

構造物基礎設計における琉球石灰岩中の空洞の影響について

基礎地盤コンサルタンツ (株) 正会員 ○白井 康夫
 基礎地盤コンサルタンツ (株) 正会員 調 修二
 (財) 沿岸技術研究センター 松岡 義博

1. はじめに

沖縄県に広く分布する琉球石灰岩は、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扱いが難しく、これまでは『琉球石灰岩上に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に支持層させる』という考え方が一般的であった¹⁾。しかし、新しい技術を積極的に導入した調査・試験²⁾によって、これまでボーリングコアにより礫状、砂質土状、泥質状と考えられていた琉球石灰岩についても、明らかなセメンテーション効果が確認され、また、その工学的特性についても明らかになってきており、琉球石灰岩を支持層とすることに道が開けつつある¹⁾。一方、琉球石灰岩中の空洞は、琉球石灰岩を支持層とする上で避けられない問題であり、那覇港内(海底面下)においても最大 1.8m 厚の空洞がボーリングにより確認されている。そこで、有限要素法 (FEM 解析) を用いて琉球石灰岩を支持層とした際の空洞の存在による構造物基礎への影響について検討した。具体的には、構造物基礎と空洞の位置関係を変えて地盤要素の安全率分布等の変化を把握し、基礎への影響を検討した。

2. 検討条件

地盤モデルは参考文献 1) に示されている若狭地区の地盤調査結果より、図-1 のような二次元平面ひずみモデルとし、構造物基礎にはケーソン基礎 ($H=11.5\text{m}$, 底面寸法 $6.1 \times 7.1\text{m}$) を仮定した。海底面から 9.6m までが沖積砂礫層 Ag , その下位が琉球石灰岩 Ls であり、 $GL-47.2\text{m}$ 以深が島尻泥岩 T である。また、空洞は、那覇港内で確認されている最大の厚さ $h=1.8\text{m}$ を想定し、幅は基礎底面幅 $B(=6.1\text{m})$ と仮定した。検討に用いた地盤定

数は表-1 のとおりであり、SBIFT や三軸 CD 試験結果¹⁾等より設定した。なお、琉球石灰岩の強度定数については、GP サンプリング試料を用いた三軸 CD 試験結果より、残留強度を用いて $c=(\sigma_1-\sigma_3)/2$ とした。また、今回の解析では、ケーソンは線形弾性モデルとし、琉球石灰岩を含む地盤モデルはモール・クーロン規準を用いるが、せん断破壊時および引張り破壊時には弾性係数 $E=0$, ポアソン比 $\nu=0.5$ となる弾完全塑性モデル(バイリニア弾性モデル)を用いた。空洞と基礎の位置関係は図-2 のとおりであり、空洞はケーソン直下に $1B$, $2B$, $3B$ の位置にあるものと仮定した。また、ケーソン天端には、レベル 1 地震時の鉛直力 $V=9700\text{kN}$, 水平力 $H=2100\text{kN}$, 曲げモーメント $M=15200\text{kN}\cdot\text{m}$ を作用させた。

表-1 検討に用いた地盤定数

地層名	単位体積重量 $\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	粘着力 $c(\text{kPa})$	せん断抵抗角 $\phi(^{\circ})$	変形係数 $E(\text{MPa})$	ポアソン比 ν
ケーソン	21.2	12000	0	24500	0.2
Ag	20.0	0	29.2	68	0.3
$Ls-1$	20.0	450	0	250	0.3
$Ls-2$	20.0	450	0	250	0.3
$Ls-3$	20.0	450 </td <td>0</td> <td>250</td> <td>0.3</td>	0	250	0.3
T	20.0	250	0	200	0.3

3. 検討結果

3.1 空洞がない場合

図-3 に空洞がない場合の荷重載荷時の鉛直応力増分の分布図を示す。鉛直力 V のみを作用させた場合は応力球根が左右対称に、 H, M も作用させた場合には、左に偏心する。図-4 に要素安全率分布図を示す。琉球石灰岩は $\phi=0$ としているため、要素安全率 F_s は $F_s=c/\tau$ [ここに、 τ :せん断応力 $=(\sigma_1-\sigma_3)/2$] で表される。 V のみ作用した時にはケーソン隅角部、およびケー

