

琉球石灰岩を支持層とする港湾構造物基礎の設計に関する検討

池内章雄*・酒井洋一**・与那嶺和史**・松岡義博***・小海尚文****

* (一財) 沿岸技術研究センター 調査役
 ** 内閣府沖縄総合事務局 那覇港湾・空港整備事務所
 *** 前(一財) 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員
 **** 基礎地盤コンサルタンツ株式会社

琉球石灰岩は未固結の砂礫状部から固結塊状部まで強度のばらつきが大きく、空洞部が点在する等、工学的な取り扱いが難しく、構造物の支持層はこれを貫通して、その下部の島尻泥岩層とするのが一般的であった。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、杭の打設には非常な困難が伴う。本研究は琉球石灰岩層を支持層とすることを目的として、施工途中の鋼管杭において杭の衝撃載荷試験を実施し、琉球石灰岩を支持層とする上での鋼管杭先端支持力の考え方を示すものである。

キーワード：琉球石灰岩、鋼管杭の支持力、杭の衝撃載荷試験、先端支持力

1. はじめに

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困難を伴う。そのため、琉球石灰岩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、工期の短縮に有意義である¹⁾。

本検討は事前の詳細な地盤調査と施工途中の鋼管杭の衝撃載荷試験結果に基づいて、杭の先端支持力の観点から、琉球石灰岩の支持力特性を解明し、琉球石灰岩を支持層とする杭の設計法のあり方を考えるものである。

2. 衝撃載荷試験による検証

那覇港（泊ふ頭地区）道路の下部工（P7 橋脚）において、中堀工法で施工途中の図-1 に示す鋼管杭に対し、琉球石灰岩における支持力発現のメカニズムを解明するため、衝撃載荷試験を実施した²⁾。

2.1 試験実施箇所の地盤条件

試験杭の対象箇所においては、事前に標準貫入試験、高品質サンプリングなど詳細な地盤調査を実施し、地盤状況の正確な把握に努めた。調査結果による柱状図と N 値を図-2 に示す。

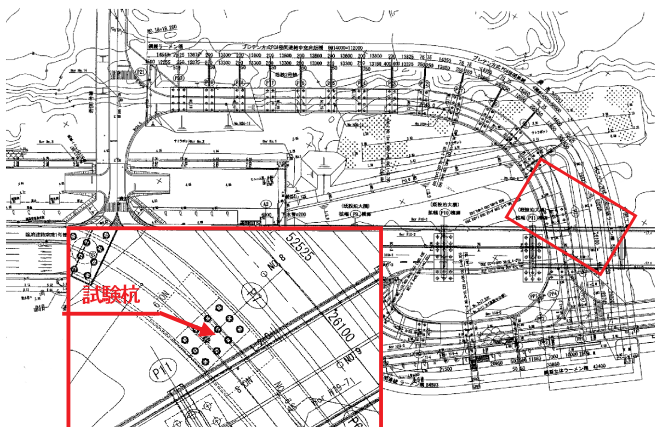


図-1 杭の衝撃載荷試験実施位置図

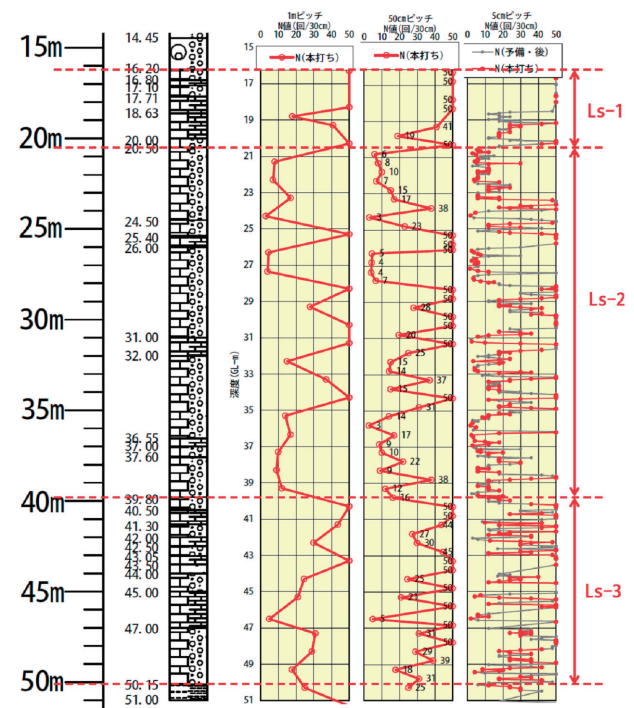


図-2 計測ピッチ別のN値の深度分布図

図中のN値は、一般的に実施されている1m毎の他、50cm毎、及び予備打ち・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値では激しくばらついていることが分かる。

