

分割法を用いた異方性砂地盤の支持力解析

成田 国朝・奥村 哲夫・山口 柏樹*

Analysis of Bearing Capacity of Anisotropic Sand Deposits by Use of a Slice Method

Kunitomo NARITA, Tetsuo OKUMURA and Hakuju YAMAGUCHI*

It has already been pointed out that natural sand deposits have much strength anisotropy due to initial fabric of parallel alignment of particles, though it is still not clear how such strength anisotropy is related with the bearing capacity of foundation. In the analysis of bearing capacity of anisotropic sand deposits, it should first be required to understand mutual relationship between directions of anisotropy, maximum principal stress and slip surface. This paper concerns, firstly with the development of slip surface in sands with fabric anisotropy in plane strain compression tests, and secondly with the effects of strength anisotropy on the bearing capacity of strip foundation. Some characteristic remarks were drawn on the analytical results of bearing capacity of sands with different directions of anisotropy, and qualitatively good correspondence was attained between the measured and calculated values.

1. はじめに

砂地盤が堆積時の定方向配列によって初期構造異方性に富むことは広く認められており、三軸あるいは平面ひずみ条件の下で堆積面の傾角を変えた圧縮試験を行って強度異方性との関連性を調べた研究が幾多見られている^{1)~4)}。しかし、要素試験で明らかにされた異方性が、砂地盤の支持力など、実際の安定問題にどう関わるかはあまり分かっておらず、関連した研究も比較的少ない。

異方性砂地盤の支持力については、小田ら⁵⁾や木村ら⁶⁾が小型模型あるいは遠心載荷装置を用いて堆積方向を変えた支持力実験を行い、地盤の変形性状や支持力値に与える構造異方性の影響を調べている。また、Kötter 式を異方性地盤に拡張して数値解を求めて実験値との整合性を検討しているが、いずれも異方性を考慮しない支持力計算ではかなり危険側の予測を与えることを指摘している。

異方性砂地盤の支持力解析では、異方性の主方向（堆積面方向）と主圧縮応力方向およびすべり面方向の3者がどう関係するかが基本的に関わってく

る。先の Kötter 式では、前2者の関係から強度定数を場所の関数として解析に取り込み、特性方程式を解いてすべり面を決定する。この意味で合理性の高い解析手法であるが、計算手続きがかなり煩雑で実用に供し難い面がある。他方、斜面安定解析に用いられる分割計算法は、以前から不均一地盤の支持力評価法としてその実用性が認められており、筆者らの一人も先にピシヨップ法を用いた複合すべり面に対する分割法を提示してその有用性を確かめている⁶⁾。

本研究は、異方性砂の平面ひずみ圧縮試験を実施してすべり面方向の観察を行い、すべり面方向と堆積面、主圧縮応力方向との関連性を調べるとともに、複合すべり面を用いた支持力解析を行って異方性の表現方法が支持力値に与える影響を調べながら、異方性砂地盤の支持力特性について解析的検討を行った結果を報告するものである。なお、本研究は文部省科学研究費補助金（一般C、代表：山口柏樹、No. 61550352）の援助を受けたことを付記し、ここに謝意を表す。

* 東京電機大学理工学部

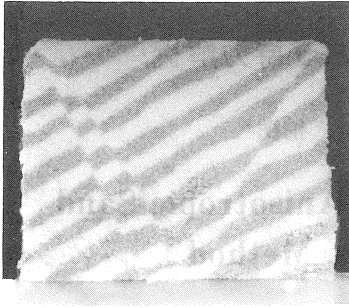


写真-1 すべり面の観察

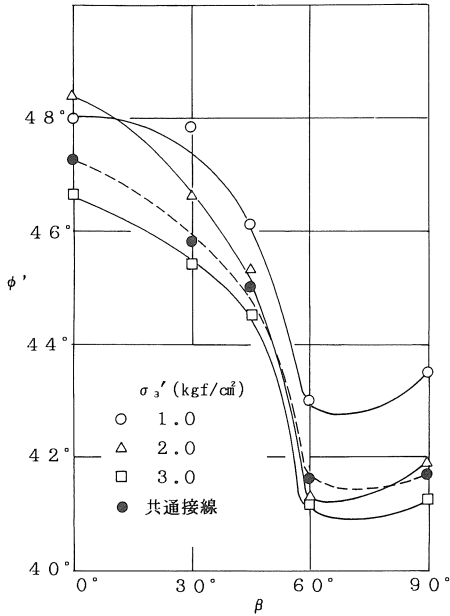


図-1 平面ひずみ試験 ($\phi' \sim \beta$)

