

대형인발시험기를 이용한 지오그리드로 보강된 궤도하부구조층의 효율성 평가 Evaluation of Geogrid-Reinforced Track substructure Effectiveness Using A Large-Scale Pullout Device

Jeongho Oh^{a,*}

^a Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang 437-763, Republic of Korea

ABSTRACT

A number of attempts has been made to reinforce ballasted track substructure to meet the requirement of high-speed operation and effective rehabilitation of existing railroads. For the purpose of this, the use of geogrid has been applied, and the benefit of its use has been recognized via previous studies. In this study, an experimental pullout test was carried out to investigate the influence of normal stress on pullout strength of geogrid using different types of soil and geogrid. The results revealed that the pullout resistance generally tends to increase proportional to normal stress while the pullout coefficient interaction decreases, which is a function of material interface properties, such as the friction angle of soil, and interlocking condition between soil and geogrid. In addition, a methodology based on work-energy concept was proposed to evaluate effectiveness of geogrid and limitedly verified using test results.

KEYWORDS

Geogrid,
Ballasted track
substructure,
Pullout coefficient of
interaction,
Pullout strength,
Work-energy concept

최근 철도의 고속화와 효율적인 기존철도 노선의 활용화가 요구됨에 따라 다양한 철도 노반의 강화에 대한 시도가 진행되어 왔다. 그 중 지오그리드는 기존의 연구들을 통해 보강효과가 있음이 인지되어왔고 이에 활용범위가 늘어나고 있다. 본 논문에서는, 물성 치가 다른 노반재료들로 구성된 궤도하부 노반을 형성 후 두 종류의 지오그리드를 각각 설치하고, 상재하중에 대한 인발강도에 미치는 영향을 알아보았다. 실험결과 인발강도와 상재하중은 비례하는 경향을 보여준 반면, 상호작용 인발계수는 감소되었으며 이는 상재하중 크기뿐만 아니라 접촉면에서의 마찰각, 격자와 입자간의 결합상태등 복합적인 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 일-에너지 개념을 이용한 지오그리드 효과를 산정하는 방법을 제시하였고 제한적으로 실험결과를 이용하여 검증하였다.

지오그리드
자갈도상궤도
인발상관계수
인발강도
일-에너지 개념

© 2014 Korea Society of Disaster Information All rights reserved

* Corresponding author. Tel. 82-70-8855-1655. Fax. 82-31-462-1531.
Email. j-oh@ut.ac.kr

ARTICLE HISTORY

Received Feb. 18, 2014
Revised Feb. 28, 2014
Accepted Mar. 19, 2014

1. 서론

최근 우수한 경제성과 시공의 간편성 등에 의해 다양한 지반 구조물들의 지지력 강화를 위해 토목섬유를 보강재로 사용하는 사례가 나날이 증가하고 있다. 토목섬유는 크게 지오그리드, 지오텍스타일, 지오펜시트, 지오셀등의 형태로 상용되고 있으며, 이 중 지오그리드를 보강재료 사용한 것은 1986년 이후부터 옹벽공법을 중심으로 활주로, 제방, 도로, 사면, 철도노반 강화 등의 여러 분야에서 국내 보급이 활발해지고 있는 실정이다.

현재 철도의 고속화와 물류량 증대로 궤도하부구조층의 구조적 역할이 증대되고 있으며, 이에 따라 노반강화의 방법 중 하나로 토목섬유 적용이 시도되고 있는 실정이다. 이미 기존의 연구들에 의해 토목섬유는 입자간의 결속력을 증대시키고, 입상재료층과 일반 노반사이의 경계층 역할을 함으로, 세립자분의 입상재료층으로 유입을 최소화하여 영구변형률을 감소시킬수 있는 역할을 한다. 지오그리드에 의한 철도노반 보강효과는 이미 기존연구들에 (Indraratna et al., 2005, Oh 2013)의해 제한적으로 입증된바 있다.

