



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원 저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리와 책임은 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)



공학석사 학위논문

공시체 직경에 관한 동결토의
강도특성에 관한 연구

A Study of Different Size for Strength
Properties of Frozen Soil



2009년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

최문석

본 논문을 졸문석의 공학석사 학위논문으로 인준함.

위원장 : 공학박사 죄 경 식 (인)

위 원 : 공학박사 김 재 수 (인)

위 원 : 공학박사 서 영 교 (인)



2009년 2월

한국해양대학교 대학원

해양개발공학과

졸 문 석

A Study of Different Size for Strength Properties of Frozen Soil

by

Moon-Seok Choi

Department of Ocean Development Engineering
Graduate School of Korea Maritime University

ABSTRACT

Many countries are interested in polar and cold regions because of exhausted resources in their domestic regions. However physical and mechanical property of frozen soil have much difference with normal temperature soil. In this research, basic strength tests of the frozen soil are performed to evaluate the basic material property and strength characteristics.

This research performed the strength tests with various of the sample size, water contents and clay contents by using weathered granite soil and standard sand (Jumunjin sand) which are mixed with kaolinite. Test samples were firstly made with the standard proctor test in the normal temperature then freeze in cold room under -15°C for a week. Three kinds of strength test are performed in the cold room. Those are UCT (Unconfined Compression Test), STT (Split Tensile Test) and UPT (Unconfined Penetration Test).

In weathered granite soil sample case, strength increased as sample size decreased and water content reached fully saturated state. These results show in common with rock mechanics's strength behavior. However, strength increased as clay content and water content reached fully saturated state in mixed sand and clay sample cases. Water content and clay content have bigger effects than sample size in frozen soil.

목 차

ABSTRACT	i
목 차	ii
그 림 목 차	iv
표 목 차	vii
I. 서 론	1
1.1 연구배경 및 목적	1
1.2 지반동결 공법	2
1.2.1 프레온 방식	2
1.2.2 저온액화가스 방식	2
1.2.3 방식의 비교	2
II. 동결토 시험의 이론적 배경	4
2.1 일축압축시험	4
2.2 쪐캡인장시험	5
2.3 일축관입시험	7
III. 시험내용 및 방법	12
3.1 공시체에 사용된 시료의 물리적 성질	12
3.2 Cold Room 실험 장비	14
3.2.1 Cold Room 사양	14
3.2.2 UTM 만능재료 시험기	14
3.3 공시체 제작 및 추출 방법	15
3.4 일축압축시험의 원리	17
3.5 쪐캡인장시험의 원리	19
3.6 일축관입시험의 원리	20
IV. 시험 결과 및 분석	21
4.1 동결 화강풍화토 공시체의 일축압축시험 결과 분석	21
4.1.1 표준직경 공시체의 일축압축시험 결과	21
4.1.2 축소직경 공시체의 일축압축시험 결과	24
4.1.3 공시체 직경에 따른 일축압축강도 결과 비교	26
4.2 동결 화강풍화토 공시체의 쪐캡인장시험 결과 분석	27
4.2.1 표준직경 공시체의 쪐캡인장시험	27
4.2.2 축소직경 공시체의 쪐캡인장시험	28
4.2.3 공시체 직경에 따른 쪐캡인장강도 결과 비교	31

4.3 동결 화강풍화토 공시체의 일축관입시험 결과 분석	32
4.3.1 표준직경 공시체의 일축관입시험	32
4.3.2 축소직경 공시체의 일축관입시험	34
4.3.3 공시체 직경에 따른 일축관입시험 결과 비교	36
4.4 동결 사질흔합토 공시체의 일축압축시험 결과 분석	37
4.4.1 표준직경 공시체의 일축압축시험	37
4.4.2 축소직경 공시체의 일축압축시험	40
4.4.3 공시체 직경에 따른 일축압축강도 결과 비교	45
4.5 동결 사질흔합토 공시체의 쪼캠인장시험 결과 분석	46
4.5.1 표준직경 공시체의 쪼캠인장시험	46
4.5.2 축소직경 공시체의 쪼캠인장시험	50
4.5.3 공시체 직경에 따른 쪼캠인장강도 결과 비교	54
4.6 동결 사질흔합토 공시체의 일축관입시험 결과 분석	55
4.6.1 표준직경 공시체의 일축관입시험	55
4.6.2 축소직경 공시체의 일축관입시험	59
4.6.3 공시체 직경에 따른 일축관입인장강도 결과 비교	63
4.7 공시체의 직경에 대한 쪼캠인장시험과 일축관입시험의 비교	64
4.7.1 화강풍화토의 비교	64
4.7.2 사질흔합토의 비교	65
V. 결 론	66
참 고 문 헌	67

그 림 목 차

Fig. 2-1 Fig 2.1 일축압축시험 모식도.....	4
Fig. 2-2 쪼갬인장강도 시험법.....	5
Fig. 2-3 집중하중을 받는 원반.....	6
Fig. 2-4 Modified Mohr-Coulomb failure criterion.....	8
Fig. 2-5 Cross section and velocity relation of the UP test.....	9
Fig. 2-6 Comparisons of tensile strength of soil determined by double punch and split tensile tests.....	11
Fig. 2-7 Comparisons of tensile strength of various materials determine by double punch and split tensile tests.	11
Fig. 3-1 화강풍화토의 입도분포곡선	13
Fig. 3-2 유동곡선.....	13
Fig. 3-3 다짐곡선.....	14
Fig. 3-4 Universal Testing Machine.....	15
Fig. 3-5 공시체 추출 모습.....	17
Fig. 3-6 Cold Room에서의 동결 모습.....	17
Fig. 3-7 일축압축시험.....	18
Fig. 3-8 일축압축시험 후 파괴된 공시체.....	18
Fig. 3-9 동결 화강풍화토의 쪼갬 인장 시험.....	19
Fig. 3-10 일축관입시험 장비.....	20
Fig. 4-1 표준직경 공시체의 일축압축시험 1차 결과.....	22
Fig. 4-2 표준직경 공시체의 일축압축시험 2차 결과.....	22
Fig. 4-3 표준직경 공시체의 일축압축시험 3차 결과.....	23
Fig. 4-4 표준직경 공시체의 최대 일축압축강도.....	23
Fig. 4-5 축소직경 공시체의 일축압축시험 1차 결과.....	24
Fig. 4-6 축소직경 공시체의 일축압축시험 2차 결과.....	24
Fig. 4-7 축소직경 공시체의 일축압축시험 3차 결과.....	25
Fig. 4-8 축소직경 공시체의 최대 일축압축강도.....	25
Fig. 4-9 직경 변화에 따른 최대 일축압축강도 변화 곡선.....	26
Fig. 4-10 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 1차 결과.....	27
Fig. 4-11 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 2차 결과	27
Fig. 4-12 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 3차 결과.....	28
Fig. 4-13 표준직경 공시체의 최대 쪼갬인장강도.....	28
Fig. 4-14 축소직경 공시체의 쪼갬인장시험 1차 결과.....	29
Fig. 4-15 축소직경 공시체의 쪼갬인장시험 2차 결과.....	29
Fig. 4-16 축소직경 공시체의 쪼갬인장시험 3차 결과.....	30
Fig. 4-17 축소직경 공시체의 최대 쪼갬인장강도.....	30

Fig. 4-18 직경 변화에 따른 최대 쪽챔인장강도 변화 곡선.....	31
Fig. 4-19 표준직경 공시체의 일축관입시험 1차 결과.....	32
Fig. 4-20 표준직경 공시체의 일축관입시험 2차 결과.....	32
Fig. 4-21 표준직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과.....	33
Fig. 4-22 표준직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과.....	33
Fig. 4-23 축소직경 공시체의 일축관입시험 1차 결과.....	34
Fig. 4-24 축소직경 공시체의 일축관입시험 2차 결과.....	34
Fig. 4-25 축소직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과.....	35
Fig. 4-26 축소직경 공시체의 최대 일축관입인장강도.....	35
Fig. 4-27 직경 변화에 따른 최대 일축관입인장강도 변화 곡선.....	36
Fig. 4-28 kaolinite 10%의 일축압축시험 1차 결과.....	37
Fig. 4-29 kaolinite 20%의 일축압축시험 1차 결과.....	37
Fig. 4-30 kaolinite 30%의 일축압축시험 1차 결과.....	37
Fig. 4-31 kaolinite 10%의 일축압축시험 2차 결과.....	38
Fig. 4-32 kaolinite 20%의 일축압축시험 2차 결과.....	38
Fig. 4-33 kaolinite 30%의 일축압축시험 2차 결과.....	38
Fig. 4-34 kaolinite 10%의 일축압축시험 3차 결과.....	39
Fig. 4-35 kaolinite 20%의 일축압축시험 3차 결과.....	39
Fig. 4-36 kaolinite 30%의 일축압축시험 3차 결과.....	39
Fig. 4-37 표준직경 공시체의 최대 일축압축강도.....	40
Fig. 4-38 kaolinite 10%의 일축압축시험 1차 결과.....	41
Fig. 4-39 kaolinite 20%의 일축압축시험 1차 결과	41
Fig. 4-40 kaolinite 30%의 일축압축시험 1차 결과.....	41
Fig. 4-41 kaolinite 10%의 일축압축시험 2차 결과.....	42
Fig. 4-42 kaolinite 20%의 일축압축시험 2차 결과.....	42
Fig. 4-43 kaolinite 30%의 일축압축시험 2차 결과.....	42
Fig. 4-44 kaolinite 10%의 일축압축시험 3차 결과.....	43
Fig. 4-45 kaolinite 20%의 일축압축시험 3차 결과.....	43
Fig. 4-46 kaolinite 30%의 일축압축시험 3차 결과.....	43
Fig. 4-47 축소직경 공시체의 최대 일축압축강도.....	44
Fig. 4-48 직경 변화에 따른 최대 일축압축강도 변화 곡선.....	45
Fig. 4-49 kaolinite 10%의 쪽챔인장시험 1차 결과.....	46
Fig. 4-50 kaolinite 20%의 쪽챔인장시험 1차 결과.....	46
Fig. 4-51 kaolinite 30%의 쪽챔인장시험 1차 결과.....	46
Fig. 4-52 kaolinite 10%의 쪽챔인장시험 2차 결과.....	47
Fig. 4-53 kaolinite 20%의 쪽챔인장시험 2차 결과.....	47
Fig. 4-54 kaolinite 30%의 쪽챔인장시험 2차 결과.....	47
Fig. 4-55 kaolinite 10%의 쪽챔인장시험 3차 결과.....	48
Fig. 4-56 kaolinite 20%의 쪽챔인장시험 3차 결과.....	48

Fig. 4-57 kaolinite 30%의 쪐챔인장시험 3차 결과.....	48
Fig. 4-58 표준직경 공시체의 최대 쪐챔인장강도.....	49
Fig. 4-59 kaolinite 10%의 쪐챔인장시험 1차 결과.....	50
Fig. 4-60 kaolinite 20%의 쪐챔인장시험 1차 결과.....	50
Fig. 4-61 kaolinite 30%의 쪐챔인장시험 1차 결과.....	50
Fig. 4-62 kaolinite 10%의 쪐챔인장시험 2차 결과.....	51
Fig. 4-63 kaolinite 20%의 쪐챔인장시험 2차 결과.....	51
Fig. 4-64 kaolinite 30%의 쪐챔인장시험 2차 결과.....	51
Fig. 4-65 kaolinite 10%의 쪐챔인장시험 3차 결과.....	52
Fig. 4-66 kaolinite 20%의 쪐챔인장시험 3차 결과	52
Fig. 4-67 kaolinite 30%의 쪐챔인장시험 3차 결과.....	52
Fig. 4-68 축소직경 공시체의 최대 쪐챔인장강도.....	53
Fig. 4-69 직경 변화에 따른 최대 쪐챔인장강도 변화 곡선.....	54
Fig. 4-70 kaolinite 10%의 일축관입시험 1차 결과.....	55
Fig. 4-71 kaolinite 20%의 일축관입시험 1차 결과.....	55
Fig. 4-72 kaolinite 30%의 일축관입시험 1차 결과.....	55
Fig. 4-73 kaolinite 10%의 일축관입시험 2차 결과.....	56
Fig. 4-74 kaolinite 20%의 일축관입시험 2차 결과.....	56
Fig. 4-75 kaolinite 30%의 일축관입시험 2차 결과.....	56
Fig. 4-76 kaolinite 10%의 일축관입시험 3차 결과.....	57
Fig. 4-77 kaolinite 20%의 일축관입시험 3차 결과.....	57
Fig. 4-78 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과.....	57
Fig. 4-79 표준직경 공시체의 최대 일축관입인장강도.....	58
Fig. 4-80 kaolinite 10%의 일축관입시험 1차 결과.....	59
Fig. 4-81 kaolinite 20%의 일축관입시험 1차 결과.....	59
Fig. 4-82 kaolinite 30%의 일축관입시험 1차 결과.....	59
Fig. 4-83 kaolinite 10%의 일축관입시험 2차 결과.....	60
Fig. 4-84 kaolinite 20%의 일축관입시험 2차 결과.....	60
Fig. 4-85 kaolinite 30%의 일축관입시험 2차 결과.....	60
Fig. 4-86 kaolinite 10%의 일축관입시험 3차 결과.....	61
Fig. 4-87 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과.....	61
Fig. 4-88 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과.....	61
Fig. 4-89 축소직경 공시체의 최대 일축관입인장강도.....	62
Fig. 4-90 직경 변화에 따른 최대 일축관입인장강도 변화 곡선.....	63
Fig. 4-91 화강풍화토의 직경별 인장강도의 비교.....	64
Fig. 4-92 사질흔합토의 직경별 인장강도의 비교.....	65

표 목 차

I. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

현재까지 많은 양의 자원으로 인류는 발전해왔고 이제 그 자원이 고갈되어 가는 위기에 놓여 있다. 이에 세계 각국은 이제껏 개발이 되지 않은 극한지나 극지, 삼해 등 많은 자원이 매장되어 있는 곳으로 관심을 돌리고 있다.

