

琉球石灰岩を支持層とする港湾構造物基礎の設計・施工技術について

具志 良太¹

¹那覇港湾・空港整備事務所(〒901-0001那覇市港町2-6-11)

那覇港内に分布する琉球石灰岩は砂礫状～塊状コアで採取され, N値のばらつきが大きく、また空洞が存在する問題がある。また、琉球石灰岩の層厚は海域で最大60mが確認されている。構造物の支持層はこれを貫通して下部の島尻層とすることが多いが、60mもの層厚を貫通して杭を打設することは困難を伴うため、琉球石灰岩を支持層にできれば、施工コストの縮減、工期の短縮に有意義である。そこで、筆者らは、琉球石灰岩の支持力を合理的に算出する手法の開発を目的として、琉球石灰岩の硬質な部分、軟質な部分で鋼管杭の衝撃載荷試験を実施した。その結果、琉球石灰岩の硬軟に間わらず1m程度の最終打撃では先端閉塞が見られないこと、先端閉塞を考慮しない地盤力学的支持力式(安福の式)、杭先端より1D(D:杭径)の範囲の平均的なN値を使用した半経験的支持力式の適用性が高いことがわかった。また、琉球石灰岩を支持層とした時に支持力不足となった場合の杭の施工方法及び支持力増大手法について検討を行った。

キーワード:琉球石灰岩、支持力、閉塞率、鋼管杭、杭の鉛直載荷試験

1. 琉球石灰岩を支持層とするための課題

沖縄県に広く分布する琉球石灰岩は、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、N値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「琉球石灰岩上に杭式基礎の構造物を築造する際には、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、那覇港に分布する琉球石灰岩の層厚は海域で最大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。

琉球石灰岩を支持層とするためには、調査、設計、施工の各段階で解決すべき課題が挙げられる。表-1にそれらの課題を示す。

(1) 調査段階

琉球石灰岩を対象とした地質調査結果では、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値分布からでは琉球石灰岩中に明確な支持層を見出すのは困

難な場合が多い。一方、蟻川ら¹⁾は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を示し、琉球石灰岩は全体にセメントーション効果により固結していることを報告した。このことから、弱層の分布、工学的特性の把握、そのための調査手法の確立などの課題を解決することで、琉球石灰岩を支持層とする可能性が高まることが考えられる。

また、空洞の位置、大きさを把握する手法の確立が課題である。

表-1 琉球石灰岩を支持層とするための課題

段階	目的	課題
調査	支持層の選定	N値のばらつき
		硬い地盤の連続性
		弱層の把握
		空洞の把握
設計	支持力の検討	最適な調査試験方法
		周面摩擦力の算出式
施工	支持力増大手法	先端支持力の算出式
		周面摩擦力増大手法
	施工の品質確保	先端支持力増大手法
		空洞充填方法
		杭周グラウトの方法
		先端閉塞方法の確立

(2) 設計段階

一般的な土砂を対象とした直接基礎や杭基礎の支持力は、①原位置での載荷試験(平板載荷試験や杭の鉛直載荷試験など)、②地盤力学的支持力式(静的支持力理論に基づいて求める方法)、③半経験的支持力式(N 値による港湾基準式など)の方法により推定されている。実務では N 値を使用した半経験的支持力式がよく用いられる。しかし、琉球石灰岩は固結状の部分が多く、孔壁が自立することで周面摩擦力がほとんどみられないことや、鋼管内土の膨張が少ないために先端閉塞が起こりにくいことが予想される。このような特殊土では、一般土に対応した半経験的支持力式の適用が可能かどうかが不明である。

一方、地盤力学的支持力式を用いる場合、どのような調査手法、どのような地盤パラメーターをどのような式に用いることが妥当であるのかの検討が必要となるが、確立された方法はない。

