

개방형 일면직접전단시험기의 제작과 정확적·정밀도·신뢰성 시험법에 대하여

김희민¹⁾, 박종호²⁾, 이자경³⁾, 조희영⁴⁾

1. 머리말

일반적으로 토압, 사면안정, 기초의 지지력 계산 등에 이용하는 강도정수를 결정하기 위한 시험법으로는 일축·삼축시험과 직접전단시험이 많이 이용되고 있다. 일축·삼축시험은 흙 공시체를 축방향으로 압축 또는 신장 파괴시켜서 압축강도를 구하는 것으로, 활동면의 응력을 Mohr-Coulomb의 파괴 기준으로부터 간접적으로 구하기 때문에 간접전단시험으로 불리고 있다. 특히, 삼축시험은 공시체의 주응력 상태가 명확하기 때문에 연구·실용면에서 폭넓게 이용되고 있다.

그러나 표 1에 정리한 것처럼, 직접전단시험과 간접전단시험의 장점과 단점은 완전히 상반된 관계에 있으며, 전자는 비배수시험 대신에 이와 등가인 정체적시험을 하기 때문에 공시체의 주응력 상태가 불분명한 반면, 전단면상에서의 응력을 직접 측정할 수 있다. 또한 일면직접전단시험은 삼축시험에 비해

공시체가 작고, 시험 조작이 용이하며, 시험 시간이 짧은 등의 장점을 가지고 있다. 그리고 일차원 압밀, 평면변형에 있어서의 강도를 직접 측정할 수 있기 때문에, 활동면의 강도를 이용하는 현행 안정계산법의 측면으로 보면, 오히려 직접전단시험 쪽이 원리·실용적으로 우수한 것으로 사료된다.

직접전단시험은 축방변위 구속형의 일면·단순전단시험과 축방변위 비구속형의 비틀림 전단시험으로 대별된다. 현재까지도 가장 많이 사용되고 있는 직접전단시험은 시험기 및 시험방법과 결과의 해석 등에 몇 가지의 문제점이 있었으며, 특히 사질토에서는 강도가 과대하게 평가되는 등의 지적이 있었다. 또한 시험기구상의 제약으로부터 전단과정 중 진행성 파괴를 일으키는 점, 공시체내의 전단변형량과 전단응력이 일정하지 않기 때문에 전단변형량을 정의할 수 없는 점 등이 있다. 한편 단순전단시험은 직접전단시험의 장점을 그대로 가지면서, 공시체에 일정한 전단변형을 전달할 수 있기 때문에 전단에 대한 응력-변형량관계를 얻을 수 있는 이상적인 시험법이라고 할 수 있다. 그러나 단순전단시험은 그 구조상, 시험기제작이 어려운 점 등 아직도 실용적인 시험기의 완성에는 도달하지 못하고 있는 실정이다.

¹⁾ 공학박사, (주)삼보기술단 지반공학부 과장
(geokimjy@naver.com)

²⁾ (주)삼보기술단 지반공학부 과장

³⁾ (주)삼보기술단 지반공학부 부장

⁴⁾ 비회원, 大阪市立大學 工學部 助教授



표 1. 직접전단과 간접전단시험의 특징대비

| | 직접전단 | 간접전단 |
|--------------|-----------------|-------------------------|
| | 일면전단, 단순전단 | 일축압축, 삼축압축시험 |
| 압밀조건 | 일차원 압밀 | 삼축 : 3차원압밀 |
| 전단시 주응력상태 | 불명확 | 명확 (공시체를 하나의 요소로 생각한다면) |
| 전단면상의 응력 | 명확 | 불명확 (전단면이 확실하지 않다) |
| 변형조건 | 강제적 (평면변형) | 선택적 (축방향) |
| 강도정수를 구하는 방법 | 직접적 | 간접적 |
| 그 외 문제점 | 일면 : 진행성파괴의 가능성 | 불포화토의 체적변화 측정이 곤란 |

이에 필자가 재확시절 수행한, 그림 1에 나타난 개량형 일면전단시험기(Mikasa가 제안한 시험기)를 기본구조로써, 일면전단시험법(JGS 0561-2000)의 기준화를 위한 시험기 제작과 시험 및 결과정리에 대해 간략히 서술하고자 한다. 아울러 기존 전단시험시의 문제점을 개선한 방법과 제작한 개량형 일면전단시험기의 개요 및 정압조건인 전단시험결과를 예로써 소개하고자 한다.

