

인공동결공법 적용 후 융해에 따른 해성 점토지반의 역학적 특성 평가

최현준¹ · 이동섭² · 이효범³ · 손영진⁴ · 최항석^{5*}

¹비회원, (주)동명기술공단 부설연구소 대리

²비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사 후 연구원

³비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정

⁴정회원, SK건설 Infra Eng'g2팀 부장

⁵정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수

Evaluation of mechanical characteristics of marine clay by thawing after artificial ground freezing method

Hyun-Jun Choi¹ · Dongseop Lee² · Hyobum Lee³ · Young-Jin Son⁴ · Hangseok Choi^{5*}

¹Assistant Manager, Research Institute, Dongmyeong Engineering Consultants & Architecture Co., Ltd.

²Post-doctoral Research Fellow, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

³Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

⁴General Manager, Infra Engineering Team 2, SK Engineering & Construction

⁵Professor, School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

*Corresponding Author : Hangseok Choi, hchoi2@korea.ac.kr

Abstract

The artificial ground freezing (AGF) method is a groundwater cutoff and/or ground reinforcement method suitable for constructing underground structures in soft ground and urban areas. The AGF method conducts a freezing process by employing a refrigerant circulating through a set of embedded freezing pipes to form frozen walls serving as excavation supports and/or cutoff walls. However, thermal expansion of the pore water during freezing may cause excessive deformation of the ground. On the other hand, as the frozen soil is thawed after completion of the construction, mechanical characteristics of the thawed soil are changed due to the plastic deformation of the ground and the rearrangement of soil fabric. This paper performed a field experiment to evaluate the freezing rate of marine clay in the application of the AGF method. The field experiment was carried out by circulating liquid nitrogen, which is a cryogenic refrigerant, through one freezing pipe installed at a depth of 3.2 m in the ground. Also, a piezo-cone penetration test (CPTu) and a lateral load test (LLT) were performed on the marine clay before and after application of the AGF method to evaluate a change in strength and stiffness of it, which was induced by freezing-thawing. The experimental results indicate that about 11.9 tons of liquid nitrogen were consumed for 3.5 days to form a cylindrical frozen body with a volume of about 2.12 m³. In addition, the strength

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)31-48(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.031>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received October 4, 2018

Revised October 23, 2018

Accepted October 26, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

and stiffness of the ground were reduced by 48.5% and 22.7%, respectively, after a freezing-thawing cycle.

Keywords: Artificial ground freezing method, Freezing-thawing, Marine clay, Piezo cone penetration test, Lateral load test

초 록

인공동결공법(artificial ground freezing method)은 연약지반 및 도심지에서의 지하구조물 시공에 적합한 차수 및 지반 보강 공법이다. 인공동결공법은 동결관(freezing pipe)을 지중에 매설한 후 냉매(refrigerant)를 순환시켜 대상 지반에 차수벽 및 지지체의 역할을 수행하는 동결벽체(frozen wall)를 형성한다. 그러나 간극수의 동결에 따른 간극수의 부피팽창은 지반의 변형을 야기시킬 수 있고, 시공완료 후 동결토의 용해에 따른 지반의 소성변형 및 입자의 재배치 등은 지반의 역학적 특성을 변화시킨다. 본 논문에서는 인공동결공법에 따른 해성 점토지반(marine clay)의 동결속도를 평가하기 위하여 인공동결공법 현장실증시험을 수행하였다. 현장실증시험은 지중에 3.2 m 깊이로 매설된 동결관 1공 내로 초저온 냉매인 액화질소를 순환시키는 방법으로 수행되었다. 또한, 원지반과 인공동결공법에 의해 동결/용해된 지반에 대한 피에조 콘 관입시험(piezo cone penetration test, CPTu) 및 공내재하시험(lateral load test, LLT)을 수행함으로써 동결/용해(freezing-thawing)에 따른 해성 점토지반의 강도 및 강성 특성의 변화를 평가하였다. 시험결과, 부피가 약 2.12 m³ 인 원기둥 모양의 동결체를 형성하는데 총 3.5일이 동안 약 11.9 ton의 액화질소가 소요되었다. 동결/용해에 따른 지반의 강도 및 강성 저하는 각각 48.5%, 22.7%로 산정되었다.

주요어: 인공동결공법, 동결/용해, 해성 점토지반, 콘 관입시험, 공내재하시험

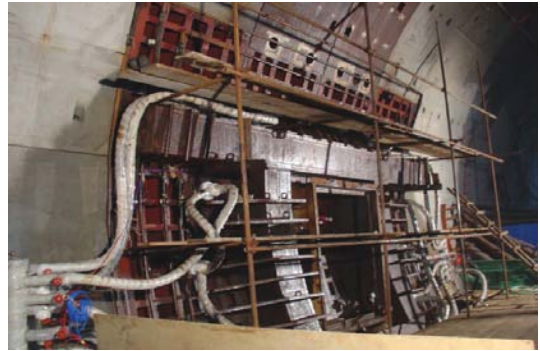
1. 서론

해저터널과 같이 높은 수압을 받는 단층파쇄대가 존재하는 지하구조물 시공현장에서는 그라우트재의 주입제한 혹은 그라우트 강도 미발현 등의 문제가 발생하여 기존의 차수 및 지반보강 공법인 그라우팅 공법의 적용이 제한적이다. 인공동결공법(artificial ground freezing method)은 지중에 동결관을 매설한 후 동결관 내로 냉매를 순환시킴으로써 대상 지반에 차수벽 및 지지체의 역할을 수행하는 동결벽체를 일시적으로 형성하는 차수 및 지반보강 공법으로, 지반지하수 아래 모든 지반조건에서 적용이 가능하다. 또한, 인공동결공법은 지반변형을 최소화하여야 하는 도심지에서 TBM (Tunnel boring machine)을 통한 터널 공사 중 TBM 발진구 및 수직구 굴착을 위한 차수 및 지반보강 공법으로 적합하다.

인공동결공법은 Fig. 1과 같이 지반 내로 약액(시멘트 등) 주입 없이 대상 지반을 일시적으로 동결/용해시키는 친환경 공법이라는 장점을 바탕으로 유럽, 싱가포르, 중국, 일본에서 연약지반에서의 지하구조물 시공 및 터널 공사 등에 인공동결공법을 활발하게 적용하고 있다(Pimentel et al., 2012; Sun and Qiu, 2012; Yan and Fang, 2012; Papakonstantinou et al., 2013; Han et al., 2016; Shawn et al., 2016). 특히, 상하이 지하철 공사에서는 병설터널 연결구(cross passage)의 98%가 인공동결공법으로 시공되었다(Song et al., 2016).



