘉大橋	島尻層	不明	鋼管杭 鋼管井筒	打込み

(3) 琉球石灰岩の不均一性

N 値分布は平面的にも深度方向にも非常に不均一かつ複雑であり、N 値から推定される明確な支持層は存在しない。一方、未固結状と考えられていた低い N 値を示す部分においても、高品質なサンプリング試料では、固結力を有していることが明らかになった。

(4) 空洞の存在

琉球石灰岩内には、堆積後の氷河性の海面変動によって陸化し、二酸化炭素を含んだ雨水あるいは地下水の影響によって琉球石灰岩中の石灰質成分が水に溶け出して空洞になっている部分、あるいは空洞内に粘土が流入している部分などが存在しており、那覇港内においても空洞の大きさは深度方向に最大 180cm あるものが確認されている。また、空洞の広がりやを特定することが極めて困難であったなど不確実性を払拭できないことから、その対応して島尻層に支持させることが多かった。しかし、

近年の新しい技術を導入し、十分な検討を実施すれば、琉球石灰岩に支持させることが可能ではないかと考えられ、以下に示すような調査・試験を実施した。

2.2 調査・試験

(1) 高品質サンプリング・炭酸カルシウム含有量試験

琉球石灰岩は、サンゴ礁堆積物(サンゴ及びサンゴ礁を作る生物群の碎屑物)からなり、岩相は、通常のボーリングコア試料観察より、硬質な塊状部と礫質、砂質、泥質に区分される。このうち、海面下の琉球石灰岩における礫質、砂質、泥質部分でのセメンテーション効果について、それを確認できる証拠がこれまでの試料観察では認められなかった。しかし、海面下の琉球石灰岩も堆積後に地殻変動により高圧力を受けており、硬化(セメンテーション)しているとも考えられていた。一方、若狭地区の地質調査で実施された高品質サンプリング試料の観察結果によると、写真-3のように明らかにセメンテーション効果が確認され、琉球石灰岩は全体に固結していることが判明した。また、堆積環境・堆積サイクルを把握し、

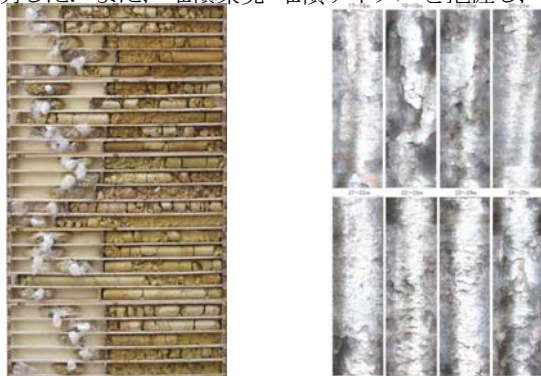


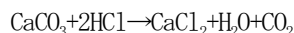
写真-1 通常の
ボーリングコア

写真-2 ボアホール
カメラ映像



写真-3 高品質なサンプリングによるコア試料

詳細な地質区分を行うため、簡易的に炭酸カルシウム量の測定を行った。琉球石灰岩の主成分は炭酸カルシウム(CaCO_3)であり、この混入率を測定することにより、琉球石灰岩あるいは陸成堆積物の判定を行い、堆積サイクルを把握した。試験方法の一つである塩酸処理については次のように実施した。標準貫入試験試料を使用し、試料を一度乾燥させた後、一定土量(200g程度)に一定量の希塩酸(1〜2mol/l ; 3.5〜7.0%溶液)を加えて反応させた後、再度乾燥させてその前後での質量及び粒度特性の変化率を求めた。下式のように、水と二酸化炭素に分解されることにより質量が減り、粒度特性が変化(粘土分の増加)する。



