

ジオネット置換工法における補強効果の評価と 設計・施工に関する研究

今西 肇¹・落合英俊²・安福規之³

¹正会員 工修 大阪土質試験所 九州地盤研究所 (〒810-0074 福岡市中央区大手門 3-5-1)

²フェロー会員 工博 九州大学大学院教授 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

³正会員 工博 九州大学大学院助教授 建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

ジオネットを用いた強制置換工法におけるネットの補強効果を評価するために、力の釣り合い条件からネットの変形と張力を規定する式を誘導し、現場における観測結果を用いて式の有効性を確認した。さらに、設計および施工管理について言及し、ジオネット選定に必要な最大張力の算定方法および実務における安定形状作成のための施工方法を提案した。

Key Words : *geonet, replacement, soft clay ground, field measurement, ground improvement, man-made island, field management*

1. まえがき

軟弱な粘土地盤を強制的に押し出し良質土砂と置換する工法、いわゆる強制置換工法は、良質の土砂を軟弱地盤上に投入すれば、短時間に経済的な支持地盤を作ることが出来る利点がある一方、その形状が一定でなく十分な安定検討も出来ないことからその使用が制限されていた。

ところが最近、ジオネットの導入で再びこの強制置換工法が注目されはじめている。その理由は、ジオネットが土砂を拘束し、その形状を安定させ、安定した置換土の築造が可能となることにより、その適用範囲が徐々に広がってきたことにある。さらに、最近の経済情勢から公共工事のコスト縮減が叫ばれるようになると、経済的な施工が可能である強制置換工法は、軟弱地盤上に仮設道路を建設する工法として再び見直され、ジオネットを併用して使用されるようになってきた。

このように、強制置換工法はジオネットを用いることにより、経済性、施工性および確実性を兼ねそなえた工法になる可能性を持ち、本設の土構造物築造方法にも適用できると思われる。

ジオネットを用いたこのような強制置換工法に関する施工は、1975年から1979年にかけて北九州市荏田港松山地区埋立地において、ロープで補強された

ネットを用いた盛土工法として、安原ら¹⁾によって実施されている。そこでは、従来の敷網工法と強制置換工法を組み合わせ置換土を理想的な形状にすることにより、敷網工法の新しい使い方が模索されており、施工後、ボーリング調査などの現場での形状の観測および室内実験などにに基づき、仮設的に取り扱う場合の設計の考え方が報告されている。

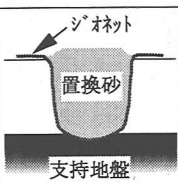
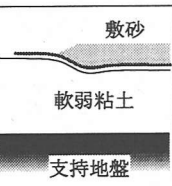
そこで本論文は、ジオネット置換工法を本設の土構造物に適用することを目的として、置換土を拘束するジオネットに着目し、その変形形状および張力分布を規定する式を誘導した。さらに得られた式を利用して、合理的な設計および施工管理について言及し、ジオネット選定に必要な最大張力および安定形状作成のための施工管理方法を提案するものである。

以後、ジオネットを用いた置換工法をジオネット置換工法と呼ぶ。

2. ジオネット置換工法

ジオネット置換工法と表層処理工法としてのシート・敷網工法の比較を表-1に示す。また、ジオネット置換工法の施工状況の概要は写真-1および図-1に示すとおりであり、その施工手順を以下に解説する。

表-1 ジオネット置換工法とシート・敷網工法の比較

	ジオネット置換工法	シート・敷網工法
参考図		
目的	仕切り堤や仮設の道路等の幅が狭く全長の長い土構造物を構築する	パーカトレン等の地盤改良を行うためのトラフィビリテイの改善を目的とした平面的な広がりを持つ土構造物を構築する
メカニズム	置換砂をジオネット上に投入し強制的に形よく潜り込ませて安定させる。	土砂を土木安定シート上に薄く覆しシートのロック効果により軟弱粘土地盤上で安定させる
適用場所	浚渫埋立地、干拓地等	浚渫埋立地、干拓地等
対象地盤	浚渫埋立地、干拓地等の支持力のほとんどない軟弱粘土地盤	支持力不足の軟弱粘土地盤

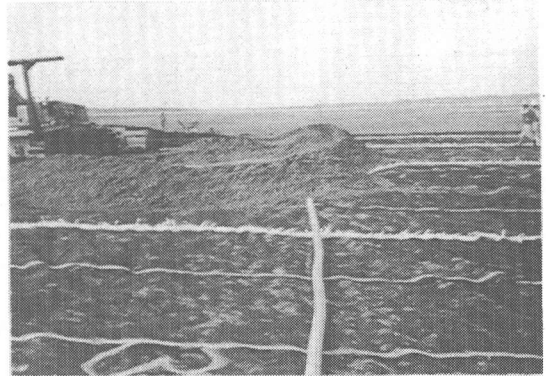
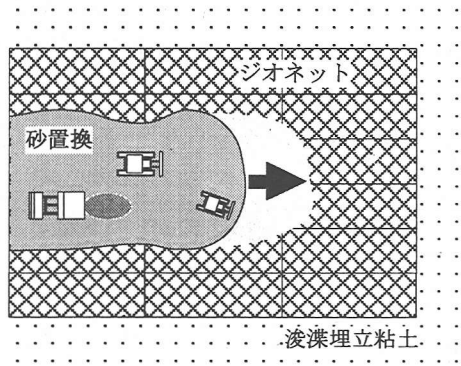
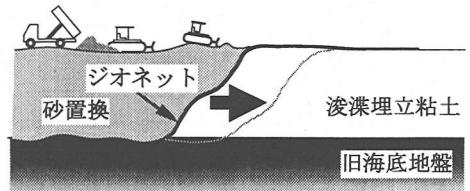


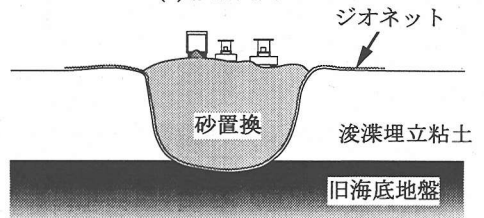
写真-1 ジオネット置換工法の施工状況



(a) 平面図



(b) 縦断面図



(c) 横断面図

図-1 施工状況模式図

まず、ロール状にしたジオネットを軟弱粘土地盤上に人力で転がし伸ばしながら敷設する。ジオネットの規格は、おおむね1枚の大きさが10m×30m(300m²)であるため、現場ではこれらをロープ等を用いて接合する必要がある。接合も基本的には相対するジオネットの接合部のハトメに1本ずつロープを通し、人力で緊結する方法である。

