

ジオテキスタイルを用いた盛土地盤の変形解析

荻 迫 栄 治
(土木本部)
河 辺 衛
(土木本部)
了 戒 公 利
(技術研究所)
町 田 泰 法
(土木本部)

§ 1. まえがき

ジオテキスタイルを用いた補強土工法は、高張力材料の特性を活かして軟弱地盤対策に限らず盛土のり面の急勾配確保、擁壁に作用する土圧の軽減などに採用されている。しかし、補強土のメカニズムとしての土と補強材の相互作用については未解明な部分が多い。また、現在採用されている設計計算法の多くは¹⁾、敷設する補強材の引張り強度および土と補強材の引抜きせん断強度に基づくものであり、いわゆる剛塑性論に立脚している。しかし、比較的剛な補強材と変形しやすい土との相互作用としての引抜き抵抗を、変位・変形を無視した剛塑性論の観点でとらえることには問題があるといえる。

一方、落合らはポリマーグリッドの引抜き試験を行ない、ポリマーグリッドの土中における変位分布と引抜き抵抗の発生状況から、土中におけるポリマーグリッドの引抜き抵抗がグリッドの変位に伴って変化することを明らかにした²⁾。

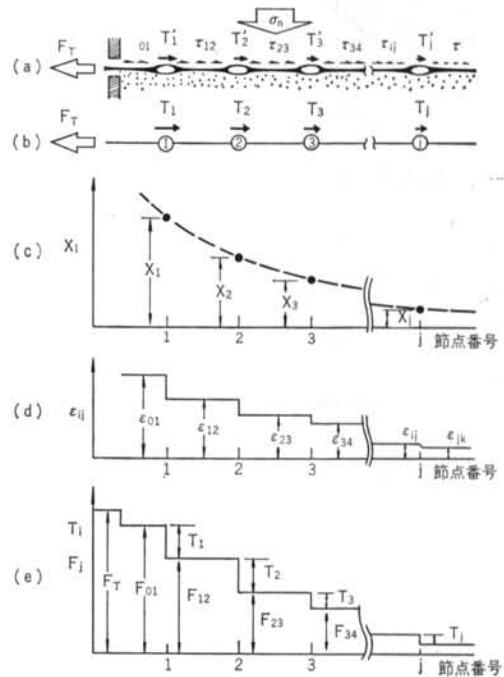
そこで、本研究ではポリマーグリッドを用いた道路盛土工事をシミュレートするために、実際に現場で使用された盛土材とポリマーグリッドを用いて引抜き試験を行ない、落合らの提案する手法^{3)~6)}に基づき土中のポリマーグリッドの引抜き抵抗の関係式を求め、得られた関係式に基づき盛土地盤のFEM変形解析を行ない、実測結果との比較・検討を行なった⁷⁾。

§ 2. 土中におけるポリマーグリッドの引抜き抵抗機構

土中のポリマーグリッドは引張り力を受けると、変位の進行に伴って引抜きと逆方向に抵抗力を受ける。このとき発生する抵抗は、図一(a)に示すようにグリッド節点間のリブに発生する土とのせん断抵抗(τ_{ij})と各節点に付加される抵抗力(T_i')であると考えられる。ポリマ

ーグリッドのように補強材をはさむ上下の土が一部連続した状態にある場合、引張り方向に直交するリブの抵抗効果は各節点に集中して伝達されるものであり、したがってリブに発生するせん断抵抗と各節点に付加される抵抗力を比較すると、後者の役割がかなり大きいと考えられる。したがって、これらの抵抗力が図一(b)のようにグリッドの各節点に集中して作用すると仮定する。鉛直応力(σ_n)一定の条件下で測定されるグリッド先頭の引張り力(F_T)とグリッド各節点の変位(X_i)を用いて、土中のグリッドに作用する引抜き抵抗力の分布を求める解析手法の概念は、以下のとおりである。

