

# 鉄筋による砂の補強効果に関する実験的研究

平 間 邦 興      鳥 井 原   誠  
山 本   彰

## Experimental Study on Sand Reinforcement Mechanism

Kunioki Hirama      Makoto Toriihara  
Akira Yamamoto

### Abstract

The Reinforced Earth Method is a method of slope stabilization which mainly uses shotcrete and rock bolts. The report describes a number of tests carried out in the laboratory to investigate the effect of reinforcement by rock-bolting. The tests were elongation tests and torsion tests which used specimens reinforced by aluminum bars. The results obtained were the following:

(1) Driving rock bolts in a direction in which tensile stresses act on the rock bolts is effective, and especially, driving rock bolts in a direction for minimum principal strain is most effective.

(2) When rock bolts were driven into the slope, the angle of internal friction of the reinforced soil was not increased, but the cohesion was apparently increased.

### 概 要

この報告は地山掘削時に土中に多数の鉄筋を挿入してその安定化を図る鉄筋挿入工法における地山補強のメカニズムについて検討したものである。特に今回は、各種室内要素試験によって一様なひずみ場における鉄筋の補強効果に注目して実験的検討を行なっている。実施した試験は、各種条件でアルミ棒を挿入した砂供試体の中空ネジリせん断試験および三軸伸張試験である。その結果、次の結論を得た。

- (1) 鉄筋は引張力が作用する方向に挿入するのが効果的であり、特に最小主ひずみ方向に挿入するのが最も効果的である。
- (2) 鉄筋を地山内に挿入した場合、補強された土塊の内部摩擦角は変化しないが、その粘着力は見かけ上増加する。

## 1. はじめに

従来、土構造物の安定性は地盤改良をするか、擁壁、杭、ケーソンといった非常に剛性の高い構造物を用いることによって確保されてきたのが大部分であった。しかし、最近、杭に比べ細長比が大きく曲げ剛性の小さい補強材を土中に多数配置することによって土塊全体を強化し構造物の安定を図る種々の「補強土工法」が開発されてきている<sup>1)</sup>。

「補強土工法」の内、切土や掘削の場合の代表的なものとして、鉄筋挿入工法がある。この工法は現場の条件によっては、従来の擁壁、杭、ケーソンなどを用いた工法に比して施工性や経済性に優れている場合も多く、既にヨーロッパを始め日本においても幾つかの施工実績が

あり、今後もその数は増加することが予想される。しかし、現在のところその設計法は実用的な面が強く、鉄筋による土の補強メカニズムの理論的な体系化はいまだになされていないのが現状である。従って、今後、鉄筋挿入工法を真に確立していくためには、より一層の理論的研究の発展が必要であり、その第一歩として鉄筋の挿入が土の強度・変形に与える影響を室内要素試験で検討しておくことが非常に重要であると考えられる。

そこで、この報告では、砂の中にアルミ棒を種々の条件で挿入した供試体を用いて、中空ネジリせん断試験(中空試験)および三軸伸張試験を行ない、一様なひずみ場におけるアルミ棒の挿入方向、断面積、付着表面積、挿入本数などが砂の強度変形特性に与える影響について検討している。

## 2. 試料

試験に用いた試料はあらかじめ 2.0 mm のふるいを通させた鬼怒川砂であり、その物理的性質を表一に示す。

比 重 $G_s$	2.694
粗 砂 分 (2.0~0.42mm)%	40.1
細 砂 分 (0.42~0.007mm)%	59.3
シルト分(0.074~0.005mm)%	0.6
均 等 係 数 $U_c$	2.71
曲 率 係 数 $U_c'$	1.00
最大密度 $\rho_{max}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.625
最小密度 $\rho_{min}$ (g/cm <sup>3</sup> )	1.284

