

나노 코팅된 PDB를 이용한 동전기 지반개량 공법의 현장 적용성에 관한 연구

A Study on Field Application of Electro-Osmosis Soil Improvement Method with Nano-Coated Plastic Drain Board

안 상 로¹⁾ · 안 광 국[†]

Sangro Ahn · Kwangkuk Ahn

Received: July 24th, 2018; Revised: August 6th, 2018; Accepted: September 22nd, 2018

ABSTRACT : The PBD (Plastic Board Drain) method is one of effective ground improvement methods on the soft dredging reclamation ground. This method has outstanding economic efficiency and constructability, and it is widely used for the soft ground improvement. However, the PBD method reduces permeability and drainage capacity of the ground due to the long construction period. Therefore, the nano coated Plastic drain board (PDB) was developed to solve problems. It is the non-metallic electrode and improves the weakness of the PBD method by using electric force of the electro-osmosis method. Various researches have been conducted to apply the nano coated PDB, but these researches were limited to model tests in laboratory. In this study, model and field tests were conducted to assess field applicability of the nano coated PDB. The result showed that the nano coated PDB had the better effect on the ground improvement compared to the normal PDB.

Keywords : Nano, PDB, Electro-osmosis, Voltage gradient, Ground improvement

요 지 : PBD(Plastic Board Drain) 공법은 준설 매립에 효과적인 지반개량을 위한 다양한 공법 중 하나이며, 시공성 및 경제성이 우수해 연약지반개량에 많이 사용되고 있다. 그러나 PBD 공법은 장시간 소요에 의한 지반 투수성 감소 및 배수능 저하를 야기시키는 문제점을 지니고 있다. 이를 개선하기 위해 개발된 나노 코팅된 Plastic Drain Board(PDB)는 비금속성 전극재로 전기삼투공법의 전기력을 이용해 PDB 공법의 단점을 개선하기 위해 개발한 재료이다. 나노 코팅된 PDB를 적용하기 위한 다양한 연구가 수행되었으나 실내실험으로 제한되었을 뿐 현장실험은 수행되지 않았다. 이에 본 연구에서는 나노 코팅된 PDB의 현장 활용성을 확인하기 위해 실내모형실험과 현장실험을 수행하였다. 그 결과 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과가 크게 나타났다.

주요어 : 나노, PDB, 전기삼투, 전압경사, 지반개량

1. 서 론

산업의 발달로 효율적인 국토 활용을 위해 하안 및 해안을 준설·매립해 조성된 연약지반이 사용되고 있다. 이러한 연약지반에 기반시설을 효율적으로 건설하기 위해서는 지반개량 시공이 필수적이며, 효과적인 지반개량을 위하여 다양한 공법들이 개발되어 사용하고 있다. 연약지반개량공법 중 PBD(Plastic Board Drain)공법은 상대적으로 저렴한 재료로 개발이 가능하여 경제적이고 시공속도가 빨라 연약지반개량공법으로 많이 사용되고 있다. 그러나 PBD 공법 시공 시 주변 지반의 교란으로 지반 투수성이 감소되어 지반개량에 소요되는 시간을 증가시키는 단점이 있다. 그리고 압밀 시간 단축을 위한 상재하중의 적용과 큰 압밀침하로 인하여

발생되는 Plastic Drain Board(PDB)의 꺾임 현상은 PBD 공법의 배수능을 저하시켜 지반개량에 소요되는 시간을 증가시키는 단점이 있다(You et al., 2003). 이에 PBD 공법의 효율을 저감시키는 지반 투수성 감소와 배수능 저하를 개선할 수 있는 새로운 재료가 필요하다. 전기삼투공법은 지반에 매립된 전극재에 발생하는 전위차를 이용해 지반 내 간극수를 양극에서 음극으로 흐르게 하여 추출정을 통해 배수시키는 공법으로 별도의 재하중 없이 신속하게 지반 내 간극수를 배수시킬 수 있다. 그러나 전극재로 금속성 전극재가 보편적으로 사용됨에 따라 경제성 및 시공성이 낮은 문제점을 내포하고 있다. 그러므로 지반개량에 효율적으로 전기삼투공법을 활용하기 위해서는 금속성 전극재를 대체할 수 있는 새로운 전극재가 필요하다. 이에 비금속 전극재로 사용할

