

粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の支持力解析

Bearing capacity analysis of rigid strip footings on sand overlying clay

山本健太郎*・平 瑞樹**

Kentaro Yamamoto and Mizuki Hira

*博士 (工学), 鹿児島大学助手, 工学部海洋土木工学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-40)

**博士 (農学), 鹿児島大学助手, 農学部生物環境学科 (〒890-0065 鹿児島市郡元 1-21-24)

In this paper, finite element analyses were applied to find the exact limit load of a rough rigid strip footing on a sand layer overlying clay. In addition to the information of ultimate bearing capacity, the normal and shear stress distributions below the footing and on the clay surface were obtained. The results were compared with those calculated using the limit equilibrium and the upper bound methods. A comparison with existing methods indicated that the finite element analyses can provide more reasonable results than the existing ones can. As the depth of the sand layer (H/B) or the undrained shear strength (c_u) of the clay was increased, the failure zone was confined to the upper sand layer. Then, the contact normal and shear stress distributions were similar to those observed below the footing on homogeneous sand. Also, as H/B was increased or c_u was reduced, the width over which normal and shear stresses were applied to the clay surface tended to increase. The ultimate bearing capacities obtained from the finite element analyses were presented in the form of dimensionless charts that may be used in design, for different internal friction angles of sand. Finally, the “critical depth” (the failure mechanism is totally contained within the upper sand layer and the ultimate bearing capacity becomes independent of the undrained shear strength of the lower clay) was proposed.

Key Words: foundation, two-layered soils, bearing capacity, contact stress, finite element method

キーワード: 基礎, 二層地盤, 支持力, 接地圧, 有限要素法

1. はじめに

均一地盤上の浅い基礎に対する支持力や破壊メカニズムは, Terzaghi¹⁾の研究以来, 現在までかなり明らかにされてきた。しかし, 自然地盤においては強度が層状に変化していることや, 砂層の間に粘土層を有する場合あるいは粘土層の間に砂層が介在している場合などの多層系地盤が多く見られる。このような不均一地盤である多層系地盤の極限支持力や破壊メカニズムについては, 均一地盤に比べると未解明なものが多い。また, 二層地盤(上層砂質土, 下層粘性土)をはじめとする多層系地盤の極限支持力に関しては均一地盤と異なり, 明確な理論解は得られていない。

山本らはこれまで, 粘性土上に砂質土を有する二層地盤に対して極限解析法の一つである上界法を用いて, 支持力方を提案した²⁾。設定した破壊メカニズムは内部摩擦角 ϕ が大きい場合や全般せん断破壊形式を示す地盤条件に対しては, 比較的精度の良い近似解を得ることができた。しかし, 全体的にはある程度の誤差を含んだものであると考

えられる。ゆえに, 二層地盤のような基礎幅 B に対する砂質土層の厚さ比 H/B や砂質土と粘性土の強度パラメータにより, 破壊メカニズムが複雑に変化する問題に対しては, 破壊メカニズムを設定する上界法よりも, 厳密な近似解を得たい場合には有限要素法が有効であると考えられる。ただし, 要素分割や解析手法, 解析モデル並びに地盤定数の選定に対する経験や多少の試行錯誤は避けられず, 誤差の原因とその取り扱いについては十分な注意が必要である。また, 変位制御方式により解析を実施した場合には, 極限支持力を荷重-沈下曲線から明確に定めることができない時, $S/B=0.10$ または 0.15 に対応する荷重, もしくは荷重-沈下曲線での初期と最終の部分に対する接線の交点とするかなど, 極限支持力の決定方法にも適宜な判断や経験を必要とする。さらに, 基礎直下に作用する垂直及びせん断応力分布を知ることが基礎設計においても重要であり, 種々の提案された支持力理論の適用性の評価においても実務的な関心事項となっている³⁾。

本論文では, 粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛

性基礎の極限支持力並びに、基礎直下と粘性土表面上に作用する垂直とせん断応力分布を精度良く求めることを目的に、有限要素解析の適用を試みた。そして、様々な二層地盤の強度パラメータの組み合わせに対する極限支持力と H/B の関係を求めた。また、有限要素解析から求めた極限支持力の妥当性を検証するために、極限釣合い法に基づく山口⁴⁾、Meyerhof⁶⁾、岡村ら⁹⁾による提案式並びに上界法に基づく Michalowski and Shi⁷⁾の結果と比較した。さらに、有限要素解析による極限支持力の値は実務に対しても有用な設計チャートの形としてまとめ、下層粘性土の強度パラメータである非排水せん断強さが支持力に影響を及ぼさなくなる深さである限界深さも求めた。

2. 既往の研究

ここでは、粘性土上に砂質土を有する二層地盤の極限支持力に関する主要な研究について述べる。山口⁴⁾は、基礎上の荷重が砂質土層中で分散して粘性土層上に広がり、この分散された荷重で粘性土地盤の破壊が生じる分散破壊メカニズムを提案し、簡易な支持力算定法として、我が国においてはよく知られている。ただし、山口の式では、砂質土層中における荷重分散角 α は地盤の強度 ϕ 、 c_u や基礎幅 B に対する砂質土層の厚さ比 H/B によらず、一定値 $\alpha = 30^\circ$ である。Meyerhof⁶⁾、Hanna and Meyerhof⁸⁾、Hanna⁹⁾ は小規模な模型支持力試験を行い、基礎の両端を通る鉛直な側面をもつ砂質土塊が粘性土層に押し込まれるパンチングせん断破壊メカニズムを考えることにより、極限釣合い法から簡易な支持力算定法を導出した。この場合、砂質土層中のすべり面の力を考慮するために、パンチングせん断抵抗係数(K_s)を導入している。彼らの支持力算定法を用いる場合、その提案図からパンチングせん断抵抗係数を読み取る必要がある。Hanna and Meyerhof の提案図⁸⁾では、 K_s と砂質土の内部摩擦角 ϕ の関係は粘性土の非排水せん断強さとパンチングせん断パラメータ δ/ϕ の関数としてプロットされている。しかし、 $\phi = 40, 45, 50^\circ$ のケースのみしか示しておらず、提案図も無次元化されていない。岡村ら⁹⁾は遠心模型実験から得られた変形に基づいて破壊メカニズムを提案し、極限釣合い法から支持力式を導いた。この場合、砂質土層中における荷重分散角 α は、地盤の強度や基礎幅 B に対する砂質土層の厚さ比 H/B に応じて変化すると仮定している。なお、 α の詳細な算定方法に関しては、岡村ら⁹⁾の文献を参照されたい。遠心模型実験は実物とほぼ同一な応力レベルを模型地盤に与えることができ、小規模な通常の(重力場)模型実験と比べるとより現実的であると考えられる。

一方、解析的研究として、Michalowski and Shi⁷⁾は、上界法に基づいて、粘性土上に砂質土を有する二層地盤に対する破壊メカニズムを提案し、種々の地盤条件に対する設計チャートを描いた。上界法から導出された支持力式が明記されていないが、実務的にかなり有用なデータを提供している。Burd and Frydman¹⁰⁾は、解析結果の一貫性と信頼性を高めるために、有限要素法と有限差分法を用いて、粘性

土上に砂質土を有する二層地盤の支持力を求めた。二つの手法ともに変位制御方式により解析を実施し、求められた支持力に関して良好な一致を得た。彼らは、二層地盤の荷重分散破壊メカニズムを考察し、基礎からの荷重を分散させる砂質土層の有効性を示した。また、荷重分散角が内部摩擦角の増加とともに増大することや、粘性土層の非排水せん断強さが増加する時に著しく減少する傾向があることも示した。さらに、有限差分法のみから基礎直下並びに粘性土表面上に作用する垂直とせん断応力分布も求めている。水野・土田^{11,12)}は粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の基礎の支持力問題に対して、分割法円弧すべり解析及び有限要素法の適用性を検討した。彼らは、粘性土の非排水せん断強さを $c_u = 98 \text{ kN/m}^2$ と固定しており、かなり固い粘性土地盤を想定していると考えられる。そして、弾塑性有限要素解析が岡村らによる提案式との比較を通して、二層地盤における極限支持力を精度良く算定できると報告している。しかし、有限要素解析に関して、解析手法の概略や解析結果からの支持力—沈下曲線は示されておらず、どのようにして極限支持力を求めたかの詳細は述べられていない。Shiau et al.¹³⁾は、数値極限解析を粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の帯基礎の極限支持力を求めるために適用した。彼らは、二層地盤の強度パラメータと H/B を変化させたケースに対して、厳密な下界値と上界値を求めた。そして、剛性基礎の場合に対しては、下界値と上界値の平均値を用い、設計チャートも示した。また、基礎の粗さや粘性土の不均一性の影響も考察し、解析結果である下界値と上界値は正解値を $\pm 10\%$ 以内またはそれよりも精度良く挟み撃ちにすることができると報告している。