その後、軟弱粘土地盤上に敷設されたジオネットに帯状の盛土を行うので、ジオネットの敷設幅は、必要な置換砂幅に軟弱地盤の深さの2倍と残し代を加えたものとなる。この場合、ジオネット張り出しを必要以上に広くとると、盛土が進行するにつれてジオネットが沈み込もうとするので、盛土部以外のジオネット部と軟弱粘土地盤間のせん断抵抗力が大きくなり、過剰な張力がジオネットに発生する。また、ジオネットの張り出しが少ないと急激なもぐり込みが発生し盛土と共にジオネットも軟弱粘土地盤中に没することになる。

置換用の盛土は、進行方向についてはできる限り滑らかな勾配をつけて施工し、土砂は中央から左右対称に小型ブルドーザを用いて沈める。シート・敷網工法と異なり、薄層で均一な厚さの管理を必要と

しない。むしろ連続的に集中して1箇所に土砂の投入を行う。

表層処理工法であるシート・敷網工法では、変形を極力少なくすることに留意するのに対し、ジオネット置換工法では、できる限り軟弱粘土内へのもぐ

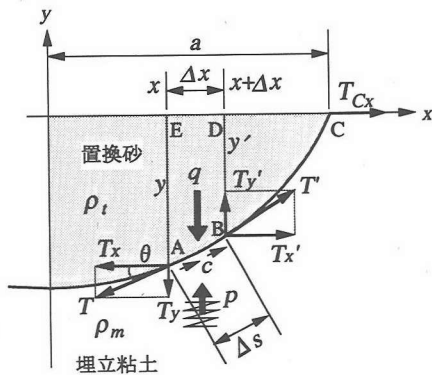


図-2 ジオネットの釣り合い条件

り込みを許容する。この意味では、地盤を完全に破壊し下部のよりせん断強さの大きい地盤へ、形よく支持させることに主眼をおく。

盛土材の投入を継続することによって、盛土厚さが大きくなっても、地盤反力の少ない軟弱粘土地盤が対象の場合には、盛土荷重を載せれば載せるほど沈下が促進される。最後に、置換砂下部が地盤反力の大きな在来地盤に到達すると、沈下が減少し、さらに置換砂をまきだしても盛土が沈下しなくなるので、施工を終了する。

3. 補強の効果

本研究の対象となるジオネット置換工法の補強の効果は「拘束効果」、「支持層への直接支持効果」、「荷重分散効果」および「周辺地盤の圧密促進効果」であると考えられる。

「拘束効果」とは、軟弱粘土地盤表面へ置換砂を直接まきだした場合、お化け丁場と言われるように、突然盛土がせん断力のない地盤中に陥没するので、ジオネットを敷設すれば、少なくとも置換砂が一塊になり、ある程度所定の大きさと形状を維持することができる効果である。「支持層への直接支持効果」とは、軟弱粘土地盤の下部の沖積地盤やそれ以上の強度を持つ地盤がジオネットにより包まれた置換砂を支持することにより、支持力が確保できる効果である。ジオネットがない場合には、砂の拘束効果が十分に期待できず、うまく置換できたととしてもすべり破壊を生じる危険性がある。「荷重分散効果」とは、ジオネット置換工法によって造成された地盤は、ある程度の厚さと断面積を持つので、走行荷重等が容易に分散しやすい効果である。最後に、「周辺地盤の圧密促進効果」とは、強制押し込みによるコンパクション効果により、周辺粘土に過剰間隙水圧が

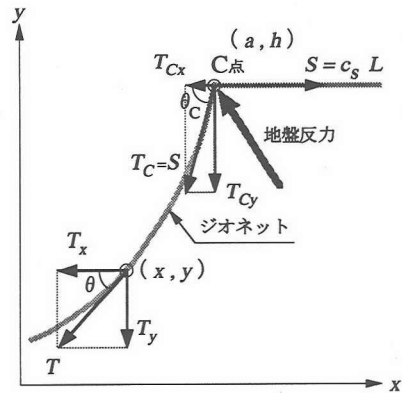


図-3 C点での釣り合い条件とジオネット張力

発生し、その消散による軟弱粘土の強度増加が見込める効果である。この場合、置換砂自体がドレーンの役割を果たすことも特徴的である。

4. ジオネットの変形と応力

ジオネット置換工法を本設の土構造物に適用するために、明らかにしなければならない課題は置換土の形状とジオネットに発生する最大張力である。このうち、置換土の形状は、ジオネットが置換土を拘束していることから、ネットの変形に置き換えて考えることができるので、ジオネット置換工法を本設の土構造物に適用するための検討課題は、ジオネットの変形と張力であることが明らかになった。

そこで本章では、ジオネットの力の釣り合いに着目し、設計および施工の基本となるジオネットの形状と張力を表す算定式を求める。

(1) 力の釣り合い条件と変形を規定する式

図-2 および図-3 は軟弱粘土地盤中にもぐり込むジオネットの釣り合い条件を次の仮定を前提に示したものである。

①ジオネットの剛性は無視する。②軟弱粘土地盤には地盤反力が発生しその大きさは Winkler の地盤係数法に従う。③ジオネットと粘土間には一定のせん断抵抗力が働く。④置換砂荷重による粘土の圧密現象は考慮しない。⑤分割片の両側面に働く不静定内力が相等しく力としては釣り合う。

ある単位幅 Δx を考えると、 x 方向の釣り合い条件から A 点での x 方向張力 T_x は、B 点での x 方向張力 T_x' とジオネットと粘土間に働くせん断抵抗力の x 方向成分の合力と等しくなり式 (1) が得られる。

また、 y 方向の釣り合い条件から A 点での y 方向張力 T_y は、B 点での y 方向張力 T_y' とジオネットと

粘土間に働くせん断抵抗力の y 方向成分の合力および、置換砂粒子の接触部分で及ぼし合う圧力の AB 面上の y 方向成分の合力である有効置換砂荷重 q と地盤反力 p に等しくなり式 (2) が得られる。

$$\begin{aligned} T'_x - T_x + c \cdot \Delta s \cdot \cos \theta &= 0 & (1) \\ T'_y - T_y + c \cdot \Delta s \cdot \sin \theta - q + p &= 0 & (2) \end{aligned}$$

ここに、

T_x, T_y : ジオネットの A 点での張力の分力

T'_x, T'_y : ジオネットの B 点での張力の分力

c : ジオネットと粘土間のせん断抵抗力

Δs : ジオネット微小要素 AB の長さ

θ : ジオネットの傾斜角度

q : A 点でのジオネット AB 上の有効置換砂荷重

p : 軟弱粘土地盤反力

式 (1) および式 (2) より、ジオネットの微分方程式を誘導する。式 (1) において

$$\begin{aligned} T'_x &= T_x + \frac{dT_x}{dx} \cdot \Delta x \\ c \cdot \Delta s \cdot \cos \theta &= c \cdot \Delta x \end{aligned}$$

