

화강토와 보강재 경계면에서의 마찰계수에 관한 연구

The Friction Coefficients of Interfaces
between Weathered Granite Soil and Reinforcements

김 상 규*¹
Kim, Sang-Kyu
이 은 수*²
Lee, Eun-Soo

Abstract

A series of shear tests is performed to measure friction coefficients of the interface between different reinforcements and weathered granite soils. The reinforcements tested are smooth steel strip, Paraweb(friction tie) and geotextile with rough surface, while the weathered granite soils are composed of different grain size distribution. Soils are compacted with the energy of 95% modified AASHTO and fully saturated before testing to simulate the worst site condition. Because of characteristics of the direct shear apparatus, shear strength is obtained in terms of drained condition.

Test results show that the more fines the soils contain, the larger ratio of friction coefficient($\mu = \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$) is obtained. Also the ratios are much higher for the Friction tie and the geotextile compared to the smooth steel strip. Those suggest that even weathered granite soils with 36% fines are possible to use as backfill of reinforced earth structures for the two reinforcements when a drainage system is provided.

요 지

다양한 입도 분포의 화강암 풍화토(화강토)에 대하여 각종 보강재와의 경계면 마찰계수를 얻기 위하여 직접전단시험을 수행하였다. 이 직접전단시험에 사용한 보강재는 강재편평대상보강재(smooth steel strip)와 표면이 거친 합성형 Paraweb(friction tie) 및 폴리에스터 직포(woven geotextile) 등이다.

함수비 변화에 따라 화강토의 전단강도가 변화하는 점을 감안하여 현장조건 중 최악의 상태인 포화도 100%로 하였으며, 직접전단시험의 특성상 배수조건을 전제로 하였다. 또한 현장의 다짐 효과에 대한 영향을 고려하여 수정다짐 95% 조건을 적용하였다. 그 결과 미세립자 함유율이 클

*¹ 정회원, 동국대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정회원, 동국대학교 대학원 토목공학과 박사과정

수록 마찰계수비($\mu = \frac{\tan \delta}{\tan \phi}$)가 증가하며, 표면이 거친 보강재(friction tie and geotextile)가 표면이 편평한 강재 보강재(smooth steel strip)에 비하여 마찰계수비가 매우 크게 나타남을 발견하였다. 이에 따라 배수상태를 유지하고 표면이 거친 보강재를 사용한다면 미세립자 함유량이 36% 정도인 화강토일지라도 보강토 뒤채움재료로 활용이 가능하다.

Keywords: Decomposed Granite Soil, The Ratio of Frictional Coefficients, Direct Shear Test, Paraweb(Friction tie), Drained Condition.

1. 서론

화강토는 통일분류법에 따르면 대부분 SM에 해당하는 토질이나 200번체 통과 미세립자 함유율이 지역별로 다양하게 나타나기 때문에 일정한 사질토의 성격으로 규정하기는 매우 어렵다. 한반도에 걸쳐 널리 분포하고 있는 화강토에 대하여 일반적인 성토 재료로서의 적합성에 관한 연구와 더불어 보강토체의 뒤채움재료로서 특성을 규명함은 보강토 공법 적용에 매우 가치 있는 연구이다.

특히 화강토는 풍화도 또는 모암의 경도에 따라 다짐 에너지의 영향으로 다짐 전후의 입도 분포가 변화할 가능성이 클 뿐만 아니라 이에 따른 투수성의 변화, 함수비 변화 및 배수 조건에 따른 전단강도의 변화가 비교적 예민하다. 화강토의 보강토 공법 적용에 있어 주목해야 할 점은 이와 같은 다짐 전후의 화강토 특성의 변화와 이와 관련하여 보강재와의 경계면에 발생 하는 마찰계수의 변화이다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 채취한 대표적인 시료를 대상으로 국내에서 이용되고 있는 보강재와의 직접전단시험을 시행하여 미세립자 함유량과 배수 조건에서의 마찰계수를 조사하고 그 결과에 따른 적용한계를 고찰하였다.