図一(c)は、引抜き試験より得られるグリッド各節点の変位(X_i)を示しており、これより各節点間におけるグリッドのひずみ(ϵ_{ij})は次式により計算することがで



図一 引抜き試験結果の解析手法概念図

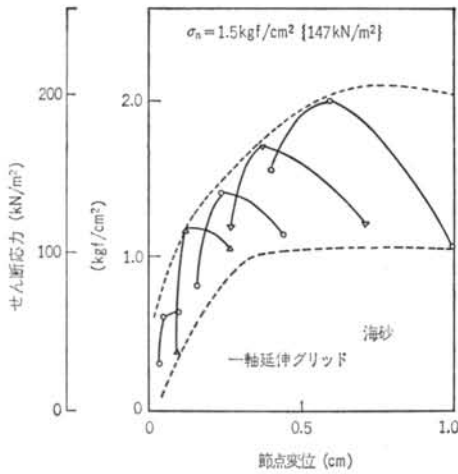


図-2 引抜き抵抗の分布状況

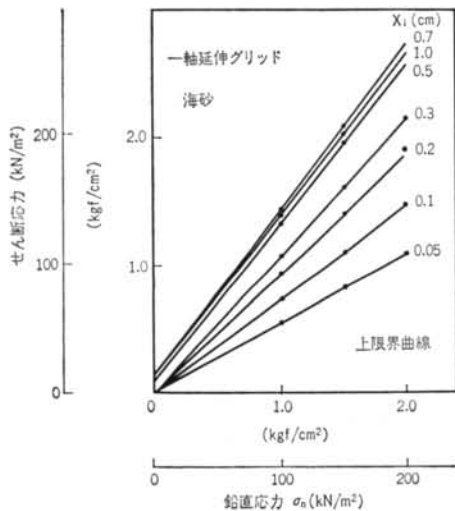


図-3 鉛直応力の影響

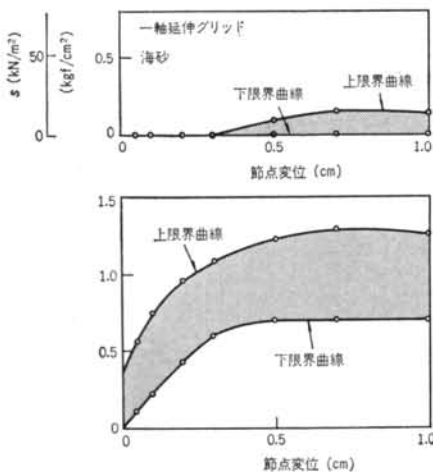


図-4 引抜き抵抗係数の発現過程と範囲

き、図-1(d)が得られる。

$$\epsilon_{ij} = \frac{X_i - X_j}{l} \quad \dots\dots(1)$$

ここに、 l はグリッド節点間の距離である。ここで、空气中で測定されたポリマーグリッドの引張り力とひずみの関係曲線を用いると、各節点間のひずみ(ϵ_{ij})に対応する各節点間の引張り力(F_{ij})を求めることができる。

このようにして得られるグリッドの引張り力の伝達状況を示したものが、図-1(e)である。図-1(e)のエレベーションの落差が、グリッド節点に作用する引抜き抵抗の合力(T_i)と解釈できる。

図-2は、任意の引張り荷重におけるグリッド節点の変位と、そのとき節点に作用した引抜き抵抗力の関係を示したものである。同図から分かるように、節点の変位とその引抜き抵抗力の曲線は、破線で描いた2本の曲線の間に分布する。ポリマーグリッドの初期の変位段階では、節点の付加抵抗力は上限の曲線に沿って立ち上がるが、変位の進行に伴い前方の節点の付加抵抗力は低下し下限曲線に漸近する一方、後続の節点付加力が上限曲線に近づく。

各節点の引抜き抵抗力の上限および下限を与える2本の曲線について、鉛直応力の影響を調べたものが図-3である。上・下限界曲線とも任意の変位レベルにおいてせん断応力と鉛直応力の関係はほぼ直線上に分布している。これは、それぞれの限界曲線において一種の摩擦則が成り立つことを意味している($2\tau = s + \sigma_n \cdot f$)。

