

성토재료로 부적합한 현장 발생토의 토목섬유 보강효과에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Reinforcement Effect of Geosynthetics for Surplus Soil, an Unsuitable Fill Material

홍용석¹, 임종철^{2*}, 강상균³, 유재원⁴, 김창영⁵

Young-Suk Hong¹, Jong-Chul Im^{2*}, Sang-Kyun Kang³, Jae-Won Yoo⁴, Chang-Young Kim⁵

¹Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

²Member, Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

³Non-Member, Graduate Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁴Member, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

⁵Non-Member, Researcher, Research Institute of Industrial Technology, Pusan National Univ., 2 Busandaehak-Ro, 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea

ABSTRACT

Surplus soil is commonly used at construction sites, because suitable fill material is not always immediately available and leads to additional costs. However, most surplus soils do not meet the requirement of suitable fill material to achieve the stability and strength of embankments. In this study, Proctor compaction tests and field compaction tests were performed by installing geosynthetics to resolve the problems caused by compacting unsuitable soils. Compaction energy and the number of geosynthetics were changed under the type A- and D- and type A Proctor compaction tests (KS F 2312), respectively. The field compaction testing using geosynthetics was performed on surplus soils of high water content. Optimum water content and maximum dry density of compacted soil decreased and increased by reinforcing geosynthetics, respectively. Compaction curves behaved with geosynthetics as the compaction curves behaved with higher compaction energy. Efficient compaction was possible because the compaction energy increased to 2.10 and 2.71 times the compaction energy required to achieve the same maximum dry density with one and two geosynthetic layer(s), respectively. Furthermore, field compaction tests verified that efficient compaction was possible because the dry density of unsuitable surplus soils of high water content was increased by reinforcing geosynthetics.

요 지

양호한 성토재료는 현장에서 즉시 입수가 곤란하고 재료의 확보를 위한 추가적인 비용이 발생하여 각 현장에서는 현장 발생토를 직접 사용하는 경우가 많지만, 현장 발생토는 대부분 성토재료의 기준에 적합하지 않기 때문에 성토체의 안정성이나 강성을 확보하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 성토재료로 부적합한 흙의 다짐시 발생하는 문제점들을 개선하기 위하여 토목섬유를 보강하여 실내다짐시험과 현장다짐시험을 하였다. 실내다짐시험(KS F 2312)의 A, D다짐시험과 A다짐시험에서 다짐에너지와 토목섬유의 보강 층수를 다르게 하였고, 현장다짐시험은 함수비가 높은 현장 발생토에 토목섬유를 보강하고 다짐을 실시하였다. 그 결과, 실내다짐시험에서는 토목섬유를 보강함으로써 최적함수비는 감소, 최대건조밀도 증가하여 다짐곡선은 다짐에너지를 증가시켜 다짐한 경우와 비슷한 거동을 하였고, 건조밀도와 다짐에너지의 관계로부터 다짐에너지는 토목섬유를 1열, 2열 보강하였을 때 각각 평균 2.10배, 평균 2.71배 증가하여 토목섬유를 보강하고 다짐하면 큰 다짐에너지로 다짐한 것과 같은 효과로 더 효율적인 다짐이 가능한 것으로 분석되었다. 그리고 현장다짐시험에서 토목섬유를 보강함으로써 건조밀도는 증가하는 것으로 분석되어 다짐시 토목섬유를 보강하여 다짐을 실시하면 함수비가 높고 성토재료로 부적합한 현장 발생토를 사용하더라도 효율적인 다짐이 가능한 것으로 입증되었다.

Keywords : Geosynthetic, Surplus soil, Proctor compaction test, Dry density, Water content, Compaction energy

Received 10 Jan. 2018, Revised 14 Feb. 2018, Accepted 21 Feb. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-51-510-2442; Fax: +82-51-518-3084

E-mail address: imjc@pusan.ac.kr (J. C. Im)

1. 서론

최근 토목섬유로 지반을 보강하여 토목 공사현장에서 발생하는 여러 가지의 지반 공학적 문제들을 해결하는 경우가 많이 있다. 토목섬유는 다양한 기능을 가지고 있기 때문에 동시에 여러 가지 문제를 해결할 수 있고, 해결을 위해 관련 제품을 복합적으로 사용할 수 있다는 장점이 있다. 토목섬유를 포설하여 구조물을 건설할 경우 기초지반의 지지력을 증가시켜 건설되는 구조물의 안정성을 향상시키고 지반파괴를 억제하는 역할을 한다. 또한, 토목섬유를 사용하는 공법은 다른 공법과 비교하여 저렴한 비용과 우수한 시공성에 의해 각종 토목공사현장에서 지반보강을 위해 많이 사용되고 있다. 토목섬유로 보강하여 다짐을 하게 되면 흙입자 구조가 조밀화 되어 일반적으로 성토재료의 전단강도가 증가하게 되고 투수성은 낮아지게 된다. 그러므로 같은 다짐에너지로 다짐을 하더라도 더 큰 에너지로 다졌을 경우와 동일한 효과를 얻을 수 있는 장점이 있을 것이다.