1) Director Road Facility Bureau, Road Facility Bureau, Daejeon Regional Construction and Management Administration

† Professor, School of Civil Engineering, Chungbuk National University (Corresponding Author : akk@cbnu.ac.kr)

수 있는 나노 코팅된 PDB가 개발되었다(Ahn et al., 2009). 나노 코팅된 Plastic drain board는 전기삼투공법의 전기력을 이용해 PDB 공법의 단점인 지반 투수성 감소와 배수능 저하를 저감시킬 수 있는 재료로 일반 PDB에 나노 코팅된 기술을 이용해 전극재로 활용할 수 있도록 개선한 재료이다. 나노 코팅된 PDB의 활용성을 확인하기 위하여 다양한 연구가 실내 축소모형실험을 통해 수행되었을 뿐 현장에서의 활용성을 확인하기 위한 현장실험에 관한 연구는 수행되지 않았다(Ahn et al., 2012; Sin, 2010; Sin, 2011). 이에 본 연구에서는 나노 코팅된 PDB의 현장 활용성을 확인하기 위하여 현장실험을 수행하였다. 현장실험에 앞서 효과적으로 나노 코팅된 PDB를 활용하기 위하여 나노 코팅된 PDB에 영향을 미칠 수 있는 다양한 영향인자 중 전압과 전극간 거리를 주요 영향인자로 실내모형실험을 수행하였으며, 이를 기반으로 적절한 전압경사를 현장실험에 적용하여 나노 코팅된 PDB의 현장 활용성을 확인하였다. 실제 현장에서 나노 코팅된 PDB의 활용성을 분석하기 위하여 연약지반의 침하 및 지반 함수비, 비배수 전단강도를 측정하여 비교·분석하였다.

Table 1. Parameter of clay

Physical properties	Quantity
Specific gravity	2.7
Liquid limit (%)	40.1
Plasticity index (%)	23.1
Initial water content (%)	47.2
USCS (Unified Soil Classification System)	CL

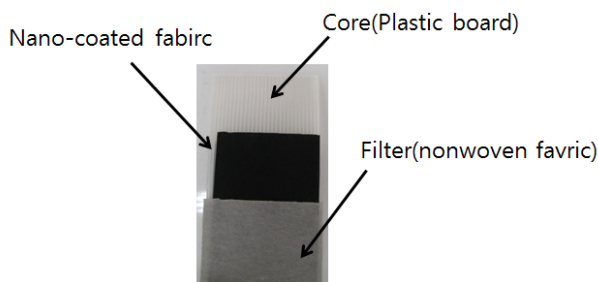


Fig. 1. Nano-coated plastic drain board



(a) Front view



(b) Top view

Fig. 2. Photo of model box

2. 실내모형실험

2.1 실내모형실험의 개요 및 방법

Table 1과 같은 물리적 특성을 가지며, Fig. 1과 같은 나노 코팅된 PDB의 현장 활용성을 확인하기 위해 현장실험에 앞서 최적의 전압 및 전극거리를 확인하기 위한 실내모형실험을 수행하였다. 실내모형실험을 위한 연약지반은 현장점토와 물리적 특성이 유사한 Table 2와 같은 내륙 점토를 인근 지역에서 채취하여 사용하였으며, 초기함수비는 현장조건의 평균 함수비인 47.2%로 조정하여 모형실험에 적용하였다.