図-4は、これらの直線から得られる s 、 f を節点変位を横座標としてプロットしたものである。 s は摩擦則の粘着力成分に、また f は摩擦成分に対応するものであり、図-4の曲線はそれぞれ土中のグリッドにおいて、その変位に伴って作用する引抜き抵抗の粘着力成分および摩擦成分の発現過程と範囲を表現していると考えられる。

§ 3. ポリマーグリッド補強土の解析手法

3.1 ポリマーグリッドの補強機構のモデル化

ポリマーグリッドを敷設した土構造物の応力・変形解析には、特異なせん断方向の摩擦特性やすべりを有する不連続面の挙動を表現し得る解析手法が必要である。そこで、特定の不連続面の変形特性を表現できるジョイント要素と、軸力のみが作用する平面トラス要素で表わしたポリマーグリッドを組み合わせることによって、ポリマーグリッドの補強機構のモデル化を行なった。図-5

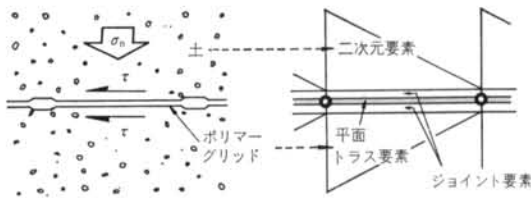


図-5 ポリマーグリッドの補強機構のモデル化に、その有限要素モデルを示す。

ジョイント要素を用いることにより、前節で述べた土中のポリマーグリッドの引抜き抵抗機構をジョイント要素の非線形性として取扱うことができる。すなわち、ジョイント要素のせん断剛性にせん断変位依存性を導入することにより、せん断変位に伴う引抜き抵抗係数の変化を表現することができる。

3.2 ジョイント要素の適用法

ジョイント要素は鉛直剛性 k_m とせん断剛性 k_s の二つの剛性を有し、前者は圧縮力のみ伝達を表現し、後者はせん断変位に対するすべりを表わす。前節で示したように、ポリマーグリッドの引抜き試験においてその引抜き抵抗係数はグリッドの節点変位に伴って変化する。したがって、ジョイント要素のせん断剛性を一定とせず、せん断変位に伴って連続的に変化させることによって土中におけるポリマーグリッドの非線形的挙動を解析することができる。

すなわち、ジョイント要素のせん断剛性 k_s の決定には引抜き抵抗の粘着力成分 s および摩擦成分 f の発現過程とその範囲を示した図-6 の関係を用いる。

ここに、 s および f がそれぞれ図-6 の破線の領域内において、せん断変位 u の線形関数 ($s=nu, f=mu$) で表わされるものとする、せん断応力は

$$2\tau = s + \sigma_n \cdot f = (n + \sigma_n \cdot m)u \quad \dots\dots(2)$$

となり、ジョイント要素のせん断剛性 k_s は次式で与えられる。

$$2k_s = n + \sigma_n \cdot m \quad \dots\dots(3)$$

各変位に対する n, m の決定に際しては、そのときの最大せん断変位 u_{max} の値によって図-6 の三つの領域 (I), (II), (III) に区分する。

(I) u_{max} がせん断変位 u_1 (下限界曲線の収束点 s_r, f_r と上限界曲線との交点におけるせん断変位) に達するまでの領域であり、 n, m の値は原点から上限界曲線上の u_{max} の点を結んだ直線の傾きで与えられる。

