

1. はじめに 基礎の耐震設計法が性能設計へ移行するに従い、塑性変位を含めた基礎の変位予測法が必要となっている。最近では、簡便かつ精度の良い変位予測法として、基礎-地盤系をマクロな要素として捉えた弾塑性モデルが発展している(例えば¹⁾)。しかし、このモデルは主に円形基礎を対象としているため、本研究では帯基礎について模型実験を行いその妥当性を検証した。

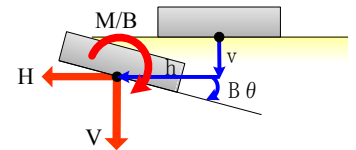


図1 荷重・変位の定義

2. モデルの仮定 本研究では鉛直・水平・モーメント荷重($V, H, M/B$)と対応する変位($v, h, B\theta$)は基礎底面中心を基準とし、それらの定義を図1に示す。単位の整合性を図るためモーメントは基礎幅 B で除し回転変位は B を乗じている。モデルの枠組みは塑性論を基にしており、降伏曲面、硬化則、塑性ポテンシャル面という3つの要素で構成されている。モデル化にあたっては円形基礎のモデルに倣い、次のような仮定を行った。(1)変位は弾性成分と塑性成分から成る。(2)降伏曲面は支持力曲面と相似で常に一定形状とする。(3)降伏曲面の大きさは塑性鉛直変位 v_p のみに依存し、単純鉛直載荷時の V - v_p 曲線で規定される。(4)塑性ポテンシャル面は常に一定形状とする。なお降伏曲面 f 、塑性ポテンシャル面 Q は以下の式を用いた²⁾。

$$\begin{aligned} \text{降伏曲面} \quad f &= \left(\frac{H}{0.541} \right)^2 + \left(\frac{M/B}{0.371} \right)^2 - 2.44H \frac{M}{B} - \left[V \left(1 - \frac{V}{V_0} \right) \right]^2 = 0 \\ \text{塑性ポテンシャル面} \quad Q &= \left(\frac{H}{0.557} \right)^2 + \left(\frac{M/B}{0.587} \sqrt{\frac{V_M}{V}} \right)^2 + 0.67H \frac{M}{B} - V_M V \left[1 - \left(\frac{V}{V_M} \right)^2 \right] = 0 \end{aligned}$$

V_0, V_M は各曲面と V 軸との交点で曲面の大きさを決める

3. 実験 実験で用いた試料は乾燥した豊浦砂で、空中落下により相対密度 $Dr=87(\%)$ の密な水平地盤を作成した。模型基礎は幅 $B=40\text{mm}$ 、長さ $L=200\text{mm}$ の底面が粗な帯基礎であり、鉛直・水平・回転変位を独立して制御できる載荷装置³⁾を用いて実験を行った。以下、今回実施した実験毎に結果・考察を述べる。

(i) 鉛直載荷実験

鉛直載荷実験は鉛直支持力 V_{max} と、荷重-沈下曲線から硬化関数を定めるために行った。図2に荷重-沈下曲線とその近似曲線を示す。 V_{max} は $1450 \sim 1600\text{N}$ となり、硬化関数は塑性変位 v_p の関数として以下の式とした。

$$V_0 = \frac{a_1 v_p}{a_2 v_p^2 + a_3 v_p + a_4} V_{max} \quad a_1 \sim a_4 \text{ は近似による定数}$$

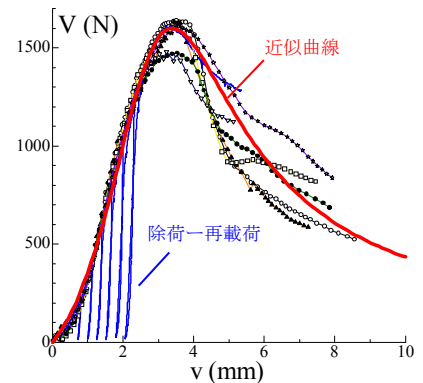


図2 荷重-沈下曲線と近似曲線

また、除荷過程を含む実験も行い除荷剛性 k_v を求めたところ、およそ $k_v=6000\text{kN/m}$ でほぼ一定の値を示した。

(ii) Swipe Test

Swipe Test の実験条件は、まず所定の鉛直荷重まで鉛直載荷を行い、次いで鉛直変位を一定に保持しつつ水平または回転変位を与えるというものであり、モデルの理論³⁾

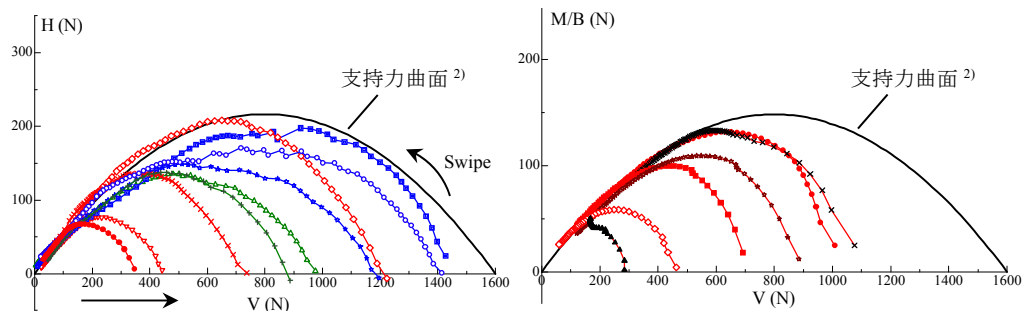


図3 Swipe Test の荷重経路

によると Swipe 時の荷重経路はほぼ降伏曲面に沿う。従って、様々な V レベルで Swipe Test を行うことにより降伏曲面形状が得られる。図3に水平・回転それぞれの Swipe Test から得られた荷重経路を示す。図中には支持力曲面²⁾も併せて描いている。荷重経路は放物線に近い形となっているが、Swipe 開始の鉛直荷重が大きくなるに従ってその膨らみは小さく

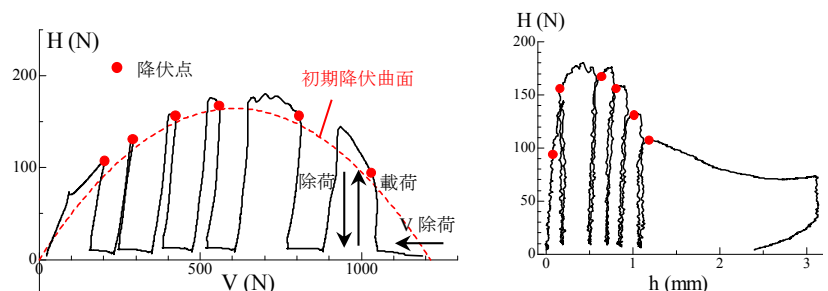


図4 水平載荷-除荷試験の結果

なる傾向がある。ここで、**Swipe** 時の荷重経路は硬化・軟化の影響を受け降伏曲面の拡大・縮小を伴うために、曲面形状を忠実に示すものではない。次に降伏曲面が弾性と塑性の境界であるかどうかを調べるため水平または回転方向の荷重-除荷繰返し実験を行った。図4に水平荷重-除荷の荷重経路、荷重変位曲線の一例を示す。水平荷重-水平変位曲線の水平変位が急増し始める点を降伏点と見なし $H-V$ 面にプロットしている。降伏点はほぼ初期降伏曲面に沿っていることから、降伏曲面という概念は妥当であると言える。

(iii) Radial Test

Radial Test は変位増分比を一定にして行う荷重試験であり¹⁾、様々な比率で実験を行うことで塑性ポテンシャル面の形状変化、仮定した硬化則の妥当性を検証することができる。本研究では鉛直・水平荷重、鉛直・回転荷重というように一つの変位成分をほぼゼロにして実験を行った。図5に実験から得られた荷重経路を示す。 $H-V$ 面では荷重経路が直線的であるのに対して、 $M-V$ 面では徐々に湾曲した形となっている。変位比一定条件であることを考える

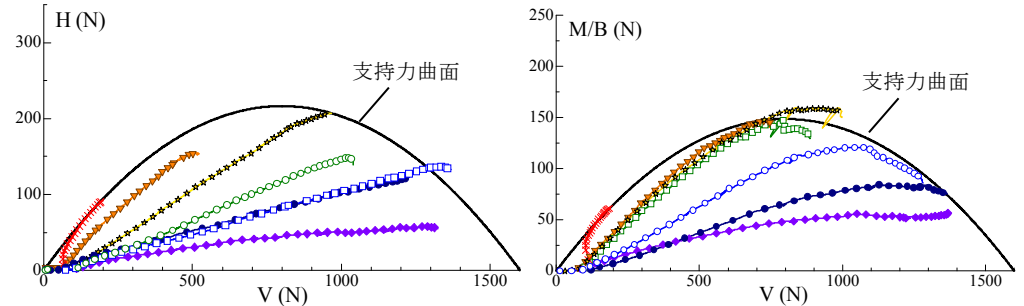


図5 Radial Test の荷重経路 (ピークまで)

