

Cold Room 실험을 통한 동결토의 강도특성 연구

서영교* · 강효섭* · 김은섭**

*한국해양대학교 해양개발공학부

**삼성중공업(주)

A Study of Cold Room Experiments for Strength Properties of Frozen Soil

YOUNG-KYO SEO*, HYO-SUB KANG* AND EUN-SUB KIM**

*Division of Ocean Development Engineering, Korea Maritime University, Busan, Korea

**Samsung Heavy Industry Co. Ltd., Geoje, Korea

KEY WORDS: Frozen soil 동결토, Frozen sand 동결모래, Unconfined compression test 일축압축시험, Split tensile test 쪼갬인장시험, Kaolinite 카오리나이트

ABSTRACT: Recently many countries have become interested in the development of cold or arctic regions. The construction of engineered structures in those regions demands an understanding of the deformation characteristics of frozen soil. However, an understanding of frozen soil behavior poses difficult problems owing to the complex interaction between the soil particles and the ice matrix. In this research, a series of laboratory tests was performed to investigate the variations in the unconfined compression strength and split tensile strength of weathered granite soil and mixed soil (standard sand and kaolinite) in 15 degrees below zero environments. In the frozen soil tests, specimens were prepared with various water and clay contents, and then the interrelationships between four factors (water content, clay content, unconfined compression strength, split tensile strength) were analyzed. The test results were summarized as follows; as the water content was increased, the unconfined compressive and split tensile strengths also increased in frozen soil. However as the clay content was increased, the unconfined compressive and split tensile strengths were lowered. In the case of frozen soil that contained little clay content, the strength decreased rapidly in mixed soil (standard sand and kaolinite) when the frozen specimen was broken. On the other hand, in the cases of mixed soil that contained a high clay content and weathered granite soil, the strength decreased relatively slowly.

1. 서 론

과거부터 현재까지 인류는 생존과 번영을 위해 지구상의 자원을 끊임없이 이용해 왔고, 이제 많은 자원들은 고갈 상태에 있다. 이에 여러 나라들은 이제껏 이용할 수 없었던 풍부한 자원이 매장되어 있는 심해나 극한지로 눈길을 돌리기 시작했다. 우리나라의 경우 또한 자원이 부족한 나라임에 틀림없고 앞으로 우리가 이런 미개발지역을 개발해야 할 필요성도 증가하고 있다. 더군다나 최근 정부의 북방정책이 활발히 추진됨에 따라 시베리아 지역 등 동토지역이 현실적 과제로 대두되면서 건설업계에 상당한 관심을 모으고 있으며 따라서 향후 수년간 과거 중동에서와 같이 큰 규모의 건설 시장이 동토지역에 형성될 전망이다.

그러나 동토지역은 기상, 기후조건, 지반의 공학적 특성, 인문지리, 풍습 등 제반 건설 환경이 국내 또는 중동 지역과는 판이하게 다르다. 따라서 종래의 지반에 관한 기초지식을 그대로 동토에 적용한다는 것은 무리한 결과를 가져올 우려가

있기 때문에 국내 건설업체, 자원개발업체 등의 이 지역에 관한 기술 자료의 수집, 분석과 구조물 설계, 시공법에 관한 체계적이고 전문적인 연구가 요구된다. 이때 기본적으로 부딪히게 되는 문제점은 동토의 역학적 성질들이고, 이런 역학적인 성질은 하중이 가해진 속도, 온도, 함수비, 결정입자, 흙의 종류 등에 따라 민감하게 달라진다.

현재 국내외 동토에 관련된 연구현황을 보면 김영진(2003), 김영진 등(2002)은 동결토의 일축압축강도와 부동수분 초음파 속도와의 관계에 대해 연구하였으며, 류능환(1995)은 함수비, 염분농도, 입도배합 및 동결속도가 동결토의 압축강도에 미치는 영향을 연구한바 있다. 또한 김정현 등(2007)은 얼음 및 동토의 재료특성을 통하여 계측 실험기법의 표준화에 관하여 연구한바있다. 국외의 경우 동결 사질토의 삼축 실험(Re et al., 2003), 동토의 물리적인 고유특성을 위한 초음파 기술의 적용(Wang et al., 2005), 포장도로에서 동토의 기초와 지반점토의 파괴(Konrad and Cummings, 2001), 불포화된 동토의 침하를 완화하기 위한 다방면의 접근(Corapcioglu and Panday, 1995) 등 동토에 관련해서 여러 연구들이 진행되고 있다.

동토지역의 개발 사업으로는 석유, 천연가스, 석탄, 전략금 속, 산림자원 등의 사업이 예상되며 또한 운송도로 및 철도, 상하

교신저자 서영교: 부산광역시 영도구 동삼동 1번지

051-410-4846 YSEO@hhu.ac.kr



Fig. 1 Universal testing machine(UTM)

수도관매설과 파이프라인 공사, 주거시설 등의 부대시설 그리고 공항, 항만, 발전소 등 기간시설이 필수적으로 수반될 전망이다. 동토지역에서 해결해야할 현장문제들로는 지반 융해 시 기초지반의 지지력 감소, 결빙토의 융해에 따른 지반침하, 지반 결빙에 따른 지반융기, 결빙 융해 주기 반복에 따른 도로 파손, 지반결빙에 따른 지하매설물의 동파 문제, 천공, 시료채취, 등의 어려움이 있다. 그리고 함빙비가 큰 동결 기초지반의 장기적 변형 등 여러 가지들 들 수 있다(조천환 등, 1993). 동토의 기후조건 및 지반의 공학적 특성에 맞는 기초 구조물의 합리적인 설계, 시공에 있어서 앞의 현장문제들이 매우 큰 요소로 작용하기 때문에 이러한 문제들을 해결하기 위한 건설 기술의 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동결토의 일축압축강도와 쪼갬 인장강도 시험을 통해서 동결토의 여러 물리적인 특성을 파악해보고, 함수비와 점토함유량에 따라서 동결토의 압축강도와 인장강도의 특성이 어떻게 변화하는지 알아보았다.

2. 시험 장비

본 시험에 사용된 Cold Room은 4m×6m×2.6m 규격의 챔버형 시설로 내부온도를 -30℃까지 조절이 가능하며, 온도 및 습도가 자동으로 이루어진다. Cold room내 설치된 UTM (Universal testing machine; 경도정밀 제작, 시험 속도 0~200mm/min, 최대압축하중 20톤급)시험기는 저온에서 작동 가능하도록 특수 제작되었으며 인장, 압축, 굴곡, 항절 시험들을 할 수 있는 만능 재료시험기로서 종래의 지침식 시험기 (Analog) 및 숫자식 시험기(Digit type)에서 발전된 것으로 하중을 전자식 감응 장치인 Load cell로 감지하여 디지털 표시장치로 표시하게 되며, 정밀도 및 내구성 면에서 훨씬 발전된 시험기이다(Fig. 1). 또한 시험 중에는 시험 하중(Load)과 변형량(Elongation)의 관계를 Digital display panel 및 컴퓨터로 데이터를 계측함으로써 자료 분석이 용이하다.

3. 시료의 기본성질

본 연구에서 사용된 시료는 국내에 널리 분포하고 있는 화강풍화토와 주문진 표준사에 대표적인 점토인 카오리나이트를

Table 1 Properties of weathered granite soil

Type of soil		Clay soil
Initial water content (%)		28.34
Particle size distribution test (Percent passing %)	#4	92.3
	#10	72.6
	#40	23.4
	#200	5.6
Liquid, Plastic test		
LL (%)		43.4
PL (%)		29.78
Plasticity index (PI)		13.62
Proctor compaction test	r_{dmax} (t/m ³)	1.44
	w_{opt} (%)	27
Uniformity coefficient (C_u)		10.71
Coefficient of gradation (C_g)		1.71

Table 2 Properties of mixed standard sand and clay

Properties of soil		Clay content(Kaolinite)		
		10%	20%	30%
Particle size distribution test (Percent passing %)	#4	100	100	100
	#10	100	100	100
	#40	12.9	17.3	21.6
	#200	0.2	0.3	0.2
Proctor compaction test	r_{dmax} (t/m ³)	1.79	1.93	2.03
	w_{opt} (%)	13.2	12.0	10.8
Permeability (k, cm/sec)		4.17 × 10 ⁻²	8.25 × 10 ⁻³	1.40 × 10 ⁻³
Uniformity coefficient (C_u)		1.76	1.88	1.98
Coefficient of gradation(C_g)		1.22	1.24	1.23