지오그리드의 성능 평가 방법 중에서 대표적으로 많이 사용되고 있는 인발시험기는 지오그리드와 대상 토질과의 상호작용을 고려한 지오그리드의 인발강도를 측정하는 방법으로 ASTM D6706 (ASTM, 2013)에 제시된 절차를 따라 평가하게 된다. 이 실험방법을 이용한 지오그리드와 흙 상관관계를 도출하기 위한 연구가 진행되어 왔다 (TENAX, 2007). 일반적인 실험방법으로는 균질한 토질을 모형박스에 채우고 지오그리드를 중간층에 매설하여 실험을 실시하나 본 논문에서는 두 종류의 지반 재료들로 상/하부 모형지반을 조성한 후, 공학적 성질이 다른 두 재료 사이에서 지오그리드에 작용하는 상재응력의 인발강도에 대한 효과를 알아보고자 하였다.

2. 인발실험 방법 및 구성

2.1 실험재료

(1) 하부구성 재료

대형인발시험기를 이용한 인발실험에 사용한 궤도하부구조의 성토재의 구성은 Table 1과 같이 물성치가 다른 3가지의 재료를 사용하였다. 공학적 특성은 통일분류법을 사용하였으며 분류결과 S-1은 SP, S-3는 GP로 분류되었으며, S-2는 표준사를 사용하였다. 또한, 체분석 시험을 실시하여 곡률계수 및 균등계수를 아래 Table 1에 각각 산정 하였다. 모형 지반은 S-1를 하부지반으로 구성하고, S-2 및 S-3를 이용하여 각각 상부지반을 구성하였다.

Table 1. Material property

Symbol of Materials	Classification	Cohesion of Soil	Friction Angle	Coefficient of Uniformity, Cu	Coefficient of Gradation, Cc
S-1	SP	0.42	36°	4.44	1.17
S-2	Standard Sand	0.07	30°	-	-
S-3	GP	-	-	1.38	1.09

(2) 지오그리드

본 논문에서 사용된 지오그리드는 2종류가 사용되었으며 폴리에스터 재질의 PVC코팅된 격자형 지오그리드를 사용하였다. 지오그리드의 기본 물성치는 아래 Table 2와 같다.

Table 2. Geogrid property

Item	Unit	G-1	G-2
Aperture Size(MD)	mm	30	20
Aperture Size(CD)	mm	20	15
Tensile strength(MD)	kN/m	60	80
Tensile strength(CD)	kN/m	30	30
Tensile strength at Tensile Strain 5%(MD)	kN/m	30	40

2.2 인발시험기 및 실험 구성

(1) 시험기 제원

대형 인발시험기의 규격은 길이가 1.4 m이고 폭이 0.6 m, 그리고 깊이가 0.6 m 이다. 인발저항력을 측정하는 하중계 프레임 방식으로 최대용량은 98 kN 이고, 공기압에 의한 최대 허용상재응력은 50 kPa이다. 지오그리드의 변위를 측정하기 위한 변위계는 인발 프레임 반대편 양 끝에 각각 1개씩 설치되어 있으며, 최대 길이는 1m이고 0.1mm 단위로 측정이 가능하다. 인발속도는 분당 1~100 mm범위로 조절 가능하다.