2. 전단시험의 문제점과 개선

상술한 바와 같이, 일면전단시험은 삼축시험에 비

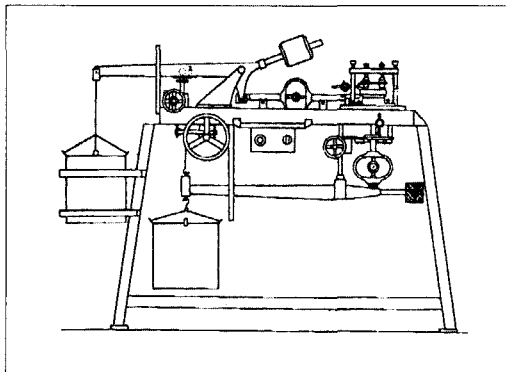


그림 1. 개량형 일면전단시험기의 기본구조 (Mikasa 식)

해 다양한 장점을 가지고 있으며 실용적으로도 우수한 시험법이지만, 상하로 분리된 강성 전단상자내에 공시체를 넣고 상하 전단상자의 분리간격을 설정한 후 상대적으로 이동시켜(상·하 전단 상자의 어느 한 쪽만을 이동시켜) 전단시키기 때문에, 구속이 강하고, 전단상자 단부로부터의 진행성 파괴, 주면마찰의 영향, 또한 사질토에서는 시료입경에 따른 영향 등 피하기 어려운 몇 가지 문제점을 가지고 있었다. 그러나 이러한 문제는 다음과 같은 해결책이 제안되고 개선된 방법으로 기준화되면서 시험결과와 신뢰성과 적용이 보다 간편해졌다.

(1) 모래시료를 사용하는 정압시험에 있어서 공시체 치수와 허용입경의 관계

일면전단시험에서는 변형에 대한 구속이 강하고, 허용입경을 초과하는 시료를 사용하면 과도한 강도가 얻어진다. 이 때문에 조립토에서는 시료의 최대입경에 대한 공시체의 최소치수, 또는 공시체 치수에 대해 허용할 수 있는 시료의 최대입경을 분명히 해 둘 필요가 있다.

여기에 대해서는, 세립분이 없는 입경의 모래시료에서는 공시체 직경을 시료의 최대입경에 대해 70배 정도, 세립분을 포함하고 입도가 좋은 시료에서는 이 조건이 완화되어 30배 정도가 적절한 것으로 사료된다.

(2) 일면전단시험에 있어서의 주면마찰의 영향
주면마찰은 전단과 함께 수반되는 흙의 체적 변화, 즉 Dilatancy에 의해 공시체와 전단상자 내면 사이에 생기는 것으로써, 이것이 전단면의 수직응력을 증감시키기 때문에 얻어지는 강도는 과대 또는 과소가 된다.

그림 2에 정압조건의 전단시험에 있어서 전단상자 내면의 주면마찰력 방향과 여기에 따른 전단면상의 수직력 변화를 나타냈다. 그림 2(1)은 정(+)¹⁾의 Dilatancy에 의해 공시체가 팽창하는 경우로 고정상자내면에는 상향의 주면마찰력이 발생하며 전단면상의 수직력을 증가시킨다. 그림 2(2)는 부(-)²⁾의 Dilatancy에 의해 공시체가 수축하는 경우로 그림 2(1)과는 반대로 하향의 주면마찰력이 발생하며 전단면상의 수직력을 감소시킨다. 정압전단강도는 이 수직력의 변화 때문에 그림 2(1)과 (2)의 경우 각각 과대·과소하게 측정된다.

이와 같은 수직력의 변화에 대해서는 반력판측에 하중계를 설치해 직접 측정함으로써 주면마찰에 대한 영향을 고려할 수 있게 하였다. 아울러 가압판측의 수직응력으로 ϕ_a 를 구해보면 정(+), 부(-)의 Dilatancy에 대해 각각 5°정도 과대·과소하게 나타

나는 경향을 보였다.