表一 物理的性質

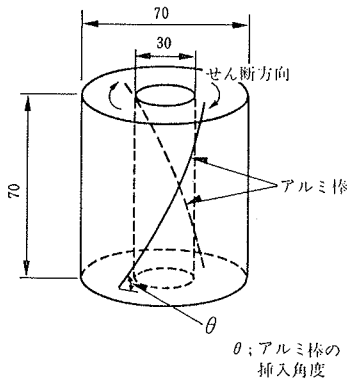
## 3. 試験方法

### 3.1. 中空ネジリせん断試験 (中空試験)

供試体は図一に示すように2本のアルミ棒を所定の角度(表一)でセットし、相対密度  $D_r=70\%$  になるようにバイブレーターを用いて砂を詰めた後、水で湿潤させた。なお、アルミ棒にはあらかじめ接着剤(アラルダイト)を用いて砂粒子を付着させてある。実施した試験

試験番号	アルミ棒の挿入角度 $\theta$ (度)	アルミ棒の長さ $l$ (cm)	アルミ棒径 $\phi$ (mm)
N 1	アルミ棒を挿入しない		
S 1	15	23.2	2.0
S 2	30	12.0	
S 3	45	8.5	
S 4	60	6.9	
S 5	75	6.2	
S 6	90	6.0	
S 7	105	6.2	
S 8	120	6.9	
S 9	135	8.5	
S 10	150	12.0	
S 11	165	23.2	
S 12	180 (=0)	15.7	

表一 試験条件 (中空試験)

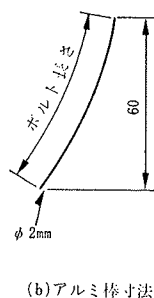


図一 中空試験用供試体の概要

はせん断ひずみ速度  $\dot{\gamma} = 1.76\%/min$ , 拘束圧  $\sigma_c = 2.0 \text{ kgf/cm}^2$  の等圧排水中空ネジリせん断試験である。

Case	アルミ棒径 (mm)	アルミ棒本数	拘束圧 (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	—	—	2.0
2	—	—	4.0
3	2.0	1	2.0
4	2.0	2	2.0
5	2.0	3	2.0
6	2.0	4	2.0
7	3.0	1	2.0
8	3.0	2	2.0
9	5.0	1	2.0
10	5.0	1	4.0

表二 試験条件 (三軸伸張試験)



図二 三軸伸張試験供試体の概要

### 3.2. 三軸伸張試験

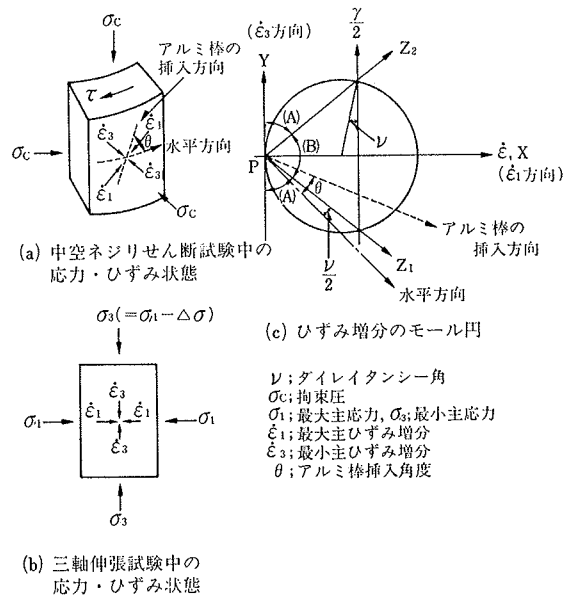
供試体は、表一に示す各種の径や本数のアルミ棒を図二のようにセットし、中空試験の場合と同様な手法で作成した。実施した試験は、軸ひずみ速度  $\dot{\epsilon}_a = 0.88\%/min$ , 拘束圧  $\sigma_c = 2.0, 4.0 \text{ kgf/cm}^2$  の排水三軸伸張試験である。ただし、供試体の両端には図二(b)に示すような穴をあけた亚克力板を設置し、図二(a)のようにアルミ棒を貫通させ、伸張後の供試体断面形状の変化を防いでいる。

