

선행하중이 작용하는 해성점토지반에 전기삼투공법의 효과

Effect of Electro-Osmosis Method on Marine Clay with Preloading

강 흥 식¹⁾ · 안 광 국[†]
Hongsig Kang · Kwangkuk Ahn

Received: November 19th, 2014; Revised: November 26th, 2014; Accepted: January 23rd, 2015

ABSTRACT : The Pre-loading method has been widely used for the soft ground stabilization but long construction times and the transport of large quantities of fill material are required. To shorten the construction periods, the vertical drain method is generally applied simultaneously. But the high costs of the fill materials along with environmental damages remain as the main difficulties to apply this method. Therefore, a complimentary way to reduce both the height of the embankment and the consolidation time is needed. In this study, the electro-osmosis method, which is able to shorten the consolidation time and minimize the damage of the environment, was performed with a model test. The results show that as the voltage increases the consolidation settlements, consolidation drainage and shear strength also increase while the water content decreases.

Keywords : Pre-loading method, Electro-osmosis method, Marine clay, Consolidation

요 지 : 우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸인 지리적 특성에 의해 연안 하부에 점토로 구성된 연약지반이 두껍게 형성되어 있다. 이러한 연약지반에 대규모 토목공사를 수행하기 위해선 연약지반 안정화 처리가 불가피하다. 연약지반 안정화 처리를 위해 일반적으로 선행하중공법이 널리 사용되고 있다. 선행하중공법은 공사기간이 길고 재하용 성토재료를 확보해야 한다는 단점을 가지고 있다. 공사기간을 단축시키기 위해 연직배수공법을 병용하여 사용하고 있다. 하지만 성토재료는 고비용 및 환경파괴를 발생시키기 때문에 성토체의 높이를 줄이면서 압밀시간을 단축시킬 수 있는 보완적인 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 보완하기 위해 압밀시간을 단축시키고 환경파괴를 최소화할 수 있는 전기삼투공법을 적용시킨 모형실험을 수행하였다. 그 결과 전압이 증가함에 따라 압밀침하량 및 압밀배수량, 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 함수비는 감소하는 것으로 나타났다.

주요어 : 프리로딩공법, 전기삼투공법, 해성점토, 압밀

1. 서 론

해성점토로 이루어진 연약지반에 대규모 토목공사를 수행하기 위해서는 연약지반의 안정성을 높이기 위한 연약지반 안정화 처리가 불가피하다. 해성점토지반과 같은 연약지반은 전단강도 및 지지력이 작고, 압축성이 크기 때문에 장기간 압밀로 인한 침하와 지반활동으로 인한 파괴가 발생할 수 있으며 이를 방지하기 위해 압밀공법을 이용하여 연약지반의 안정처리를 수행하여야 한다. 이러한 압밀공법 중 선행하중압밀공법을 널리 사용하고 있으며 연약지반의 점토층이 두꺼운 경우 연직배수공법과 병용하여 사용하고 있다. 선행하중공법은 지표면에 과재하중을 등분포 형태로 재하하여 압밀을 촉진시키는 공법으로 성토하중의 재하 및 제하와 성토속도에 따른 연약지반의 압밀거동특성과 최종침하량 및 강도증가에 관한 연구가 진행되고 있다(Aldrich, 1965;

Johnson, 1970; Asaoka, 1978; Choi, 2008; Kim, 2012). 이러한 선행재하공법은 공사비가 저렴하고 압밀효과가 균등하다는 점을 가지고 있으나 공사기간이 매우 길고, 재하용 성토재료를 확보해야 한다는 단점을 보유하고 있어 압밀시간을 단축시키기 위한 방법으로 연직배수공법을 병용하여 사용되어 왔다. 하지만 재하용 성토재료를 구하기 위해서는 산악지역의 산림을 훼손시키고 운반거리에 따른 공사비용을 발생시키기 때문에 성토체의 높이를 줄이면서 압밀시간을 단축시킬 수 있는 보완적인 방법이 필요하다. 이러한 단점을 보완하기 위한 방법으로 본 연구에서는 보조공법으로 사용되는 연직배수재에 전기삼투공법을 적용시켜 지반개량 효과를 확인하기 위한 모형실험을 수행하였다. 전기삼투공법은 전기삼투현상을 이용하여 간극수를 배수시켜 압밀을 촉진시키고 지반의 흠 입자 배열을 면모구조에서 이산구조로 변화시켜 전단저항을 증가시키는 공법(Helmholtz, 1879)