(3) 일면전단시험에 있어서의 상하 전단상자의 분리간격과 공시체내부 변형

일면전단시험에 있어서 이상적인 공시체의 변형 상태는 그림 3(2)와 같이 하나의 면으로 전단되는 것이지만, 실제 일면전단시험에서는 그림 3(3)과 같이 전단상자의 전후 단부에 변형이 집중되어 단부로부터 파괴가 진행되는 진행성파괴의 형태를 취하는 불균일한 변형을 일으킨다. 이것이 전단강도에 미치는 영향으로는 진행성파괴에 의한 강도저하와 공시체 단부의 구속에 의한 강도증가라는 이면성을 가지고 있다. 또한 착색한 모래요소를 일체로 제작한 공시체를 사용해 전단시험에 의한 상하 전단상자 사이의 간격과 공시체 내부변형의 관계를 보면 볼록 렌즈형상의 전단영역이 나타나며, 정압전단조건에서의 간격과 내부 변형의 관계에 대해서는 아직까지 불명확한 실정으로 연구가 진행 중이다.

한편, 직접전단시험에 있어서 이상적인 변형은 단순전단의 형태라고 사료된다. 이것은 상하 전단상자의 분리간격을 전단층의 폭(평균 입경 D_{50} 의 10~20배) 이상으로 하면 진행성파괴의 형태가 아닌, 그림 3(4)와 같이 분리간격내에서 단순전단의

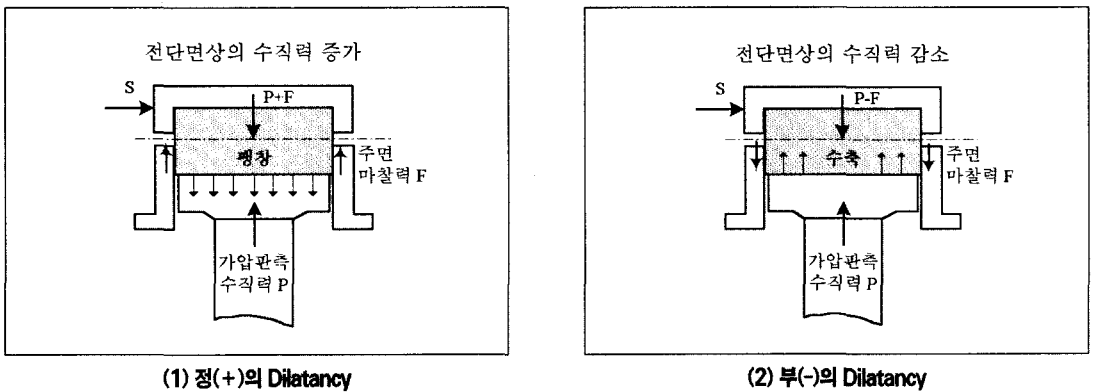


그림 2. 정압조건에 있어서 주면마찰력의 영향

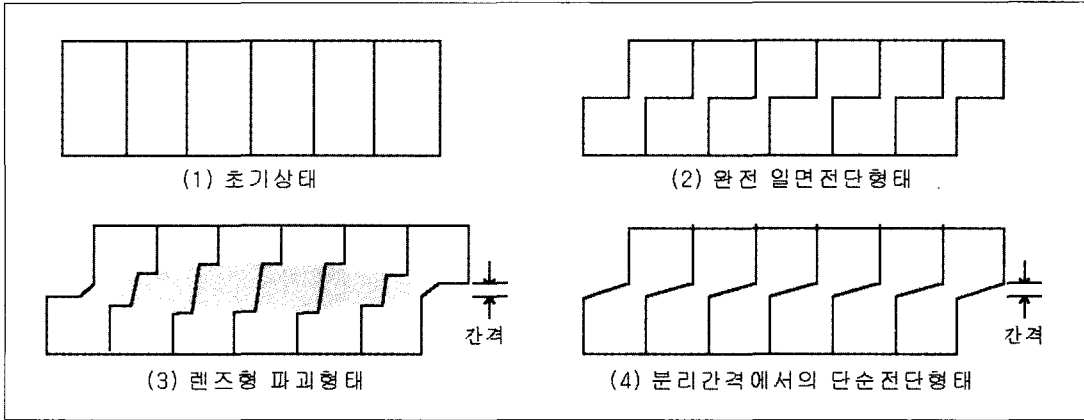


그림 3. 전단상자 사이의 간격과 공시체 내부의 변형

변형형태가 나타나게 되는 것이다. 아울러 비교적 크기가 큰 구형 단면 공시체를 사용하는 정압전단시험에서는 분리간격의 크기가 작은 경우 전단층의 자유로운 발달을 방해할 수 있기 때문에 과도한 강도가 얻어지는 것이 보고되고 있다.

