

種々の载荷条件下にある砂地盤の変形挙動に関する FEM 解析

FEM analysis of lateral flow deformation of sand ground subjected to static and cyclic loadings

専修大学北海道短期大学 土木科
北海道大学大学院 工学研究科

○正 員 横浜 勝司 (Shoji YOKOHAMA)
フェロー 三浦 清一 (Seiichi MIURA)

1. まえがき

種々の形態の荷重を受ける構造物-地盤系の支持力および流動変形特性を、簡便な解析手法によって適切に評価できることは、合理的な設計をする上で極めて有効である。

本研究では、構造物の沈下に伴う地盤の側方流動変形挙動を有限要素法による弾塑性解析および模型試験¹⁾によってどのように評価できるかを検討し、変形挙動を推定するための簡易解析手法の基本的な考え方を示した。

2. 変形解析

本解析では、図-1 に示されるような要素分割^{2) 3)}を行った。これは模型試験¹⁾における模型地盤および構造物に対応しており、二次元平面ひずみ条件である。地盤は長さ2000mm、深さ400mm、要素数630、節点数2009である。底面および左右側面は固定端として地盤の鉛直および水平変位を拘束している。

地盤の構成モデルには Mohr-Coulomb の破壊基準を用いている。また降伏関数 F と塑性ポテンシャル関数 Ψ はそれぞれ以下のである。

$$F = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c \cdot \cos \phi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (1)$$

$$\Psi = (\sigma_1 - \sigma_3) - 2c \cdot \cos \phi - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \phi \quad (2)$$

ここで σ_1 , σ_3 はそれぞれ土要素に作用する最大および最小主応力、 c は粘着力、 ϕ は内部摩擦角である。また ϕ はダイレイタンシー角であり、本解析は $\phi \neq 0$ のような非関連流動則による解析を行った。なおここでは $\phi = 0$ と設定して解析を進めた。

有限要素の離散化は Galerkin 法を用いている。さらに計算の収束判定として、 $\{R\} = [K]\{u\} - \{F\}$ のように表される残差ベクトル $\{R\}$ のスカラー値が初期値(1 回目の収束計算での値)の 0.1% 以下になったときを収束とみなし、計算している。ここで $[K]$ は剛性マトリクス、 $\{u\}$ は変位ベクトル、 $\{F\}$ は節点に作用する外力ベクトルを示している。

3. 载荷方法と変形量の定義

本研究では、静的载荷試験と繰返し载荷試験の解析および模型試験⁴⁾を行った。载荷方法を図-2 に示す。静的载荷試験では、荷重を中心载荷条件(Static Central Loading Test, SCL と略称)と偏心载荷条件(Static Eccentric Loading Test, SEL と略称)で载荷しており、偏心度の違いが地盤の変形挙動に及ぼす影響を調べている。SEL 試験および解析では、荷重の偏心距離 e を構造物の幅 B で正規化した偏心度 e/B を 0.15, 0.3, 0.5 に設定した。なお模型試験での静的荷重の载荷速度は $0.3 \text{ kN/m}^2/\text{min}$ である。一方、繰返し载荷試験(Cyclic Central Loading Test, 以下 CCL と略

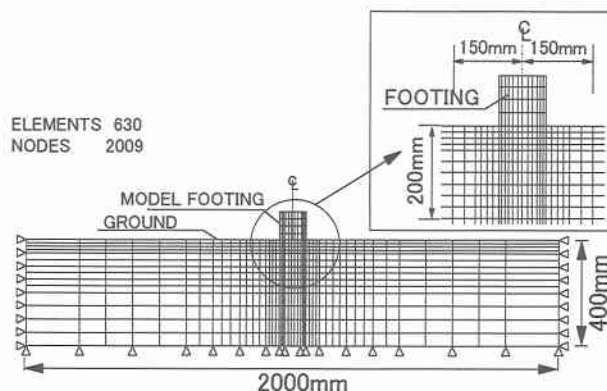


図-1 変形解析に用いたメッシュ

称) では、構造物の中心に繰返し荷重を与えている。すなわち、半正弦波荷重を周期4秒で模型構造物に与え、载荷方法の違いによる地盤の変形挙動の変化を調べた。

図-3 は、構造物および地盤が変形した状態を模式的に示したものである。解析および試験の結果から地盤・構造物系の変形挙動を評価するために、図中に示されるような各変形量(構造物変位量および地盤内の変形)を測定している。構造物の左右の下部端点における沈下量をそれぞれ S_{VL} , S_{VR} とし、両者のうちの大きい方の値を S_{Vmajor} , また水平移動量を S_{HL} , S_{HR} と定義し、そのうちの大きい方の値を S_{Hmajor} とした。これらの値は载荷ロードに具備されている変位計の測定値を用いて幾何学的に計算されている。

