

강보강재로 보강된 실트질 모래의 배수 및 비배수 인발력

Drained and Undrained Pullout Capacity in Steel Strip Reinforced Silty Sands

이 홍 성¹ Lee, Hong-Sung

Abstract

Effective stresses may decrease due to generation of excessive pore pressure at the interface between soil and reinforcement in undrained condition such as rapid drawdown of groundwater level, resulting in the decrease in pullout capacity of the reinforcement. In this research, a series of laboratory pullout tests have been performed on different materials (clean sand, 5, 10, 15 and 35% silty sand), different overburden pressures (30, 100 and 200 kPa), and different drainage conditions (drained and undrained) in order to compare drained pullout capacity with undrained pullout capacity. The test results show that both drained and undrained pullout capacity are influenced by silt contents and increase with the increase of friction angle of the soil. The pullout capacity and the pullout displacement required to reach the peak value also increase as the overburden pressure increases. In undrained condition, the effective stresses acting on the reinforcement decrease as excessive pore pressures are generated, resulting in the decrease in pullout capacity and pullout displacement.

요 지

지하수 급속저하와 같은 비배수 상태에서는 흙과 보강재 사이의 경계면(interface)에서 발생하는 과잉간극수압으로 인하여 유효응력이 감소할 수도 있으며, 이는 보강재의 인발력 감소로 이어지기도 한다. 본 연구에서는 각기 다른 종류의 흙(순수모래, 5, 10, 15, 35% 실트질 모래)과 상재하중(30, 100, 200kPa)을 대상으로 배수 및 비배수 실내인발시험을 실시하여 최대 배수인발력과 최대 비배수인발력을 서로 비교하였다. 시험결과 배수인발력과 비배수인발력 모두 실트 함유량에 의해 영향을 받고, 흙의 내부마찰각이 증가함에 따라 인발력 또한 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 상재하중이 증가함에 따라 인발력도 증가하였으며, 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리도 증가하였다. 비배수 시험에서는 과잉간극수압이 발생함에 따라 보강재에 작용하는 유효응력이 감소하였으며, 그 결과 배수 조건과 비교하여 인발력과 인발거리가 감소하였다.

Keywords : Drained, Pullout capacity, Pullout test, Reinforced soil, Undrained

1. 서 론

보강토 옹벽은 1970년대 초반 그 현대적 개념이 정립된 이후로 중력식 옹벽에 비해 낮은 비용으로 더 큰 하중을 지지할 수 있다는 장점 등으로 인하여 토목공사에서 사용이 급증해오고 있으며, 초기의 강보강재뿐만 아

니라 지오그리드 등 토목섬유와 같은 새로운 보강재의 개발은 보강토 옹벽의 적용성을 더욱 증가시키고 있다.

보강토 옹벽의 뒤채움 흙으로는 모래와 같이 투수성이 좋은 조립토를 사용할 것이 권장되고 있으나, 여러 가지 이유, 특히 경제적인 이유로 인해 세립성분이 섞인 흙이 사용되고 있는 것이 현실이다. 투수성이 나쁜 세

¹ 정회원, 현대건설 기술연구소 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology, hongsung@hdec.co.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2006년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

립토가 섞인 흙이 뒤채움 재료로 사용된 경우, 폭우나 지하수 급속 저하시 옹벽은 비배수상태에 놓이게 된다. 이 경우, 흙과 보강재 사이의 인터페이스에서 발생하는 과잉간극수압의 소산속도가 발생속도보다 느려 흙과 보강재 사이의 전단강도가 감소하게 될 것이며, 결국 보강재의 인발력 감소로 이어져 보강토 옹벽의 안정성은 크게 저하될 것이다. 이와 같이 배수 조건과 비배수 조건에서의 보강토 옹벽 거동은 분명 다름에도 불구하고 비배수 조건에서의 설계기준은 현재 명확하게 수립되어 있지 않은 실정이다. 기존의 보강토 옹벽 설계에 적용되고 있는 한계상태해석에서는 흙의 극한강도와 보강재의 최대인발력이 고려되고 있으며, 이는 배수 조건에서만 유효하다. 따라서 본 연구에서는 세립분의 함유량, 상재하중 그리고 배수 조건을 달리하며 실내인발시험을 수행하여 배수인발력과 비배수인발력 사이의 상관관계를 규명하고자 하였다.

2. 문헌고찰

보강재와 주변 흙 사이의 마찰특성은 보강토 옹벽의 설계 및 시공 이전에 반드시 파악되어야 하며, 이 때 사용되는 가장 일반적인 실내시험은 대형직접전단시험과 인발시험이다. 인발시험은 수직하중이 작용하고 있는 상태에서 흙 사이에 삽입되어 있는 보강재를 인발하는 시험으로, 흙과 보강재 사이의 마찰계수를 얻을 수 있는 시험이다. 인발시험의 결과에 영향을 미치는 인자로는 경계조건, 인발시험 상자의 크기 및 흙 속에 묻힌 보강재의 길이 등이 있으며, 인발시험 상자의 크기에 대해서는 특별한 규정이 없으나 기존의 연구사례에서 살펴보면 일반적으로 폭 30~100cm, 길이 60~120cm, 높이 25~60cm 범위의 시험상자가 사용되었다(Ochiai 등, 1992; Hayashi 등, 1994; Alfaro 등, 1995).