러시아는 확인매장량 기준으로 천연 가스 세계 1위, 석유 세계 7위의 자원 부국으로서 현 정권이 들어선 이후 국가 에너지 전략 2020을 수립 시계 에너지 시장에서의 위상 확대 정책을 추진하고 있으며 그 일환으로 시베리아 유전 및 가스 개발을 가속화 하고 있다. 이에 따라 미국은 러시아와 지속적인 에너지 개발을 위한 원조로 안정적인 자원 확보에 노력을 기울이고 있다. 이런 국제 정세에 편승에 우리나라도 북방정책을 내세워 시베리아 지역 등의 동토지역으로 현실적 과제가 대두되면서 관련업계에 많은 관심을 보이고 있다.(김영진 2006) 하지만 이러한 영구 동토지역의 지반을 개발하기에는 현재 우리가 가지고 있는 정보나 기술력이 많이 부족한 현실이다. 또한 현재 동토에 관련되어 많은 사업을 구상하고 있고, 이러한 것을 성공적으로 수행하기 위한 연구들은 시베리아나 남극대륙 진출을 위해 꼭 필요한 연구들이다. 여기에 관련된 동토 관련 건설기술은 국내 건설현장에서도 적용할 수 있음은 물론이고, 나아가서 동토 개발의 선두에 서기 위한 우리나라의 또 하나의 브랜드가 될 수 있을 것이라 생각한다.

그러나 동토지역은 기상, 기후조건, 지반의 공학적 특성, 인무지리, 풍습 등 제반 건설 환경이 국내 또는 현재 진출해 있는 다른 지역과는 판이하게 다르다, 따라서 종래의 지반에 관한 기초지식을 그대로 동토에 적용한다는 것은 무리한 결과를 가져올 우려가 있고, 따라서 이 지역에 관한 보다 체계적이고 전문적인 연구가 요구된다. 우리나라로 계절 기 동토지경에 속하는 나라이지만, 현실적으로 절실한 요구가 없었기 때문에 이 분야의 연구가 미약 한다. 특히 건설기술은 무엇보다도 그 지반을 구성하고 있는 물질의 특성을 파악이 무엇보다 절실하고 전문기술이 요구된다. 동토 현장에서 기본적으로 부딪히게 되는 문제점은 동토의 기본적인 역학적인 성질일 것이다. 이러한 역학적인 성질을 파악하기 위해 우선적으로 동토의 기본적인 강도 특성을 파악하는 것이 무엇보다 중요하다.

이에 본 연구는 과거 선행되었던 연구를 바탕으로 보다 다양한 시험을 통해 동토의 강도에 영향을 주는 여러 가지 요인들에 대한 강도 특성을 결정하고 파악하는데 그 목적이 있다.

1.2 지반동결공법 (ground freezing method)

인공적으로 지반을 동결하여 토목공사의 보조공법으로 이용하는 방법은 1862년 영국과 독일에서 시공되었다는 보고가 있다. 이들은 냉동기를 이용하여 광산용 입구의 연약부분을 동결한 것으로 그 후 1930년대에서는 유럽, 미국, 소련 등에서 채광용 입구 이외의 상하수도, 지하철, 철도의 입체교차, 수문, 지하탱크 등의 건설공사에서 채용되어 급속히 보급되었다.

제 2차 대전 후 냉동기기, 계측기기 등 규모가 크고 나쁜 조건하에서도 충분히 신뢰할 수 있는 냉동기기가 제작되어 본 공법을 안전하고 확실한 공법이라고 생각하게 되었다. 또한 최근 20년 사이에 최적냉각 온도 설정, 지반 동결속도의 해석, 지하수 흐름이 동결에 미치는 영향, 동결에 따른 동상(동결팽창), 해동 후 침하 등의 문제점에 대한 연구가 진행되고 있으며, 이러한 연구결과들은 설계 시공 상의 유의점과 지반동결공법 채택의 판단기준이 되고 있다. 요즘 건설공사에 따른 공해문제가 표면화됨에 따라 본 공법이 무공해 공법으로 인식되어 현재는 약 250건의 시공실적이 있다. 본 공법의 원리는 지중에 일정간격(약 0.8m)으로 동결 관을 매설하고 관속으로 냉각액(프레온 또는 저온 액화가스)을 흘려보내면 시간이 경과함에 따라 동결 관을 중심으로 간극수가 점차 링 모양으로 얼게 되며 그로인해 인근의 흙이 상호결합체로 되어 동토 벽을 형성한다. 동결 관을 냉각하는 방법으로는 프레온 방식과 저온 액화가스 방식으로 분류되며 그 방법은 아래와 같다.



1.2.1 프레온 방식

이는 표준적인 증기 압축식 냉동사이클로 냉장냉동고에 상용되고 있으며, 프레온 (CaCl_2 수용액)을 냉동기로 $-20 \sim -30^{\circ}\text{C}$ 로 냉각하여 순환펌프로 동결 관으로 보재 지반을 냉각한다. 온도가 상승되어 되돌아 온 프레온은 다시 냉각기로 냉각하는 순환방식이다.

1.2.2 저온액화가스 방식

이 방식은 액체 질소를 제조공장에서 탱크트럭으로 운반하여 동결 관에 넣고 그 안에서 기화(증발온도 -196°C)시켜 냉각한다. 이 방식에서 기화한 가스는 대기 중으로 방출한다.

1.2.3 방식의 비교

저온액화가스방식은 프레온 방식에 비하여 냉각속도가 빠르고 약간의 지하수 흐름이 있어

도 동결이 가능하며, 설비도 간단하나 공사비가 많다는 결점이 있다. 조성할 동토 량이 200m³이하이고 유지기간이 1주일 정도로 단기 소규모 공사에 적합하다. 프레온 방식은 공사 규모가 크고 굴착 구축기간을 포함하여 유지기간이 긴 경우에 다방면으로 많이 채용되고 있으며 설비규모가 크고 동토조성 시간이 긴 결점이 있다.



II. 동결토 시험의 이론적 배경

2.1 일축압축시험 (Unconfined Compression Test)

동토의 압축강도는 동토의 가장 기본적인 공학적 성질로 이미 여러 연구자들에 의해 연구된 바 있다. (Thytovich. N. A. 1975, K. K. Pekarakaya. 1966) 그리고 이들 연구에 의해 동결토의 강도는 온도와 시간의 함수임이 밝혀졌다. 흙의 강도는 점착력과 흙-얼음 구조의 마찰력에 의존한다고 알려져 있다. 빙빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 적을 때)의 강도는 입자 상호간의 마찰력에 의해 좌우되고, 부빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 클 때)의 강도는 흙-얼음구조의 점착력에 의해 좌우된다.(조천환 1993) 또한 동토의 압축강도와 변형특성은 흙의 온도, 얼음의 함량, 변형속도에 의존하게 되는데 변형속가 증가하거나 온도가 감소하게 되면 강도는 강해지게 된다. (김영진 2003)

$$\sigma_c = \frac{4P}{\pi D^2} \quad (2-1)$$

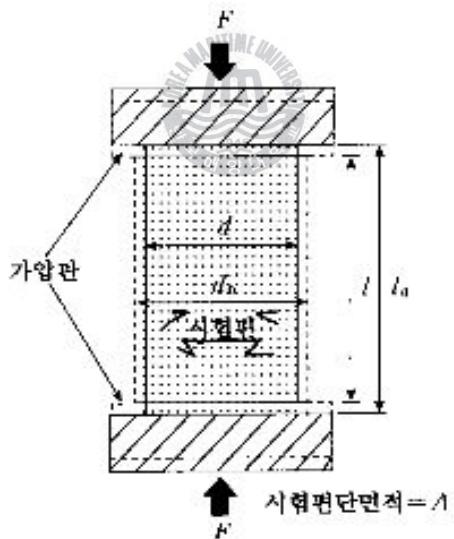


Fig. 2-1 일축압축시험 모식도

여기서, σ_c : 압축강도 (MPa)

P : 시험기가 내는 최대하중 (N)

D : 공시체의 지름 (mm)

본 논문에서는 이러한 물리적 이론을 바탕으로 Fig. 2-1의 방법으로 화강풍화토와 사질혼합토를 동결시킨 후 시험을 수행하였으며, 하중 재하 시, 가압 속도는 공시체 높이의

2%(100mm*200mm, 4mm/min : 73.8mm*150mm, 3mm/min)로 고정하였고 시험 시 Cold Room의 온도는 -15°C로 일정하게 유지하였다. UTM(Universal Testing Machine)기에서의 최대 측정 하중을 식(2-1)에 대입하여, 단면적으로 나눈 뒤의 결과 값을 동결 공시체의 압축강도라 생각하였다.

2.2 쪼慨인장시험 (간접인장시험 : Spilt Tensile Test)

인장강도의 시험법 중에는 직접인장 시험방법과 쪼慨인장(간접인장) 시험방법이 있다. 쪼慨인장 시험방법은 직접인장 시험방법과는 다르게 특별한 시험장치를 필요로 하지 않고, 간단히 인장강도를 측정할 수 있기 때문에 우리나라의 KS F 2423에서 규정한 표준인장 시험으로 정해져 있는 방법을 토대로 시험을 수행하였다. 이는 쪼慨인장의 경우 원주형 공시체의 연직 평면에 수직으로 하중을 가하는 일축압축시험과는 다르게 연직 평면에 평행하게 하중을 가함으로서 파괴가 일어나고 이때의 하중 값을 가지고 인장응력을 측정하는 방법이다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi d l} \quad (2-2)$$

여기서, σ_t : 인장강도 (MPa)

P : 시험기에서 측정된 최대 하중 (N)

d : 공시체의 지름 (mm)

l : 공시체의 길이 (mm)

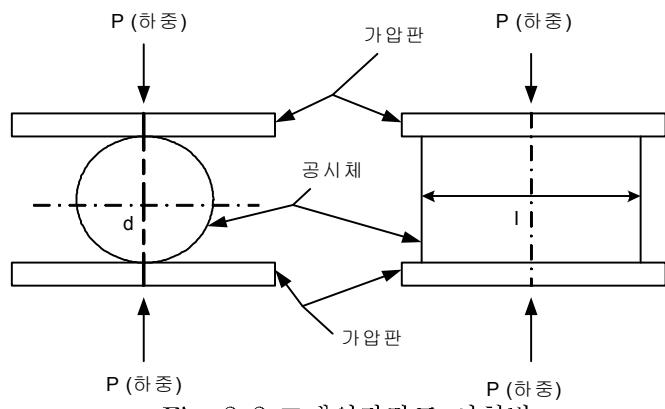


Fig. 2-2 쪼慨인장강도 시험법

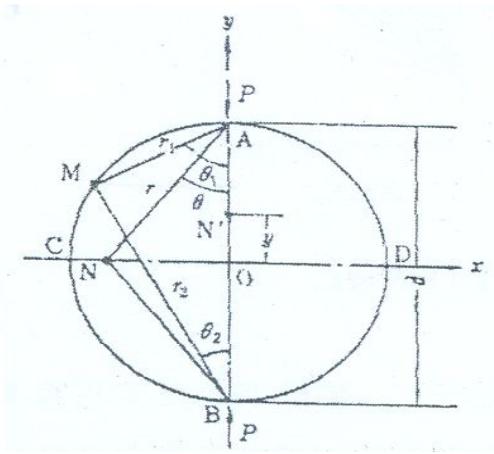


Fig. 2-3 집중하중을 받는 원반

위 Fig. 2-2에서 AB방향에 1쌍의 집중하중 P 를 받는 경우를 생각한다. 양 하중 모두 단순방사상 분포를 반지름 방향에 생기게 한다고 가정하면 원주상의 일점 M 에서는 반지름 r_1 및 r_2 방향에 각각 $2P\cos\theta_1/\pi r_1$ 및 $2P\cos\theta_2/\pi r_2$ 의 압축응력이 생긴다. r_1 과 r_2 는 직교하므로

$$\frac{\cos\theta_1}{r_1} = \frac{\cos\theta_2}{r_2} = \frac{1}{d} \quad (2-3)$$