3. 解析手法

ここでは、解析条件並びに有限要素解析について述べる。

3.1 解析条件

本論文では、実務上での興味の対象となる図-1に示した解析条件に対して有限要素解析を実施した。この図に示されているように、通常的地盤では $\phi = 40^\circ$ 以上の地盤はまれであることから、上層砂質土の内部摩擦角 ϕ を $30, 35, 40^\circ$ の3ケース、基礎幅 B に対する砂質土層の厚さ比 H/B を $0.125, 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0$ の8ケース、下層粘性土の非排水せん断強さ c_u を $10, 30, 50, 70, 90 \text{ kN/m}^2$ の5ケー

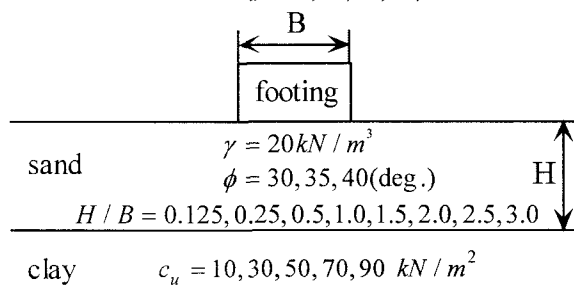


図-1 二層地盤の解析条件

スと変化させた。

3. 2 有限要素解析¹⁴⁾

有限要素法は、粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の極限支持力に対する正確な近似解を得るために、不均一地盤である二層地盤に対しても大変有効な手法である。有限要素解析から得られた解のエラーとしては、主に有限要素による連続体の離散化、解法並びにその増分値、各要素における非線形応力-ひずみ関係の数値積分などが挙げられる。しかし、エラーとなり得る原因を注意深く取り扱えば、有限要素解析の結果から数学的厳密解に近い解を得ることは可能である。本論文では、有限要素解析を用い、粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の極限支持力と基礎直下並びに粘性土表面上に作用する垂直とせん断応力分布を求めた。降伏規準にはモール・クーロンの降伏規準を用いた。モール・クーロン降伏曲面での角部においては、微分の不連続性による数値解析上の不都合が生じるため、モール・クーロン降伏曲面での角部を丸めた降伏規準を採用した。応力積分手法には陽解法に基づいた修正 Euler 法を用いた。そして、関連流動則を仮定し、メッシュには平面ひずみ条件で、2 次式の形状関数をもつ 6 節点 3 角形要素を用いた。解析に用いたメッシュは、基礎端周辺と荷重の作用方向で十分にメッシュを細かくすることも実施した。

解析手法としては、最初、水平地盤堆積層に重力をかけることによって、静的応力場を設定した。そして、二層地盤と比較してかなり剛な基礎を仮定し（弾性係数 $E=30000000 \text{ kN/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.2$ ）、応力制御方式により解析を実施した。なお、砂質土は $E=80000 \text{ kN/m}^2$ 、 $\nu=0.3$ 、粘性土は $E=40000 \text{ kN/m}^2$ 、 $\nu=0.3$ と設定した。上層砂質土と基礎の接触面に関しては、ジョイント要素などは導入せず、砂質土の内部摩擦角 ϕ ($c_u=0$) による摩擦を考慮した。 $c_u=0$ のため、tension cut-off 等の導入も不必要であった。また、非線形弾塑性問題を解くために、Newton-Raphson 反復法を用いた。二層地盤の E 並びに ν は妥当な範囲内にあれば、極限支持力に対して影響を与えないことも確認した。有限要素解析の有限要素メッシュ並びに境界条件の詳細に関しては、次章で述べるものとする。

4. 解析結果と考察

図-2(a), (b)には有限要素解析で用いた典型的な有限要素メッシュの一例を示す。左右端の境界条件は x : 固定、 y : 自由とし、下端の境界条件は x, y ともに固定とした。左右の境界は極限支持力と破壊メカニズムに影響を与えないような幅 ($10B$) となるように設定した。上下端の幅は $5B$ とし、基礎の厚さは $0.2B$ とした。図-2(a)は均一地盤のメッシュで、7745 個の節点、3774 個の 6 節点 3 角形要素で形成した。一方、図-2(b)は $H/B=1.5$ のケースにおける二層地盤のメッシュで、8295 個の節点、4050 個の 6 節点 3 角形要素で形成した。両図ともに基礎と地盤との境界面において、3 つの節点を有する 3 角形要素の総数は 24 個である (図-2(a), (b)右上での基礎直下における 3 角形要

素の概略図を参照)。

まず、有限要素解析から得られた解の精度の検証を均一な粘性土並びに砂質土地盤に対して行う。有限要素メッシュは図-2(a)で示した均一地盤のメッシュを用い、剛性基礎を仮定した。まず、図-3には粘性土地盤に対する有限要素解析からの q_b/c_u と無次元化した垂直変位との関係を示す。ここで、 q_b は基礎の base における単位面積当たりの鉛直荷重を表す。最終的に、 $q_b/c_u=5.29$ が得られ、Prandtl の厳密解 $q_b=(2+\pi)c_u=N_c c_u$ との誤差は 2.9% であった。次に、図-4, 5 には有限要素解析から得た基礎直下での垂直並びにせん断応力分布を示す。使用した有限要素解析では、1 つの 3 角形要素に 3 つの積分点がある。図中の直線は、基

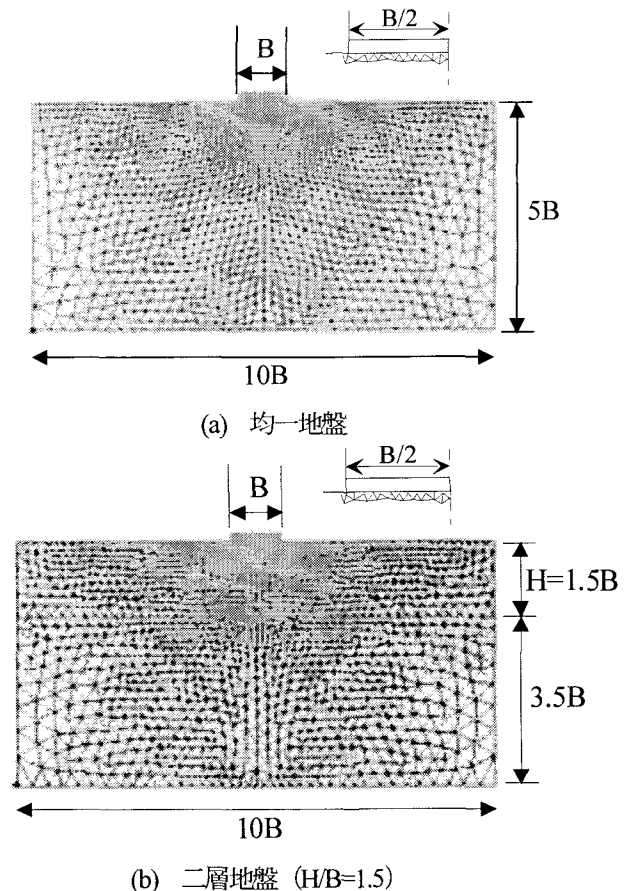


図-2 有限要素解析で用いた典型的な有限要素メッシュ

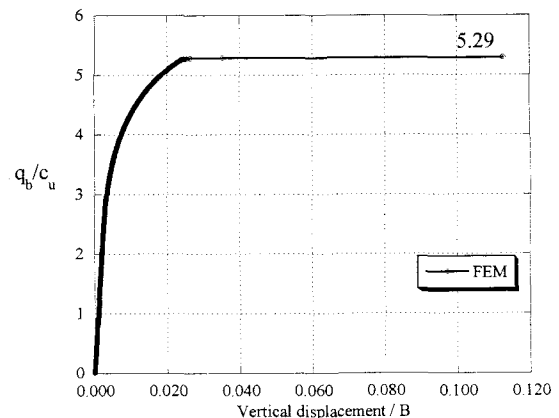


図-3 有限要素解析からの q_b/c_u と無次元化した垂直変位との関係 (粘性土地盤)

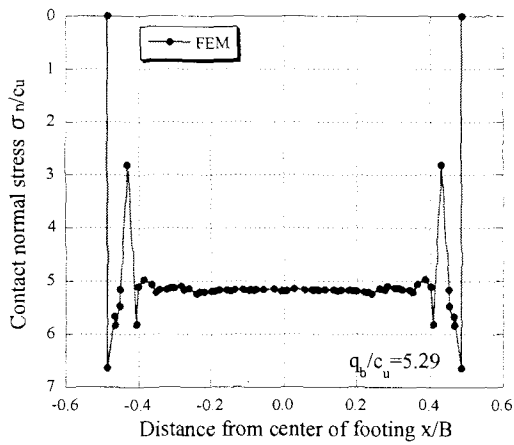


図-4 有限要素解析からの基礎直下での垂直応力分布 (粘性土地盤)

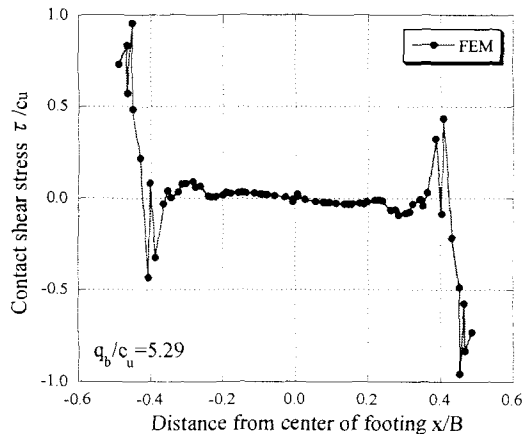


図-5 有限要素解析からの基礎直下でのせん断応力分布 (粘性土地盤)