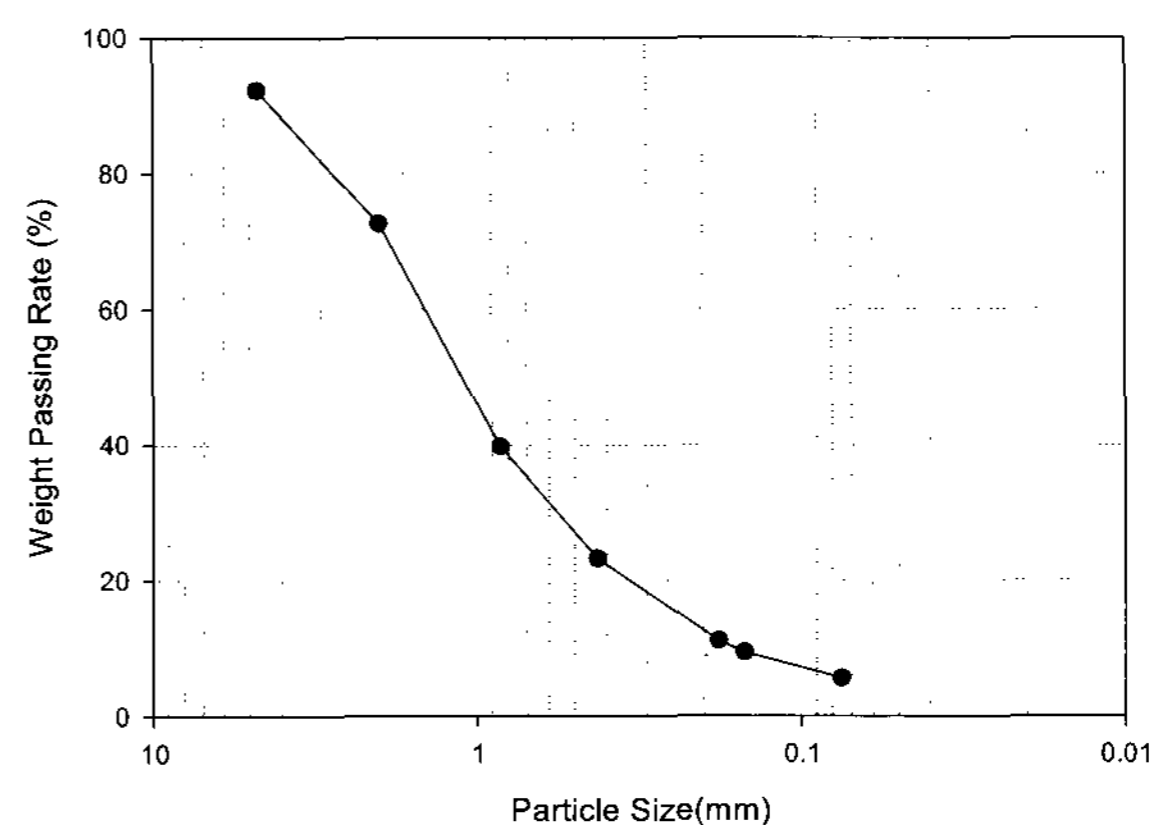


Fig. 2 Particle size distribution curve of weathered granite soil

중량비로 10%, 20%, 30% 비율로 섞어서 사용하였다. 화강풍화토와 표준사에 점토 비율이 섞인 시료의 기본 물성을 파악하기 위해 KSF 시험방법에 의한 체가름시험, 비중시험, 액 소성

시험, 다짐시험, 투수시험을 수행하였다. 본 실험에 사용된 화강풍화토와 표준사, 카오리나이트는 노 건조시킨 후 사용하였다. 기본 시료의 물리적 성질로 Table 1과 Table 2에 나타내고 있으며, Fig. 2는 화강풍화토 입도분포곡선을 나타내고 있다. 이결과를 바탕으로 통일분류법(USCS)에 의해 시료를 분류해보면 화강풍화토는 SP-SM으로 점성토성 화강풍화토로 볼 수 있고, 표준사에 점토 함유비 10%인 시료는 균등한 모래, 점토 함유비 30%인 시료는 세립질 모래로 생각할 수 있다.

4. 공시체 제작 및 시험 방법

본 연구에 사용된 시편은 직경 100mm, 길이 210mm로 주문 제작된 아크릴 통을 몰드로 사용하고, 밀도를 균질하게 하기 위해 2.5kg 래머로 3층, 25회 표준 다짐을 실시하여 제작하였다. 동결 화강풍화토 압축, 인장 시험에서 함수비에 따른 강도 특성을 알아보기 위해서 함수비를 20%, 25%, 30%, 35%, 40%로 변화시켜 공시체를 제작하였고, 사질토-점토 혼합토의 경우에는 점토(10%, 20%, 30%)와 함수비 비율(7%, 15%, 20%)에 각각 나누어서 공시체를 제작하였다. 시료는 일관된 결과 값을 얻기 위해서 표준사를 제외한 화강풍화토와 카오리나이트를 40번체로 걸러진 시료를 사용하였다. 다짐된 시편은 동결과정에서 발생할 수 있는 수분 손실을 고려하여 랩으로 윗부분을 마감하였다. 시편의 동결은 -15°C 의 Cold room에서 6일(144시간) 동안 동결시켰고, 동결온도와 동결시간에 따라 예민하게 달라질 수 있는 동토의 강도를 고려하여 모든 시편에 동일하게 적용시켰다.

6일간 동결시킨 시편은 시료를 추출하는데 동결과정에서 몰드와 시편 사이의 수분으로 인한 부착력이 크게 작용하기 때문에 다짐 시험 시 사용되는 유압식시료추출기를 사용하여 추출하였다. 추출된 시료는 동결과정에서 시료 안에 포함된 수분에 의해 체적 팽창 현상이 발생되어 시편의 위, 아래 부분이 울퉁불퉁한 상태로 된다. 일축압축 시험 시 위, 아래 부분이 고르지 않으면 편심이 발생되어 정확한 값을 알 수 없으므로 수평자와 절단기를 사용하여 트리밍을 실시하였다. 트리밍은 상온에서 작업할 수밖에 없는 실험실 환경으로 인해 시험하기 하루 전에 추출하여 트리밍을 시행하여 공시체를 Cold room에 24시간 동결시킨 후 시험을 실시하였다.

Cold room에서 동결되는 시편은 이론적으로 시편의 모든 부분이 균질하게 동결되었다고 가정은 하고 있지만 실질적으로 부동수분, 일관된 다짐, 함수비가 많은 시편의 경우 긴 동결시간에 의한 흙의 침전 현상 등으로 100% 균질하지 않기 때문에 추출된 시편은 실험의 일관성과 결과의 오차를 줄이기 위한 방법으로 동결시킬 때 위, 아래 방향을 표시하고 압축과 인장 시험을 실시하였다.

일축압축시험(Fig. 3)의 하중재하 시, 변형 속도는 공시체높이의 2%로 고정하여 4mm/min로 시험하였다. 시험시 Cold room의 온도는 -15°C 로 항상 일정하게 유지하였다. 공시체를 시험기에 설치 할 때는 시편이 정확히 상, 하 가압판의 중심에