Palmeira와 Miligan(1989)은 인발시험 상자의 크기뿐만 아니라 경계조건의 영향에 대한 연구를 수행하였다. 조사된 경계조건의 종류는 시험상자 상부경계조건(강성, 연성)과 시험상자 전면경계조건(거친 면, 사포(sand paper) 면, 일반강재 면, 매끄러운 면)이었다. 시험결과, 시험상자의 상부가 강성일 경우에 약간 더 큰 최대인발력이 발휘되었으며, 시험상자의 전면이 거칠 때 인발력이 가장 컸으며, 이후로 사포 면-일반강재 면-매끄러운 면 순으로 나타났다. Palmeira 등(1989)은 전면의 거칠기와 시험상자 크기의 상관관계를 규명하기 위하여 시

험상자의 크기를 변화시켜가며 추가로 인발시험을 실시하였으며, 시험상자의 크기가 작을수록 전면의 거칠기에 대한 영향이 큰 것으로 나타났다. 따라서 전면마찰의 영향을 최소화하기 위해서 시험상자 전면을 윤활유 등으로 매끄럽게 처리해야 한다고 보고하였다.

이와 같은 연구결과를 바탕으로 상부경계조건의 영향과 전면 거칠기의 영향을 최소화하기 위하여 Abramento 등(1995)은 워터백(waterbag)을 이용하여 상재하중을 가하였으며, 시험상자내의 모든 벽면을 윤활 처리한 다음 실내인발시험을 수행하였다. 시험결과 구속압이 클수록 최대인발력도 증가하는 것으로 나타났다. Bergado 등(1993) 또한 실내인발시험을 수행하였고, Abramento 등(1995)의 연구결과와 마찬가지로 상재하중이 클수록 최대인발력이 증가함을 밝혀냈다.

기존의 인발시험은 대부분 건조한 흙, 즉 과잉간극수압이 발생되지 않는 배수 조건에서 수행되었으나, 본 연구에서 수행된 인발시험은 배수 조건 및 비배수 조건 모두에서 수행되었다. 본 논문에서 사용되는 “배수 조건”과 “비배수 조건”에 대한 정의는 다음과 같다. 과잉간극수압의 소산이 변화하는 전통적인 배수 조건의 정의와는 달리 과잉간극수압의 소산이 완전히 끝난 후의 조건을 의미하며, 따라서 인발시험은 건조한 흙에서 수행되었다. 비배수 조건은 삼축압축시험 등에서 사용되는 시료 전체에서 체적변화가 전혀 없는 전통적인 의미와 달리 강보강재 주위의 국부적인 면에서 과잉간극수압이 발생하고 소산이 억제되는 조건을 의미한다. 강보강재 주위에서 발생한 과잉간극수압이 소산되지 않고 국부적으로 체적변화가 일어나지 않는 비배수 조건에서 인발시험이 진행되었음은 Bayoumi(2000)와 Lee(2003)의 연구에서 수행된 수치해석으로 입증되어 있다.

3. 인발시험 장비와 방법

3.1 인발시험 장비

본 연구에서 수행된 인발시험 시스템은 그림 1에 나타난 것처럼 크게 인발시험기, 외부 수조 및 압력 제어기, 계측기로 구성되어 있으며, 추가로 계측결과를 수신, 저장하는 데이터 인식 장치가 연결되어 있다. 철판으로 제작된 인발시험기는 크게 토조와 수조 두 부분으로 나뉘지며, 토조의 크기는 폭 40cm, 높이 50cm, 길이 100cm이며, 수조의 크기는 폭 40cm, 높이 50cm, 길이

50cm로, 인발시험기 전체 크기는 폭 40cm, 높이 50cm, 길이 150cm 이다(그림 2 참조). 이러한 크기는 문헌고찰에서 나타난 일반적인 인발시험상자의 범위 안에 드는 것이다. 또한 상재하중으로 인한 시험기 상부의 변형을 방지하기 위해 추가 반력 빔을 설치하였다.

인발시험 중, 토조 안에는 다져진 흙이 놓이며 비배수 시험 시 수조는 물로 채워지는데, 수조가 없다면 강보강재의 설치구를 통하여 물이 배수되어 흙의 포화도를 유지할 수 없을 것이다. 또한 인발시험이 시작되면 로드셀에 연결된 인발실린더가 시험기 외부로 인발됨에 따라 빈 공간이 발생하게 되며, 이 공간을 채우기 위한 물이 필요하게 된다. 이를 위해 그림 1에 표시된 바와 같이 두 개의 외부 수조를 설치하였다. 비배수 시험이 진행되는 동안에는 일정한 압력의 백프레셔가 적용되기 때문에 새로운 공간이 발생하게 되면 즉시 외부 수조안의 물이 시험기 안으로 유입됨에 따라 토조의 포화도가 유지된다.

인발시험의 계측 항목으로는 인발력, 상재하중, 인발 변위이며, 여기에 비배수시험에는 외부수압과 간극수압(백프레셔)이 추가된다. 인발력을 측정하기 위해 강보강재를 지지하고 있는 그림과 인발실린더 사이에 수증 로드셀을 설치하였으며, 정확한 상재하중 및 외부수압을 가하기 위해서 두 개의 압력변환기가 압력제어기에 설

치되었다. 또한, LVDT를 인발시험기 전면의 반력 빔에 부착하여 인발변위를 측정하였으며, 시험기 외부벽면에 설치한 압력변환기로 간극수압을 측정하였다.

시험에 사용된 강보강재의 크기는 상용 돌기형 강보강재와 같은 크기인 폭 5cm, 두께 3mm, 길이 1m 이며, 토조 안에 삽입되는 길이는 75cm 이다. 스테인리스 스틸 재질의 매끈한 표면인 강보강재의 마찰력을 증가시키기 위하여 강보강재의 표면에 에폭시를 부착하였다. 또한, Palmeira와 Milligan(1989)에 의해 지적되었듯이, 경계조건에 영향을 최소화하기 위해 상재하중은 연성 재질인 에어백을 통하여 가하였으며, 벽 마찰의 영향을 최소화하기 위해 시험기 내부의 벽면은 모두 그리스로 매끄럽게 처리하였다.