이 되고, M 점의 압축응력은 모두 $2P/\pi d$ 로 표현된다. Fig. 2-2 의 지름상의 일점 N 의 수평방향응력(σ_x) 및 수직방향응력(σ_y)과 전단응력(τ_{xy})을 구하면 $r_1 = r_2 = r$ 및 $\theta_1 = \theta_2 = \theta$ 이므로

$$\sigma_x = -2 \cdot \frac{2P}{\pi} \cdot \frac{\cos\theta}{r} \cdot \sin^2\theta + \frac{2P}{\pi d} \quad (2-4)$$

$$= -\frac{4P}{\pi} \cdot \frac{\sin^2\theta\cos\theta}{r} + \frac{2P}{\pi d}$$

$$\sigma_y = -2 \cdot \frac{2P}{\pi} \cdot \frac{\cos\theta}{r} \cdot \cos^2\theta + \frac{2P}{\pi d} = -\frac{4P}{\pi} \cdot \frac{\cos^3\theta}{r} + \frac{2P}{\pi d}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

지름 AB에 연해 있는 일점 N' 의 응력분포는 $r_1 = \frac{d}{2} - y$, $r_2 = \frac{d}{2} + y$, $\theta_1 = \theta_2 = 0$ 이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_x = \frac{2P}{\pi d} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned}\sigma_y &= -\frac{2P}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{2}-y} - \frac{2P}{\pi} \cdot \frac{1}{\frac{d}{2}+y} \cdot \frac{2P}{\pi d} \\ &= -\frac{8Pd}{\pi} \cdot \frac{1}{d^2-4y^2} + \frac{2P}{\pi d}\end{aligned}$$

$$\tau_{xy} = 0$$

위의 식(2-5)에서 σ_x 는 지름 AB에 연하여 일정한 인장응력을 표현하고 이것에서 식(2-2)가 구해진다.

2.3 일축관입시험 (Unconfined Penetration Test)

일축관입시험은 Chen (1970)의 양면편침시험을 개량하여 CBR(California Bearing Ratio)과 표준다짐시험을 활용하여 흙의 인장강도를 측정할 수 있도록 Fang and Fernandez(1981)에 의해 제시된 방법이다.

일축관입시험법에 사용된 이론은 Chen이 제안한 한계해석(Limit analysis)에 근거를 두고 있다. Chen (1970)은 완전소성이론을 이용한 한계해석으로부터 식(2-6)과 같은 인장강도 계산식을 유도할 수 있음을 보여주었다. 원래 식(2-6)은 쪼갬인장시험 (Thompson, 1965)에 대한 인장강도 계산식으로 이 식의 이론적 기본은 선형탄성이론에 바탕을 두고 있다. (서영교 2008)

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (2-6)$$

여기서, σ_t : 인장강도 (MPa)

P : 공시체의 작용하중 (N)

L : 공시체의 길이 (mm)

d : 공시체의 직경 (mm)

한계해석에 근거하여 Chen (1970)은 양면편침시험법(Double punch test)을 만들었으며, 이를 이용하여 콘크리트와 암에 대한 지지력 예측방법을 개발하였다(Chen and Drucker, 1969; Chen, 1970). 여기서 한 가지 중요한 점은 콘크리트에 적용된 똑같은 이론이 흙에도 적용이 가능하다는 것으로(Fang & Chen, 1972), 그 이유는 콘크리트나 모르타르의 지지력 거동이 흙의 지지력거동과 매우 유사하기 때문이다. 다만 일반적인 한계이론을 흙에 적용하

기 위해서는 다음과 같은 두 가지 사항을 만족해야 한다. 첫 번째 사항은 흙의 변형에 대한 것으로 흙은 완전소성체로 인장 및 압축시 충분한 국부변형(Local deformability)이 발생하여야 한다는 것이다. 두 번째는 Fig. 2-3의 파괴기준에 관한 것으로, 압축측면에서는 수정 Mohr-Coulomb 파괴면이 인장측면에서는 작지만 '0'이 아닌 인장 값을 갖는 파괴면을 가정해야 한다는 것이다. Fig. 2-3에서는 흙의 일축압축강도(q_u), 인장강도(σ_t), 점착력(c) 및 내부마찰각(ϕ)을 각각 나타낸다.

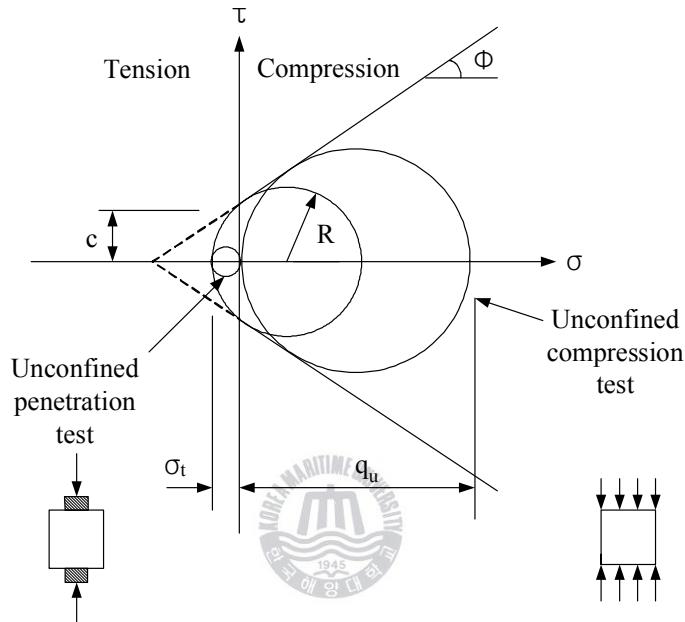


Fig. 2-4 Modified Mohr-Coulomb failure criterion

(지반실무적용, 구미서관 2003)

Fig. 2-4 는 원통형공시체에 대한 양면편침시험과 일축관입시험에 의한 이상적인 파괴메카니즘을 나타낸 것이다. 방사선 방향으로 인장균열이 발생되어 있으며 두 개의 콘 형태의 파괴면이 원반 바로 밑에 형성이 되어있다.

Fig. 2-5(a)에서는 양쪽에 형성된 콘 형태의 파괴면은 서로 강체처럼 이동하면서 콘 주위의 재료를 양 옆으로 이동시키는 것을 볼 수 있다. 파괴메카니즘에 대한 속도벡터관계는 Fig 2.4(b)와 같다. 콘 형태의 파괴면을 따라 각 위치에서 상대속도벡터(δ_w)는 파괴면 으로부터 내부마찰각(ϕ)만큼의 경사를 가지고 작용한다.

Δ_R 와 Δ_D 는 각각 상대속도벡터(δ_w)의 수평방향과 수직방향 성분이다. 에너지소멸율은 각 불연속면의 면적에 인장강도 σ_t 를 곱하고 거기에 수평방향 속도벡터성분(Δ_R)을 다시 곱해서 구한다. 외부일률은 하중 P에 수직방향성분의 속도벡터(Δ_D)를 곱해서 구한다. 내부에너지소멸율에 대한 외부일률(external work) 관계로부터 작용한 힘(P)에 대한 상한 값을 산출할 수 있다.

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin \phi}{\sin \alpha \cos(\alpha + \phi)} \frac{q_u}{2} + \tan(\alpha + \phi) \left(\frac{bH}{a^2} - \cot \alpha \right) \sigma_t \quad (2-7)$$

여기서 α 는 미확정된 콘 형태 과괴면의 각도이고, a 는 원반의 반지름, 그리고 b 와 H 는 각각 공시체의 반지름과 높이이다(Fig. 2-5).

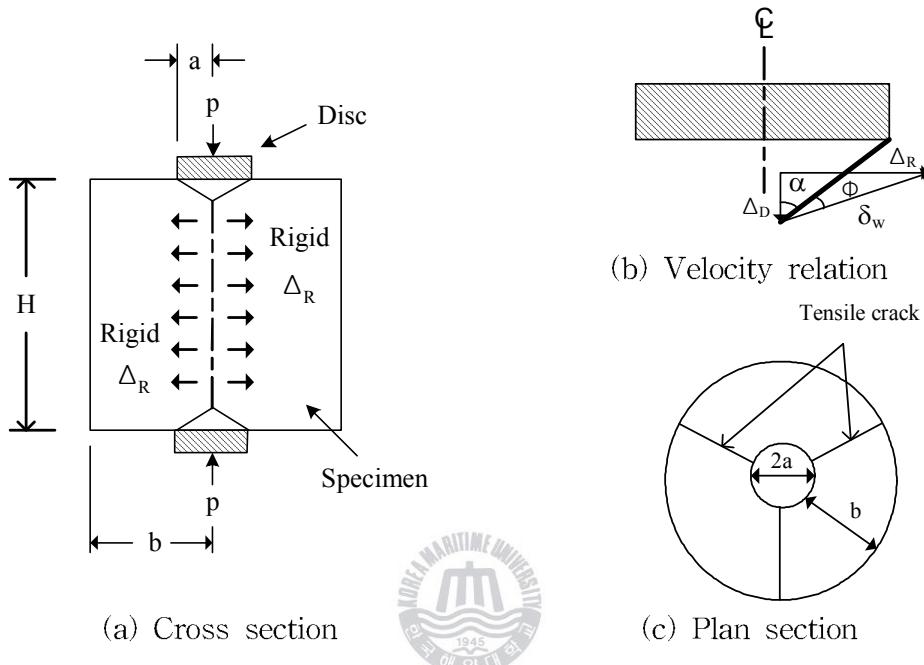


Fig 2.5 Cross section and velocity relation of the UP test

상한해는 최소값을 취하면 되고, α 가 다음의 조건, $\partial P_u / \partial \alpha = 0$ 을 만족해야 한다.

$$\cot \alpha = \tan \phi + \sec \phi \left[1 + \frac{\frac{bH}{a^2} \cos \phi}{\frac{q_u}{\sigma_t} \left(\frac{1 - \sin \phi}{2} \right) - \sin \phi} \right]^{1/2} \quad (2-8)$$

위 식(2-8)은 $\alpha \geq \tan^{-1} \left(\frac{2a}{H} \right)$ 일 때 유효하며, 위 결과를 이용하여 식(2-7)은 다음과 같아 정리된다.

$$P \leq P_u = \pi (KbH - a^2) \sigma_t \quad (2-9)$$

식(2-9)에서 K 는 $\tan(2\alpha + \phi)$ 로 식(2-8)에서 볼 수 있는 것과 같이 내부마찰각 뿐만 아니라 압축-인장강도 비, 공시체-원반 체적 비에도 영향을 받는다.

Chen and Drucker(1969)가 내린 결론처럼 상한해(upper bound solution)는 정해값에 가깝다. 그러므로 모든 흙에 대한 양면편평시험에서 인장강도를 구하는 하나의 식으로 다음 식이 타당하다고 볼 수 있다. 즉, 식(2-10)은 양면편평시험에 대한 인장강도 계산식으로 활용할 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(KbH - a^2)} \quad (2-10)$$

여기서, σ_t : 인장강도 (MPa)

P : 공시체의 작용하중 (N)

K : 응력계수 = $\tan(2\alpha + \phi)$

H : 공시체의 높이 (mm)

a : 편평 디스크의 반경 (mm)

b : 공시체의 반경 (mm)

Table 2-1 Proposed values of parameter K in Eq.(2-10)

(Fang and Fernandez, 1981)

Size of specimen	K value
Harvard miniature compaction mold(3.3×7.2cm)	1.05 ~ 1.10
Proctor mold (10.2×11.3cm)	1.0
CBR mold (15.2×17.8cm)	0.8

Conditions :

- Specimen-disc ratio : 0.2 ~ 0.3
- Height to diameter of specimen ratio : 0.46 ~ 1.0
- Rate of loading : ASTM recommendation for axial strain at a ration of 0.5 ~ 2 percent of height per minute.