であるので式 (1) は次のようになる。

$$\frac{dT_x}{dx} + c = 0$$

これを T_x について積分すると

$$T_x = -c \cdot x + A$$

ここに A は積分定数である。 a を盛土幅の 1/2 とし、 T_{Cx} を C 点での x 方向の張力の分力とすると、境界条件 $x=a, T_x=T_{Cx}$ より次式が得られる。

$$T_x = T_{Cx} + c \cdot (a - x)$$

また、 S を C 点でのジオネット張力とすると、図-3 より $T_{Cx} = S \cdot \cos \theta_C$ である。さらに、 S はジオネット地表部における粘土表面とジオネット間に働くせん断抵抗力 c_s の積分値と考え、地表部のジオネット長さを L とすると $S = c_s \cdot L$ で示される。ゆえに T_x は式 (3) のように示すことが出来る。

$$T_x = c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x) \quad (3)$$

一方、 ρ_i を置換砂の密度、 ρ_w を水の密度、 g を重力の加速度とすると、

$$\begin{aligned} q &= \frac{1}{2} \cdot (y + y') \cdot \Delta x \cdot (\rho_i - \rho_w) \cdot g \\ y' &= y + \frac{dy}{dx} \cdot \Delta x \end{aligned}$$

の関係から、

$$q = \left\{ y \cdot \Delta x + \frac{1}{2} \cdot \frac{dy}{dx} \cdot (\Delta x)^2 \right\} \cdot (\rho_i - \rho_w) \cdot g$$

となり、二次の微小項を無視すると

$$q = y \cdot \Delta x \cdot (\rho_i - \rho_w) \cdot g$$

さらに式 (2) 中の各項はそれぞれ

$$\begin{aligned} c \cdot \Delta s \cdot \sin \theta &= c \cdot \Delta s \cdot \frac{\Delta y}{\Delta s} = c \cdot \Delta y = c \cdot \frac{dy}{dx} \cdot \Delta x \\ p &= K \cdot y \cdot \Delta x \\ T'_y &= T_y + \frac{dT_y}{dx} \cdot \Delta x \end{aligned}$$

となる。ここに K は地盤反力係数である。

したがって、式 (2) は

$$\frac{dT_y}{dx} - y \cdot (\rho_i - \rho_w) \cdot g + K \cdot y + c \cdot \frac{dy}{dx} = 0 \quad (4)$$

となる。このうち $\frac{dT_y}{dx}$ は $T_y = T_x \cdot \tan \theta = T_x \cdot \frac{dy}{dx}$ より、次のように書き換えることが出来る。

$$\begin{aligned} \frac{dT_y}{dx} &= T_x \cdot \frac{d^2y}{dx^2} + \frac{dT_x}{dx} \cdot \frac{dy}{dx} \\ \frac{dT_y}{dx} &= \{ c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x) \} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} - c \cdot \frac{dy}{dx} \quad (5) \end{aligned}$$

式 (5) を式 (4) に代入すると、

$$\begin{aligned} \{ c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x) \} \cdot \frac{d^2y}{dx^2} \\ - (\rho_i - \rho_w) \cdot g \cdot y + K \cdot y = 0 \end{aligned}$$

ゆえに

$$\frac{d^2y}{dx^2} - \frac{(\rho_i - \rho_w) \cdot g - K}{c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x)} \cdot y = 0$$

そこで

$$k = \sqrt{\frac{(\rho_i - \rho_w) \cdot g - K}{c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x)}}$$

とすると、式 (6) のような同次 2 階線形常微分方程

式が得られ、これが求めるジオネットの変形を規定する式である。

$$\frac{d^2y}{dx^2} - k^2 \cdot y = 0 \quad (6)$$

(2) ジオネットの変形形状

式 (6) には k の中に x が含まれているので、

$$0 \leq \cos \theta_C \leq 1, \quad 0 \leq x \leq a$$

であることに着目して、式 (3) を次のように変形する。

$$\begin{aligned} T_x &= c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x) \\ &= c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot a \cdot \left(1 - \frac{x}{a}\right) \end{aligned}$$

そこで、 $\cos \theta_C = n_1$ 、 $1 - \frac{x}{a} = n_2$ と置き換え、 x に無関係な量として取り扱うことにすると

$$T_x = n_1 \cdot c_s \cdot L + n_2 \cdot c \cdot a \quad (7)$$

となる。ここに $0 \leq n_1 \leq 1$ 、 $0 \leq n_2 \leq 1$ であり n_1, n_2 を張力係数と呼ぶ。したがって k は次のように示される。

$$k = \sqrt{\frac{(\rho_t - \rho_w) \cdot g - K}{n_1 \cdot c_s \cdot L + n_2 \cdot c \cdot a}}$$

これより、式 (6) を近似的に解くことができ、その一般解は次式で示される。

$$y = C_1 \cdot e^{k \cdot x} + C_2 \cdot e^{-k \cdot x}$$

境界条件 $x=0$ 、 $\frac{dy}{dx} = 0$ を代入すると、 $C_1 = C_2$ となり、

$$y = C_1 \cdot (e^{k \cdot x} + e^{-k \cdot x})$$

が得られる。また、支持層から地表面までの高さを h とすると C_1 は次の通りである。

$$C_1 = \frac{h}{e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a}}$$

したがって、ジオネットの変形式は

$$y = \frac{h}{e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a}} (e^{k \cdot x} + e^{-k \cdot x}) \quad (8)$$

で示される。

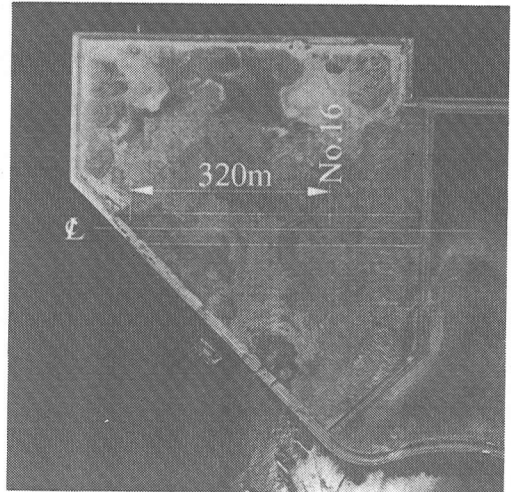


写真-2 ジオネット置換工法の適用場所

(3) ジオネットの張力

ジオネット張力の x 方向成分は式 (3) で表されており、図-3 を参考にしてジオネットに発生する張力を求めると次式のようになる。

$$T = \frac{T_x}{\cos \theta} = \frac{c_s \cdot L \cdot \cos \theta_C + c \cdot (a - x)}{\cos \theta} \quad (9)$$