3.2 인발시험 방법

인발시험방법은 배수시험과 비배수시험 모두 기본적으로는 같으며 다만 배수시험은 건조한 흙에서, 비배수 시험은 포화된 흙에서 수행되고 백프레셔(40, 70kPa)가 가해진다는 점만 다를 뿐이다. 인발속도는 배수시험에서 1mm/min, 비배수시험에서 10mm/min이 적용되었다. 비배수시험에서 빠른 인발속도가 적용된 이유는 과잉 간극수압의 소산을 최대한 방지하기 위해서이다. 또한, 인발거리는 최대 20mm 이었으며, 시험 결과, 이 거리는 강보강재의 인발거동을 정확히 규명할 수 있는 충분한 거리였음이 밝혀졌다.

인발시험에 앞서 가장 중요한 점은 균질한 흙 시료의 준비이다. 본 연구에서는 일정한 함수비를 가진 흙을 직접 손으로 다져 다짐도 95%의 시료를 획득하였다. 다만 순수모래의 경우 함수비에 따라 최대건조단위중량의 변화가 없으므로 다짐도 100%를 시험시료로 사용하였다. 침강법(water pluviation)이나 슬러리 침전법(slurry deposition)도 고려되었으나, Fannin 등(1994)에 의해 지적되었듯이 침강법은 모래와 실트의 분결(segregation) 때문에, 슬러리 침전법은 너무 많은 시간이 필요하다는 점에서 시료준비방법에서 제외되었다(Kuebris와 Vaid, 1988). 따라서 다짐시험을 통하여 각 시험시료의 최대 건조단위중량을 구한 다음, 다짐도 95%의 시료를 얻기 위해 인발시험 토조에 시료를 포설한 다음 일정 중량(4kg)의 강괴를 일정 높이(30cm)에서 낙하하는 방법이 적용되었다. 이 때, 층 별로 세 개의(네 개 층, 총 12개) 원형 용기를 삽입하여 다짐이 끝난 후 회수하여 단위중

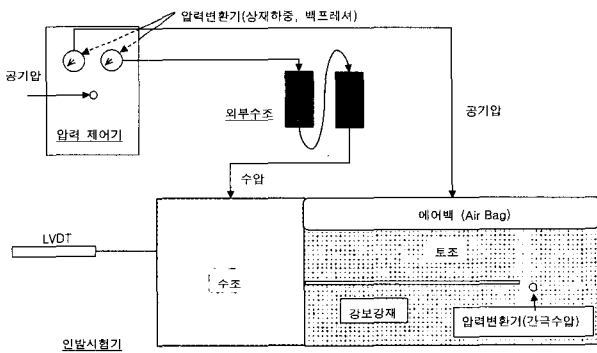


그림 1. 인발시험 시스템

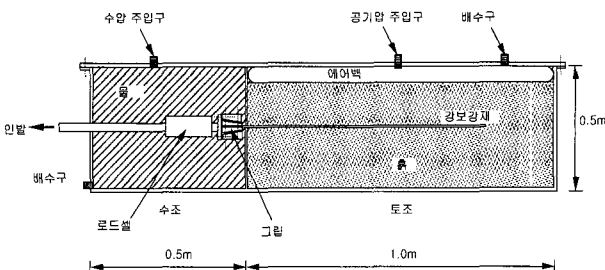


그림 2. 인발시험기

량을 측정하는 방법으로 낙하횟수가 적절한지 확인하였으며, 다짐도 95%의 시료가 얻어질 때까지 시행착오 방법으로 적절한 낙하횟수를 구하였다. 이러한 방법은 본 연구에서 수행된 인발시험 내내 수행되었으며, 확인 결과 오차는 대부분 1% 미만으로 나타났다. 배수시험순서는 다음과 같다.

- (1) 흙을 10cm 두께로 네 개의 층으로 나누어 토조 안에 포설한 다음 다짐도 95%로 다진다.
- (2) 강보강재를 두 번째 층의 다짐이 끝난 후에 설치한다.
- (3) 네 번째 층의 다짐이 완료된 후 에어백을 설치한 다음 시험기의 덮개를 덮는다.
- (4) 상재하중을 가한다. 이 때, 상재하중이 목표하중을 초과하지 않도록 압력제어기로 조절한다.
- (5) 상재하중이 목표하중에 도달했을 때, 강보강재의 인발이 시작되며 동시에 계측이 시작된다.

비배수시험에서는 네 개의 층에 대한 다짐이 완료된 후, 수조에 저장된 물이 토조의 하부에 설치된 세 개의 수로를 통해 물의 상향침투가 시작된다. 자연 상향침투로는 완전포화가 어렵기 때문에 상재하중을 가할 때 백프레셔도 동시에 작용시켰다. 이 때, 상재하중과 백프레셔의 압력차이는 목표 유효상재하중보다 크지 않도록 조절하였다. 상재하중이 목표하중에 도달하고 시험기 벽면에 설치된 압력변환기로부터 시험기 내부 간극수압이 가해진 백프레셔와 같은 압력이 확인되었을 때, 강보강재의 인발이 시작되었으며 이후의 과정은 배수시험과 같다.

4. 인발시험

4.1 인발시험

본 연구의 인발시험은 다음과 같은 조건에서 수행되었다.

