

철도노반 침하저감을 위한 토목섬유 감쌈 쇄석말뚝 설계방안 고찰

A Study on Design Method of Geogrid Encased Stone Column for Settlement Reduction in Railroad

이대영^{1*}

Dae-Young Lee^{1*}

¹Member, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology., 283, Goyangdae-Ro, Ilsansseo-gu, Goyang, 411-712, Republic of Korea

ABSTRACT

The geogrid encased stone column (GESC) system, which increases the confinement effect, has been developed to improve the load carrying capacity of stone columns. The reasonable design method for calculating the geogrid ring tension force and ultimate bearing capacity that can be applied to the design of GESC is proposed. In order to calculate design procedure for GESC, two ultimate bearing capacities were compared. One is the ultimate bearing capacity measured using data of the field loading test in light railway site and the other is the ultimate bearing capacity using suggested design procedure of GESC. The results indicated that design method of GESC higher ultimate bearing capacities compared with field loading test.

요 지

지오그리드 감쌈 쇄석말뚝 공법은 지오그리드의 인장구속효과로 인해 연약지반에 시공된 쇄석말뚝의 지지력을 증가시켜주는 공법이다. 본 연구에서는 토목섬유 감쌈 쇄석말뚝(GESC)공법의 설계에 적용할 수 있는 토목섬유 인장저항력과 극한지지력을 산정할 수 있는 합리적인 설계법을 제안하였다. 제안된 설계방법의 적적성을 평가하기 위해 부산 경전선 연약지반 시험시공 결과로부터 산출된 GESC의 극한지지력과 설계법에 의해 산정된 극한지지력을 비교 검증하였다. 연구결과 GESC 설계법에 의해 산정된 지지력이 현장시험의 지지력 보다 크게 나타나는 것으로 검토되었다.

Keywords : Geogrid encased stone column, Bearing capacity, Design method, reduced settlement

1. 서 론

철도 노반의 궤도 형식은 자갈궤도와 콘크리트궤도를 사용하고 있으며 자갈궤도는 초기 건설비용이 적게드는 장점이 있으나 장기적으로 유지보수비를 많이 지출하게 된다. 최근들어 철도의 고속화, 유지보수비 절감 및 승차감 개선 효과로 인해 콘크리트궤도의 사용이 증가하고 있다. 콘크리트궤도는 구조적 안정성에도 불구하고 자갈궤

도에 비해 압밀침하가 발생하는 연약지반의 경우, 잔류침하를 매우 엄격하게 규정하고 있다. 고속철도 설계기준(2005)에 의하면 콘크리트궤도의 허용잔류침하 기준은 30mm(열차하중에 의한 침하량 5mm포함)로 궤도의 안정성을 확보하기 위해서는 장기침하를 고려한 연약지반 처리공법을 적용하여야 한다. 특히 호남고속철도는 연약지반층이 일부 노선에 분포되어 있어 치환 및 압성토 공법 등을 이용하여 개량이 이루어지고 있기 때문에 잔류침하가 발생하며, 공사 중 및 유지관리시에 계측을 통해 침하 관리가 반드시 이루어져야 한다(Han and Choi, 2012). 일부 연약지반에 고속철도 건설시 고속철도 콘크리트궤도의

Received 2 Jun. 2014, Revised 16 Sep. 2014, Accepted 17 Sep. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-31-910-0528; Fax: +82-31-910-0211

E-mail address: dylee@kict.re.kr (D. Lee)

잔류침하 기준 적용이 힘들뿐더러 지층에 따라 과도한 침하 발생 및 이로 인한 교량대체로 비용과 시공기간이 증가하는 문제 등이 발생한다. 최근들어 토목섬유로 모래(쇄석)말뚝을 감싸 보강하여 기존 연약지반 개량공법에 비해 지지력을 증가시키는 연약지반 보강공법에 대한 연구 및 현장적용이 증가하고 있다(Kempfer and Raithel, 2002; Alexview et al., 2005). 독일 등 유럽에서는 고속철도 건설시 고속화에 따른 콘크리트레도 노반의 안정화를 위해서 토목섬유 보강 모래말뚝공법(GEC) 공법을 이용하여 잔류침하 감소와 지지력을 증가시키는 기술을 적용하고 있다. 토목섬유 보강 모래말뚝 공법은 기존 모래말뚝쇄석기둥 공법에 비해 저소음저진동 시공이 가능하며 토목섬유 보강으로 인한 지지력 증가로 시공물량을 줄여 공사비 절감할 수 있는 장점이 있는 공법으로 미국 캘리포니아에서는 철도노반 보수 보강공사에 GEC 공법을 적용하여 기존공법 대비 지반침하 감소효과 및 28~40% 비용을 절감 효과가 있다고 보고된바 있다(Richard, 2005).