(2) 原位置せん断摩擦試験(SBIFT)・三軸CD試験

琉球石灰岩の強度・変形特性を把握することは、基礎設計を行う上で必要不可欠であるが、琉球石灰岩中の砂礫層

あるいは岩塊状の力学特性を直接的に求めた事例は少ない。これは、今までの調査手法では、礫質土のサンプリングが、例えば、凍結サンプリングのように極めて高額であること、および、礫径の影響を考慮した室内土質試験を実施しようとする、かなり大孔径(少なくとも最大礫径の5倍以上)でのサンプリングが不可欠になること、などの理由による。そこで、琉球石灰岩のような地盤でも原位置で強度・変形特性を把握することが可能な原位置せん断摩擦試験(SBIFT: Self Boring typed In-situ Friction Test)を実施した。またSBIFTと同様、琉球石灰岩の力学特性、および変形特性を把握し、地盤力学的手法による杭あるいは直接基礎の支持力算出に用いることを目的として、高品質なサンプリング試料を用いた三軸CD試験を実施した。

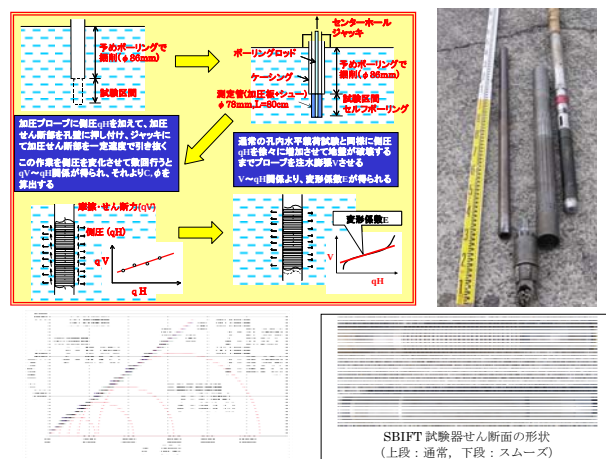


図-1 原位置せん断摩擦試験(SBIFT)の概要

2.3 琉球石灰岩の支持層判定・力学的特性に対する適用性

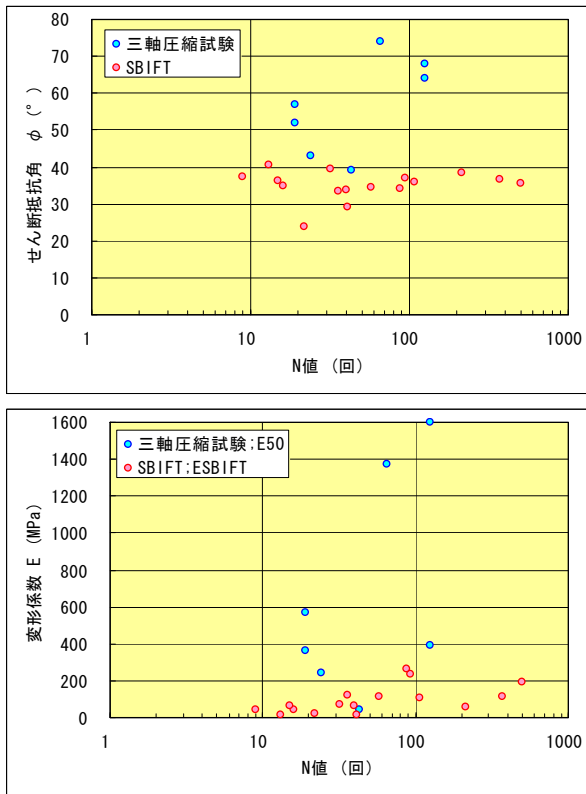
(1) 支持層判定

琉球石灰岩中での支持層を判定するための上記調査試験の結果として、以下の傾向が見られる。

標準貫入試験結果のN値は、平面的にも深度方向にもバラツキが大きく不規則な分布を示すが、支持層と仮定した赤色を帯びたキー(鍵)層では、他の地層に比べて相対的にバラツキが少なく、極端に小さなN値を示す箇所が見られない特徴がある。これに対して、SBIFT、三軸CD試験結果の内部摩擦角 ϕ および変形係数Eは、(図-2)のようにN値にはあまり関係なく一定値を示している。このようにSBIFTおよび三軸CD試験ではほぼ一様な力学特性を有しているとも推定できるが、支持層を判定する上では、琉球石灰岩中の脆弱部を如何にして捉えるかが重要である。すなわち、深度方向のバラツキをより詳細に調べるための調査(サウンディング)方法を検討する必要がある。

