

전기 삼투압을 이용한 교란영역의 투수성 개선에 관한 연구 The Study on permeability enhancement in smear zone using electro-osmotic pressure

안병욱¹⁾, Byung-Wook Ahn, 노희전²⁾, Hee-Jeon Noh, 김현기³⁾, Hyun-Ki Kim, 조남준⁴⁾, Nam-Jun Cho

- 1) 국민대학교 건설시스템 공학부 연구조교, Research Assistant, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.
- 2) 국민대학교 기계공학과 석사과정, Graduate Student, Mechanical Engineering, Kookmin Univ.
- 3) 국민대학교 건설시스템 공학부 전임강사, Full-time Lecturer, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.
- 4) 국민대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Kookmin Univ.

SYNOPSIS: More time is required for consolidating soft clay when its hydraulic conductivity around the vertical drains is reduced by soil disturbance. One of the methods to be proposed to solve such problem is the electro-osmotic flow application. This study presents the experimental results of model tests using a modified oedometer and a large-scale cylinder with a sand drain. Results show that the development of negative excessive pore water pressure due to the DC electrical field in saturated clay can be transformed to additional loads causing more consolidation settlement.

Key words: electro-osmotic consolidation, cylinder test, vertical drain, pore water pressure

1. 서 론

본 연구는 연직배수재 공법과 전기 삼투압 공법을 연약점토 개량에 함께 적용함으로써 배수재 타설로 인한 교란영역의 투수성 감소에 따른 압밀속도의 감소를 최소화하는 연구 개발에 있어서 이론적 배경을 마련하고자 한다.

일면배수 조건에서 전기삼투를 적용한 압밀실험을 실시하여 비전압상태의 압밀에 비하여 간극수의 유출속도 증가량을 추정하고 이를 등가 하중으로 환산하였다. 그리고 연직배수재가 설치된 지반에 대한 대형 실린더 모형실험을 실시하여 전기삼투압공법이 교란영역의 투수성 개선과 압밀속도 향상에 어느 정도 기여하는지에 대한 평가하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 연직배수재 시공에 따른 투수성 저하

연직배수재를 연약지반에 설치할 때 맨드릴이나 케이싱의 관입 및 인발 과정에서 타설 주변부위가 심하게 교란되며, 교란영역은 원지반에 비하여 투수성이 매우 떨어지게 된다. 연직배수재 주변 교란영역의 투수계수를 정량적으로 규명할 수 있는 방법은 아직 개발되지는 않았지만 일반적으로 그림 1과 같이 원지반 투수계수의 약 0.2~0.5배 정도인 것으로 알려져 있다.

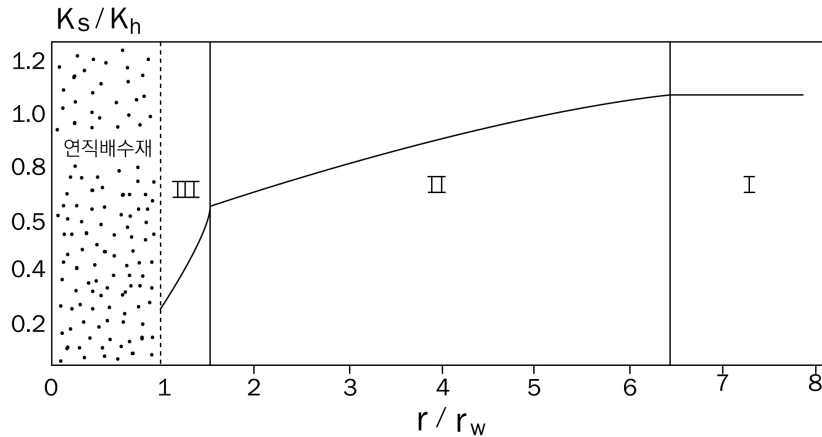


그림 1. 교란영역의 분포 (after Onoue et al, 1991)

그림 1에서 r_w 는 연직배수재의 환산 반경이며, r 은 연직배수재 중심으로부터의 거리이다. 여기서 I ~ III은 각각 원지반(I), 교란영역(II), 완전 교란영역(III)을 의미한다. 그리고 k_s 는 교란영역에서의 수평 방향 투수계수이며 k_h 는 불교란 영역에서의 수평방향 투수계수이다. 연직배수재 부근으로 접근할수록 교란도가 증가하여 수평방향 투수계수가 감소하게 된다 (Onoue, 1991).