(3) 施工段階

琉球石灰岩のようなN値のばらつきの大きな地盤では、想定した支持層で支持力を得られず、支持力増大手法を適用することが多くなることが考えられる。また、空洞対策を行うにしても、琉球石灰岩でのグラウトなどの実績が少なく、施工が可能であるかの検討が必要となる。

本論文では、上記のような複数の課題のうち、鋼管杭の衝撃載荷試験をもとに琉球石灰岩の先端支持力の評価について記述する。

2. 地盤条件

杭の衝撃載荷試験を実施したのは、那覇港内の那覇市若狭地先の那覇臨港道路若狭2号橋P7橋脚である(図-1)。

事前に実施したボーリング調査による柱状図と N 値を図-2 に示す。N 値は、一般的に実施されている 1m 毎, 50cm 毎, 予備打ち, 本打ち, 後打ち時の 5cm 毎の打撃回数から換算した換算 N 値を示している。

琉球石灰岩は塊状コア主体の Ls-1 層, 砂礫状コアが主体の Ls-2 層, その双方が混じる Ls-3 層に分けられる。Ls-1 層上部では N 値 30 以上が層厚 2m 程度みられるが, 支持層とするには不足している。Ls-2 層, Ls-3 層では, 1m 間隔の N 値であれば N 値 30 以上が連続する支持層候補となりそうな部分も見られるが, 50cm 毎, 5cm 毎の N 値を見る限り, 琉球石灰岩の N 値はノコギリの刃のようにばらついており, 一般的な支持層の要件を満たさない。このような地層を支持層として考えためには, 硬質な部分だけではなく, N 値の小さい部分の工学的特性の評価が重要となる。そこで, 支持力の検討の対象とする深度を N 値の大/小の双方から選ぶこと

とし, GL-26.7m, GL-29.7m, GL-35.3m の 3 深度で載荷試験を行うこととした.

これらの深度では高品質サンプリングを実施し、三軸 CD 試験による強度定数の設定を実施した。表-2 に土質試験結果を示す。強度特性としては、N 値の小さな GL-26.7m・GL-35.3m の試料ではせん断抵抗角 $\phi = 30\text{--}38^\circ$ であったが、N 値の大きい GL-29.7m の試料は固結度が強く、軟岩のように粘着力 c で評価するのが妥当な結果となった。