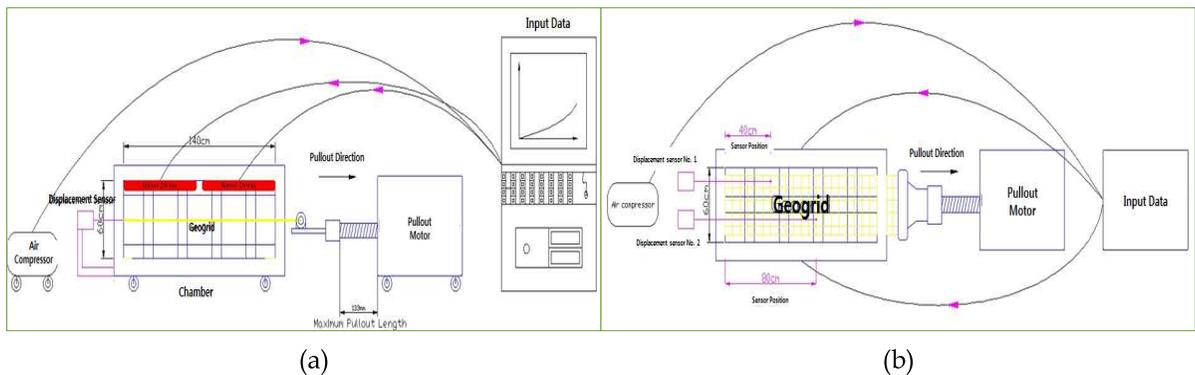


Fig. 1 The pullout device: (a) front view (b) top view

(2) 인발시험 방법

시험기 토조 내부에 궤도하부구조층 모형을 형성하였다. 총 높이 0.6 m중에 하부 0.3 m는 S-1으로 구성하고, 상부 0.3 m는 S-2와 S-3로 각각 구성하여 상부와 하부사이에 지오그리드를 포설하였다. 다짐은 10cm 층다짐을 기준으로 하고 다짐도는 모래 치환법에 의해 확인하였다. S-2 표준사 경우 강사법을 이용하여 층별 일정한 80% 상대밀도를 가질수 있도록 지반을 조성하였다. S-1 재료는 노상을 형상화 하고 있으며, 실내 다짐시험을 통해서 얻은 최대 건조 단위중량 18.63kN/m³와 최적 함수비 12.2%를 기준으로 80% 다짐도로 층 다짐을 실시하였다.



Fig. 2 The pullout device and test preparation

상재하중은 S-2를 이용한 실험에서는 10, 20, 30 kPa로 유지한 반면, S-3 재료는 같은 상재하중을 가하였을 때 상대적으로 큰 지오그리드와 재료간의 결속력으로 실험 중간에 지오그리가 파손되는 현상을 보여 상재하중을 제한 실험을 하기로 결정하였다. 이는 도상자갈용이나 입상재료로 구성되어지는 강화노반을 지오그리드로 보강 시에는 대상 재료 자체의 물성을 고려한 지오그리드 선택이 중요하다는 것을 입증하고 있는 것이다. 지오그리드의 인발되는 선단부는 인발 프레임에 고정되어 있으며, 반대편 끝단은 자유단 상태로 설치 하였다. 인발시 나타나는 인발저항력과 선단변위는 인발장치에 부착된 로드셀에 의해 자동 측정되며, 지오그리드의 인발변위는 인발장치 반대편 토조박스 면에 설치된 두개의 변위계에 의해 측정된다 (Fig 1 참조). 인발속도는 ASTM D-6706-01에 따라 1 mm/min을 설정 하였으며, 2개의 변위계 절점 위치는 인발 프레임으로부터 각각 0.6 m, 1 m 위치하도록 설치하였다. 이는 인발력에 대한 각기 다른 지오그리드 격자 위치에서의 하중전이 현상을 확인하고자 함이다.

3. 실험결과

3.1 모형지반 1 실험 결과(하부 30cm(S-1)+상부 30cm(S-2)구성)

(1) 상재하중 - 선단변위의 상관관계

Fig. 3은 시편의 상하부를 각각 S-1과 S-2 재료로 구성하여 상하부 사이에 지오그리드를 포설하여 각 상재하중에서 선단변위에 대한 인발저항력을 나타낸 그림이다. 선단변위에 대한 인발저항력은 다음과 같이 산정할 수 있다 (ASTM, 2013).

$$P_r = F_p / W_g \quad (1)$$

여기서, P_r = 인발강도 (kN/m), F_p = 최대인발력 (kN), W_g = 지오그리드 폭 (m) 이다.

상재하중이 30, 20, 10 kPa일 때 G-1 지오그리드 경우 최대인발강도는 각각 30.5, 22.4, 16.4 kN/m으로 측정되었으며, G-2지오그리드의 경우 각각 31.5, 25.6, 10.2 kN/m으로 측정되었다. 각각의 지오그리드는 상재하중의 크기가 클수록 그에 상응하는 인발강도도 증가함을 알 수 있었다. 이는 상재하중의 증가가 토조 안의 구속압력의 증가를 유발함으로써, 지오그리드와 지반재료간의 결속력 증가에 따른 것으로 판단된다. 상재하중이 어느 단계 이상에서는 (본 연구에서는 20 kPa 이상) G-2 지오그리드의 인발강도가 좀 더 큰 것으로 측정되었으며, 이는 Table 2에서 보듯이 G-2 지오그리드의 기계방향 인장강도가 큰 것에 기인한다고 사료된다. 또한, 선단변형 역시 상재하중이 커질수록 인발력이 최대가 될 때 증가되는 것을 알 수 있다.

