

정압(CD)조건의 개량형 일면전단시험과 단순전단시험에 있어서 강도특성에 관한 연구 Strength Character of the Condition of Consolidated Constant pressure with Improvement One-Dimension Shearing Test and Simple Shearing Test

김재영¹⁾, Jae-Young Kim, Akihiko Ohshima²⁾, Naotoshi Takada³⁾, 김동현⁴⁾, Dong-Hyun Kim,
소충섭⁵⁾, Choong-Seop So

1) (주)삼보기술단 기반사업부, 공학박사, Ph., Doc., SAMBO Engineering Co., LTD.

2) Assistant Professor, Dept. of Urban Engineering, Osaka City University

3) Professor, Dept. of Urban Engineering, Osaka City University

4) (주)삼보기술단 이사, 공학박사, Ph., Doc., SAMBO Engineering Co., LTD.

5) (주)삼보기술단 전무, SAMBO Engineering Co., LTD.

개 요 : 일면전단시험은 전단면의 응력을 직접 측정하므로 평면변형시 강도를 파악할 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있으며, 시험조작이 간편하기 때문에 실용적으로도 우수한 것으로 판단된다. 그러나 사질토의 경우, Dilatancy에 의한 체적변화과정에서 공시체와 전단상자의 주면마찰력이 전단면의 수직 응력을 증감시키기 때문에 구해지는 강도가 과대 또는 과소하게 나타나는 것으로 알려져 있다. 그러나 반력판측에 장착한 하중계를 통해 전단면의 수직응력을 직접 측정·제어하는 형식으로 개선되어 주면마찰력의 영향을 해소하였다. 따라서 본 연구는 반력판측에 하중계를 장착한 개량형 다단식 단순전단시험기를 개발하여, 사질토의 정압(CD)조건 전단시험을 수행하여 강도특성과 전단강도에 미치는 영향을 개량형 일면전단시험의 결과와 비교하였다. 그 결과, 정압조건의 일면전단시험과 단순전단시험에 의한 강도정수는 조밀한 모래의 경우는 거의 비슷하게 나타나며, 느슨한 모래의 경우는 일면전단이 다소 크게 나타났다. 그리고 단순전단과 일면전단시험에서의 Dilatancy거동에는 큰 차이가 나타나지 않았다.

Key words : 개량형 일면전단시험, 개량형 다단식 단순전단시험, 정압조건, 전단강도, 사질토

1. 연구목적

일반적으로 일면전단시험은 전단면상의 응력을 직접 측정할 수 있으며, 1차원 압밀을 간편하게 수행할 수 있고, 평면변형시 강도를 측정할 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있다. 또한 공시체가 작고 시험조작이 간편하기 때문에 실용적으로도 우수한 시험법으로 판단된다. 그러나 이 시험을 위한 공시체로써 사질토를 이용하는 경우 과대 또는 과소한 강도가 얻어진다는 인식이 강해 많은 활용과 연구결과가 미약한 실정이다. 그 주요 원인은 흙의 Dilatancy에 의한 체적변화에 따른 공시체와 전단상자 내면의 주면마찰력이라고 할 수 있다. 이 주면마찰력이 전단면상의 수직응력을 증감시키기 때문에 구해지는 강도가 과대 또는 과소하게 나타나게 된다. 그러나 이러한 문제는 수직응력을 반력판측에 장착한 하중계를 통해 전단면상의 수직응력을 직접 측정하는 구조로 시험기를 개량함으로써 해결되었다.

따라서 본 연구는 신뢰할 수 있는 형식으로 개량한 다단식 단순전단시험기를 개발하여 사질토의 정압조건 전단시험에 있어서 강도특성을 비교하고자 한다. 다단식 단순전단시험방법은 공시체 두께를 일정하게 유지하면서 전단상자 요소를 8, 6, 2단으로 교체사용이 가능한 다단식 전단시험 상자속에 층다짐법으로 작성한 공시체를 사용하여 전단시험을 수행하였다. 그리고 개발한 다단식 단순전단시험기를 이용

한 정압조건 전단시험결과를 개량형 일면전단시험결과와 함께 비교하였다.