(a) Launching shaft for earth pressure balanced (EPB) TBM (Shawn et al., 2016)



(b) Cross passage for Shanghai Yangtze river tunnel (Han et al., 2016)

Fig. 1. Application of AGF method for tunneling construction

그러나 동결과정에서 간극수의 부피팽창으로 야기되는 흙 입자의 파쇄 및 지반의 간극비 증가와 시공완료 후 동결토의 용해에 따른 흙 입자의 재배치 및 지반의 소성변형은 지반의 강도를 감소시킬 수 있다. 즉, 동결/용해에 따른 지반의 역학적 특성 변화는 터널 구조물에 영향을 미칠 수 있으므로 인공동결공법 설계 시 중요하게 고려되어야 하는 요소이다. 국외에서는 동결/용해가 지반거동에 미치는 영향에 대한 연구를 지반의 용기현상, 간극수의 이동, 동결토의 역학적 특성과 같이 다양한 관점에서 활발히 수행하고 있다(Jessberger, 1981; Eigenbrod, 1996; Padilla et al., 1997; Kudryavtsev, 2004; Yang et al., 2006). 그러나 국내에서는 동결/용해 반복에 따른 불포화 지반의 강도 감소 및 투수계수 증가에 대한 실내시험적 연구만 수행되었다(Shin et al., 2009; Choi et al., 2011; Kang et al., 2011).

본 논문에서는 인공동결공법에 따른 해성 점토지반의 동결속도를 평가하기 위하여 동결관 1공을 지반에 매설한 후 동결관 내로 초저온 냉매인 액화질소를 순환시킴으로써 동결관을 중심으로 원기둥 모양의 동결체를 형성하는 방법으로 인공동결공법 현장실증시험을 수행하였다. 또한 인공동결공법이 수행되기 전과 후, 즉 원지반과 동결/용해된 지반에 대한 피에조 콘 관입시험(piezo cone penetration test, CPTu) 및 공내재하시험(lateral load test, LLT)을 수행함으로써 인공동결공법에 따른 동결/용해가 지반의 강도와 강성에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 인공동결공법 현장실증시험

2.1 현장부지

인공동결공법 현장실증시험은 전라남도 신안군에 위치한 염전 부지에서 수행되었다(Fig. 2(a)). 현장부지의 지질조건을 파악하기 위하여 시추조사 및 표준관입시험을 5 m 간격으로 약 20 m 깊이까지 총 3회 수행하였고, 지반조사를 수행한 위치를 Fig. 2(b)에 나타내었다. 여기서, SA는 지반조사, FA는 인공동결공법 현장실증시험이 수행된 위치이다.



(a) Plan view of test bed



(b) Test bed layout showing test locations

Fig. 2. Plan view and test bed layout in Sinan-gun

시추조사 결과, 현장부지는 지표부터 매립토층, 퇴적토층, 풍화암층의 순서로 구성되어 있고, 지하수위는 GL -1.0 m에 위치하는 것으로 파악되었다. 실트질 자갈로 구성된 매립토층은 지표 하 0~1.0 m 구간, 실트질 점토로 구성된 퇴적토층은 지표 하 1.0~13.0 m 구간, 풍화암층은 지표 하 13.0 m 이상 구간에 분포하였다. 시추조사 결과를 통해 도출된 현장부지의 지질주상도를 Fig. 3에 나타내었다.

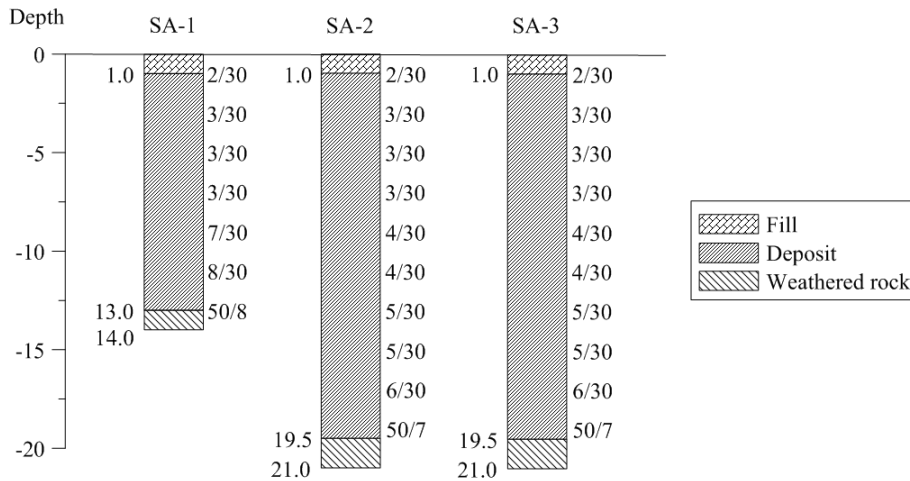


Fig. 3. Geologic profile of test bed evaluated by boring investigations

표준관입시험 결과, 동결관이 매설된 지표 하 1.0~4.2 m 구간은 N 치가 2~3인 매우 연약(very soft)한 점토지반으로 평가되었고, 피스톤 샘플러(piston sampler)를 통해 채취된 직경 76 mm (NX 코어)의 비교란 시료에 대한 실내시험을 통해 해당 지반의 기본물성 및 역학적 특성을 평가하여 Table 1에 정리하였다.

Table 1. Summary of fundamental physical properties and consolidation parameter of test bed

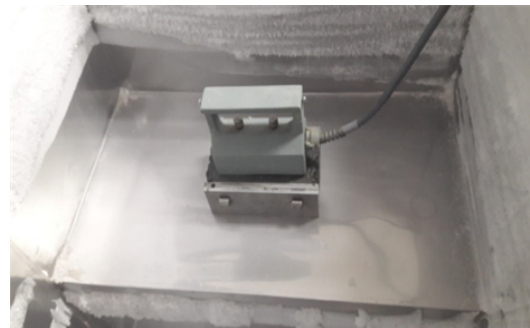
Depth (m)	Dry unit weight (g/cm ³)	Water content (%)	Salt concentration (‰)	Atterberg limit		Consolidation		USCS
				LL (%)	PI (%)	P _c (kPa)	C _c	
2.0~2.8	1.263	42.5	17.9	51.4	26.4	62.0	0.418	CH
3.0~3.8	1.212	46.0	17.5	52.8	27.5	95.0	0.516	CH

현장부지는 해안에 인접한 지질학적 특성에 따라 간극수의 염분농도가 해수의 평균 염분농도인 35%의 약 50%인 17.7%로 측정되어 해성 점토지반으로 분류되었다.

또한, 인공동결공법의 동결효율에 직접적인 영향을 미치는 지반의 열전도도(thermal conductivity)의 평가를 위하여 채취한 비교란 시료에 대한 비동결상태(unfrozen)와 동결상태(frozen)의 열전도도를 측정하였다. 비동결 시료는 약 15°C의 상온에서, 동결시료는 -10°C의 냉동고에서 24시간 동안 시료를 동결시킨 후 열전도도를 측정하였다. 이 때, 동결시료의 경우에는 열전도도 측정 중 시료의 용해를 최소화하기 위하여 냉동고 내부에서 열전도도를 측정하였다. 열전도도의 측정에는 0.023~12.0 W/mK, -10~200°C의 측정범위 및 ±5%의 정밀도를 갖는 프로브(PD-13)가 장착된 열전도도 측정장비인 QTM-500 (Kyoto Electronics)이 사용되었다(Fig. 4). 비동결상태와 동결상태의 열전도도 시험결과를 Table 2에 정리하였다.



