

동결온도와 수직구속응력 변화에 따른 모래와 알루미늄 재료의 접촉면에서 작용하는 동착강도 실험 연구

Experimental Study on Adfreeze Bond Strength Between Frozen Sand and Aluminium with Varying Freezing Temperature and Vertical Confining Pressure

고 성 규¹ Ko, Sunggyu

최 창 호² Choi, Changho

Abstract

Bearing capacity of pile foundations in cold region is dominated by adfreeze bond strength between surrounding soil and pile perimeter. Adfreeze bond strength is considered to be the most important design parameter for foundations in cold region. Many studies in last 50 years have been conducted to analyze characteristics of adfreeze bond strength. However, most studies have been performed under constant temperature and normal stress conditions in order to analyze affecting factors like soil type, pile material, loading speed, etc. In this study, both freezing temperature and normal stress acting on pile surface were considered to be primary factors affecting adfreeze bond strength, while other factors such as soil type, pile material and loading speed were predefined. Direct shear box was used to measure adfreeze bond strength between Joomoonjin sand and aluminium because it is easy to work for various roughness. Test was performed with temperatures of $>0^{\circ}\text{C}$, -1°C , -2°C , -5°C , and -10°C and vertical confining pressures of 1atm, 2atm, and 3atm. Based on the test results, the effects of temperature and vertical stress on adfreeze bond strength were analyzed. The test results showed that adfreeze bond strength increases with decreased temperature and increased vertical stress. It was also noted that two types of distinct sections exist, owing to the rate of increase of adfreeze bond strength along the change of freezing temperature: 1)rapidly increasing section and 2)gradually decreasing section. In addition, the results showed that a main factor affecting adfreeze bond strength switches from friction angle to adhesion as freezing temperature decreases.

요 지

동토지역 말뚝기초의 지지력은 말뚝과 토사의 접촉면에서 작용하는 동착강도에 지배된다. 말뚝주변 토사 내 간극수의 동결로 인해 발현되는 동착강도는 동토지반 기초설계에 있어 가장 주요한 설계정수로 고려되고 있다. 지난 50년간 동착강도에 대한 연구가 다각도로 수행되어 왔으나, 대부분 동결온도와 지중온도를 고정조건으로 그 영향력을 고려하지 않은 채 토사종류, 말뚝종류, 재하속도 등의 영향인자를 분석하기 위한 목적으로 수행되었다. 본 연구에서는 동결온도와 마찰면에 작용하는 수직구속응력을 주요 변수로 적용하고, 토사종류, 말뚝종류, 재하속도 등은 고정조건으로 적용하여 직접전단방식의 동착강도 측정실험을 수행하였다. 실험재료로는 표면 가공이 용이하여 거칠기를 정밀하게 조절할 수 있는 알루미늄 모형과 주문진표준사를 활용하였다. 실험은 상온($>0^{\circ}\text{C}$), -1°C , -2°C , -5°C , -10°C 의 동결온도

1 학생회원, 과학기술연합대학원대학교 석사과정 (Student Member, Graduate Student, University of Science and Technology)

2 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원/과학기술연합대학원대학교 부교수 (Member, Senior Researcher, Korea Institute of Construction Technology/Associate Professor, University of Science and Technology, chchoi@kict.re.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

및 1atm, 2atm, 3atm의 수직구속응력 조건에서 수행되었으며, 그 결과를 바탕으로 동결온도와 수직구속응력이 동착강도에 미치는 영향을 분석하였다. 전반적으로 동착강도는 동결온도가 낮아질수록, 혹은 수직구속응력이 커질수록 증가하는 경향을 보였으며, 특히 단위온도차에 따른 동착강도의 증가율이 1)급증하는 구간과 2)점진적으로 감소하는 구간을 뚜렷하게 나타내며 변화하는 특성을 보였다. 또한, 동결온도의 저하에 따라 동착강도의 변화를 지배하는 요소가 마찰각에서 부착력으로 변화하며 수렴구간을 형성하는 경향을 나타냈다.

Keywords : Adfreeze bond strength, Cold region, Foundation, Direct shear test, Frozen sand

1. 서론

동토지역(cold region)은 지반의 동결특성에 따라 계절동토와 영구동토(permafrost)로 구분될 수 있다. 계절동토란 우리나라와 같이 대기온도가 낮아지는 동계기간에만 지표층이 동결되는 지반을 의미하며, 영구동토란 계절과 상관없이 2년 이상 동결되어 있는 지층(영구동토층, permafrost layer)이 존재하는 지반을 의미한다(Esch, 2004). 영구동토는 일반적으로 계절과 상관없이 동결되어 있는 영구동토층 위로 계절에 따라 동결·융해가 반복되는 활동층(active layer)이 나타나는 구조를 보인다. 활동층과 영구동토층의 깊이는 지역적 특성에 따라 다르게 나타나는데 활동층의 깊이가 얇게는 수 cm에서 깊게는 약 3m 정도로 나타나는 반면 영구동토층은 지역에 따라 깊게는 수백 m까지 나타난다(Davis, 2001).

일반적인 비 동결지반에서 말뚝기초의 지지력은 말뚝의 주면과 토사 사이에서 작용하는 마찰력과 선단지 지지력에 의해 지배되는 것과는 달리, 영구동토에서 말뚝기초의 지지력은 말뚝 주면과 동결토의 접촉면에서 작용하는 동착강도(adfreeze bond strength)에 의해 지배된다(Freitag와 McFadden, 1997). 여기서, 동착(adfreezing)이란 수분이 동결하여 이질 재료의 표면에 부착하는 현상을 의미하며, 지반공학 분야에서는 토사와 기초구조물의 접촉면에 존재하는 간극수가 동결함에 따라 토사와 기초구조물을 접착(bonding)시키는 현상을 의미한다(Terashima 등, 1999). 동착강도는 간극수의 동결로 접착된 기초구조물과 토사의 접촉면에서 슬립(slip)파괴가 일어날 때의 최대응력으로 정의된다(Cutbertson-Black, 2001).

