

보강용 토목섬유의 거동 파악을 위한 현장계측

Field Instrumentations for the Investigations of the Behaviour of Geotextiles

조성민¹⁾, Sung-Min Cho, 김홍종¹⁾, Hong-Jong Kim, 장용채²⁾, Yong-Chai Chang, 남순성³⁾, Soon-Sung Nam

¹⁾ 한국도로공사 도로연구소 책임연구원, Chief Researcher, Highway Research Center, KHC

²⁾ 한국도로공사 도로연구소 수석연구원, Research Director, Highway Research Center, KHC

³⁾ (주)은진건설엔지니어링 대표이사, President, Eun-jin Construction Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : Full scale trial constructions were performed to verify the deformational characteristics of the polyester(PET) mat which was used for the embankment reinforcement. Many instrumentaion equipments including surface settlement plates, profile gauges and inclinometer casings were installed to observe the behaviour of the soft ground due to the soil embankment. 60 electrical resistance strain gauges and 9 vibrating wire LVDTs were installed to measure the deformation of the PET mat. Many pre-tests and investigations were carried out to suggest the proper installation method for the bonding of the gauge to the geotextile, waterproofing and pretection from the hazard environments.

1. 개요

토목섬유는 지반 내에서 흙과 상호작용을 하며 본래의 능력을 발현하기 때문에 그 거동 규명을 위해서는 현장 지반에서의 연구가 필수적이라 할 것이나, 경제적인 부담 증가와 계측기 설치 및 관리상의 어려움 때문에 현장 시험연구 사례가 거의 없는 실정이다.

도로연구소(HRC)에서는 지반 보강과 균등 침하 유도를 위하여 성토체 하부에 포설하는 폴리 에스테르(polyester, 이하 PET) 매트와 역학적 거동 특성 파악과 토목섬유상의 계측기 설치 기술 및 관리 방안의 모색을 위하여 실제 공사가 진행 중인 현장 지반에서 시험시공을 수행 중에 있다. 현장지반에서 실규모로 시공되는 PET 매트상에 직접 계측기를 부착하여 매트의 변형 거동을 관찰하는 것은 국내에서 처음 행해지는 연구로서, 현재는 필요한 계측기의 설치를 끝내고 단계성토 계획에 따라 성토 시공을 진행하면서 지반과 토목섬유의 거동을 관측하고 있다. 이 글에서는 PET 매트의 거동 관측을 위한 계측기 선정 및 설치 과정과 현재까지 측정된 결과를 위주로 서술한다.

2. 시험시공

2.1. 개요

시험 시공을 시행한 지역은 서해안고속도로(당진-서천간)를 건설 중인 곳으로서 원지반상에 장비 주행성 확보와 충분한 목적의 필터용 폴리프로필렌 부직포(nonwoven PP mat)를 설치하고, 그 위에 일정 두께로 모래층(sand mat)을 형성한 다음, 성토체 보강 목적의 P.E.T 매트(인장강도

15t/m)를 포설하였다. PET 매트 of 포설 방법에 따른 거동 변화를 관측하기 위하여 그림 2와 같이 일부 구간에는 성토체 길이 방향으로 봉합을 하지 않고 매트를 포설하였다. P.E.T 매트의 성토체 길이 방향 연결 방법과 설치 간격에 따라 시험시공 구간은 그림 1과 같이 A, B, C의 3구역으로 구분하였다.

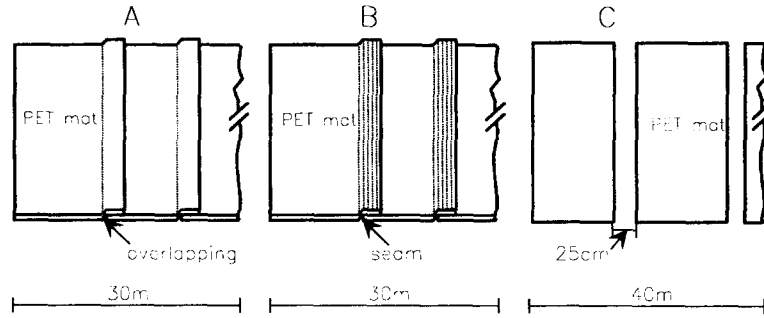


그림 1. 매트 포설 조건별 시험시공 구역의 구분

2.2. 지반의 공학적 특성

시험시공 지역의 지반 특성을 파악하기 위하여 설계 당시 수행한 지반조사 결과를 분석하였으며, 우리 공사에서 보유하고 있는 '지반특성측정시스템(조성민 외, 1998)'을 이용하여 전자식콘관입시험(CPT)과 현장배인전단시험(FVT)을 추가로 수행하였다.

