

鉄筋で補強した斜面の室内模型実験

平間 邦興 鳥井原 誠
山本 彰

Model Test of Slope Reinforced with Steel Bars

Kunioki Hirama Makoto Toriihara
Akira Yamamoto

Abstract

The Reinforcing Process by Insertion of Iron Bars is a method of slope stabilization which mainly uses shotcrete and a large number of iron bars. The report describes model tests carried out in the laboratory to investigate the influences of spacing between iron bars and length for effect of reinforcement. Aluminum bars were substituted for iron bars in the tests. The parameters of the test were spacing and length of aluminum bars. (1) The effect of iron bars increases with increase in length and decrease in spacing. However, the optimum spacing of iron bars should be decided giving consideration to the economics and efficiency. (2) If iron bars are driven into a slope with the appropriate spacing and length, differential stress and strain in the ground will be small and widely dispersed. (3) In designing for the Reinforcing Process by Insertion of Iron Bars the total length of reinforcing bars deeper inside than the sliding surface is a very important factor.

概要

鉄筋挿入工法における鉄筋の挿入ピッチ・長さが斜面の補強効果に与える影響について検討するため、アルミ棒で補強した斜面の室内模型実験を行なった。実験変数はアルミ棒のピッチと長さである。その結果、次の点が明らかとなった。(1) 補強材の挿入長さが増大するほど、また挿入ピッチが小さくなるほど補強効果は大きくなるが、その効率性を考慮すれば最適値を設定することができる。(2) 適性な長さとしピッチで補強材を挿入すると、斜面内のひずみが広範囲に分散し、明瞭なすべり面が見られなくなる。(3) 鉄筋挿入工法の設計に当たっては、すべり面以深の補強材総付着長さが非常に重要な要因となる。

1. はじめに

斜面に多数の鉄筋を挿入して地山を補強する鉄筋挿入工法は斜面安定工法の一つとして、近年、特に注目されている。しかし、その補強メカニズムについては不明な点が多く残されており、その設計法も十分確立しているとは言い難いのが現状である。

筆者らはこれまで三軸試験機や中空ネジリせん断試験機といった土質試験機を用いて、主に、1本の鉄筋に着目して鉄筋の補強効果、挿入方向、周辺への影響範囲といった点について検討してきた^{1),2)}。

この報告は、それらに引き続いて、実際の斜面をモデル化した各種の室内模型実験を行ない、鉄筋の挿入長さや挿入ピッチの影響について検討を加えたものである。

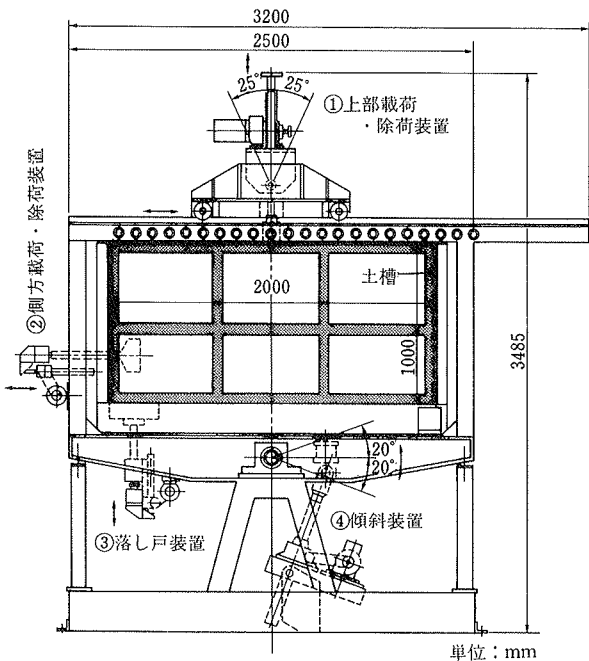
2. 実験装置

図-1に斜面模型実験装置の機構図を示す。この装置は①上部載荷・除荷、②側方載荷・除荷、③落し戸、④傾斜、といった各種の機能を有しているが、今回の実験はそのうち①の上部載荷装置を用いた斜面載荷実験である。

