

鉛直載荷重を受ける模型砂質土鉄筋補強斜面の 補強効果に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON THE REINFORCEMENT EFFECT
OF STEEL BARS IN THE SANDY SOIL SLOPE
MODEL FOR VERTICAL LOADS

北村 照喜*・長尾 哲**

By Teruki KITAMURA and Akira NAGAO

In order to study the effect of the steel bar reinforcement in a sandy slope, triaxial compression tests and vertical loading tests for the reinforcement slope model were carried out. In the triaxial compression test, the setting numbers and the friction condition of steel bars were varied. In the vertical loading test, the setting direction of reinforcement bars was only varied, and the surface deformation of the model slope and the stresses of the reinforcement bars were measured. Through the test, it is shown that the reinforcement becomes more effective when the reinforcement bars can confine the soil extrusion between the reinforcement bars.

Keywords : model test, reinforcement slope, steel bar, slope stability, triaxial compression test

1. はじめに

近年の土地利用の高度化に伴い、従来より広い範囲で土地利用がはかられ、土木施工がなされるようになってきている。その結果、従来の施工法に比べ、より簡便で、より廉価に施工を行う手法が広く検討されている。それらの中の1つに日本国内での施工実績が近年飛躍的に増加し、構造物掘削、土留め山留め工、のり面対策工に効果的に対処し得る工法と認められている鉄筋補強土工法がある。この工法は、何らかの方法で補強材を地山中に設置し、その補強を行うことにより、地山全体としての強度変形特性を改良しようとするものである。

ところで、このように剛性等の性質の異なる材料を他の材料中に設置することにより材料全体としての性質を改良しようとする試みは実際には古くから行われていた。しかし鉄筋を地山中に設置する鉄筋補強土工法についての土塊補強のメカニズムは、三軸圧縮試験、直接せん断試験によりある程度検討されているものの^{1)~3)}、室内における模型載荷試験、現地載荷試験となると数える

ほどしか実施されていないのが現状である^{4)~7)}。したがって補強材ののり面処理効果、補強材のグラウト効果、補強材の設置密度・設置長・設置角度の相違による補強効果の違いに関する考察も十分に行われているとはいがたい。

そこで著者らは、滋賀県甲賀郡のシルト混り砂を使用し、補強材を設置した高さ 200 mm、直径 100 mm の供試体を作成し三軸圧縮試験を実施するとともに、同一の試料で高さ 750 mm、幅 1200 mm、奥行 900 mm の供試体と同様の含水比・密度の試験体を作成し、それに対する鉛直載荷試験を実施した。

本論文は、三軸圧縮試験結果から得られた補強土塊の強度変形特性をもととして、模型砂質土鉄筋補強斜面に対する鉛直荷重載荷時の斜面の変形・破壊特性、さらに載荷時に補強材に発生する軸応力と摩擦応力などの計測を行い、補強材の補強効果についての検討を行ったものである。

2. 三軸圧縮試験による補強供試体の 強度変形特性

補強材により地盤を補強する場合、補強材にどのような力がどのように発生するかを考える必要があることはいうまでもない。そこで、ここでは供試体の内部に補強

* 日本道路公団理事

(〒100 千代田区霞ヶ関 3-3-2 新霞ヶ関ビルディング)

** 正会員 工博 日本道路公団東京第一建設局松田工事事務所

(〒258 神奈川県足柄上郡松田町惣領 1634)

鉄線 ($\phi=0.9 \text{ mm}$, $E=2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$) を設置して三軸圧縮試験を行った。鉄線の設置にあたり、鉄線をそのまままで設置したもの、鉄線に砂を接着材で付着させて設置したもの、鉄線の先端部に直径 10 mm の円形プレートを装着して設置したものの 3 タイプを用意した。三軸圧縮試験(圧密非排水試験)の軸荷重の載荷は、0.5%/min のひずみ制御で行った。

(1) 三軸圧縮試験供試体の作成

試験に使用した土の日本統一土質分類名は、シルト混り砂 (S-M) で、最大粒径は 29 mm、礫分の含有量は 24%、細粒分含有量は 13%、土粒子比重は $G_s=2.64$ 、自然含水比 $W_n=11\%$ 、供試体湿潤密度 $\rho_t=2.00 \text{ g/cm}^3$ 、間隙比 $e=0.47$ であり、無補強供試体の粘着力は $C=0.15 \text{ kgf/cm}^2$ 、内部摩擦力は $\phi=33^\circ$ であった。

図-1 に、供試体中の補強鉄線の配置を示す。頭部プレートのない場合

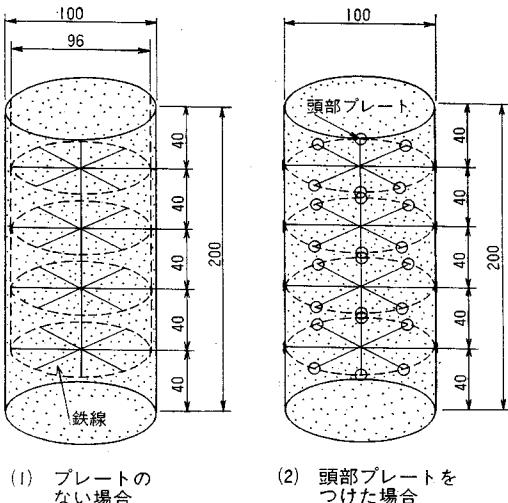


図-1 三軸圧縮試験用補強供試体 (4段配置の場合)