ここに、

$$\theta = \tan^{-1} \left\{ \frac{k \cdot h}{e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a}} (e^{k \cdot x} - e^{-k \cdot x}) \right\} \quad (10)$$

5. 埋立地への適用

写真-2 はジオネット置換工法を適用しネットの挙動を測定した埋立地の航空写真である。

適用に当たっては、ジオネット形状の正確な測定が要求されたため新しく測定装置を開発した。そして、これらの観測結果に基づいて 4 章で示した提案式の検証を行った。

(1) 軟弱粘土地盤の性状

適用現場の代表的な土質特性を図-4 に示し、粒径加積曲線を図-5 に示す。

埋立地の旧海底には、古第三紀の砂岩・頁岩を基盤として、その上に層厚約 10m の砂礫を主体とする洪積層および層厚約 7m の沖積粘性土が堆積している。そしてこれらの自然堆積地盤の上に博多港の航路および泊地をグラブ船で浚渫した粘性土を約 10m の層厚で埋め立てている。

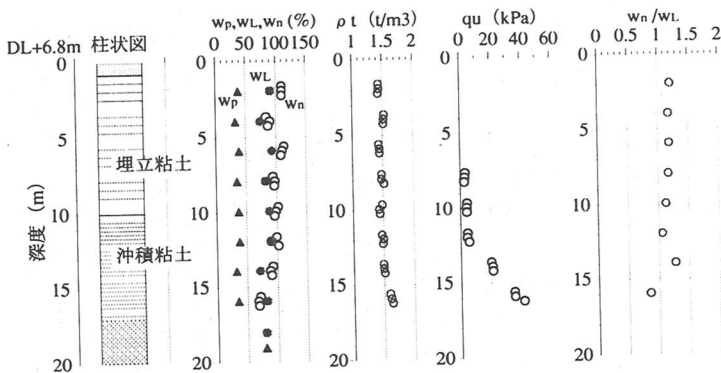


図-4 埋立地の代表的な土質特性

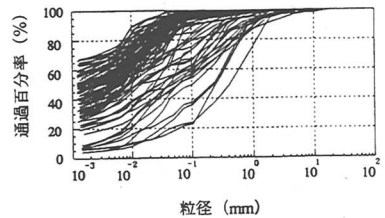


図-5 埋立粘土の粒径加積曲線

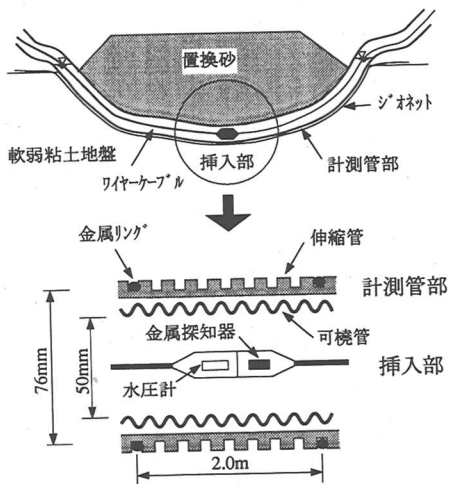


図-6 2DDM 模式図

これらの図より今回対象とした軟弱粘土地盤は浚渫埋立粘土であり、含水比が液性限界の1倍から1.4倍程度で、粘土分含有量が70~90%の乱された粘土であることがわかる。

(2) 考案した計測装置および計測方法

ジオネット置換工法は、置換砂を拘束し力学的に安定な形状を保持しようとするもので、そのジオネットの動きを知れば、形状を比較的容易に確認できる利点がある。

そこで、ジオネット形状を水圧計と金属探知器を用いて測定し任意点の位置を測定する方法として2DDM (Two Dimensional Deformation Meter) を考案した。模式図を図-6に示す。

2DDM は、管内の水圧を測定する水圧計 (深度測定用) および金属リング位置を測定する金属探知器からなる挿入部と、φ50mmの耐圧性を有する内管

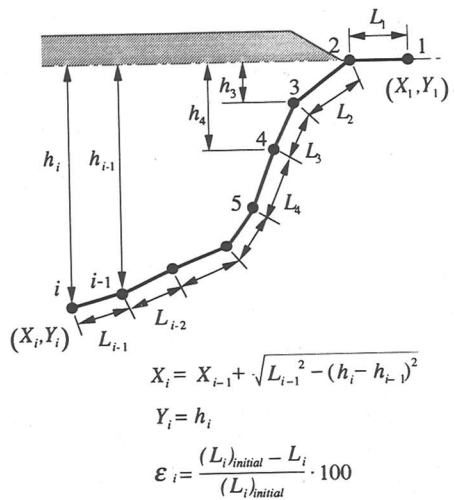


図-7 ジオネットの位置の決め方

および金属リングを2m間隔で設置したφ76mmの伸縮性を有する外管の二重管構造の計測管部からなる。なお、伸縮管および可とう管はともにほとんど剛性がないものであり、測定値に対する剛性の影響を無視できると考えた。

砂のまき出しに先立ち、まず埋立て粘土上に敷設されたジオネットに、内管を満水状態にした2DDMの計測管を盛土の横断方向に設置する。

その後、砂のまき出しとともにジオネットに沿って計測管が地中にもぐり込むので、計測管口元に設けた基準点位置から金属リング設置位置までの斜距離を金属探知装置で測定し、各点の深度を水圧計で測定する。伸縮管は結束線をしっかりと巻き付けてジオネットの目合いに固定する。固定点は金属リング位置とし、その間隔は2mピッチとした。これにより伸縮管の伸びとジオネットの伸びを同等のものと判断した。

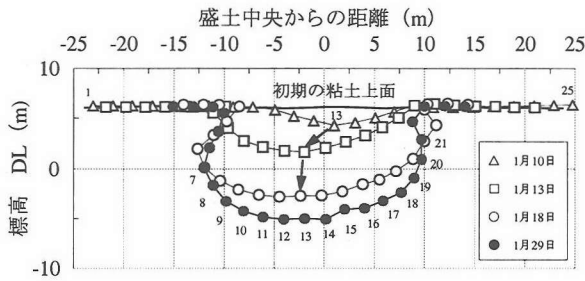


図-8 ジオネットの変形形状
(置換砂投入開始日: 1月9日)