2. 전단시험기의 구성과 시험방법

2.1 시험기의 구성

다단식 단순전단시험기는 공시체 두께를 일정하게 유지하면서 전단상자 요소를 8, 6, 2단으로 교체사용할 수 있으며, 또한 전단상자크기는 직경×높이가 60×20, 90×30, 120×40, 150mm×50mm의 공시체 크기에 대한 시험이 가능하도록 하였다. 아울러 본 연구에 사용한 전단상자는 일면직접전단용의 2단과, 단순전단시험용의 8단이며, 공시체 크기는 직경 120mm×높이 40mm의 공시체를 사용하였다.

그림 1에 전단시험기의 상세구조를 나타내었다. 전단면의 수직응력을 측정하기 위해 상부 전단상자와 반력롤러의 사이에 하중계를 장착하였다. 수직응력은 Cylinder에 의한 공기압 재하방식으로 최대 7.5kgf/cm² 까지 재하가능하며, 전단력은 Screw Jack방식의 모터에 의한 변위제어방식의 구조를 적용하였다.

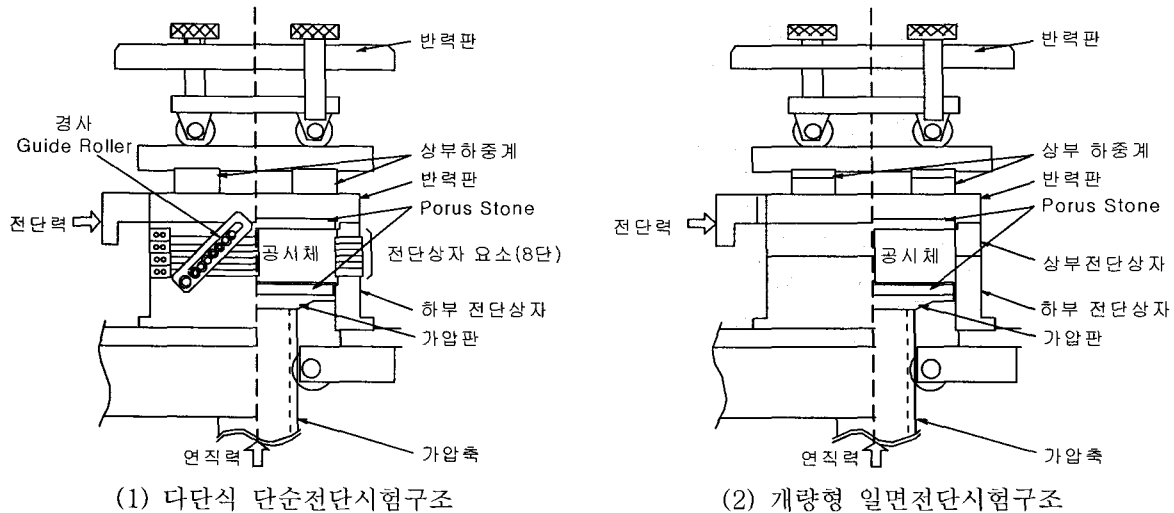


그림 1. 전단시험에 사용한 전단구조의 비교

2.2 시험방법

시험에 사용한 모래는 일본 Yamane Misumi에서 채취한 해사이며, 물리 특성을 표 1에, 입도분포특성을 그림 2에 나타냈다. 전단시험용 공시체 제작은 모두 다짐법에 의한 방법을 적용하였다. 제작방법은 우선 준비한 소정량의 시료를 균등하게 넣고 표면을 일정하게 조정후 공시체 직경과 동일한 원판을 이용하여 층고르기를 수행하였다. 이후 표 2에 나타난 Rammer를 사용하여 소정의 낙하높이와 타격회수로 총 3층으로 나누어 층다짐한 후, 표 3에 나타난 시험조건으로 압밀과 전단시험을 수행하였다.