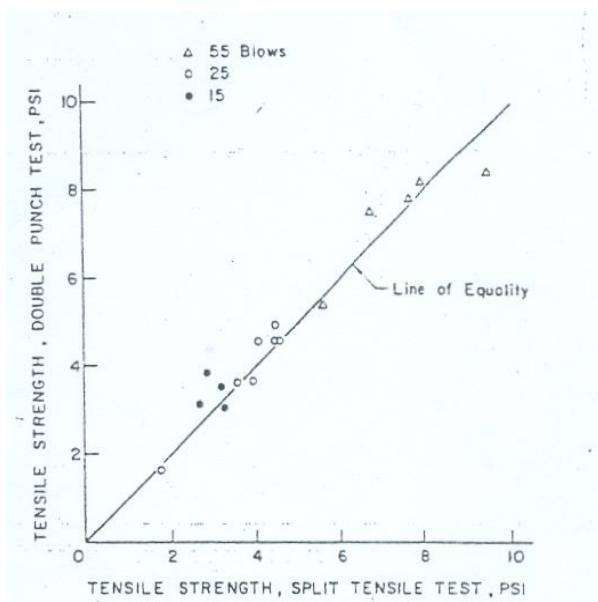


Fig. 2-6 Comparisons of tensile strength of soil determined by double punch and split tensile tests.

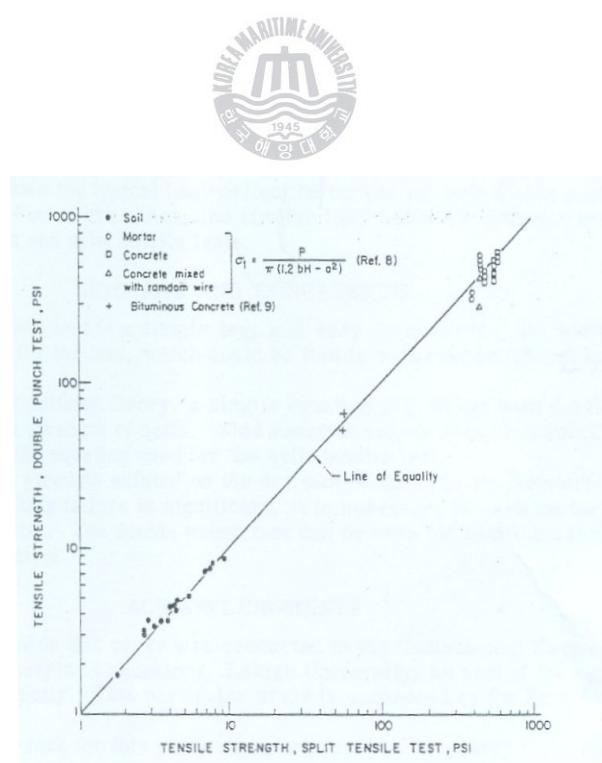


Fig. 2-7 Comparisons of tensile strength of various materials determine by double punch and split tensile tests.

III. 시험 내용 및 방법

3.1 공시체에 사용된 시료의 물리적 성질

우리나라의 지질은 국토면적의 70%정도가 화강암 및 화강편마암으로 구성되어 있으며 이를 모암이 지하에서 심충풍화된 화강암질 풍화토로 잔류하여 전국적으로 많이 분포하고 있다. 건설부 국립건설연구소 (1980)의 연구에 의하면 국내 화강풍화토의 대부분은 SM, SC에 속한다고 보고되었다. 화강풍화토는 일반적으로 암에 가까운 사질토가 있는가 하면 점성토도 있다. 토립자가 과쇄 되어 세립화하기 쉽고 물로 포화되면 전단강도가 급격하게 떨어지며 점착력은 0에 가까워진다. 압축성은 사질토와 점성토의 중간정도이며 자연 상태 투수성은 크나 잘 다져지면 투수계수가 0에 가까운 불투수성을 보이기도 한다. (지반실무적용, 구미서관 2003)

본 연구에 사용된 공시체의 시료는 크게 주문진 표준사와 대표적 점토인 카오리나이트를 혼합한 사질혼합토와 우리나라 토질을 구성하는 흙의 종류중 70%를 차지하는 화강풍화토를 사용하였다. 사질혼합토는 노건조 시킨 주문진 표준사와 카오리나이트의 중량비를 10, 20, 30% 비율로 섞어서 제작하였고, 화강풍화토는 부산 영도지역에서 채취한 시료를 노건조 시켜서 합수비의 변수만 적용시켜서 공시체를 제작하였다. 이 시료들의 기본 물성을 파악하기 위해 KS F 시험방법에 의해 체가름시험, 비중시험, 액. 소성한계시험, 다짐시험, 투수시험 등을 수행하였다. 일반적으로 사질혼합토의 10%를 균질한 모래, 30%를 세립질 모래로 생각할 수 있다.

화강풍화토의 입도 분포 곡선은 Fig .1 과 같이 나타나고 있다. 이 결과를 바탕으로 통일 분류법(USCS)에 의해 시료를 분류해보면 #200번체의 통과량이 5.6%로 SP-SM으로 분류 할 수 있으며, PI 값도 13.62로 나타나 점성토에 가까운 화강풍화토로 나타났다. Fig. 3-1의 입도 분포곡선과 Fig. 3-2의 유동곡선, Fig. 3-3의 다짐곡선을 나타내었다.

Table 3-1 화강풍화토의 물리적 성질

Type of soil	Clay soil
Initial water content (%)	28.34
Particle size distribution test	#4
	#10
	#40
	#200
Liquid, Plastic test	LL (%)
	PL (%)
	PI
	LI
Proctor compaction test	r_{dmax} (t/m^3)
	w_{opt} (%)
Uniformity coefficient (C_u)	10.71
Coefficient of gradation (C_c)	1.71

Table 3-2 사질혼합토의 물리적 성질

Properties of soil		Clay content (Kaolinite)		
		10%	20%	30%
Particle size distribution test	#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	γ_{dmax} (t/m^3)	1.79	1.93	2.03
	ω_{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

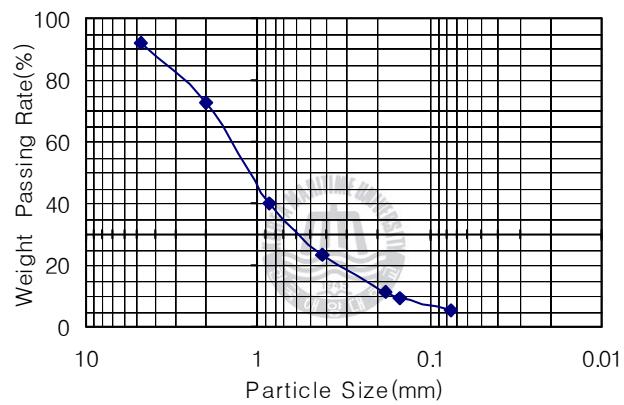


Fig. 3-1 화강풍화토의 입도분포곡선

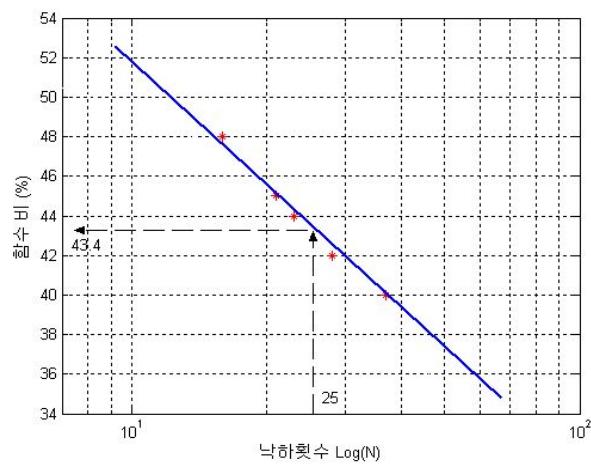


Fig. 3-2 유동곡선

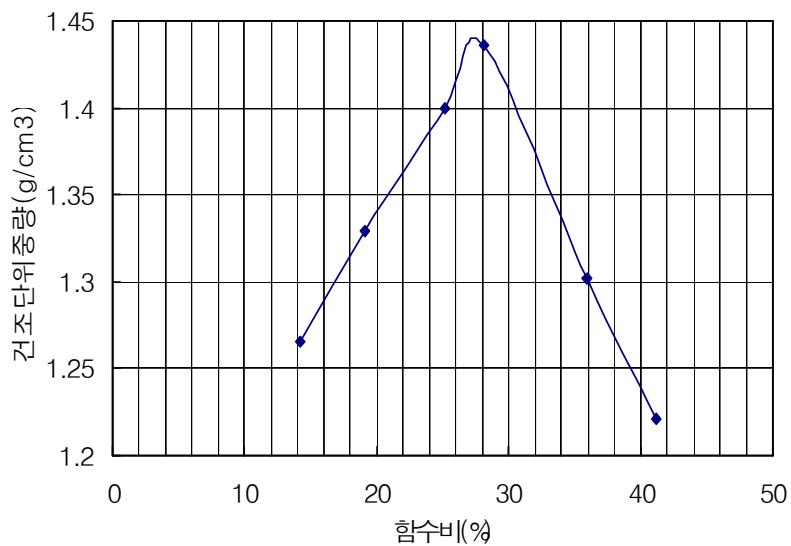


Fig. 3-3 다침곡선

3.2 Cold Room 실험 장비

3.2.1 Cold Room 사양



- Dimension : 4M * 6M * 2.6M
- Temperature Control : -30 deg ~ + 15 deg
- Temperature Accuracy : ± 0.5 deg at -20 deg
- Temp / Humidity Controller : Digital PID Controller Automatic Defrost
- Interior Material : STS-316 Polisher Plate
- Exterior Material : Polyurethane Pannell
- Compressor : 10 RT

3.1.3 UTM (Universal Testing Machine) 만능재료 시험기

본 연구에 사용된 시험기는 저온에서 작동 기능 하도록 특수 제작되었으며, 인장, 압축, 굴곡, 항절 시험 등을 할 수 있는 만능재료시험기로서 종래의 지침식 시험기(Analog) 및 숫자식 시험기 (Digit Type)에서 발전된 것으로 하중을 전자식 감응 장치인 Load Cell로 감지하여 디지털 표시 장치로 표시하게 되며, 정밀도 및 내구성 면에서 훨씬 발전된 시험기이다. 또한 시험 중에는 시험 하중(Load)과 변형량(Elongation)의 관계를 Digital Display Panel 및 컴퓨터로 데이터를 계측함으로서 자료 분석이 용이하다.

기계식 UTM용 디지털 인디게이터는 위와 같은 형태로 하중 인디게이터, 변위 인디게이터, 속도 콘트롤로 구성되어 있으며, 하중 및 변위 인디게이터의 연계동작을 위하여 시작 및 마침 신호를 연결하여 동작이 가능하도록 되어 있으며 속도를 수동으로 설정 및 컴퓨터에서도 설정이 가능하도록 되어 있다. 하중 인디게이터는 하중을 표시하는 디지털 인디게이터로 Peak 및 과단검출 Over Load 설정 시작 신호 출력기능을 가지고 있다. DISP 인디게이터는 변위량을 측정하는 인디게이터로 Exentio Meter와 병용해서 사용이 가능하도록 2단의 교정 값을 가지고 하였으며, 수동 시험시 초기 하중이 가해지는 상태에서 시작하여 시료 과단시 계측이 멈추도록 되어있다. 이는 하중 인디게이터의 시작 설정 값에서 시작하여 마침 신호에서 정지한다.



Fig. 3-4 Universal Testing Machine

3.3 공시체 제작 및 추출 방법

본 연구에 사용된 시편은 직경 100mm, 길이 210mm로 주문 제작된 아크릴 통과 직경 73.8mm, 길이 180mm로 제작된 스테인레스 관을 몰드로 사용하고, 밀도를 균질하게 하기 위해 2.5kg 래머로 3층, 25회 표준 다짐을 실시하여 제작하였다. 동결 화강풍화토 인장 시험에서 함수비에 따른 강도 특성을 알아보기 위해서 함수비를 20%, 25%, 30%, 35%, 40%로 변화 시켜 공시체를 제작하였고, 사질혼합토의 경우에는 Table 3.3 과 같이 점토와 함수비 비율에 각각 나누어서 공시체를 제작하였다.

Table 3-3 Clay content and water content of mixed soil and clay

Clay content (k, %)	Water content (ω , %)
10%	7
	15
	20
20%	7
	15
	20
30%	7
	15
	20

일관된 결과 값을 얻기 위해서 각각의 경우에 대해서 3번의 시험을 수행하여 평균값을 이용하였다.

다짐된 시편은 동결과정에서 발생할 수 있는 수분 손실을 고려하여 래으로 윗부분을 마감하였다. Fig 3.6의 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.

Fig 3.5처럼 6일간 동결시킨 시편은 시료를 추출하는데 동결과정에서 몰드와 시편 사이의 수분으로 인한 부착력이 크게 작용하기 때문에 다짐 시험 시 사용되는 유압식시료추출기와 코어 추출기를 사용하여 추출하였다. 추출된 시료는 동결과정에서 시료 안에 포함된 수분에 의해 체적 팽창 현상이 발생되어 시편의 위, 아래 부분이 유통불통한 상태로 된다. 일축관입 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 보관하였다.

