

# 화강토에서의 띠 보강재의 걸보기마찰계수

Apparent Coefficients of Friction between  
Weathered Granite Soils and Strip Reinforcements

김 상 규\*<sup>1</sup>

Kim, Sang-Kyu

이 은 수\*<sup>2</sup>

Lee, Eun-Soo

---

## Abstract

Pull-out tests for three different types of strip reinforcements are performed to investigate variation of the apparent coefficient of friction which occurs between the reinforcements and the weathered granite soils with different contents of fine materials. The contents of fine materials for the soil sample are varied from 7% to 36% and the reinforcements used for the pull-out tests are smooth, ribbed steel strips and a textured shape Paraweb/Friction tie.

Test results show that the apparent coefficient of friction tends to decrease with the increase of the content of fine materials. It is known, however, that the minimum apparent coefficient of friction required to the design of reinforced earth structures can be achieved even at 35% fine contents by using appropriate reinforcements. The ribbed strip reinforcement is found to be the most effective in mobilizing the apparent friction when interacting to finer weathered granite soils. The textured reinforcement is also useful for 35% fine contents if the textured depth is increased.

## 요 지

화강토(화강암풍화토)의 세립자함유율에 따른 각종 띠형 보강재의 걸보기마찰계수의 변화를 알아보기 위하여 세립자함유율이 각각 7.28%, 19.58%, 35.86%인 3가지의 화강토 시료와 관형, 돌기형과 거친 무늬형의 띠형 보강재를 대상으로 인발시험을 시행하였다. 인발시험결과 세립자함유율이 증가하면 걸보기마찰계수는 감소하지만 세립자함유율이 35%인 화강토에서도 보강재 형상에 따라 보강토체 안정에 필요한 걸보기마찰계수를 얻을 수 있음이 확인되었다. 특히 돌기형

---

\*<sup>1</sup> 정희원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*<sup>2</sup> 정희원, 동국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

보강재는 세립자 함유율이 큰 화강토에서 매우 우수한 결과를 보였으며, 거친무늬형도 무늬깊이를 수정하면 35%의 세립자함유율의 화강토에 적용이 가능하다.

Keyword : Apparent coefficient of friction, Pull-out failure, Dilatancy, Direct shear failure, Potential failure mechanism

## 1. 서 론

보강토 공법 연구의 초기단계에서는 일반적인 직접전단시험을 이용하여 흙-보강재 간의 마찰계수를 얻었다. 그러나 보강토 벽체의 예상 파괴메커니즘(potential failure mechanism)을 분석해 보면 극히 일부분에서만 직접전단파괴(direct shear failure)가 일어난다. 즉 그림 1에서와 같이 A부분은 토체의 예상파괴면으로 둘러싸인 부분이 토체로부터 분리될 때 미끄러짐(sliding) 형태로 파괴된다. 다시 말하면 띠형 보강재로 구축된 토체의 임의 평면중 보강재가 있는 부분이 가장 전단저항력(shearing resistance)이 작기 때문에 보강재와 토사의 경계면에서 미끄러짐에 의한 직접전단파괴로서 직접전단시험에서 얻은 흙-보강재 간의 마찰계수의 적용이 적절하다.

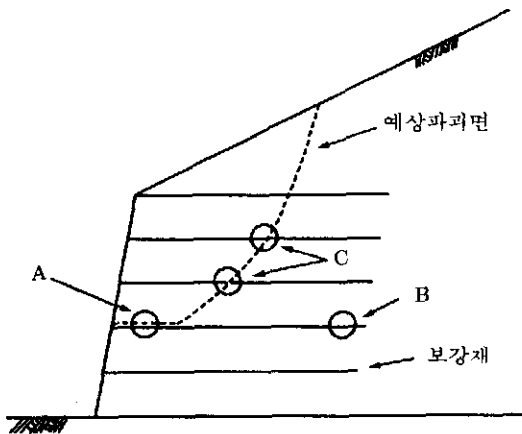


그림 1. 보강토체의 예상파괴형태

한편 B와 C점에서는 보강재를 분리토체의 이동방향으로 끌어당기는 인장력(tensile force)으로 인하여 인발파괴(pull-out failure)가 발생한다. 따라서 인발파괴메커니즘과 동일한 형태의 인발시험을 시행하여 흙-보강재 간의 실질적인 마찰계수를 얻어 설계에 적용함이 타당하다.

현재까지의 시험은 대부분 양질의 조립토(사질토)를 대상으로 시행하였으나, 우리나라의 지질분포를 감안할 때 세립자함유율이 많은 화강토를 대상으로 인발시험을 시행하여야만 현실적으로 유용한 설계인자를 얻을 수 있을 것으로 기대한다.

본 연구는 기존의 연구결과들을 고찰하고, 선택된 몇 가지의 화강토를 대상으로 띠형 보강재에 대한 인발시험(pull-out test)을 시행하여 세립자함유율의 변화에 따른 겉보기마찰계수(apparent coefficient of friction)의 변화 경향을 분석하였다. 이것은 뒤채움재로서의 세립 화강토의 적용한계를 결정하는 중요한 수단이 될 것이다.

## 2. 문헌고찰

보강토 공법의 개발 초기에는 직접전단시험 결과만으로 흙-보강재의 전단저항력을 결정하였다. 직접전단시험에서 얻은 흙-보강재의 마찰계수는 수직응력의 크기에 관계없이 일직선으로 나타나기 때문에 다음과 같은 간단한 수식으로 표현된다(Schlosser, 1978; 김, 이, 1996a, b).

$$f = \tan \delta = \mu \tan \phi' \quad (1)$$

$f$  : 흙-보강재의 마찰계수

- $\delta$  : 흙-보강재의 마찰각(°)
- $\phi'$  : 흙의 내부마찰각(°)
- $\mu$  : 흙과 흙-보강재의 마찰계수 비

이러한 직접전단시험결과는 인장력에 의한 파괴형태를 설명하기는 불충분하므로 보다 실제 상황과 일치하는 인발시험이 시도되었다. 최초에는 600mm 높이의 성토체를 판형 동판 때 보강재(smooth bronze strip : 150 × (800 ~ 1,000) × 0.2mm)로 그림 2와 같이 보강한 모델을 만들었다(Mevelllec, 1977). 특히 보강재 양단을 플라스틱 튜브로 보호하여 일정한 보강재 길이만이 균일한 수직응력을 받도록 하였다.

