

鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内実験(IV)

——補強材引張力と補強効果の関係——

Laboratory Study on Reinforcing of Sand Slope with Steel Bars

——Relationship between Reinforcement Tensile Force and Reinforcing Effects——

龍岡 文夫*・浜田 英治**

Fumio TATSUOKA and Eiji HAMADA

1. はじめに

模型砂斜面内に配置した引張補強材に発生する引張力と補強効果に強い相関性があることを前報告¹³⁾で示唆した。今回はこのことについてやや詳しく論ずる。

2. 補強材引張力と補強材本数(密度)の関係

図-34 は点 T.2, B.2 における曲率と引張力を異なった補強材本数 n に対して比較したものである(ただし, $n=39$ のときの曲率の測定に失敗した)。明らかに n が増加すると曲率は下がっている。後に示すように補強材

の角度を変化させた実験から、補強材曲率と補強効果の間には相関がなく、この場合でも補強材引張力と補強効果に相関があることが分かっている。そこで、以下、補強材引張力と補強効果の関係について検討する。

図-35 は斜面崩壊時(フーチング荷重が最大になったときの)補強材内の引張力の分布である。これから次の2つのことが分かる。

(1) 最大引張力は $n=19$ 本のときは斜面から 15 cm あたりの T.2 の位置に生じているが、 n がより大き

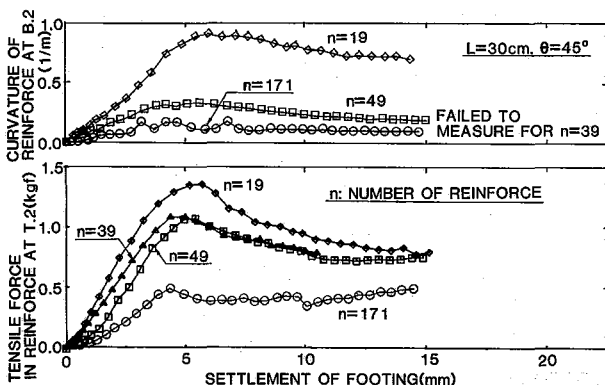


図34 点 T.2 (B.2) における曲率、引張力と補強材本数の関係

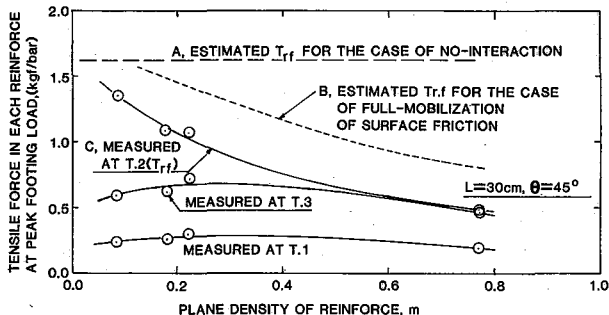


図36 フーチング荷重が最大になったときの 1 本あたりの補強材引張力の補強材平面密度による変化

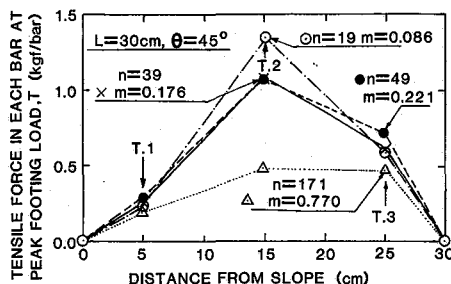


図35 フーチング荷重が最大になったときの 1 本あたりの補強材引張力 T の分布の本数による変化

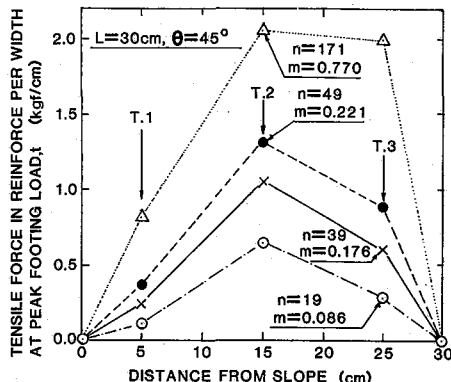


図37 フーチング荷重が最大になったときの 斜面単位幅 (1 cm) あたりの補強材引張力 t の分布の本数による変化

* 東京大学生産技術研究所 第 5 部

** 大洋技術開発株式会社

くるとより深い所(T.2とT.3の間)に生じているようである。すなわち、 n の増加により生じようとしているすべり面は基本的には無補強のときの位置にあるのだろうが、多少はより深くならうとしている。これは、補強効果が生じていることの反映である。しかし、 $n=19$ 本($m=0.086$)程度では、補強されていない斜面で生じるすべり面の位置で最大引張力が生じていると考えてよさそうである。このことは、設計計算で設定する必要のある鉄筋引張力の分布についての重要な知見である。