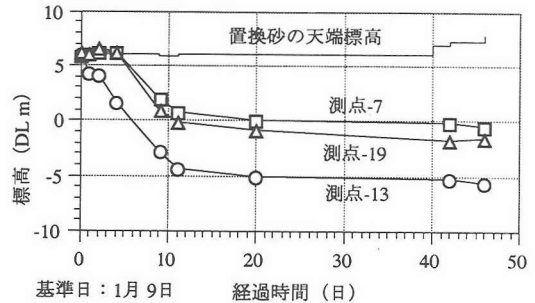


図-10 ジオネットの沈下

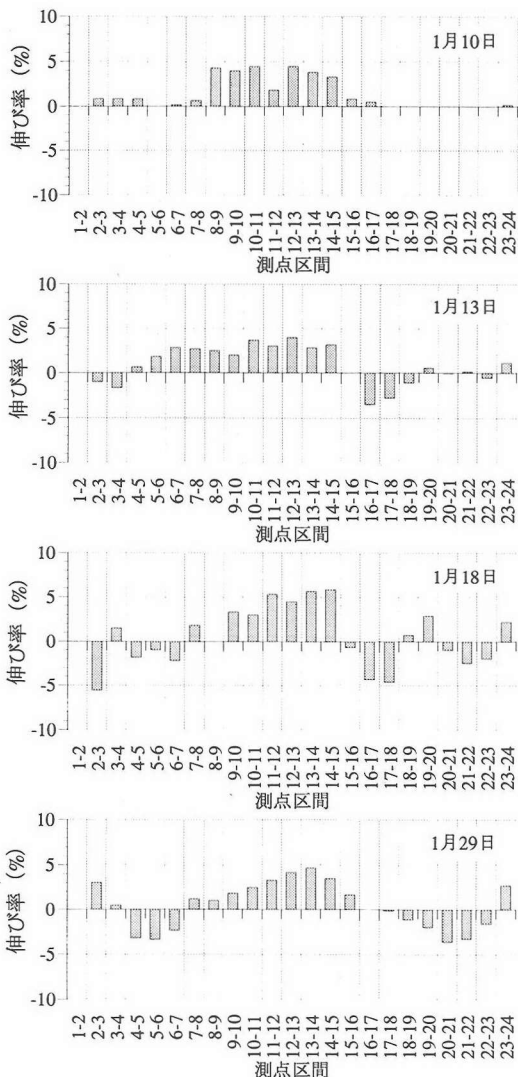


図-9 ジオネットの伸び率分布

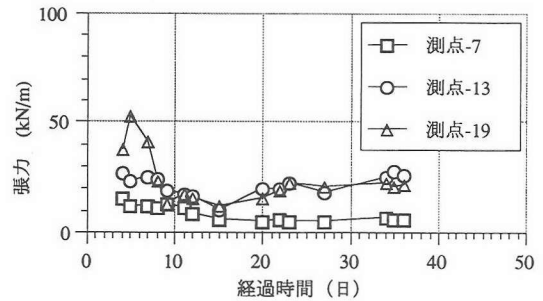


図-11 ジオネット張力の経時変化

このようにして測定された基準点から金属リングまでの斜距離 (L) と深度 (h) より、図-7に示すように金属リングの座標 (X, Y) を計算し、各施工段階毎におけるジオネットの地盤中へのもぐり込み形状を観測した。また金属リング間の距離の変化からその伸び率も測定した。伸び率は伸び方向を (+)、縮み方向を (-) としている。

なお、使用したジオネットは塩ビ樹脂コーティングしたポリエステル系の織物で、その母材引張強度の規格は 100kN/m である。

(3) 計測結果

a) 置換砂のもぐり込み形状

写真-2に示すように、仮設道路起点から 320m の No.16 地点の各載荷時における置換砂の地盤中へのもぐり込み軌跡を図-8に示す。

まき出し量が少ない1月13日までの初期において、ジオネットはハンモック形状になり、置換砂は中心よりやや左斜め方向に地盤中にもぐり込んでいる。その後、まき出し量が多くなり置換砂の荷重が増加するとともに、底面部は横に広がりながらほぼ鉛直に沈下している。

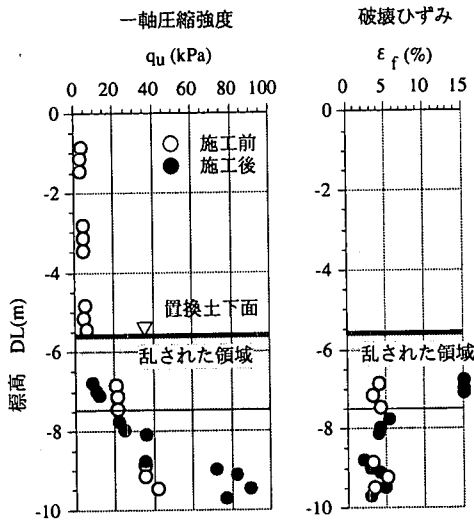


図-12 ジオネット下部の乱れ

ただし、もぐり込みの形状は、ハンモック形状からU字溝形状に変化している。最終的には、置換砂は深いU字溝の形状で地盤中にもぐり込み、埋立粘土層下に分布する在来地盤の沖積粘土層中に約1.5mもぐり込んだ形状で平衡している。

b) ジオネットの伸び率および張力

各載荷時における伸び率分布は図-9に示すとおりである。なお、測定日は図-8の測定日に対応する。

置換砂のもぐり込みが浅い1月10日の時点では、ジオネットに全体的に伸びが発生しており、伸び率の大きさは4～5%程度である。

置換砂のもぐり込みが深くなった1月13日においても、伸び率はそれ以上増加しない。置換砂のもぐり込みがさらに深くなる1月18日では、左側断面では全体に伸びが発生するのに対し、右側断面ではたのみが発生している。最終的には、1月29日に示すように、置換砂の底部が旧海底粘土中に入ると、ジオネットの伸び率はジオネット中央を頂点とした三角形分布となる。一方、浚渫埋立粘土中のジオネットでは逆にたるみが発生する。

