Evaluation of Bearing Capacity of Geogrid Reinforced Foundation

Yang Jun jie, Kumamoto University

Ochiai Hidetoshi, Kyushu University

Hayashi Shigenori, Kyushu University

Abstract

The bearing capacity of foundation ground with one layer geogrid is formulated based on the upper bound theorem of plasticity theory. The failure mechanism of reinforced foundation ground is obtained through use of results of model tests. Two reinforcing effects are considered in the proposed formula. One effect is that the failure zone is extended, which is reflected by the enlarged angles of the rigid triangular wedge under the base of footing. Another is that the shear resistance on the two lateral sides of the wedge increases. The calculated results are compared with the loading test results.

概 要

ジオグリッドを一層敷設した補強基礎地盤の支持力評価を検討する。ジオグリッドを基礎幅より浅く敷設した場合、模型載荷試験により補強基礎地盤はジオグリッドを横切って無補強の場合に比べてより大きいすべり面が発生する形で破壊する。このような破壊メカニズムを用い、速度場法の理論を援用し、補強基礎地盤の支持力を、破壊域拡大の効果とせん断抵抗の効果を考慮した評価方法を示し、実験結果と比較した。

ジオグリッド補強基礎地盤の支持力評価

熊本大学工学部 ○楊 俊傑

九州大学工学部 落合英俊

” 林 重徳

1. まえがき

図-1に示すような、ジオグリッドを地盤内に一層敷設することによって支持力の増加を図る方法は、基礎地盤の補強工法の一つである。この補強基礎地盤の支持力は、表-1に示すような影響要因に支配されるものである。

著者ら¹⁾は、有限幅のジオグリッドを一層敷設した補強基礎地盤の表面 ($D_f=0$) に帯状荷重が作用する場合を対象として、ジオグリッドの種類、敷設深さと敷設幅、基礎幅、地盤密度が補強基礎地盤の破壊形態、支持力特性、ジオグリッド敷設による補強の効果に与える影響およびそれらの相互の関係を実験で調べた。また、極限釣合法による慣用の支持力公式に補強効果を組み入れることによって補強基礎地盤の支持力評価式を提案した²⁾が、慣用の支持力公式における支持力係数 N_r は解析で表せないで、補強材敷設によって変わる補強効果の評価が複雑になり、実用的でない。

一方、速度場法は極限解析法の一つであり、正解値との位置づけが分かること、また、合理的な破壊メカニズムを設定できれば、実務でも比較利用され易いことから、支持力問題、土圧問題、斜面の安定問題によく用いられている³⁾。速度場法を補強土構造物の安定解析に適用できれば、有力な手法になり得る。

そこで、本文は、速度場法を用いて補強基礎地盤の支持力の評価を試みる。

2. ジョグリッド補強基礎地盤の支持力

載荷試験の結果

ジオグリッドを一層敷設した補強基礎地盤の表面に帯状荷重を想定した模型載荷試験より次の結論が得られている。

(1) 補強効果が最大となる最適敷設深さが存在する。この最適敷設深さ Z_0 は地盤の密度、補強材の敷設幅とその種類にかかわらず、ほぼ基礎幅 B と同程度 ($Z_0 \approx B$) である。

(2) 補強材を最適敷設深さより浅く敷設した補強基礎地盤 ($Z < Z_0 \approx B$) は、

図-1 ジョグリッドを一層敷設した補強地盤の概念図

表-1 補強基礎地盤の支持力に及ぼす影響要因

項目	影響因子
基礎	幅 B , 根入れ深さ D_f
地盤	粘着力 c , 内部摩擦角 ϕ , 単位体積重量 γ
補強材	敷設深さ Z , 敷設幅 L , 引張り強度 F_u , 許容伸びひずみ ε_0 , 土との摩擦特性 δ

補強材を横切る形で破壊する。この場合、敷設深さを増加すれば補強の効果も増加する。また、敷設幅が大きいほど補強効果は大きくなるが、敷設幅が基礎幅の3倍程度までは補強効果は顕著に増加し、敷設幅が基礎幅の3倍程度以上になると増加の程度が小さくなる。

(3) 補強材を最適敷設深さより深く敷設した場合 ($Z > Z_0 \approx B$)、補強基礎地盤は、補強材の上面で破壊する。この場合、敷設深さを増加したら補強の効果は逆に減少する。一方、敷設幅が基礎幅の3倍程度までは補強効果は敷設幅とともに顕著に増加するが、敷設幅が基礎幅の3倍程度以上になると補強効果はほぼ一定になる。

