

A Study of Improvement Pile friction in Marine Clay using Electrokinetics Treatment

¹⁾, Kwang-Yeol Lee, ²⁾, Tae-Gon Gu, Daniel Tjandra²⁾, ²⁾, Jae-Duck Hyun

- 1) , Professor, Dept. of Civil Engineering, Dongseo University
2) , Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dongseo University
2) , Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dongseo University
2) , Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dongseo University

SYNOPSIS : The objective of this study is to enhance the ultimate bearing capacity of piles embedded in marine clay by electrokinetic(EK). The focus of improvement is at interface between soil and pile. A series laboratory test was performed in EK cell. In each of test, the pile in the centre as anode is surrounded by cathode and it was installed in the vicinity of pile with triangular layout. The pile was made by stainless and embedded with 30cm of depth. Afterward, the DC voltage was applied to electrode over period of time. It caused flowing water from anode to cathode, thus the soil in the center of box has higher bearing capacity value than in the side of box has. It is shown by increasing of un-drained shear strength(C_u) near the pile and also ultimate bearing capacity of pile increase after EK treatment. In the future work, the continuous of this study is finding the effective DC voltage and makes EK treatment more applicable in the field.

Key words : ultimate bearing capacity, electrokinetic, un-drained shear strength

1. 서론

최근 들어 해안지역의 개발이 확대되면서 대심도 초연약지반에서의 지지력 확보에 큰 어려움이 따르고 있다. 대심도 연약지반에서 말뚝기초를 적용하는데 있어 말뚝의 길이가 길어지면서 구조물의 하중에 의해 편심의 위험성이 있으며, 시공장비의 문제점과 더불어 말뚝타설시 주변지반의 교란으로 말뚝 지지력의 감소 등의 문제점 때문에 말뚝의 수를 증가시키고 근입깊이를 짧게 하여 말뚝의 선단이 기반암에 미치지 못한 상태의 시공사례가 발생한다. 이렇게 부득이 말뚝의 선단부가 기반암에까지 도달시키지 못하는 경우에 말뚝의 지지력을 크게 하기 위하여 직경이 증가된 말뚝을 사용하거나 말뚝의 수를 늘려 말뚝의 마찰력을 이용하여 지지력을 증가시키는 방법이 일반적인 대책이다. 하지만 이러한 준설연약지반과 대심도 연약지반에서는 지반의 마찰력이 작기 때문에 이에 대한 보완공법의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 대심도 연약지반 말뚝기초시공의 문제점을 보완하고자 말뚝의 마찰력에 의한 상재 하중을 견딜 수 있는 마찰말뚝의 필요성과 마찰력 증진 공법의 필요성이 대두되어지고 있다.

표 1. 전기동력을 이용한 지반개량 시 개량효과에 영향을 미치는 인자

	영 향 인 자	특 징
지반조건	토립자의 크기와 광물성분	· 2 μ m보다 큰 성분을 30%이상 함유하는 지반에서 효과적 · 고소성 점토보다 중저소성 실트질 점토에서 효과적
	염분 함유율	· 염분함유율이 높은 지반에서는 효과적이지 못함
	pH	· pH < 4인 지반에서는 거의 효과가 없음 · pH > 9인 지반에서는 염분함유율이 많아도 효과가 좋음
	투수계수	· 지반의 투수계수(k_h)에 대한 전기동력 투수계수(k_e)의 상대적인 크기가 클수록 효과적
적용방법	전류밀도	· 흙의 종류 및 상태에 따라 큰 차이를 보임
	전극재의 종류	· 은, 백금, 구리, 황동 등의 전극재는 전기전도율이 우수 · 경제성을 고려한 경우 강철 재료가 유리
	전극재의 배치형태	· 지반조건에 따라 배수방향(수평, 수직) 결정 · 적절한 전극재의 간격과 설치깊이의 결정이 중요

연약 점토층처럼 압축성이 큰 지반에 시공한 말뚝기초에서는 말뚝주변의 지반이 말뚝보다 상대적으로 많이 침하하는 경우가 발생한다. 이때 말뚝 주변의 전단응력은 하향으로 작용하며 이를 부주면마찰력이라 한다. 부주면마찰력은 말뚝에 Downdrag 하중으로 작용하여 말뚝의 지지력을 감소시킬 뿐 아니라 경우에 따라서는 설계하중이 극한지지력을 넘어서서 구조적 파괴를 발생시키기도 한다. 그러므로 주면마찰력의 정확한 산정은 말뚝의 설계, 시공 및 해석시 안전을 확보의 관건이라 할 수 있다.

