引張試驗에 의한 補强土의 擧動決定

Soil-Reinforcement Interaction Determined by Extension Test

金 雲 永*
Kim, Oon Young

Abstract

The new technique has been used to determine the soil-reinforcement interaction. The testing apparatus is essentially a triaxial cell fitted with the capability to house a hollow cylinderical sample. A hollow cylinderical sand specimen with a concentrical layer of reinforcing material sandwitched in the middle is used in this investigation. The reinforcement is fastened at the base. The hollow specimen can be viewed as a "unit sheet" of a soil-reinforcement composite system of infinite horizontal extent. Axial load as well as inner and outer chamber pressures can be applied to perform a test. The specimen is first subjected to an isotropic stress state corresponding to the overburden pressure. Next, an extension test by reducing the axial load is carried out. The specimen is "loaded" to failure by either the breakage of reinforcing material (tensile failure) or slippage which takes place at the soil-reinforcement interface (i.e. the overcoming of the bonding capacity). Since the reinforcement is fastened at its lower end to the base, any tendency of relative movement between the reinforcement and the sand during an extension test can induce tensile force in the reinforcement thus forming a "reversed pull-out" test condition. Preliminary test results have demonstrated positively of the new approach to test the soil-reinforcement interaction. Reinforcing elements of different extensibility were used to study the deformbility of reinforced soil. Furthermore, both the breakage and the pull-out modes of failure were observed.

요 지

흙과 보강재 사이의 거동을 측정하는 수단으로서 hollow cylinder type의 샘플 내에 보강재를 인장방향으로 삽입하여 주위압력을 일정하게 유지한 가운데 軸力을 감소시키는 소위 삼축인장시험을 실시하였다. 引張特性(extensibility)이 相異한 3종류의 보강재를 사용한 결과 파괴변형율(failure strain), 최대강도후의 응력감소(loss of post-peak strength), 변형모양(deformation mode) 등이 보강재에 따라 각각 독특하였고, 파괴의 양상은 breakage 또는 pull-out이 발생하였으며, 補强材端의 고정여부에 따라 보강효과가 영향을 받음이 확인되었다. 따라서 보강토 해석 및 설계시 흙 및 보강재 자체의 强度와 더불어 보강재의 引張特性과 境界條件이 매우 중요한 고려요소임을 알 수 있었다.

* 正會員 · 陸軍士官學校 專任講師

1. 서 론

1960년대 프랑스의 Vidal[1]이 補强土工法을 제안한 이래, 옹벽, 교대, 제방 등 다양한 토질 구조물에 실용화되어 그 효과가 입증된 바 있다. 보강토공법의 초기에는 steel strip이 주로 사용되었으나 근래에는 geotextile, geogrid 등의 대체보강 재료들이 개발되어 그 사용량이 계속 증가되는 추세에 있다[2]. 그러나 非引張性(inextensible)의 steel strip을 사용한 경우의 해석 및 설계방식이 引張性(extensible)의 geotextile 같은 것에 그대로 적용되기는 곤란한데[3] 이는 위의 두가지 타입의 보강재들이 각기 다른 하중-변형의 擧動을 보이고 있기 때문이다.

지금까지 현장이나 실험실에서 실시된 보강토에 관한 많은 실험결과들이 발표되었는데, 특히 흙과 보강재 사이의 상호마찰거동 (frictional interaction)을 측정하기 위한 실내 모형실험의 경우 pull-out 시험, 직접전단시험 또는 삼축압축시험이 주로 실시되어 왔으나 인장응력분포의 불균등, 주응력방향의 회전 또는 파괴면의 傾斜性으로 인한 문제점을 내포하고 있으며, 主引張變形方向과 보강재의 설치방향이 일치하는 삼축인장타입의 실험은 거의 드문 실정이다.

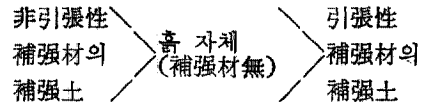
본 논문에서는 설치된 보강재가 인장이 진행되는 동안 균일한 구속압력을 받게끔 외압과 동일한 내압이 동시에 작용하는 hollow cylinder type 샘플속에 보강재가 설치된 경우에 대한 삼축인장실험의 결과들을 보강재의 引張特性과 補强材端의 拘束條件의 측면에서 報告 및 論議하고자 한다.

