

낮은 구속응력에서 모래-실트 혼합토의 동결강도 평가를 위한 동적 콘 저항력 및 전단강도 상관성 연구

Study on Correlation between Dynamic Cone Resistance and Shear Strength for Frozen Sand-Silt Mixtures under Low Confining Stress

김 상 엽¹⁾ · 이 종 섭¹⁾ · 홍 승 서²⁾ · 변 용 훈[†]

Sangyeob Kim · Jong-Sub Lee · Seungseo Hong · Yong-Hoon Byun

Received: July 18th, 2015; Revised: July 23rd, 2015; Accepted: November 24th, 2015

ABSTRACT : Investigation of in-situ ground in cold region is difficult due to low accessibility and environmental factors. In this study, correlation between dynamic cone resistance and shear strength is suggested to estimate the strength of frozen soils by using instrumented dynamic cone penetrometer. Tests were conducted in freezing chamber after preparing sand-silt mixture with 2.3% water content. Vertical stresses of 5 kPa and 10 kPa were applied during freezing, shearing, and penetration phase to compare the dynamic cone resistance and shear strength. The dynamic cone resistance, additionally, is calculated to minimize the effect of energy loss during hammer impact. Experimental results show that as the shear strength increases, the dynamic cone penetration index (DCPI) decreases nonlinearly, while the dynamic cone resistance increases linearly. This study provides the useful correlation to evaluate strength properties of the frozen soils from the dynamic cone penetration and direct shear tests.

Keywords : Frozen soils, Dynamic cone penetration index, Dynamic cone resistance, Shear strength

요 지 : 극한지에서는 환경적 요인과 접근성의 한계에 따라, 동결토의 강도를 현장 상태에서 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 극한지 현장의 동결강도를 평가하기 위하여 계장화된 동적 콘 관입기로부터 산정된 동적 콘 저항력과 직접전단실험으로부터 획득된 전단강도 간의 상관성을 조사하였다. 실트가 혼합된 주문진사를 함수비 2.3%로 동일하게 조성하였으며, 시료를 냉동 챔버 내에서 동결시킨 후 직접전단실험과 동적 콘 관입실험을 진행하였다. 실험은 동결과정 및 전단과정, 그리고 동적 콘 관입과정에서 수직응력을 5kPa 및 10kPa로 조합한 4가지 경우로 구성하였으며 이에 따른 동적 콘 관입지수와 전단강도를 산정하였다. 또한 해머타격으로부터 전달되는 에너지의 손실에 대한 영향을 최소화하기 위하여 선단에서 산정된 에너지 및 변위를 이용함으로써 동적 콘 저항력을 산출하였다. 직접전단실험 및 동적 콘 관입실험을 수행한 결과 구속조건에 의한 전단강도의 증가에 따라 동적 콘 관입지수는 비선형적으로 감소하였으며, 동적 콘 저항력은 전단강도와 선형적으로 비례하는 관계로 나타났다. 본 연구는 동결토에 대한 동적 콘 관입실험과 직접전단실험을 통한 강도정수를 비교 및 평가한 연구이며 본 연구에서 도입된 동적 콘 저항력은 극한지 현장에서 동결토의 강도를 추정하기 위한 유용한 지표가 될 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 동결토, 동적 콘 관입지수, 동적 콘 저항력, 전단강도

1. 서 론

시베리아나 알래스카 등의 극한지 동결지반에서 천연 대체에너지가 발견됨에 따라 이를 확보하기 위한 파이프라인, 철도 등의 대규모 인프라 건설이 진행되어 왔다. 이에 따라 극한지의 광범위한 면적의 동결지반에 대한 강도평가가 요구되며, 일반적으로 간극수의 동결에 의한 지반의 부피팽창 및 입자 간 결합의 급격한 증가와 같은 연속체적인 공학적 특성을 보여주는 동결토에 대한 관심이 높아져 왔다(Kim et al., 2015).

동결토의 강도평가를 위해 일축압축실험, 삼축압축실험, 직접전단실험 등의 실내실험이 수행되어 왔으며 각 실험조건에 따른 동결토의 강도가 보고되어 왔다(Lee & Choi, 2012; Kang et al., 2013). Zhu & Carbee(1984)는 동일한 온도조건에서의 동결 시료에 대해 일축압축실험을 수행하였으며, 동결중의 구속응력에 따른 다양한 동결 시료의 강도를 비교하였다. 그러나 일축압축실험의 특성상 강도평가에 구속응력의 영향이 반영되지 않는 단점이 있다. 또한 Da Re et al.(2003)은 다양한 상대밀도, 구속응력, 변형속도, 그리고 온도에 따른 동결토의 삼축압축실험을 수행하였으며 동결토의 응력-

1) School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University

2) Korea Institute of Construction Technology

† School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University (Corresponding Author : asan1103@korea.ac.kr)

변형을 관계와 부피변형에 대해 분석하였다. 이러한 동결토의 삼축압축실험은 부동액을 사용하여 시료의 용해를 방지할 수 있으나, 실험기간이 길어지는 한계점도 내포하고 있다. 한편 동결토에 대해 적용이 쉽고 강도의 과소평가를 방지할 수 있다는 장점으로 인하여 직접전단실험을 이용한 전단강도 평가에 관한 연구들이 수행된 바 있다(Yasufuku et al., 2003; Christ & Park, 2010).