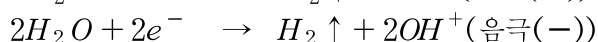
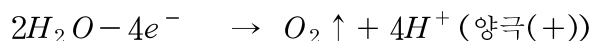
Casagrade(1949)가 실트지반에 전기삼투(Electro-Osmosis)공법을 처음 적용한 이래 Bjerrum 등(1967)이 노르웨이의 Quick Clay에 이 공법을 적용하면서 실트 및 점토지반의 개량을 위한 공법으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 이들 연구의 초기단계에는 지반내 간극수의 염분 함유율이 2g/l 이하인 지반에서의 전기삼투로 인한 압밀축진 효과를 주로 연구하였으나, 최근 해상매립 및 해상구조물 공사가 늘어나면서 30g/l 이상의 염분을 함유하고 있는 지반에서의 강도 증진을 위하여 전기동력(Electrokinetics)을 이용한 공법을 연구하고 있다.

본 연구에서는 부산 강서구 용원의 남해안에서 채취한 해성점토를 대상으로 고염분 지반에서의 전기동력에 의한 말뚝의 마찰력 증진을 알아보기 위하여 모형토조시험을 수행하였다.

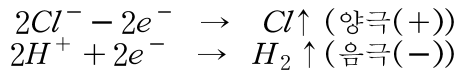
2. Electrokinetics의 정의

지중 내에 설치된 전극에 직류 전류가 가하여지면, Electro-Kinetic 현상이 발생하여 흙-물-전해질 시스템이 물리, 화학, 수리학적으로 변화되며 전기삼투, 전기이온이동 등의 현상이 발생한다. 전해질은 수용액이나 용융상태에서 (+), (-) 이온으로 이온화되는데 여기에 직류 전류를 통하면 두 이온은 각각 반대극으로 끌려가서 전하를 잃고 중성물질로 된다. 이 때 전극에서의 전자는 전원의 음극(-)으로부터 양극(+)으로 흐른다. 이 때 음극(-)에서는 용액에 전자를 내어놓고, 양극(+)에서는 용액으로부터 전자를 얻어서 전극 바로 주위에서 물이 이온화되어 전기분해가 생긴다. 따라서, 아래에 서술된 전기분해 반응식과 같이 양극(+)에서는 물의 산화가 일어나고, 음극(-)에서는 물의 환원이 일어나므로 간극수가 순수한 물인 경우 산소가 방출되고 음극(-)에서는 수소가 발생하며 NaCl이 존재하는 경우에는 음극(-)에서는 수소가 양극(+)에서는 염소가 발생한다. 이러한 전기화학적 현상을 분자식으로 설명하면 다음과 같다.

NaCl, 0 mole인 경우



NaCl, 0.01, 0.1, 1 mole인 경우



그리고 양극(+)에서는 산전선(acid front)이 생성되고 음극(-)에서는 염기전선(base front)이 형성된다. 따라서 전기분해 현상에 의하여 양극(+)에서는 전자가 방출되는 산화 현상이 발생하여 전극의 질량이 소모된다.