## 4. 試験結果および考察

### 4.1. アルミ棒の挿入方向に関する基本的考え方

一様なひずみ場の土の内部にある補強材に生ずる力と挿入方向の関係は図三に示すひずみ増分のモール円を用いて整理することができる。このモール円から、補強材に生ずる力を次の三つの領域に分けて考えることができる<sup>1)</sup>。

4.1.1. アルミ棒に引張力が作用する方向 この方向は図中の(A)で示される領域であり、PY 方向で最大の引



図三 アルミ棒の挿入方向とアルミ棒に作用する力の関係

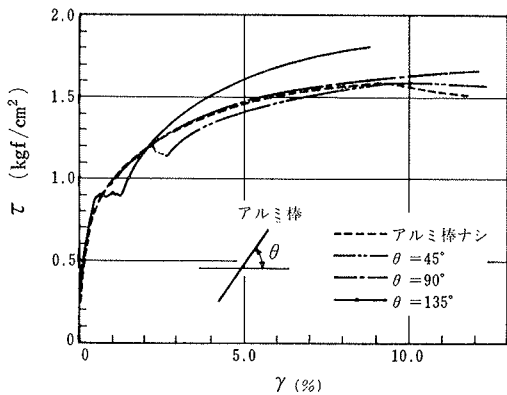
張力を生じる。このPY方向は中空試験では  $\theta=135^\circ$  に、また三軸伸張試験では鉛直に挿入した場合に相当する。

4.1.2. アルミ棒に圧縮力が作用する方向 この方向は図中の(B)で示される領域であり、PX方向で最大の圧縮力を生じる。このPX方向は中空試験では  $\theta=45^\circ$  に相当する。

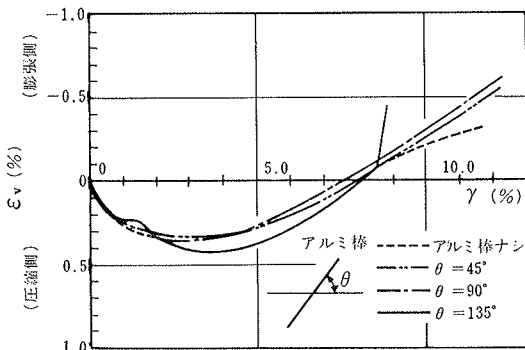
4.1.3. アルミ棒に圧縮力も引張力も作用しない方向 この方向は図中のPZ<sub>1</sub>, PZ<sub>2</sub>方向であり、中空試験では  $\theta=90^\circ$  付近にあると考えられる。

4.2. 中空ネジせん断試験(中空試験)結果

図一4はアルミ棒を挿入していない場合およびアルミ棒を  $\theta=45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$  の角度で挿入した場合のせん断応力  $\tau$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係を示している。ここで、今回実施した試験が等方圧条件であることから、4.1. で述べたように  $\theta=45^\circ$  はアルミ棒の軸方向に圧縮力のみが作用する方向(最大主ひずみ方向)であり、 $\theta=135^\circ$  は引張力のみが作用する方向(最小主ひずみ方向)である。また、 $\theta=90^\circ$  はアルミ棒の軸方向に引張力も圧縮力もほとんど作用しない方向である。この図によると、 $\theta=135^\circ$  の場合にはアルミ棒が挿入されていない場合に比べ、せん断初期のせん断応力増分も最大せん断応力も大きくなっているが、 $\theta=45^\circ, 90^\circ$  の場合にはアルミ棒の挿入されていない場合との間に大きな差異は見られない。



図一4 せん断応力  $\tau$  ~ せん断ひずみ  $\gamma$  関係



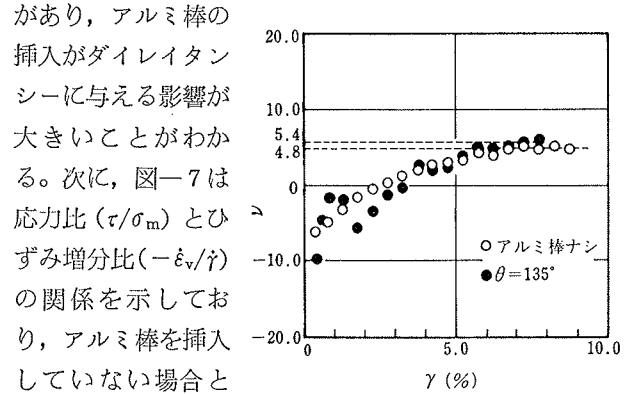
図一5 体積ひずみ  $\varepsilon_v$  ~ せん断ひずみ  $\gamma$  関係

なお、 $\theta=45^\circ, 135^\circ$  の場合にはせん断中にせん断応力の一時的な低下が見られるが、これはアルミ棒とその周辺にある砂の間で生じるすべりによるものと考えられる。また、図一5はせん断中の体積ひずみ  $\varepsilon_v$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係を示しており、 $\theta=135^\circ$  の場合にはアルミ棒を挿入していない場合とやや異なる挙動を示しているが、 $\theta=45^\circ, 90^\circ$  の場合にはアルミ棒を挿入しない場合とほぼ同じ挙動を示している。以上のことから、アルミ棒は  $\theta=135^\circ$  (最小主ひずみ方向) に挿入した場合に砂のせん断応力・体積ひずみに与える影響が最も大きくなることがわかる。そこで、以後、 $\theta=135^\circ$  の場合とアルミ棒を挿入しない場合に限って検討する。

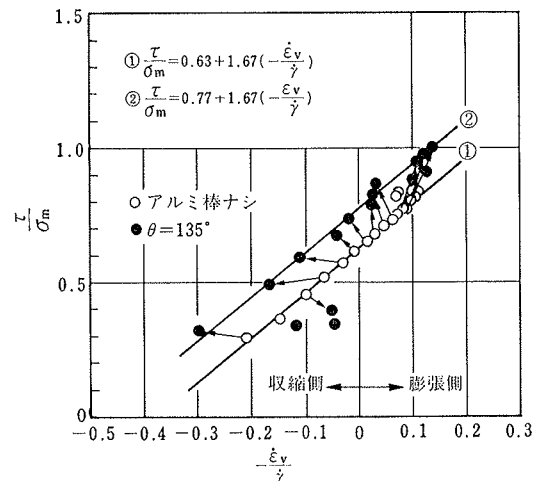
図一6は式(1)で定義されるダイレイタンシー角  $\nu$  とせん断ひずみ  $\gamma$  の関係を示している。

$$\sin \nu = \frac{\dot{\varepsilon}_1 + \dot{\varepsilon}_3}{\dot{\varepsilon}_1 - \dot{\varepsilon}_3} \dots\dots\dots(1)$$

この図から、 $\nu$  の値は両者とも  $\gamma$  の増加に伴って単調増加し、 $\theta=135^\circ$  の場合には  $5.4^\circ$  に、アルミ棒を挿入していない場合には  $4.8^\circ$  に漸近している。また、 $|\nu|$  を比較すると  $\theta=135^\circ$  の場合の方が常に大きな値を示す傾向があり、アルミ棒の挿入がダイレイタンシーに与える影響が大きいことがわかる。



図一6 ダイレイタンシー角  $\nu$  ~ せん断ひずみ  $\gamma$  関係



図一7 応力比  $\left(\frac{\tau}{\sigma_m}\right)$  ~ ひずみ増分比  $\left(-\frac{\dot{\varepsilon}_v}{\dot{\gamma}}\right)$  関係

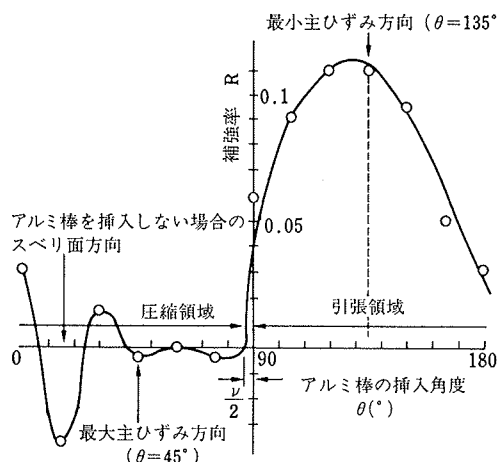


図-8 補強率 R～アルミ棒挿入角  $\theta$  関係

印で結んである。この図から、体積ひずみ増分が収縮側にある場合には等せん断ひずみ時の応力比はアルミ棒の有無による影響をあまり受けないが、体積ひずみ増分が膨張側にある場合にはアルミ棒の挿入によって応力比が大きく増加することがわかる。従って、鉄筋の挿入効果はせん断時の土の体積膨張が大きい程増大することが予想される。

図-8 は式(2)で定義される補強率 R とアルミ棒の挿入角  $\theta$  の関係を示している。

$$R = \frac{\tau_a^*}{\tau_n} - 1 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここで、 $\tau_n$  はアルミ棒を挿入しない場合の最大せん断応力である。また、 $\tau_a^*$  はアルミ棒を挿入した場合の最大せん断応力であり、アルミ棒の長さが挿入角によって異なるため、7.0 cm (供試体の高さ) に相当するように式(3)を用いて補正している。

$$\tau_a^* = (\tau_a - \tau_n) \times \frac{l^*}{l} + \tau_n \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、 $\tau_a$  は補正前の最大せん断応力、 $l$  はアルミ棒長さ、また、 $l^* = 7.0$  cm である。

さらに、図上には図-6 で得られた最大せん断応力時のダイレイタンス角  $\nu$  を用いて、アルミ棒に作用する力が圧縮力となる領域と引張力となる領域を示している。この図から、アルミ棒は引張力が作用する方向に挿入するのが効果的であり、特に最小主ひずみ方向に挿入するのが最も効果的であることがわかる。このことは Jewell の一面せん断試験結果・龍岡らの土槽実験結果と一致するものとなっている<sup>1)</sup>。

#### 4.3. 三軸伸張試験結果

上述のように、鉄筋は最小主ひずみ方向に挿入するのが効果的であることから、次に最小主ひずみ方向に挿入されたアルミ棒の断面積、挿入本数、付着表面積が土の強度変形特性に与える影響について、三軸伸張試験結果

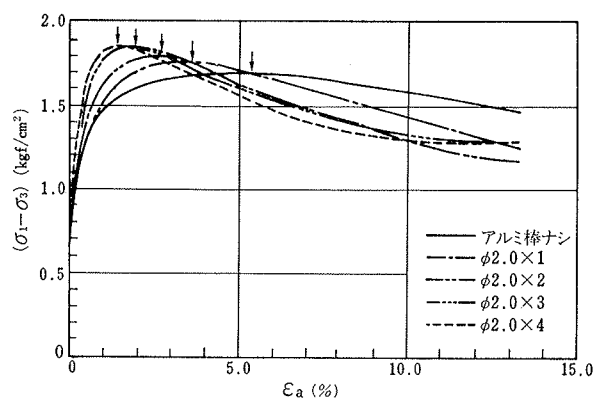


図-9 軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$ ～軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係

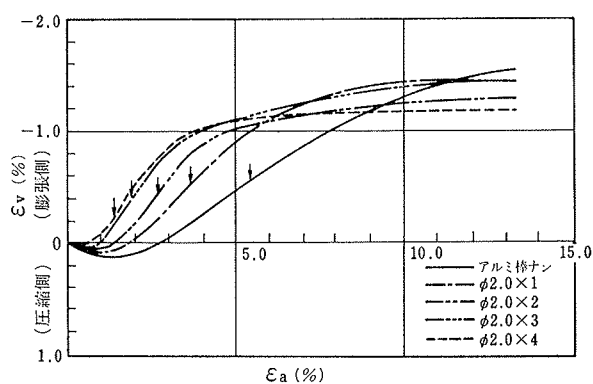


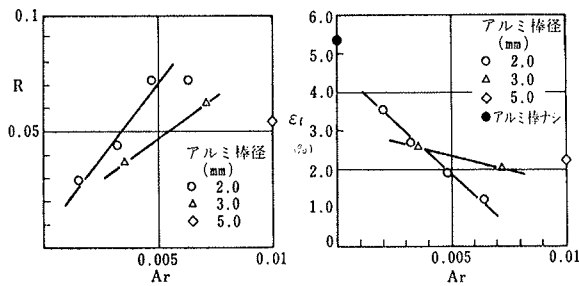
図-10 体積ひずみ  $\epsilon_v$ ～軸ひずみ  $\epsilon_a$  関係

をもとに検討する。

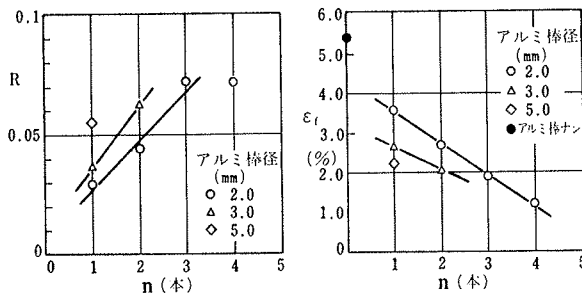
図-9 は  $\phi 2.0$  mm のアルミ棒を 1～4 本挿入した場合およびアルミ棒を挿入しない場合の軸差応力  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を示している。この図から、軸ひずみが小さい時にはアルミ棒の有無にかかわらず軸差応力はほぼ等しいが、軸ひずみがある程度大きくなると、アルミ棒を挿入した場合にはいずれも軸差応力が大きくなっていることがわかる。図中の矢印は最大軸差応力を示すが、アルミ棒の挿入本数が増えるほどその値が大きくなり、しかもその時の軸ひずみが小さくなっていることが明らかである。そして、これらの傾向はアルミ棒の挿入本数が増えるほど顕著である。これらのことから、鉄筋の補強効果は土の変形が小さい段階では十分発揮されず、変形がある程度進んだ段階で発揮されると考えられる。図-10 は体積ひずみ  $\epsilon_v$  と軸ひずみ  $\epsilon_a$  の関係を示しており、アルミ棒を挿入した場合の体積ひずみはアルミ棒を挿入していない場合に比べ大きく、この傾向はアルミ棒の挿入本数が多いほど強くなっている。図中の矢印は最大軸差応力時の点を示している。

次に、挿入されたアルミ棒の断面積、挿入本数、付着表面積が補強効果に与える影響について、検討する。補強効果を表わす指標としては補強率 R、最大軸差応力時の軸ひずみ (破壊ひずみ)  $\epsilon_f$  を用いる。

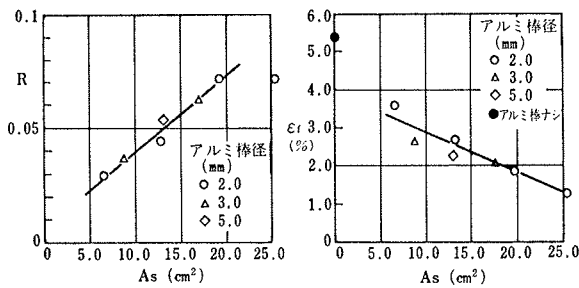
図-11(a)は補強率  $R$ 、破壊ひずみ  $\epsilon_f$  と断面積比  $A_r$  ((アルミ棒の占める断面積)/(供試体の占める断面積)) の関係を示したものであり、図-11(b)は  $R$ 、 $\epsilon_f$  と挿入本数  $n$  の関係を示したものであるが、両者ともアルミ棒径の違いによって異なる相関関係が見られ、断面積比や挿入本数では任意のアルミ棒径における補強効果を一意的に説明できないと言える。一方、図-11(c)は  $R$ 、 $\epsilon_f$  と付