2. 연구배경

보강재의 종류와 재질이 다양해짐에 따라 보강토의 거동에 영향을 미치는 중요한 요소로서 보강재의 引張特性을 거론하였는데 이에 관해서는 McGrown et al.[3]이 처음으로 문제시 하였고 Gray et al.[4]이 체계적으로 정리하였는데, 여기서 주목할만한 것은 다음과 같다.

○破壞時의 變形率

○最大强度後의 應力감소



○主機能

非引張性 補强材 : 補强, 變形억제

引張性 補强材 : 補强, 引張性증대(ductility)

보강재 자체의 力學的 性質이 보강토의 거동에 주영향을 미치는 요소가 되겠지만, 고려해야 할 다른 사항은 보강토의 載荷形態와 境界條件을 생각할 수 있다. 보강토에 대한 실내 실험의 경우를 생각해 본다면 載荷形態(직접전단시험, pull-out 시험, 삼축압축시험 등)와 補强材의 境界條件(補强材端이 拘束된 경우와 自由로운 경우)에 따라 荷重-變形擧動이 달라지는데, 이에 관해서는 Ingold[6]의 실험보고에서 잘 기술되어 있다. 특히 McGown et al.[5]이 강조한 것처럼 보강재는 主引張形方向으로 설치될 때 보강효과가 최대화되며 이는 Gray et al.[4]의 직접전단시험결과에서도 확인되었다. 또한 보강재가 수평하게 설치된 실린더타입 샘플에 대한 삼축압축시험의 경우 흙만의 샘플에서 볼수 있는 planar failure 보다는 층과 층 사이에 bulging이 유발됨으로서 각층의 보강효과가 고르지 않음이 Gray et al.[7]에 의해 관찰되었다.

위에서 기술한 바와 같이 보강재의 재질부터 실험형태에 이르기까지 많은 요소들이 복합적으로 작용하여 보강토의 거동에 영향을 미치므로 이들이 모두 반영되는 실험 모델을 만든다는 것은 어려운 일이다. 종래의 실험모델이 지녔던 문제점 들 중 hollow cylinder type sample에 대한 보강재의 설치방향과 샘플의 主引張變形方向이 일치하는 삼축인장시험을 통하여(그림 1) 다음의 改善點들을 얻을 수 있었다.

○균일한 拘束應力

상대적으로 얇은 hollow type cylinder의 벽체의 안-팎에 같은 압력이 작용하므로 引張이 진행되는 동안 보강재는 균일한 垂直應力을 받

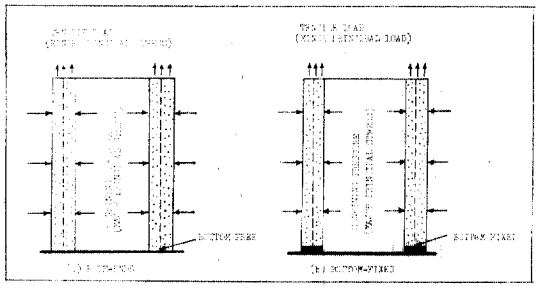


그림 1. Two Types of Ends Condition to Measure the Effects of Reinforcement in Triayial Extension Test

는다.

○다양한 파괴형태

일정한 拘束壓力과 軸方向力의 감소에 따른 흙입자들의 軸方向 移動傾向으로부터 소위 'reversed pull-out 타입'의 載荷狀況을 얻음으로서 보강토샘플은 slippage 또는 breakage의 파괴형태를 보여줄 수 있다.

연구목적에 따라 관찰사항들을 여러 관점에서 설정할 수 있겠는데 본 논문에서는 다음 사항들을 연구중점으로 삼고 이에 맞추어 실험 결과들을 정리하였다.

○보강재의 引張特性이 보강토샘플의 應力-變形擧動에 미치는 영향 : 직접 전단시험이나 삼축압축시험을 통하여 관찰되었던 荷重-變形擧動에 대한 引張特性의 영향이 hollow cylinder type 샘플의 삼축인장 시험에서도 유사한 傾向을 기대할 수 있겠는가?