また図-8に示す7, 13, 19の3測点に張力計を設置し張力の経時変化を計測した結果を図-10および図-11に示す。

張力計は、ジオネットと同程度の伸び率特性を有するプレートに超大ひずみゲージを貼り付けたものを、ジオネットにビスで固定する方法を採用した。

これより、置換砂のもぐり込みが浅い初期時点では張力が最大となり、もぐり込みが深くなるとともに徐々に小さくなり、最終的に張力は一定の値となる。

この傾向は、図-9に示す伸び率の経時的な変化に対応している。

c) ジオネット下部の地盤の乱れ

No.16付近の施工が終了した置換砂の中心線上のジオネット下部における沖積粘土の一軸圧縮試験結果を図-12に示す。破壊ひずみの深度分布により、ジオネット下部の在来地盤の乱れは、ジオネットの下端より約2.0m程度であり、それ以上の乱れは少ない。すなわち、粘土の流動は、ジオネットに沿って約2.0mの幅の範囲で生じていることになる。ジオネット下部の軟弱粘土層全体が絞られざる様な破壊形態を示していない。

また、この現象は置換砂のもぐり込みに対するせん断抵抗力が、乱された状態の地盤の非排水せん断強度に影響されることを示唆している。

6. 計算値と実測値の比較

(1) ジオネット形状の比較

ジオネットの形状は地表面をx軸にとると式(8)より次のようになる。

$$y = \frac{h}{e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a}} (e^{k \cdot x} + e^{-k \cdot x}) - h \quad (11)$$

$$k = \sqrt{\frac{(\rho_l - \rho_m) \cdot g}{n_1 \cdot c_s \cdot L + n_2 \cdot c \cdot a}}$$

式(11)によりジオネットの変形形状を計算するためには、k内の地盤反力係数Kおよび張力係数n₁, n₂を与える必要がある。

軟弱粘土地盤の含水比が液性限界を越えていることから、地盤反力を考慮せず置換砂に浮力が働くと仮定すると、(ρ_l - ρ_w) · g - K を (ρ_l - ρ_m) · g に置き換えることが出来る。ここで、ρ_mは軟弱粘土の密度である。

つぎに張力係数n₁, n₂について考察する。最終的にジオネットが支持地盤まで潜り込み置換土が安定した状態ではS = n₁ · c_s · L = 0となり、張力係数はn₂のみになる。

図-13は同一粘土地盤でボーリング調査によって確認された形状でありy/hを縦軸にとり整理したものが図-14である。式(11)を用いて計算した結果と比較することによりn₂ = 0.2が得られる。

張力係数n₁は式(7)よりcosθ_cであり、θ_cは式(10)にx = aを代入して得られる。すなわち

$$\theta_c = \tan^{-1} \left\{ \frac{k \cdot h}{e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a}} (e^{k \cdot a} - e^{-k \cdot a}) \right\}$$

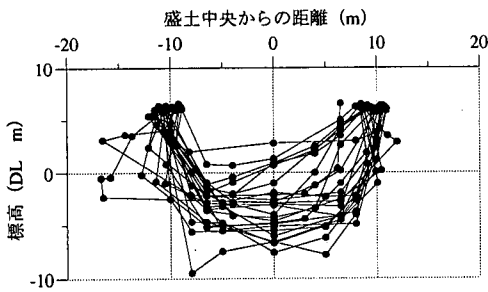


図-13 同一粘土でのジオネット形状調査結果

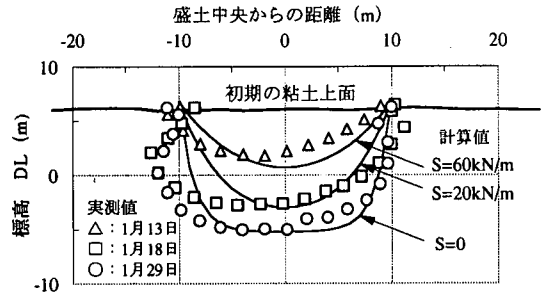


図-15 ジオネット形状の計算値と実測値の比較

表-2 計算条件

No.16観測日	形状			張力			
	1/13	1/18	1/29	1/29			
S (kN/m)	60	20	0	0			
c (kPa)	2			1	2	3	4
a (m)	10			10			
h (m)	12			12			
ρ_m (t/m ³)	1.6			1.6			
ρ_t (t/m ³)	1.5			1.5			
n_1	0.44	0.24	0	0			
n_2	0.2			0.2			

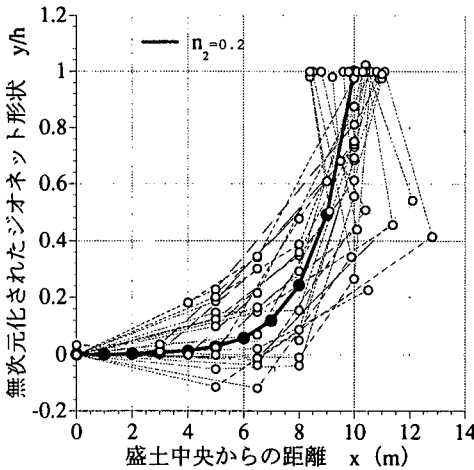


図-14 張力係数 n_2 の決定

であり、ここに

$$k = \frac{(\rho_t - \rho_m) \cdot g}{\cos \theta_c \cdot c_s \cdot L + n_2 \cdot c \cdot a}$$

である。左辺と右辺に θ_c が含まれているので、 θ_c をトライアル計算で求め、 $n_1 = \cos \theta_c$ より n_1 を求めることが出来る。

図-15 は、式 (11) を用いて計算した結果と、実測値を比較した一例である。計算条件を表-2 に示す。ジオネットの形状は、実測値が計算値に比べ少し左側に膨らんだ形状を示すが、全般的には計算値と実測値は比較的良好一致を示す。

(2) ジオネット張力分布の比較

式 (9) に表-2 で示される計算条件を代入して得られた張力分布と、最終形状と考えられる 2DDM 測定値 (1月29日) の伸び率に引張剛性を掛けて張力に換算した値とを比較したものが図-16 である。

粘土とジオネット間に働くせん断抵抗力を図-4 に示す一軸圧縮試験から求めた粘土の非排水せん断強さに等しいと置くと、ジオネット中央部の張力は埋立粘土の非排水せん断強さ 2kPa を用いて 20kN/m と計算できる。これは実測値 38kN/m のほぼ 2 倍の値を示している。その理由は、最終形状においてジオネットの下端部が在来の沖積粘土中に入っているため、ネット張力が乱された沖積粘土の非排水せん断強さ 4kPa に大きく影響されていると考え、実測値と計算値はほぼ一致する。

また、ジオネットに発生する張力の分布形状は、実測値および計算値ともにジオネット中央を頂点とした三角形形状となっている。

このように、軟弱粘土地盤の非排水せん断強さに対してジオネット張力は敏感であるため、今後の調査においては、深度方向の連続的な地盤の非排水せん断強さ分布を求める必要があると考える。