그리고 모래를 이용한 정압전단시험에서는 일면전단시험에 비해서 Dilatancy 거동이 크게 나타나는 경향이 있다. 마찰각의 예로써 보면, 느슨한 경우는 일면전단이 크고, 조밀한 경우는 단순전단이 크게 나타나는 경향이 있었다.

3. 개량형 일면 직접전단 및 다단식 단순전단시험

(1) 기존의 일면전단시험(간이전단시험)

현재까지도 국내에 널리 보급되어 있으며 한국산업규격 KS F2343「압밀 배수조건에서 흙의 직접전단시험방법」에 규정되어 있는 전단시험기에 의한 시험방식은(그림 4 참조), ①가압판이 가압축에 고

정되어 있지 않기 때문에 전단 중에 기울어지며, ② 전단 중에 수직응력의 제어(정체적 제어)가 불가능하며, ③수직하중계는 가압판 측에만 설치되어 있기 때문에 반력판측에 작용하는 응력을 확인할 수 없는 점 등 시험기준에 적합하지 못한 문제점이 있다.

이 시험기를 사용한 비배수조건의 시험은 수직방향의 체적변화 제어가 불가능하기 때문에 빠른 속도로 전단해 정체적전단시험결과로 근사시킨다(급속전단, CU조건에 해당). 또한 배수조건의 시험은 과잉간극수압이 발생하지 않도록 느린 속도로 전단한다(완속전단, CD조건에 해당). 급속전단에 있어서 수직변위가 수축·팽창하는 경우는 전단강도가 과대·과소하게 얻어지게 되며, 완속전단에 있어서 수

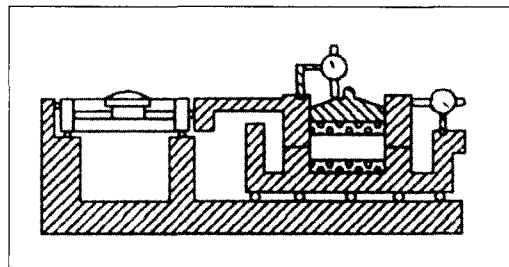
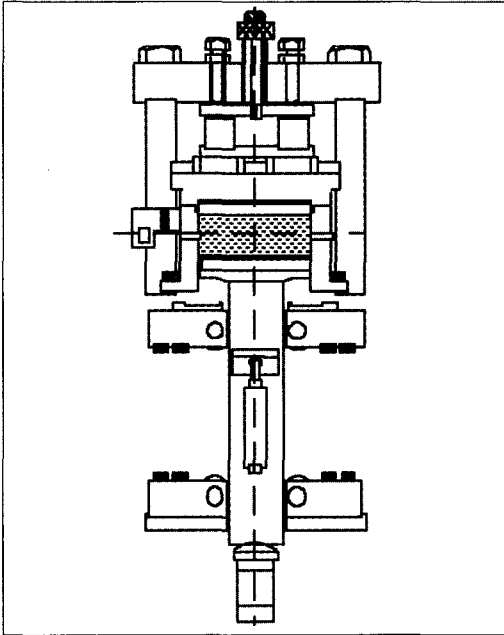
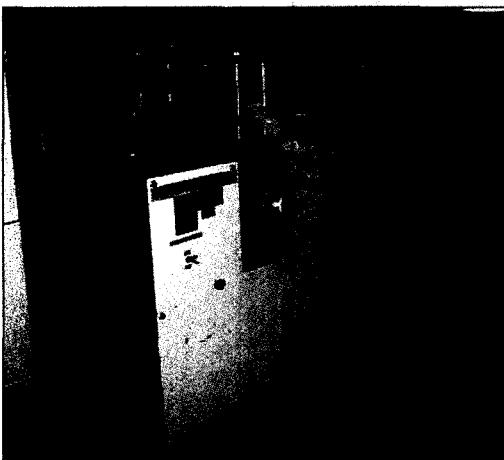


그림 4. 일반적인 전단시험

직변위가 수축·팽창하는 경우는 주면마찰력의 영향으로 전단강도가 과소·과대하게 얻어지게 된다.