(2) n が大きくなっても鉄筋の端部近くではあまり引張力は変わらないが、中央部では n が大きくなると引張力は小さくなっている。このことを分かりやすく示したのが図-36である。ここで、 $m=ds/(d+ds)=n \cdot ds/40$ である。ただし、 ds は補強材直径(0.18 cm)、 d は補強材間隔、 n は補強材本数、40は砂箱の幅(cm)である。これから、 n が大きくなるほど、鉄筋の引張力(すなわち、鉄筋表面の摩擦係数)が十分に発揮されないまま斜面が崩壊していることが分かる。このことは、 n 本の鉄筋補強材を用いたときの1本あたりの引張力を「1本しか補強材が存在していないときのその補強材に発生する引張力」と等しいと仮定すると過大評価することを意味している。

上記(2)の理由としては次の2つが考えられる。

(a) 補強材1本が変形を拘束している領域は、本数 n が増加するほど重なり合ってきて、この拘束領域の干渉が生じてくる。⁹⁾いま、図-36のAの線はこの干渉がまったくないときの点T.2における最大引張力をあらわしているとする。ある $n(m)$ 以上になると上記の干渉のため鉄筋引張力はBの線であらわすように減じてくるであろう。

(b) n が大きくなるほど、上記の干渉がある状態における補強材に発生する引張力の最大値(図-36のBの曲線)が発揮される前に斜面自体があるメカニズムで崩壊してしまう可能性が高くなる。したがって、T.2で測定された引張力を最大引張力 T_{rf} とすれば、図-36のCの曲線であらわすような最大引張力のときに斜面は崩壊したことになる。すなわち、いま、無補強斜面に生じたせん断層をS0とする。また、補強材が1本だけのときの補強材表面で発揮されている摩擦係数の平均値を μ_1 とする。この μ_1 は最大にありうる砂の粒子と補強材表面の間の摩擦係数 μ^* よりは小さいであろう。補強材が増加してゆくと、せん断層が仮に変化しないとしても上記(a)の理由で μ は n の増加とともに減少してゆくであろう。これを μ_2 であらわす。一般に、補強効果があるほど、生じるせん断層はS0とは異なってくる。すなわち、補強されたせん断層S0よりも相対的に弱いせん断層SRにせ

ん断変形が集中することにより斜面の崩壊が生ずる。このとき補強材はせん断層SRに対して最も有効であるように配置されているわけではないから、そのときの $\mu=\mu_3$ は μ_2 よりも小さくなりうる。これが上記の(b)の理由である。 μ_3 に対応して生じた補強材引張力が測定される引張力である。

補強材1本あたりの引張力 T よりも、斜面単位幅当たりの補強材引張力 t のほうが斜面の補強効果と関連していると思われる。この場合、砂箱の幅は40 cmであるから、単位幅当たりの引張力 t を

$$t = T \cdot n / 40 \quad (\text{kgf/cm})$$

として求めた。図-37は t の分布が n の変化によりどう変化するかを示したものである。 n が大きくなると t は大きくなっているが、その分布形は異なってくる。図-38はT.2における $t=t_{rf}$ の m による変化を示したものである。 t_{rf} は m (あるいは n)の変化に対して線型に変化していないことが分かる。図中のA'、B'、C'の線は図-36のA、B、Cの線に対応したものである。すなわち、補強材により拘束されている領域の相互干渉がないとしたときの推定した関係がA'、相互干渉があってもその補強材引張力が最大限発揮されているときの推定した関係がB'、T.2で測定した補強材引張力を補強材最大引張力