図-1 試験位置案内図

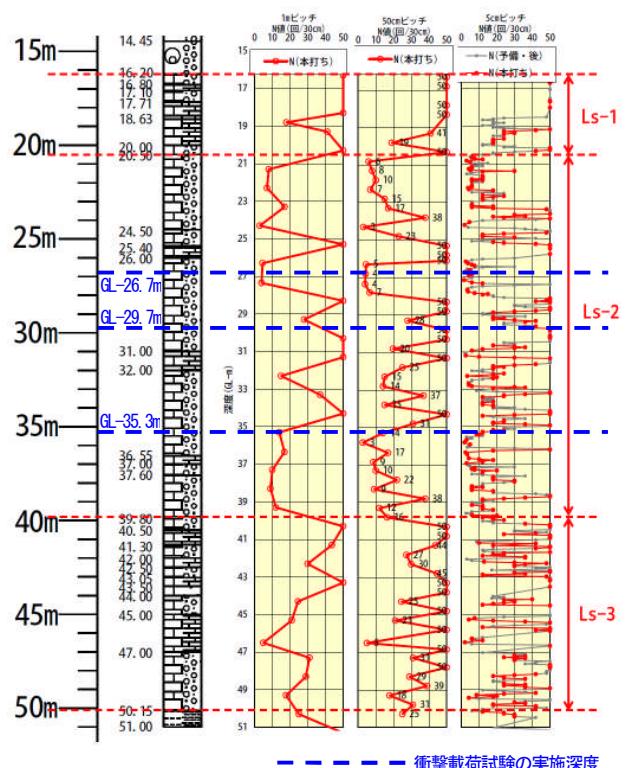


図-2 N値の深度分布図

3. 衝擊載荷試驗

(1) 試験杭

試験に用いた鋼管杭は、島尻層泥岩を支持層とする本設

表-2 載荷試験深度の土質試験結果

試験深度	GL-26.7m	GL-29.7m	GL-35.3m
平均N値(下1m間)	11	78	18
高品質サンプリング試料			
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.895	2.172	1.804
細粒分含有率 F_c (%)	37.3	31.8	22.2
粘着力 c (kN/m ²)	280	1,270	291
せん断抵抗角 ϕ (°)	38.9	0	30.3
限界摩擦角 ϕ'_c (°)	30	38	30
変形係数 E_{50} (MN/m ²)	37	459	22
変形係数 $E_{0.1\%}$ (MN/m ²)	101	862	82

杭で、杭施工の途中の所定の深度で施工を止め、衝撃載荷試験を実施することとした。杭径は $\phi 1000\text{mm}$ 、先端の肉厚は 30mm である。なお、近隣住民に対する騒音・振動に配慮し、杭の施工方法は全周回転による埋め込み鋼管杭としている。そのため、杭の先端には約70mmの刃先が突出している。

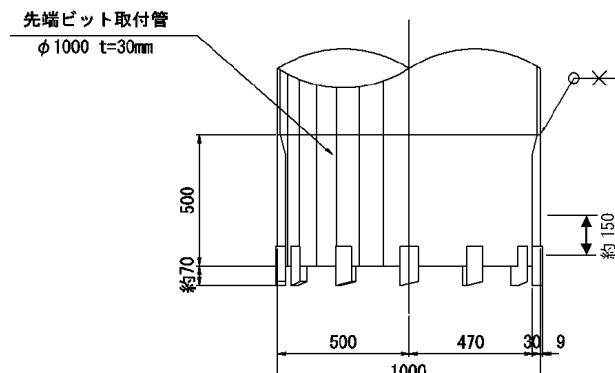
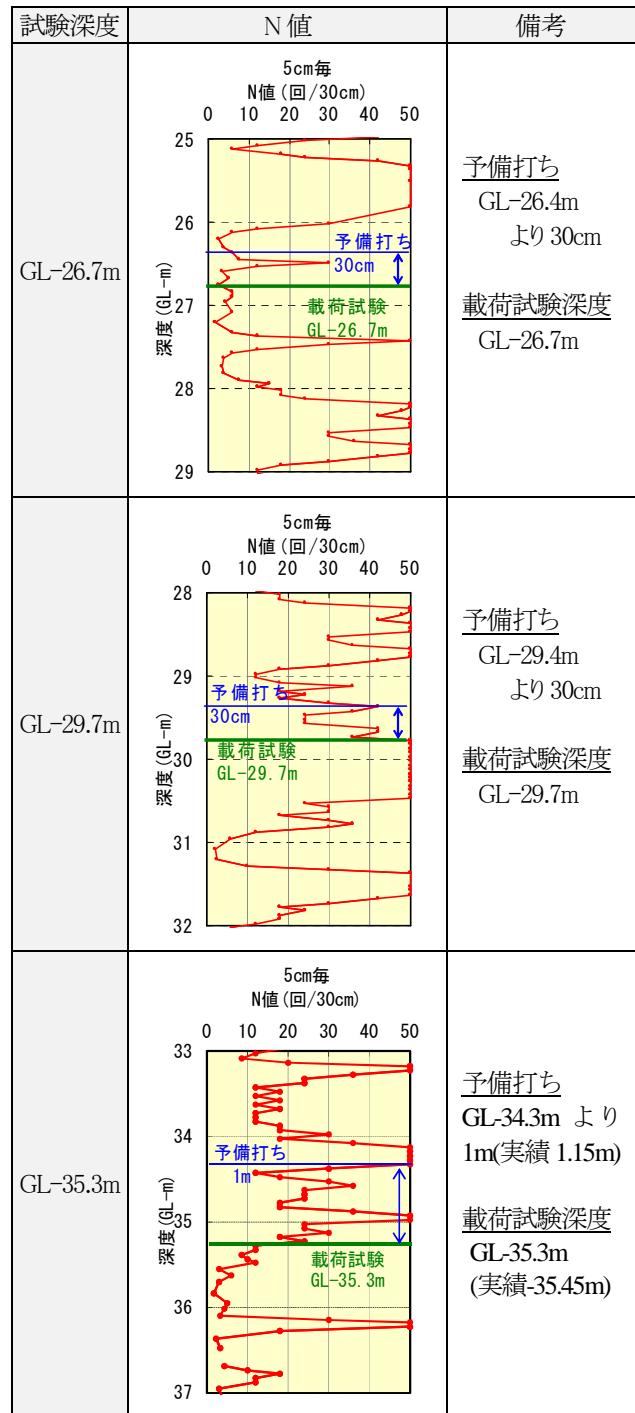