(1) 전단상자의 구조



(2) 시험기의 전경

그림 5. 개량형 일면직접전단시험기

(2) 개량형 일면전단 및 다단식 단순전단시험

2절과 3절의 (1)에 서술한 기존 일면전단시험의 문제점을 개선한 개량형 일면전단시험기를 그림 5에 나타냈다. 경제적시험은 전단시 수직변형량이 발생하지 않도록 가압축의 변위를 조절하도록 하였고, 정압전단시험은 전단면에서의 수직응력을 직접 측정하기 위해 상부 가압판과 반력 롤러 사이에 하중계를 설치하여 전단과정 중 항상 일정하게 제어한다. 수직응력은 실린더에 의한 공기압으로 재하하며, 최대 7.5kgf/cm^2 의 재하압 설정이 가능하도록 하였다. 전단력은 스크류재 방식의 모터로 변형량을 제어하는 형식으로 하였다. 시험 가능한 공시체의 직경과 높이는 $60\text{mm}\times 20\text{mm}$, $90\text{mm}\times 30\text{mm}$, $120\text{mm}\times 40\text{mm}$, $150\text{mm}\times 50\text{mm}$ 로 전단상자만을 교체함으로써 다양한 크기의 시험이 가능하도록 제작하였다.

본 기사에서는 생략했지만, 다단식 단순전단시험기는 공시체 높이에 대해 전단상자 요소수를 8, 6, 3, 2단으로 조절가능하며, 또한 전단상자를 교체해 직경과 높이를 $60\text{mm}\times 20\text{mm}$, $90\text{mm}\times 30\text{mm}$, $120\text{mm}\times 40\text{mm}$, $150\text{mm}\times 50\text{mm}$ 의 공시체 크기로 시험이 가능하도록 제작하였다. 이 시험기는 그림 5에서 사용한 전단상자를 교체해 병용 가능하도록 하였다. 전단면에서의 수직응력 측정, 재하방식, 변형량 제어, 가압판 형식은 개량형 일면직접전단시험기의 방식과 동일하다. 이 시험기에 대해서는 향후 다시 보고하고자 한다.

(3) 시험 및 결과

시험에 사용한 모래의 물리특성을 표 2에, 입경분포를 그림 6에 나타냈다. 정압전단시험은 소정의 압



표 2. 사용한 모래시료의 물리특성

| | |
|--------------------------------|-------|
| D_{max} (mm) | 0.425 |
| D_{50} (mm) | 0.174 |
| F_5 (%) | 5.8 |
| U_s (g/cm ³) | 1.3 |
| P_s (g/cm ³) | 2.67 |
| P_{min} (g/cm ³) | 1.516 |
| P_{max} (g/cm ³) | 1.279 |
| W_{opt} (%) | 19 |

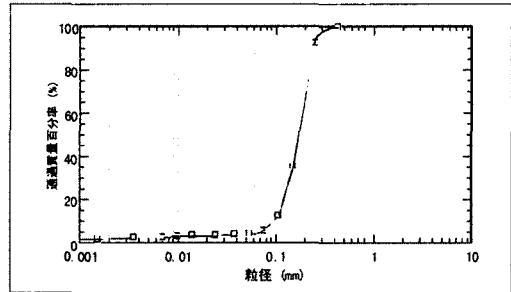
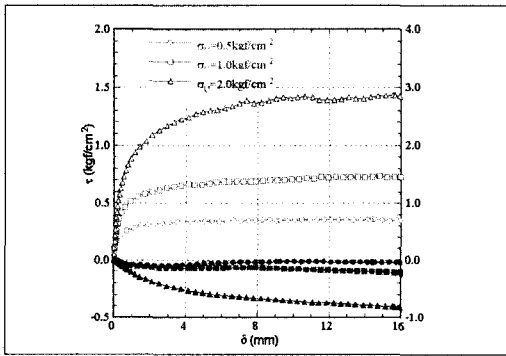
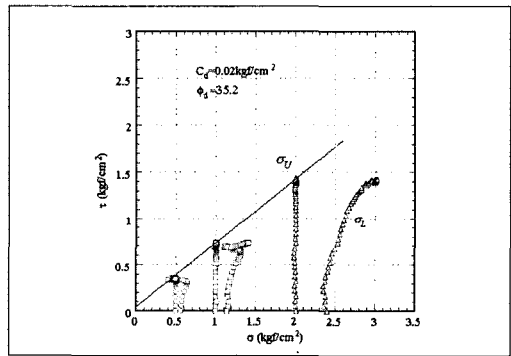