표 1. 공시체 다짐방법

D_{max} (mm)	0.425
D_{50} (mm)	0.174
F_c (%)	5.8
U_c (g/cm ³)	1.3
ρ_s (g/cm ³)	2.67
ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.516
ρ_{dmin} (g/cm ³)	1.279
w_{opt} (%)	19

표 2. 공시체 다짐방법

σ_c (kgf/cm ²)	D _{r0} (%)	D _{rc} (%)	Rammer 중량 (kg)	낙하높이 (cm)	타격회수 (회)
0.5	35	40	1.25	10	4×2
	70	75		20	10×2
1	30	40		10	3×2
2	67	75		20	10×2

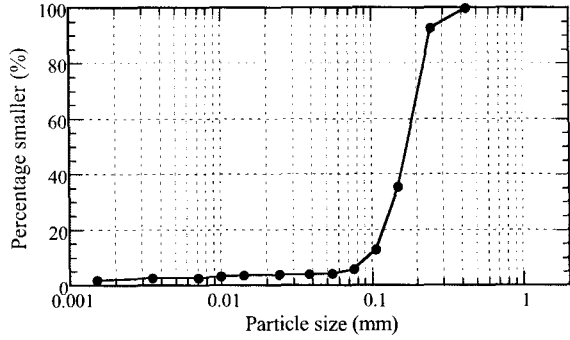


그림 2. Misumi사의 입경 분포

표 3. 각 조건에 대한 압밀압력과 전단시 수직응력

조 건	일정제어하는 수직응력	공칭압밀압력 σ_c (kgf/cm ²)	압밀시 σ_L (kgf/cm ²)			전단면 수직응력 σ_U 과 평균 수직응력 σ_M (kgf/cm ²)		
			0.55	1.1	2.3	0.50	1.00	2.00
정압일면	σ_U	0.5	0.55	1.1	2.3	0.50	1.00	2.00
정압단순	σ_M	1	0.52	1.05	2.05	0.50	1.00	2.00
		2						

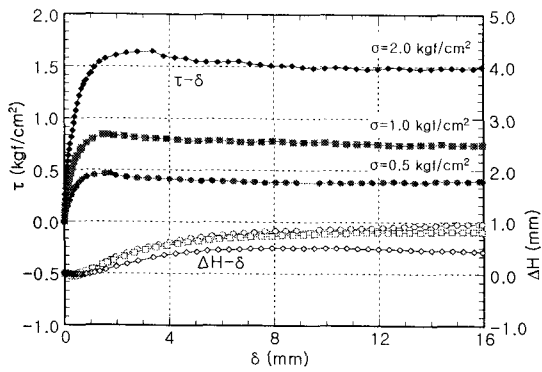
3. 다단식 단순전단과 개량형 일면전단시험 결과비교

3.1 조밀한 경우

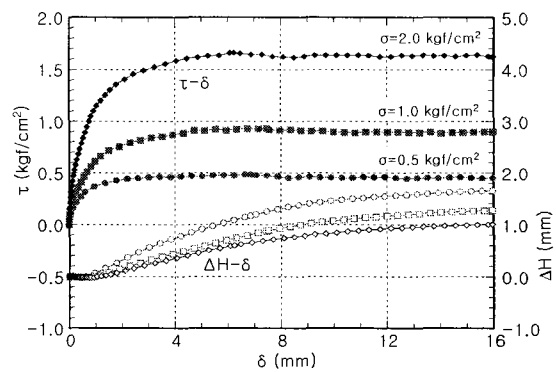
그림 3, 4에 정압(CD)조건에서의 일면전단시험(σ_U 일정)과 단순전단시험(σ_M 일정)을 나타냈다. 그림 3(1), 4(1)의 전단응력 τ -변위 δ 관계를 보면 전단응력 τ 의 peak값은 거의 동일하며, 전단변위에 대한 peak위치에 차이가 나타나며, ΔH 의 팽창량이 일면전단에 비해 단순전단에서는 약 2배를 나타내고 있다. 그림 3(2), 4(2)에 수직응력비로서 일면전단에서는 반력관측의 수직응력과 가압축측의 비로서 σ_U/σ_L 을, 단순전단에서는 평균 수직응력에 의한 σ_M/σ_L 을 나타내었다. 일면전단에서 전단면의 수직응력 σ_U 는 단순전단의 σ_M 에 해당하기 때문에 모두 동일하게 나타나고 있다. 수직응력비로 나타낸 주면마찰력은 전단초기에는 일면전단측이 크며, 전단이 진행함과 함께 단순전단이 일면전단과 동등한 크기까지 증가하고 있는 것을 알 수 있다. 또한 단순전단에서는 전단개시시 $\sigma_M/\sigma_L \approx 1$ 이므로 주면마찰이 거의 발생하지 않고 있다. 그 이유는 τ - δ 의 관계에서 공시체가 전단도중에 변형되고 있는 것을 나타내며, 일면전단의 전단초기에는 전체에 걸쳐 공시체가 변형하므로 단순전단과 같다고 할 수 있다. 이 때문에 단순전단과 같이 거의 동일한 전단강도가 나타나게 된다. 이후에는 진행성과 및 구속의 증가에 따른 파괴영역의 집중현상으로 인해 일면전단에서는 peak값이 나타나기 쉬운 것으로 판단할 수 있다. 또한 단순전단에서 ΔH 의 팽창량이 큰 것은 공시체 전체가 전단되기 때문이며, 단순전단시험 특유의 특성에 따른 결과로 판단할 수 있다.