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



Fig. 3-5 공시체 추출 모습



Fig. 3-6 Cold Room에서의 동결 모습

3.4 일축압축시험 (Unconfined Compression Test)의 원리

동토의 압축강도는 동토의 가장 기본적인 공학적 성질로 이미 여러 연구자에 의해 연구된 바 있다 (Thytovich, N. A. 1975, K. K. Pekarakaya. 1966). 이들 연구에 의해 동결토의 강도는 온도와 시간의 함수임이 밝혀졌고, 흙의 강도는 점착력과 흙-얼음 구조의 마찰력에 의존한다고 알려져 있다. 빙빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 적을 때)의 강도는 입자상호간의 마찰력에 의해 좌우되고, 부빙점토(부피의 30%보다 얼음의 함량이 더 클 때)의 강도는 흙-얼음구조의 점착력에 의해 좌우된다. 또한 동토의 압축강도와 변형특성은 흙의 온도, 얼음의 함량, 변형속도에 의존하게 되는데 변형속도가 증가하거나 온도가 감소하게 되면 강도는 강해지게 된다. (김영진 2003)

일축압축시험은 점착력이 있는 시료를 원추형 공시체로 제작하여 측압을 받지 않는 상태에서 축하중을 가하여 전단파괴 시킨 후 시료의 전단강도를 결정하는 시험방법이다. 일축압축시험의 KS F 2343의 표준압축 시험방법을 적용한 압축강도 계산식은 식(3-1)을 적용하였다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (3-1)$$

여기서, σ : 압축강도 (MPa)

P : 최대하중 (N)

A : 공시체의 단면적 (mm^2)

본 연구에서는 앞서 설명한 방법으로 제작된 동토시편을 이용해 Cold Room에서 일정한 온도 하에서 점토의 함유비와 함수비에 따른 일축압축시험을 통해 동토의 공학적인 거동을 파악하였다.

하중 재하 시, 변형 속도는 공시체 높이의 2%(4mm/min , 100mm*200mm : 3mm/min ,

73.8mm*150mm)로 고정하였고 실험 시 Cold Room의 온도는 -15°C로 일정하게 유지하였다. 파괴응력은 최대하중(peak)이 나타날 때의 값을 일축압축강도로 선정하였다. 미리 준비된 화강풍화토(w20, w25, w30, w35, w40)와 사질혼합토(w7, w15, w20 : Clay 함유율 10%, 20%, 30%)의 동토 시편을 UTM기에 설치에 시험을 실시하였다. 공시체가 가압판의 중심에 위치 할 수 있도록 가이드를 설치하고 시험을 시작하기 전 가이드를 제거 하였다. 시험 중 공시체가 파괴되면서 파편들이 주변으로 떨어져 그 중량의 차이가 있을 수 있으므로 시험기 주변을 비닐로 덮어 공시체 시편의 유실을 미연에 방지하였다.

이 같은 방법으로 화강풍화토 5개, 사질혼합토 9개의 일축압축시험을 수행하고 파괴된 공시체를 회수, 실험 전, 후의 함수비를 비교하였다.



Fig. 3-7 일축압축시험



Fig. 3-8 일축압축시험 후 파괴된 공시체

3.5 쪼慨인장시험 (간접인장시험 : Split Tensile Test)의 원리

쪼慨인장시험(간접인장시험)은 Fig. 3-9과 같이 원주형 공시체에 대하여 연직 평면에 평행하게 작용하는 정적 및 반복 압축하중을 가함으로써 진행되었다.

이러한 하중 재하 방법은 하중 재하의 방향과 연직 평면 방향을 따라 상대적으로 일정한 인장 응력이 발생하게 되는데, 이는 공시체의 지름 방향으로 파괴가 발생하게 된다. 또한 이러한 시험방법은 브라질과 일본에서 많은 연구(Akazawa 1953, Hadley 1965 등)가 수행되었다. 쪼慨 인장 시험의 장점은 시험이 비교적 간단하고 파괴가 균일한 인장응력 안에서 발생하기 때문에 유용히 사용되나, 시료에 발생하는 응력 상태가 현장에서 발생하는 응력상태와 차이가 있고 해석이 다른 시험방법에 비해 훨씬 복잡하다는 단점도 있다.

UTM시험기의 상부가압판과 하부판의 지름은 200mm이고, 사용된 공시체의 길이는 트리밍으로 인해 190mm에서 200mm사이의 조건(직경 100mm의 공시체)에서 시험이 진행되었고, 73.8mm직경의 공시체는 공시체의 길이 150mm로 적용하여 시험의 일관성을 두었다. 앞의 2장의 인장강도시험의 이론적 배경에서 설명한 쪼慨 인장시험의 KS F 2423의 표준인장 시험방법의 식(3-2)을 적용하여 결과를 분석 하였다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (3-2)$$

여기서, σ_t : 인장강도 (MPa)



P : 최대하중 (N)

D : 공시체의 지름 (mm)

L : 공시체의 길이 (mm)

함수비가 20%, 25%, 30%, 35%, 40%의 5개 1set의 동결화강풍화토에 대한 시험은 3set를 실시하였고, 사질혼합토에 대한 시험은 카오리나이트 함유율 10%, 20%, 30%와 함수비 7%, 15%, 20%를 고려하여 9개 1set의 공시체를 제작, 3set를 시험하였다.

하중 재하 시 변형 속도는 공시체 높이의 0.5%인 1mm/min으로 고정하였고, 실험 시 Cold Room의 온도가 의 일정한 상태를 유지하며 모든 시험을 수행하였다.

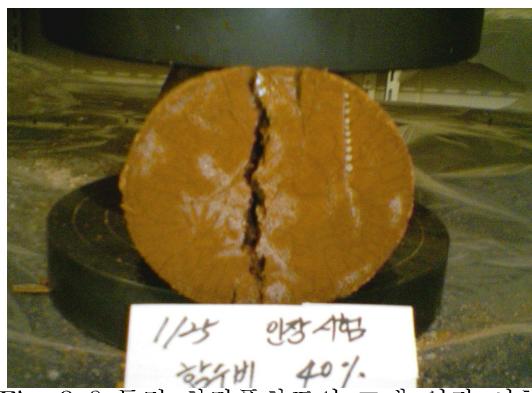


Fig. 3-9 동결 화강풍화토의 쪼慨 인장 시험

3.6 일축관입시험 (양면편침시험 : Unconfined Penetration Test)의 원리

본 시험은 Fang and Chen (1972)에 의한 Double-Punch Tensile Strength Test의 이론을 바탕으로 하였으며, 시험기는 Cold Room 내부에 있는 UTM(universal testing machine)를 사용하여 시행하였다. 공시체 제작은 앞서 설명한 쪼갬인장시험(split tensile test)에서 만든 방법과 동일하게 적용하여 동결 화강풍화토의 함수비 20%, 25%, 30%, 35%, 40%의 5개 1set 공시체를 3set를 시험하였고, 사질혼합토의 경우는 카오리나이트 함유율 10%, 20%, 30%와 함수비 7%, 15%, 20%를 고려하여 9개 1set의 공시체를 제작, 3set를 시험하였다.

이번 시험을 위해 Fig. 3-9에서처럼 UTM장비의 가압판과 하부판을 자체 제작하였고, 관입시험을 위해 디스크(12.5mm, 25mm, 37.5mm, 50mm)의 크기도 다르게 제작하였다. 공시체를 시험기에 설치할 때 편심을 줄이기 위해서 하부판에 시료 직경에 맞게 홈을 파고, 홈 부분에 반으로 잘려진 아크릴 원통을 꽂아서 가이드로 사용하여 시료의 중심을 맞추도록 하였다. 또한 공시체의 재하 속도는 쪼갬 인장 시험과 동일하게 1mm/min 으로 설정하여 시험하였다.

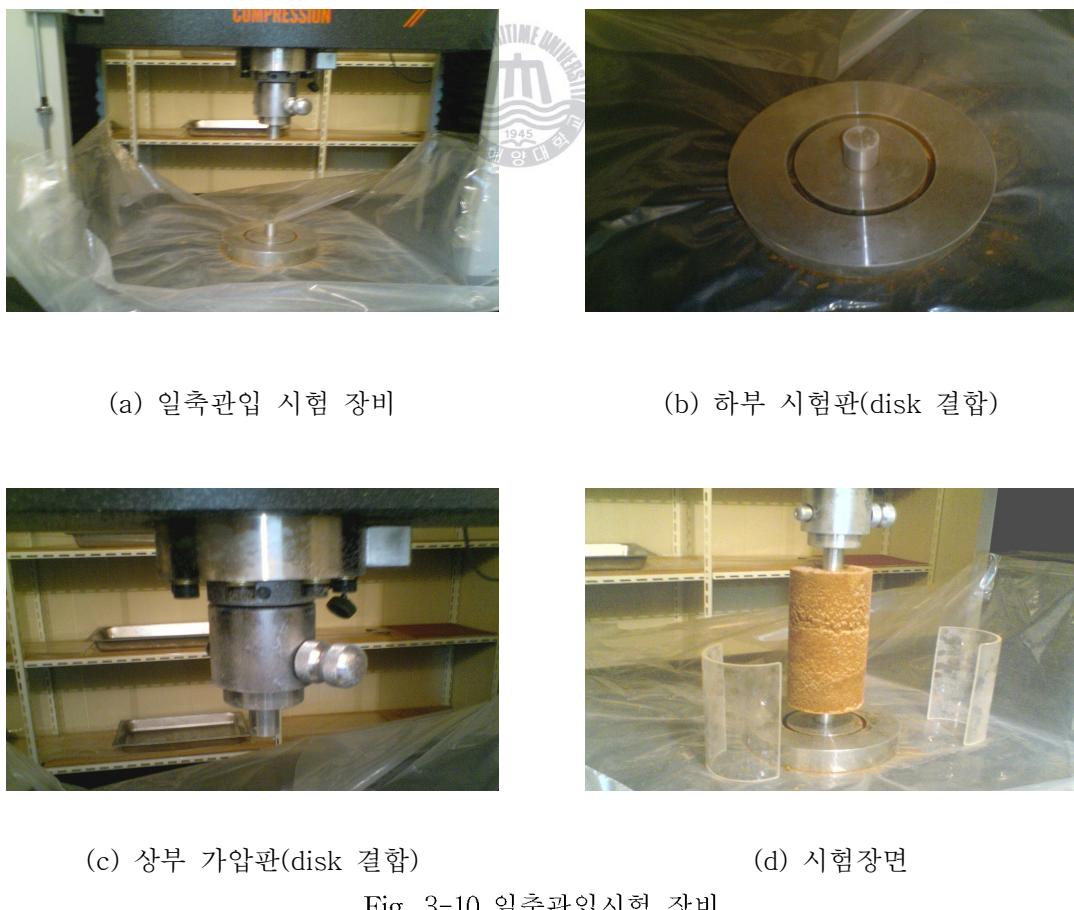


Fig. 3-10 일축관입시험 장비

Table 3-4 일축관입시험 조건의 계산 값

시험조건	계산값
Specimen-disc ratio	$\frac{25\text{mm(디스크 직경)}}{100\text{mm(공시체직경)}} = 0.25$
Height to diameter of specimen ratio	$\frac{100\text{mm(공시체직경)}}{200\text{mm(공시체높이)}} = 0.5$

재하속도는 시료 길이의 0.5%로 쪼갬인장시험 과 같은 1mm/min으로 하고, 관입 disk 크기를 25mm로 사용하였다. Table 2-1 (Fang and Fernandez, 1981)에 제시한 시험조건에서 Specimen-disc ratio은 0.2 ~ 0.3, Height to diameter of specimen ratio = 0.46 ~ 1.0 , Rate of loading = ASTM recommendation for axial strain at a ration of 0.5 ~ 2 percent of height per minute를 만족한다. 이를 토대로 앞선 2장의 일축관입시험의 이론을 근거로 시험을 수행하였다.

본 논문 중 인장응력 값을 구하려면 K 계수 값을 알아야 하는데 K값은 앞서 설명한 일축관입시험에 있어서 공시체의 높이와 디스크의 반경 그리고 내부 마찰각 등에 의해 영향을 받는다. 이번 시험의 공시체의 크기와 디스크실험 환경조건을 고려하고 아래의 일축관입시험의 식들을 이용하여 K값을 계산해 보면,

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(KbH - a^2)} \quad (3-3)$$

$$K = \tan(2\alpha + \phi), \quad \alpha \geq \tan^{-1}\left(\frac{2a}{H}\right) \quad (3-4)$$

여기서, σ_t : 인장강도 (MPa)

P : 작용하중 (N)

K = 계수

H : 공시체 높이 (mm)

a : 원반 반경 (mm)

b : 공시체 반경 (mm)

ϕ : 내부 마찰각 ($^\circ$)

계산 결과 $\alpha \geq \tan^{-1}\left(\frac{2 \times 12.5\text{mm}}{200\text{mm}}\right) \Rightarrow \alpha \geq 7.125$ 이며 내부마찰각은 30° 로 가정하여

(2)식에 대입하여 K값을 0.97값을 구할 수 있었다. 따라서 본 시험에서 인장강도를 계산할 때 필요한 K값은 0.97로 간주하였다. 이는 직경과는 무관하게 두 가지 공시체에 모두 적용되었다.