최근 들어서는 내시공성이 우수한 지오그리드로 쇄석말뚝의 외관을 감싸 구속력을 증가시켜 지반의 침하를 감소시켜주는 효과가 있는 토목섬유 감쌈 쇄석기둥(GESC) 공법에 대한 연구가 진행되고 있다(Murugegesan and Rajagopal, 2006; Lee and Yoo, 2006; Gneil and Bouazza, 2009; Yoo and Lee, 2012; Lee, 2012). 토목섬유 감쌈 쇄석기둥 공법에 관한 기존의 연구는 대부분 실내시험과 수치해석을 통한 토목섬유 보강메카니즘 및 보강효과로 현장적용을 위한 설계, 시공법 연구가 부족한 실정이다. Murugesan and Rajagopal(2008)과 Yoo and Kim(2009)은 실내시험과 수치해석 연구를 통해 지오그리드 감쌈 쇄석기둥공법의 설계기법 개발을 위한 기초연구로 설계 영향인자에 대해 고찰하였다. Lee et al.(2008)은 김해 경전선 부지 연약지반 개량공사 구간에 지오그리드 감쌈 쇄석기둥공법의 현장시험시공을 수행한 사례가 있으나, GESC 설계 및 시공방법에 대한 현장적용 연구는 진행된사례가 거의 없으며 현장적용을 위해서는 GESC의 설계법에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 고속철도 노반 등 구조물이 통과하는 연약지반의 보강 공법으로 토목섬유 감쌈 쇄석기둥(geogrid encased stone column, GESC)설계방안을 제시하였다. 제시된 토목섬유 감쌈 쇄석말뚝의 설계방법의 비교를 위해 GESC 현장시험시공이 수행된 김해 경전선 현장시험 데이터와 제안된 설계법에 따른 말뚝의 지지력 결과와 비교 검증 하였다.

2. 토목섬유 보강 쇄석말뚝 이론적 고찰

토목섬유로 조립토말뚝을 감싸 보강하는 공법은 토목섬유 보강재의 구속인장저항력으로 말뚝의 변형을 억제함으로써 하중지지력의 증가와 침하량을 감소시키는 작용을 하므로 토목섬유 보강 쇄석말뚝의 지지력 산정방법은 별장파괴에 대한 메카니즘을 바탕으로 한다. 토목섬유 감쌈 모래기둥의 하중지지특성을 평가하기 위해서는 토목섬유의 원형인장력(ring tension force)과 모래기둥에 발생하는 하중분담 메카니즘을 고려하여야 한다.

단위셀에 재하되는 평균응력 $\Delta\sigma$ 는 쇄석기둥과 지반의 강성 차이에 의해 각각 $\Delta\sigma_{v,c}$ 와 $\Delta\sigma_{v,s}$ 으로 분리되어 작용하며 힘의 평형에 의해 응력과 면적의 곱으로 식 (1)로 나타낼 수 있다. 이들 연직방향의 응력은 쇄석기둥과 지반의 수평력으로 변환되어 쇄석기둥의 수평방향응력 $\sigma_{h,c}$ 과 수평방향 토압 $\sigma_{h,s}$ 가 발생된다. 연직하중의 대부분은 상대적으로 강성이 큰 쇄석기둥에 집중되고 연약지반에서 토압은 매우 작게 발생되기 때문에, 쇄석기둥의 수평력에 대한 연약지반의 저항력은 약할 수 밖에 없다. GEC공법은 토목섬유로 모래 및 쇄석말뚝의 둘레를 보강함으로써 토목섬유 인장력(F_R)으로 인한 수평방향 구속력 작용으로 쇄석말뚝에 작용하는 하중을 분담시켜 수평방향 변위를 억제하고 지지력을 증가시키게 한다. Fig. 1은 토목섬유로 보강된 쇄석기둥에 작용하는 응력분담 메카니즘을 나타내고 있다.

$$\Delta\sigma \cdot A_E = \Delta\sigma_{v,c} \cdot A_c + \Delta\sigma_{v,s} \cdot (A_E - A_c) \quad (1)$$

여기서, $\Delta\sigma_{v,c}$: 쇄석기둥에 작용하는 연직응력, $\Delta\sigma_{v,s}$: 연약지반에 작용하는 연직응력, $\sigma_{h,c}$: 쇄석기둥에 발생하는 수평응력, $\sigma_{h,s}$: 연약지반에 발생하는 수평응력, r_c : 쇄석기둥의 반지름, r_{geo} : 지오그리드를 포함한 쇄석기둥의 반지름, r_E : 단위셀 반지름, F_R : 지오그리드의 원형인장력(Ring tension force) 이다.