일반적으로 연약지반에서는 유사정적 콘 관입시험(Cone penetration test)과 베인전단시험(Vane shear test)과 같이 정적 관입 및 회전을 통해 강도를 평가하는 반면, 경질지반에서는 표준관입시험(Standard penetration test)과 텍사스 콘 관입시험(Texas cone penetration test) 등 동적 관입에 의해 지반의 강도를 평가한다. 한편 일반적인 지역과 달리 극한지는 지반조사 장비의 운송 및 기후에 따른 제약 등의 문제가 있어 왔다. 이와 같은 이유로 극한지역에 운송이 가능하도록 경량화되고, 정밀하게 동결토의 강도평가가 가능한 계장화된 동적 콘 관입기(Instrumented Dynamic Cone Penetrometer, IDCP)가 개발되어 극한지 현장에 적용된 바 있다(Byun et al., 2014). 여기서 계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)는 선단부에 변형률계와 가속도계를 설치함으로써 실제 선단부까지 전달된 에너지를 파악할 수 있도록 설계되었으며, 이를 통해 보다 정밀한 동결지반의 강도평가를 가능하도록 구성되었다.

본 논문에서는 직접전단실험으로부터 산정된 전단강도와 동적 콘 관입실험을 통한 동적 콘 저항력의 상호관계를 조사하고자 동일한 조건에서 조성된 시료를 이용하여 실험을 수행하였다. 영하의 온도에서 작동이 가능하도록 제작된 실험장비들은 냉동 챔버 내에서 동일한 영하의 온도를 유지하였으며, 동적 콘 관입실험 중 선단부에 설치된 센서를 통해 정밀한 강도평가가 가능하도록 하였다. 먼저 본 실험에 사용된 시료의 특성과 실험조건을 서술하고, 직접전단실험과 동적 콘 관입실험의 실험과정 및 결과를 설명하였다. 그 후 두 가지의 실험을 통한 동결토의 전단강도와 동적 콘 저항력의 상호관계에 대해 토의하였다.

2. 재료 특성 및 실험 조건

2.1 시료 특성

동상현상이 발생할 수 있는 동결지반을 모사하기 위하여 주문진사와 실트의 혼합토를 사용하였으며, 모래에 대한 실트의 무게비(W_{silt}/W_{sand})가 30%인 시료에 중량 함수비가 2.3%가 되도록 증류수를 혼합하였다. 여기서 중량 함수비 2.3%는 포화도 10%에 해당하며, 이는 포화도가 낮은 불포화토의 동결 시 강도평가를 위해 설정되었다. 혼합토의 기본물성실험 결과, Table 1과 같이 비중은 2.59로 나타났으며 최대 간극비는 0.79, 최소 간극비는 0.45로 산정되었다.

2.2 실험 조건

실험에 사용된 시료는 기본적으로 직접전단실험의 전단상자와 동적 콘 관입실험의 동결토조에 동일한 조건으로 조성되었다. 먼저 주문진사에 중량비 30%에 해당하는 실트를 혼합한 후, 포화도 10%가 되도록 증류수를 가하여 배합하였다. 배합시간이 5분 경과되면 충분히 균질하게 혼합되었다고 가정하여 시료를 각각 8층으로 나누어 동일한 에너지와 다짐횟수로 상대밀도 60%가 되도록 조성하였다. 그 후 조성된 시료는 냉동 챔버 내에 위치시켜 -5°C의 온도를 유지하여 동결시켰다.

극한지의 표층지반을 모사하기 위해 동결과정 및 전단과정, 그리고 콘 관입과정에서 비교적 작은 수직응력 5kPa과 10kPa을 조합하여 Table 2와 같이 총 4가지 경우에 대한 실험을 수행하였다. 이는 수직응력이 5kPa과 10kPa인 경우($\sigma_f/\sigma_s=5/5, 10/10$) 동결과정의 수직응력은 5kPa이며, 전단과정의 수직응력이 10kPa인 경우($\sigma_f/\sigma_s=5/10$) 동결과정의 수직응력은 10kPa이며, 전단과정의 수직응력이 5kPa인 경우($\sigma_f/\sigma_s=10/5$)로 나누어 진다. 여기서 직접전단실험의 전단과정과 동적 콘 관입실험의 관입 과정에서의 수직응력은 동일하게 σ_s 로 표기하였다.

Table 1. Properties of the sand-silt mixture

Specific gravity (G_s)	Degree of saturation (S)	Maximum void ratio (e_{max})	Minimum void ratio (e_{min})
2.59	10%	0.79	0.45

Table 2. Vertical stress during freezing, shearing, and penetration

	Vertical stress			
	$\sigma_f=5$ kPa	$\sigma_f=5$ kPa	$\sigma_f=10$ kPa	$\sigma_f=10$ kPa
Freezing phase	$\sigma_s=5$ kPa	$\sigma_s=10$ kPa	$\sigma_s=5$ kPa	$\sigma_s=10$ kPa

* σ_f : Vertical stress during freezing; σ_s : Vertical stress during shearing and penetration

3. 직접전단실험

3.1 직접전단실험기

모래-실트-증류수로 혼합된 시료의 전단강도를 평가하기 위하여 시료를 조성한 후 직접전단실험을 수행하였다. 본 연구에서 사용된 동결토용 직접전단실험기는 Fig. 1과 같이 구성되어 있으며, 시료의 동결을 위해 냉동 챔버 내에 설치하였다. 전단상자의 경우 가로와 세로가 각각 100mm, 높이 76mm의 내경을 갖는 황동재질로 제작되어 냉동 챔버 내의 영하의 온도가 효과적으로 전달되도록 하였다(Kim et al., 2015). 상부와 하부로 구성된 전단상자의 간격은 0.5mm로 유지시켰으며 상·하부 사이와 하부상자 아래에 베어링(Bearing)을 설치하여 마찰력의 영향을 최소화하였다. 또한 시료와 전단상자 내부 벽면 사이의 동결에 의한 동착강도의 발현을