(II) u_{max} が u_1 を越える場合で、 u_{max} を生じたジョイント要素のせん断抵抗は残留抵抗 τ_r の値を示

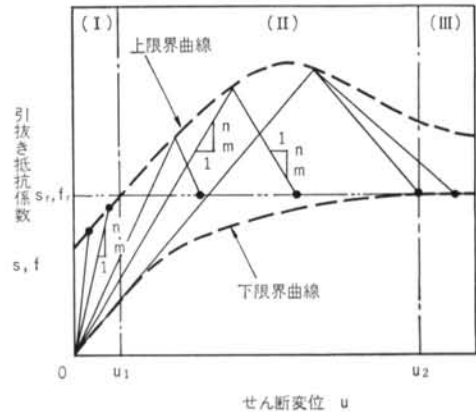


図-6 ジョイント要素のせん断剛性 k_s の決定法

すものとする。また、 u_{max} 以下のせん断変位に対する s, f は、上限界曲線上の点を折返し点とした傾き $\pm n, \pm m$ の2本の直線と与えられる。

(III) u_{max} がせん断変位 u_2 (領域(II)において原点を通る直線が下限界曲線に接するときの最大せん断変位) を越える場合で、せん断変位に対する s, f の値は領域(II)と同様に2本の直線と与えられるが、原点を通る直線は u_{max} の値にかかわらず $u_{max}=u_2$ のときの直線とする。

以上のように、ジョイント要素の非線形性は、三つの領域区分に対して表わした比較的簡単なせん断剛性 k_s の最大せん断変位 u_{max} 依存性によって表わされる。

一方、ジョイント要素の鉛直剛性は圧縮側と引張り側でそれぞれ一定値をとるものとし、引張り側の値 k_{n2} は圧縮側の値 k_{m1} に比べてきわめて小さい値とする。

§ 4. 道路盛土地盤の変形解析

以上述べたような、土中におけるポリマーグリッドの引抜き抵抗機構の解析手法を用いて、実際に現場で施工された道路盛土地盤の解析を行なった。当現場は、建設省山形工事事務所管内で建設中の南陽バイパス深沼地区における、ジオテキスタイルと深層混合処理工法を併用した道路盛土工事である。

4.1 解析対象地盤

原地盤は、図-7 に示すように上部3~4mに有機質土を有する軟弱地盤である。盛土の右側には、サンドマットのり尻位置から5m程度離れて幅15m水路の護岸があり、盛土載荷による水路側へのすべり破壊を防止するために、盛土のり尻付近の地盤は深層混合処理工法によ