연직하중에 대한 쇄석기둥의 지지력이 최대로 발현된 이후 하중은 수평방향으로 전이되는데, 이때 지오그리드는 쇄석기둥의 수평내압에 저항하는 역할을 담당하게 되며 쇄석기둥의 둘레방향 지오그리드에 발생하는 저항력을 인장력(Ring tension force, F_R)이라 한다. 이 인장력은 Fig. 2에 보이는 바와 같이 쇄석기둥에서 작용하는 수평방

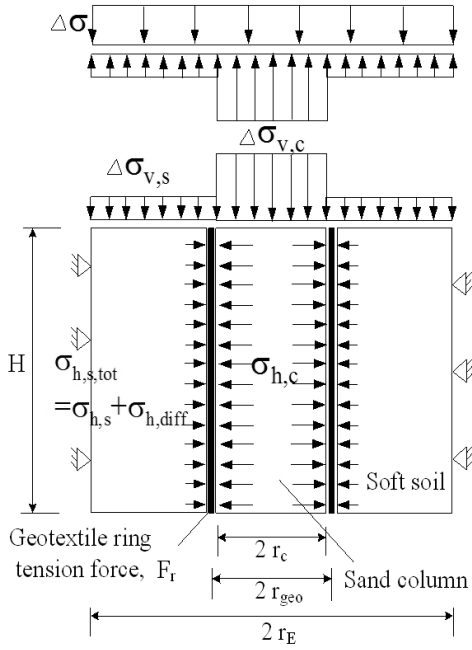


Fig. 1. Calculation model for geotextile encased column (Raithel and Kempfert, 2000)

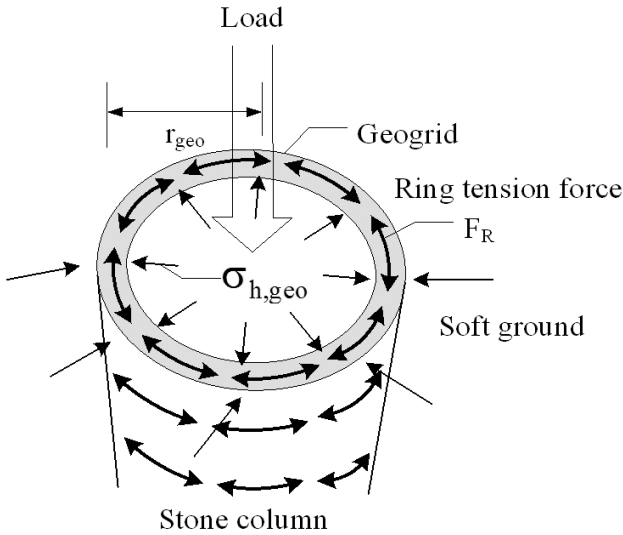
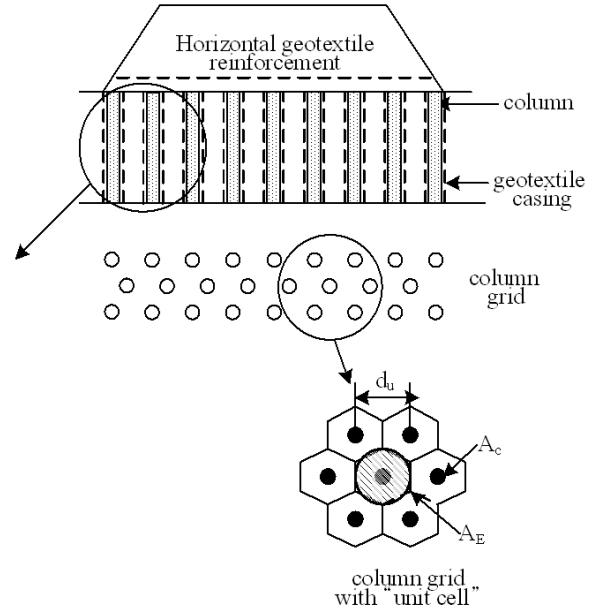


Fig. 2. Ring tension force of geogrid

향 내압($\sigma_{h,geo}$)과 지오그리드를 포함한 쇄석기둥의 반지름(r_{geo})의 곱으로 나타내며, 지오그리드 강성(J)의 항목으로 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = \sigma_{h,geo} \cdot r_{geo} \rightarrow F_R = J \cdot \Delta r_{geo} / r_{geo} \quad (2)$$

수평방향의 힘의 평형을 고려하여 $\sigma_{h,geo}$ 는 식 (3)과 같이 지반과 쇄석의 수평응력의 차로 산정할 수 있으며, 수평응력은 재하하중으로 유발되는 연직응력과 토압계수의 곱으로 식 (4)와 (5)를 이용하여 계산된다.

$$\sigma_{h,geo} = \sigma_{h,c} - (\sigma_{h,s} + \sigma_{h,diff}) \approx \sigma_{h,c} - \sigma_{h,s} \quad (3)$$

$$\sigma_{h,c} = (\Delta\sigma_{v,c} + \sigma_{v,0,c}) \times K_{a,c} \quad (4)$$

$$\sigma_{h,s} = (\Delta\sigma_{v,s} + \sigma_{v,0,s}) \times K_{o,s} \quad (5)$$

여기서, $\sigma_{v,0,c}$: 초기조건에서 쇄석기둥 중간의 연직응력, $\sigma_{v,0,s}$: 초기조건에서 점토층 중간의 연직응력, $K_{a,c}$: 쇄석기둥의 주동토압계수, $K_{o,s}$: 점토층의 정지토압계수이다.

