

空洞を有する地盤の支持力特性に関する数値解析

Numerical analysis on the bearing capacity behavior of footing foundation above void

清住真*・彭芳楽**・大内正敏***・日下部治****

Makoto KIYOSUMI, Fang-Le PENG, Masatoshi OHUCHI and Osamu KUSAKABE

* 工修 (株)白石 技術本部技術開発部 (〒101-8588 東京都千代田区神田岩本町 1-14)

** 博士 (工学) (株)白石 技術本部技術開発部 (同上)

*** 技術士 (株)白石 技術本部技術開発部 (同上)

**** Ph.D 東京工業大学土木工学専攻 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1)

The cavity effect on the bearing capacity of footing foundation was investigated analytically by using the elasto-plastic 2D FEM analysis. Several factors, such as the void location and the void shape, affect the bearing capacity behavior of footing foundation. The load and settlement relation of footing foundation was analyzed for different conditions of the void. In the FEM analyses, the geomaterial was supposed as an elastic perfectly plastic material. The analytical results indicated that there is a critical effect region for the void under the footing foundation. Only when the void is located within this region, the bearing capacity of footing foundation varies considerably with the void location. In addition, it was also found that the bearing capacity behavior depends on the cavity shape, such as circular and square.

Key Words : Cavity, Footing foundation, Numerical analysis

1. はじめに

沖縄地方には、サンゴ礁堆積物で構成された琉球石灰岩層と称される地層が広く分布し、基盤層となる島尻層泥岩の上に 20m から 50m の厚さで堆積している。琉球石灰岩層の主な特徴¹⁾としては、(1) 深さと水平方向に対して N 値が不規則に分布、(2) 固結層と未固結層が交互に成層する多層性地盤、(3) 数多くの空隙と空洞の存在の 3 点である。これより、琉球石灰岩層は構造物基礎の支持層として、不適切であると言われている。

近年、沖縄地方ではインフラストラクチャーを整備するため、離島架橋などの大型プロジェクトが盛んに実施されている。しかし、琉球石灰岩層の支持力特性に未解明な部分が多いため、基礎の設計方法に様々な問題点を抱えている。それは、基礎の支持層を従来より浅く琉球石灰岩層とした時、基礎の支持力を算定することが困難になる。例えば、道路橋示方書²⁾ (以下、道示と略) に記載されている基礎の極限支持力公式からは、空洞を有する地盤や互層地盤の基礎の支持力を算定することは困難である。これに対して、基礎の支持層を基盤層となる島尻層泥岩とした時、その出現深度が深い場合には、基礎の根入れが深くなるため不経済となる。従って、琉球石灰岩層の支持力特性を解明し、沖縄地方においてこれ

を支持層とするより合理的で経済的な基礎の設計方法を確立することが望まれる。本研究の目的は、琉球石灰岩層を支持層とする基礎の設計方法および地盤の変形と破壊メカニズムに関する数値解析方法の提案である。

研究を進めるに当たり、空洞を有する粘性土地盤の支持力評価に関する Wang ら^{3), 4), 5)}と望月ら⁶⁾の文献を調査した。両者の研究は、模型実験と FEM 解析を比較し、FEM 解析が模型実験を精度良く再現している。両者の解析での地盤の降伏基準は、Wang らが Drucker-Prager の条件とし、望月らが Mohr-Coulomb の条件としている。両者は地盤を弾完全塑性体としていることから、筆者ら⁷⁾は地盤を弾完全塑性体とした 2 次元弾塑性 FEM 解析にて、空洞が存在する地盤の支持力評価を検討した。検討項目は、空洞の幅と深さが支持力に及ぼす影響である。その結果、空洞の幅が大きくなるほど、そして、空洞がより浅い位置に存在するほど、基礎の支持力は著しく低下した。これに対して、空洞の幅が小さくなるほど、そして、空洞がより深い位置に存在するほど、空洞が支持力に及ぼす影響が小さくなる。そして、空洞がある条件を満たすと、地盤内に空洞が存在しても支持力に全く影響を及ぼさなくなることを確認した。本論文ではこれらの結果を踏まえて、空洞の位置が支持力と地盤の破壊メ

カニズムに及ぼす影響と空洞形状による支持力の差について検討した。そして、空洞が支持力に及ぼす影響コンター図を用いて、空洞を有する地盤の基礎の支持力を簡易に算定することができた。

2. FEM 解析の概要

2.1 検討項目および解析ケース

図-1 は、基礎と空洞の概略図である。空洞の諸元が基礎の支持力に及ぼす要因を、(1) 空洞の幅 W 、(2) 空洞の高さ H 、(3) 空洞の上端までの深さ Y 、(4) 基礎の中心線から空洞の図心までの離隔距離 X 、(5) 空洞の形状、(6) 空洞の断面積 A 、以上の 6 項目にまとめた。

空洞の位置 (X と Y) が支持力に及ぼす影響の検討は、 $W/B=1.0$ ($W=2\text{m}$, $B=2\text{m}$) の正方形の空洞について、 X と Y を 0m から 10m まで 2m づつ 6 通りに変化させた。 X と Y の組合せは 36 通りとなる。

空洞の形状が支持力に及ぼす影響の検討は、同じ断面積 A の正方形と円形の空洞を対象とした。ここで、形状が異なる 2 つの空洞の幅 W と高さ H は、断面積 A が同じであれば円形の空洞の方が大きくなる。なお、円形空洞は使用プログラム⁸⁾の都合上、正 32 角形で近似した。空洞の断面積 A は、 0.78m^2 , 3.14m^2 , 7.07m^2 , 12.57m^2 , 19.63m^2 , 28.27m^2 の 6 ケースである。空洞の離隔距離 X は 0 とし、空洞の深さ Y を 1m , 2m , 4m , 6m , 8m , 10m と 6 通りに変化させて、それぞれの深さ Y における空洞形状が支持力に及ぼす影響について検討した。よって、全解析ケースは 72 通りとなる。

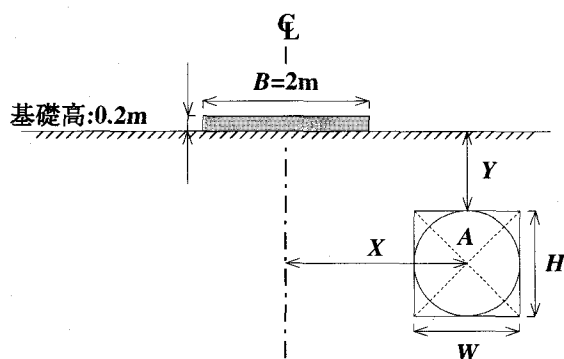


図-1 基礎と空洞の概略図

2.2 FEM 解析モデル

地盤モデルは、単一層の地盤に空洞を作成した。図-2 に解析に用いた平面ひずみ有限要素分割図を示す。要素は節点数が 15 で応力点数が 12 の三角形形状とした。積分法は、Gauss 数値積分である。要素数は 511、節点数は 4233、応力点数は 6132 である。ただし、これらの値は空洞の形状やサイズにより若干異なる。解析領域の境界条件は底面の鉛直と水平変位を固定し、側面は水平変位を固定した。直接基礎の底面は、地盤と基礎底面の節点を