3. 전기삼투압을 이용한 압밀하중의 증가

3.1 전기삼투현상

포화된 점토입자의 표면은 동형치환(同形置換)에 의해 음전하로 대전되어 있다. 따라서 점토입자는 간극수의 양이온들을 끌어들임으로써 전기적으로 평형을 유지하려고 하며 양이온이 끌리는 범위를 이중층이라고 한다. 그림 2와 같이 이중층은 Helmholtz층과 확산층으로 구분되며 Helmholtz층은 점토입자와 강하게 부착된 층으로 고정층이라 하고 확산층은 점토입자와의 전기적 결합력이 비교적 약하며 가동층이라고 한다. 또한 이중층 외부의 자유수는 점토입자의 전기적 성질에 무관하게 거동한다(김명모 외 3인, 2005; Casagrande, 1952).

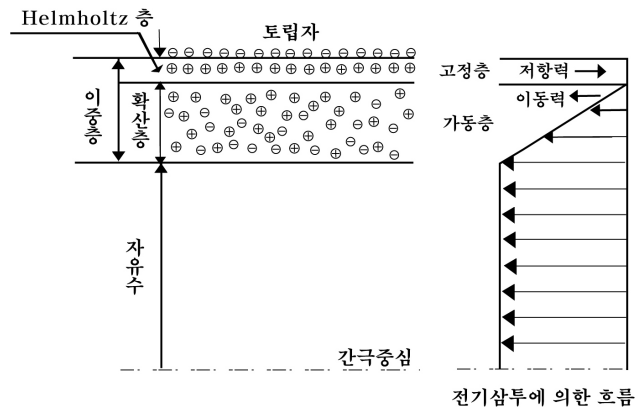


그림 2. 단일 모세관에서의 전기삼투압원리 (김명모 외 3인, 2005)

3.2 전기삼투 적용시 압밀하중의 증가

전기삼투압을 적용하게 되면 양(+)극에서 음(-)극 방향으로 간극수의 흐름이 발생하며 일면 배수조건
의 압밀상태인 경우에는 양극 방향으로 음의 과잉간극수압이 발생하게 되고, 그림 3과 같이 등가 압밀
하중으로 치환하여 계산할 수 있다 (Nicholls and Herbst, 1967; Esring, 1968). 전위차에 의한 압밀증
가로 δ 만큼의 압밀변화량이 증가했을 때 Δp_t 는 실제 재하하중과 전기삼투압에 의한 응력증가의 합이며,
 Δp 는 재하하중에 의한 응력증가량이다. 또한 전기삼투압에 의해 추가 발생한 압밀하중
($\Delta p_e = \Delta p_t - \Delta p$)을 정량적으로 산정할 수 있으며, 이를 통하여 연직배수재가 설치된 시료에 대한 압밀
현상에 대해 전기삼투압에 의한 횡방향 투수계수(k_{re}), 하중에 의한 횡방향 투수계수(k_r), 전기삼투압에
의한 횡방향 침투유속(v_{re}), 하중에 의한 횡방향 침투유속(v_r) 등을 알 수 있다 (그림 3 참조).

