

ジオグリッド引抜き試験結果の定量的評価

九州大学工学部	落合英俊
熊本大学工学部	大谷 順
佐賀大学低平地防災センター	林 重徳
三井石化産資	平井貴雄

1. まえがき

今日、ジオグリッドを用いた補強土構造物（壁構造物の裏込め土、盛土および基礎地盤等）の設計・施工は広く実施されている。この構造物は、地盤の変形と深い関係があり、通常ジオグリッド補強土が変形する際には、土塊の変形に伴い、土とジオグリッドが相対的に変形するとともに、ジオグリッド自身も伸びながら引き抜かれる状態にある。引抜き試験は、このような引抜き抵抗を評価するために行われる。土中のジオグリッドが引抜き力を受けると、ジオグリッド自身が変形しながら引き抜かれるために、ジオグリッドに発生する抵抗力の分布は一様にならない。また、拘束圧の大きさによって、ジオグリッドが後端まで引抜ける場合と破断を生じる場合がある。このような観点から、引抜き試験は、その装置、試験条件および結果の評価法によってさまざまな結果を得ることとなるが¹⁾、今日のように、設計のパラメータを決定する目的で実施する場合は²⁾、ある程度ユニークな値を得ることが望まれる。

本論文は、このような引抜き抵抗の特性を考慮に入れた合理的かつ定量的な試験結果の評価法を提案するものである。

2. 引抜き試験

2.1 試験の装置と手順

Fig.1に用いた引抜き試験装置の概略図を示す。土槽は長さ0.6m、幅0.4mで高さ0.4mの内、下箱（高さ0.1m）を固定し、その間に敷設したジオグリッドを、ロードセルを介したスクリージャッキにより変位速度1mm/min.で引き抜く。この時、土槽内面には土との摩擦を軽減させる目的で、シリコングリースを塗布したラバーメンブレンを用いた。上箱は、ロードセルを介した支柱により固定されており、引抜き時に上箱に加わる力が計測できるようになっている。引抜き試験は、ジオグリッドが破断するか、もしくは引抜き変位が約75mmに達するまで行った。本試験に用いたジオグリッドは、一軸延伸グリッド（SR2）である。節点位置およびその番号を同じくFig.1に示す。節点位置は、前方の1点は空中、後方の6点は土中に位置している。

本試験においては、供試体の試料として気乾状態の豊浦標準砂を用い、多重ふるいを用いて空中落下法により平均相対密度、 D_r を約80%とし、比較的密な状態の地盤を想定して作成した。土試料の物性をTable 1に示す。試験は、まず多重ふるいにより

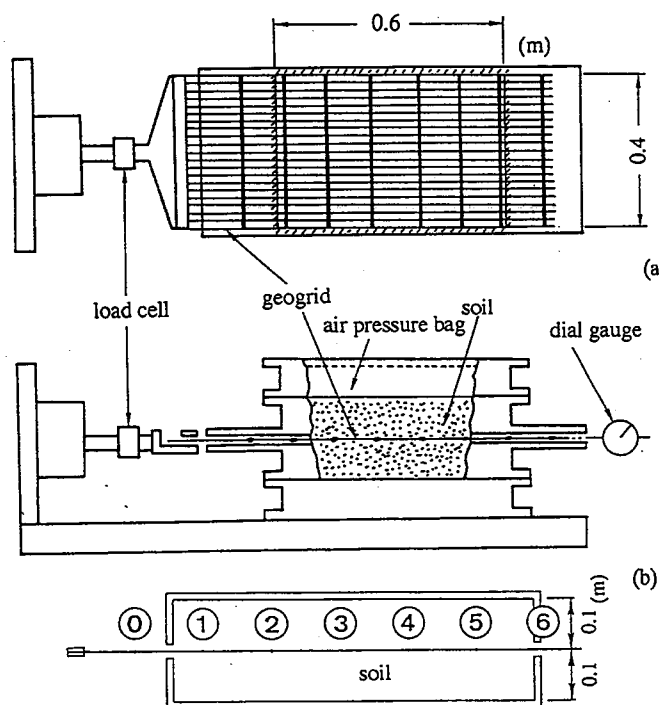


Fig. 1. Pull-out test apparatus.