1) School of Civil Engineering, Chungbuk National University

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

으로 안정된 지반을 신속하게 얻어 낼 수 있으며, 점토지반의 공학적 성질을 크게 개선시킬 수 있고, 환경파괴를 최소화할 수 있다. 전기삼투공법을 적용하기 위한 연구는 다양한 전극재를 이용하여 압밀특성을 확인하기 위한 연구가 수행되었으며(Bang et al., 1996; Lee & Lee, 1998; Kim et al., 2007), 최근 일반 PBD에 전기적 특성을 부여한 나노 코팅 PBD 섬유에 대한 연구가 이루어지고 있다(Jeong, 2009; Shin, 2010; Ahn, 2011). 이에 본 연구에서는 단계하중이 작용하는 해성점토지반에 전기삼투공법이 적용됨에 따른 지반개량효과를 확인하기 위해 연직배수재를 나노 코팅 PBD 섬유로 교체하여 전기삼투모형실험을 수행하고 점토지반의 압밀침하, 압밀배수, 함수비, 전단강도를 측정 후 비교·분석하였다.

2. 선행재하공법 및 전기삼투공법

2.1 선행재하공법과 연직배수공법

선행하중공법은 지표면에 과재하중을 등분포 형태로 재하하여 압밀을 촉진시키는 공법이다. 선행하중공법은 Fig. 1과 같이 지반에 처음부터 설계하중만(P_s)을 재하하는 경우 점선으로 표시된 곡선과 같이 1차 압밀침하량과 시간과의 관계가 나타나며, 이때의 S_t 는 최종 1차 압밀침하량을 의미

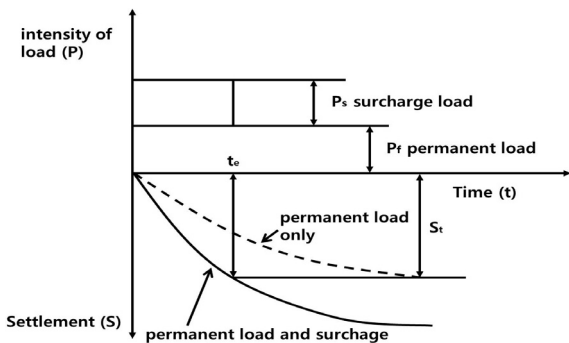


Fig. 1. Consolidation by preloading

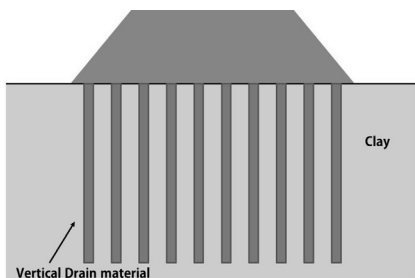


Fig. 2. Applied vertical drain method & effect of consolidation

한다. 동일한 지반에 설계하중보다 큰 초과하중(P_s)을 재하한다면 1차 압밀침하량과 시간의 관계는 실선과 같이 되며, 침하량의 크기가 설계하중 하에서의 최종 1차 압밀침하량과 같아지는 시간 이후에 초과하중을 제거하여도 더 이상의 1차 압밀침하가 일어나지 않는다.

선행재하공법에 의한 지반 개량 시 투수성이 나쁜 연약 점토층의 두께가 크면 지반 개량에 소요되는 기간이 1년 이상이 소요되며, 이 기간을 단축시키기 위해서는 연직배수공법을 사용하여 압밀을 촉진시켜야 한다. 압밀시간은 배수거리의 제곱에 비례하고 또한 대부분의 지반에서는 수평 투수계수가 수직 투수계수보다 크기 때문에 배수공법을 사용하면 Fig. 2와 같이 동일한 지반에 연직배수재를 사용하는 경우 압밀시간을 크게 단축시켜 침하를 조기에 완료시킬 수 있다.