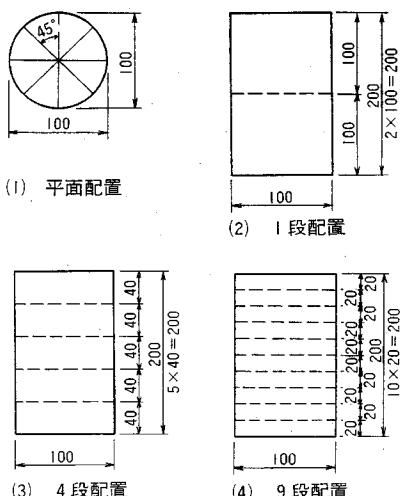


図-2 供試体中の補強鉄線の配置

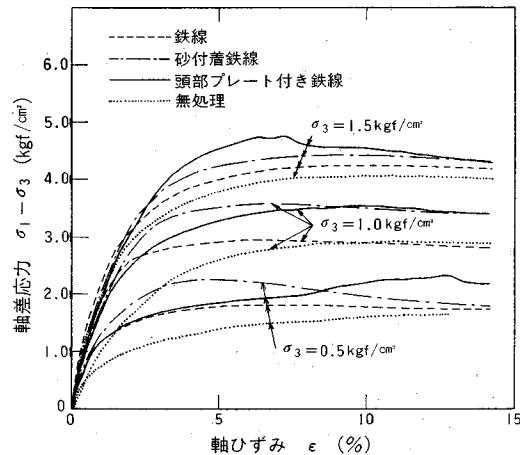


図-3 1段補強供試体の軸差応力と軸ひずみとの関係

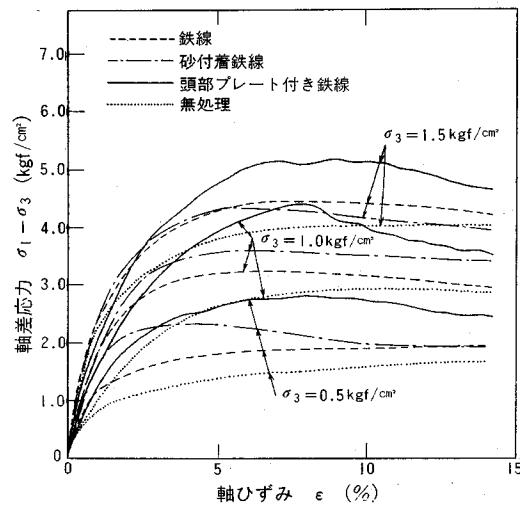


図-4 4段補強供試体の軸差応力と軸ひずみとの関係

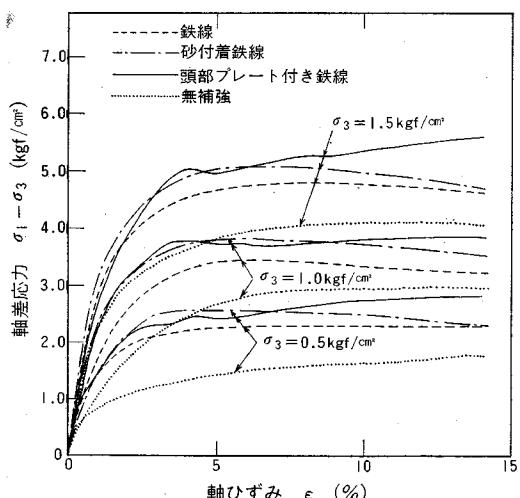


図-5 9段補強供試体の軸差応力と軸ひずみとの関係

レートがない場合には、鉄線によってメンブレンが破れないよう外縁径を 96 mm とした。頭部プレートは、市販の画鋸の頭部を用いたもので直径 10 mm である。

供試体の鉄線配置は 1 段・4 段・9 段にて行った(図-2)。鉄線は角度 90° に折り曲げ中心角 45° となるように、平面的に配置した。ゆえに、一平面内には、4 本の折り曲げ鉄線が配置されている。おのおのの折り曲げ鉄線は、中央部分でエポキシ系接着剤によって固着した。よって、実験供試体は、鉄線無補強のもの補強を加えて合計 10 種類である。