이와 같이 전기분해에 의하여 양극(+)에서 생성된 H⁺이온군의 산전선은 극성에 따라 음극(-)방향으로 진행하려고 하고 음극(-)에서 생성된 OH⁻이온군의 염기전선은 양극(+)방향으로 진행하려고 할 것이다. 그런데 전기삼투 현상에 의하여 양극(+)에서 음극(-)으로 향하는 물에 편승하여 H⁺이온이 음극(-)방향으로 이동하는 이류현상이 발생하여 H⁺이온의 이동성이 OH⁻이온의 이동성보다 크게 된다. 이로 인해 결과적으로 산전선이 염기전선보다 빨리 이동하게 된다. 그러므로 시간이 경과함에 따라서 음극(-)에서 생성된 염기전선은 이동이 지체되고 양극(+)에서 생성된 산전선은 지반을 통과하여 음극(-)으로 진행하게 된다. 따라서 산전선이 지반의 화학작용을 지배하게 된다. 산전선의 이동현상에 의하여 지반내의 pH값이 감소하게 되는데 감소정도는 양극(+)에서 생성된 kaolinite의 산에 대한 완충능력에 따라 변한다.

3. 흙의 특성

본 논문에서 사용한 시료는 경남 진해시 용원의 남해안에서 채취하였고, 밝은 회색의 해성점토로서 현장에서 채취한 시료는 슬러지 상태이며 평균함수비가 68.19%로 측정되었다. 채취한 시료는 각종 유기물질과 조개껍질 등이 포함되어 있어 균일성을 확보하기 위하여 #40를 이용하여 체가름을 실시하였다. 비중시험, 액성한계, 소성한계 등의 물성시험을 통해 통일분류법의 의한 흙의 공학적 분류는 ML/CL인 것으로 분류되었다. 또한 염분비시험, 유기물함량시험(중크롬산화법, 3회 실시), pH시험, XRF, SEM분석을 실시하여 시료의 특성을 파악하였다.

표 2. 시료의 물성시험결과 요약

함수비 (%)	비중	액성한계 (%)	소성한계 (%)	염분비 (g/L)	유기물 함량 (%)	입도			USCS	pH
						자갈(%)	모래(%)	점토(%)		
68.19	2.709	35.41	28.41	17.3	6.18	0	26.82	73.28	ML/CL	9.08