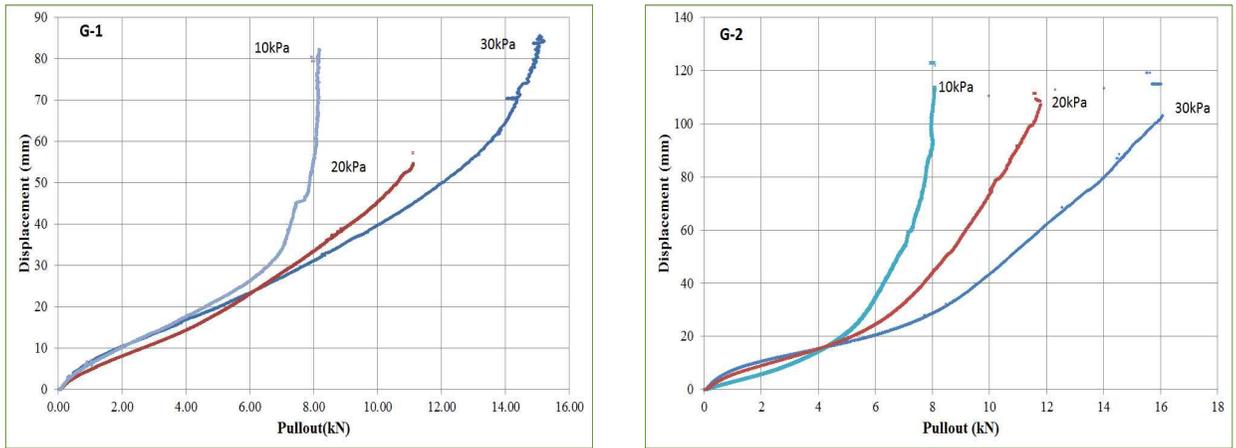


Fig. 3 Displacement-pullout relation curve(S-2)

(2) 상재하중 - 변위계 절점변위의 상관관계

Fig. 4, 5는 각 상재하중에 따른 인발력과 변위계 절점 위치에 따른 변위량을 나타낸 그림이다. 여기서, 센서 1은 인발 프레임에서 1 m 지점의 측정 변위를 말하며, 센서 2는 0.6 m 지점의 변위를 각각 말한다. G-1 지오그리드의 경우 인발 프레임에 가까운 변위계 에서 높은 변위가 측정되었으나, G-2 지오그리드 경우 그 차이가 상대적으로 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 결과는 가해진 인발력에 대해 G-2 지오그리드가 G-1 지오그리드에 비해 높은 하중 전이가 이루어진 것으로 보이며, 이는 G-2 지오그리드의 좀 더 조밀한 격자 배열에 따른 것으로 판단된다.