단순전단의 경우, 전단개시와 함께 주면마찰이 그다지 발생하지 않는 것은 각 전단상자 요소간에 간격이 있기 때문에 상하방향으로 어느 정도 자유로운 상태에 있기 때문으로 사료된다. 따라서 설정한 전단상자 간격 0.2mm의 범위내에서 공시체의 팽창, 수축거동이 일면전단에 비해 다소 자유롭기 때문에 마찰이 발생하기 어려운 것으로 생각할 수 있다. 전단이 점차 진행되면서 경사 Guide Roller에 전단력이 전달되기 시작하면, 각 전단상자요소가 자유롭게 상하로 움직일 수 없게 된다. 따라서 주면마찰력이 증가하며, σ_M/σ_L 이 증가하는 것으로 생각할 수 있다.

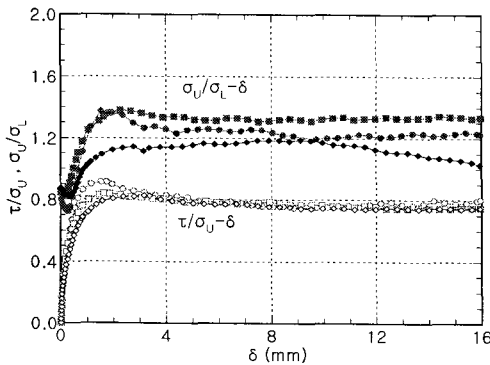
그림 3(3), 4(3)에 전단응력 τ -수직응력 σ 의 관계를 나타내었다. σ_U 와 σ_M 으로 정리한 응력경로를 바탕으로 나타나는 ϕ_d 는 전단형식과 관계없이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 아울러 σ_L 은 가압축의 수직응력으로써 기존의 간이 전단시험방식으로 전단시험을 수행하는 경우의 응력경로를 참고로 나타내었다.