쇄석기둥에 작용하는 주동토압과 지반에 작용하는 수동토압으로부터 쇄석기둥과 지반사이의 수평방향 평형방정식은 식 (6)으로 정리할 수 있으며, 앞서 유도한 응력들을 식 (6)에 대입하여 정리한 것이 식 (7)이다.

$$\sigma_{h,c} = \sigma_{h,geo} + \sigma_{h,s} \quad (6)$$

$$\sigma_{v,c} K_{ac} + \sigma_{c,c} K_{ac} = \frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} + \sigma_{v,s} K_{ps} + \sigma_{s,s} K_{ps} \quad (7)$$

식 (7)로부터 인장저항응력 $\sigma_{h,geo}$ 를 고려한 말뚝의 최대 연직응력은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{v,c} = \frac{1}{K_{ac}} \left[\frac{J}{A_L} \times \frac{\Delta r_{geo}}{r_{geo}} + K_{ps} (\sigma_{v,s} + \sigma_{s,s}) - \sigma_{c,c} K_{ac} \right] \quad (8)$$

3. 지오그리드 감쌘 쇄석말뚝 설계법 고찰

3.1 GESG 설계방법 제안

지오그리드 감쌘 쇄석말뚝공법(GESG) 공법은 해상 등 초연약지반 보강공법으로 모래말뚝 전체를 토목섬유로 감싸는 GEC 공법에 비해 고강도의 지오그리드를 이용하여 채움재로 쇄석, 폐콘크리트, 재활용 골재 등을 사용하는 공법으로 모래기둥 전체를 토목섬유로 보강하는 GEC 공법과는 달리 쇄석말뚝의 상부 취약부분을 부분적으로 보강할 수 있는 공법이다. GEC 공법은 $Cu < 15kN/m^2$ 의 연약 지반에 적용되는 공법으로 GEC 개별말뚝에 전달되는 응력과 토목섬유 보강재의 응력분담과 침하량을 고려하여 설치 여부를 결정한다. GEC 공법의 설계방법으로는 Raithel and Kempfert(2000)에 의해 제안된 말뚝과 연약지반사이의 수직응력과 토목섬유감쌘으로 인해 발생하는 횡방향 인장력 분석방법을 이용하여 설계에 반영한다. 본 연구에서 제안한 GESG 설계방법은 GEC 공법의 설계절차와 같이 지오그리드 감쌘으로 인한 지오그리드의 원형인장력(F_R)을 산정하여 설계에 반영한다. 본 연구에서는 실내시험과 현장 시험을 통해 산정된 지오그리드의 인장저항력을 산정하여 GESG 극한지지력 산정방법을 아래와 같이 제안하였다. 연약지반에 적용된 GESG 설계를 위해서는 지반에 적용되는 응력(p_0)과 단위셀 면적을 통해 말뚝에 적용하는 하중을 산정한다. 토목섬유 보강으로 인해 발생하는 구속인장력을 구하기 위해서 무보강 말뚝에 적용하는 수직응력(σ_v)은 식 (9)를 이용하여 산정한다. 지오그리드 감쌘으로 인해 말뚝에 추가되는 구속인장력(P_c)는 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_v = (\sigma_{ro} + 4c_u)K_p \quad (9)$$

$$P_c = \frac{(P_o - \sigma_v)}{Kp} \quad (10)$$

지오그리드 감쌘 쇄석말뚝에 적용되는 지오그리드 원형 인장력 (F_R)은 구속인장력(P_c)과 쇄석말뚝 반지름의 곱으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_R = \frac{P_c d}{2} \quad (11)$$