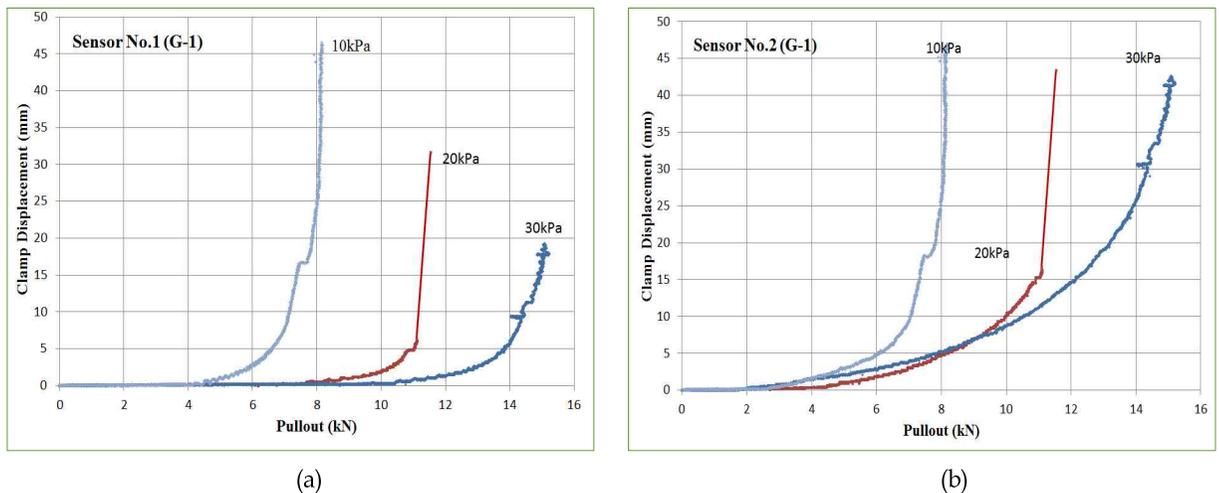


Fig. 4 Displacement-pullout force relationship of G-1 geogrid:
 (a) displacement sensor no.1 (b) displacement sensor no.2

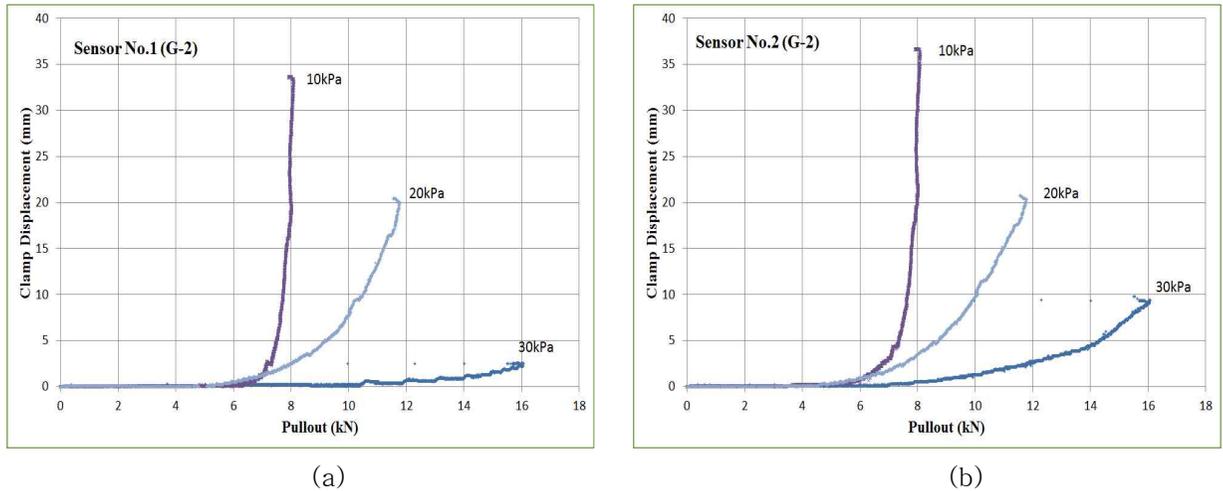


Fig. 5 Displacement-pullout force relationship of G-2 geogrid:
 (a) displacement sensor no.1 (b) displacement sensor no.2

3.2 모형지반 2 시험결과(하부 30cm(S-1)+상부 30cm(S-3)구성)

S-3는 앞에서 기술한 것 같이, S-1 노상 위에 G-1 지오그리드를 설치한 후 0.15 m와 0.3 m 높이로 각각 포설 다짐 후 상재하중은 가하지 않고 실험을 시행하였다. 입상재료에 대한 균질한 다짐도 18.6 kN/m³를 확보하기 위해 강성 다짐봉 하부를 충격을 완화할 수 있도록 보완하였다. Fig. 6,7과 같이 상재하중이 가하지 않은 상태에서도 30kPa의 상재하중을 가한 S-2재료에 비해 큰 인발강도 (44 kN/m)가 측정되었다. 또한, S-3 입상 재료를 0.15m로 조성했을 경우 10kPa의 상재하중을 가한 S-2 재료와 유사한 인발 저항력을 보이는 것으로 확인되었다. 이는 S-2와 S-3 재료의 유사한 다짐밀도와 동일한 하부지반 (S-1) 조건을 고려했을 때, S-3재료가 지오그리드 접촉면에서 다양한 골재 형상과 분포 등으로 높은 결속력을 보임으로써 상재하중의 효과를 대신했다고 볼 수 있다.