2.2 전기삼투이론

포화된 흙 속에 전기가 가해지면 양이온은 음극으로 음이온은 양극으로 이끌리게 되는데 이때 음전하로 대전된 흙 입자와 평형을 이루기 위해 포화된 흙 속에서 많은 수의 양이온이 음극으로 이동함에 따라 양이온은 주위의 수화물과 함께 이동하게 된다. 또한 Fig. 3에서 나타난 바와 같이 전기장이 가해지면 확산 이중층 내의 수화된 이온은 각기 다

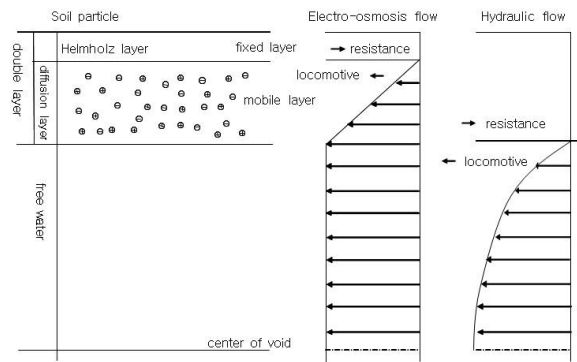
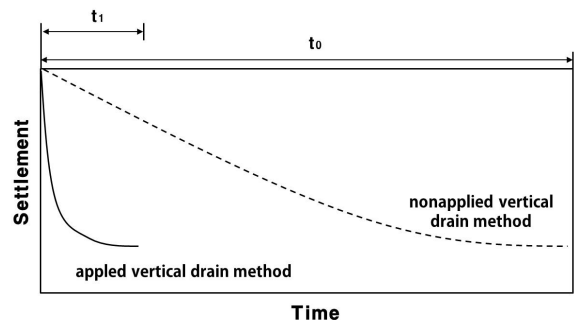


Fig. 3. Diagram of eletro-osmosis principle in single capillary viscometer (Casagrande, 1952)



른 극으로 이동하면서 자유수층의 간극수를 함께 이동시킴으로써 물이 흐르게 되는데 이와 같은 현상을 전기삼투라고 하며 이에 대한 연구는 Mitchell(1991), Lo(1991a, 1991b) 등에 의해 연구되었다.

3. 실험 장치 및 방법

모형실험을 위한 모델박스는 Fig. 4와 같이 전열체인 아크릴로 제작하였으며, 양측 하부에 배수장치를 두어 간극수의 배수가 가능하도록 하였다. 선행재하공법 및 전기삼투공법이 적용되는 연약지반은 Table 1과 같은 해성점토를 사용하였으며, 초기 함수비는 70%로 선정하여 연약지반을 구성하였다. 연약지반에 선행재하공법을 적용시키기 위한 상재하중은 0.78kg의 추를 사용하였으며 연약지반 상부에 균등하게 적용시키기 위해 추와 연약지반 사이에 아크릴판을 설치하여 아크릴판을 통해 연약지반에 균등하게 하중이 작용하도록 하였다. 단계하중은 1일 간격으로 0.78kg씩 총 3일 동안 2.34kg의 하중이 해성점토지반 상부에 균등하게 작용하도록 하였다. 전기삼투공법을 적용시키기 위한 연직배수재는 연직배수재 및 전극재로 활용이 가능한 Fig. 5와 같은 나노 코팅 PBD 섬유를 사용하였으며, 전기적 특성은 Table 2와 같다.

단계하중이 작용하는 해성점토지반에 전기삼투공법이 반영됨에 따른 지반개량효과를 확인하기 위한 모형실험 방법은 Fig. 7의 흐름도와 같이 초기 함수비 70%의 해성점토를



Fig. 4. Model box

Table 1. Parameter of marine clay

Physical properties	Quantity
Specific gravity, G_s	2.7
Liquid limit, LL (%)	55.29
Plasticity index, PI (%)	19.22
Initial water content (%)	70
USCS (Unified Soil Classification System)	MH