構造物の変位に伴う地盤の側方流動変形を実験的に調べるために、直径1.9mmのスパゲティ⁵⁾を地盤内に挿入し、試験中にそれらの変形量を測定している。なおスパゲティは地盤の深さ200mmまで挿入されており、その位置は模型構造物底部の左右端点、およびその点から25mm間隔に挿入している。スパゲティは地盤の変形に影響を与えないような剛性(初期剛性の4%以下)になった後、試験が開始されている³⁾。

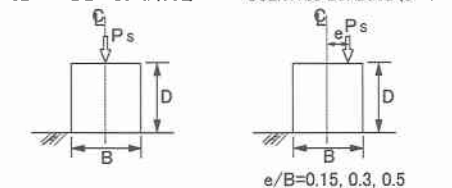
地盤内の側方変形は、このスパゲティの変位量(水平変位量)を測定することによって把握されている。すなわち、構造物端点の位置に挿入されたスパゲティの水平変位量を測定し、その値を側方変位量 δ として測定している。

また、構造物の沈下量およびスパゲティの変形量から、以下に示す沈下土量 V_p 、側方流動土量 V_δ を算出し、考察に用いている(図-3 参照)。

・沈下土量 V_p : 構造物が地盤に沈下した部分の単位奥行当りの体積。

・側方流動土量 V_δ : 地盤が側方に変形した部分の単位奥行当りの体積

STATIC LOADING TEST (B=100mm, D=100mm)
CENTRAL LOADING (SCL) ECCENTRIC LOADING (SEL)



CYCLIC CENTRAL LOADING TEST (CCL)

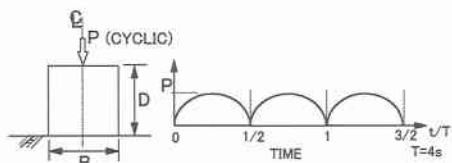


図-2 試験方法(静的および繰返し載荷試験)

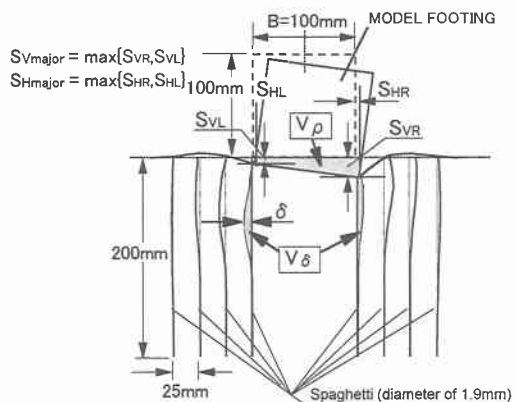


図-3 地盤-構造物系の変位量の定義

4. 静的載荷条件での変形解析

4.1 支持力および側方変形挙動

静的中心載荷条件下にある砂地盤の支持力特性を調べるために、図-4に SCL および SEL 試験の解析および模型試験結果の支持力-沈下量 S_{Vmajor} 関係を示している。なお支持力は、模型試験では静的荷重 P_s を構造物底面積で除した値、解析では構造物底面での応力の平均値として評価している。

SCL 試験に対応する FEM 解析に用いた地盤のパラメータは、弾性係数 $E=3000\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角 $\phi=35^\circ$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ とした²⁾。一方、SEL 試験に関する解析では、ポアソン比の変化が解析結果に与える影響について検討するために、 $\nu=0.3$ の他にポアソン比を変えた解析も行っている。なお模型構造物は剛体と仮定して解析した。