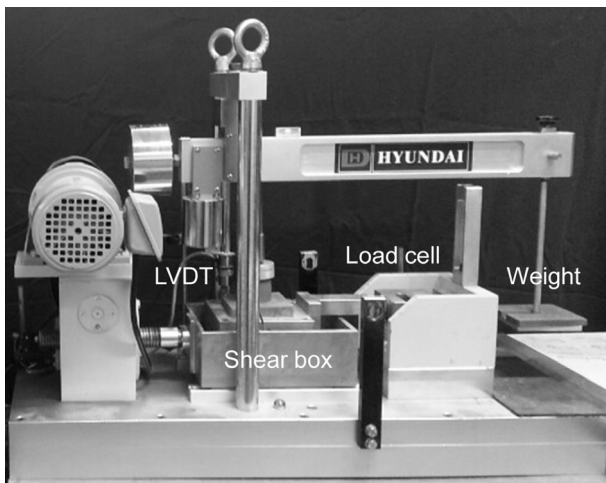
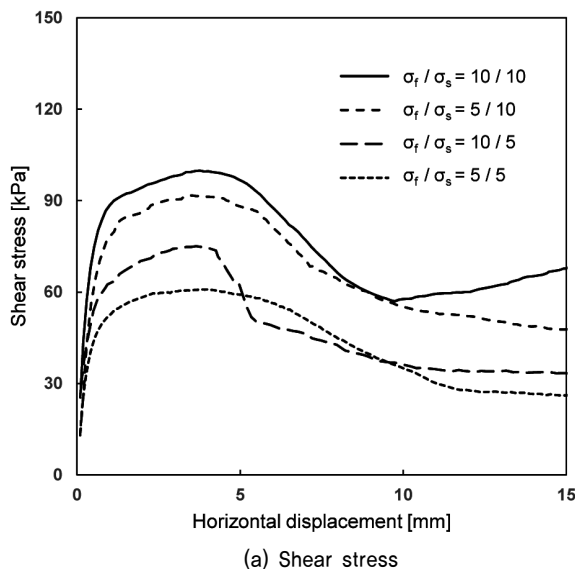


Fig. 1. Direct shear apparatus



제거하기 위하여 그리스(Grease)로 처리하였다.

동결토 직접전단실험기는 상대적으로 큰 하중의 전단력을 고려하여 용량 5ton의 로드 셀(Load cell)을 사용하였으며 부피팽창 및 전단과정을 관찰하기 위해 최대 30mm까지 측정이 가능한 두 개의 수직 변위 및 수평 변위 측정용 직선형 가변 차동변압기(LVDT)를 설치하였다. 이러한 로드 셀 및 직선형 가변 차동변압기로부터 전단력, 수직 및 수평 변위를 매초마다 컴퓨터에 저장하였다.

3.2 실험 결과

동결과정 및 전단과정에서 동일하게 수직응력 5kPa과 10kPa을 조합하여 실험을 수행하였으며, 전단과정에서의 전단변형은 속도 0.4mm/min으로 수평 변위가 20mm에 도달할 때까지 진행하였다. 전단변형에 따른 전단응력 및 수직 변위의 변화는 Fig. 2와 같이 나타났으며 각 하중조건에 따른 최대 전단응력은 60.8, 74.8, 91.7 그리고 99.6kPa로 나타났다. 전단변형에 따른 부피팽창은 최대 전단응력이 증가할수록 감소하는 것으로 관찰되었다. 동결과정에서 동일한 수직응력을 가한 경우 전단과정에서의 수직응력이 증가할수록 전단강도가 증가하였고, 전단과정의 동일한 수직응력 조건에서도 동결과정의 수직응력의 크기에 영향을 받기 때문에 나타났다. 또한 전단강도에 대한 영향은 전단과정의 수직응력이 동결과정보다 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이를 통하여 동결과정 및 전단과정의 수직응력 변화에 따라 최대 전단응력이 변화하였으며, 이는 각 과정에서 구속압력의 크기변화가 시료의 강도에 영향을 주는 것을 보여준다.

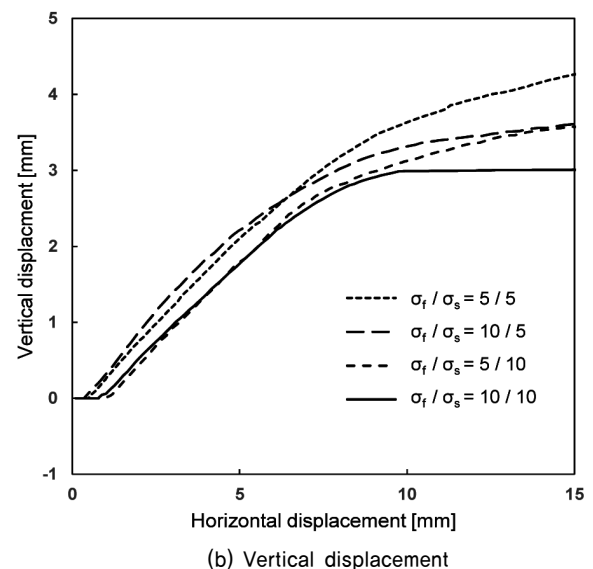


Fig. 2. Results of shear test according to horizontal displacement

4. 동적 콘 관입시험

4.1 계장화된 동적 콘 관입기

본 연구에서는 극한지 동결지반의 강도평가를 위해 Fig. 3 과 같이 계장화된 동적 콘 관입기(Instrumented Dynamic Cone Penetrometer, IDCP)를 사용하였다. 계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)는 선단 각 60°와 직경 24mm의 선단부와 동일한 직경을 갖는 길이 740mm의 룯드로 연결하였으며, 추가적으로 룯드를 체결하여 길이를 연장할 수 있도록 하였다. 계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)의 선단부에는 힘과 가속도를 각각 측정할 수 있는 변형률계와 가속도계가 설치되었으며, 동적 관입을 위하여 8kg의 원형 추를 575mm의 일정한 높이에서 타격할 수 있는 해머 가이드를 연결하였다. 타격 시 가해진 위치에너지는 해머-가이드 사이에 발생하는 마찰력, 연결부의 임피던스(Impedance) 차이로 인한 반사파 발생, 시료-룯드 사이의 주면 마찰력 등 여러 가지 원인으로 인해 실제 전달된 에너지와 차이가 발생하는 것으로 알려져 있다 (Odebrecht et al., 2005; Byun & Lee, 2013). 이에 따라 본 연구에서는 지반의 강도평가 시 에너지 손실에 대한 영향을 최소화하기 위하여 계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)를 통해 측정되는 선단부에 전달된 에너지를 이용하고자 하였다.