2. 문헌고찰

보강토체에 이용되는 뒤채움재에 관한 시방은 안정적인 마찰계수를 얻기 위하여 미세립

자 함유율을 15% 이하로 규정하였다. 그러나 현실적으로 현장내에서 이러한 시방규정에 적합한 뒤채움재를 얻기는 매우 어려운 실정이며 국내에 널리 분포하고 있는 화강토는 SM으로 분류되는 사질토이지만 시방에 만족하는 범위는 15%에 불과하다.(김, 이 1996) 다만 다양한 보강재의 표면형상에 따라 마찰 계수가 다양하게 나타나기 때문에 각각의 보강재에 대한 흙/보강재의 마찰계수를 설계에 적용한다면 미세립자 함유율을 일정하게 제한시키지 않아도 좋을 것으로 판단된다.

즉 종전에 사용하여 온 보강재에 대한 흙의 직접전단시험방법에 따라 대표적으로 사용되는 여러 보강재의 시험조건별 마찰계수($\tan \delta$)를 얻고 흙의 마찰계수에 대한 흙/보강재의 마찰계수의 비(μ)를 분석하여 경계범위를 설정하면 화강토의 일반적인 특성으로 평가할 수 있다. 이 때에 이용되는 공식은 다음과 같이 정의된다.

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

현재까지의 연구결과는 표면이 편평한 강재 보강재의 경우 $\mu = 0.5$ (Schlosser, 1973 $\phi = 43^\circ$ 의 양질의 뒤채움인 경우, $\delta = 25^\circ$) $\mu = 0.75$ (한양대 산업연구소, 1986 $\phi = 35.6^\circ$ 인 화강토, $\delta = 28.5^\circ$)로서 일정한 기준을 얻기가 어려울 뿐만 아니라 이에 대한 자료도 충분치 않다. Milligan and Palmeira(1987)에 따르면 표면이 편평한 강재보강재의 경우 $\mu = 0.4 \sim 0.65$ 이며, Geotextile의 경우 $\mu = 0.7 \sim 1.0$ 의 범위

서, 응력의 크기(stress level), 보강재 표면의 형태(type of surface : roughness), 뒤채움토사의 입경과 형태(size and shape of soil particle), 포화도(degree of saturation) 등이 영향요소라고 하였다. 이들 영향요소 가운데 인위적으로 관리가 어려운 포화도의 영향은 포화도가 100%에 가까울수록 흙의 전단강도가 감소하므로(Milligan and Palmeira, 1987, 김, 이, 1996) 최악의 조건(포화도 100%인 경우)에서의 결과만을 대상으로 하면 안전측이다.

다만 직접전단시험의 성격상 비배수상태의 내부마찰각(ϕ)을 얻기가 매우 어렵기 때문에 배수조건을 전제로 하였다.