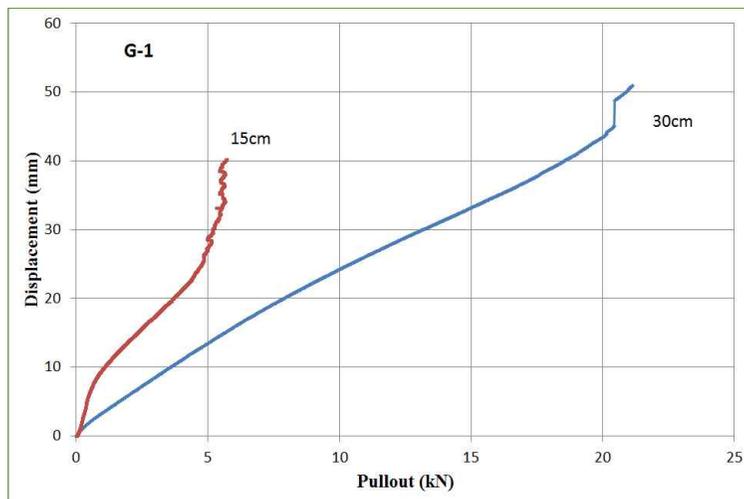


Fig. 6 Displacement-pullout relation curve (S-3, G-1)

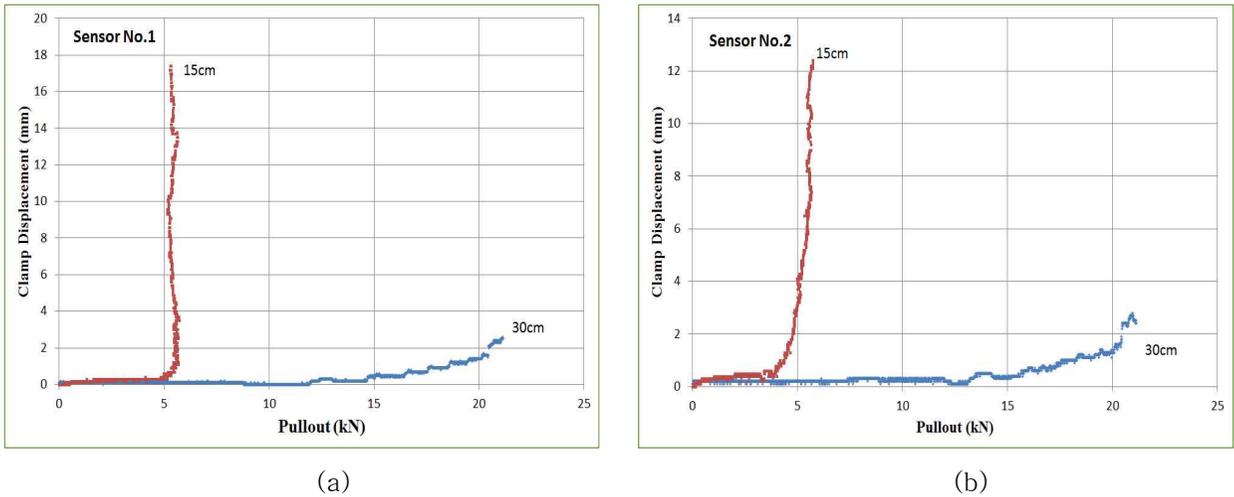


Fig. 7 Clamp displacement-pullout relation curve(S-3,G-1):
 (a) displacement sensor no.1 (b) displacement sensor no.2

3.3 지오그리드 인발계수

S-2 지반과 지오그리드의(G-1, G-2) 접측면 인발계수는 지오그리드와 흙 사이의 상호작용에 따른 관계를 의미하는 값으로 다음과 같은 식을 이용하여 산정 하였다 (Tenax et al., 2007).

$$f_{po} = \frac{F}{2 \times A \times \sigma_n \times (\tan \phi)} \tag{2}$$

여기서, F = 최대 인발 하중, (kN), f_{po} =지오그리드 접측면 인발계수, A = 지오그리드 면적, $\tan \phi$ =지반의 내부 마찰각, deg, 그리고 σ_n =상재응력, kPa 이다.