IV. 시험 결과 및 분석

4.1 동결 화강풍화토 공시체의 일축압축시험 결과 분석

4.1.1 표준직경 공시체 (100mm*200mm)의 일축압축시험 결과

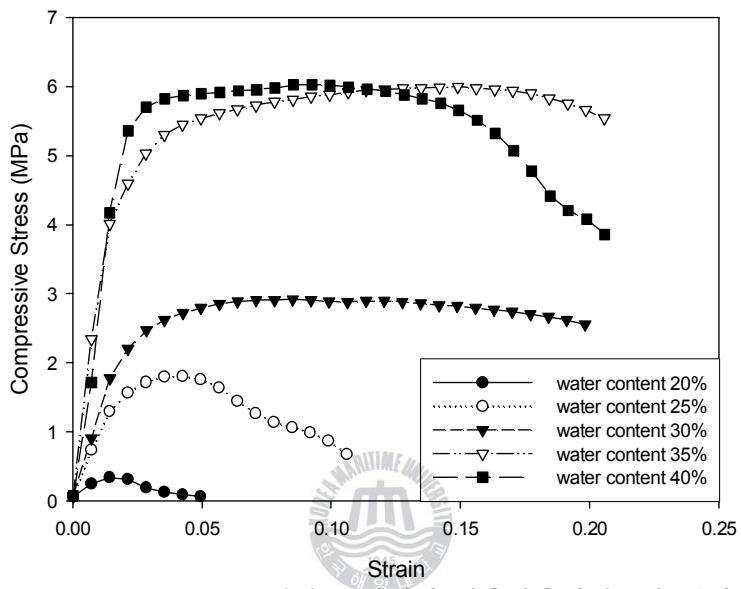


Fig. 4-1 표준직경 공시체의 일축압축시험 1차 결과

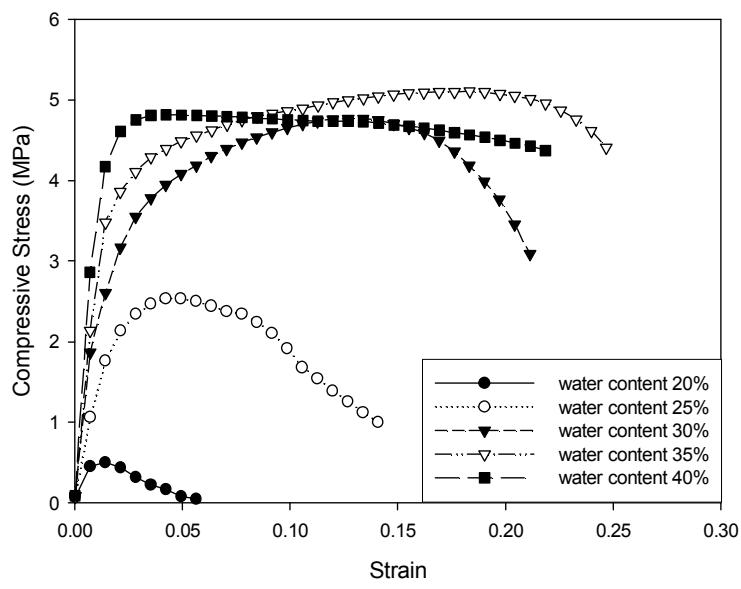


Fig. 4-2 표준직경 공시체의 일축압축시험 2차 결과

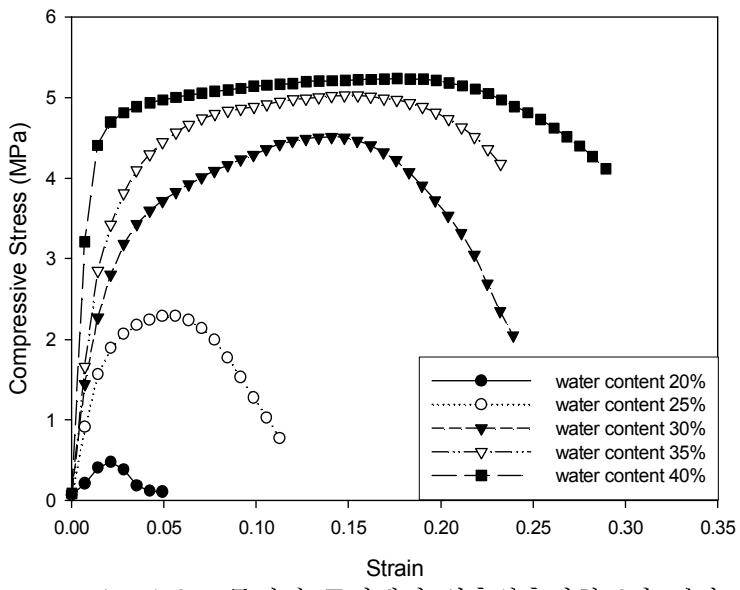


Fig. 4-3 표준직경 공시체의 일축압축시험 3차 결과

Table 4-1 표준직경 공시체의 일축압축시험 결과

Water content	Max Unconfined Compression Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	0.350	0.512	0.481	0.448
25%	1.818	2.543	2.294	2.218
30%	2.198	4.771	4.510	3.826
35%	5.933	5.109	5.028	5.357
40%	6.033	4.821	5.240	5.365

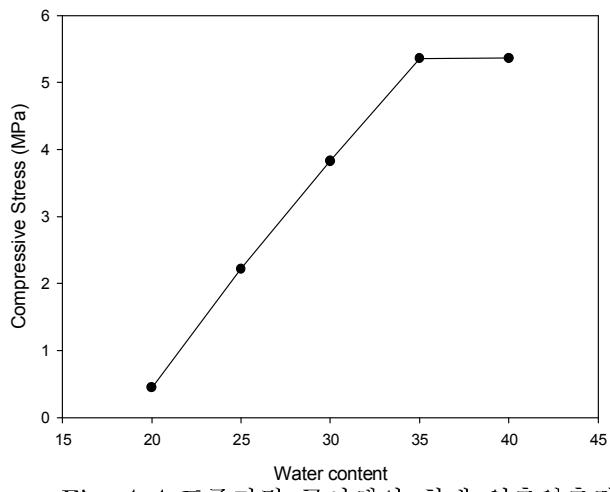


Fig. 4-4 표준직경 공시체의 최대 일축압축강도

3회에 걸쳐 시험한 표준직경 동결 화강풍화토 공시체의 일축압축강도 그래프에서 볼 수 있듯이 최대 측정 강도가 0.3 ~ 6.0MPa 범위로 측정되었으며, 공시체의 강도가 함수비가 증가함에 따라 증가함을 알 수 있다. 화강풍화토의 포화 함수비는 30%~35% 이므로 불포화 상태에서 증가하던 강도곡선도 공시체의 포화 함수비를 넘어서서 부터는 더 이상 강도가 증가하지 않음을 보여준다. 이는 포화 함수비가 넘어서서 부터는 얼음의 부피가 30%이상인 부빙점토로 전환되어 강도 값의 변화가 작아짐을 알 수 있다.

4.1.2 축소직경 공시체 (73.8mm*150mm)의 일축압축시험 결과

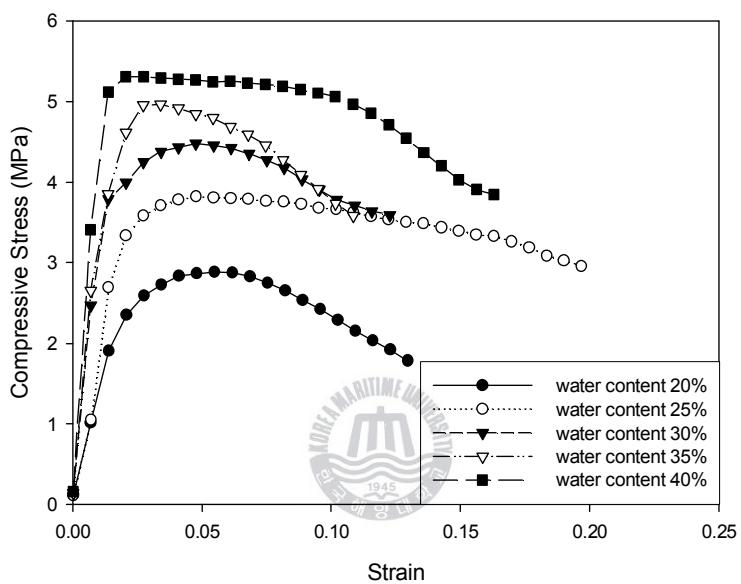


Fig. 4-5 축소직경 공시체의 일축압축시험 1차 결과

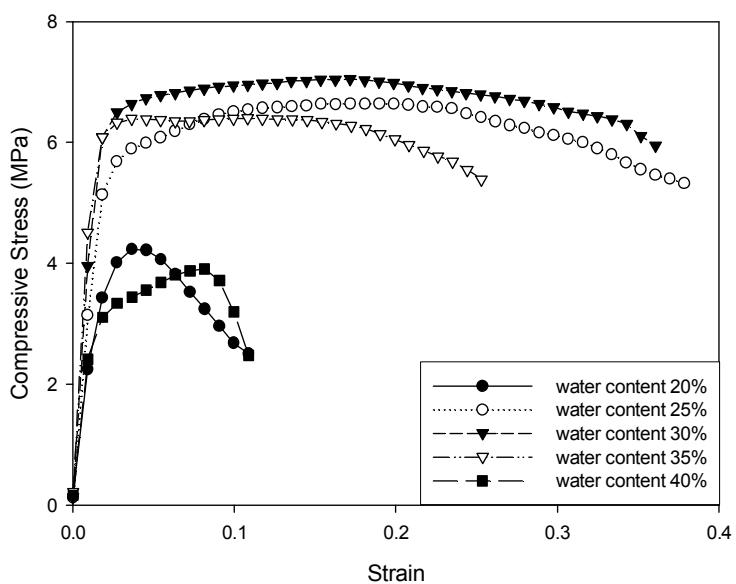


Fig. 4-6 축소직경 공시체의 일축압축시험 2차 결과

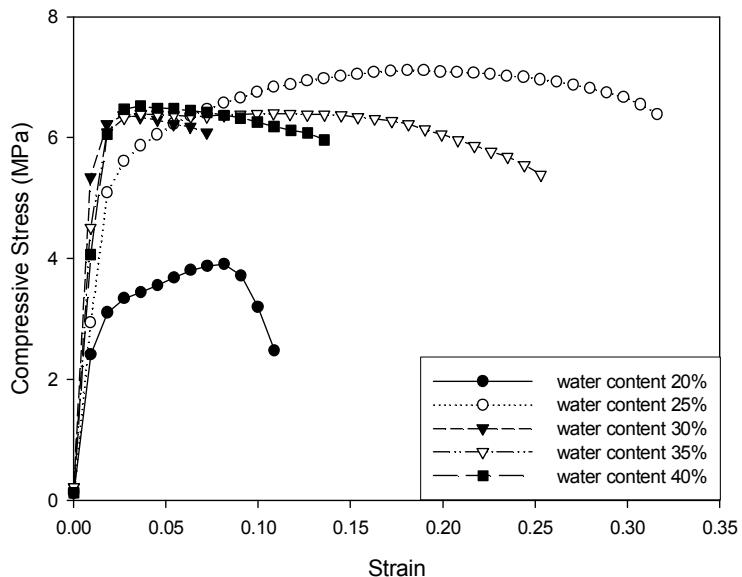


Fig. 4-7 축소직경 공시체의 일축압축시험 3차 결과

Table 4-2 축소직경 공시체의 일축압축시험 결과

Water content	Max Unconfined Compression Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	2.907	4.263	3.925	3.698
25%	3.838	6.669	7.121	5.876
30%	4.489	7.058	6.373	5.973
35%	4.984	6.417	6.380	5.927
40%	5.332	6.098	6.554	5.995

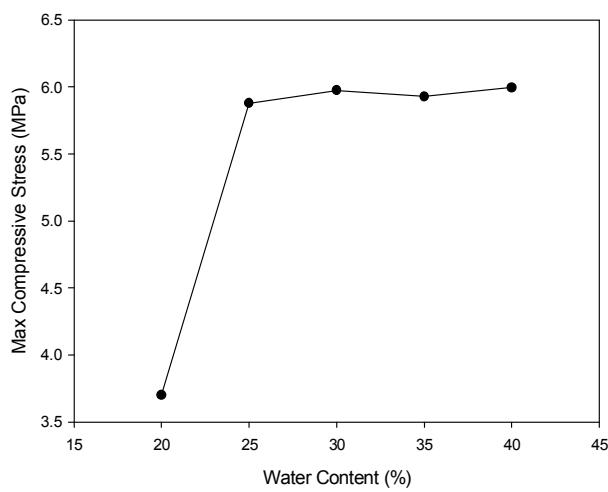


Fig. 4-8 축소직경 공시체의 최대 일축압축강도

축소직경 공시체는 합수비에 따라 Compressive Stress가 2.9 ~ 7.9MPa 범위의 최대 응력 값들이 측정되었으며 불포화일 경우 합수비가 증가함에 따라 강도 값도 같이 증가하다가 포화를 넘어서면서 부터는 강도 값이 약간 감소하면서 수렴하는 것을 보여준다.