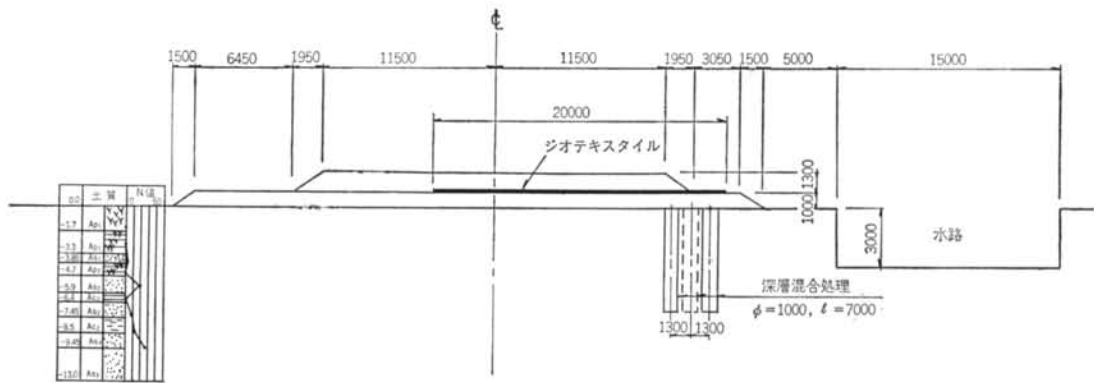


図-7 盛土断面図

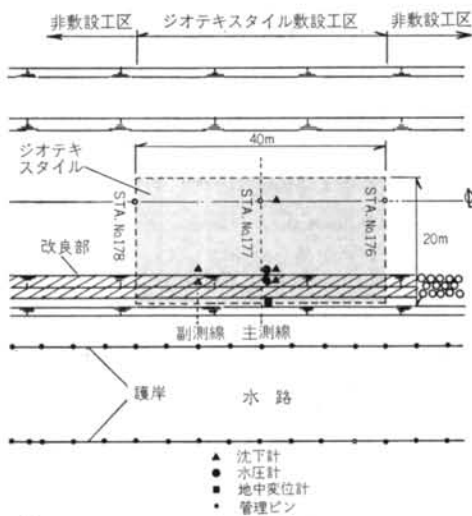


図-8 計器配置平面図

って改良されている。

盛土は、1mのサンドマットの上に1.3m 載荷するもので、盛土材にはマサ土を使用し、締固め度85~90%で締固められている。

また、敷設したジオテキスタイルはポリマーグリッド(SS-2)であり、縦断方向延長40m、横断方向幅20mにわたってサンドマット上に敷設されている。

ジオテキスタイルには、盛土横断方向のジオテキスタイルのひずみを測定するためにひずみ計を8個貼付している。また、改良部と未改良部の土圧および沈下量を測定するために、それぞれ土圧計および沈下計を設け、さ

らに改良柱体の外側には地中変位計を設置している。計測器の配置図を図-8に示す。

4.2 解析方法および土質定数

解析に際しては、まず現地で使用した盛土材とジオテキスタイルを用いて室内にて引抜き試験を行ない、試験結果より得られた盛土とジオテキスタイル間の引抜き抵抗機構を考慮したFEMによる変形解析を行なった。なお、盛土および原地盤については弾性体と仮定した。

解析に用いた土質定数は、当該地盤のボーリングデータおよび土質試験結果を基に決定した。表-1にその値を示す。

| 土層 | 弾性係数 E | | 単位体積重量 γ | | ポアソン比 ν |
|------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-------------|
| | (tf/m ²) | (kN/m ²) | (tf/m ³) | (kN/m ³) | |
| 盛土 | 500 | 4,903 | 1.977 | 19.39 | 0.333 |
| AP1① | 23 | 226 | 1.036 | 10.16 | |
| AP1② | 55 | 539 | 1.151 | 11.29 | |
| AS1 | 140 | 1,373 | 1.800 | 17.65 | |
| AP2 | 60 | 588 | 1.346 | 13.20 | |
| AS2① | 1,190 | 11,670 | 1.800 | 17.65 | |
| AC2① | 100 | 981 | 1.754 | 17.20 | |
| AS2② | 1,190 | 11,670 | 1.800 | 17.65 | |
| AC2② | 1,190 | 11,670 | 1.258 | 12.34 | |
| AS3① | 1,820 | 17,848 | 1.800 | 17.65 | |
| AS3② | 1,820 | 17,848 | 1.800 | 17.65 | |
| 改良柱体 | 8,000 | 78,453 | 2.000 | 19.61 | |

表-1 土質定数

| 目合寸法 (縦×横) (mm) | 単位面積 当たりの質量 (g/m ²) | 単位幅当たりの引張り強度 (縦×横) | | 初期接線変形係数 (縦×横) | | 材質 |
|-----------------------|---------------------------------------|-----------------------|-----------|-------------------|---------|---------|
| | | (tf/m) | (kN/m) | (tf/m) | (kN/m) | |
| 29×40 | 200 | 1.50×2.80 | 14.7×27.5 | 72×43 | 706×422 | ポリプロピレン |

表-2 ポリマーグリッド(SS-2)の材料特性

4.3 盛土およびジオテキスタイル間の引抜き抵抗

4.3.1 引抜き試験

試験に用いたジオテキスタイルは二軸延伸のポリマーグリッド(SS-2)であり、その材料特性は表-2に示すとおりである。

試験に用いた盛土材はマサ土で、平均乾燥密度 $\gamma_a = 1.782 \text{ tf/m}^3$ (17.48kN/m³)、平均含水比 $w = 7.18\%$ である。