(a) Unfrozen (15°C)



(b) Frozen (-10°C)

Fig. 4. Measurement of thermal conductivity through QTM-500

Table 2. Summary of laboratory thermal conductivity test

		2.0~2.8 m	3.0~3.8 m
Thermal conductivity (W/mK)	Unfrozen (15°C)	1.592	1.486
	Frozen (-10°C)	2.669	2.827

2.2 현장실증시험 개요

본 현장실증시험에서는 1.0 m 두께의 상부 매립토층을 제거함으로써 포화된 해성 점토지반에 대한 인공동결 공법을 모사하였다. 현장실증시험을 위하여 스테인리스 강(Stainless steel, SUS) 재질로 제작된 직경 89 mm, 길이 3.8 m의 동결관(Freezing pipe) 1공을 시공하였고, 동결관 내로 초저온 냉매인 액화질소를 순환시킴으로써 주변 지반에 원기둥 모양의 동결체를 형성하였다.

현장실증시험에 적용된 동결관은 내관(inner pipe)과 외관(outer pipe)으로 구성된 이중관 형태로 설계되었으며, 동결효율을 최대로 하기 위하여 동결관 내관에 설치된 유입부(inlet)와 유출부(outlet) 사이에 단열재(insulator)를 충전함으로써 주입되는 냉매, 유출되는 냉매, 그리고 외기 사이의 열교환을 최소화하였다. 동결관의 자세한 형상을 Fig. 5에 나타내었다.

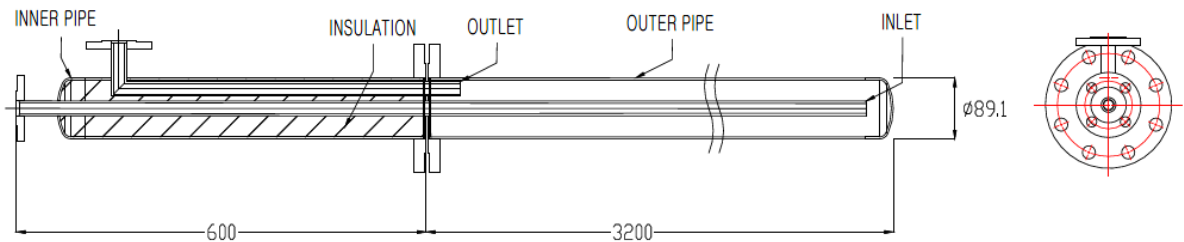


Fig. 5. Specific configuration of freezing pipe used in AGF field experiment

액화질소의 주입은 Fig. 6(a), 6(b)와 같이 3단계로 분류할 수 있다. 먼저, 액화질소는 액화질소 탱크에서 동결 시스템으로 주입되며, 동결시스템에 설치된 자동밸브를 통해 액화질소의 주입속도가 조절된다. 동결시스템을 통과한 액화질소는 동결관으로 주입되고, 동결관을 통과하면서 지반과의 열교환을 통해 액체질소가 기체로 상변화된다. 마지막으로 기체상태로 상변화된 질소는 동결시스템을 통해 대기 중으로 배출된다. 액화질소의 주입관리를 위하여 동결시스템에 설치된 온도센서를 통해 배출되는 질소의 유출온도를 실시간으로 측정하며, 자동밸브를 통해 액화질소의 주입속도를 조절함으로써 질소의 유출온도를 일정하게 유지하였다. 본 현장실증시험에서는 질소의 유출온도를 -170°C 로 설정하여 실험을 수행하였다.

인공동결공법 적용 시 지반의 온도변화를 측정하기 위하여 동결관으로부터 방사방향으로 25 cm 간격(동결관으로부터 25 cm, 50 cm, 75 cm, 1 m)의 온도공(온도공 A~D)을 굴착하고, 각 온도공에 깊이방향으로 50 cm 간격(지표 하 0.7 m, 1.2 m, 1.7 m, 2.2 m, 2.7 m, 3.2 m, 3.7 m, 4.2 m)의 열전대(Thermocouple)를 설치하였다(Fig. 6). 또한, Fig. 6(a)에 나타난 바와 같이 지표 상부로 노출된 동결관에 단열을 함으로써 외기의 영향을 최소화하였다.

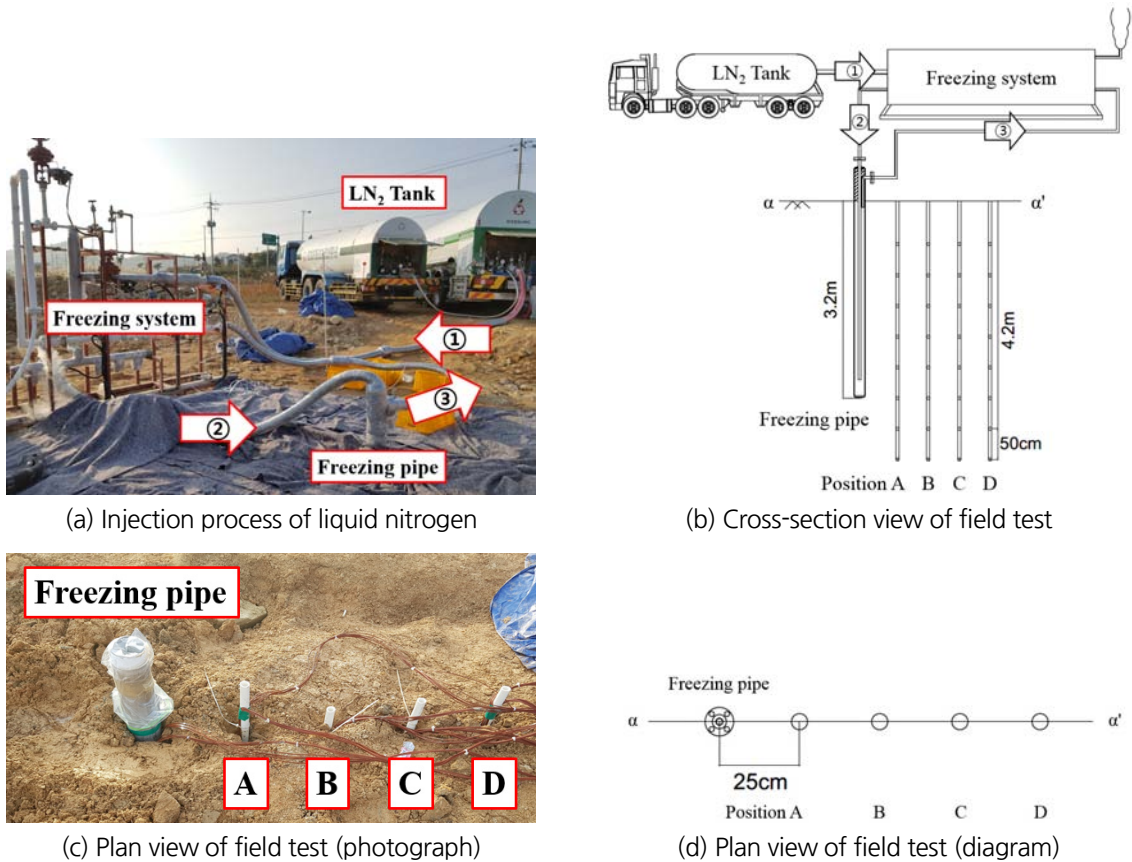
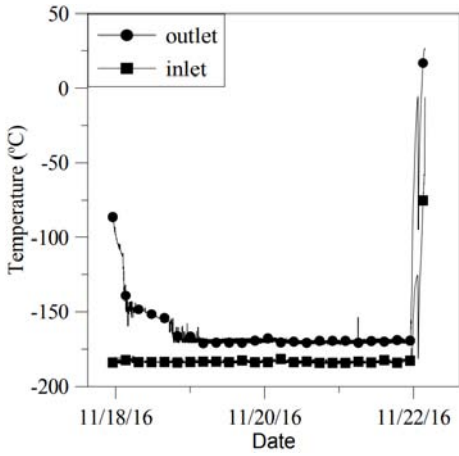