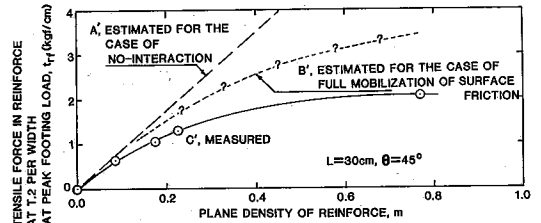


図38 フーチング荷重が最大になったときの斜面単位幅(1 cm)あたりの補強材引張力の補強材平面密度による変化

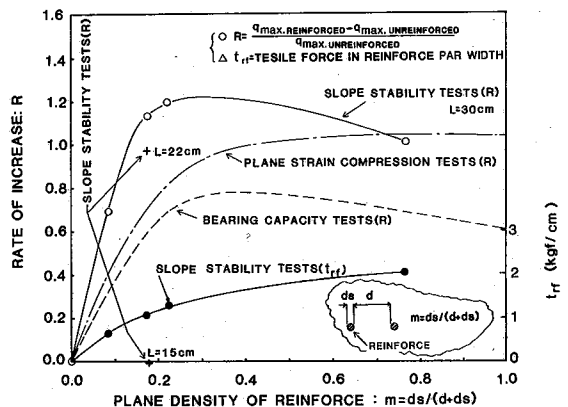


図39 ピーク荷重状態における強度増加率R、補強材最大引張力 t_{rf} と補強材平面密度 m の関係

研 究 速 報

としたときの関係が C' である。この t_{rf} の値と補強効果が強い相関を持っているものと考えられる。

補強材の本数を変えた実験の結果をフーチング荷重が最大になった状態に対してまとめたのが図-39で、 m が補強材の平面配置密度 (図中に説明)、 R が強度の増加率、 t_{rf} が補強材の単位幅あたりの最大張力 (kgf/cm, T.2 で測定) を示す。さらに図中には、補強材の長さを変えた場合の斜面の安定実験結果および砂中に無補強の場合での ϵ_3 の方向に鉄筋を配置した水平地盤の支持力実験および平面ひずみ圧縮試験結果 (図-23¹³⁾) の強度増加率も示している。図-40 は、残留強度状態 (フーチング変位量 = 7.5 mm) に対する図-39 と同様な整理をした結果である。図-39 と 40 から、補強材の配置密度が増すと強度増加率 R は急激に m に比例して増加するが、ある配置密度で R は最大値に達し、 m がそれ以上大きくなると逆にやや低下していく傾向をもつことが分かる。支持力実験も平面ひずみ試験もほぼ同じ傾向を示すが、特に支持力実験の傾向と非常に良く類似している。このことから、鉄筋による斜面と水平地盤の補強効果は同じメカニズムによるものであることが推定される。 t_{rf} と補強効果は非常に密接に関連しており、実際の設計計算では t_{rf} の値を正確に予測することは非常に重要である。

図-40 を見ると、フーチング沈下量 $S=7.5$ mm のときのほうがピーク荷重状態より強度増加率がやや大きいことが分かる。このことは、引張補強材で補強された斜面の残留強度は十分大きいことを示している。これは補強材が破断しなければ、流動的破壊が生じにくいことを意味している。一般に、ピーク荷重のみならず残留強度も大きいことが構造物の安定性の一つの要因である。この見地から言えば、本実験における補強斜面の安定性は十分大きいといえよう。