○보강재의 引張特性이 보강토샘플의 파괴 형태에 미치는 영향 : 引張性 또는 非引張性의 補强材質이 파괴형태(slippage 또는 breakage)에 미치는 영향은?

○補强材端의 拘束條件이 보강효과에 미치는 영향 : hollow cylinder type 샘플 내의 補强材 下端이 固定된 경우 또는 自由로운 경우에 있어서 應力-變形擧動에 미치는 영향은?

3. 實驗槪要

3.1 샘 플

샘플의 내경은 38 mm, 외경은 64 mm, 높이는

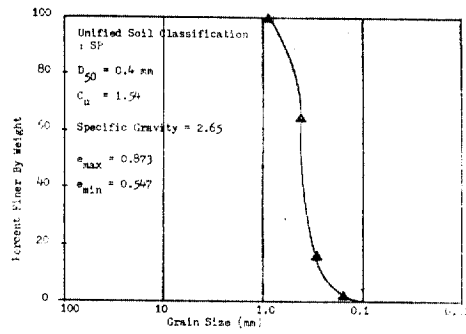


그림 2. Grain Size Distribution of Monterey 'O' Sand

외경의 2배인 128 mm로 하였는데 벽체의 두께는 보강재 설치를 위한 作業性을 고려하여 약 13 mm로 하였다. 샘플의 구체적인 설치형태는 참고문헌 9에 소개돼 있다.

사용된 흙은 Monterey 'O'Sand(그림 2)로서 샘플 준비과정 중 몰더의 side tamping을 통하여 밀도유지를 기하였는데 그 건조단위 중량은 1.5~1.6 g/cm³이었다.

보강재는 인장강도 및 변형정도가 서로 다른 3종류를 사용하였는데 실내 모형실험용인 만큼 실제 현장에 쓰이는 제품은 아니지만 각 보강재의 특성에 맞추어 편의상 다음의 ( )내의 명칭으로 부르기로 한다.

○Textile (Geotextile)

얇은 不織布로서 인장에 강한 섬유방향이 主引張變形方向이 되도록 보강재를 설치하였다.

○網紗(Geogrid)

주택에서 방충망으로 쓰이는 창문, 스크린 같은 것으로서 나일론 섬유이다. 마름모꼴 격자를 인장방향으로 하여 늘어나는 정도를 좋게 하였다.

○알루미늄 박판(Aluminium Foil)

가정용으로 흔히 쓰이는 상업용 aluminium foil로서 늘어남이 거의 없다.

합당한 시험기가 미비하여 사용된 보강재들의 인장특성을 구체적으로 측정하지 못했지만 fabric과 aluminium의 인장특성에 대해서는

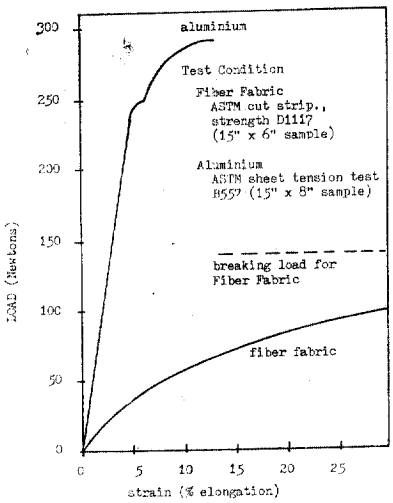


그림 3. Tensile Stress- Strain Behavior of Fabric and Aluminium Foil (after Tumay et al.)

Tumay et al.[8]의 실험논문에 소개돼 있다(그림 3). 사용된 보강재들을 늘어나는 정도와 인장강도의 견지에서 상대적으로 비교하면 다음과 같다.

· 伸長率

geogrid>geotextile>aluminium foil

· 引張强度

aluminium foil>geogrid>geotextile

3.2 三軸引張試驗

Soil Engineering Equipment Co.의 자동삼축시험기를 사용하였으며 載荷方式은 strain-control을 적용하였는데 인장율은 0.1%/分으로서 최고 15%까지 인장시켰다. 실시한 실험내용은 다음과 같으며 각 수치는 적용된 구속압력으로서 단위는 kPa이다(1kg/cm^3=98.07kPa).