그림 2는 콘관입시험으로 얻은 선단저항력 q_c 와 주면마찰력 f_s 를 심도별로 나타내고, 이를 토대로 지층 조건을 도시한 것이다. 그림에서 '▲'로 표시된 것은 1단계 성토가 종료된 이후에 실시한 시험의 결과이다.

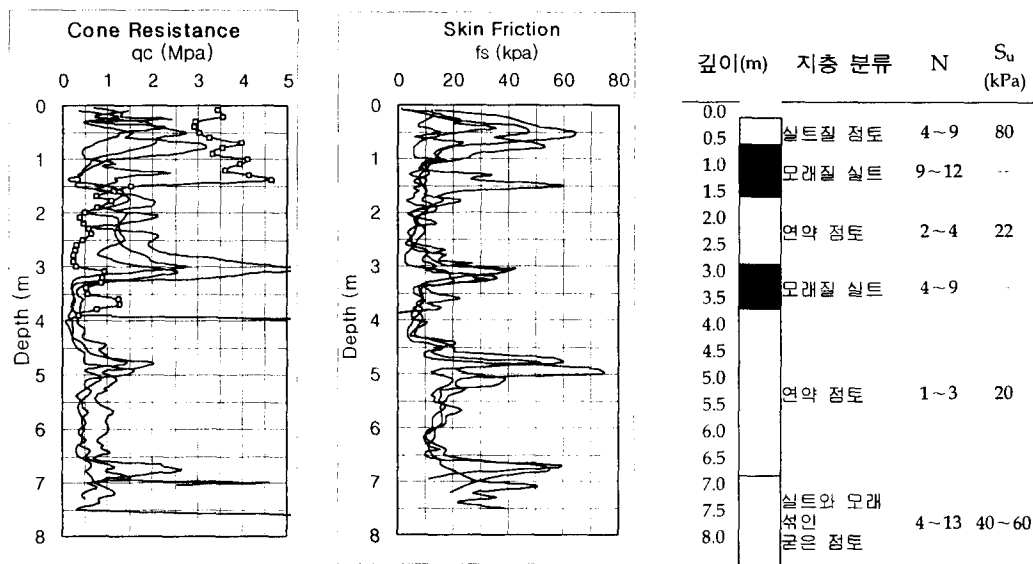


그림 2. 대상 지반의 현장시험 결과 및 지층 조건

시험시공 구간의 지반은 지표부터 심도 약 1m까지 점토와 모래가 섞인 실트층, 그 아래로 최대 0.8m 두께의 연약한 점토층이 심도 약 1.5m까지 분포한다. 그 하부에는 두께 1.5m 가량의 모래질 실트층이 심도 약 3.2m까지 존재하고, 그 아래로 심도 약 4.5m까지 두께 1.5m 가량의 연약 점토층이 분포한다. 여기에서부터 아래로는 실트 섞인 단단한 점토층이 심도 8m 이상까지 분포한다. 즉, 비배수강도가 20kPa 안팎인 연약 점토층이 지표면 기준으로 심도 1.0m부터 심도 4.5m까지 분포하고 있으며, 그 중간에 1.5~2.5m 두께의 모래 섞인 실트층이 존재하고, 그 아래로는 실트와 모래가 섞인 단단한 점토층이 분포한다. 점성토층의 함수비는 30% 안팎이며, 액성한계는 자연함수비를 약간 상회한다. 표준압밀시험으로 얻은 압축지수는 0.25 정도이고, 압밀계수는 $1 \times 10^{-2} \text{cm}^2/\text{s}$ 정도로 큰 편이다. 한편, 실내 일축압축시험과 삼축압축시험으로 구한 점성토층의 비배수전단강도는 대략 25kPa 정도인 것으로 나타났다.

3. 계측

3.1. 계측기의 선정

현장 지반에 포설된 토목섬유의 거동은 지반의 거동과 밀접한 관련을 가지고 있으므로, PET 매트 자체의 변형 뿐 아니라 성토체와 하부지반의 변형을 함께 관측하여야 한다. 따라서 지반의 침하량, 횡변위량 등을 관측할 수 있는 침하관, 경사계 등을 기본적으로 설치하고, 매트의 변형, 응력을 측정할 수 있는 별도의 계측기를 선정하여 설치하여야 한다.