축소직경 동결 화강풍화토의 평균 최대일축압축강도 그래프 (Fig. 4-8)에서도 역시 표준 직경 공시체와 비슷하게 포화합수비 부근에서 최대 일축압축 강도가 나타났고, 이는 직경이 작아지더라도 시료 자체의 특성은 변하지 않음을 알 수 있다.

4.1.3 공시체 직경에 따른 일축압축강도 결과 비교

Table 4-3 공시체 직경에 따른 최대 일축압축강도

Max Unconfined Compression Strength (MPa)		
Water content	73.8mm*150mm	100mm*200mm
20%	3.698	0.448
25%	5.876	2.218
30%	5.973	3.826
35%	5.927	5.357
40%	5.995	5.365

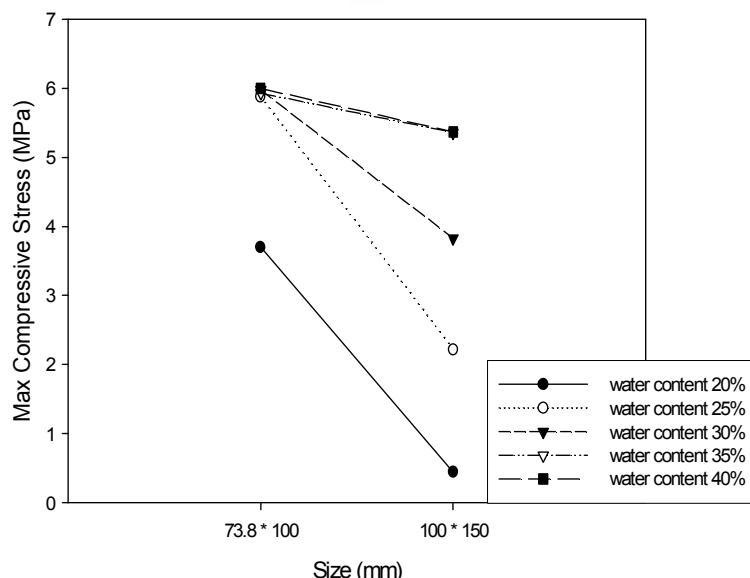


Fig. 4-9 직경 변화에 따른 최대 일축압축강도 변화 곡선

Fig. 4-4와 Fig. 4-8을 비교하여 보면 그래프의 모양이 다소 다른 것을 알 수 있다. 표준 몰드시의 일축압축강도는 합수비 35%인 부분에서 가장 큰 값을 보이고 있다. 하지만 합수비가 35%이상에서는 축소된 몰드에서와 같이 내부얼음의 부피가 증가하여 강도에 영향을

미치고 있는 것으로 보이고 있다. 각 함수비당 강도를 크기별로 비교한 Fig. 4-9를 보면 직경이 큰 공시체의 경우 그 강도 값이 작아짐을 볼 수 있었고, 함수비가 높아질수록 강도차이가 줄어드는 모습이 보이면서 함수비 35% 이상일 때부터 그 변화가 거의 없는 것을 보이고 있다. 이것은 함수비가 35%정도에서부터는 공시체가 포화되어 강도가 함수비와는 크게 상관없이 나타남을 알 수 있다.

4.2 동결 화강풍화토 공시체의 쪼갬인장시험 결과 분석

4.2.1 표준직경 공시체 (100mm*200mm)의 쪼갬인장시험

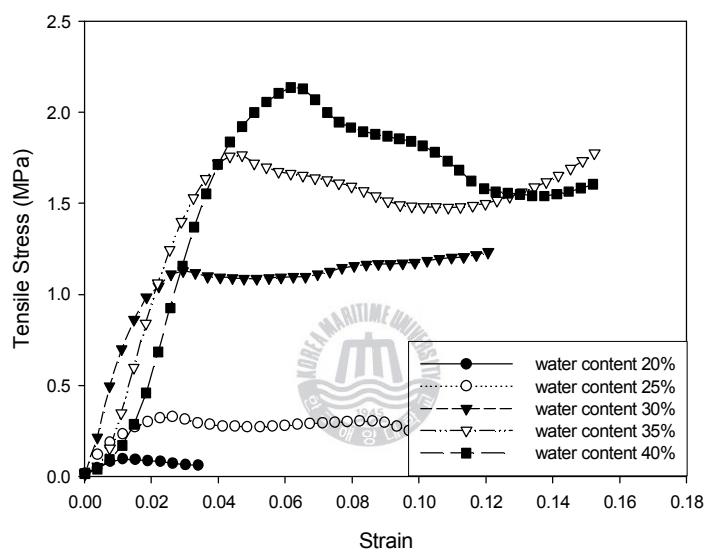


Fig. 4-10 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 1차 결과

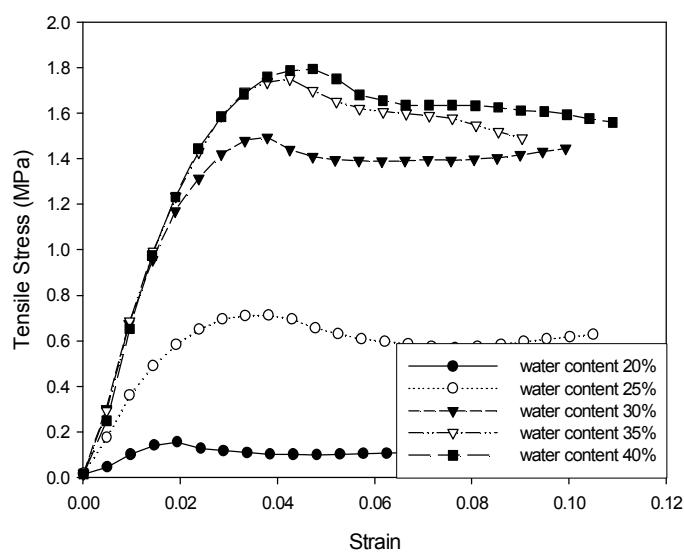


Fig. 4-11 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 2차 결과

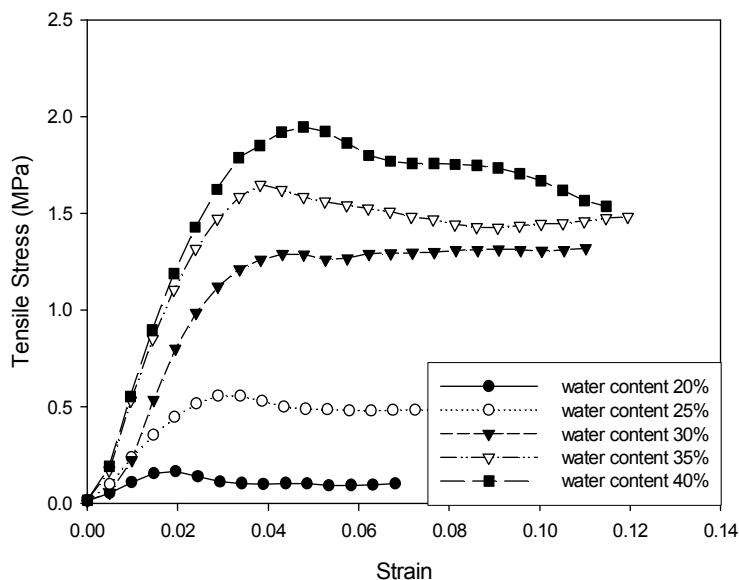


Fig. 4-12 표준직경 공시체의 쪼慨인장시험 3차 결과

Table 4-4 표준직경 공시체의 쪼慨인장시험 결과

Water content	Max Spilt Tensile Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	0.084	0.171	0.159	0.138
25%	0.328	0.543	0.712	0.528
30%	1.234	1.326	1.503	1.354
35%	1.804	1.657	1.750	1.737
40%	2.133	1.942	1.861	1.979

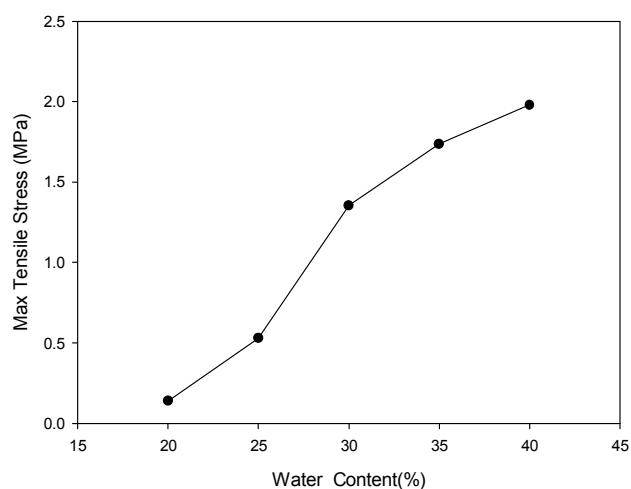


Fig. 4-13 표준직경 공시체의 최대 쪼慨인장강도

Table 4-3에서 확인 할 수 있듯이, 표준직경 공시체의 쪼ヶ임인장시험 결과 최대인장강도가 함수비의 변화에 따라 $0.083 \sim 2.1$ MPa의 강도 값으로 나타나고 있다. 이는 Table 4-1의 일축압축강도에 비해 약 $1/3$ 정도의 강도 값에 해당하며, 실제 콘크리트의 압축강도와 인장강도 비인 $1/9 \sim 1/13$ 과 비교해 볼 때 더 큰 인장강도 값으로 나타나고 있음을 알 수 있다.

