

자갈질 재료의 비선형적 전단강도 특성 평가법

Evaluation Method for Non-linear Shear Strength of Gravel Materials

신동훈¹⁾, Dong-Hoon Shin, 조성은¹⁾, Seong-Eun Cho, 임은상²⁾, Eun-Sang Lim, 박한규³⁾, Han-Gyu Park

¹⁾ K-water연구원 책임연구원, Principal Researcher, K-water Institute

²⁾ K-water연구원 선임연구원, Senior Researcher, K-water Institute

³⁾ K-water연구원 연구위원, Director, K-water Institute

SYNOPSIS : It is well known that the peak strength envelope of geomaterials with no cohesion, such as sand, gravel and rockfill, exhibits significant curvature over a range of stresses. In a practical design of slope, however, the linear Mohr-Coulomb's failure envelope is used as a failure criterion and consequently gives inaccurate safety factors, especially for some ranges of small normal stresses on shallow failure surfaces. Necessity of a nonlinear shear strength envelope in slope stability analysis is on this point. Hence, this study describes how to evaluate nonlinear shear strength of gravel fill materials using the results of large triaxial tests under consolidated-drained condition, and compares the safety factors from slope stability analyses for a homogeneous gravel fill or rockfill embankment incorporating the non-linearity of strength, so as to show its effects on safety factors.

Keywords : Shear Strength, Gravel, Rockfill, Failure Envelope

1. 서론

일반적으로 흙재료의 전단강도는 구속압(엄밀하게 말하면 전단면에 작용하는 연직응력)의 영향을 크게 받는다. 자갈이나 록필과 같이 점착력이 없는 지반재료의 경우에는 구속압이 작용하지 않을 경우 전단강도가 발휘되지 않으며, 구속압의 크기에 따라서 전단저항력이 비선형적으로 변화하고, 그에 따라서 전단강도 파괴포락선(failure envelope of shear strength)은 상당한 비선형성(non-linearity)을 나타낸다. 기존 연구에 따르면 과압밀점토(Bishop, Webb & Lewin, 1965; Atkinson & Farrar, 1985; Crabb & Atkinson, 1991; Perry, 1991)나 실트(Penman, 1953)인 경우에도 전단강도의 비선형성이 나타나고, 록필 재료(Charles & Watts, 1980) 및 절리가 많은 암석(West, 1987)의 경우에는 더욱 두드러진 비선형적 파괴포락선 형태를 나타내는 것으로 알려져 있다.

지반재료의 전단강도 파괴포락선식은 식(1)과 같이 파괴면에 작용하는 연직응력 σ_n , 점착력 c , 내부마찰각 ϕ , 절리면 거칠기 JRC , 밀도, 모암의 강도, 함수비 및 기타 인자의 함수로 나타낼 수 있다. 파괴포락선식에 많은 인자들이 포함되면 이론적으로는 그 재료의 전단거동을 보다 정확하게 표현할 수 있으나 실제로는 한개 내지는 세 개 정도의 인자들을 채택하여 나타내는 경우가 대부분이며, 함수식의 형태도 직선함수, bi-linear함수 또는 지수함수 등의 형태로 단순한 형태가 일반적이다.

직선함수 형태의 파괴포락선식으로는 식(2)와 같은 Mohr-Coulomb식이 가장 일반적으로 사용되고 있으며, Lefebvre(1981)는 bi-linear형태, de Mello(1977)은 tri-linear형태의 파괴포락선식을 제안한 바 있다.

$$\tau = f(c, \sigma_n, \phi, JCS, \text{밀도, 입도, 모암의 강도, 함수비, } \dots) \quad (1)$$

$$\tau = c + \sigma_n \tan \phi \quad (2)$$

$$\tau = A(\sigma_n)^b \quad (3)$$

여기서, 식(3)의 A 와 b 는 각각 삼축실험을 통해 구하는 실험상수

de Mello(1977), Charles & Watts(1980), Charles & Soares(1984), Collins et al.(1988), Maksimovic(1989) 및 Perry(1994) 등은 식(3)과 같은 멱급수(power) 형태의 파괴포락선식을 제안한 바 있다. Barton & Kjaernsli(1981)는 근본적으로는 식(3)과 동일한 형태이나 절리가 많은 암석재료에 대하여 식(4)와 같은 전단강도식을 제시하였하고, 동일한 개념을 록필재료에 적용하여 JRC 와 JCS 대신에 등가거칠기 R 과 입자의 등가강도 S 를 사용하여 록필재료의 내부마찰각의 구속압의존성을 식(5)와 같이 평가할 수 있음을 제시하였다.

$$\tau = \sigma_n' \left[JRC \cdot \log \left(\frac{JCS}{\sigma_n'} \right) + \phi_r \right] \quad (4)$$