共有する完全粗の状態とした。

琉球石灰岩層での空洞は固結層に存在することから、地盤定数は岩盤の値を使用した。ただし、固結層の詳細な物性値が不明であるため、電力中央研究所が定めた岩盤分類⁹⁾の岩級区分 C_L から D の範囲の値と仮定した。表-1 は、解析に用いた地盤と直接基礎の物性値である。直接基礎は、線形弾性体と仮定してコンクリートの物性値を用いた。地盤は Mohr-Coulomb モデル (弾完全塑性体) と仮定して地盤定数を算出した。ここで、軟岩の引張強度 σ_t は粘着力の $1/2$ とし¹⁰⁾、ダイレイタンシー角は式(1)により算定した。地盤の降伏基準は Mohr-Coulomb モデルに従い、塑性ひずみは式(2)の非関連流れ則より算出した。ここで、式中の g_i は塑性ポテンシャルであり、式(3)、式(4)および式(5)から算定される。式中の λ は、 $\lambda > 0$ の比例定数である。

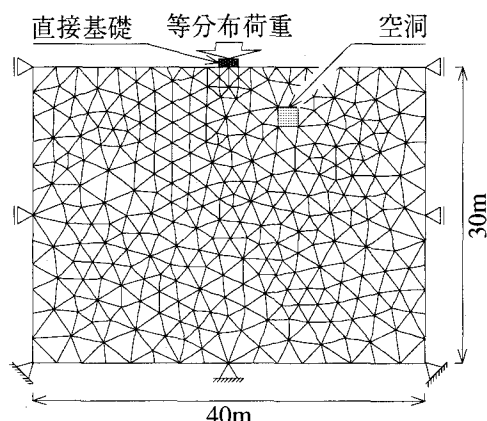


図-2 平面ひずみ有限要素分割図

表-1 解析に用いた地盤と基礎の物性値

物 性 値	地盤	平板基礎
単位体積水中重量 γ' (kN/m^3)	9	14
変形係数 E (kN/m^2)	4.9×10^5	3.0×10^7
ポアソン比 ν	0.3	0.1
粘着力 c (kN/m^2)	980	—
引張強度 σ_t (kN/m^2)	490	—
内部摩擦角 ϕ (deg)	26.5	—
ダイレイタンシー角 φ (deg)	0	—

$$\varphi = \phi - 30^\circ \quad \text{ただし, } \varphi \geq 0 \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}^p = \lambda_1 \frac{\partial g_1}{\partial \sigma'} + \lambda_2 \frac{\partial g_2}{\partial \sigma'} + \lambda_3 \frac{\partial g_3}{\partial \sigma'} \quad (2)$$

$$g_1 = \frac{1}{2} |\sigma'_2 - \sigma'_3| + \frac{1}{2} (\sigma'_2 + \sigma'_3) \sin \varphi \quad (3)$$

$$g_2 = \frac{1}{2} |\sigma'_3 - \sigma'_1| + \frac{1}{2} (\sigma'_3 + \sigma'_1) \sin \varphi \quad (4)$$

$$g_3 = \frac{1}{2} |\sigma'_1 - \sigma'_2| + \frac{1}{2} (\sigma'_1 + \sigma'_2) \sin \varphi \quad (5)$$

2.3 解析方法

解析方法は、自重解析を行い地盤の初期応力を作成した後、地盤に所定の空洞を作成するため掘削相当外力を作用させた。次に、直接基礎の上端部に等分布荷重を地盤が破壊に至るまで載荷した。地盤の破壊は以下のように定義した。使用プログラム⁸⁾は、試行計算に基づいて荷重増分を自動的に決定しているが、適用した荷重増分が2つの連続したステップ間で減少した時、地盤が破壊に至ったとする。

3. 空洞の位置が支持力に及ぼす影響

3.1 荷重強度—相対沈下曲線より

図-3と図-4は、直接基礎の荷重強度—基礎の沈下量と基礎幅の相対沈下曲線である。それぞれの図には、Case1 ($W/B=0$: 空洞無し)と道示から算定したケーソン基礎の極限支持力も示す。ここで、極限支持力は、Case1の方が道示よりも約20%小さい結果となった。

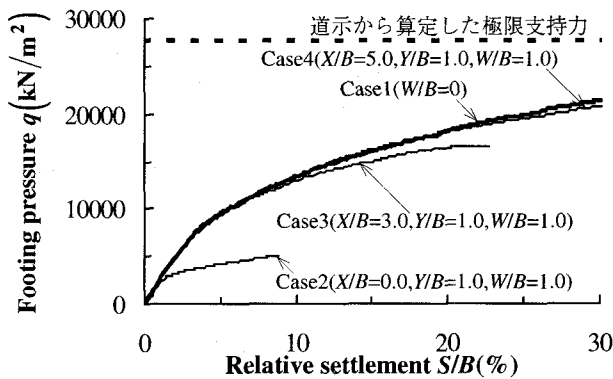


図-3 荷重強度—相対沈下曲線 ($Y/B = 1.0$)

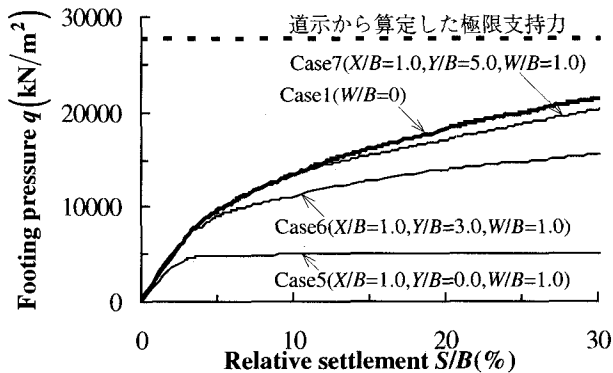


図-4 荷重強度—相対沈下曲線 ($X/B = 1.0$)

図-3のCase2, 3, 4とCase1の比較より、空洞が地盤内に存在すると、支持力が低下することを確認できる。そして、空洞が基礎の中心線に近づく (X/B が小さくなる) ほど基礎の支持力は低下し、より小さな荷重で降伏している。図-4からも同様なことが言える。空洞が浅い位置に存在するほど (Y/B が小さくなるほど) 基礎の支持力は低下し、より小さな荷重で降伏している。以上の

ことから、空洞が基礎に近づくほど基礎の支持力は低下し、より小さな荷重で基礎は降伏点に到達する。

3.2 支持力比と沈下比を用いた評価

空洞の位置が支持力に及ぼす影響を、2つの指標を用いて定量的に評価する。1つは支持力比 (Bearing capacity ratio: BCR) であり、空洞が存在しない地盤 (図-3のCase1)の降伏荷重と各解析ケースの降伏荷重の比である。 BCR は式(6)にて算定し、式中の q_y は各解析ケースの降伏荷重、 q_{0y} は空洞が無い地盤の降伏荷重である。 BCR が1.0に近づくほど、空洞が支持力に及ぼす影響が小さくなる。もう1つは沈下比 (Settlement ratio: SR) であり、空洞が存在しない地盤の降伏時での基礎の沈下量と各解析ケースの降伏時での基礎の沈下量との比である。 SR は式(7)にて算定し、式中の S_y は各解析ケースでの降伏時の基礎の沈下量、 S_{0y} は空洞が無い地盤での降伏時の基礎の沈下量である。 SR が1.0より小さくなると、空洞が無い地盤よりも小さな沈下量で降伏荷重に到達する。降伏荷重と降伏時の沈下量は、杭の押込み試験方法¹¹⁾を参考にし、 $\log q$ - $\log S$ 曲線にて定まる第1折れ点での荷重と沈下量とした。図-5にCase2 ($X/B=0.0, Y/B=1.0, W/B=1.0$)の q_y と S_y の算定例を示す。

$$BCR = \frac{q_y}{q_{0y}} \quad (6)$$

$$SR = \frac{S_y}{S_{0y}} \quad (7)$$

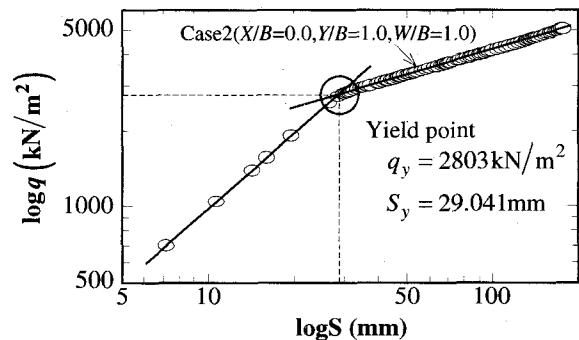


図-5 $\log q$ - $\log S$ 曲線 (降伏荷重の算定例)