모형실험에 이용한 모형토조는 Fig. 2와 같이 모형지반 조성 시 수평으로 작용하는 토압에 저항하기 위해 강성이 높은 금속성 재료를 이용하였으며 120cm(가로)×120cm(세로)×100cm(높이)의 크기로 제작하였으며, 나노 코팅된 PDB의 동전기 현상에 금속성 재료의 영향을 방지하기 위해 액상 실리콘을 이용해 표면을 코팅하여 절연시켜 모형실험에 사용하였다. 나노 코팅된 PDB의 설치는 Fig. 3과 같이 모형토조 양측 4지점에 전극거리에 따라 설치하였으며, 전압공급 시 전극에 의한 영향을 증가시키기 위해 전극은 지그재그 형태로 배치하였다. 연약지반 조성 후 지반 상부에 스폰지를 이용해 배수층을 묘사하고, 0.1kg/cm²의 상재하중을 적용하였으며, 모형실험 동안 간극수를 상부로 배출시키는 단면배수조건으로 모형실험을 수행하였다. 연약지반 조성은 50%의 초기함수비 조건으로 교반한 점토시료를 모형토조에 투입한 후 0.03kg/cm²의 상재하중을 제하한 후 배출되는 배수량을 측정해 연약지반의 함수비가 47.2%로 조성된

Table 2. Properties of nano coated PDB

Total transmittance (%)	≥ 75
Sheet resistance (/sq)	80 ~ 120
Uniformity (%)	≤ 10
Hardness (H)	≥ 3
ITO Adhesion	100/100

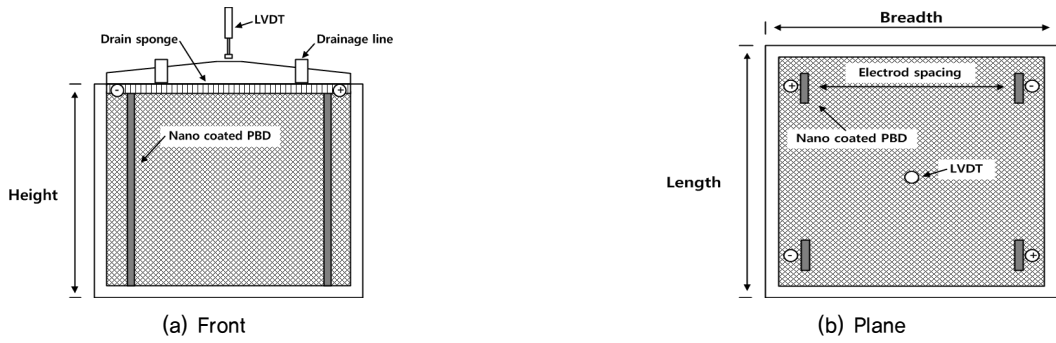


Fig. 3. Schematic diagram of model box

Table 3. Experimental condition

Experimental time (day)	Electrode spacing (m)	Applied voltage (V)	Voltage gradient (V/m)	Test No.
30	1.00	0	-	D100-V0
		10	10	D100-V10
		30	30	D100-V30
		50	50	D100-V50
	0.75	0	70	D100-V70
		10	-	D75-V0
		30	13	D75-V10
		50	40	D75-V30
	0.50	0	67	D75-V50
		10	93	D75-V70
		30	-	D50-V0
		50	20	D50-V10

후 모형실험을 수행하였다. 그리고 연약지반 개량효과를 분석하기 위해 모형지반 상부 중앙에 LVDT를 설치하여 시간에 따른 침하량을 측정하였다. 실험시간은 전압 및 전극거리에 따른 압밀침하의 수렴성을 확인해 총 30일 동안 모형실험을 수행하였다.

모형실험 중 나노 코팅된 PDB에 작용하는 전압 및 전극거리에 따른 지반개량 효과를 확인하기 위하여 전압은 0V, 10V, 30V, 50V로 변화시켜 모형실험을 수행하였으며, 전극거리는 100cm, 75cm, 50cm로 변화시켜 모형실험을 수행하였다. 나노 코팅된 PDB의 현장 적용을 위한 실내 대형모형

실험에서 전압 및 전극거리에 따른 실험조건과 전압경사는 Table 3과 같다.

2.2 실내모형실험 결과 및 분석

2.2.1 압밀침하

나노 코팅된 PDB에 적용한 전압 및 전극거리 변화에 따른 압밀침하거동은 Fig. 4와 같이 전극거리 별로 전압이 증가됨에 따라 압밀침하는 급격히 유도되고 동일한 압밀시간에 대하여 압밀침하가 증가하는 것으로 나타났다.