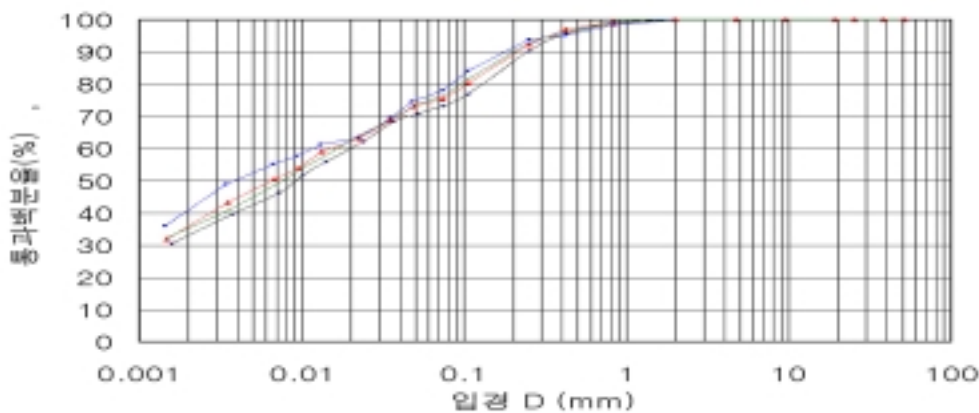


그림 1. 입도분석결과

4. 실험방법

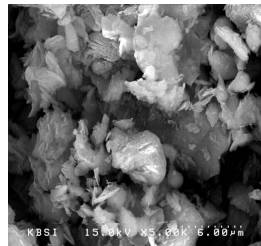
말뚝모형실험은 선단저항력과 마찰저항력이 측정 가능한 모형말뚝과 하중재하장치, 아크릴토조를 제작하여 현장에서 채취한 준설풀토를 이용하여 모형지반을 아크릴 토조에 형성하였다. 이 모형 지반에 그림 3의 (b)와 같이 모형말뚝을 30cm 관입하면서 선단저항력과 마찰저항력을 1차 측정한 후, 일정시간 전기동역 적용후 10cm 추가관입을 하여 2차 측정을 하였다. 전극봉을 삼각형으로 배치하여 직류전압장치를 이용하여 말뚝에는 양(+극)을 전극봉에는 음(-)극을 적용하였다. 양전극간 거리가 20cm이므로 전압강사 1V/cm를 적용하기 위하여 20V의 직류전압을 가하였으며, 전압계를 이용하여 양 전극재 사이에 전압과 전류 측정용 탐침을 설치하여 적용시간마다 측정하였다. 시간에 따른 말뚝의 지지력변화를 분석하기 위하여 전기동역학(Electrokinetics) 적용시간을 3시간, 6시간, 12시간, 24시간씩 4단계로 적용한 후 추가 10cm 관입하면서 선단저항력과 마찰저항력을 측정하였다. 전기동역학에 의한 지반 내 영향을 분석하기 위하여 말뚝과 전극간 거리비(x/L)가 0, 0.25, 0.5, 0.75, 1의 5개 지점에서 XRF, SEM분석과 적용시간별로 pH분석, 함수비 변화를 측정한다. 그리고 Vane 시험을 통해 양전극간 거리비와 심도별로 실험을 실시하였다. 각 실험의 측정위치 및 전극설치를 그림 3에 나타내었다.

표 3. 화학적 조성분석 결과

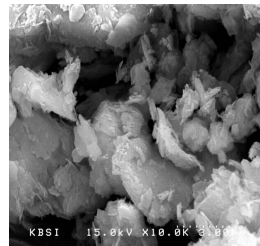
화학생분	함유율
SiO ₂	60.39
Al ₂ O ₃	16.27
Fe ₂ O ₃	5.84
MnO	0.09
CaO	1.67
MgO	2.11
K ₂ O	2.84
Na ₂ O	2.14
P ₂ O ₅	0.1
TiO ₅	0.74
LOI	7.51
Total	99.70

표 4. 유기물함유량 시험결과

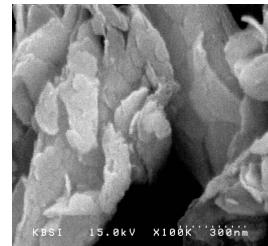
시 료	S-1	S-2	S-3	평균
유기물함유량	6.13	6.22	6.20	6.18



<배율 ×5000>



<배율 ×10,000>

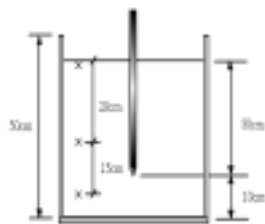


<배율 ×100,000>

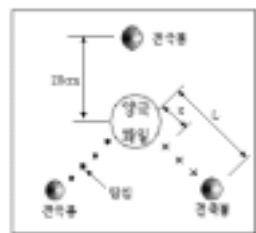
그림 2. SEM 촬영사진



(a)모형토조 및 하중장치



(b)말뚝관입심도



(c)전극배치 및 간격



(a)말뚝1차관입



(b)전압 적용



(c)말뚝 2차관입



(d)말뚝 인발

그림 3. 모형토조 및 전극설치간격

그림 4. 전기동역학에 의한 말뚝시험

5. 분석

5.1.1 함수비

적용시간에 따른 양 극간 거리비(x/L)에서의 함수비 변화를 그림 5, 6에 나타내었다. 전기동역학 3시간, 6시간 적용 시에 음극(cathode)주변에서 초기함수비보다 약간 증가한 것을 제외하고는 초기함수비보다 감소되었고, 처리시간에 따른 함수비 증가율은 말뚝(+전극)으로부터의 이격거리가 멀어질수록 감소하는 경향을 보였다.

5.1.2 pH

적용시간에 따른 양 극간 거리비(x/L)에서의 pH의 변화를 그림 7, 8에 나타내었다. pH의 경우 양극(anode)에서는 물의 산화가 일어나고 음극(cathode)에서는 물의 환원이 일어나므로 양극(anode)에서는 산전선(acid front)이 생성되고 음극(cathode)에서는 염기전선(base front)이 형성된다. 말뚝으로부터 이격거리가 멀어질수록 시간경과에 따른 pH값이 감소하는데 x/L=0.67정도에서는 pH값이 정지되었다가 이 지점을 지나면서 시간경과에 따른 pH값은 오히려 증가한다.