図-3 試験杭の先端ピット(単位mm)

(2) 試験深度

試験深度は表-3に示す3深度とした。GL-26.7m, GL-35.3m は N 値の小さい箇所、GL-29.7m は N 値の大きい箇所としている。また、通常の杭施工で実施される先端閉塞のための最終打撃と同等の処置として、試験深度に達する直前から「予備打ち」を実施した。予備打ち量は 30cm(先端ピットの突出量の 3 倍以上)を基本とし、GL-35.3m に関しては他の深度との比較を目的に、予備打ち量を 1m とした。

表-3 衝撃載荷試験深度



(3) 試験方法

衝撃載荷試験は地盤工学会基準(JGS 1816-2002)にしたがって実施した。なお、予備打ちから本打ちまでの作業フローを図-4に示す。

(4) 試験結果

表-4 は衝撃載荷試験(波形マッチング解析)による静的先端支持力の解析結果である。

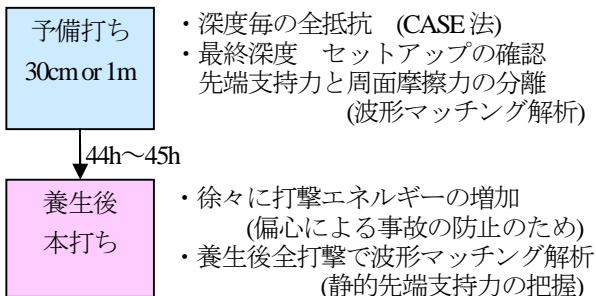


図-4 衝撃載荷試験のフロー

表-4 衝撃載荷試験による静的先端支持力

深度 (m)	平均 N 値 (下 1D)	内容	養生期間 (hr)	先端支持力 (MN)	セットアップ 率
GL- 26.7m	11	予備打	44	417	1.5
		養生後		643	
GL- 29.7m	78	予備打	45	1,863	1.0
		養生後		1,897	
GL- 35.3m	18	予備打	44	1,385	0.8
		養生後		1,165	

a) N 値と先端支持力

各深度の養生後の静的先端支持力は、GL-26. 7m は 643kN, GL-29. 7m は 1, 897kN, GL-35. 3m は 1, 165kN であった。先端支持力は GL-26. 7m(N=11) < GL-35. 3m(N=18) < GL-29. 7m(N=78) となり、杭先端下 1m の N 値に対応した先端支持力となっている。しかし、GL-29. 7m は他に比べて大きな N 値であるにも関わらず、先端支持力はそれほどの差がない。

b) 支持力の上昇(セットアップ)

予備打ちと養生後では、GL-26. 7m では支持力の上昇がみられるが、その他の深度では支持力の上昇がみられない。同じく琉球石灰岩を対象とした古宇利大橋の衝撃載荷試験結果²⁾でも同様の結果であり、琉球石灰岩では短期的な支持力のセットアップは見られないと考えてよさそうである。