전극거리에 관계없이 압밀시간 25일 기준으로 압밀침하

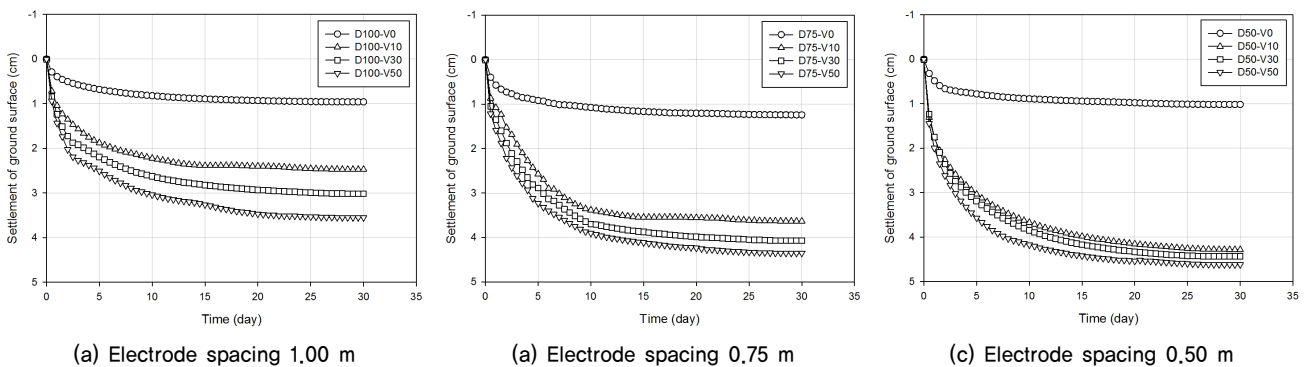


Fig. 4. Settlement of ground surface by time

는 미소하게 나타났으며, 동일한 압밀시간에 대하여 전극거리가 1.00m인 경우 전압이 증가함에 따라 압밀침하는 전압을 공급하지 않은 경우에 비해 2.0~2.9배 크게 나타났으며, 전극거리가 0.75m인 경우는 3.0~3.6배 크게 나타났다. 그리고 전극거리가 0.50m인 경우는 3.5~3.8% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전압이 증가함에 따라 이온을 증가시켜 간극수를 빠르게 배수시켰기 때문인 것으로 보인다. 그리고 전극거리가 감소함에 따라 최종압밀침하는 3~73% 증가하는 것으로 나타났으나 압밀침하의 차이는 전극거리가 감소할수록 45~84% 감소하는 것으로 나타났다. 이는 전극거리가 짧아짐에 따라 배수거리가 짧아지고 동시에 지반저항이 감소되어 지반 내 이온의 이동을 원활하게 하였기 때문인 것으로 보인다.

2.2.2 전압경사

나노 코팅된 PBD를 실제 현장에 적용하기 위한 최적의 전압 및 전극거리를 분석하기 위하여 전압에 대한 전극거리의 비인 전압경사와 최종침하를 Fig. 5와 같이 비교하였다. 전압경사가 증가함에 따라 전압별로 최종침하량은 약 4.28~4.62cm로 유사하게 나타났으며, 전압별로 전압경사가 증가함에 따라 최종침하는 약 4.62cm로 수렴하는 것으로 나타났다. 그리고 전압경사 증가에 따른 최종침하거동의 기울기는 전압이 증가함에 따라 11~25% 감소하는 것으로 나타났다.

전압경사가 증가함에 따라 최종침하는 수렴하고 최종침하거동의 기울기는 감소하는 것으로 나타남에 따라 높은 전압경사의 선택은 현장에 적용하기에 비효율적인 것으로 판단된다. 또한, 전압경사가 클수록 대상지반의 특성을 변화시킬 수 있으며, 높은 전압으로 인한 높은 전류는 지반 내 이온을 증가시켜 전기삼투 흐름을 감소시킬 수 있고 에너지