引抜き試験装置は、図-9に示すようにジオテキスタイルを挟む供試体を上下の圧力室でおおうようになっており、試験は以下の手順で実施した。

(1)試験容器の下部の圧力室を構成するゴム膜の上に、ジオテキスタイルを挟んだ供試体を充填する。

(2)この供試体の上に、上板とゴム膜とから構成された上部圧力室を設置する。

(3)上部圧力室に空気圧をかけ、ゴム膜を介して供試体に所定の荷重を作用させる。

(4)圧力の負荷が完了したら、ジオテキスタイルを引き抜く。そのとき、引張り力とジオテキスタイルの変位を測定する。

なお、引抜き速度は1.0mm/minの一定速度で行ない、鉛直応力は5段階に変えて試験を行なった。

4.3.2 実験結果より得られる引抜き抵抗係数

§2および§3.で述べた方法によって実験結果を整理すると、引抜き抵抗の粘着力成分 s および摩擦成分 f を決定する係数 n および m は、それぞれ次のように与えられる。

(1) n

(i)第(I)領域: $u_{\max} \leq 0.17\text{cm}$

(a) $u_{\max} \leq 0.11\text{cm}$ の場合 $n = 2.273$

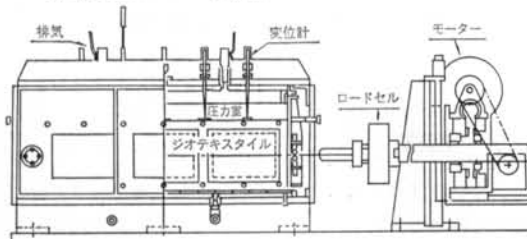


図-9 引抜き試験装置

(b) $0.11\text{cm} < u_{\max} \leq 0.17\text{cm}$ の場合

$$n = -19.767u_{\max} + 4.447$$

(ii)第(II)領域: $0.17\text{cm} < u_{\max} \leq 0.36\text{cm}$

$$n' = -1.337u_{\max} + 1.314$$

$$d = n'u_{\max} + 0.189$$

$$u_t = \frac{d}{2n'}$$

(a) $u \leq u_t$ の場合 $n = n'$

(b) $u > u_t$ の場合 $n = \frac{n}{u} - n'$

(iii)第(III)領域: $u_{\max} > 0.36\text{cm}$

(a) $u \leq 0.29\text{cm}$ の場合 $n = 0.833$

(b) $u > 0.29\text{cm}$ の場合

$$n = \frac{0.0526u - 0.242u_{\max} + 0.0548}{(0.29 - u_{\max})u}$$

(2) m

(i)第(I)領域: $u_{\max} \leq 0.10\text{cm}$

(a) $u_{\max} \leq 0.02\text{cm}$ の場合 $m = 6.875$

(b) $0.02\text{cm} < u_{\max} \leq 0.05\text{cm}$ の場合

$$m = -90.8u_{\max} + 8.69$$

(c) $0.05\text{cm} < u_{\max} \leq 0.10\text{cm}$ の場合