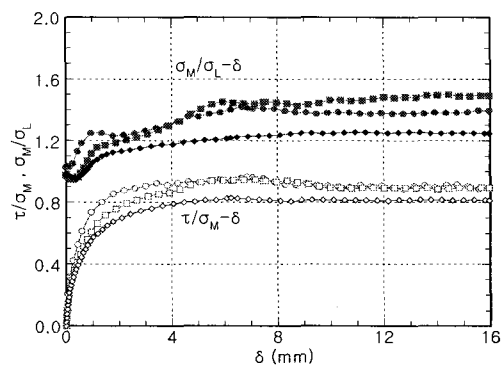
(1) 전단력 τ , 수직변위 ΔH -변위 δ 관계



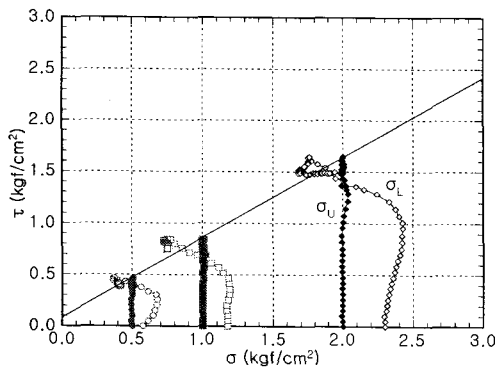
(1) 전단력 τ , 수직변위 ΔH -변위 δ 관계



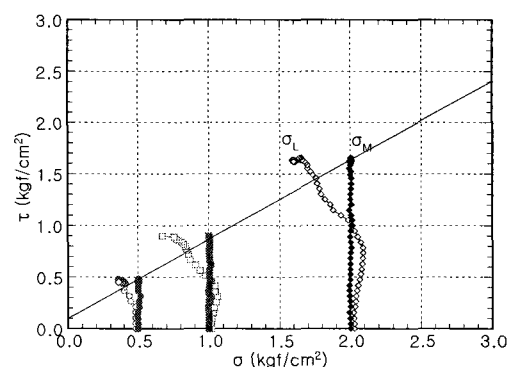
(2) τ/σ_v , σ_v/σ_L -변위 δ 관계



(2) τ/σ_M , σ_M/σ_L -변위 δ 관계



(3) 전단응력 τ -수직응력 σ 관계



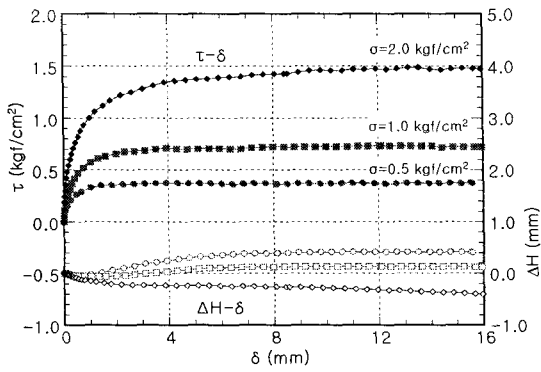
(3) 전단응력 τ -수직응력 σ 관계

그림 3. 조밀한 경우의 일면전단시험결과

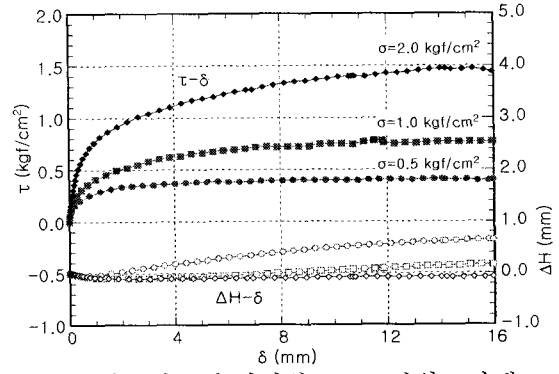
그림 4. 조밀한 경우의 단순전단시험결과

3.2 느슨한 경우

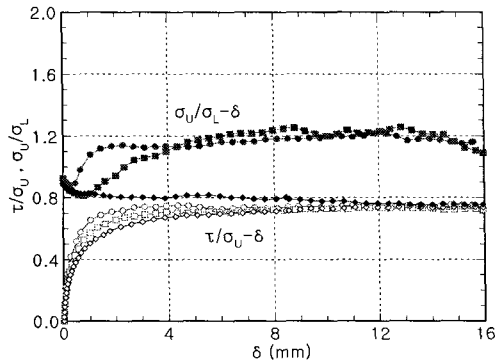
그림 5, 6에 느슨한 경우의 일면전단과 단순전단시험 결과를 나타냈다. 그림 5(1), 6(1)에 나타낸 τ 의 구배로부터 일면전단의 Dilatancy부(-)의 경우보다 단순전단의 경우는 전단력의 증가가 완만하게 나타나고 있다. 전단응력 τ 의 peak는 거의 동일하게 나타나고 있으며, Dilatancy정(+)
의 $\sigma_c=0.5, 1.0\text{kgf/cm}^2$ 에서는 단순전단의 ΔH 가 일면전단의 약 2배로 나타나고 있다. 그림 5(2), 6(2)에서는 그림 3(2), 4(2)의 경우와 같이 전단진행과 함께 주면마찰이 증가하는 과정을 확인할 수 있었다. 