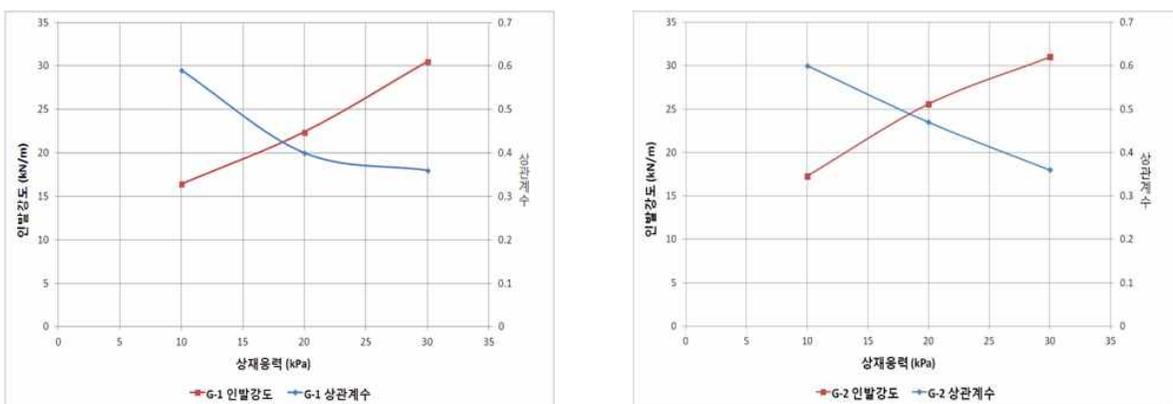


Fig. 8 Relationship between pullout coefficient of interaction, pullout strength, and overburden pressure

본 논문에서는 $\tan \phi$ 를 0.57로 ($\phi = 30^\circ$) 가정하여 인발계수를 산정 및 비교하고 있으나, 추후에 대형직접전단시험기를 이용하여 지오그리드가 매설된 복합지반의 내부마찰각을 산정하여 정확한 인발계수를 산정하고자 한다. 인발계수를 산정하여 비교한 결과 (Fig. 8 참조), G-1과 G-2 지오그리드의 상재응력이 증가함에 따라 인발계수가 감소하는 경향을 보였다. 다만, G-1 지오그리드 경우, 인발계수 감소 경향이 비선형 형태를 보였으며 상재하중 20 kPa 재하시 인

발계수 감소도가 상대적으로 크게 나타났다. 이러한 경향은 Fig. 9에서 보듯이 기존의 연구 문헌에서도 찾을 수 있었다(Tenax et al. 2007). 하지만, 일반적으로 흙-구조물의 마찰계수가 1.0에 근접할수록, 접촉면에서의 마찰력이 크게 작용되어 흙-구조물 거동이 일체화가 됨을 인지할 때, 본 논문에서 산정된 인발계수로는 지오그리드와 주변 재료와의 상관관계를 명확히 표현하고 있다고는 사료되지 않는다. 이는 지오그리드와 주변 흙 재료간의 상호작용은 상재응력 뿐만이 아니라 지오그리드 격자크기, 입자분포, 입자모양 등의 복합적인 영향을 고려해야 한다고 판단된다. 이를 규명하기 위해서 지오그리드와 노반 재료간 접촉면의 거동을 검증하기 위한 개별요소해석법을 추후에 실시할 예정이다.

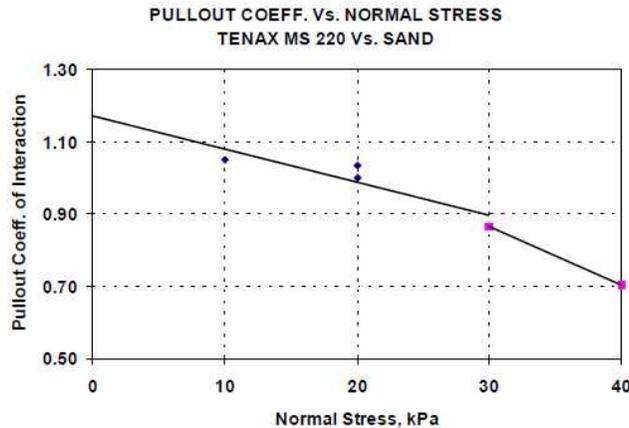


Fig. 9 Pullout coefficient vs. normal stress (Tenax, 2007)