모델박스에 투입시켜 연약지반을 형성하고 연약지반 양 끝에 전압을 공급할 수 있는 연직배수재인 나노 코팅 PBD 섬유를 설치하였다. 이후 상재하중을 적용시키기 위해 Fig. 6과 같이 연약지반 상부에 아크릴판을 설치한 후 아크릴판 중앙에 상재하중을 위한 추를 설치하였으며, 상재하중 및 전압공급에 따른 연약지반의 압밀침하량을 측정하기 위해 아크릴판 상부에 LVDT를 설치하여 시간에 따른 압밀침하량을 측정하였다. 실험에 적용한 전압의 크기는 0.3V, 0.6V, 0.9V를 사용하였으며 이는 현장에서 고압을 사용하는 경우 위험요소가 있기 때문에 저전압을 실험에 적용하였다. 또한 실험을 통해 발생하는 압밀배수량은 모델박스의 양측하부의 배수 밸브를 통해 메스실린더로 이동하여 유출된 물의 양을 측정하였다. 72시간 경과 후 실내 베인시험은 모델박스 중앙부에서 시료의 전단강도를 측정하였으며, 양극 전극재 부분과 중앙 부분에서 시료를 채취하여 함수비 변화를 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 침하량 변화

Fig. 8 및 Fig. 9, Table 3은 단계하중이 작용되는 해성점토지반에 전압변화에 따라 발생된 압밀침하거동 및 최종압밀침하량을 비교한 것이다. Fig. 8과 같이 전압에 따른 압밀침하거동은 전압이 공급되지 않는 0V의 경우 1단계 및 2단

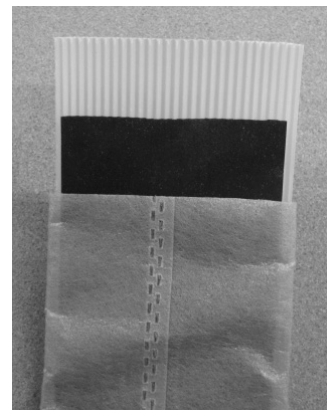


Fig. 5. Nano coated PBD

Table 2. Properties of nano coated PBD

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

계 하중에 의한 압밀침하 발생하였으나 3단계 하중에 의한 압밀침하 발생하지 않는 것으로 나타났다. 전압이 0.3V 인 경우는 0V의 경우와 유사한 압밀침하 거동양상으로 나타났으나 0V에 비해 23%~14% 압밀침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 그리고 전압이 0.9V의 경우는 0V 및 0.3V와 다르게 3단계 하중에 의한 압밀침하가 발생하였으며 1.5V의 경우는 0.9V와 유사한 압밀침하 거동양상으로 나타났으나 0.9V에 비해 8%~15% 압밀침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 0.3V의 압밀침하거동에 비해 0.9V 이상의 전압에서 3단계 하중에 의한 압밀침하거동이 뚜렷하게 나타나는 것은 1단계 하중에 의한 압밀침하가 크게 발생하여 3단계 하중에 의한 압밀침하에 단계하중이 영향을 미치지 때문으로 보인다.

그리고 전압에 따른 최종 압밀침하량은 Fig. 9 및 Table 3과 같이 1단계 하중의 경우는 0V를 기준으로 0.3V의 경우 23%, 0.9V는 76%, 1.5V는 102% 증가하는 것으로 나타났으며, 2단계 하중에서는 0V를 기준으로 0.3V의 경우 14%, 0.9V는 52%, 1.5V는 67% 증가하는 것으로 나타났고, 3단계 하중에서는 0V를 기준으로 0.3V는 11%, 0.9V는 46%, 1.5V는 58% 증가하는 것으로 나타났다.