①動的貫入試験：ラムサウンディングが実用面から候補として考えられるが、 $N > 50$ 回の岩塊状の部分を打ち抜くことは困難であり、ラムサウンディング以上の貫入能力は期待できない。

②標準貫入試験：この試験は、本来10cm毎に打撃回数を記録することになっているため、10cm毎の打撃回数を30cm毎に換算してプロットするなど精度を上げれば、より詳細な固結部の連続性の情報が得られると考えられる。

図-2 N値と ϕ , Eの関係

③センサー付きボーリング：高度なセンサー付きボーリングであれば固さの連続的な把握は可能であると考えられる。しかしながら、特殊ボーリングであり、実用的でないため問題がある。以上より、標準貫入試験の拡張が実務面も考慮すれば検討に値するものと考えられる。また、ボーリング孔間の連続性を補間する手法として比抵抗トモグラフィも有用な方法であると考えられる。

(2) 力学的特性

力学的特性を直接的に求めるための調査試験として、SBIFTおよび三軸CD試験を実施した結果、以下の傾向が見られる。

SBIFTの試験結果は、三軸CD試験の最低値付近で得られており、三軸試験結果より過小な定数を与える傾向にある。しかしながら、N値から推定される値よりもかなり大きな定数を与えることも明らかである。そのため、先端支持力に対しては、設計安全側の第一近似としての利用は可能であると考えられる。三軸CD試験の内部摩擦角は、かなり大きな値で得られているが、これは、1つのモールの円だけで原点を通る破壊線を引いているためであり、琉球石灰岩の固結力(セメンテーション)に対して過圧密領域で試験したことによると考えられる。三軸CD試験による残留強度が摩擦評価に有効と考えていたが、SBIFTのスムーズ(せん断面の形状を鋼管杭と同様に凹凸のない形状(図-1下段)で行う試験)の方が小さな値となり、実際の摩擦力発現機構を考えると、圧縮試験である三軸CD試験とは異なり、SBIFTのスムーズの試験結果は、摩擦評価には適用可能であると考えられる。