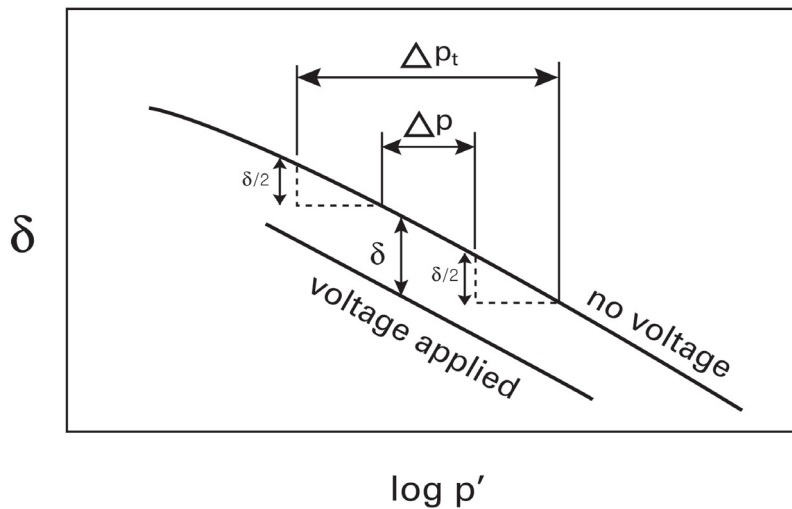


그림 3. 전기삼투현상에 의한 하중증분 계산 (Nicholls and Herbst, 1976)

하중만 가한 경우의 수평방향 압밀계수와 수평방향 투수계수는 식 1에서 계산할 수 있으며 c 는 압밀
계수, T 은 시간계수, d 는 배수거리, t 는 소요시간, a_v 는 압축지수, e 는 공극비를 나타낸다.

$$c_r = \frac{T_r \times d^2}{t}, \quad k_r = \frac{c_r \gamma_w a_v}{1 + e} \quad (1)$$

하중과 전기삼투압을 동시에 가한 경우의 수평방향 압밀계수와 수평방향 투수계수는 식 2에서 계산할
수 있다.

$$c_{rt} = \frac{T_{rt} \times d^2}{t}, \quad k_{rt} = \frac{c_{rt}}{c_r} k_r \quad (2)$$

하중과 전기삼투압을 동시에 가한 경우의 침투유속은 식 3에서 계산할 수 있으며 i 는 하중으로 인한
동수경사, i_t 는 하중과 전기삼투압으로 인한 동수경사, E 는 전압경사로써 식 4와 같이 계산된다.

$$v_{rt} = v_{re} + v_r = k_{rt} \times i_t = (k_{re} \times E) + (k_r \times i) \quad (3)$$

$$i = \Delta p/d, \quad i_t = \Delta p_t/d, \quad E = V/d \quad (4)$$

전기삼투 투수계수와 침투유속은 식 5와 식 6에서 계산된다.

$$k_{re} = \frac{(k_{rt} \times i_t) - (k_r \times i)}{E} \quad (5)$$

$$v_{re} = k_{re} \times E \quad (6)$$

4. 전기삼투 압밀실험

4.1 전기삼투 일면배수 압밀실험

초기 함수비 60%, 두께 35cm, 압밀응력 56kPa, 일면배수 조건으로 14일 동안 압밀한 카올리나이트(Kaolinite)로 두 개의 시료를 이용하여 일면배수조건에 대한 표준압밀시험(KS-F2316)을 실시하였다. 전기삼투에 의한 압밀 촉진효과를 관찰하기 위하여 두 시료의 압밀곡선이 서로 수렴하는 것을 확인한 이후, 그 다음 하중단계 재하 직전 하나의 시료에 그림 4와 같이 시료의 양면에 3V의 전위차를 주고 다음 하중을 재하하였다. 전위차에 의한 간극수의 흐름이 압밀 방향과 일치하도록 시료 하부에 양극을 설치하였고 상부에 음극을 설치하였고, 시간에 따른 시료의 연속적인 변위측정을 위해 전자식 다이얼게이지를 이용하여 측정하였다.

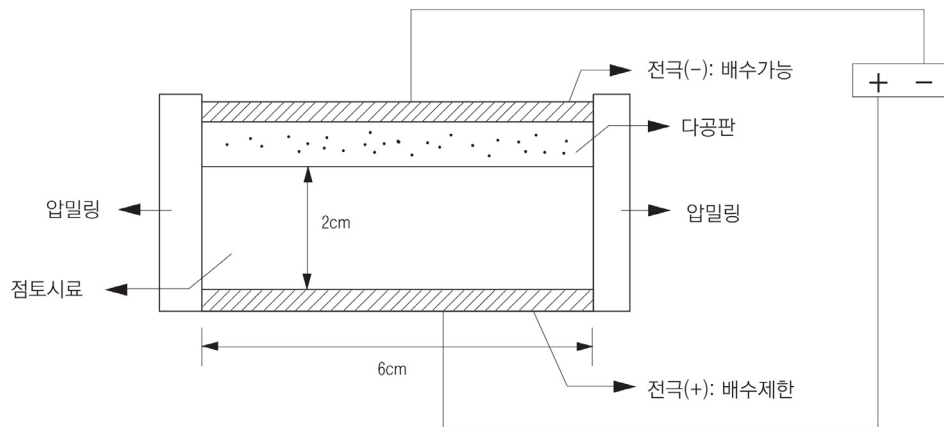


그림 4. 전기삼투 일면배수 압밀실험장치 개요도

그림 5와 같이 16kPa 하중단계에서 압밀이 종료된 이후 두 시료의 압밀 곡선이 서로 수렴하는 것을 확인한 후에 다음 하중단계인 32kPa에서부터 한 개의 시료에는 3V의 전위차를 주고, 나머지 시료에 대해서는 비전압 상태를 유지하며 압밀시험을 진행하였다. 그림 5에서 e_0 는 시료의 초기 공극비, e_i 는 매 하중단계에서 압밀이 종료된 이후의 최종 공극비이다. 그림 3에서 제시한 방법으로 그림 5에 나타난 결과를 해석한 결과는 그림 6과 같으며 하중에 의해 발생된 압력 증가분 Δp 는 32kPa이고, 하중과 전기삼투압에 의해 발생된 압력 증가분의 합 Δp_t 는 60.8kPa이며, 전기삼투압에 의해 발생된 압력증가분 Δp_e 는 28.8kPa로 나타났다. 또한 Δp , Δp_t , Δp_e 를 이용하여 침투유속과 투수계수를 산정한 결과를 표 1에 나타내었다.

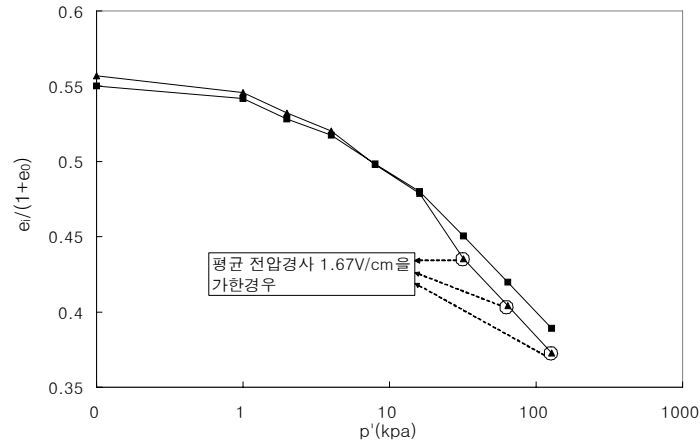


그림 5. 전기삼투 일면배수 압밀실험의 $e_i/(1+e_0) - \log p'$ 곡선

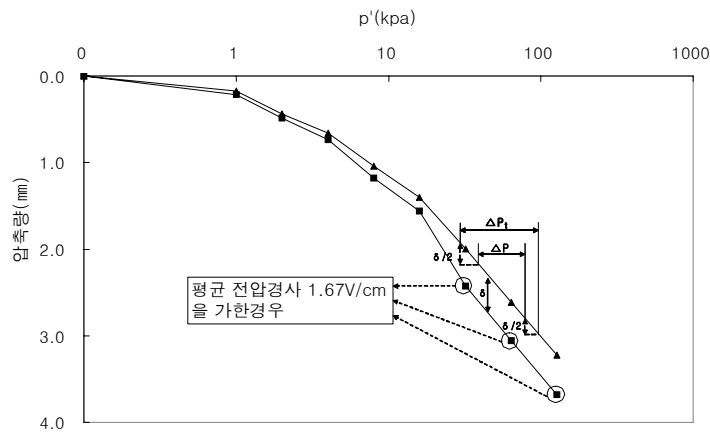


그림 6. 전기삼투 일면배수 압밀실험의 압축량- $\log p'$ 곡선

표 1. 하중과 전기삼투압에 의한 침투유속 및 투수계수

투수계수			침투유속		
$k_{vt} (cm/sec)$	$k_v (cm/sec)$	$k_{ve} (cm^2/V \cdot sec)$	$v_{vt} (cm/sec)$	$v_v (cm/sec)$	$v_{ve} (cm/sec)$
6.11×10^{-8}	5.04×10^{-8}	7.00×10^{-7}	2.15×10^{-6}	9.35×10^{-7}	1.22×10^{-6}

표 1과 같이 전기삼투압이 작용하는 경우의 침투유속 v_{vt} 가 비전압상태의 침투유속 v_v 에 비해 약 2.3 배 크게 나타났으며, 전기삼투압에 의한 배수방향과 하중에 의한 배수방향이 일치할 경우 전기삼투압은 추가적인 하중의 역할을 하며 압밀량 증가와 간극수의 유출속도 증대에 큰 영향을 주는 것을 알 수 있었다.

4.2 전기삼투 연직배수 실린더실험

초기 함수비 약 60%의 카올리나이트 시료를 직경 26cm, 높이 135cm의 스테인리스 스틸 실린더 안

에 높이 100cm로 타설한 후 압밀하중 36kPa, 양면배수 조건으로 7일간 초기압밀한 후, 그림 7과 같이 직경 2.2cm의 연직배수재(샌드 드레인방식)와 전극을 설치하였다. 이 때 전극은 교란영역의 직경이 샌드 케이싱의 직경 3cm의 3배라 가정하여 직경 d_s 가 9cm인 지점에 사방으로 설치하였다.

연직배수재와 전극을 설치 후 하부 배수구를 차단하고 일면배수 조건에서 56kPa의 연직 압밀하중을 재하하면서 15분 간격으로 변위를 측정하여 그림 8과 같이 시간(min)에 따른 압축량(mm)을 측정하였다. 또한 전기삼투압을 발생시키기 위한 전압경사는 하중재하 360분 이후 120분, 1200분 이후 240분 간 평균전압경사 2.67 V/cm로 적용하였다.

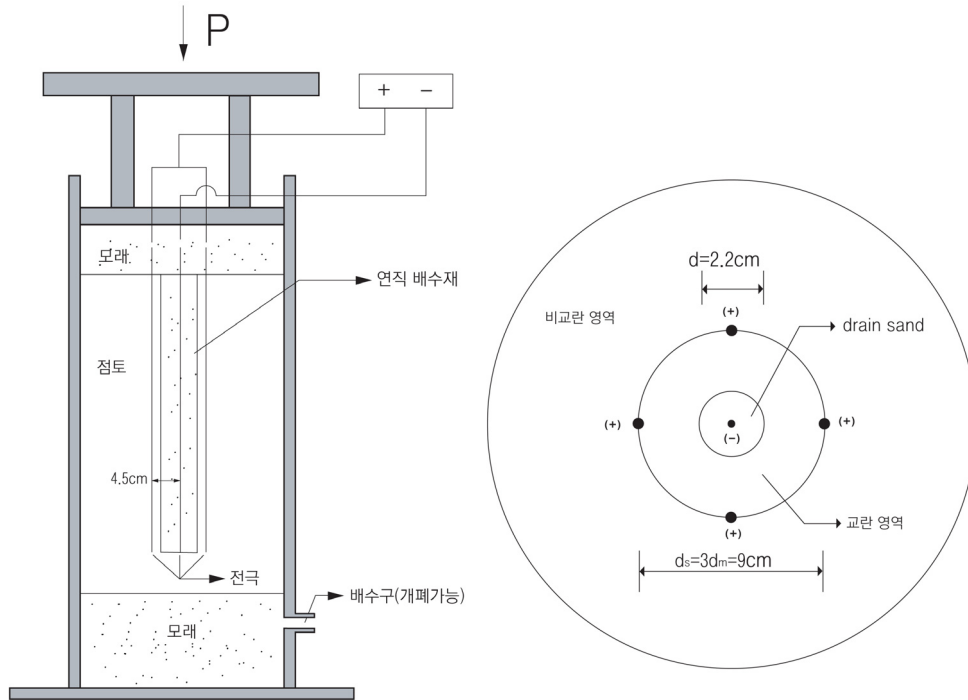


그림 7. 전기삼투 연직배수 실린더실험의 개요도

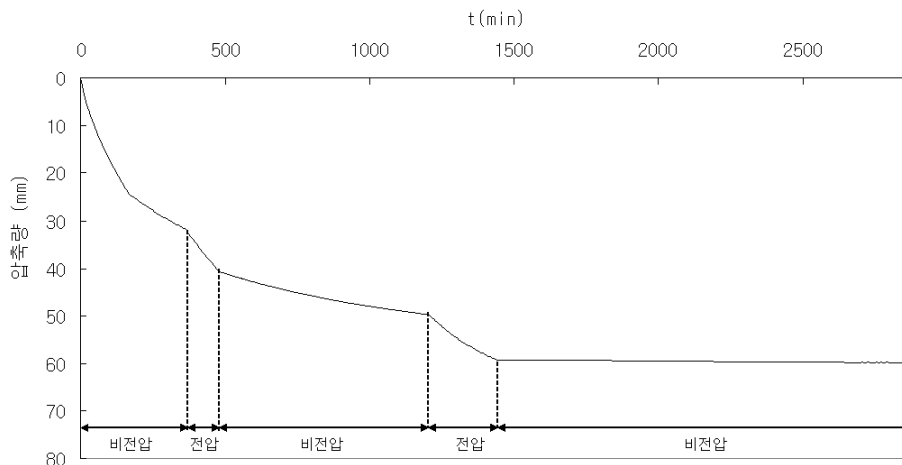


그림 8. 전기삼투 연직배수 실린더실험의 압축량-시간 곡선

그림 8과 같이 압밀재하하중이 일정한 상태에서 전위차를 주었을 경우 압밀 침하속도는 비전압상태에

비해 상당히 빠른 것으로 관찰되었다. 따라서 전기삼투압을 적용한 영역에서는 수평방향 침투유속이 빨라지고 연직배수재가 설치된 주변의 교란된 점토시료의 투수성이 개선되었음을 확인하였다.

5. 결론

전기삼투 일면배수 압밀실험을 통해 점토시료에 적용한 전기삼투압은 추가되는 압밀하중으로 치환하여 고려할 수 있으며, 이에 따른 침투유속의 증가를 평가해 보았다. 전기삼투압에 의한 배수방향과 하중의 증가로 인한 배수방향이 일치하는 경우, 전기삼투압으로 인해 발생한 과잉간극수압이 추가적인 하중의 역할을 하여 압밀 침하량을 증가시키고, 간극수압 소산과정에서 발생하는 시료 내부에서의 침투유속 또한 증가하는 것으로 나타났다.

대형 실린더 모형 실험을 통해 연직배수재 관입으로 인한 교란영역에 대하여 전기삼투압을 적용시킨 결과, 비전압 압밀배수상태에 비하여 압밀속도가 상당히 향상되었음을 확인 할 수 있었고, 이것은 전기삼투압을 적용한 교란영역의 투수성 개선이 가능함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김명모, 김병일, 이승원, 조성민(2005), **지반개량공법 설계**, 도서출판 세론, pp.289-290.
2. 경제자유구역 화전지구 개발사업 2공구 지반조사 보고서(2006), EJ tech, pp.104-105, pp.119-122.
3. Casagrande L. (1952), "Electro-Osmotic Stabilization of Soil", *Journal of Boston society of Civil Engineers*, Vol. 39, pp. 51-83.
4. Esring, M.I.. (1968), "Pore pressure, consolidation, and electrokinetics," *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol. 94, pp. 899-921.
5. Nicholls, R.L. and Herbst, R.L. (1967), "Consolidation under electrical pressure gradients", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division*, ASCE, Vol. 93, pp.139-148.