(2) 実験結果

図-3～図-5 はそれぞれの段数を補強した場合の軸差応力と軸ひずみとの関係を無補強の場合の結果と合わせて示したものである。

いずれのケースでも、補強供試体の軸差応力は無補強供試体のものよりも大きい。補強鉄線の種類による軸差応力の発生状況は、次に示す傾向にある。すなわち、軸ひずみ 2% 未満の低ひずみ状態においては、鉄線の種類による軸差応力の大きさに目立つほどの差は生じていない。鉄線の種類による軸差応力に相違が生ずるのは軸ひずみが 2% 以上からで、1 段補強と 4 段補強の場合には軸ひずみが 5% 程度になると軸差応力の発生の仕方は鉄線の種類により相当違った値を示している。一方無補強供試体では最大軸差応力発生時の軸ひずみは 5% 以上である。ゆえに、2% の軸ひずみは、供試体中のひずみレベルが破壊時の半分にも達していないことを示している。ひずみレベルが無補強土塊の破壊時の大さきの半分以上に達した後、鉄線の補強効果が明確になってくる。

図-6 は、軸ひずみ $\epsilon_a = 5\%$ の時の補強供試体の軸差応力を無補強供試体の軸差応力で除したものである。拘束圧

が 1.0 kgf/cm² と 1.5 kgf/cm² の場合、補強効果は補強段数とともに増加するが、補強効果に限界がみられる。しかしながら、拘束圧が小さい場合には、1 段補強と 4 段補強とで補強鉄線の種類による補強効果の程度が異なる。一般に、拘束圧の低下とともに、補強材から周辺の土に伝達される摩擦力が減少するので、補強材間の土粒子は変形しやすくなる。すなわち、土塊の変形の進行とともに土粒子は補強材の間からすり抜けようとする。1 段補強と 4 段補強において、頭部プレート付き鉄線と砂付着鉄線とで補強効果が逆転するのは、補強材の間からの土粒子のすり抜けやすさに差が生じたためと思われる。

斜面安定を目的とした鉄筋補強土工においては、補強鉄筋周辺の地中の拘束応力は 0.5 kgf/cm² 程度のことが多く、補強効果を高めるため表層土塊の拘束を増加させるような面工の重要性が理解される。

3. 補強斜面における鉛直載荷試験

三軸圧縮試験で得られた鉄線の補強効果が、いかに斜面で発揮されるかを調べる目的で模型斜面における鉛直載荷試験を行った。なお、補強材中に発生する応力を精确に測定するために、ここでは三軸圧縮試験における鉄線の代わりにアルミ板(幅 25 mm, 厚さ 2 mm, 長さ 450 mm, $E = 7.03 \times 10^5$) を用いた。

(1) 模型斜面の作製と載荷実験

図-7 は模型斜面、図-8 は載荷装置である。模型斜面は、長さ 2100 mm・幅 900 mm・高さ 750 mm の鉄製型枠内に三軸圧縮試験に使用したシルト混り砂を層厚 15 cm ごとに締固めて作製した。締固めの途中で、所定の位置に補強材を設置した。締固めの程度は、三軸圧縮試験供試体と同じである。締固め終了後、型枠を取りはずす。

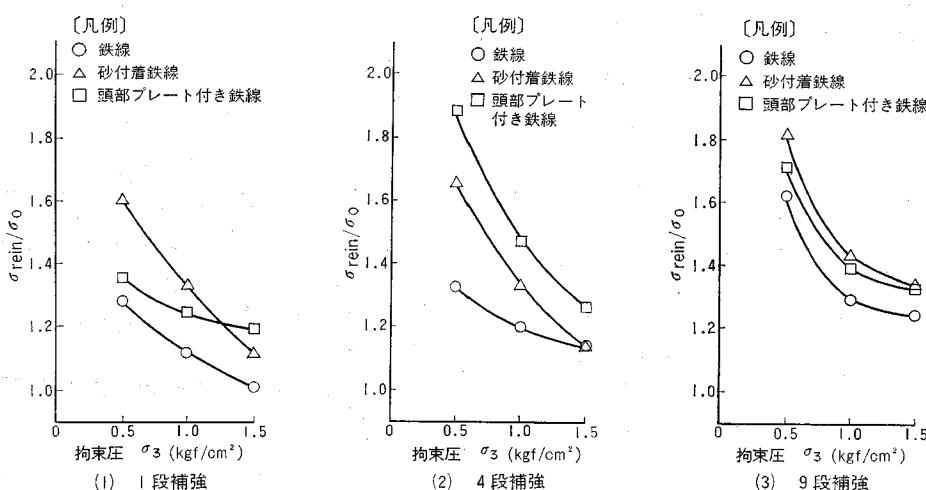


図-6 軸ひずみ $\epsilon_a = 5\%$ の時の補強効果について(ただし、 σ_{rein} ：補強供試体の軸差応力、 σ_0 ：無補強供試体の軸差応力)

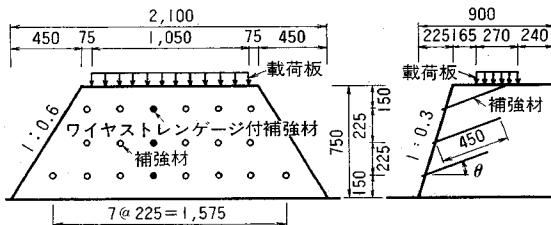


図-7 模型補強斜面の諸元(単位:mm)