여기서, τ : 최대전단강도, σ_n' : 전단면에 작용하는 유효연직응력, JRC : 절리면의 거칠기 계수로서 JCS 와 활동면에 작용하는 유효연직응력 σ_{n0}' 의 함수, JCS : 절리면벽체의 압축강도, ϕ_r : 잔류마찰각

$$\phi' = R \cdot \log \left(\frac{S}{\sigma_n} \right) + \phi_b \quad (5)$$

여기서, ϕ' : 록필재의 내부마찰각, ϕ_b : 암석표면의 기본 마찰각, R : 등가 거칠기, S : 입자의 등가강도(단위:MPa)

한편, Indraratna(1994)는 Barton & Kjaernsli의 제안식은 Figure 1에서와 같이 보통의 응력수준(300-700 kPa) 보다 작거나 큰 응력범위에서는 내부마찰각을 각각 과소평가하거나 과대평가하는 경향이 있음을 지적한 바 있다. 특히 식(5)의 경우에는 록필재료의 등가거칠기 R 와 입자의 등가강도 S 의 일반성에 대한 검증이 미흡하고, 암석표면의 기본마찰각 ϕ_b 의 대표값 산정이 용이하지 않아 실무 적용이 쉽지 않다.

따라서 본 논문에서는 댐 축조재료 중 자갈질 재료의 비선형적 전단강도 특성을 de Mello 등이 제시한 방법인 식(3)을 이용하여 평가하는 방법을 살펴보고, 식(3)을 댐 사면의 안정해석에 적용하여 전단강도의 구속압 의존성, 즉 비선형성이 사면의 안정성 즉, 안전율에 미치는 영향을 고찰하였다.

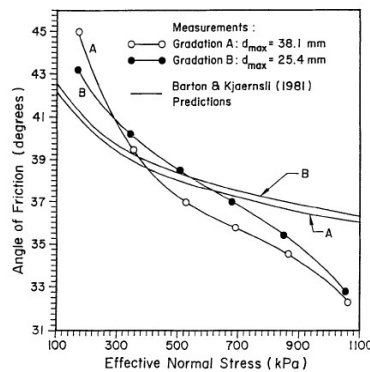


Figure 1. Comparison of friction angles by test results and prediction from Barton & Kjaernsli(1981)

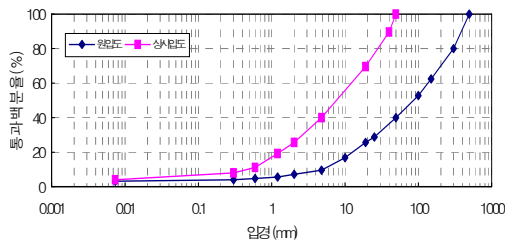
2. 자갈질 재료에 대한 삼축압축시험 결과

2.1 기본물성

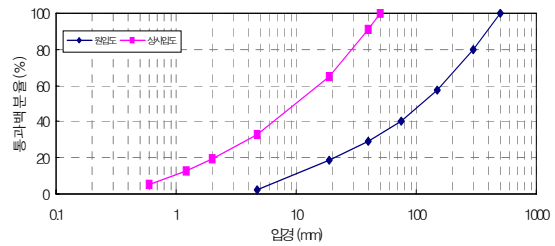
본 연구에서 사용한 자갈질 재료는 댐 축조재료의 일부로서 하천바닥에서 채취하였으며, 기본적인 물성은 Table 1과 같다. 삼축시험에 사용한 재료는 전단강도 특성 비교를 위해 자갈질 재료 2종류(A와 B)와 록필재료 1종류(C)를 사용하였다. 재료 A와 B는 기본물성이 거의 유사하나 재료 A에는 No.200체 이하의 세립자가 포함되어 있으나 재료 B에는 포함되어 있지 않고, 재료 C는 쇄석재로서 입자의 angularity가 재료 A 및 B 보다 크다.

Table 1. Physical properties of specimen

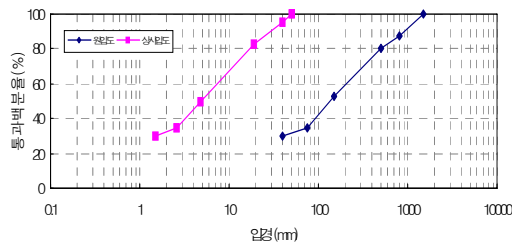
구 분	A(gravel)	B (gravel)	C(rockfill)	비 고
비 중	2.60	2.60	2.69	
마모율 (%)	32.1	30.8	29.6	
흡수량 (%)	0.65	0.67	0.73	
최대 입경 (mm)	원입도	500	1500	
	상사입도	50.8	50.8	
평균입경 D_{50} (mm)	7.3	10.0	5.0	



(a) Sample A



(b) Sample B



(c) Sample C

Figure 2. Gradation curves of specimen tested

2.2 삼축압축시험

삼축압축시험에 사용한 시험기는 직경 300mm, 높이 620mm의 원주형 공시체를 사용하는 대형삼축압축시험기이며, 축하중은 서보제어 시스템에 의해 가한다. 공시체는 다짐에너지를 $0 \sim 6.403 \text{ kgf} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3$ 로 변화시켜 가며 5층으로 분할 다짐시험을 실시하여 최대와 최소밀도를 구한 후 다짐에너지를 조절하여 상대밀도 75%의 밀도가 되도록 제작하였다. Figure 3은 다짐시험을 통해 구한 최대밀도와 최소밀도이며, 최대밀도는 다짐실험을 통해 구한 다짐에너지-밀도의 관계를 식(6)의 쌍곡선식으로 근사하여 구하였다. 식(6)에서 a 와 b 는 각각 실험계수이며, 식(6)을 식(7)과 같이 변환하여 다짐실험 데이터를 직선으

