

現場引抜き試験による 帯鋼補強材と盛土材との摩擦特性

小川憲保

正会員 工博 (株) 補強土エンジニアリング 代表取締役 社長 (〒550 大阪市西区西本町 1-7-19)

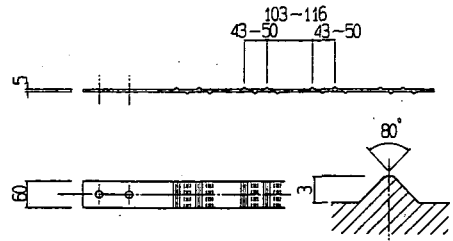
マニュアルに従って施工された数多くの現場において、ストリップの表面形状、垂直応力、施工後の経過時間、ストリップ長、および盛土材などを変えて、ストリップの引抜き試験を行い、ストリップと盛土材との間に発生する垂直応力とせん断強度との関係を求めた。その結果、両者の間にはクーロンの破壊規準式が成立することがわかった。また、リブ付きストリップと盛土材との間に発生するせん断強度は、平滑ストリップと盛土材との間に発生するものより大きいことがわかった。さらにリブ付きストリップと盛土材との間に発生する摩擦角の正接($\tan\phi$)と壁面変位には負の相関があることがわかった。

Key Words : pull-out test in in-situ, reinforced earth, reinforcement, friction, shear stress

1. はじめに

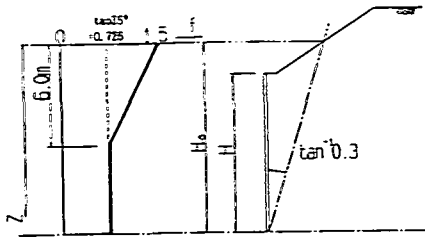
テールアルメ工法とは、ストリップ（帯状鋼板）を補強材とする補強土で、盛土の中にストリップを敷設することにより盛土の補強を行い、垂直なり面を形成する工法である。この際、ストリップの補強効果はストリップ自体の強度、ストリップと盛土材との摩擦力による引抜き抵抗を考慮して設計される。しかし、ストリップと盛土材との摩擦特性については十分解明されていないのが現状である。現在までの研究成果を見ると、数多くの施工現場におけるストリップ引抜き試験結果をまとめた報告^{1), 2), 3), 4)}は数多くはない。多くは室内での模型実験や、一現場における施工完了後の確認試験の報告である。

本文では、マニュアル⁵⁾に従って施工された数多くの現場において、ストリップ表面形状（平滑とリブ付き）、垂直応力（土かぶり）、施工後の経過時間、ストリップ長、および盛土材などを変えてストリップ引抜き試験を行い、土中ストリップ全長で均一に働くと考えた平均的せん断応力特性を明らかにするとともに、このせん断応力と壁面変位の関係を明らかにした。すなわち従来の研究成果においては、ストリップと盛土材の摩擦特性として、摩擦係数に着目していたが、ここでは両者の間に発生する垂直応力とせん断応力の関係を求めた。理由は、



図—1 リブ付きストリップの表面形状（単位 mm）

ストリップと盛土材の間には付着力等も関係しているので、摩擦係数と土かぶり厚さに直線的な関係がなく、土かぶり厚さが変化したときの摩擦係数が推定しにくいためである。引抜き試験結果からは、ストリップと盛土材との間に発生する垂直応力とせん断強度にはクーロンの破壊規準式が成立することがわかった。また、リブ付きストリップと盛土材との間に発生するせん断強度は、平滑ストリップと盛土材との間に発生するものより大きいことがわかった。さらに、リブ付きストリップと盛土材との間に発生する摩擦角の正接 ($\tan\phi$) と壁面変位には負の相関があるが、付着力等の垂直応力に影響されないせん断強度と壁面変位には相関がないことがわかった。



図—2 リブ付きストリップの設計摩擦係数

2. ストリップと盛土材との摩擦係数

テールアルメ工法のストリップには、平滑ストリップ（幅 100 mm、厚さ 3.2mm）とリブ付きストリップ（幅 60mm、厚さ 5.0mm）（図—1）の 2 種類がある。テールアルメ工法がフランスから導入された当初は平滑ストリップが使用されていたが、1983 年ごろから国内でもリブ付きストリップが使用されはじめ、現在ではすべてのテールアルメにおいてリブ付きストリップが使用されている。設計に用いるリブ付きストリップの摩擦係数 f は、マニュアルにより次のように示されている（図—2 参照）。

$$f = f_0 \left(1 - \frac{z}{z_0} \right) + \tan \varphi_1 \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad z \leq z_0 = 6.0\text{m のとき} \quad (1)$$

$$f = \tan \varphi_1 \quad z > z_0 = 6.0\text{m のとき}$$

ここに $f_0 = 1.5$

$\varphi_1 = 36^\circ$

z : 仮想壁高 H_a (壁の最下段と、これからはじめる $\tan^{-1} 0.3$ の角度の直線と地表面または路面との交点までの鉛直距離で、計算上の壁高) 上端から着目点までの深さ

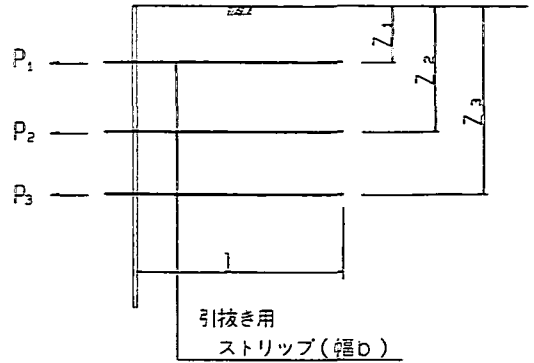
z_0 : 仮想壁高 H_a の上端から摩擦係数変換点までの深さ、 $z_0 = 6.0\text{m}$

式(1)は盛土材が次に示す条件に適合し、かつマニュアルに定められた所定の締固めがなされることが前提である。

- ① 細粒分（土粒子の粒径が $75\mu\text{m}$ 以下のもの）の含有量が 25% 以下の土質材料。
- ② 最大粒径が 250mm 以下の硬岩ずりて、 75mm あるいは通過分の含有量が 25% 以下、かつ大小粒が適当に混合して締固めのしやすいもの。

ストリップと盛土材との摩擦に関して現在までの研究より以下のことが分かっている^{1), 2), 3), 4), 6), 7), 8)}。

- ① リブ付きストリップの摩擦係数は土かぶり厚さが小さいほど大きくなる。
- ② リブ付きストリップと平滑ストリップの摩擦係数を比較すると、同じ土かぶり厚においてはリブ付



図—3 $\sigma \sim \tau_m$ 関係を求めるための現場引抜き試験

きストリップの方が大きい。

- ③ 摩擦力がピーク値に達するまでの引抜き量は、平滑ストリップよりリブ付きストリップの方が大きく、摩擦力のピーク値と残留値の差は、平滑ストリップよりリブ付きストリップの方が小さい。

- ④ 摩擦係数は経過年数に従いほぼ増加傾向にある。

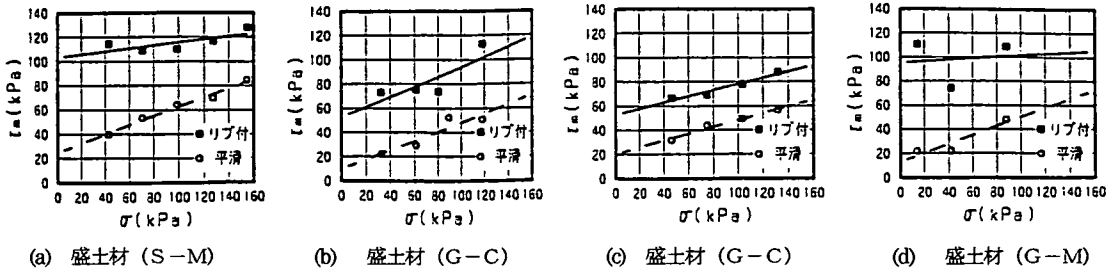
ストリップが盛土内に敷設される時の垂直間隔と水平間隔は、土圧力によりストリップが破断しないように決定される。実際の計算では、ストリップに発生する引張り応力が、許容引張り応力以内になるように決定される。垂直間隔には 0.75m 、 0.375m 、水平間隔には 0.75m 、 0.50m がある。

ストリップの配置密度が増加すると、1本のストリップに働く引抜き抵抗力が減少することが考えられる。この群効果については、Guilloux らの平滑ストリップを用いた室内引抜き試験によると、補強材の敷設間隔が補強材幅の 8 倍程度以上であれば、群効果は無視できるとされている⁹⁾。現場のストリップ引抜き試験においても群効果の影響を把握するために複数ストリップの引抜き試験を対象とすべきであるが、ここでは 1本のストリップ引抜き試験を対象とした。

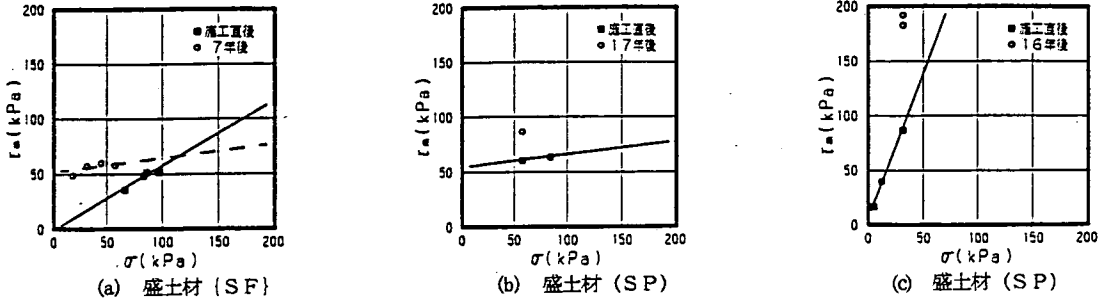
3. 現場ストリップ引抜き試験

(1) 試験方法

施工時に試験用のストリップを壁面から露出させて敷設し、施工完了後これに油圧ジャッキを連結し、壁面に反力を取って現場ストリップ引抜き試験を実施した。引抜き速度は $1 \sim 2\text{mm/min}$ とし、試験はひずみ制御で行った。ここではストリップと盛土材との摩擦係数を求めるのではなく、ストリップと盛土材との間に発生する平均的せん断強度 τ_m に着目し、 $\sigma \sim \tau_m$ の関係を見いだすことを目的とした。そのために、土中ストリップ長 l_0 が同一で、ストリップに作用する垂直応力 σ が異なる 3 本以上のストリップを用いて引抜き試験を行い、それぞれの



図—4 現場ストリップ引抜き試験のストリップ表面形状の影響



図—5 現場平滑ストリップにおける τ_m の経時変化

最大引抜き力 P を求めた(図—3参照)。なお、ここで σ は盛土材の単位体積重量と土かぶり厚さの積で算出した。

ストリップと盛土材との間に生じる τ_m は次式により最大引抜き力 P により得られる。

$$\tau_m = \frac{P}{(2 \cdot b \cdot l_e)} \quad (2)$$

ここに b : ストリップの幅 (リブ付きストリップは 0.06 m, 平滑ストリップは 0.10 m)
 l_e : ストリップの土中長さ (m)

(2) 試験結果

現場引抜き試験結果から、ストリップ表面形状(平滑とリブ付き)、ストリップの埋設から引抜き試験までの時間(以下経時変化という)、土中ストリップ長、および盛土材の種別により、ストリップと盛土材との間に生じる τ_m および摩擦係数 f がどのような影響を受けるか整理した。

a) ストリップ表面形状の影響

ストリップ形状の影響を調査するために、盛土材が同じで土中ストリップ長さを同一にして、リブ付きストリップと平滑ストリップの両方で引抜き試験を行った(図—3参照)。試験結果より、ストリップに作用する σ と τ_m の関係を図—4に示す。図より両方のストリップとも σ が増加すれば τ_m が増加し、 σ と τ_m との間にはクーロンの破壊規準式が成立する。またリブ付きストリップとの間に発生する τ_m は、平滑ストリップのものより大きく、特に σ に影響されないせん断強度が卓越していることが

わかる。

b) 経時変化の影響

平滑ストリップと盛土材との間に生じる τ_m の経時変化を図—5に示す。これは森ほかが測定した引抜き試験結果⁹⁾を、 $\sigma \sim \tau_m$ の関係で整理したものである。図では3現場における施工直後と7年、17年、16年後における $\sigma \sim \tau_m$ の関係を比較して示している。図より平滑ストリップに働く τ_m は経時変化により増加することがわかる。また図—5(a)より、長時間経過によるせん断強度の増加は、 σ の影響を受けないように変化していることがわかる。その結果、経時変化により、テールアルメ盛土が安定していくことがわかる。この理由としては、平滑ストリップの表面が腐食して、盛土材との付着力が増加したためであると考えられる。

c) 土中ストリップ長の影響

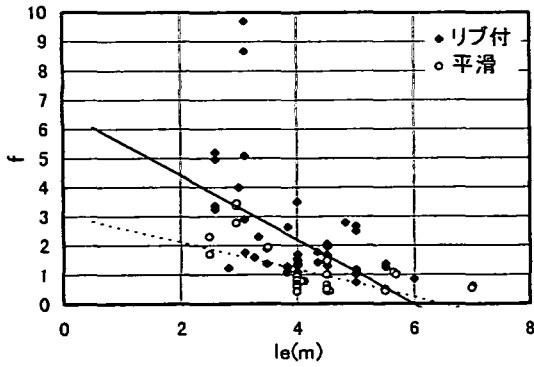
現場で行った全てのストリップ引抜き試験結果を、ストリップの土中長さ l_e とストリップに働く摩擦係数 f との関係で整理したのが図—6である。ここで摩擦係数 f は次式を用いて算出した。

$$f = \frac{P}{(2 \cdot b \cdot \sigma \cdot l_e)} \quad (3)$$

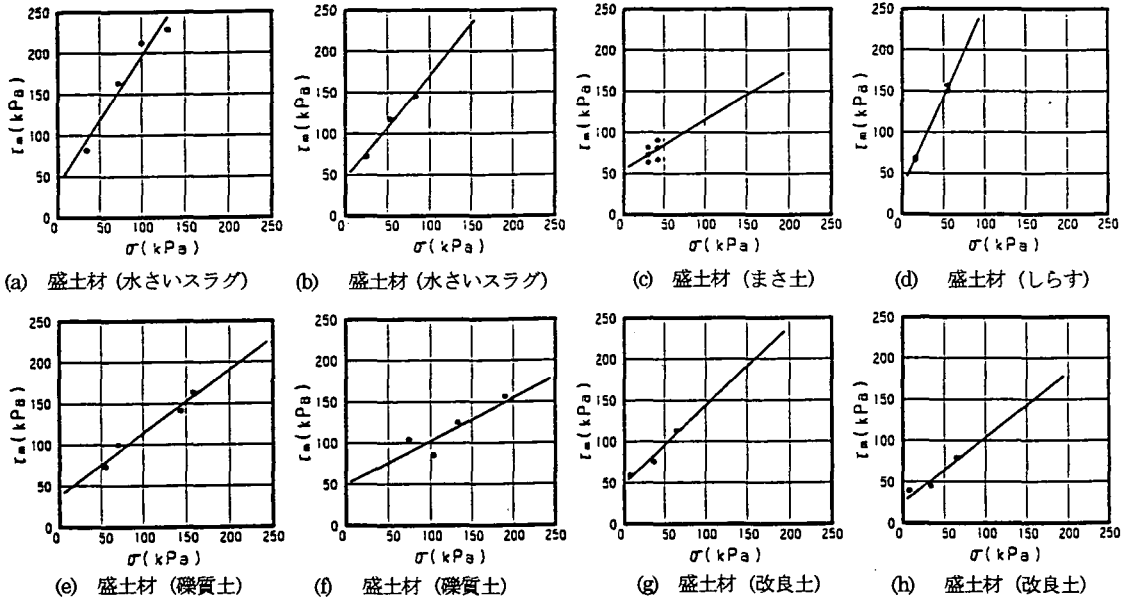
ここに示したものは、ストリップに作用する垂直応力 σ および盛土材の種別はさまざまであるが、図より摩擦係数 f はストリップ表面形状に関係なく、ストリップの土中長さ l_e が長くなるにしたがって減少するのがわかる。

表一 盛土材の土性

| 盛土材の種類 | 日本統一土質分類名 | 細粒分含有量 (%) |
|----------------|-------------------------------|------------|
| 軽量盛土材 (水さいスラグ) | (SP) | 2.0 |
| まさ土 | (SM) | 19.4 |
| しらす | (SV) | 30.1 |
| 礫質土 | (GF) | 15.0~25.0 |
| 改良土 | 細粒分含有量 46%の (SM) をセメント系固化材で改良 | |



図一六 ストリップ土中長さの影響



図一七 現場リブ付きストリップにおける σ と τ_m の関係

d) 盛土材の影響

現場引抜き試験結果を表一に示す盛土材別に σ と τ_m との関係で整理したのを図一七に示す。図よりリブ付きストリップに生じる τ_m は盛土材の種類により異なることがわかる。また、付着力等の σ に影響されない強度のばらつき(変動係数 $\delta=0.1990$)は小さいが、摩擦角の正接($\tan\phi$)のばらつき(変動係数 $\delta=0.5709$)は大きいことがわかる。

一方、平滑ストリップに生じる τ_m も同様に盛土材の種類により異なることがわかる(図一四、五参照)。

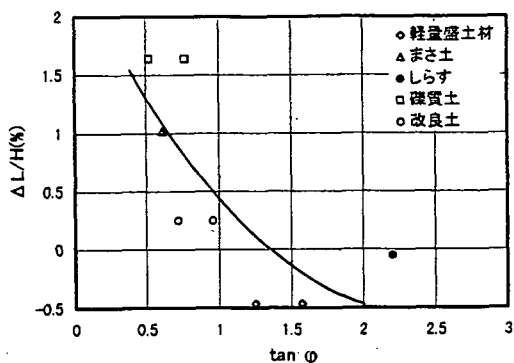
4. 考察

現場ストリップ引抜き試験より、リブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m が、リブ無しの平滑ストリ

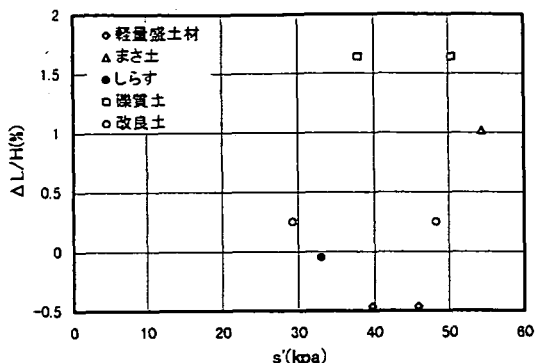
ップに発生する τ_m より大きいことがわかった。これはリブ付きストリップの場合、リブによりせん断面積が増加すること、せん断面がストリップと盛土材のせん断面と、盛土材と盛土材のせん断面の両方から構成され、せん断面の質が変化するためであると考えられる。

また試験結果より、リブ付きストリップと盛土材との間に発生する σ と τ_m の間にはクーロンの破壊規準式が成立し、 σ に影響されない強度が大きいことがわかった。この σ に影響されない強度は、付着力 s とリブと土粒子とのインターロッキングによる強度 α の和であると考えられるが、図一四より α の影響が大きいことがわかる。

($s + \alpha$)を s' で表すと、リブ付きストリップの摩擦係数 f は式(2)、(3)より、次のように表すことができる。



(a) $\tan\phi \sim \Delta L/H$



(b) $s' \sim \Delta L/H$

図—8 $\tan\phi$, s' と $\Delta L/H$ の関係

表—2 盛土材別壁面変位の測定値¹⁰⁾

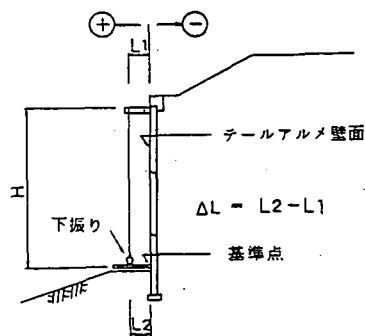
| 盛土材の種類 | 壁面変位平均値 $\Delta L/H(\%)$ | 測定数 |
|--------|-----------------------------|-----|
| 軽量盛土材 | -0.46 | 69 |
| まさ土 | 1.02 | 123 |
| しらす | -0.05 | 81 |
| {GF} | 1.64 | 120 |
| 改良土 | 0.25 | 49 |

$$f = \frac{\tau_m}{\sigma} = \frac{(s' + \sigma \tan\phi)}{\sigma} = \left(\frac{s'}{\sigma}\right) + \tan\phi \quad (4)$$

ここで、 s' 、 ϕ は定数であるので、 (s'/σ) は σ の増加に伴い小さくなり、 $\tan\phi$ は σ に関係なく一定である。以上より、摩擦係数 f は土かぶり厚さが小さいほど大きく、また土かぶり厚さが大きくなると f は小さくなることわかる。また、設計摩擦係数を満足し、かつできるだけ近似した τ_m を $\tan\phi$ を固定して求めると次のようになる。

$$\tau_m = 22.5 + \sigma \tan 36^\circ \quad (\text{kPa}) \quad (5)$$

次に現場におけるリブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m の $\tan\phi$ 、 s' と壁面変位との関係について考えてみる。図—7 に示した盛土材ごとのリブ付きストリップに発生する $\tan\phi$ 、 s' と、過去に調査した盛土材ごとの壁面変位平均値 (表—2) との関係を図—8 に示す。ここで壁面変位は、施工中の変位と施工後の変位の両方からなる盛土安定後の変位で、壁面の勾配で表す。すなわち、壁面下端からの鉛直線を基準とし、壁上端での変位量を ΔL 、測定間の高さを H として、 $\Delta L/H$ で示した。なお壁上端が前面側に出て、オーバーハングの状態を +、壁上端が鉛直線より背面側に引っ込んでいる状態を - とした (図—9 参照)。図—8 より、 $\tan\phi$ と $\Delta L/H$ には高い (負の) 相関があることがわかる。すなわち、



図—9 壁面変位

壁面変位は s' に依存せず、 $\tan\phi$ のみに依存すると考えられる。

これは、図—7 に見られるように s' は盛土材の種類に関係なくほぼ一定であるが、 $\tan\phi$ は盛土材の種類により変化することからもわかる。

5. まとめ

現場引抜き試験によるテールアルメ工法のストリップと盛土材との摩擦特性についてまとめると次のようになる。

- ① ストリップと盛土材との間に発生する σ と τ_m にはクーロンの破壊規準式 ($\tau_m = s' + \sigma \tan\phi$) が成立する。また、リブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m は、平滑ストリップと盛土材との間に発生する τ_m より大きく、特に σ に影響されないせん断強度が卓越している。これはリブ付きストリップの場合、リブによりせん断面積が増加することと、せん断面の質が変化することによるものと考えられる。
- ② 平滑ストリップと盛土材との間に発生する τ_m は、経時変化により増加する。この理由としては、平滑ストリップの表面が腐食して、盛土材との付着力が増加したためと考えられる。