지오그리드 원형 인장력(F_R) 산정을 통한 GESG 말뚝

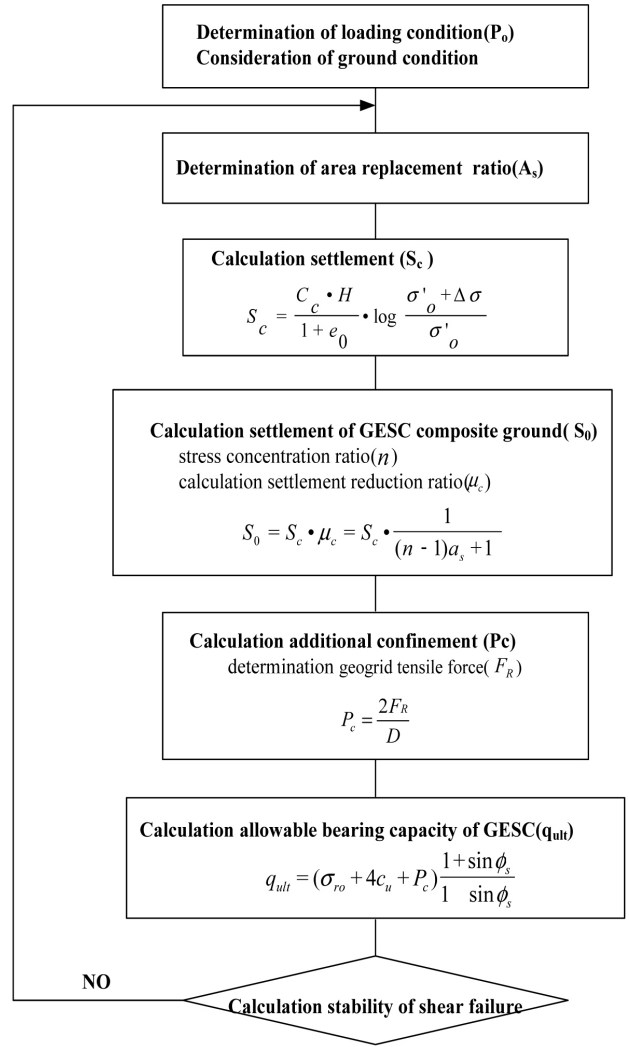


Fig. 3. Design procedure of GESG

의 극한지지력은 기존 지지력 공식에 토목섬유 감쌘으로 인해 발생하는 구속인장력 (P_c)의 항으로 표시하면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{gu} = (\sigma_{ro} + 4c_u + P_c) \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \quad (12)$$

Fig. 3은 본 연구에서 제안한 GESG 공법의 설계절차를 나타내고 있다.

3.2 쇄석말뚝 설계법 검증

3.2.1 GESG 설계법 적용 대상

본 연구에서는 GESG 설계방법의 평가를 위해 제안된 설계법을 이용한 설계대상 구간으로는 GESG 공법의 시공 시험이 수행된 부산 경전선 연약지반 공사 현장을 선정하

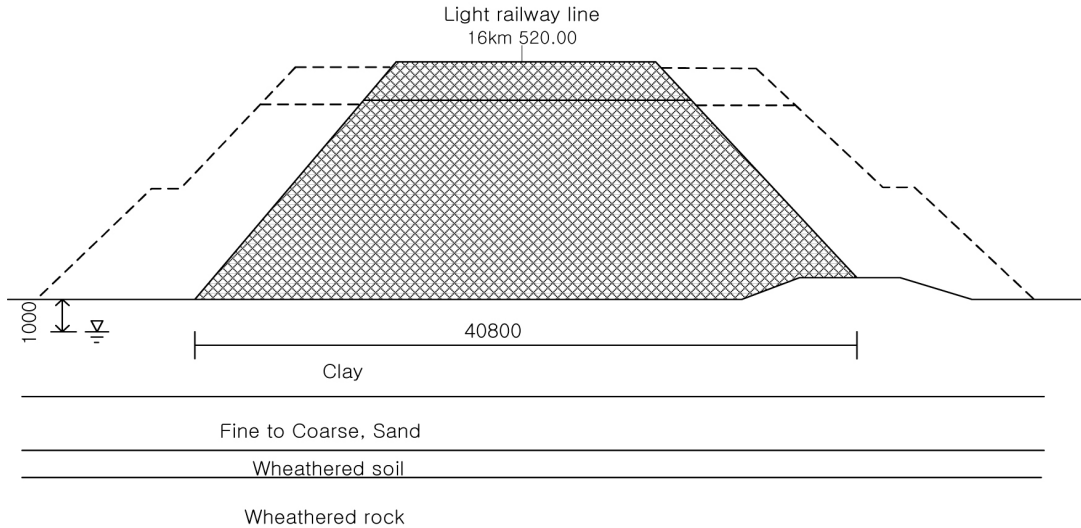


Fig. 4. Section view of light railway construction site

Table 1. Material parameters used for design consideration

	N-Value	γ_t (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	Es (kPa)
Fill layer	–	19.0	15.2	25.0	–
clay	4.0	16.9	17.6	0	–
Sand	–	18.0	0	26.0	14,700
Fine to Coarse, Sand	8.0	20.0	9.8	28.0	67,620
Weathered soil	40.0	22.0	0	35.0	98,000
GESC	–	18.5	0	32.6	–