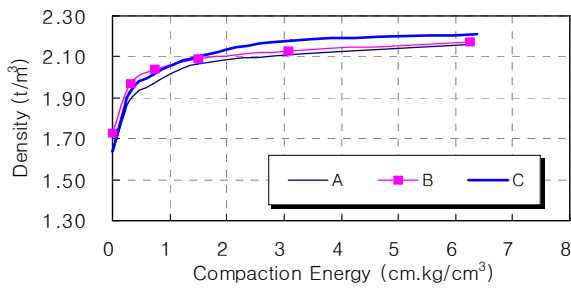
로 근사하여 구할 수 있다.

공시체를 포화시킨 후에는 미리 설정한 구속압 하에서 등방압밀을 완료하고, 배수조건으로 시료를 압축전단하면서 축하중-축변형율-체적변형율을 기록하였다. 구속압은 댐의 규모(높이 약 50m)를 고려하여 100, 200 및 400 kPa의 세 종류로 결정하였다.

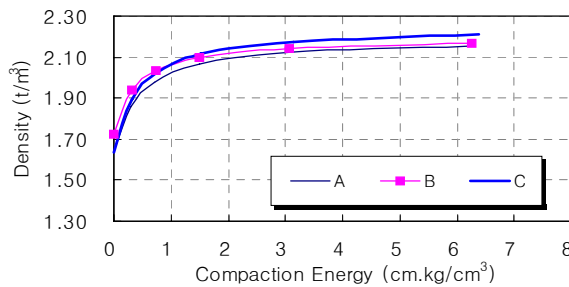
$$\gamma_d = \frac{E_c}{a + b \cdot E_c} \tag{6}$$

$$\frac{E_c}{\gamma_d} = a + b \cdot E_c \tag{7}$$

여기서, γ_d : 건조밀도 (tf/m^3), E_c : 다짐에너지, a 및 b : 실험계수



(a) Measured



(b) Predicted by hyperbola

A	$\gamma_d = \frac{E_c}{0.8283 + 1.7993E_c}$
B	$\gamma_d = \frac{E_c}{0.8105 + 2.1351E_c}$
C	$\gamma_d = \frac{E_c}{0.6900 + 1.6323E_c}$

Figure 3. Results of Compaction test for Sample A, B and C

Figure 4는 각각 재료 A, B 및 C에 대하여 삼축실험 결과로부터 구한 Mohr원과 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 나타낸 것이다. 재료 A와 B는 점착력과 내부마찰각이 거의 유사하나 재료 C는 점착력은 약 2~3배 작고, 내부마찰각 역시 약 2도 작게 나타났는데 이는 입자의 파쇄효과와 입도분포 차이에 의한 영향으로 볼 수 있다.