시험시공 구간에는 지반의 침하량을 측정하기 위해서 각 구역별로 3개, 총 9개의 지표면 침하관을 설치하였으며, 또한 각 구역마다 전체 단면에서의 침하량 프로파일을 알기 위해 전단면침하계(profile gauge)를 1개씩 매설하였다. 그리고, 성토 하중에 의해 유발되는 지중 횡변위를 관측하기 위하여 B 구역과 C 구역에 경사계를 1개씩 매설하였다.

PET 매트 거동 측정을 위한 계측기로는 변형률계(strain gauge)와 선형변위계(LVDT; linear variable digital transformer)를 선정하였다. 변형률계는 실내 모형시험시에 널리 활용되고 있으며, 외국에서는 현장 시험시공 계측에 이미 활용한 바 있다(Koerner, 1996). 매설된 계측기들은 PET 매트와 일체 거동을 하여야 하며, 성토 충격과 온도 변화 및 강우와 지하수위 상승에 의한 수분 유입에 견뎌야 하므로 측정 방식과 크기, 재질에 제한을 받으며, 반면에 내구성이 매우 좋아야 한다. 현장 포설된 토목섬유의 계측과 관련하여 일부 성과가 보고되고는 있으나, 이들은 대부분 지오그리드 등 상대적으로 강성이 큰 토목섬유 제품에 해당되는 것으로서, PET 매트와 같이 강성이 매우 작고 신축량이 큰 재료에 적합한 계측기의 선정에는 많은 어려움이 있다. Bourdeau 등(1994)과 Guglielmetti 등(1996)은 토목섬유 변형 측정을 위하여 접착지점에서 연속적인 측정이 가능한 특수 케이블(inextensible flexible cable)을 사용하기도 하였다.

변형률계는 측정 방식에 따라 전기저항식과 진동현식 등 두 종류로 대별할 수 있다. 내구성이나 내습성, 결과의 신뢰성 면에서는 진동현식이 유리하나, 크기가 크고 측정 가능 범위가 상대적으로 작은 단점이 있다. 반면에 전기저항식은 가격이 싸고 신축성이 좋으며 소성 게이지를 이용할 경우 10% 이상의 변형률도 측정할 수 있으나, 습기와 충격에 약하고 케이블이 길어질 경우 오차가 커지는 문제가 있다(Hanna, 1985).

이러한 여러가지 사항들을 검토하여, 시험시공시 토목섬유 매트에 부착하여 사용할 계측기로 전기저항식 변형률계와 진동현식 선형변위계를 선정하였는데, 이 두 종류의 계측기는 각 구역마다 함께 설치되어 서로의 측정값을 교차검증하는 목적으로도 활용할 수 있게 하였다. 변형률계는 일본 T사의 모델로서 센서부는 구리-니켈선으로 구성되어 있으며, 길이 10mm, 폭 3mm이고, 플라스틱재질의 베이스는 길이 20mm, 폭 7mm의 크기를 갖는다. 선형변위계는 미국 G사의 모델로서 길이 300mm, 직경 8mm로 표면 균열이나 절리 변위 측정에 주로 이용되는 것이다.

시험시공 구간에 설치한 계측기의 종류와 수량은 다음 표 1에 정리하였다.

표 1. 시험시공 구간에 설치한 계측기의 종류와 수량

| | Quantity | | | Measured Value | Remarks |
|------------------------------------|----------|----|----|--------------------------------|-------------------------|
| | A | B | C | | |
| electrical resistance strain gauge | 20 | 20 | 20 | strain of PET mat | $\epsilon_{max} > 10\%$ |
| vibrating wire LVDT | 3 | 3 | 3 | displacement of PET mat | $\epsilon_{max} > 10\%$ |
| settlement plate | 3 | 3 | 3 | surface settlement | |
| profile gauge | 1 | 1 | 1 | settlement profile | |
| inclinometer casing | 1 | - | 1 | lateral displacement of ground | |

3.2. 계측기의 설치와 관리

지반 변위 측정을 위한 침하판, 경사계, 전단면 침하계는 원지반상에 PP 매트를 포설하고 모래를 간 다음 설치 위치별로 모래를 일부 파낸 후 매설하는 통상적인 방식으로 설치하였다.