· 보강재 양단이 자유로운 경우

—geotextile : 100, 200, 300, 400

—geogrid : 100, 200, 300

—aluminium foil : 100, 200, 300

· 보강재 하단이 고정된 경우

—geotextile : 200, 300, 400, 500

—geogrid : 200, 300, 400, 500

—aluminium foil : 200, 300, 400, 500

모래 자체의 hollow cylinder type 샘플을 사용한 인장시험의 결과 및 논의는 참고문헌 9에 소개되어 있다.

4. 실험결과 및 관찰

4.1 보강재 兩端이 自由로운 경우(Free-Ends)

geotextile, geogrd 및 aluminium foil에 대한 인장시험 결과가 각 구속압력별로 그림 4, 5, 및 6에 나타나 있다.

인장진행에 따른 변형의 외적 양상은 그림 11과 같이 특정위치에 단면적이 집중적으로 감소하는 소위 necking 현상이 나타났는데 각 보강재별로 최종적인 변형모양은 다음과 같다(그림 11).

—모래 자체 : 샘플의 중간부나 그 주변에서 necking 현상

—geotextile : 샘플의 양단 중 하나에서 necking 현상

—geogrid : 샘플의 중간부나 그 주변에서 necking 현상, 모래 자체에 비해 그 정도는 완만.

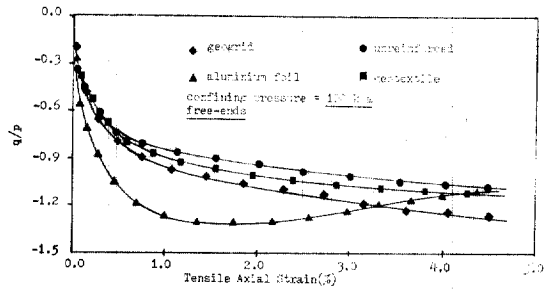


그림 4. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

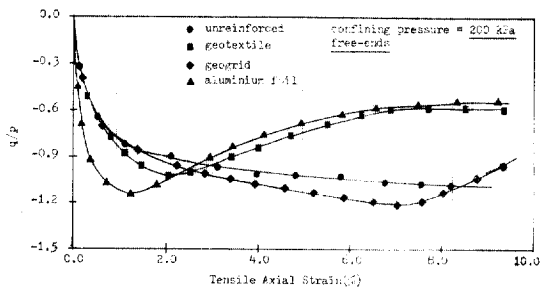


그림 5. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

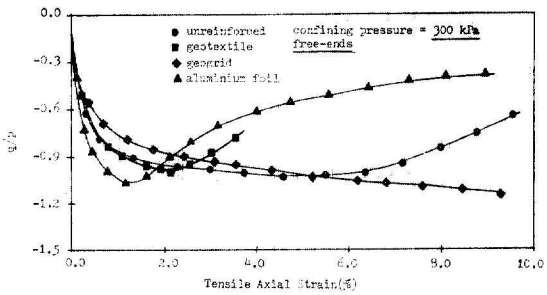


그림 6. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Holllow Cylinder Type Sample

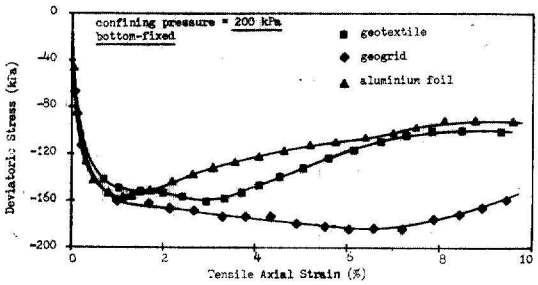


그림 7. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

—aluminium foil : 샘플의 양단 중 하나에서 necking 현상, necking의 출현이 가장 빠르고 그 깊이도 가장 크다.

위의 necking과 관련하여 관찰된 일반적인 사항은 ;

—非引張性의 보강재일수록 보강재 주변을 따라서는 샘플단면적의 감소가 거의 없었으며, 초기의 형상이 유지되었다(內的 變形 억제).

—인장으로 인해 necking type의 변형이 형성되었고 變形帶는 수평방향으로서 일종의 밴드모양을 보였다.

—인장응력이 최대치를 지나면서 necking의 外的 出現이 시작되었다.

