

## 동결 온도와 재하속도에 따른 동결토의 일축압축 및 쪼갬인장 강도특성

서영교 · 최현우  
한국해양대학교 해양공학과

### Experimental Study on Unconfined Compression Strength and Split Tensile Strength Properties in relation to Freezing Temperature and Loading Rate of Frozen Soil

Young-Kyo Seo and Heon-Woo Choi

Department of Ocean Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**KEY WORDS:** Frozen soil 동결토, Uniaxial compression test 일축압축시험, Indirect tensile test 간접인장시험, Freezing temperature 동결온도, Axial strain rate 축 변형 속도, Initial tangent modulus 초기탄성계수

**ABSTRACT:** Recently the world has been suffering from difficulties related to the demand and supply of energy due to the democratic movements sweeping across the Middle East. Consequently, many have turned their attention to never-developed extreme regions such as the polar lands or deep sea, which contain many underground resources. This research investigated the strength and initial elastic modulus values of eternally frozen ground through a uniaxial compression test and indirect tensile test using frozen artificial soil specimens. To ensure accurate test results, a sandy-mud mixture of standard Jumunjin sand and kaolinite (20% in weight) was used for the specimens in these laboratory tests. Specimen were prepared by varying the water content ratio (7%, 15%, and 20%). Then, the variation in the strength value, depending on the water content, was observed. This research also established three kinds of environments under freezing temperatures of 5°C, -10°C, and -15°C. Then, the variation in the strength value was observed, depending on the freezing environment. In addition, the tests divided the loading rate into 6 phases and observed the variation in the stress-strain ratio, depending on the loading rate. The test data showed that a lower freezing temperature resulted in a larger strength value. An increase in the ice content in the specimen with the increase in the water content ratio influenced the strength value of the specimen. A faster load rate had a greater influence on the uniaxial compression and indirect tensile strengths of a frozen specimen and produced a different strength engineering property through the initial tangential modulus of elasticity. Finally, the long-term strength under a constant water content ratio and freezing temperature was checked by producing stress-strain ratio curves depending on the loading rate.

#### 1. 서 론

최근 많은 양의 석유와 천연가스가 매장된 것으로 확인된 동토지역에 대한 개발이 활발하게 진행되고 있다. 이러한 동토지역의 개발 사업으로는 석유, 천연가스, 석탄, 전락금속, 산림자원 등의 사업이 예상되며 또한 운송도로 및 철도, 상하수도관 매설과 파이프라인 공사, 주거시설 등의 부대시설 그리고 공항, 항만, 발전소 등 기간시설이 필수적으로 수반될 전망이다. 하지만 동토지역은 기상, 기후조건, 지반의 공학적 특성, 인문지리, 풍습 등 제반 건설 환경이 국내 또는 현재 진출해 있는 다른 지역과는 판이하게 다르며, 종래의 지반에 관한 기초지식을 그대로 동토

에 적용한다는 것은 무리한 결과를 가져올 우려가 있으며, 국내 건설업체, 자원개발업체 등의 진출을 위한 이 지역에 대한 기술 자료의 수집, 분석과 구조물 설계, 시공법에 관한 체계적이고 전문적인 연구가 요구되고 있다. 현재 국외 동토에 관련된 연구현황을 보면 동결 사질토의 삼축 실험(Gregory, 2003), 동토의 열수분 물리적 모델의 일체화(Ning, 2000), 동토의 물리적인 고유특성을 위한 초음파 기술의 적용(Wang, 2005), 포장도로에서 동토의 기초와 지반점토의 파괴(Konrad, 2001), 불포화된 동토의 침하를 완화하기 위한 다방면의 접근(Corapcioglu, 1995) 등 동토에 관련해서 여러 연구들이 활발하게 진행되고 있다. 이 외에도 동토지역에서 해결해야할 현장문제들로 지반 융해 시 기초지반의

Received 21 September 2012, revised 9 November 2012, accepted 11 December 2012

Corresponding author Heon-Woo Choig : +82-10-5564-9676, hwbest24@hotmail.com

© 2012, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2011 in Busan

지저력 감소, 결빙토의 융해에 따른 지반침하, 지반 결빙에 따른 지반응기, 결빙 융해 주기 반복에 따른 도로 파손, 지반결빙에 따른 지하 매설물의 동파 문제, 천공, 시료채취, 그리고 함빙비가 큰 동결 기초지반의 장기적 변형 등에 대한 연구가 진행되었다(Hong, 1992; Cho et al., 1993; Hong et al., 2010). 본 연구에서는 동토지역에서 나타나는 많은 문제점들 중 동토지역의 흙은 지반 내 간극수가 낮은 기온에 의해 얼게 되면서 소성재료인 흙이 얼음과 같은 취성파괴의 형태를 나타내며 일반적인 지반과는 다른 강도특성을 보이는 것에 관하여 시험을 통하여 그 원인을 분석해 보았다. 취성파괴는 공학적으로 매우 불안한 상태의 재료로서 앞서 말한 개발을 위한 제반시설들을 건설하는데 많은 위험과 어려움이 예상된다. 이에 본 연구에서는 다양한 경우의 시험을 통해 동토의 강도변화 특성을 확인해 보았다.

## 2. 동결토에 영향을 미치는 요소

### 2.1 부동수분

부동수분(Unfrozen water content)이란 지반이 동결하여도 흙속에서 일정한 온도까지 얼지 않는 상태로 존재하는 수분을 말한다. 지반에 동상현상이 일어날 때 지하로부터 모세관현상에 의해 올라 온 간극수는 흙 속 부동수의 막을 통로로 하여 이동하는 것으로 알려져 있다. 따라서 동결 시 부동수분을 많이 포함하고 있는 흙에서는 동상이 활발하고, 적게 포함하고 있는 흙에서는 상대적으로 동상이 작게 일어난다. 또한, 부동수분이 많고 적음에 따라 동결토를 구성하는 흙 입자와 얼음의 밀착관계가 달라지므로 동결토의 강도가 달라지고, 동결토의 열전도율, 전기비저항 등도 달라진다(Kim et al., 2003; Kim, 2006; Choi, 2009).