Fig. 6. Injection process of liquid nitrogen and arrangement of freezing pipe and temperature hole

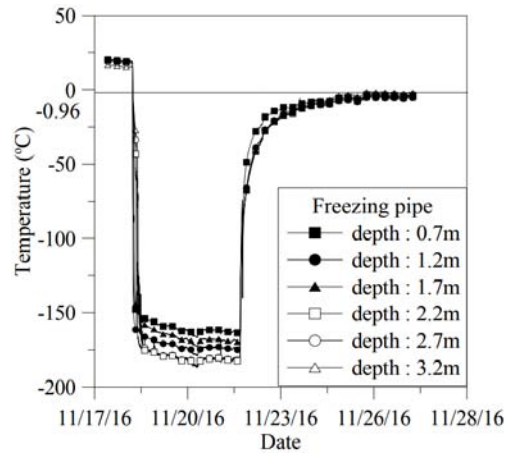
2.3 현장실증시험 결과

간극수의 염분농도는 간극수의 어느점 내림을 유발하므로 인공동결공법의 동결속도 및 동결 완료시점에 영향을 미친다. 현장부지의 간극수 염분농도는 약 17.7‰로 측정되어, 염분농도에 의한 간극수의 어느점 내림이 -0.96°C 로 산정되었다(Arenson and Sego, 2006). 현장실증시험 중 동결시스템 및 지중에 설치된 열전대를 통해 계측된 냉매의 주입 및 유출온도, 동결관 외벽, 지중의 온도변화를 Fig. 7에 나타내었다.

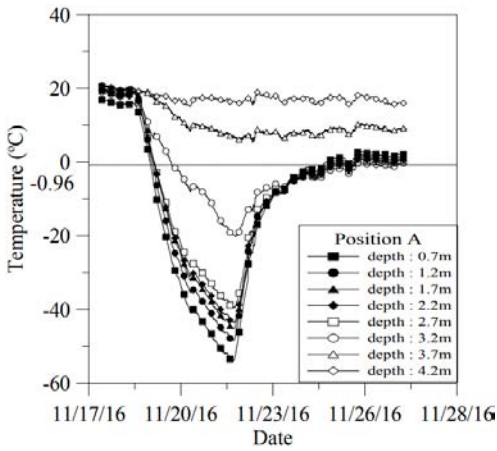
앞서 서술한 바와 같이 동결시스템에 설치된 자동밸브를 통해 액화질소가 안정적으로 주입되고, Fig. 7(a)에 나타난 것과 같이 질소의 유출온도가 약 -170°C 로 비교적 일정하게 유지되었다. 동결관 외벽의 온도분포는 Fig. 7(b)와 같이 동결관 끝단에서 가장 낮은 온도가 측정되었고, 동결관 상단에서 가장 높은 온도가 측정되었다. 이는 이중관 구조인 동결관의 특성으로 유입부를 통해 동결관 끝단으로 주입된 액화질소가 유출부가 위치한 동결관 상단으로 이동하면서 지반과 열교환하기 때문이다(Fig. 8). 따라서 액화질소가 주입되는 동결관 끝단의 온도가 가장 낮고, 지반과 열교환함으로써 지반의 열을 흡수한 액화질소가 유출되는 동결관 상단의 온도가 가장 높다.



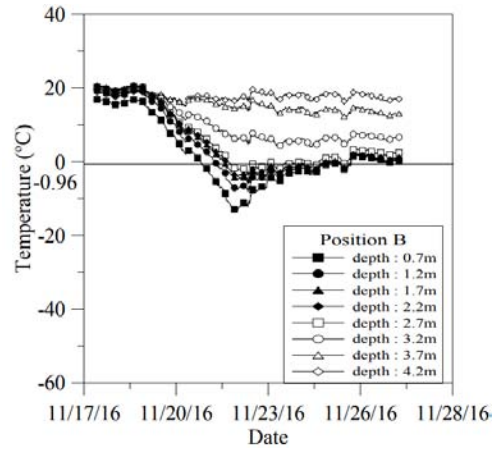
(a) Inlet and outlet temperature of LN₂



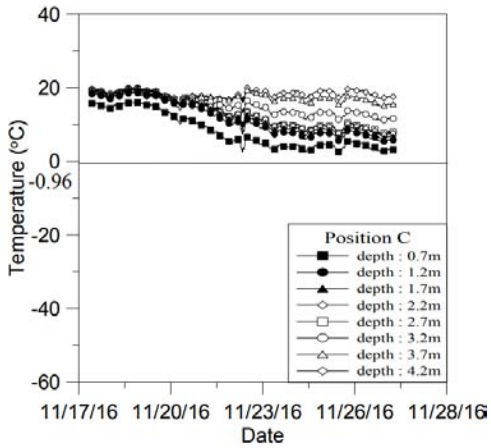
(b) Temperature on freezing pipe



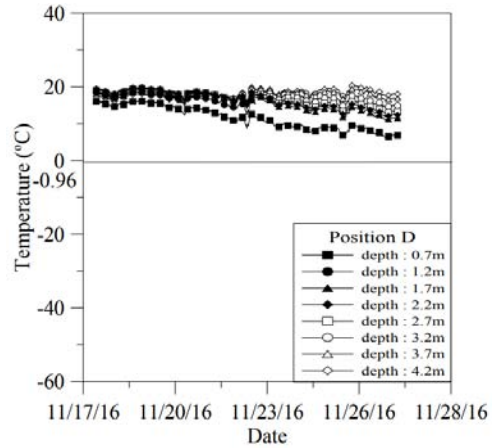
(c) Temperature at hole A



(d) Temperature at hole B



(e) Temperature at hole C



(f) Temperature at hole D

Fig. 7. Temperature change with time at each position by AGF method

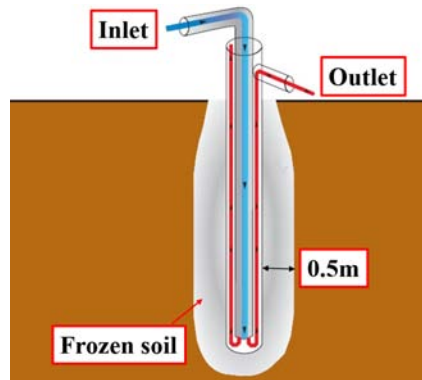


Fig. 8. Frozen soil formation by liquid nitrogen flow through freezing pipe

현장실증시험에서는 측정된 지중의 온도변화(Fig. 7(c)~7(f))를 통하여 동결체 형성범위를 산정하였다. 동결관에 약 3.5일간(84시간) 약 11.9 ton의 액화질소를 주입함으로써 동결관을 중심으로 부피가 약 2.12 m³ (반지름 약 0.5 m, 높이 약 2.7 m)인 원기둥 모양의 동결체가 형성되었다. 또한, 동결완료 후 약 8일간(192시간) 약 10°C의 대기조건에서 융해시킴으로써 형성된 동결체가 모두 융해된 것을 확인하였다. 이 때, 각 온도공의 4.2 m 깊이에 설치된 온도센서를 통해 측정된 지중 온도가 시간에 따라 비교적 일정하게 측정되었으므로 외부 온도에 의한 영향이 다소 적다고 판단된다.