본 논문에서는 식(2)을 사용한 인발계수 산정법 대신, 식 (3)의 일-에너지량을 이용하여 지오그리드와 재료간의 거동 메커니즘을 제한적으로 산정해 보았다. 측정된 하중-변위 곡선을 회귀분석을 통해 적정식을 산출한 후 식 (3)을 이용하여 최대인발하중까지 적분하여 일-에너지량을 산정하였다. Table 3에서 보이듯이, S-3 재료를 이용한 실험 경우, 선단과 근접한 변위계 2에서 발생하는 일-에너지량이 상대적으로 높은 것으로 산정되었으며, 추가적인 데이터들을 이용하여 제안된 방법을 검증할 예정이다.

$$W = \int_0^{P_{max}} f(x) dx \tag{3}$$

여기서, W = 인발시험에 의해 발생한 지오그리드와 노반재료간의 일-에너지, P_{max} = 최대인발강도, $f(x)$ = 하중-변위 실험곡선식 이다.

Table 3. Comparison of work-energy quantities estimated

Work-energy (tom*mm)	15cm of S3	30cm of S3
Sensor 1	0.11	0.72
Sensor 2	0.65	0.80

4. 결론

본 연구에서는 다음과 같은 결과들을 제시하고 있다.

- 1) 지오그리드의 인발강도와 선단변위는 상재하중의 크기와 비례하는 것으로 확인 하였다.
- 2) 일반적으로, 인발력이 발휘되는 선단 에 근접한 위치에서 하중에 대한 영향을 먼저 받는 것이 보통이나, 지오그리드의 특성에 따라 하중전이가 다른 분포를 보일 수 있는 것으로 확인하였다. 즉, 지오그리드 G-2인 경우

G-1에 비해 상대적으로 균등하게 하중이 전이가 됨을 확인하였다.

- 3) 지오그리드 인발계수는 인발강도의 상재하중의 효과와 반대로, 상재하중이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다.
- 4) 일-에너지 개념을 이용하여 인발력에 의해 발생하는 지오그리드와 주변 노반재료간의 일-에너지량을 산정하였으며, 제한적으로 측정된 인발강도의 변화 추이와 상응하는 것을 확인하였다.
- 5) 지오그리드의 격자규격과 궤도하부구조층의 재료와 접촉면에서 상호작용으로 인한 상호작용 인발계수의 거동은 지오그리드 및 재료의 특성 뿐만 아니라 상재하중에 대한 효과에 따른 복합적인 요인으로 산정됨을 확인하였다.

본 연구는 제한적인 궤도하부구조층 재료와 지오그리드 규격, 시험조건을 바탕으로 한 결과로 추후 다양한 궤도하부구조층 재료와 지오그리드 조합을 고려한 실험 및 개별요소해석을 실시하여 지오그리드의 보강효과를 검증하고자 한다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- Indraratna. B., Shahin, M.A., W. Salim (2005). "Use of Geosynthetics for Stabilizing Recycled Ballast in Railway Track Substructures", Proceedings of NAGS2005/GRI19 Cooperative Conference, USA, North American Geosynthetics Society, pp. 13-15.
- Oh, J (2013). "Parametric Study on Geogrid-Reinforced Track Substructure", IJR International Journal of Railway, Vol. 6, No. 2, pp. 59-63.
- ASTM D6706-01(2013) "Standard Test Method for Measuring Geosynthetic Pullout Resistance in Soil", American Standard Testing Method, US.
- Teixeira, S. H. C., Bueno, B. S., Zornberg, J. G. (2007). "Pullout Resistance of individual Longitudinal and Transverse Geogrid Ribs", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 133, No. 1, pp 37-50.
- TENAX (2007) "Pullout Tests of TENXA Geogrids", Technical Reference GRID-TE-5, www.tenax.co.uk.