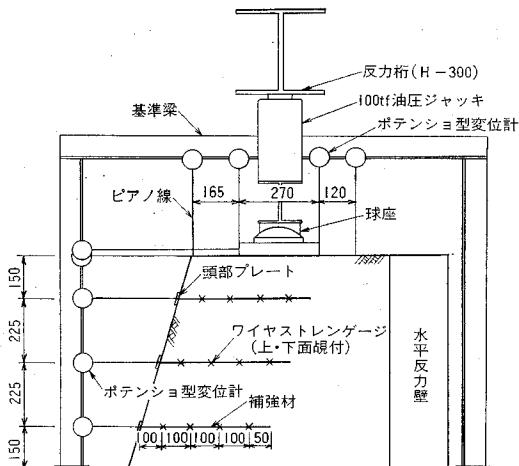


図-8 載荷装置と計測諸元(単位:mm)

ずし、図-7 の形状になるように整形した。

補強材の長さは 450 mm、配置間隔は 225 mm である。補強材は、斜面奥行き方向に上向きに設置した上向き補強、それと逆方向の下向き補強、および水平補強の 3 種類の配置とした。上向き補強と下向き補強の配置角度は、水平面に対して $\theta=20^\circ$ である。補強材の表面には、エポキシ系接着剤で試料土を付着させた。補強材の頭部には、アルミ製のプレート (40 mm × 40 mm) を取り付けて斜面表面の拘束を試みた。斜面中央部の補強材 3 本にはワイヤストレンゲージをはり付けて載荷中に補強材に発生するひずみを測定した。

模型斜面の高さは 750 mm、正面勾配は 1:0.3、側面勾配は 1:0.6 である。側面勾配を 1:0.6 としたのは、載荷による側方破壊を防止するためである。載荷板は鋼製で、幅 270 mm・長さ 1,050 mm である。

荷重は、油圧ジャッキにより 0.5 kgf/cm^2 のステップ載荷とした。1 ステップの載荷時間は基本的に 15 分間とし、載荷板の沈下が載荷ステップの沈下量の 0.5% / min 以下におさまるまでとした。降伏状態に近づいた場合には、載荷増分を 0.25 kgf/cm^2 とした。

載荷中の計測項目は、載荷重、載荷板と斜面表面の変位量、補強材の応力である。斜面表面変位は、ポテンショメータによって測定した。計測は、自動記録である。

(2) 斜面表面の変位とすべり面

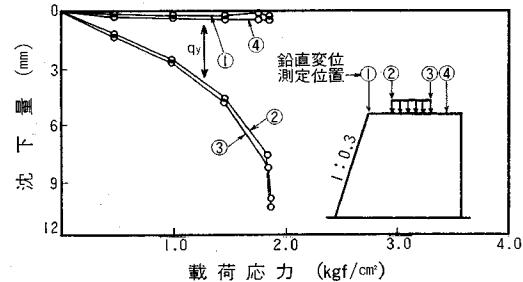


図-9 無補強斜面の載荷応力と鉛直変位との関係

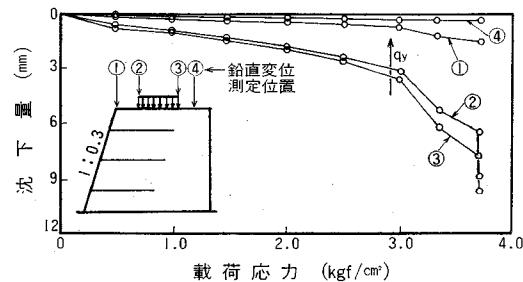


図-10 水平補強斜面の載荷応力と鉛直変位との関係

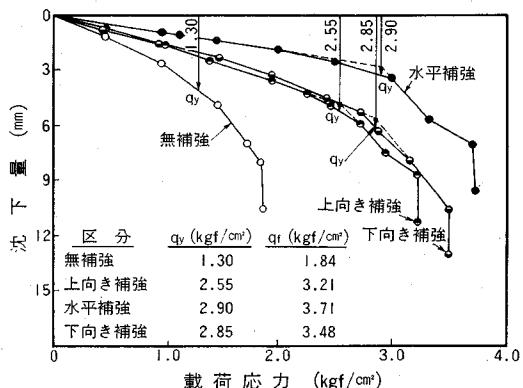


図-11 載荷応力と載荷板沈下量との関係

図-9 に無補強の場合、図-10 に水平補強の場合の載荷板設置面における鉛直変位と載荷応力の関係を示す。測点①と④の沈下量は小さく、載荷応力の増加とともに載荷板が押し込まれているのがわかる。また、載荷板の沈下は②と③とでほぼ等しい。そこで、鉛直沈下は②と③の平均値で表示することとした。