下箱に砂を敷き詰め、余分な砂を除いてせん断面を平らにした後、その上に、すでに節点変位を測定するためのステンレスワイヤーを取り付けてあるジオグリッドを敷設する。そして上箱をセットし、再び多重ふるいにより上箱に砂を敷き詰めた。鉛直載荷圧(拘束圧), σ_v は、壁面の影響をできるだけ減らし、供試体に一樣な鉛直応力を載荷させるために、供試体上部よりラバープレッシャーバッグを介して、空気圧により載荷した。グリッドの節点変位は、各節点にフックによりステンレスワイヤーを取り付け、それを土槽外に引き出し、ダイヤルゲージに接続して測定した。

2.2 引抜き抵抗力算定方法³⁾

引抜き試験により得られる結果を用いて、ジオグリッドに働く引張り力、すなわち引抜き抵抗力を求めるための整理方法を以下に示す。

整理方法の基本的な考え方をFig.2に示す。実験結果より得られた各節点の変位図 (Fig.2(a)) より、各節点間におけるグリッドの伸び(ひずみ ϵ_{ij}) が得られる (Fig.2(b))。ここで、ジオグリッドの空気中における引張り力と伸びの関係曲線 (Fig.2(c)) を用いると、最終的に、各節点間のひずみに対応する各節点間の引張り力が Fig.2(d) のように求めることができる。ここでは、節点 i, j 間のひずみによる引張り力は、節点 i, j の中間点に働くものとする。

2.3 試験結果および考察

試験で得られる結果は、一般には先頭の引抜き力と引抜き変位であるが、本試験ではこれに加えて各グリッド節点の変位量である。まず、Fig.3は先頭での引抜き力と引き抜き変位関係を異なる拘束圧についてプロットしたものである。引抜き力は変位が増加すると伴に、また拘束圧が高いほど大きい、あまり拘束圧が大きいと (100kN/m^2 以上)、ジオグリッドがその引張り強度に達し、頭打ちになることがわかる。Fig.4は、2つの異なる拘束圧 ($\sigma_v = 50$ and 100 kN/m^2) について、Fig.3の引抜き力を各グリッド節点変位に対してプロットしたものである。比較的低拘束圧下 (Fig.4(a)) では、各節点の変位はほぼ等しく、ジオグリッドの先端から自由端までほぼ一樣な荷重伝達傾向を示している。一方Fig.4(b)に示すように、拘束圧が高くなると各節点変位は一樣とはならず、それぞれの節点で異なる曲線関係を示す。これは、ジオ

Table 1. Material properties of sand.

Specific gravity	Gs	2.64
Relative density	Dr (%)	80
Max. void ratio	e max	0.971
Min. void ratio	e min	0.601
Uniformity coefficient	Uc	1.7