- (1) 흙 : 순수모래, 5%, 10%, 15%, 35% 실트질 모래
- (2) 유효상재하중 : 30kPa, 100kPa, 200kPa
- (3) 배수 조건 : 배수, 비배수

시험에 사용된 모래는 오타와 표준사이며 통일분류법에 의해 SP로 분류된다. 실트질 모래는 오타와 표준

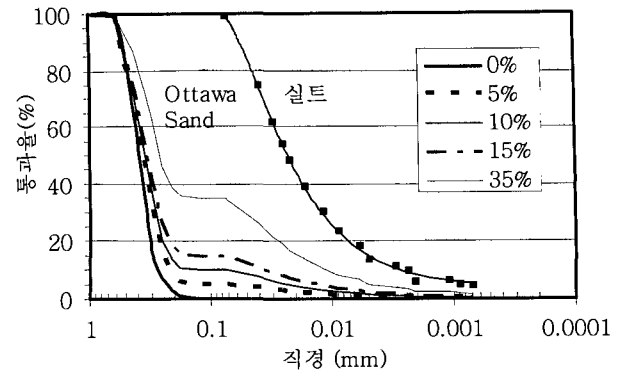


그림 3. 시료의 입도분포곡선(순수모래와 실트는 Salgado 등(2000)의 자료 인용)

사에 실트를 증량비로 5%, 10%, 15%, 35% 씩 혼합하여 준비하였다. 35% 실트질 모래는 보강토 옹벽의 뒤채움 흙으로 사용되기에는 적합하지 않지만 세립질이 인발력에 끼치는 영향을 조사하기 위한 한계조건으로써 시험에 적용되었다. 그림 3은 순수모래 및 각 실트질 모래의 입경가적곡선을 보여 주고 있다.

다짐시험 결과, 각 시료의 최대건조단위중량은 16.7 kN/m³(5%), 17.1kN/m³(10%), 17.9kN/m³(15%), 19.3kN/m³(35%)으로 구해졌으며, 다짐도 95%에 해당되는 단위중량은 15.9kN/m³(5%), 16.2kN/m³(10%), 17.0kN/m³(15%), 18.3kN/m³(35%)으로 나타났다.

인발시험에 적용된 유효상재하중은 30kPa, 100kPa, 200kPa 이며, 각각 보강토 옹벽의 일반적 높이인 1.5m, 5.0m, 10.0m에 작용하는 하중에 해당된다. 본 연구에서 수행된 인발시험의 총 횟수는 30회이며, 이외에도 인발시험의 유효성과 반복성을 검증하기 위하여 각 흙 시료 및 배수 조건별로 한 번씩의 반복시험이 추가로 수행되었다. 특히 순수모래에 대한 배수시험에서는 모든 상재하중에 대하여 반복시험이 수행되어 총 11번의 반복시험이 수행되었다(순수모래에 대한 비배수시험 제외). 반복시험 결과는 다음 절에서 소개되듯이 인발시험이 동일한 조건에서 수행되었음을 보여주었다.

4.2 인발시험 결과

그림 4는 순수모래에 대한 배수인발시험 결과를 보여 주고 있다. 전술한 바와 같이 순수모래에 대한 배수인발시험은 모든 상재하중에서 두 번씩 수행되었으며 결과는 그림에 나오듯이 각 시험결과가 거의 동일하였다. 시험 결과, 최대인발력은 예상한 바와 같이 200kPa 상재

하중에서 가장 크게 나왔으며, 30kPa 하중에서 가장 작게 나왔다. 즉, 상재하중이 클수록 최대인발력이 크며, 초기강도도 큰 것으로 나타났다. 즉, 같은 인발변위를 발생시키는데 필요한 인발력이 상재하중이 클수록 더 큰 것으로 나타났다. 또한, 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리는 상재하중이 클수록 큰 것으로 나타났다. 비배수인발시험 결과는 제시되지 않았지만 배수인발시험 결과와 동일한 결과가 얻어졌다. 이는 순수모래의 투수계수가 커서 발생된 과잉간극수압이 곧바로 소산되어 배수시험이나 비배수시험에 작용된 유효상재응력이 동일하였기 때문이다.

그림 5는 10% 실트질 모래에 대한 배수인발시험 결과이다. 순수모래에 대한 인발시험 결과와 마찬가지로 상재하중이 증가할수록 최대인발력이 증가하고 초기강도도 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 100kPa 상재하중에 대해 수행된 반복시험 결과도 양호한 것으로 나타났다.

그림 6은 비배수인발시험 결과이다. 배수시험과 비교

하여 모든 상재하중에서 인발력이 감소하였으나, 상재하중이 증가할수록 최대인발력과 초기강도가 증가하고 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리가 증가하는 등의 전체적인 경향은 배수시험과 동일한 것으로 나타났다. 그림 7은 10% 실트질 모래에 대한 배수인발시험과 비배수인발시험 결과를 보여주고 있다. 그림에서 보이듯이 모든 상재하중에서 비배수인발력은 배수인발력에 비해 감소하였다. 이러한 인발력감소는 앞서 말한 바와 같이 과잉간극수압 발생에 따른 유효상재응력의 감소에 기인한다. 또한, 배수시험의 초기강도가 비배수시험의 초기강도보다 큰 것을 알 수 있다. 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리는 비배수시험에서 짧은 것으로 나타났다.

그림 8과 9는 각각 35% 실트질 모래에 대한 배수인발시험 및 비배수인발시험 결과를 보여주고 있으며, 그림 10은 배수시험과 비배수시험 결과를 비교하고 있다. 순수모래 및 10% 실트질 모래에 대한 인발시험과 같은 결