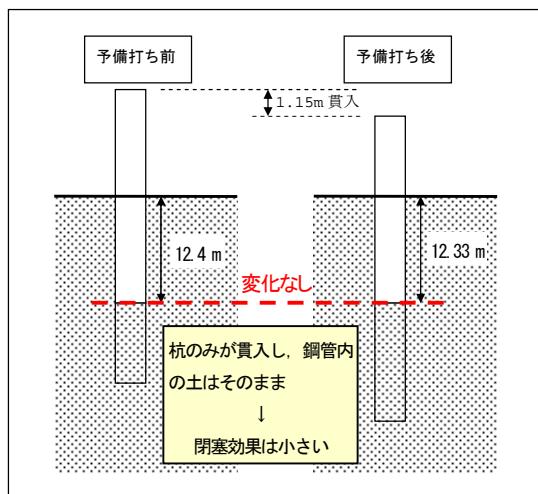


図-5 試験中の鋼管内土砂の変化

c) 先端閉塞

予備打ちを 1m 実施した GL-35. 3m では、衝撃載荷試験前後で杭中の土砂の変化を計測したが、杭を打ち込んでも鋼管内土砂の高さは変化しておらず、杭のみが地中に打ち込まれていく状況であった。このことから、琉球石灰岩においては、予備打ち量が 1m 程度では杭の先端はほとんど閉塞していないことが考えられる(図-5)。

4. 先端支持力の評価

(1) 検討に用いた支持力式

衝撃載荷試験結果から得られた先端支持力に対し、各種基準や地盤力学的手法による支持力計算式を用いて、那覇港に分布する琉球石灰岩への適用性を検討した。

先端支持力の推定方法としては、地盤力学的支持力式と半経験的支持力式が存在するが、設計に用いられる手法としては、N 値や一軸圧縮強度 q_u を用いる半経験的支持力式の利用が大半である。今回の支持力式の適用性の判断に関しては、これまでに実績の多い港湾基準の式(1a)(1b)で N 値および一軸強度 q_u を用いた。また、地盤力学的支持力式として、式(2a)に示す安福の支持力推定式³⁾を検討した。

半経験的支持力式(港湾基準)

$$R_p = 300NA_p \quad (1a)$$

$$R_p = 5q_u A_p \quad (1b)$$

ここに、 R_p :極限先端支持力(kN)

N :N 値

q_u :一軸圧縮強度(kN/m²)

A_p :杭先端の有効面積(m²)

地盤力学的支持力式(安福の式)

$$q_p = \frac{A}{1 - \sin \phi'_{cv}} \left\{ \frac{G / \sigma'_v}{B + D(G / \sigma'_v)^{-0.8}} \right\}^C \sigma'_v \quad (2a)$$

$$A = \frac{4(1 + \sin \phi'_{cv})(1 + 2K_0)}{(3 - \sin \phi'_{cv})} \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) \quad (2b)$$

$$B = \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \right) \tan \phi'_{cv} \quad (2c)$$

$$C = \frac{4 \sin \phi'_{cv}}{3(1 + \sin \phi'_{cv})} \quad (2d)$$

$$D = 50 \left(\frac{1 + 2K_0}{3} \tan \phi'_{cv} \right)^{1.8} \quad (2e)$$

ここに、 q_p :極限先端支持力度(kN/m²)

σ'_v :有効土被り圧(kN/m²)

G :せん断剛性(kN/m²)

K_0 :静止土圧係数

ϕ'_{cv} :限界状態の摩擦角(°)

(2) 使用した地盤定数

今回検討を行う地盤では、図-6 に示すように、先端の閉塞率が大きいと荷重は杭先端の地盤の深部まで到達してより厚い地層で支持力を発揮することになるが、先端が閉塞していない状況であると杭先端の実断面積のみで支持力を発揮していることが予想される。したがって、閉塞率の設定と地盤定数の設定(どの範囲まで考慮するか)については、切り離して考えることができない。