—최대인장 강도 후의 응력이 감소하는 정도와 necking의 진행속도는 비례하였다.

—구속압력이 클수록 necking의 깊이도 커졌다.

인장시험 후 보강재를 抽出, 확인한 결과 찢어짐이나 늘어짐은 적용된 구속압력 범위에서는 관찰되지 않았다.

4.2 보강재 下端이 固定된 경우(Bottom-Fixed)

geotextile, geogrid 및 aluminium foil의 하단이 고정된 경우에 대한 인장시험 결과가 구속압력별로 그림 7부터 그림 10까지에 나타나 있다.

변형의 일반적인 모양은 兩端이 自由로운 경우와 같으나 몇가지 별다른 것은 다음과 같다.

—aluminium foil과 geogrid에 비해 상대적으로 inextensible한 geotextile의 경우 下端固定으로 말미암아 샘플의 上端 부분에서만 necking 현상이 나타났다.

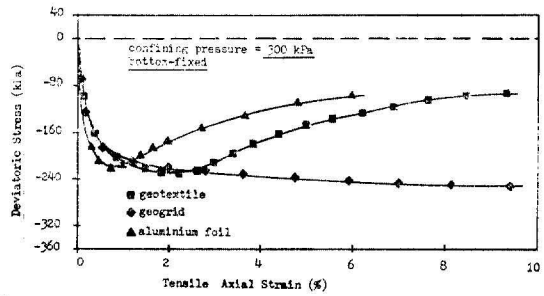


그림 8. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

—aluminiuminium foil의 길이를 본래보다 1 cm 및 2 cm 줄여 본 결과 necking은 보강재가 끝나는 데서 나타났다.

—geotextile의 경우 300 kPa 이상의 상대적으로 높은 구속압력하에서는 먼저 중간부분에 미소한 necking이 나타나다가 상단부분의 necking이 시작되며서 중간부분은 편편해지고 최종적으로 상단의 necking만 존재하였다. 실험 후에 geotextile을 확인한 결과 해당 중간부분이 약간 접혀진 흔적이 관찰되었다.

—geogrid의 경우 400 및 500kPa의 구속압력하에서 중간부분의 섬유가 수평하게 끊어졌는데 구속압력이 500 kPa의 경우 breaking이 더 빨리 발생하였다(그림 9 및 10의 응력—변형커브의 최대응력점 참조).

4.3 兩端自由와 下端固定의 비교

그림 12에서 그림 14까지 각 보강재의 실험결과에서 1개씩 선정하여 주어진 구속압력하에

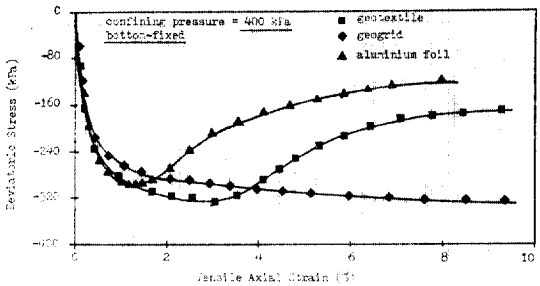


그림 9. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

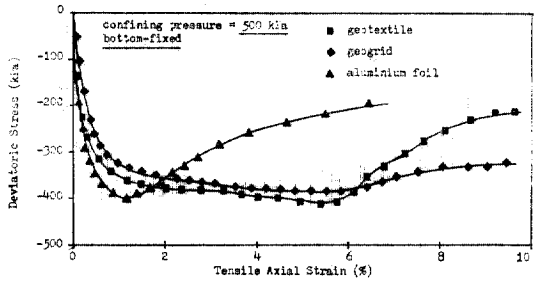


그림 10. Comparision of Triaxial Extension Test Results using Hollow Cylinder Type Sample