本文は、補強材を最適敷設深さより浅く敷設した補強基礎地盤 ($Z < Z_0 \approx B$) を対象とし、その補強効果を評価した支持力式を速度場法を用いて求めるものである。

3. 速度場法による支持力評価

速度場理論による上界値計算の結果がどれほど正解値に近いかは、ひとえに仮定された破壊メカニズムが、いかに現実の物理現象を忠実に表現しているにかかっている³⁾とされている。従ってまず最初に、これまで実施した模型載荷試験の結果に基づいて、ジオグリッドによる補強基礎地盤の破壊のメカニズムを考察する。

3-1. 補強基礎地盤の破壊メカニズムと

可容速度場について

a) 補強基礎地盤の破壊メカニズムの設定

図-2は、砂地盤 (ϕ) 内に基礎幅 B の3~7倍程度の幅でジオグリッドを一層浅く敷設した場合 ($Z < B$) に、試験終了後の地盤の断面を撮影した写真から求められたすべり面の形状を示したものである。それから次の結論が得られている。

- ① 破壊形態は無補強基礎地盤のそれに相似している。
- ② 破壊域は無補強基礎地盤より大きくなる。
- ③ 基礎直下での破壊はジオグリッドを横切る形で生じる。

図-2 実験終了後の地盤断面の変形状況により求められたすべり面

なお、対象とする浅い基礎 ($D_f \leq B$) の補強基礎地盤には、土被り圧の効果を等価サーチャージ荷重 (γD_f) として考え、地表面載荷の場合と同様なすべり面が生じると考える。

すなわち、上記の結論①，②，③より，無補強地盤の破壊メカニズムを参照して^{4) 5)}，図-3に示すような破壊メカニズムを設定する。cdを対数ラ線に，deを直線に仮定する。cdとdeを滑らかに接させるために角度 $\angle edd'$ を $(\pi/2 - \phi)$ とする。deと水平線の交わる角度を α とし，この α は得られる支持力の上界値を最小とするように決められる。

$$\omega = f(\omega_0, \varepsilon_0, F_u, \delta, L, Z, F_{\text{Тmax}}) \quad (1)$$

b) 補強基礎地盤の可容速度場について

図-3 に示すような破壊メカニズムが可容速度場となるように、図-4 のようなホトグラフによ

り速度成分を決定する。

土くさびが基礎と共に速度 V で下降するとする。図-4より、 V_0 と V の関係および bc 面に沿う速度の不連続値 ΔV_{bc} を次のように求める。

$$V = V_0 \cos \phi / \cos(\omega - \phi) \quad (2)$$

$$\Delta V_{bc} = V_0 \sin \omega \cos \phi / \cos(\omega - \phi) \quad (3)$$

また、 bcd は対数らせん線であるので、

$$V_1 = V_0 \exp(\theta \tan \phi) \quad (4)$$

$$V_2 = V_0 \exp(\theta_1 \tan \phi) \quad (5)$$

となる³⁾⁻⁵⁾。

これで、 V 、 V_0 、 V_1 および V_2 は可容速度場を構成する。この可容速度場に基づいて、速度場法を実行できるが、まず、ジオグリッドがすべり面を横切った場合、そのすべりに抵抗して発揮したせん断抵抗の効果は速度場法において評価する考え方を説明する。

図-4 bc 面に沿う速度の不連続値

3-2. ジオグリッドのせん断抵抗の評価

ジオグリッドが横切るすべり面では付加的なせん断応力が生じる。この付加のせん断応力は、Jewellの方法⁶⁾⁻⁸⁾を利用して、次のようにすべり面でジオグリッドによって消費されるエネルギー（内部消散）として評価する。

図-5(a)に示すように運動する剛体は静止剛体に対してすべろうとすると、すべり面を横切る補強材に引張り力 F_T が生じる。この引張り力 F_T をすべり面方向の成分 $F_T \sin \theta'$ とすべり面に垂直な方向の成分 $F_T \cos \theta'$ に分けて考えられる。そこで、すべり面方向の成分 $F_T \sin \theta'$ がすべりに対する直接抵抗抗力になる。一方、すべり面に垂直な方向の成分 $F_T \cos \theta'$ はすべり面に作用する直応力を増加させることによって、土のせん断抵抗抗力