성토공사시 투수성과 다짐이 양호한 사질토를 많이 사용하지만, 이러한 양질의 성토재료는 현장에서 즉시 입수가 곤란하고, 성토재료의 확보를 위한 추가적인 비용이 발생하여 각 현장에서는 공급이 용이한 현장 발생토를 직접 사용하는 경우가 많다. 하지만 소성이 있는 점성토나 세립분이 많은 실트질 흙과 같이 성토재료로 적합하지 않은 흙의 경우에는 전단강도 및 강성이 양호한 사질토에 비해 성토체의 안정성이나 강성을 확보하는데 어려움이 있다.

다짐은 성토재료를 최대건조밀도(V_{dmax})와 최적함수비(w_{opt}) 상태에서 다짐을 실시하여 성토체가 적정한 다짐도를 확보하여 추후 시공단계에서의 추가적인 침하 등의 피해를 방지하기 위함이 그 목적이다. 하지만 현장 발생토의 경우에는 각 시방규정에서 요구하는 함수비 보다 높은 경우가 많기 때문에 성토재료에 적합한 조건을 만족하기 위해서는, 현장 발생토를 건조시켜야 하고, 건조를 시키기 위해 적재 공간을 확보해야 하는 문제점이 있다. 만약 건조시키지 않고 함수비가 높은 상태에서 다짐을 실시하게 되면 다짐에 의해 흙이 짓이겨져서 다짐상태가 오히려 나빠지는 과도전압(Overcompaction) 상태가 되기도 하고, 원하는 다짐도를 얻기 위해 다짐에너지를 증가시켜 다짐을 실시하면 성토재료로 양호한 흙의 경우에는 다짐에너지가 증가하면서 간극은 감소하여 흙은 더 조밀해지지만, 소성이 있는 점성토나 세립분이 많은 실트질 흙의 등에서

는 함수비가 높은 상태에서 다짐에너지를 증가시켜 반복적으로 작용하면 다짐상태가 나빠져서 밀도와 강도 특성은 증가하지 않고 오히려 강도가 저하되는 과다짐 현상이 발생한다(Im, 2016).

Lee et al.(2015)은 여러 다짐평가기법간의 상관성을 분석하기 위하여 노상두께 20cm, 30cm, 40cm에 대한 평판재하시험, 현장밀도시험, 동적 콘 관입시험, 동편평재하시험을 이용하여 노상토의 지지력을 평가하였고, 각각의 다짐평가기법간의 결과를 비교·분석하여, 향후 활용법에 대하여 살펴보았다. 그리고 Park(2014)는 소성이 없는 실트질 모래를 KS F 2312의 A다짐으로 토목섬유(지오그리드, PET매트)를 보강하여 다짐을 실시하였다. 그 결과 토목섬유를 보강함으로써 최적함수비는 감소하고, 최대건조밀도는 증가하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 성토재료의 기준에 적합하지 않은 소성이 있는 실트질 모래의 다짐 시 이러한 문제점들을 개선하기 위하여 토목섬유를 보강하여 실내다짐시험과 현장다짐시험을 실시하였다. 먼저, 실내다짐시험(KS F 2312)의 A, D다짐시험 방법으로 다짐을 실시하고, 동일한 함수비에서 토목섬유의 보강 조건을 다르게 다짐시험을 실시하여 건조밀도의 변화 및 다짐에너지의 차이에서 나타나는 효율적인 다짐방법에 대해 분석하였다. 그리고 현장다짐시험을 실시하여 실제 함수비가 높은 현장 발생토에 토목섬유를 보강하고 다짐을 실시하여 건조밀도의 변화에 대해서 비교·분석하여 토목섬유의 보강효과를 확인하였다.

2. 실내다짐시험

2.1 지반재료와 토목섬유

시험에 사용된 지반재료는 부산시 강서구 국제물류 산업도시 조성공사 현장에서의 현장 발생토를 사용하였다. 사용된 지반재료의 물성값은 Table 1과 같고, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다. 노상 재료의 기준은 최대입경은 100mm 이하, 4.75mm 통과율 25% 이상, 0.075mm 통과율 25% 이하, 그리고 소성지수(PI)는 10 이하이다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 또한, 성토재료로 사용이 부적합한 흙의 기준은 액성한계(LL) 50% 이상, 소성한계(PL) 25% 초과, 건조밀도는 $1.5g/cm^3$ 이하인 재료 등이다(Ministry of Construction and Transportation, 1996). 하지만 본 연구에서 사용된 지반재료는 Table 1과

Table 1. Physical properties of soil

USCS	Specific gravity (G _s)	Natural water content (w _n , %)	Liquid limit (LL, %)	Plastic limit (PL, %)	Plasticity index (PI)	Particle size analysis
SM	2.66	39.62	41.10	35.05	6.05	Sand : 65.52% Silt : 26.88% Clay : 7.60%

