



## 투수성 포장체 쇄석 보조기층 지오그리드 보강효과 확인에 대한 연구

권혁민<sup>1</sup> · 오정호<sup>2</sup> · 한신인<sup>3</sup>

한국교통대학교 철도시설공학과 석사과정<sup>1</sup>, 한국교통대학교 철도시설공학과 조교수<sup>2</sup>,  
 서영엔지니어링 기술연구소 상무<sup>3</sup>

## A Study on Effect of Geogrid Reinforced- Crushed stone Sub-base in Permeable Pavement System

Kwon, Hyeok-Min<sup>1</sup> · Oh, Jeongho<sup>2</sup> · Han, Shin-in<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student, Dept. of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation  
<sup>2</sup>Assistant Professor, Dept. of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation  
<sup>3</sup>Director, SeoYeong Engineering Co.Ltd

**Abstract:** A rapid urbanization has increased the portion of paved layer that results in the change of water circulation system. This change leads to frequent events of flooding, drought, and urban heat island. To resolve these issues, permeable pavement system based on Low Impact Development (LID) concept is being applied to international urban areas. Therefore it is necessary to establish a rational design procedure for the permeable pavement system that reflects our environmental conditions. iDue to inherent characteristics of permeable pavement system, water infiltrates thorough the layers so it may reduce the bearing capacity of sub-layers. In this study, an effort was made to investigate the effectiveness of geogrid reinforced crushed stone subbase layer based on field experimental program along with a limited numerical analysis. It reveals that geogrid reinforced sections improve the bearing capacity by close to 20%. In addition, a light weight deflectometer (LWDT) appears to be promising for the compaction quality control of crushed stone subbase layer in order to construct qualified permeable pavement systems.

**Key Words:** LID, permeable pavement, crushed stone sub-base, geogrid, LWDT, bearing capacity

### 1. 서론

최근 급격한 도시화 및 산업화로 인한 도심지 내 도로 포장률의 증가와 함께 기후변화로 인한 집중호우 및 가뭄으로 인한 전체적인 물순환 체계에 문제가 발생하고 있다. 이 문제를 보완 하고자 국내외 저영향 개발 (low impact development, LID)개념을 도입한 투수성 포장체 및 설계에 대한 연구가 진행되고 있다.

투수성포장은 일반적으로 주차장이나 보도, 교통량이 적은 도로에 적용하고 있고, 기층과 보조기층을 물저류층으로 사용할 수 있고, 부분적으로 노상으로 물을 침투 시킬 수 있고, 토목섬유 종류 중 하나인 지오

텍스타일을 층경계면에 설치하여 입자의 유동을 억제한다. (Hein, 2014).

투수성 포장에서 토목섬유는 원지반의 지지력이 매우 낮은 경우 보조기층을 보강하는데 사용하도록 제안하고 있다 (Tyson and Tayabji, 2015; Knapton et al., 2010).

토목섬유의 대표적인 보강 메커니즘은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 교통하중 재하 시 기층의 재료를 횡방향으로 구속시켜 횡전단변형을 억제하며, 기층의 탄성계수값을 증가 시켜, 지지력계수를 증가시킨다. 또한, 층분리 역할을 하여 세립자의 유동을 억제할 수 있는 기능이 있다 (US Army, 2007).

**주요어:** LID, 투수포장, 쇄석보조기층, 평판재하시험, 반복평판재하시험, 동평판재하시험, 지오그리드

**Corresponding author:** Oh, Jeongho

Department of Railroad Facility Engineering, Korea National University of Transportation, Uiwang 637-715, Korea.  
 Tel: +82-70-8855-1655, Fax: +82-2-400-2268, E-mail: j-oh@ut.ac.kr

Received December 4, 2015 / Revised December 16, 2015 / Accepted December 18, 2015

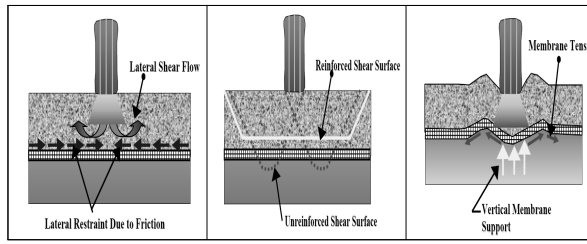


Fig. 1 Mechanism of geosynthetics (US Army, 2007)

투수성 포장 특성상 우수의 유입이 예상되며 특히 보조기층은 원활한 투수성을 확보하기 위해서 입도분포가 상대적으로 고르고 간극이 큰 조립재나 쇄석 자갈을 이용하여 다짐 시공하게 된다. 재료 특성상 일반 혼합골재를 이용한 보조기층 시공에 비해 다짐도를 확인하는 것이 용이치가 않으므로 이에 대한 기준이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 시험 포장체 3개소 (4m X 4m)를 시험시공 하여 쇄석 보조기층 지오그리드 보강효과를 각각에 대한 현장시험을 통해 구조적 안정성을 검증해 보고자 한다. 현장시험으로는 평판재하시험(Plate Bearing test, PBT) · 반복평판재하시험(Repeat Plate Bearing Test, RPBT) · 동평판재하시험(Light Weight Deflectometer Measurements, LWDT)을 진행하였으며, 수치해석을 이용하여 실험 결과를 검증하였다.

## 2. 현장시험방법

일반적으로 도로에서 지지력 계수를 얻기 위한 시험으로 평판재하시험을 실시한다. 본 연구에서는 평판재하시험 이외에 국내 고속철도 다짐관리를 위해 수행하는 반복평판재하시험, 최근 해외에서 노반다짐관리 목적으로 사용되고 있는 동평판재하시험을 실시하였다.

### ● 평판재하시험

시험은 KSF 2310에 따라 수행하였으며, 직경 30 cm 재하판을 이용하여 지반에 단계 하중을 가하여 그 하중단계에서의 침하량을 측정한다. 원래의 시험법에서는 하중단면에 표준사를 재설하여 재하 하도록 하였으나 본 시험에서는 쇄석층 특성상 공극의 존재로 표면이 고르지 못하여 재하판 아래 고무판을 부착하여 하중 분포가 균등하도록 하였다. 본 시험을 통해 식(1)을 이용하여 지반반력계수를 산정하였다.

$$K_{30} = \frac{\sigma}{\Delta\delta} \quad [\text{kgf/cm}^3] \quad (1)$$

여기서,  $\sigma$  는 기준 침하량에서의 재하응력 ( $\text{kgf/cm}^2$ )  
 $\Delta\delta$  는 침하량 (cm)

콘크리트 포장의 경우 침하량 1.25 mm, 그리고 아스팔트의 경우 침하량 2.5 mm 기준으로 지반반력계수를 산정하며, 도로시공기준에서 보조기층의  $K_{30}$  은 콘크리트 포장의 경우 침하량 1.25 mm 에서  $20\text{kgf/cm}^3$  이상으로 관리하고, 아스팔트의 경우 침하량 2.5 mm 에서  $30\text{kgf/cm}^3$  이상으로 관리한다고 명시되어있다 (Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2009).

### ● 반복평판재하시험

시험은 DIN 18 134에 따라 수행하였으며, 시험장비는 평판재하시험과 동일하나, 2회의 하중재하 및 재하를 실시함으로써, 초기 소성변형을 측정하고 이를 고려한 변형탄성계수( $E_{v1}$ ,  $E_{v2}$ )를 식(2)를 이용하여 산정한다.

$$E_v = 1.5 \cdot r \cdot \frac{1}{a_1 \cdot a_2 \cdot \sigma_{0\max}} \quad [\text{MN/m}^2, \text{MPa}] \quad (2)$$

여기서, r 는 평판 반지름 (mm)

$\sigma_{0\max}$  는 최대재하응력 ( $\text{MN/m}^2$ )

$a_1, a_2$  는 모델계수

Fig. 2는 평판재하시험과 반복평판재하시험 결과 그래프의 차이점을 보여준다.

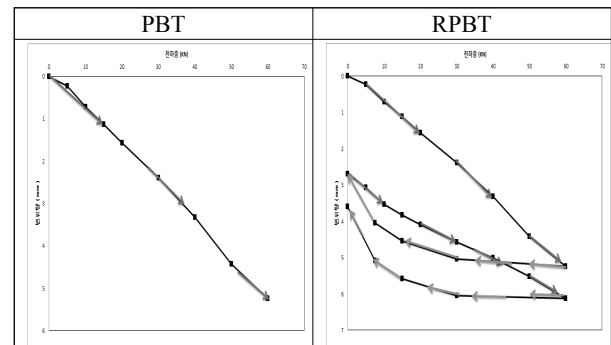


Fig. 2 Comparison of test results of PBT and RPBT

### ● 동평판재하시험

시험은 ASTM E2835-11에 따라 수행하였으며, 직경 30 cm 재하판에 10 kg의 추를 일정한 낙하고에서 자유낙하 시켜 약 100 kPa의 충격하중을 가하여 순간적으로 발생하는 표면침하량을 다음 식(3)에 대입하여 동탄성계수( $E_{vd}$ )를 산정한다.

$$E_{vd} = \frac{22.5}{\Delta\delta} \quad [\text{MN/m}^2, \text{MPa}] \quad (3)$$

여기서,  $\Delta\delta$  는 침하량 (mm)

Fig. 3은 현장시험에 사용된 장비 사진이다.

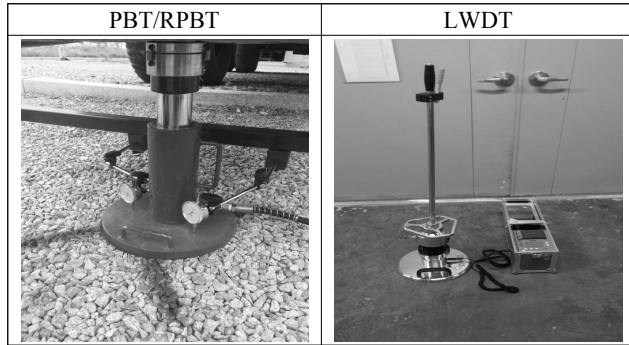


Fig. 3 Scheme of PBT/RPBT and LWDT devices

평판재하시험과 반복평판재하시험의 가장 큰 차이점은 평판재하시험은 각 단계별 하중재하 종료 시점이 1분간 발생하는 침하량이 해당 하중단계에서 발생한 총 침하량의 1% 미만일 경우 종료하고, 다음 단계로 진행한다.

반면에 반복평판재하시험은 각 단계별 하중재하 종료 시점이 일반적인 경우 2분, 보조기층인 경우 1분간 재하 후 다음 단계로 진행한다.

### 3. 현장시험용 투수성 포장체 시공

도로 포장체 하부층에 지오그리드 보강에 대한 연구 사례를 조사한 결과, 혼합골재 보조기층 지오그리드 보강 시 보조기층 상부로부터 1/3 위치에 보강하였을 때 가장 효과가 좋다는 것을 확인 하였고 (Abu-Farsakh and Chen, 2011), 철도 자갈도상에서 지오그리드 보강 시 자갈도상층 하부 1/3 위치에 보강하였을 때 가장 효과가 좋다는 것을 수치해석을 통하여 확인하였다 (Oh, 2013).

따라서 본 연구에서는, 30 cm 쇄석 보조기층에 무보강, 상하부 기준 1/3 지점에 지오그리드 보강 조건을 각각 시공하여 실험을 진행하였고, 시공은 OO대학교 OO캠퍼스 내 LID실증연구단지에서 진행하였다. 시공단면은 Fig. 4와 같다.

보조기층은 최대입경은 25 mm 이며, 노상재료는 현장 지반의 흙을 이용하였다. 쇄석과 노상의 물성치는 다음 Table. 1과 같다. 사용된 지오그리드는 LID 연구단에서 자체적으로 개발한 지오그리드이며 외형은 Fig. 5와 같다.

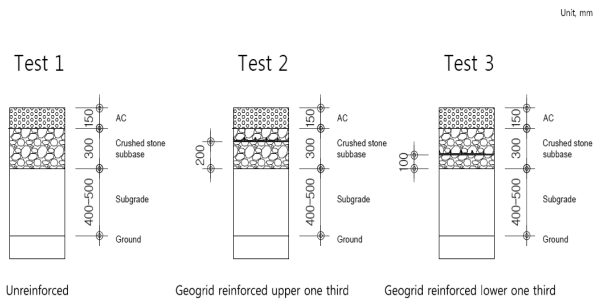


Fig. 4 Scheme of field test sections

폴리프로필렌 소재로 제작된 지오그리드 한 셀의 크기는 가로, 세로 24 cm, 각 접점에서의 높이는 2 cm로 3차원 구조 형태로 구성되어 있다.

Table. 1 Material properties of subgrade and subbase

Subgrade		Crushed stone subbase	
C <sub>u</sub>	21.11	C <sub>u</sub>	15
C <sub>c</sub>	0.9357	C <sub>c</sub>	0.96
Classification	SP	Classification	GP
γ <sub>dmax</sub>	1.95	γ <sub>dmax</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.67
LL (%)	28.13	γ <sub>dmin</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	1.33
PL (%)	5.053	D <sub>max</sub> (mm)	25

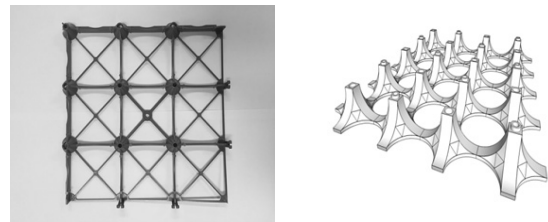


Fig. 5 Scheme of geogrid used

지오그리드 시공방법으로는 먼저 10 cm 쇄석골재 포설 후 그 층을 느슨히 다진 후 지오그리드를 설치하고, 다시 10 cm 골재를 포설한 뒤 전체적으로 다져준 다음 마지막으로 10 cm 골재 포설 후 다짐을 실시한다. 이 시공방법은 지오그리드와 골재 사이의 결집력을 증가시켜주고 이는 시험 결과값에 상당한 영향을 미치기 때문에 반드시 고려하여야 한다 (Abu-Farsakh and Chen, 2011).

Fig. 6은 현장시공 및 시험 사진이다.

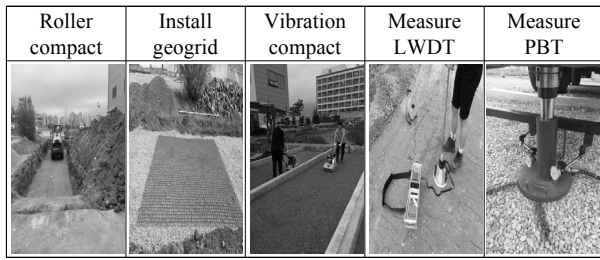


Fig. 6 Field test procedures

#### 4. 시험결과

지오그리드 보강효과 비교를 위해서는 각 구간의 다짐의 균질성이 확보되어야 한다. 쇄석보조기층은 진동다짐기를 이용하여 다짐 후 동평판재하시험을 통해 다짐정도를 확인하였으며, Fig. 7은 위치별 LWDT 측정 결과 이며, Table 2는 DIN 규정에서 제시하고 있는  $E_{vd}$ 와  $E_{v2}$ , 다짐도의 상관관계를 보여준다.

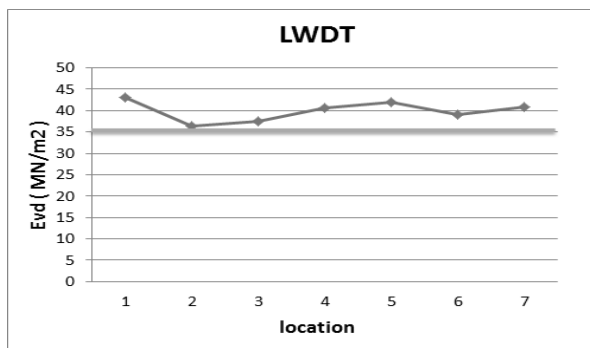


Fig. 7 LWDT measurements

Table. 2 Interaction among  $E_{vd}$ ,  $E_{v2}$ , and degree of compaction

	Degree of compaction	Modulus	
		$E_{v2}$ = MPa	$E_{vd}$ = MPa
DIN 18 196	%		
GW, GI	$\geq 100$	$\geq 100$	$\geq 50$
	$\geq 98$	$\geq 80$	$\geq 40$
	$\geq 97$	$\geq 70$	$\geq 35$

Table. 2에 의하면 본 연구에서 사용된 쇄석보조기층과 유사한 재료 (GW)의 다짐도 97%에 상응하는 최소 동탄성계수 값이  $E_{vd} = 35\text{MPa}$  이므로 이 값을 기준으로 하여 다짐을 관리 하였다. 시험결과,  $E_{vd}$ 값은 35~45 MPa로 기준 다짐도 97% 이상인 것을 확인하였다. 일반 도로에서는 다짐평가를 들밀도 시험을 통해서 하고 있지만, 쇄석골재층에서는 이러한 방법이

용이치 않으며, 이에 대한 대안으로 동평판재하시험을 적용할 수 있을 것으로 판단되며, 추가 시험을 통해서 다짐 기준을 제시하고자 한다. 평판재하시험 결과는 Fig. 8, Table. 3과 같다.

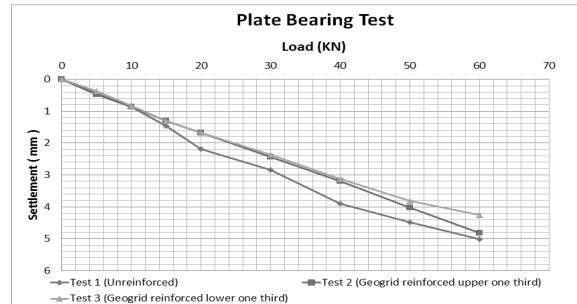


Fig. 8 Test results of PBT

Table. 3 Comparison of  $K_{30}$  from PBT

	Concrete		Asphalt	
	$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Reinforcement effect (%)	$K_{30}$ (kg/cm <sup>3</sup> )	Reinforcement effect (%)
N/A	15.24	-	14.29	-
Upper 1/3	16.72	9.71	17.79	24.55
Lower 1/3	16.62	9.06	18.37	28.59

투수포장 표층재료는 투수 콘크리트 및 투수 아스팔트를 사용하므로 각각에 대한  $K_{30}$  값을 산정하였다.

Table. 3에서의 보강효과는 무보강 시  $K_{30}$ 값을 기준으로 보강 시 향상된  $K_{30}$ 값 비율을 나타낸 것이다.

시험 결과, 콘크리트기준 상부 1/3에서 보강효과가 근소하게 크게 나왔지만, Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 전하중 40 kN 까지는 하부 1/3 보강 조건과 거의 동일한 값으로 침하량이 측정되다가 50 kN부터 침하량이 상부 1/3 보강 시 크게 측정됨을 확인하였다. 이는 지오그리드 하부 1/3 보강 조건이 하중의 증가 시 보강효과가 상대적으로 큰 것임을 확인할 수 있었다.

본 실험에서의  $K_{30}$  값은 일반도로 시공기준에는 만족하지 않지만, 주로 주차장이나 경량도로에 시공 가능한 투수성 포장에 대한 시공기준은 아직 없기 때문에 이에 대한 검토가 필요 할 것으로 판단된다. 하지만, 무보강 조건보다는 지오그리드 하부 1/3 보강 시 지반반력계수의 증가를 확인 하였으며, 추후 연구를 바탕으로 투수성 포장체 설계 및 시공 시 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.

반복 평판재하시험 결과는 Fig. 9, Table. 4와 같다.

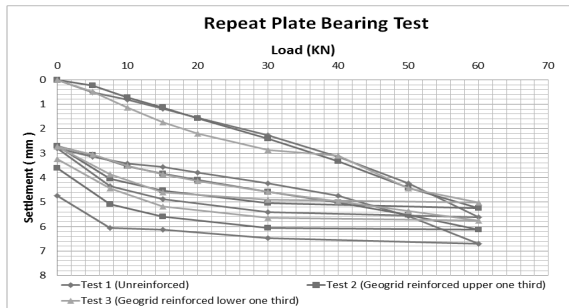


Fig. 9 Test results of RPBT

Table. 4 Comparison of  $E_{v1}$  and  $E_{v2}$  from RPBT

	$E_{v1}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Reinfor- cement effect (%)	$E_{v2}$ (MN/m <sup>2</sup> )	Reinfor- cement effect (%)	$E_{v2}/$ $E_{v1}$
N/A	35.74	-	53.11	-	1.49
Upper 1/3	35.87	0.38	58.68	10.49	1.64
Lower 1/3	39.43	10.33	64.97	22.33	1.65

반복평판재하시험 결과 역시 하부 1/3 에서 보강효과가 가장 좋다는 것을 확인하였다. 평판재하시험 결과와 비교하였을 때, 상대적으로 하부 1/3 보강 시 보강효과를 보다 명확히 확인할 수 있었으며, 이는 반복평판재하 시험 특성상 1차 하중재하를 통해서 지오토크가 골재의 결속력을 발휘할 수 있는 단계를 만들어 주고 제하 후 2차 재하를 하는 하중 특성에 기인하는 것으로 판단된다. 또한, 1차 하중재하를 통해서 1차 소성변형을 제거한 뒤 측정되는 2차 변형탄성계수  $E_{v2}$ 가 보강 정도를 효과적으로 보여주는 것으로 확인 되었다.

5. 수치해석 검토

현장 실험에서 확인한 위치별 지오토크 보강효과에 대한 검증용 위해 PLAXIS 2D (Brinkgreve et al., 2006)를 이용한 유한요소해석을 실시하였다. 다음 Table 5는 해석에 사용된 물성치이다.

Table. 5 Properties of Materials from PLAXIS

	Model	Propert- -ties	Unit	Value
Sub- base	Mohr- Coulomb	$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	20
		$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	20
		$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	150000
		$\nu$		0.2
		$C_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	0.1
		$\phi$	°	42
Sub- -grade	Mohr- Coulomb	$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	19
		$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	20
		$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	104000
		$\nu$		0.2
		$C_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	5
		$\phi$	°	35
Natural Ground	Mohr- Coulomb	$\gamma_{unsat}$	kN/m <sup>3</sup>	18
		$\gamma_{sat}$	kN/m <sup>3</sup>	19
		$E_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	80000
		$\nu$		0.3
		$C_{ref}$	kN/m <sup>2</sup>	5
		$\phi$	°	32
Plate	Elastic	EA	KN/m	630000
		EI	KNm <sup>2</sup> /m	5250
		w	KN/m/m	1
		d	m	0.01
		$\nu$		0.2
Geo- -grid	Elastic	EA	KN/m	300

본 해석은 Mohr-Coulomb 탄소성 해석모델을 이용하여 축대칭 조건에서 하중재하는 변위제어(prescribed displacements) 모드로 하였다. 재하판의 반지름은 15 cm 조건으로 진행하였으며, 무보강, 상부 1/3 보강, 하부 1/3 보강 총 3가지의 경우에 대해 해석을 진행하였다. Fig. 10은 해석에 사용된 모델의 형상과 치수를 보여주며, Fig. 11은 해석 결과를 보여주고 있다

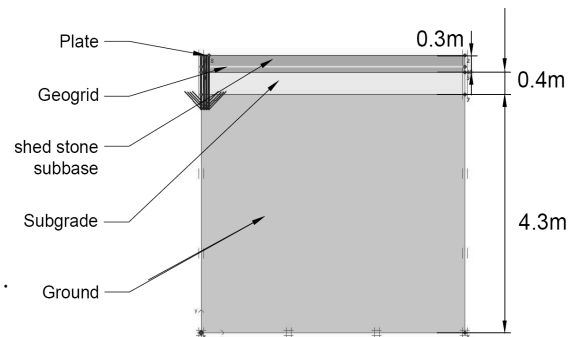


Fig. 10 PLAXIS model for PBT example

전하중 20 KN 기준 무보강 침하량은 2.08 mm, 상부 1/3 보강은 2 mm, 하부 1/2 보강은 1.9 mm 로 해

석결과 역시 하부 1/3 보강시 가장 효과가 좋은 것으로 나타났으나, 현장 시험 결과치와 비교해 보았을 때 보강효과가 적은 것으로 확인하였다.

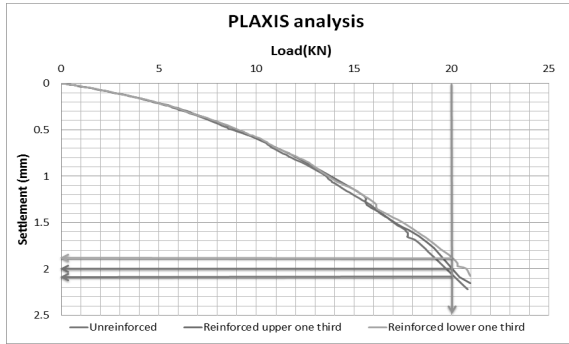


Fig. 11 Results of PLAXIS analysis

이는 유한요소해석에서 지오그리드와 주변 재료간의 결속력의 모델링의 한계가 있음으로 판단되며, 추후 개별요소해석을 통해서 효과를 재검증하고자 한다. 개별요소해석은 입자간의 결집력 및 미끄럼 등을 정확히 모델링 할 수 있어 지오그리드 보강 효과를 검증하는데 유효한 것으로 보고 되었다 (Pi, 2015; Chen et al., 2012).

## 6. 결론 및 제언

(1) 동평판재하시험은 투수성 포장체에 적용하고자 하는 쇄석 보조기층의 다짐정도를 판단하는데 유효한 것으로 판단되며, 추가 시험을 통해 다짐기준을 제시하고자 한다.

(2) 평판재하 및 반복평판재하 시험 결과 쇄석 보조기층 하부 1/3 위치에 지오그리드 보강하였을 때 20% 정도 지지력이 향상되었다.

(3) 소성변형을 고려한 반복평판재하시험은 투수성 도로 포장체의 지지력 산정에도 적용이 가능 할 것으로 판단되며, 시험 완료 시간 또한 평판 재하시험에 비해 상당부분 단축함으로써 현장에서의 적용성을 높일 수 있는 것으로 확인하였다.

(4) K30 결과값을 보면 일반도로기준에 만족하지 못하나, 투수성 포장체는 주로 주차장이나 경량도로에 적용되는 것을 고려하면, 투수성 포장의 K30 다짐기준은 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.

(5) 유한요소해석 결과, 하부 1/3 위치에 지오그리드 보강 시 효과가 가장 좋은 것으로 확인하였다. 추후 개별요소해석을 실시하여 보강효과를 재확인 할 필요가 있을 것으로 판단된다.

(6) 쇄석 보조기층 보강을 위한 지오그리드의 물성은 보강효과 및 시공상 손상정도에 영향을 미칠 것을 판단되며, 향후 연구를 통해 검증할 필요가 있다.

(7) 지오그리드 보강효과를 보다 정량화하기 위해서 지오그리드 보강을 통한 단면 축소나 유지관리비를 고려한 경제성 분석을 추가할 예정이다.

## ACKNOWLEDGEMENT

본 연구과제는 국토교통부 국토교통과학기술진흥원 물관리연구사업인 ‘건전한 도시물순환인프라의 저영향 기법(LID)및 구축운영기술’ 과제[12기술혁신C04]의 일환으로 이루어졌습니다. 이에 감사드립니다.

## References

- ASTM E2835-11, 2011, “Standard Test Method for Measuring Deflections Using a Portable Impulse Plate Load Test Device,” *Annual Book of ASTM Standards*, Vol. 04.03, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- Brinkgreve, R.B.J., Broere, W, and Waterman, D. (2006). *PLAXIS Version 8 Manual*. The Netherlands.
- Cheng Chen, G.R. McDowell, N.H Thom (2012), “Discrete element modelling of cyclic loads of geogrid-reinforced ballast under confined and unconfined conditions”, *Geotextiles and Geomembranes*, Vol. 35, pp. 76-86.
- David K. Hein, P. Eng(2014), “Development of an ASCE standard for permeable interlocking concrete pavement”, 2014 Conference and Exhibition of the Transportation Association of Canada.
- DIN 18 134 (2001), "Determining the deformation and strength characteristics of soil by the plate loading test" *Deutsches Institut für Normung e.V.*, Berlin. Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin, Germany.
- John Knapton, David Morrell, Mihailo Simeun, “Structural Design Solutions For Permeable Pavements”, Obtained from ([http://www.uni-groupusa.org/PDF/Interpave\\_UK\\_PIC\\_P\\_design\\_guide.pdf](http://www.uni-groupusa.org/PDF/Interpave_UK_PIC_P_design_guide.pdf))
- Kim DaeSung (2012) “Evaluation of Modulus and

- load-settlement characteristics of Subgrade Soil used in Track Foundation”, Master’s Thesis, Paichai University, Daejeon, Korea.
- KS F 2310 (2000), "Plate Bearing Test Method of Roadway“ *Korean Agency for Technology and Standards(KS)*, Seoul, Korea.
- Lim Yujin , Kim DaeSung, Cho Hojin, Sagong Myoung (2013), “Investigation of Stiffness Characteristics of Subgrade Soils under Tracks Based on Stress and Strain Levels“, *Korean Society for Railway*, 16(5), pp. 386-393.
- Murad Abu-Farsakh (2011), “Evaluation of geogrid base reinforcement in flexible pavement using cyclic plate load testing” *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 12, No.3, pp. 275-288.
- Oh, J. (2013). “Parametric Study on Geogrid Reinforced Track Substructure”, *IJR International Journal of Railway*, Vol. 6, No. 2, June 2013, pp. 59-63.
- Pi JiHyun (2014), “Evaluation of Geogrid Reinforced Track Substructure Effectiveness Using A Laboratory Test and Discrete Element Method”, Master’s thesis, Korea National University of Transportation, Uiwang, Korea.
- Standard Specification for Roadway Construction (2009), Ministry of Land Infrastructure and Transport, Korea.
- US. Army (2007), “USE OF GEOGRIDS IN PAVEMENT CONSTRUCTION”, Technical Letter No.1110-1-189.
- U.S Department of Transportation Federal Highway Administration (2015), “Permeable Interlocking Concrete Pavement” FHWA-HIF-15-007.