Table 2. Properties of geogrid

	Polymer type	Thickness (mm)	Tensile strength (kN/m)	Mesh sperture spacing (mm)
Geogrid	polyester	1.2	120	30 × 30

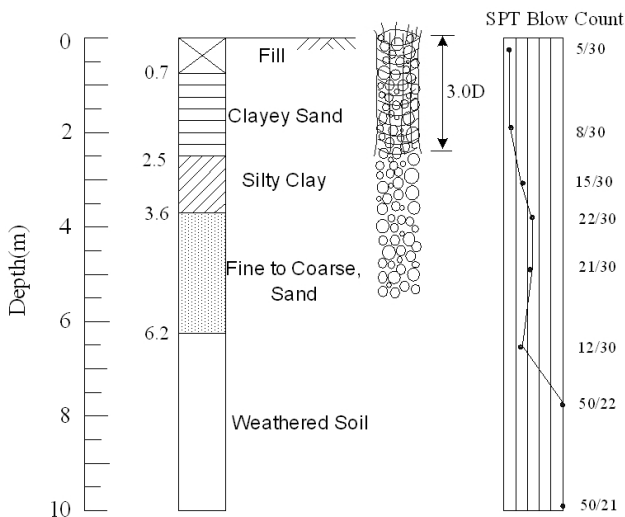


Fig. 5. Ground condition

였다. 대상구간 선정이유로는 해당 구간은 경전선 연약도

반의 보강을 위해 짧은 쇄석말뚝(geopier)적용된 구간으로, GESC 시험시공 및 현장재하시험이 수행됨에 따라 제안된 설계법을 통한 지지력 산정과 시험결과와의 비교를 통한 검증이 가능함에 따라 선정하였다. 설계대상구간의 단면은 Fig. 4와 같으며 지반조사결과 매립층, 모래, 실트 질점토층, 모래자갈층, 풍화토 층으로 분포하는 것으로 나타났다. Fig. 5와 Table 1은 지반 물성치와 지반조건을 나타내고 있으며, 시험시공 및 현장시험에 대한 자세한 설명은 Lee et al.(2008)에 의해 보고된 바 있다. 현장시험시공은 GESC공법의 침하감소 효과와 현장적용성 및 시공성을 평가하기 위해 수행하였으며 현장재하시험을 통해 극한지지력과 변형특성을 평가하였다. 말뚝의 직경은 약 0.76m, 길이는 5.5m로 시공되었으며, 지오그리드 보강 길이는 말뚝직경(D)의 2D, 3D로 시공하였다. Table 2는 사용된 지오그리드의 제원을 나타내고 있다. Fig. 6은 현장

Table 3. Result of design procedure consideration

	Diameter (m)	Length (m)	Encasement Length (m)	Tensile Strength (kN/m)	Area Replacement Ratio (%)	Spacing (m)	Bearing Capacity (ton)
GESC Design Method	0.76	5.5	5.5(7D)	100	10	2.1×2.1	66.89
Field Test	0.76	5.5	1.6(2D), 2.4(3D)	100	10	-	40, 48

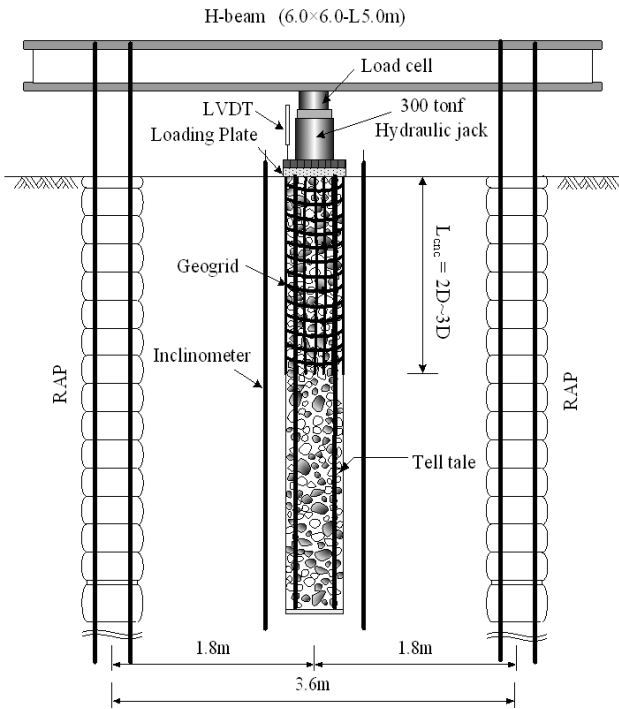


Fig. 6. Load test setup

재하시험을 나타내고 있는데 300ton 용량의 유압장치를 이용하여 하중을 재하하였으며, 시험 계측항목으로는 토목섬유 감쌈으로 인한 변형감소효과를 평가하기 위해 경사계와 변위를 측정하기 위해 LVDT를 설치하였다.