7. 設計と施工管理への提案

(1) 設計への提案

ジオネット置換工法の設計を前提に検討しなければ

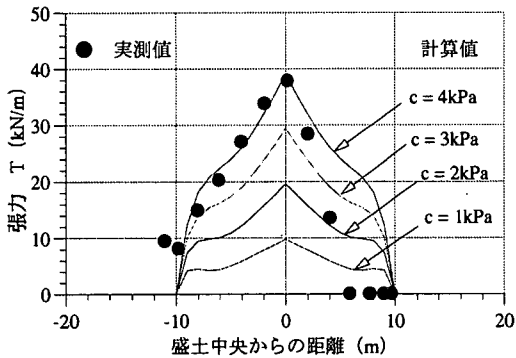


図-16 ジオネット張力の計算値と実測値の比較

ばならない項目は、ジオネットの形状を推定、ジオネットに包まれた土量を算出およびジオネット上に発生する最大張力とその発生位置の推定である。

地表面を x 軸にとるとジオネットの形状は式 (11) により求められることは 6 章で述べた。そこで置換砂の縦断方向の長さを b とすると、ジオネット置換砂量は、式 (11) を $-a$ から $+a$ まで積分することにより次式で求められる。

$$V = 2 \cdot b \cdot \left\{ h \cdot a - \frac{h}{k \cdot (e^{k \cdot a} + e^{-k \cdot a})} (e^{k \cdot a} - e^{-k \cdot a}) \right\} \quad (12)$$

つぎに、ジオネットに発生する最大張力について考察する。

式 (9) を変形すると

$$T = c_s \cdot L \cdot \frac{\cos \theta_c}{\cos \theta} + c \cdot a \cdot \frac{\left(1 - \frac{x}{a}\right)}{\cos \theta} \quad (13)$$

となる。そこで図-3 を考慮すると、 $0 \leq x \leq a$ において、

$$\cos \theta_c \leq \frac{\cos \theta_c}{\cos \theta} \leq 1, \quad 0 \leq \frac{\left(1 - \frac{x}{a}\right)}{\cos \theta} \leq 1$$

である。

したがって、施工中における張力は式 (13) の第 1 項の最大値である $c_s \cdot L$ と第 2 項の最大値である $c \cdot a$ の和を越えないと判断でき、式 (14) が得られる。

$$T \leq c_s \cdot L + c \cdot a \quad (14)$$

さらに、盛土両端で地表部に露出されているジオネットと粘土間に発揮されるせん断抵抗力 c_s を c に等しいと仮定すると、式 (14) は簡単に次式のようになる。

$$T \leq c \cdot (L + a)$$

これより、ジオネットに発生する最大張力は、初期のジオネット敷設幅とジオネットと軟弱粘土地盤との間に発生するせん断抵抗力の積に相当する張力を越えないと考えられる。

また、最終状態として置換砂が軟弱粘土下部の支持地盤において安定状態にある場合には、ジオネットの最大張力発生位置は 4 章での考察の結果、 $x = 0$ の地点すなわちジオネットの中央最深部であり、その大きさは式 (9) に $x = 0$ 、 $\theta = 0$ を代入することにより次式で表すことが出来る。

$$T_{\max} = c \cdot a \quad (15)$$

ここにジオネットと粘土間に働くせん断抵抗力 c は、ベーン試験および一軸圧縮試験から得られる非排水せん断強さに等しいと考える。

(2) 施工管理への提案

施工管理とは、設計仕様を満足できるように現場において管理することである。しかしながら、現場では予期せぬことも発生することがあり、管理項目は出来るかぎり少なくかつ管理しやすい項目が必要である。ジオネット置換工法において最も重要な管理項目は、その形状管理であると言える。もちろんジオネットの張力分布の管理も必要であるが、この測定は難しく現場的でない。また、形状をコントロール出来れば置換砂の安定も容易に検討できる。

図-8 の計測結果を参照すると、左右対象に置換砂がもぐり込んでいるとは言えない。いくつかの現場において、施工後におけるジオネットの地上での引き込まれ状態と置換砂下部のジオネットの深度確認ボーリング結果を対比すると、置換砂のもぐり込み深さが左右対象の場合は、ジオネットはほぼ均等に地盤中へ引き込まれているが、どちらか片方のジオネットが大きく地盤中へ引き込まれる場合には、もぐり込み深さは、引き込まれ量の少ない方に片寄った形状となっている。この場合、引き込まれ量の少ない方の地上のジオネット長は、引き込まれ量の多い方の地上のジオネット長より長い。これは左右の張力のバランスが崩れたことが原因の一つであると考えられる。

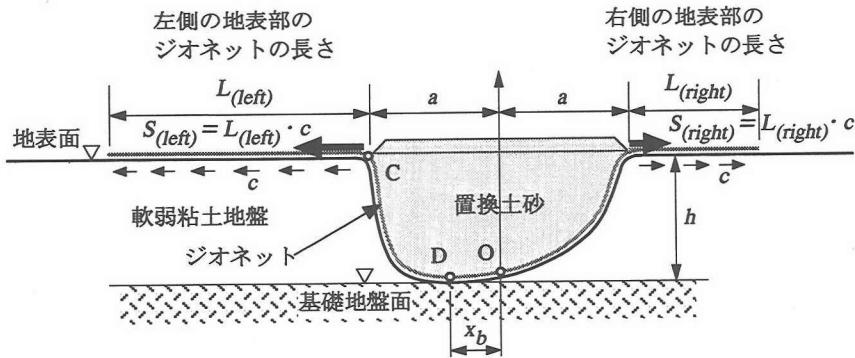


図-17 ジオネット張力と片寄り

そこでジオネット張力を表す式 (13) の L の値を左右変えて検討する。

図-17 は置換砂が左方向に片寄った場合を想定した模式図である。そこで点 O からの張力の釣り合い中心位置点 D の偏心量 x_b について考察する。

図-17 より点 D の左右に働くジオネットの張力は次の2つの式で与えられる。

$$T_{(left)} = \frac{c_s \cdot L_{(left)} \cdot \cos \theta_{C(left)} + c \cdot (a + x_b)}{\cos \theta_{(left)}}$$

$$T_{(right)} = \frac{c_s \cdot L_{(right)} \cdot \cos \theta_{C(right)} + c \cdot (a - x_b)}{\cos \theta_{(right)}}$$