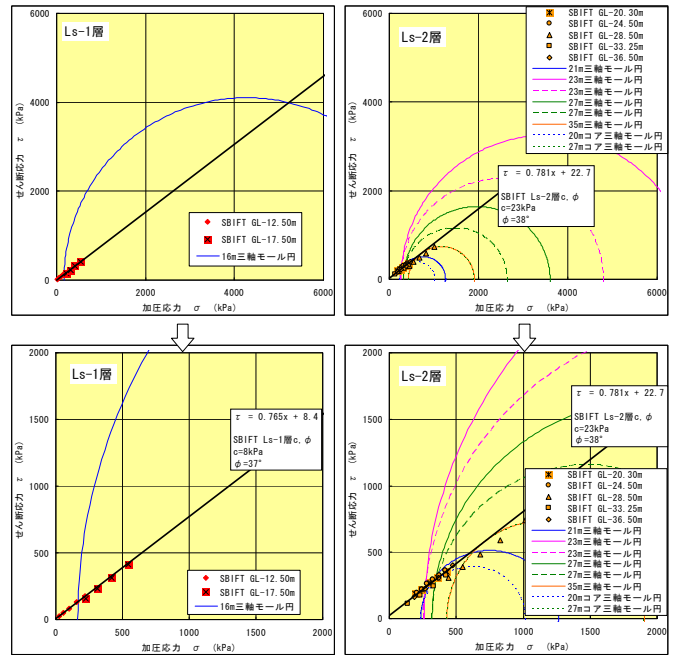


図-3 三軸試験結果とSBIFT結果との比較

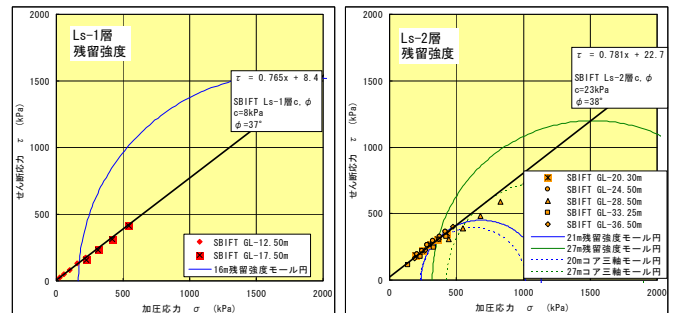


図-4 残留強度によるモール円とSBIFTの比較

3. 支持力算定手法の検討

基礎工の支持力算定法は、道路橋示方書による方法の他、杭基礎についてはN値を用いず、三軸試験やSBIFTによる地盤定数 C , ϕ を用いた地盤力学的手法がある。支持力算定手法の比較検討は、道路橋示方書のN値による方法を比較検討のベースと考え、その他の地盤力学的手法として、周面摩擦力度については一般式を、先端支持力度については地盤の圧縮性を考慮した安福式¹⁾による支持力算出式で検討した。この式は、「球空洞押し広げ理論」に基づくものであり、コンクリート杭などの非排土杭を対象としている。そのため、鋼管杭の場合は、完全閉塞条件(例えば、杭先端に中詰めコンクリート)としての試算となる。なお、周面摩擦力度、先端支持力度共に、地盤定数には、SBIFT試験結果(C , ϕ , E)をそのまま用いた。また、支持層が浅くなることも考えられることから、直接基礎(ニューマチックケーソン)も比較対照とした。なお、若狭地区で現在計画されている基礎形式は躯体のないパイルベント形式であるが、杭基礎の支持力算定法の違いによる直接基礎との経済比較を直接的に行いたい(基礎工だけの比較が純粋にできるように)ため、図-5の基礎工比較検討モデルに示したように、杭基

礎についてはフーチング、躯体を設けた下部工形式とした（パイルベント形式は、特に水上部で仮締め切り等が必要いため、直接基礎と比較すると経済的になる）。

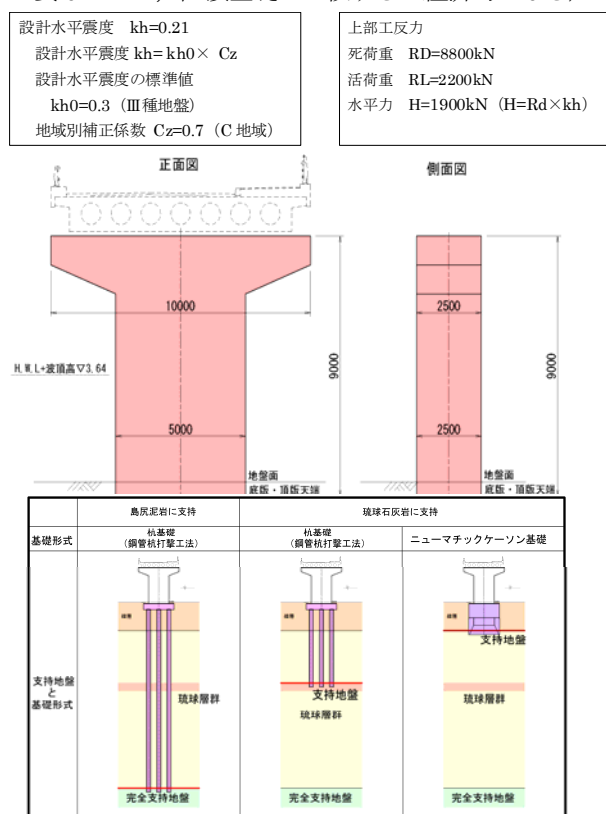


図-5 支持力比較検討モデル

①島尻層を支持層とした場合の杭基礎、②琉球石灰岩を支持層とした場合の杭基礎、③琉球石灰岩を支持層とした場合のニューマチックケーソン基礎の比較設計結果を表-2, 3にそれぞれ示す。なお、N値を用いた打込み杭の場合、杭の中間支持やケーソン基礎は従来採用されなかった考え方であり、参考までに示したものである。