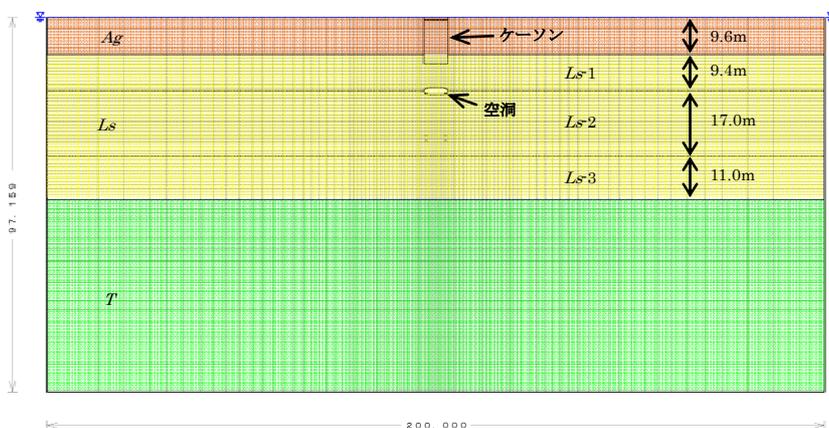


図-1 解析モデル

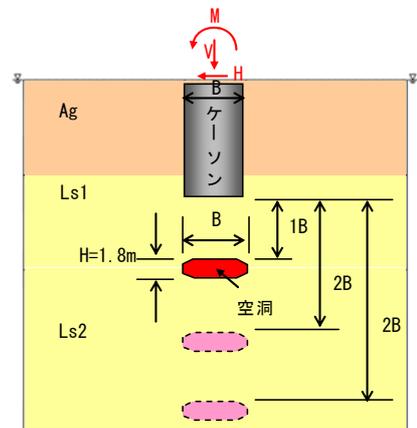


図-2 構造物基礎と空洞の位置関係

キーワード 琉球石灰岩, 空洞, FEM 解析, 基礎設計, ケーソン

連絡先 〒814-0022 福岡市早良区原 2-16-7 基礎地盤コンサルタンツ (株) 九州支社技術部 TEL092-831-2512

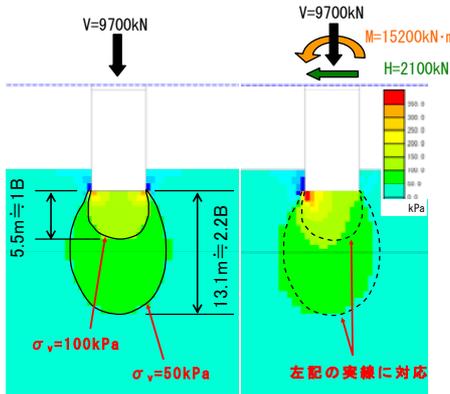


図-3 空洞がない場合の増加応力分布図

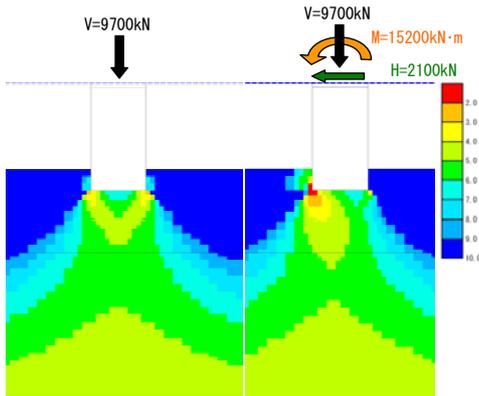
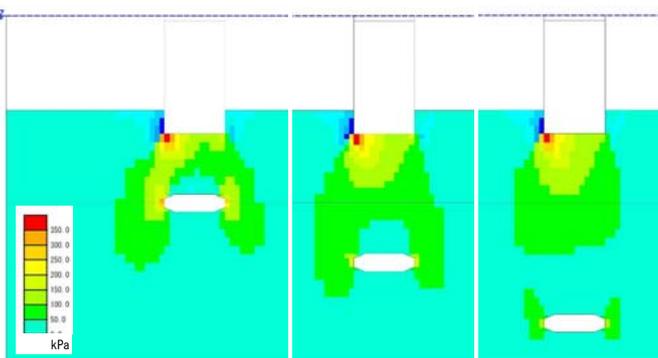


図-4 空洞がない場合の要素安全率分布図

ソソ底面周辺地盤でくさび状に周囲に比べて安全率の小さな範囲がみられる。そして、 H, M 作用時には、くさびは無くなり、左側隅角部に要素安全率の小さな範囲が集中する。

3.2 空洞が存在する場合

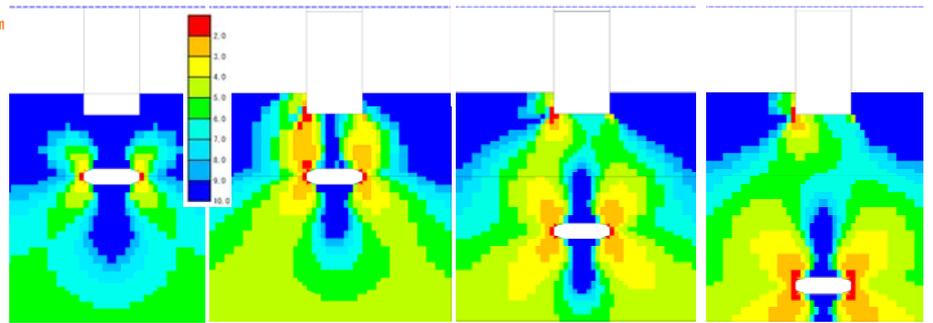
図-5(a)にケーソン直下 $1B$ 位置に空洞が存在する場合の、 $V \cdot H \cdot M$ 載荷時の増加鉛直応力の分布図を示した。鉛直応力の増加範囲は球根状とはならず、空洞天端でアーチ状に広がる。また、空洞天端での増加応力は小さく、空洞側面で大きい。



(a) 空洞位置 $1B$ (b) 空洞位置 $2B$ (c) 空洞位置 $3B$

図-5 空洞が存在する場合の増加応力分布図

図-6(a)にケーソン直下 $1B$ 位置に空洞が存在する場合の、ケーソン施工前(空洞生成時)の要素安全率の分布図を示す。空洞側面から左右対称に要素安全率の小さな範囲が広がり、空洞側面部では局所的に要素安全率が 2.0 を下回る箇所がみられる。次に、図-6(b)に V, H, M 作用時の安全率分布図を示した。(a)図のケーソン施工前に比べて要素安全率 F_s の低下範囲は広がり、



(a) $1B$;施工前 (b) 空洞位置 $1B$ (c) 空洞位置 $2B$ (d) 空洞位置 $3B$

図-6 空洞が存在する場合の要素安全率分布図

$F_s < 3.0$ の範囲も空洞側面とケーソン下端で連続する。一方、(c)図および(d)図のケーソン底面から空洞が $2B, 3B$ 離れた場合には、ケーソン底面と空洞部とで $F_s < 3.0$ の範囲は連続せず、 $2B$ の場合で $F_s > 4.0$ 、 $3B$ の場合で $F_s > 5.0$ となる。また、空洞部での増加応力は図-5(b)や(c)図のように、 $1B$ の場合(最大 300kPa 程度)に比べて小さく、 $50 \sim 100\text{kPa}$ 程度と小さい。

4. まとめ

二次元弾塑性 FEM 解析結果をまとめると下記の通りである。

- ・ 空洞周辺での増加応力は、空洞天端のアーチ効果により空洞天端ではほとんど増加はなく、空洞側面に増加応力が集中する。
- ・ そのため要素安全率は、空洞がない場合、ケーソン隅角部周辺地盤で最も要素安全率の小さな箇所が現れるが、空洞が存在する場合には、空洞側面部でも小さくなる。
- ・ ケーソン直下 $1B$ 位置に空洞が存在する場合には、ケーソン底面と空洞部で $F_s < 3.0$ の範囲が連続し、空洞部での増加応力は最大 300kPa と大きい。一方、空洞が $2B, 3B$ と離れたと要素安全率は大きくなり、増加応力も小さくなる。

構造物基礎設計で考える安全率と、地盤要素の安全率の定義や考え方は異なるものの、要素安全率 $F_s = 3.0$ という値および、鉛直応力増分の分布傾向から考えると、ケーソン直下 $1B$ に空洞が分布する場合には基礎に影響を与える可能性が考えられ、逆に $2B$ 以上離れていると大きな影響はないと推察される。したがって、地盤調査時には、基礎底面から $2B$ 範囲内の空洞の存在は把握しておく必要があり、空洞の存在が確認された場合には、空洞を充填する等の対策が必要と考える。

5. おわりに

今回の検討は、那覇港内のある地盤をモデルケースとして検討したものである。したがって、荷重条件や空洞の大きさによって空洞の存在による基礎への影響範囲も変わる可能性がある。よって、今後は荷重の大きさや空洞の大きさ、また、空洞が水平方向にずれた場合などの検討も必要と考えている。

参考文献

- 1) 佐々木, 蟻川, 前幸地: 琉球石灰岩を支持層とする港湾施設の設計手法の検討, 基礎工, 37-3, pp.73-77, 2009.
- 2) 上原: 島嶼県沖縄での地盤工学物語, しまたてい, No.52, pp.16-19, 2010.