$$m = -38.0u_{\max} + 6.05$$

(ii)第(II)領域: $0.10\text{cm} < u_{\max} \leq 0.16\text{cm}$

$$m' = -10.67u_{\max} + 3.32$$

$$d = m'u_{\max} + 0.225$$

$$u_t = \frac{d}{2m'}$$

(a) $u \leq u_t$ の場合 $m = m'$

(b) $u > u_t$ の場合 $m = \frac{d}{u} - m'$

(iii)第(III)領域: $u_{\max} > 0.16\text{cm}$

(a) $u \leq 0.15\text{cm}$ の場合 $m = 1.61$

(b) $u > 0.15\text{cm}$ の場合

$$m = \frac{0.0165u - 0.242u_{\max} + 0.0338}{(0.15 - u_{\max})u}$$

4.4 解析モデルおよび解析条件

図-10に解析モデルを示す。3.1で示したように、ジオテキスタイルは平面トラス要素とし、土とジオテキスタイルの境界面に前節で求めた n 、 m より決まるせん断

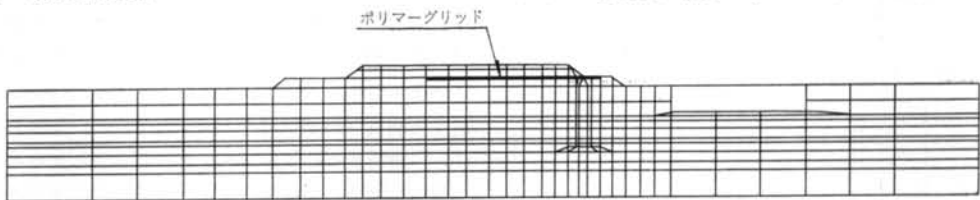


図-10 解析モデル

剛性 k_s を有するジョイント要素を用いた。

境界条件としては、側面を鉛直方向自由、水平方向固定、底面を両方向固定とし盛土による変形解析を行なった。なお、解析に際しては平面ひずみ条件を仮定した。

4.5 解析結果

図-11は地表面沈下量の水平分布を示しており、一点鎖線が解析値、黒丸が実測値を表わしている。盛土セン

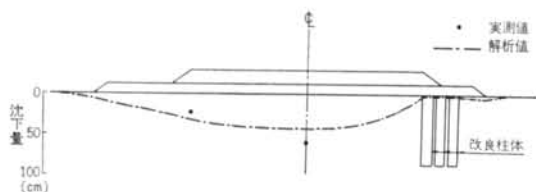


図-11 地表面沈下量

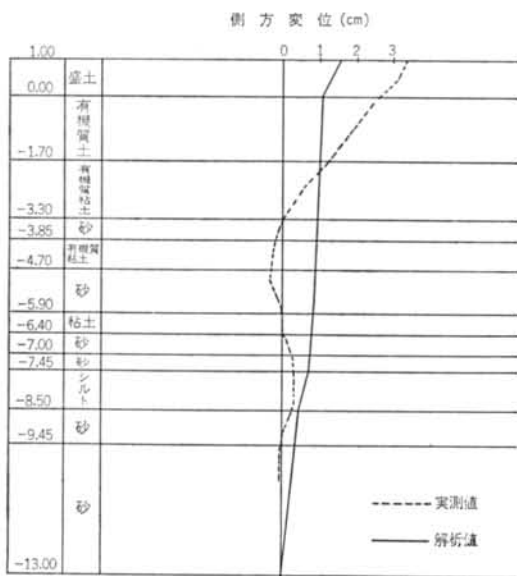


図-12 側方変位の地中方向分布

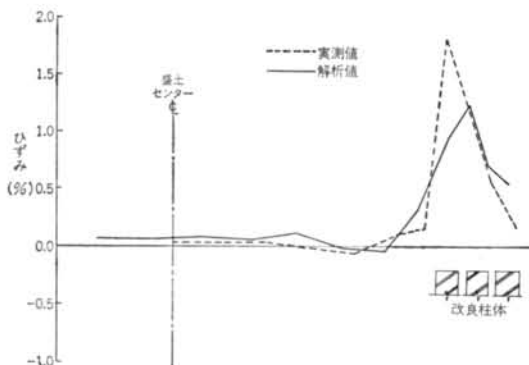


図-13 ジオテキスタイルに発生するひずみ分布

ターおよび改良柱体上については解析値が実測値より小さめ、また未改良部については解析値が実測値よりやや大きめである。これは、盛土横断方向にはボーリング調査が行われていないため確認できないが、横断方向の地層に変化がある可能性があること、また地盤を弾性体と仮定していることなどに起因するものと考えられる。しかしながら、全体としては解析値は実測値と比較的よく一致しているといえる。

図-12は、改良柱体外縁部の側方変位の地中方向分布を示したものである。実測値は、EL-3.3~-5.9m付近において盛土内側に引き込まれており、解析値とは異なった挙動を示している。このような解析値と実測値との違いは、やはり上述したような理由によるものと考えられるが、変位量自体がかなり小さな値であり、測定精度に言及すれば必ずしも解析値と実測値との誤差が大きいとはいえない。