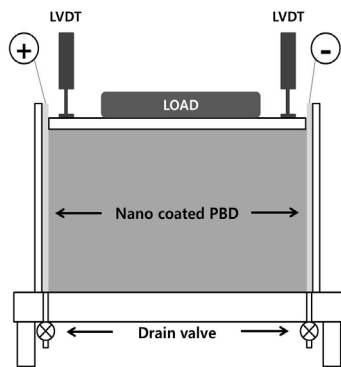


Fig. 6. Layout of model test

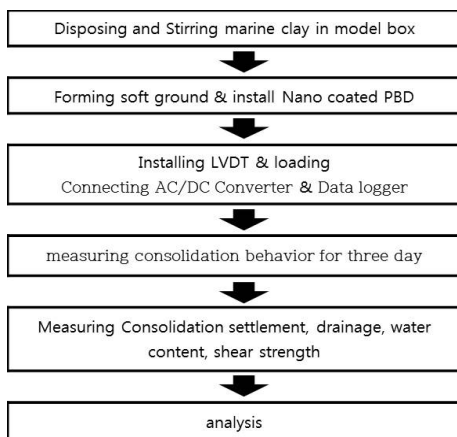


Fig. 7. Flowchart of model test

4.2 배수량 변화

단계하중이 작용하는 해성점토지반에 전압 변화에 따른 압밀배수거동은 Fig. 10과 같은 거동양상으로 나타났으며 최종 압밀배수량은 Table 4와 같다. Fig. 10과 같이 압밀배수거동은 단계하중에 의한 압밀배수량 증가는 나타나지 않았으나 전압에 의해 압밀배수량이 증가하는 양상으로 나타나 압밀배수의 경우 단계하중에 의한 영향보다 전압에 의한 영향이 큰 것으로 보인다. 그리고 전압변화에 따른 최종압밀배수량은 전압 0V를 기준으로 0.3V는 39%, 0.9V는 198%, 1.5V는 213% 증가하였다.

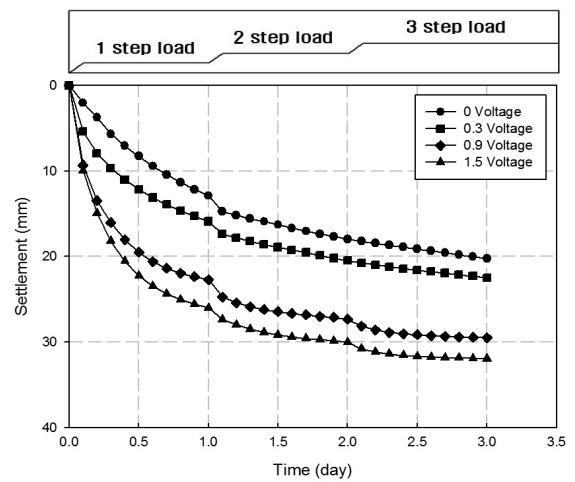


Fig. 8. Consolidation settlement with changing voltage

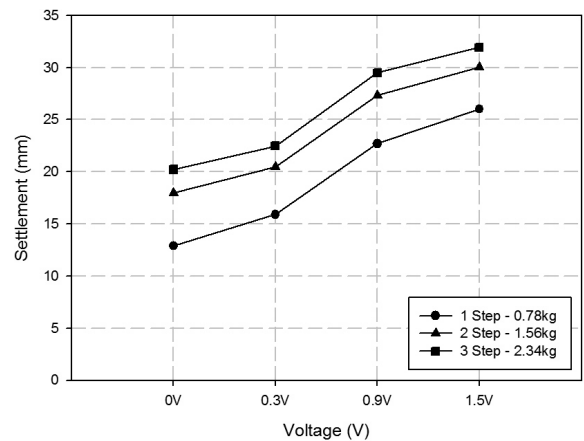


Fig. 9. Final consolidation settlement with changing voltage

Table 3. Consolidation settlement under surcharge with changing voltage

Surcharge	Consolidation settlement (mm)			
	0V	0.3V	0.9V	1.5V
1	12.9	15.9	22.7	26.0
2	18.0	20.5	27.3	30.0
3	20.2	22.5	29.5	31.9

4.3 함수비 변화

단계하중이 적용되는 해성점토지반에 전압변화에 따른 전기삼투모형실험 전·후의 함수비 변화를 Fig. 11 및 Table 5에 나타내었다. Fig. 11과 같이 전압이 증가함에 따라 함수비는 감소하는 것으로 나타났으며, 전압에 따른 함수비는 0V