### 2.2 동결 온도

Fig. 1에서 확인할 수 있듯이 동결공시체는 온도가 낮아질수록 부동수분이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 동결토 내 부동수분이 많을 경우 부동수분의 윤희제 작용으로 인해 일축압축강도가 작아짐을 확인할 수 있다(Kim et al., 2001; Kim et al., 2003; Kim et al., 2005; Kim, 2009).

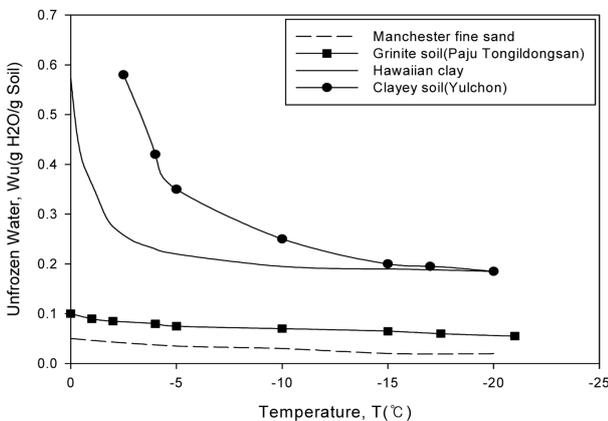


Fig. 1 Unfrozen water alteration of soil to frozen temperature

### 2.3 재하속도

동결모래의 재하속도가 느리면 흙입자와 얼음사이의 압축력이

얼음의 융해를 일으키면서 물이 생기게 되고, 이 때 이 물들의 이동 후 재 동결과정에서 흙입자의 이동이 발생하게 된다. 이러한 이동은 공시체를 좀 더 촘촘하게 만들면서 완만한 강도 변화 곡선을 보이게 되며, 그 반대의 경우 급한 경사의 변위에 대한 강도 변화 곡선을 보이게 된다(Richard et al., 1981; Choi, 1990; Choi, 1991; Ku and Kim, 2000).

## 3. 시험 방법 및 장비

### 3.1 시험방법

본 연구에 사용된 시편은 직경 73.8mm, 길이 180mm로 주문 제작된 몰드를 사용하였고, 시험에 사용된 흙은 표준사와 카오리나이트를 혼합한 사질혼합토를 사용하였다, 이 때 카오리나이트의 비율은 표준사 중량의 20%로 통일하여 혼합하였다(Table 1). 모든 시편의 밀도를 동일하게 유지시키기 위해 표준다짐에너지 (ASTM D698, 1982)와 동일한 다짐에너지를 주어 제작하였다. 또한 다양한 환경에서의 실험결과를 얻기 위하여 각기 다른 함수비(7%, 15%, 20%)와 동결온도(-5°C, -10°C, -15°C)를 사용하였으며, 동결시간은 Fig. 2와 같이 동결시간에 따른 강도가 24시간(1440분) 동결 이후 변화가 없음을 실험으로 확인하여 결정하였다. 동토의 경우 동결온도에 따라 강도값의 변화가 예민하게 달라질 수 있으므로 모든 시편에 동일하게 적용시켰으며 동결과정

Table 1 Sand-mud mixed soil properties

Proctor compaction test	$\gamma_{dmax}$ ( $t/m^3$ )	1.93
	$\omega_{opt}$ (%)	12.0
Permeability (k, cm/sec)		$8.25 \times 10^{-3}$
Uniformity coefficient (Cu)		1.88
Coefficient of gradation (Cg)		1.24

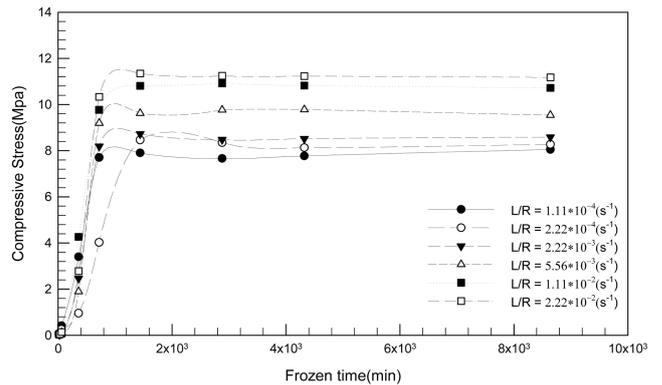


Fig. 2 Unconfined compression strength to freezing time

Table 2 Specifications of Cold room

Dimension	4m×6m×2.6m
Temperature Control	-30deg ~ + 15deg
Temperature Accuracy	±0.5deg at -20deg

에서 기화현상으로 인한 수분손실을 최소화하기 위하여 밀봉하였다. 동결 후 전동식 코어 추출기를 사용하여 시편을 추출하였으며, 이

때 추출속도는 3mm/sec로 고정하였다. 추출된 시편은 일축압축시험을 위해 상, 하부를 트리밍 하여 수평 평탄도를 유지하고 높이가 직경의 2배가 되도록 제작하였다. 모든 과정은 작업 중 발생하는 열에 의한 동결 시편의 용해를 방지하기 위해 콜드룸(Table 2)에서 동결온도와 동일한 온도로 수행함으로써 열에 의한 피해를 최소화 하였으며, 트리밍 작업 후 1시간(60분)동안 추가 동결시킨 뒤 시험을 수행하였다. 하중재하속도는 총 3단계(2 mm/min, 20mm/min, 200mm/min) 즉 초당 변형율속도로 환산하면 ( $2.22 \times 10^{-4}$ ,  $2.22 \times 10^{-3}$ ,  $2.22 \times 10^{-2}(s^{-1})$ )로 하여 다양한 경우에서의 강도 변화를 확인하였다(Nakano and Froula, 1973; Freitag and McFadden, 1997; Kwon et al., 2005; Korean industrial standard KS F 2343).