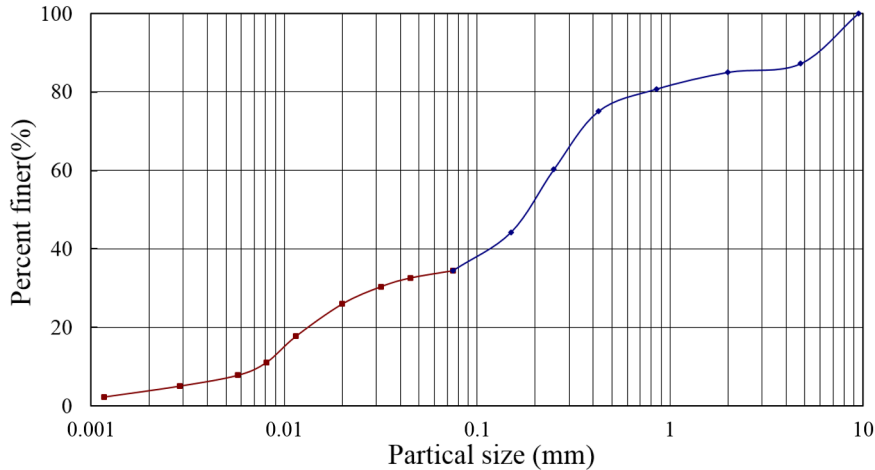


Fig. 1. Particle size distribution curve of soil used in Proctor compaction tests

Table 2. Physical properties of PET mat

Fiber type	Product type	Elongation (%)	Tensile strength (kN/m)	Seam strength (kN/m)
Polyester	Woven geotextile	20	100	50

Table 3. The type and conditions of compaction test

Contents	Compaction test type	No. of soil layers	No. of blows per layer	No. of geosynthetic layers
D-NR	D	5	55	-
A-NR	A	3	25	-
A-M1				1
A-M2				2

*Description of test name: D, Type D Proctor compaction test; A, Type A Proctor compaction test; NR, Proctor compaction test without geosynthetics; M, PET mat; 1 and 2, Number of geosynthetic layers.

같이 0.075mm 통과율이 34.48%이고, 소성한계(PL)는 35.05%로 성토재료로 부적합하다.

토목섬유는 PET매트를 사용하였다. PET매트는 지오텍스타일의 한 종류로 분리, 보강, 배수, 여과 등의 기능이 있고 연약지반에서 모래층과 원지반토의 분리, 인장강도에 의한 트래픽커빌리티 향상, 지반의 지내력 보강 등의 용도로 모래와 같은 잔골재와 함께 주로 사용된다. 본 연구에서 사용된 PET매트는 Table 2와 같이 인장신도는 20%, 인장강도는 100kN/m이고, 봉합강도는 50kN/m이다.

2.2 실내다짐시험의 종류 및 조건

Table 3은 실내다짐시험(KS F 2312)의 시험종류별 조건을 정리한 것이다. 시험은 토목섬유를 포설하지 않은 상태인 무보강 상태에서 A(Fig. 2(a)), D다짐을 각각 3회씩 실시하였고, 토목섬유의 보강에 따른 효과를 분석하기 위해서 Fig. 2의 (b), (c)와 같이 A다짐에서 1열과 2열에 PET매트를 포설하여 각각 3회씩 실시하였다.

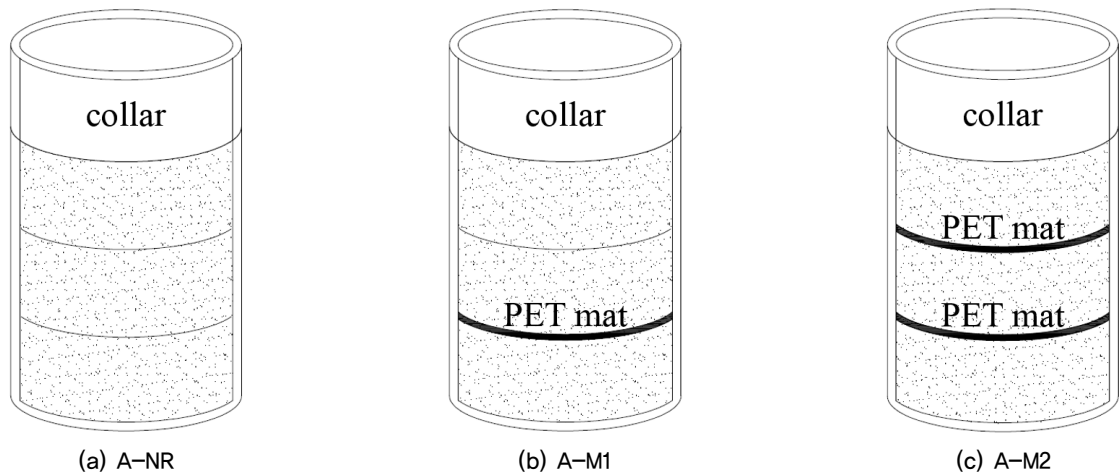


Fig. 2. Type and method of A Proctor compaction test

2.3 실내다짐시험의 방법

다짐시험 재료는 현장에서 채취한 흙을 공기 중에서 건조하고 건조된 흙에 가수(加水)하여 함수비를 조절하였으며, 가수한 흙을 일정 시간 방치하여 함수비가 전체적으로 일정하게 되도록 하였다.