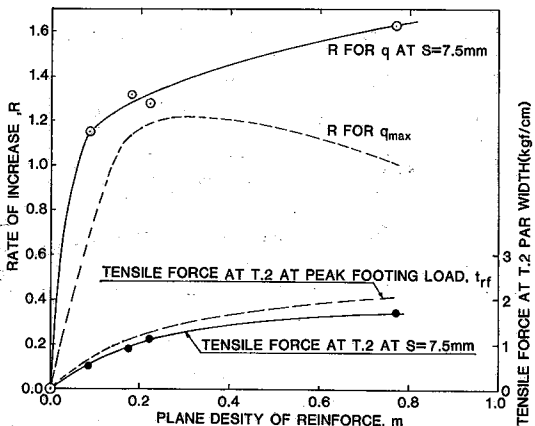


図40 ピーク荷重時とフーチング変位量 $S=7.5$ mm のときの R , t_{rf} と m の関係の比較

次に T.2 で測定された引張力の値 T_r と補強材 1 本あたりの補強効果 (強度増加率) R/n の関係を見てみよう (図-41)。図中には、フーチング沈下量 $S=1.5$ mm, $S=2.5$ mm, $S=3.5$ mm (無補強斜面でフーチング荷重が最大値になったとき)、 $S=4.9$ mm (補強斜面でフーチング荷重がほぼ最大値になったとき) における補強材 1 本あたりのフーチング応力増加率 R/n とそのときの引張力 T_r の関係を示す。フーチング荷重が最大値になったときの T_r が T_{rf} である。図-41 で①~④に対しては、 R は同一のフーチング変位量 S に対する無補強および、補強斜面に対してのフーチング荷重から求めている。一方、無補強斜面と補強斜面でフーチング荷重は異なった S で最大値となっていることに注意する必要がある。したがって、⑤に対しては R は図中に示す方法で求め、 T_r には補強斜面でフーチング荷重が最大になったときの値、 T_{rf} を用いている。図を見ると、全体として補強材 1 本あたりのフーチング荷重増加率 R/n と補強材 1 本あたりの張力 T_r (あるいは T_{rf}) はほぼ線型関係にあることが分かる。すなわち、この図からも、補強材引張力と補強効果の間には密接な相関があることが分かる。しかし、よく図-41 を見ると、 n が大きいほど曲線の勾配が小さくなることが分かる。そこで、図-41 に示す⑤の曲線の割線勾配 $A=R/n/T_{rf}=R/(n \cdot T_r)$ もしくは $R/(n \cdot T_{rf})$ と補強材平面密度 m の関係を求めてみた (図-42)。 A は補強材最大引張力の単位量 (1 kgf) に対するフーチング荷重増加率をあらわしている。図-42 に示す結果は A は m の増加と伴に徐々に減少することをあらわしている。図中には測定された補強材引張力を用いて行った極限つり合い法による安定解析 (後に詳述する) で求めた A の値も示す。測定された A が何故 m の増加により減少するのか、明確なことは分からない。