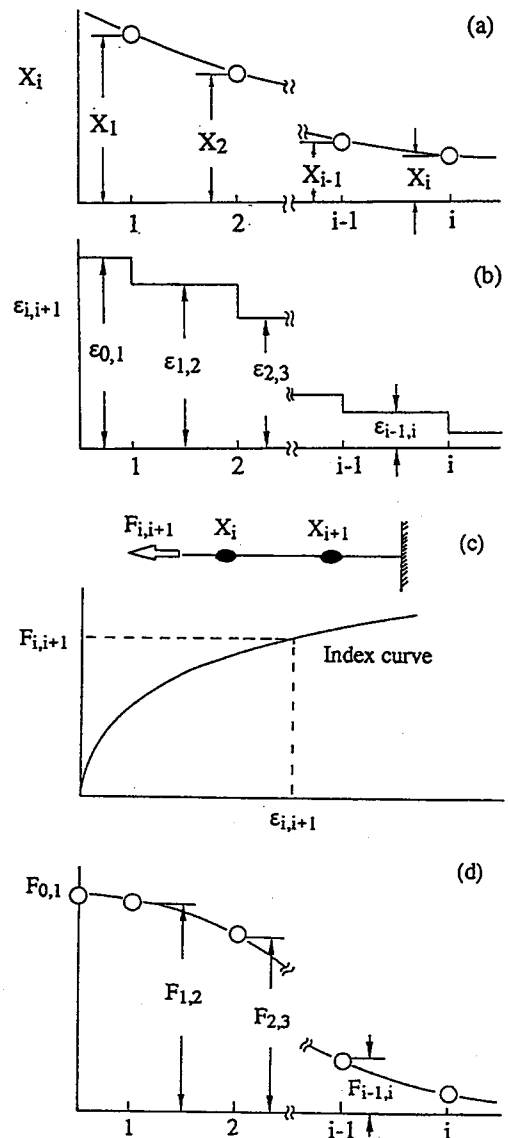


Fig. 2. Basic concepts of evaluation method of pull-out resistance.

グリッドの引抜き特性が、グリッド自身が伸びながら引き抜かれることを示すものである。Fig.5は、任意の引抜き力段階でのグリッドの節点位置と節点変位の関係を示したものである。グリッドの節点変位は下に凸な曲線になり、まず先端に近い節点で変位を生じ、引き抜き力の増加に伴い徐々に後端に近い節点も変位し始める。また、各節点位置間の節点変位の差がその節点間に生じる伸びであり、その伸びも引抜き力が増加するにつれて大きくなっており、グリッド自身が伸びながら引抜きに抵抗するという挙動をよく表現している。

2.2で述べた算定法を用いて、以下引抜き抵抗力を求める。すなわち、まず、Fig.5の結果から各グリッド間の平均的なひずみを計算する (Fig.2(b))。続いて、Fig.2(c)に相当するジオグリッドの空気中での引張り試験結果より、そのひずみに相当する抵抗力を求めることができ、これが引抜き抵抗力である。なお、この空気中での引張り試験結果は、引張り速度や温度の試験条件に大きく影響されるが、ここでは、本引抜き試験と同じ条件、すなわち引張り速度、1mm/min.と室温20度の条件で行った試験結果を用いており、こうして最終的に求めた引張り力分布がFig.6である。ここでは、3つの異なる引抜き力レベルについてその結果を示しているが、後方部から先頭部へ向けて抵抗力は大きくなり、その分布は、初期の引抜き段階では下に凸の曲線になるが、次第に引抜き力が大きくなると、先頭部の引張り力が頭打ちになり、曲線が先頭付近でやや上に凸となり、逆S字型の変曲点を持つ曲線となる。このように、変位が進行した先頭部においては残留状態の引抜き抵抗力が、更に後方の勾配の急な中程ではピーク状態の引き抜き抵抗力が発現しているのので、後方の部分が全体の引抜き力に寄与する割合は少ないと言えよう。

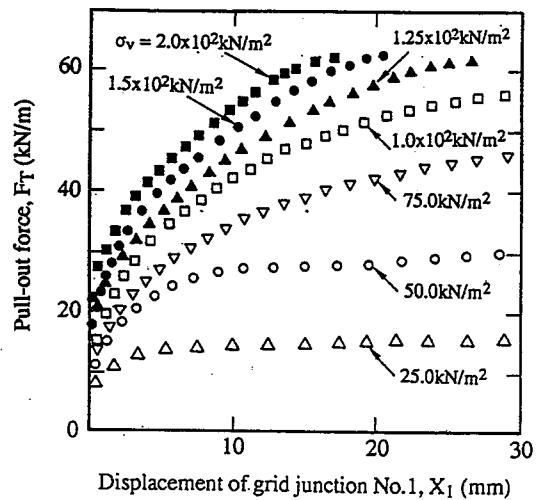


Fig. 3. Pull-out force - displacement relations at the top of geogrid for various vertical pressure.

