

연약지반개량을 위한 전기삼투 압밀공법 현장적용성 연구

A Study of Field Application on Electro-Osmotic Consolidation for Soft Ground Improvement

방준호¹⁾, Joon-Ho Bang, 김운형²⁾, Woon-Hyung Kim, 한일영³⁾, Il-Yeong Han

¹⁾ 선경건설(주) 부설연구소 연구원, Researcher, R&D Center, Sunkyong Eng'g & Const. Ltd..

²⁾ 선경건설(주) 부설연구소 선임연구원, Senior Researcher, R&D Center, Sunkyong Eng'g & Const. Ltd..

³⁾ 선경건설(주) 부설연구소 책임연구원, Research Fellow, R&D Center, Sunkyong Eng'g & Const.Ltd..

개요(SYNOPSIS) : A field test was performed to evaluate the effectiveness of the electro-osmotic consolidation method in strengthening the soft clay. The variation of settlement, shear strength and voltage distribution during and after treatment was monitored and cone penetration test was performed before and after treatment. The results of CPT at different locations within the treated area and at different depth indicate that the cone resistance increased by approximately 240% and the undrained shear strength increased by 35% for the six meters below the original ground surface for a period of five months. Also, it was evident that electro-osmotic consolidation settlement was proportional to the electrical potential and inversely proportional to the distance between anode and cathode. When electro-osmotic consolidation method was compared with sand drain and preloading, its consolidation settlement was about 175% larger than by preloading and about 30% larger than by sand drain. It is evident, therefore, that increase in strength as well as improvement in settlement may be achieved by electro-osmotic consolidation method.

주요어(Key words) : 전기삼투(Electro-Osmosis), 지반개량공법, 연약지반, 압밀배수공법

1. 서론

인구증가와 산업발달에 따라 토지수요가 급증하고 있는 시점에서 부족한 토지 확보 방안의 하나로 해안 및 하안매립공사가 활발히 수행되고 있다. 해안 및 하안매립에 의해 조성된 연약지반상에 제방, 교량, 도로, 건축물 등 구조물 건설시 압밀침하발생에 따른 안정성 문제가 대두되므로 사전에 연약지반 처리공법을 통한 지반안정화후 구조물 공사를 실시하는 것이 일반적인 순서이다. 특히, 연약지반이 점토층으로 구성된 경우 샌드드레인, 페이퍼드레인, 팩드레인 등의 강제배수공법을 이용하나 모래 및 드레인 보드재를 이용한 압밀배수공법은 주변 점토입자 유입에 의한 폐색현상, 배수재 절단, 불균질한 처리효과, 처리심도 한계 및 시공기간의 장기화 등의 문제점을 내포하고 있으며 배수재 확보 또한 문제점으로 등장하고 있다. 최근에 이러한 시공상 효율성 제고, 처리심도 확대 및 시공기간 단축을 위해 캐나다, 영국을 중심으로 전기삼투기술을 이용한 연약지반처리 및 개량기술 연구가 활발히 진행되고 있으며 국내에서도 일련의 연구활동이 수행되고 있다.

본 연구는 전기삼투(electro-osmosis)기술과 기존의 압밀배수공법인 샌드드레인의 배수시스템을 결합한 전기삼투 압밀공법(electro-osmotic consolidation)개발을 위한 전기삼투기술의 현장적용성 및 효율성

을 분석평가한 결과로서 특히, 전압크기, 전극간 거리, 전극배치 형태가 압밀침하 및 지반강도에 미치는 영향을 살펴보았다.

2. 현장실험계획

본 현장실험의 대상지반은 지역이력상 노년기에 해당하며 주위에는 표고 50m 내외의 낮은 구릉이 발달되어 있고 간척사업으로 육지화된 지반으로 실내실험결과 액성한계 39.4%, 소성지수 18.8%, 함수비 38.1%, 습윤단위중량 1.65kg/cm^2 인 점토로 구성된 지반이다. 압밀침하에 미치는 전압크기 영향을 파악하기 위해 사용전압은 전극간 거리를 2.5m로 고정시킨 채 정류장치 용량을 고려하여 20V, 40V 및 60V 전압을 사용하였으며, 전극간 거리에 따른 조사하기 위하여 소요 압밀기간과 실제공사시의 시공성을 고려하여 고정전압 40V하에서 1.5m, 2.5m 및 3.5m씩 양극과 음극을 이격시켜 실험을 수행하였고, 전극배치 형태에 의한 영향을 알아보기 위하여 전극간 간격 2.5m, 전압 40V일 때의 일자형, 사각형 및 육각형 전극배치에 따른 전기삼투 압밀배수공법 시공성과 효율성을 검토하였다. 한편, 현장실험은 영향인자 상호간의 간섭효과를 최대한 배제하고 현장여건과 시공성을 감안하여 6개 구획으로 구분하여 실시하였다(그림 1). 지반에 직류전류를 발생시키기 위하여 2대의 발전기, 3대의 정류기를 이용하였으며 그림 2는 전원공급 배치도를 나타낸다.

본 실험에 사용된 전극은 양극과 음극으로 나뉘며 양극은 단순히 전극재를 지중에 삽입하여 형성하고 음극은 전극 기능이외에 양극으로부터 유입되는 지중수 배제기능을 겸한 구조가 되도록 음극 주위에 샌드드레인을 설치하여 여과 및 배수기능을 갖도록 설계하였다(그림 3). 전극재로는 전기전도성이 양호한 금속재를 사용가능하나 경제성 및 구입용이성등을 고려하여 직경 50mm 강관을 사용하였으며, 직경은 설치시 수직성 유지 및 지반마찰에 충분히 저항할 수 있는 강성 확보와 시공상 문제를 고려하여 결정하였다. 한편, 전극길이는 지반개량심도에 의해 결정되나 전극재 하단부에 위치한 지반에서의 전기장 형성 및 운반성과 작업성을 고려하여 길이 3m가 되도록 제작하였으며 전극양단에 암나사와 슛나사를 형성하여 개량심도에 따라 각 부재를 연결하여 사용하였다. 전극 및 배수기능을 동시에 갖는 음극은 직경 5mm의 천공된 유공관으로하여 배수가 되도록 하였다. 상재하중으로 사용되는 성토 및 하부 모래배수층과 접촉하고 있는 전극은 전류손실을 막기 위해 표면에 에폭시처리를 하였다. 전극재 하단부는 전극관 내경을 통한 흡과 지중수 유입에 따른 관막힘 및 간극수압 상승을 방지하기 위하여 원추형 콘을 설치하였다. 또한, 전기삼투 압밀공법 적용전후의 지반특성변화를 분석하기 위하여 콘관입시험 및 실내역학실험을 실시하여 강도증진효과를 비교분석하였다.

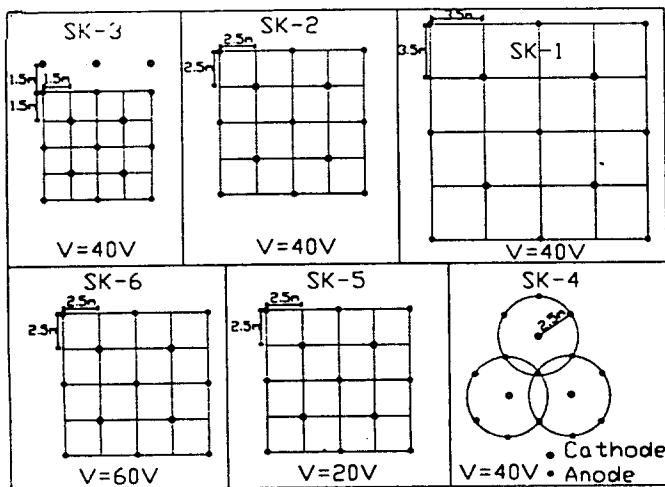


그림 1. 전극 배치도

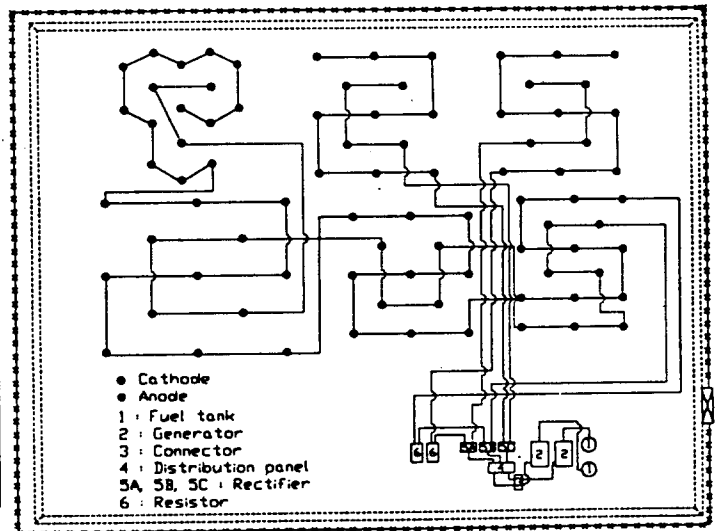


그림 2. 전원공급 배치도

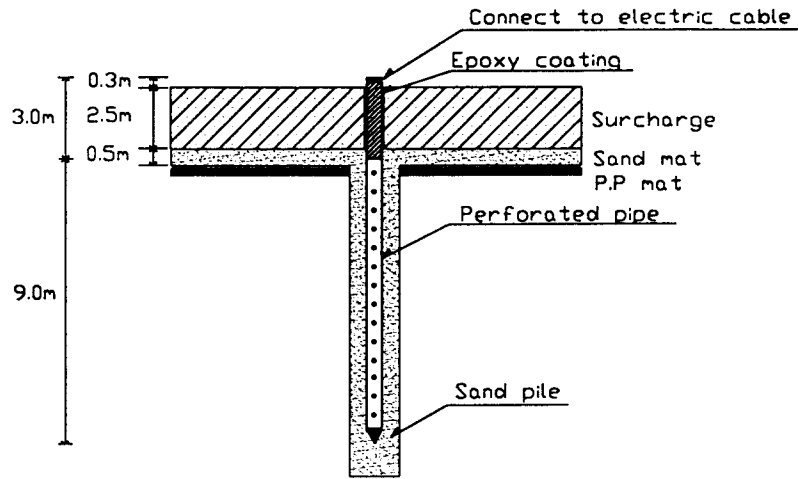


그림 3. 전극설치 단면도(음극)

3. 실험결과 및 분석

3.1 전기삼투 압밀배수공법의 효율성

선재하공법 및 샌드드레인공법과의 비교를 통한 전기삼투 압밀공법의 효율성을 살펴보기 위하여 각 공법별로 본 현장실험 조건에 대한 침하량을 계산하여 그림 4에 이론 및 실측치를 비교하였다. 전기삼투 압밀공법의 경우 전극간격 1.5m, 전압 40V일 때 발생하는 침하량을 기준으로, 샌드드레인공법의 경우 드레인간격 1.5m일 때의 계측결과를 바탕으로, 선재하공법의 경우 이론침하량을 계산하여 비교하였다. 163일 경과후 선재하공법은 약 32%의 압밀도를 나타내며 샌드드레인공법은 약 67%의 압밀도를 나타냈으며, 전기삼투 압밀공법은 약 87%인 것으로 나타났다. 선재하공법 대비 침하발생량은 샌드드레인공법 적용시 113%, 전기삼투 압밀공법의 경우 175% 증가를 보여주고 있으며 샌드드레인공법 대비 전기삼투압밀공법 적용시 약 30% 증가됨을 알 수 있다.

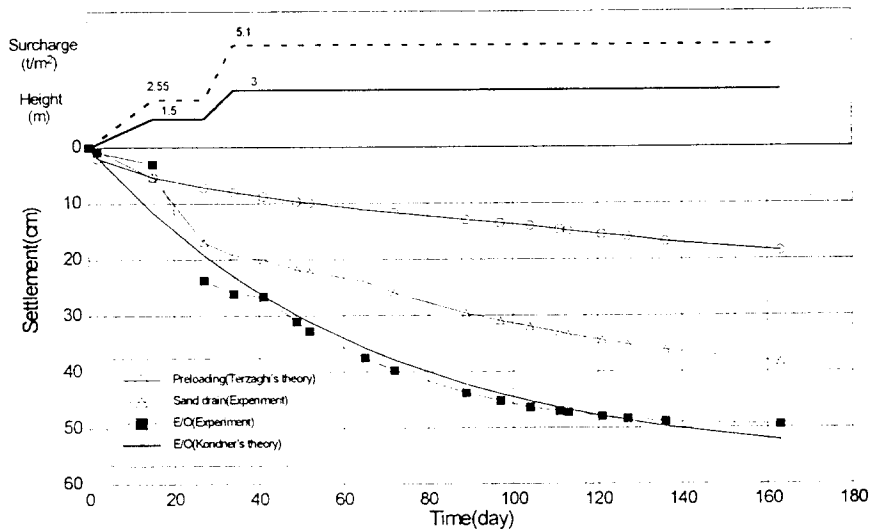


그림 4. 공법별 침하량 비교

3.2 전기삼투 적용에 따른 지반강도 변화

전기삼투 적용후의 강도증진효과를 검토하기 위하여 콘관입시험을 실시하였으며 심도별 콘선단저항력 (q_c)을 그림 5에 나타내었다. 전기삼투적용에 따른 개량후 선단저항력은 깊이 6m까지 최대 $12\text{kg}/\text{cm}^2$, 평균 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 을 나타내다가 6m이하에서는 오히려 개량전보다 선단저항력이 감소하는 현상을 보여준다. 또한, 깊이 6m까지는 전압크기 및 전극간의 거리에 비례하는 경향을 나타내나 그 이하의 경우 전압크기에 반비례하는 경향을 나타낸다. 이러한 현상은 처리심도에 따른 지반내 전기저항, 전압 지중전달 부족 및 간극수의 전해질 영향에 의한 것으로 판단된다. 한편, 적용후의 강도증진효과를 검토하기 위하여 깊이 3m와 6m에서 자연시료를 채취하여 일축압축(UA) 및 삼축압축(UU)시험을 실시하여 그림 6에 나타내었다.

공법적용전 일축압축시험을 통한 점토의 압축강도는 평균 $0.2\text{kg}/\text{cm}^2$, 공법적용후 평균 $0.27\text{kg}/\text{cm}^2$ 으로 약 35% 강도증진효과가 있는 것으로 나타났다. 한편, 비압밀 비배수 전단강도시험(UU)결과에 의하면 공법적용후 약 6% 강도증진효과가 나타났다.

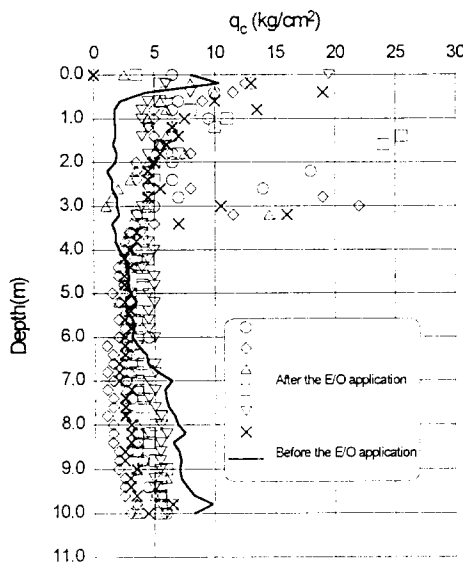


그림 5. 깊이별 콘선단저항력 변화

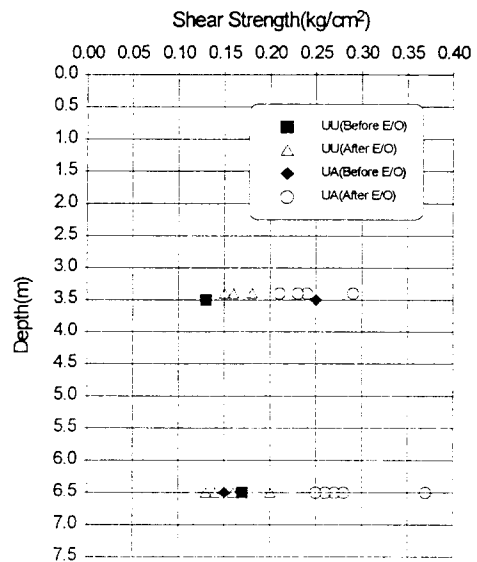


그림 6. 전기삼투 적용전후 지반강도 변화

3.3 전기삼투 영향인자 분석

3.3.1 전극간 거리

전압을 40V로 고정시킨 채 전극간 거리 1.5m, 2.5m 및 3.5m일 경우의 발생침하량을 계측하였으며 그림 7에 시간에 따른 침하량을 나타내었다. 163일 경과후 전극거리 3.5m인 경우 발생침하량 34.5cm를 기준으로 2.5m인 경우 16%, 1.5m인 경우 44% 증가함을 알 수 있다. 따라서, 전극간 거리가 가까울수록 침하량은 증가하며 소요 압밀침하량에 도달하는 기간이 단축될 수 있음을 나타내나 현장에서의 시공성 및 경제성을 고려한 적정거리 선정이 추천된다. 실험현장 지반의 전압통전성 및 통전시 지반내 전압분포를 살펴보기 위하여 전압 20V, 40V, 60V인 경우의 전극간 전압분포를 전압측정봉을 이용하여 살펴보았으며 그림 8과 같다. 전극간격 2.5m일 때의 실험조건에 대하여 0.5m 간격으로 전극봉을 삽입하여 전압측정을 실시하였으며 전극거리에 따라 양극에서 음극으로 선형적으로 감소함을 나타낸다. 이와 같은 결과로 미루어 볼 때 본 현장조건에서의 전압통전율은 계획전압의 1/10에서 1/14정도임을 알 수 있다.

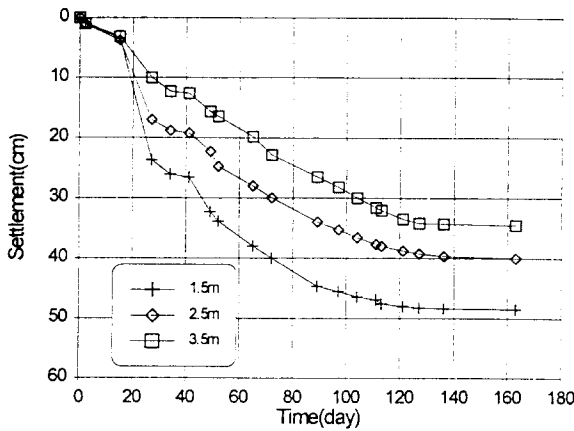


그림 7. 전극거리별 침하량(전압 40V)

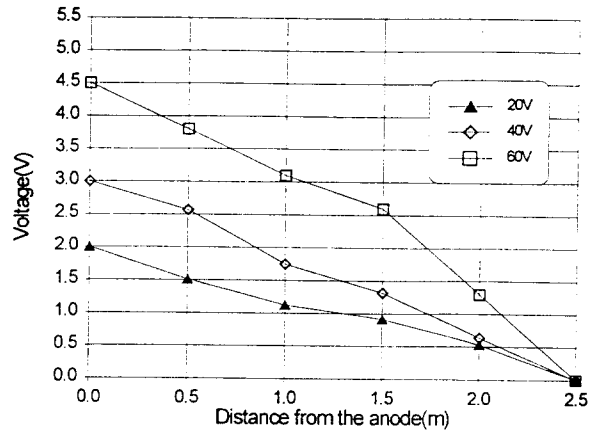


그림 8. 전극간 전압분포

3.3.2 적용전압

전극간 거리를 2.5m로 고정하고 전압크기를 각각 20V, 40V 및 60V 적용한 경우의 시간에 따른 침하량을 그림 9에 나타내었다. 163일 경과후 20V 적용시 발생침하량 35cm를 기준으로 40V인 경우 14%, 60V인 경우 41% 증가됨을 알 수 있다. 따라서, 전압이 증가할수록 일정 기간내 발생하는 침하량은 증가하나 적용전압에 따라 소요전압을 발생시키기 위한 비용이 비례적으로 증가함을 고려해야 한다.

3.3.3 전극배치

전극간 거리 2.5m, 사용전압 40V일 때의 발생침하량을 예측하였으며 그림 10에 시간에 따른 침하량을 나타내었다. 전체적으로 전극배치 형태와는 무관하게 비슷한 경향을 보여주며 특히, 사각 및 원형배치의 경우 초기에 거의 같은 값을 나타내다가 110일 이후 차이가 발생한다. 침하량은 사각형, 원형, 일자형 배치순으로 크게 나타나며 각 배치형태간 침하량 크기는 약 2cm 정도로 큰 차이를 나타내지 않는다. 전극배치 형태가 시공성 및 경제성에 미치는 영향에 비교할 때 상대적으로 전극배치에 따른 발생침하량의 차이는 극히 적은 것을 알 수 있다.

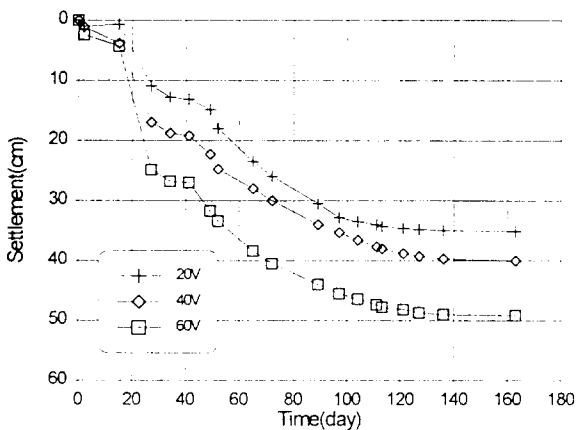


그림 9. 적용전압별 침하량(전극거리 2.5m)

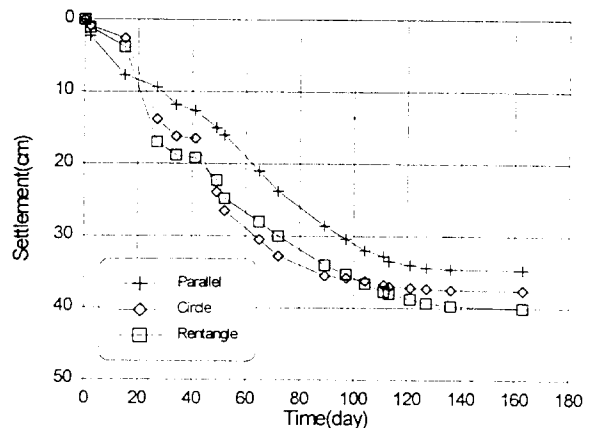


그림 10. 전극배치별 침하량(전극거리 2.5m, 전압 40V)

4. 결론

서해안에 인접한 연약지반을 대상으로 전기삼투 압밀공법의 효율성 및 적용성을 검토하기 위하여 현장 실험을 실시하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 전기삼투 압밀공법의 효율성 및 효과를 검증하기 위한 실험결과 동일조건하에서 비교시 전기삼투 압밀공법의 경우 압밀침하량은 선재하공법 대비 약 175%, 샌드드레인공법 대비 약 30% 증가한 것으로 나타났으며 기존공법에 비해 압밀기간의 단축에 매우 효과적인 것으로 판단된다.
- (2) 실험전후 콘관입시험결과 약 240% 콘선단저항력이 증가하였고 실내실험을 통한 비배수 강도는 약 35% 증가하였다.
- (3) 전압크기가 압밀침하량에 미치는 영향 분석결과 적용전압 증가에 따라 압밀침하량이 크게 발생하는 것으로 나타났으나 전압발생을 위한 비용에 반비례하는 것으로 나타났다.
- (4) 전극간 거리가 압밀침하량에 미치는 영향 분석결과 전극간 거리증가에 따라 압밀침하량이 작게 발생하였다.
- (5) 전극간 거리를 고정하고 전극배치를 변화시켰을 때 사각형, 원형, 일자형 배치순으로 침하량이 크게 발생하였으나 압밀침하량 차이는 미미한 것으로 경제성 및 시공성을 고려할 때 사각형 배치가 가장 효과적이라 판단된다.
- (6) 현장실험결과 전기삼투기술을 이용한 지반개량시 압밀침하 증진효과, 지반강도 증진효과 및 효율성 향상이 나타났으나 실용화를 위한 선결과제로 다음과 같은 문제점이 도출되었다.
 - 전기효율 극대화를 위한 지반내 전기흐름 영향인자들에 대한 조사.
 - 전기삼투흐름에 영향을 미치는 간극수내 이온의 종류 및 농도에 대한 깊이 있는 연구. 특히, 지중 간극수내의 높은 농도를 갖는 염분성분이 전기삼투흐름에 미치는 영향에 대한 조사 진행.
 - 전기흐름 및 저항에 영향을 미치는 지반내 토질 종류 및 토립자를 형성하고 있는 광물입자들에 대한 특성 파악.
 - 지반내 전류흐름에 의한 전극재 종류별, 성분별 부식현상에 대한 이해.
 - 전기삼투를 고려한 압밀해석모델의 개발.

5. 참고문헌

1. Barron, R. A.(1948) "Consolidation of fine grained soils by drain wells", *Trans. of ASCE*, 113, pp. 718 ~742.
2. Esrig, M.I.(1968), "Pore pressure, consolidation and electrokinetics", *Jour. Soil Mech. and Found. Div.*, 94(4), pp. 899~922.
3. Kondner R. L. and Boyer W. C.(1957), "Research on the use of Electroosmosis in the stabilization of fine grained soils", *Proc. Highway Research Board*, 36, pp. 783~793.
4. Lo, K. Y, Incullet, I. I. and Ho, K. S.(1991), "Field test of electro-osmotic strengthening of soft sensitive clay", *Canadian Geotechnical Journal*, 28(6), pp. 74~83.