동착강도는 토사의 종류, 동결온도, 함수비, 기초구조물 표면 거칠기, 마찰면에 수직으로 작용하는 지중응력 등 다양한 인자들에 영향을 받는 것으로 보고되고

있다(Scarr와 Mokwa, 2008). 특히, 토사 내 간극수의 동결정도에 직접적인 영향을 미치는 ‘동결온도’ 및 토립자와 기초구조물의 마찰력에 영향을 미치는 ‘지중구속응력’과 밀접한 관계가 있을 것으로 판단된다. 하지만 지금까지 수행되어온 동착강도에 관한 기존 연구동향을 살펴보면 주로 토사종류, 기초구조물 표면 거칠기, 전단속도 등의 요인이 동착강도에 미치는 영향을 파악하기 위한 실험연구에 초점을 맞추어 이루어져왔다. 본 연구는 동결온도와 수직구속응력을 주요 실험조건으로 적용하여 수행한 직접전단방식의 동착강도 실험결과를 바탕으로 동결온도 및 수직으로 작용하는 지중구속응력이 동착강도에 미치는 영향을 분석하기 위한 목적으로 수행되었다.

2. 기존연구

2.1 모형말뚝의 인발실험(Oura 등, 1960)

Oura 등(1960)은 그림 1에 나타난 바와 같이 직경 2.5cm의 둥근 강봉(steel pipe)을 세로 10cm, 가로 10cm, 깊이 2.5cm, 5cm 및 15cm의 상자에 토사를 채우고 연직으로 매설하여 약 -20°C 전후의 냉동실에서 하루 이상 동결시킨 후, 강봉을 인발하는 방식으로 말뚝주면에서 발현된 동착강도를 측정하였다. 실험결과 표면이 거친 재료에 대한 동착강도가 표면이 매끈한 재료에 대한 동착강도에 비하여 크게 나타나는 것을 확인하였다. 또한 같은 재료의 강봉의 경우에도 녹는 강봉에 발현되는 동착강도가 녹슬지 않은 강봉에서 발현되는 동착강도와 비교하여 약 3배 이상 크게 나타나는 결과를 보고하였다. 이러한 실험결과는 동착강도가 재료 표면 거칠기 변화와 밀접한 관계가 있음을 시사하고 있다. Oura 등(1960)은 같은 방식의 실험을 다양한 동결온도 조건에서 반복하며 동착강도와 동결온도의 관계를 확인하였

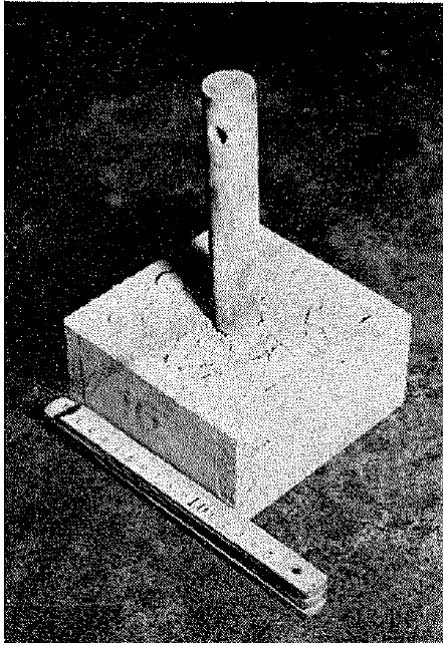


그림 1. 모형말뚝 인발실험(Oura 등, 1960)

고 그 결과 동결온도 조건이 낮을수록 동착강도가 크게 나타나는 결과를 제시하였다.

2.2 모형말뚝의 압축실험(Parameswaran, 1978)

Parameswaran (1978)은 다양한 재료로 제작한 모형말뚝을 이용하여 동착강도 측정실험을 수행하였다. 모형말뚝의 재료는 세 가지 종류의 목재(B.C. fir, spruce and creosoted B.C. fir), 스틸(coated and un-coated steel) 및 콘크리트(concrete)가 사용되었다. H형의 스틸 말뚝을 제외한 모형말뚝은 직경 76.2mm, 길이 304.8mm로 제작되었으며, 스틸 말뚝은 가로 100mm, 세로 101.6mm, 길이 304.8mm의 H형강이 사용되었다. 실험은 그림 2와 같은 장치를 이용하여 동결된 토사에 매설된 모형말뚝에 일정한 속도로 수직하중을 재하하여 모형말뚝의 표면과 토사가 접하는 면에서 발생하는 저항력인 동착강도를 측정하는 방식으로 수행되었다. 실험을 위한 모형말뚝은 304.8×304.8×304.8mm의 크기로 제작된 박스 안에 190.5mm 깊이로 채워진 오타와(Ottawa)의 가는 모래(함수비 약 14%)에 매설되었고, 동착강도의 발현을 위하여 -6±0.2℃의 냉동실에서 약 4일정도 동결시켰다.

그림 2에서 A는 모형 말뚝, B는 플렉시 유리 박스, C는 소켓, D는 바닥판, E는 변위를 제어하는 수직하중 재하장치, T는 지중 온도계, F는 지지대를 나타내고 있으며, 본 실험 장치는 동결상태를 유지한 채 하중을 재

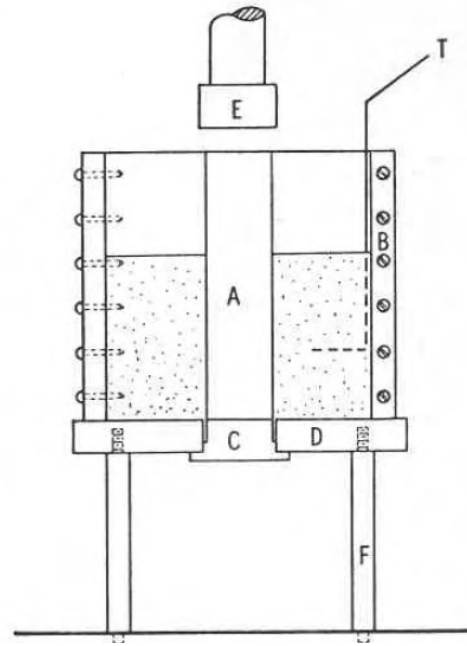


그림 2. 모형말뚝 압축실험(Parameswaran, 1978)

하하기 위하여 냉동실 내에 설치되었다. 표 1은 각 재료별 동착강도 실험결과를 정리한 것으로, 크로스헤드의 속도(Cross-Head Speed)가 일정한 상태에서 대체적으로 B.C. fir 목재 말뚝에서 작용한 동착강도가 가장 높게 나타났으며, 페인트가 칠하여진 스틸(painted steel)과 크레오소트(creosote)로 표면처리된 B.C. fir 목재 말뚝에서 가장 낮은 동착강도가 발현된 것으로 나타났다. 또한 크로스헤드의 속도는 곧 모형말뚝의 표면과 토사의 접촉면에서의 전단속도라고 할 수 있으며, 실험결과 전단속도가 증가할수록 동착강도가 크게 나타나는 경향을 보였다.