3.2 시험장비

실험에 사용된 만능재료시험기는 저온에서 작동 가능 하도록 특수 제작된 챔버형 장비로서, 인장 압축, 굴곡, 항절 시험 등을 수행할 수 있다. 종래의 지침식 시험기(Analog) 및 숫자식 시험

기(Digit type)에서 발전된 것으로 하중을 전자식 감응 장치인 Load cell로 감지하여 디지털 장치로 표시하게 되며, 정밀도 및 내구성 면에서 기존 시험기 보다 발전된 시험기이다.

4. 모형시험 결과 및 해석

4.1 일축압축강도 실험 결과

일축압축 시험결과 동일한 재하속도에서 함수비의 차이에 따라 다양한 강도변화곡선을 보였다. 또한 실험결과에 대한 항복점은 변형을 증가에 대하여 하중의 증가가 현격히 감소하는 지점을 항복점으로 정의 하였다. 함수비가 낮은 7%의 경우 침투하중까지 완전한 강도변화곡선을 보이며 일반 흙과 비슷한 경향을 나타내고 있는 반면, 함수비가 20%인 경우 침투하중까지의 강도변화곡선은 얼음과 유사한 형태를 보이고 있었다. 그리고 재하속도가 빨라질수록 침투하중 이후 급작스런 강도변화를 보이며 취성과괴의 경향까지 나타내고 있다. Fig. 3의 (d) 그래프는 사용된 시료의 최적함수비와 가장 유사한 함수비 15%일 때의 강

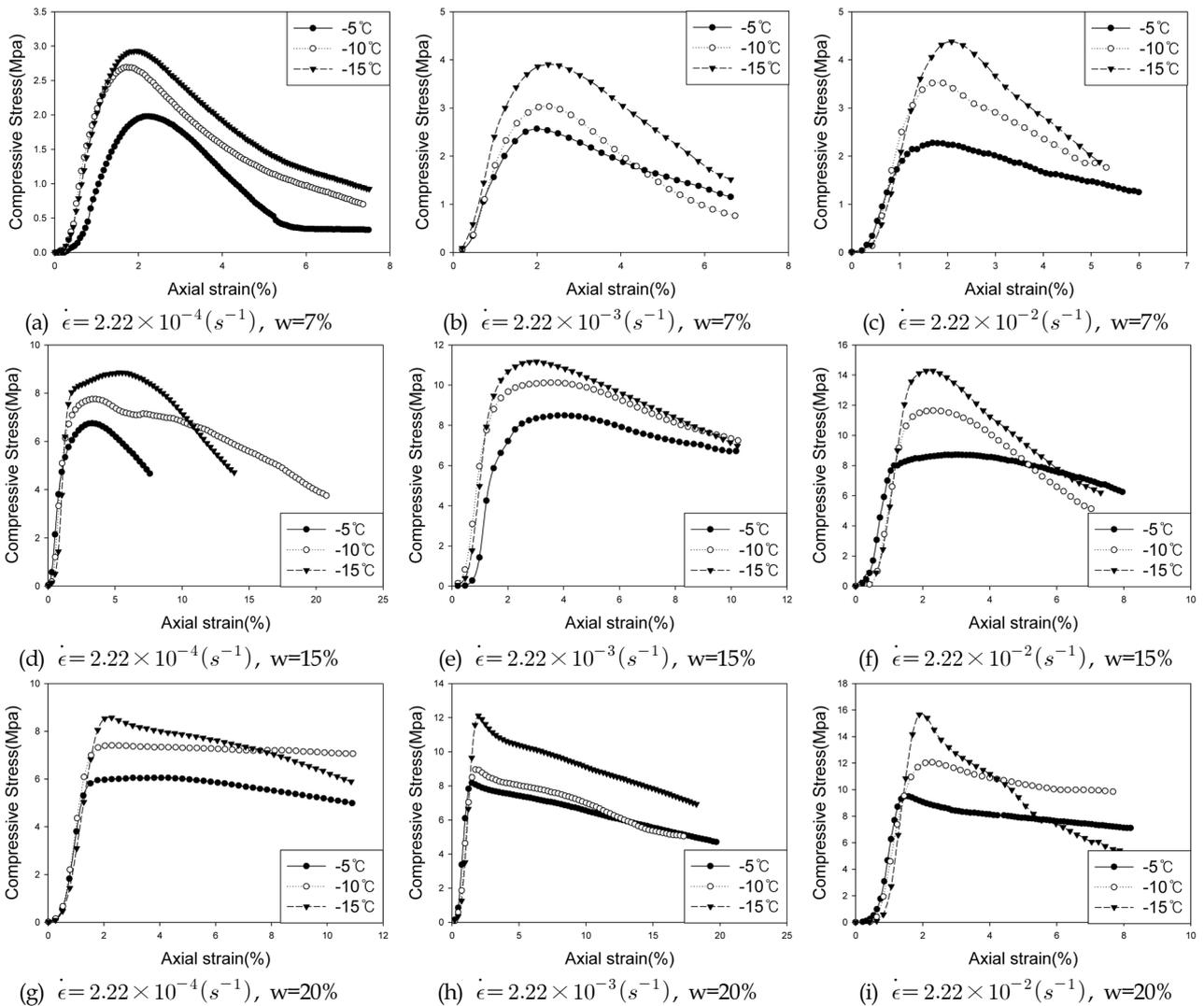


Fig. 3 Strength alteration curve of unconfined compression test

도변화곡선으로 약 2%의 변위율까지 강도 값이 수직에 가까운 기울기로 증가하면서 얼음과 유사한 강도변화를 보이다가 어느 지점부터 완만한 강도변화곡선으로 흙의 특성을 보이며, 얼음과 흙의 강도변화특성을 동시에 나타내고 있다. 이는 하중이 재하됨에 따라 초기의 급한 경사는 시편 내 얼음이 모든 하중에 저항하기 때문이며 일정하중이 재하로 얼음이 파괴되면서 일차적인 항복점을 나타내고, 이 후 느린 재하속도로 작용하는 압축력에 의해 시료 내 흙 입자와 얼음 사이에서 발생하는 마찰열이 얼음의 용해를 일으키게 되는데 이 때 발생한 물들은 시료의 공극을 통해 수직방향으로 이동을 하며 흙 입자의 조밀한 재배열을 유도한 뒤 동결온도에 의해 다시 어느 과정을 갖는다 (Richard and Andersland, 1981). 이 같은 과정은 연속으로 발생하며 일차항복점 이후 침두하중까지의 강도변화곡선이 완만한 곡선을 보이는데 영향을 주고 있다. 하지만 Fig. 3의 (e), (f)를 보면 동일한 함수비이지만 재하속도가 증속됨에 따라 일차항복점 이후 침두하중까지의 강도변화곡선을 거의 찾아볼 수 없게 된다. 이와 같은 결과들을 통해 재하속도가 빠르고 함수비가 높을수록 동결시편의 강도는 얼음에 의해 결정됨을 확인할 수 있다.