3. 동결/융해에 따른 지반의 역학적 특성 변화

본 논문에서는 동결/융해에 따른 해성 점토지반의 역학적 특성 변화를 평가하기 위하여 원지반과 동결/융해된 지반에 대하여 피에조 콘 관입시험(Piezo cone penetration test, CPTu)과 공내재하시험(Lateral load test, LLT)을 수행하고 동결/융해에 따른 지반의 강도 및 강성 특성을 평가하였다. 원지반에 대한 현장시험은 시추공 SA-3 (Fig. 2(b))에서 수행하였고, 동결/융해된 지반에 대한 현장시험은 동결체 형성범위에 위치한 동결관으로부터 약 0.25 m 이격된 지점에서 수행하였다. 이 때, 현장시험에 따른 지반의 교란에 대한 영향을 최소화하기 위하여 비교적 지반의 교란이 적은 콘 관입시험을 먼저 수행한 후에 인접한 지점에서 공내재하시험을 수행하였다.

3.1 동결/융해에 따른 지반의 강도 특성

피에조 콘 관입시험은 연약지반 설계 시 가장 중요한 고려요소인 압밀특성, 전단강도 특성, 응력분포 특성 등을 단일 관입시험을 통해 얻을 수 있는 시험방법으로, 지반에 일정한 속도로 관입되는 콘 내부에 설치된 전기식 로드 셀을 통해 콘 관입과 함께 선단저항치, 슬리브마찰력, 그리고 간극수압을 연속적으로 측정한다. 본 실험에서는 ASTM D 5778 방법을 준수하여 관입속도 2 cm/sec로 콘을 지중에 관입하였고, 콘 관입시험 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

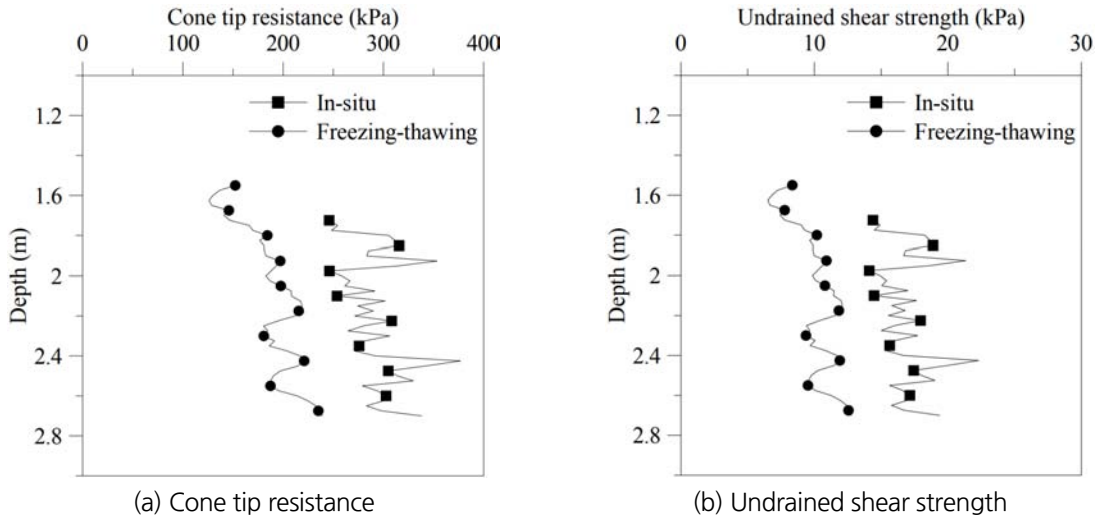


Fig. 9. Results of piezo cone penetration test

이 때, 비배수 전단강도(Undrained shear strength, S_u)는 아래 식을 통해 산정되었다.

$$S_u = \frac{Q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}} \quad (1)$$

$$Q_t = q_c + u(1 - a) \quad (2)$$

$$a = \frac{A_n}{A_c} \quad (3)$$

여기서, Q_t 는 불균등면적비가 보정된 콘 지지력, N_{kt} 는 경험적 콘지수(Cone factor), a 는 순 면적비이다. 본 시험에 적용된 콘의 N_{kt} 와 a 는 각각 15, 0.7이다.

시험 결과, 인공동결공법에 의한 동결/융해로 인하여 해성 점토지반의 강도가 저하된 것을 확인할 수 있었고, 지표부근에서 약 53.9%, 지표하 2.7 m 부근에서는 강도가 약 43.0% 정도 저하되었다. 동결과정에서 간극수는 상 변화하면서 약 9%의 부피팽창이 발생되고, 이로 인하여 간극비가 증가된다. 증가된 간극비는 융해과정에서 발생하는 입자의 재배치로 인하여 감소되는데, 감소폭은 상재하중에 따라 상이하다. 상재하중이 지표부근에 비해 큰 지표하 2.7 m 부근의 경우, 흙 입자가 보다 조밀하게 재배치되어 강도저하율이 작게 산정된 것으로 판단된다.

또한, 콘 관입시험 결과로부터 대상 부지의 지층분포를 추정할 수 있고, Robertson (1990)의 흙 분류방법을 이용하여 분석한 결과를 Fig. 10과 Table 3에 나타내었다.

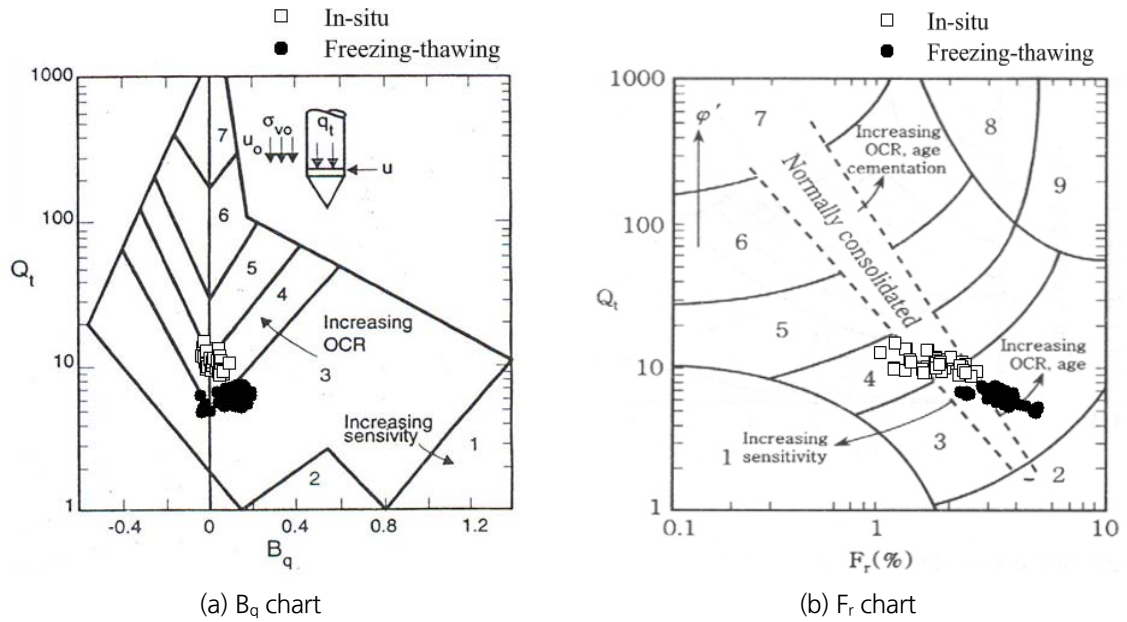


Fig. 10. Soil classification based on results of cone penetration test (Robertson, 1990)