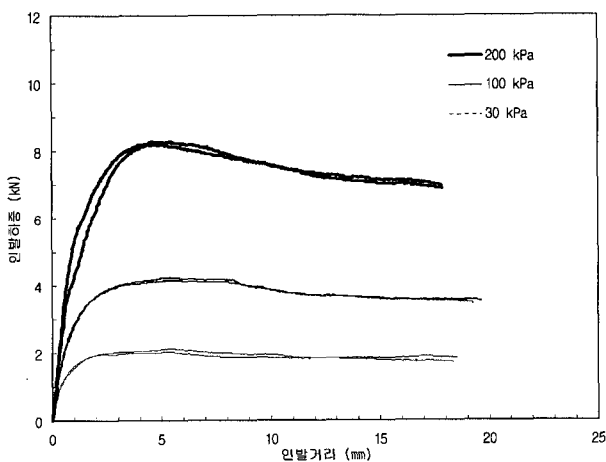


그림 4. 순수모래에 대한 배수인발시험 결과

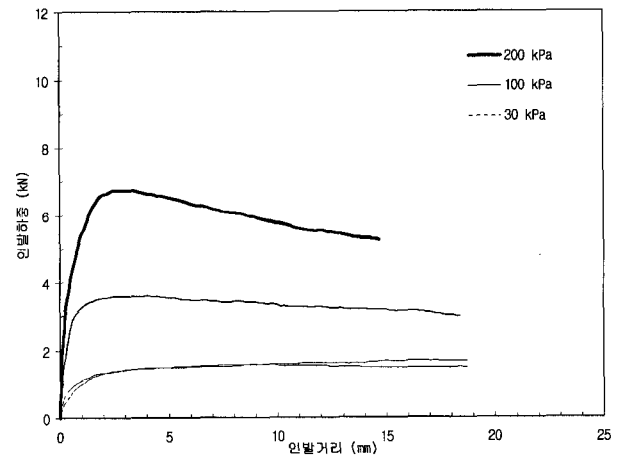


그림 6. 10% 실트질 모래에 대한 비배수인발시험 결과

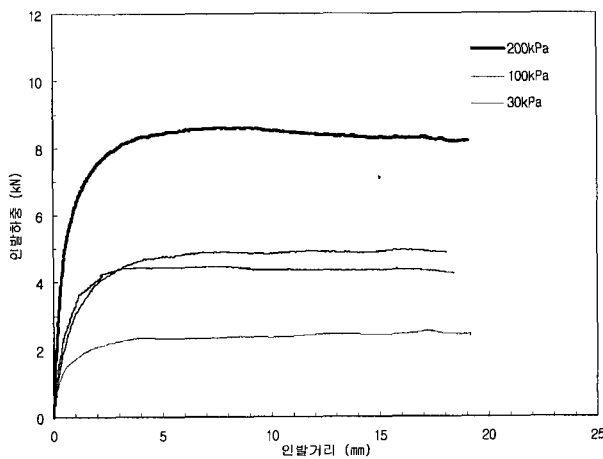


그림 5. 10% 실트질 모래에 대한 배수인발시험 결과

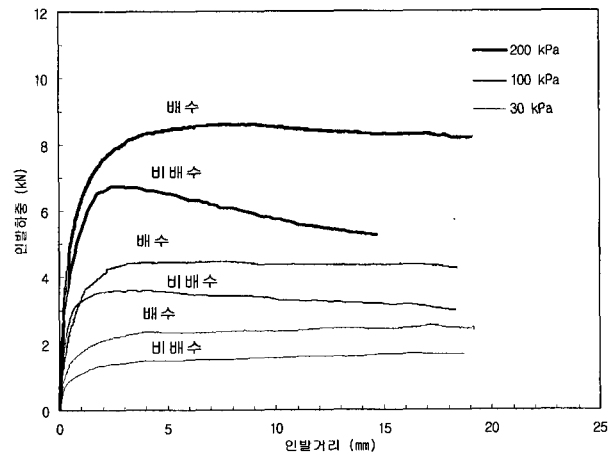


그림 7. 10% 실트질 모래에 대한 배수 및 비배수인발시험 결과

과가 얻어졌다.

그림 11은 실트 함유량에 따른 배수 및 비배수 조건에서의 최대인발력을 보여주고 있다. 배수 및 비배수 인발력 모두 실트 함유량이 0%에서 5%로 증가함에 따라 감소하다가 10%로 증가 시 증가하였다. 이후로는 실트 함유량이 15%, 35%로 증가하면서 최대인발력도 같이 감소하였다. 한편, 동일한 실트질 모래에 대해 비슷한 구속압력 하에서 Salgado 등(2000)에 의해 수행된 삼축

압축시험 결과를 살펴보면 흙의 내부마찰각은 36.5°(순수모래), 35°(5%), 37°(10%), 33°(15%)로 각각 얻어져 최대인발력의 증감과 동일한 경향을 보임을 알 수 있다. 따라서 배수시험의 경우, 동일한 상재하중과 동일한 강보강재가 사용될 경우 인발력은 흙의 내부마찰각에 지배됨을 알 수 있다. 표 1에 배수 및 비배수 조건에서의 최대인발력이 정리되어 있다.