(a) 補強材の発揮する補強効果

(b) 補強効果の評価

図-5 すべり面と交差する補強材の効果とその評価

が増加する。

したがって、図-5(b)に示すように、すべり面において、補強材の引張り力による、静止領域に働く応力はすべり面に垂直する付加の直応力 σ_T とすべり面に平行する付加のせん断抵抗応力 τ_T となる。単位幅、単位長さのすべり面を考えると、 τ_T と σ_T は次式のように表せる。

$$\tau_T = \sigma_T \tan \phi + c_T \quad (6)$$

$$\sigma_T = F_T \cos \theta' \quad (7a)$$

$$c_T = F_T \sin \theta' \quad (7b)$$

ここに、 F_T はすべり面の位置で補強材に発生した引張力、 θ' は補強材とすべり面のなす角度である。

すなわち、土自身の変形・強度特性(c_s や ϕ 等)を向上させる化学的地盤改良工法等と違って、補強土工法はせん断面に作用する直応力の増加(σ_T)による土のせん断抵抗の増加($\sigma_T \cdot \tan \phi$)と補強材力の分力による見かけの粘着力の増加(c_T)として評価できるものである。したがって、補強土構造物において、運動する剛体ブロックの速度は、補強材を横切るすべり面と補強材なしの土だけのすべり面において、ともに静止域に対して ϕ だけの傾きを持つものであり、速度場法を実行できるものと考えることができる。

補強材と交差するすべりに抵抗する補強土塊の強さによる、静止領域に働くせん断抵抗応力(τ_R)は、土の本来のせん断抵抗応力 τ_s と補強材によるせん断抵抗応力 τ_T の和として考えられ、次式のようになる。

$$\begin{aligned} \tau_R &= \tau_s + \tau_T = (\sigma_s + \sigma_T) \tan \phi + (c_s + c_T) \\ &= \sigma_R \tan \phi + c_R \end{aligned} \quad (8)$$

ここに、 σ_s と c_s はそれぞれ補強材なしとした場合のすべり面上の直応力と土の粘着力である。

速度場法では、直応力、せん断抵抗応力を求める必要がないので、見かけの粘着力 c_R だけ用いて土だけの場合と同様な考え方にしたが、補強材が横切るすべり面で消散するエネルギーは次式で算定する。

$$\begin{aligned} E_R &= (c_s + c_T) \times (\text{速度の不連続値}) \times (\text{速度の不連続線の長さ}) \\ &= E_s + E_T \end{aligned} \quad (9)$$

ここに、 E_s と E_T はすべり面において、それぞれ土だけと補強材だけの消散するエネルギー(内部消散)である。

3-3. 補強基礎地盤の支持力評価式

式(9)のようにジオグリッドのせん断抵抗の効果は簡単に内部消散に組み入れることができる。以下、速度場法を用いた補強基礎地盤の支持力評価式を考える。

速度場法を補強基礎地盤の支持力問題に適用する場合、解き方等は従来³⁾の方法と同じであるが、上述のようにジオグリッドと交差するすべり面でジオグリッドによる内部消散が生じる。図-3に示すように、ジオグリッドが横切るすべり面では土くさびの側面と動径すべり面が考えられるが、ここでは、簡単のため、図-6に示すように、敷設されたジオグリッドを土くさび側面

図-6より土くさび側面に平行するジオグリッドの分力（見かけの粘着力） c_T が次式のように求められる。

図-3 に示す可容速度場に基づいて、従来の手順に従い、外力仕事と内部消散を計算し、全外力仕事と全内部消散を等値として、求められた補強地盤の支持力は次式に示される。

図-6 土くさび側面に沿う
付加のせん断応力

$$q_R = cN_c + \gamma D_I N_q + \frac{1}{2} \gamma B N_r + \frac{F_{\tau \max}}{B} \sin 2\omega \quad (11)$$

ここに、 N_e , N_g , N_r は ω , ϕ , α の関数であり、次式で与えられる。

$$N_c = \frac{\cos(\omega - \phi)}{\cos\omega \sin\phi} \left[\frac{\sin\omega \sin\phi}{\cos(\omega - \phi)} - 1 + \left(\frac{\sin\phi \cos(\phi + \alpha)}{\sin\alpha} + 1 \right) \exp[(\pi + 2\phi + 2\alpha - 2\omega) \tan\phi] \right] \quad (12a)$$

$$N_q = \frac{\sin(\phi + \alpha) \cos(\omega - \phi)}{\cos \omega \sin \alpha} \exp[(\pi + 2\phi + 2\alpha - 2\omega) \tan \phi] \quad (12b)$$