Table 3. Soil classification according to freezing-thawing by Robertson's chart (Robertson, 1990)

	Soil classification	Note
In-situ	4. Soil mixtures clayey silt to silty clay	1. Sensitive, fine grained 2. Organic soils-peat 3. Clays-clay to silty clay 4. Soil mixtures clayey silt to silty clay
Freezing-thawing	3. Clays-clay to silty clay	5. Sand mixtures; silty sand to sand silty 6. Sand; clean sand to silty sand 7. Gravelly sand to sand 8. Very stiff sand to clayey sand 9. Very stiff fine grained

여기서, 간극수압계수(Pore pressure coefficient, B_q)와 마찰비(Friction ratio, F_r)는 아래 식으로 각각 산정되었다.

$$B_q = \frac{u - u_0}{q_t - \sigma_{v0}} \quad (4)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_c} \times 100(\%) \quad (5)$$

Fig. 10에 나타난 바와 같이 콘 관입시험을 통해 원지반은 ‘4. Soil mixtures clayey silt to clay’, 동결/융해된 지반은 ‘3. Clays-clay to silty clay’로 분류되었다. 이는 동결과정에서 간극수의 동결팽창에 따라 흙 입자의 파쇄 및 지반의 간극이 증가되고, 융해과정에서 동결토가 융해됨에 따라 흙 입자의 재배치 및 지반의 소성변형이 발생하면서 지반의 강도가 저하되었기 때문이다.

조립토의 경우에는 동결과정에서 간극수의 동결팽창에 의하여 간극비의 증가와 함께 흙 입자의 파쇄에 의한 흙 입자구조의 변형이 발생된다. 동결과정에서 조립토의 흙 입자 파쇄는 흙 입자 내부에 존재하는 간극수(porewater)의 동결팽창과 이로 인한 흙 입자의 균열이 증가되어 발생된다(Fig. 11). 그러나 세립토의 경우에는 흙 입자 내부에 존재하는 간극수 혹은 흙 입자의 균열이 미비하기 때문에 동결과정에서 흙 입자가 파쇄될 가능성이 조립토에 비하여 적다(Chamberlain and Gow, 1979; Qi et al., 2006; Angin et al., 2016).

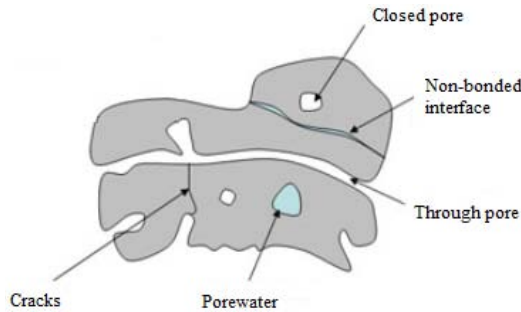


Fig. 11. Components of soil structure (Angin et al., 2016)

본 연구에서는 동결/융해에 따른 흙 입자구조의 변화를 평가하기 위하여 원지반과 동결/융해된 지반의 비교란 시료에 대한 기본물성시험을 수행하였고, 시험결과를 Fig. 12와 Table 4에 정리하였다.

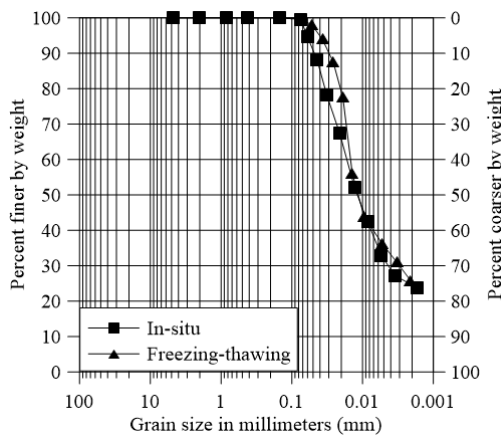


Fig. 12. Grain size distribution curve according to freezing-thawing

Table 4. Fundamental physical properties according to freezing-thawing

	Dry unit weight (g/cm ³)	Water content (%)	Atterberg limit		USCS
			LL (%)	PI (%)	
In-situ	1.263	42.5	51.4	26.4	CH
Freezing-thawing	1.227	47.6	52.1	26.9	CH

입도분석시험 결과, Fig. 12에 나타난 바와 같이 동결/융해된 지반이 원지반에 비하여 세립질로 평가되었다. 입도분포의 차이는 실트(0.005~0.074 mm)에 해당하는 입경 구간에서 주로 발생한 것으로 파악되었으나, 동결과정에서 흙 입자 내부 간극수의 동결팽창 혹은 흙 입자 균열의 증가로 인하여 흙 입자가 파쇄된 것으로 평가하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 또한, 동결/융해에 따른 함수비의 증가는 간극수의 동결팽창에 의하여 지반의 간극이 증가하였기 때문으로 판단된다(Table 4).

콘 관입시험 결과를 통한 흙의 분류가 동결/융해에 따라 변화한 것과 달리 입도분석시험을 통한 흙의 분류는 동결/융해에 따라 변화하지 않았다. 입도분석시험에 따른 흙 분류의 경우, 간극수의 동결팽창에 따른 흙 입자의 파쇄가 주로 실트에 해당하는 입경 구간에서 발생함으로써 세립토의 분류 기준인 액성한계(Liquid limit, LL)와 소성지수(Plasticity index, PI)에 대한 흙 입자 파쇄의 영향이 미비하여 동결/융해에 따라 흙의 분류가 변화하지 않은 것으로 사료된다.

3.2 동결/융해에 따른 강성 평가

공내재하시험은 시추공벽의 원주전체 또는 일부를 가압하여 가압하중에 따른 공벽면의 변형량을 측정함으로써 지반의 강성 및 변형특성을 평가하는 시험으로, 본 시험에서는 시추공 내에 팽창성 고무튜브를 삽입하고 액체나 기체에 의하여 시험공의 공벽에 하중을 가하는 등압분포재하법이 적용되었다. 공내재하시험 결과를 Fig. 13에 나타내었다.