실내다짐시험의 방법은 KS F 2312, ASTM D 698, D 1557, AASHTO T 99, T 180 등이 있다. 이 시험방법들은 래머의 무게, 낙하고, 몰드의 크기, 다짐충수, 타격회수, 입자의 크기에 따라 차이가 있다. KS F 2312에는 다짐시험을 다섯 종류로 분류하고 있으나, ASTM에서는 표준다짐시험과 수정다짐시험의 두 종류로 대별하고 또한, 각 시험을 세 종류씩으로 세분해서 총 여섯 종류의 시험으로 나누고 있다. 그리고 AASHTO에서는 네 종류로 분류를 하고 있다. 본 연구에서는 기본적으로 KS F 2312의 다짐시험 방법과 동일한 방법으로 실시하였다. 그리고 시험과정은 먼저, 첫 번째 다짐시험을 실시한 후 그 결과로부터 각 층별 시료의 무게가 최대한 일정하게 되도록 계산하여 각 층별로 계산된 무게만큼 넣고 다짐을 재실시(두 번째 다짐시험)하였다. 그리고 세 번째 다짐시험시 이전 과정을 반복하였으며, 그 결과를 모두 평균하여 최종적인 다짐곡선을 작성하였다. 또한, 토목섬유를 보강함으로 인해서 증가하는 다짐에너지 효과를 비교·분석하기 위해서 토목섬유를 1열, 2열에 각각 보강하여 앞의 방법과 같이 3회씩 다짐을 실시하여 그 결과를 평균하였다. 여기서, 토목섬유의 포설은 한 층의 다짐이 종료된 후에 Fig. 3과 같이 하였다. 함수비는 실내다짐시험의 종료 후, 시료추출기를 이용하여 몰드에서 다짐체 전체를 추출한 후 높이를 기준으로 상·



Fig. 3. A Proctor compaction test

중·하 세 부분으로 나누어 몰드 원의 중심부분 시료를 채취하여 건조한 결과를 평균하여 측정하였다.

2.4 실내다짐시험 결과

2.4.1 최적함수비 및 최대건조밀도

Table 4는 A다짐, D다짐시험 결과와 A다짐시험에서 토목섬유의 보강개수에 따른 최적함수비와 최대건조밀도 결과를 정리한 것이고, Fig. 4는 시험종류별 각각 3회씩 다짐한 결과를 다짐곡선으로 작성한 것이다. A다짐시험에서 토목섬유를 보강함으로써 다짐곡선의 형태는 토목섬유의 보강개수가 증가함에 따라 최적함수비는 감소하고, 최대건조밀도는 증가하였다.

2.4.2 다짐에너지

토목섬유를 보강함으로써 발생하는 다짐에너지의 효과를 분석하기 위해서 식 (1)의 다짐에너지 식을 이용하여

Table 4. Compaction test results

Contents	Optimum moisture content, ω_{opt} (%)	Maximum dry density, γ_{dmax} (g/cm ³)
D-NR	12.30	1.927
A-NR	14.35	1.784
A-M1	13.68	1.822
A-M2	13.08	1.849

*Description of test name: D, Type D Proctor compaction test; A, Type A Proctor compaction test; NR, Proctor compaction test without geosynthetics; M, PET mat; 1 and 2, Number of geosynthetic layers.

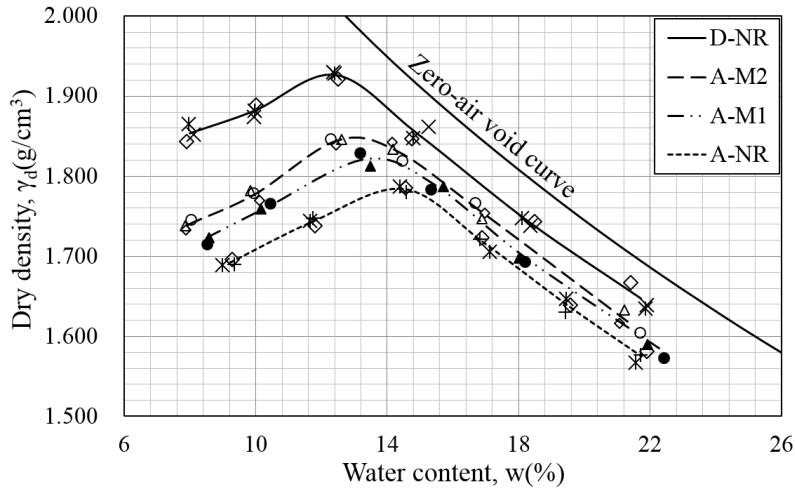


Fig. 4. Comparison of compaction curves obtained by installing PET mat (with and without PET mat) and by changing compaction energy (A and D type) and number of reinforced PET mats (from one to two) in Proctor compaction tests

Table 5. Compaction energy

Compaction type	Weight of rammer (N)	Rammer drop height (m)	No. of soil layers	No. of blows per layer	Volume of mold (m ³)	Compaction energy (kN·m/m ³)
D	44.1	0.45	5	55	2.2×10 ⁻³	2470.6
A	24.5	0.30	3	25	1.0×10 ⁻³	551.3

D다짐과 A다짐을 실시하였을 때의 다짐에너지를 Table 5와 같이 정리하였다.

$$E_c = \frac{W \cdot h \cdot N_d \cdot N_h}{V_m} \text{ kN} \cdot \text{m} / \text{m}^3 \quad (1)$$

여기서, E_c : Compaction energy (kN·m/m³)
 W : Weight of rammer (kN)
 H : Rammer drop height (m)
 N_d : Number of layers
 N_h : Number of blows per layer
 V_m : Volume of mold (m³)