그러나 $\sigma_c=0.5, 1.0\text{kgf/cm}^2$ 에서는 주면마찰력이 일면전단과 단순전단이 동일한 정도로 증가하고 있지만, $\sigma_c=2.0\text{kgf/cm}^2$ 에서는 전혀 다른 응력비-변위관계를 나타내고 있다. 일면전단의 경우 σ_v/σ_L 가 감소는 Dilatancy부(-)를 나타내는 반면, 단순전단에서는 Dilatancy정(+)
을 나타내고 있다. 이러한 결과는 그림 5(3), 6(3)과 같이 응력경로의 차이로 잘 나타나고 있으며, 단순전단이 일면전단에 비해 약간 작은 ϕ_d 를 나타내고 있다.



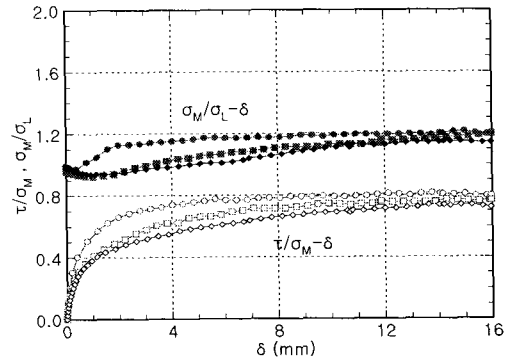
(1) 전단력 τ , 수직변위 ΔH - 변위 δ 관계



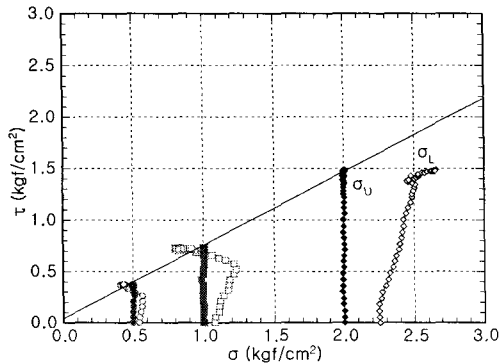
(1) 전단력 τ , 수직변위 ΔH - 변위 δ 관계



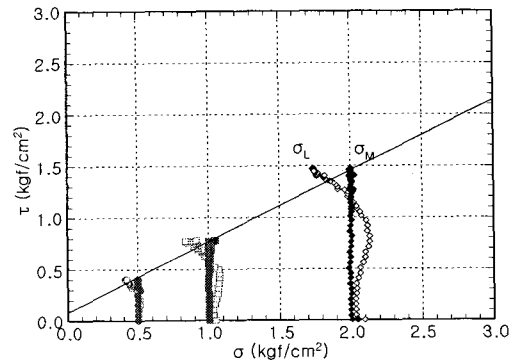
(2) τ/σ_U , σ_U/σ_L -변위 δ 관계



(2) τ/σ_M , σ_M/σ_L -변위 δ 관계



(3) 전단응력 τ -수직응력 σ 관계



(3) 전단응력 τ -수직응력 σ 관계

그림 5. 느슨한 경우의 일면전단시험결과

그림 6. 느슨한 경우의 단순전단시험결과

이와 같이 단순전단측이 일면전단에 비해 작은 강도를 나타내는 것은 기존의 간이형 일면전단과 단순전단에서도 일반적인 점으로 지적되고 있으며, 본 연구의 결과비교에서도 동일하게 나타나고 있다.