2.3 이중전단시험(Ladanyi와 Theriault, 1990)

Ladanyi와 Theriault (1990)는 동착강도와 동결토 전단강도와의 관계, 그리고 수직구속응력에 의한 영향을 파악하기 위해 그림 3과 같은 이중(double)전단시험기를 활용하여 -2℃의 조건에서 동착강도 측정실험을 수행하였다. 본 실험에서 사용된 토사는 캐나다 퀘벡(Quebec)의 가는 모래로 약 90%의 입자가 0.1mm~1.0mm의 작은 입경을 가지고 있다. 시료 크기는 직경 63mm, 높이 65mm로 약 14~15% 정도의 함수비를 기준으로 다짐하였다. 제작이 완료된 시료는 4~5시간정도에 걸쳐 포화시킨 후 냉장 보관하였고, 실험 24시간 전부터 -2℃의 냉동실에서 동결시켰다.

표 1. 동착강도 측정결과(Parneswaran, 1978)

Cross-Head Speed (mm/min)	Adfreeze Strength (τ_f), Mpa						
	B.C. fir	Concrete	Painted steel	Creosoted B.C. fir	Spruce	Unpainted steel	Steel H-section
0.0005	1.140	0.525	0.497	0.403	0.960	0.527	0.640
0.001	1.175	0.553	0.496	0.487	0.863	0.760	0.513
	1.290					0.609	
0.002	1.113	0.671	0.648	0.690	1.122	0.680	0.648
	1.247					0.505	
0.005	1.610	0.773	0.677	0.720	1.967	0.806	0.691
0.01	1.560	0.866	0.679	0.813	1.167	0.734	0.695
						0.940	
0.02	1.936	1.160	0.973	0.920	1.461	0.868	0.854
0.05	2.231	1.293	1.026	0.875	1.290	1.181	0.852
						1.506	
0.10	2.420	1.611	1.146	1.220	1.542	1.364	0.983
						0.704	

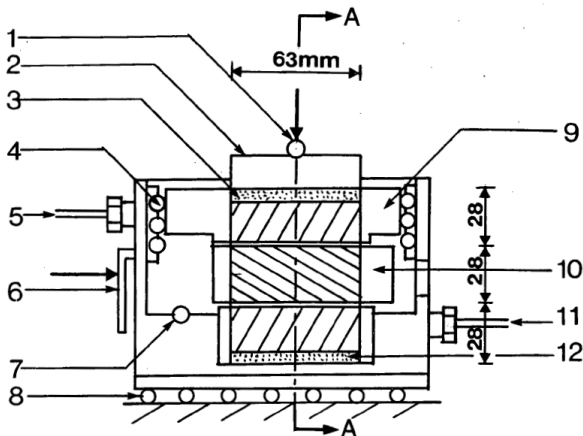


그림 3. 이중전단시험기(Ladanyi와 Theriault, 1990)

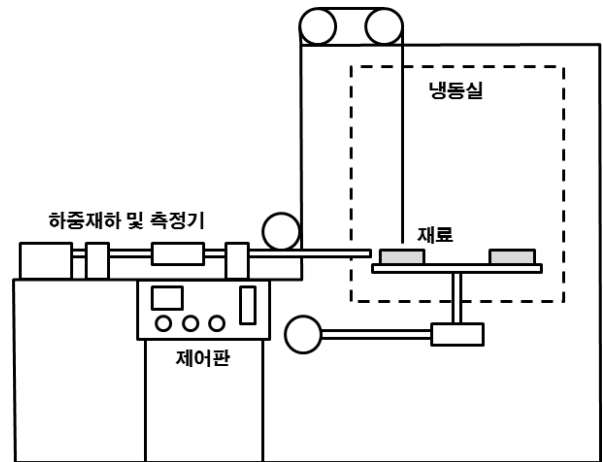


그림 4. 동착강도 측정시험기(吉田 光則 등, 1993)

실험 결과 수직구속응력이 100kPa 이하인 경우 동착강도와 동결토 전단강도의 비 (τ_{mp}/τ_{sp})는 0.1이하로 상당히 낮게 나타났으며, 수직구속응력이 증가함에 따라 동착강도와 동결토 전단강도의 비도 증가하였는데 그 기울기가 Sand-Steel의 경우 약 20°, Sand-Aluminium의 경우 약 28° 정도인 것으로 나타났다. 또한, Ladanyi와 Theriault(1990)는 토사의 전단변형으로 인하여 동착강도가 사라진 후, 다시 회복되는 현상인 동착강도의 회복(bond-healing) 효과와 수직구속응력의 관계를 확인하기 위한 연구를 수행하였다. 실험은 두 공시체 가운데 위치한 모형(steel, aluminium)재료가 최대동착강도 발현 후 약 5mm의 변위를 일으킬 때까지 움직이게 한 후, 수직구속하중을 가한 상태로 시간이 흐른 뒤 다시 동착강도를 측정하는 방식으로 수행되었다. 실험 결과에 의하면

모형재료가 스틸(sand-steel 조합)의 경우 400kPa 이상의 수직구속응력조건에서 약 300시간이 지나면 동착강도가 완전히 회복되는 경향을 나타내었다.