이는 Table 3을 통해서도 확인할 수 있다. 함수비가 낮은 경우 동결시편의 얼음의 양이 거의 없으므로 인해 최대 재하속도와 최소 재하속도에 따른 강도 값의 변화는 동결온도에 상관없이 평균 1.7Mpa을 보인다. 하지만 함수비가 15% 이상의 경우에는 최소 2Mpa에서 최대 6Mpa까지 차이를 보이며, 동결시편 내 함수비에 따른 얼음 증가에 영향을 주는 동결온도가 낮고 함수비가 높을 때, 그 차이가 커짐을 확인할 수 있다. 또한 얼음의 경우 재하속도 증속에 따른 충격력에 따라 강도가 크게 증

가하는 특성을 가지고 있다. 이러한 특성을 Fig. 4의 각 재하속도에서 동결온도 변화에 따른 함수비별 강도 변화를 통해 확인할 수 있다. 재하속도가 2mm/min 인 (a) 그래프에서는 재하속도에 의한 영향이 거의 없으므로 따라 최적함수비와 가장 가까운 15% 함수비인 경우에서 최대강도값을 찾을 수 있다. 하지만 재하속도가 20mm/min인 (b)그래프 중 동결온도가 15°C일 때 함수비 20%에서 동결시편 내 얼음의 강도 값이 흙의 강도값을 역전함을 확인할 수 있다. 이 때의 얼음의 강도는 순수한 얼음의 강도와 상대적으로 빠른 하중재하속도가 합쳐진 강도로 예상되며, 재하속도가 200mm/min인 (c)그래프에서 함수비가 가장 높은 20%에서는 동결온도에 상관없이 가장 높은 강도를 갖는 것을 통해 확인할 수 있다.

4.2 간접인장강도 실험 결과

일반적으로 흙은 인장강도가 약하고 소성재료이기 때문에 최대인장강도값 이후 파괴 거동은 Fig. 5의 (a), (b), (c)와 같이 재하속도에 상관없이 완만한 곡선을 그리며 파괴점에 도달한다. 하지만 함수비의 증가로 인한 동결시편 내 얼음의 증가는 재하속도에 따라 다른 파괴곡선을 그리고 있다. 특히 하중재하속도가 200mm/min 이상일 경우 최대인장강도 이후 갑자기 파괴되는 취성파괴의 형태를 보이고 있다. 또한 함수비의 증가에 따라 최대인장강도값의 변화는 있으나 강도변화곡선은 유사한 형태를 보이고 있다. 이러한 취성파괴는 일반적으로 얼음, 콘크리트, 암석과 같은 재료에서 발견되는 특성으로 동결시편 내 함수비가 증가되거나 동결온도가 낮아짐에 따라 얼음의 양이 증가하게 되고 이는 재료의 주 성분이 흙임에도 불구하고 동결시편의 파괴형태가 거의 얼음과 같아지는 결과로 이어졌다.

Table 3 Max compressive stress result of unconfined compression test

Max Compressive Stress (Mpa)	Temperature (°C)								
	-5			-10			-15		
	Water content (%)			Water content (%)			Water content (%)		
Axial strain rate	7	15	20	7	15	20	7	15	20
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-4} (s^{-1})$	1.730	6.669	5.879	2.396	7.817	7.248	2.923	8.951	8.552
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-3} (s^{-1})$	2.519	8.365	7.923	3.038	9.937	9.341	3.525	11.129	12.429
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-2} (s^{-1})$	3.482	8.631	9.467	4.042	11.531	12.736	4.663	14.294	15.782

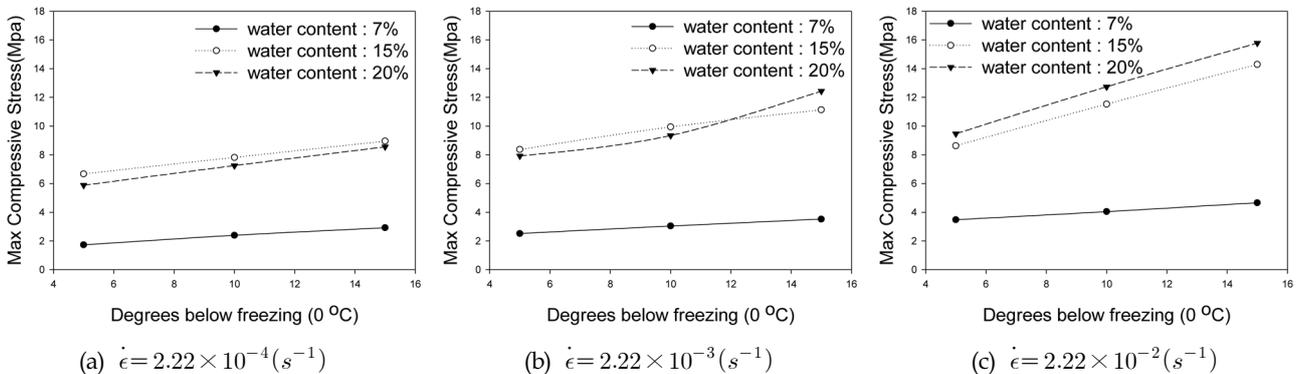


Fig. 4 Max compressive stress behavior characteristics to freezing temperature and loading rate