3. 実験方法

3.1. 試料

実験に用いた試料はあらかじめ2.0mmのふるいを通過させた鬼怒川砂であり、比重は2.694、粗砂分は40.1%、細砂分は59.3%、シルト分は0.6%、最大密度は1.625 g/cm³、最小密度は1.284 g/cm³である。



図一 斜面模型実験装置

3.2. 補強材

実験に用いた補強材は 5 mm (幅) × 2 mm (厚さ) のアルミ棒であり、長さは 20, 30, 40 cm の 3 種類である。また、その表面には接着剤で砂粒子を付着させてある。

3.3. 斜面の作成方法

実験に用いる斜面を作成するため、まず、試料の含水比を 5.0% に調整した後、単位体積重量 1.4 tf/m³ となるように 1 層当たり 5~10 cm で数層に分けて突き固めた。その際、図一 2、写真一 1 に示すように補強材と標点を砂中の所定の位置に設置した。実験に用いた斜面 (勾配 70°) は突き固めた後、掘削・整形して作成した。

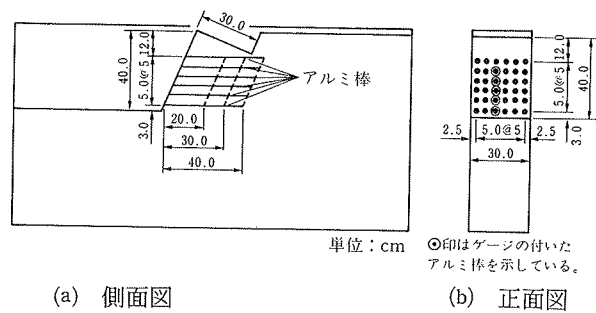
3.4. 実験条件

表一 1 は実験条件を示しており、補強材は 1~36 本を正方形ピッチで配置した。図一 2 は補強材 36 本の場合の配置状況を示している。また、補強材に発生する軸力を測定するため、各段、ほぼ中央の補強材にはひずみゲージを貼り付けている。載荷面は 30 cm × 30 cm であり、載荷方向は実際斜面の破壊挙動により近くするため、鉛直より 20° 傾斜させている。載荷速度は 2.4 mm/min で一定である。実験中の測定項目は載荷重、載荷方向の変位、補強材のひずみ、そして、写真撮影による標点の移動である。

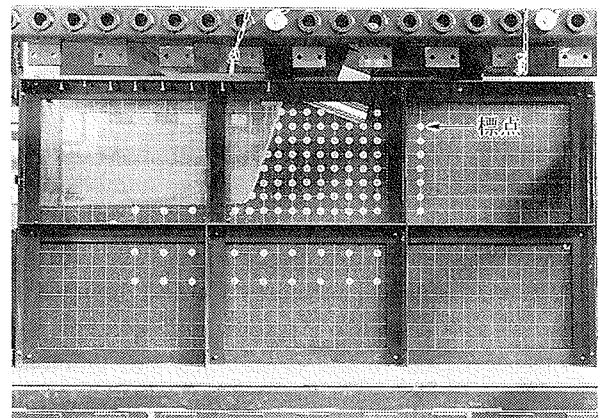
4. 実験結果

4.1. 載荷重と載荷方向変位の関係

図一 3 は補強材本数 n を一定 ($n=36$ 本) とし、長さを変化させた場合の載荷重と載荷方向変位 (以下、変位と



図一 2 斜面形状および補強材挿入位置 (補強材 36 本の場合)



写真一 1 標点の設置状況

アルミ棒長さ (cm)	なし	20				30				40						
アルミ棒本数 (本)	-	9	16	25	36	1	4	9	16	25	36	4	9	16	25	36
アルミ棒ピッチ (cm)	-	10.0	7.5	6.0	5.0	30.0	15.0	10.0	7.5	6.0	5.0	15.0	10.0	7.5	6.0	5.0