・支持力算出方法の違い N値による設計に比べ、SBIFTの結果を用いて地盤定数を設定し、地盤力学的支持力式を用いて設計した方が杭基礎では杭本数が減り、ケーソンでは寸法、根入れが小さくなるため、経済的となる。ただし、琉球石灰岩支持の杭基礎に関しては、SBIFT結果を用いた設計では、拘束圧の小さな浅い深度での周面摩擦力が小さくなるため、N値で求めた周面摩擦力よりも小さくなり、結果的に杭本数が増える結果となっている。しかし、この場合の周面摩擦力については、N値による設計では過大評価の可能性（ $L_s=1$ 層では特に岩塊部が多いためN値を過大に評価している可能性が高い）が高く、N値による設計は信頼性に欠ける。また、周面摩擦力算出時には杭周グラウトを考慮していないため、実際にはN値による設計と同等あるいはそれ以上の周面摩擦力は期待できると考えられる。今後、杭の鉛直載荷試験により、この周面摩擦力算出法について検証、検討する必要がある。また、先端支持力についても、三軸試験時の微小ひずみ 10^{-3} レベルの変形係数を用いて安福式で算出すると、更に大きな先端支持力が

得られると考えられ、この琉球石灰岩支持の杭基礎については、更に経済的な設計が行える可能性があると考えられる。

・杭基礎の施工方法の違い 杭基礎については、打撃工法で施工できればかなり安価な工費で済むが、実際には琉球石灰岩の打ち抜きは困難である（特に $L_s=1$ 層）ため、先端拡大ビット+最終打撃+杭周グラウトのような工法が採用されると考えられる。この場合、実際には周面摩擦力の発現機構が打撃時とは異なるものと考えられるが、現時点では打込み杭としての周面摩擦力を算出している。打撃工法とケーソンを比較すると、荷重が小さいこともあって比較が困難であるが、先端拡大ビット+杭周グラウトなどの補助工法併用を考えると、ケーソン基礎も可能性として考えられる。

表-2 比較検討結果（基礎形状）

	鋼管杭基礎		ケーソン基礎	
	島尻泥岩支持	琉球石灰岩支持	琉球石灰岩支持	琉球石灰岩支持
N値による設計	 $\phi 1000$ $n=7$ 本 $L=46.5m$	 $\phi 1000$ $n=8$ 本 $L=20.5m$	 平面形状 $8.5 \times 8.5m$ 高さ $8.5m$	
SBIFT結果を用いた設計	 $\phi 1000$ $n=5$ 本 $L=46.5m$	 $\phi 1000$ $n=9$ 本 $L=20.5m$	 平面形状 $7.0 \times 6.5m$ 高さ $6.5m$	

表-3 比較検討結果（概算工事比率）

	支持力	鋼管杭基礎		ケーソン基礎
		島尻泥岩支持	琉球石灰岩支持	琉球石灰岩支持
N値による設計	周面摩擦力	9,003 kN	3,942 kN	設計地盤定数 $C=0$
	先端支持力	1,173 kN	3,755 kN	$\phi=28^\circ$
	極限支持力 R_u	10,176 kN	7,697 kN	
SBIFT結果を用いた設計	周面摩擦力	13,031 kN	3,144 kN	設計地盤定数 $C=8kN/m^2$
	先端支持力	1,173 kN	3,911 kN	$\phi=37^\circ$
	極限支持力 R_u	14,204 kN	7,056 kN	

表-4 比較検討結果（支持力）

	概算費用算出時の施工方法	鋼管杭基礎		ケーソン基礎
		島尻泥岩支持	琉球石灰岩支持	琉球石灰岩支持
N値による設計	打撃	0.53	(参考) 0.34	1.20
	先端拡大ビット+杭周グラウト	1.00	0.64	
SBIFT結果を用いた設計	先端拡大ビット+杭周グラウト	0.82	0.69	0.87

注）従来、N値を用いた打込み杭は採用されなかった考え方であるため、参考までに示したものである。

4. まとめと今後の課題

琉球石灰岩層は、当初の想定より強固な固結力を有しており、支持層として期待できれば、経済的な杭基礎の設計が可能であると考えられる。今後は乱さない試料を用いた室内試験や原位置試験結果に基づいて設定した地盤定数から算出した周面摩擦力や先端支持力の妥当性を検証することが課題として残っており、具体的な杭の載荷試験実施計画を作成し、実際の試験で得られたデータの比較検討を行う予定である。

参考文献

- 1) Yasufuku, N., Ochiai, H. and Ohno, S: Pile end-bearing capacity of sand related to soil compressibility, Soils and Foundations, Vol. 41, No. 4, pp59-71, Aug. 2001