3. 실내다짐시험 결과 분석

3.1 토목섬유 보강에 따른 최적함수비와 최대건조밀도의 변화 분석

Table 6은 토목섬유를 보강하여 다짐시험을 실시한 결과를 정리한 것이다. A다짐시험에서 무보강인 경우와 1열, 2열 보강하였을 때의 다짐시험 결과를 비교하면 최적함수비는 4.7%, 8.9% 감소하고, 최대건조밀도는 2.1%, 3.6% 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같이 Fig. 5의 화살표 방향으로 최적함수비는 감소하고, 최대건조밀도는 증가하는 결과는 다짐에너지를 증가시켜 다짐을 하였을 경우와 유사한 다짐곡선의 이동 형태를 나타내어 토목섬유를 보강하여 다짐을 실시하면 더 큰 다짐에너지로 다짐을

Table 6. The results of Proctor test compaction tests using PET mat

Contents	Optimum water content, ω_{opt} (%)	Maximum dry density, γ_{dmax} (g/cm ³)	Ratio of optimum water content ($\omega_{opt}/\omega_{opt}$ of A-NR)	The ratio of maximum dry density ($\gamma_{dmax}/\gamma_{dmax}$ of A-NR)
A-NR	14,35	1,784	1,0	1,0
A-M1	13,68	1,822	0,953	1,021
A-M2	13,08	1,849	0,911	1,036

*Description of test name: A, Type A Proctor compaction test; NR, Proctor compaction test without geosynthetics; M, PET mat; 1 and 2, Number of geosynthetic layers.

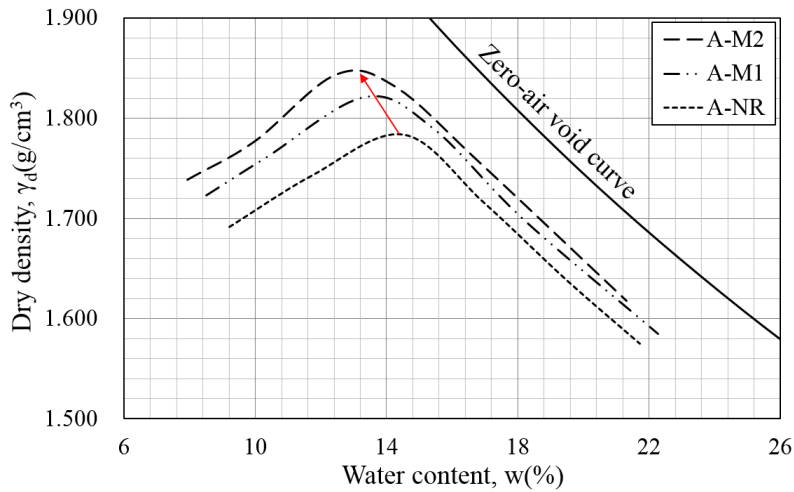


Fig. 5. Type A Proctor compaction test results without PET mat and with PET mat(s)

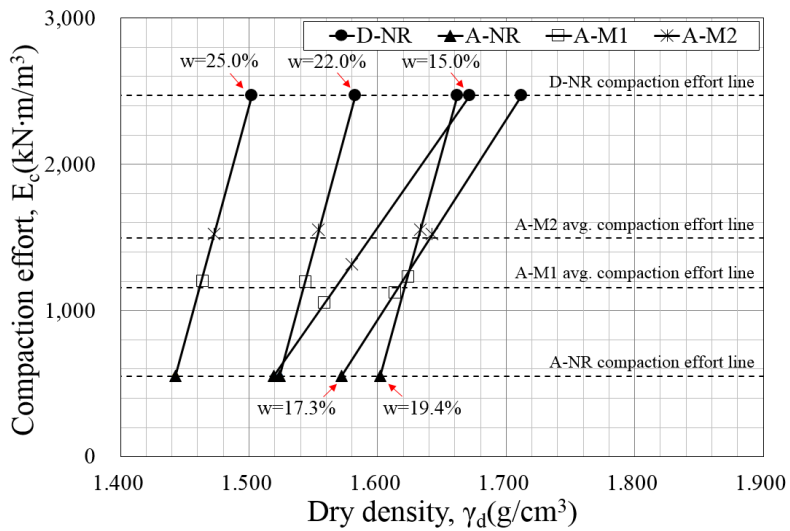


Fig. 6. Compaction effort relative to dry density

하는 효과가 있을 것으로 판단된다.

3.2 토목섬유의 보강개수에 따른 다짐효과 분석

Hwang and Oh(2005)는 국내의 여러 지역의 다양한 함수비를 가진 강모래의 다짐도와 다짐에너지 관계에서 다

짐에너지의 범위가 500~2,500kN·m/m³일 때, 다짐에너지가 증가함에 따라 건조밀도는 거의 비례하여 증가하는 경향을 나타내는 것으로 분석하였다. 따라서 본 연구에서는 토목섬유의 보강개수에 따른 다짐효과를 분석하기 위해서 Fig. 6과 같이 A, D다짐시험의 각각의 동일한 함수비에서 건조밀도와 다짐에너지의 관계를 직선으로 가정하였

Table 7. Compaction effort affected by number of reinforced PET mat layers (type A compaction test)

Water content, ω (%)	Compaction effort, E_c (kN·m/m ³)			Ratio of compaction effort	
	A-NR	A-M1	A-M2	A-M1 / A-NR	A-M2 / A-NR
10.0	551.3	1049.9	1316.1	1.90	2.39
12.3		1121.2	1522.9	2.03	2.76
14.4		1227.2	1554.2	2.23	2.82
17.0		1191.2	1552.8	2.16	2.82
20.0		1199.7	1524.1	2.18	2.76

*Description of test name: A, Type A Proctor compaction test; NR, Proctor compaction test without geosynthetics; M, PET mat; 1 and 2, Number of geosynthetic layers.