表一 1 実験条件

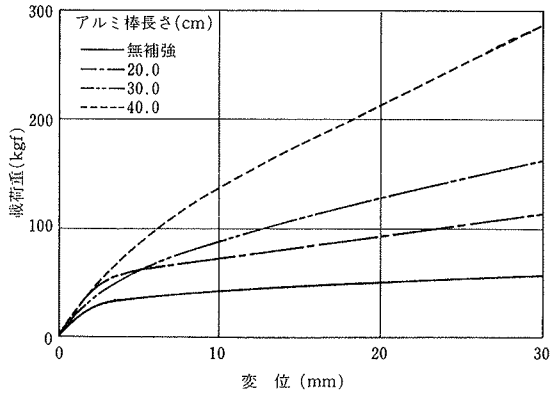
いう) の関係を示している。一方、図一 4 は補強材長さ l を一定 ($l=30$ cm) とし、挿入本数を変化させた場合の載荷重と変位の関係を示している。これらの図から、いずれのケースにおいても、変位が小さい領域 (約 2.0 mm 以下) では載荷重は補強材の有無あるいは長さ、挿入本数の影響をあまり受けないが、変位が大きくなるに従って、補強後の載荷重は無補強時のそれに比べ大きくなっている。この傾向は補強材が長くなるほど、また、挿入本数が多くなるほど顕著になっている。

これらのことから、鉄筋による地山の補強効果は変形が小さい場合にはあまり発揮されないが、変位が進むに従ってその効果は大きくなるのがわかる。

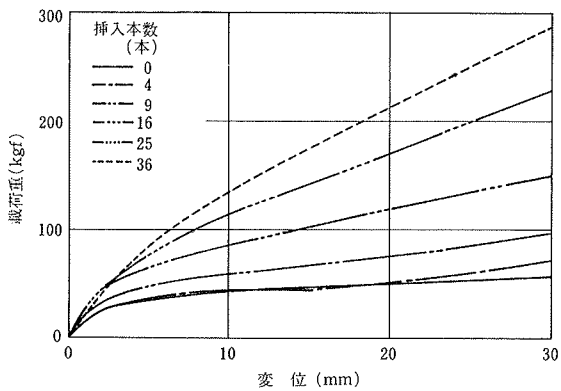
4.2. 補強率と挿入本数、挿入ピッチの関係

一般に、鉄筋の補強効果は次式で示される補強率 R で表現されることが多い³⁾。

$$\text{補強率} = \frac{\text{補強時の載荷重}}{\text{無補強時の載荷重}} - 1$$



図一三 荷重と荷重方向変位の関係 (n=36本)

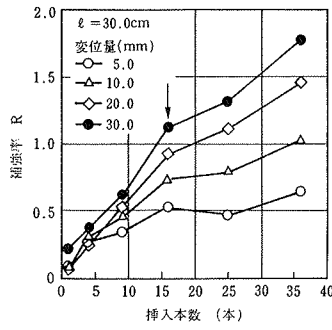


図一四 荷重と荷重方向変位の関係 (l=30 cm)

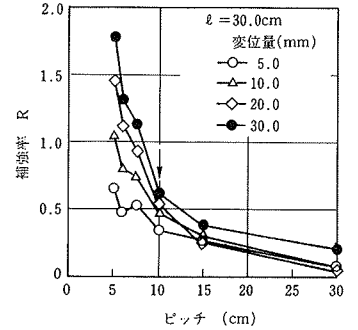
図一五は補強材長さ 30 cm の場合の各変位レベルにおける補強率と挿入本数の関係を示している。この図から、補強率は挿入本数が増加するに従って大きくなっていくが、ある程度以上挿入本数が多くなるとその増分は小さくなり、補強率と挿入本数の関係は bi-linear となっていることが明らかである。この増分が小さくなるときの挿入本数は補強材が効率的に作用する限界挿入本数を示しているものと考えられる。すなわち、これ以上の補強材を挿入したとしても、それに見合うだけの補強効果の増大は期待できないのである。