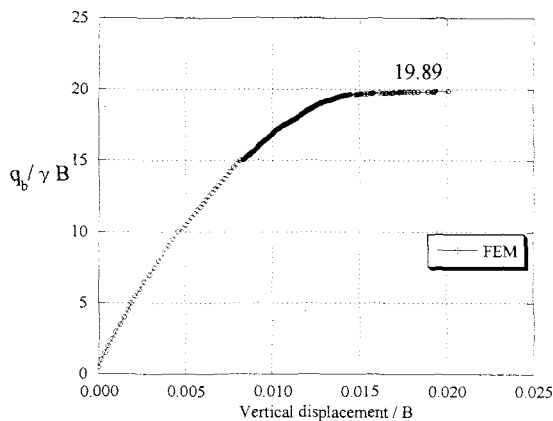


図-6 有限要素解析からの $q_b / \gamma B$ と無次元化した垂直変位との関係 (砂質土地盤 ($\phi = 35^\circ$))

礎と地盤との境界面において3つの節点を有する3角形要素の積分点における垂直またはせん断応力の値を結んだものである。図-4を見ると、基礎直下での垂直応力分布は基礎の中心に対して対称で、中央部周辺において一定値をとり、基礎の端部において中央部より大きい垂直応力が認められる。このことは、粘性土地盤における剛性基礎直下での接地圧分布¹⁵⁾と良い対応を示していることがわかる。なお、垂直応力は圧縮を正としている。次に、図-5を見ると、基礎直下でのせん断応力分布は図-4と良く対

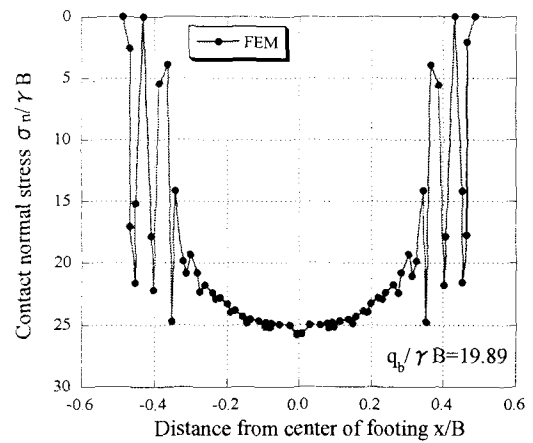


図-7 有限要素解析からの基礎直下での垂直応力分布 (砂質土地盤 ($\phi = 35^\circ$))

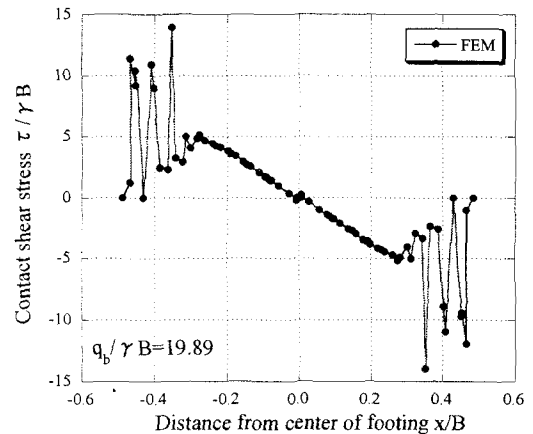


図-8 有限要素解析からの基礎直下でのせん断応力分布 (砂質土地盤 ($\phi = 35^\circ$))

応しており、これは基礎の中心に対して逆対称となっている。中央部周辺ではせん断応力が0となり、基礎の端部周辺においては垂直応力の変化が著しいと同様に、せん断応力の変化も著しいことがわかる。なお、基礎直下でのせん断応力は時計回りを正としている。これにより、基礎の端部周辺においては基礎の中心に向かうせん断応力が作用していることがわかる。図-6には砂質土地盤 ($\phi = 35^\circ$, $c_u = 0$, $\gamma = 20$ kN/m³) に対する有限要素解析からの $q_b / \gamma B$ と無次元化した垂直変位との関係を示す。解析ではより正確な極限鉛直支持力を求めるために、multi-increment stepsを用いた。解析初期では载荷ステップを大きく設定し、荷重増分を大きくした。そして、载荷荷重が大きくなるに従い、载荷ステップを小さく設定し、荷重増分が小さくなるようにして正確な極限鉛直支持力を求めることを試みた。図-6では垂直変位の増加とともに、 $q_b / \gamma B$ が19.89に収束する様子がわかる。Frydman and Burd¹⁶⁾による有限要素解析から示された値、 $q_b / \gamma B = 20$ ($\phi = 35^\circ$) と比較しても良好な一致を示していることがわかる。次に、図-7,8には有限要素解析から得た基礎直下での垂直並びにせん断応力分布を示す。図-7を見ると、有限要素解析からの基礎直下での垂直応力分布は基礎の中心に対して対称で、基礎中心で最大値をとり、基礎端でほぼ0をとっていることがわかる。このことは、砂地盤における基礎直下での接地

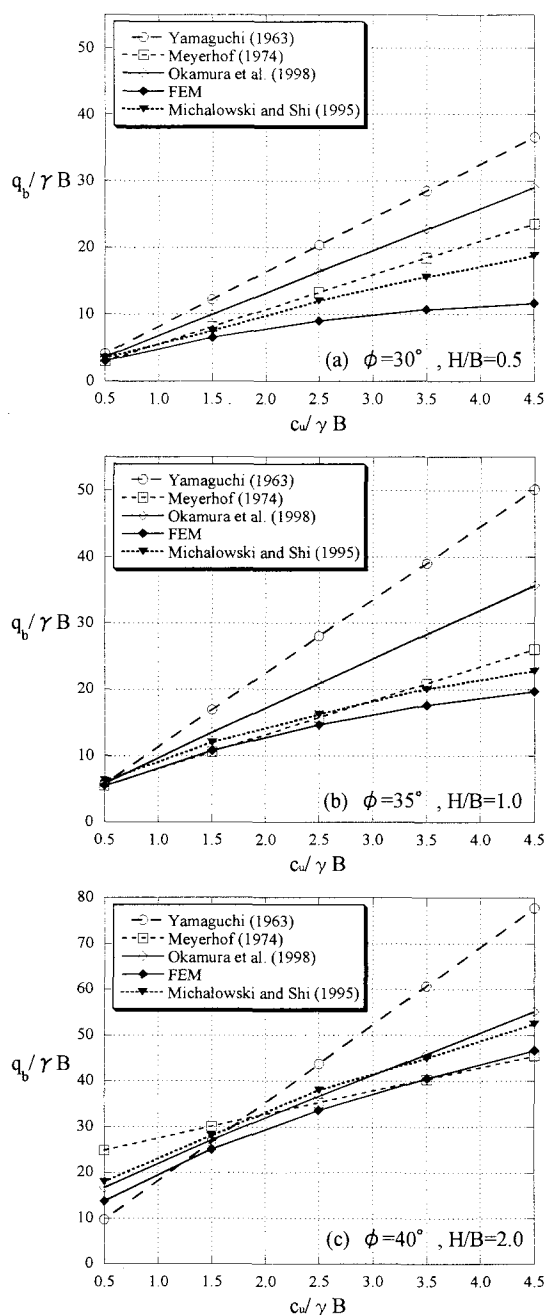


図-9 $q_u / \gamma B \sim c_u / \gamma B$ 関係の比較

圧分布¹⁵⁾と良い対応を示していることがわかる。図-8を見ると、基礎直下でのせん断応力分布は図-7と対応しており、これは基礎の中心に対して逆対称となっており、基礎の中心で0をとっていることがわかる。なお、基礎直下では基礎の中心に向かうせん断応力が作用していることがわかる。また、図-4,5で示された粘性土地盤と比較して、図-7の傾向と同様に図-8でも、基礎端周辺において応力の変化が著しいこともわかる。図-7,8で主として見られる、基礎端周辺において応力分布の形状がジグザグとなる傾向はFrydman and Burd¹⁶⁾においても見られ、これらは基礎端部の周辺直下での3角形要素の幾何学条件や有限要素による連続体の離散化の影響などによるものと考えられる。以上により、本論文で使用する有限要素解析は、工学的に十分な精度を有していると考えられる。