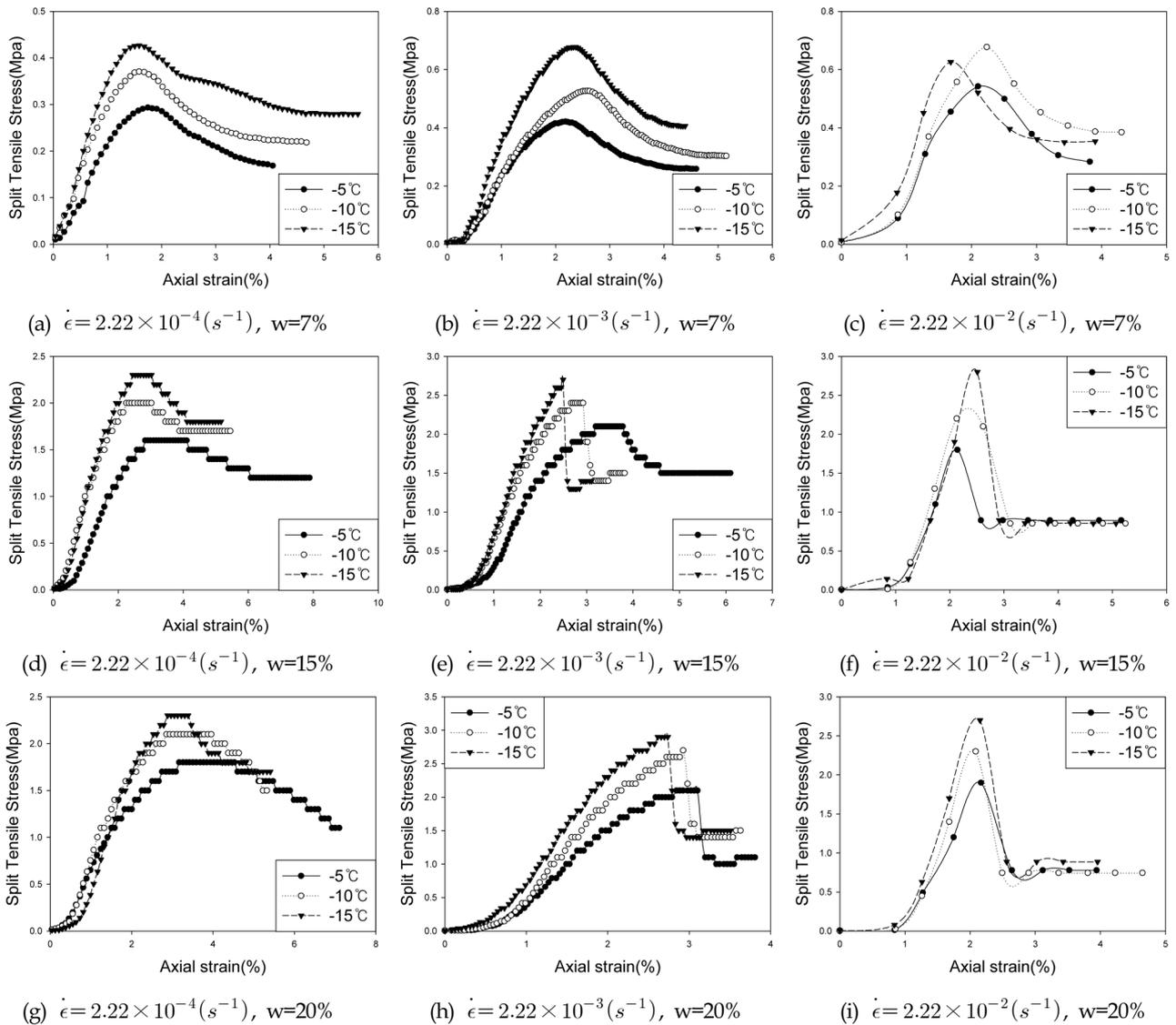


Fig. 5 Strength alteration curve of split tensile test

Table 4 Max tensile stress result of split tensile test

Max Tensile Stress (Mpa)	Temperature (°C)								
	-5			-10			-15		
	Water content (%)			Water content (%)			Water content (%)		
Axial strain rate	7	15	20	7	15	20	7	15	20
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-4} (s^{-1})$	0.449	2.500	2.746	0.565	2.948	3.215	0.642	3.529	3.479
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-3} (s^{-1})$	0.618	3.086	3.177	0.769	3.699	4.044	1.001	4.150	4.302
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-2} (s^{-1})$	0.786	2.758	2.961	1.052	3.469	3.523	1.046	4.095	4.041

전체적인 최대인장강도값은 동결온도가 낮아짐에 따라 소폭 증가하는 경향을 보이고 있다. 또한 함수비가 낮은 7%의 경우에 비해 함수비가 상대적으로 높은 15%, 20%일 때 큰 강도값을 보였으며, 최적함수비 이상의 함수비에서는 강도값의 차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 앞서 하중재하속도의 증속에 따라 최대강도값이 증가되었던 최대압축강도값과는 달리 최대인

장강도값은 하중재하속도가 200mm/min일 때 소폭 감소하는 경향을 보였는데, 이는 인장력에 약한 얼음이 순간적인 충격력을 이겨내지 못하고 취성파괴 됨에 따른 결과로 보인다.