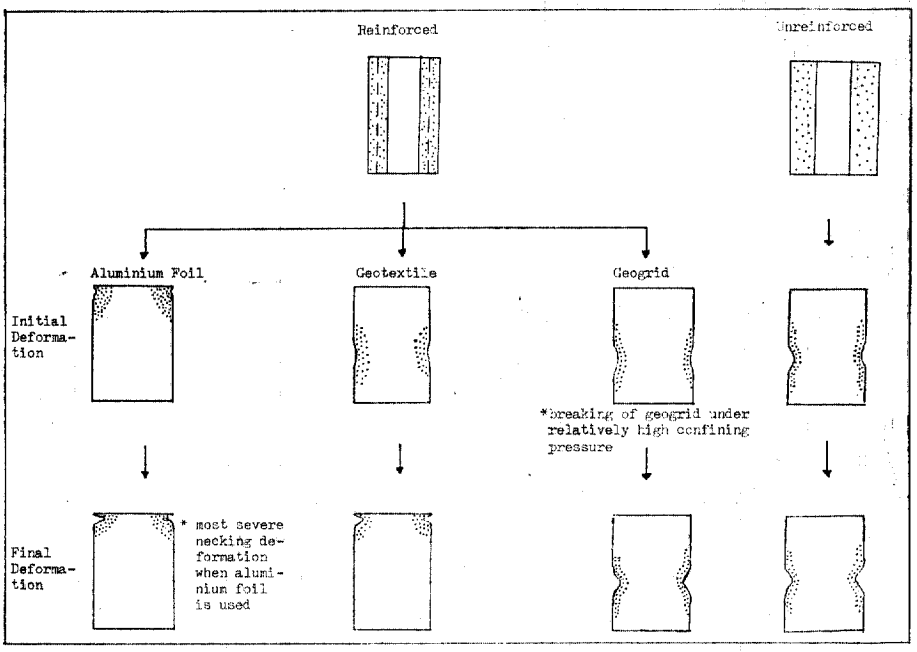


그림 11. Deformation Characteristics of Hollow Cylinder Type Sample under Triaxial Extension Loading

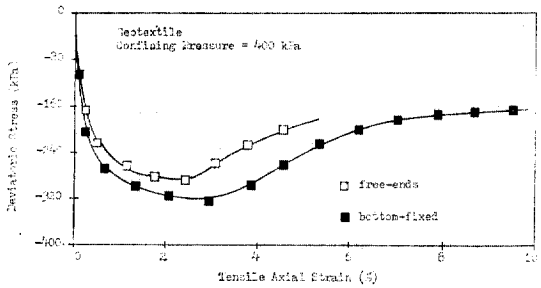


그림 12. Comparision of Free-Ends and Bottom-Fixed under Triaxial Extension with Geotextile Reinforcement

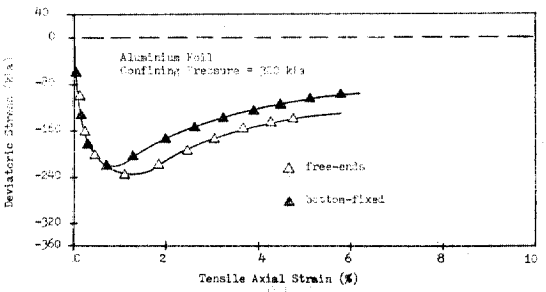


그림 13. Comparision of Free-Ends and Bottom-Fixed under Triaxial Extension with Aluminium Foil Reinforcement

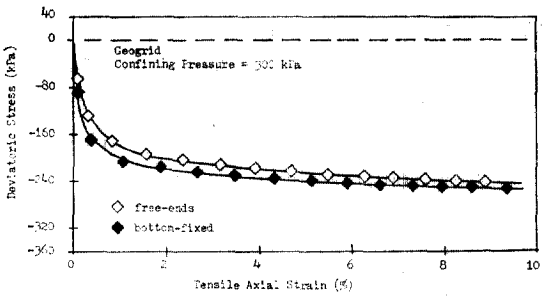


그림 14. Comparision of Free-Ends and Bottom-Fixed under Triaxial Extension with Gegrid Reinforcement

서 兩端自由와 下端固定의 應力-變形관계를 비교하여 보여주고 있다. 이들로부터 다음을 관찰할 수 있었다.

—응력-변형擧動의 類似性

兩端自由와 下端固定의 경우에 있어 引張抵抗의 차이는 있지만 응력—변형커브는 서로 간에 거의 평행하였으며 引張特性의 영향을 받는 파괴시의 변형율, 변형모양 및 최대인장강도 후의 응력감소의 傾向을 동일하게 반영하고 있다.