図-9には、有限要素解析から求めた極限支持力の妥当性を検証するために、極限釣合い法に基づく山口⁴⁾、Meyerhof⁶⁾、岡村ら⁹⁾による提案式並びに上界法に基づくMichalowski and Shi⁷⁾の結果との $q_u / \gamma B \sim c_u / \gamma B$ 関係の比較を示す。横軸は下層粘性土の正規化した非排水せん断強度 $c_u / \gamma B$ 、縦軸は正規化した極限支持力 $q_u / \gamma B$ を表す。これを見ると、山口と岡村の式は他の提案式などの結果と比較して、 $c_u / \gamma B$ の増加とともに $q_u / \gamma B$ が顕著に直線的に増加する傾向があることがわかる。Meyerhofの式は図-9(c)の $c_u / \gamma B$ の値が小さい場合を除けば、山口と岡村の式よりも $q_u / \gamma B$ を抑えめに評価する傾向があることがわかる。一方、Michalowski and Shiによる上界値は山口、Meyerhof、岡村らによる提案式と比較して、上界値であるにもかかわらず、有限要素解析結果の傾向と比較的良好一致を示すことがわかった。図-9(a), (b), (c)より、全般的に有限要素解析から得た $q_u / \gamma B$ は他の提案式などの結果と比較して、 $q_u / \gamma B$ を抑えめに評価する傾向があり、安全側の解を与えることがわかる。

図-10, 11には、有限要素解析からの $q_u / \gamma B$ と無次元化した垂直変位との関係を示す。解析ではより正確な極限鉛直支持力を求めるために、multi-increment stepsを用いた。図-10は ϕ と H/B が一定で($\phi = 35^\circ$, $H/B = 1.0$)、 $c_u / \gamma B$ を変化させた時の結果である。これを見ると、垂直変位が増加するに従い、荷重が収束する様子がわかる。そして、 $c_u / \gamma B$ の増加とともに $q_u / \gamma B$ が大きくなることもわかる。次に、図-11は ϕ と $c_u / \gamma B$ が一定で($\phi = 35^\circ$, $c_u / \gamma B = 1.5$)、 H/B を変化させた時の結果である。これを見ると、 H/B が小さい時の $H/B = 0.125, 0.25$ では $q_u / \gamma B$ の大きさがあまり変わらない。これらを除くと H/B の増加とともに $q_u / \gamma B$ が大きくなることがわかる。

図-12~15には有限要素解析から得た基礎直下での垂直並びにせん断応力分布を示す。縦軸には γB で無次元化した応力、横軸には基礎幅 B で無次元化した基礎中心からの距離を示す。図中の $q_u / \gamma B$ は正規化した極限支持力を示す。図-4, 5, 7, 8と同様に、図中の直線は、基礎と地盤との境界面において3つの節点を有する3角形要素の積分点における垂直またはせん断応力の値を結んだものである。後述するが、図-12, 13は図-16, 17、図-14, 15は図-18, 19にそれぞれ対応している。図-12, 13は ϕ と $c_u / \gamma B$ が一定で($\phi = 35^\circ$, $c_u / \gamma B = 2.5$)、 H/B を変化させた時の結果である。図-12, 13ともに H/B の増加とともに $q_u / \gamma B$ も増加し、図-7, 8で示された均一砂質土地盤上の剛性基礎直下での垂直並びにせん断応力の分布形状に近づくことがわかる。粘性土表面上での垂直応力分布である図-16から、(a) $H/B = 0.5$ の時のみが基礎中心での正規化した垂直応力($\sigma_{rr} / \gamma D)(c_u / N)$ が1以上となり、破壊面が下層粘性土中にも及んでいると考えられる。なお、積分点での応力を照査し、基礎中心での積分点が降伏していることも確認した。また図-13から、(a) $H/B = 0.5$ での基礎中心付近でのせん断応力が0である場合を除くと、(b) $H/B = 1.0$, (c) $H/B = 1.5$, (d) $H/B = 2.0$ では基礎直下において、基礎中心に向かうせん断応力が作用していることがわかる。図-14, 15

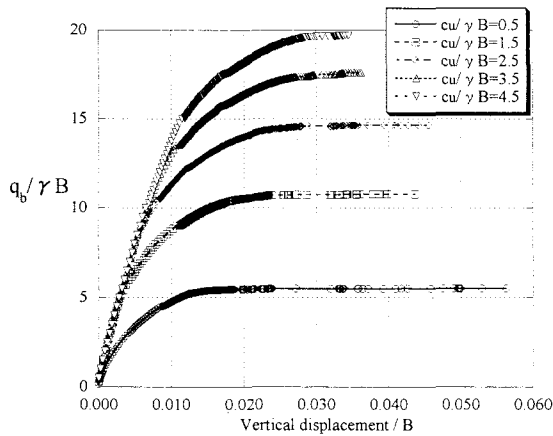


図-10 有限要素解析からの $q_b / \gamma B$ と無次元化した垂直変位との関係 ($\phi = 35^\circ$, $H/B = 1.0$)

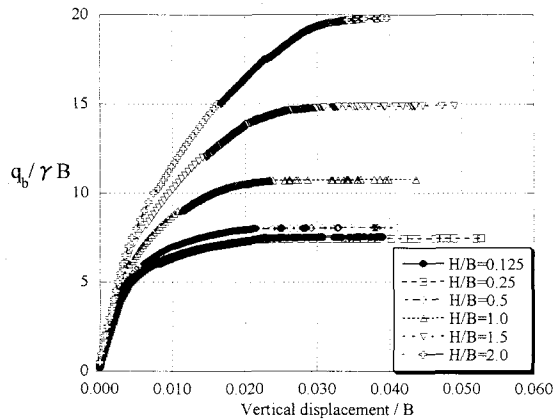


図-11 有限要素解析からの $q_b / \gamma B$ と無次元化した垂直変位との関係 ($\phi = 35^\circ$, $c_u / \gamma B = 1.5$)

は ϕ と H/B が一定で ($\phi = 35^\circ$, $H/B = 1.0$), $c_u / \gamma B$ を変化させた時の結果である。まず、粘性土表面上での垂直応力分布である図-18を見ると、(a) $c_u / \gamma B = 0.5$, (b) $c_u / \gamma B = 1.5$ では基礎中心での正規化した垂直応力 ($\sigma_v / \gamma D)(c_u / N_c)$ が 1 以上となり、破壊面が下層粘性土中にも及んでいると考えられる。ここでも積分点での応力を照査し、基礎中心での積分点が降伏していることを確認した。図-14, 15 では $c_u / \gamma B$ が大きくなると破壊領域が上層砂質土中に限定されるので、基礎直下での垂直並びにせん断応力分布は図-7, 8 に類似してくる。また、図-14(a) では基礎の中心周辺において、中心での垂直応力が少し小さくなる傾向が見られ、図-14(b) では基礎の中心周辺において、垂直応力分布がほぼ一様となる傾向が見られた。そのことと対応して、図-15(a) では基礎の中心周辺において基礎端に向かうせん断応力、図-15(b) では基礎の中心周辺においてせん断応力が 0 となった。なお、図-15(a) で基礎の中心周辺において基礎端に向かうせん断応力は、 $c_u / \gamma B$ が小さい時のみに作用し、基礎からの荷重を分散させることをより効果的にしていると考えられる。図-12 と 13 並びに図-14 と 15 は全般的に良い対応を示していることもわかった。

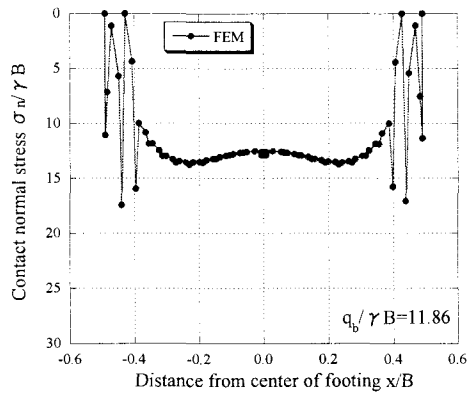
図-16~19 には有限要素解析から得た粘性土表面上での垂直並びにせん断応力分布を示す。垂直応力の縦軸は上層砂質土の自重 (γD) を差し引き、 c_u / N_c で無次元化した。一方、せん断応力の縦軸は下層粘性土の非排水せん断強さ

(c_u) で無次元化した。垂直並びにせん断応力分布とともに、横軸には基礎幅 B で無次元化した基礎中心からの距離を示す。図中の直線は、上層砂質土と下層粘性土との境界面直下における3つの節点を有する3角形要素の積分点における垂直またはせん断応力の値を結んだものである。図-16, 17 は図-12, 13 と同様に、 ϕ と $c_u / \gamma B$ が一定で、 H/B を変化させた時の結果である。これを見ると、 H/B の増加につれて垂直並びにせん断応力分布とともに分布形状が少しずつ変化していくことがわかる。これは基礎からの荷重がより分散されるので、垂直並びにせん断応力分布が作用する領域が増加していることによる。 H/B の増加とともに、基礎中心での垂直応力の値は減少し、せん断応力の最大値と最小値は変わらないことがわかる。また、図-16, 17 の (a), (b), (c) から、基礎端においては垂直応力の減少率が著しく、せん断応力が最大に達することがわかった。次に、図-18, 19 は図-14, 15 と同様に、 ϕ と H/B が一定で、 $c_u / \gamma B$ を変化させた時の結果である。これを見ると、 $c_u / \gamma B$ が増加するにつれて、粘性土表面上での垂直並びにせん断応力が作用する領域が減少することがわかる。このことは、 $c_u / \gamma B$ が小さい時には、上層砂質土が基礎からの荷重を分散させるのに効果的であることを示す。図-19 を見ると、せん断応力分布のパターンは (a) $c_u / \gamma B = 0.5$ の時のみ異なることがわかる。図-19(a) のせん断応力は、 $|x/B| < 3.75$ で