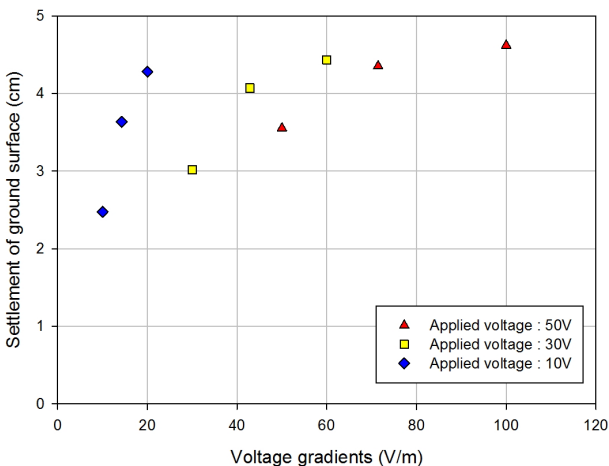


Fig. 5. Settlement of ground surface with voltage gradients

소비량을 증가시켜 지반개량 비용을 증가시킬 수 있는 기존 연구 결과와 부합된다(Lee et al., 2007; Han et al., 2007). 따라서 나노 코팅된 PBD의 효율적인 현장 적용을 위한 전압경사는 현장에서 시공되는 일반 PBD의 시공 간격인 1.8m를 고려해 50V/m 이내의 전압경사를 고려하였으며 최종침하의 크기를 고려해 20V/m의 전압경사를 현장실험에 적용하기 위해 선정하였다.

3. 현장실험

3.1 현장실험 개요 및 방법

실제 현장에서 나노 코팅된 PBD의 현장 활용성을 확인하기 위하여 대상지반은 Fig. 6과 같이 충남 ○○도로건설 현장의 연약지반 구간을 대상지반으로 선정하였으며, 대상지반에 대한 지반개량효과를 통해 나노 코팅된 PBD의 활용성을 확인하기 위해 일반 PBD를 비교 대상으로 고려하였다. 일반 및 나노 코팅된 PBD를 대상지반에 설치하기에 앞서 대상지반의 연약층 분포 및 지층현황을 확인하기 위해 시추조사와 불교란 시료에 대한 실내토질정수시험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 7과 같이 점토지반은 6.1~8.1m 두께로 존재하며 점토층 상하부에 자갈 및 모래층이 위치하고 있는 것으로 조사되었다. 그리고 Table 4와 같이 점토지반은 CL에 해당하는 점토지반으로 구성되어 있으며, 초기함수비는 26.8~54.8%의 범위로 분포되고 있고 삼축압축실험

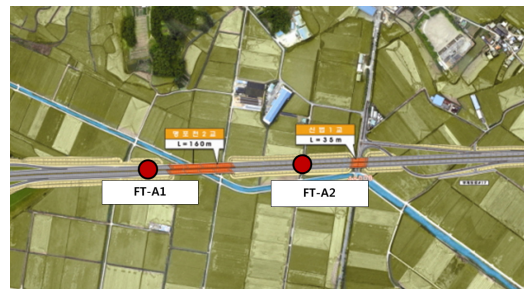


Fig. 6 Field test area

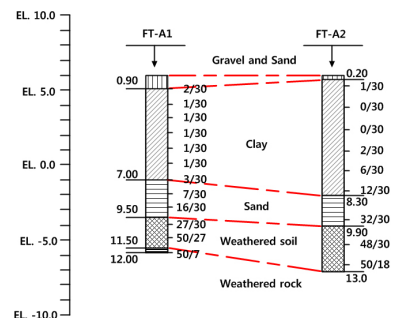


Fig. 7. Stratum condition

Table 4. Clay property for field test

Location	Depth (m)	Water content (%)	Cu (kPa)	USGS
FT-A1	4.4	54.8	21.83	CL
	5.4	54.6	9.81	
	6.4	59.4	80.41	
FT-A2	4.4	33.2	34.32	
	5.4	54.1	16.86	
	6.4	26.8	77.47	