2.4 물과 재료의 동착강도 실험(吉田 光則 등, 1993)

吉田 光則 등(1993)은 동결한 얼음과 다양한 모형재료의 접촉면에서 발현되는 동착강도의 특성과 동착강도를 저감시키는 요인들에 대한 연구를 목적으로 동착강도 측정실험을 수행하였다. 본 연구에 사용된 재료들은 플라스틱, 염화비닐, 불소수지, 아크릴 실리콘 수지, 아크릴 우레탄 수지, 알루미늄, 스테인리스, 벽돌, 콘크리트 등으로, 그림 4에 나타난 실험장치를 활용하여 각 재료별로 발현되는 동착강도를 측정하였다. 실험은 모형재료가 올려진

표 2. 각 연구사례별 실험조건

연구사례	실험방법	고정조건	변수조건
Oura 등(1960)	매설된 강봉 인발	수직구속응력, 재하속도	동결온도, 말뚝모형재료
Parameswaran(1978)	모형말뚝 압축	동결온도, 수직구속응력	말뚝모형재료, 재하속도
Ladanyi와 Theriault(1990)	이중전단시험	동결온도, 재하속도	말뚝모형재료, 수직구속응력
吉田 光則 등(1993)	얼음과 접착된 재료 수평하중재하	동결온도, 수직구속응력, 재하속도	말뚝모형재료
Kim 등(2007)	말뚝매설 후 토조 동결	동결온도, 말뚝모형재료, 수직구속응력	토사종류
본 연구	직접전단시험	말뚝재료, 재하속도	동결온도, 수직구속응력

스테인리스 판을 충분히 냉각한 후 증류수를 부어 재료와 스테인리스 판 표면에 임의의 얼음 막을 형성시키고 소정의 시간이 흐른 후 전단력을 가해 각각의 재료를 스테인리스 판으로부터 분리해 내는 방식으로 수행되었다.

실험결과에 따르면 재료에 따라 그 변화율은 달랐지만 온도가 낮아질수록 동착강도는 증가하는 경향을 보였다. -10℃의 조건에서 측정된 각 재료에 따른 동착강도는 재료에 따라 적게는 약 0.8MPa에서 많게는 약 1.1MPa로 다양하게 나타났다. 재료별 측정결과의 편차는 대체적으로 재료가 갖고 있는 표면 거칠기의 정도에 따른 차이인 것으로 판단된다.

2.5 모형말뚝의 동착력 측정실험(Kim 등, 2007)

국내에서도 동착현상과 관련한 연구가 Kim 등(2007)에 의하여 계절 동토 혹은 활동층에서 동계기간 동착현상에 의해 말뚝기초에 작용하는 상향의 동착력을 저감시킬 수 있는 채움재를 개발하기 위한 목적으로 수행되었다. 실험은 모형말뚝을 토조에 매설 한 후, -26℃에서 동결시켜 말뚝에 작용하는 상향력을 측정한 결과와 새로 개발된 채움재(plastic material)로 모형말뚝 주변 토사를 치환한 후 같은 방식으로 말뚝에 작용하는 상향력을 측정한 결과를 상호 비교하여, 개발된 채움재의 동착현상 저감 성능을 증명하는 방식으로 수행되었다.

실험결과 채움재 없이 매설된 모형말뚝에 작용하는 최대 동착강도와 비교하여 새롭게 개발된 채움재를 활용한 경우의 최대 동착강도가 약 15% 정도 감소하는 결과를 나타내 새롭게 개발된 채움재를 활용할 경우 말뚝기초에 작용하는 상향의 동착력에 의한 영향을 저감시킬 수 있다는 사실을 증명하였다.

3. 직접전단시험

앞서 살펴본 기존 연구사례들은 각각의 연구 목적에

따라 다양한 실험방법을 활용하고 있다. 하지만 대다수 실험들이 고정된 동결온도 조건에서 수행되었으며, 동결온도가 동착강도에 미치는 영향을 정량적인 결과로 제시하고 있지 않은 것으로 파악된다. 또한, Ladanyi와 Theriault(1990)의 연구를 제외한 모든 연구사례에서 수직구속응력이 동착강도에 미치는 영향은 고려되고 있지 않다. 본 연구에서는 동결온도와 수직구속응력이 동착강도에 미치는 영향을 분석하기 위해 직접전단시험기를 활용하였다. 직접전단시험기의 하부 전단박스에 가공이 비교적 용이하여 단면의 거칠기를 정밀하게 조절할 수 있는 알루미늄 모형재료를 설치하고, 상부 전단박스에 토사를 채워 동결시킨 후 하부박스에 수평하중을 재하하여 전단하는 방식으로 동착강도 실험을 수행하였다. 표 2는 앞서 제시한 연구사례들의 실험방법, 시험시의 고정조건 및 변수조건을 비교하여 보여준다. 본 연구에서 수행된 동착강도 실험은 기존 연구들의 실험에서 다루어 온 변수조건과는 다른 조합의 변수조건을 적용함으로써 동결온도와 수직구속응력의 복합적 영향인자 분석을 위해 수행되었다.

3.1 실험장비

본 연구에서 수행한 전단시험은 동토지역의 저온환경을 모사하기 위하여 대형 냉동챔버 내에서 대기온도를 영하로 유지한 상태에서 수행되었고 최저 -30℃의 온도조건에서도 가동과 측정이 가능하도록 제작된 동결토 전단시험장비를 활용하였다. 동결토 전단시험기는 수평하중, 수직변위, 수평변위를 각각 0.01kg, 0.01mm, 0.01mm 단위로 측정할 수 있으며, 각 계측값은 2Hz의 속도로 측정되었다. 수평하중의 재하 및 로드 셀(load cell) 최대 측정값은 5ton이며, 수직변위계(LVDT) 측정범위는 100mm이다. 전단박스는 가로와 세로가 100mm이고 높이 40mm인 정방형 박스를 활용하였다. 시료의 수평변위로 인해 감소하는 실제 전단면의 면적에서 작