이와는 달리 매트의 거동을 관측하기 위한 변형률계와 선형변위계의 설치는 다른 방법으로 설치하였다. 이들 계측기들은 매트의 움직임에 즉각 동일한 물리량으로 반응하여야하므로 매트와 일체화되어야 하며, 특히 변형률계의 경우 전기저항을 이용하므로 방수처리가 완벽하게 되어야 한다. 변형률계의 효과적인 설치 방법을 찾기 위해 시편을 이용하여 사전시험을 수행한 결과를 표 2에 간략하게 정리하였는데, 게이지와 섬유 사이에 고무 멤브레인 등 임의의 매개 물질을 사용할 경우에는 매개 물질의 변형 특성이 게이지 측정값에 상당한 영향을 미치는 것으로 나타나, 게이지를 섬유면에 직접 부착하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.

표 2. 변형률계 부착 방법별 시편시험 결과

| Type | difference between readings and real strain | |
|--------------------|---|------------|
| mediate attachment | thick membrane | very large |
| | thin membrane | large |
| Attachment method | full cement | small |
| | partial cement | large |
| direct attachment | | |

이 때 게이지와 섬유의 접착에 사용하는 접착제가 중요한 변수가 되는데, 보강토 옹벽의 지오그리드에 아교를 이용하여 변형률계를 부착한 외국 사례에서는 아교의 상대적 강성이 커서 측정 부위에서 오히려 그리드의 변형이 억제되는 현상이 나타났다고 보고된 바 있다. 이러한 점을 감안하여 변형률계의 접착제로는 제작사에서 추천한 제품(용고시 허용 변형률 25% 이상)을 시험을 통해 확인하고 사용하였다. 한편, 부착 대상 섬유면을 아무 처리 없이 두었을 때가 매끈하게 처리하였을 때에 비하여 측정 결과가 우수하여 부착면은 무처리하는 것으로 하였다.

그리고, 변형률계의 방수 처리를 위해서 접착제와 실리콘, 절연 테이프를 사용하여 그림 3과 같이 섬유면에 부착하였다. 이 방법으로 처리한 변형률계와 섬유는 일정 시간 동안 수침시킨 후 실내에서 시편 시험을 통해 그 효용성을 충분하게 검증하였다.

변형률계의 부착 방법과 순서는 다음과 같다.

- 1) 게이지 부착 위치의 섬유 표면 청소 및 건조
- 2) 해당 위치의 섬유 바닥면에 아크릴판 등 불투수성 평판 받침 삽입(평면 유지 및 작업 도중 바닥면에서 올라오는 습기 차단)
- 3) 게이지 부착 위치에 접착제 도포 및 부착
- 4) 리드선 단자 부착 후 게이지 주변에 원형으로 접착제 도포(섬유 단면을 통한 침수 차단)
- 5) 리드선을 납땜으로 단자와 게이지에 접선
- 6) 게이지와 단자가 충분히 잠기도록 실리콘 도포 후 절연 테이프로 표면 마감
- 7) 게이지와 접선한 케이블을 보호관에 넣고 S자 형태로 여유를 두어 남겨놓으면서 데이터 로거와 연결