図-6は空洞の離隔距離と支持力比の関係であり、図-7は空洞の離隔距離と沈下比の関係である。各図中の曲線は、最小2乗法によるフィッティング曲線である。図-6のフィッティング曲線は、式(8)を用いて作成し、図-7のフィッティング曲線は、式(8)の左辺の BCR を SR に変更したものを用いて作成した。式中の a_1 と b_1 、そして c_1 は、最小2乗法から求まる定数である。

$$BCR = \left(1 - \frac{a_1}{e^{b_1(X/B)}} \right) + c_1 \quad (8)$$

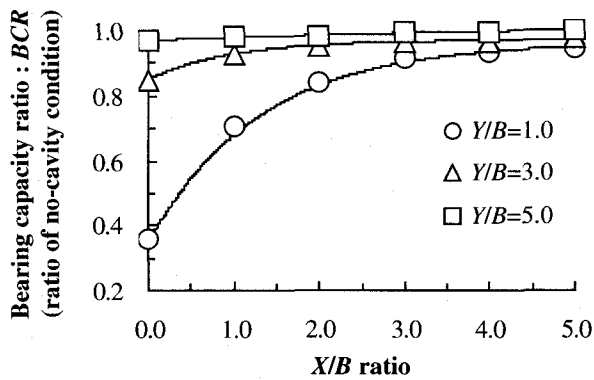


図-6 空洞の離隔距離と支持力比の関係

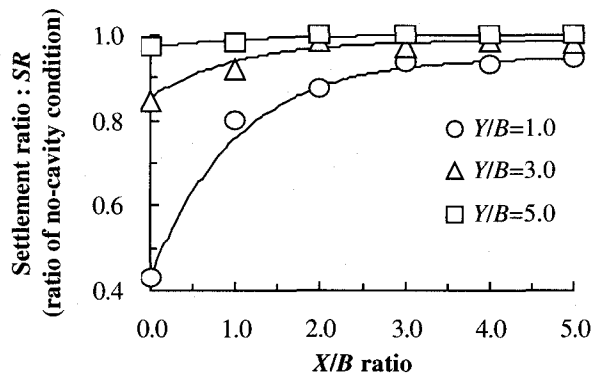


図-7 空洞の離隔距離と沈下比の関係

図-6 に示すように、 X/B が小さくなると BCR は低下しているが、 Y/B が小さいフィッティング曲線ほど BCR の低下は顕著である。一方、 Y/B が大きいフィッティング曲線は、 X/B が小さくなっても、 BCR の低下はほとんどない。例えば、 Y/B が 1.0 のフィッティング曲線は、 X/B が 5.0 から 0.0 になると、 BCR が約 0.6 低下している。これに対して、 Y/B が 3.0 のフィッティング曲線は、 X/B が 5.0 から 0.0 になると、 BCR の低下量は約 0.2 であり、常に BCR は 0.8 以上である。そして、 Y/B が 5.0 のフィッティング曲線では、 BCR はほとんど低下していない。このことから、深さ Y が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 BCR が 0.8 以上となり、支持力に対してほとんど影響しない。

図-7 に示すように、 SR も BCR と同じく、 X/B が小さくなると低下している。 SR の低下の傾向は、 BCR と同じく、 Y/B が小さいフィッティング曲線ほど顕著である。例えば、 Y/B が 1.0 のフィッティング曲線の SR は、 X/B が 5.0 から 0.0 になると、約 0.9 から約 0.4 に低下している。これに対して、 Y/B が 3.0 と 5.0 のフィッティング曲線は、 X/B が低下しても SR は常に 0.8 以上である。このことから、深さ Y が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 BCR と同じく SR も 0.8 以上となり、降伏荷重に到達する沈下量も空洞が無い地盤とほとんど同じである。

図-8 は空洞までの深さと支持力比の関係であり、図-9 は空洞までの深さと沈下比の関係である。各図中の曲線は、最小 2 乗法によるフィッティング曲線である。図-8 のフィッティング曲線は、式 (9) を用いて作成し、図

-9 のフィッティング曲線は、式 (9) の左辺の BCR を SR に変更したものを用いて作成した。式中の a_2 と b_2 、そして c_2 は、最小 2 乗法から求まる定数である。

$$BCR = \left(1 - \frac{a_2}{e^{b_2(Y/B)}} \right) + c_2 \quad (9)$$

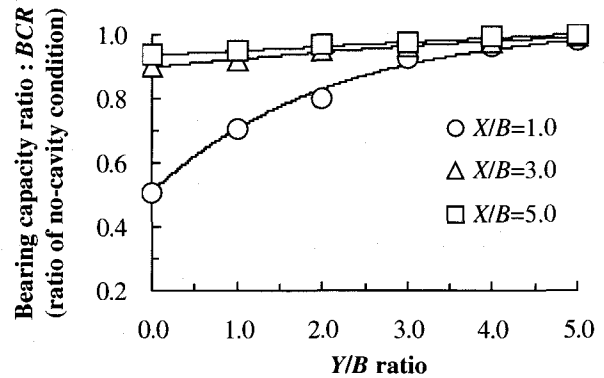


図-8 空洞までの深さと支持力比の関係

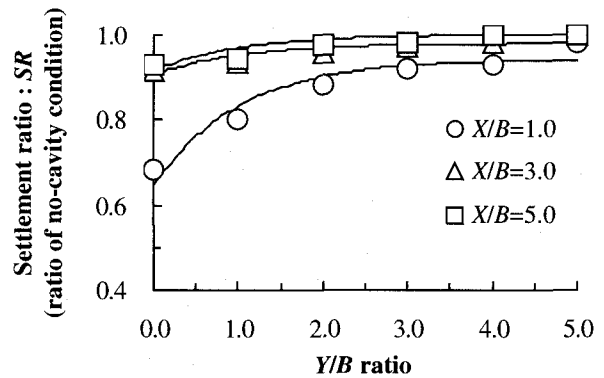


図-9 空洞までの深さと沈下比の関係

図-8 に示すように、 Y/B が小さくなると BCR は低下している。 BCR の低下の傾向は、 X/B が小さいフィッティング曲線ほど BCR の低下は顕著である。 X/B が 1.0 のフィッティング曲線は、 Y/B が 5.0 から 0.0 になると、 BCR は約 0.9 から約 0.5 に 0.4 低下している。一方、 X/B が 3.0 のフィッティング曲線は、 BCR の低下量は約 0.1 と少ない。そして、 X/B が 5.0 のフィッティング曲線では、 BCR はほとんど低下していない。このことから、離隔距離 X が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 BCR が常に 0.8 以上となり、支持力に対してほとんど影響を及ぼさない。