3. 시험

3.1 시료의 특성

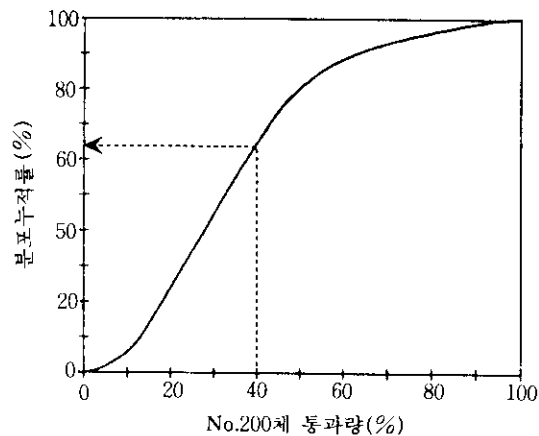


그림 1. 전국 분포 화강토의 미세립자 함유율에 따른 누적분포 곡선

3.1.1 화강토 시료

국내에 분포하고 있는 화강토의 미세립자 함유율과 누적분포율은 그림 1(김, 이, 1996)과 같다. 이렇게 다양한 분포상황에서 보강토 뒤채움재로 이용이 가능하리라고 추정되는 미세립자 함유율 40% 이하의 분포율은 약 65%에 이른다. 지금까지의 경험으로 미루어 수중구조물이 아닌 육상구조물인 경우에도 미세립자 함유율이 40% 이상인 화강토의 보강토 뒤채움재 사용은 매우 불안정하거나 비경제적이라고 판단된다. 따라서 시방기준 및 모든 조건을 만족시킬 수 있는 미세립자 함유율 7.28%의 A시료, 일반 시방규정에는 미치지 못하지만 최소조건 (15 μ m이하 10~20%)을 충족하는 미세립자 함유율 19.58%의 B시료와 사용한계에 근접하는 미세립자 함유율 35.86%의 C시료를 시료로 선택하였다.(그림 2. 참조)

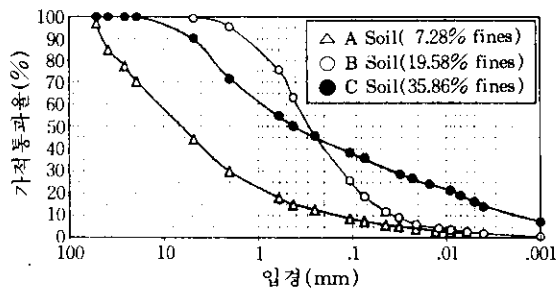


그림 2. 선택시료의 입도분포 곡선

표 1. 선택시료의 특성

시 료	200번체 통과율(%)	$\phi(^{\circ})$	C(kg/cm ²)	K(cm/sec)
A	7.28	36.9	0.25	2.0×10^{-4}
B	19.58	33.4	0.27	7.0×10^{-6}
C	35.86	29.7	0.29	2.0×10^{-6}

시험장비의 규격 때문에 4번체 이상의 골재 크기는 시험의 편차가 많을 것으로 판단되어 4번체 이상의 토립자는 제거하고 200번체 잔류 토로 전체 분포비율과 동일하게 대체 치환하였다. 이러한 시료선정방법은 실제 화강토 보다 조립률이 불량하게되어 전단강도가 다소 과소 평가되었다고 판단된다.

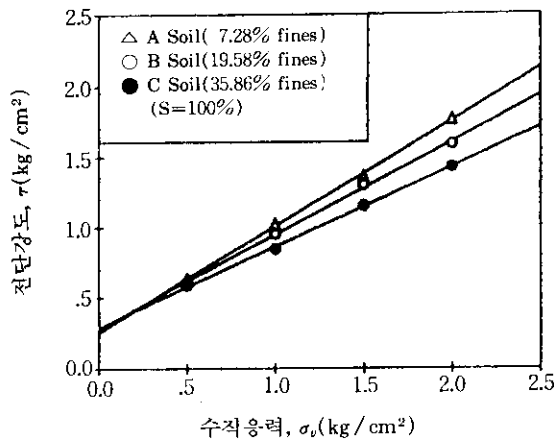


그림 3. 선택시료의 전단강도 특성(직접전단시험)

선택된 시료의 직접전단시험에 의한 포화도 100% 상황에서의 전단강도 특성은 그림 3.과 같으며, KSF 2312의 D 다짐, 95% 일때 나타

표 2. 보강재 시편의 종류

보강재	표면형상	재료	두께(mm)	제조원
Smooth steel strip	편평형	강재	3.0	-
Paraweb(friction tie)	거친무늬형(textured)	HDPE	3.5	E&S/GECO
Woven geotextile	직포표면상태	Polyester	0.9	Kolon

3.2 시험장비 및 시험방법

3.2.1 시험장비

직접전단시험에 이용된 시험기의 흙시료 전단상자(상부) 규격은 폭 60mm×길이 95mm의 직사각형이며, 하부Box가 수평이동하도록 고

난 투수계수와의 관계는 그림 4.이다.