図-11 に、載荷板の沈下量と載荷応力の関係を示す。図中、 q_y は降伏載荷応力で第一次の沈下量変曲点に相当し、破線の交点として示した。 q_r は破壊載荷応力で、沈下量が急激に増加するときの応力に相当する。降伏載荷応力は、水平補強と下向き補強で約 2.9 kgf/cm^2 と無補強の場合の 2.2 倍に増加している。水平補強と下向き補強の補強効果の差は、降伏載荷応力発生時の沈下量の差に現われている。下向き補強のときの沈下量は、水平

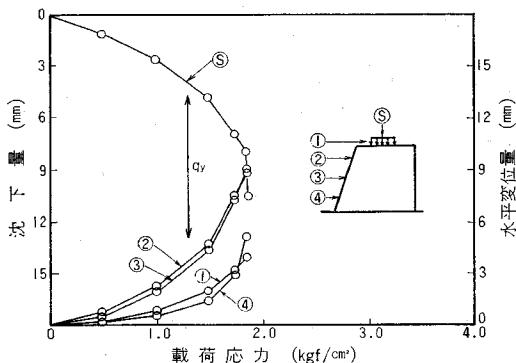


図-12 無補強斜面の載荷応力と表面変位との関係

補強時の約2倍である。

図-11にみられる補強効果の差は、斜面表層の水平変位にも影響を与えている。図-12は無補強、図-13は上向き補強、図-14は水平補強の斜面表面変位である。変位量は、水平補強・上向き補強・無補強の順に大きくなる。下向き補強の変位量は、図-11の曲線から推察されるように上向き補強と類似の傾向を示した。また、いずれの場合も(1)と(4)と比較して(2)と(3)の水平変位量が大きく、同時に、(2)と(3)の水平変位量がほぼ等しい事に気付く。このことは、土塊全体が測点(4)の上部から一様に押し出されていることを意味している。

以上のような斜面表面の変形は、すべり面の形状と密接に関係している。図-15は、載荷試験終了後、斜面土塊を除去しながらすべり面を直接観察した結果を示したものである。補強斜面のすべり面は、いずれの場合も無補強のものより斜面の奥へと後退している。後退の度合いは、水平補強が最も大きく、上向き補強と下向き補強とでは同程度である。特に、上向き補強の場合、最下段の補強材に沿う形ですべり面が発生しているのが特徴的である。

三軸圧縮試験の場合と同様に、小さい拘束応力の下では、補強材の間からの土のすり抜けを阻止するように補強材を配置することが重要となってくる。

(3) 補強材に発生する応力

斜面表面の変位とすべり面の観察から、補強土塊は中段と下段の補強材の間をすり抜ける形で押し出されていることがわかった。そこで、載荷応力の増加とともに補強材に発生する軸応力の変化を図-16～図-21に示した。中段補強材の軸応力は、上向き補強・下向き補強・水平補強の順に大きくなる。下段補強材の軸応力は、水平補強と下向き補強で同程度、上向き補強の場合には著しく小さい。また、軸応力は降伏載荷応力を越えたステップ載荷の段階から急増している。三軸圧縮試験時に鉄線の補強効果が目立って発揮されるのは、軸ひずみが2%以上であったこととあわせて考えれば、興味深い現象である。

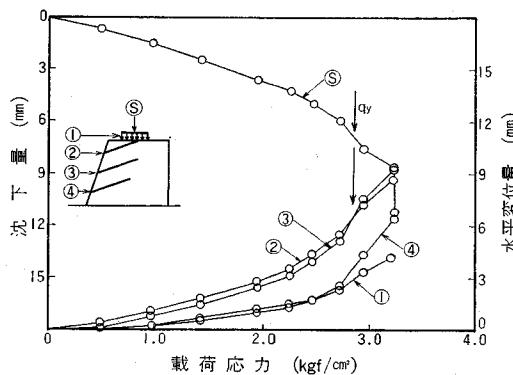


図-13 上向き補強斜面の載荷応力と表面変位との関係

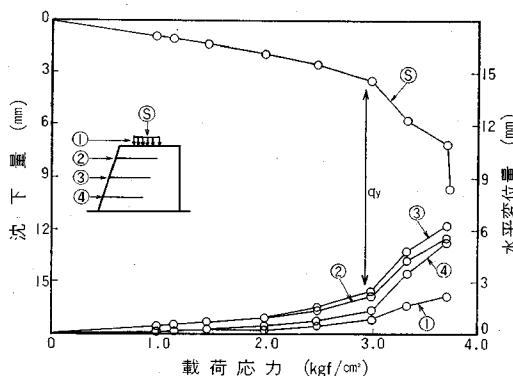


図-14 水平補強斜面の載荷応力と表面変位との関係

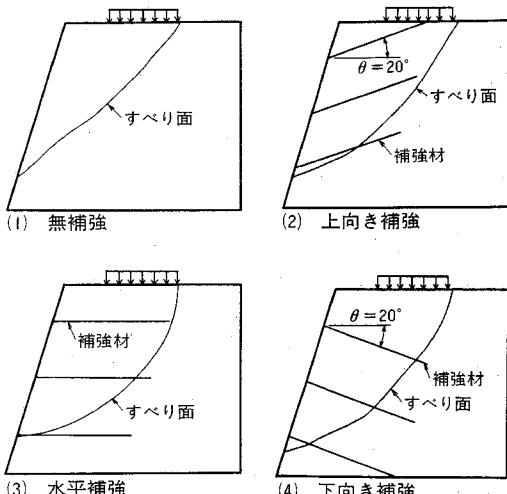


図-15 補強形態のすべり面の位置

図-22～図-24は、載荷応力段階ごとの軸応力を示したものである。白丸点線が降伏載荷応力以前、黒丸実線が降伏載荷応力付近、白丸破線が破壊載荷応力時の軸応力である。図中には、すべり面の位置も示した。無補

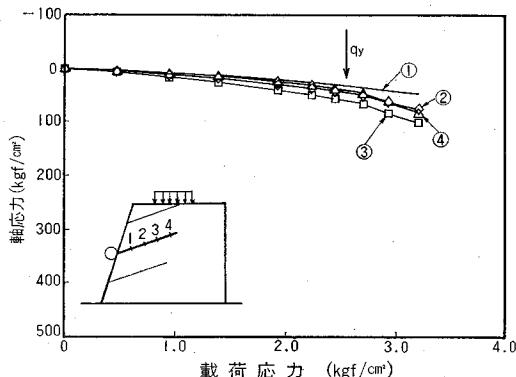


図-16 上向き補強材中段の載荷応力と軸応力との関係

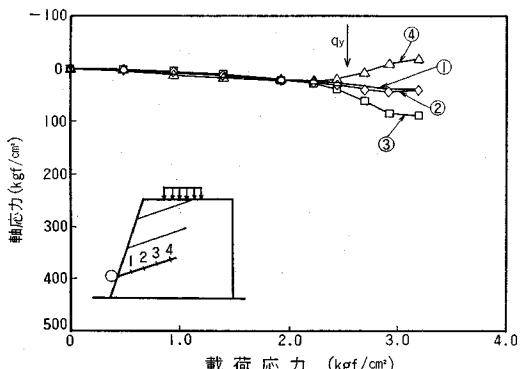


図-17 上向き補強材下段の載荷応力と軸応力との関係

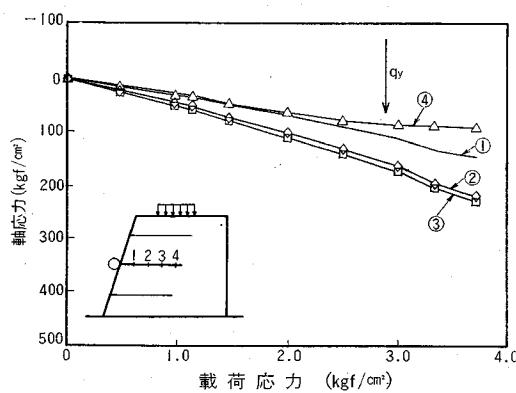


図-18 水平補強材中段の載荷応力と軸応力との関係

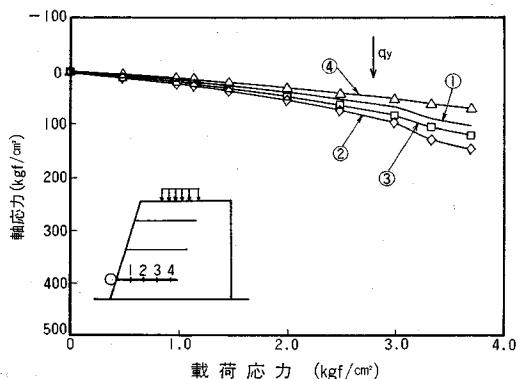


図-19 水平補強材下段の載荷応力と軸応力との関係

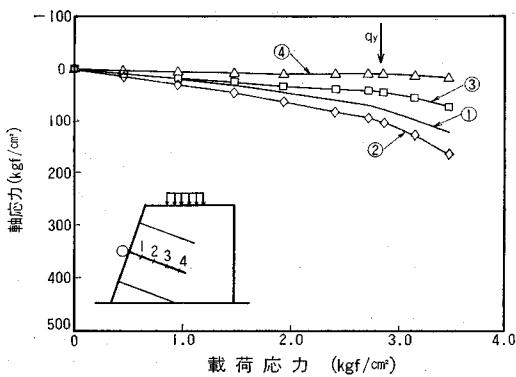


図-20 下向き補強材中段の載荷応力と軸応力との関係

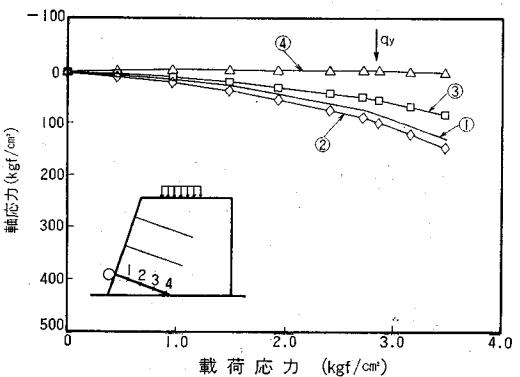


図-21 下向き補強材下段の載荷応力と軸応力との関係

強時と補強時のすべり面の位置と軸応力の関係に着目すれば、興味ある現象に気付く。一般的には、軸応力の最大値は、すべり面付近で発生する。いずれの補強ケースの場合でも、載荷応力が小さいときには中段補強材の最大軸応力発生地点は無補強時と同様すべり面が、中段補強材の軸応力の最大値付近を通過している。載荷応力の増加とともに軸応力は増加する。水平補強の場合、中段補強材測点3の軸応力の増加は、測点2のものより大きい。

い、同様に、下向き補強においても中段補強材の測点2の軸応力の増加は、他と比較して顕著である。軸応力の増分が著しい測点は、無補強時と補強時のすべり面の中間に位置している。このような現象は、載荷応力の増加に伴う斜面変形の増大が補強材の補強効果を発揮させる過程で、すべり面の位置が無補強時の位置から斜面の奥へ移行したためと推定される。

図-25～図-27は、補強材表面に発生した摩擦応力

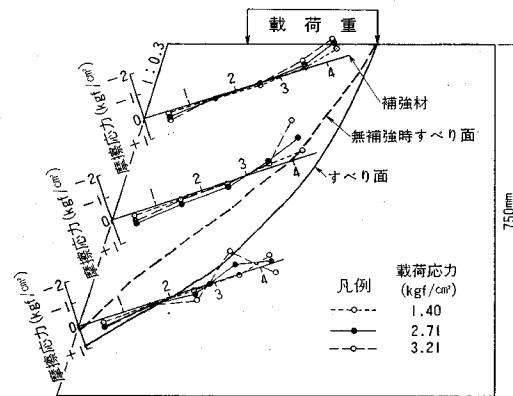
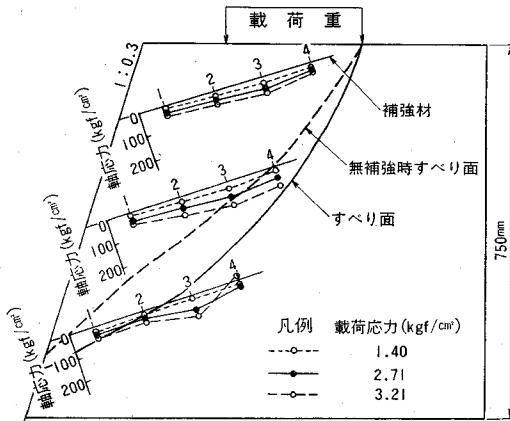