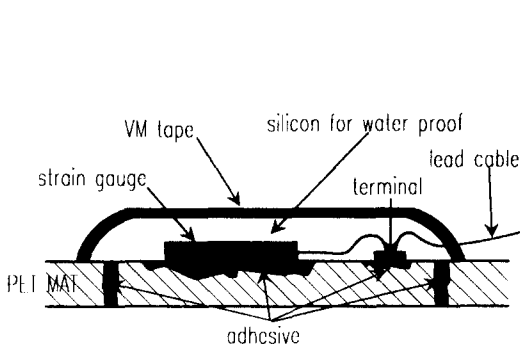


그림 3. 변형률계의 방수처리 및 부착 단면

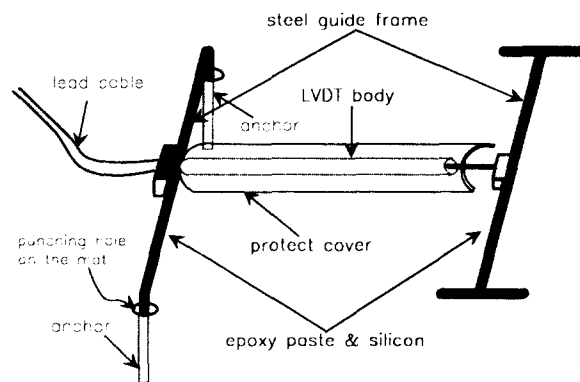


그림 4. 선형변위계의 설치 방법

진동현식 선형변위계는 그림 4와 같이 양쪽 끝에 철제 막대를 용접하여 이 막대를 섬유 매트면에 에폭시를 사용하여 접착하는 방식을 사용하였다. 리드선 접속부에 연결된 철제 막대에는 앵커를 설치하여 매트를 뚫고 흙 속에 고정되도록 하였다. 선형변위계 본체는 PVC 재질의 보호덮개로 덮어 게이지 사이로 흙 등의 이물질이 끼거나 충격으로 본체가 파손될 위험을 줄였다. 별도의 방수처리는 하지 않았다.

의 깊이별 분포는 다음 그림 7과 같다. 이 변위는 성토체 선단부 아래 지반에서 경사계를 이용하여 측정된 것이다. 아직 성토고가 높지 않고, 또한 점성토층 내에 실트 및 모래질 성분이 많이 포함되어 있어 현재까지 관측된 횡변위량은 40mm를 넘지 않고 있다.

3.3.2. 변형률계 계측 결과

PET 매트 위에 직접 부착한 변형률계는 설치 직후와 성토 초기에 고장난 4개를 제외한 56개가 현재까지 정상적으로 작동하고 있어 93% 이상의 생존율을 유지하고 있다. 이러한 결과는 토목섬유 뿐 아니라 여타 다른 공사 현장의 계측 사례에서도 찾아보기 어려운 정도의 높은 생존율로서, 이번 시험시공 계측에 적용한 게이지 부착 방법이 매우 효과적임을 입증한다고 볼 수 있다. 더욱이, 변형률계의 작동 환경이 성토 시공을 위한 중장비의 통행과 다짐으로 인한 충격과 수분, 먼지 등에 그대로 노출되어 있고, 또한 이번 여름철에 빈번하게 집중호우가 있었던 가운데에서도 이와 같은 생존율을 보이고 있음은 시사하는 바가 크다고 하겠다.

3m 높이의 1단계 성토가 이루어진 현재까지 변형률계로 측정된 PET 매트의 변형률은 0.1% 미만으로 극히 미미한 수준이나, 구역별로 다소의 차이를 보이고 있다. A 구역과 B 구역에서 측정된 매트의 변형률은 약 0.03% 안팎의 값을 보이고 있고, C 구역에서 측정된 값은 약 0.06%를 나타내고 있다. 각 구역에서 측정된 결과를 그림 8~13에 나타내었다. 그림들에 표시된 값은 게이지에서 현재 읽혀지는 값들로, 매설 상태의 초기값은 최초 측정값들로 간주할 수 있다. (-)부호는 압축을 의미한다. 이와 같이 관측된 토목섬유 매트의 변형률이 예상과 달리 매우 작은 것은 낮은 성토고 외에도 상대적으로 실트와 모래가 많이 포함된 지층 조건에 기인하는 바가 클 것이다.

전체적인 경향을 살펴보면 성토가 개시된 이후로 측정값이 점차 증가하고 있으며, 이는 미소하나 PET 매트가 인장력을 받아 늘어나는 상태에 있음을 보여주는 것으로 생각된다. 더욱이 측정값들이 거의 동일한 응답 거동을 보이는 등 게이지가 정상 상태를 유지하고 있어, 지속적으로 관측시 공학적으로 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

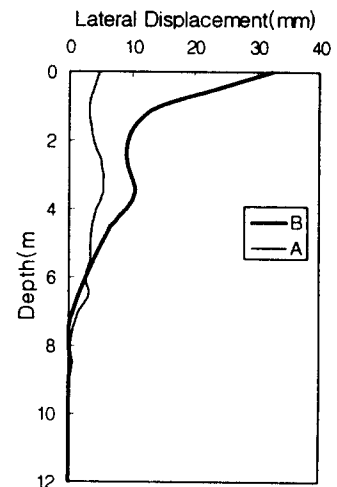


그림 7. 지중횡변위

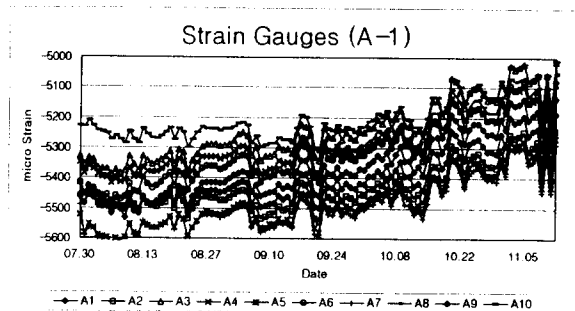


그림 8. 변형률계 계측 결과(A구역-1)

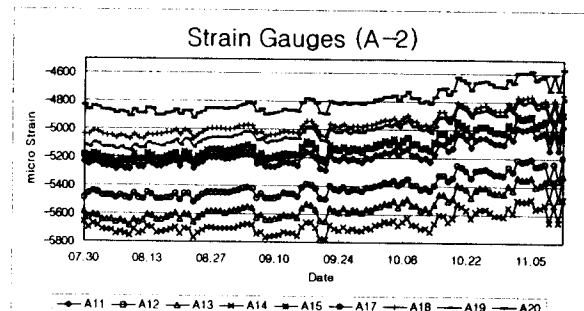


그림 9. 변형률계 계측 결과(A구역-2)

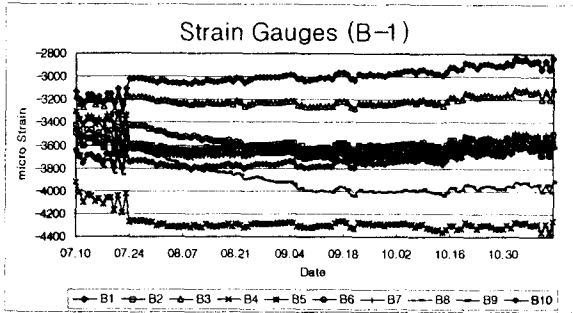


그림 10. 변형률계 계측 결과(B구역-1)

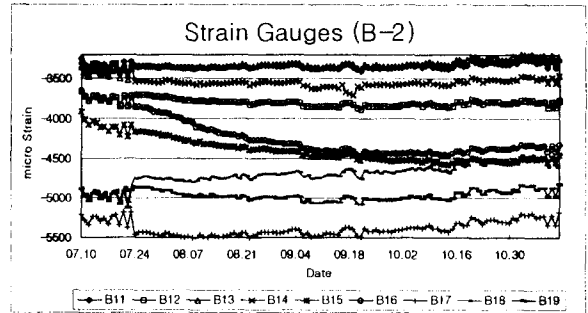


그림 11. 변형률계 계측 결과(B구역-2)

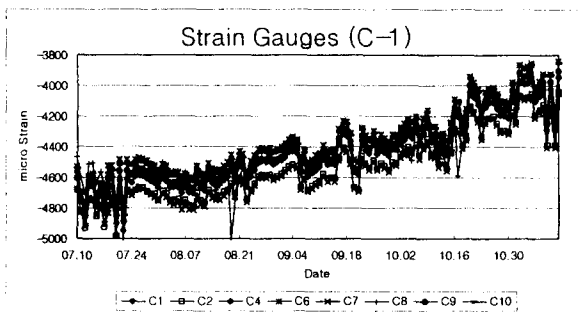


그림 12. 변형률계 계측 결과(C구역-1)

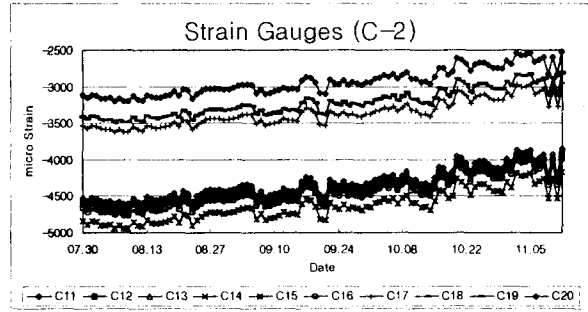


그림 13. 변형률계 계측 결과(C구역-2)

3.3.3. 선형변위계 계측결과

각 구역별로 3개씩 설치한 선형 변위계는 성토 직후 B 구역의 2개가 고장난 것 외에는 모두 정상적으로 작동하고 있어, 현재까지의 계이지 생존율은 78% 가량이다. 측정 결과는 그림 14에 일자별로 나타내었다. 7개 중 C 구역의 1개를 제외하고는 성토가 진행되면서 변위가 늘어난 것으로 관측되었으나, 변형률계와 마찬가지로 그 양이 매우 작아(0.5mm 이하, 변형률 기준으로 0.1% 미만) 아직까지는 공학적 분석의 대상으로 삼기에는 무리가 있다.