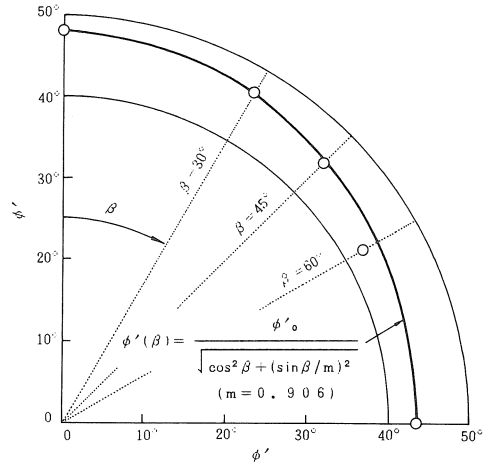


図-2 $\phi' \sim \beta$ 関係の楕円表示

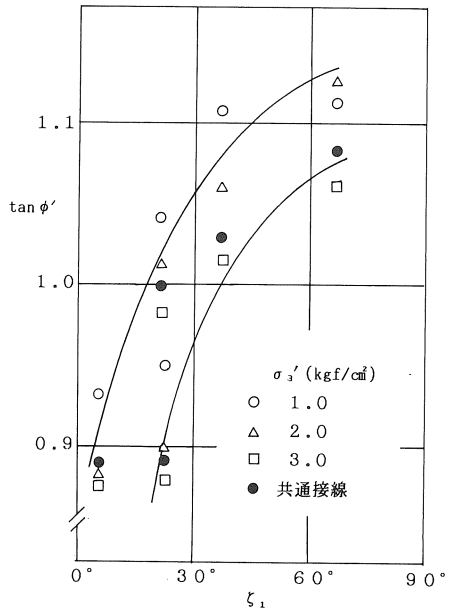


図-3 $\tan \phi' \sim \xi_1$ 関係

2. 異方性砂の平面ひずみ圧縮試験

木村ら³⁾と同様な方法で、可傾モールドを用いて堆積面の傾角を変えた正方形供試体(一辺10cm)を作製し、平面ひずみ圧縮試験を実施した。用いた試料は豊浦標準砂であり、 $e=0.69$ ($Dr=78\%$)に調整して作製した各傾角の供試体に対し、拘束圧を $\sigma_3'=1, 2, 3 \text{ kgf/cm}^2$ に変えて実験を行った。本実験では供試体を作製する際に着色した豊浦砂を互層に詰め、試験後に断面を切り出してすべり面の観察を行った。写真-1は一例として $\beta=30^\circ$ (β :堆積面と最大主応力面の交角)の場合を示したが、かなり明瞭なすべり面が観察されている。

図-1は本実験で得られた $\phi' \sim \beta$ 関係であり、

$\beta=0^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ および 90° に対して拘束圧ごとに

$$\phi' = \sin^{-1}(\sigma_1' - \sigma_3' / \sigma_1' + \sigma_3')f \quad (1)$$

から定まる ϕ' と、 $\sigma_3'=1, 2, 3 \text{ kgf/cm}^2$ の破壊円の包絡線として得られる ϕ' を併記して示した。また図-2は、破壊包絡線から定まる ϕ' と β の関係を極形式でまとめたものである。 $\beta=90^\circ$ の ϕ' (ϕ_{90}')と $\beta=0^\circ$ の ϕ' (ϕ_0')の比

$$m = \phi_{90}' / \phi_0' \quad (2)$$

は異方性の一つの尺度を与えるが、本実験では $m=0.906$ となった。この結果に基づいて図中式で表される楕円近似を行った曲線が太い実線で示されている

る。一般に平面ひずみ試験では、 $\beta=60^\circ$ 付近で ϕ' が極小値を取ることが知られているが²⁾³⁾、本実験結果においても概ねその傾向が認められる。