계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)에 설치된 변형률계와 가속도계를 통하여 측정된 신호는 Eq. (1)과 같이 시간변화에 따라 선단부에 전달된 에너지[$E(t)$]로 산정할 수 있다.

$$E(t) = \int F(t) \times V(t) dt \quad (1)$$

여기서 $F(t)$ 는 변형률계를 통해 시간변화에 따라 측정된 힘을 나타내며, $V(t)$ 는 가속도계를 통해 시간변화에 따라 산정된 속도이다. 힘을 산정하기 위한 변형률계는 온도보상과 편심보정이 가능하도록 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge) 회로를 구성하여 설치시켰으며 동일한 단면에서의 입자속도를 파악하기 위해 가속도계를 동일한 위치에 설치하였다.

4.2 동결 토조

동결 시료의 조성을 위해 가로와 세로 400mm, 높이 300mm의 내경을 갖는 스테인리스강 재질의 토조를 제작하여 동결 챔버 내의 영하의 온도가 효율적으로 전달되도록 하였다. 모래-실트-증류수가 혼합된 시료를 상대밀도 60%가 되도록 8층으로 나눈 후 동일한 다짐횟수로 조성하였으며, 동결 시 상재하중을 가하기 위한 상재하중 판이 Fig. 4와 같이 제작되었다. 동결 후 콘의 관입을 위해 직경 30mm의 홀을 중앙부에 위치시켰으며 동결 및 관입 시에 볼트 체결을 통한 홀마개의 탈부착이 가능하도록 하였다. 또한 시료 조성 후 동결과정에서 토조 벽면 사이로의 간극수 손실을 방지하기 위해 토조 내부 벽면에 실리콘을 도포하였다.

동결도에 대한 동적 콘 관입시험은 직접전단시험의 전단강도와와의 비교를 위해 동일한 시료로 조성하여 수행되었다. 시료가 조성된 후 목표한 수직응력이 되도록 추를 상재하중

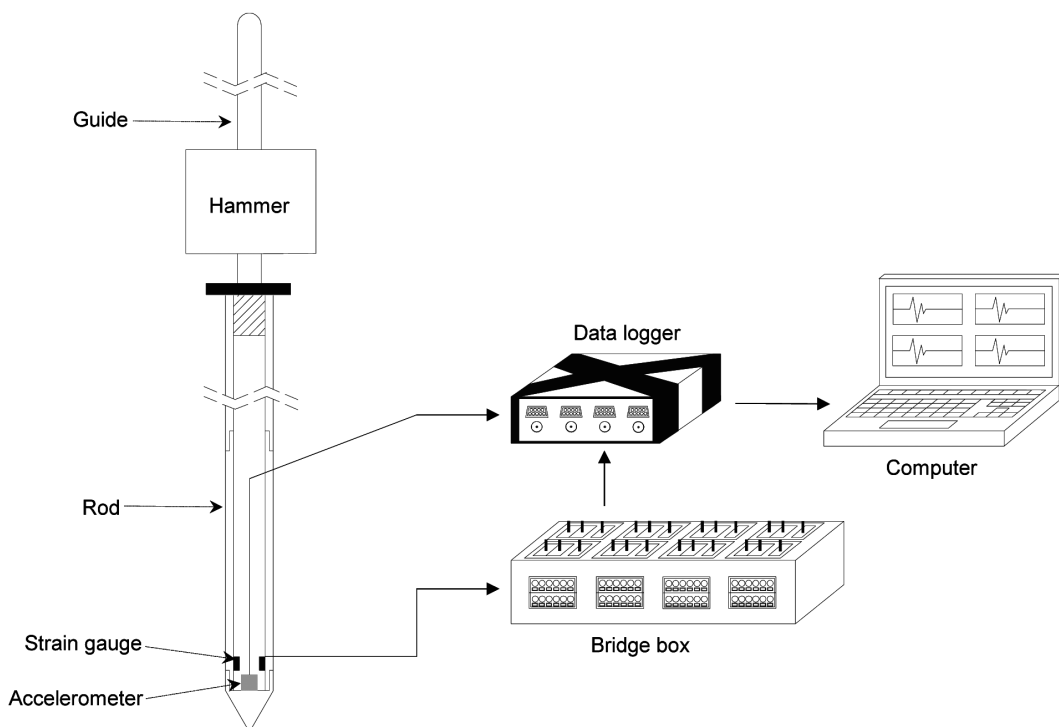


Fig. 3. Measurement system of dynamic cone penetration test

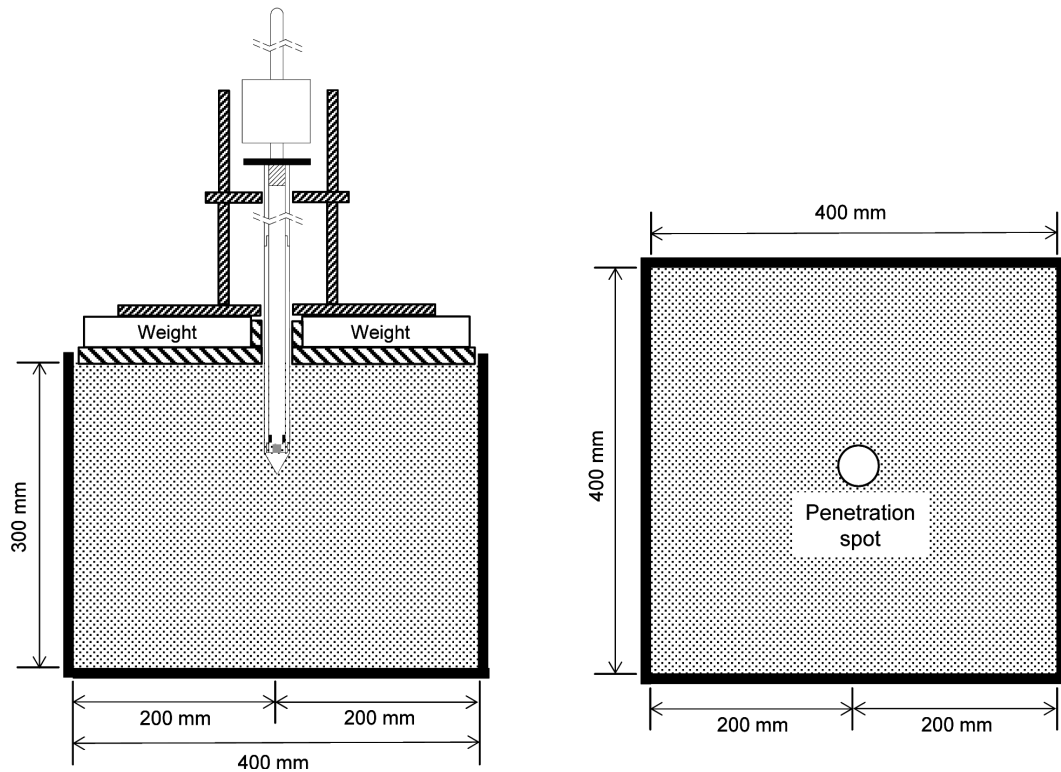


Fig. 4. Schematic drawing of dynamic cone penetration

판에 가하여 구속된 상태로 동결과정이 진행되었다. 조성된 시료를 동결 챔버 내에서 동결하였으며 동결과정에서의 온도 변화를 관찰하기 위하여 시료의 중앙부에 K-type의 열전대(Thermocouple)를 설치하였다. 설치된 열전대는 데이터로거(Data logger)를 통해 컴퓨터로 출력하여 실험 중 온도 변화를 모니터링하였으며, 시료의 온도가 -5°C 에 도달하면 동결과정을 종료하고 콘 관입과정을 수행하였다. 이때 콘 관입과정의 수직응력이 동결과정과 다른 경우에는 추를 가감하였다. 콘의 관입을 위하여 상재하중판 중앙부의 홀 마개를 분리하여 직경 30mm의 콘 관입 통로를 확보하였으며 해머 타격에 의해 관입되는 콘의 수직도를 유지시켜주기 위하여 룯드 가이드를 설치하였다.

4.3 실험 결과

일반적으로 동적 콘 관입실험을 통하여 지반의 강도평가 시 때 타격마다 해당 관입 깊이를 나타내는 동적 콘 관입지수(Dynamic Cone Penetration Index, DCPI)를 이용하며 본 연구에서도 조성된 동결 시료의 강도평가를 위해 동적 콘 관입지수(DCPI)를 측정하였다. Fig. 5는 각 시료의 조건에 따라 동적 콘 관입지수(DCPI)의 범위가 변화되는 것을 보여준다. 각 하중조건에 따른 동적 콘 관입지수(DCPI)의 심도에 따른 분포의 경향은 모두 유사하게 최초 관입 시의 큰 관입량을 보이며 일정 구간 동안 수렴하는 것으로 나타났다. 이

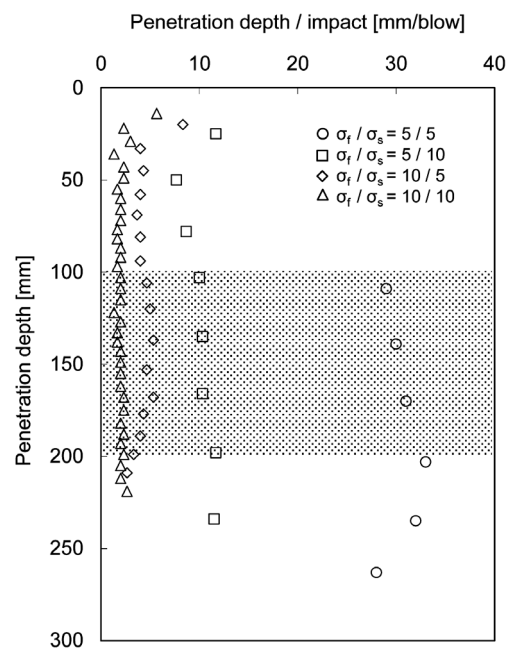


Fig. 5. Dynamic cone penetration index along penetration depth

는 Mohammadi & Robertson(2008)이 보고한 경계면 영향이 존재함을 보여주며, 이 영향이 최소화된 심도 100mm와 200mm 사이의 동적 콘 관입지수(DCPI)를 평균하여 시료의 대표적인 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})로 산정하였다. 이러한 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})는 동결 및 관입 시 수직응력이 증가함에 따라 감소되는 것으로 나타났다. 사용

된 시료의 함수비가 2.3%(포화도 10%에 해당)로 매우 낮은 관계로 동결 시의 수직응력보다 관입 시 수직응력에 더 민감하게 반응하는 것으로 판단된다.

5. 토 의

계장화된 동적 콘 관입기(IDCP)의 선단부에 설치된 변형률계와 가속도계를 통하여 대표적인 2가지 조건에서 획득된 동적 신호를 Fig. 6에 도시하였다. 변형률계에서는 전기저항의 변화로부터 획득된 선단에 가해진 힘과 가속도계로부터 측정된 가속도를 통해 계산된 속도에 콘의 임피던스(EA/C)를 곱하여 Fig. 6(a)에 함께 도시하였으며 Eq. (1)로

산정된 에너지는 Fig. 6(b)에 도시하였고 가속도계로부터 계산된 속도를 적분하여 산정된 변위를 Fig. 6(c)에 나타내었다. Fig. 6(a)를 보면 구속압력 5kPa의 경우 선단에 측정된 힘에 비교하여 속도는 크게 나타난 반면 구속압력 10kPa의 경우 그 차이가 줄어들어 힘은 증가하고 속도는 감소한 것을 알 수 있다. 또한 선단부에서 산정된 에너지를 비교하면 구속압력 10kPa의 경우가 구속압력 5kPa인 경우보다 크게 나타난 반면 선단부 변위는 구속압력 5kPa의 경우가 구속압력 10kPa인 경우보다 크게 발생하는 것을 보여주었다. 여기서 주의해야 할 것은 구속압력 5kPa 및 10kPa의 경우의 변위 그래프는 y축 범위가 다르다는 점이다. 이와 같은 결과로부터 지반강도의 변화에 따라 선단부에서 산정된 에너지 및 변위가 영향받게 되어 변화됨을 알 수 있다.

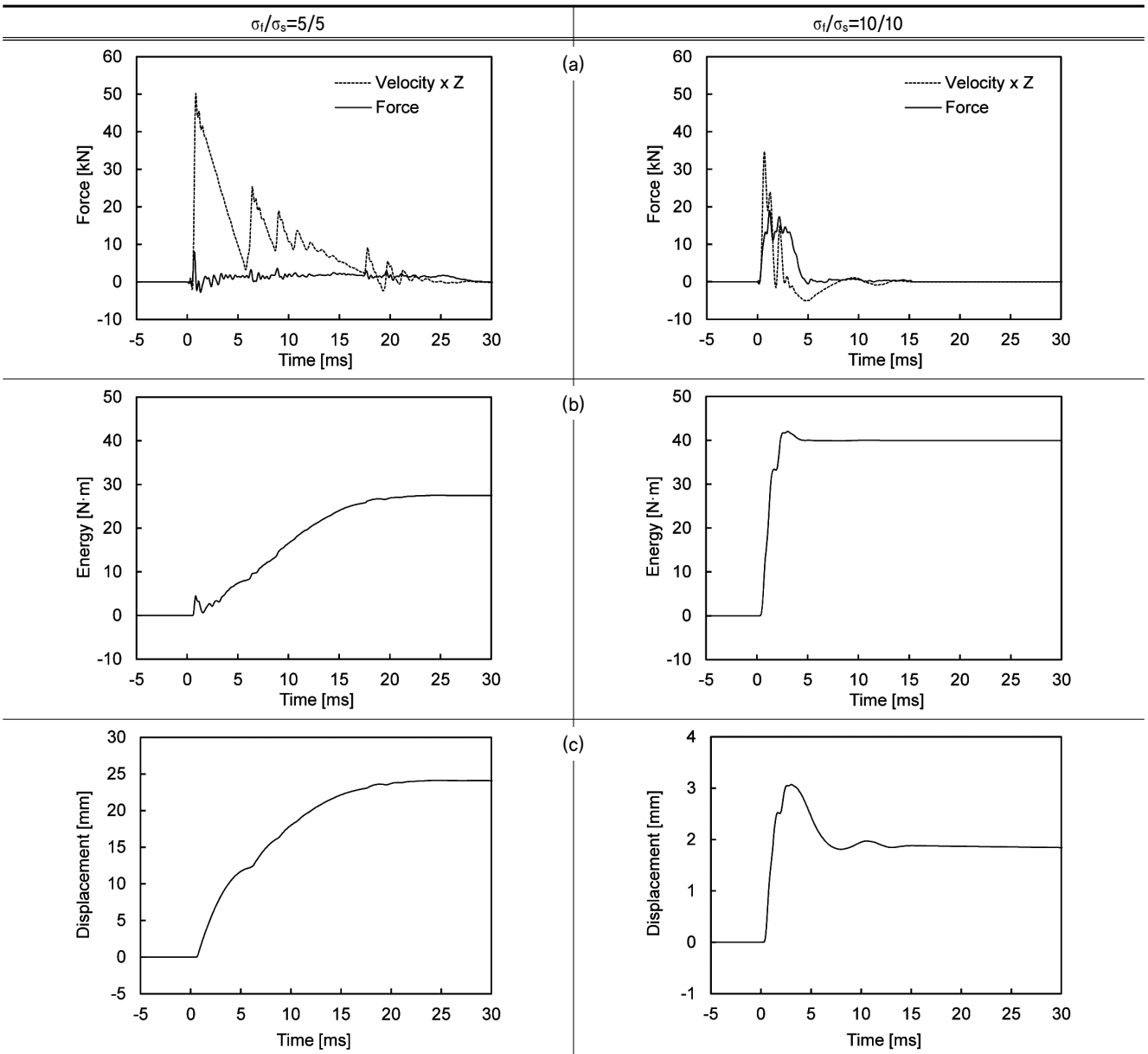


Fig. 6. Dynamic responses at cone tip : (a) Force and velocity; (b) Energy; (c) Displacement

Table 3. Summary of results obtained from dynamic cone penetration test and direct shear test

	$\sigma_f/\sigma_s=5/5$	$\sigma_f/\sigma_s=10/5$	$\sigma_f/\sigma_s=5/10$	$\sigma_f/\sigma_s=10/10$
Peak strength (kPa)	60.8	74.8	91.7	99.6
DCPI _{avg} (mm/blow)	30.8	10.8	4.6	2.0
q _{dynamic} (MPa)	2.6	15.0	26.7	52.8

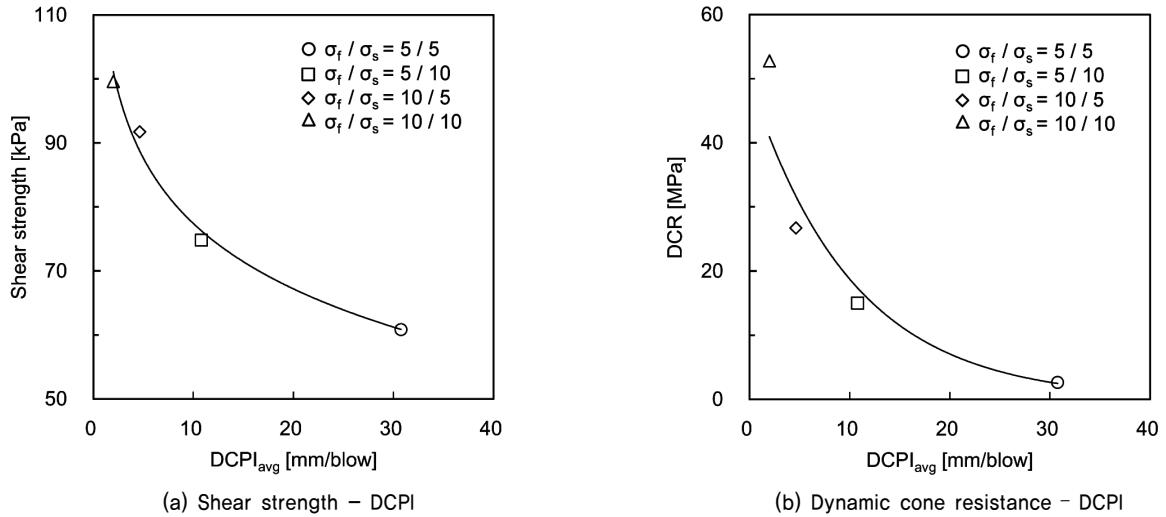


Fig. 7. Correlations

기존의 동적 관입시험에서 동적 콘 관입지수(DCPI)의 측정 시 에너지 손실에 따른 오차가 포함되는 한계가 있으므로 보다 정밀한 지반강도를 평가하기 위하여 Eq. (2)와 같이 선단부에서 측정된 에너지를 선단부에서 산정된 변위 및 단면적으로 나눠줌으로써 동적 콘 저항력(Dynamic Cone Resistance, DCR)을 정의하였다.

$$DCR = \frac{E_{tip}}{d_{tip}A} \quad (2)$$

여기서 E_{tip} 는 선단부에서 산정된 전달에너지이고 d_{tip} 는 선단부에서 산정된 변위이며, A 는 콘의 단면적이다. 이처럼 에너지를 변위 및 단면적으로 나누어 산정된 동적 콘 저항력(DCR)은 그 단위가 응력이므로 타격당 관입 깊이인 동적 콘 관입지수(DCPI)와 반비례하며, 지반강도가 증가할수록 동적 콘 저항력(DCR)도 증가하게 된다.

동일한 구속조건으로 동결된 시료의 직접전단시험을 통한 전단강도와 동적 콘 관입시험을 통한 동적 콘 저항력(DCR)을 Table 3에 정리하였다. 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})와 전단강도의 관계는 Fig. 7(a)와 같이 도시되었으며 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})가 감소함에 따라 전단강도가 증가하는 비선형적인 관계가 관찰되었다. 이는 Mohammadi et al.(2008)의 결과에서 볼 수 있듯이 입자가 조밀하게 구성되어 상대밀도가 높아질수록 전단강도가 증가하고, 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})는 급격하게 감소하는 경향과 일치한다.

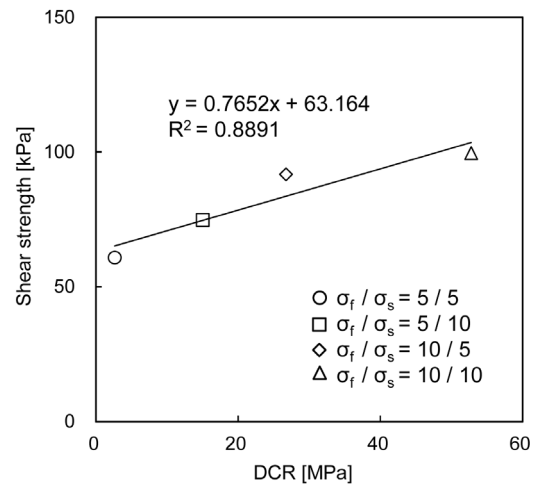


Fig. 8. Correlation between dynamic cone resistance and shear strength

반면 입자가 느슨해질수록 전단강도는 감소하고, 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})는 증가함을 알 수 있다. 한편 동적 콘 저항력(DCR)과 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})의 관계는 Fig. 7(b)와 같이 비선형적인 반비례 관계를 보여주었다.

동적 콘 저항력(DCR)-전단강도 간의 관계를 Fig. 8에 도시하였으며 동적 콘 저항력(DCR)과 전단강도는 선형적으로 비례하는 것으로 나타났다. 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})-동적 콘 저항력(DCR)의 관계와 전단강도-평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})의 관계가 비선형적으로 반비례함을 고려하면 극한지와 같이 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})가 대체

적으로 작은 동결토의 경우에 전단강도의 추정이 작은 실험적 오차에 의해 크게 변동될 수 있는 가능성이 크게 내포되어 있다. 반면 선형적인 관계를 이용한 동적 콘 저항력(DCR)으로부터 동결토의 전단강도 추정은 비선형적 관계를 이용하는 경우보다 오차를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다. 이와 같은 동적 콘 저항력(DCR)-전단강도의 관계는 극한지 동결지반의 강도추정에 공학적으로 적용이 가능할 것으로 기대된다.

6. 요약 및 결론

본 연구에서는 낮은 구속응력 조건에서 동결토의 강도 변화를 평가하기 위해 동적 콘 관입실험을 통한 동적 콘 저항력과 직접전단실험을 통한 전단강도 간의 상호관계를 비교하였다. 시료는 모래에 대한 실트의 무게비가 30%인 혼합토를 상대밀도 60%, 함수비 2.3%가 되도록 동일하게 조성하였으며 챔버 내에서 동결과정을 진행하여 -5°C에 도달하였을 때에 전단실험과 동적 콘 관입실험을 수행하였다. 냉동 챔버 내에서 영하의 온도를 유지하며 계장화된 동적 콘 관입기(IDCPI)를 이용하여 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})를 파악하였으며, 동일한 시료와 조건을 조성하여 직접전단실험을 통해 전단강도를 측정하였다. 또한 동적 콘 관입기의 선단부에 변형률계와 가속도계를 설치하여 에너지 손실에 대한 영향을 최소화하여 지반강도를 평가할 수 있는 동적 콘 저항력(Dynamic Cone Resistance, DCR)을 산출하였다. 동결 및 전단, 그리고 동적 콘 관입과정에서 구속압력의 크기를 변화시킴으로써 전단강도의 차이에 따른 동적 콘 저항력(DCR)의 변화를 비교하였으며, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})는 동결 및 관입 시 수직응력이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타났고 동결 시보다 콘 관입 시 수직응력에 더 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며 이는 시료의 함수비가 낮았기 때문인 것으로 판단된다.
- (2) 동일한 상대밀도와 동일한 방법으로 동결된 시료에 대하여 직접전단실험을 이용하여 산정된 전단강도는 동결 및 전단 시 수직응력이 증가함에 따라 증가하였으며, 함수비가 낮은 시료인 관계로 전단 시의 수직응력이 동결 시 전단응력보다 더 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.
- (3) 평균 동적 콘 관입지수(DCPI_{avg})가 증가함에 따라 동적 콘 저항력(DCR)과 전단강도가 모두 비선형적으로 감소한 반면 전달에너지의 손실에 대한 영향을 최소화하여 산정된 동적 콘 저항력(DCR)은 전단강도와 선형적인 관계를 보여주었다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 플랜트연구사업의 연구비지원(13IFIP-B06700801)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Byun, Y. H. and Lee, J. S. (2013), Instrumented dynamic cone penetrometer corrected with transferred energy into a cone tip: a laboratory study, *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 36, No. 4, pp. 533~542.
2. Byun, Y. H., Yoon, H. K., Kim, Y. S., Hong, S. S. and Lee, J. S. (2014), Active layer characterization by instrumented dynamic cone penetrometer in Ny-Alesund, Svalbard, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 104~105, pp. 45~53.
3. Christ, M. and Park, J. B. (2010), Laboratory determination of strength properties of frozen rubber-sand mixtures, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 60, pp. 169~175.
4. Da Re, G., Germaine, J. and Ladd, C. (2003), Triaxial testing of frozen sand: equipment and examples results, *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 90~118.
5. Kang, J. M., Lee, J. G., Lee, J. Y. and Kim, Y. S. (2013), Analysis of the relationship between unconfined compression strength and shear strength of frozen soils, *Journal of Korean Geosynthetic Society*, Vol. 12, No. 3, pp. 23~29 (in Korean).
6. Kim, S. Y., Lee, J. S., Kim, Y. S. and Byun, Y. H. (2015), Evaluation of the shear strength and stiffness of frozen soil with a low water content, *The Journal of Engineering Geology*, Vol. 25, No. 1, pp. 93~102 (in Korean).
7. Lee, J. Y. and Choi, C. H. (2012), A study for shear strength characteristics of frozen soils under various temperature conditions and vertical confining pressures, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 13, No. 11, pp. 51~60 (in Korean).
8. Mohammadi, M. M. and Robertson, P. K. (2008), A numerical study of chamber size and boundary effects on cpt tip resistance in NC sand, *Scientia Iranica*, Vol. 15, No. 5, pp. 541~553.
9. Mohammadi, S. D., Nikoudeh, M. R., Rahimi, H. and Khamsehchiyan, M. (2008), Application of the dynamic cone penetrometer(DCP) for determination of the engineering parameters of sandy soils, *Engineering Geology*, Vol. 101, No. 3~4, pp. 195~203.
10. Odebrecht, E., Schnaid, F., Rocha, M. M. and Bernardes, G. P. (2005), Energy efficiency for standard penetration test, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 131, No. 10, pp. 1252~1263.
11. Yasufuku, N., Springman, S. M., Arenson L.U. and Ramholt, T. (2003), Stress-dilatancy behavior of frozen sand in direct shear, *Proc. Of the Eighth International Conference on Permafrost*, Switzerland, pp. 1253~1258.
12. Zhu, Y. and Carbee, D. L. (1984), Uniaxial compressive strength of frozen silt under constant deformation rates, *Cold Regions Science and Technology*, Vol. 9, No. 1, pp. 3~15.