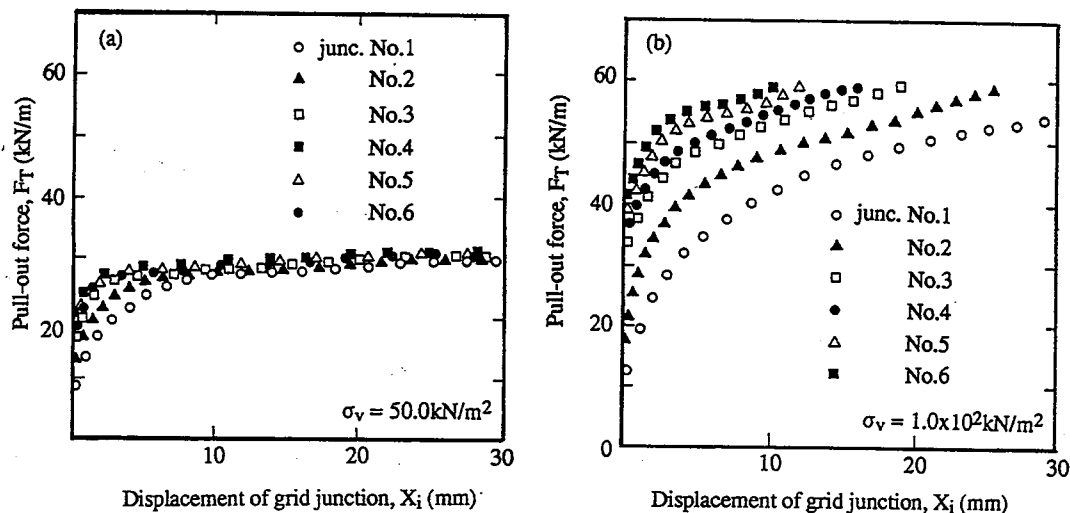


Fig. 4. Pull-out force - displacement relation in each junction.

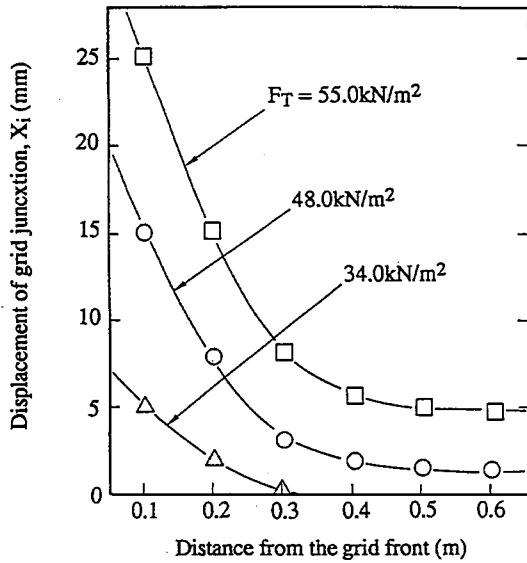


Fig. 5. Distributions of geogrid displacement.

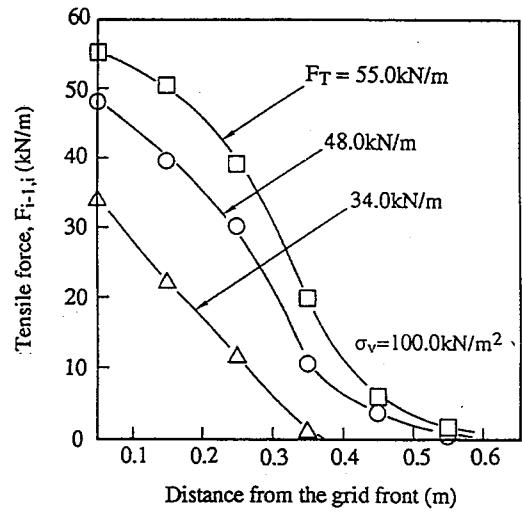


Fig. 6. Distributions of tensile forces on geogrid.

3. 引抜き抵抗応力の定量的評価

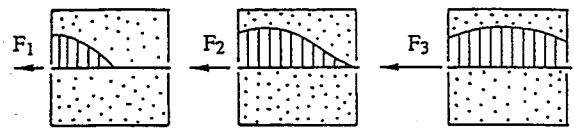
実際の設計や数値解析においては、引抜き抵抗は応力量として扱われる。土中のジオグリッドに発生する引張り力分布はFig.6のようになり、その発生メカニズムは、引抜き力や拘束圧の条件によって大きく異なる。ここでは、引抜き抵抗応力の評価法について述べる。