그림 6. 사용한 모래시료의 입경 분포

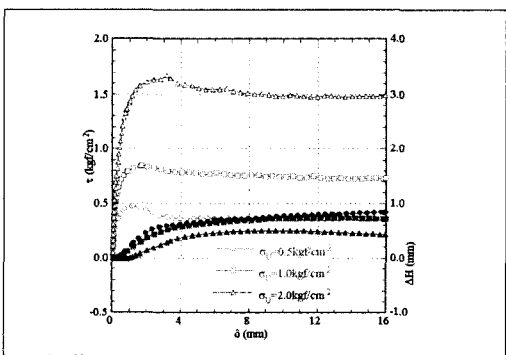


(1) 전단응력(τ)-변형량(δ)관계

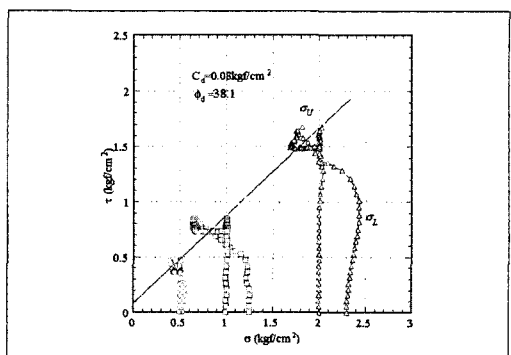


(2) 전단응력(τ)-수직응력(σ)관계

그림 7. 정압조건의 전단시험결과 ($D_r = 25\%$ 의 경우)



(1) 전단응력(τ)-변형량(δ)관계



(2) 전단응력(τ)-수직응력(σ)관계

그림 8. 정압조건의 전단시험결과 ($D_r = 75\%$ 의 경우)

력으로 압밀한 후, 상하 전단상자에 분리간격을 설정하고, 모니터링을 통해 반력판의 수직응력이 일정

하게 되도록 재하압력을 제어하면서 전단시험을 실시했다. 여기서는 정압전단조건의 일면전단시험의

결과 예를 그림 7, 8에 나타냈다. 그림에 나타난 σ_u , σ_L 은 각각 상부, 하부 가압판에 설치한 하중계의 실측 값으로써 가압축의 재하압과 반력판의 측정값이 차이가 있음을 알 수 있으며, 반력판측의 값으로 제어하는 것이 진정한 의미의 정압전단조건을 잘 나타내는 일면직접전단시험이라는 것을 보여주고 있다.

아울러 본 기사에서는 생략했지만, 정체적시험의 경우는 소정의 압력으로 압밀한 후, 상하 전단상자의 분리간격을 설정하고, 모니터링을 통해 수직변형량이 발생하지 않도록 가압축의 변위를 조절하면서 전단시험을 실시한다.

4. 맺음말

일면직접전단시험은 전단면상의 응력을 직접 측정할 수 있는 점, 일차원 압밀을 간단히 실시할 수 있으며, 평면변형에서의 강도를 측정할 수 있는 점 등의 장점을 가지고 있다. 또한 공시체가 작고, 시험 조작이 간편하기 때문에 실용적으로도 우수한 시험 법이라고 사료된다. 이러한 우수성에도 불구하고 주변마찰력의 영향, 시험시료의 유효입경, 상하 전단상자의 분리간격 설정, 정압·정체적 시험조건외의 문제점 등을 이유로 다양한 용도로 활용되지 못하고 있는 실정이다. 그 원인이 되는 시험의 문제점과 개선내용을 간략하게 정리하면 다음과 같다.

(1) 진정한 정압전단조건외의 시험

기존의 전단시험에서는 특히 사질토에서 과대한 강도가 얻어진다는 의견이 많았다. 그 원인은 흙의 Dilatancy에 따른 체적변화에 있어서 공시체와 전단상자 내면의 주변마찰력이 전단면상의 수직응력

을 증감시키기 때문에 얻어지는 강도가 과대·과소로 나타나기 때문이다. 따라서 이것은 수직응력을 반력판측에서 설치한 하중계를 통해 전단면상의 수직응력을 직접 측정하도록 개선하여 올바른 강도의 평가가 가능하도록 하였다.