고, 토목섬유를 보강하여 다짐을 실시한 A-M1, A-M2의 건조밀도 결과에 해당하는 다짐에너지를 Table 7과 같이 산정하였다. 그 결과, 무보강인 경우를 기준으로 토목섬유를 1열을 보강하였을 때의 다짐에너지 비는 1.90~2.23으로 다짐에너지는 평균 2.10배 증가하였고, 2열을 보강하였을 때의 다짐에너지 비는 2.39~2.82의 범위로 다짐에너지는 평균 2.71배 증가하는 것으로 분석되었다. 이 결과로부터 토목섬유를 보강하여 다짐을 하게 되면 더 큰 에너지로 다짐을 하는 효과가 발생하기 때문에 더 효율적인 다짐이 가능하고, 적은 다짐에너지로도 원하는 다짐도의 확보가 가능하여 경제적인 다짐이 될 것으로 판단된다.

4. 현장실험

실내다짐시험에서는 토목섬유를 보강함으로써 최적함수비는 감소하고, 최대건조밀도는 증가하는 경향을 나타내는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 실제 현장에 적용을 하였을 경우에도 동일한 결과를 나타내는지 확인하고자 현장다짐실험을 실시하였다. 또한, 양질의 성토재료 기준에 적합하지 않은 함수비가 높은 현장 발생토에 토목섬유를 보강하고 다짐을 실시하여 실내다짐시험 결과와 비교하고 건조밀도의 변화 및 다짐도의 변화에 대해서 비교·분석 하였다. 여기서, 지반 및 토목섬유는 실내다짐시험에 사용한 재료와 동일하다.

4.1 현장실험 조건

현장다짐실험은 토목섬유를 설치하지 않은 무보강 구역, 1열 보강, 2열 보강의 총 세 개의 구역에서 실시하였고, Fig. 7과 같이 각 구역의 폭은 약 4.0m, 길이는 약 10.0m이다.

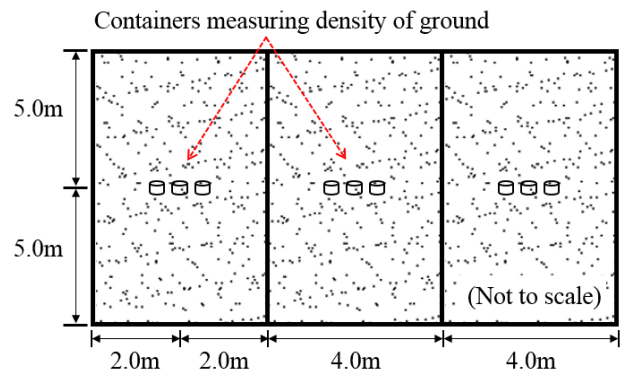


Fig. 7. Plan view showing field compaction tests

4.2 현장실험 방법

현장실험은 먼저, 함수비가 높은 현장 발생토를 일정량 포설 후 밀도 측정용 캔에 흙을 채워 넣고(Fig. 8(a)), 측정할 곳에 위치시킨 후, 현장 발생토를 더 포설하고 다짐롤러를 이용하여 다짐(Fig. 8(b))을 실시하였다. 첫 번째 층의 다짐 종료 후, PET매트가 2열로 설치되는 곳에는 하부의 PET매트 1열을 설치하고 앞서 실시한 실험과정을 반복하여 다짐을 실시하였다. 그리고 두 번째 층의 다짐이 끝나면 토목섬유를 보강하지 않는 구역을 제외하고, 나머지 구역에 PET매트를 설치하고 마찬가지로 앞서 실시한 실험과정을 반복하고, 세 번째와 네 번째 층에서도 실험과정을 반복하여 다짐을 실시하였다. 네 번째 층의 다짐작업이 종료되면 최상부 층의 지표면에서 들밀도시험(KS F 2311)을 실시하였다. 또한, 각 층의 다짐 작업이 종료되면 레벨측량을 통해 각 층의 높이를 측정(Fig. 8(c))하였다. Fig. 9에서는 세 가지 현장다짐실험의 레벨 측량 결과를 바탕으로 토목섬유와 밀도 측정용 캔의 위치를 나타내었다. 들밀도시험이 끝난 후, 각 층의 밀도 측정용 캔이 묻힌 곳의 토사를 백호를 이용하여 일부 걷어내고, 인력으로 밀