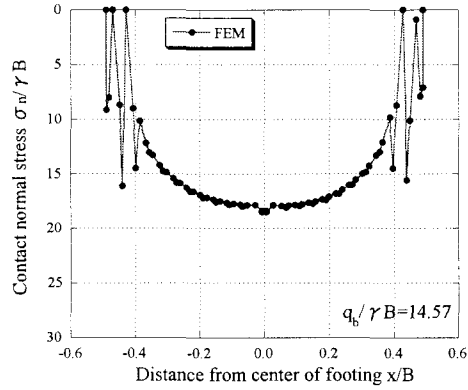
は基礎の中心から外側に向かって作用する。左右の境界に近い $|x/B| \geq 3.75$ では基礎の中心に向かって内側に作用している。一方、図-19(b), (c), (d) では基礎の中心から外側に向かって、せん断応力が作用することがわかる。

$|x/B| \geq 4.0$ ではせん断応力は、ほぼ 0 となっている。このことは図-15(a) においてのみ、基礎の中心周辺において基礎端に向かうせん断応力が見られることと対応しているものと考えられる。なお、図-18(a) では基礎の中心において垂直応力の変化が著しいが、これは積分点の応力を抽出し、それらが3角形要素の幾何学条件や有限要素による連続体の離散化の影響などを敏感に受けるためである。しかしながら、結果に対しては問題がないことを書き加えておく。図-16 と 17 並びに図-18 と 19 が全般的に良い対応を示していることもわかった。

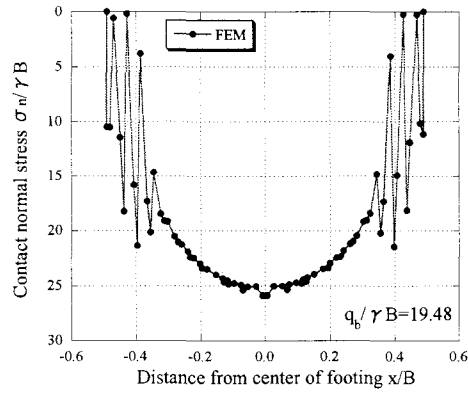
図-20 には $\phi = 30, 35, 40^\circ$ に対する有限要素解析から得た $q_b / \gamma B \sim H/B$ を示す。横軸は H/B ($0.0 < H/B \leq 3.0$)、縦軸は $q_b / \gamma B$ で整理した。これを見ると、(a), (b), (c) ともに H/B の増加に伴って、均一砂質土地盤に対して得られる $q_b / \gamma B$ に収束する様子がわかる。図中の数値である 8.88, 19.89, 49.46 はそれぞれ、 $\phi = 30, 35, 40^\circ$ の均一砂質土地盤に対して得た $q_b / \gamma B$ である。なお、Frydman and Burd¹⁶⁾ による有限要素解析では $\phi = 30, 35, 40^\circ$ に対して、 $q_b / \gamma B = 8.3, 20.48$ が得られており、良好な一致を示すことがわかる。(a) $\phi = 30^\circ$ の場合には $c_u / \gamma B = 2.5, 3.5, 4.5$ で $H/B \leq 0.50$ の時に、8.88 よりも大きい $q_b / \gamma B$ を得た。(b) $\phi = 35^\circ$ の場合には $c_u / \gamma B = 4.5$ で $H/B = 0.125$ の時に、19.89 よりも大き



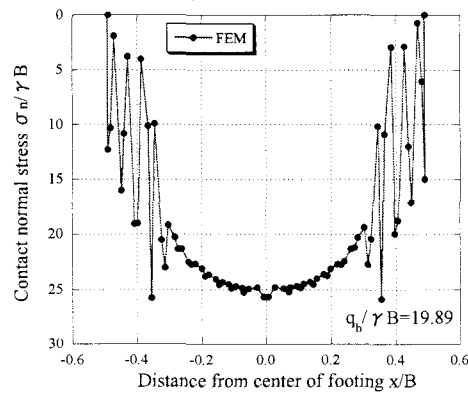
(a) $H/B=0.5$



(b) $H/B=1.0$

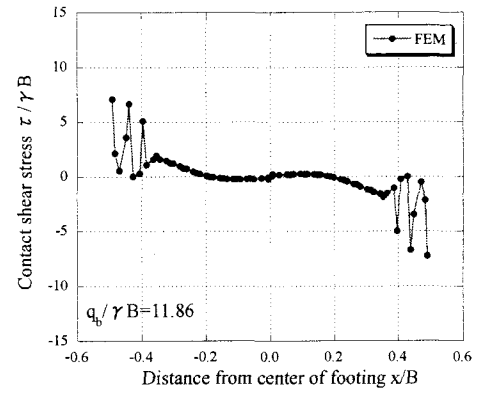


(c) $H/B=1.5$

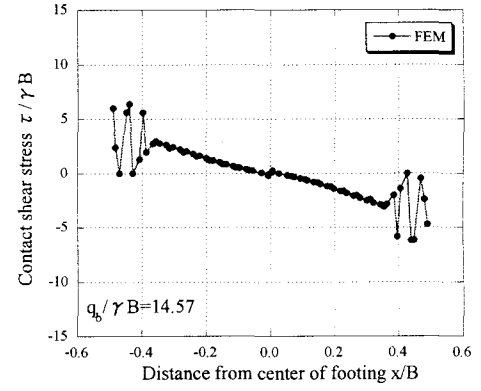


(d) $H/B=2.0$

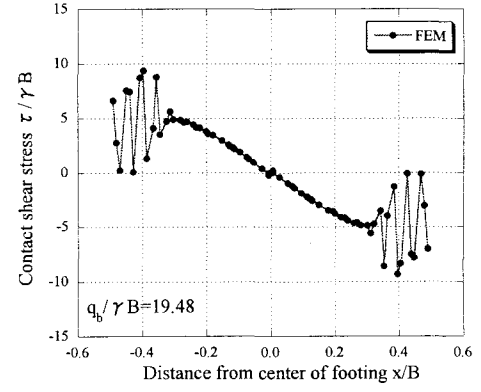
図-12 有限要素解析からの基礎直下での垂直応力分布 ($\phi=35^\circ$, $c_u/\gamma B=2.5$)



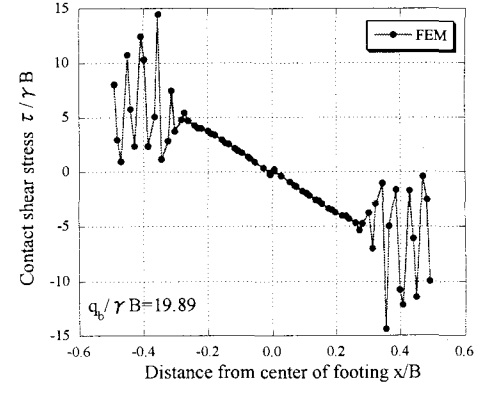
(a) $H/B=0.5$



(b) $H/B=1.0$

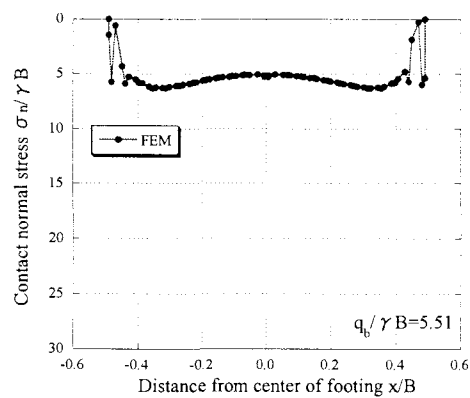


(c) $H/B=1.5$

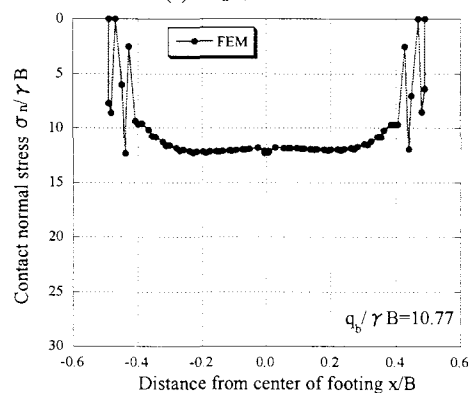


(d) $H/B=2.0$

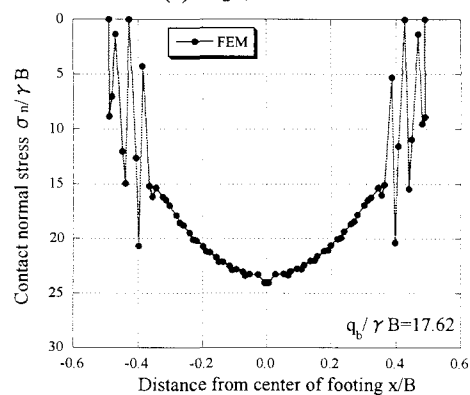
図-13 有限要素解析からの基礎直下でのせん断応力分布 ($\phi=35^\circ$, $c_u/\gamma B=2.5$)