図-9 に示すように、 SR も BCR と同じく、 Y/B が小さくなると低下している。 SR の低下の傾向も BCR と同様であり、 X/B が小さいフィッティング曲線ほど、 SR の低下は顕著である。 X/B が 1.0 のフィッティング曲線は、 Y/B が 5.0 から 0.0 になると、 SR は約 0.3 低下しているが、 X/B が 3.0 と 5.0 では、 Y/B が小さくなっても SR はほとんど低下しない。このことから、離隔距離 X が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 SR が常に 0.8 以上となり、降伏時の基礎の沈下量に対してほとんど影響を及ぼさない。

3.3 空洞の影響範囲

深さ Y と離隔距離 X が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 BCR と SR が常に 0.8 以上であった。つまり、 X/B と Y/B が 3.0 以上に位置する空洞は、基礎の支持力と降伏時の沈下量に対してほとんど影響を及ぼさない。そこで、弾性論における応力の伝達範囲と塑性論における破壊領域から、 X/B と Y/B が 3.0 以上の範囲とはどのような位置かを検討する。半無限弾性地盤上にある鉛直線荷重による応力¹²⁾は、ブーシネスクの解より式 (10) から算出される。幅に比べて長さが大きい範囲に荷重が帯状に分布する場合、つまり、平面ひずみの状態では、式 (10) の q を式 (11) とし、基礎幅について積分すると式 (12) の Michell の解が得られる。ここで、式中の β と ϕ は、図-10 および式 (13) に示される。

$$\sigma_y = \frac{2q}{\pi \cdot y} \cos^4 \theta \quad (10)$$

$$q = \bar{q} d\xi \quad (11)$$

$$\sigma_y = \frac{q}{\pi} (\beta + \sin \beta \cos \phi) \quad (12)$$

$$\beta = \beta_2 - \beta_1, \phi = \beta_2 + \beta_1 \quad (13)$$

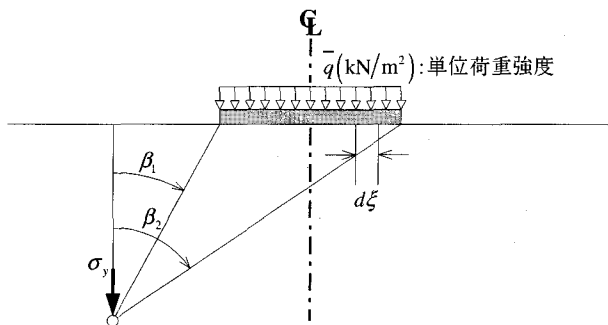


図-10 帯状等分布荷重による地盤内の応力

図-11 は、式 (12) から算定した鉛直応力 σ_y の圧力球根であり、分布荷重 $\bar{q}$ に対してどのくらいの割合で鉛直応力 σ_y が減少するかを示すものである。分布荷重 $\bar{q}$ が作用した時の鉛直応力 σ_y は、深くなるほど減少し、基礎直下の Y/B が 0.5 では鉛直応力 σ_y は $0.8\bar{q}$ 、 Y/B が 1.5 ではさらに減少し $0.4\bar{q}$ となっている。そして、 Y/B が 3.0 では、鉛直応力 σ_y が $0.2\bar{q}$ となり、地盤内に分布荷重 $\bar{q}$ は 2 割しか伝達されない。

図-12 は、本解析モデルの地盤における地盤の自重を考慮しないテルツァギーのすべり線場¹²⁾である。すべり線場の各領域は、I は主動ランキン帯であり、II は放射状せん断帯である。そして、III は受働ランキン帯である。すべり線場の深さ方向の範囲は、 Y/B が約 1.0 であり、放射状せん断帯の底部が到達している。そして、すべり線場の横方向の範囲は、 X/B が約 3.0 であり、受働ランキン帯の先端部が到達している。以上のことから、塑性論か

ら求まるすべり線場の外の領域と弾性論から求まる鉛直応力が 2 割程度しか伝達されない領域は、 X/B と Y/B が 3.0 以上で BCR と SR に対して影響をほとんど及ぼさない空洞範囲に相当する。

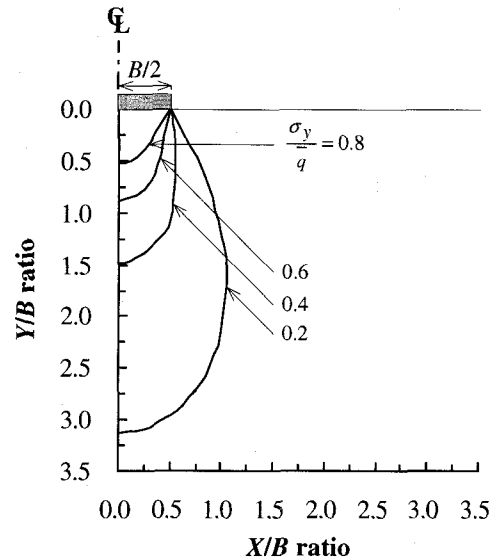


図-11 帯状等分布荷重による圧力球根

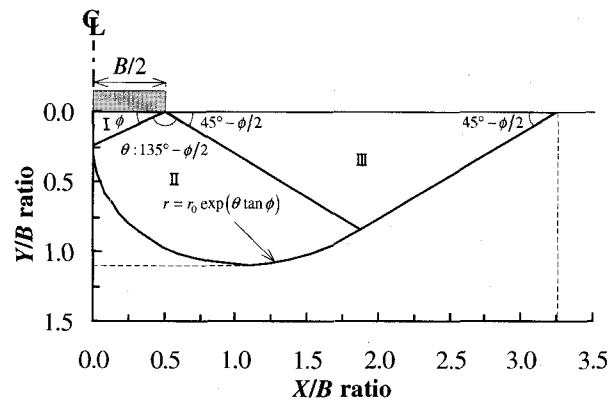


図-12 テルツァギーのすべり線場

3.4 空洞の位置が破壊メカニズムに及ぼす影響

地盤の破壊状況から空洞の位置が支持力に及ぼす影響について検討する。図-13 と図-16 から図-18 は、基礎の降伏時の沈下量 δ_y と沈下量 $3\delta_y$ での地盤の破壊状況であり、圧縮破壊と引張破壊に到達した応力点を示す。ここで、圧縮破壊は Coulomb の破壊包絡線上の応力点とし、引張破壊は最小主応力が引張強度に到達した応力点とする。図-13 は、空洞が無い地盤の破壊状況である。 δ_y での圧縮破壊状況から、基礎直下から A 点付近にかけて明確な主動くさびを形成している。基礎の沈下量が $3\delta_y$ になると、 δ_y の時よりも破壊領域は広がり、基礎直下から深度 6m 付近にかけて圧縮破壊を生じている。しかし、 δ_y の時に形成されていた主動くさびは、 $3\delta_y$ にて確認することができない。一方、引張破壊領域は、 δ_y にて基礎の両端部で生じ、 $3\delta_y$ になると新たに B 点付近の要素に