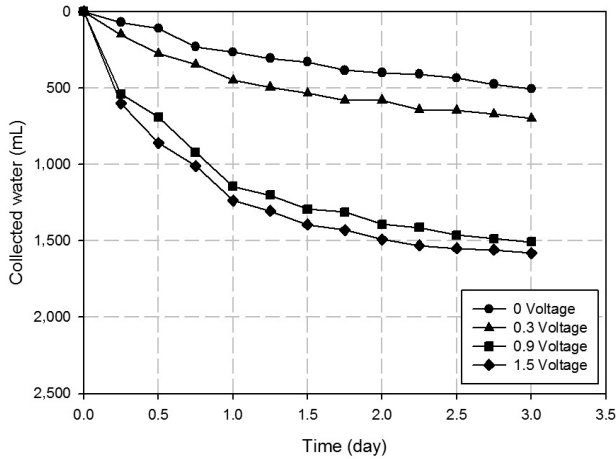


Fig. 10. Consolidation drainage with changing voltage

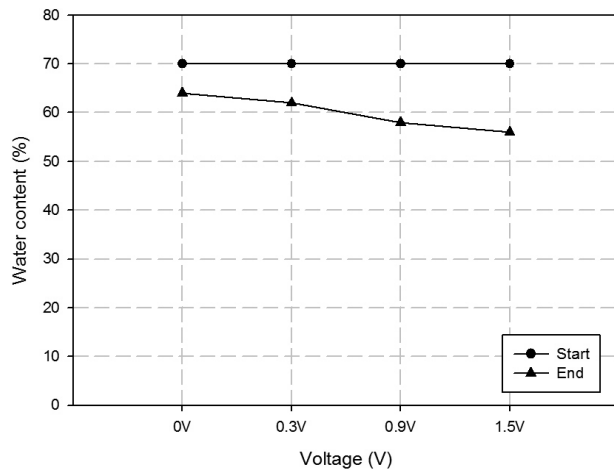


Fig. 11. Final water content with changing voltage

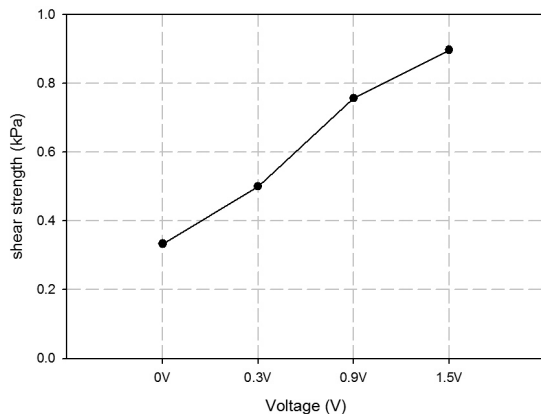


Fig. 12. Final undrained shear strength with changing voltage

를 기준으로 0.3V는 3%, 0.9V는 9%, 1.5V는 13% 감소하는 것으로 나타났다. 그리고 실험 초기함수비를 기준으로 0V는 9%, 0.3V는 11%, 0.9V는 17%, 1.5V는 20% 감소하여 전압의 크기가 증가할수록 함수비는 감소하는 것으로 나타났다.

4.4 전단강도 변화

단계하중이 작용하는 해성점토지반에 전압변화에 따른 전기삼투모형실험을 수행한 후의 최종 전단강도 변화는 Fig. 12 및 Table 6과 같이 나타났다. 전단강도는 전압이 증가함에 따라 최종 전단강도는 증가하는 것으로 나타났으며, 전압 변화에 따라 최종 전단강도는 0V를 기준으로 0.3V는 52%, 0.9V는 130%, 1.5V는 173%로 전압이 증가함에 따라 전단강도도 증가하는 것으로 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 단계하중이 작용하는 해성점토지반에 전기삼투공법을 병용하여 수행하는 경우에 대한 지반개량 효과를 확인하기 위한 모형실험을 수행한 결과를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 압밀침하량은 전압이 증가함에 따라 증가하는 것으로 나타나 동일한 압밀침하량에 대하여 전압이 공급되는

Table 4. Final consolidation drainage with changing voltage

Voltage (V)	Final consolidation drainage (mL)
0	505
0.3	700
0.9	1,507
1.5	1,580

Table 5. Final water content with changing voltage

Voltage (V)	Initial water content (%)	Final water content (%)
0	70	64
0.3		62
0.9		58
1.5		56

Table 6. Final undrained shear strength with changing voltage

Voltage (V)	Final undrained shear strength (kPa)
0	0.33
0.3	0.50
0.9	0.76
1.5	0.90

경우 압밀시간을 단축시킬 수 있을 것으로 판단된다. 그리고 압밀침하거동은 0.9V 이상의 전압에서 3단계 하중에 의한 압밀침하양상이 뚜렷하게 나타나 0.9V 이상의 전압에서 단계하중에 의한 영향이 클 것으로 보인다.