いずれの試験においても、沈下量 S_{Vmajor} が 20mm 程度までは、解析値と実測値が良く一致していることが分かる。なお、沈下量 $S_{Vmajor}=20\text{mm}$ は模型構造物幅 $B(=100\text{mm})$ に対して 20%となる大きさ($S_{Vmajor}/B=0.2$)である。建築基礎構造設計指針⁶⁾等によると、地盤の極限支持力が誘発されるときに構造物の沈下量は、基礎幅の 10%程度であることが指摘されている。また、本模型試験においても S_{Vmajor}/B が 10%に達した時点でくさびの形成が確認されている¹⁾⁴⁾⁷⁾。したがって本解析結果は、地盤の極限支持力が発生するまでの地盤の挙動を再現できているものと考えられる。

また SEL 試験では、実測および解析値において、偏心

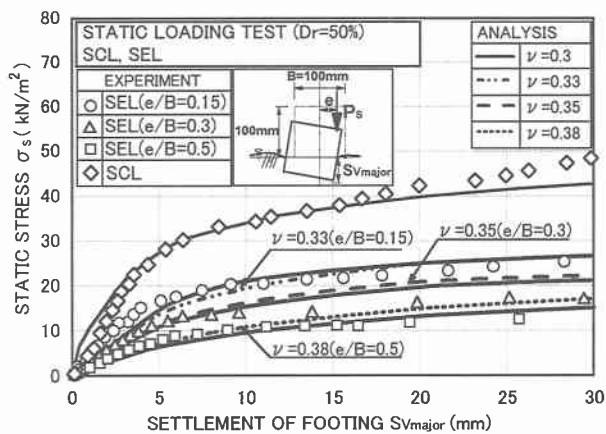


図-4 支持力-沈下量関係(SCL, SEL : Dr=50%)

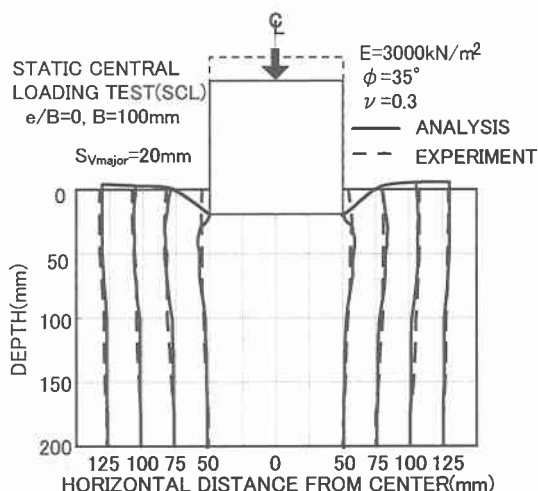


図-5 地盤-構造物系の変形(SCL, Dr=50%)

度が高くなるにつれて地盤の支持力が低下する傾向が見られている。これより解析および試験結果は、Meyerhof⁸⁾が示した有効幅の概念を良く説明しているようである。したがって解析値は、SCL 試験と同様に、偏心度がある場合にも地盤の支持力特性を表現できていると言える。また、ここで採用した各パラメータの値は、静的載荷条件での地盤の支持力特性を示す上で妥当であると考えられる。

次に、構造物-地盤系の変形挙動を調べるために、沈下量 $S_{Vmajor}=20\text{mm}$ における地盤の変形図を模式的に示した(図-5参照)。実線が解析値、点線が実測値を示している。この図より、本解析法は構造物の沈下に伴う地盤の側方変形挙動をよく再現していることが分かる。

同様に、図-6に SEL 試験(偏心度 $e/B=0.3$)の $S_{Vmajor}=20\text{mm}$ における構造物-地盤系の変形図を示している。図より、 $\nu=0.3$ での解析結果は、深さ 50mm 程度まで、地盤の側方変形量 δ を過小評価していることが分かる。しかしながら、全体的な側方変形挙動は良く再現されているようである。なお模型実験において、荷重の偏心度が増加すると地盤が流動し易くなるという傾向⁴⁾が見られている。したがって、図-6のような解析値と実測値間の差は、荷重の偏心度が地盤の側方流動特性に影響を与えた結果によるものとして説明されよう。

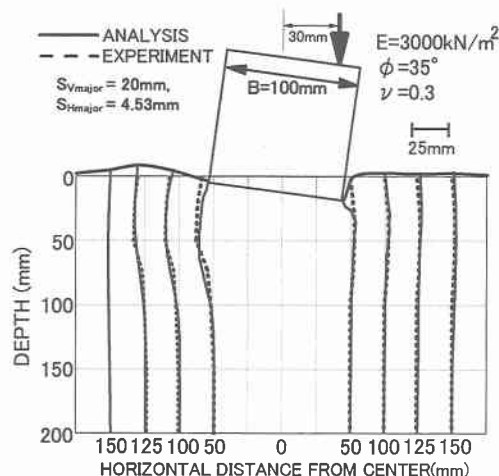


図-6 地盤－構造物系の変形(SEL, $e/B=0.3$, $Dr=50\%$)