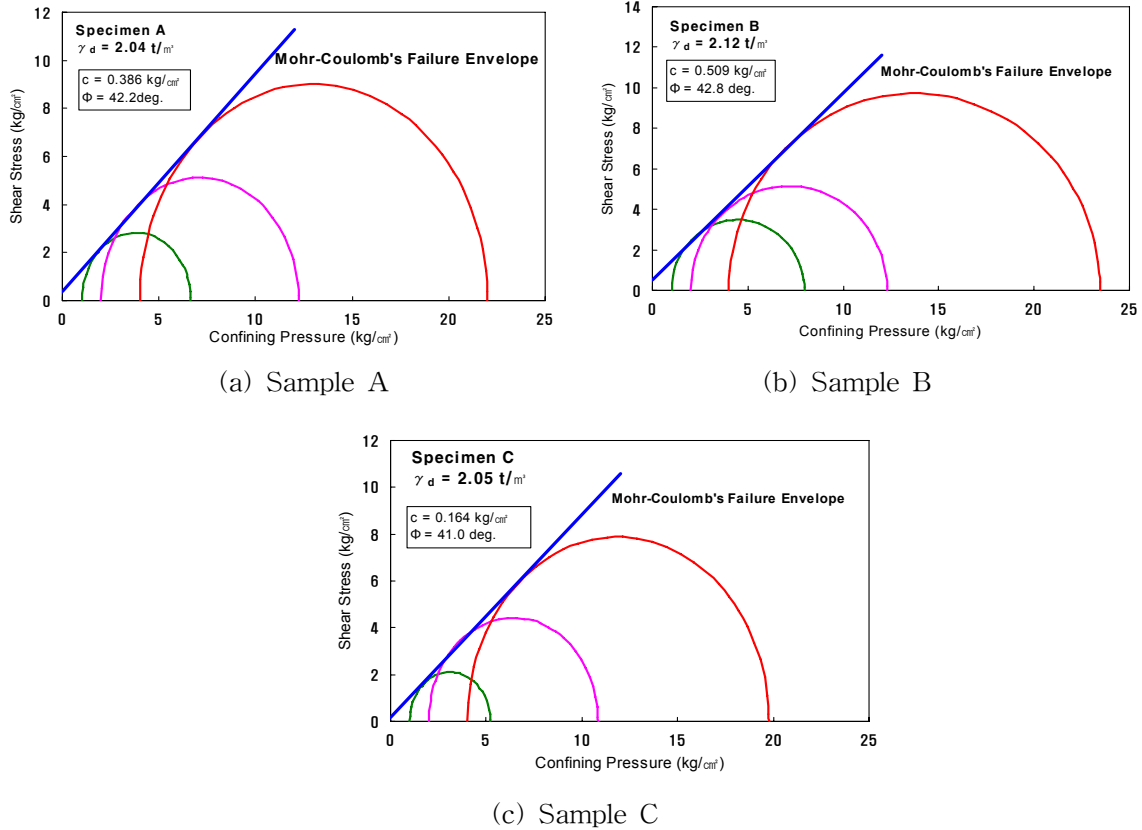


Figure 4 Mohr circles and Mohr-Coulomb's failure envelopes

3. 자갈질 재료의 비선형 전단강도 특성 평가

3.1 비선형(Power함수) 평가법

de Mello는 Marsal이 수행한 록필재료에 대한 대형삼축시험 결과를 분석하여 록필재료의 구속압 의존성을 고려할 수 있는 전단강도식을 식(3)과 같이 Power함수의 형태로 제안하였다. 식(3)의 실험계수 A 와 b 를 구하는 방법은 다음과 같다. 먼저 압밀배수 조건 하에 수행된 삼축시험결과로부터 구속압 σ_3' 와 파괴시 최대주응력 σ_{1f}' 의 관계를 양대수 그래프로 정리하면 Figure 5와 같고 이를 수식으로 나타내면 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{1f}' = n_0 P_a \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^m \quad (8)$$

여기서, P_a : σ_3' , σ_{1f}' 와 동일한 응력단위로 측정된 대기압 (보통 1.03 kg/cm^2), n_0 , m : 무차원의 정수

또한, 임의의 σ_3' 과 σ_{1f}' 에서의 Mohr응력원은 Figure 6과 같으며, 이때 내부마찰각은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다. 그리고 σ_3' 과 σ_{1f}' 은 식(8)의 관계가 있으므로 식(8)을 식(9)에 대입하면 식(10) 또는 (11)과 같이 나타낼 수 있어 내부마찰각의 구속압 의존성을 표현할 수 있게 된다.

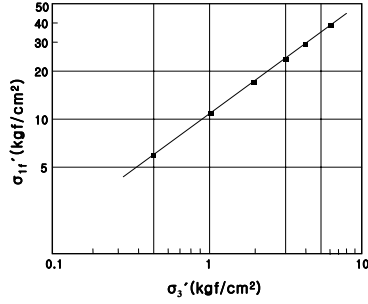


Figure 5. σ_3' vs. σ_{1f}'

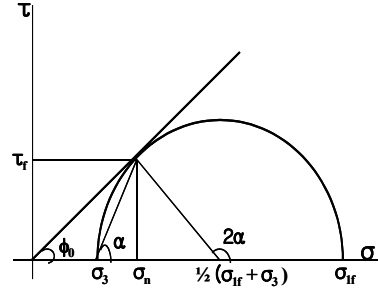


Figure 6. Mohr's circle and internal friction angle

$$\phi_0' = \sin^{-1} \left(\frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{\sigma_{1f}' + \sigma_3'} \right) \quad (9)$$

$$\phi_0 = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_0 \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^{m-1} - 1}{n_0 \cdot \left(\frac{\sigma_3'}{P_a} \right)^{m-1} + 1} \right\} \quad (10)$$

$$\phi_0' = \phi_{0f}'(\sigma_3') \quad (11)$$

한편, Figure 6에서 파괴면에 작용하는 수직응력과 전단응력은 식(12) 및 (13)과 같이 나타낼 수 있으며, 식(12) 및 (13)에 식(10)을 대입하여 정리하면 전단강도의 구속압 의존성을 식(14) 및 (15)와 같이 나타낼 수 있다. 또한 식(14) 및 (15)로부터 산정된 파괴면 작용하는 수직응력과 전단응력의 관계를 양대수 그래프에 도시하면 Figure 7과 같이 되고, 이를 수식으로 정리하여 식(16)과 같은 Power함수 형태의 전단강도식을 얻을 수 있다. 식(16)에서 보는 바와 같이 de Mello의 식은 암석재료의 전단강도를 구속압력의 함수(엄밀하게는 파괴면에 작용하는 수직응력의 함수)로 정의하여 실제와 잘 부합하는 파괴기준식으로 볼 수 있다.

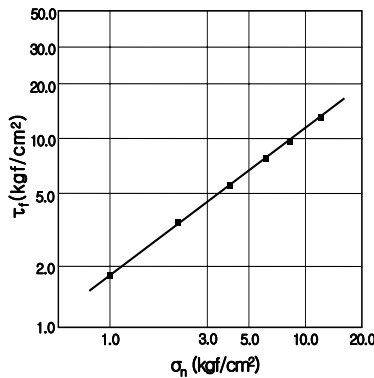


Figure 7. τ_f vs. σ_n

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_{1f}' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \sin \phi_0' \quad (12)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \cos \phi_0' \quad (13)$$

$$\sigma_n' = \frac{\sigma_{1f}' + \sigma_3'}{2} - \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \sin \phi_0(\sigma_3') \quad (14)$$

$$\tau_f = \frac{\sigma_{1f}' - \sigma_3'}{2} \cos \phi_0(\sigma_3') \quad (15)$$

$$\tau_f = A(\sigma_n')^b \quad (16)$$

3.2 파라미터 A, b의 산정

본 연구에서 사용한 자갈질 재료에 대한 삼축시험 결과로부터 de Mello의 비선형 전단강도 특성을 평가하기 위하여 구한 n_0 와 m , A 와 b 를 다음과 같이 산정하였다.

Figure 8은 각 재료에 대하여 파괴시의 최대주응력 σ_{1f} 와 구속압 σ_3 의 관계로부터 m 과 n_0 값을 구한 것이고, Figure 9는 식(14)와 (15) 및 Figure 8에서 구한 n_0 와 m 을 사용하여 A 와 b 를 구한 것이다. 각 재료의 n_0 와 m , A 와 b 값은 Table 2와 같으며, 표에서 보는 바와 같이 gravel재료와 록필재료의 A , b 값은 다소의 차이가 있는 것으로 나타났다.

Figure 10은 전단강도를 Power함수식으로 나타냈을 때(nonlinear failure envelope 사용시)와 Mohr-Coulomb식으로 나타냈을 때 파괴면에 작용하는 연직응력과 전단응력의 관계를 나타낸 것이다. Figure 10에서 보는 바와 같이 Mohr-Coulomb식 중 $c=0$ 인 경우(점선으로 표시)에는 전단강도가 과소평가됨을 알 수 있으며, Power함수식을 기준으로 볼 때 전단강도는 Figure 11에서와 같이 현저하게 과대평가 또는 과소평가하는 것으로 나타났으며, 이는 곧 사면안정해석시 안전율의 차이로 나타나게 되는데, 특히 연직응력(또는 구속응력)의 수준이 낮은 경우에는 그 차이가 매우 크게 나타나 $c=0$ 로 간주하는 경우 사면구조물을 과대하게 보수적으로 설계하는 결과를 초래할 수 있고, 사면의 실제 거동과도 차이를 나타낼 수 있다.

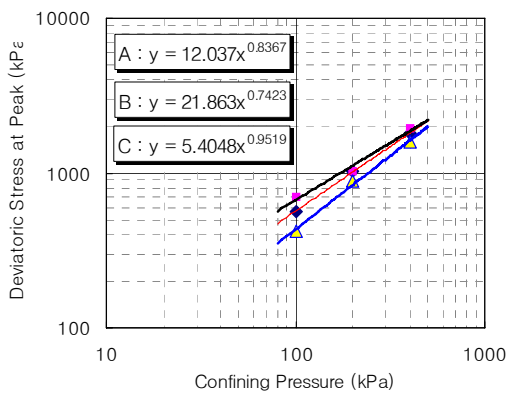


Figure 8. Determination of n_0 and m

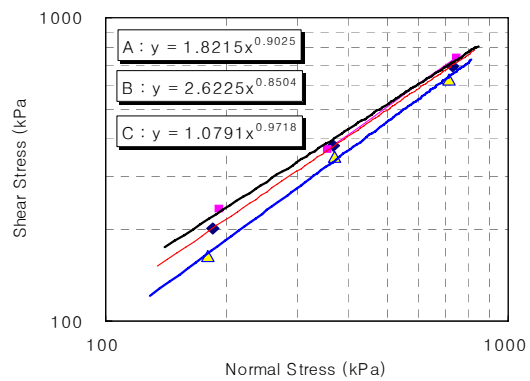
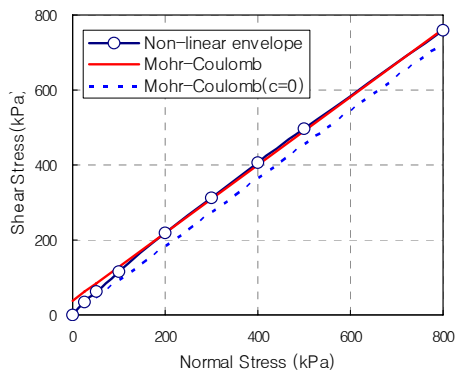


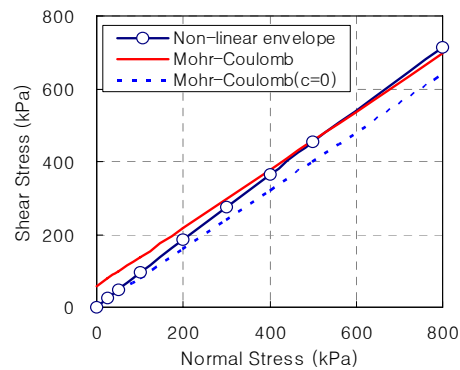
Figure 9. Determination of A and b

Table 2. n_0 , m , A and b

	n_0	m	A	b
Sample A	12.037	0.8367	1.8215	0.9025
Sample B	21.863	0.7423	2.6225	0.8504
Sample C	5.4048	0.9519	1.0791	0.9718

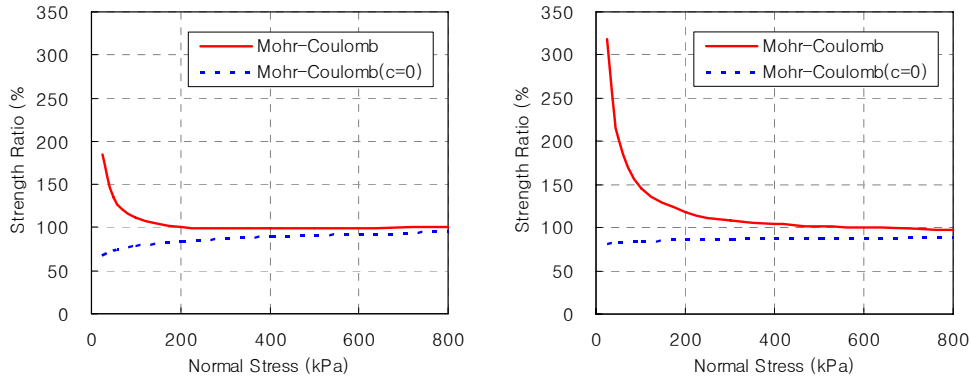


(a) Sample A



(b) Sample C

Figure 10. Comparison of nonlinear failure envelope and Mohr-Coulomb's one



(a) Sample A

(b) Sample C

Figure 11. Comparison of strength ratio with normal stress for nonlinear strength=100%

3.3 예제

필댐의 사면안정해석시 파괴규준으로 de Mello의 비선형 전단강도식을 사용할 때와 기존의 Mohr-Coulomb의 직선형 파괴포락선식을 사용할 때 안전율이 어떻게 다른지를 살펴보기 위해 다음과 같은 댐 단면을 상정하였다. 댐 형식은 표면차수벽형사력댐(concrete face gravel fill dam, CFGD) 또는 표면차수벽형석괴댐(concrete face rockfill dam, CFRD)이고, 사면구배는 이러한 형식의 댐에 있어서 가장 일반적으로 채택하고 있는 1:1.5로 하였다. 파괴규준에 의한 영향만을 검토하기 위하여 댐 단면을 Gravel Fill 또는 Rock Fill의 단일재료로 축조된 균질형 댐 단면으로 단순화하였고, 사면안정해석 프로그램으로는 SLOPE/W를 사용하였다. 해석에 사용한 입력파라메타는 Table 3과 같다.

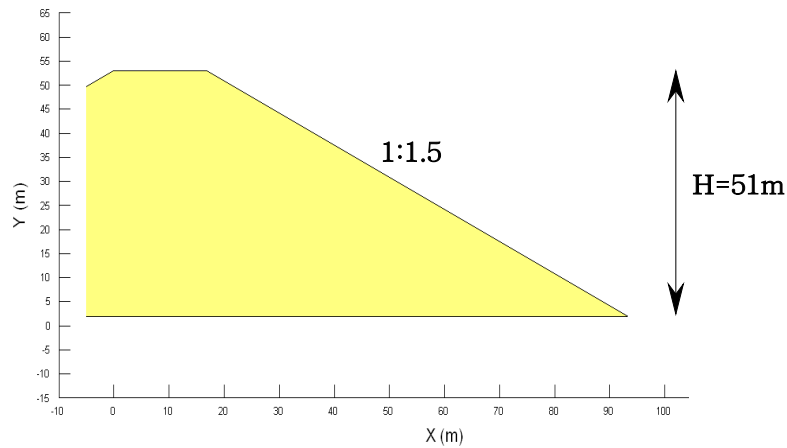


Figure 12. Section of CFGD or CFRD selected for slope stability analyses

Table 3. Input parameters for slope stability analysis by Bishop method

	전단강도 모델			
	Mohr-Coulomb 모델		비선형 모델(de Mello 모델)	
	점착력(kPa)	내부마찰각(도)	A	b
Gravel Fill	38.6	42.2	1.8215	0.9025
Rockfill	16.4	41.0	1.0791	0.9718

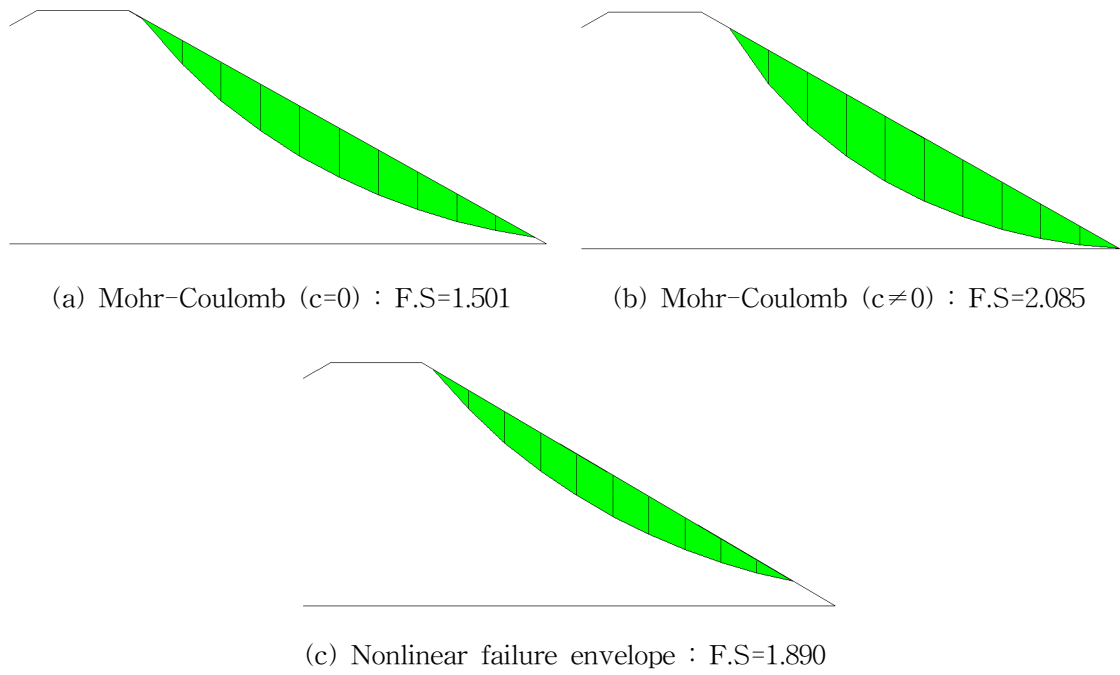


Figure 13. Critical slip surfaces of gravel fill slope

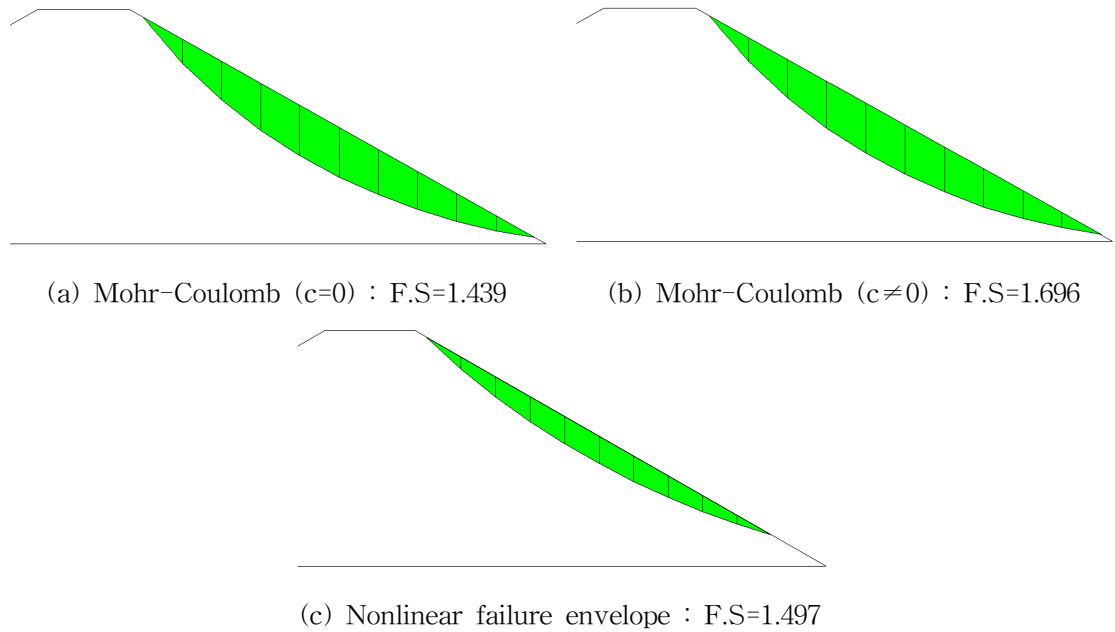


Figure 14. Critical slip surfaces of rockfill slope

Table 4. Safety factors calculated using Mohr-Coulomb's and nonlinear failure envelopes

	Safety Factors		
	Mohr-Coulomb's equation		Power equation (after de Mello)
	$c = 0$	$c \neq 0$	
Gravel Fill	1.501	2.085	1.890
Rockfill	1.439	1.696	1.497

Figure 13과 14의 사면안정해석결과로 부터 축조재료의 비선형적 전단강도 특성을 고려할 경우 Mohr-Coulomb의 파괴규준을 채택하는 경우 보다 실제에 가까운 안전율을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 즉, 비선형 전단강도를 사용할 경우, 겉보기 점착력을 무시하는 경우 보다는 크고 점착력을 고려할 때 보다는 작은 안전율 값을 얻을 수 있다. 이는 비선형 전단강도를 사용할 경우 축조재료의 점착력을 무시하여 과다설계가 되는 것을 방지할 수 있음을 의미한다.