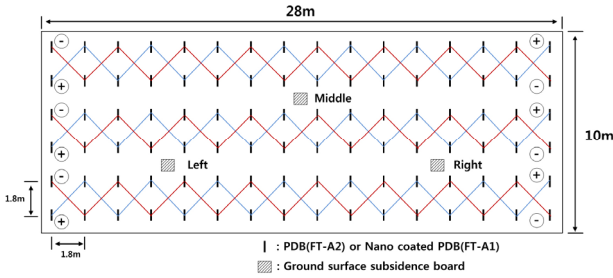


Fig. 8. Installing array of PDB and nano coated PDB for field test

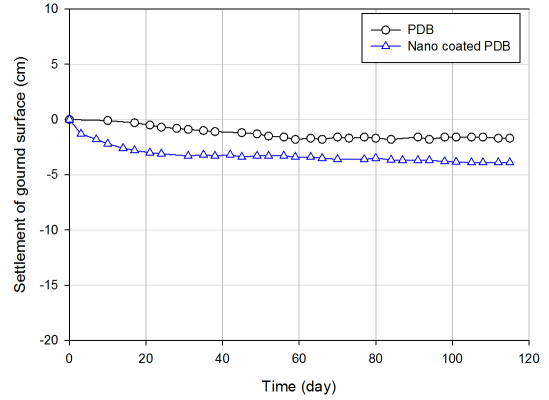
에 의한 비배수전단강도는 9.81~80.41kPa의 범위로 분포되어 있는 것으로 조사되었다.

현장실험을 위한 일반 및 나노 코팅된 PDB의 설치는 Fig. 7의 FT-A1 지점에 일반 PDB를 FT-A2 지점에 나노 코팅된 PDB를 Fig. 8과 같이 면적 280m²에 설치하였다. 설치조건은 ○○ 도로건설공사계획에 수립된 일반 PDB의 설계조건에 따라 설치간격을 1.8m로 정방형으로 설치하였으며, 1m 높이의 성토하중을 현장실험에 동일하게 적용하였다. 그리고 전압공급 시 전극에 의한 영향을 높이기 위해 전극은 실내모형실험과 동일하게 지그재그 형태로 배치하였다. 일반 및 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과를 확인하기 위해 지표침하판 3개를 대상지반의 좌·중·우에 각각 1개씩 설치하였으며, 실험기간 동안 시간에 따른 지표침하를 측정하였다. 실험기간은 압밀침하의 수렴성을 고려하여 총 115일 동안 현장실험을 수행하였다. 현장실험 중 나노 코팅된 PDB에 적용되는 전압은 실내모형실험 결과를 기반으로 전압경사 20V/m가 되도록 36V의 전압을 현장실험에 적용하였다.

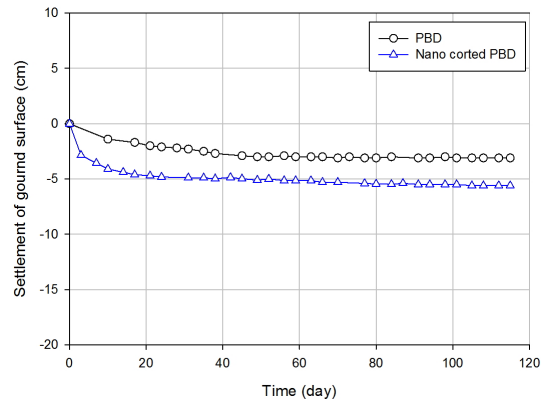
3.2 현장실험 결과 및 분석

3.2.1 압밀침하

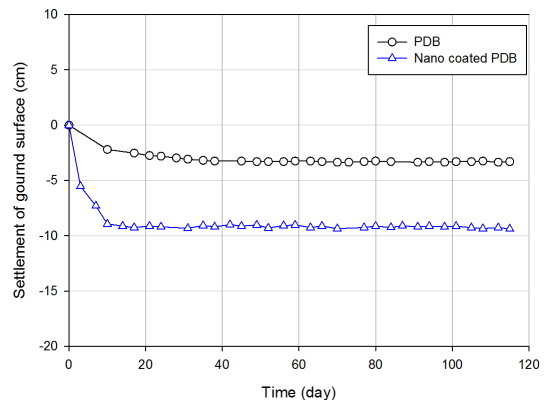
연약지반에 설치된 일반 및 나노 코팅된 PDB에 의한 압밀침하거동은 계측 위치별로 Fig. 9와 같이 나타났다. 압밀침하거동은 계측 위치별로 동일한 실험조건에서 전체적으로 유사하게 나타났으며, 전압이 공급되는 나노 코팅된 PDB가 일반 PDB에 비해 압밀침하가 급격하게 유도되고 동일한 압밀침하에 대하여 소요시간이 단축되는 것으로 나타났