5.1.3 토립자의 구조

전기동역학 적용 후 양전극간 위치에 따라 SEM(Scanning Electron Microscope) 촬영결과를 각 배율로 그림 9에 나타내었다. 말뚝(x/L=0, +전극)에서 음극으로 갈수록 흙의 입자 구조가 느슨해지는 것을 볼 수 있다. 이는 지반 내 물이 양극(anode)에서 음극(cathode)으로 이동함으로써 말뚝(+전극) 주변의 지반이 함수비 저하로 인해 더 견고해진 것으로 판단된다.

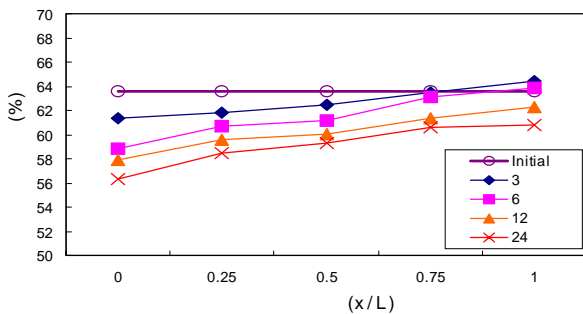


그림 5. 이격거리에 따른 위치별 함수비 변화

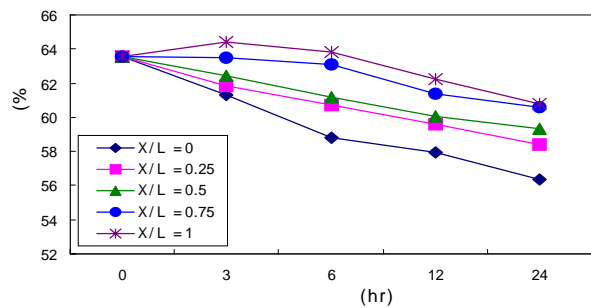


그림 6. 적용시간에 따른 위치별 함수비 변화

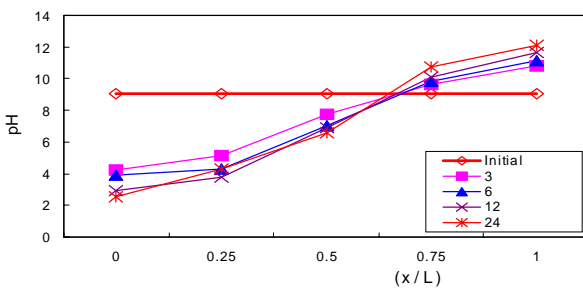


그림 7. 이격거리에 따른 위치별 pH 변화

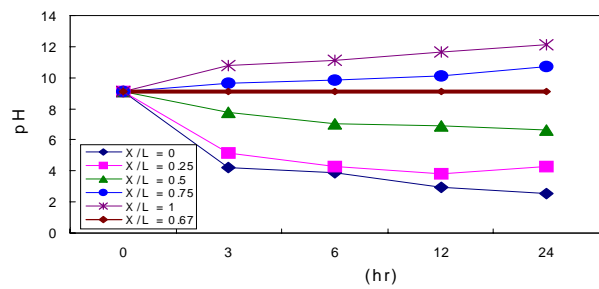
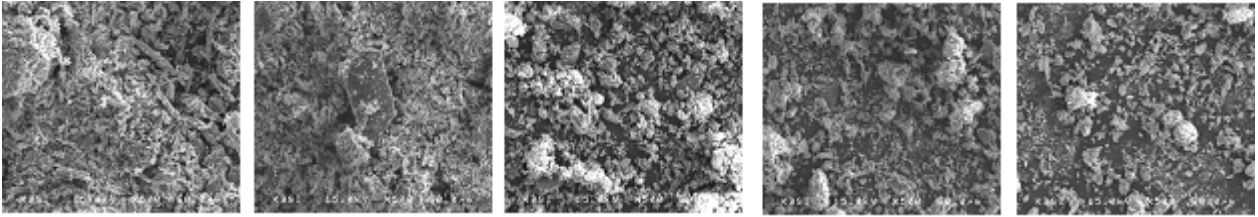
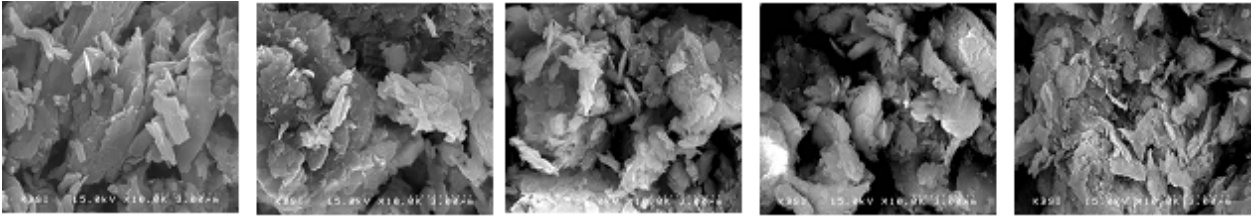