そこで、半経験的支持力式(港湾基準)に用いる平均 N 値に関しては平均する範囲を複数設定し、適用性を検討した。

地盤力学的支持力式(安福の式)の計算に用いる土質定数としては、載荷試験実施深度の三軸 CD 試験結果(E_{50} とひずみ 0.1%時の変形係数 $E_{0.1\%}$)を比較検討した。

表-5 使用した地盤定数

項目	設定方法	GL-26.7m	GL-29.7m	GL-35.3m
N 値	下 2t	6	144	2
	下 0.5D	5	117	18
	下 1D	11	78	18
	下 2D	30	69	15
$q_u(\text{kN/m}^2)$	三軸 CD	560	2,540	582
$\phi'_{\text{ax}}(\%)$	三軸 CD	30	38	30
E (MN/m ²)	三軸 E_{50}	37	459	22
	CD $E_{0.1\%}$	101	862	82

注) t:杭先端の肉厚(=30mm), D:杭径(=1000mm)

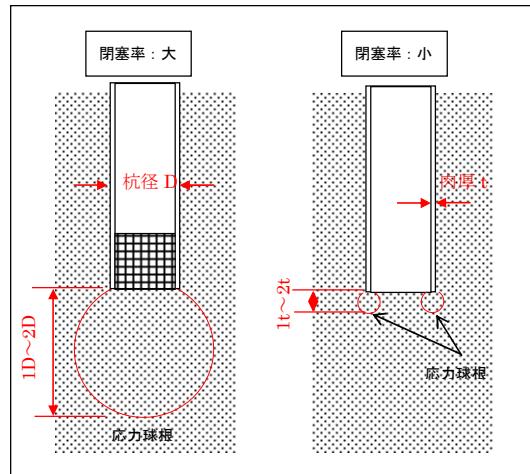


図-6 先端支持力の影響範囲の考え方

(3) 先端支持力の評価

各種支持力式から計算した先端支持力と養生後の実測先端支持力の関係を図-7 に示した。各グラフ内に赤線で示したのが実測の先端支持力である。棒グラフは各支持力式から得られる先端支持力で、下限値は閉塞率 $\alpha = 0.1164$ (閉塞なし; 今回の杭の実断面積相当), 上限値は $\alpha = 1.0$ (完全閉塞)の値を示している。

a) 地盤力学的支持力式(安福の式)