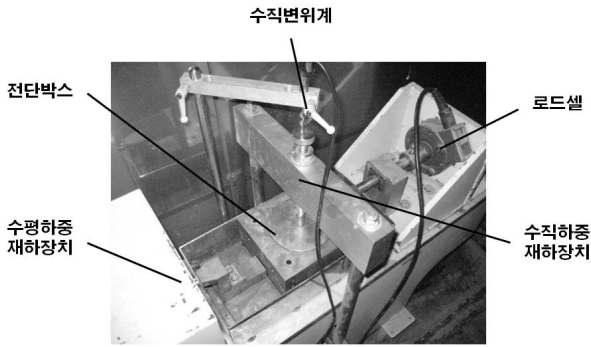


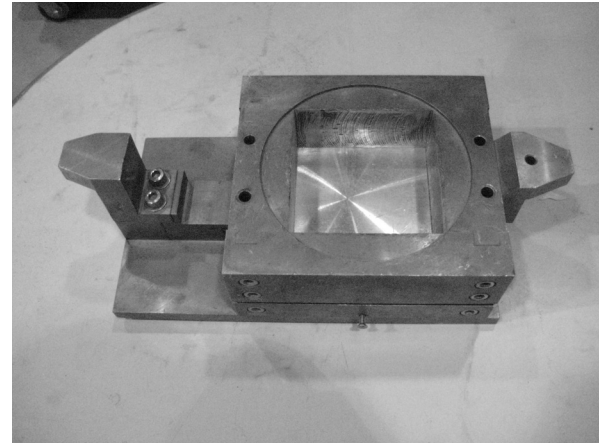
그림 5. 동결토 전단시험기

용한 전단응력을 정확하게 측정하기 위하여 각 수평변위에 대하여 면적을 보정하였다. 전단속도는 기존 Parameswaran(1978)의 동착강도 측정실험 사례를 참조하여 분당 0.1%의 수평변형율이 발생하도록 0.1mm/min의 속도를 적용하였다. 그림 5는 동결토 전단시험기의 모습과 주요 구성요소들의 명칭을 나타내고 있다.

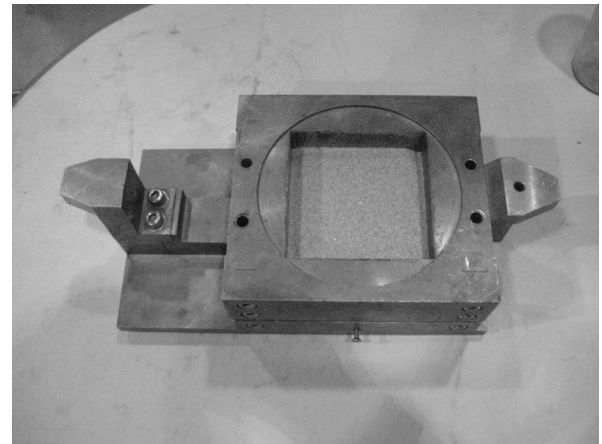
3.2 시료준비

실험에 활용된 토사는 표 3에서 정리하고 있는 바와 같이 비중 2.67, 최대/최소 건조단위중량은 각각 16.7 kN/m^3 과 13.3 kN/m^3 의 물리적 특성을 나타내며, 전형적인 빈립도 사질토로 분류되는 주문진 표준사를 활용하였다(김종열 등, 2000). 알루미늄 모형재료와 사질토를 활용한 동착강도시험을 위하여, 시료는 그림 6과 같이 평평한 면을 갖도록 제작된 알루미늄 모형을 하부전단박스에 삽입하고 상부전단박스에 토사를 채운 후, 정적으로 다짐하는 단계를 거쳐 제작하였다. 동결을 시작하기 전 1시간동안 수침시켜 시료를 완전 포화시켰다. 시료에 사용된 토사는 공기 중의 습윤화를 방지하기 위하여 건조로에서 꺼낸 직 후에 중량을 측정함으로써 완전건조 상태를 기준으로 제작되었으며, 상대밀도 77% ($e=0.66$)를 기준으로 제작하였다.

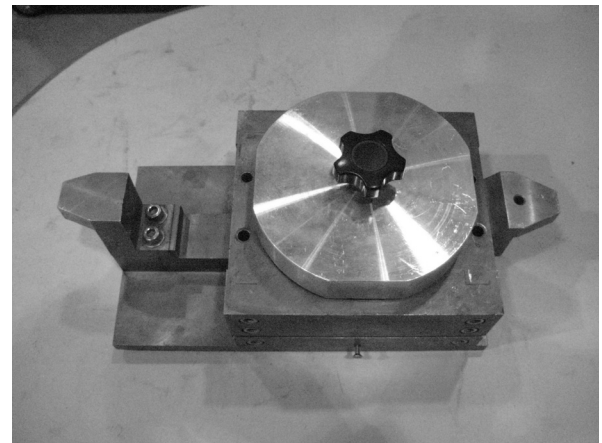
1시간동안 수침시켜 포화가 완료된 시료는 대형 냉동 챔버 내에서 수직하중을 가하지 않고 동결시켰다. 포화된 시료의 중심부까지 냉동챔버의 동결온도조건과 평형을 이루는 총 동결시간을 정확히 파악하기 위하여 중



(a)하부 모형재료 삽입



(c)상부 토사채움



(d)정적다짐

그림 6. 시료제작 과정

심부에 온도계를 삽입한 예비시료를 만들어 시료내부 온도를 측정하였다. 수회에 걸친 온도측정결과 본 실험

표 3. 주문진 표준사 물성치(김종열 등, 2000)

흙의 공학적 특성	비중	최대건조단위중량(kN/m^3)	최소건조단위중량(kN/m^3)	USCS
	2.67	16.7	13.3	SP

표 4. 실험결과

전단시험	온도조건 (°C)	수직구속응력 σ (kPa)	동착강도 τ_{ad} (kPa)	부착력 a (kPa)	내부마찰각 δ (°)	R^2
알루미늄-동결사질토	상온(>0)	100	41	19	13	0.9879
		200	69			
		300	88			
	-1	100	57	36	12	0.9984
		200	80			
		300	100			
	-2	100	239	140	44	0.9952
		200	323			
		300	430			
	-5	100	665	549	51	0.9858
		200	816			
		300	915			
-10	100	1150	1001	56	0.9998	
	200	1294				
	300	1445				

이 수행된 온도범위 내에서 약 10시간정도의 시간이 흐르면 냉동챔버 내부의 대기온도와 시료중심부의 온도가 평형을 이룬다는 사실을 확인하였다. 이러한 경험을 바탕으로 본 실험에서는 시료를 약 24시간동안 충분히 동결시켰다.