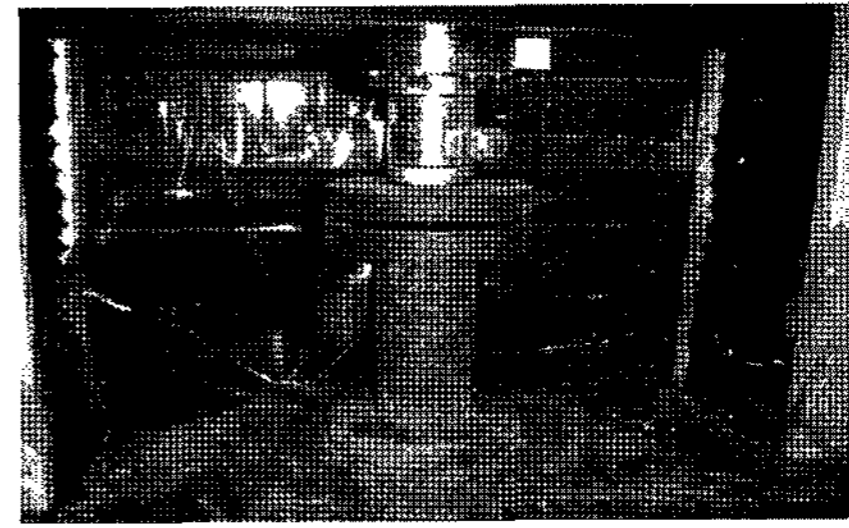


Fig. 3 Unconfined compression strength test of frozen specimen

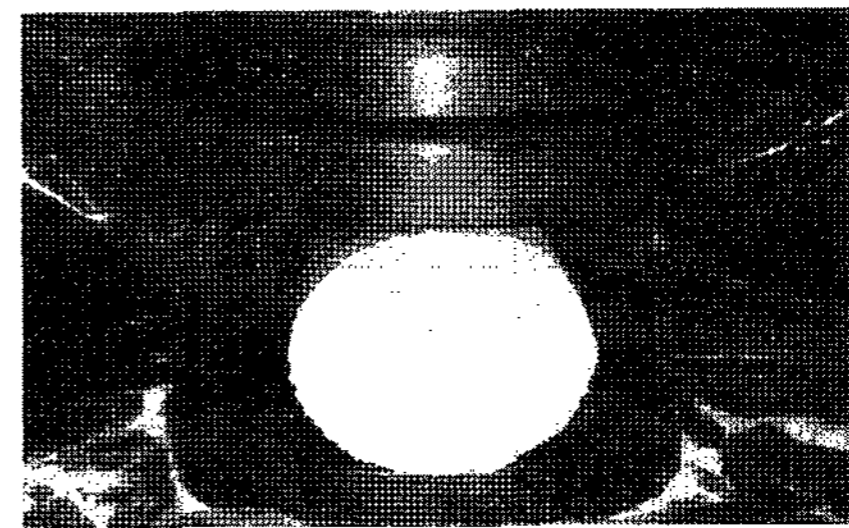


Fig. 4 Split tensile strength test of frozen specimen

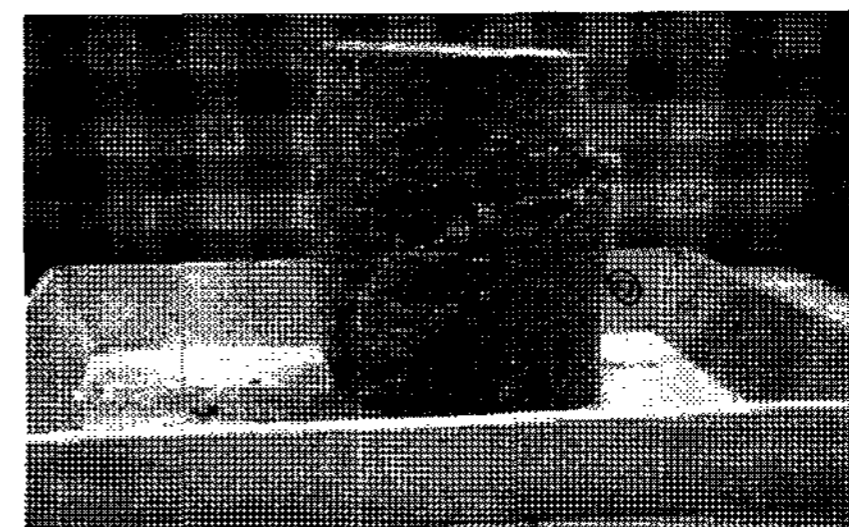


Fig. 5 Failure shape of unconfined compression strength test



Fig. 6 Failure shape of split tensile strength test

5. 시험 결과

위치 할 수 있도록 시료를 설치하였다. 동결사질혼합토와 화강풍화토 두 시료 모두 동일조건을 적용시켜 시험 하였다.

간접인장시험인 쪼갬 인장시험(Fig. 4)은 원주형 공시체에 대하여 연직 평면에 평행하게 작용하는 정적 압축하중을 가함으로써 간접적인 인장응력을 구하는 방식이다. 이 시험은 직접인장시험과는 달리 특별한 장치를 필요로 하지 않고, 간단히 인장강도를 측정할 수 있기 때문에 우리나라에서도 KS F 2423의

표준인장 시험방법으로 규정하고 있다. 하중재하 시 변형 속도는 1mm/min으로 고정하였으며, 동결사질혼합토와 화강풍화토에 동일하게 적용시켰다.

5.1 동결토의 응력-변형률 곡선

일축압축시험 결과의 응력-변형률 곡선(Fig. 8)을 보면, 동결사질혼합토의 경우 각각의 점토함유율 10%, 20%, 30%의 함수비 7%인 그래프를 제외하고는 Peak 값이 명확하게 나타나지 않는 것을 볼 수 있다. 각각의 함수비 7%인 동결공시체를 제외한 압축응력-변형률은 초기에 급하게 증가하다가 한계점에 이르면 거의 직선의 형태를 보이고 있다. 이러한 경향은 함수비가 커질수록 점토함유비가 많아질수록 더욱 두드러지게 나타나고 있다. 또한 동결화강풍화토의 일축압축시험결과의 응력-변형률 곡선(Fig. 10)에서도 동결사질혼합토의 형태와 비슷하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 함수비가 20%, 25%인 동결화강풍화토의 응력-변형률 곡선에서는 대체적으로 Peak값이 나타나고 있지만, 함수비가 30%이상일 경우에는 초기에 급격하게 증가하다가 한계점에 이르면 거의 직선거동을 하며, 점토함량이 많은 동결사질혼합토의 결과와 비슷한 거동을 하는 것을 볼 수 있다. 동결사질혼합토와 화강풍화토의 압축시험의 응력-변형률 곡선을 볼 때 시료에 포함된 함수비와 점토의 함량에 따라서 응력-변형률의 거동이 달라짐을 알 수 있다.

이러한 결과는 파괴형상에서도 찾아 볼 수 있다. 함수비와 점토의 함량이 적은 시료의 경우, 압축시험 후 대각선 형태로 파괴되는 양상을 볼 수 있지만(Fig. 5), 함수비와 점토의 함량이 많아질수록 공시체의 위, 아래 부분이 넓어지면서 찌그러지는 현상이 나타났음을 알 수 있었다. 이는 동결토가 함수비와 점토의 함량에 의해 공시체의 성질이 바뀐다는 것을 알 수 있었다.

인장시험의 응력-변형률 곡선인 Fig. 9와 Fig. 11을 살펴보면, 초기의 응력-변형률 곡선이 급하게 증가하는 압축시험과는 달리, 인장시험에서는 완만하게 곡선의 형태로 보이면서 Peak값이 보이지 않는 형태의 거동을 하는 것을 볼 수 있다. 압축시험에서는 함수비와 점토의 함유량이 증가할수록 응력-변형률의 형태가 달라지는 것을 두드러지게 볼 수 있었다. 인장시험에서도 압축시험에서와 같이 변화 되는 경향을 나타나고 있지만 압축시험 때만큼 두드러진 특징을 나타나지는 않는다.

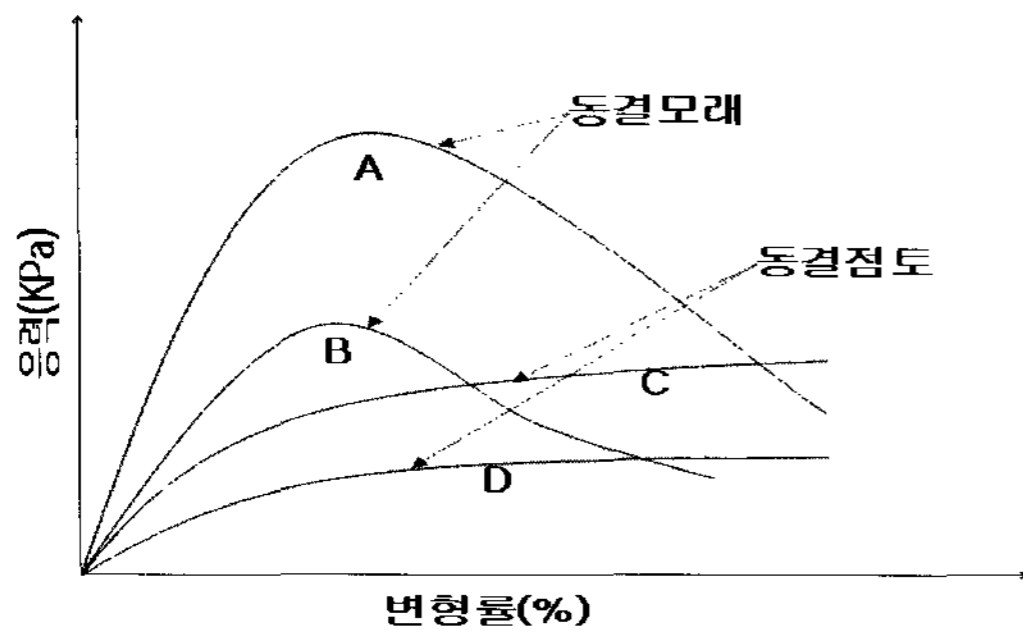


Fig. 7 Stress-strain curves of frozen soil result in type of soil and density (Takashi et al., 1980)

Takashi et al. (1980)은 동결토의 응력-변형률 곡선을 흙의 종류, 다짐상태, 함수비변화에 따라 Fig. 7과 같이 4가지 형태로 분류하였다.