図-7 中の青の棒グラフで示される地盤力学的支持力式(安

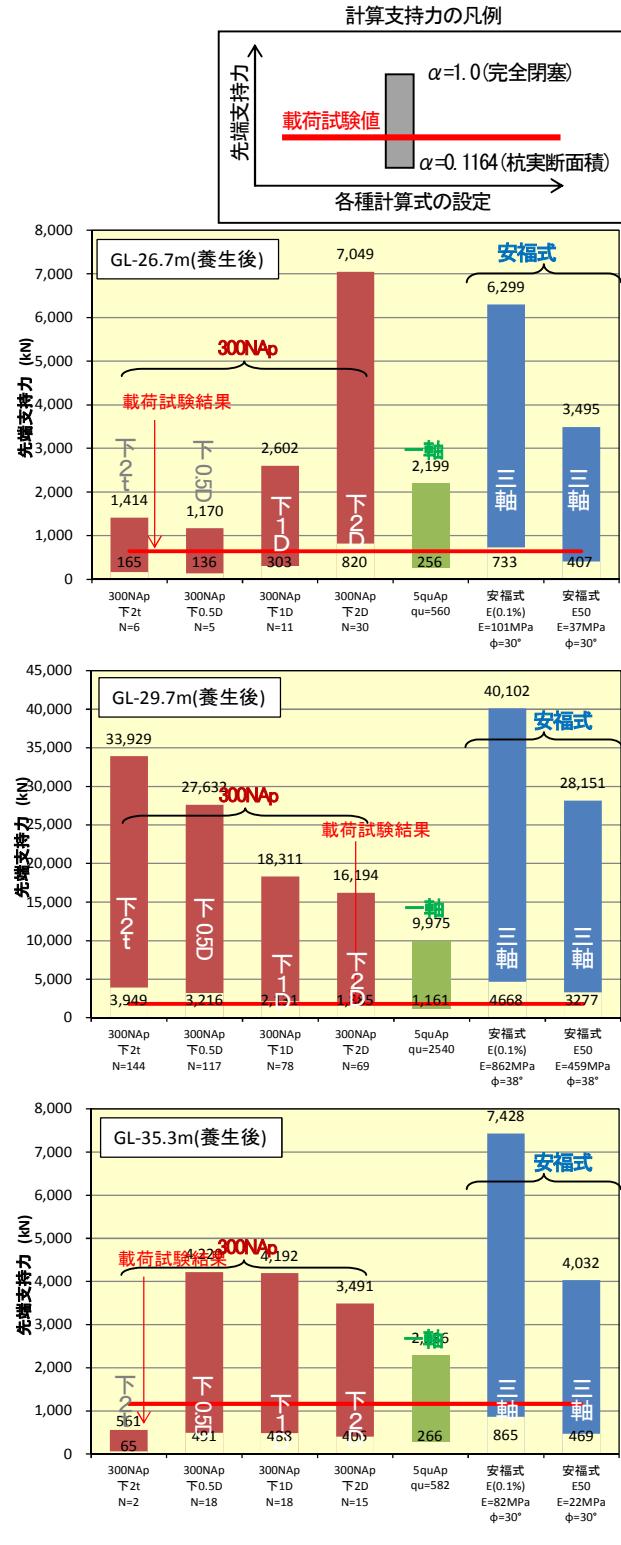


図-7 支持力検討結果

福の式)で計算される支持力は、載荷試験結果と比較すると、GL-29.7m ではやや支持力が過大評価となるが、硬さの異なるいずれの深度でも閉塞がほとんどないという結果になる。この傾向は鋼管内土砂の計測結果から導かれる「閉塞効果が小さい」という傾向と一致する。また、 E_{50} , $E_{0.1\%}$ のいずれの変形係数を用いても、計算支持力に大きな違いがない。

b) 半経験的支持力式(港湾基準)

図-7 中の赤の棒グラフで示される N 値によるものは、 N 値

を平均する範囲によって支持力計算結果が大きくなづく。その中で比較的適用性がよいと思われるには、N値を平均する範囲を杭先端下1D(=1m)としたものである。計算される支持力と載荷試験結果を比較すると、いずれの深度でも閉塞率が小さいという結果になる。

図-7中の緑の棒グラフで示される一軸圧縮強度によるものは、閉塞率が比較的大きめに計算され、計算支持力が過小評価となることが多い。例えばGL-35.3mでは閉塞率が40～50%としたときに載荷試験結果に近くなるが、これは他の支持力計算式の傾向と異なり、また管内土砂の計測結果から導かれる「閉塞効果が小さい」という傾向とも一致しない。

以上から、琉球石灰岩の先端支持力を求めるには土質試験結果を用いた安福式で、先端閉塞がない(杭の実断面積で支持)とするものが、最も適用性がよいと思われる。

(4) N値を用いた半経験的支持力式の適用性

実務的には、N値を用いた支持力評価式は重要である。図-8に杭先端下1D(=1m)の平均N値と実測先端支持力の関係を示した。図中には $R_p = \alpha 300 N_A p$ で、 $\alpha = 0.1164$ (今回の杭の実断面積相当)～ $\alpha = 1.0$ (完全閉塞)の線を表示している。図中の赤線で示したように、閉塞なし(杭の実断面積で支持)と考えるのが比較的適用性がよく、また設計安全側の設定になっている。