4. 실험결과

본 연구에서는 알루미늄 모형재료와 동결 사질토간의 동착강도실험을 각각 상온(>0°C, 비동결상태), -1°C, -2°C, -5°C, -10°C의 동결온도 조건에서 수행하였으며, 각 온도조건별로 1atm, 2atm, 3atm(1atm ≃ 100kPa)의 수직구속응력을 재하였다. 실험결과 증가량에 차이는 있지만 동결온도 조건이 낮아질수록, 또는 수직구속응력이 커질수록 알루미늄 모형재료와 동결 사질토의 표면에서 작용하는 동착강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 동착강도는 전반적으로 온도조건이 상온(>0°C)에서 -1°C로 내려가는 동결초기구간에서는 변화량이 작게 나타나다가 동결온도가 -1°C에서 -2°C로 낮아지며 급격하게 증가하는 특성을 나타냈다. 특히 -1°C 조건에서는 영하의 온도조건에서도 동결하지 않는 부동수분(不凍水分)의 함유량이 실험자의 눈으로 확인 될 정도로 높아 동결에 의한 영향이 크게 나타나지 않은 것으로 사료되며, 이후 온도가 낮아지며 부동수분이 감소하여 급격한 강도증진 현상이 발생한 것으로 판단된다. -10°C 조건에

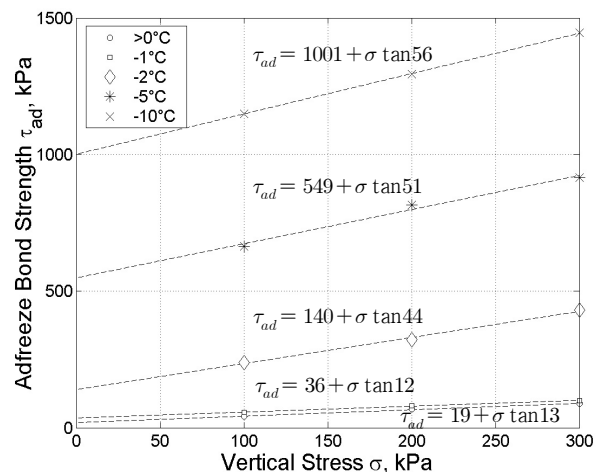


그림 7. 수직구속응력에 대한 동착강도

서는 최대 1MPa 이상의 동착강도를 기록하였다. 표 4는 각 실험조건별 결과 값을 구체적으로 나타내고 있다.

그림 7은 알루미늄 모형재료와 동결 사질토간의 동착강도시험 결과로, 동결토사와 알루미늄 재료의 전단면에서 발현된 최대 동착강도 τ_{ad} 를 종축에, 전단시험 중 재하된 수직구속응력 σ 를 횡축에 도시하여 나타내고 있으며, Mohr-Coulomb 전단강도 이론을 적용하여 각 온도 조건별 동착강도를 부착력 a 와 마찰각 δ 를 상수로 갖는 수직구속응력 σ 에 대한 함수로 나타내고 있다. 여기서, 부착력은 동착강도 측정결과에 대한 1차원 회귀 분석으로 추정된 직선의 추세선과 종축이 만나는 교점, 즉 수직구속응력이 0인 경우의 동착강도를 의미하며,

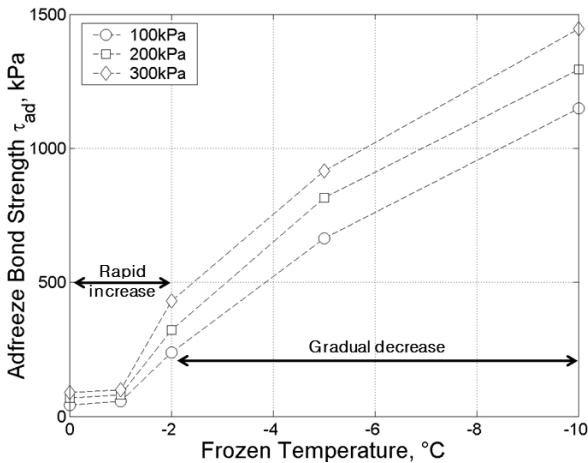


그림 8. 동결온도에 대한 동착강도

마찰각은 추세선의 기울기를 의미한다. 각 온도조건별 1차원 회귀분석결과 추세선의 결정계수 R^2 값은 평균 0.9934로 비교적 안정적인 분석결과를 나타냈으며, 부착력과 마찰각은 온도조건이 낮아질수록 증가하는 경향을 나타냈다.

그림 8은 수직구속응력이 동착강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 각 온도조건별 실험결과를 수직구속응력에 따라 구분하여 나타낸 것이다. 여기서, 그래프의 연속성을 확보하기 위하여 상온($>0^{\circ}\text{C}$)에서의 실험 결과는 간극수의 동결이 시작되는 0°C 직전까지 동일하다는 가정하에 그 결과값을 0°C 에 표시하였다. 그림 8로부터 온도변화에 따라 동착강도가 증가하는 경향이 유사하고, 수직구속응력의 재하정도에 따라 일정한 비율의 간격을 유지하며 변화하고 있다는 사실을 확인할 수 있다. 그림 8에 나타난 점선(dashed line)은 실험결과를 선형으로 연결한 것으로 그 기울기의 변화를 통해 온도조건이 상온($>0^{\circ}\text{C}$)에서 -10°C 로 낮아지는 동안 단위온도변화에 따른 동착강도의 증가율이 1) 급증하는 구간과 2) 점진적으로 감소하는 구간으로 구분할 수 있다. 상온($>0^{\circ}\text{C}$)에서 -2°C 까지의 급증구간에서는 온도변화에 대한 민감도, 즉 기울기가 -1°C 이후 급격히 증가하는 경향을 나타냈다. -2°C 에서 -10°C 이후 나타나는 점진적 감소구간은 온도변화에 대한 민감도가 점차적으로 감소해가는 경향을 나타냈다. 본 실험결과를 바탕으로 동결온도가 -2°C 에서 -5°C 로 낮아지는 구간과 -5°C 에서 -10°C 로 낮아지는 구간에서의 단위온도차에 대한 동착강도 증가량은 평균적으로 $156\text{kPa}/-1^{\circ}\text{C}$ 에서 $100\text{kPa}/-1^{\circ}\text{C}$ 로 감소하며 약 36%의 감소율을 나타냈다. 이와 같은 경향을 바탕으로 -10°C 이후, 온도저하에 따른 동착강도의 증