그림 12는 상재하중에 따른 배수 및 비배수 조건에서의

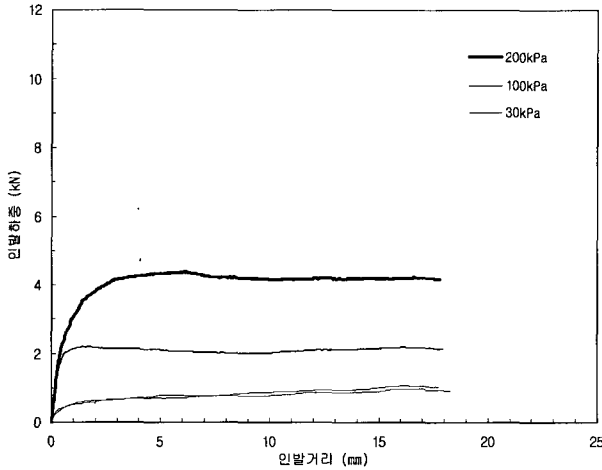


그림 8. 35% 실트질 모래에 대한 배수인발시험 결과

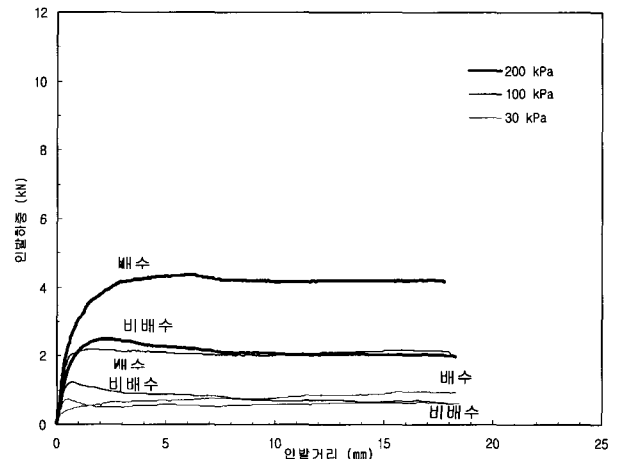


그림 10. 35% 실트질 모래에 대한 배수 및 비배수인발시험 결과

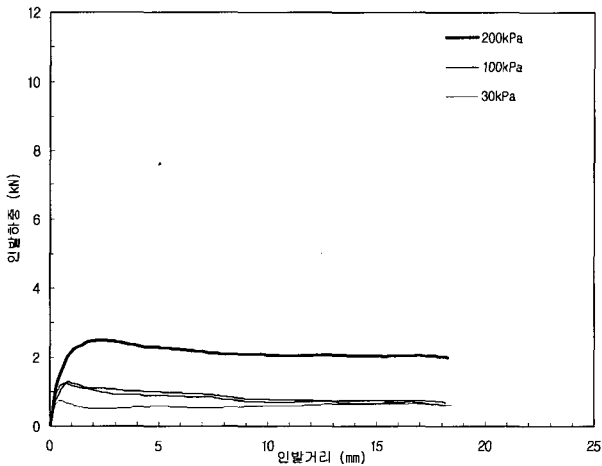


그림 9. 35% 실트질 모래에 대한 비배수인발시험 결과

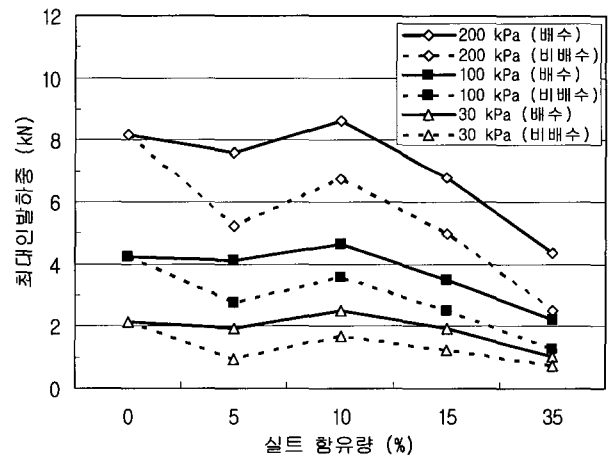


그림 11. 실트 함유량에 따른 최대인발력 비교

표 1. 배수 및 비배수 조건에서의 최대인발력(단위 : kN)

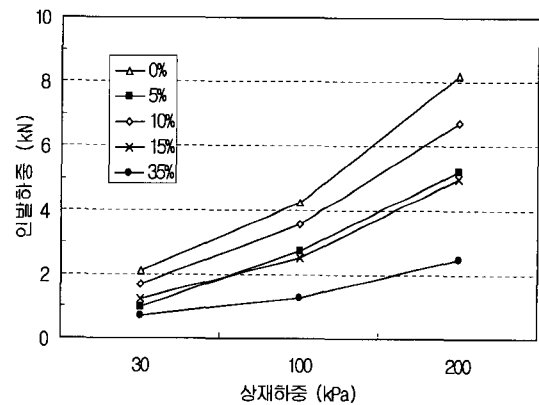
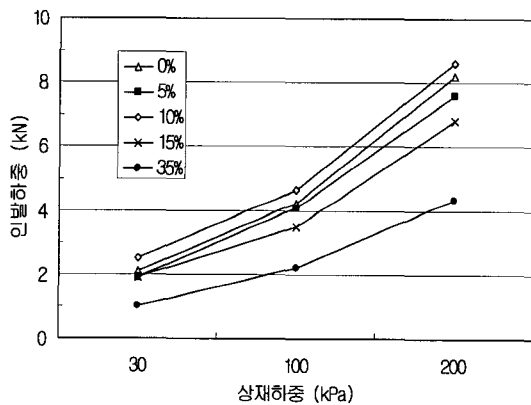
흙	배 수			비 배 수		
	상 재 하 중			상 재 하 중		
	30kPa	100kPa	200kPa	30kPa	100kPa	200kPa
순수모래	2.12	4.24	8.19	2.12	4.24	8.19
5% 실트질 모래	1.92	4.09	7.60	0.96	2.75	5.23
10% 실트질 모래	2.51	4.66	8.61	1.69	3.59	6.74
15% 실트질 모래	1.92	3.48	6.79	1.25	2.52	4.99
35% 실트질 모래	1.02	2.20	4.37	0.73	1.29	2.50

최대인발력을 보여주고 있다. 앞서 살펴본 바와 같이 상재하중이 증가함에 따라 배수 및 비배수 인발력 모두 증가함을 알 수 있다. 특히, 상재하중이 100kPa에서 200kPa로 두 배 증가할 때, 최대 배수인발력도 두 배로 선형 증가하였지만, 30kPa에서 100kPa로 증가할 때에는 그렇지 못함을 알 수 있다. 이는 상재하중 30kPa에서 작용된 ‘구속 다이러턴시 효과(constrained dilatancy effect)’ 때문이다. Guillois 등(1979)에 의하면, 보강재와 상호 거동하는 보강재 주위 흙의 유효체적은 매우 작고 모든 변형이 이 유효체적 안에서 발생하며, 유효체적 밖의 흙은 단순히 구속압으로서만 작용하는 것으로 알려져 있다. 따라서 상대적으로 작은 상재하중이 작용할 경우, 유효체적에 대한 구속압이 추가로 작용하게 되고 이에 따라 보강재와 흙 사이의 인터페이스에서의 전단강도가 증가하게 되는데 이것이 바로 구속 다이러턴시 효과이다. 일반적으로 상재하중이 100kPa보다 크면 이미 충분한 구속압이 작용하고 있어 구속 다이러턴시 효과는

무시할 만한 것으로 알려져 있다.