- ③ リブ付きストリップの摩擦係数は、土かぶり厚さが小さいほど大きくなる。これはリブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m における付着力等が大きいためである。また、マニュアルによる設計摩擦係数を満足させるためのリブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m の近似値は、次のように表すことができる。

$$\tau_m = 22.5 + \sigma \tan 36^\circ \text{ (kPa)}$$

- ④ ストリップと盛土材との間に発生する摩擦係数 f は、ストリップの表面形状に関係なく、ストリップの土中長さ l_s が長くなるにしたがって減少する。
- ⑤ リブ付きストリップと盛土材との間に発生する τ_m は、盛土材により大きく異なることがわかる。また、付着力等の垂直応力に影響されない強度のばらつきは小さいが、摩擦角の正接 ($\tan\phi$) のばらつきは大きいことがわかる。
- 一方、平滑ストリップにおいても、 τ_m は盛土材により大きく異なる。
- ⑥ リブ付きストリップと盛土材との間に発生する摩擦角の正接 ($\tan\phi$) と壁面変位には、高い(負の)相関があるが、付着力等の垂直応力に影響されないせん断強度と壁面変位には相関がない。その結果、リブ付きストリップと盛土材との間に発生する摩擦角が大きいほど、壁面変位は小さくなる。

参考文献

- 1) 橋本良昭：補強土（テールアルメ）壁に用いるリブ付きストリップの摩擦特性について、土と基礎、Vol.31, No.9, pp.41~46, 1983.
- 2) 坂田康之, 平山浩靖, 熊田哲規：補強土（テールアルメ）壁における補強材の引き抜き試験について、第22回土質工学研究発表会, pp.1429~1430, 1987.
- 3) 若槻良行, 瓦川善三, 奥田和浩：補強土（テールアルメ）壁工法の現地引抜き試験, 日本道路公団試験所報告, Vol.26, pp.13~20, 1989.
- 4) 三嶋信雄, 星野克之, 瓦川善三：テールアルメ工法に用いた盛土におけるストリップの摩擦特性, 第28回土質工学研究発表会, pp.2765~2766, 1993.
- 5) 土木研究センター：補強土（テールアルメ）壁工法設計・施工マニュアル 改訂版 1988.
- 6) 小川憲保：テールアルメ工法における盛土材と壁面変位の関係, 土木学会論文集, No.493/Ⅲ-27, p.123, 1994.
- 7) 三嶋信雄, 佐藤修治：補強土壁工法の土と補強材との摩擦特性, 日本道路公団試験所報告, 1984.
- 8) 森 巖, 落合英俊, 田畑秀典：テールアルメに用いる補強材の摩擦特性について, 第27回土質工学研究発表会, pp.2465~2466, 1992.
- 9) Guilloux, A., Schlosser, F. and Long, N.T. : Etude du frottement sable-armature en laboratoire International conference on soil reinforcement Paris, Mars. 1979.
- 10) 文献⑥, p.122.

謝辞：本研究では、信州大学の川上 浩教授に有益なご助言を頂いた。ここに感謝の意を表します。

(1996. 8. 6 受付)

FRICIONAL CHARACTERISTICS OF STRIPS AND FILLING MATERIAL

Noriyasu OGAWA

We performed a series of pull-out tests of metal strips in in-situ under various conditions, and determined the required relationship between normal stress and shear stress both of which develop usually between strips and filling material. With the results obtained from the above-mentioned test, it has been learned that the Coulomb's failure criterion has been affected between them and, more over, obliquity of the wall facing will be less when friction angle developed between them is more.