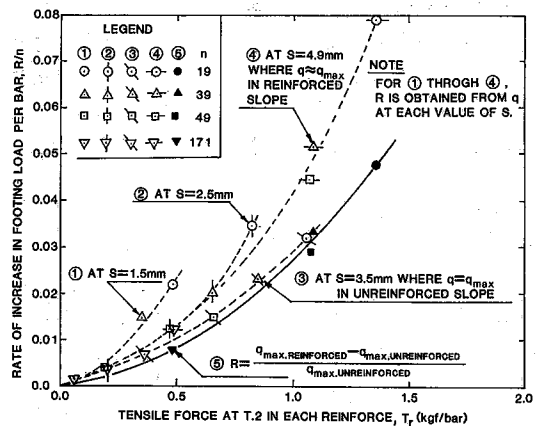


図41 補強材引張力 T_r (T.2 における値) と補強材 1 本あたりの強度増加率 R/n の関係

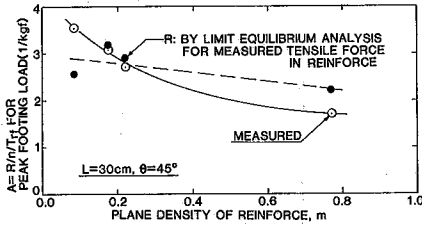


図42 補強材最大引張力の単位量あたりの強度増加率 $A = R / (n \cdot T_r)$ と補強材平面密度 m の関係

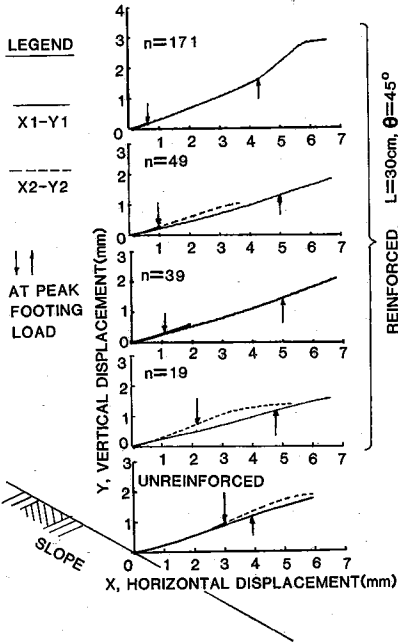


図43 斜面表面の変位ベクトル

3. 斜面表面変位の考察

補強材を用いることにより斜面の表面変位がどのように変わってくるか、若干考察しておく。図-43は、図-44中の説明図に示すような2点での測定された水平(X方向)と鉛直方向(Y方向)の変位を合成したベクトルを示す。これを見ると、変位ベクトルの方向は無補強斜面と補強斜面でそれほど相違はないが、フーチング荷重が最大値になるときの変位量は異なってくるのが分かる。このことを分かりやすくまとめたのが図-44, 45である。図-44はフーチング荷重が最大になったときの表面変位を示したものである。明らかに補強材上方での斜面表面変位 X1-Y1は無補強斜面よりも補強斜面のほうが大きくなっているが、補強材下方での斜面表面変位 X2-Y2は、補強斜面で n が大きいほど小さい。図-45ではフーチング荷重が最大になるときのフーチング変位量 S が無補強斜面と補強斜面で異なっていることを考慮

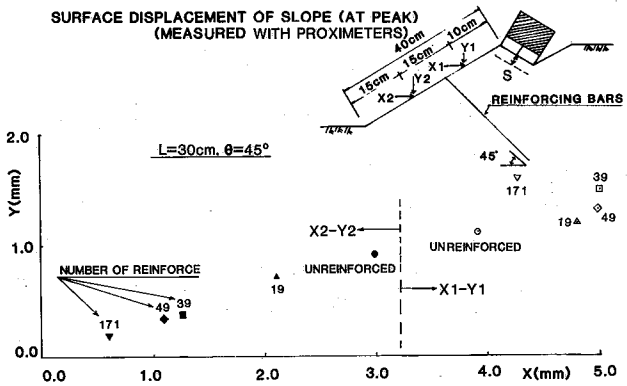


図44 フーチング荷重が最大になったときの斜面表面の変位量

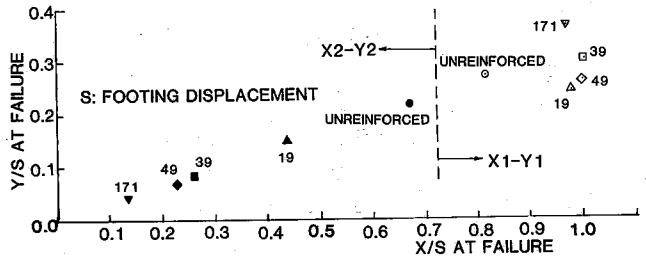


図45 図-44に示す変位量をフーチング変位量 S で除して正規化した図

し、図-44に示す斜面表面変位量を S で除して正規化してある。図-44, 45を見ると、補強効果があるほど、補強材下方の斜面の変位は小さくなっているが、補強材上方では補強効果がある場合でも変位は小さくなっていないし、逆に少し大きくなっていることが分かる。このことは、この補強材配置方法によって斜面の崩壊パターンが変わることを示している。おそらく、この補強材上方の斜面変位を拘束するように補強材を追加して配置すれば、さらに斜面の強度は増すであろう。このことについては後に述べる。

4. まとめ

以上要するに、補強効果は補強材本数に比例するわけではないことがわかった。この現象は、ある本数より大きくなると、1本の補強材が補強している領域が重なり合ってくることで、また、その補強材が有効に作用し得ない他の補強メカニズムによる破壊が生じやすくなるためであると思われる。したがって、補強材に生ずる最大引張力と引張力の分布、あるいは発揮しうる表面摩擦係数の平均値、または分布の予測は、1本の補強材の引き抜き試験から予測できるような単純なものではないようである。

(1984年7月2日受理)

参考文献

13) 龍岡文夫・浜田英治 (1984). “鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内実験Ⅲ—補強材の本数の影響—”, 生産研究, 36巻, 12号 36~39頁.