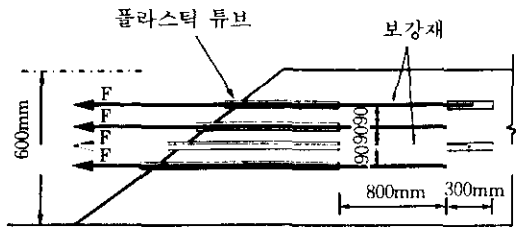


그림 2. 인발시험을 위한 최초의 모델(Mevelllec, 1977)

이와 같은 인발시험을 통하여 프랑스의 LCPC(Laboratoire Central des Ponts et Chaussées)는 인발저항계수를 순수한 마찰계수가 아닌 포괄적인 의미의 겉보기마찰계수(apparent coefficient of friction :  $f^*$ )로서 다음과 같이 정의하였다.

$$f^* = \frac{F}{2bl\gamma z} \quad (2)$$

- $F$  : 인발저항력(ton)
- $b$  : 보강재의 폭(m)
- $L$  : 보강재의 길이(m)
- $\gamma$  : 흙의 단위중량( $t/m^3$ )
- $z$  : 보강재 상부의 흙의 두께(m)

1976년 이후 이와 유사한 인발시험이 많은 연구자들에 의해 시행되었으며 그 결과로 현재의 보강토 설계이론이 정립되기에 이르렀다. 본 연구에서도 인발시험 결과를 LCPC 방법에 의하여 분석하였다.

### 3. 시 험

#### 3.1 화강토 시료의 특성

시험에 사용한 시료는 200번체 통과율이 각각 7.28%, 19.58%, 35.86%의 화강암질 풍화토(화강토)를 선택하고 인발시험전 동 시료의 특성을 알기 위한 일반적인 기초시험을 시행하였다.

##### 3.1.1 다짐전 흐트러진 시료의 특성

채취된 시료에 대한 기초시험결과를 요약하면 다음과 같다(표 1 및 그림 3 참조).

- A 시료는 화강편마암(granite gneiss)의 풍화토로서 비교적 풍화도가 낮아 구성입자의 크기가 매우 크고 점토 내지 실트크기 입자(0.074mm 이하)의 함유율은 7.28%에 불과 하며 채취전의 원지반은 모암의 구성조직(original texture)을 유지하고 있는 풍화암상태(completely weathered)이다. 입도분포가 양호하고 비소성이므로 성토재료로서 매우 좋은 재료이다.

- B 시료는 화강암(granite)의 풍화토로 입자의 크기가 비교적 크고, 결모양이 깨끗한 모래이며 세립자함유율(0.074mm이하)이 19.58%로서 일반 성토재료로서 양호한 재질이며 보강토 뒤채움재료로서도 최소기준을 만족시키는 적합한 재료이다.

- C 시료는 화강편마암(granite gneiss) 풍화토로 완전풍화 후 잔적토(residual soil) 상태로 모암의 구성조직(original texture)이 소멸된 시료이며, 0.074mm 이하의 세립자함유율이 35.86%이고, 0.015mm 이하의 세립자함유율이 24.19%로서 보강토 뒤채움재료의 최소기준에도 미달하는 부적합재료이다.

표 1. 호트러진 시료의 특성

시료	비중	함수비 (%)	최대입경 (mm)	입도분석결과				$C_c$ $\left(\frac{D_{60}}{D_{10}}\right)$	$C_u$ $\left(\frac{D_{30}}{D_{10} \times D_{60}}\right)$
				2mm 이상	2~0.074mm	0.074~0.015mm	0.015mm 이하		
A	2.69	10.37	50.8	70.17	22.55	3.98	3.30	56.5	2.7
B	2.65	15.78	19.1	4.47	75.95	13.64	5.94	11.5	1.4
C	2.69	21.20	19.1	28.51	35.63	11.68	24.18	450	0.8

흙의 분류		액성한계 LL(%)	소성지수 PI(%)	모암(채취위치)
U.S.C.S.	AASHTO			
GW-GM	A-1-a	N.P	N.P	화강편마암(충남 아산시 인주면 문방리)
SM	A-2-4	N.P	N.P	화강암(충남 천안시 성환읍 매주리)
SM	A-4	34.5	8.8	화강편마암(경기 남양주시 지금동)

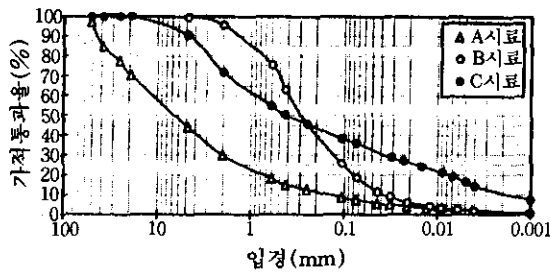


그림 3. 다짐전 화강토 시료의 입도분포 곡선

### 3.1.2 다짐후 흙시료의 특성

각 시료를 Procter D다짐 95%로 다졌을 때 입도분포곡선의 변화(그림 4 참조)와 그 특성을 표 1에 정리하였다.

- A 시료는 모암의 구성조직내의 불연속면이 다짐시 분쇄되어 입경이 세립화하기 때문에 파쇄도(index of crushing : IC)가 매우 크게 나타난다. 그러나 다짐에 의한 세립화이후에도 여전히 조립질의 입자가 많기 때문에 투수성이 양호하며 전단강도도 매우 크게 나타나는 특징이 있다.

- B 시료는 비교적 안정성이 큰 재료로서 파쇄도가 매우 낮으며 다짐전후의 특성변화가 거의 없다. 특히 세립자의 증가가 뚜렷하지 않

아 다짐전 입도분포만으로도 시료의 특성을 유추해석 가능한 재료이다.

- C 시료는 세립자함유율이 크기 때문에 파쇄도가 비교적 작게 나타나며 이는 일반적인 풍화토의 파쇄성과 잘 일치한다. 투수성이 세립자함유율에 비하여 완전불투수성이 아니며 간단한 배수시설로서 불포화 상태 유지가 가능한 재료로 판단된다. 즉 내부마찰각이 약 30° 정도로서 함수비 조절로 전단강도의 유지가 가능하다면 뒤채움재료로서 사용이 가능할 것으로 사료되는 재료이다.

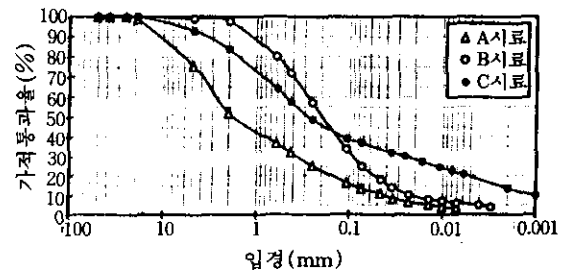


그림 4. 다짐후 화강토 시료의 입도분포 곡선

표 2. 다짐(D95%)후 흙 시료의 특성

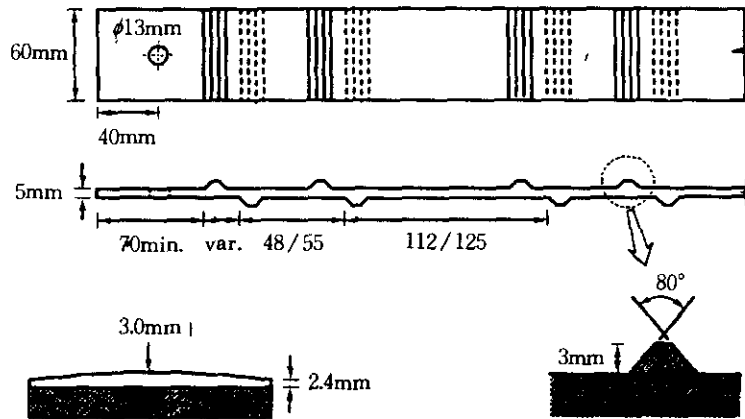
시료	비중	최대 건조 밀도 (g/cm <sup>3</sup> )	최대 입경 (mm)	입도 분석 결과				C <sub>u</sub> ( $\frac{D_{60}}{D_{10}}$ )	C <sub>g</sub> ( $\frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}}$ )
				2mm 이상	2~0.074mm	0.074~0.015mm	0.015mm 이하		
A	2.69	2.078	19.1	48.19	38.62	8.00	5.19	65.1	1.0
B	2.65	1.985	4.75	2.34	72.75	16.85	8.06	12.1	1.3
C	2.69	1.890	4.75	16.29	46.80	10.62	26.29	490	1.38