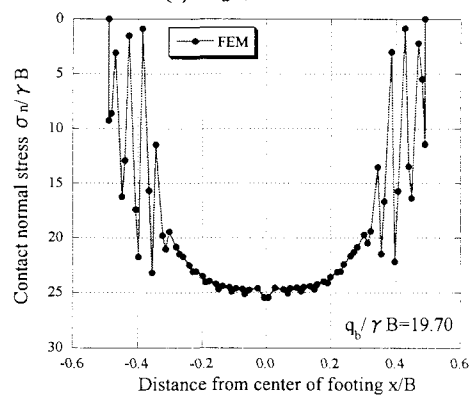
(a) $c_u / \gamma B = 0.5$



(b) $c_u / \gamma B = 1.5$

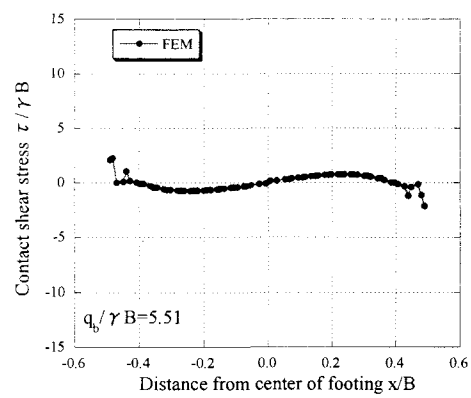


(c) $c_u / \gamma B = 3.5$

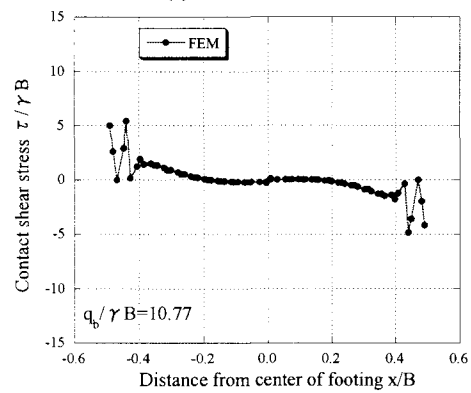


(d) $c_u / \gamma B = 4.5$

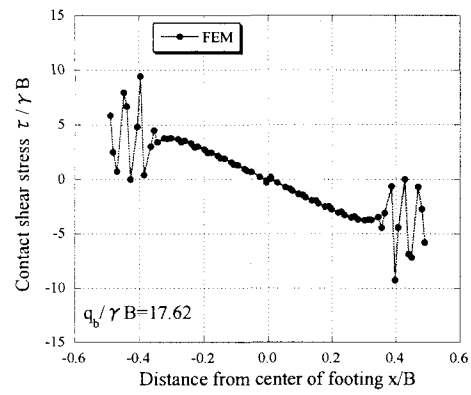
図-14 有限要素解析からの基礎直下での垂直応力分布 ($\phi = 35^\circ$, $H/B = 1.0$)



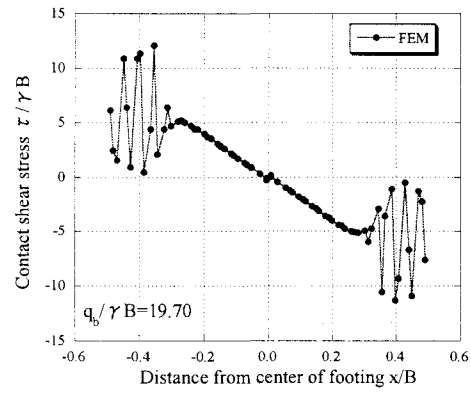
(a) $c_u / \gamma B = 0.5$



(b) $c_u / \gamma B = 1.5$



(c) $c_u / \gamma B = 3.5$



(d) $c_u / \gamma B = 4.5$

図-15 有限要素解析からの基礎直下でのせん断応力分布 ($\phi = 35^\circ$, $H/B = 1.0$)

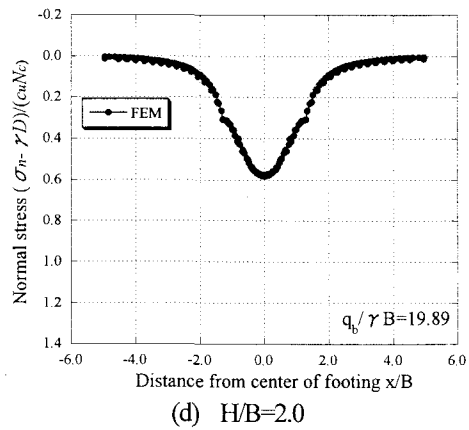
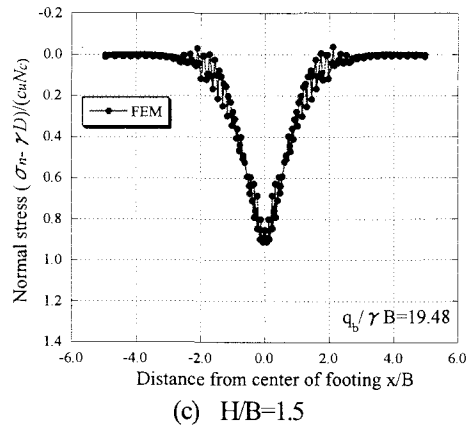
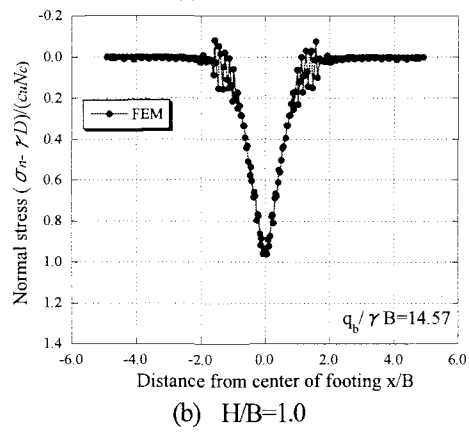
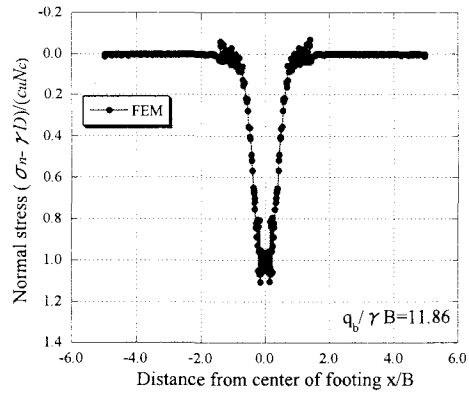


図-16 有限要素解析からの粘性土表面上での垂直応力分布 ($\phi = 35^\circ$, $c_d / \gamma B = 2.5$)

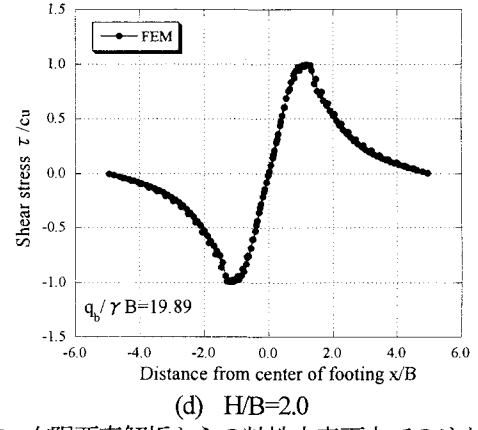
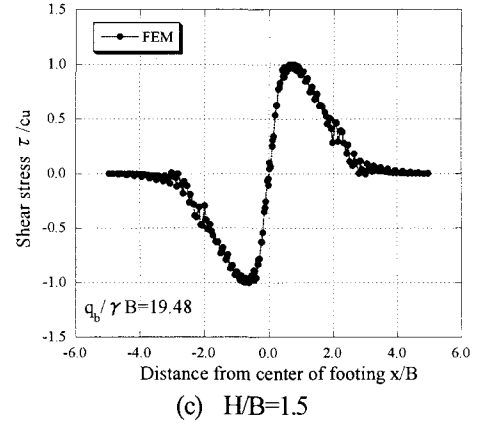
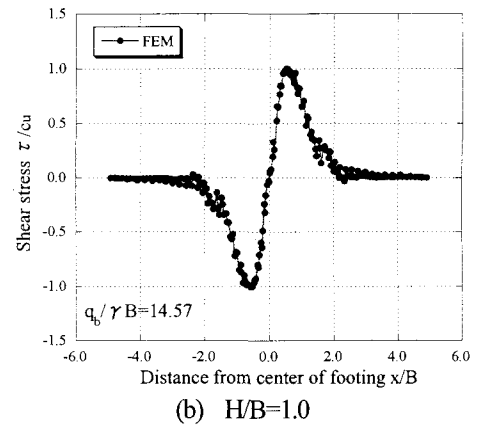
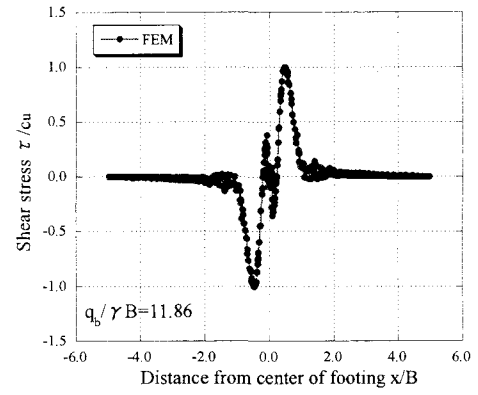
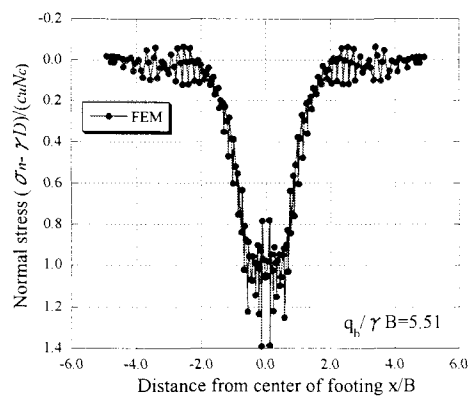
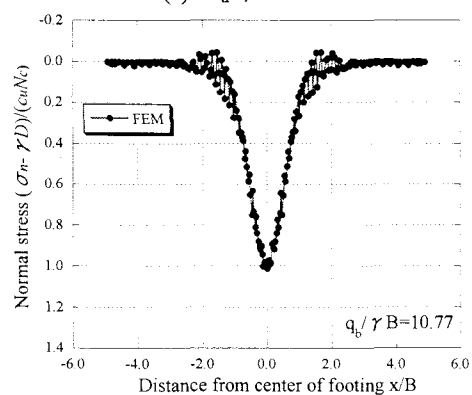