- (2) 압밀배수의 경우 단계하중에 의해 압밀배수가 증가하는 양상은 나타나지 않았으나 전압에 의해 압밀배수가 증가하는 양상은 나타나므로, 압밀배수는 단계하중에 비해 전압에 의한 영향이 큰 것으로 사료된다.
- (3) 전압이 증가함에 따라 최종함수비는 감소하고 최종전단강도는 증가하는 것으로 나타나며, 연약지반에 단계하중만을 적용시켜 연약지반을 개량하는 경우 보다 추가적으로 전기삼투공법을 동시에 적용시켜 지반을 개량하는 경우가 지반개량효과를 더 크게 증가시킬 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 따라서 연약지반에 선행재하공법을 적용시켜 현장에 적용하는 경우, 보조적으로 전기삼투공법을 병용하여 사용하는 경우가 빠르게 압밀시간을 단축시키고 지반개량효과를 크게 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

1. Ahn, S. R. (2011), Effect of electrode efficiency for electroosmosis ground improvement, Master's thesis, Chungbuk National University. pp. 54~55 (in Korean).
2. Aldrich, H. P. (1965), Precompression for support of shallow

- foundations, Journal of Soil Mechanics and Foundations Div., ASCE, Vol. 91, SM2, pp. 5~20.
3. Asaoka, A. (1978), Observation procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, JSSMGE, Vol. 18, No. 4, pp. 87~101.
4. Bang, J. H., Kim, W. H. and Han, I. Y. (1996), A study of field application on electro-osmotic consolidation for soft ground improvement, KGS 96, pp. 135~140 (in Korean).
5. Casagrande, L. (1952), Electroosmotic stabilization, Journal of Boston Society of Civil Engineers, Vol. 39, pp. 51~83.
6. Choi, Y. M. (2008), Prediction of consolidation settlements and strength increase of soft soil by pre-loading methods, Master's thesis, Yonsei University. pp. 59~60 (in Korean).
7. Helmholtz, H. (1879), Wiedemann's Annalen D. Physik, Vol. 243, Issue 7, pp. 337~382.
8. Jeong, K. S. (2009), Characteristics on electrokinetic ground improvement using nano-geosynthetics, master's thesis, Chungbuk National University. pp. 65~66 (in Korean).
9. Johnson, S. J. (1970), Precompression for improving foundation soils, Journal of the Soil Mech. and Foundations Div., ASCE, Vol. 96, pp. 111~144.
10. Kim, G. H. (2012), A study on the consolidation behavior of soft grounds due to the embankment speed, Master's thesis, University of Seoul, pp. 54~55 (in Korean).
11. Kim, S. S., Han, S. J. and Kim, J. Y. (2007), Estimation of shear strength of marine clay using electrokinetic cementation method, KSCE Journal of Civil Engineering, Vol. 27, No. 5, pp. 321~329 (in Korean).
12. Lee, S. W. and Lee, Y. N. (1998), Electrokinetic strengthening of soft marine clays in E/K cell, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol. 14, No. 4, pp. 77~89 (in Korean).
13. Lo, K. Y., Ho, K. S. and Incullet, I. I. (1991a), Field test of electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, pp. 74~83.
14. Lo, K. Y., Incullet, I. I. and Ho, K. S. (1991b), Electro-osmotic strengthening of soft sensitive clays, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 28, pp. 66~73.
15. Mitchell, J. K. (1991), Conduction phenomena from theory to geotechnical practice, Geotechnique, Vol. 41, pp. 299~340.
16. Shin, D. C. (2010), Characteristics on electrokinetic ground improvement according to electrode types, Master's thesis, Chungbuk National University. pp. 46~47 (in Korean).