3.2.2 GESC 설계방안 검증

본 연구에서 제시한 GESC설계방안의 검증을 위해 Fig. 3과 같이 대상구간의 연약지반 보강을 위해 적용된 지오그리드 인장구속력과 지오그리드 감쌈 말뚝의 설계극한지력을 산정하였다. Fig. 3에서 제시한 설계절차에 의해 시험시공구간 성토구간의 설계하중(P_o)은 성토구간과 열차의 하중은 268.12kN/m^2 로 계산되었다. GESC 쇄석말뚝의 직경은 시험시공 구간에 적용된 GESC와 같이 직경 0.76m, 말뚝길이는 5.5m, 치환율은 10%(spacing of 2.1m×2.1m)로 설계하였다. 지오그리드 감쌈 길이(L_{enc})는 지반 조사 결과 점토층의 N값이 6 이하, 사질토의 N값은 10이

내, GL - 0.7m 로 나타남에 따라 전체 감쌈깊이는 말뚝길이 전체를 감싸는 것으로 결정하였다. 지반의 압밀침하(S_c)는 $S_c = C_c H / (1 + e_0) \cdot \log(\sigma'_o + \Delta\sigma / \sigma'_o)$ 를 이용하여 아래와 같이 0.69m로 계산되었다.

$$S_c = \frac{C_c H}{1 + e_0} \cdot \log \frac{\sigma'_o + \Delta\sigma}{\sigma'_o}$$

$$= \frac{0.35 \times 4.3}{1 + 1.001} \log \left(\frac{3.65 + 27.36}{3.65} \right) = 0.69\text{m}$$

GESC의 침하량은(S_o) 침하저감계수(μ_s) 0.76을 적용하여 다음과 같이 0.52m로 계산되었다.

$$S_o = S_c \cdot \mu_c = 0.69 \times 0.76 = 0.52\text{m}$$

지오그리드 감쌈으로 인한 인장저항력(P)은 인장강도(T) 100kN/m, 말뚝의 직경 0.76m를 적용하여 다음과 같이 263.15kN/m^2 로 산정되었다.

$$P_c = \frac{2T}{D} = \frac{2 \times 100\text{kN/m}}{0.76\text{m}} = 263.15\text{kN/m}^2$$

GESC 개별말뚝의 설계 극한지력(q_{gu})은 Hughes and Witheres(1974)에 의해 제안된 지지력 산정식을 이용하여 산정하였으며, 지오그리드 감쌈효과로 인한 지오그리드 구속인장력(P_c) 고려하여 655kN으로 산정하였다.

$$Q_{gu} = (\sigma_{ro} + 4c_u + P_c) \frac{1 + \sin\phi_s}{1 - \sin\phi_s} = 1445.2\text{kN/m}^2$$

$$q_{gu} = 1445.2 \times \frac{0.76^2 \pi}{4} = 655.5\text{kN}$$

GESC 말뚝이 적용된 대상현장 지반의 안정성 평가를 위해 사면안정프로그램 해석을 수행하여 안전성 평가를 수행하였으며 안전율은 1.75로 설계안전율을 만족하는 것

으로 나타났다. 이를 통해 제안한 설계방법에 따라 대상현장의 지반조건을 고려한 GESC 적용 방법은 Table 3과 같이 제시하였다. 본 연구에서 제안된 설계방법에 의해 산정된 GESC 말뚝의 지지력을 검증하기 위해 GESC 말뚝이 시험시공된 대상현장의 현장시험 결과와 비교하였다. 제안된 설계방법에 의해 산정된 GESC 극한지지력은 655kN으로 산정되었으며, 현장시험을 통해 산정된 GESC 극한지지력은 감쌈길이(2D, 3D)에 따라 각각 420, 470kN으로 나타났다. 제안한 설계방법을 이용해 산정된 GESC의 극한지지력이 현장시험에 비해 39~56% 크게 나타난 것은 제안식의 경우 전체감쌈(약 7D) 말뚝의 지지력으로 현장시험의 경우 말뚝의 감쌈길이가 2D~3D로 말뚝감쌈 길이의 차이에 의한 영향으로 판단된다. 이러한 결과는 Lee and Yoo(2006)과 Murugesan and Rajagopal(2008)이 실내시험과 수치해석을 통해 토목섬유 감쌈길이가 증가할수록 지지력이 증가하며, 말뚝전체감쌈시의 지지력이 2D~3D 감쌈 경우에 비해 약 20~30% 증가함에 따라 토목섬유 감쌈길이가 GESC의 지지력에 영향을 주요설계인자라고 보고한 것과 일치하고 있다. 본 연구에서 제안한 GESC 설계법은 말뚝 전체감쌈 지지력을 평가함에 따라 부분감쌈 적용시 과다설계의 우려가 있으므로 감쌈길이에 따른 감소계수 등을 적용하거나 감쌈길이를 고려한 수정 지지력식을 적용해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 철도노반의 침하저감을 위한 연약지반 보강 공법인 GESC공법의 설계방법을 제안하였다. 제안한 설계법의 평가를 위해 GESC 현장시험결과를 통해 구한 극한지지력 비교를 수행하였으며, 이 결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 토목섬유감쌈 쇄석말뚝의 실내시험과 현장시험결과를 통해 토목섬유 인장구속력을 이용한 극한지지력 산정식과 이를 이용한 GESC 설계방법을 제시하였다.
- (2) 본 연구에서 제안된 설계방법에 의해 산정된 GESC 극한지지력이 현장재하시험을 통해 산정된 극한지지력에 비해 39~56% 크게 나타났다. 이러한 지지력 차이는 제안식의 경우 전체감쌈(약 7D) 말뚝의 지지력으로 현장시험의 경우 말뚝의 감쌈길이가 2D~3D로 토목섬유 감쌈길이의 차이에 의한 영향으로 판단된다.