O.M.C. (%)	진극비 (e)	파쇄성 파쇄지수(IC)	직접 전단 시험		투수계수, k (cm/sec)	액성한계 LL(%)	소성지수 PI(%)
			점착력(kg/cm <sup>2</sup> )	내부마찰각(°)			
10.1	0.294	83.0	0.25	36.9	$2.0 \times 10^{-7}$	N.P	N.P
10.6	0.336	14.95	0.27	33.4	$7.0 \times 10^{-6}$	N.P	N.P
13.5	0.427	21.30	0.29	29.7	$2.0 \times 10^{-6}$	35.53	10.07

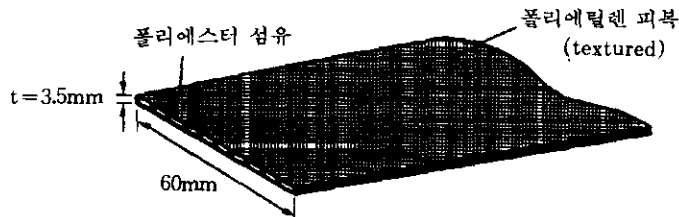
### 3.2 보강재 시편

본 연구를 위하여 사용된 보강재는 강판을 절단하여 제작한 판형 보강재 프랑스의 돌기형

보강재와 영국의 거친무늬형(ribbed) Paraweb(polyester 섬유다발을 고밀도 polyethylene으로 피복하여 표면을 거칠게 한 띠형 ge-



(a) 돌기형 보강재(Ribbed steel strip)



(b) 거친 무늬형(Paraweb/Friction tie) 보강재

그림 5. 보강재 시편(판형 보강재 제외)

표 3. 보강재 시편의 종류

시편	표면형상	표면재료	두께(mm)	비고
관형 강재 띠 보강재 (smooth steel strip)	매끄러운 평판형	강재	3.0	-
돌기형 강재 띠 보강재 (ribbed steel strip)	돌기형	강재	5.0	돌기높이 : 3.0mm
Paraweb(Friction tie)	거친무늬형 (textured)	HDPE	3.5	무늬깊이 : 0.5mm

omembrane보강재, 그림 5 참조)의 3종류를 선택하였으며, 각 보강재 시편의 폭을 60 mm로 일정하게 하였다.

### 3.3 시험장비 및 방법

본 연구에 사용된 시험장비는 그림 6과 같으

며, 토조는 Palmeira와 Milligan(1989)에 의하여 연구·발표된 바와 같이 경계조건의 영향을 배제하기 위해서 1340×800×800 mm로 충분히 크게 제작되었다.

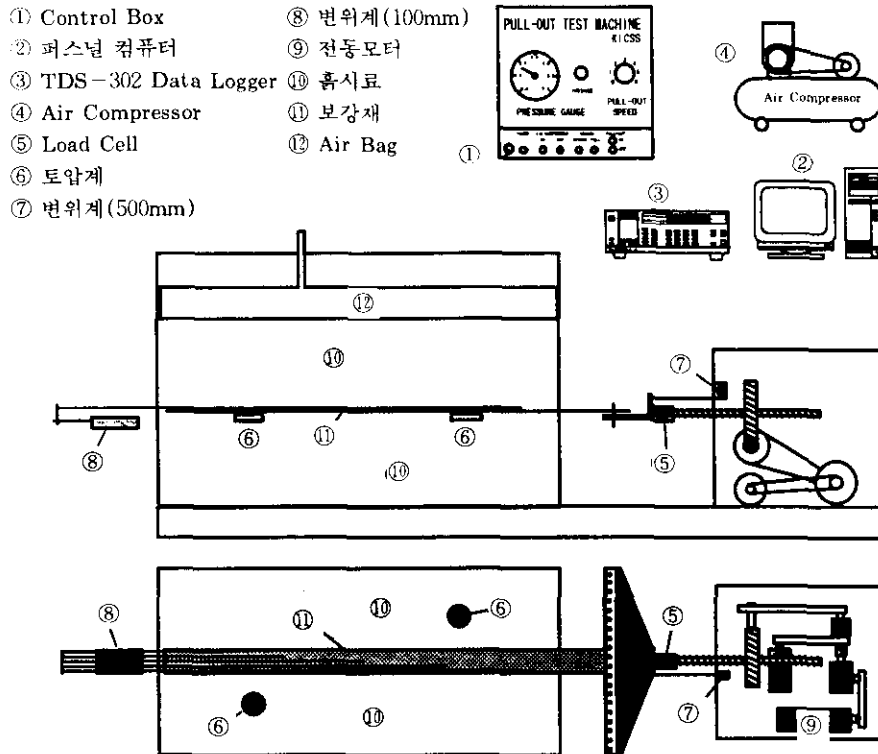


그림 6. 시험에 사용된 인발시험기

인발시험기의 인발장치는 전동모터에 의해서 구동되고 인발속도를 일정하게 유지할 수 있도록 제작되었으며, 시험시 인발속도는 1mm/min으로 고정되어 있다. 인발시에 나타나는 인발저항력은 인발장치에 부착된 로드셀(electronic load cell)에 의하여 자동으로 측정되며, 보강재의 인발변위는 토조박스 앞에 설치된 변위계에 의해서 측정된다.

화강토의 포설은 보강재 시편이 설치될 높이까지 2층으로 나누어 KSF 2312의 D다짐 95%가 되는 중량의 흙 시료를 tamping에 의하여 다지고 다시 보강재를 설치한 후 다시 2층으로 나누어 같은 방법으로 다져서 완성하였다.

채하장치는 상부경계를 유연한 면으로 고른 압력을 분포시키도록 토조의 상부에 air bag을 설치하였고, 공기압축기로 압축공기를 주입하여 상재압(overburden pressure)을 가하도록 제작되었으며, 이 때의 공기압은 control box의 압력계에 의하여 제어된다.

인발력, 인발변위 등의 측정데이터는 TDS-302 datalogger에 의해서 자동으로 기록된다.