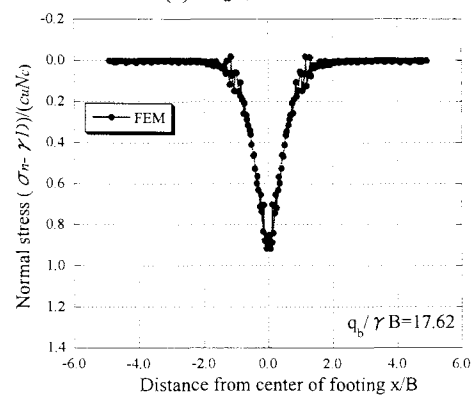
図-17 有限要素解析からの粘性土表面上でのせん断応力分布 ($\phi = 35^\circ$, $c_d / \gamma B = 2.5$)



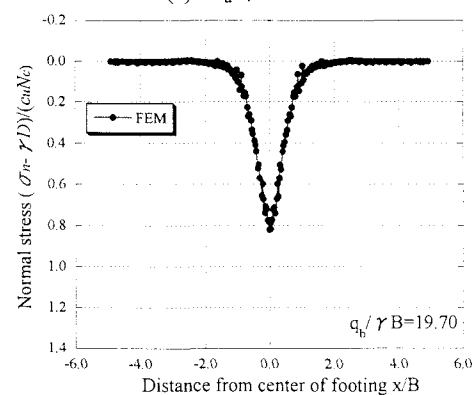
(a) $c_u/\gamma B=0.5$



(b) $c_u/\gamma B=1.5$

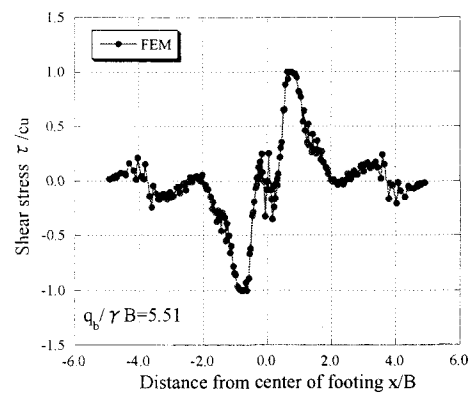


(c) $c_u/\gamma B=3.5$

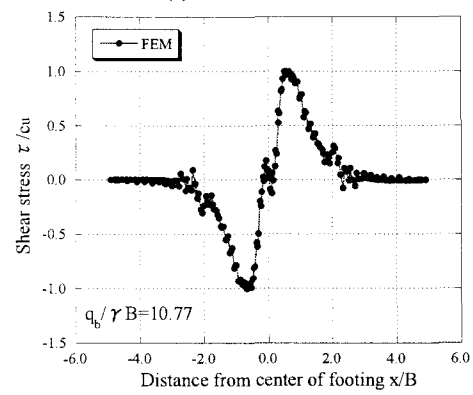


(d) $c_u/\gamma B=4.5$

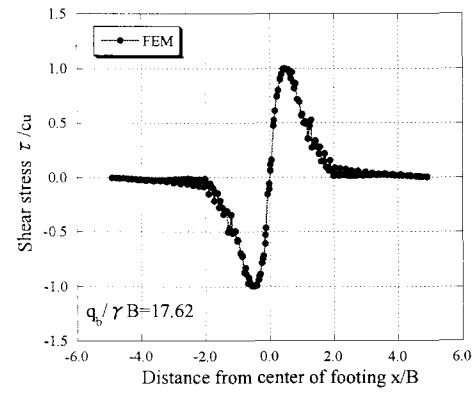
図-18 有限要素解析からの粘性土表面上での垂直応力分布 ($\phi=35^\circ$, $H/B=1.0$)



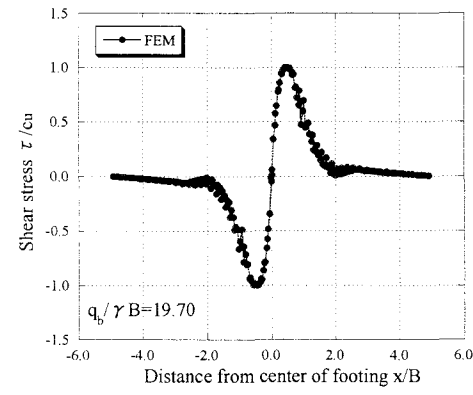
(a) $c_u/\gamma B=0.5$



(b) $c_u/\gamma B=1.5$



(c) $c_u/\gamma B=3.5$



(d) $c_u/\gamma B=4.5$

図-19 有限要素解析からの粘性土表面上でのせん断応力分布 ($\phi=35^\circ$, $H/B=1.0$)