(a) Installation of containers measuring density of ground

(b) Passes of a vibratory single drum roller

(c) Survey of elevations of both PET mats and containers

Fig. 8. Field compaction testing procedure

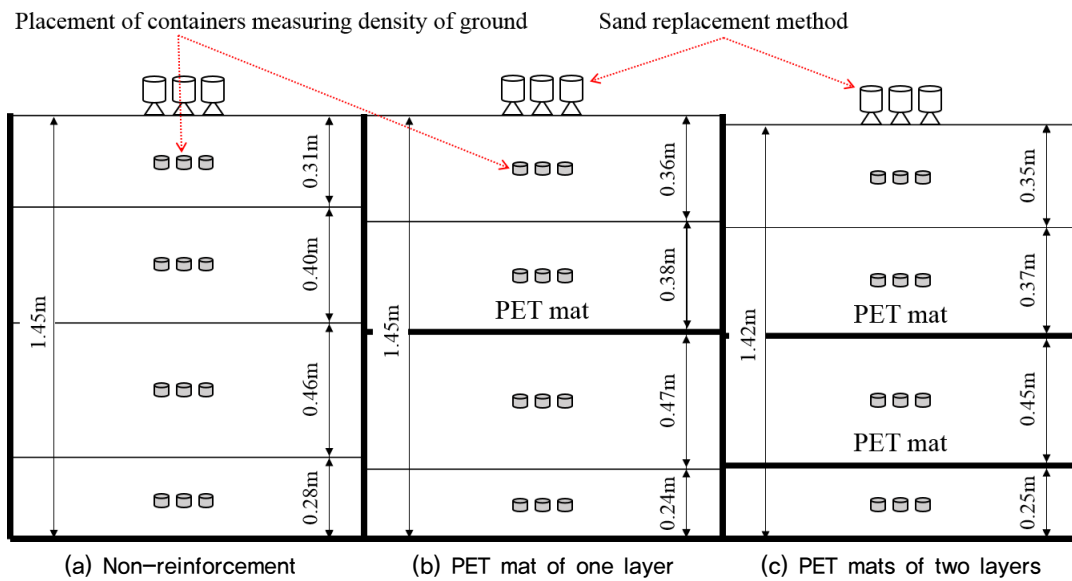


Fig. 9. Summary of field compaction test sections

도 측정용 캔이 묻힌 곳까지 삽을 이용하여 토사를 인력으로 걷어낸 후, 밀도 측정용 캔이 위치한 곳을 레벨측량을 통해 높이를 측정하였다. 회수된 밀도 측정용 캔은 무게를 측정하고, 온도 $110 \pm 5^\circ\text{C}$ 의 건조로에서 24시간 건조 후 무게를 측정하여 함수비와 건조밀도를 산정하였다.

4.3 현장시험 결과

현장다짐시험시 밀도 측정용 캔이 일부분 유실되어 100% 회수가 되지 않아서 회수된 캔으로만 다음 Fig. 10 과 같이 건조밀도 결과를 정리하였다. 결과를 보면, 토목 섬유를 보강한 구역에서 건조밀도가 증가하였고 토목섬유를 2열 보강하였을 때, 1열 보강하였을 때 보다 건조밀도

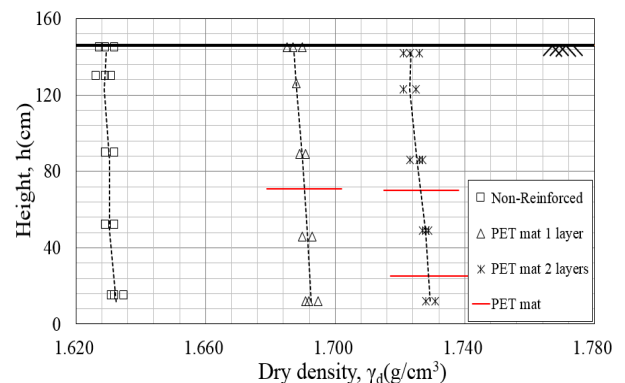


Fig. 10. Results of field compaction test showing density change in entire depth

는 더 증가하였다.

Table 8. Results of field compaction tests (Average dry density)

Non-reinforcement		PET mat one layer		PET mat two layers		The ratio of maximum dry density	
Height (cm)	Dry density, $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	Height (cm)	Dry density, $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	Height (cm)	Dry density, $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	(PET mat one layer / Non-reinforcement)	(PET mat two layers / Non-reinforcement)
145	1,629	145	1,687	142	1,723	1,036	1,058
130	1,629	126	1,688	123	1,723	1,036	1,058
90	1,630	89	1,690	86	1,725	1,037	1,058
52	1,630	46	1,691	49	1,728	1,037	1,060
15	1,632	12	1,692	12	1,729	1,037	1,059

5. 현장다짐시험의 결과 분석

실내다짐시험에서의 D다짐과 A다짐의 최적함수비는 각각 14.4%, 12.3%이지만, 현장다짐시험에 사용된 지반 재료의 함수비 범위는 약 20~24%로 실내다짐시험의 최적함수비 보다 함수비가 높은 조건에서의 현장다짐시험을 실시하였다. 그 결과는 Table 8과 같고, 여기서 건조밀도는 각 층에서의 평균값을 정리한 것이다. 결과를 보면, 무보강인 경우의 평균 건조밀도는 $1.630g/cm^3$ 이지만, 토목섬유를 1열 보강하였을 때의 평균 건조밀도는 $1.690g/cm^3$, 2열 보강하였을 때의 평균 건조밀도는 $1.726g/cm^3$ 으로 토목섬유를 1열, 2열로 보강개수가 증가함에 따라 평균 건조밀도는 각각 3.7%, 5.9%로 증가하는 것으로 분석되었다. 이 결과로부터, 실내다짐시험의 결과와 마찬가지로 현장 시험에서도 토목섬유의 보강에 의한 건조밀도가 증가하는 것을 확인하였고, 함수비가 높은 지반재료에서도 토목섬유의 보강효과로 인한 효율적인 다짐이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

본 연구에서는 다짐시 토목섬유의 보강효과를 확인하기 위해서 실내다짐시험과 현장다짐시험이 실시되었다. 결론은 다음과 같다.