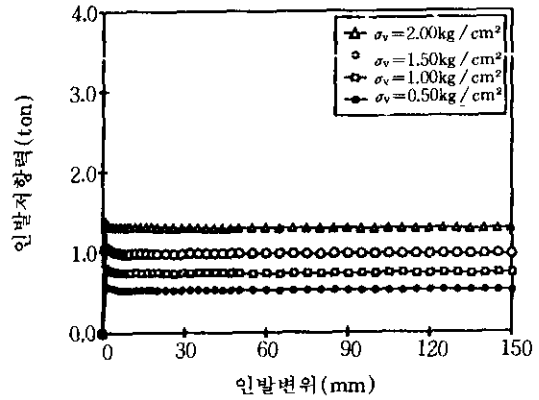
## 4. 시험결과

### 4.1 판형 보강재

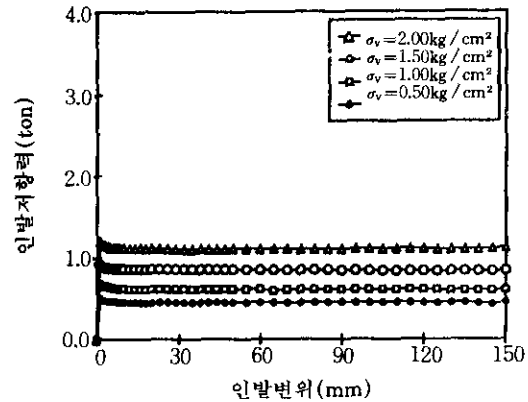
흙 시료의 종류에 관계없이 매우 작은 변위(1.0 mm 이내)에서 인발저항력이 최대값에 도달하며, 5~10 mm의 변위에서 급격히 감소하여 잔류값에 도달한다(그림 7 참조).

이 때의 잔류값은 최대값의 75~92% 정도로서 비교적 그 차이가 작으나 매우 작은 변위에서 나타나기 때문에 판형 보강재를 사용할 경우에는 잔류인발저항력으로부터 얻은 겉보기 마찰계수를 설계에 적용해야 함이 타당하다.

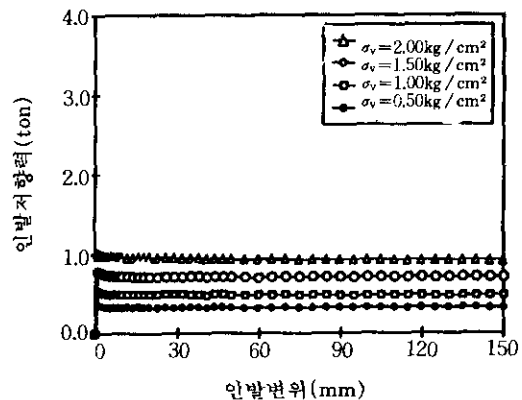
겉보기마찰계수는 공식(2)의 토피하중( $\gamma z$ )을 수직응력( $\sigma_v$ )으로 대체하여 산정하면 그림 8과 같다. 토피하중이 없는 경우의 겉보기마찰계수( $f^*$ )는 산출이 불가능하므로 그림 8에서 0.5~2.00kg/cm<sup>2</sup>까지 연장하여 추정하였다.



(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )

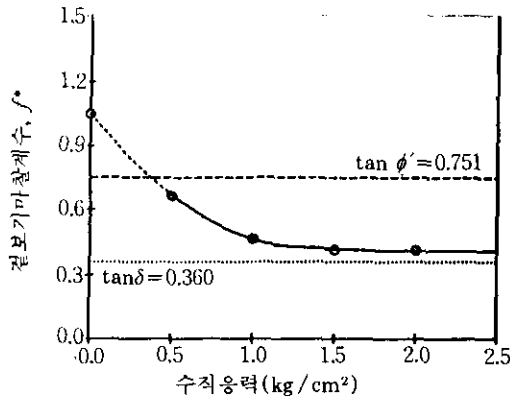


(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' 33.4^\circ = 33.4^\circ$ )

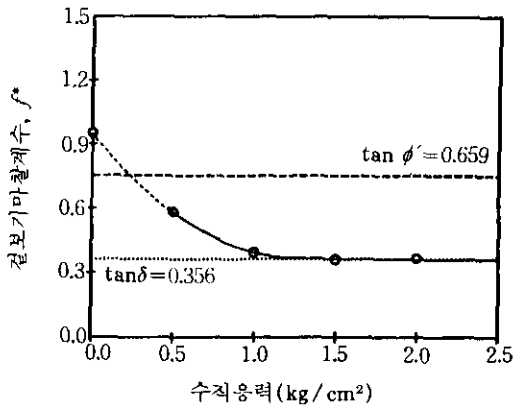


(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )

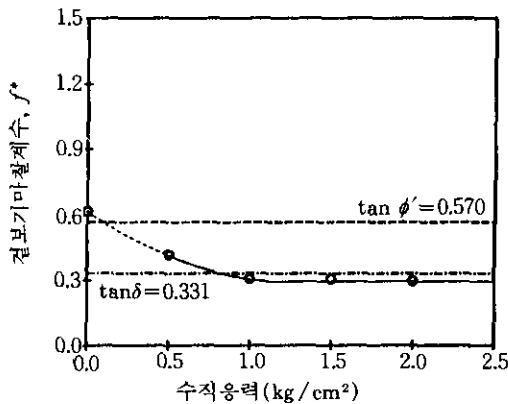
그림 7. 판형 보강재의 인발시험 결과



(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )



(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' = 33.4^\circ$ )



(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )

그림 8. 판형보강재에 대한 수직응력과 겉보기 마찰계수와의 관계

이러한 방법으로 추정된 겉보기 마찰계수는 A, B시료는 물론 C시료에서도 흙의 마찰계수보다 크게 나타났다.

인발시험에서 얻은 인발저항 겉보기마찰계수는 낮은 응력에서 높게 나타나고, 수직응력( $\sigma_v$ )이  $1.5 \text{ kg/cm}^2$ (환산토퍼 약 7.5m)가 되면 일정한 값으로 수렴한다. 다만 세립자함유율이 30%이상인 C시료에서는 수직응력( $\sigma_v$ )이  $1.0 \text{ kg/cm}^2$ (환산토퍼 약 5.0m)에서 최저값에 수렴하며 감소율은 다소 낮아진다. 즉 세립자함유율이 낮은 A, B시료에서는 겉보기마찰계수의 감소율이 약 40% 정도이나, C시료에서는 약 30% 정도이다.

판형 보강재의 겉보기마찰계수는 수직응력이 증가하면 직접전단시험에서 얻은 흙의 마찰계수( $\tan \phi'$ )에 미치지 못하며 세립자함유율이 35% 이상이면 흙 마찰계수의 약 52% 정도로 흙-보강재의 마찰계수( $\tan \delta$ )의 90% 이하가 된다.

세립자함유율이 증가하면 당연히 겉보기마찰계수는 감소한다. 세립자함유율의 증가에 따른 겉보기마찰계수의 감소율은 수직응력이 작을수록 크며 수직응력이 클수록 작다(그림 9 참조). 다만 판형 보강재의 겉보기마찰계수는 수직응력 변화에 예민한 변화를 보이지는 않는다.