表-2 鋼管杭の衝撃載荷試験深度状況

試験深度	N 値	備考
GL-26.7m	<p>5cm毎 N値(回/30cm) 0 10 20 30 40 50</p> <p>25 26 27 28 29</p> <p>深度 (GL-m)</p> <p>予備打ち GL-26.4m より30cm</p> <p>載荷試験深度 GL-26.7m</p>	<p>予備打ち GL-26.4m より30cm</p> <p>載荷試験深度 GL-26.7m</p>
GL-29.7m	<p>5cm毎 N値(回/30cm) 0 10 20 30 40 50</p> <p>28 29 30 31 32</p> <p>深度 (GL-m)</p> <p>予備打ち GL-29.4m より30cm</p> <p>載荷試験深度 GL-29.7m</p>	<p>予備打ち GL-29.4m より30cm</p> <p>載荷試験深度 GL-29.7m</p>
GL-35.3m	<p>5cm毎 N値(回/30cm) 0 10 20 30 40 50</p> <p>33 34 35 36 37</p> <p>深度 (GL-m)</p> <p>予備打ち GL-34.3m より 1m(実績 1.15m)</p> <p>載荷試験深度 GL-35.3m (実績-35.45m)</p>	<p>予備打ち GL-34.3m より 1m(実績 1.15m)</p> <p>載荷試験深度 GL-35.3m (実績-35.45m)</p>

2.2 試験深度と試験方法について

琉球石灰岩を支持層として考えるには、硬質な部分だけでなく、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値の大小の双方の地点から選ぶこととし、GL-26.7m、GL-29.7m、GL-35.3mの3深度で衝撃載荷試験を実施した。

試験に用いた鋼管杭は島尻層泥岩を支持層とする本設杭で、杭施工の途中の所定の深度(表-2)で施工を止め、試験を行った。杭径はφ1000mm、先端の肉厚は30mmであり杭の施工方法は全周回転による埋め込み鋼管杭である。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。杭の施工方法が先端ビット掘削のため、掘削直後の孔底面は乱されており、そのまま衝撃載荷試験を実施しても、地盤が本来持つ先端抵抗を確認することができない。そのため、施工後予備打ちを実施し、上・中層では30cm、下層では上・中層の結果により予備打ち長を100cmとし予備打ち時も計測した。予備打ち後24時間以上の養生期間を設定したが、結果として各深度45時間程度となった。

2.3 試験結果のまとめ

試験結果の解析には、「杭を弾性体、地盤の静的抵抗成分をバネとスライダ(弾塑性)、動的抵抗成分をダッシュポットでモデル化し、一次元波動理論に基づいて、杭体を伝播する応力波を特性曲線により解析する波形マッチング解析」を用いた。

また、波形マッチング解析では、全抵抗から動的抵抗を取り除いて得られた静的抵抗は周面摩擦力と先端支持力に分離されるが、本検討では先端支持力のみ注目して整理した結果を表-1に示す。

表-1 衝撃載荷試験による静的先端支持力

深度 (m)	平均N値 (下ID)	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 養生後	45	1,863 1,897	1.0
GL-35.3m	18	予備打	44	1,385	0.8
		養生後		1,165	

衝撃載荷試験結果による静的先端支持力と杭先端部の平均N値との関連、養生による先端支持力の上昇、及び杭の先端閉塞について以下にまとめた。

・N値との関連

各深度の養生後の静的先端支持力は、上層GL-26.7mは643kN、中層GL-29.7mは1,897kN、そして下層GL-35.3mは1,165kNであった。先端支持力はGL-29.7m(N=78) > GL-35.3m(N=18) > GL-26.7m(N=11)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、中層のGL-29.7mは他に比べてかなり大きなN値であるにも関わらず、先端支持力はそれほど差がない。