この点に関して松岡ら⁴⁾は、図-4の図中に示す堆積面と滑動面（潜在すべり面）のなす角度 ξ_1

$$\xi_1 = |45^\circ + \phi'/2 - \beta| \quad (3)$$

が粒子のかみ合い抵抗の程度を表す指標として適切であり、 β に関して極小値をもつ摩擦成分 $\tan\phi'$ （または ϕ' ）が ξ_1 に対しては直線的に増加すると述べている。図-3は図-1の実験結果を $\tan\phi' \sim \xi_1$ 関係でまとめたものである。実験結果にバラツキがあり、確とした関係は認められないが本実験値に対しては実線で示すような曲線関係が考えられる。

図-4は各供試体に対して式(3)から計算される ξ_1 と、すべり面観察から直接測定される交角 ξ の対応関係を調べたものである。●印が上記 ξ_1 であるが、 $\beta=30^\circ \sim 60^\circ$ の実験では写真-1に見られるような滑動面と対をなすすべり面も観察されたので、これと堆積面の交角を ξ_2 （ただし鋭角をとる）

$$\xi_2 = |45^\circ + \phi'/2 + \beta| \quad (4)$$

として○印でプロットした。すべり面観察の精度の問題もあるが、両者は良く対応しており、 ξ_1 、 ξ_2 に有為な差はないように思われる。

以上のように、強度異方性を表現する方法にも、図-2の楕円表示のように堆積角 β だけに着目して整理するか、松岡らの $\tan\phi' \sim \xi_1$ 関係（図-3）のように堆積面とすべり面の関係を考慮して整理するかなど内容的にかなり異なるものが考えられ、その物理的意味づけや適用性については今後十分議論していく必要がある。以下では、上記の異方性の表現方法の違いが支持力値に与える影響を調べながら、異方性砂地盤の支持力特性について解析的検討を進めることとする。

3. 異方性砂地盤の支持力解析

3.1 解析手法

地盤が不均一であったり、強度異方性が著しい場合の支持力解析には、斜面安定解析に用いられるビショップ法を応用した複合すべり面に対する分割法が有用であることを先に示した⁶⁾。この手法は図-5に概略示したように、過渡域を円弧すべりと仮定して帯片分割し、両端面に作用する主動土圧 P_h と受働土圧 P_p を合わせて中心点回りのモーメントつり合いより支持力 q を算出するものである。ここでは、この手法を水平からの傾斜角が δ なる斜め異方性砂地盤の解析へ拡張するが、このとき堆積面方向、最大主応力方向およびすべり面方向の間には図示の関係があり、前節で定義した堆積面方向と最大主応力面の交角 β は次式で与えられる（鋭角をとる）。