—initial stiffness

引張初期의 $\Delta\sigma_d/\Delta\varepsilon_a$를 initial stiffness라고 한다면 그 값은 下端固定이 兩端自由보다 더 크다. 즉, 같은 인장응력하에서 下端固定이 변형억제와 引張强度 증가에 효과가 있음을 보여준다.

그러나 특이한 점은 aluminium foil의 경우 兩端自由의 引張抵抗이 下端固定보다 더 크다는 것이다.

5. 고 찰

앞에서 기술한 실험결과와 관찰로부터 보강재의 引張特性 측면에서 hollow cylinder type의 보강토샘플의 삼축인장에 대한 일반적인 거동을 먼저 살펴보기로 하자.

샘플의 형태와 경계조건의 영향에 의해 인장초기에는 internal deformation tendency가 샘플의 중간부분에 보다 크게 나타난다. 그러나 aluminium foil과 같은 非引張性의 보강재의 경우 무시할 정도로 작은 伸張率로 말미암아 위의 경향이 억제되므로 상대적으로 억제가 되지 않은 보강재의 끝부분에 변형(necking)의 유발 및 집중현상이 발생한다. 본 실험에서 사용된 geotextile과 같이 aluminium foil에 비해 상대적으로 extensible한 경우, 초기에는 위의 경향에 따라 샘플 중간부에 다소의 변형이 유발되지만 마찬가지로 제한된 보강재의 伸張率로 인하여 補强材面上의 모래입자들의 움직임이 억제되므로 결국 샘플 끝 부분의 necking으로 종결된다. 3종류의 보강재 중 가장 伸張率이 좋은 geogrid의 경우 모래입자들의 움직임과 더불어 geogrid가 함께 늘어나므로 변형의 양상은 모래 자체의 경우와 유사하다.

free-ends와 bottom-fixed를 비교한 그래프에서 볼 수 있듯이 일반적으로 후자가 더 좋은 보강효과를 제공하고 있다. 즉 보강재의 하단을 고정시킴으로서 인장으로 인한 흙의 upward movement tendency를 억제하는 효과가 추가되는데 본실험에 따르면 이로 인한 인장응력의 증가는 삼축인장의 진행에 상관없이 비교적 일정한 경향을 보였다.

非引張性의 aluminium foil의 경우 보강재의 하단이 고정됨으로서 인장으로 인한 흙의 upward movement tendency는 더욱 억제되어 상대적으로 上端에서의 necking의 출현이 下端이 자유로운 경우보다 더 빨라진다. necking의 出現은 引張應力이 이미 最大點을 지나 減少 단계에 있음을 뜻하므로 바꾸어 말한다면 본 실험조건의 경우 aluminium foil과 같이 非引張性 보강재는 下端固定의 경우가 오히려 낮은 보강효과를 보였다.

aluminium foil이나 geotextile의 경우 보강효과가 흙과 보강재 표면 사이의 마찰 작용(frictional interaction)으로부터 얻어지는데 비하여 geogrid의 경우 물론 grid의 rib과 node의 표면에서의 마찰과 더불어 grid opening 안에 interlack된 흙입자들로 말미암은 anchorage 작용이 보강효과 증대의 또다른 요인으로 추가된다. Koerner에 따르면 후자의 메커니즘을 grid의 rib 앞의 흙의 bearing capacity 문제로 간주하였는데, 본 실험에서의 geogrid breaking도 anchorage 작용으로 유발된 引張應力이 주원인으로 사료된다.

Gray et al.[4]이 제시한 引張特性이 영향을 미치는 두가지의 주요현상인 파괴시의 변형율과 最大引張强度후의 應力감소의 측면에서 본 모델실험의 결과들을 비추어 본다면 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

· 파괴시의 변형율

aluminium foil<geotextile<geogrid

· 최대인장강도 후의 응력감소

aluminium foil>geotextile>geogrid

이는 앞의 3장에서 소개한 보강재 자체의 引張特性과 연관지어 볼 때 Gray et al.[4]의 제안은 보다 보편적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

따라서 종래의 보강토옹벽 안정해석 기법처럼 한계평형 이론의 적용을 위하여 흙과 보강재의 强度特性을 각각 따로 구하여 사용할 수도 있겠지만 토질구조물의 경우 극한상태를 염두에 둔 安定의 문제와 더불어 주어진 載荷條件에 대한 變形의 문제도 또한 중요하므로 흙과 보강재를 별개로 하여 필요한 파라메터들을 얻기 보다는 하나의 複合物質로 보아 그 거동을 관찰, 이해하는 것이 바람직하다고 생각된다.