上の2つの式が釣り合う場合、 $T_{(left)} = T_{(right)}$ において $\theta_{(left)} = \theta_{(right)} = 0$ であるため

$$c_s \cdot L_{(left)} \cdot \cos \theta_{C(left)} + c \cdot (a + x_b) = c_s \cdot L_{(right)} \cdot \cos \theta_{C(right)} + c \cdot (a - x_b)$$

$$2 \cdot c \cdot x_b = c_s \cdot L_{(right)} \cdot \cos \theta_{C(right)} - c_s \cdot L_{(left)} \cdot \cos \theta_{C(left)}$$

$$x_b = \frac{c_s \cdot L_{(right)} \cdot \cos \theta_{C(right)} - c_s \cdot L_{(left)} \cdot \cos \theta_{C(left)}}{2 \cdot c}$$

ここで、 $c_s = c$ とすると

$$x_b = \frac{1}{2} (L_{(right)} \cdot \cos \theta_{C(right)} - L_{(left)} \cdot \cos \theta_{C(left)})$$

もし仮に $L_{(left)}$ が $L_{(right)}$ に比べて十分に大きいと、 x_b は負になり釣り合い点 D は点 O より左にずれる。ゆえに、ジオネット形状は左右張力が均等の場合と比

べれば張力の大きい左側に片寄ることがわかる。

以上の考察より、地表部でのジオネット左右の長さをコントロールすることによってジオネット置換砂を左右対称な形状に作成することが出来るものと判断される。

(3) 最適形状の作成方法

最適形状とはジオネット置換砂断面が矩形である状態を示すものとする。矩形断面は式 (11) において、 C 点でのジオネット張力 S が 0 で、軟弱粘土地盤の非排水せん断強さ c が 0 の場合に相当する。しかし、当初から S を 0 にすると、地盤の不均一性や地表面部の凹凸、軟弱粘土地盤の含水比のばらつきや非排水せん断強さの変化などにより、左右対称にもぐり込むとは言えない。したがって、施工の方法を次のように提案する。

①ジオネット上への土砂のまきだし時は出来るかぎり左右均等に張力をかけるよう、ジオネットの地表部長さを同じにする。

②ジオネットが支持地盤に達するまでは、左右のジオネットの長さは出来るかぎり同じになるように管理する。

③万一、どちらか片方が余計に引き込まれるような状況であれば、引き込まれた側は余り沈み込んでいないと考え、まきだしを重点的に行う。

④その際、ジオネットは引き込まれた側に継ぎ足し、反対側より長めにしておく。

⑤ジオネット中央部が支持地盤に達すれば、ジオネットの両端部の張力を出来るかぎり少なくするようにジオネット端部からロール上に中央部に向かって巻き上げ抵抗を少なくする。

⑥最後に置換砂が沈み込まなくなる状況を確認する。

以上のように、地上でのジオネットの観察を通して地下の状況を判断し管理できると考えられる。

また、このような施工管理上の情報は記録しておくことにより、その後の盛土やプレロード時のジオネット置換砂の安定検討にも、十分反映させることも可能になる。

8. 結論

ジオネットを用いた置換工法の補強メカニズムについて、地盤中のジオネットの釣り合い条件から変形を規定する式を誘導し、ジオネットの変形形状および張力分布を表す式を提案した。それによると、ジオネットは簡単な同次二階線形常微分方程式で示され、その近似解としてジオネットの変形曲線は指数関数により表現することが出来た。また、ジオネットの張力分布はジオネット中央を頂点としたほぼ二等辺三角形分布を示すことがわかった。

さらに、現場においてこれらの式の有効性を確認した結果、置換砂の断面形状は、置換砂の投入量が少ない初期の状態においてはハンモック形状となり、置換砂の投入量が多くなるにつれて粘土層に塑性流動が発生し、沈下とともにU字溝形状となることを確認した。ジオネットに作用する張力はジオネット中央で最大となり、ハンモック形状となる初期段階においてその絶対値は大きく、もぐり込みが深くなり断面形状がU字溝形状になるにつれて、徐々に小さくなる傾向にあることを確認した。また、ジオネット変形形状および張力分布の提案式は、実測結果ともよく一致し、提案式の妥当性を検証できた。

最後に、設計に際し必要とされる置換砂の形状・置換砂量・最大張力を示す式を提案し、ジオネット置換砂の安定形状作成には、地表部でのジオネット

張力の管理が重要であることを示した。このように、適切な施工管理を行えば理想的な置換土形状を形成できる可能性があることがわかった。

謝辞：本論文をまとめるに当たり有益なご助言をいただいた赤井浩一京都大学名誉教授（大阪土質試験所理事長）、諏訪靖二氏（大阪土質試験所）、大嶺聖博士（九州大学）ならびに、現場における実験に多大なご協力をいただいた逸見廣治氏、原竹信昭氏（福岡市港湾局）、朝隈真氏（ニチポー）他、関係各位に対し深く感謝いたします。

参考文献

- 1) Yasuhara, K. and Tsukamoto, Y.: A Rapid Banking Method Using the Resinous Mesh on a Soft Reclaimed Land, Proceedings of Second International Conference on Geotextiles, pp.635-640, 1982.
- 2) 松井 保：超軟弱地盤の流動・変形機構，超軟弱地盤に関するシンポジウム発表論文集，pp.25-34, 1976.
- 3) 清水昭男：トリカルネット工法の基本原理と実施例，地盤の表層安定処理工法，総合土木研究所，pp.51-63, 1978.
- 4) 山内豊聰，後藤恵之輔：敷網工の実用支持力公式の一提案，九州大学工学集報，vol.52, No.3, pp.201-207, 1979.
- 5) 落合英俊，林 重徳，渡 義治：ジオテキスタイルを用いた補強土工法（10.軟弱地盤における補強土壁工法），土と基礎，第42巻，第1号，pp.65-72, 1994.
- 6) Imanishi, H., Ochiai, H., Haratake, N. and Asakuma, M.: Behavior of sand replacement with geo-net on reclaimed marine clay, Proceedings of the International Symposium on Earth Reinforcement, pp.597-602, 1996.
- 7) 今西 肇，落合英俊：ジオネット補強置換工法の理論と実際，第12回ジオシンセティックスシンポジウム論文集，pp.123-131, 1997.

(1998.1.14 受付)

ESTIMATION OF REINFORCE EFFECT IN GEONET REPLACEMENT METHOD AND ITS DESIGN AND FIELD MANAGEMENT

Hajime IMANISHI, Hidetoshi OCHIAI and Noriyuki YASUFUKU

The ground replacement method reinforced by geonet is used for improving the trafficability on soft clay in the temporary road construction. However, the replacement technique is based on the field experiences so that the theoretical consideration has been required to adopt the geonet. In this study, we have considered the mechanical behavior of the geonet based on a cable theory and derived to the differential equation from the equilibrium condition of geonet on soft ground. Finally we have considered its design and field management, and also proposed how to make a stable figure of replaced sand.