### 4.3 초기탄성계수

시험에 사용된 동결시편은 크게 토질입자와 얼음으로 구성되

어 있으며, 이들은 서로 밀접한 관계를 유지하며 동결시편의 강도를 결정한다. Fig 7의 동결시편의 응력-변형률 곡선 중 낮은 재하속도에서 2차례의 항복점을 나타냄을 확인할 수 있다. 이때 첫 번째 항복점은 동결시편 내 얼음결자의 파괴에 의한 것이고, 다음의 2차 최대 항복점은 토질입자의 파괴로 나타나는 것으로 보인다. 하지만 재하속도가 빨라질수록 1차 항복점의 경계가 모호해지며 최대 일축압축강도에 도달하기까지 급한 경사를 보이며 강도가 증가하다가 취성파괴와 같은 급한 경사를 보이며 파괴됨을 볼 수 있는데, 이는 얼음의 내하중 능력이 하중이 작용한 시간과 온도에 따라 크게 달라짐에 따라, 빙점 근처의 얼음은 상대적으로 연약하고 쉽게 변형되지만 저온에서는 강도가 커져 취성파괴를 나타내는 특징 때문인 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 8의 응력-변형률 곡선에서 1차 항복응력은 얼음

결자의 파괴인 점을 통해 초기접선탄성계수를 이용하여 동결공시체의 강도에 영향을 주는 공시체내 얼음의 강도 변화를 확인하였다.

일축압축강도와 간접인장강도시험의 응력-변형률 곡선에서 변형률 0.5%까지의 데이터를 선형회귀분석 하여 각각의 초기접선탄성계수( $E_{ic}$ ,  $E_{it}$ )를 구하였다(Table 5, Table 6).

일축압축강도시험에 대한  $E_{ic}$ 는 Table 5를 통해 확인할 수 있듯이 동일한 함수비라도 동결온도가 상대적으로 높은  $-5^{\circ}\text{C}$ 인 경우와  $-10^{\circ}\text{C}$ 이하인 경우에서 많은 차이를 보이고 있다. 이는 빙점 부근에서는 연성파괴를 하지만 저온으로 내려갈수록 취성파괴의 형태를 취하는 얼음의 특성에 따른 것으로 보인다. 하지만 하중재하속도의 증속은 이러한 차이를 많이 줄여주고 있는데, 이는 증속에 따른 충격하중에 따른 것으로 보인다. 또한 동일한 동결온도에서 함수비가 7%일 때의  $E_{ic}$ 값과 15% 이상일 경우의

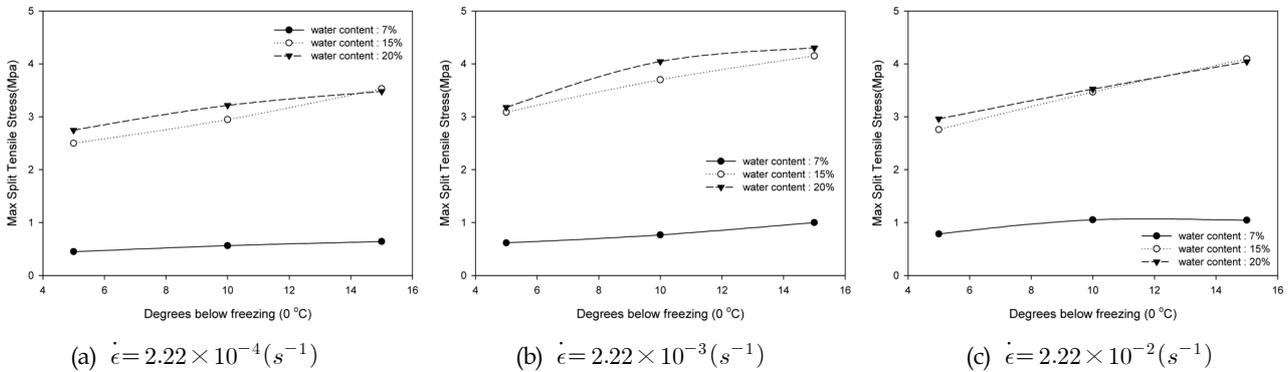


Fig. 6 Max tensile stress behavior characteristics to freezing temperature and loading rate

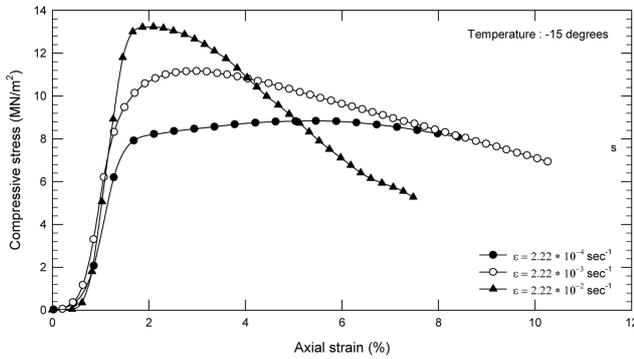


Fig. 7 Stress-strain curve to loading rate

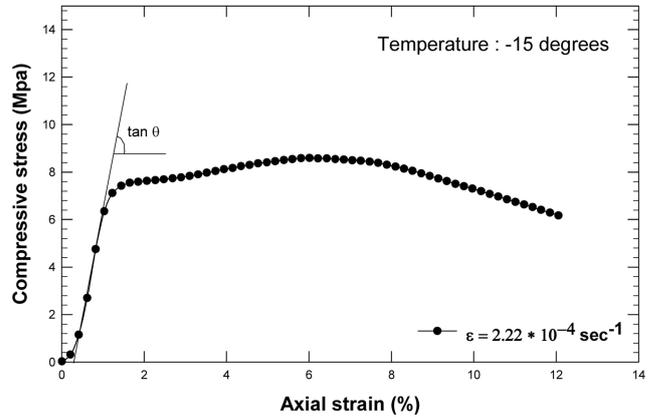


Fig. 8 Initial tangent modulus

Table 5 Initial tangent modulus of unconfined compression test (Mpa)

Initial tangent modulus	Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )								
	-5			-10			-15		
	Water content (%)			Water content (%)			Water content (%)		
Axial strain rate	7	15	20	7	15	20	7	15	20
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-4} (s^{-1})$	149.55	613.13	590.86	287.50	727.74	643.02	299.10	955.78	911.87
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-3} (s^{-1})$	223.08	649.44	945.42	276.61	968.98	823.01	329.29	1185.2	1235.7
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-2} (s^{-1})$	268.88	1017.7	1201.2	357.92	1194.1	1259.5	501.51	1539.2	1837.1

Table 6 Initial tangent modulus of split tensile test (Mpa)