6. 결 론

제한된 회수와 한정된 실험조건이었지만 보강재가 삽입된 hollow cylinder type sample의 삼축인장시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 補强土의 擧動을 보다 전체적으로 이해하기 위해서는 引張特性의 측면에서 보강재를 識別하는 것이 매우 중요하다.

2) 荷重-變形擧動, 파괴시의 변형율, 최대강도 후의 응력감소에 대한 보강재의 引張特性의 영향은 직접전단시험이나 삼축압축 시험에서 관찰되었던 종래의 경향은 본 모델의 삼축인장시험에서도 잘 일치하였다.

3) hollow cylinder type 샘플에 대한 삼축인장시험을 통하여 보강토의 전형적인 파괴양상인 breakage와 slippage의 발생이 가능하였다.

4) 補强材의 下端이 固定된 경우와 自由로운 경우보다 일반적으로 증가된 補强效果를 나타내었으나 본실험의 경우 非引張性의 aluminium foil은 necking의 早期出現과 뒤이은 應力減少로 말미암아 반대의 효과를 보였다. 그러나 일반적인 應力—變形擧動은 위의 두경우가 類似하였다.

5) 引張에 따른 샘플의 變形帶가 水平한 사실로부터 荷重—變形擧動이 hollow의 중심축에 대하여 對稱的임을 볼 수 있다. 따라서 종래의 모델실험들이 안고 있었던 應力 및 變形의 非對稱的 局部現象을 克服할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Henri Vidal "The Development and Future of Reinforced Earth" *Proceedings of a Symposium on Earth Reinforcement, ASCE* Annual Convention, Pittsburgh, Pennsylvania, 1978, pp. 1~63.
2. Rebert M. Koerner "*Designing with Geosynthetics*" Prentice-Hall, 1986, pp. 1~27.
3. A. McGown, K.Z. Andrawes and M.M. Al-Hasani "Effect of Inclusion Properties on the Behavior of Sand", *Geotechnique* 28, No. 3, 327~346, 1978, pp. 327~346.
4. Donald H. Gray and Harukazu Ohashi "Mechanics of Fiber Reinforcement in Sand" *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 109, No. 3, 1983, pp. 335~353.
5. Kamal Z. Andrawes, Alan McGown, Mohsen M. Mashhour and Ragui F. Wilson-Fahmy "Tension Resistant Inclusion in Soils", *Journal og Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 106, No. GT 12, 1980, pp. 1313~1326.
6. T.S. Ingold "Some Observations on the Laboratory Measurement of Soil-Geotextile Bond", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 5, No. 3/4, 1982, pp. 57~67.
7. Donald H. Gray and Trlal Al-Refeal "Behavior of Fabric-versus Fiber-Reinforced Sand", *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 112, No. 8, 1986, pp. 804~820.
8. M.T. Tumay, Mario Antonini and Ara Arman "Metal versus Nonwoven Fiber Fabric Earth Reinforcement in Dry Sands: A Comparative Statistical Analysis of Model Tests", *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 2, No. 1, 1970, pp. 44~56.
9. 김운영, "Hollow Cylinder Type 샘플을 사용한 삼축인장실험에 관한 연구", **1987년도 대한토목학회 학술발표회 논문집**, 1987, pp. 325~332.
10. M. Al-Hussaini and E.B. Perry "Field Experiment of Reinforced Earth Wall", *Proceedings of a Symposium on Earth Reinforcement, ASCE* annual convention, Pittburgh, Pennsylvania, 1978, pp. 99~127.
11. 홍성완, 심재법, 조삼덕, "토질 및 기초공학 분야에서의 Geotextile 이용", **대한토목학회지**, 제35권 제 2 호, 1987. 4. pp. 28~30.

(接授 : 1987. 11. 17)