$$\beta = |45^\circ + \phi'/2 - (\alpha - \delta)| \quad (5)$$

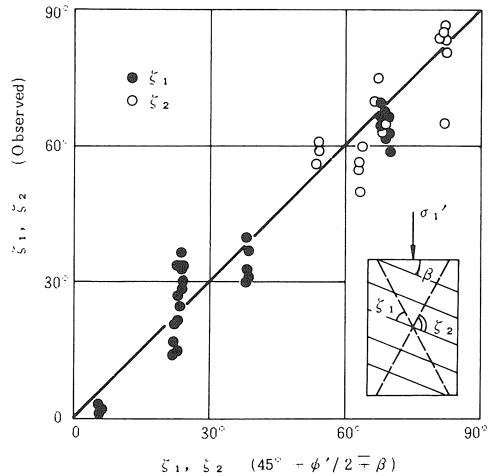


図-4 堆積面とすべり面の関係

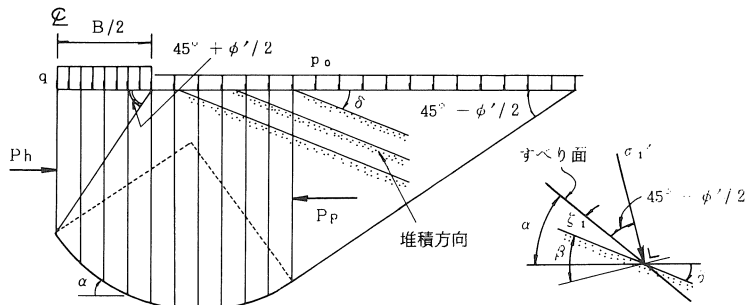
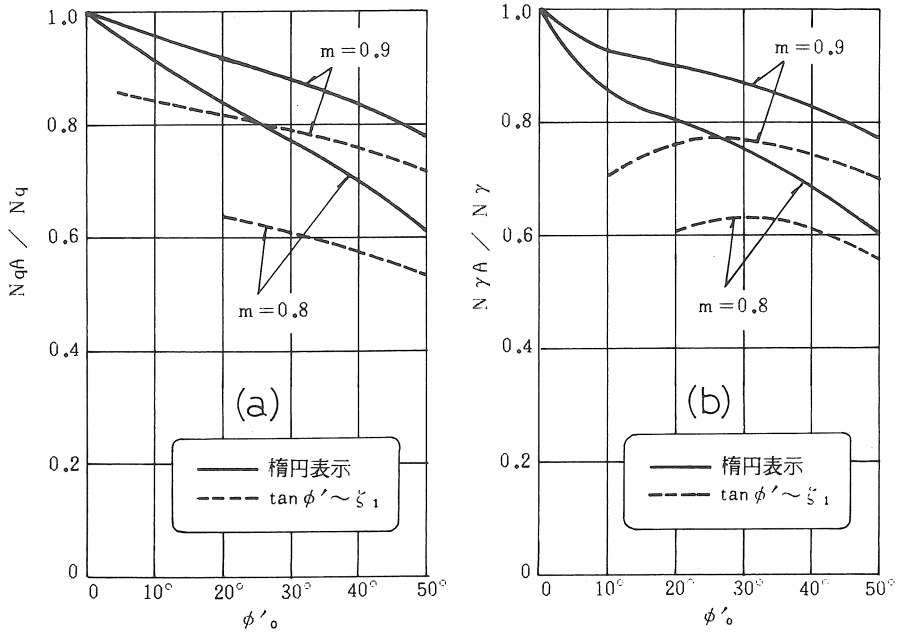


図-5 斜め異方性地盤の解析



図一六 水平堆積地盤の支持力係数

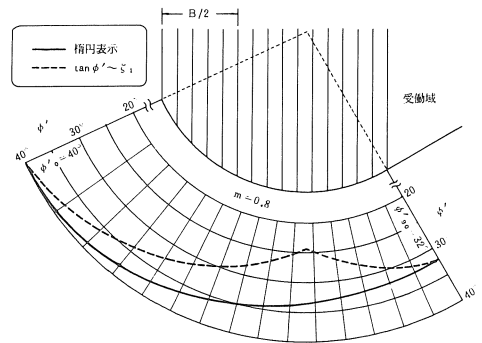
ここで、 ϕ' と β は互いに関数関係にあるから、その決定に当たっては、例えば楕円表示で得られる $\phi' \sim \beta$ 関係と上式の $\beta \sim \phi'$ 関係が同時に満たされるように、試探的な操作が必要となる。

3.2 水平堆積地盤の支持力解

図一六は水平堆積地盤 ($\delta=0^\circ$) において、式(2)で定義される異方性比率を $m=0.8, 0.9$ として計算した支持力係数 $NqA, N\gamma A$ (A は異方性の意) を、等方性地盤の $Nq, N\gamma$ との比で示したものである。ここで、実線は楕円表示を用いた解、破線は松岡らの提案する $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係を用いた解である。図に見られるように、同じ m 値に対しても異方性の表現法によって支持力値がかなり異なることが分かる。