Initial tangent modulus	Temperature (°C)								
	-5			-10			-15		
	Water content (%)			Water content (%)			Water content (%)		
Axial strain rate	7	15	20	7	15	20	7	15	20
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-4} (s^{-1})$	0.24	0.97	0.97	0.32	1.16	1.04	0.36	1.29	1.34
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-3} (s^{-1})$	0.29	1.34	1.23	0.34	1.92	1.79	0.46	1.99	2.06
$\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-2} (s^{-1})$	0.38	1.49	1.40	0.47	1.88	1.92	0.57	2.07	2.22

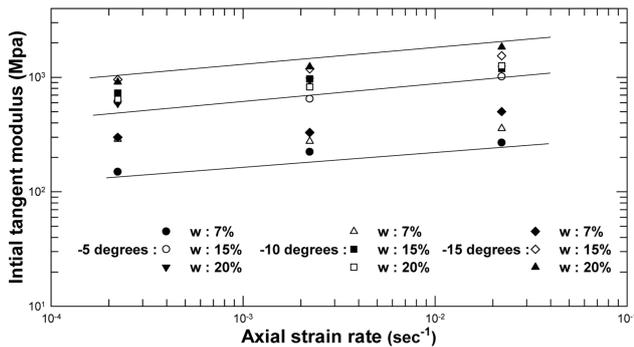


Fig. 9 Initial tangent modulus behavior characteristics of unfined compression test

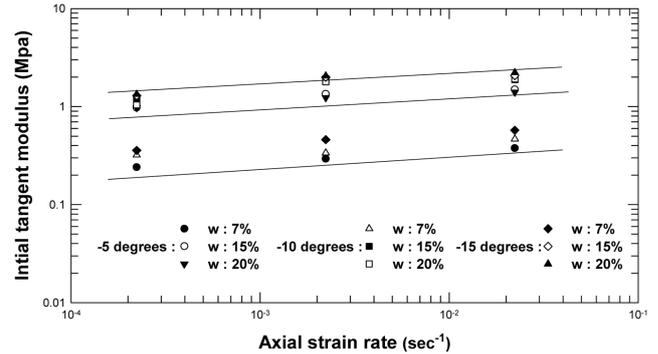


Fig. 10 Initial tangent modulus behavior characteristics of split tensile test

$E_{ic}$  값은 큰 차이를 보이고 있으나 15%와 20%의  $E_{ic}$  값은 유사함을 나타내며, 오히려 함수비가 높은 경우 낮은 값을 나타내는 경우도 있다. 이는 일정함수비가 넘어서면 동결시편 내 부동수분의 양이 많아지면서 윤회제와 같은 역할을 수행하게 되고 이로 인해 동일한 변형률에서 낮은 일축압축강도값을 갖기 때문이다. 간접인장강도시험을 통해 얻은  $E_{it}$  값(Table 6)은 전체적으로 흙과 얼음이 인장에 약한 재료이기 때문에 낮은 값을 보이고 있다. 하지만 연성파괴로 인해 동결온도에 따라  $E_{ic}$ 의 차이가 많이 났던 앞선 결과와는 달리  $E_{it}$ 의 경우 빙점 부근에서 연성재료의 특징을 갖는 얼음으로 인해 파괴가 더디게 진행되고, 오히려 저온인 상태에서는 취성파괴로 최대인장강도에 도달하기 전에 파괴가 이루어지는 결과로 인해  $E_{it}$  값이  $E_{ic}$ 에 비해 상대적으로 조밀한 형태를 보이고 있다(Fig. 9, Fig. 10).

### 5. 결 론

본 연구에서는 극한지 개발의 시대적인 요구에 부응하여 동토의 일반적인 물리적 성질을 정리하고 콜드룸 실험을 통하여 강도의 영향을 주는 동결온도, 함수비, 재하속도 등의 변수들에 대한 강도특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 도출하게 되었다.

1) 일축압축 시험결과 15%의 함수비에서 하중재하속도가  $\dot{\epsilon} = 2.22 \times 10^{-4} (s^{-1})$ 인 Fig. 4의 (d) 그래프를 통해 동결시편의 일반적인 강도변화곡선을 확인하였다. 동결시편의 경우 적정 함수비에서 하중을 느린 속도로 재하하게 되면 일차적으로 동결시편 내 얼음이 모든 하중에 저항을 하게 되면서 급한 경사

의 강도변화곡선을 나타내고, 얼음이 항복하는 일차 항복점 이후 동결시편 내 흙입자들이 조밀하게 재배열되면서 침투하중까지 완만한 강도변화곡선을 보였다. 이를 통해 동결시편의 초기강도 값은 얼음에 의해 결정하고 얼음이 파괴된 이후 흙이 재하되는 하중을 인계받아 저항하면서 강도값을 결정함을 확인하였다.

2) 하중재하속도가 빨라질수록 얼음이 항복하는 일차 항복점과 침투하중의 경계가 모호해지고 침투하중 이후 순간적인 취성 파괴의 경향을 보인다 다시 완만한 경사로 파괴되고 있는데, 이 경우 최대항복강도는 하중재하속도에 의한 충격력에 대하여 순간적인 얼음의 저항에 의한 것으로 예상되며, 이후 취성파괴와 같은 강도변화 이후 완만한 경사로 파괴되는 것은 얼음의 항복이후 다시 흙에 의한 강도변화로 보인다.

3) 간접인장 시험결과 하중재하속도가  $2.22 \times 10^{-3} (s^{-1})$  이상일 경우 최대인장강도 이후 갑자기 파괴되는 취성파괴의 형태를 보이고 있다. 이러한 취성파괴는 일반적으로 얼음, 콘크리트, 암석과 같은 재료에서 발견되는 특성으로 동결시편 내 함수비가 증가되거나 동결온도가 낮아짐에 따른 함빙비의 증가로 재료의 주성분이 흙임에도 불구하고 동결시편의 파괴형태가 거의 얼음과 같아지는 결과로 보인다. 또한 함수비의 증가에 따라 최대인장강도값의 변화는 있으나 강도변화곡선은 유사한 형태를 보이고 있다.

4) 하중재하속도의 증속에 따라 최대강도값이 증가되었던 최대압축강도값과는 달리 최대인장강도값은 하중재하속도가  $2.22 \times 10^{-2} (s^{-1})$ 일 때 소폭 감소하는 경향을 보였는데, 이는 인장력에 약한 얼음이 순간적인 충격력을 이겨내지 못하고 취성파괴됨에 따른 결과로 보인다.

5) 동일한 동결온도에서 함수비가 7%일 때의  $E_{ic}$  값과 15% 이상일 경우의  $E_{ic}$  값은 큰 차이를 보이고 있으나 15%와 20%의

$E_{ic}$  값은 유사함을 나타내며, 오히려 함수비가 높은 경우 낮은 값을 나타내는 경우도 있다. 이는 일정함수비가 넘어서면 동결 시편 내 부동수분의 양이 많아지면서 유힬제와 같은 역할을 수행하게 되고 이로 인해 동일한 변형률에서 낮은 일축압축강도 값을 갖기 때문이다. 간접인장강도시험을 통해 얻은  $E_{it}$  값은 연성파괴로 인해 동결온도에 따라  $E_{ic}$ 의 차이가 많이 났던 앞선 결과와는 달리  $E_{it}$ 의 경우 빙점 부근에서 연성재료의 특징을 갖는 얼음으로 인해 파괴가 더디게 진행되고, 오히려 저온인 상태에서는 취성파괴로 최대인장강도에 도달하기 전에 파괴가 이루어지는 결과로 인해  $E_{it}$  값이  $E_{ic}$ 에 비해 상대적으로 조밀한 형태를 보이고 있다.

## 후 기

본 논문은 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “빙해선평의 극지방로 안전운항기술 및 극저온 빙 성능 시험평가 기법 개발” 중 “극지용 저온 설계 및 Winterization 평가 기술 (PNS133C)” 과제의 연구비 지원으로 수행된 결과임.

## 참 고 문 헌

- Americal Society for Testing and Materials, 1982. ASTM Standard, Part 19, Philadelphia, Pa.
- Cho, C.W., Shon, J.I., Lee, W.J., Kim, H.S., 1993. A Study on the Properties of Frozen Soil and Pile Foundation in Frozen Ground. Korea Institute of Construction Technology.
- Choi, K.S., 1990. An Application of Plasticity Model for Ice Deformation Characteristics. Journal of The Korean Society of Ocean Engineers, 4(2), 165-171.
- Choi, M.S., 2009. A Study of Different Size for Strength Properties of Frozen Soil. Master's Thesis of Korea Maritime University.
- Choi, Y.C., 1991. The Properties and Construction of Permafrost: State of the Art. Master's Thesis of Seoul National University.
- Corapcioglu, M.Y., 1995. Multiphase Approach to Thaw Subsidence of Unsaturated Frozen Soils : Equation Development. Journal of Engineering Mechanics, 121(3), 448-459.
- Freitag, D.R., McFadden, T.T., 1997. Introduction to Cold Regions Engineering. ASCE.
- Gregory, D.R., 2003. Triaxial Testing of Frozen Sand : Equipment and Example Results. Journal of Cold Regions Engineering, 17(3), 90-118.
- Hong, S.S., Kim, Y.S., Kim, H.S., Bae, G.J., 2010. A Fundamental Study of Artificial Ground Freezing. 2010 Korean Geo-Environmental Society Fall Conference.
- Hong, S.W., 1992. Development of Effective Methods for Design and Construction of Foundations in Cold Regions. The Ministry of Science-Technology.
- Kim, E.S., 2006. A Study of Cold Room Experiments for Strength Properties of Frozen Soil. Master's Thesis of Korea Maritime University, 22-55.
- Kim, Y.C., Bae, J.H., Song, W.K., 2003. An Experimental Study on the Unfrozen Water Contents and Ultrasonic Wave Velocity in Frozen Soil. Journal of Korean Society of Civil Engineers 23, 207-217.
- Kim, Y.C., Hong, S.S., 2005. A Study for Penetration Depth in Pavement in Korea. 2005 Korean Geo-Environmental Conference.
- Kim, Y.C., Hong, S.S., Kang, J.M., Kim, H.S., Choo, J.H., 2009. A Study on the Frost Penetration Depth and Insulation Methods in Pavement. Korea Institute of Construction Technology.
- Kim, Y.C., Hong, S.S., Kim, H.M., 2001. A Study on the Frost Penetration Depth and Insulation Methods in Pavement. Korea Institute of Construction Technology.
- Konrad, J.M., 2001. Fracture toughness of frozen base and subbase soils in pavement. Canadian Geotechnical Journal, 38(5), 967-981.
- Korean Industrial Standard KS F 2343 (Testing Method for Direct Shear test of Soils under Consolidated Drained Conditions), KS F 2423 (Method of Test for Splitting Tensile Strength of Concrete).
- Ku, K.D., Kim, K.S., 2000. An Experimental Study on the Concrete Compression Strength According to Loading Rates. Journal of Architectural Institute of Korea Conference, 20(2), 432-434.
- Kwon, H.J., Park, J.B., Song, Y.W., Lee, Y.S., 2005. Principles of Geotechnical Engineering, Goomibook, 47-59, 60-66, 131.
- Nakano, Y., Froula, N.H., 1973. Sound and Shock Transmission in Frozen Soil. North America Contribution to the Second International Conference on Permafrost, U. S. National Academy of Science, 359-369.
- Ning Li, 2000. The Coupled Heat-Moisture-Mechanic Model of the Frozen Soil. Cold Regions Science and Technology, 31(3), 199-205.
- Richard A.B., Andersland O.B., 1981. Strain Rate, Temperature, and Sample Size Effects on Compression and Tensile Properties of Frozen Sand. Engineering Geology, 18, 35-46.
- Wang, D., 2005. Study on the Resistance to Deformation of Artificially Frozen Soil in Deep Alluvium. Cold Regions Science and Technology, 42(3), 194-200.