$$N_r = \frac{\cos(\phi + \alpha) \sin(\phi + \alpha) \cos(\omega - \phi)}{2 \cos^2 \omega \sin \alpha} \exp \left[\left(\frac{3}{2} \pi + 3\phi + 3\alpha - 3\omega \right) \tan \phi \right] \\ + \frac{\cos(\omega - \phi)}{2 \cos^2 \omega (1 + 9 \tan^2 \phi) \cos \phi} \left\{ [3 \tan \phi \sin(\phi + \alpha) - \cos(\phi + \alpha)] \exp \left[\left(\frac{3\pi}{2} + 3\phi + 3\alpha - 3\omega \right) \tan \phi \right] \right. \\ \left. + 3 \tan \phi \cos \omega + \sin \omega \right\} - \frac{1}{2} \tan \omega \quad (12c)$$

上式の α はいずれの ϕ 、 ω においても $(\pi/4 - \phi/2)$ になると N_c 、 N_a 、 N_r は最小となる。したがって、図-3の破壊メカニズムにおける α は $(\pi/4 - \phi/2)$ と考えられ、この時の N_c 、 N_a 、 N_r を補強基礎地盤の支持力係数とする。

補強材の最大引張り力 $F_{Tm,x}$ と補強基礎地盤の土くさび角度 ω の表示式(1)が分かれば式(11)と(12)で補強基礎地盤の支持力を算定できるが、本文は次のように考える。

3-4. パラメータ F_{Tmax} と ω について

補強の効果は補強材が変形して初めて発揮するものであるので、補強の効果を検討するために、変位の導入が必要になる。しかし、速度場法は剛塑性理論に立脚するものであるため、本文は、補強土の現在の実用設計法⁹⁾と同じ考えを用いて極限状態で発生されるであろう補強材の引張り力を想定した上で速度場法を利用する。

まず、補強材の地盤内における状態について考える。図-7(a)に示すように、極限状態時、地盤内における補強材は基礎端から引き抜かれる状態にあり、引張り力の分布を図-7(b)に示すように仮定する。補強材の最大の引張力は基礎直下で生じ、補強材全体の伸びもそこにだけ集中して生じるとする。ジオグリッドの最大引張力 F_{Tmax} は引抜き試験の結果を利用すれば算定できる¹⁰⁾。

$$\begin{aligned} F_{Tmax} &= \tau_{max} \cdot (L-B) \\ &= \sigma (L-B) \tan \delta \end{aligned} \quad (13)$$

ここでは簡便的に、 σ はジオグリッドの上面に作用する平均直応力であり、 δ には土とジオグリッドの平均的な摩擦角を用いる。

上記の結論④により、土くさび角度 ω はジオグリッドの敷設幅 (L/B) と敷設深さ (Z/B) の増加と共に増加するので、次のような土くさび角度 ω の拡大の仕方を考える。

図-8に示すように、ある深さ Z

(b) 補強材に生じる引張り力の分布の仮定

図-7 地盤内における補強材の状態と生じる引張り力分布の仮定

($<B$)に敷設されたジオグリッドの下面に無補強の場合の土くさび角 ω_0 より η だけ増加した角度($\omega_0 + \eta$)を持つ二等辺三角形を想定する。この η はジオグリッドの伸びひずみの関数である。

図-9 補強材の許容伸びひずみ ε_0 とその変位角 η_0

図-9に示すように、ジオグリッドが許容伸びひずみ ε_0 に対する幅(L_T)で敷設された場合、 η はそれに対する変位角 η_0 となり、ジオグリッドの引張り力 F_{Tmax} はジオグリッドの引張り強度 F_u となる。また、敷設幅 L は基礎幅 B と同じ場合、ジオグリッドに引張り力は生じず、 $F_{Tmax}=0$ となり、 η もゼロとなる。基礎幅 B と L_T の間での敷設幅 L に応じた変位角 η は次式で算定するものとする。

$$\eta = (L - B) / (L_T - B) \cdot \eta_0 \quad (14)$$

ここに、 L_T はジオグリッドが破断するかしないかの限界敷設幅であり、ジオグリッドの引張強度 F_u を式(13)に代入することによって得られた(15)式で算定する。また、 η_0 は式(16)で算定する。