図一七は $\phi'_0=40^\circ, m=0.8$ の場合について、同一円弧すべり面上の ϕ' の分布を比較したものである。楕円表示では主動域から受働域に至る間に ϕ' が単調に減少するが、 $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係では $\zeta_1=0^\circ$ のすべり面最深处で ϕ' が極小値をとり、その値は ϕ'_{90} より小さくなる。すなわち後者の場合は図一に見られるような $\beta=60^\circ$ 付近での ϕ' の極小化傾向が反映されるのであり、これによって図一六の支持力値が全般的に小さ目にする傾向が説明できる。

以上の検討を通じて、いずれの表現方法が合理的であるかは軽々に断じ難いが、楕円表示の方法では



図一七 すべり面上の ϕ' 分布 (水平堆積地盤)

異方性を支配する滑動方向を考慮する余地がないこと、 $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係では ζ_1 小なる範囲で実験で得られる極小値を越えて ϕ' 値を外挿する場合があること、など支持力解析を行う上で検討すべき問題点が幾つか残されている。

3.3 斜め異方性地盤の支持力解析

図一八は異方性比率を $m=0.8$ として、堆積角 δ を変化させて求めた $N\gamma A$ を等方性地盤の $N\gamma$ との比で示したものである。 Nq についても同様の図が描けるが、その ϕ' および δ に対する変化傾向は $N\gamma$ と大体類似していると考えてよい。図によると、 ϕ' の値によらず $\delta=0^\circ$ (水平堆積) の $N\gamma A$ 値が最も大

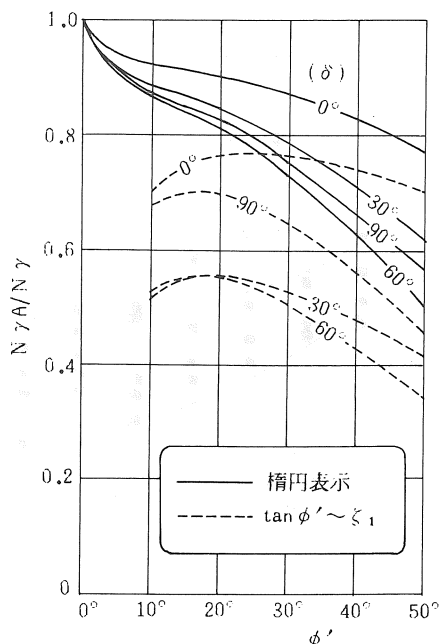


図-8 斜め異方性地盤 ($N\gamma \sim \phi'$)

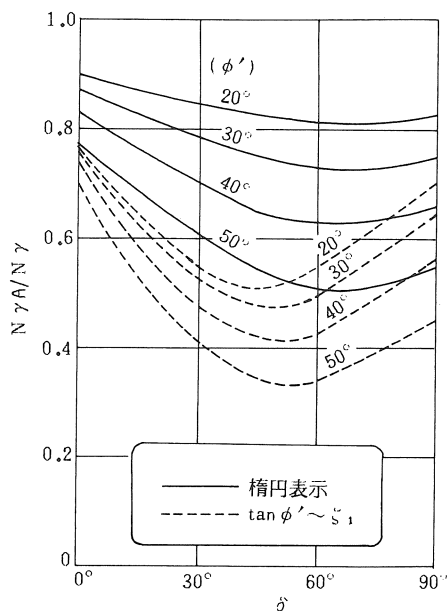


図-9 斜め異方性地盤 ($N\gamma \sim \delta$)

きいが、逆に最小の $N\gamma A$ 値は $\delta=90^\circ$ (鉛直堆積) の場合でなく、 $\delta=30^\circ \sim 60^\circ$ の間に現われることが知られる。図-9 はこれを明確にする意味で同じ結果を ϕ' をパラメータとして整理し直したものである。異方性の表現方法によって支持力の極小値を与える堆