(a) 断面積比  $A_r$  による影響



(b) 挿入本数による影響



(c) 付着総表面積による影響

図-11 補強率  $R$  および破壊ひずみ  $\epsilon_f$

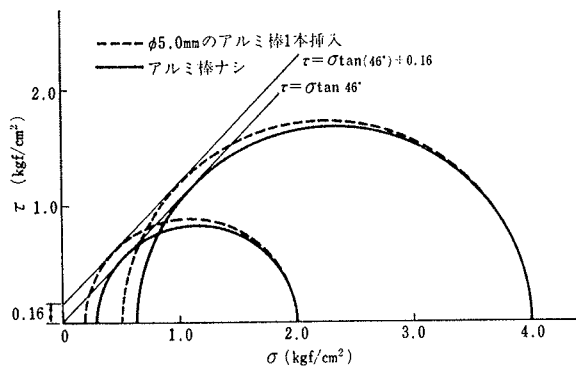


図-12 モールの応力円

着総表面積  $A_s$  の関係を示したものであるが、アルミ棒径にかかわらず全体的に良い相関関係を示している。

このことより、補強効果に影響を与える要因としては付着総表面積が最も支配的であることがわかる。従って、最小主ひずみ方向に鉄筋を挿入する場合、すなわち鉄筋の引張力に地山の補強効果を期待する場合には鉄筋の補強効果を挿入断面積や挿入本数で評価するよりも付着総表面積で評価するのが適切であると考えられる(ただし、ここでは鉄筋は引張力によって破断しないものと仮定している)。

図-12はアルミ棒が挿入されていない場合と  $\phi 5.0$  mm のアルミ棒が1本挿入された場合のモールの応力円および破壊包絡線を示しており、アルミ棒を挿入した場合にはアルミ棒を挿入しない場合に比べ土の内部摩擦角は変化しないが、粘着力は見かけ上増加している。この見かけ上の粘着力はアルミ棒の引張力に起因するものであり、その値はアルミ棒の付着総表面積に支配されることが考えられる。

## 5. おわりに

この研究では、一様なひずみ場をもつ土中に挿入された鉄筋の補強メカニズムを明らかにするため、種々の条件のもとで供試体内にアルミ棒を挿入し、中空ネジせん断試験、三軸伸張試験を実施した。その結果、次の結論を得た。

- (1) 土中に鉄筋を挿入する場合、鉄筋は引張力が作用する方向に挿入するのが効果的であり、特に最小主ひずみ方向に挿入するのが最も効果的である。
- (2) 鉄筋はその周辺地盤が体積収縮を生じる場合にはあまり補強効果を発揮しないが、体積膨張を生じる場合には大きな補強効果を発揮する。
- (3) 鉄筋の引張力に地山の補強効果を期待する場合にはその補強効果を鉄筋の付着総表面積で評価するのが適切である。
- (4) 鉄筋を地山に挿入した場合、補強された土塊の内部摩擦角は変化しないが、その粘着力は見かけ上増加する。

この研究では室内要素試験によって、鉄筋による地山の補強効果について検討を行ってきたが、今後はさらに、土槽実験、現場実験により鉄筋挿入による地山の補強効果を明らかにしていく予定である。

## 参考文献

- 1) 土質工学会編: 補強度工法, 土質工学ライブラリー 29, (1986)