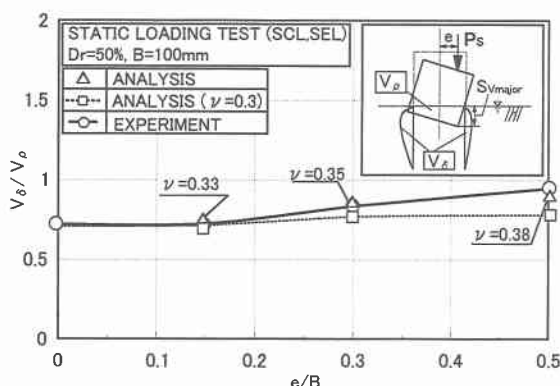


図-7 土量比－偏心率関係($S_{vmajor}=10mm$)

4.2 発生土量の解析

次に、本解析法によって、地盤の流動変形挙動を再現可能かどうかを検討する。ここでは、地盤－構造物系の変形挙動を、側方流動土量 V_δ を沈下土量 V_0 で正規化した土量比 V_δ/V_0 を用いて調べた。なお土量比 V_δ/V_0 は、地盤－構造物系の側方変形挙動を表現できるパラメータ²⁾として、簡便かつ有効であることが明らかにされている。

図-7 には構造物の沈下量 S_{vmajor} が 10mm における土量比 V_δ/V_0 と偏心率 e/B の関係を示した。図では、それぞれの偏心率において実測土量比 V_δ/V_0 を再現するようなポアソン比に設定して解析を行った結果を示している。比較のために、図中にはポアソン比 $\nu=0.3$ の解析結果も併せて示している。

実測値では、偏心率 e/B が増加すると土量比 V_δ/V_0 も増加する傾向が見られている。これは、荷重の偏心率の違いが地盤の側方流動挙動に及ぼす影響が大きいことを示している。一方、ポアソン比を 0.3 に設定した解析では、土量比 V_δ/V_0 がほぼ一定となり、偏心率の違いによる地盤の側方流動変形挙動の変化を再現できていないことが分かる。しかし、偏心率に応じてポアソン比を変化させると、地盤の側方流動変形をより適切に表現可能であることが分かった。

そこで、偏心荷重場にある地盤のポアソン比についてさらに検討するために、図-8 に SEL に対する解析で設定した地盤のポアソン比 ν を SCL に対する解析で用いたポア

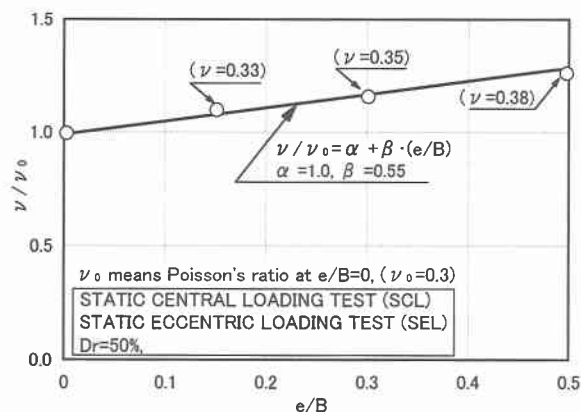


図-8 設定ポアソン比と偏心率の関係

ソン比 ν_0 で正規化した値 ν/ν_0 と、偏心率 e/B の関係を示した。これより、荷重の偏心率 e/B が増加するにつれて ν/ν_0 も大きくなることが分かる。これは以下のような関係で示される。

$$\begin{aligned} \nu/\nu_0 &= a + b \cdot (e/B) \\ (a=1, b=0.55) \end{aligned} \quad (3)$$

ここで a , b は定数、 ν_0 は SCL 試験での解析に用いたポアソン比($\nu_0=0.3$)である。これより、静的偏心荷重が作用する地盤の変形挙動の解析を行う場合には、上式のような関係を考慮すると、側方流動変形を精度良く再現できると考えられる。