- (3) 감쌈길이가 증가할수록 지지력이 증가하는 기존의 연구결과로 볼 때 지오그리드 감쌈 길이는 지지력에 매우 중요한 설계인자이며, 감쌈길이를 고려한 설계반영을 위해서는 제안된 설계법에 감쌈길이에 따른 감소계수를 적용시켜야 과다설계를 방지할 수 있음을 알 수 있다.
- (4) 본 연구결과를 통해 제안된 설계법이 향후 철도노반 및 도로지반의 침하저감을 위한 연약지반보강공법으로 현장 설계적용을 위한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

References

1. Korea Rail Network Authority (2005), Design Criteria for Railroad (Road Bed).
2. Alexiew, D., Brokemper, D. and Lothspeich, S. (2005). Geotextile encased columns (GEC): load capacity, geotextile selection and pre-design graphs. *Proceedings of the Geo-Frontiers Conference*, Austin, Texas,US, ASCE Geotechnical Special Publication, pp.497-510.
3. Han, S. J. and Choi, W. I. (2012), "Residual Settlement of trackbed on soft ground Management Program Development", *Preceedings of the Railway Conference*, pp.49-54.
4. Hughes, J. M. and Withers, N. J. (1974). "Reinforcing of Soil Cohesive Soils with Stone Columns", *Ground Engineering*, Vol.7, No.3, pp.42-49.
5. Gneil, J. and Bouazza, A. (2009). "Improvement of Soft Soils Using Geogrid Encased Stone Columns, *Geotextiles & Geomembranes.*, 27(3), pp.167-175.
6. Kempfert, H. G. and Raithel, M. (2002). "Experiences on Dike Foundations and Land Fills on Very Soft Soils", *Proc. Intern. Workshop ISSMGE*, Techn. Committee TC 36 Foundation in Difficult Soft Soil Conditions, Mexico City, SMMS, pp. 176-181.
7. Lee, D. Y. and Yoo, C. S. (2006). "Load Carrying Capacity and Failure Mechanism of Geogrid Reinforced Stone Columns : Reduced-Scale Model Tests", *Journal of Korea Geotechnical Society*, Vol.22, No.10, pp.121-131.
8. Lee, D. Y., Yoo, C., Park, S. S., Jung, S. T. and Lee, B. R. (2008), "Field Load Tests of Geogrid Encased Stone Columns in Soft Ground", *Proc., of Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, pp.121-131.
9. Lee, D. Y. (2012), *An experimental Investigation into Geogrid-Encased Stone Columns in Soft Ground*, Ph.D Thesis, University of Skyungkyunkwan, pp.141-145.
10. Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2006), "Geosynthetic-Encased Stone Columns : Numerical evaluation", *Geotextiles & Geomembranes.*, 24, pp.349-358.

11. Murugesan, S. and Rajagopal, K. (2008), "Performance of Encased Stone Columns and Design Guidelines for Construction on Soft Clay Soils", Proceedings of the 4th Asia Regional Conference on Geosynthetics, pp.729-734.
12. Raithel, M. and Kempfert, H. G. (2000), Calculation Models for Dam Foundations with and Geotextile-Coated Sand Columns, Proc., GeoEngineering 2000, Technomic, Melbourne, Australia.
13. Richard, S. (2005), "Rock-steady railway", Public works magazine.
14. Yoo, C. and Kim, S. B. (2009), "Numerical Modeling of Geosynthetic-Encased Stone Column, Geosynthetics International", Vol.16, No.3, pp.116-126.
15. Yoo, C. and Lee, D. (2012). "Performance of geogrid-encased stone column in soft ground : Full-scale load tests, *Geosynthetics International*, Vol.19, No.6, pp.480-490.