3.1.2 보강재 시편

보강재로는 강재 편평대상 보강재(smooth steel strip)와 HDPE(high density polyethylene)의 거친표면(textured)형 Paraweb(friction tie라고도 하며 polyester 섬유를 polyethylene 으로 도포하여 strip형으로 제작한 geomembrance 보강재), Polyester직포(woven geotextile)를 시험 대상으로 선택하였다.

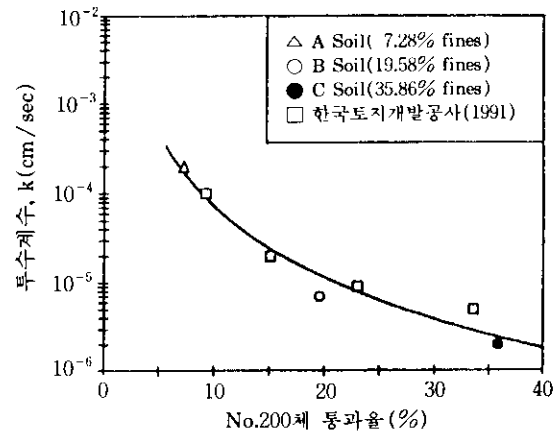


그림 4. 화강토의 미세립자 함유량과 투수계수와의 관계(D 다짐, 95%)

안된 것이다. 시료의 포화상태가 유지가능하도록 전단상자 외부에 물을 채울 수 있는 2중 상자 형태로 특별히 제작하였으며, 기타 직접전단시험의 하중재하 및 변위측정장치는 일반적인 시험장비와 동일하다.(그림 5. 참조)

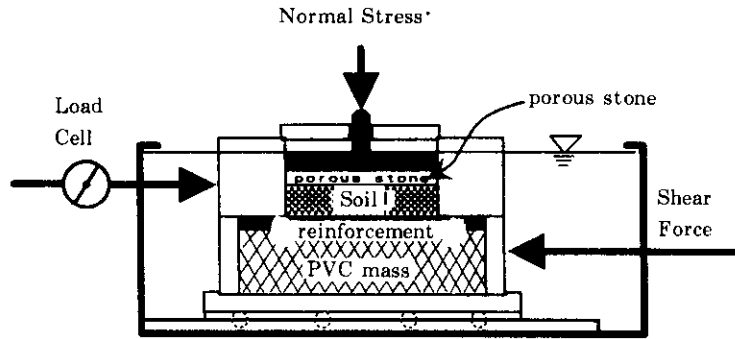


그림 5. 직접전단시험기 구조(nondimensional)

3.2.2 시험방법

프랑스(MOT : ministry of transportation)에서 추천하는 시험방법으로서 흙/보강재의 마찰각을 얻는 전통적인 시험방법을 이용하였다. 그림 5. 에서와 같이 하부 Box에는 처짐이 발생하지 않도록 P.V.C채움재를 보강재 두께만큼 얇게 채운후 시험하고자 하는 보강재를 직접전단시험기의 규격에 맞게 절단하여 설치하였다. woven geotextile의 경우 시험도중 밀림을 방지하기 위하여 하부 P.V.C채움재에 점착제를 도포하여 결합시키는 방법을 채택하였다. 상부의 흙 시료는 20mm 두께로 D 다짐, 95%시의 건조 중량의 흙 시료를 tamping에 의하여 규정한 다짐도를 얻었다.