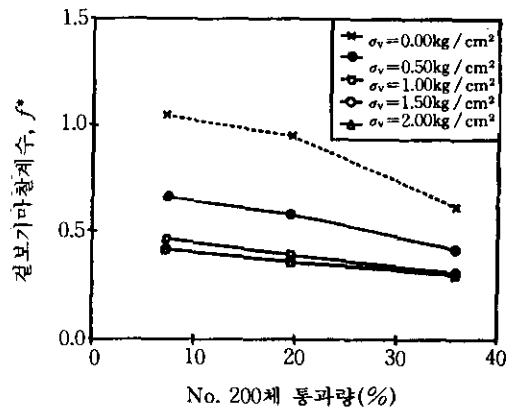


그림 9. 판형 보강재의 세립자함유율과 겉보기마찰계수,  $f^*$



표 4. 판형 보강재의 겉보기마찰계수,  $f^*$

수직응력 ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	A 시료 세립자함유율 7.28% $\phi = 36.9^\circ, \tan \delta_{\text{steel}} = 0.360$		B 시료 세립자함유율 19.58% $\phi = 33.4^\circ, \tan \delta_{\text{steel}} = 0.356$		C 시료 세립자함유율 35.86% $\phi = 29.7^\circ, \tan \delta_{\text{steel}} = 0.331$	
	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$
0.0	1.050	1.398	0.950	1.442	0.620	1.088
0.5	0.664	0.884	0.581	0.882	0.417	0.732
1.0	0.463	0.617	0.390	0.592	0.307	0.539
1.5	0.413	0.550	0.358	0.543	0.306	0.537
2.0	0.412	0.549	0.355	0.539	0.296	0.519

이러한 세립자함유율에 따른 겉보기마찰계수의 변화를 흙의 마찰계수비( $\mu' = f^*/\tan\phi'$ )로 분석해 보면 직접전단시험에서의 흙의 마찰계수비( $\mu = f/\tan\phi' = \tan\delta/\tan\phi'$ )와는 현저한 차이를 나타낸다. 즉 직접전단시험에서 얻은 마찰계수비( $\mu$ )는 세립자함유율이 증가함에 따라 증가하는 경향(김, 이, 1996b)이었으나, 인발시험에서의 마찰계수비( $\mu'$ )는 감소하는 경향을 보인다. 인발시험에서 얻은 겉보기마찰계수비( $\mu'$ )는 낮은 응력상태( $0.5\text{kg}/\text{cm}^2$ )에서 세립자함유율이 약 20%에 이르도록 거의 변화가 없으며 20% 이상이 되면 급격히 감소하여 세립자함유율 35%에 이르면 약 17%가 감소하는 한편 높은 응력상태( $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ )에

서는 세립자함유율의 영향을 거의 받지 않으며 불과 5% 정도만이 감소한다(그림 10 참조).

이와 같은 결과를 토대로 화강토 뒤채움재에 대한 판형 보강재의 겉보기마찰계수를 수직하중증가, 세립자함유율증가에 따른 감소요소로 구분하여 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$z \leq z_0 \doteq 5.0\text{m}$ 일 때

$$f^* = f^*_0 \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) + 0.52 \tan \phi' \frac{z}{z_0} \quad (3)$$

$$f^*_0 = 0.43 \left(1 - \frac{P_{200}}{40}\right) + 0.62 \quad (4)$$

$P_{200}$ : 200번체 통과 백분율

$z \leq z_0 \doteq 5.0\text{m}$ 일 때

$$f^*_0 = 0.54 \tan \phi' \quad (5)$$

#### 4.2 돌기형 보강재

돌기형 보강재는 판형에 비하여 매우 우수한 결과를 보여준다(그림 11 참조).

낮은 응력상태에서의 돌기형의 인발저항력은 양질의 뒤채움재인 A시료에서 판형의 6배나 되며 세립자함유율이 증가하면 점차 감소하지만 세립자함유율이 35.86%인 C시료에서도 판형의 4.8배나 된다. 높은 응력상태에서의 인발저항력은 A시료가 5.3배이며 C시료도 2.7배

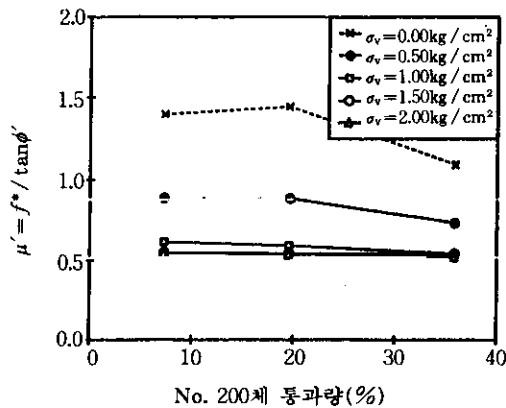
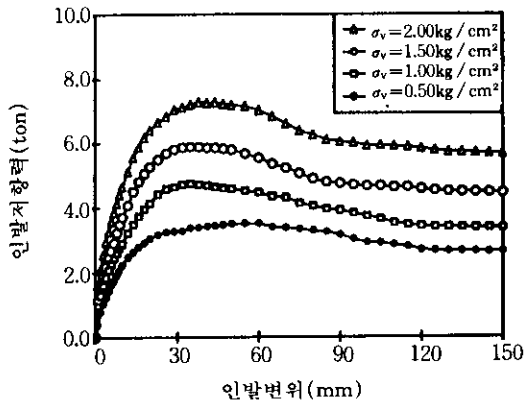
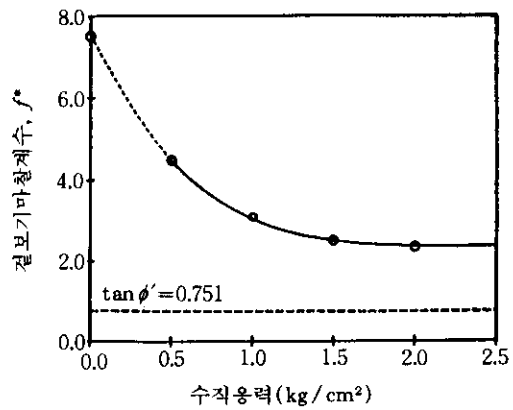


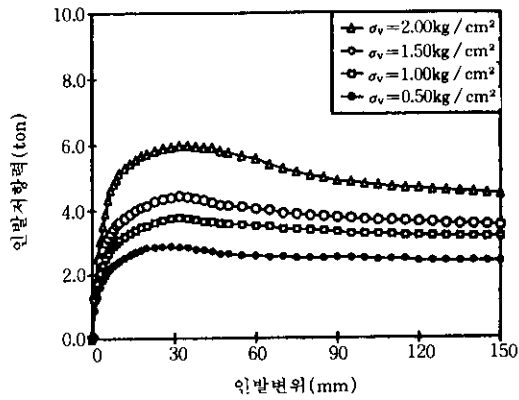
그림 10. 판형 보강재의 세립자함유율과 겉보기마찰계수비,  $\mu'$



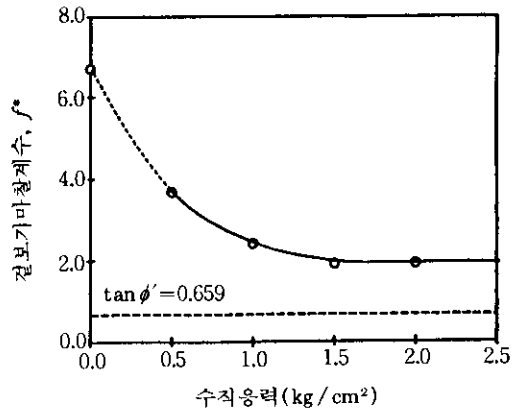
(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )



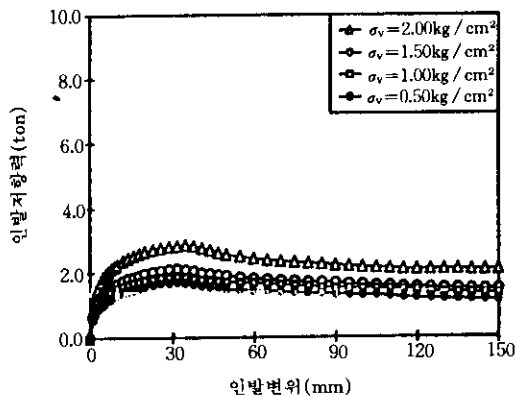
(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )



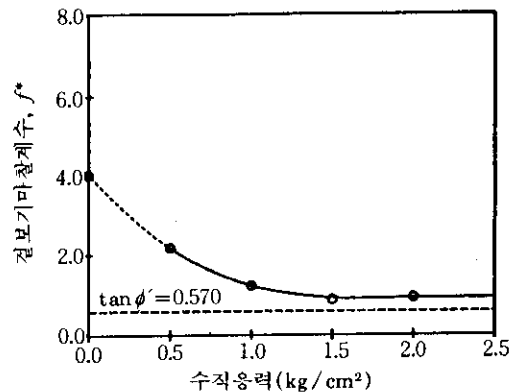
(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' = 33.4^\circ$ )



(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' = 33.4^\circ$ )



(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )



(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )

그림 11. 돌기형 보강재의 인발시험 결과

그림 12. 돌기형 보강재의 수직응력과 결보기마찰계수와의 관계

이다.

돌기형 보강재의 인발저항력은 최대값이 30~50mm의 매우 큰 변위에서 둔한 곡선 형태로 나타나며 60~90mm의 변위에서 최대값의 75~85% 크기로 수렴한다.

돌기형 보강재의 수직응력에 대한 걸보기마찰계수를 분석하여 그림 12에 도시하였다. 이 결과는 낮은 응력상태에서 수직응력이 증가하면 걸보기마찰계수는 급격히 감소하며 1.5kg/cm<sup>2</sup>(환산토폴 : 7.5m)부터 일정한 값으로 나타난다.

돌기형 보강재의 걸보기마찰계수는 불량한 뒤채움재인 화강토 C시료에서 토폴하중이 없는(no overburden) 경우의 걸보기마찰계수( $f^*$ )가 흙의 마찰계수( $\tan\phi'$ )의 6.4배인 4.0이나 되

었으며 높은 수직응력 상태에서의 최소값도 1.8배인 1.02로서 세립자함유율이 40% 정도의 화강토에서도 흙의 마찰계수 보다는 큰 값이 됨을 알 수 있다.

세립자함유율에 따른 걸보기마찰계수와 걸보기마찰계수비( $\mu' = f^* / \tan\phi'$ )의 변화를 각각 그림 13 및 그림 14에 표시하였다.

이 분석결과는 세립자함유율이 20% 이하 보다 20% 이상일 때의 감소율이 크게 나타났다. 특히 돌기형이 관형 보다 세립자함유율의 영향이 크다는 사실이 증명되었다. 즉 돌기형태의 보강재 형상으로 인한 부피팽창(dilatancy)의 영향은 양질의 뒤채움재에서 효과가 크게 나타나며 세립자함유율이 큰 불량한 뒤채움재에는

표 5. 돌기형 보강재의 걸보기마찰계수,  $f^*$

수직응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	A 시료 세립자함유율 7.28% $\phi = 36.9^\circ$		B 시료 세립자함유율 19.58% $\phi = 33.4^\circ$		C 시료 세립자함유율 35.86% $\phi = 29.7^\circ$	
	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan\phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan\phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan\phi'}$
0.0	7.500	9.987	6.700	10.167	4.000	7.018
0.5	4.473	5.956	3.667	5.564	2.162	3.793
1.0	3.032	4.037	2.412	3.660	1.204	2.112
1.5	2.514	3.348	1.897	2.879	0.907	1.591
2.0	2.337	3.112	1.915	2.906	0.907	1.591

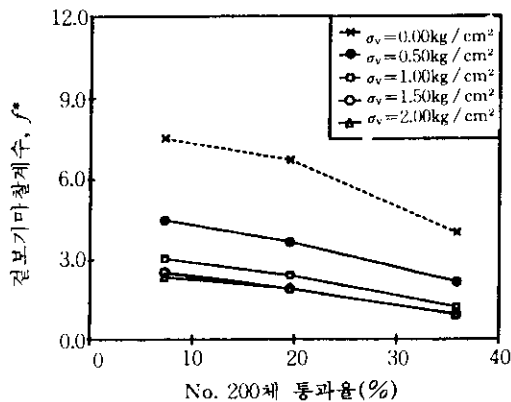


그림 13. 돌기형 보강재의 세립자함유율과 걸보기마찰계수,  $f^*$

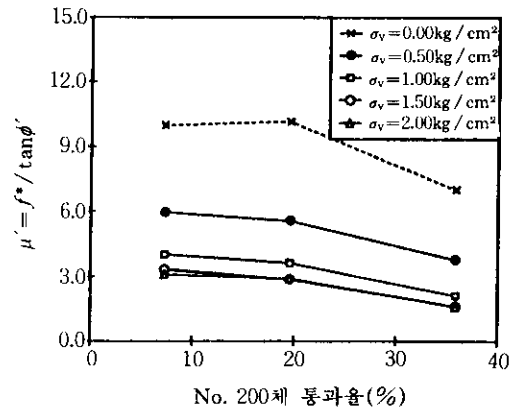


그림 14. 돌기형 보강재의 세립자함유율과 걸보기마찰계수비,  $\mu'$

효과가 감소한다. 그러나 최소한 흙의 마찰계수 크기의 겘보기마찰계수를 유지할 수 있다.

이러한 결과를 토대로 돌기형 보강재의 겘보기마찰계수를 수직응력의 크기, 즉 환산토퍼 6.0m 이상일 때 최소치인 흙의 마찰계수( $\tan\phi'$ )와 동일하다고 가정하고 판형 보강재와 같은 요령으로 다음과 같이 공식화 할 수 있다.

$z \leq z_0 \doteq 6.0\text{m}$  일 때

$$f^* = f_0^* \left(1 - \frac{z}{z_0}\right) + \tan\phi' \frac{z}{z_0} \quad (6)$$

$$f_0^* = 4.5 \left(1 - \frac{P_{200}}{40}\right) + 3.0 \quad (7)$$

$z > z_0 \doteq 6.0\text{m}$  일 때

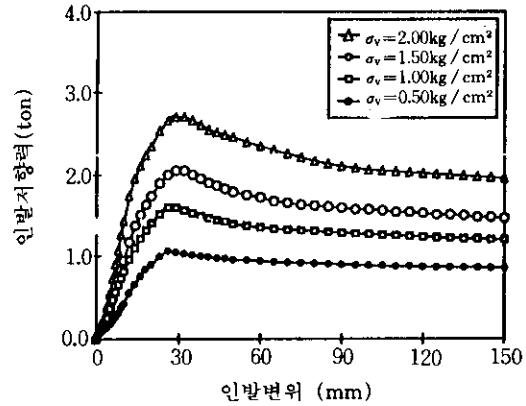
$$f^* = \tan\phi' \quad (8)$$

### 4.3 거친무늬형 보강재(Paraweb/Friction tie)

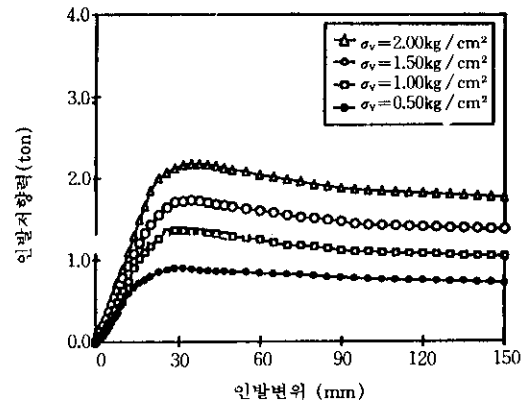
거친무늬형 보강재의 인발저항력은 판형과 돌기형의 중간 정도이다. 인발변위-저항력의 시험결과와 돌기형 보강재의 경향과 유사하며 25~40mm의 변위에서 최대값을 나타내고 점차 감소하여 90~100mm에서 최대값의 75~88% 크기로 수렴한다(그림 15 참조).

최대값과 잔류값의 차이는 세립자함유율이 낮으면 높은 응력상태에서 크게 나타나고 세립자함유율이 높으면 낮은 응력상태에서 크게 나타난다.

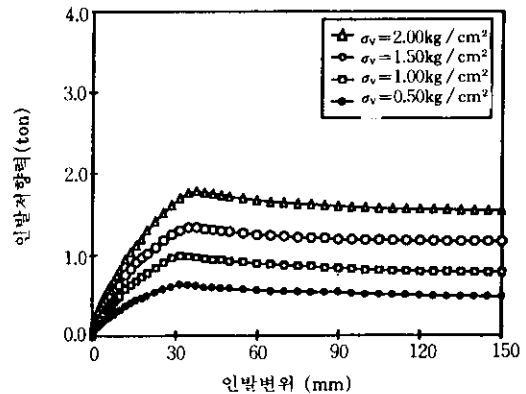
거친무늬형의 겘보기마찰계수를 분석한 결과는 그림 16 이다. 수직응력의 증가에 따라 겘보기마찰계수는 감소하며 세립자함유율이 작은 A, B시료에서는 수직응력  $2.0\text{kg}/\text{cm}^2$ (환산토퍼, 10m)에서, 세립자함유율이 높은 C시료에서는 수직응력  $1.5\text{kg}/\text{cm}^2$ (환산토퍼, 7.5m)에서 일정한 잔류값에 도달하였다. 토퍼하중이 없을(no overburden pressure) 때의 겘보기마찰계수( $f_0^*$ )는 세립자함유율이 작을수록 크게 나타나서 세립자함유율이 작을수록 수직응력의 변화에 따른 영향이 크다.



(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )

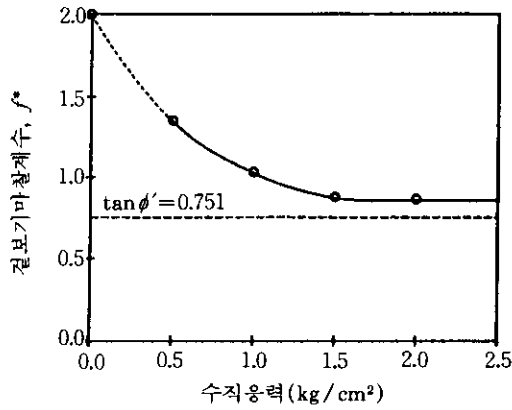


(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' = 33.4^\circ$ )

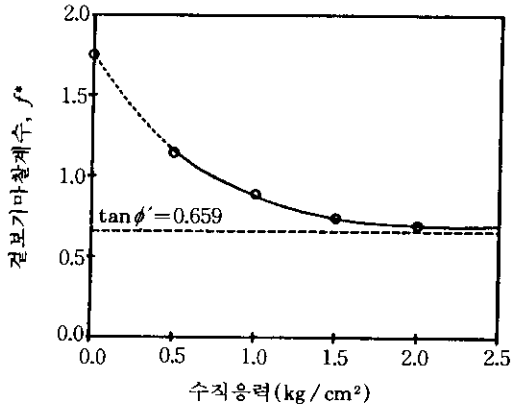


(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )

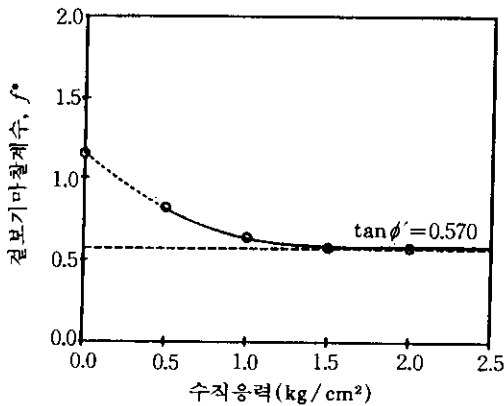
그림 15. 거친무늬형 보강재의 인발시험 결과



(a) A시료(세립자함유율 7.28%,  $\phi' = 36.9^\circ$ )



(b) B시료(세립자함유율 19.58%,  $\phi' = 33.4^\circ$ )



(c) C시료(세립자함유율 35.86%,  $\phi' = 29.7^\circ$ )

그림 16. 거친무늬형 보강재의 수직응력과 겉보기마찰계수와의 관계

세립자함유율과 겉보기마찰계수( $f^*$ )의 관계는 그림 17이다. 거친무늬형이 겉보기마찰계수는 수직응력이 낮으면 변화가 크며 높으면 변화가 둔하게 나타난다. 이러한 경향은 겉보기마찰계수비( $\mu' = f^* / \tan \phi'$ )와 세립자함유율과의 관계를 보면 더욱 분명하다(그림 18 참조). 낮은 응력상태에서는 약 25%가 감소하며 높은 응력상태에서는 약 13%만이 감소한다. 특히 낮은 응력상태에서 세립자함유율이 20% 될 때까지 겉보기마찰계수비는 작은 변화를 나타내지만 20% 이상이 되면 급격히 감소하는 경향은 띠형 보강재의 일반경향과 동일하다.

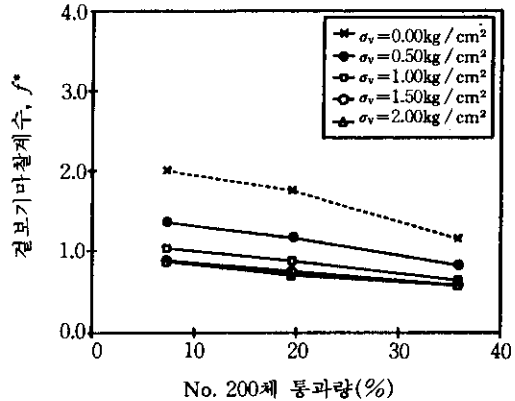


그림 17. 거친무늬형 보강재의 세립자함유율과 겉보기마찰계수,  $f^*$

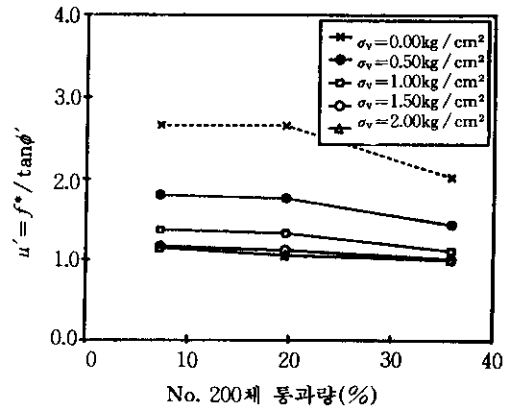


그림 18. 거친무늬형 보강재의 세립자함유율과 겉보기마찰계수비,  $\mu'$

표 6. 거친무늬형 보강재의 걸보기 마찰계수,  $f^*$

수직응력 (kg/cm <sup>2</sup> )	A 시료 세립자함유율 7.28% $\phi = 36.9^\circ$		B 시료 세립자함유율 19.58% $\phi = 33.4^\circ$		C 시료 세립자함유율 35.86% $\phi = 29.7^\circ$	
	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$	$f^*$	$\mu' = \frac{f^*}{\tan \phi'}$
0.0	2.000	2.663	1.750	2.656	1.150	2.018
0.5	1.355	1.804	1.162	1.763	0.817	1.433
1.0	1.092	1.370	0.874	1.326	0.636	1.116
1.5	0.875	1.165	0.740	1.123	0.575	1.009
2.0	0.864	1.150	0.697	1.058	0.572	1.004

거친무늬형의 걸보기마찰계수는 세립자함유율이 35.86%인 C시료에서도 최소값이 흙 마찰계수( $\tan \phi'$ )를 상회한다. 최종잔류값이 시료에 따라 환산토피, 10m에서 나타나지만 환산토피, 6.0m에서 잔류값이 도달한다고 가정하면 안전측이다.

따라서 돌기형 보강재의 경계조건 및 공식(6), (8)은 동일하며 공식(7)은 공식(9)와 같이 조정하여야 한다.

$$f_0^* = 0.85 \left( 1 - \frac{P_{200}}{40} \right) + 1.15 \quad (9)$$

## 5. 결 론

세립자함유율이 큰 화강풍화토의 보강토 뒤 채움재료로서의 이용성을 알아보기 위하여 특별히 제작한 인발시험기로 세가지 보강재에 대해 인발시험을 수행하였다. 시험결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 화강토/보강재의 걸보기마찰계수( $f^*$ )는 화강토의 세립자함유율이 증가함에 따라 감소한다. 특히 세립자함유율이 20%를 초과하면 감소율이 증가하며 낮은 응력상태에서 더욱 예민하다. 그러나 세립자함유율이 약 35% 정도일 경우라도 보강재 형상에 따라 보강토체 안정에 필요한 걸보기마찰계수를 얻을 수 있음이 시험을 통하여 확인되었다.
- (2) 세립자함유율이 35.86%인 C시료에서도

돌기형 보강재의 걸보기마찰계수는 기존 설계 적용제한식보다 1.5배 이상 큰 값으로 나타났다. 특히 낮은 응력상태에서는 약 2배 정도의 크기이므로 세립자함유율이 35% 정도의 화강토는 보강토 뒤채움재의 이용이 가능하다.

- (3) 세립자함유율이 작은 화강토는 다짐에서의 파쇄로 인한 영향에도 불구하고 양질의 사질토를 대상으로 한 실험 결과와 동일하며 세립자함유율이 작을수록 dilatancy의 영향이 커져서 더욱 큰 걸보기마찰계수가 나타난다.
- (4) 세립자함유율이 35% 정도인 화강토 시료에서 거친무늬형 보강재의 걸보기마찰계수는 흙 마찰계수( $\tan \phi'$ )를 약간 상회하였으나 그와 같은 화강토에 적용하려면 무늬깊이 (textured depth)를 더 크게하여 dilatancy의 효과를 증대시켜야 할 것으로 판단된다.
- (5) 거친무늬형 보강재의 걸보기마찰계수로부터 얻은 공식은 경계깊이( $z_0$ )를 6.0m로 조정하면 기존 설계 제안식과 거의 동일하며 다소 안전측이다.
- (6) 판형 보강재의 걸보기마찰계수는 세립자함유율이 작은 양질의 화강토에서도 충분한 값을 얻기 어렵다. 그러나 낮은 응력상태(환산토피, 5.0m 이하)에서는 비교적 큰 걸보기 마찰계수를 얻을 수 있으므로 제한적으로 이용될 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. 김상규, 이은수 (1996a), "보강토 구조물 뒤채움재료로서 화강 풍화토의 적용성", 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 1, pp.60~68.
2. 김상규, 이은수 (1996b), "화강토와 보강재 경계면에서의 마찰계수에 관한연구", 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 2, pp.107 ~ 114.
3. Ingold, T.S. (1982), "Reinforced Earth", Thomas Telford, London. pp.89 ~ 99.
4. M. O. T. of France (1980), "Reinforced Earth Structures : Recommendations and Rules of the Art", pp.3 ~ 4, 97~102.
5. Milligan, G.W.E. and Palmeira, E.P. (1987), "Prediction of Bond between Soil and Reinforcement", Proc. of Int'l Symp. on Prediction and Reinforcement in Geotechnical Engineering, Calgary, pp.147 ~ 153.
6. Palmeira, E.M., and Milligan, G.W. E. (1989), "Scale and other Factors effecting the Results of Pull-out Tests of Grids buried in Sand", Geotechnique 39, No. 3, pp. 511 ~ 524.
7. Scholsser, F. and Elias, V. (1978), "Friction in Reinforced Earth", Proc. ASCE Symp. on Earth Reinforcement, Pittsburgh, pp.735 ~ 762.

(접수일자 1996. 6. 10)