그림 8. 적용시간에 따른 위치별 pH 변화

<배율 : ×500 >



<배율 : ×10000 >



<x/L = 0>

<x/L = 0.25>

<x/L = 0.5>

<x/L = 0.75>

<x/L = 1.0>

그림 9. SEM 촬영에 의한 흙구조

표 5. 전기처리 후 흙의 성분분석결과

성분 \ 위치(x/L)	0(양극)	0.25	0.5	0.75	1(음극)
Na	-	3.98	14.909	10.742	11.235
Mg	-	3.893	7.322	7.737	8.219
Si	78.039	50.321	58.769	60.348	60.778
P	-	0.477	0.274	0.265	-
S	-	0.25	0.152	0.16	0.192
K	-	23.101	11.898	13.726	12.86
Ca	-	8.253	3.612	3.671	3.638
Ti	-	9.726	3.063	3.35	3.078
W	21.961	-	-	-	-
Total(%)	100	100	100	100	100

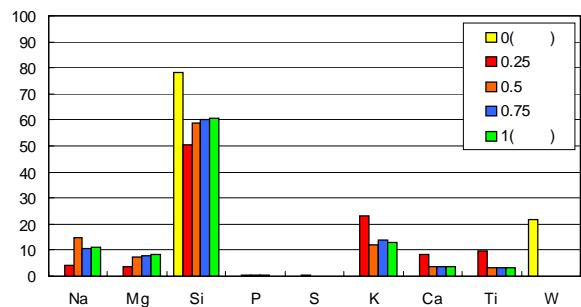


그림 10. 위치별 XRF 광물 성분분석결과

5.1.4 흙의 성분

양전극간 거리비에 따라 24시간 전압을 적용한 모형토조 내에서 시료를 채취하여 XRF(X-RAY Fluorescence spectrometry) 시험을 실시하였다. 양극(x/L=0)에서 채취한 시료는 전압적용 후 모형말뚝에 고착되어진 시료를 채취하여 분석시험결과 실리카(Si) 성분과 텅스텐(W) 성분이 주를 이루었다. 이것은 스텐레스강으로 만들어진 말뚝이 전기분해로 인해 텅스텐 성분이 분해되어진 것으로 보이며, 마그네슘(Mg) 성분이 음극(cathode)으로 갈수록 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 표 5와 그림 10에 그 결과를 나타내었다.

5.2 비배수 전단강도

전기동력 적용후의 비배수 전단강도 시험결과를 이용하여 적용시간별로 나타낸 결과 양극간 거리비(x/L)가 0.75와 1(음극)에서 6시간 전기동력을 적용하였을 때 약간 감소하는 경향이 나타났으나, 이를 제외하고 적용시간이 증가할수록 모든 위치에서 비배수 전단강도가 증가하는 것으로 나타났다. 그림 11~13에 전기동력(Electrokinetic) 적용후의 측정깊이와 양극간 거리비(x/L)별로 비배수 전단강도를 나타내었다.