그림 13과 표 2에 실트질 모래에서 얻어진 배수 및 비배수 최대인발력을 순수모래에서 얻어진 배수 및 비배수 최대인발력에 대한 상대 비로 나타내었다. 배수시험의 경우 상대 비가 0.91~0.96(5%), 1.05~1.18(10%), 0.82~0.91(15%), 그리고 0.48~0.53(35%)으로 나타났으며, 비배수시험의 경우에는 0.45~0.65(5%), 0.80~0.85(10%), 0.59~0.61(15%), 그리고 0.31~0.35(35%)로 나타났다. 상재하중이 다른 경우에도 순수모래에 대하여 전반적으로 비슷한 상대 비를 나타내고 있다. 다만 상재하중 30kPa 비배수시험의 경우에 상이한 상대 비를 보여주고 있는데, 이는 시험 오차에 기인한 것으로 판단된다. 또한, 비배수시험에서 얻어진 상대 비가 배수시험에서 얻어진 상대 비보다 상당히 작게 나타나는데, 이는 비배수시험의 경우 과잉간극수압의 발생에 따른 유효응력의 감소 때문인 것으로 풀이된다.

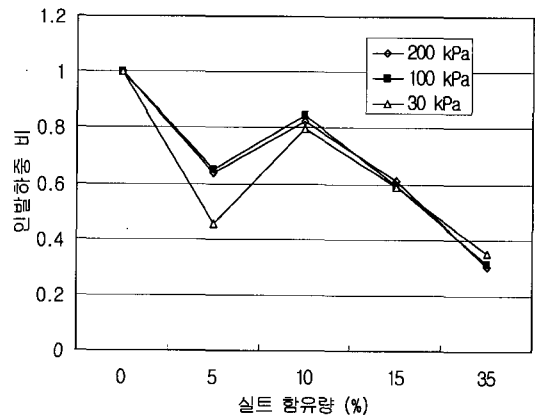
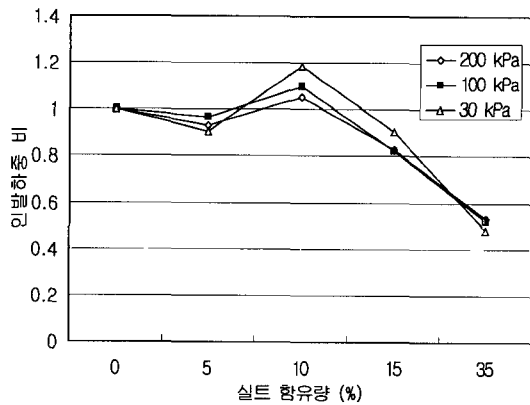
각 시료별 최대 비배수인발력 대 최대 배수인발력 비



(a) 배수인발시험

(b) 비배수인발시험

그림 12. 상재하중에 따른 최대인발력 비교



(a) 배수인발시험

(b) 비배수인발시험

그림 13. 순수모래의 최대인발력과 비교한 최대인발력 상대 비

표 2. 배수 및 비배수 조건에서의 최대인발력 상대 비(순수모래와 비교하여)

흙	배 수			비 배 수		
	상 재 하 중			상 재 하 중		
	30kPa	100kPa	200kPa	30kPa	100kPa	200kPa
순수모래	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5% 실트질 모래	0.91	0.96	0.93	0.45	0.65	0.64
10% 실트질 모래	1.18	1.10	1.05	0.80	0.85	0.82
15% 실트질 모래	0.91	0.82	0.83	0.59	0.59	0.61
35% 실트질 모래	0.48	0.52	0.53	0.35	0.31	0.31

표 3. 최대인발력 비율(배수 : 비배수)

흙	상 재 하 중		
	30kPa	100kPa	200kPa
순수모래	1.00	1.00	1.00
5% 실트질 모래	0.50	0.67	0.69
10% 실트질 모래	0.67	0.77	0.78
15% 실트질 모래	0.65	0.72	0.73
35% 실트질 모래	0.72	0.59	0.57

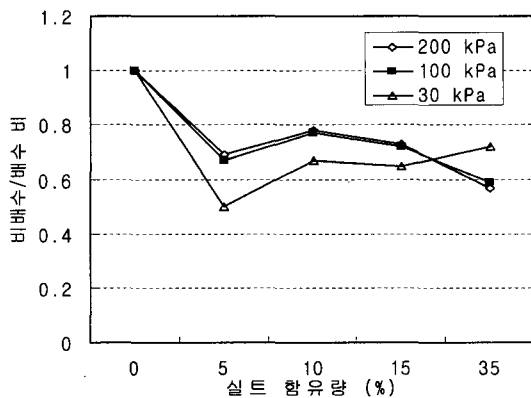


그림 14. 최대 비배수인발력 대 최대 배수인발력 비

가 그림 14와 표 3에 나와 있다. 비배수시험에서 유효응력의 감소가 일어나지 않아 배수 및 비배수시험에서 동일한 최대인발력이 얻어진 순수모래에서는 비배수/배수 비가 1.0이었으며, 100kPa 및 200kPa 상재하중에서는 0.67~0.69(5%), 0.77~0.78(10%), 0.72~0.73(15%), 0.57~0.59(35%), 그리고 30kPa 상재하중에서는 0.50(5%), 0.67(10%), 0.65(15%), 0.72(35%)로 나타났다. 100kPa과 200kPa 상재하중의 경우 비배수/배수 비가 거의 동일한 값을 나타냈으나, 30kPa에서는 35% 실트질 모래를 제외하고는 100, 200kPa 상재하중에서의 비보다 작은 값을 보였다. 모든 상재하중에서 비배수/배수 비는 순수모래에서 5% 실트질 모래로 실트 함유량이 증가함에 따라 감소하였다가 10% 실트질 모래에서 증가, 다시 15%, 35% 실트질 모래에서 감소하였다. 다만 상재하중 30kPa

35% 실트질 모래에서는 그 비가 증가하였다.