(a) Left



(a) Center



(c) Right

Fig. 9. Settlement of ground surface by time

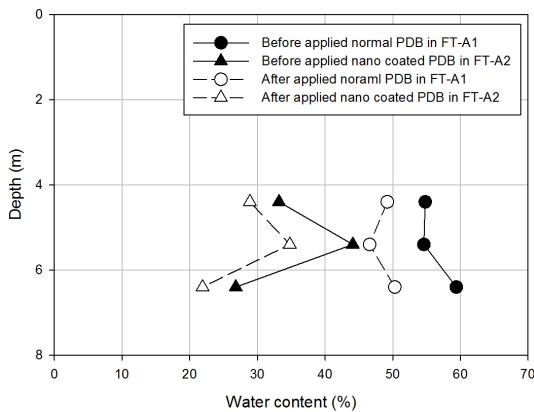
다. 나노 코팅된 PDB의 경우 압밀시간은 계측 위치에 관계 없이 20일을 기준으로 압밀침하가 미소하게 증가되는 것으로 나타났으나 일반 PDB의 경우는 계측 위치에 따라 압밀시간에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 이는 대상지반의 계측 위치에 따라 지층현황이 다르기 때문인 것으로 보이며, 나노 코팅된 PDB의 경우는 전기력에 의한 전기삼투현상이 지반 내 균등하게 적용되었기 때문에 압밀침하의 차이는 발생하였으나 압밀시간은 유사하게 나타난 것으로 보인다. 압밀시간 20일을 기준으로 압밀침하는 나노 코팅된 PDB의 경우가 일반 PDB인 경우에 비해 1.6~2.8배 크게 나타

나 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과가 우수함을 확인하였다.

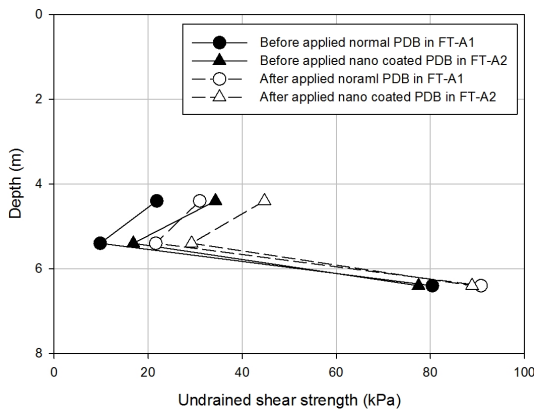
그리고 압밀침하는 계측 위치에 따라 일반 PDB의 경우 유사하게 나타났으나 나노 PDB의 경우는 계측 위치가 중앙인 경우에 비해 좌측의 경우 0.6배 작게, 우측의 경우 1.9배 크게 나타났다. 이는 나노 코팅된 PDB가 설치된 지반에서 계측 위치에 따라 지층조건이 계측 위치 중앙에 비해 좌측의 점토지반두께가 작고 우측의 점토지반두께는 크기 때문인 것으로 보인다.