(2) 시료의 유효입경

일면전단시험에서는 공시체가 강성의 전단상자 및 가압판에 둘러싸여 있기 때문에 변형에 대한 구속이 강하고, 시료입경의 영향을 받기 쉽다. 이것은 공시체 크기와 입경의 문제로서 공시체 직경을 시료의 최대입경에 대해 70배 정도(입경폭이 넓은 시료에서는 30배 정도)로 적절한 것으로 사료된다.

(3) 상하 전단상자의 분리간격

상하 전단상자의 분리간격은 공시체내의 전단층 폭(평균입경 D_{50} 의 10~20배) 정도로 할 필요가 있고, 분리간격이 작으면 전단층의 자유로운 발달을 방해하며, 강도가 과대하게 나타나는 경향이 있다. 이 때문에 상기와 같은 분리간격으로 설정하면 간격 사이의 공시체가 단순변형의 형태가 되는 것이 보고되고 있다. 그러나 분리간격을 너무 크게 하면 시료가 유실되어 강도가 작아진다는 연구결과 보고도 있으며, 적절한 상하 전단상자의 분리간격 및 공시체의 변형모드에 대해서는 현재까지도 연구가 진행 중에 있으며 향후 그 결과에 대해 투고하고자 한다.

본 기사에서는 필자가 재학시절 개량형 일면전단 시험기의 제작과 일본 지반공학회 토질시험법의 기준화과정에서 얻은 경험을 바탕으로 시험법의 개선과 시험기의 간략한 개요를 서술하였다. 개량형 일면직접전단시험기는 제작과 조작이 간편하고, 시험



시간이 짧기 때문에 반복 시험에 의한 신뢰성을 확보할 수 있으며, 삼축시험에 비해 보다 확실한 응력조건의 재현과 응력경로를 파악할 수 있고, 삼축시험에 비해 저렴하게 거의 비슷한 강도정수를 얻을 수 있는 점 등 많은 장점을 가지고 있다. 그리고 일차원 압밀, 평면변형에 있어서의 강도를 직접 측정할 수 있기 때문에 활동면의 강도를 이용하는 현행 안정계산법의 측면에서는 직접전단시험이 원리·실용적으로 우수한 것으로 사료된다. 향후 개량형 일면전단시험기를 활용한 연구와 실무분야에 있어서 유익한 연구 및 결과적용에 대한 활발한 보고를 기대한다.

- 土木學會 第15回年次學術講演會 要集, pp.45~48
2. 高田直俊, 大島明彦, 坂本佳理(1996), 一面せん断従來型定壓試験と眞の定壓試験の比較, 第31回地盤工學究發表會講演集, pp.665~666
 3. 新規制定地盤工學會基準・同解説Ⅳ(1997), 土の一面せん断試験方法, 地盤工學會.
 4. 高田直俊, 大島明彦, 坂本佳理(1997), 砂の一面せん断定壓試験における供試體寸法と許容粒徑の關係, 土木學會 第51回年次學術講演會概要集, III-A16, pp.32~33
 5. 土質試験の方法と解説(2000), 地盤工學會, pp.563~574
 6. 土質試?(2000), 地盤工學會, pp.121~134

참고문헌

1. 三笠正人(1960), 新型一面せん断試験機について,

2004년 사면안정기술위원회 학술세미나 개최 및 발표논문모집

2004년 사면안정기술위원회 학술세미나를 다음과 같이 개최할 예정입니다. 세미나와 관련하여 논문모집을 하오니 회원여러분의 많은 참여 부탁드립니다.

- 다 음 -

1. 일 시 : 2004년 6월 23일(수) 08:30 - 18:30
2. 장 소 : 과총회관 대강당(역삼동 소재)
3. 발 표 주 제 : 집중호우에 대비한 사면안정대책
4. 논문초록마감 : 5월 22일(토) (E-newsletter 및 homepage로 공지)
5. 논문원고마감 : 6월 10일(목)
6. 문의 및 논문초록제출은 백용(한국건설기술연구원)에게 해주시기 바랍니다.
7. 연 락 처 : Tel. 031-9100-228 Fax. 031-922-3156 E-mail. baek44@kict.re.kr