5. 결론

강보강재를 사용한 보강토 옹벽의 비배수 거동 파악과 세립토가 끼치는 영향을 조사하기 위하여 본 연구에서는 순수모래 및 실트질 모래 실트 함량(5, 10, 15, 35%)와 상재하중(30, 100, 200kPa)을 변화시켜가며 배수 및 비배수 조건에서 실내인발시험을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 실트 함유량의 영향 : 순수모래에 중량비로 실트 5%가 첨가됨에 따라 최대인발력은 감소하였으며, 이후 10%에서 증가, 이후 15% 및 35% 실트질 모래에서는 감소하였는데, 이는 흙의 내부마찰각의 증감과 동일한 경향을 보였다.
- (2) 상재하중의 영향 : 모든 흙 시료에서 상재하중이 증가할수록 최대인발력도 증가하는 것으로 나타났으며, 또한 상재하중이 클수록 강도 및 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리도 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 배수 조건의 영향 : 과잉간극수압의 영향이 전혀 없는 순수모래를 제외한 나머지 실트질 모래에서는 모두 비배수인발력이 배수인발력에 비해 감소하였다. 또한 초기강도 및 최대인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리도 비배수 조건에서 저하되는 것으로 조사되었다. 최대인발력의 비배수/배수 비는 상재하중 100kPa과 200kPa에서 1.0(순수모래)이었으며, 5% 실트에서는 0.67~0.69로 감소하였다가 10% 실트에서 0.77~0.78로 증가하였으며, 다시 15%와 35% 실트에서는 각각 0.72~0.73, 및 0.57~0.59로 감소하였다. 그리고 30kPa 상재하중에서는 0.50(5%), 0.67(10%), 0.65(15%), 0.72(35%)로 나타났다.

(4) 본 연구 결과, 비배수 조건에서는 보강토 내에서 상당한 크기의 과잉간극수압이 발생할 수도 있는 것으로 조사되었다. 과잉간극수압의 발생은 보강재와 주변 흙 사이의 전단강도의 감소로 이어져 보강토 옹벽의 안정성에 영향을 끼치게 될 것이다. 이러한 전단강도의 감소는 흙의 공학적 특성, 상대밀도, 상재하중, 인발속도 등 여러 가지 인자에 의해서 발생하게 되는데, 본 연구에서는 그 감소가 약 40%까지 일어나는 것으로 조사되었다. 또한, 비배수 조건에서는 배수 조건에 비해 초기강도가 저하되고, 최대 인발력에 도달하는데 소요되는 인발거리가 감소하는 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. Abramento, M. and Whittle, A. J. (1995), "Experimental Evaluation of Pullout Analyses for Planar Reinforcements", *Journal of Geotechnical Engineering*, June, pp.486-492.
2. Alfaro, M. C., Miura, N. and Bergado, D. T. (1995), "Soil-Geogrid Reinforcement Interaction by Pullout and Direct Shear Tests", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.18, No.2, pp.157-167.
3. Bayoumi, A. (2000), "Evaluation of Pullout Capacity of Reinforced Ottawa Sand under Drained and Undrained Conditions", *MS Thesis*, Purdue University.
4. Bergado, D. T., Shivashankar, R., Alfaro, M. C., Chai, J-C. and Balasubramaniam, A. S. (1993), "Interaction Behavior of Steel Grid Reinforcements in a Clayey Sand", *Geotechnique* 43. No.4, pp.589-603.
5. Fannin, R. J., Vaid, Y.P. and Shi, Y. (1994), "A Critical Review of the gradient ratio test", *Geotechnical Testing Journal, ASTM, GTJODJ*, 22(3), pp.22-31.
6. Guillois, A., Schlosser, F. and Long, N. T. (1979), "Etude du Frottement Sable-Armature en Laboratoire", *Proceedings International Conference on Soil Reinforcement*, Paris, pp.35-40.
7. Hayashi, S., Makiuchi, K. and Ochiai, H. (1994), "Testing Methods for Soil-Geosynthetic Frictional Behaviour-Japanese Standard", *5th Int. Conf. on Geotextiles, Geomembranes and Related Products*, Singapore, September, pp.411-415.
8. Kuebris, R. H. and Vaid, Y. P. (1988), "Sand Sample Preparation - The Slurry Deposition Method", *Soils and Foundations*, Vol.28, No.4, pp.107-118.
9. Lee, H. S. (2003), "The Undrained Pullout Capacity of Reinforced Soil", *Ph. D Thesis*, Purdue University.
10. Ochiai, H., Hayashi, S., Otani, J. and Hirai, T. (1992), "Evaluation of Pull-Out Resistance of Geogrid Reinforced Soils", *Proc. of Int. Symposium on Earth Reinforcement Practice*, Kyushu, Japan, pp.141-146.
11. Palmeira, E. M. and Milligan, G. W. E. (1989), "Scale and other Factors Affecting the Results of Pullout Tests of Grids Buried in Sand", *Geotechnique*, London, pp.511-524.
12. Salgado, R., Bandini, P. and Karim, A. (2000), "Shear Strength and Stiffness of Silty Sand", *Journal of Geotech and Geoenvironmental Eng. Div. ASCE*.

(접수일자 2005. 11. 17, 심사완료일 2006. 6. 12)