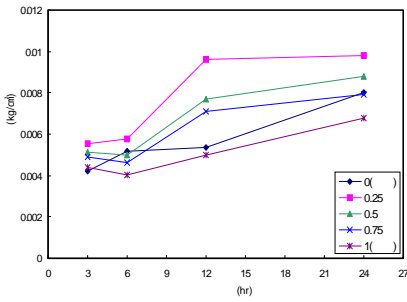


그림 11. EK 적용시간에 따른 비배수전단강도 변화(표면)

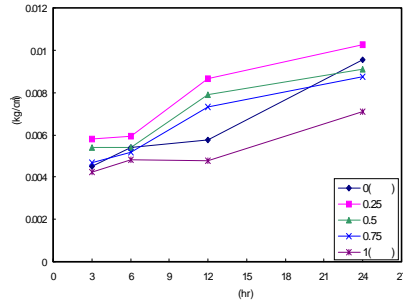


그림 12. EK 적용시간에 따른 비배수전단강도 변화(20cm)

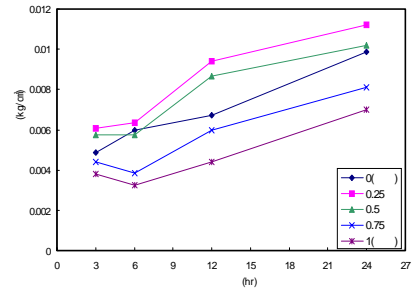


그림 13. EK 적용시간에 따른 비배수전단강도 변화(35cm)

표 6. 전기동력(Electrokinetic) 적용전후의 말뚝 저항력 변화

항 목 적용시간	마찰저항력(kg)		선단저항력(kg)		총저항력(마찰+선단)(kg)	
	Initial	Treatment	Initial	Treatment	Initial	Treatment
3시간	1.10	5.63	1.5	7.4	2.60	13.03
6시간	1.0	7.60	1.5	9.8	2.50	17.4
12시간	1.13	13.81	1.8	19.1	2.93	32.91
24시간	1.04	16.87	1.6	21.8	2.64	38.67

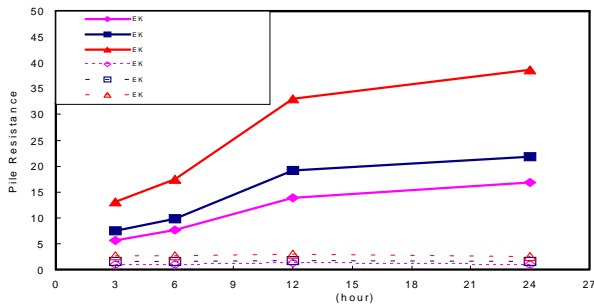


그림 14. EK 적용전후의 말뚝저항력

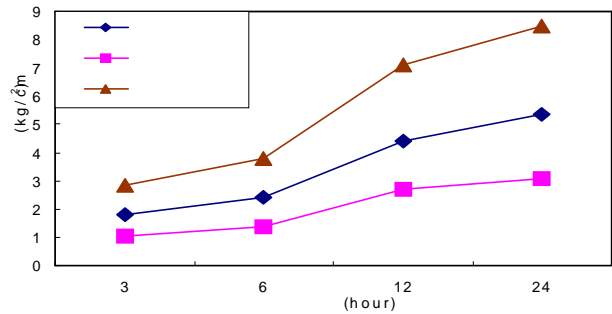


그림 15. EK 적용후의 말뚝지지력

표 7. 전기동력(Electrokinetic) 적용후의 말뚝지지력 변화

항 목 적용시간	주변마찰력 (kg/cm ²)	선단지지력 (kg/cm ²)	극한지지력 (kg/cm ²)
3시간	1.79	1.04	2.84
6시간	2.42	1.39	3.81
12시간	4.40	2.70	7.10
24시간	5.37	3.09	8.46

5.3 총지지력

전기동력(Electrokinetic) 적용시간에 따른 지지력을 나타내었다. 전압적용후의 2차관입시에 측정된 최대 마찰저항력과 최대 선단저항력을 나타내었으며, 마찰저항력과 선단저항력의 합으로 산정되어진 말뚝 총저항력의 최대값을 표 6에 나타내었다. 표에서 보듯이 전기동력 적용시간에 비례하여 각 저항력은 증

가함을 알수있는데, 12시간 이후에는 저항력 증가폭이 감소되는 경향을 나타냈다.