4. 결론

일면전단시험은 평면변형시 강도를 직접 측정할 수 있으며, 시험조작과 방법이 간편하기 때문에 실용적으로도 우수한 것으로 사료되지만, 사질토의 경우 주변마찰력의 증감에 의해 구해지는 강도가 과대 또는 과소하게 나타나는 문제점이 있었다. 이러한 문제점은 반력판측에 장착한 하중계를 통해 전단면의 수직응력을 직접 측정·제어하는 형식으로 시험장비를 개량하여 주변마찰력의 영향이 해결되었다. 따라서 본 연구는 이와 같은 시험기 형식을 활용하여 개량형 다단식 단순전단시험기를 개발하고, 사질토의 정압(CD)조건 전단시험을 수행하여 강도특성과 전단강도에 미치는 영향을 개량형 일면전단시험의 결과와 비교하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 개량형 일면전단시험기를 사용한 시험에서 전단초기의 주면마찰력은 일면전단이 크며, 전단변위가 증가함에 따라 단순전단의 주면마찰력은 일면전단과 동등한 크기까지 증가하고 있다. 그 이유는 단순전단에서는 전단과정과 함께 공시체가 변형되며, 일면전단은 전단초기에 공시체 전체가 변형되기 때문이다.
- (2) 초기 주면마찰력의 거동에 차이가 나타나지만, 최대 전단강도는 거의 동일하게 나타나고 있다. 그리고 단순전단시험은 각 전단요소가 설정된 간격내에서 어느 정도 자유롭기 때문에 압밀단계 및 전단초기단계에 있어서 주면마찰력이 작게 나타나는 것으로 판단된다.
- (3) 일면전단시험은 단순전단시험에 비해 진행성과 및 구속의 증가에 따른 파괴영역의 집중현상으로 peak값이 나타나기 쉬운 것으로 판단된다. 또한 단순전단에서 ΔH 의 팽창량이 일면전단보다 크게 나타나는 것은 공시체 전체가 전단되기 때문에 발생하는 현상으로 단순전단시험 특유의 특성에 따르는 것으로 판단할 수 있다.
- (4) 정압조건에서의 일면전단시험과 단순전단시험에 의한 강도정수를 밀도에 대해 비교하면 조밀한 모래의 경우 거의 비슷하게 나타나며, 느슨한 모래의 경우는 일면전단이 다소 크게 나타났다. 또한 단순전단과 일면전단시험의 Dilatancy거동은 큰 차이가 나타나지 않았다.
- (5) 이와 같이 반력판측에 설치한 하중계를 통해 전단면상의 응력을 직접 측정·제어하는 형식의 시험 방법 및 구조가 우수함에도 불구하고, 한국산업규격 KS F2343 「압밀 배수조건에서 흙의 직접전단시험방법」에 규정되어 있는 시험방식(이른바 간이전단시험)이 개선되지 못하고 있기 때문에 일면전단시험은 다양한 목적과 용도에 활용되지 못하고 있는 실정이다.
- (6) 그러나 최근에는 기존의 전단시험방식의 문제점을 개선한 대형일면전단시험도 제작되어 조립제의 전단특성을 파악하는 등 활발한 연구가 진행되고 있는 바, 향후 다양한 성과와 결과활용에 대한 보고를 기대한다.

참 고 문 헌

1. 김재영, 류동훈 이재성, 大島昭彦(2004), 개량형 일면직접전단시험기의 제작과 정체적·정압조건 전단시험에 대하여, 한국지반공학회, Vol.19, No.11, pp.58-65.
2. 김재영, 소충섭, 大島昭彦, 高田直俊(2004), 개량형 일면직접전단시험기를 사용한 정체적·정압조건 전단시험에 대하여, 대한토목학회 정기학술대회, pp.1434-1438.
3. 이대수, 김경열, 홍성연, 조화경, 황성준(2005), 대형직접전단시험을 이용한 조립재료의 전단거동 특성(I), 한국지반공학회논문집 제21권 6호, pp.81-91.
4. Kim, J., Yang T. and Ohshima A.(2005), A Study on Improvement of Shear Test Apparatus in the Direct Shear Test Under Constant Pressure, Journal of Korea Geotechnical Society, Vol. 21, No. 2, pp.137-144.
5. 土質試験の方法と解説(2000), 地盤工学会, pp.563-574.