Fig.7に示すように、引抜き試験から引抜き抵抗を評価する方法は2つに大別される。1つは、土とジオグリッドの相対変位に伴って発揮される引抜き抵抗の発現過程を評価する方法であり、ここでは”Mobilizing Process Method”と呼ぶ (Fig.7(a))。他の一つは、最大引抜き抵抗を発揮する際の平均的な摩擦抵抗としてこれを評価する方法であり、”Average Resistance Method”と呼ぶ。また、この後者は、その平均値の考え方により、Fig.7(b)に示すように3つの方法が考えられる。1つは、”Total Area Method”である。これは、引抜き抵抗を試験土槽全域で平均化して評価する方法である。

2番目は”Effective Area Method”であり、実際に引張り力が発揮する領域のみでこれを評価する方法、最後は、Fig.6で示した曲線で、最大引抜き力時のものを取り上げ、その曲線の最急勾配によりこれを評価する”Maximum Slope Method”である。

これら2つの評価法の適用については、”Mobilizing Process Method”は、各引抜き力段階のすべての抵抗分布を評価しており、有限要素法による変形解析等に用いられ、また一方”Average Resistance Method”は、補強土構造物の極限解析への適用が考えられる。以下、それぞれについて詳細に説明する。

(a) mobilizing process method



(b) average resistance method

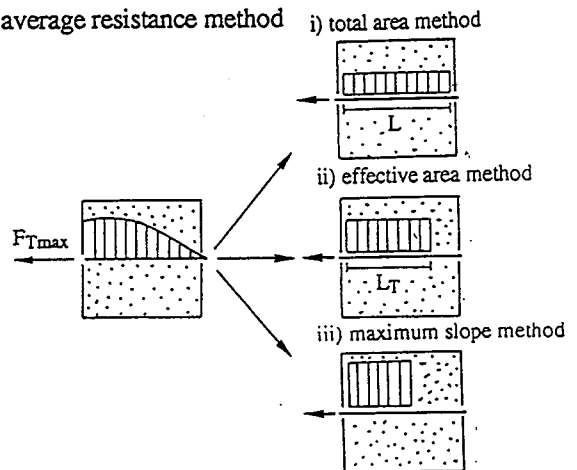


Fig. 7. Evaluation methods of pull-out resistance.

3.1 Mobilizing Process Method

一般に、土中のジオグリッドに発揮される抵抗力は、そのグリッドの形状から、引抜き力方向に沿った縦リブに発生する摩擦力と、それと直角をなす方向に位置する横リブの抵抗力からなると考えられる。これを2次元的に考えると、横リブの抵抗力は、グリッド節点に集中して発揮すると考えられ、節点の抵抗力は縦リブのそれに比べてかなり大きく、よって抵抗力は、各節点に集中して発揮すると仮定される。この引抜き抵抗力は、Fig.6での引張り力分布より、以下の式で定義される。

$$T_i = F_{i-1, i} - F_{i, i+1} \quad (1)$$

ここで、 $F_{i-1, i}$ は、節点(i-1)と(i)間に発生する引張り力である。この抵抗力を応力量に換算するために次式を用いる。

$$\tau_i = T_i / d \quad (2)$$

ここで、 d は隣合う2つの節点間距離である。

引抜き試験結果を基に、上式を用いて得られた、引抜き抵抗応力分布の一例をFig.8に示す。これは拘束圧が 100 kN/m^2 のケースであり、各引抜き力段階での応力分布を各グリッド節点の変位と共にプロットしている。この図に示すように、引抜き抵抗応力は、変位と共に変化し、その分布は上に凸の形状である。また、これらすべての分布は、ある上限と下限の両曲線で囲むことができる。この" Mobilizing Process Method" は、土中のグリッドに発生する引抜き抵抗を各変位レベルで評価しており、有限要素法による変形解析に直接的に適用可能である。荻迫は⁴⁾、異なる拘束圧下のこの上下限曲線にクーロン摩擦則を適用して、土-ジオグリッド系の各変位に伴う摩擦挙動についてモデル化を行っており、またこの方法を有限要素法による変形解析に導入する方法および実際の補強土擁壁の解析方法について提案している。