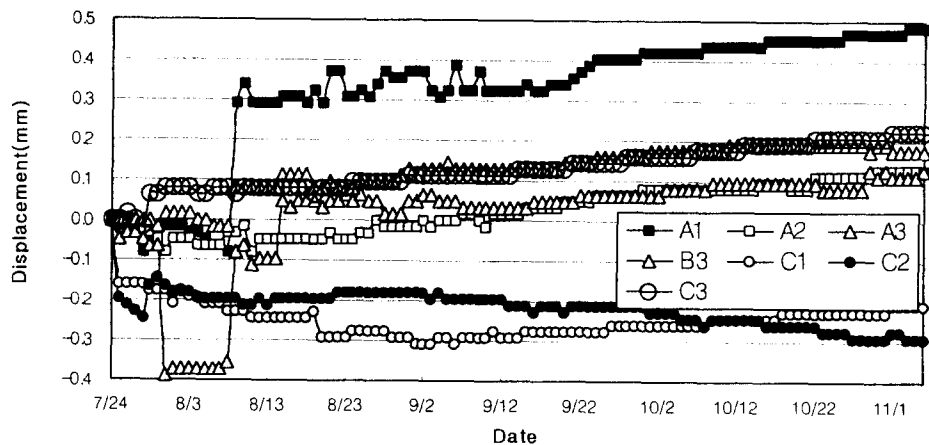


그림 14. LVDT 측정 결과

4. 결론

지반 보강을 위하여 포설되는 토목섬유(PET 매트)의 현장 거동을 분석하기 위하여 지반과 섬유매트의 변형을 측정할 수 있는 계측시스템을 적용한 시험시공을 시도한 결과 다음과 같은 잠정적 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) PET 매트의 변형 측정에 필요한 계측기의 선정과 설치법 모색을 위하여 사례 조사와 사전 시험을 실시하였으며, 이를 토대로 전기저항식 변형률계와 진동현식 선형변위계를 매트상에 직접 부착하고 데이터로거와 연결하여 자동계측시스템을 구성하였다. 계측기들은 매트와의 일체성을 유지하고 시공 중의 충격과 수분 침투에 견디도록 설치시 적절한 처리를 하였다. 이렇게 설치한 변형률계와 선형변위계의 현재 생존율은 각각 93%와 78% 이상으로 높게 나타나, 적용한 방법이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- 2) 토목섬유의 변형을 유발하는 지반의 변형 거동 파악을 위해 지표 침하를 측정할 수 있는 지표면 침하판과 전단면 침하계를 매설하였으며, 성토체 선단부 아래 지반의 지중 횡변위를 측정할 수 있는 경사계를 설치하였다.
- 3) 1단계 성토가 완료된 현재까지 변형률계와 선형변위계를 통해 관측된 매트의 변형률은 0.1% 미만이나, 성토 시공에 따라 매트에 작용하는 인장력이 증가하면서 변형률이 점차 늘어나는 경향을 뚜렷하게 확인할 수 있었다. 계획에 따라 성토가 계속 진행되면서 지반의 변형량이 커지게 되면 매트에서 관측되는 변형률도 증가할 것이므로, 지속적으로 계측시 공학적으로 의미 있는 결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. Bourdeau, Y., Oganro, T. and Larael, P.(1994), "Use of strain gauges to predict soil-geotextile interaction", Proc. 5th IGS Conference, Singapore, pp.451-456
2. Guglielmetti, J.L., Koerner, G.R. and Battino, F.S.(1996), "Geotextile reinforcement of soft landfill process sludge to facilitate final closure: An instrumented case history", Proc. GRI-9 Conference on Geosynthetics in Infrastructure Enhancement and Remediation, GII, Philadelphia, pp.195-211
3. Hanna, T.H.(1985), *Field instrumentation in geotechnical engineering*, 1st ed., Trans Tech Publications
4. Koerner, R.M.(1996), "The state-of-the-practice regarding in-situ monitoring of geosynthetics", Proc. 1st European Geosynthetics Conference, Netherlands, pp.71~86
5. 조성민, 김홍종, 장용채, 김성환(1998), "효율적 지반조사를 위한 차량 탑재형 시스템의 구축", 한국지반공학회 '98 가을 학술발표회 논문집, pp.89-96