・支持力の上昇（セットアップ）

予備打ちと養生後では、下層の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ため、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られる。

・先端閉塞

予備打ちを1m実施した下層のGL-35.3mでは、衝撃載荷試験前後で杭内土砂高さの変化を計測したが、杭の打設後も管内土砂の高さは変化せず、杭のみが地中に打ち込まれる状況であった。このことから、琉球石灰岩では杭の先端はほとんど閉塞していないと推測される。

3. 鋼管杭の先端支持力の評価

3.1 検討に用いた支持力式と地盤定数

衝撃載荷試験結果から得られた杭の先端支持力に対し、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、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）

$$R_p = 300NA_p \tag{1a}$$

$$R_p = 5q_u A_p \tag{1b}$$

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）

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

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

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

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

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

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 (°)

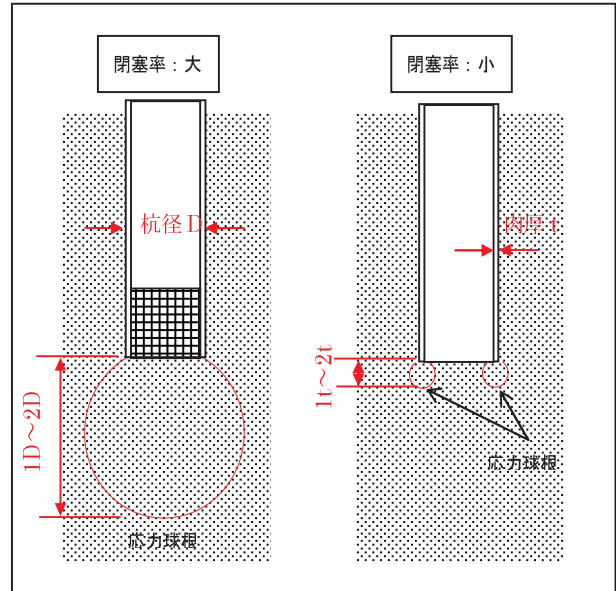


図-3 杭の先端における影響範囲の考え方

図-3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深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ケース設定し、適用性を検討することとした。

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、事前の詳細な地盤調査結果より得られた実施深度毎の三軸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-3 杭の支持力式に用いた地盤定数

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 (kN/m ²)	三軸CD	560	2,540	582	
ϕ'_{cv} (°)	三軸CD	30	38	30	
E (MN/m ²)	三軸CD	E_{50}	37	459	22
		$E_{0.1\%}$	101	862	82

注) t:杭先端の肉厚 (=30mm), D:杭径 (=1000mm)

3.2 杭の先端支持力の評価

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-4に示す。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を表しており、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。

・地盤力学的的支持力式（安福の式）

図-4の青の棒グラフで示す地盤力学的的支持力式（安福の式）で計算される支持力は、载荷試験結果と比較すると、硬さの異なるいずれの深度でも閉塞がほとんどないと推定され、これは载荷試験時の管内土砂の計測結果から導かれた杭の閉塞がないという結果とも一致する。中層GL-29.7mではやや支持力が過大評価となる。 E_{90} 、 $E_{0.1\%}$ のいずれの変形係数を用いても、先端支持力の計算値には大きな違いはないと言える。

・半経験的支持力式（港湾基準）

図-4の赤の棒グラフで示すN値による計算値は、平均N値の範囲（肉厚の2倍から杭径の2倍までの4ケース）によって支持力の計算値は大きくばらつく。この結果から現実的な適用性を考慮すると、N値を平均する範囲を杭先端下1D（=1m）とし、先端閉塞がなく杭の実断面積で支持する計算値の算出式を簡易式とすることも考えられる。

図-3の緑の棒グラフで示される一軸圧縮強度による計算値は、最下層GL-35.3mにおいて閉塞率が40~50%とした計算値が衝撃载荷試験で得られる値にほぼ等しい結果となった。しかし、これは载荷試験時の管内土砂高の計測結果から導かれる閉塞効果が認められないという結果と一致しない。

以上の結果から、現段階では琉球石灰岩の先端支持力は先端閉塞がない杭の実断面積で支持するとして、土質試験結果を用いて「安福の式」にて算出することが最も妥当であると判断する。