図-22 上向き補強時の軸応力とすべり面との関係

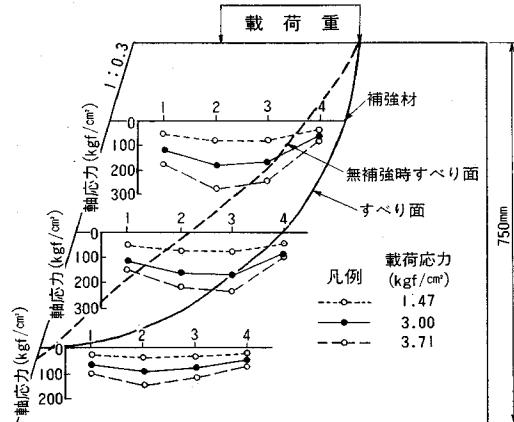


図-25 上向き補強時の摩擦応力とすべり面との関係

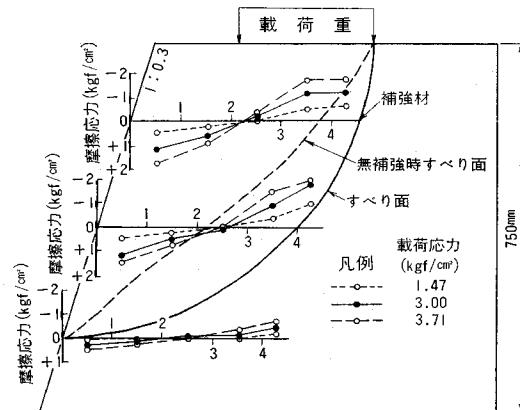


図-23 水平補強時の軸応力とすべり面との関係

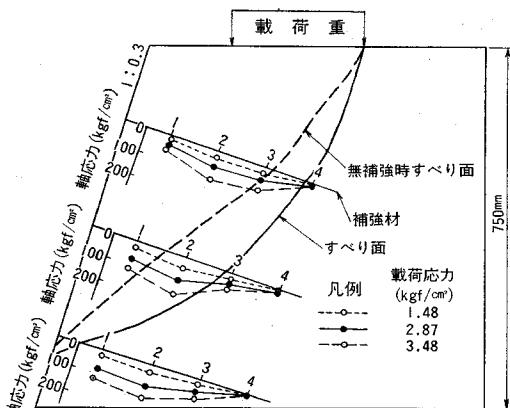


図-26 水平補強時の摩擦応力とすべり面との関係

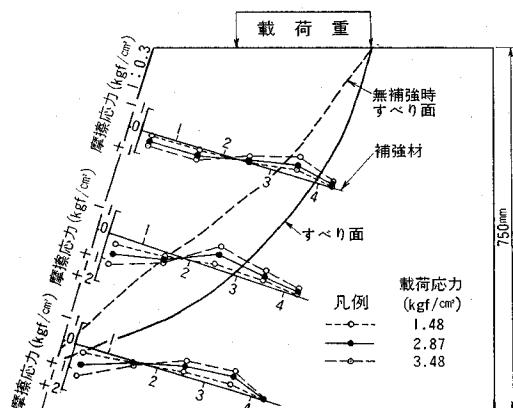


図-24 下向き補強時の軸応力とすべり面との関係

である。隣接する軸応力の差分を区間に発生する補強材の周面摩擦力とみなして、算出したものである。負の摩擦応力は、斜面奥側の軸応力が小さい場合に相当する。上向き補強の場合、摩擦応力の発生は他と比較して著しく小さい。軸応力の場合と同様に、水平補強と下向き補

強の中段補強材において、載荷応力による摩擦応力の増分が顕著な位置は、無補強時と補強時のすべり面の中間部分である。

模型斜面の大きさから容易に推察されるように、補強材周辺の地中応力はきわめて小さい。載荷試験によって

生ずる模型斜面の変形と補強材の軸応力の発生は、三軸圧縮試験における拘束圧 0.5 kgf/cm^2 の場合の強度・変形特性に基本的に支配されていることがわかった。土塊のすり抜け変形が阻止されるように補強材が配置されるときに、補強効果は最も顕著になる。

4. 結論

本研究において著者らは、鉄線を供試体中に設置した補強土塊を用いた三軸圧縮試験結果に基づき、実際の斜面における補強材の補強効果がどのように発揮されているかを確認するために、模型斜面に対し鉛直載荷試験を実施し、斜面の破壊パターンの確認と補強材に発生する応力の計測を行った。得られた主な結論は、以下のとおりである。

(1) 三軸圧縮試験においては拘束圧の大きさにかかわらず、鉄線のみ・砂付着鉄線・頭部プレート付き鉄線などの鉄線の種類による補強効果の差が現われるのは、軸ひずみが 2% 以上になってからである。

(2) 三軸圧縮試験における軸ひずみが 5% のときの補強供試体の軸差応力を無補強供試体のそれで除した値、すなわち補強効果は、拘束圧の増加とともに減少する。特に、低拘束圧、たとえば $\sigma_3=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の補強効果は、補強材の間からの土のすり抜け変形の難易さの影響を受ける。

(3) 模型斜面に対する鉛直載荷試験の結果、上向き補強・下向き補強・水平補強の順に補強効果が増加することがわかった。これは、上記補強材の配置パターンの順に、破壊時のすべり面が斜面奥側へと後退しているためである。

(4) 補強材の軸応力の測定において、軸応力の増分が著しい測点は、無補強時と補強時のすべり面の中間に位置している。これは、載荷応力の増加に伴う斜面変形の増大が補強材の補強効果を発揮させる過程で、すべり面の位置が移行したことを示すものである。

(5) 低拘束圧の応力状態にある斜面表層での補強材の補強効果は三軸圧縮試験における拘束圧 $\sigma_3=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の場合の補強供試体の強度・変形特性の影響を受け、土塊のすり抜け変形が阻止されるように補強材が配置されるときに、補強効果は最も顕著になることが確認された。

参考文献

- 1) Jewell, R.A. : Some effects of reinforcement on the mechanical behaviour of soils, Ph.D. Thesis, Cambridge Univ., 1980.
- 2) 徳江俊秀・梅津喜美夫：補強土の強度、変形特性と補強材挿入角度、第 16 回土質工学研究発表会、pp. 509～512, 1981.
- 3) 龍岡文夫・金藤浩司・三木五三郎・生原 修・浜田英治・佐藤剛司：引張補強材による砂の補強についての基礎的研究、土と基礎、Vol. 31, No. 9, pp. 11～19, 1983.
- 4) Stocker, M.F., Korber, G.W., Gössler, G. and Gudehus, G. : Soil Nailing, Proc. ICSR, Paris, Vol. II, pp. 469～474, 1979.
- 5) 北村照喜・奥園誠之・長尾 哲：鉄筋による補強土工法に関する実験的研究、第 16 回日本道路会議論文集、pp. 93～94, 1985.
- 6) 龍岡文夫・浜田英治：鉄筋による砂斜面の補強法に関する室内実験 [II]、生産研究、Vol. 36, No. 11, pp. 13～16, 1984.
- 7) 林 重徳・落合英俊・田山 聰・坂井 晃：鉄筋による斜面の補強土機構における頭部プレートの効果、土木学会論文集、No. 367, VI-4, pp. 62～70, 1986.

(1987.12.15・受付)