여기서, P_e , r , ΔH 는 아래 식 (6), (8), (9)를 통해 각각 산정되었고, P_s 는 PG-P의 최대값, t 는 팍커의 두께, L 은 팍커의 길이, 그리고 S 는 팍커의 단면적이다.

$$P_e = P + P_s - PG \tag{6}$$

$$PG = 0.14 \times H_{120} + 0.03 \tag{7}$$

$$r = \sqrt{t^2 + \frac{H_{120} \times S}{3.14 \times L}} \tag{8}$$

$$\Delta H = H_{120} - H_{30} \tag{9}$$

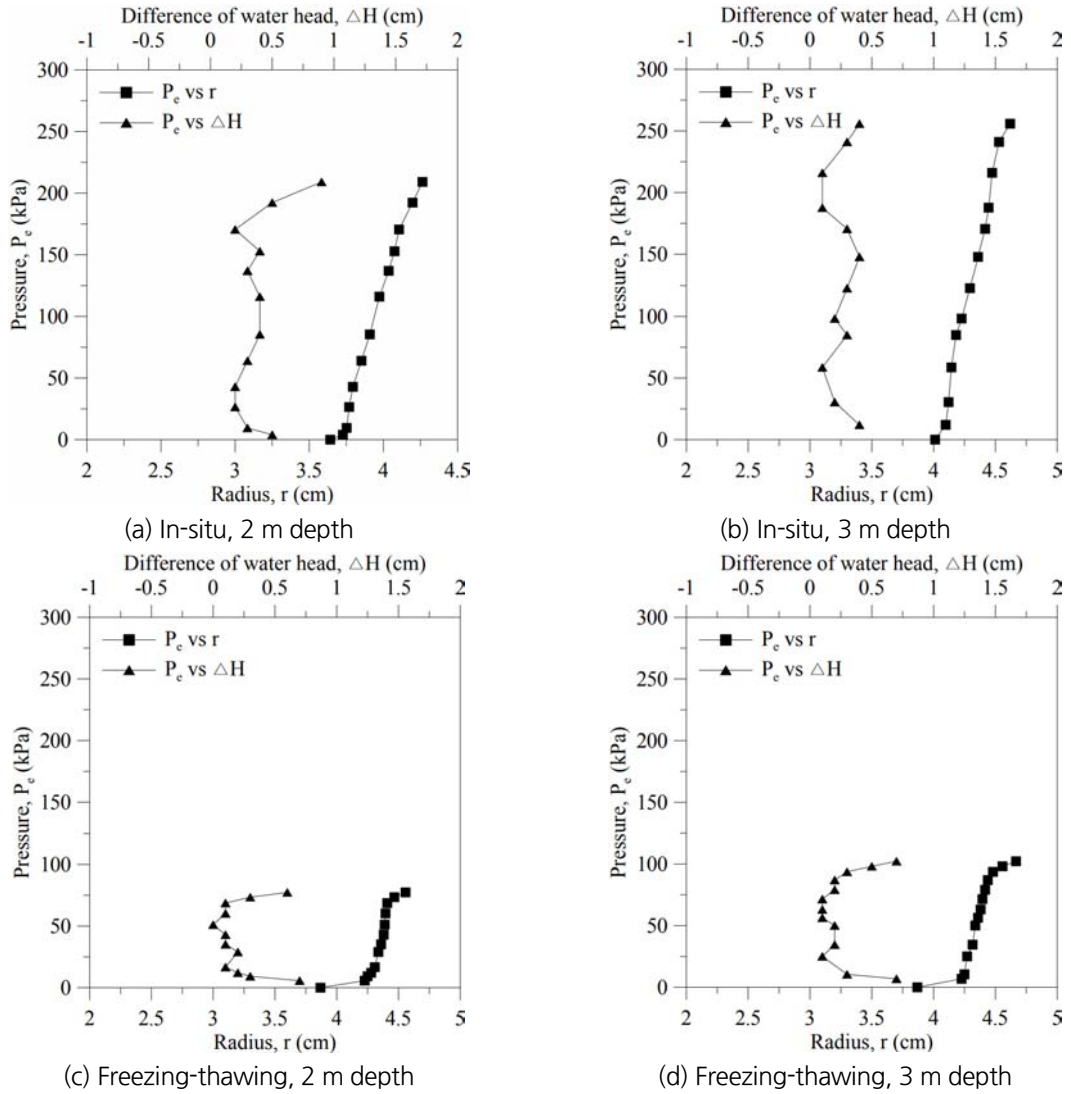


Fig. 13. Results of lateral load test

Table 5. Summary of lateral load test according to freezing-thawing

	Depth (m)	Earth pressure at rest (P_0 : kPa)	Yield pressure (P_L : kPa)	Coefficient of soil reaction (K_m : kPa)	Modulus of elasticity (E_m : kPa)	Average of modulus of elasticity (kPa)
In-situ	2.0	4.0	170.5	439.7	2,583.08	3037.9
	3.2	12.0	216.0	543.3	3,492.75	
Freezing-thawing	2.0	5.7	68.7	344.9	2,233.89	2349.3
	3.2	6.9	87.0	379.3	2,464.68	

여기서, K_m 과 E_m 은 아래 식 (10), (11)을 통해 각각 산정되었다.

$$E_m = 1.5 \times K_m \frac{(r_0 + r_y)}{2} \quad (10)$$

$$K_m = \frac{p_y - p_o}{r_y - r_o} \quad (11)$$

시험 결과, Table 5에 정리된 바와 같이 인공동결공법을 통한 동결/융해로 인하여 해성 점토지반의 강성이 저하된 것을 확인할 수 있고, 강성저하율은 약 22.7%로 산정되었다.

3.3 시험결과 분석

큰 관입시험 및 공내재하시험 결과, 동결/융해에 따른 강도 및 강성 저하는 각각 약 48.5%와 22.7%로 산정되었다. 이는 동결과정에서 동결팽창에 따라 간극수의 부피가 약 9% 증가됨으로써 발생하는 흙 입자의 파쇄 및 지반의 간극 증가와 인공동결공법 완료 후 융해과정에서 발생하는 흙 입자의 재배치 및 지반의 소성변형 때문으로 사료된다.

Cheng et al. (2009)은 실내시험을 통해 동결/융해 반복에 따른 전단강도 저하율 공식을 도출하였고, 식 (12), (13)과 같이 제시하였다.

$$\beta_n = 0.47 \times e^{-0.234n} + 0.57 \quad (12)$$

$$\tau_n = \beta_n \tau_0 \quad (13)$$

여기서, n 은 동결/융해 반복회수이다. 본 실험은 n 이 1인 조건이고, 위 식을 통해 산정된 전단강도 저하율은 약 6%이다. 위 식을 통해 산정되는 전단강도 저하율은 동결/융해 반복이 무한히 증가하여도 43%로 수렴된다. 또한, Shin et al. (2002)은 1회의 동결/융해에 의하여 흙의 일축압축강도가 약 18% 감소된다고 보고한 바 있다. 그러나 본 실험에서는 인공동결공법을 통해 동결/융해가 1회 수행되었지만 강도저하율이 48.5%로 산정되어 비교적 큰 강도저하율이 산정되었다.

4. 결론

본 연구에서는 해성 점토지반에 대한 인공동결공법 현장실증시험을 수행하였다. 지중에 3.2 m 길이의 동결관

1공을 매설한 후 액화질소를 순환시킴으로써 주변 지반을 동결시키는 방법으로 현장실증시험이 수행되었다. 또한, 원지반과 동결/융해된 지반에 대하여 피에조 콘 관입시험 및 공내재하시험을 수행함으로써 인공동결공법에 의한 동결/융해가 해성 점토지반의 강도 및 강성 특성에 미치는 영향을 평가하였다.