図一六は補強材長さ 30 cm の場合の各変位レベルにおける補強率と挿入ピッチの関係を示している。この図から、補強率は挿入ピッチが小さくなるほど大きくなること、しかも、挿入ピッチが 10 cm 以下で急激に増大していることが明らかである。また、挿入ピッチが 10 cm 以下では変位の進行に伴い補強率が大きく増加しているのに対し、これ以上の挿入ピッチでは変位の進行に伴う補強率の増大があまり見られない。

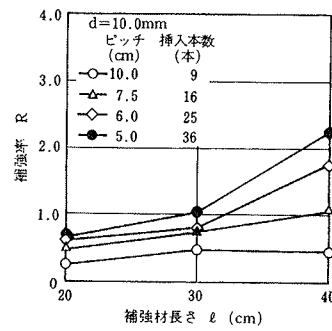
この実験結果は、以前に筆者らが行った補強材引き抜き時の影響範囲把握のための室内引き抜き試験結果²⁾と類似の傾向を示しており、今回の実験では挿入ピッチ 10 cm が補強効果を周辺地盤に有効に作用させるための



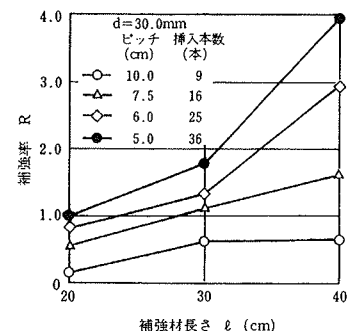
図一五 補強率と挿入本数の関係



図一六 補強率と挿入ピッチの関係



(a) 変位量 10 mm



(b) 変位量 30 mm

図一七 補強率と補強材長さの関係

限界挿入ピッチであると考えられる。すなわち、このピッチより大きくなると地山と補強材との一体化が損なわれ、補強効果が発揮されにくくなるのである。

4.3. 補強率と補強材長さの関係

図一七(a), (b)は変位 10, 30 mm の場合の補強率と補強材長さの関係を示しており、いずれの場合にも挿入ピッチが大きい場合には補強率は補強材長さによる影響を受けにくい、挿入ピッチが小さくなるにつれて補強率は補強材長さの影響を強く受けることがわかる。特に、挿入ピッチが 5.0, 6.0 cm の場合には補強率が補強材長さとともに急激に増加していることがわかる。すなわち、挿入ピッチが小さいほど長さの影響が大きくなると思われる。

4.4. 地盤内のひずみ分布

図一八(a), (b), (c), (d)は変位量 30 mm 時点の、無補強時及び長さ 30 cm の補強材をそれぞれ 4, 16, 36本挿入した場合の主ひずみ分布図を示している。これらの図から、無補強時及び補強材が 4 本の場合には、法尻を通る浅いすべりと、荷板端部と法尻を通る深いすべりの二つが明確に見られる。しかし、挿入本数が 16, 36本の場合には斜面内のひずみは小さくなり、補強された領域全体に分散してくる傾向が明らかである。特に、補強材本

数が36本の場合には、補強材の効果によって最小主ひずみが拘束され、ほぼ均質にひずみが分散されている。

図-8(e), (f)は変位量30mm時点の補強材本数36本、補強材長さ20, 40cmにおける地盤中の主ひずみ分布図を示している。これらの図および図-8(d)から、補強材長さが20cmの場合、補強材の効果によって浅いすべり面は消失しているが、補強材が短いため載荷板端部を通る深いすべり面はまだ残っている。一方、補強材長さが30, 40cmの場合にはひずみが非常に小さくなっており、明瞭なすべり面は見られない。特に、補強材長さが40cmの場合にはこの傾向が強くなっている。

これらのことから、斜面内に適正なピッチ及び長さで補強材を挿入すると、無補強の場合に発生する局所的な大きなひずみ(すべり面)を、補強材の引張り抵抗によって低減し、ひずみを広い範囲に分散させ、補強された部分の一体化を促進し、斜面崩壊の防止に大きく寄与するという、鉄筋挿入工法の補強メカニズムをよく理解することができる。

4.5. 補強材の軸力分布

図-9(a), (b), (c)は長さ30cmの補強材を16, 36本挿入した場合及び長さ20cmの補強材を36本挿入した場合の補強材の軸力分布図を各変位レベルで示しており、これらの図は図-8(c), (d), (e)に対応している。これらの図から、補強材の軸力はいずれも変位が進行するに従って増加していることがわかる。また、長さ30cmの補強材を16, 36本挿入した場合の軸力は法肩に近い補強材では深部において大きく、また法尻に近い補強材では法面前面に近い部分で大きな値を示しており、山形の分布となっている。そして、これらの軸力が最大となる点を結んだ線は図-8(a)の無補強時のすべり面にほぼ対応しているようである。しかし、長さ20cmの補強材を36本挿入した場合の軸力は長さ30cmの補強材を36本挿入した場合に比べ全体的に小さく、特に上層部ではほとんどフラットな分布となっている。これは補強材長さが30

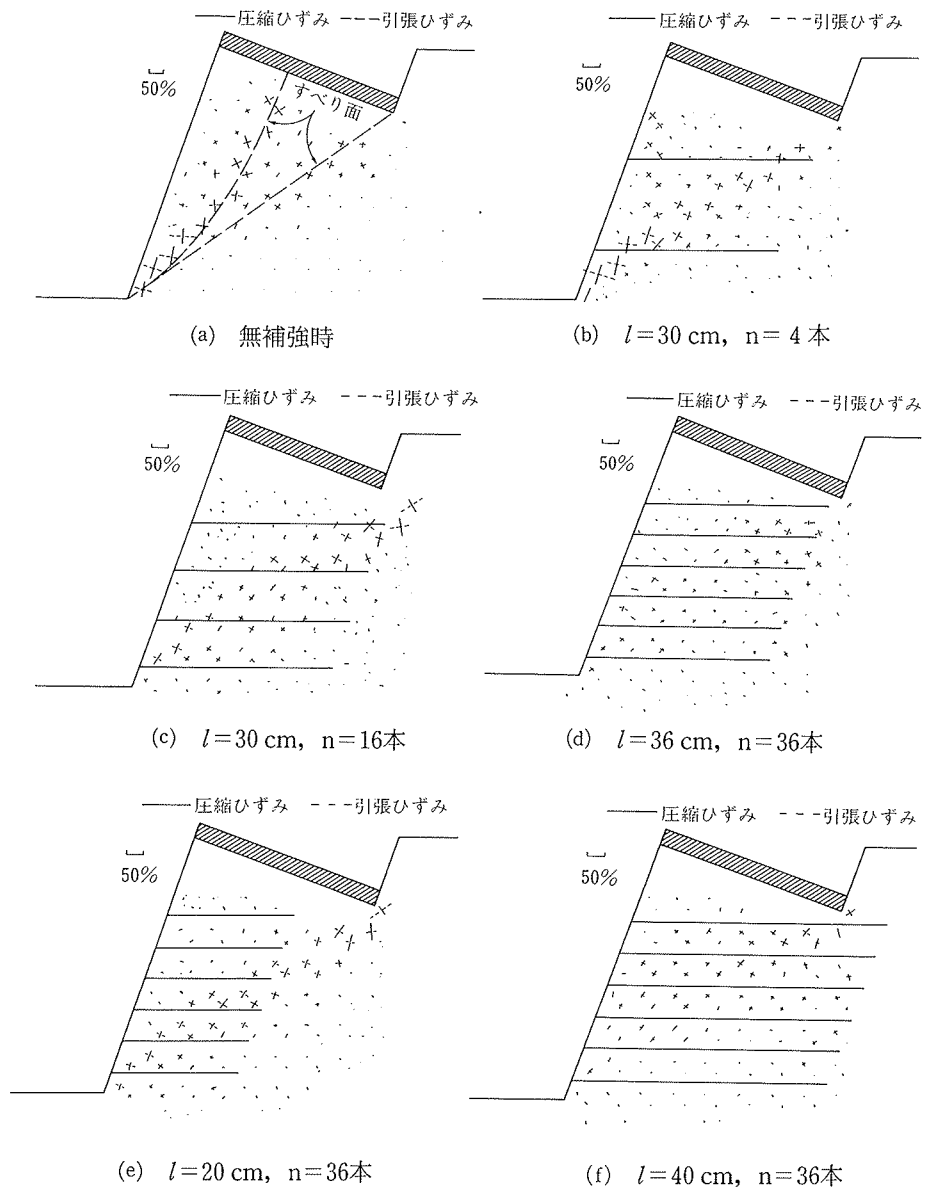


図-8 主応力分布図

cmの場合には大部分の補強材が無補強時のすべり面の外側にまで入っているのに対し、補強材長さが20cmの場合にはほとんどの補強材が無補強時のすべり面の内側にあるためである。

4.6. 設計法への対応

今回の一連の実験結果から、鉄筋挿入工法の補強効果は補強材の引張り抵抗に由来するものであり、その効果は挿入長さや挿入本数が増大するほど大きくなることが明らかとなった。このことを実際の設計法に適用するために、すべての実験結果を補強率と補強材総付着長さの関係で整理したのが図-10である。なお、今回の実験の場合、法面表面において補強材にプレートなどを設置し法面を拘束していないため、補強材付着長さとしては図-11に示すように載荷板端部と法尻を通るすべり面を境として短い方の補強材長さを考えることとした。図-

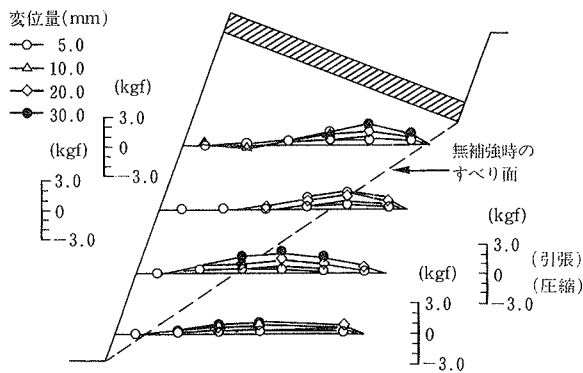


図-9(a) 補強材の軸力分布図 ($l=30$ cm, $n=16$ 本)

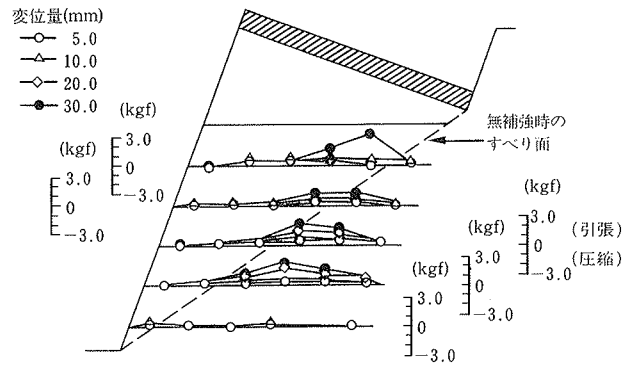


図-9(b) 補強材の軸力分布図 ($l=30$ cm, $n=36$ 本)

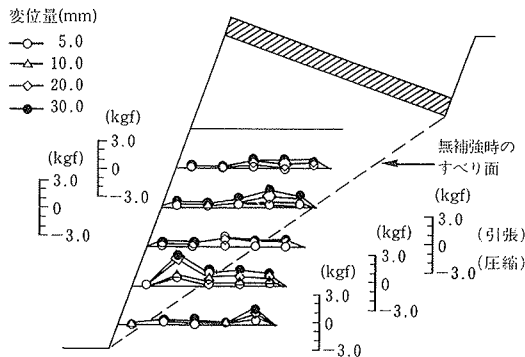


図-9(c) 補強材の軸力分布図 ($l=20$ cm, $n=36$ 本)

10で用いている補強材総付着長さとはこれら補強材付着長さの総和である。

図-10から、明らかなように、補強率と総付着長さはほぼ線形関係を示している。従って、鉄筋挿入工法の設計に当たっては総付着長さが非常に重要な要因となることがわかる。

こういった点を考慮して、今回の斜面模型実験における力の釣り合い状態を概念的に示すと図-11のようになる。すべり力は載荷重 P とすべり土塊の重量 W で表わされ、抵抗力はすべり面上のせん断力 S と補強材に働く張力 T で表わされる。ここで張力 T は補強材の付着長さで一意的な関係にあることは言うまでもない。

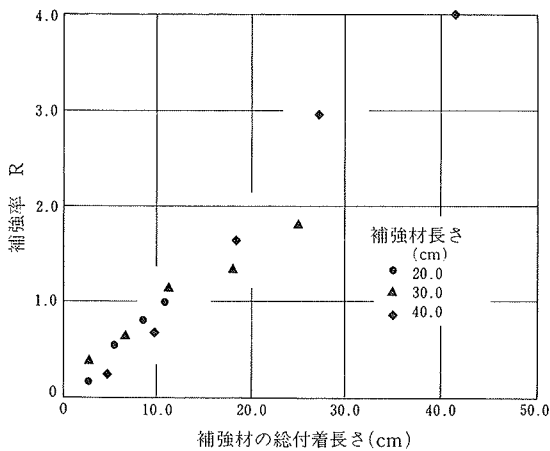


図-10 補強率と付着総長さの関係

5. おわりに

この研究では鉄筋挿入工法における鉄筋の補強効果に影響を与える要因のうち、特に補強材の長さやピッチに着目した検討を行なった。その結果、次のことが明らかとなった。

- (1) 補強材の挿入長さが増大するほど、又、挿入ピッチが小さくなるほど補強効果は大きくなるが、その効率性を考慮すれば、最適値を設定することができる。
- (2) 適度な長さやピッチで補強材を挿入すると、斜面内のひずみが広範囲に分散し、明瞭なすべり面が見られなくなる。
- (3) 鉄筋挿入工法の設計に当たっては、すべり面以深の補強材総付着長さが非常に重要な要因となる。

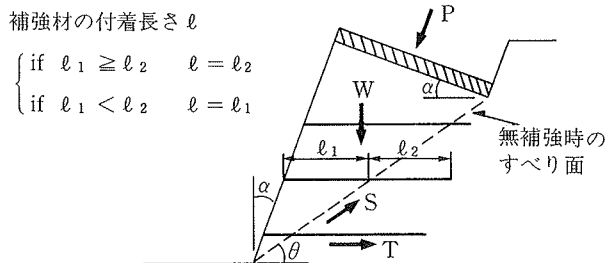


図-11 実験時の力の釣り合いの概念図

参考文献

- 1) 平間, 鳥井原, 山本: 鉄筋による砂の補強効果に関する実験的研究, 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 52~56
- 2) 平間, 鳥井原, 山本: 補強ボルト引き抜き時の影響範囲の把握, 土木学会第42回年次学術講演会, III, (1987), pp. 874~875,
- 3) 補強土工法(土質工学ライブラリー29)土質工学会編