3.2 Average Resistance Method

補強土構造物の現行設計法は、限界状態での釣合いを考えたものが多く、その場合、土とジオグリッドの相互作用についても同様の仮定が導入される。このような場合、最大引抜き力時のみの引抜き抵抗を対象としており、ここに述べる" Average Resistance Method" が適用される。Fig.9は、各拘束圧下において、最大の引抜き力が発揮する時の引張り力分布を示したものである。この試験結果を用いて上述した3つの評価法について以下説明する (Fig.10)。

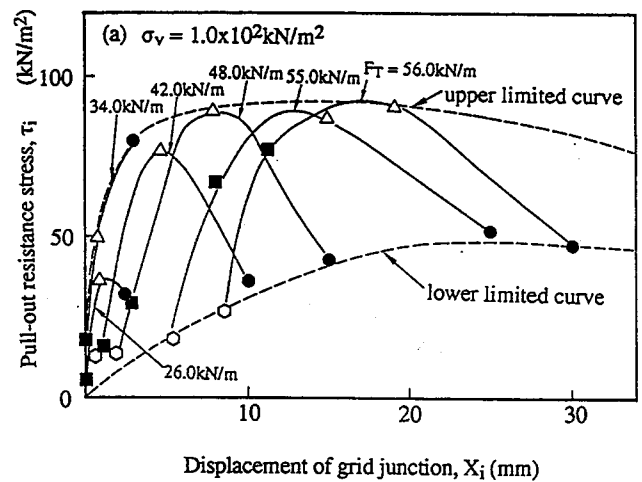


Fig. 8. Distributions of mobilized pull-out resistance.

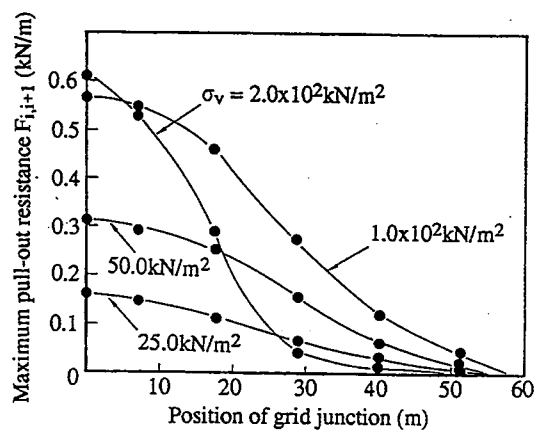


Fig. 9. Distributions of maximum pull-out forces for various vertical pressures.

(a) Total Area Method

引抜き抵抗応力は次式で算定される。

$$\tau_{av} = \frac{F_{Tmax}}{2BL} \quad (3)$$

ここで、 F_{Tmax} および L は、Fig.10に示すように、それぞれ最大引抜き力、およびジオグリッド先頭から自由端までの距離である。また B は、ジオグリッドの敷設幅を示す。この方法は、土槽全体で平均的な抵抗応力を算定するものであが、ジオグリッドが全域において引抜かれるような場合、すなわち、低拘束圧下での引抜き特性を評価する場合は比較的妥当な結果を得ることになるが、引抜き土槽中で、部分的に定着長が発生するような場合、すなわち拘束圧が高い場合については、この抵抗を過小評価すると考えられる。しかし、計測については、全体すなわち先頭の引抜き力および引抜き変位量のみであり、試験自身を比較的簡便に行う利点があると考えられる。

(b) Effective Area Method

ジオグリッドが後端まで引抜ける場合には、全敷設長を引抜き抵抗長とみなすことができる。しかし、ジオグリッドの敷設長や拘束圧がある値以上になると、土中のジオグリッドは後端まで引抜けず、場合によっては破断する。この場合、ジオグリッド後端部において土との相対変位が著しく小さいか、または起きない部分が生じるので、この部分は引抜き抵抗に寄与しないとして、引抜き抵抗長から除外する。ここでは、引抜きに抵抗する有効抵抗長 (L_T) として、ジオグリッドが破断強度に至らずに最大引抜きせん断応力を発揮する限界の長さを考える。すなわち、引抜き抵抗応力は次式で算定される。