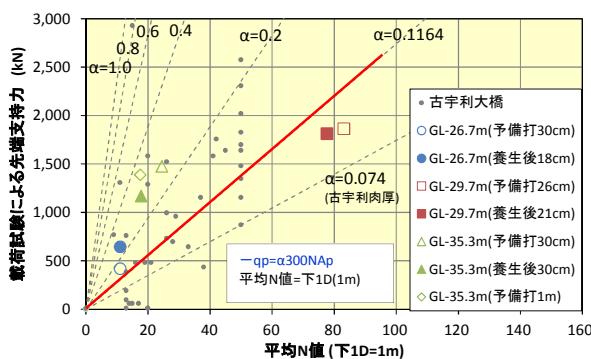


図-8 半経験的支持力式の適用性

同図には古宇利大橋での衝撃載荷試験結果事例²⁾(平均N値=下1D)を重ねている、古宇利大橋の事例は今回の試験結果よりも更に閉塞率が小さい傾向がみられるが、これは古宇利大橋の杭先端の肉厚が19mmと薄いためと考えられる。古宇利大橋の試験結果を $\alpha = 0.074$ (閉塞なし;杭の実断面積で支持)と考えると、今回の試験結果と同様に設計安全側の設定になる。

以上から、N値を用いた半経験的支持力式に関しては、港湾基準の $R_p = \alpha 300 N_A p$ に対して、杭先端より1D(D:杭径)の範囲の平均的なN値を使用し、先端閉塞を考慮しない(杭の実断面積相当の閉塞率 α とする)ことで、安全側の設定となるが、琉球石灰岩への適用性があると考えられる。

(5) 今後の問題点

今回の衝撃載荷試験では長期沈下の影響などが不明であり、静的な載荷試験による支持力確認が必要である。また、提案式(安福式)を用いる場合は土質試験結果の確認が必要であること、簡易式(港湾基準式)を用いる場合は提案式に比べばらつきが大きいので、N値で設計する場合は連続標準観入試験によるN値の精度向上が望ましい。

5. 支持力増大手法

那覇港での杭施工の実績では、琉球石灰岩を打ち抜くために先端拡大ビットが多用され、孔壁が自立することから周面摩擦がほとんど期待できない。また、琉球石灰岩では1m程度の最終打撃では先端閉塞がほとんどみられない。その対策として、周面摩擦増大として杭周グラウト、先端閉塞工法として杭先端への中詰めコンクリートの打設、双方に効果があると思われる鋼管ソイルセメント杭工法の検討が考えられる。しかし、いざれも琉球石灰岩を対象とした事例が少ないと、またグラウト注入量が計画よりもかなり多くなった事例⁴⁾があることから、試験施工による支持力確認が必要と思われる。

6. 結論

琉球石灰岩の支持力を合理的に算出する手法の開発を目的として、琉球石灰岩の硬質な部分、軟質な部分で杭の衝撃載荷試験を実施した。その結果、以下のことがわかった。

- ①琉球石灰岩の硬軟に関わらず、1m程度の最終打撃では先端閉塞はほとんど見られない。
- ②琉球石灰岩には、先端閉塞を考慮しない地盤力学的支持力式(安福の式)、杭先端より1D(D:杭径)の範囲の平均的なN値を使用した半経験的支持力式の適用性が高い。
- ③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必要である。

謝辞:本研究を遂行するにあたり、技術検討委員会が設置され、学識経験者・専門家から適切な助言が得られました。関係された方々のご尽力に感謝いたします。

参考文献

- 1) 蟻川辰美、佐々木暢彦:琉球石灰岩を支持層とする港湾施設の設計手法の検討、2008、平成20年度国土交通省国土技術研究会
- 2) 古宇利大橋第4期鋼管杭支持力管理調査検討業務報告書、2001.7、沖縄県土木建築部北部土木事務所
- 3) 安福規之、落合英俊、大野司郎:圧縮性を考慮した杭先端支持力の実用的評価式とその適用、2001、土と基礎、Vol.49 No.3 Ser.No.518, pp.12-15
- 4) 那覇臨港道路工事誌作成業務報告書 本編其の二(B)(調査・試験・実験編)、1986.3、那覇港工事事務所