図-13は、ジオテキスタイルに発生するひずみの分布を示したものである。ジオテキスタイルに発生するひずみは、盛土荷重のみならず盛土材とジオテキスタイルとの間の力の伝達、また盛土による地盤の変形などの複雑な相互作用の影響を受けるものと思われる。図-13によれば、ジオテキスタイルに発生するひずみの最大値は、発生箇所は多少異なるが解析値、実測値とも改良柱体上で発生している。また、改良柱体より2~3m離れた所で解析値、実測値ともに若干圧縮ひずみが発生しており、全体として定性的にも定量的にも解析値は実測値とよく一致しているといえる。

また、土圧は改良部上で実測値 $7.5 \text{ tf/m}^2 \{73.5 \text{ kN/m}^2\}$ 、解析値 $8.7 \text{ tf/m}^2 \{85.3 \text{ kN/m}^2\}$ および未改良部上で実測値 $1.5 \text{ tf/m}^2 \{14.7 \text{ kN/m}^2\}$ 、解析値 $2.5 \text{ tf/m}^2 \{24.5 \text{ kN/m}^2\}$ であり、両者ともかなりよく一致している。

§ 5. 結論

ジオテキスタイルを用いた道路盛土工事を取り上げ、現地で使用された盛土材とジオテキスタイルを用いて引抜き試験を行ない、その結果得られた土とジオテキスタイル間の引抜き抵抗の関係式を用いて当盛土地盤の FEM 変形解析を行なった。その結果、地盤の変形挙動やジオテキスタイルに発生するひずみ分布等について、解析値と実測値はかなりよく一致した。特に、ジオテキスタイルに発生するひずみの解析値は実測値ときわめてよく一致しており、引抜き試験より得られる引抜き抵抗の変位依存性を考慮した本解析手法が、ジオテキスタイルで

補強された土構造物の補強効果や変形予測にきわめて有用であることを示唆している。

謝辞 本研究は、建設省土木研究所との共同研究の昭和61年度成果の一部であり、第一著者が昭和62年度受託研究員として九州大学工学部水工土木学科土質工学研究室に滞在中になされたものである。当研究室の落合英俊教授、林重徳助教授、ならびに佐賀大学理工学部坂井晃助

手には本研究テーマを進めるに当たり有益なご助言、ご指導をいただいている。また、建設省土木研究所嶋津晃臣室長、塚田幸広研究員、ならびに不動建設株式会社磯田知広氏、奥田達矢氏には貴重な現場データの提供にご尽力いただくとともに、熱心なご討議をいただいた。末筆ながら、皆様に深く感謝の意を表する次第である。

〈参考文献〉

- 1) Netlon Ltd.: "Test Methods & Physical Properties of 'Tensar' Geogrid" (1984)
- 2) 林重徳・山内豊聡・落合英俊・孫純鐘: "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 (1985年) pp.21~26
- 3) 坂井晃・落合英俊・林重徳・了戒公利: "ジオグリッドを用いた土構造物の応力・変形解析" 第21回土質工学研究発表会発表講演集 (1986年) pp.1445~1448
- 4) H. Ochiai & A. Sakai: "Analytical Method for Geogrid-Reinforced Soil Structures" Proc. 8th Asian Regional Conf. on SMFE (1987) pp.483~486
- 5) 坂井晃・落合英俊・林重徳: "ジオグリッドを用いた補強土の変形解析法" 土質工学会論文報告集 Vol.27, No. 3 (1987年) pp.147~155
- 6) 建設省土木研究所編: "ジオテキスタイルの土中での挙動とその効果に関する研究報告書, 昭和60年度" 建設省土木研究所 (1986年) pp.194~217
- 7) 建設省土木研究所編: "同上, 昭和61年度" 建設省土木研究所 (1987年) pp.156~184