$$\tau_{av} = \frac{F_{Tmax} - F_r}{2BL_T} \quad (4)$$

ここで、 $(F_{Tmax} - F_r)$ は、土中の先端点からその長さ L_T までの引張り力である。

(c) Maximum Slope Method

引抜き抵抗応力は次式で算定される。

$$\tau_{av} = \left(\frac{dF}{dL} \right)_{max} \quad (5)$$

この方法は、Fig.9に示すように、最大引抜き抵抗の変化分、すなわち曲線の勾配を抵抗応力と考え、その最急勾配、すなわち最大引抜き抵抗応力で平均化する方法である。

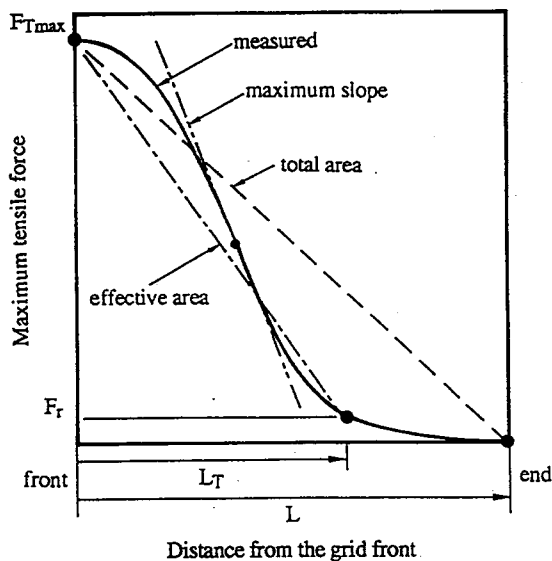


Fig.10. Sketches of the evaluation methods of the pull-out resistance.

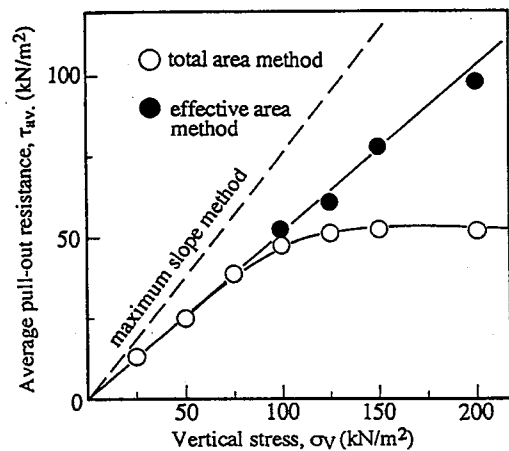


Fig. 11. Maximum pull-out resistances - vertical stress relations.

実際の試験結果を用いて、この3つの方法より得られた引抜き抵抗応力を比較したものがFig.11である。"Maximum Slope Method"による結果は、常に他の方法より得られた結果より大きく、抵抗を過大評価している。"Total Area Method"と"Effective Area Method"の結果を比較すると、比較的小さい拘束圧条件では両結果はほぼ等しく、またこの時のジオグリッド自身の伸びは小さい。これに対して拘束圧が大きくなると、前者は常に後者より小さい結果を示す。この時、"Total Area Method"によって得られる結果はほぼ一定であるが、これはすでにジオグリッドが引張り強度に達しており、その強度より決まる一定値を示していることになる。"Effective Area Method"による結果はほぼ直線上にあり、Coulomb摩擦則の適用が可能となり、その傾きより摩擦角を定義することが可能となる。また一方、"Effective Area Method"や"Maximum Slope Method"ではそれぞれ有効長や最急勾配を決定する場合に人為的な違いが加わることは明らかである。

よって最終的な結論としては、比較的小さい拘束圧で引抜き試験を行い、"Total Area Method"を用いて引抜き抵抗を評価すれば、計測も先頭の引抜き力と引抜き変位のみで、比較的簡単に設計のパラメータを決定することが可能であると考えられる。

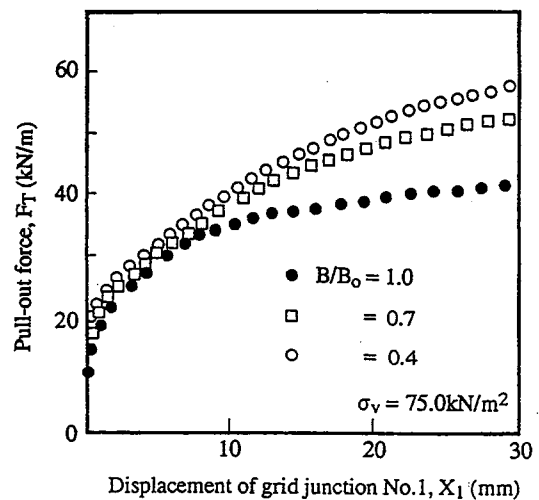


Fig. 12. Effect of geogrid width on the pull-out behavior.