본 연구에 사용한 파일은 직경 3cm, 길이 30cm로서 파일 하부의 마찰 측정 가능한 부분은 10cm이다. 마찰측정부분의 면적과 선단면적으로 측정되어진 저항력에 나누어 지지력을 구하였다.

그 결과를 표 7에 나타내었다. 그림 15에서와 같이 총지지력은 전기동역(Electrokinetics) 적용시간에 비례하여 증가함을 알 수 있었다.

6. 결과

본 연구에서는 최근 국내 연약지반 개량기술로 연구되어지고 있는 전기동역학(Electrokinetics) 이론에 근거해 실험하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형지반 양극(anode) 주변의 함수비가 감소함으로서 지반이 견고해지고 비배수 전단강도가 증가함을 알 수 있었다.
2. 모형 지반 내 함수비는 전기동역학 적용처리시간에 비례하여 양극 주변은 최대 56.37%까지 감소하였다.
3. 지반 내 물이 양극(anode)에서 음극(cathode)으로 이동함에 따라 양극 주변 pH가 낮아져 지반은 산성화(pH 2.54) 되었다.
4. 전기동역학 처리 후 말뚝(+전극)으로부터 거리비(x/L)가 0.67인 지점에서는 전기동역학 처리전의 pH 농도와 같은데, 이 지점을 중심으로 음극(cathode)으로 갈수록 pH값은 증가함을 보였다.
5. SEM 촬영에 의한 분석결과 말뚝에서 멀어질수록 토립자 구조가 느슨한 것을 알 수 있었다. 이는 지반 내 물이 음극(cathode)으로 이동함으로서 말뚝(+전극) 주변의 지반이 더 견고한 것으로 판단된다.
6. 비배수전단강도는 적용시간에 비례하여 모든 측정거리에서 증가함을 보였는데, 양극재(+)-보다는 거리비 0.25에서 가장 큰 증가를 보였다.
7. 총 말뚝지지력에 있어 6시간에서 12시간의 전기동역 적용 시에 가장 큰 증가폭을 보였으나 12시간 이후에는 증가폭이 감소함을 보였다.

본 연구결과에 따르면 연약지반 말뚝기초공법에서 전기동역학적 처리공법을 적용함으로서 연약지반개량뿐만 아니라 말뚝 지지력 향상에 있어서도 큰 효과가 있는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김수삼, 한상재 (2003). 건설·지반환경 기술자를 위한 동전기 오염지반 정화기술, 구미서관
2. 방준호, 김운형, 한일영 (1996). 연약지반개량을 위한 전기삼투 압밀공법 현장적용성 연구, 96 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, Vol.0, No.0, Startpage 135
3. 이승원, 이영남 (1998). Electrokinetic cill을 이용한 해성점토지반의 개량효과 연구, 한국지반공학회지,지반(한국지반공학회지), Vol.14, No.4
4. 이영남 (2000). E/K를 이용한 연약지반 처리공법 연구(최종보고서), 현대건설
5. Hyun-Ho Lee, Ji-Won Yang, 2000. A New Method to Control Electrolytes pH by Circulation System in Electrokinetics Soil Remediation. Departement of Chemical Engineering, KAIST, 373-1, Kusung-dong, Yung-sung-gu, Taejon, 305-701, South Korea.
6. J.Q. Shang, K.L. Lo, 1997. Electrokinetic Dewatering of a Phosphate Clay. Faculty of Engineering Science, The University of Western Ontario, London, Ont., Canada N6A 5B9.
7. Julie Q. Shang, Wayne A. Dunlap, 1998. Pullout Resistance of High-Voltage Strengthened Ground Anchors, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering