전기가열장치를 이용한 표층지반개량

Improvement of Shallow Soil Using Electric Heating Equipment

박 민 철¹ Park, Min-Cheol임 은 상² Im, Eun-Sang신 백 철³ Shin, Beck-Chul한 희 수⁴ Han, Heui-Soo

Abstract

This paper is to develop the method of surface soil improvement by electric heating equipment. For this purpose, the electric heating systems were invented to apply to the in-situ soil. Laboratory tests were done to study the behaviors of sea clays by electric heating. In lab tests, two different heating temperatures, 70°C and 110°C, were applied to the saturated clays to examine the relationship between evaporation and compaction. In addition, trafficability was analyzed to the heated by applying cone penetrometer to the heated clays. Furthermore, in-situ tests were conducted to analyze the range of soil improvement and strength variations. The temperature changes in field were measured and they were compared with those of the commercial program (Temp/W). Also, the bearing capacities of electrically heated field were tested by PBT (plate bearing test). Several conclusions were derived from the results of the numerical analysis and tests (lab and field). The improvement ranges and strength variations of electrically heated soil depended on the heating temperature and time. If the heating temperature is more than 100°C evaporating the ground water, the bearing capacity and settlement increased rapidly. The bearing capacities of in-situ soil increased more than 3 times, and heated soil emitted a lot of vapors. The soil around electric heater was sintered completely, and its range was almost 20 cm.

요 지

본 논문은 전기가열장치를 이용한 표층지반 개량방법을 개발하기 위한 것으로, 현장 지반에 적합한 전기가열 장치를 개발하여 연구하였다. 전기가열에 의한 해상점토의 거동을 해석하기 위하여 실내실험을 하였으며, 실내실험 시 70°C와 110°C의 두 가지 온도를 이용하여 포화점토의 증발과 압축의 상호관계를 검증하였다. 또한 가열지반에 콘관입기를 이용하여 중장비의 주행성을 시험하였다. 나아가, 지반개량 및 강도변화 범위를 분석하기 위하여 현장실험을 하였다. 현장지반의 온도변화를 측정하였으며, 그 결과는 상용 프로그램(Temp/W) 해석치와 비교하였다. 또한 평판재하시험을 이용하여 전기 가열된 현장지반의 지지력을 평가하였다. 전기 가열된 지반의 개량범위와 강도변화는 가열온도와 시간에 의존하였다. 가열온도가 지하수를 증발시킬 수 있는 100°C 이상이면, 지지력과 침하량이 급격히 증가하였다. 지반의 지지력은 3배 이상 증가하였고, 가열지반은 많은 수증기를 배출하였다. 전기가열기 주변 약 20cm 범위의 흙은 완전 소결되었다.

Keywords : Ground improvement, Electric heater, Trafficability, Cone penetrometer, Evaporation

1 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

2 정회원, 수자원공사 기반시설연구소 책임연구원, (Principle Researcher, Infrastructure Technology Center, K-Water Institute, KOWACO, Tel: +82-42-870-7633, Fax: +82-42-870-7639, esim89@kwater.or.kr, 교신저자)

3 비회원, 한화건설(주) 토목환경사업본부 소장 (Project Manager, Civil Works & The Environment Division, Hanwha Engrg. & Construction Corp)

4 정회원, 금오공과대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2013년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 급속한 경제성장과 더불어 농업용지 및 주거용지의 수요가 날로 증가하였지만 지반조건이 양호한 사업지구의 확보가 어려워짐에 따라 지반조건이 불량하고 개발여건이 열악한 연약지반 사용이 불가피한 상태이다. 그러므로 이에 대한 효율적인 연약지반 개량방안이 요구되고 있고, 경제적으로 수요자의 요구를 충족시킬 수 있는 해안용지의 개발이 증가되고 있다.

국내 연약지반 처리공법은 구조물 하중의 일정부분을 상재하중으로 미리 재하하는 선행재하공법(Pre-Loading)과 함께 현장지반의 투수계수를 증가시키거나, 배수거리를 줄여서 압밀시간을 단축시키는 샌드드레인 또는 PBD공법을 병행하는 방법이 많이 시행되고 있다. 하지만 최근 들어 상재하중 및 샌드드레인으로 사용되는 양질의 사질토를 확보가 어려우며 성토재의 성토 및 사토로 인한 공사비 증가로 인해, 국내의 연약지반의 현황에 적합한 합리적인 연약지반 개량공법이 필요한 실정이다.

또한, 양질의 성토재의 확보가 어려워짐에 따라 바다에서 쉽게 구할 수 있는 해성점토를 준설패립재료로 이용하는 해안매립공사를 수행하는 경우가 많다. 이러한 준설패립토의 경우 고함수비이고 압축성이 크며 자중압밀 동안에 지반의 지내력이 거의 없는 상태이므로 시공장비의 주행은 물론 사람의 보행조차 곤란하다. 그러므로 연약한 원지반의 개량 및 표층부의 중장비 주행성 확보를 위한 대책공법이 필요하지만 이에 대한 적절한 기술이 확보되지 못하고 있는 실정이다.

따라서 연약지반의 표층을 신속하게 안정화시킬 수 있는 기술 개발의 일환으로, 본 연구는 전기가열장치를 이용한 표층지반개량 공법 개발을 목적으로 파이프히터 방식의 전기가열장치를 고안하고 이를 이용하여 실내시험과 현장시험을 수행하고 지반개량효과와 현장적용성을 연구하는 데 그 목적이 있다.

지반가열에 의한 개량공법은 Beles와 Stănculescu(1958) 및 Litvinov(1961)을 중심으로 하는 소련의 기술자들에 의해 실시되었으며, 점토질 연약지반 속에 보링 후 화석 연료를 넣고 가열하여 주변의 흙을 소결하는 방법이 적용되었으며 소련과 루마니아 등에서 상당수 시공되었다.

표층지반개량은 PTM공법과 진공배수공법, 토목섬유 및 대나무매트공법 등에 대해 연구가 수행되었다. 한국 건설기술연구원(2001)에서 표층건조처리를 위한 PTM 개선 기술 개발에 대해 연구하였으며 PTM공법 적용시

지층함수비, 지표면경사 등의 지반조건, 트렌치간격, 깊이, 형상 등의 트렌치 조건, 복사량, 풍속 등의 기상조건에 따른 준설패립지반 표층의 증발특성, 건조특성을 구체적으로 파악하였다. 수평진공배수공법은 박중배 등(2002)에 의해 연구되었으며, 수평배수공법 적용 이후 약 4개월 경과 후 장비주행성 검토를 수행하였으며, 개량지반위에 Geomat(50kPa, 150kPa)을 깔고 그 위에 모래나 산토를 포설하여 시험을 수행하였다. 각 경우에 있어서 국부적인 융기현상이 발생하였지만 장비주행에 무리가 없는 개량지반으로 판정하였다. 대나무 매트 공법은 대나무망과 저인장강도의 토목섬유 위에 중장비를 직접 탑재하지 않고 복토용 모래포설이 가능하도록 고안된 공법으로, Tommo Tanabe 등(2004)은 오사카항의 준설토를 매립재로 하여 인공적으로 조성된 유메시마의 표층처리에 시멘트계 고화처리 판과 net 형 토목섬유를 이용하여 표층처리를 실시한 시공사례를 보고하였다. 양기석과 강명찬(2004)은 대나무 표층처리 준설패립지반의 지지력특성을 규명하기 위하여 직경 1.5m 원형 철판을 이용한 평판재하시험을 실시한 결과, 대나무 간격이 가로 세로 각각 1.0m일 경우의 토목섬유보다 대나무 이용시 지지력 증대효과가 1.5~1.7배 정도 뛰어난 것으로 보고하였다.

2. 전기가열장치

전기가열장치의 경우 우리나라 산업 전반에 광범위하게 사용되고 있으며 그 종류는 대표적으로 파이프 히터(Pipe Heater)와 카트리지 히터(Catridge Heater) 등이 있다. 본 연구에서는 파이프 히터를 이용하여 연구의 목적에 맞게 전기가열장치를 제작하였다.

Fig. 1(a)는 일반적인 파이프 히터의 구조도를 나타낸 것이다. 일반적인 파이프 히터의 경우 전열선과 보호관 그리고 열전달 매체인 마그네시아(MgO)로 이루어져 있다. 전열선은 KS규격으로는 니켈크롬 1종, 니켈크롬 2종, 철크롬 1종, 철크롬 2종 등으로 분류되며, 본 연구에서 제작된 전기가열장치에는 니켈크롬 1종을 사용하였다. 보호관 혹은 튜브의 경우 국내에서는 일반적으로 스텐(SUS, STP) 304 용접튜브를 사용하며 튜브의 제질은 철, 동, SUS 304, SUS 316L 등을 사용하고 있으며, 본 연구에서는 스텐레스를 이용하였다. 전열선을 고정시키는 열전달 매체인 마그네시아는 파이프 튜브와 카트리지 튜브를 제조하는데 꼭 필요하며 사용하는 이유

(a) Section of pipe heater

(b) Electric heater

Fig. 1. Electric heater

(a) Acryl box

(b) Electric heater

Fig. 2. Electric heat

는 다른 세라믹 물질에 비하여, 고온에서 열전도도가 우수하며, 전기적 절연성이 우수하기 때문이다. Fig. 1(b)는 실내실험에 사용된 전기가열장치를 나타낸 것이다. 가열파이프의 총 길이는 60cm이며 가열부는 50cm, 비가열부는 10cm이다. 가열파이프 외에 온도 컨트롤러와 온도센서, 가정용 전기 콘센트(220V)로 구성되어 있다.

3. 실내 전기가열실험

3.1 실험방법(가열온도 70℃, 110℃)

전기가열온도와 가열시간에 따른 연약지반의 개량효과를 파악하기 위하여 실내 전기가열실험을 수행하였다. 전기가열온도는 70℃와 110℃, 가열시간은 총 96시간을 적용하였다. 이 실험은 현장실험의 예비실험으로,

지하수의 증발 없이 투수계수를 증대시키는 저온가열과 지하수의 증발을 고려한 고온가열의 두 가지 방법의 현장적용성을 검토하기 위한 것이다.

Fig. 2는 실내 전기가열실험 모습을 나타낸 것이다. 대형토조를 이용한 예비실험에서 열원의 영향반경이 약 30cm 정도로 나타났으므로 본 실험에 사용된 아크릴 토조의 크기를 30cm×30cm×60cm(높이)로 하였다. 아크릴 토조의 점토층 하부에 높이 20cm로 표준사를 충전한 후 30cm의 높이로 인천 소래지구에서 채취한 해성점토를 충전하고 전기가열장치를 관입한 후 실험을 수행하였다.

인천 소래지구에서 채취한 해성점토의 실내토질실험 결과는 다음 Table 1과 같다. 실내토질 실험결과, 대부분이 점토로 구성된 연약한 해성점토로 나타났으며, 액성한계가 평균 44%, 소성지수가 평균 21.3의 값을 나타냈다.

Table 1. Result of laboratory soil tests

Part		Unit	Fine-grained soil	
			Range	Average
Specific gravity (G_s)		—	2.67 ~ 2.71	2.68
Water content (W_n)		—	24.80 ~ 60.90	41.44
Grain-size composition	Gravel	%	0.0 ~ 6.59	0.26
	Sand	%	0.0 ~ 29.94	1.46
	Silt	%	0.10 ~ 30.27	1.62
	Clay	%	41.81 ~ 99.93	99.67
Consistency	Liquid limit	%	30.40 ~ 69.0	44.0
	Plastic limit	%	—	—
	Plastic Index	—	6.50 ~ 42.10	21.30
Unconfined compressive strength (q_u)		kPa	31.10 ~ 67.70	47.10
Preconsolidation load (P_c)		kPa	24.0 ~ 26.0	81.0
Compression index (C_c)		—	0.18 ~ 0.50	0.32
Void ratio (e_0)		—	0.51 ~ 1.54	1.10
UU test	Cohesion (c)	kPa	21.20 ~ 80.20	34.0
	Internal friction angle (ϕ)	degree	—	—

(a) After 24 hours

(b) After 48 hours

(c) After 72 hours

(d) After 96 hours

Fig. 3. Changes in marine clay under the surface 70°C heating time elapsed

(a) After 24 hours

(b) After 48 hours

(c) After 72 hours

(d) After 96 hours

Fig. 4. Changes in marine clay under the surface 110°C heating time elapsed

또한, 불교란 시료의 강도시험결과, 일축압축강도 47.1 kPa , 비배수 삼축시험 $c_u = 34.0 kPa$ 인 초연약지반임을 알 수 있다.

3.2 가열로 인한 해성점토의 표면 변화

Fig. 3은 70°C 가열시 시간경과에 따른 해성점토의 표

면변화를 나타낸 것이다. 시간이 증가함에 따라 가열로 인해 점토의 표면이 건조되기 시작하였으며 그 범위가 점점 넓어졌지만, 점토 표면이 완전 소결되지는 않았다. 또한 점토 표면에 균열이 발생되었으며 이 틈으로 증기가 분출되었다.

Fig. 4는 110°C 가열시 시간경과에 따른 점토의 표면 변화를 나타낸 것이다. 가열로 인해 점토의 표면이 건조

되기 시작하였으며 그 범위가 점점 넓어져 72시간 경과 후에는 표면이 완전 소결되었다.

3.3 콘관입시험을 통한 강도 측정

본 연구에 사용된 인천 소래지구의 해성점토는 교란된 상태였으며, 실험 시 자중압밀 및 열적거동이 시료강도 증가를 위한 압축의 두 가지 중요한 요소이지만, 전기가열장치를 이용한 표층지반 개량효과에 의한 지반의 강도개선효과를 판단하는 것이 주목적이므로, 전기가열온도와 가열시간에 따른 점토의 강도 변화를 파악하기 위해 콘관입시험을 수행하였다. 콘관입시험은 정적 콘관입시험기를 사용하였고 전기가열 열원으로부터 5cm와 10cm지점에서 측정하였으며, 표면에서 25cm지점까지 각 5cm 심도로 지반의 콘관입치를 측정하였다.

3.3.1 70℃ 가열시 콘관입시험 결과

70℃ 가열시 콘관입시험 결과는 Table 2에 나타내었다. 여기서, q_c 는 콘지수(kPa), q_{ci} 는 초기 콘지수(kPa)를 나타내며, q_c/q_{ci} 는 콘지수 증가비를 나타낸 것이다. 가열 48시간 후 열원으로부터 5cm지점에서 심도별 콘지수는 62.0~93.0 kPa 로 나타났으며 초기 콘지수(15.0 kPa)에 비해 약 4~6배정도 증가되었고, 열원으로부터 10cm지점에서 심도별 콘지수는 15.5~93.0 kPa 로 나타났으며 초기 콘지수에 비해 약 1~6배정도 증가되었다.

콘지수는 가열 72시간부터 급격히 증가되었으며, 열원으로부터 5cm지점에서 심도별 콘지수는 775.0~310.1 kPa 로 약 20~50배정도 증가되었으며, 열원으로부터 10cm지점에서 심도별 콘지수는 310.1~155.0 kPa 로 약 10~20배정도 증가되었다. 96시간 가열시, 열원으로부터 5cm지점에서 심도별 콘지수는 852.7~480.6 kPa 으로 약 32~57배정도 증가되었으며, 열원으로부터 10cm지점

Table 2. Con test result of 70℃ heating

5 cm from heating source horizontally								
Heating time (hr) \ Depth (cm)	24		48		72		96	
	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}
5	46.5	3.1	62.0	4.1	775.2	51.7	852.7	56.8
10	62.0	4.1	77.5	5.2	697.7	46.5	620.2	41.3
15	69.8	4.7	93.0	6.2	465.1	31.0	542.6	36.2
20	93.0	6.2	93.0	6.2	310.1	20.7	480.6	32.0

10 cm from heating source horizontally								
Heating time (hr) \ Depth (cm)	24		48		72		96	
	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}	$q_c (kPa)$	q_c/q_{ci}
5	15.5	1.0	15.5	1.0	310.1	20.7	387.6	25.8
10	31.0	2.1	31.0	2.1	232.6	15.5	232.6	15.5
15	46.5	3.1	46.5	3.1	155.0	10.3	217.1	14.5
20	77.5	5.2	93.0	6.2	155.0	10.3	186.1	12.4

* Note : Disturbed soil, $q_{ci} = 15.0 kPa$

(a) 5 cm horizontally

(b) 10 cm horizontally

Fig. 5. Con test results of 70℃ heating

에서 심도별 콘지수는 $387.6 \sim 186.1 \text{ kPa}$ 로 약 12~26배정도 증가되었다.

Table 2와 Fig. 5를 보면, 초기에는 자중압밀과 하부 배수로 인해 시료 하단의 강도가 상대적으로 증가하나, 전기가열관의 열량이 지속적으로 시료에 축적되어 상부의 지하수가 배출되면 상부의 강도가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 전기가열관의 열이 지반에 축적되어 물리화학적 상태변화를 일으키기 전에는 중력에 의한 자중압밀이 우세함을 알 수 있으며, 일정한 열이 축적되어 지하수의 증발 및 지반의 상태변화를 일으키면 열적거동이 지반개량에 상당한 역할을 하고 있음을 보여준다. 그러므로, 지반의 열적 개량을 위해서는 일정 수준이상의 열량이 필요함을 알 수 있다.

3.3.2 110℃ 가열시 콘관입시험 결과

110℃ 가열시 콘관입시험 결과는 Table 3에 나타내었다. 가열 24시간 후 열원으로부터 5cm지점에서 심도별 콘지수는 $480.6 \sim 434.1 \text{ kPa}$ 로 나타났으며 초기 콘지수(15.0 kPa)에 비해 약 24~32배정도 증가되었고, 열원으로부터 10cm지점에서 심도별 콘지수는 $170.5 \sim 186.1 \text{ kPa}$ 로 나

타났으며 초기 콘지수에 비해 약 9~12배정도 증가되었다. 가열 48시간 후 열원으로부터 5cm지점에서 심도별 콘지수는 $1007.8 \sim 1705.4 \text{ kPa}$ 로 나타났으며 초기 콘지수에 비해 약 67~114배정도 증가되었고, 열원으로부터 10cm지점에서 심도별 콘지수는 $310.1 \sim 899.2 \text{ kPa}$ 로 나타났으며 초기 콘지수에 비해 약 21~60배정도 증가되었다.

Table 3을 도시한 Fig. 6은 Fig. 5와 반대의 결과를 보여주고 있다. 110℃ 이상으로 지하수가 지속적으로 증발하게 가열한 경우, 초기부터 자중압밀효과보다 지반의 열적 거동이 우세하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5와는 달리 가열 2일 경과 후 하부지반이 상부지반보다 더 높은 강도를 보여주고 있는 것을 알 수 있다. 이는 하부는 축열로 인한 고온소결현상이 지속적으로 일어나고 있으나, 상부는 대기 접촉으로 인한 열 손실이 발생하여 소결정도가 상대적으로 낮음을 알 수 있다. 대기가 영향을 미치는 지표의 고결정도가 상대적으로 낮은 것은, 전기가열된 현장 지반굴착 시에도 확인을 할 수 있었으며, 지반이 대기의 영향을 받지 않은 일정한 깊이 이후에는 지반의 고결정도가 일정함을 확인 할 수

Table 3. Con test result of 110℃ heating

From heating source Heating time (hr) Depth (cm)	5 cm horizontally				10 cm horizontally			
	24		48		24		48	
	$q_c \text{ (kPa)}$	q_c/q_{ci}	$q_c \text{ (kPa)}$	q_c/q_{ci}	$q_c \text{ (kPa)}$	q_c/q_{ci}	$q_c \text{ (kPa)}$	q_c/q_{ci}
5	480.6	32.0	1007.8	67.2	170.5	11.4	310.1	20.7
10	372.1	24.8	1240.3	82.7	186.0	12.4	620.2	41.3
15	356.6	23.8	1395.3	93.0	139.5	9.3	775.2	51.7
20	434.1	28.9	1705.4	113.7	186.0	12.4	899.2	59.9

* Note : Disturbed soil, $q_{ci} = 15.0 \text{ kPa}$

(a) 5 cm horizontally

(b) 10 cm horizontally

Fig. 6. Con test results of 110℃ heating

있다(Fig. 9(a)~(b) 참조).

3.3.3 주행성(Trafficability) 검토 결과

전기가열온도와 가열시간에 따른 시공장비의 주행성을 판단하기 위해 콘지수와 초연약지반에서 사용되는 습지도저와 소형도저, 중·대형도저, PBD장비의 접지압과 비교하였다(이종선, 2009).

Table 4는 70℃ 가열시 가열시간에 따른 주행성 검토 결과를 나타낸 것이다. 70℃ 가열한 실내시험의 경우, 열원의 영향을 빨리 받는 횡방향 5cm지점에서는 48시

간 가열시(지표강도 62.0kPa) PBD장비를 제외한 중장비의 주행이 가능하였으며 72시간 가열시(지표강도 775.2 kPa)부터 모든 중장비의 주행이 가능한 것으로 판단되었다. 열원의 직접적 영향을 받지 못해 자중압밀의 영향이 우세한 열원 횡방향 10cm지점의 경우 48시간 가열시(지표강도 15.5kPa) 모든 중장비의 주행이 불가능하였으며, 열적거동이 자중압밀보다 우세해진 72시간 가열(지표강도 310.1kPa)이후 부터 모든 중장비의 주행이 가능한 것으로 판단되었다.

Table 5는 110℃ 가열시 가열시간에 따른 중기주행

Table 4. Trafficability according to heating time at 70℃ heating

5 cm from heating source horizontally				
Heating Time	Con Index q_c (kPa)	Equipment	Contact Pressure (kPa)	Trafficability
24	46.5	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	N.G
48	62.0	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	N.G
72	775.2	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
96	852.7	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
10 cm from heating source horizontally				
Heating Time	Con Index q_c (kPa)	Equipment	Contact Pressure (kPa)	Trafficability
24	15.5	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	N.G
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
48	15.5	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	N.G
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
72	310.1	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
96	387.6	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium·large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	

Table 5. Trafficability according to heating time at 110°C heating

5 cm from heating source horizontally				
Heating Time	Con Index q_c (kPa)	Equipment	Contact Pressure (kPa)	Trafficability
24	480.6	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium•large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
48	1007.8	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium•large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
10 cm from heating source horizontally				
Heating Time	Con Index q_c (kPa)	Equipment	Contact Pressure (kPa)	Trafficability
24	170.5	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium•large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	
48	310.1	Wetland dozer	20.0 ~ 25.0	O.K
		Small dozer	25.0 ~ 30.0	
		Midium•large dozer	35.0 ~ 45.0	
		PBD equipment	75.0 ~ 120.0	

성 검토결과를 나타낸 것이다. 대상 해성점토를 110°C 가열하여, 열원의 영향범위를 늘린 결과, 24시간 가열 시 횡방향 5cm지점에서는 지표강도 480.6kPa의 강도와 횡방향 10cm지점에서는 지표강도 170.5kPa의 강도를 보여 모든 장비의 주행이 1일 이내에 가능한 것으로 판단된다.

4. 현장 전기가열실험

4.1 실험방법

실내실험에서 고온지반가열이 현장지반개량이 훨씬 유리함을 알 수 있어, 현장실험은 고온소결이 일어날 수 있는 250°C로 지반가열하기로 하였다. 현장가열실험에 사용된 전기가열장치는 Fig. 7(a)와 같다. 가열시스템은 실내가열실험에서 사용된 전기가열장치와 동일하며 열원으로 사용되는 파이프히터, 전력공급 케이블, 온도계로 구성되어있다. 파이프히터의 총 길이가 1.9m이며 가열부의 길이는 1.8m이다. 파이프히터는 1kW~3kW의 전력을 소비하며 콘트롤박스를 이용하여 800°C까지 온도조절이 가능하도록 제작하였다. 현장실험지반은 실트질모래와 자갈이 혼재되어있으며 표준관입시험결과 N

치가 4~8정도의 연약지반이었다.

파이프히터의 관입을 위해 중장비와 스틸파이프 (60mm)를 이용하였으며, Fig. 7(b)는 중장비를 이용한 지반 천공모습을 나타낸 것이다. Fig. 7(c)는 천공 후 파이프히터를 삽입하는 모습이다. 점토지반의 경우 중장비 없이 관입이 가능하겠지만 본 현장의 경우 실트질모래와 자갈이 혼재되어있어 중장비를 이용하여 천공한 후 파이프히터를 인력으로 관입하였다. Fig. 7(d)는 현장에 설치된 파이프히터에 전원케이블 및 온도계를 연결한 것이다. 파이프히터를 지반 관입 후 천공홀을 모래로 충전하여 공극으로 인한 열손실을 최소화하였다. 이 후 파이프히터 감전을 방지하기 위해 실리콘으로 연결부를 보호하였다. Fig. 7(e)는 현장가열실험 배치도를 나타낸 것이다. 전기가열장치는 총 6개소 설치하였으며 전기가열장치는 가로 2.0m, 세로 1.0m로 배치하여 실험을 수행하였다. 가열온도는 파이프히터에 1kW의 전류를 흘려 가열관 표면온도를 250°C로 유지하였으며 가열로 인한 열전달 범위를 파악하기 위해 가열관 주변에 온도측정용 스테인리스파이프를 관입하였다(Fig. 7(f) 참조). 전기가열로 인한 지중온도는 현장에 설치된 스테인리스 파이프에 온도센서를 관입하여 측정하였으며, 열원으로부터 횡방향거리 0.25m간격으로 1.0m까지 측정하였으며 지

(a) Electric pipe Heater

(b) Boring

(c) Injection of pipe heater

(d) Installation of Thermometer

(e) Outline of Field Test

(f) Measurement of Temperature

Fig. 7. Field Test

표하 심도는 0.1m간격으로 0.5m까지 측정하였다.

4.2 가열로 인한 지중온도 변화

4.2.1 전기가열로 인한 지중온도 측정결과

초기의 지중온도는 약 5°C 이었으며, 가열 2일과 3일 경과 시 측정된 지중온도 측정값으로 온도분포도를 그

린 결과는 Fig. 8과 같다. 전기가열 2일 경과 시 열원으로부터 10cm지점은 95°C에 도달하며 1m지점은 초기 5°C에서 12°C로 온도가 상승되었으며, 3일 경과시 열원으로부터 10cm지점은 110°C에 도달하며 1m지점은 15°C로 온도가 상승되는 것을 알 수 있다.

지중 전기가열 효과를 확인하기 위하여 지반을 굴착하였다. 특이한 점은 굴착 시 다량의 수증기가 발생되었

다는 것이다. 이는 이미 열원 주변의 물이 끓어 수증기가 되었지만 상당량의 수증기가 공극에서 배출되지 못했다는 것을 알 수 있다. 추후 현장 적용시에는 수증기를 배출하기 위한 별도의 배출구가 필요하며, 원활한 수증기 배출시 지반개량효과가 더욱 증대될 것으로 판단된다.

Fig. 9는 전기가열지반의 심도별 형태를 나타낸 것이다. 이를 살펴보면 심도에 상관없이 전기가열관 주변 20cm지점까지는 완전 소결된 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 9(f)를 살펴보면 가열관 하부로는 열전달이 되지 않고 상부로만 전달되는 것을 알 수 있다. 이는 가열로 인

해 발생한 수증기가 상부로만 배출되기 때문인 것으로 판단되며, 수평열원모형을 이용한 프로그램의 경우보다 더 하부로 열전달이 되지 않음을 보여준다(Fig. 10~11 참조).

4.2.2 프로그램 해석결과

현장 온도 측정결과와 비교를 위해 상용프로그램인 Temp/W를 이용하여 지중온도변화를 해석하였다. 해석시 입력자료는 다음 Table 6과 같으며 현장 지중온도는 5℃, k(열확산율)은 3W/m·K인 상수값으로 하였고 전기가열관의 길이는 현장과 동일하게 1.8m이며 열원 온도는 현

Fig. 8. Temperature Distribution by Field Test

Fig. 9. Behavior of heated soil

(a) Before Heating

(b) After 1 Day

(c) After 5 Days

(d) After 10 Days

Fig. 10. Analysis of Field Condition by Temp/W

(a) 0.5 m from ground surface

(b) 1.0 m from ground surface

(c) 1.5 m from ground surface

(d) 0.5 m from Heat pipe bottom

Fig. 11. Temperature distribution by heating time(Temp/w)

장과 동일한 200℃이다.

Fig. 10은 지표 하 0.5m, 1.0m, 1.5m지점과 전기가열관 하부 0.5m지점의 가열시간에 따른 온도변화 해석결과이다.

Fig. 11은 가열시간에 따른 온도변화 해석결과를 나타낸 것이며, Fig. 10에 보인 바와 같이 지표 하 0.5m, 1.0m, 1.5m지점과 전기가열관 하부 0.5m지점에서 결과를 나타내었다. Fig. 11은 열원의 수평 및 수직 방향에 따라 다른 온도거동을 보여준다. 가열시간별 수평방향 온도분포는 비슷하였으나 하부 수직방향의 경우는 다른 양상을 나타내었다. 하부방향 역시 지속적으로 온도가 증가하는 양상이지만, 본 해석에 사용된 Temp/W는 수평열원 모델을 이용한 프로그램이므로 온도의 증가율이 횡방향보다 작음을 알 수 있다.

4.2.3 결과 비교

초기의 지중온도는 약 5℃ 이었으며, 가열 2일과 3일 경과 시 지표 하 0.5m 지점에서 열원에서 횡방향으로 0.5m 지점과 1m 지점의 지중온도를 측정하였다. Fig. 12에서 보듯이, 횡방향 0.5m 지점에서는 프로그램 해석결과가 실측결과보다 높게 나타나며, 횡방향 1m 지점에서는 실측결과가 프로그램 해석결과보다 높게 나타났다. 즉, 횡방향거리에 따라 다른 온도거동을 보여주고 있는데, 이는 크게 입력상수값 및 지반조건의 두가지 이유로 생각할 수 있다.

첫째로, 프로그램 해석 시 k 값(열확산율)은 지식경제부의 현지지중열전도도 측정기술보고서(2008)에서 제시한 3W/m·K인 상수값으로 하였으나, 참고한 보고서의 경우 불교란된 불포화토의 열확산계수에 해당되어 현장지반의 열확산계수와 차이가 있었다. 또한 현장 지중온도는 초기 측정 시 5℃였으나, 3일 동안 날씨변화로 지중 온도가 증가하였다.

둘째로, 현장지반은 완전히 포화된 교란지반으로 발생한 열의 상당량이 지하수를 통해 전달되므로, 열확산계수가 일반 지반보다 높았다. 그러므로, 열이 주변지반의 지하수의 증발과 지반의 상태변화에 상당부분 소요되었음에도 불구하고, 현장의 횡방향열전달율이 이론적 해보다 높아, 횡방향 온도증가율이 상대적으로 높은 것이다. Fig. 9에서 가열지반의 심도별 형태를 보면 심도에 상관없이 다량의 수증기 배출 및 전기가열관 주변 20cm지점까지는 완전 소결된 것을 볼 수 있는데, 이는 지하수의 열전달과 흡입자의 상태변화에 따른 소결현상을 동시에 보여주는 현상이다.

4.3 평판재하시험 결과

현장 지반의 전기가열 3일 후 강도증가를 측정하기 위해 열원으로부터 0.5m지점에 평판재하시험을 수행하였으며 그 결과는 Fig. 13과 Table 7과 같다. 가열지점의 경우 지표면 위로 파이프히터가 돌출되어 있어 평판재

Table 6. Input data for Temp/w

Ground Temperature (°C)	Thermal Conductivity k (W/m·K)	Electric Pipe Heater		Analyzed depth (from ground surface, m)
		Length (m)	Temperature (°C)	
5	3	1.8	200	0.5, 1.0, 1.5, 2.3

(a) 0.5 m from heating source (horizontal)

(b) 1.0 m from heating source (horizontal)

Fig. 12. Soil temperature comparison

Fig. 13. Result of plate load test

Table 7. Result of plate load test

구 분	Allowable capacity q_a (kPa)	Settlement s (mm)	Yielding capacity q_y (kPa)	Settlement s (mm)
Before Heating	126.0	6.45	252.0	12.90
After Heating	328.1	1.88	656.2	3.66

하시험이 불가능하여 0.5m지점에서 시험을 수행하였다. 원지반의 경우 평판재하시 관입전단 파괴형태를 나타내었으며 항복지지력인 126.0kPa로 산정되었다. 전기가열지반은 지표면이 모두 건조된 상태이며 항복지지력은 328.1kPa로 약 3배 정도 증가되었다. 각 항복지지력에 대한 대응침하량은 원지반은 12.90mm, 전기가열지반은 3.66mm로 나타났다. 3일간의 전기가열로 인해 현장 지반의 지지력이 126.0kPa에서 328.1kPa로 급격히 증가되어, 중장비 뿐만 아니라 구조물을 시공할 수 있는 충분한 지지력을 나타내었다.

5. 결 론

본 연구에 사용된 인천소래지구의 해성점토는 교란된 상태였으며, 실험 시 자중압밀 및 열적거동이 시료강도 증가를 위한 압축의 두 가지 중요한 요소이지만, 본 연구에서는 전기가열장치를 이용한 표층지반 개량효과에 의한 지반의 강도개선효과를 판단하는 것이 주목적

이다. 이를 위하여 실내실험과 현장실험을 수행하였으며, 전기가열에 의한 연약지반의 강도변화를 파악하여 지반개량효과와 중장비 주행성을 검증하였다. 본 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 인천 소래지구 해성점토를 70℃와 110℃로 가열하여 실내시험을 하였다. 70℃로 저온 지반 가열시, 지반의 물리화학적 상태변화를 일으키기 전에는 중력에 의한 자중압밀이 우세하여 초기에는 자중압밀로 인해 시료 하단의 강도가 상대적으로 증가한다. 그러나, 일정한 열이 지반에 축적되면, 지하수의 증발 및 지반의 상태변화를 유발하여 열적거동이 지반개량에 상당한 역할을 하므로, 지반의 열적 개량을 위해서는 일정 수준이상의 열량이 필요함을 알 수 있다.
- (2) 110℃ 고온가열로 지하수가 지속적으로 증발하게 가열한 경우, 초기부터 자중압밀효과보다 지반의 열적 거동이 우세하였다. 고온가열 시 하부는 축열로 인한 고온소결현상이 지속적으로 일어나고 있으

나, 표층(20~30 cm)은 대기 접촉으로 인한 열 손실이 발생하여 소결정도가 상대적으로 낮았다. 이는 전기가열된 현장 지반굴착 시에도 확인을 할 수 있었으며, 지반이 대기의 영향을 받지 않은 일정한 깊이 이후에는 지반의 고결정도가 일정함을 확인 할 수 있다.