と、 $M-V$ 面の塑性ポテンシャル面は荷重の進行に伴って変化することが分かる。しかし、第一次近似として荷重経路は直線と見なし、本モデルでは塑性ポテンシャル面の形状は常に一定とした。次に硬化則の検証を行うため、同実験の V_0-v_p 曲線と鉛直荷重時の近似曲線の比較を行った (図6)。水平・回転荷重が卓越すると、より小さな v_p でピークに至ることから、降伏曲面の大きさを v_p のみの関数とすることは単純化し過ぎているといえる。ここで、ピーク荷重時の塑性変位の関係を図7に示す。この変位量の関係を楕円で近似し、 $(v_p, h_p, B \theta_p)$ 空間でこれらを断面に持つ単純な楕円曲面がピーク荷重時の塑性変位量を表すものと仮定した。更にピークに達する以前においても相似な曲面が成立すると考え、降伏曲面と変位量を表す曲面の大きさを関係付けて硬化則とする。硬化則は変位量曲面の大きさを t_p で表し、単純鉛直荷重時の $V-v_p$ 近似曲線の v_p を t_p で置き換え以下の式で与えられる。

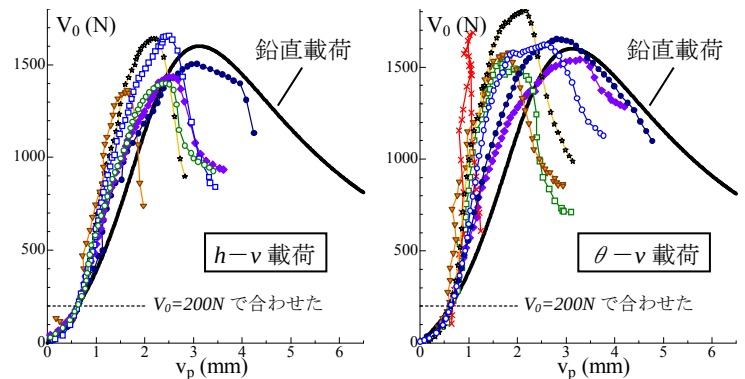


図6 V_0-v_p 曲線比較 (Radial Test)

$$V_0 = \frac{a_1 t_p}{a_2 t_p^2 + a_3 t_p + a_4} V_{\max} \quad t_p = \sqrt{v_p^2 + \left(\frac{h_p}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{B \theta_p}{\beta}\right)^2}$$

$$\alpha = 0.909, \quad \beta = 0.742$$

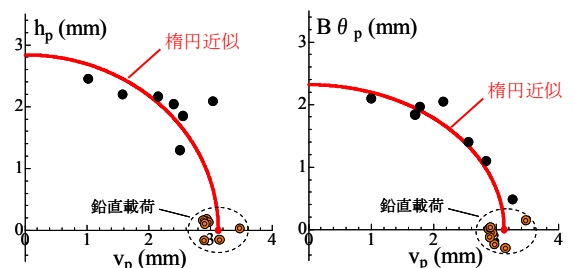


図7 ピーク荷重時の変位関係 (Radial Test)

4. 変位予測

以上に述べたモデルの適用性を確認するため、Radial Test の荷重から変位予測を行った。図8にその例を示す。ピーク後はやや過大に変位を予測するものの、ピーク前はうまく変位の予測ができています。

5. まとめ

本研究は、基礎-地盤系をマクロな要素と見て塑性論を適用したモデルを帯基礎について作成した。その結果、静的な単調荷重に対しては精度良く基礎の変位を予測することができた。

参考文献：1) G.Gottardi, G.T.Houlsby, R.Butterfield : Plastic response of circular footings on sand under general planar loading, *Geotechnique* 49, No.4, pp.453~469, 1999. 2) 堀ら：組合せ荷重を受ける砂地盤の支持力・変形特性, 第40回地盤工学研究発表会, pp.1471-1472, 2004. 3) 古川ら：組合せ荷重を受ける砂地盤上の帯基礎の荷重-変位モデル, 第41回地盤工学研究発表会, pp.1359-1360, 2005.

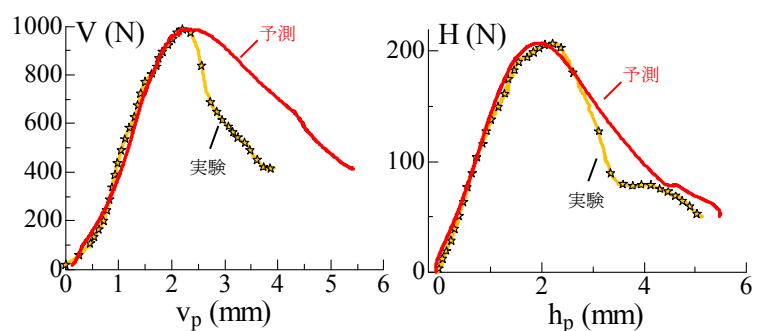


図8 Radial Test の変位予測