5. 繰返し載荷試験の変形解析

5.1 繰返し荷重を受ける地盤の沈下挙動

波浪のような複雑な形態の荷重を受ける地盤－構造物系の変形挙動を調べるために、まず単純な繰返し載荷条件での地盤の沈下および側方流動変形を調べることは有効である。そこで本研究では、繰返し中心載荷(CCL)における解析および試験を行った。

まず、繰返し荷重を受ける構造物・地盤系の沈下挙動の特徴を明確にするために、図-9 に荷重の繰返し回数 N_c を地盤の剛性比によって正規化した値 $N_c/(E/E_0)$ と、 N_c との関係を示した。ここで E は、繰返し応力 σ とひずみ(沈下量 S_{vmajor} を模型地盤厚 H_s で除した値)の比²⁾³⁾、いわゆる弾性係数を示している。また E_0 は $N_c=1$ 時の E の値である。図より、 $N_c/(E/E_0)$ 値と N_c との関係は直線的であることが分かる。したがって、繰返し載荷条件下にある地盤剛性の変化は、荷重の繰返し回数の関数として評価できそうである。

そこで、繰返し回数 N_c の増加に伴って地盤の剛性が高くなるものと仮定し、以下のように繰返し載荷による地盤の剛性変化²⁾³⁾を考慮してみた。すなわち、地盤の弾性係数 E と繰返し回数 N_c の間に以下の関係が成立つものとした。

$$E/E_0 = N_c / (c + d \cdot N_c) \quad (4)$$

ここで、 E_0 は $N_c=1$ での地盤の弾性係数であり、ここでは SCL で設定した値($E_0=3000 \text{ kN/m}^2$)とした。また E は任意の N_c における弾性係数、 c および d は定数である。ここでは $c=0.93$, $d=0.07$ としている。

このような地盤剛性の変化を考慮して解析した結果を図-10 に示している。図は、構造物の沈下量 S_{vmajor} と荷重の

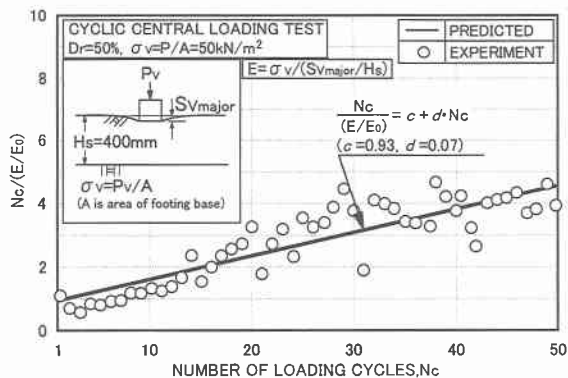


図-9 地盤の剛性と繰返し回数との関係

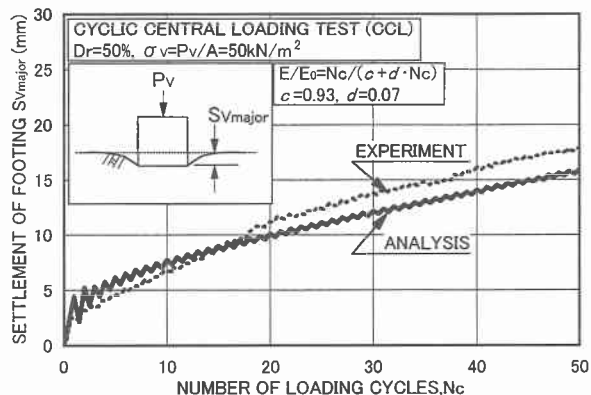


図-10 沈下量と繰返し回数 N_c の関係(CCL, $Dr=50\%$)

繰返し回数 N_c との関係を示したものである。なお繰返し載荷応力は 50kN/m^2 であり、地盤の相対密度は 50% である。ここでは構造物の沈下が大きく急激に進行するまでの変形挙動を調べるために、繰返し回数 N_c は 50 回までとして解析している。

この図より、繰返し回数 N_c が小さい段階(つまり沈下量が急激に発生するような段階)では、実測値と解析値の挙動が良く対応していることが分かる。

したがって、地盤剛性が繰返し載荷回数によって変化する地盤特性を考慮した FEM 解析法は、繰返し荷重場にある地盤一構造物系の沈下挙動をある程度再現できることが分かった。つまり、繰返し載荷を受ける地盤の初期沈下挙動を把握する上で、(4)式のような仮定は有効であると言える。