5. 標準的な室内引抜き試験法の提案

5.1 ジオグリッド幅の影響

Fig.12は、引抜き試験におけるジオグリッドの敷設幅が引抜き抵抗に及ぼす影響についての一例である。この図は、先頭の引抜き力と先頭の引抜き変位関係を異なる敷設幅 $B/B_0 = 1.0, 0.7, 0.4$ についてプロットしたものである。ここで、 B はジオグリッドの敷設幅、 B_0 は土槽幅である。この結果より明らかであるが、敷設幅が土槽幅と同じ場合 ($B/B_0 = 1.0$) に比べて敷設幅が小さい場合は大きく異なり、 $B/B_0 < 1$ の場合でのジオグリッド端面の影響は大きいことがわかる。よって、標準的な引抜き試験法では $B/B_0 = 1.0$ の条件で行うことが望ましいと言える。

5.2 室内引抜き試験法

本論文の結果に基づき、標準的な室内引抜き試験法およびその結果の評価法について以下を提案するものである。

(1) 引抜き試験時に土試料の変位を拘束しない。

(a) エアプレッシャーバッグを用いて一定の拘束圧を作用させる。

(b) 引抜き土槽と土試料間の摩擦を軽減させるために、シリコングリスを塗布したラバーメンブレンを土槽内面に用いる。

(2) 引抜き試験結果より得られる結果は、装置および材料の寸法に依存しない。

(a) ジオグリッドの敷設幅は、土槽幅と同じにする。

(b) 土槽の高さを大きくすると、引抜き時に、土槽の引抜き方向前面壁での土圧が大きくなり、引抜き抵抗の評価に大きく影響を与える⁵⁾。本試験では20cmとしている。

(c) ジオグリッドの敷設長は結果の評価法により以下のとおりとする。

(c-1) "Total Area Method" で評価する場合：ジオグリッドが伸びない程度の長さ

(c-2) その他の方法で評価する場合：ジオグリッドが伸びる程度の長さ

(3) 計測する物理量は結果の評価法に依存する。

(a) "Total Area Method" で評価する場合：引抜き力とジオグリッド先頭の変位

(b) その他の方法で評価する場合：引抜き力とジオグリッド各節点の変位

6. 結論

本論文より得られた結論を以下に示す。

(1) 土中のジオグリッドの引抜き抵抗特性は、ジオグリッド自身に不均一な伸びが生じながら引抜かれる。

(2) 引抜き試験結果の評価法として、その目的に応じた2つの方法を提案した。

a.: Mobilizing Process Method b.: Average Resistance Method

(3) 本論文の結果より、ジオグリッドの標準的な室内引抜き試験法およびその結果の評価法について提案した。

参考文献

- 1) たとえば, Juran, I. et al., "Pull-out response of geotextiles and geogrids", Proc. of the Symp. on Geosynthetics for soil improvement, ASCE, U.S.A., pp.92-111, 1988.
- 2) ジオテキスタイルを用いた補強土の設計・施工マニュアル, 建設省土木研究所資料, 1992年
- 3) 林重徳 他, "土中におけるポリマーグリッドの引抜き抵抗機構", 土と基礎, Vol.33, No.5, pp.21-26, 1985年
- 4) 荻迫栄治, "ジオグリッドの引抜き抵抗の評価法と補強土擁壁の設計に関する研究", 九州大学学位論文, 1990年.
- 5) Palmeira, E.M. et al., "Scale and other factors affecting the results of pull-out tests of grids buried in sand", Geotechnique 39, No.3, pp.511-524, 1989.