한편, 비선형 전단강도를 사용할 때 b값이 1.0에 가까울 경우에는 파괴포락선이 직선에 가까워져 Mohr-Coulomb포락선에서 점착력을 무시한 경우와 비슷한 안전율 값을 얻어지게 되며, 이는 Table 4에서 록필재료로 축조된 사면의 경우 c=0일 때의 안전율과 비선형 전단강도식을 사용했을 때의 안전율이 거의 유사한 것을 통해 확인할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 댐 축조재료 중 자갈질 재료의 비선형적 전단강도 특성을 대형삼축시험 결과로부터 de Mello의 Power 함수식($\tau = A(\sigma_n)^b$)으로 평가하는 방법을 살펴보고, 자갈질재료 또는 록필재료로 축조된 균질형 댐 사면의 안정해석에 적용하여 종래의 Mohr-Coulomb파괴포락식과 비선형 전단강도식을 적용했을 때 안전율에 미치는 영향을 살펴보았으며, 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 자갈질 재료와 같은 비점착성 토질재료의 전단강도는 연직응력(구속응력), 점착력, 내부마찰각, 절리면 거칠기, 밀도, 모암의 강도, 함수비 및 기타 인자에 의해 영향을 받는다. 이중 밀도는 자갈질 재료의 전단강도에 가장 큰 영향을 미치는 인자이며, 본 연구에서는 다짐시험을 통해 구한 다짐에너지(E_c)-밀도(γ_d)의 관계를 쌍곡선식으로 제안하였으며, 실험치와 비교할 때 서로 잘 일치할 뿐만 아니라 최대밀도와 최소밀도를 합리적으로 구할 수 있는 것으로 나타났다.

$$\gamma_d = \frac{E_c}{a + b \cdot E_c} \quad (6)$$

(2) 전단강도를 Power함수식으로 나타냈을 때(nonlinear failure envelope 사용시)와 Mohr-Coulomb 식으로 나타냈을 때의 전단강도를 비교한 결과, Mohr-Coulomb식은 c=0로 한 경우에는 전단강도를 과소평가하고, c≠0인 경우에는 전단강도를 현저하게 과대평가하여 댐 단면의 안전율이 과소 또는 과대평가됨으로써 결국 댐 단면 설계가 비경제적(c=0일 때)이거나 너무 낙관적(c≠0일 때)이 되어 불합리할 수 있는 것으로 나타났다. 그러나 전단강도를 Power함수로 표현할 경우에는 자갈질 재료의 실제 전단거동과도 잘 일치하며, 사면안정해석시 Mohr-Coulomb식에 의한 것 보다 합리적인 안전율 값을 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 신동훈 등(2002), "Rock재료의 내부마찰각의 구속압 의존성", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집.
2. Barton, N. and Kjaernsli, B.(1981), "Shear Strength of Rockfill", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.107, No.GT7, July, 1981, pp.873-891.
3. Charles J.A. and Watts K.S. (1980) The influence of confining pressure on the shear strength of compacted rockfill, *Geotechnique*, 30, 353 - 67.
4. Charles, J.A. and Soares, M.M.(1984) ; "The Stability slopes in soils with nonlinear failure envelopes", Canadian Geotechnical Journal, Vol.21, pp.397-406
5. Indraratna, B.(1994), "The Effect of Normal Stress-Friction Angle Relationship on the Stability Analysis of a Rockfill Dam", Geotechnical and Geological Engineering, 1994, 12, pp.113-121.

6. Jiang, J.J., Baker, R. and Yamagami, T.(2003), "The Effect of Strength Envelope Nonlinearity on Slope Stability Computations", Canadian Geotechnical Journal, 40, pp.308-325.
7. Leps, T.M.(1970), "Review of Shearing Strength of Rockfill", Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.96, No.SM4, July, 1970, pp.1159-1170.
8. Lefebvre, G.(1981), "Strength and Slope Stability in Canadian Soft Clay Deposits", Canadian Geotechnical Journal, Vol.18, pp.420-442.
9. Maksimovic, M.(1989), "Nonlinear Failure Envelope for Soils", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.115, No.4, April, 1989, pp.581-586.
10. Perry, J.(1994), "A Technique for Defining Non-linear Shear Strength Envelopes, and Their Incorporation in a Slope Stability Method of Analysis", Quarterly Journal of Engineering Geology, 27, pp.231-241.