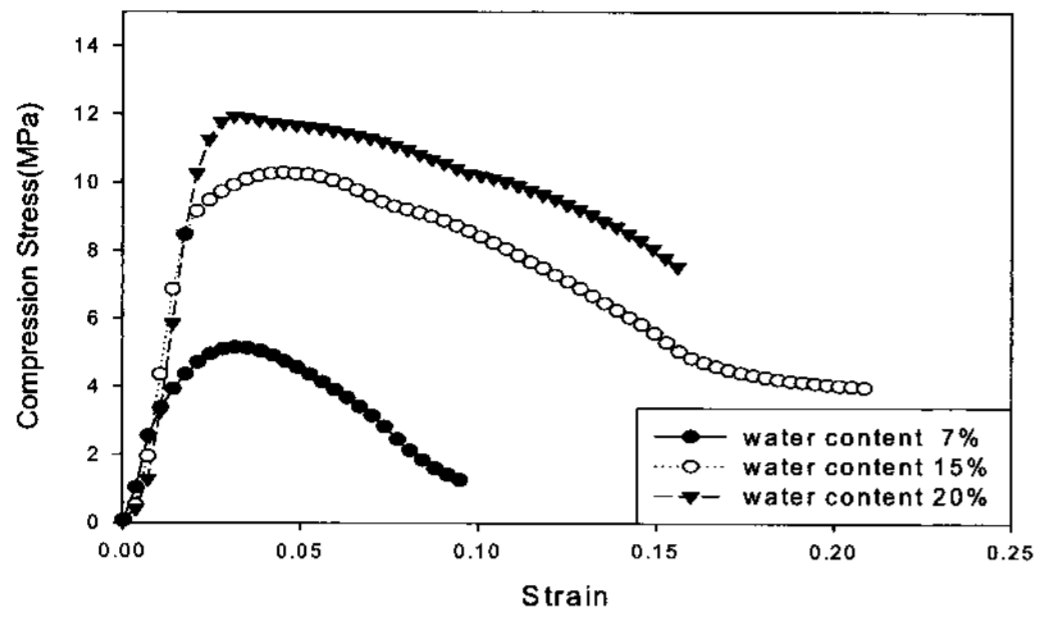
본 시험의 응력-변형률 곡선에서도 이와 같은 형태를 타나내고 있음을 알 수 있다. Fig. 8 와 Fig. 9의 사질혼합토의 점토함유율 10%인 압축과 인장응력-변형률 곡선을 보면 Fig. 7의 A, B와 비슷한 거동을 하고 있다. 그리고 점토함유율이 30%인 인장, 압축응력-변형률 곡선과 화강풍화토의 응력-변형률 곡선이 Fig. 2의 D, C와 같은 거동을 하고 있음을 알 수 있다. 점토함유량이 많을수록 D와 C의 곡선 형태로 변해 감을 알 수 있다.

5.2 압축과 인장강도 비교

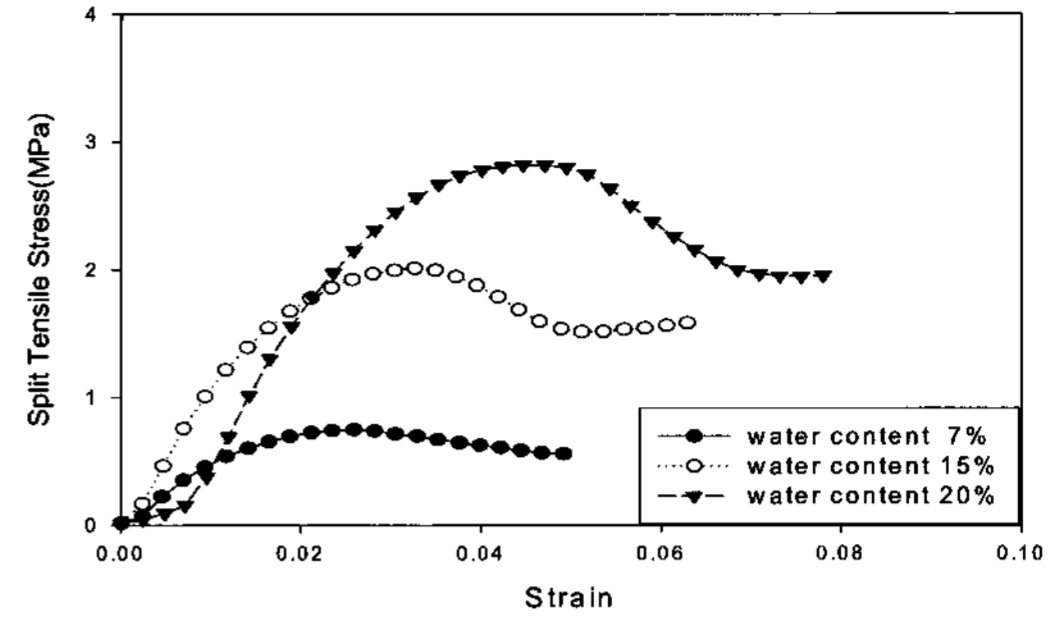
Table 3에 나타나듯이 동결토의 압축강도와 인장강도를 보면 동결사질혼합토의 경우 점토함유율에 따라 조금씩 다르지만, 압축강도는 3.66~12.21(MPa)의 강도 분포를 나타내고 있고, 인장강도는 0.64~2.8(MPa)의 강도 분포를 나타내고 있다. 동결화강풍화토의 경우, 압축강도는 0.45~5.36(MPa)을 나타내고 있으며, 인장강도는 0.14~1.96(MPa)의 분포를 나타내고 있다. 일반적으로 동토의 인장강도는 압축강도보다 약 1/2~1/6 정도로 보고 있다(조천환 등, 1993). 본 시험을 통해 동결사질혼합토의 인장강도는 압축강도의 약 1/4.5의 강도를 나타내고 있고, 동결화강풍화토의 인장강도는 압축강도의 약 1/3의 강도를 나타내고 있다. 이는 콘크리트의 인장과 압축강도비(1/9~1/13)와 비교해볼 때 비교적 큰 인장강도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Compression and tensile strength of frozen soil

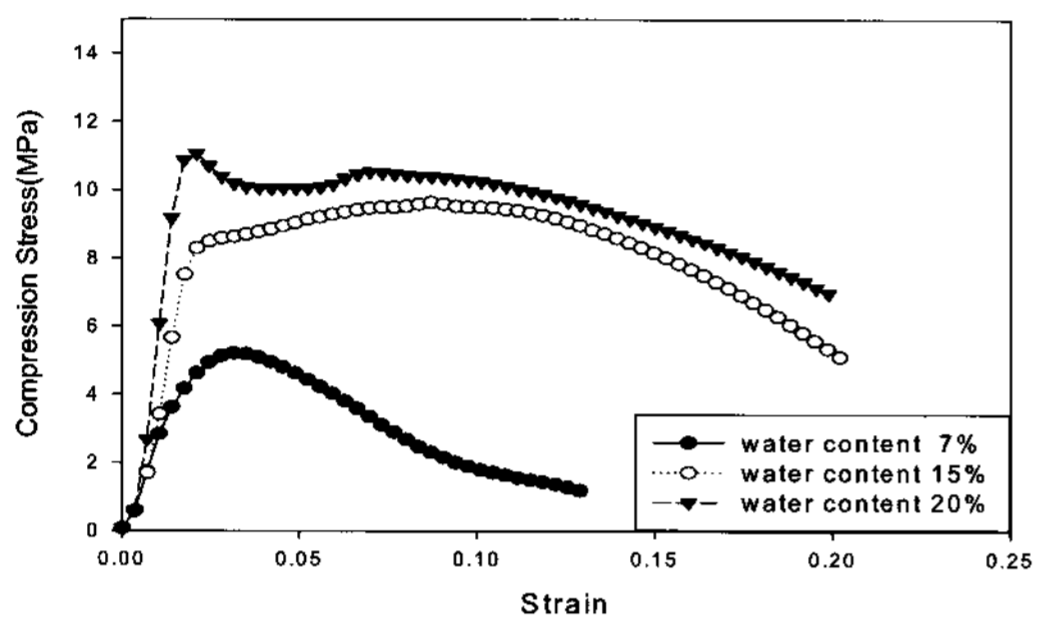
Type of soil	Water content (w, %)	Temperature (°C)	Compression strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Sand + Kaolinite (10%)	7	-15	4.9	0.78
	15	-15	9.86	2.00
	20	-15	12.21	2.80
Sand + Kaolinite (20%)	7	-15	5.69	1.02
	15	-15	10.16	2.53
	20	-15	10.98	2.77
Sand + Kaolinite (30%)	7	-15	3.66	0.64
	15	-15	9.25	2.37
	20	-15	10.08	2.53
Clay soil	20	-15	0.45	0.14
	25	-15	2.22	0.53
	30	-15	4.07	1.35
	35	-15	5.38	1.74
	40	-15	5.36	1.96



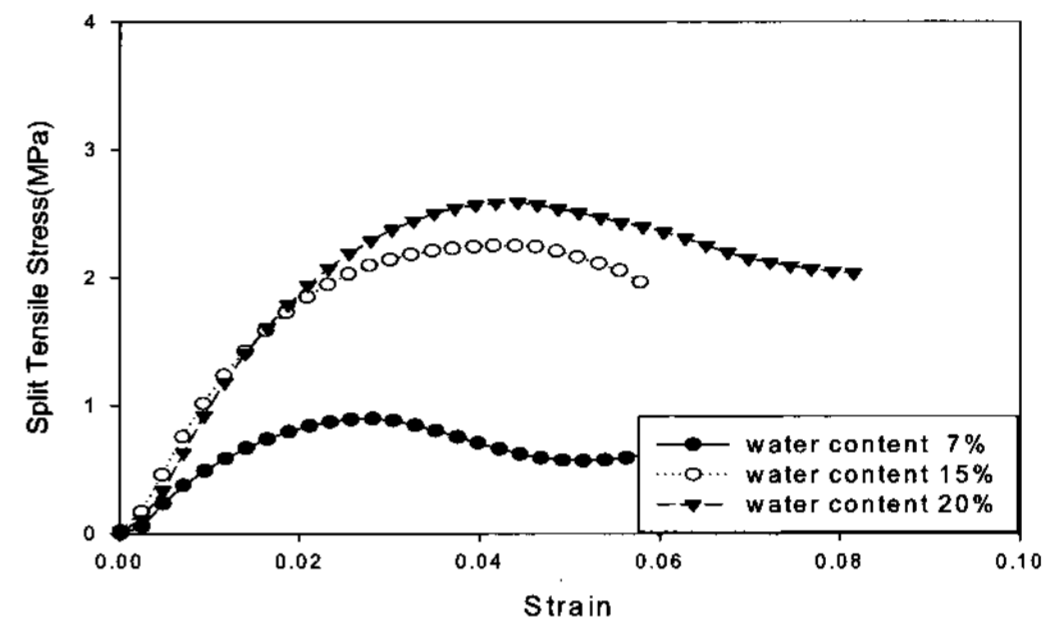
(a) Clay content 10%



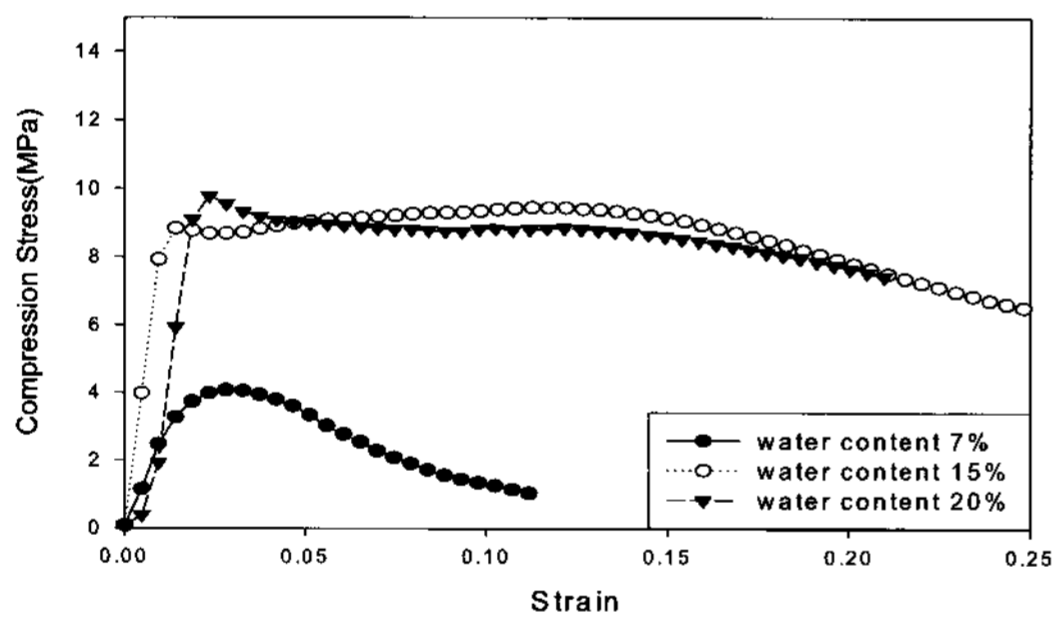
(a) Clay content 10%



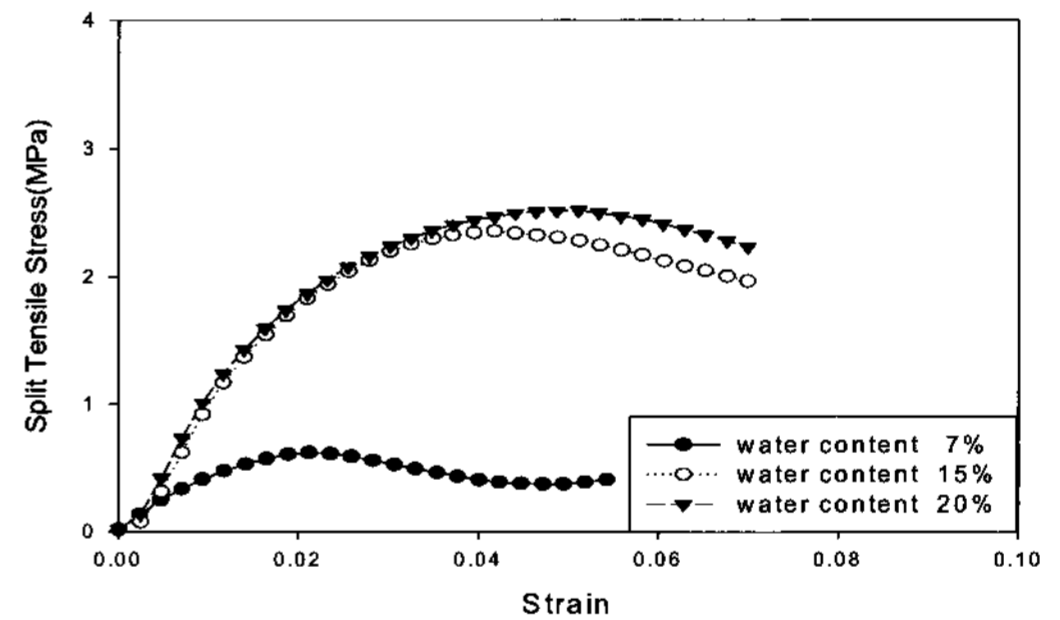
(b) Clay content 20%



(b) Clay content 20%



(c) Clay content 30%



(c) Clay content 30%

Fig. 8 Stress-strain curves of mixing a frozen soil result in unconfined compression strength test

Fig. 9 Stress-strain curves of mixing a frozen soil result in split tensile strength test

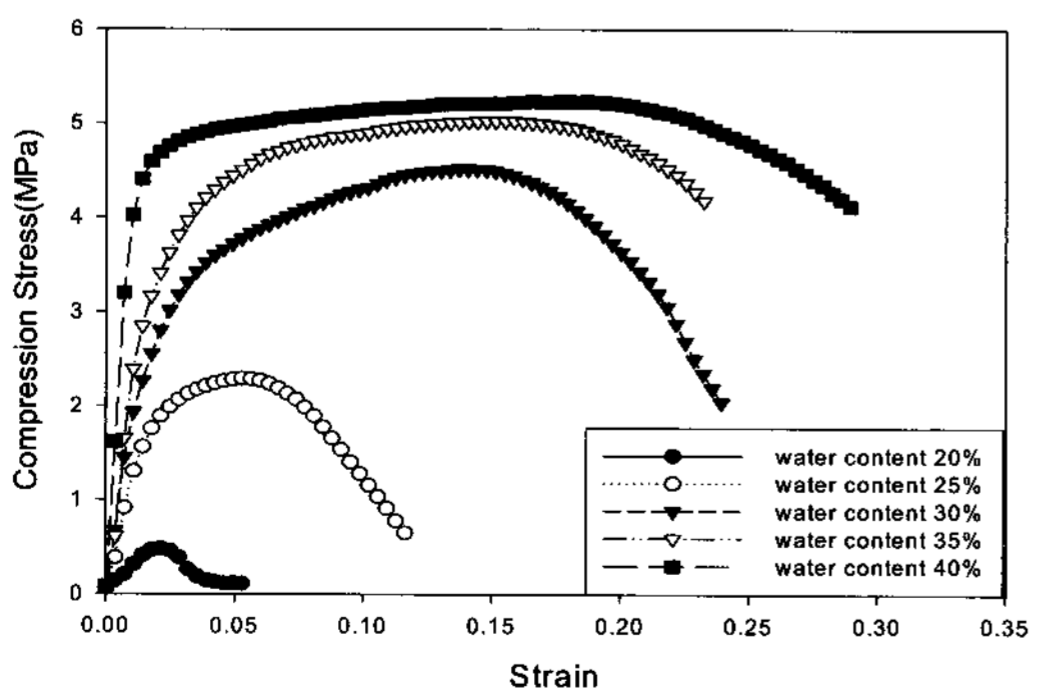


Fig. 10 Stress-strain curves of frozen granite soil result in unconfined compression strength test

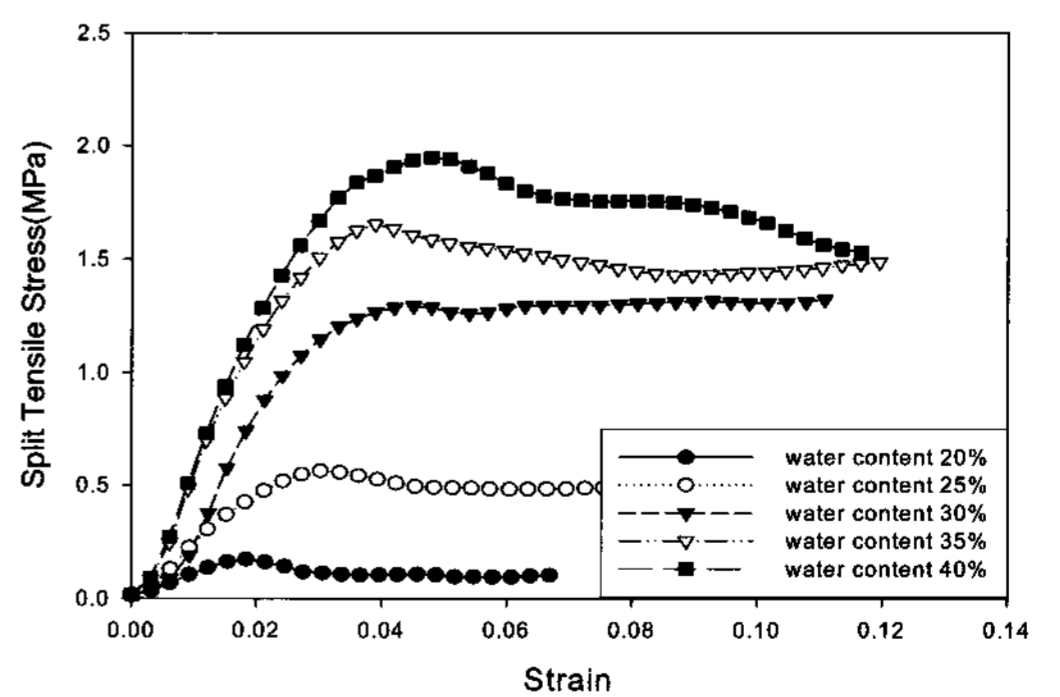


Fig. 11 Stress-strain curves of frozen granite soil result in split tensile strength test

5.3 함수비 변화에 따른 강도변화

동결사질혼합토의 일축압축과 인장시험 모두에서 함수비가 증가함에 따라 강도가 증가하는 추세를 보이고 있다. Fig. 12의 함수비에 따른 압축강도곡선과 Fig. 13의 함수비에 따른 인장강도 변화곡선을 보면, 압축과 인장강도 값이 차이가 나지만,

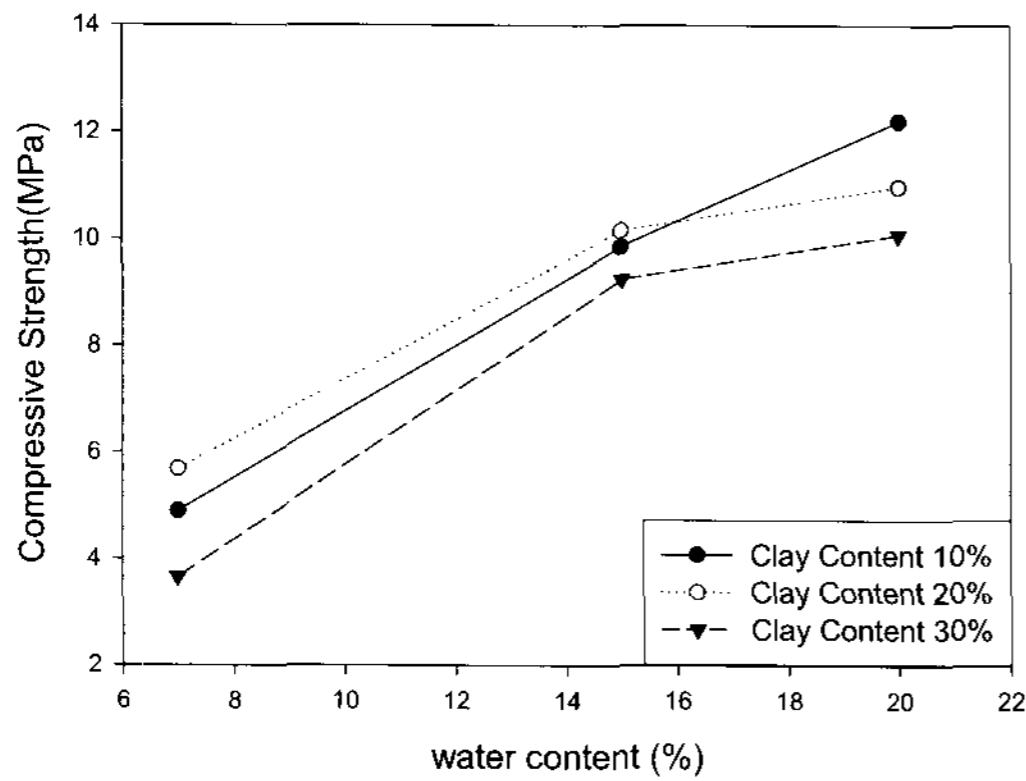


Fig. 12 Comparison of mixing frozen soil strength of water content determined by unconfined compression strength test

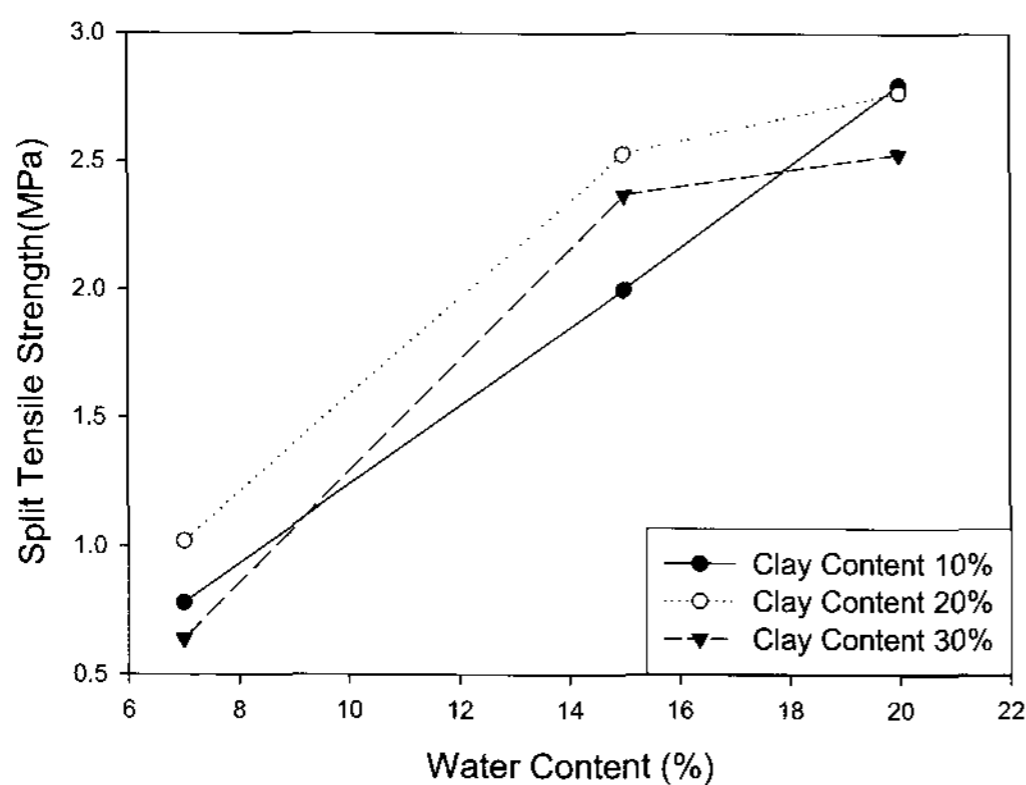


Fig. 13 Comparison of mixing frozen soil strength of water content determined by split tensile strength test

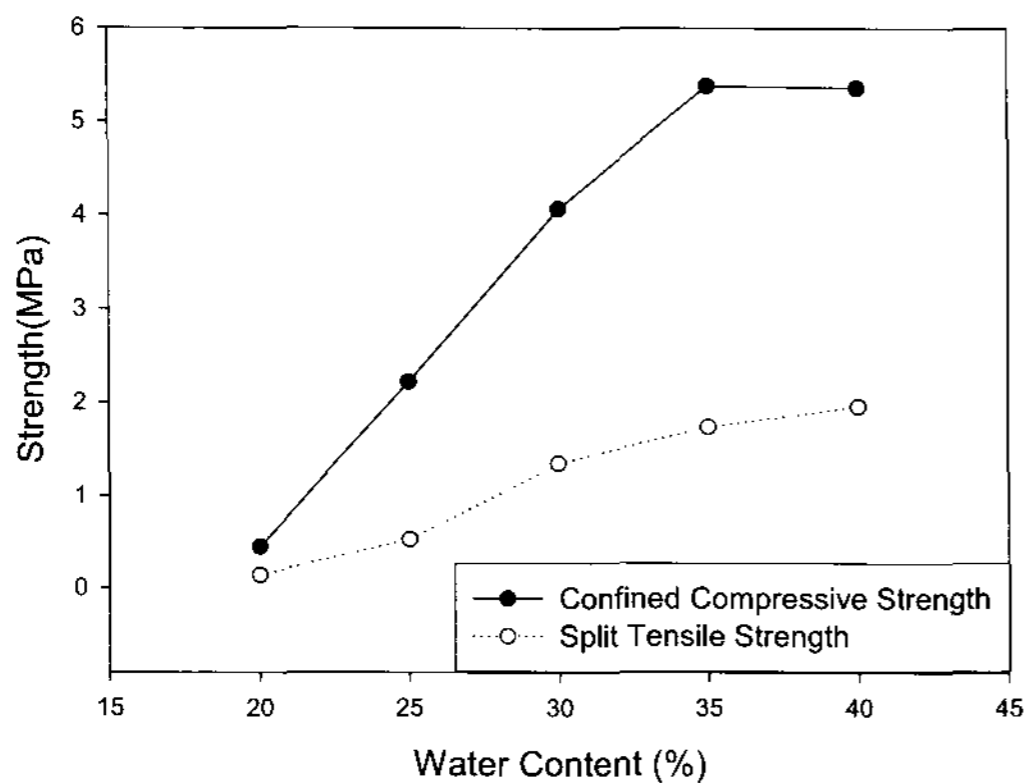


Fig. 14 Comparison of frozen granite soil strength of water content determined by unconfined compression and split tensile strength test

함수비에 따라 강도의 거동이 거의 비슷하게 나타나고 있다. 점토함유량이 적은 경우 함수비가 2배, 3배로 증가하면서 동결토의 압축강도 및 인장강도 또한 함수비의 증가량과 비슷한 추세로 증가하는 것을 볼 수 있다.

또한 함수비가 7%에서 15%로 증가할 때 함수비가 15%에서 20%로 증가할 때 보다 더 큰 강도증가를 보였다. 이를 보아 시료의 최적함수비 부근에서 강도 증가율이 크다는 것을 알 수 있다. 함수비에 따른 동결토의 일축압축강도는 포화상태까지는 함수비가 증가함에 따라 증가하고 포화이후부터는 함수비가 증가함에 따라 강도가 감소하는 경향을 보이는 것으로 알려져 있다(조천환 등, 1993).

동결화강풍화토의 일축압축과 쪼갬 인장시험에서 함수비에 따른 강도변화(Fig. 14)의 경우에도 사질혼합토의 경우와 유사한 거동 형태를 보이고 있으며, 함수비가 증가함에 따라 압축과 인장강도가 증가하는 경향을 보였다. 포화함수비 근처에 근접하게 되면 강도의 증가가 거의 없음을 보이고 있고, 화강풍화토의 최적함수비 27%근처에서는 강도 증가율이 압축, 인장 모두 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

5.4 점토함유량에 따른 특성

Fig. 15과 Fig. 16은 동결사질혼합토의 점토함유량에 대한 압축과 인장강도 변화 곡선을 나타내고 있다. 전체적으로 점토함

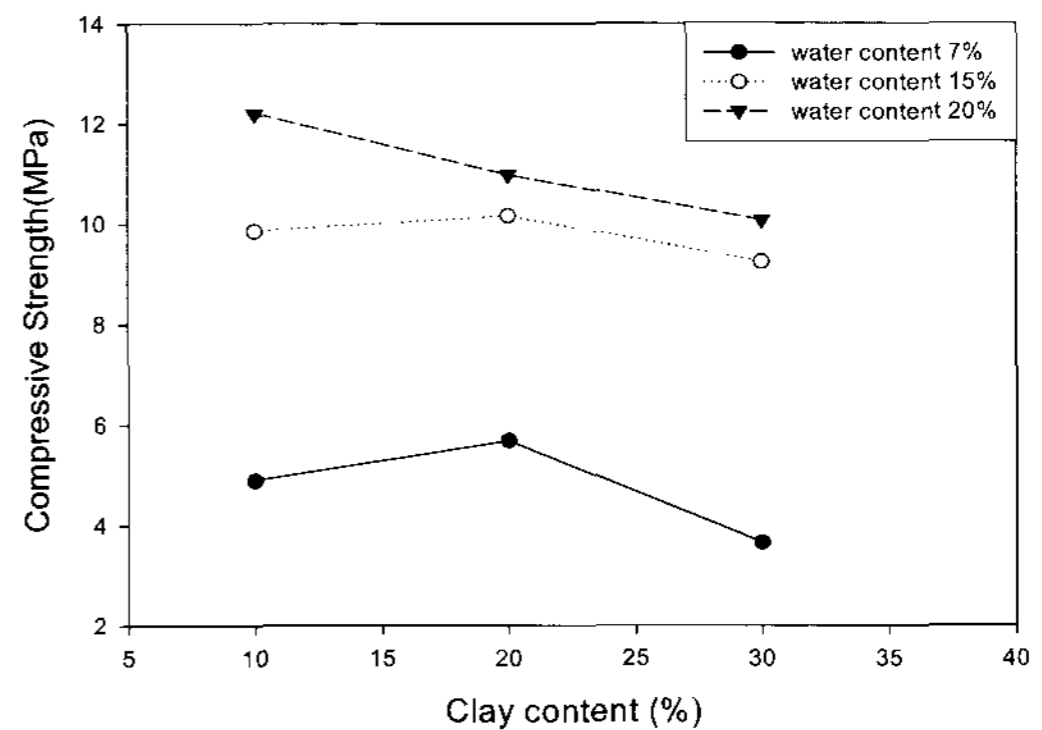


Fig. 15 Relationships of various water content between clay content and unconfined compression strength test

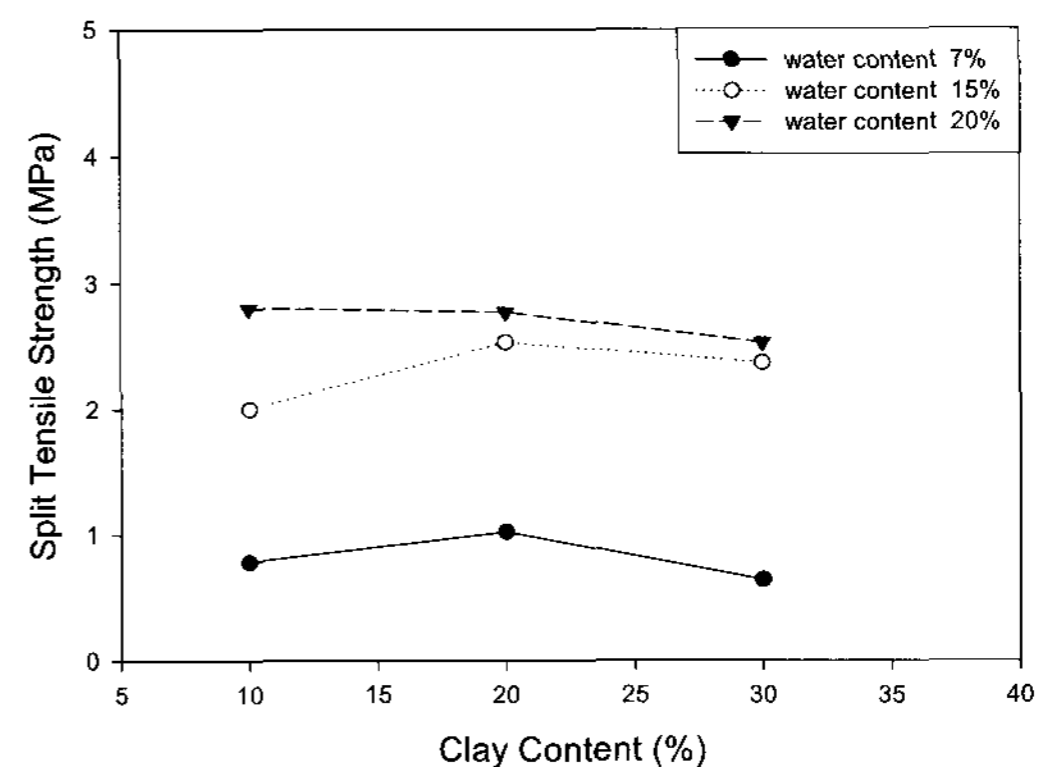


Fig. 16 Relationships of various water content between clay content and split tensile strength test

유비가 증가 할수록 압축과 인장강도가 작아지고 있음을 나타내고 있다. 흙이 동결할 경우 간극수의 대부분이 얼음으로 변하고, 흡착수의 일부가 부동수로 존재한다고 연구된바 있으며, 김영진(2003)의 초음파속도와 부동수분의 관계를 연구한 결과에서 화강토 보다 점성토에 더 많은 부동수분이 존재 하고 있음을 밝히고 있다. 이는 구성 흙 입자의 평균 입경이 작을수록 흙 입자 주위에 흡착되어 잔존하는 부동수분의 양이 많게 되는 것이 주원인이라고 설명하고 있다. 본 시험의 결과에서 나타나듯이, 압축과 인장시험에서 모두 함수비 15%, 20%시료의 점토함유비 10%~20% 구간에서는 강도가 미소하게 증가하는 경향을 보이고 있지만, 점토함유량이 30%에 근접할 때는 전체적으로 강도가 작아짐을 알 수 있다. 이는 모관장력에 의해 수분을 흡입하는 흡입력이 큰 점토 미립분의 함량이 많아지면서 모관장력이 커지고 이에 따라 동결토 내에 얼지 않은 상태로 존재하는 부동수분의 양이 증가하기 때문이라고 사료된다.

6. 결 론

미개발 지역인 극한지와 동토지역의 개발이 현실적인 과제로 대두되면서 건설업계의 상당한 관심을 모으고 있지만, 구조물 설계, 시공법 및 동토지역 지반에 대한 역학적 성질에 대한 체계적이고 전문적인 연구가 전무한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 극한지 개발의 시대적인 요구에 부응하여 동결토의 일반적인 물리적 성질을 정리하고, 압축과 인장 시험을 통해서 동결토 강도에 영향을 주는 변수들에 대한 강도특성을 파악하였다.

(1) 본 시험을 통해 인장강도가 압축강도에 비해 동결사질혼합토의 경우 약1/4.5, 동결화강풍화토의 경우 약1/3정도의 인장강도를 나타내고 있음을 알 수 있다.

(2) 동결토의 함수비함량이 증가할수록 압축강도와 인장강도가 모두 증가하다가 포화함수비 부근에서 가장 큰 강도를 나타내는 경향을 보였다.

(3) 포화함수비에 근접할수록 동결토의 압축강도와 인장강도의 증가율은 감소함을 알 수 있었고, 최적함수비 부근에서의 강도 증가율이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 다짐의 효과가 동결토의 강도에 영향을 미치고 있음을 보여주고 있으며, 시료가 포화되기 전까지의 수분은 동결토의 강도에 긍정적인 영향을 미치고 있음을 판단할 수 있다.

(4) 동결사질혼합토의 경우 점토 함유비가 증가할수록 압축강도와 인장강도 모두 감소하는 경향을 보였으며, 점토 함유비가 10% 일 때 보다는 30%일 때 더 작은 강도를 나타냈다. 이와 같은 결과는 모관장력에 의해 수분을 흡입하는 흡입력이 큰 점토 미립분의 함량이 많아지면서 모관장력이 커지고 이에 따라 동결토 내에 얼지 않은 상태로 존재하는 부동수분의 양이 증가하기 때문이라 판단된다.

(5) 점토성분이 적게 함유된 동결토의 경우에는 높은 응력

하에서 최대응력을 보이면서 동결토의 파괴가 발생한 후 하중이 급격히 떨어지는 형태를 보였고, 점토함유비가 높은 세립질 모래와 화강풍화토의 동결공시체의 경우에는 파괴가 발생한 후 응력 값이 떨어지는 속도가 아주 느리거나 떨어지는 속도가 아주 느리거나 떨어지지 않고 꾸준히 올라가는 형태를 보였다.

후 기

본 연구는 해양수산부 영남씨그랜트 대학사업단 지원금(YSG-RC0510)에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- 김영진 (2003). "동결토의 일축압축강도와 부동수분, 초음파 속도와 관계", 대한토목학회논문집, 제23권, 5-C호, pp 309-317.
- 김영진, 배정호, 송원근 (2002). "동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구", 대한토목학회논문집, 제2권, 3-C호, pp 207-217.
- 김정현, 최경식, 서영교 (2007). "Cold Room을 이용한 얼음 및 동토의 재료특성 계측 실험기법의 표준화", 한국해양공학회지, 제21권, 제2호, pp 60-66.
- 류능환 (1995), "동결토의 압축강도에 관한 실험적 연구(II)", 농업과학연구, Vol 6, No 0, pp 87-99.
- 조천환, 손준익, 이원제, 김학삼 (1993). 동결토의 특성과 동토 지역에서 말뚝기초연구, 한국건설기술연구원.
- 한국산업규격 KS F 2502, 체가름 시험 방법.
- 한국산업규격 KS F 2518, 석재의 흡수율 및 비중시험 방법.
- 한국산업규격 KS F 2303, 흙의 액성한계·소성한계 시험 방법.
- 한국산업규격 KS F 2312, 흙의 다짐 시험 방법.
- 한국산업규격 KS F 2322, 흙의 투수 시험 방법.
- 한국산업규격 KS F 2423, 쪼갬인장 강도 시험 방법.
- Corapcioglu, M.Y. and Panday, S. (1995). "Multiphase Approach to Thaw Subsidence of Unsaturated Frozen Soils: Equation Development", Journal of Engineering Mechanics, Vol 121, No 3, pp 448-459.
- Das, B.T. (1998). Principles of Geotechnical Engineering, Thomson Learning, pp 21-246.
- Konrad, J.M. and Cummings, J. (2001). "Fracture Toughness of Frozen Base and Subbase Soils in Pavement", Canadian Geotechnical Journal, Vol 38, No 5, pp 967-981.
- Re, G.D., Germaine, J.T. and Ladd, C.C. (2003). "Triaxial Testing of Frozen Sand: Equipment and Example

- Results", *Journal of Cold Regions Engineering*, Vol 17, No 3, pp 90-118.
- Takashi, T., Ohrai, T., Yamamoto, H. and Okamoto, J. (1980). "Experimental Study of Uniaxial Compressive Strength of Frozen Sand", *Journal of the Japan Society of Civil Engineers*, No 302, pp 79-89.
- Wang, D.Y., Zhu, Y.L., Ma, W. and Niu, Y.H. (2006). "Application of Ultrasonic Technology for Physical-Mechanical Properties of Frozen Soils", *Cold Regions Science and Technology*, 44, pp 12-19.
-

2007년 10월 4일 원고 접수

2008년 2월 18일 최종 수정본 채택