- (1) 실내다짐시험에서 토목섬유를 보강하여 다짐을 실시한 결과, 최적함수비는 감소하고 최대건조밀도는 증가하여 다짐에너지를 증가시켜 다짐을 실시한 다짐곡선과 같은 형태로 거동하는 것으로 분석되어 토목섬유의 보강으로 인해 다짐에너지 효율이 증가하는 것으로 판단된다.
- (2) 건조밀도와 다짐에너지의 관계로부터 토목섬유의 보

강으로 인한 다짐에너지 효과를 분석한 결과, 토목섬유를 1열 보강하였을 때의 다짐에너지는 평균 2.10배, 2열을 보강하였을 때의 다짐에너지는 평균 2.71배 증가하는 것으로 분석되어 토목섬유를 보강하여 다짐을 하게 되면 더 큰 에너지로 다짐을 하는 효과가 발생하기 때문에 더 효율적인 다짐이 가능하고, 무보강인 경우와 비교하여 토목섬유를 보강함으로써 인해 현장 기준다짐도에 도달하기 위한 다짐에너지는 더 적기 때문에 경제적인 다짐이 가능할 것으로 판단된다.

- (3) 현장다짐시험 결과, 토목섬유로 보강하였을 때 건조밀도는 증가하여 실내다짐시험에서 토목섬유를 보강하였을 대와 거동이 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다. 성토재료로 부적합한 현장 발생토를 사용하여 다짐을 실시하여도 건조밀도는 증가하여 효율적인 다짐이 가능할 것으로 판단된다.

상기의 결론을 바탕으로 성토재료로 부적합한 현장 발생토를 사용함으로써 인해 양호한 성토재료의 확보를 위한 시간적, 경제적 비용을 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 실제 현장에서는 다짐구간에 인접한 구조물이 있을 경우 큰 다짐에너지로 인한 구조물에 손상을 초래할 수 있을 경우나, 공간이 협소하여 크기가 큰 다짐장비를 사용하여 다짐을 할 수 없어 작은 크기의 다짐장비를 사용하여 다짐을 해야만 하는 경우 등에 토목섬유를 사용하여 다짐을 할 경우에 효과적일 것으로 기대된다. 하지만 실제 현장의 설계시 적용 또는 기준을 제안하기 위해서는 향후 다양한 다짐에너지의 실내다짐시험과 다양한 토질의 현장다짐시험을 통하여 토목섬유 보강으로 인해 건조밀도, 다짐에너지 그리고 지지력 증가 등이 발생하는 지반과 토목섬유 간의 매커니즘을 규명할 수 있는 연구가 더 진행되어야 할 것으로 판단된다.

Acknowledgement

This work was supported by a 2-Year Research Grant of Pusan National University.

References

1. AASHTO T99 (2015). *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 2.5-kg (5.5-lb) Rammer and a 305-mm (12-in.) Drop*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC.
2. AASHTO T180 (2015). *Standard Method of Test for Moisture-Density Relations of Soils Using a 4.54-kg (10-lb) Rammer and a 457-mm (18-in.) Drop*, American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), Washington, DC.
3. ASTM D698-07 (2007). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Standard Effort (12 400 ft-lbf/ft³ (600 kN-m/m³))*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
4. ASTM D1557-09 (2009). *Standard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft³ (2,700 kN-m/m³))*, ASTM International, West Conshohocken, PA.
5. Hwang, S. C. and Oh, B. H. (2005), "The Compaction Characteristics Analysis of Domestic River Sands", *Journal of the Korean Society of Road Engineers*, Vol.7, No.4, pp.31-39. (in Korean)
6. Im, J. C. (2016). *A guide for soil engineering*, 4th Edition, POD of CIR, Seoul, South Korea, pp.286-287. (in Korean)
7. KS F 2311 (2001). *Test method for soil density by the sand replacement method*, Korean Standards Association, Seoul, South Korea. (in Korean)
8. KS F 2312 (2001). *Test method for soil compaction using a rammer*, Korean Standards Association, Seoul, South Korea. (in Korean)
9. Lee, J. Y., Jeoung, J. H., Choi, C. H., Kim, J. Y. and Jin, H. W. (2015), "Analysis of Correlation among Various Compaction Evaluation Methods for Estimating of the Bearing Capacity on Subgrades", *J. Korean Geosynthetics Society*, Vol. 14, No. 4, pp.45-58. (in Korean)
10. Ministry of Construction and Transportation (1996), *Road Design Standard*, Ministry of Construction and Transportation, Seoul, South Korea, p.80. (in Korean)
11. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), *Road construction Design Standard*, Korean Road Traffic Association, Seoul, South Korea, pp.4-22. (in Korean)
12. Park, Y. T. (2014). *An experimental study on the changes of compaction curve by reinforcement of geotextiles*, M.Sc.Thesis, Pusan National University, Busan, South Korea. (in Korean)