3.2.2 함수비와 비배수전단강도 비교

지반개량효과를 확인하기 위한 방안으로 일반 및 나노 코팅된 PDB가 설치된 지반에 대한 토질 정수의 변화를 분석하기 위해 지반조사 위치와 유사한 위치에서 불교란 시료를 채취하여 함수비 및 삼축압축실험을 수행하였다. 그 결과 Fig. 10과 같이 일반 및 나노 코팅된 PDB가 적용된 연약 지반의 전·후의 결과를 얻었다. 함수비의 경우 초기 지반에 비해 나노 코팅된 PDB가 설치된 경우 13~21% 감소하는 것으로 나타났으며, 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB를 적용한 경우가 19~44% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고



(a) Water content



(b) Undrained shear strength

Fig. 10. Comparison of clay properties after test

비배수전단강도의 경우 초기 지반에 비해 나노 코팅된 PDB가 설치된 경우 15~127% 증가하는 것으로 나타났으며, 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB를 적용한 경우가 5~14% 증가하는 것으로 나타났다. 이는 지반 내 간극수가 배수됨에 따라 점토 입자 간 점착력을 증가시켰기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

나노 코팅된 PDB를 실제 현장의 연약지반에 적용시킴으로써 나노 코팅된 PDB의 적용성을 확인하기 위해 전압경사에 따른 실내모형실험을 수행하였으며 이를 기반으로 현장실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실내모형실험을 통해 전압 및 전극거리에 따른 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과는 전압이 증가함에 따라 일반 PDB에 비해 압밀침하의 경우 2.0~3.6배 크게 나타났으며, 동시에 전극거리가 감소할수록 압밀침하는 3~73% 증가하는 것으로 나타나 지반개량효과가 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB의 활용이 우수함을 확인하였다.
- (2) 현장에 설치되는 나노 코팅된 PDB에 효율적인 전압공급을 위해 20V/m의 전압경사가 유지되도록 36V의 낮은 전압을 공급하였으며, 이에 따른 지반개량효과는 계측위치에 따른 지층현황의 차이에 관계없이 유사한 압밀시간이 소요되며 일반 PDB에 비해 압밀침하는 1.6~2.8배 크게 나타나 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과가 우수함을 확인하였다.
- (3) 그러나 실내실험에 비해 현장실험에서 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과는 다소 작게 나타났다. 이는 실내실험 조건과 현장실험조건에 따른 차이 때문인 것으로 보이나 낮은 전압에서 일반 PDB에 비해 나노 코팅된 PDB의 지반개량효과가 크게 나타남에 따라 나노 코팅된 PDB의 현장 활용성은 우수할 것으로 보인다.

References

1. Ahn, K. K., Jeong, K. S. and Lee, J. D. (2009), Characteristics on electroosmosis ground improvement using nano-geosynthetics, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, Vol. 10, No. 4, pp. 59-63 (In Korean).
2. Ahn, K. K., Ahn, S. R., Lee, J. D. and Kang, H. S. (2012), Effect of electrode for electroosmosis ground improvement with pH change, Proceeding of Korean Geo-Environmental Society, Korean Geo-Environmental, Vol. 2012, No. 9, pp. 198-201 (In

- Korean).
3. Byeon, I. S., Kang, H. S., Sun, S. Y., Han, J. H. and Ahn, K. K. (2016), Improvement effect and electrical characteristics of soft ground with plastic electrode spacing, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 17, No. 1, pp. 13~19 (In Korean).
 4. Han, S. J., Kim, S. S., Kim, J. Y. and Kang, B. Y. (2007), Application of electrokinetic soil improvement method to field test construction site, *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 5C, pp. 331~341 (In Korean).
 5. Kang, H. S. and Ahn, K. K. (2015), Effect of electro-osmosis method on marine clay with preloading, *Journal of the Korea Geo-Environmental Society*, Vol. 16, No. 2, pp. 53~58 (In Korean).
 6. Lee, M. H., Han, J. G. and Lee, J. Y. (2007), Soft ground improvement using electrokinetic geosynthetics, *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 6, No. 3, pp. 25~30 (In Korean).
 7. Sin, D. C. (2010), Characteristics on electrokinetic ground improvement according to electrode types, Master's thesis, Graduate School of Chungbuk National University, pp. 1~47 (In Korean).
 8. Sin, T. J. (2011), Characteristics on electroosmosis ground improvement of marine clay, Master's thesis, Graduate School of Chungbuk National University, pp. 1~53 (In Korean).
 9. You, S. K., Hong, W. P. and Yoon, G. L. (2003), Study on consolidation behaviors of soft ground by plastic board drain using model tests, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 4, No. 4, pp. 17~23 (In Korean).