- (3) 70℃ 가열한 실내시험의 경우, 열원의 영향을 빨리 받는 횡방향 5cm지점에서는 48시간 가열시(지표강도 62.0kPa) PBD장비를 제외한 중장비의 주행이 가능하였으며 72시간 가열시(지표강도 775.2kPa)부터 모든 중장비의 주행이 가능한 것으로 판단되었다. 열원의 직접적 영향을 받지 못해 자중압밀의 영향이 우세한 열원 횡방향 10cm지점의 경우 48시간 가열시(지표강도 15.5kPa) 모든 중장비의 주행이 불가능하였으며, 열적거동이 자중압밀보다 우세해진 72시간 가열(지표강도 310.1kPa)이후 부터 모든 중장비의 주행이 가능한 것으로 판단되었다. 대상 해성점토를 110℃ 가열하여, 열원의 영향범위를 늘린 결과, 24시간 가열시 횡방향 5cm지점에서는 지표강도 480.6kPa의 강도와 횡방향 10cm지점에서는 지표강도 170.5kPa의 강도를 보여 모든 장비의 주행이 1일 이내에 가능한 것으로 판단된다.
- (4) 실트질 모래지반의 현장 전기가열실험 결과, 지속적인 수증기 배출현상이 발생하였고 3일간 지속가열 후 영향범위가 가열관의 반경 1m 정도까지 확대되는 것을 확인 할 수 있었다. 전기가열로 인한 지반 개량효과를 확인하기위해 굴착을 한 결과 심도에 상관없이 열원으로부터 주변 20cm지점까지 완전 소결된 것으로 나타났다.
- (5) 프로그램 해석결과와 실측결과는 열원으로부터 횡방향거리에 따라 다른 온도거동을 보여주었다. 현장지반은 완전히 포화된 교란지반으로 발생한 열의 상당량이 지하수를 통해 전달되므로, 열이 지하수의 증발과 지반의 상태변화에 상당부분 소요되었음에도 불구하고, 횡방향 온도증가율이 상대적으로 높았다. 가열현장지반은 굴착 시 나타난 수증기 배출 및 가열관 주변 완전 소결현상은, 높은 지하수 함유량에 의한 열전달과 흡입자의 소결현상이 동시에 진행되었음을 보여준다.

- (6) 현장 전기가열지반에서의 평판재하시험 결과, 원지반의 경우 항복지지력인 126.0kPa으로 산정되었으며 전기가열지반은 지표면이 모두 건조된 상태로 항복지지력은 328.1kPa로 약 3배 정도 증가되었다. 3일간의 전기가열로 인해 현장 지반의 지지력이 급격히 증가되어, 중장비 뿐만 아니라 구조물을 시공할 수 있는 충분한 지지력을 나타내었다.

본 연구에서는 전기가열방식에 의한 표층지반개량 효과 및 현장 적용성을 검증하기 위해 실내 전기가열실험 및 현장 전기가열실험을 수행하였으며 가열온도에 따라 다소 차이는 발생하였지만 지지력이 크게 증가되어 지반개량효과가 탁월한 것으로 판단된다. 추후 표층개량뿐만 아니라 심층개량에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Beles, A. A. and Stănculescu, I. I. (1958), "Thermal Treatment as a Means of Improving the Stability of Earth Masses", *Geotechnique*, Vol.8, No.4, pp.158-165.
2. Korea Institute of Construction Technology (2001), "Improvement of Progressive Trenching Method for Surface Desiccation of Dredged Soft Clay", pp.217-219.
3. Lee, J. S. (2009), "Mechanics Behavior of Soft Ground Improved by Surface Reinforcement", Master's Thesis, *Korea University*, pp.47-49.
4. Litvinov, I. M. (1961), "Stabilization of Soil for Constructional Purposes", *Proceeding of The Fifth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.775-777.
5. Ministry of Knowledge Economy (2008), "A Study on the In-Situ Geothermal Characteristics Testing and Analysis Technology", pp.27-39.
6. Park, J. B., Kim, H. S., Kim, S. J., Kang, M. C., and Lee, S. (2002), "A Study on the Application of Lateral Vacuum Consolidation Method for the Surface Ground Strengthening to the Hydraulic Fills in Situ", *Journal of Civil Engineering*, Korea Society of Civil Engineering, Vol.5-C, No.22, pp.545-554.
7. Tommo Tanabe, Takashi Sato, Shisaku Ikeda, Masayuki Kimoshita, Kenji Hayashi, Eiji Okumiya (2004), "Field Measurement of Sheet Tension on Reclaimed Ground by Dredged Clay", *Engineering Practice and Performance of Soft Deposits*, IS-OSAKA, ISBN 4-88644-812-7, pp.293-296.
8. Yang, K. S., and Kang, M. C. (2004), "Research on the Characteristics of the Bearing Surface Treatment Method using Bamboo Network", *ISSMGE ATC-7 Symposium*, Busan, Korea, pp.107-120.

(접수일자 2012. 5. 2, 심사완료일 2012. 10. 25)