포화도 100%를 얻기위한 예비시험으로 다

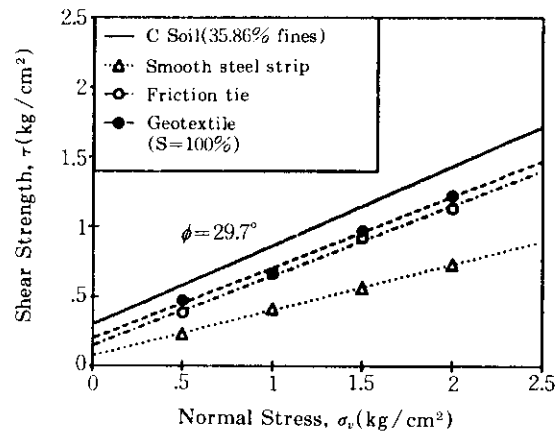
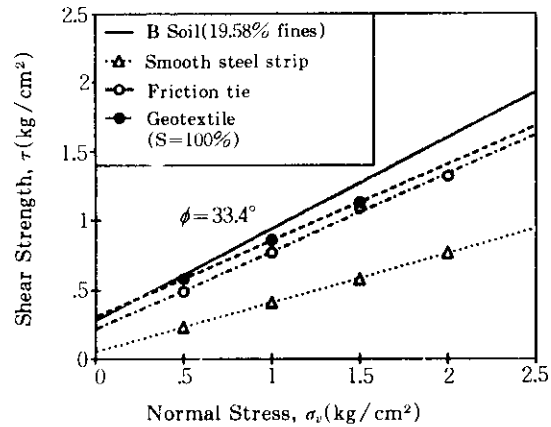
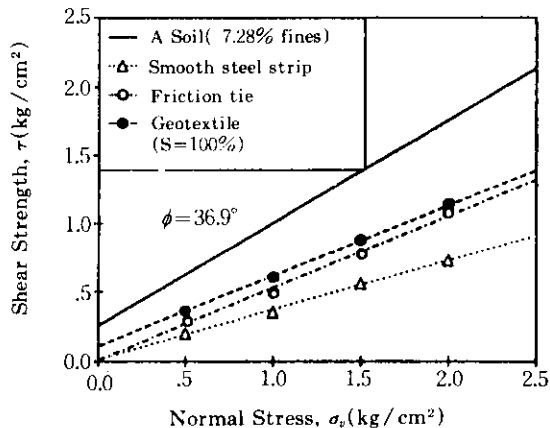


그림 6. 각 시료별 보강재의 직접전단시험결과

짐한 시료를 24시간 수침후 포화도를 측정된 결과 완전포화상태임이 확인되었으므로 상부

Box를 수조에 24시간 수침시킨후 시험기에 거치하여 수직하중을 가하면서 1mm/min의 속도로 전단시켰다.

4. 시험 결과 분석

A시료(미세립자 함유율 7.28%)의 경우 입도 분포곡선상에서 나타나듯 4번체 잔류율이 60%나 되어 200번체 잔류량으로 치환된 부분이 B, C시료에 비하여 매우 큰 특성을 가진 시료이다. 즉 A시료는 소규모의 직접전단시험에 이용하기 위하여 No. 4체 이상 크기의 조립토가 제거되었으므로 대형직접전단시험이 추가로 요구되는 시료이다.

표 3. 흙/보강재 경계면 마찰계수비

	Friction angle	Smooth steel strip		Paraweb(friction tie)		Woven geotextile	
	$\phi(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\mu = \frac{\tan\delta}{\tan\phi}$	$\delta(^{\circ})$	$\mu = \frac{\tan\delta}{\tan\phi}$	$\delta(^{\circ})$	$\mu = \frac{\tan\delta}{\tan\phi}$
A시료	36.9	19.8	0.48	27.5	0.69	27.0	0.68
B시료	33.4	19.6	0.54	29.2	0.85	28.8	0.79
C시료	29.7	18.3	0.58	26.6	0.88	27.0	0.89

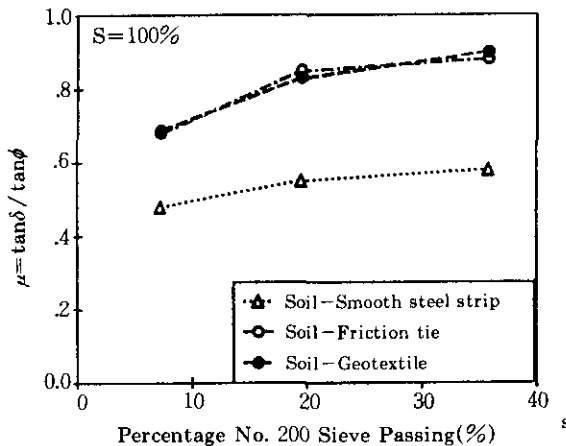


그림 7. No.200체 통과율과 마찰계수비(μ)와의 관계

• 그림 7.에 나타난 마찰계수비(μ)는 보강재 표면의 거칠기(roughness)에 따라 다소 차이는 있으나 미세립자 함유율이 증가하면 마찰계수비(μ)도 증가하는 것으로 나타났다. 그 이유

시험에서 나타난 결과는 다음과 같다.

• 흙/보강재의 마찰계수($\tan\delta$)와 흙의 내부마찰계수($\tan\phi$)에 대한 비(μ)는 편평보강재(smooth steel strip)의 경우 타 보강재와 같이 미세립자 함유량 증가에 따라 증가하는 경향은 동일하나 0.48~0.58 으로 증가율이 매우 작다. 그에 비하여 friction tie와 woven geotextile의 경우는 상대적으로 큰 증가율을 보이며 마찰계수비(μ)도 0.68~0.89로서 만약 미세립자 함유율이 더 큰 시료에 대한 시험을 행한다면 Milligan and Palmeira(1987)의 주장과 같이 1.0에 이를것으로 판단된다.(표3. 및 그림 7.참조)

는 그림 8.에서와 같이 입경이 작은 흙 시료일수록 예상 파괴면과 경계면 사이에 전단파괴시 잔존하는 흙 입자가 많기 때문에 굴림(rolling) 또는 미끄러짐(sliding)에 의한 파괴가 흙과 흙사이에서 발생하는 면적비율이 크게 되어 $\tan\delta$ 가 본래의 흙시료의 특성, $\tan\phi$ 에 근접하게 되는 것으로 보인다.

• 직접전단시험에서 얻은 설계인자는 보강토 옹벽의 파괴형태중 물체의 미끄러짐(sliding)파괴형태에 적용되는 부분이다. 보강토 옹벽의 또 다른 중요한 예상파괴는 보강재의 인발파괴(pull-out failure)이며 이를 분석하려면 직접전단시험에서 얻은 마찰계수보다 마찰저항과 점착력에 의한 포괄적 의미의 인발저항(pull-out resistance)을 나타내는 겉보기 마찰계수(apparent friction coefficient)를 인발시험으로부터 얻어야 한다. 특히 겉보기 마찰계수는 부피팽창(dilatancy)의 영향으로 보



그림 8. 거친 표면 보강재의 직접전단 예상파괴 개념도

강재 표면형태에 영향을 받지만 낮은 응력상태 (low stress level)에서 매우 큰 값으로 나타나며, 높은 응력상태 (high stress level)에서는 흙 시료의 마찰계수 ($\tan\phi$)값에 근접하는 특성이 있으므로 이에 대한 추가시험이 필요하다. (Schlosser and Elias, 1978)

표 4. 흙/보강재 경계면 점착력 잔존율

	Cohesion	Smooth steel strip		Paraweb(Friction tie)		Woven geotextile	
	kg/cm ²	C_R (kg/cm ²)	$\frac{C_R}{C} \times 100(\%)$	C_R (kg/cm ²)	$\frac{C_R}{C} \times 100(\%)$	C_R (kg/cm ²)	$\frac{C_R}{C} \times 100(\%)$
A 시료	0.25	0.01	4	0.01	4	0.13	52
B 시료	0.27	0.05	18.5	0.21	77.8	0.27	100
C 시료	0.29	0.07	24.1	0.14	48.3	0.20	69.0

C_R : 흙/보강재의 잔존 점착력. $\frac{C_R}{C}$: 보강후 점착력의 잔존율

5. 결론

위에서 논의된 내용을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 화강토에서 배수상태를 유지하면 보강재 표면 거칠기에 따라 마찰계수비(μ)는 0.68~0.90 정도를 얻을 수 있다. 그러나 편평보강재에서는 0.48~0.58으로서 0.5 이상을 설계에 적용할 수 없다.

- 표면이 거친(rough) 보강재의 경우 미세립자 함유율이 커짐에 따라 마찰계수비(μ)도 증가하므로 실제 적용하는 보강토 뒤채움재료에 따라 마찰계수비(μ)를 조정하여 설계에 반영할 수 있다. 미세립자 함유율이 커지면 흙의

- 점착력의 잔존율은 편평형보강재(smooth steel strip)의 경우가 가장 작게 나타났으며 A 시료에서는 무시할 정도로 작았다. 또한 friction tie 보다 woven geotextile의 점착력 잔존율이 비교적 높았으며 시료에 따라 일정치는 않으나 보강재표면의 거칠기에 따라 잔존 점착력이 크게 나타난다.(그림 6. 참조) 점착력 잔존율이 woven geotextile에서 friction tie 보다 큰 이유는 재료의 특성상 polyester섬유와 흙 시료의 결속력이 friction tie의 polyethylene보다 더 크며 흙 시료의 파괴면과 접촉면 사이에서 유발된 점착성분이 잔존하고 있다고 판단된다.

내부마찰각(ϕ)이 작아지지만 미세립자 함유율이 35.86%인 C시료의 경우도 $\delta \approx 27^\circ$ 에 이르기 때문에 화강토의 적용범위가 크게 확대될 가능성이 충분하다.

- 미세립자 함유율이 많은 뒤채움재료의 경우 전단강도를 구성하는 점착성분의 비율이 상당하므로 종전의 직접전단시험에서 얻은 내부마찰각(ϕ)만을 고려하는 설계방법은 지나치게 안전측 설계이다.

- 위와 같은 결론을 토대로 최근 개발된 grid형 보강재가 매우 큰 인발저항력을 동원하는 우수한 보강재 구조로 보고된 바 있으므로 향후 연구에서는 grid형 보강재의 직접전단시험을 위한 시험기의 대형화가 필요하며 보

강토옹벽 구조에서의 파괴형태를 고려한 pull-out 시험을 시행하여 복합적인 보강재의 인발저항력으로 부터 설계에 반영할 수 있는 토질별 걸보기 마찰계수를 결정하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김상규, 이은수(1996), "보강토 구조물 뒤채움재료로서 화강풍화토의 적용성", 한국지반공학회지, Vol.12, No.1, pp. 63~71.
2. 토지개발공사(1991), "화강암질 풍화토의 기층 및 보조기층 이용방안 연구"
3. 한양대학교 산업과학연구소(1986), "Friction tie의 인장강도 및 흙과의 마찰계수 시험연구", pp. 4~6.
4. Ingold, T. S.(1982), "Reinforced Earth", Thomas Telford, London. pp. 89~99.
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. M.O.T. of France(1980), "Reinforced Earth Structures: Recommendations and Rules of Art", pp. 128~130.
7. Scholsser, F. and Elias, V.(1978), "Friction in Reinforced Earth", Proc. ASCE Symp. on Earth Reinforcement, Pittsburgh. pp. 735~762.
8. Zornberg, J. G. and Mitchell, J. K.(1994), "Reinforced Soil Structures with Poorly Draining Backfills Part I: Reinforcement Interactions and Function", Geosynthetics Int'l. Vol.1 No. 2, pp. 103~147.

(접수일자 1996. 2. 5)