$$L_T - B = F_u / (\sigma \tan \delta) \quad (15)$$

$$\cos \eta_0 = 1 / (1 + \varepsilon_0) \quad (16)$$

式(13)と式(15)を式(14)に代入すると次式が得られる。

$$\eta = (F_{Tmax} / F_u) \cdot \eta_0 \quad (17)$$

次に、図-8において点aとc、bとcをそれぞれ結んで、 $\angle bac$ ($\angle abc$)を敷設幅と敷設深さの効果を検討した補強の場合の土くさび角 ω として考える。幾何関係により ω を次式のように求める。

$$\tan \omega = \tan(\omega_0 + \eta) + 2(Z/B) \quad (18)$$

4. 計算結果と実験結果の比較

式(17)における F_{Tmax} は、土被り圧等によって異なるが、ここでは、 $L = B$ ($F_{Tmax} = 0$)の場合について、計算結果と実験結果との比較を行う。

相対密度が83%($\phi = 40^\circ$, $\gamma = 1.6 \text{ tf/m}^3$ とする)の砂地盤の表面に、幅 B が0.1mの帯状荷重を想定した模型載荷試験を実施した¹⁾。使用されたジオグリッドは二軸延伸SS-1であり、その引張り強度 F_u は1.2tf/mで、許容伸びひずみ ε_0 は10%である。

図-10 計算結果と実験結果の比較($L/B = 1$)

また、土とジオグリッドの平均摩擦角 $\delta = 2\phi/3 \approx 27^\circ$ とした。敷設深さ Z を $Z/B = 0.3, 0.8$ であった。これらの値を用い、計算した支持力値と実験値を比較したものが図-10である。ただし、無補強基礎地盤の支持力 q_0 は、式(12c)において、支持力係数 N_γ が最小となる時 ($\omega_0 = 15 + \phi$ 度) の値を式(11)の第三項に代入して算定した値を用いた。ジオグリッドを地盤内に一層浅く敷設した場合、提案した方法により、実験結果をかなり良く評価できることが分かる。

5. あとがき

ジオグリッド補強による基礎地盤の支持力を、破壊域拡大の効果とせん断抵抗の効果を考慮した速度場法を用いて評価する方法を示した。この方法による支持力の推定結果は、実験結果を比較的うまく評価することができる。今後、ジオグリッドの敷設幅が基礎幅 B より広く敷設する場合の計算結果と実験結果を比較・考察するとともに、補強基礎地盤の簡便かつ汎用的な支持力評価法を検討・考察していきたいと考えている。

謝辞：本研究を遂行するにあたって、九州大学工学部の大谷 順先生(現 熊本大学工学部)、梅崎健夫先生(現 信州大学工学部)には、有益な助言を、実験装置の計画作成及び実験に際しては、同 中島通夫技官に多大なご助力を賜った。また、熊本大学工学部の鈴木敦巳先生および北園芳人先生には仕事について便宜を図って頂き、三井石油化学工業(株)の平井貴雄氏に補強材に関するデータを提供して頂いた。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 楊・落合・林：ジオグリッド補強基礎地盤の支持力特性に関する実験的研究，土木学会論文集投稿中。
- 2) 楊・落合：ジオグリッド補強基礎地盤の支持力式に関する一考察，第6回ジオテキスタイルシンポジウム論文集，pp.15~23, 1991.12.
- 3) 木村・日下部：土の強さと地盤の破壊入門，土質工学会，pp.273~312, 1987.7.
- 4) 山口：土の力学，エンジニアリング・サイエンス講座26，pp.93~115, 1976.7.
- 5) Chen: Limit analysis and soil plasticity, Developments in geotechnical Engineering 7, 1975.
- 6) Jewell, R. A. and Wroth, C. P.: Direct shear tests on reinforced sand, Geotechnique, Vol. 37, No. 1, pp. 53~68, 1987.
- 7) 龍岡：文献抄録，補強した砂の直接せん断試験，土と基礎，Vol. 36, No. 1, pp. 92~95, 1988.
- 8) 龍岡：ジオテキスタイルを用いた補強土工法，2. ジオテキスタイルによる補強メカニズムその1，土と基礎，Vol. 41, No. 3, pp. 76~82, 1993.3.
- 9) 龍岡：ジオテキスタイルを用いた補強土工法，2. ジオテキスタイルによる補強メカニズムその3，土と基礎，Vol. 41, No. 5, pp. 67~74, 1993.5.
- 10) H. Ochiai, et al.: Pull-out behavior of polymargrid in soils and its analytical method, Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University, Japan, Vol. 48, No. 2, pp. 125~139, 1988.