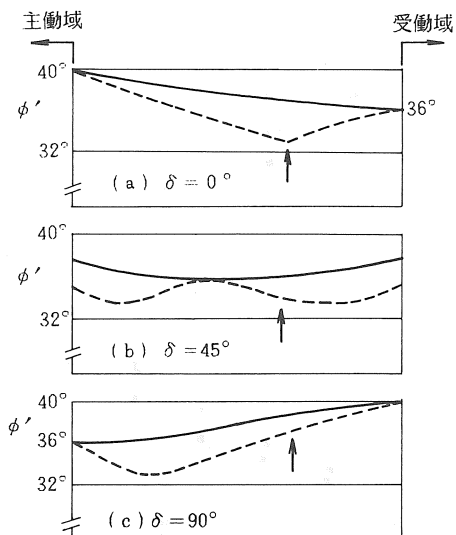


図-10 すべり面上の ϕ' 分布 (斜め異方性地盤)

積角 δ が異なること、および $\tan \phi' \sim \zeta_1$ による $N\gamma A$ 値が全般的に小さく、 δ の変化に対してかなり大きく変動することが示される。

図-10は上記の特性を調べるために、 $\phi'_0=40^\circ$ 、 $m=0.9$ の場合についてすべり面上の ϕ' の分布を比較したものであり、矢印はすべり面最深部を表す。水平堆積 ($\delta=0^\circ$) の場合は図-7と同じであり、楕円表示では受働域側、 $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係ではすべり面最深部で ϕ' が極小値をとる。 δ が大きくなるとこれらの極小点は主動域側へ移動するが、 $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係では別の極小点が受働域側に現われる。そして、 $\delta=90^\circ$ で $\delta=0^\circ$ と対称の分布形になる。したがって両方法とも、その途中の $\delta=30^\circ \sim 60^\circ$ で ϕ' が平均的に最も小さくなり、これが図-9の支持力特性に反映されたと考えられる。

4. 実験値との比較

図-11は木村³⁾が遠心载荷装置を用いて行った砂地盤の支持力実験の結果について比較計算を行ったものである。ここで、V载荷は载荷方向と堆積方向が直交する場合(本文の水平堆積： $\delta=0^\circ$)、H载荷は両方向が一致する場合(鉛直堆積： $\delta=90^\circ$)である。計算は前と同様に2つの表現方法に対して行ったが、両方法の差は比較的小さく、 $\tan \phi' \sim \zeta_1$ 関係が実験値に近づいている。また、実験ではV载荷とH载荷の差が明瞭でないが、計算では両者にかかなり大きな開きが見られる。このように計算値と実験値

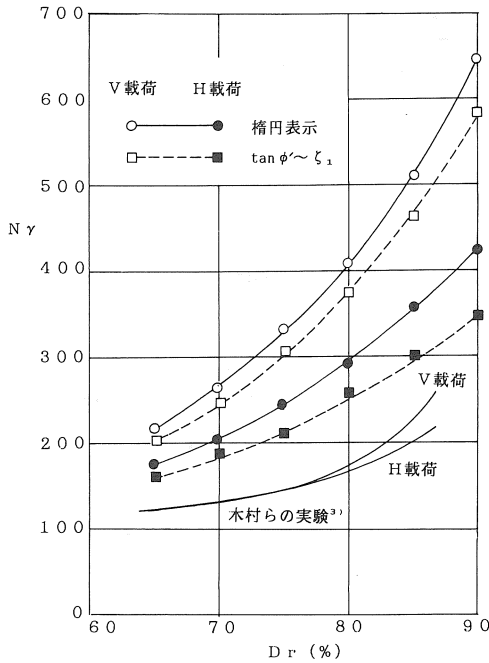


図-11 実験値との比較 (その1)

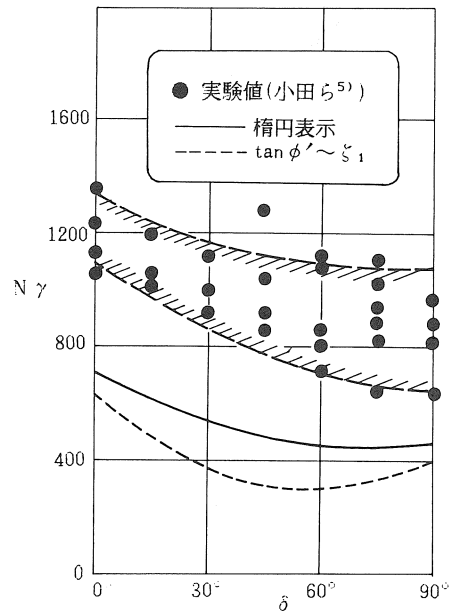


図-12 実験値との比較 (その2)

の差は約2倍程度あり量的には対応しているとは言えないが、支持力値の変動傾向は計算である程度説明しているように思われる。

図-12は小田ら⁵⁾が堆積面の傾角 δ を変化させて行った支持力実験(砂地盤)と比較したものである。実験値(●印)に対して $m=0.9$ として上記2つの方法で計算した $N\gamma$ 値を実線と破線で示している。いずれの計算値も絶対量としては実験値の約半分で、かなりの開きがあるが、 δ の変化に伴う $N\gamma$ の変動傾向はある程度とらえているように思われる。

以上の実験結果との対比では、いずれも計算値と実験値の差が大きく定量的な議論が困難であること、そして計算値と実験値の大小関係が比較対象によって異なる場合があることを指摘した。しかし、後者については解析上の問題というより、むしろ比較対象とした実験の方法が大きく異なる(木村らは遠心場、小田らは重力場の実験)ことによるものであり、これが前者の事項にも関連してくると考えられる。すなわち、木村らの実験の $N\gamma$ は100~250程度であるのに対し、小田らの実験では800~1200程度の $N\gamma$ が得られており、実験の方法によって $N\gamma$ 値のオーダーにかなりの開きがあることが知れる。そして、本解析結果が両者の中間的な範囲に属してい

ることを考えると、上記の計算値と実験値の差は決定的なものではなく、今後の実験資料の蓄積によって更に有効な比較議論が可能になると思われる。

5. まとめ

本研究の成果をまとめると以下ようになる。

- (1) 堆積面、すべり面、そして最大主応力面の3者の方向の関係は滑動面の概念を用いて説明でき、すべり面の観察結果ともよく対応する。
- (2) 異方性の表現方法によってすべり面上の ϕ' の分布や大きさが異なり、これが支持力値に大きく影響する。
- (3) 斜め異方性地盤では、堆積面の傾角 δ が $30^\circ \sim 60^\circ$ の範囲に支持力の最小値が現われる。
- (4) 実験値との対比では、絶対量としての整合性はまだ十分なものとは言えないが、定性的な傾向については比較的良い一致が見られた。

参考文献

- 1) Arthur, J. R. F. and Menzies, B. K.: Inherent Anisotropy in Sand, Geotechnique 22, No.1, pp.115-128, 1972.
- 2) Oda, M., Koishikawa, I. and Higuchi, T.:

- Experimental Study on Anisotropic Shear Strength of Sand by Plane Strain Test, S & F, Vol.18, No.1, pp. 25-37, 1978.
- 3) 木村孟・斉藤邦夫・日下部治・司代明：砂地盤の支持力ならびに変形性状に関する異方性の影響について，土木学会論文報告集，第319号，pp. 105-113，1982.
- 4) 松岡元・平尾淳一・福武毅芳：異方性を考慮した砂の変形・強度論，土と基礎，32-11，pp.31-36，1984.
- 5) Oda, M. and Koishikawa, I.: Effect of Strength Anisotropy on Bearing Capacity of Shallow Footing in a Dense Sand, S & F, Vol. 19, No3, pp.15-27,1979.
- 6) 今泉繁良・山口柏樹：分割法による地盤の支持力計算法，土質工学会論文報告集，Vol.26, No. 2, pp.143-150，1986.
- (受理 昭和63年1月25日)