1. 인공동결공법 현장실증시험은 총 11.5일간 수행되었으며, 3.5일간 동결관을 통해 액화질소를 주입하여 주변 지반을 동결시킨 후, 8일간 상온(약 10°C)에서 융해시킴으로써 인공동결공법에 따른 지반의 온도변화를 측정하였다. 자동밸브를 통해 액화질소의 주입유속을 조절시킴으로써 질소의 유출온도를 약 -170°C로 유지시켰으며, 인공동결공법에 의해 동결관을 중심으로 반지름 약 0.5 m, 높이 약 2.7 m인 원기둥 모양의 동결체가 형성되었다.
2. 동결/융해에 따른 피에조 콘관입시험 결과, 지표부근에서 약 53.9%, 지표 하 2.7 m 부근에서 약 43.0%의 강도 저하율이 산정되었다. 이는 상재하중이 지표부근에 비해 큰 지표 하 2.7 m 부근의 경우, 동결과정에서 증가된 간극비의 감소가 발생하는 융해과정에서 흙 입자의 재배치가 보다 조밀하게 발생하였기 때문으로 사료된다.
3. 콘 관입시험 결과를 통한 흙 분류의 경우, 동결/융해에 따른 강도저하로 인하여 동결/융해 전후에 흙의 분류가 변화하였다. 흙 입자 내부에 간극수 혹은 흙 입자의 균열이 미비한 세립토의 경우에는 동결에 의하여 흙 입자구조의 변화에 대한 영향이 조립토에 비하여 적다. 즉, 세립토 지반에서 동결/융해에 따른 흙 분류의 변화는 동결에 따른 흙 입자구조의 변화에 대한 영향보다 간극수의 동결팽창을 통해 발생된 간극비 증가에 의한 지반의 강도감소의 영향이 크다.
4. 공내재하시험 결과, 인공동결공법에 따른 동결/융해에 의해 해성 점토지반의 강성이 저하되었으며, 강성저하율은 약 22.7%로 산정되었다. 동결/융해에 따른 지반의 강성저하는 동결과정에서 발생하는 간극수의 동결팽창이 융해과정에서 흙 입자의 재배치를 유발시키기 때문으로 사료된다.
5. 터널 및 지하구조물 시공(TBM 발진구 및 수직구, 병렬터널의 연결구 등)에서 차수 및 지반보강 공법으로 인공동결공법을 적용할 경우, 설계단계에서 동결/융해에 따른 지반의 강도 및 강성 저하를 중요하게 고려하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13 건설연구 T01)의 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

1. Angin, I., Sari, S., Aksakai, E.L. (2016), "Effects of diatomite (DE) application on physical properties of soils subjected to freeze-thaw cycles", Soil and Tillage Research, Vol. 160, No. 1, pp. 34-41.

2. Arenson, L.U., Sego, D.C. (2006), "The effect of salinity on the freezing of coarse-grained sands", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 43, No. 3, pp. 325-337.
3. Chamberlain, E.J., Gow, A.J. (1979), "Effect of freezing and thawing on the permeability and structure of soils", *Engineering Geology*, Vol. 13, No. 1-4, pp. 73-92.
4. Cheng, Y., Ge, Q., He, Y. (2009), "Experimental research on the shear strength deterioration between the freezing and thawing surface of melting soil slope in seasonal frozen regions", *Proceedings of the Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals*, Harbin, pp. 2284-2290.
5. Choi, C.Y., Shin, E.C., Kang, H.H. (2011), "Reduction of shear strength of railway roadbed materials with freezing-thawing cycle", *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 12, No. 7, pp. 13-21.
6. Eigenbrod, K.D. (1996), "Effects of cyclic freezing and thawing on volume changes and permeabilities of soft fine-grained soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 529-537.
7. Han, L., Ye, G., Li, Y., Xia, X., Wang, J. (2016), "In situ monitoring of frost heave pressure during cross passage construction using ground-freezing method", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 53, No. 3, pp. 530-539.
8. Jessberger, H.L. (1981), "State-of-the-art report-Ground freezing. Mechanical properties, processes and design", *Engineering Geology*, Vol. 18, No. 1, pp. 5-30.
9. Kang, S.S., Kim, J.I., Obara, Y., Hirata, A. (2011), "Estimation of weathering characteristics of sandstone and andesite by freeze-thaw test", *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 21, No. 2, pp. 145-150.
10. Kudryavtsev, S.A. (2004), "Numerical modeling of the freezing, frost heaving, and thawing of soil", *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 41, No. 5, pp. 177-184.
11. Padilla, F., Villeneuve, J.P., Stein, J. (1997), "Simulation and analysis of frost heaving in subsoils and granular fills of roads", *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 25, No. 2, pp. 89-99.
12. Papakonstantinou, S., Anagnostou, G., Pimentel, E. (2013), "Evaluation of ground freezing data from the Naples subway", *Geotechnical Engineering*, Vol. 166, No. 3, pp. 280-298.
13. Pimentel, E., Papakonstantinou, S., Anagnostou, G. (2012), "Numerical interpretation of temperature distributions from three ground freezing applications in urban tunneling", *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 57-69.
14. Qi, J., Vermeer, P.A., Cheng, G. (2006), "A review of the influence of freeze-thaw cycles on soil geotechnical properties", *Permafrost and Periglacial Processes*, Vol. 17, No. 3, pp. 245-252.
15. Robertson, P.K. (1990), "Soil classification using the cone penetration test", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 27, No. 1, pp. 151-158.
16. Shawn, P.C., Juan, L.P., Michael, A.S. (2016), "Ground freezing to repair leaks in a slurry wall shaft", *World Tunnel Congress 2016*, San Francisco, pp. 1-10.
17. Shin, E.C., Kang, H.M., Park, J.J., Kim, S.H. (2009), "Experimental study of frozen barrier using artificial ground freezing system", *Journal of the Korean Geosynthetics Society*, Vol. 8, No. 3, pp. 35-44.
18. Shin, E.C., Park, J.J., Kim, J.I. (2002), "Frost heaving pressure characteristics of frozen soils with frost-susceptibility and degree of saturation", *Korean Geotechnical Society Spring Conference 2002*,

Seoul, pp. 329-336.

19. Song, H., Cai, H., Yao, Z., Rong, C., Wang, X. (2016), "Finite element analysis on 3D freezing temperature field in metro cross passage construction", *Procedia Engineering*, Vol. 165, No. 1, pp. 528-539.
20. Sun, C., Qiu, P. (2012), "Research on the freezing method applied to tunnel cross passage of the Guangzhou metro", *Modern Tunnelling Technology*, Vol. 49, No. 3, pp. 161-165.
21. Yan, Q., Fang, X. (2012), "Thermal-solid coupling analysis of the connected of the cross aisle in metro constructed by horizontal freezing in ground", *China Railway Science*, Vol. 33, No. 1, pp. 54-59.
22. Yang, P., Ke, J., Wang, J.G., Chow, Y.K., Zhu, F. (2006), "Numerical simulation of frost heave with coupled water freezing, temperature and stress fields in tunnel excavation", *Computers and Geotechnics*, Vol. 33, No. 6, pp. 330-340.