て生じている。この空洞が無い地盤の破壊状況を基準として、各ケースの破壊状況との比較を行う。

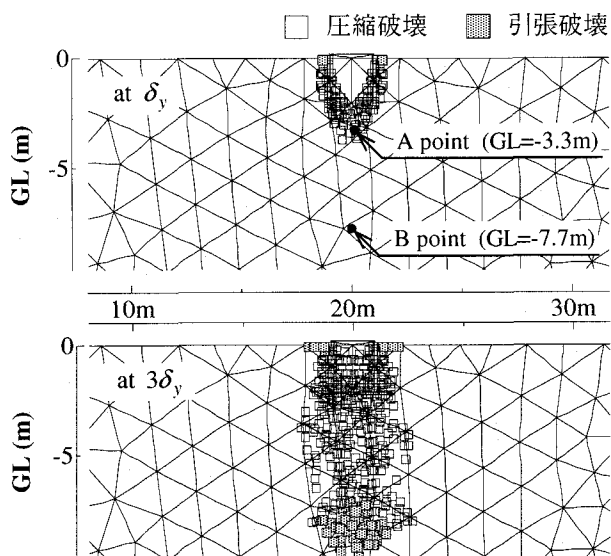


図-13 地盤の破壊状況 ($W/B = 0.0$)

図-14 は、図-13でのA点とB点の応力経路とCoulombの破壊基準である。応力の向きは、正が圧縮であり負が引張を示す。A点の応力は、 δ_y の時にCoulombの破壊基準に到達し、最小主応力がほとんど変化せずに最大主応力が増加している。そして、 δ_y 以降の応力経路は、最大主応力と最小主応力がCoulombの破壊基準に沿って圧縮側に増加している。一方、B点の応力経路は、 δ_y まではA点と同じく最小主応力がほとんど変化せずに最大主応力が増加している。しかし、 δ_y 以降になると最大主応力がほぼ一定の状態でも最小主応力が引張側に増加し、 $3\delta_y$ にて最小主応力が引張強度に到達している。

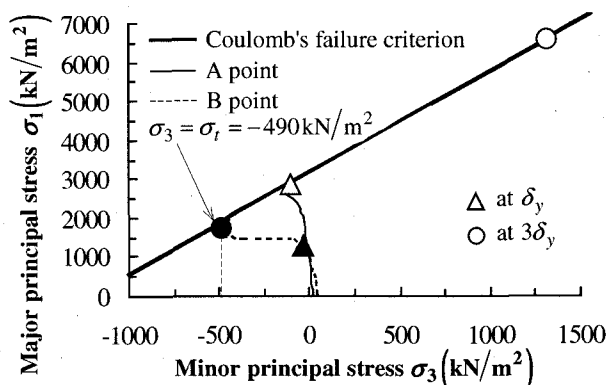


図-14 Coulombの破壊基準と要素の応力経路

図-15 は、空洞が無い地盤の $3\delta_y$ での変位増分ベクトル図である。A点の変位増分は鉛直方向が卓越し、基礎直下からB点までは鉛直方向の変位増分が顕著に表れている。よって、図-14のA点の応力経路は、最大主応力が圧縮側に増加してCoulombの破壊基準に到達した。一方、基礎直下よりも側方とB点以深の領域では、水平方

向の変位増分を生じている。よって、変位増分ベクトルの方向は傾斜を生じ、B点を境に左右に向いている。このことから、B点付近の要素は左右に引張られる状態となり、図-14のB点の応力経路は最小主応力が引張強度に到達した。鉛直方向の変位増分が卓越している領域は、くさび状を形成しB点以深の直下の領域を左右に押し退けている。よって、B点付近の要素は割裂破壊を生じた。

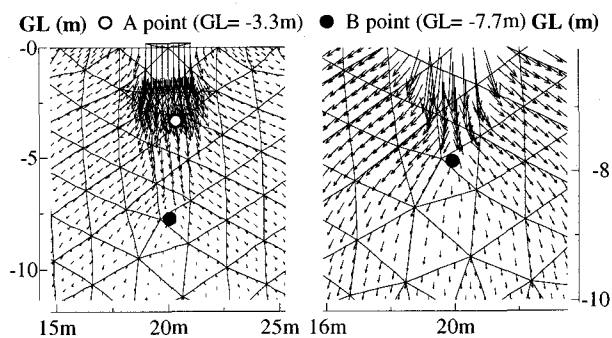


図-15 $3\delta_y$ での変位増分ベクトル図 ($W/B = 0.0$)

図-16 は、空洞が基礎の直下 ($X/B=0.0$, $Y/B=1.0$) の時の地盤の破壊状況である。 δ_y での圧縮破壊は、基礎の両端部から空洞の上部の両端部にかけて生じ、主働くさびを形成していない。そして、 $3\delta_y$ の圧縮破壊領域は、 δ_y の時に形成された領域が横方向に僅かに進展するのみで、空洞の下部以深は、破壊領域の進展が見られ無い。一方、引張破壊領域は、 $3\delta_y$ の時に基礎の両端部と空洞の上部と下部に沿って発生している。以上のことから、空洞を有する地盤の破壊領域は、空洞が無い図-13と比較すると狭くなり、BCRは0.36まで低下している。

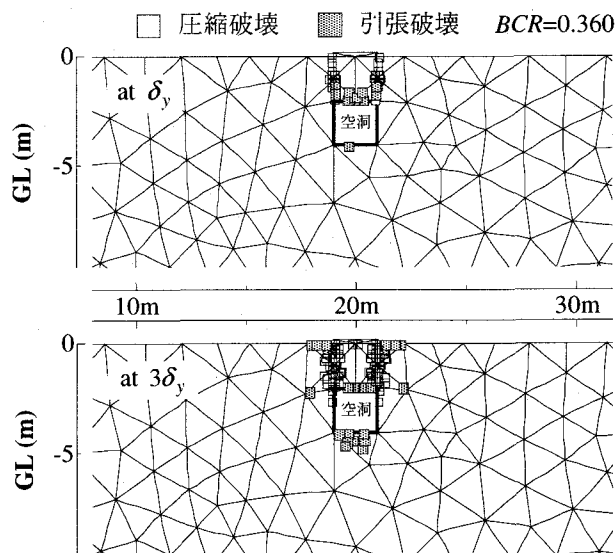


図-16 地盤の破壊状況 ($X/B=0.0$, $Y/B=1.0$, $W/B=1.0$)

図-17 は、空洞の位置が基礎中心線よりも離隔した ($X/B=2.0$, $Y/B=1.0$) 地盤の破壊状況である。 δ_y での圧縮破壊状況は、空洞が無い図-13よりも深さ方向に対し

て2mほど小さい主働くさびを形成している。 $3\delta_y$ の圧縮破壊領域は、空洞に向かって進展している。一方、引張破壊領域は、 δ_y の時は図-13と同じであり、基礎の両端部にて生じている。 $3\delta_y$ の引張破壊領域は、空洞の右下の要素にて生じている。以上のことから、空洞が基礎の中心線よりも離隔した地盤の破壊領域は、図-16よりも深さ方向に進展し、BCRは0.360から0.704へと増加している。しかし、図-13と比較すると、破壊領域の幅は狭くなり空洞の影響を受けている。

図-18は、図-17 ($X/B=2.0$, $Y/B=1.0$)よりも空洞の位置が基礎中心線からさらに離隔した ($X/B=5.0$, $Y/B=1.0$) 地盤の破壊状況である。 δ_y と $3\delta_y$ での圧縮破壊と引張破壊の状況は、空洞が無い図-13と比較するとほぼ同じである。このことから、基礎からある程度離れた位置に存在する空洞は、地盤の破壊メカニズムに影響を及ぼさなくなり、そのため、BCRが約1.0となっている。

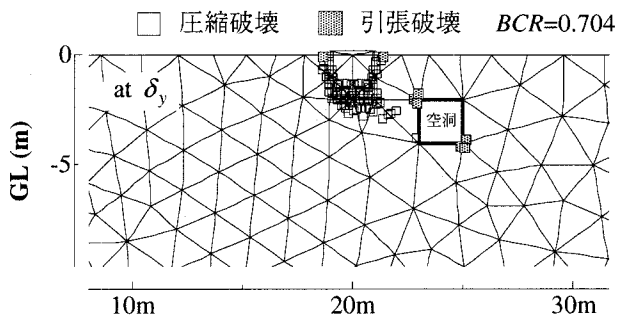


図-17 地盤の破壊状況 ($X/B=2.0$, $Y/B=1.0$, $W/B=1.0$)

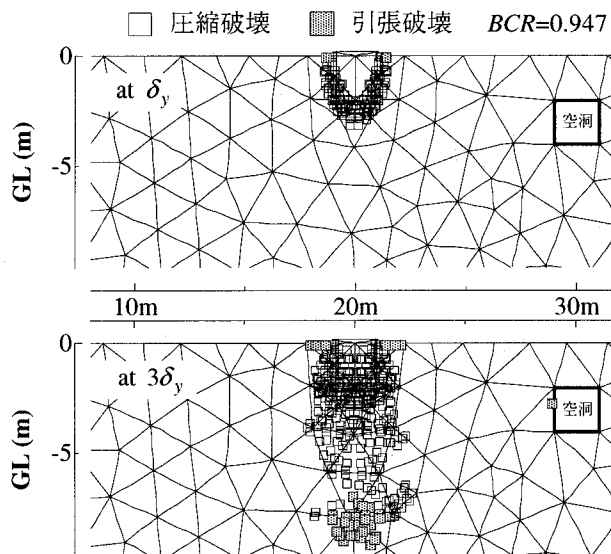


図-18 地盤の破壊状況 ($X/B=5.0$, $Y/B=1.0$, $W/B=1.0$)

3.5 空洞を有する地盤の支持力算定方法

図-19は、図-6と図-8を3次元空間で示したものである。空洞の位置が支持力に及ぼす影響は、 X と Y 、そして、BCRで形成される空間の曲面で評価できる。BCRは、 X/B と Y/B が大きくなるほど、曲面の頂点へ近づく。一方、 X/B と Y/B が小さくなるほど、BCRは曲面の下部に近づき小さくなる。つまり、空洞が基礎の中心線に近く、そして、浅い位置に存在するほど、基礎の支持力は小さくなる。逆に、空洞が基礎の中心線から遠く、深い位置に存在するほど、支持力に対して影響を及ぼさない。

図-20は、空洞が支持力に及ぼす影響コンター図である。図中の点は、式(8)と式(9)から算定し、これから式(14)を用いて最小2乗法によるBCRのコンター図を作成した。ここで、式中の a_3 と b_3 は、最小2乗法から求まる定数である。なお、図-20は、図-19のBCRが0.6以上での X/B - Y/B 平面上に、BCRが0.1毎のコンターを写像したものと等価である。空洞の位置がBCR=0.6の左側の領域であれば、BCRは0.6以下になる。また、空洞の位置がBCR=0.9のコンターよりも右側の斜線部の領域であれば、BCRは0.9以上となる。以上のように空洞の位置とBCRのコンターから、空洞の影響を評価した地盤の支持力を簡易的に算定することができる。

$$Y/B = a_3(Y/X)^2 + b_3 \quad (14)$$

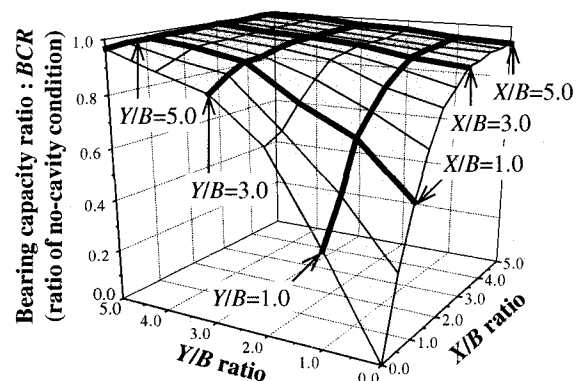


図-19 空洞の位置が支持力比に及ぼす影響

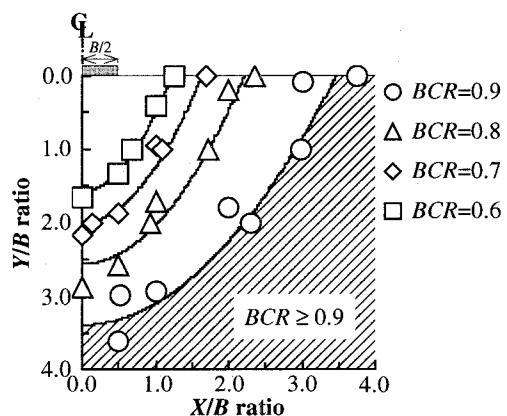


図-20 空洞が支持力に及ぼす影響コンター図

3.6 空洞の位置が支持力に及ぼす影響のまとめ

2次元弾塑性 FEM 解析を用いて、空洞の位置が支持力に及ぼす影響について検討し、以下の知見が得られた。

- (1) 荷重強度—基礎の沈下量と基礎幅の相対沈下曲線より、空洞が地盤内に存在すれば、支持力は低下した。そして、空洞の位置が基礎に近いほど支持力は低下し、より小さな荷重で降伏した。
- (2) BCR と SR を用いて、空洞が支持力に及ぼす影響を定量的に評価した。その結果、深さ Y と離隔距離 X が基礎幅 B の 3 倍以上の空洞は、 BCR と SR に対して、ほとんど影響を及ぼさない。この空洞範囲は、すべり線場の外の領域ならびに鉛直応力が 2 割程度しか伝達されない領域に相当する。
- (3) 地盤の破壊状況は、空洞が無い地盤と空洞が存在する地盤では異なり、 BCR が低下した。しかし、空洞が基礎からある程度遠ざかると、空洞が無い地盤の破壊状況と同じになり、この時の BCR は約 1.0 となる。
- (4) 空洞の位置と BCR の関係は、3 次元空間の曲面で表示できる。空洞が基礎に近い位置に存在するほど、曲面の下部に近づき BCR が小さくなる。これに対して、空洞が基礎から離れるほど、曲面の頂点へ近づき BCR が大きくなる。
- (5) 空洞の位置と BCR のコンターから、空洞の影響を評価した地盤の支持力を簡易に算定することが可能である。

4. 空洞の形状が支持力に及ぼす影響

4.1 荷重強度—相対沈下曲線より

図-21 は、空洞の形状と断面積を変化させた時の直接基礎の荷重強度—基礎の沈下量と基礎幅の相対沈下曲線である。図には、Case 1 ($W/B=0$: 空洞無し) と Y/B が 1.0 の代表的なケースを示す。Case8 と Case10 は正方形空洞であり、Case9 と Case11 は円形空洞である。空洞の断面積 A は、Case8 と Case9 が 28.27m^2 、Case10 と Case11 が 0.78m^2 である。円形と正方形空洞は、断面積 A が減少すると、空洞の形状によらず支持力が増加して Case1 に近づいている。Case8 と Case9 の結果より、断面積 A と深さ Y が同じであれば、支持力は円形空洞の方が大きくなる。これは、断面積 A の小さい Case10 と Case11 の結果からも同様なことが言えるが、両者の支持力の差は、断面積 A の大きい Case8 と Case9 に比べて僅かである。

図-22 は、断面積 A が 28.27m^2 の代表的な結果である。Case12 と Case14 は空洞形状が正方形であり、Case12 は Y/B が 0.5、Case14 は Y/B が 5.0 である。Case13 と Case15 は空洞形状が円形であり、Case13 は Y/B が 0.5、Case15 は Y/B が 5.0 である。円形と正方形の空洞共に、基礎の支持力は、 Y/B が増加すると増加している。 Y/B が 5.0 の Case14 と Case15 は空洞が無い Case1 とほぼ同じであり、

また、空洞形状による支持力の差がない。これに対して、 Y/B が 0.5 の Case12 と Case13 は、空洞形状による支持力の差が見られる。空洞形状が円形の Case13 の支持力は、空洞形状が正方形の Case12 よりも大きい。以上のことから、円形と正方形空洞の支持力は、円形空洞の方が大きい。空洞の深さ Y と断面積 A によって、空洞形状による支持力の差が異なる。

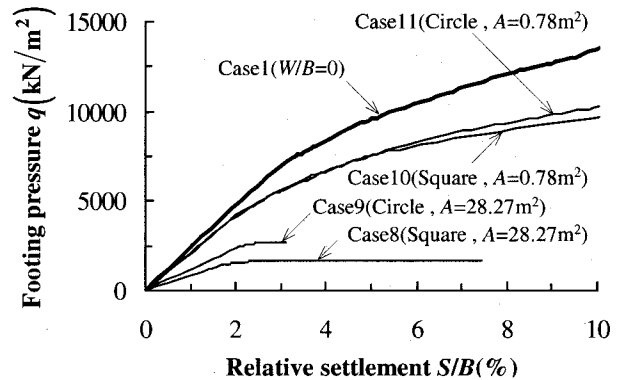


図-21 荷重強度—相対沈下曲線 ($Y/B = 1.0$)

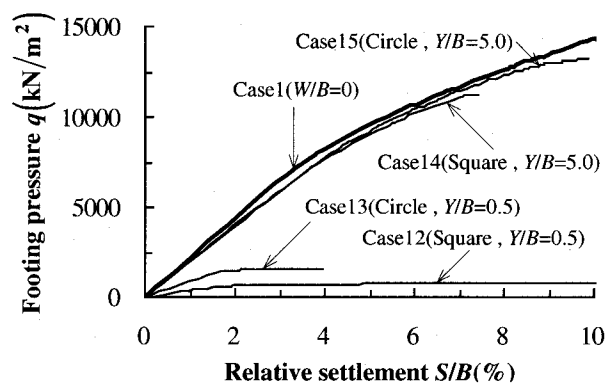


図-22 荷重強度—相対沈下曲線 ($A = 28.27\text{m}^2$)

4.2 空洞形状による支持力の差

空洞の断面積 A と深さ Y が同一の円形と正方形の空洞を有する地盤の支持力の比 BCR_s を、空洞形状による支持力の差を定量的に評価するため、式 (15) で算定した。 BCR_s が 1.0 の時は両者に支持力の差が無く、 BCR_s が 1.0 以上であれば、支持力は円形空洞の方が大きい。式中の $q_{y(\text{Circle})}$ は空洞形状が円形の基礎の降伏荷重であり、 $q_{y(\text{Square})}$ は空洞形状が正方形の基礎の降伏荷重である。なお、降伏荷重の算定方法は、3. と同様に $\log q$ - $\log S$ 曲線にて算定される第 1 折れ点の荷重とした。

$$BCR_s = q_{y(\text{Circle})} / q_{y(\text{Square})} \quad (15)$$

図-23 は空洞の断面積 A と空洞形状による支持力比 BCR_s の関係であり、図-24 は空洞の深さと空洞形状による支持力比の関係である。それぞれの図中の曲線は、最小 2 乗法によって作成したフィッティング曲線であり、

図-23 は式 (16) から作成し、図-24 は式 (17) から作成した。それぞれの式中の a_4 と a_5 、 b_4 と b_5 、そして、 c_4 は、最小 2 乗法から求まる定数である。

$$BCR_S = \sqrt{a_4 A - b_4} + c_4 \quad (16)$$

$$BCR_S = \frac{a_5}{(Y/B)} + b_5 \quad (17)$$

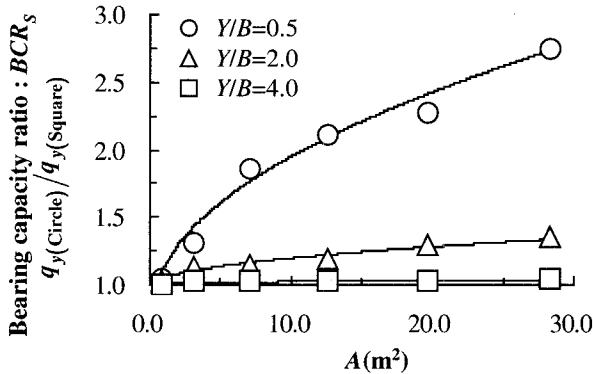


図-23 空洞の断面積と空洞形状による支持力比の関係

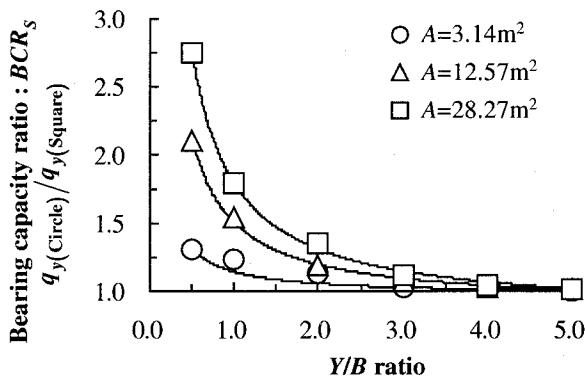


図-24 空洞の深さと空洞形状による支持力比の関係

図-23 に示すように、 Y/B 毎のフィッティング曲線の BCR_S は、常に 1.0 以上の値である。このことから、空洞の断面積 A と深さ Y が同一の正方形と円形状の空洞の基礎の支持力は、正方形よりも円形の空洞の方が大きくなる。そして、空洞の断面積 A が大きくなると、 BCR_S は増加し空洞形状の影響が大きくなる。ただし、 Y/B が 0.5 のフィッティング曲線は、 A が 28.27m^2 の時で BCR_S が約 2.8 である。これに対して、 Y/B が 2.0 のフィッティング曲線の BCR_S は、 A が増加してもほとんど増加せず、最大値が約 1.25 である。そして、 Y/B が 4.0 のフィッティング曲線の BCR_S は、 A が増加してもほとんど増加せず、最大値も約 1.0 ($BCR_S > 1.0$) である。以上のことから、深さ Y が基礎幅 B の 2 倍以上の空洞は、 BCR_S が 1.3 以下となり、空洞形状による支持力の差がほとんどない。

同様なことは、図-24 から言える。 BCR_S は常に 1.0 以上であり、 Y/B が小さくなると BCR_S は増加している。ただし、 BCR_S の増加の傾向は、断面積 A によって異なる。

例えば、 A が 28.27m^2 のフィッティング曲線は、 Y/B が 0.5 の時に BCR_S が約 2.8 である。これに対して、 A が 3.14m^2 のフィッティング曲線の BCR_S は、 Y/B が 0.5 の時に約 1.25 であり、 Y/B が減少してもほとんど増加しない。このことから、空洞の断面積 A が 3.14m^2 よりも小さい空洞は、 BCR_S が 1.3 以下となり、空洞形状による支持力の差がほとんどない。

図-25 は、図-23 と図-24 を 3 次元空間で示したものである。空洞形状が支持力に及ぼす影響の大きさは、断面積 A と深さ Y 、そして、 BCR_S で形成される曲面で評価することができる。3 次元空間での BCR_S は、空洞の断面積 A と深さ Y によって異なっている。断面積 A が小さく、深い位置に存在する空洞ほど、 BCR_S は曲面の底面に近づき約 1.0 となっている。ただし、 BCR_S は 1.0 以上である。これに対して、断面積 A が大きく、浅い位置に存在する空洞ほど、曲面の頂点へ向かっている。そして、 BCR_S の最大値は約 2.8 となっている。以上のことから、断面積 A が大きく、浅い位置の空洞ほど、空洞形状による支持力の差が顕著になる。すなわち、3. の結果と既往の研究成果⁷⁾より、空洞の諸元が支持力に大きく影響を及ぼす条件であれば、空洞形状による支持力の差も顕著になる。例えば、 X/B と Y/B が小さく、そして、 W/B が大きい空洞は、空洞の形状によって支持力の差が顕著になる。

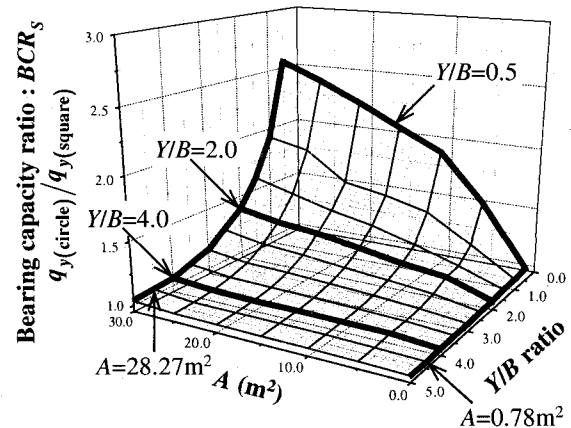


図-25 空洞の深さと断面積が
空洞形状による支持力比に及ぼす影響

4.3 空洞の形状が支持力に及ぼす影響のまとめ

2 次元弾塑性 FEM 解析を用いて、空洞形状による基礎の支持力の差を検討した。対象とした空洞形状は、円形と正方形空洞である。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 荷重強度—基礎の沈下量と基礎幅の相対沈下曲線より、空洞の断面積 A と深さ Y が同じ円形空洞と正方形空洞を比較すると、支持力は円形空洞の方が大きい。
- (2) 空洞形状による支持力差を評価するため、 BCR_S を用いた。 BCR_S とは、円形空洞を有する地盤の基礎の支持力と正方形空洞を有する地盤

の基礎の支持力との比である。面積 A が 3.14m^2 よりも小さく、深さ Y が基礎幅 B の 2 倍以上の空洞は、 BCR_s が 1.3 以下となり、空洞形状による支持力の差がほとんどない。

- (3) 空洞形状が支持力に及ぼす影響は、断面積 A と深さ Y 、そして、 BCR_s で形成される曲面で評価した。その結果、断面積 A が小さく、深い位置に存在する空洞ほど、 BCR_s は曲面の底面に近づき約 1.0 となる。一方、断面積 A が大きく、浅い位置に存在する空洞ほど、曲面の頂点へ向い、 BCR_s の最大値は約 2.8 となる。以上のことから、空洞の諸元が基礎の支持力に大きく影響を及ぼす条件であれば、空洞形状による支持力の差も顕著になる。

5. おわりに

空洞を有する地盤の支持力特性の内、空洞の位置と形状が基礎の支持力に及ぼす影響を数値解析によって検討した。得られた解析結果は、2 つの指標を用いて定量的に評価した。1 つは支持力比 (Bearing capacity ratio : BCR) であり、空洞が存在しない地盤の降伏荷重と各解析ケースの降伏荷重の比である。もう 1 つは沈下比 (Settlement ratio : SR) であり、空洞が存在しない地盤の降伏時での基礎の沈下量と各解析ケースの降伏時での基礎の沈下量との比である。そして、 BCR のコンター図より、空洞を有する地盤の基礎の支持力を簡易に算定した。しかし、琉球石灰岩層を支持層とするためには、以下に示す課題がある。

- (1) 本論文での BCR のコンター図は、空洞が 1 つの場合にしか対応していない。しかし、琉球石灰岩層は地盤内に数多くの空洞が点在していると考えられる。よって、複数の空洞に対応した支持力の算定方法を検討することが必要である。
- (2) 本解析で用いた地盤定数は、岩級区分 C_L から D の値と仮定した。よって、本解析結果に汎用性を持たせるためには、物性値が変化した場合の検討が必要である。また、調査した文献は c 材料に対して模型実験と FEM 解析の比較を実施しているが、本解析で対象とした c 、 ϕ 材料に対しては比較検討が実施されていない。そこで、 c 、 ϕ 材料を対象とした模型実験を実施し、解析精度を確認する必要がある。
- (3) 琉球石灰岩層の支持力評価での要因は、空洞以外にも多層性地盤や N 値のバラツキなどがある。よって、これらの要因を総合的に取入れた評価方法の検討が必要である。

参考文献

- 1) 大内正敏・彭芳楽・清住真・日下部治：琉球石灰岩層を支持層とした基礎形式について、第 15 回沖縄地盤工学研究発表会、pp.51-54, 2002
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書 (I 共通編・IV 下部構造編同解説)、丸善、2002
- 3) Badie,A. and Wang,M.C. : Stability of spread footing above void in clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.110, No.11, pp.1591-1605, 1984
- 4) Wang,M.C. and Badie,A. : Effect of underground void on foundation stability, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.111, No.8, pp.1008-1019, 1985
- 5) Baus,R.L. and Wang,M.C. : Bearing capacity of strip footing above void, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.109, No.1, pp.1-14, 1983
- 6) Sreng Sokkheang・貞野哲也・上野勝利・望月秋利：空洞を有する地盤の支持力、土木学会第 57 回年次学術講演会、pp.1221-1222, 2002
- 7) 清住真・彭芳楽・大内正敏・日下部治：空洞の存在が基礎の支持力に及ぼす影響について、土木学会第 58 回年次学術講演会、pp.551-552, 2003
- 8) PLAXIS Version7, Finite Element Code for Soil and Rock Plasticity, Delft University of Technology, Netherlands
- 9) 土木学会：第四版・土工学ハンドブック I、技報堂出版、pp.395-423, 1989
- 10) 土質工学会：岩の工学的性質と設計・施工への応用、pp.219-225, 1985
- 11) 地盤工学会：杭の鉛直載荷試験方法・同解説・第 1 回改訂版、pp.19-59, 2002
- 12) 河上房義：土質力学 (第 6 版)、森北出版、pp.189-190, 1995
- 13) 日下部治：支持力入門、地盤工学会、pp.54-62, 2000

(2003 年 9 月 12 日受付)