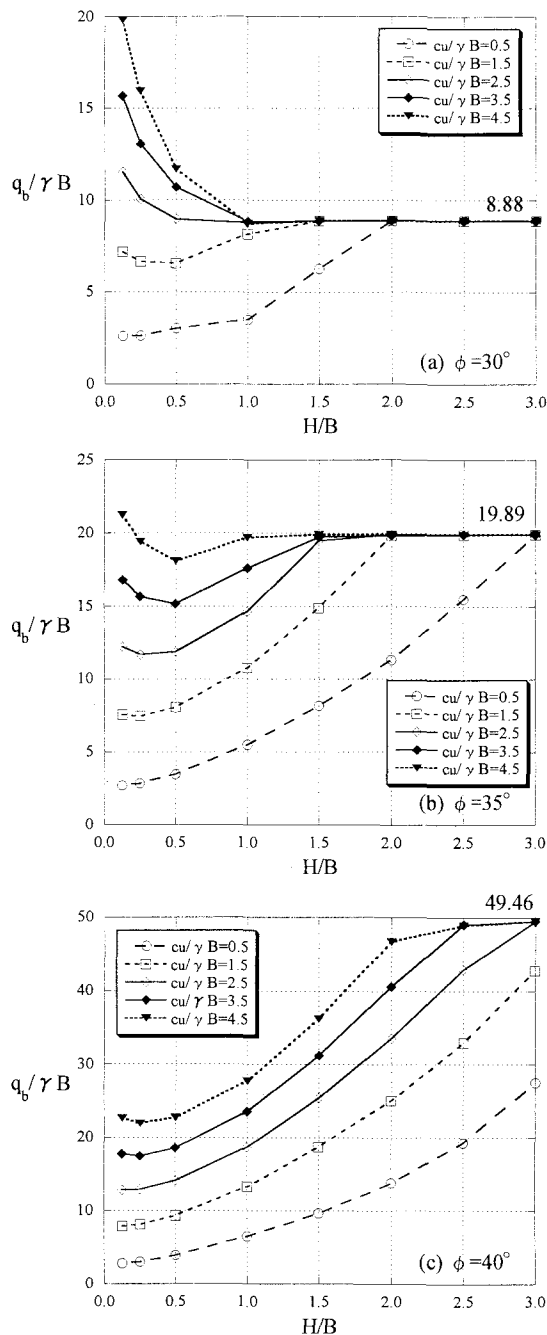


図-20 有限要素解析からの $q_b/\gamma B \sim H/B$ 関係

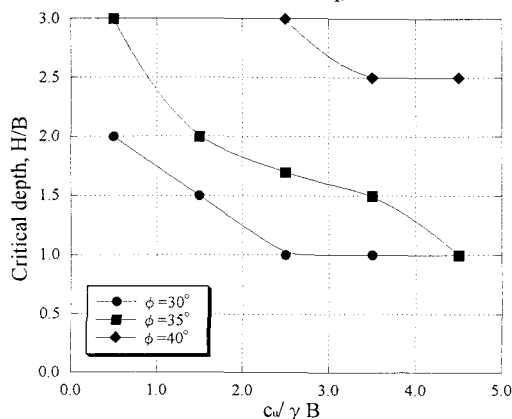


図-21 有限要素解析からの限界深さ $H/B \sim c_u/\gamma B$ 関係

い $q_b/\gamma B$ を得た。(c) $\phi=40^\circ$ の場合には $H/B \leq 3.0$ において、49.46 よりも大きい $q_b/\gamma B$ を得なかった。このことから、粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の限界支持力は、下層粘性土が固く、 H/B が小さい時にのみ、均一砂質土地盤の極限支持力よりも大きくなることがわかった。この時、上層砂質土中において破壊メカニズムが卓越する傾向が見られた。なお、上層砂質土の ϕ が大きくなるほど、二層地盤の極限支持力が均一砂質土地盤の極限支持力を超えることないこともわかった。また、(a), (b), (c) ともに $c_u/\gamma B$ が大きい場合には、 $H/B=0.125$ の時の $q_b/\gamma B$ が $H/B=0.25$ の時よりも大きいことがしばしば見られた。このことは現場でも見られる、粘性土層上に薄い表面硬化層があると支持力が増大することと対応しているものと考えられる。図-20 に示した結果を用いると、 ϕ , $c_u/\gamma B$ 並びに H/B がわかれば有限要素解析からの極限支持力を得ることができ、実務に対しても有用であると考えられる。

図-21 には有限要素解析からの限界深さ $H/B \sim c_u/\gamma B$ を示す。ここでの限界深さ H/B は、下層粘性土の強度パラメータである c_u が支持力に影響を与えない深さのことを指す。すなわち、いったん H/B がある限界深さに達すると、破壊メカニズムは上層砂質土中のみ含まれ、支持力が下層粘性土の c_u に対して独立となる。そして、一層系地盤と見なすことが可能となる。図-21 を見ると、 $\phi=30^\circ$ の場合は $c_u/\gamma B \geq 2.5$ の時、限界深さ H/B は 1.0 となった。 $\phi=35^\circ$ の場合は $c_u/\gamma B$ の増加とともに、限界深さ H/B は 3.0 から 1.0 まで減少し、減少率が大きいことがわかる。また、 $\phi=40^\circ$ の場合は $c_u/\gamma B=2.5$ の時、限界深さ H/B は 3.0 となり、 $c_u/\gamma B=3.5, 4.5$ の時は限界深さ H/B は 2.5 となった。よって、限界深さ H/B は ϕ が大きい、あるいは $c_u/\gamma B$ が小さい時に大きいことがわかった。図-21 のように結果を整理することで、図-1 の解析条件に対する限界深さ H/B を容易に求めることができる。

5. 結論

本論文では、有限要素解析を粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の極限支持力並びに、基礎直下と粘性土表面上に作用する垂直とせん断応力分布を精度良く求めるために適用した。そして、様々な二層地盤の強度パラメータの組み合わせに対して、極限支持力並びに基礎直下と粘性土表面上に作用する垂直とせん断応力分布求め、考察を行った。本論文から得られた主な結論は以下の通りである。

- 1) 様々な二層地盤の強度パラメータの組み合わせに対して、正規化した極限支持力 $q_b/\gamma B$ と基礎幅 B に対する上層砂質土の厚さ比 H/B の関係を実務に対しても有用な設計チャートの形でまとめた。このチャートを用いると、 ϕ , $c_u/\gamma B$ 並びに H/B がわかれば有限要素解析からの極限支持力を容易に得ることができる。また、粘性土上に砂質土を有する二層地盤上の剛性基礎の極限支持力は、下層粘性土が固く、 H/B

が小さい時にのみ、均一砂質土地盤の極限支持力よりも大きくなるケースがあることがわかった。

- 2) 極限釣合い法や上界法に基づく提案式は、いくつかの仮定の導入もしくはおおまかな破壊メカニズムが仮定されており、ある特定の地盤条件や幾何学条件に対してのみ有効であると考えられる。
- 3) ϕ と $c_u/\gamma B$ が一定の場合 ($\phi=35^\circ$, $c_u/\gamma B=2.5$)、 H/B の増加とともに基礎からの荷重がより分散されるので、粘性土表面上での垂直並びにせん断応力が作用する領域は増加する。それとともに、基礎中心での垂直応力の値は減少する。一方、せん断応力の最大値と最小値は変わらなかった。
- 4) $\phi=35^\circ$, $H/B=1.0$ で $c_u/\gamma B$ が大きい場合、破壊領域が上層砂質土中に限定されるので、基礎直下での垂直並びにせん断応力分布は均一砂質土地盤において基礎直下で見られたものと類似した。この時、垂直応力分布は基礎の中心で最大となり、基礎端に向かって徐々に減少する。せん断応力分布は基礎直下で、基礎の中心に向かって作用する。また、 $c_u/\gamma B$ が減少すると、下層粘性土にも破壊が及びはじめるので、基礎直下での垂直並びにせん断応力分布はその大きさとともに減少する。そして、垂直応力分布は基礎の中心周辺において中心での垂直応力が少し小さくなる傾向が見られ、せん断応力分布は基礎の中心周辺において、基礎端に向かうせん断応力が見られた。このことは $c_u/\gamma B$ が小さい時、基礎からの荷重を分散させるのにより効果的であることと関係していると考えられる。
- 5) 二層系地盤の実務上大きな関心である限界深さ H/B 、すなわち上層砂質土がどの程度の層厚になったら一層系地盤と見なし得るかを求めた。

なお、本論文では理論的な考察を主として行ったが、今後は種々の条件下での模型支持力試験などを行い、実験的な検証も行う予定である。

参考文献

- 1) Terzaghi, K.: *Theoretical soil mechanics*, John Wiley & Sons, New York, 1943.
- 2) Yamamoto, K. and Kim, D.: Bearing capacity of spread foundations on sand overlying clay, *Lowland Technology*

International, 6(2), pp.33-45, 2004.

- 3) Bauer, G. E., Shields, D. H., Scott, J. D. and Nwabuokei, S. O.: Normal and shear stress measurements on a strip footing, *Can. Geotech. J.*, 16, pp.177-189, 1979.
- 4) Yamaguchi, H.: Practical formula of bearing value for two layered ground, *Proc. of 2nd ARCSMFE*, 1, pp.176-180, 1963.
- 5) Meyerhof, G. G.: Ultimate bearing capacity of footings on sand layer overlying clay, *Can. Geotech. J.*, 11(2), pp.223-229, 1974.
- 6) Okamura, M., Takemura, J. and Kimura, T.: Bearing capacity predictions of sand overlying clay based on limit equilibrium methods, *Soils Found.*, 38(1), pp.181-194, 1998.
- 7) Michalowski, R. L. and Shi, L.: Bearing capacity of footings over two-layer foundation soils, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 121(5), pp.421-428, 1995.
- 8) Hanna, A. M. and Meyerhof, G. G.: Design charts for ultimate bearing capacity of foundations on sand overlying soft clay, *Can. Geotech. J.*, 17, pp.300-303, 1980.
- 9) Hanna, A. M.: Foundations on strong sand overlying weak sand, *J. Geotech. Engrg. Div.*, ASCE, 107, No. GT7, pp.915-927, 1981.
- 10) Burd, H. J. and Frydman, S.: Bearing capacity of plane-strain footings on layered soils, *Can. Geotech. J.*, 34, pp.241-253, 1997.
- 11) 水野健太・土田孝: 円弧すべり解析および有限要素法による上部砂一下部粘土二層地盤の支持力解析, 第 36 回地盤工学研究発表会講演集, pp.1455-1456, 2001.
- 12) Mizuno, K. and Tsuchida, T.: Practical use of finite element analysis for slope stability and bearing capacity, *Proc. of Foundation design codes and soil investigation in view of international harmonization and performance*, Kamakura, pp.359-367, 2002.
- 13) Shiau, J. S. and Lyamin, A. V. and Sloan, S. W.: Bearing capacity of a sand layer on a clay by finite element limit analysis, *Can. Geotech. J.*, 40, pp.900-915, 2003.
- 14) 山本健太郎: 偏心および傾斜荷重を受けた砂地盤における剛性基礎の支持力解析, 応用力学論文集 Vol.7, No.1, pp.471-482, 2004.
- 15) 山肩邦夫: 建築基礎工学, 朝倉書店, pp.103-105, 1990.
- 16) Frydman, S. and Burd, H. J.: Numerical studies of bearing-capacity factor N_γ , *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, ASCE, 123(1), 20-29, 1997.

(2005 年 4 月 15 日受付)