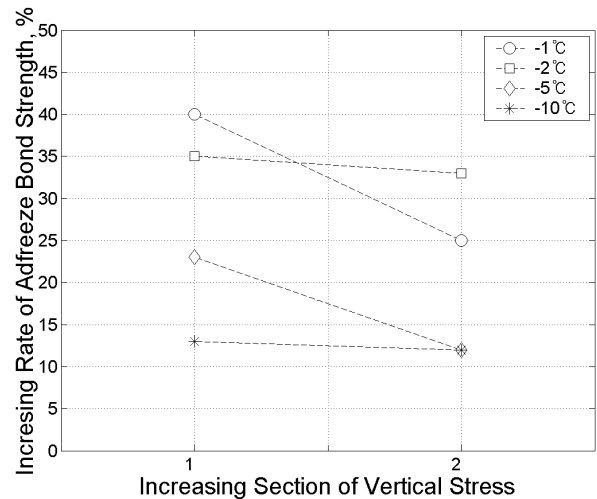


그림 9. 각 온도조건에서 수직구속응력 증가구간별 동착강도 증가율

가율이 점차 감소하며 수렴구간을 형성해 갈 것이라 분석된다. Bowles(1996)는 동착강도가 약 -12°C 내외의 동결온도 조건에서 수렴 값에 도달할 것이라고 보고한바 있으나, 본 연구에서는 현재까지 수행된 실험결과를 바탕으로 정확한 수렴지점을 예측하는 것은 한계가 있을 것으로 판단된다.

그림 9는 각 온도조건에서 수직구속응력에 의한 동착강도의 증가율을 나타내고 있다. 그림에서, 횡축은 수직구속응력 증가구간을 의미하는데 1구간은 수직구속응력이 1atm에서 2atm으로, 2구간은 2atm에서 3atm으로 증가하는 구간을 의미한다. -1°C 조건에서는 수직구속응력이 1atm씩 증가함에 따라 각각 약 40%, 25%의 동착강도 증가율을 나타냈으며, -2°C 조건에서는 평균적으로 약 34%씩 증가하였다. -5°C 및 -10°C 조건에서는 수직구속응력이 1atm에서 2atm으로 증가할 때 동착강도가 각각 약 23%와 13%, 2atm에서 3atm으로 증가할 때 약 12%씩 동일하게 증가하였다. 이러한 실험결과는 전반적으로 동결온도가 낮아질수록, 혹은 수직구속응력이 증가할수록 수직구속응력에 의한 동착강도의 증가율이 작아지는 경향이 있음을 나타낸다. 말뚝기초 설계를 위한 동착강도 산정시 지중에서 말뚝과 토사의 접촉면에 수직으로 작용하는 지중응력에 대한 영향을 고려할 필요가 있으며, 특히 상대적으로 높은 동결온도 조건에서 주요하게 다루어져야 한다는 사실을 시사하고 있다.

동결온도가 동착강도에 미치는 영향을 보다 정확하게 분석하기 위하여 그림 10과 11에 동결온도의 변화에 따른 부착력 a 와 마찰각 δ 의 변화양상을 분리하여 도시화하였다. 여기서, 점선(dashed line)으로 나타낸 추세선은

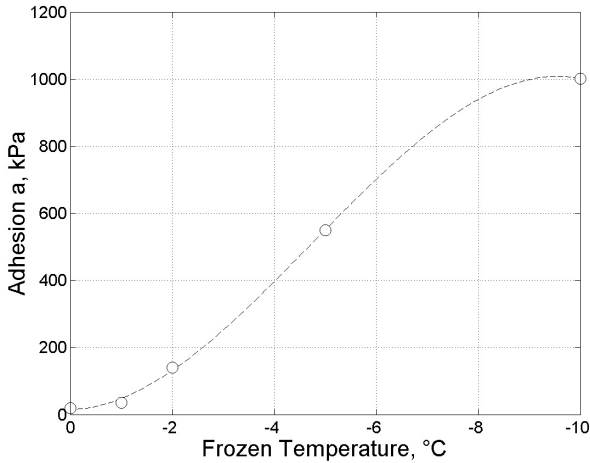


그림 10. 동결온도에 따른 부착력 변화

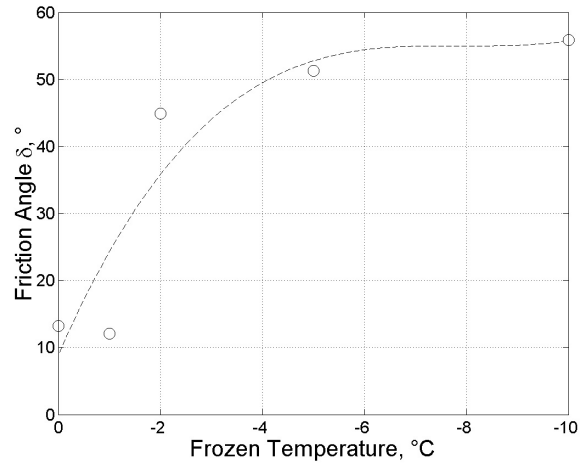


그림 11. 동결온도에 따른 마찰각 변화

실험결과로부터 다차원 보간법(polynomial interpolation)을 활용하여 추정된 추세선이다. 그 결과 상기 기술한 바와 같이 부착력과 마찰각은 모두 동결온도가 낮아질수록 증가하는 경향을 나타냈지만, 증가하는 추세는 전혀 다른 경향을 나타냈다. 부착력의 경우 동결초기구간에서는 증가량이 작다가 동결온도가 낮아질수록 증가량이 증대되는 경향을 나타낸 반면, 마찰각의 경우 -1°C 를 기점으로 급격히 증가하다가 동결온도가 -5°C 이후로 약 53° 정도로 수렴구간을 형성해가는 경향을 나타냈다. 이는 동결온도가 낮아질수록 동착강도의 변화양상을 지배하는 요소가 마찰각 δ 에서 부착력 a 로 변화하는 것을 의미하는 것으로 판단되었다. 또한, 동결온도가 -5°C 이하로 하강함에 따라 마찰각의 선(先)수렴 후, 부착력 역시 기울기가 감소하며 수렴구간을 형성해 가는 것으로 사료되는데, 이를 바탕으로 부착력과 마찰각에 의해 지배되는 동착강도의 증가율이 -5°C 이후, 점진적으로 감소하며 수렴구간이 형성 될 것이라는 결과를 예측할 수 있다. 앞서 제시한 강도정수의 동결온도별 거동은 주문진 표준사와 알루미늄 재료의 표면에서 발현하는 동착강도의 변화 특성을 바탕으로 분석된 결과이다. 따라서 다른 토사와 말뚝재료 사이에서 발현하는 동착강도에서도 위와 비슷한 경향을 보일 것으로 예측되나, 수렴구간의 온도는 재료의 다양성에 따라 변화할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 동결온도와 수직구속응력의 변화가 알루미늄 모형재료와 동결 사질토의 접촉면에서 발현

되는 동착강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 직접 전단시험기를 활용한 동착강도 측정실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 동착강도는 동결온도가 낮아질수록, 수직구속응력이 커질수록 증가하는 경향을 나타내었으며, 단위온도차에 따른 동착강도의 증가율이 1)급증하는 구간과 2)점진적으로 감소하는 구간으로 구분할 수 있다.
- (2) 동착강도는 Mohr-Coulomb 전단강도 이론을 적용하여 부착력 a 와 마찰각 δ 를 상수로 갖는 수직구속응력 σ 의 함수로 표현할 수 있다.
- (3) 동착강도는 동결온도가 낮아질수록, 혹은 수직구속응력이 커질수록 수직구속응력이 동착강도의 증가율에 미치는 영향력이 감소하는 경향을 나타냈다. 그러므로, 설계 동착강도 산정시 마찰면에 수직으로 작용하는 지중응력에 의한 영향을 고려할 필요가 있을 것으로 판단된다.
- (4) 부착력 a 는 동결온도가 낮아질수록 단위온도차에 대한 증가율이 증가하는 반면 마찰각 δ 는 초기 동결온도 구간에서 급격히 증가하다가 -5°C 이후 수렴구간을 형성해가는 양상을 나타냈다.
- (5) 그러므로 동착강도의 변화양상을 지배하는 요소는 동결온도가 낮아질수록 마찰각 δ 에서 부착력 a 로 변화하는 것으로 사료된다.

본 연구는 동착강도에 영향을 미치는 주요 인자로서 동결온도와 수직구속응력을 고려하여 수행되었다. 본 연구의 결과는 동착강도에 영향을 미치는 요소로 알려진 말뚝재료의 거칠기, 토사종류 등에 대한 추가연구를

통하여 동토지반에서의 말뚝기초 설계 정수로서 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서 수행된 실험은 모래와 표면이 매끈한 알루미늄 재료에 대하여 최저 온도 -10℃ 조건에서 수행되었고, -2℃ 이후의 구간별 온도차이가 비교적 크다는 한계가 있었다. 그러므로 다양한 종류의 토사 및 말뚝재료에 대한 실험, -10℃ 이하 온도에서의 추가적인 실험연구, 보다 세분화된 온도 구간별 실험연구가 수행된다면 보다 의미 있는 연구결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 기관과유사업인 “극한지 하부구조 급속시공 플랫폼 기술개발”과제의 지원으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 김종열, 최용환, 정자영, 강권수 (2000), “직접전단시험 형태에 따른 주문진 표준사의 전단정수 고찰”, *대한토목학회 학술발표회 논문집*, 제2권, pp.439-442.
2. 吉田 光則, 大市 貴志, 山岸 暢, 金野 克美, 後町 光夫, 平野 徹, 藤野 和夫, 堀口 薫, 水野悠紀子, 山岡 勝, 近藤 孝, 浅井 規夫, 佐竹 正治 (1993), “着雪氷防止技術に関する研究”, *北海道立工業試験場報告*, No.292. pp.13-22.
3. Assali, I. F. (1994), *Thermal Analysis and bearing Capacity of Piles Embedded in Frozen Soils*, Thesis for Master Degree, University of Windsor, Ontario, Canada.
4. Bowles, J. E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw-Hill.
5. Davis, T. N. (2001), *Permafrost: A Guide to Frozen Ground in Transition*, Fairbanks, Alaska, University of Alaska Press.
6. Esch, D. C. (2004), *Thermal Analysis, Construction, and Monitoring Methods for Frozen Ground*, *The Technical Council on Cold Regions Engineering*, Virginia: American Society of Civil Engineering.
7. Freitag, D. R. and McFadden, T. (1997), *Introduction to Cold Regions Engineering*, New York: ASCE Press.
8. Kim, Y-C., Nam, M. S., Hong, S-S. (2007), “Ground characteristics in the antarctic and adfreeze force on pile foundations”, *Proc. of Int. Conf. on Tampere*, Finland.
9. Ladanyi, B. and Theriault, A. (1990), “A study of some factors affecting the adfreeze bond of piles in permafrost”, *Proc. of Geotechnical Engineering Congress, GSP 27 ASCE*, Vol.1, pp.213-24.
10. Oura, H., Usuki, H., and Takada, Y. (1960), “On adfreezing force of soil”, *Low Temperature Science*.
11. Parameswaran, V. R. (1978), “Adfreeze strength of frozen sand to model piles”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, No.4, pp.494-500.
12. Scarr, K. L., Mokwa, R. L. (2008), *Axial Capacity of Piles Founded in Permafrost: A Case Study on The Applicability of Modern Pile Design in Remote Mongolia*, Project Report, BioRegions International, Bozeman, Montana.
13. Terashima, T., Kawai, T., Furuya, A., Narita, K., Usami, N., Saeki, H. (1999), “Experimental study on adfreeze bond strength between ice and pile structure”, *Proc. of 9th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Vol.2, pp.549-556.

(접수일자 2011. 6. 23, 심사완료일 2011. 9. 20)