4. おわりに

琉球石灰岩を支持層とすることを目的とした詳細な地盤調査・杭の衝撃载荷試験に基づいて、杭の先端支持力を主として検討した現段階での結果を以下に示す。

- ・連続的な（5cmピッチ）標準貫入試験は地盤のばらつきをある程度表現できる手法として評価できる。
- ・琉球石灰岩では杭の先端閉塞効果は認められない。また、短期間（2日間）でのセットアップも確認できなかった。
- ・琉球石灰岩の杭の先端支持力の算定式は、先端閉塞を考慮しない（杭の実断面積）地盤力学的的支持力式（安福の式）が最も適切である。
- ・簡易式として杭先端より1D（D:杭径）の範囲の平均N値を用いた半経験的支持力式の適用も考えられる。
- ・支持力増大手法については、杭周グラウトや先端閉塞が考えられるが、試験施工による確認が必要である。

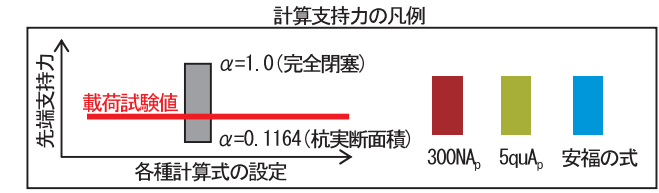
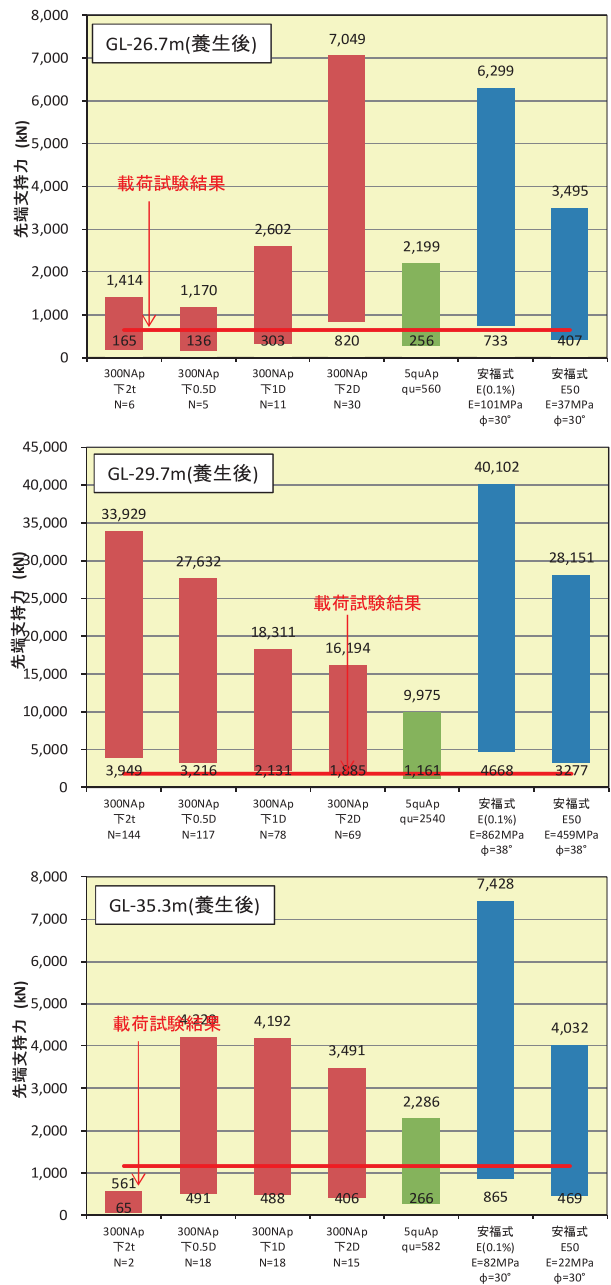


図-4 鋼管杭の先端支持力検討結果

参考文献

- 1) 納見昭広・根木貴史：那覇港内における琉球石灰岩層の支持力特性について 沿岸技術研究センター論文集 No. 8 (2008)。
- 2) 那覇港（泊ろ頭地区）道路下部工（P7）载荷試験業務 杭の衝撃载荷試験報告書 平成22年11月 五洋建設・みらい建設工業特定建設工事共同企業体。
- 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.