5.2 繰返し荷重場での側方流動特性

次に、繰返し載荷を受ける地盤一構造物系の側方変形挙動について調べる。図-12は CCL で解析および模型試験から得られた土量比 V_δ/V_p と沈下量 S_{vmajor} の関係を示している。実測値によると、 S_{vmajor} の増加に伴い V_δ/V_p が双曲線的に増加しながら 0.8 程度の値に収束する傾向にある。一方、解析においても、 S_{vmajor} が小さいときには土量比 V_δ/V_p が急増するような挙動を示している。しかしながら、解析における土量比 V_δ/V_p の収束値が 0.6 になっており、実測値と異なる結果を示した。

本解析では、地盤のポアソン比を 0.3 に固定して繰返し載荷に対する解析を行っているため、繰返し回数 N_c の増加に伴う地盤の側方流動変形の増加挙動を再現できていな

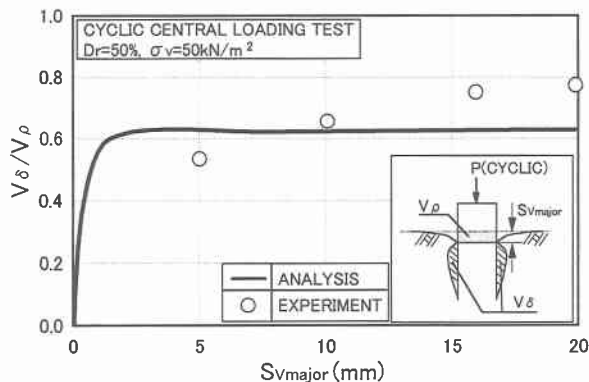


図-11 土量比と沈下量の関係(CCL, $Dr=50\%$)

いものと思われる。したがって、繰返し荷重を受ける地盤の側方流動変形を FEM 解析によって正確に評価するためには、地盤剛性の繰返し回数 N_c の依存性以外に、新たな評価が必要になると言える。

6. 結論

一連の解析および模型試験から、以下の結論を得た。

- (1) 静的偏心荷重を受ける地盤の側方流動変形を FEM によって再現するためには、偏心度の変化に伴う地盤のポアソン比の変化を考慮する必要がある。
- (2) 繰返し荷重場にある地盤一構造物系の沈下挙動を解析によって評価するには、地盤の剛性変化を考慮することが重要である。また地盤の側方流動変形を評価するためには、地盤の剛性以外にも新たな評価法が必要と言える。

参考文献

- 1) 川村志麻, 三浦清一, 横浜勝司, 宮浦征宏: 繰返し力を受ける構造物支持地盤の破壊とその防止策に関する実験, 土木学会論文集, No.624, III-47, pp.77-89, 1999.
- 2) Yokohama, S., Seiichi MIURA, Shima KAWAMURA and Masahiro MIYAURA: Mechanical behavior of sand bed-coastal structure system subjected to cyclic loading, Proceedings of An International Conference on Geotechnical and Geological Engineering(GeoEng2000), 2000.
- 3) 横浜勝司, 高橋朋代, 三浦清一, 川村志麻, 木幡行宏: FEM 解析による構造物・地盤系の側方流動変形の評価, 地盤工学会北海道支部技術報告集, 第 40 号, pp.237-246, 2000.
- 4) 川村志麻, 飯田和弘, 宮浦征宏, 横浜勝司, 三浦清一: 静的および繰返し荷重場にある構造物支持地盤の変形特性, 土木学会第 54 回年次学術講演会講演概要集, 第三部門, pp.30-31, 1999.
- 5) Tani, K.: Stability of skirted gravity foundations on very soft clay, Ph. D. Thesis, Dept. of Engineering, Manchester Univ., 1990.
- 6) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 1988.
- 7) 三浦清一, 瀧本聖吾, 川村志麻, 萩原淳平: 二次元平面ひずみ模型土槽による飽和砂層の流動化条件に関する研究, 土質工学会北海道支部技術報告集, 第 34 号, pp.194-201, 1994.
- 8) Meyerhof, G. G.: The bearing capacity of foundation under eccentric and inclined loads, Proceeding of 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol.1, pp.440-445, 1953.