4.2.2 축소직경 공시체 ($73.8\text{mm} \times 150\text{mm}$)의 쪼ヶ임인장시험

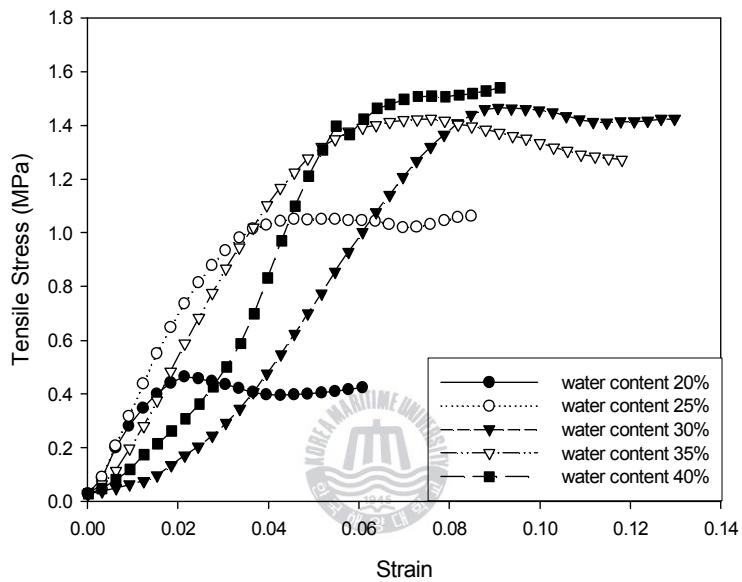


Fig. 4-14 축소직경 공시체의 쪼ヶ임인장시험 1차 결과

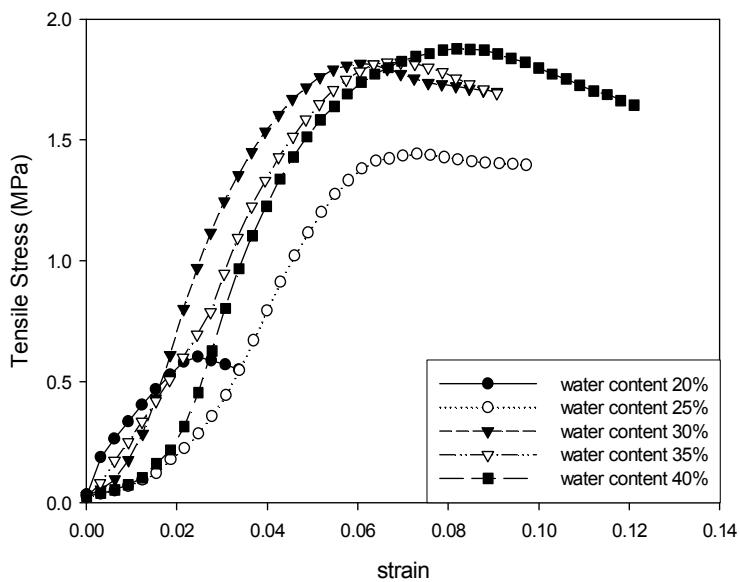


Fig. 4-15 축소직경 공시체의 쪼ヶ임인장시험 2차 결과

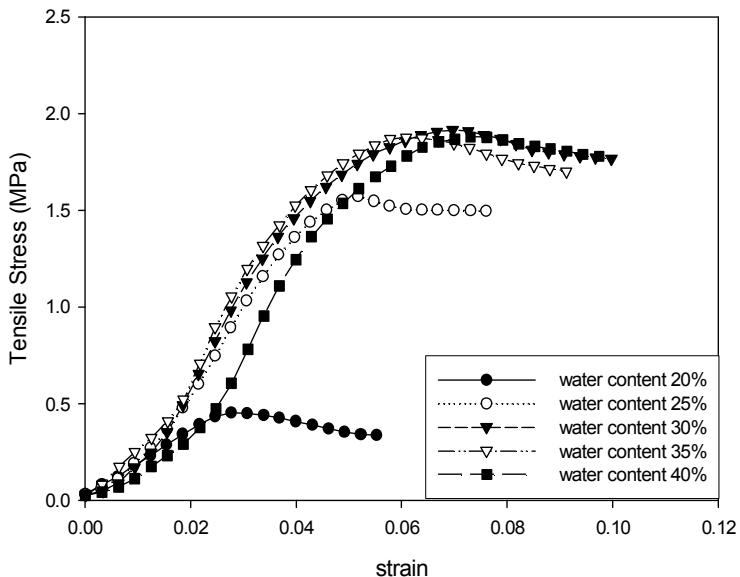


Fig. 4-16 축소작경 공시체의 쪼慨인장시험 3차 결과

Table 4-5 축소작경 공시체의 쪼慨인장시험 결과

Water content	Max Spilt Tensile Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	0.468	0.605	0.455	0.509
25%	1.077	1.445	1.575	1.356
30%	1.470	1.820	1.916	1.735
35%	1.430	1.829	1.881	1.713
40%	1.543	1.881	1.884	1.769

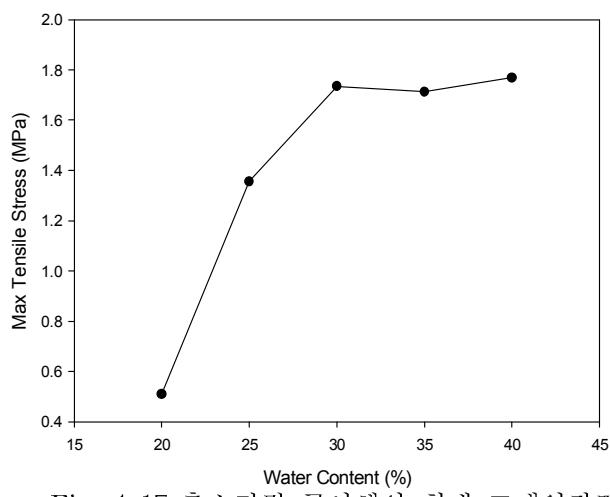


Fig. 4-17 축소작경 공시체의 최대 쪼慨인장강도

축소직경 공시체의 쪼갬인장강도 값은 0.4 ~ 1.9 MPa 정도로 나타났으며, 표준직경 공시체와 마찬가지로 함수비 30%에서 인장강도 증가폭이 최대임을 알 수 있다. 함수비 30%를 넘어서면서 강도 값의 변화량은 급격히 줄어들며, 이는 포화함수비 이후부터는 공시체가 부링점토로 바뀌면서 강도 값의 변화가 작아짐을 알 수 있다.

4.2.3 공시체 직경에 따른 쪼갬인장강도 결과 비교

Table 4-6 공시체 직경에 따른 최대 쪼갬인장강도

Water content	Max Spilt Tensile Strength (MPa)	
	73.8mm*150mm	100mm*200mm
20%	0.509	0.138
25%	1.356	0.528
30%	1.735	1.354
35%	1.829	1.737
40%	1.881	1.861

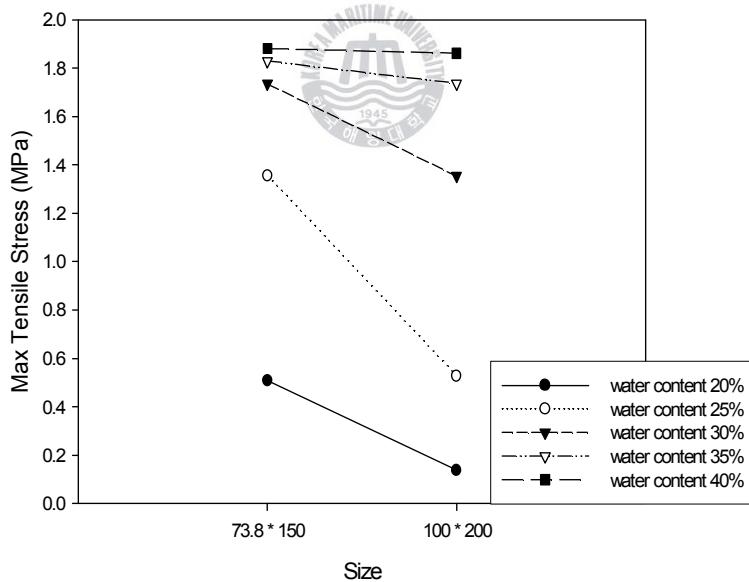


Fig. 4-18 직경 변화에 따른 최대 쪼갬인장강도 변화 곡선

쪼갬 인장의 경우 표준몰드 경우의 강도 값과 축소된 몰드의 강도 값의 함수비별 변화도는 비슷한 경향을 보이고 있다. 크기별 강도 비교에서는 함수비가 30%까지는 몰드의 크기가 작을 때 강도 값이 크게 측정되었고, 35%이상부터는 강도 값의 변화가 급격히 줄어들어 거의 비슷한 강도 값이 측정되었다. 이 역시 일축압축시험과 같이 35%이상부터는 포화함수비를 초과하기 때문에 강도 값이 비슷한 경향을 띠고 있음을 알 수 있다.

4.3 동결 화강풍화토 공시체의 일축관입시험 결과 분석

4.3.1 표준직경 공시체 (100mm*200mm)의 일축관입시험

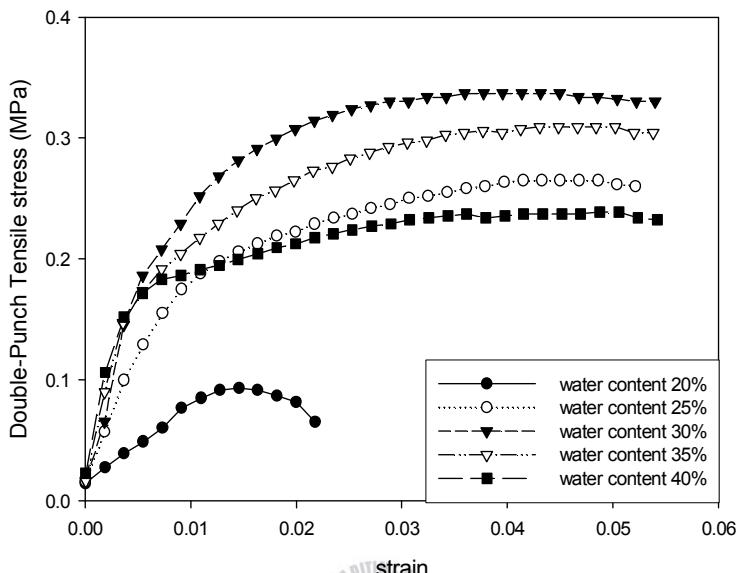


Fig. 4-19 표준직경 공시체의 일축관입시험 1차 결과

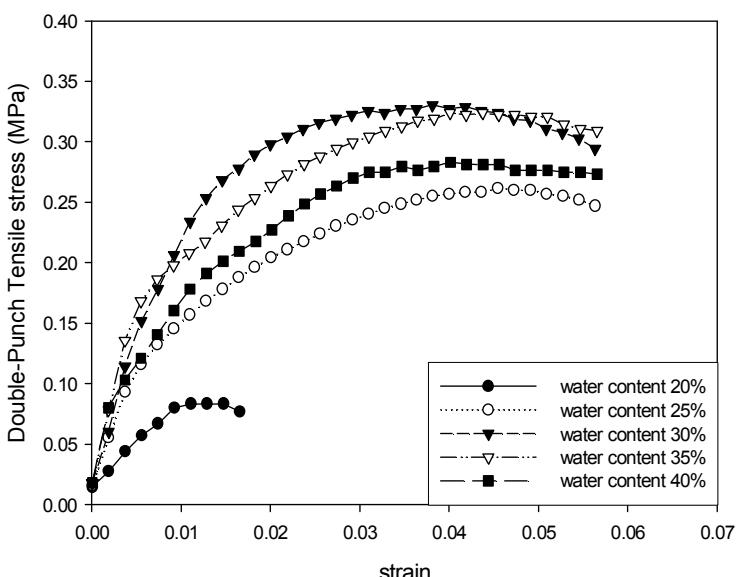


Fig. 4-20 표준직경 공시체의 일축관입시험 2차 결과

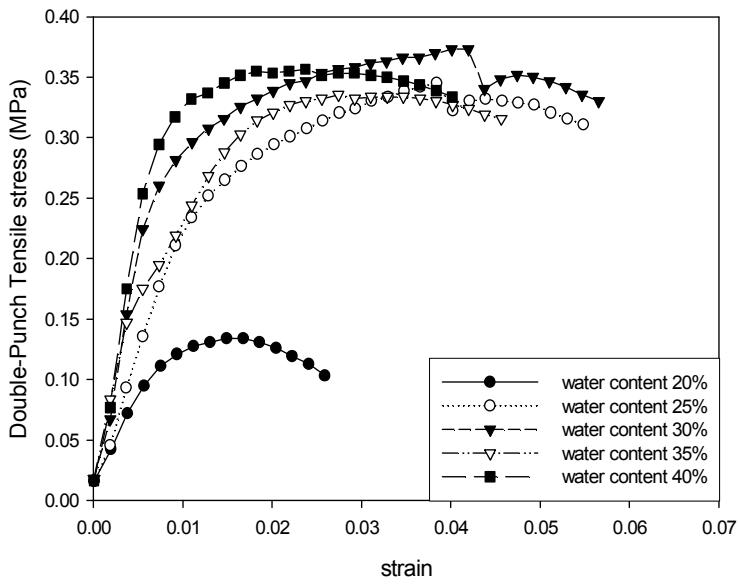


Fig. 4-21 표준직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과

Table 4-7 표준직경 공시체의 일축관입시험 결과

Water content	Max Spilt Tensile Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	0.091	0.083	0.136	0.103
25%	0.265	0.261	0.349	0.292
30%	0.339	0.331	0.374	0.348
35%	0.311	0.322	0.337	0.323
40%	0.239	0.283	0.342	0.293

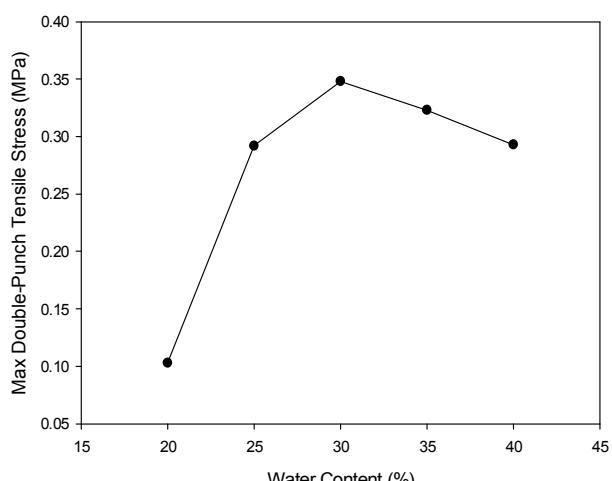


Fig. 4-22 표준직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과

동결 화강풍화토의 일축관입 시험결과 함수비에 따라서 $0.09 \sim 0.36$ MPa로 분포함을 알 수 있다. 이번 시험에서 특이한 점은 앞의 쪼캡 인장강도 시험에서 함수비가 증가하면 강도도 같이 증가하는 것을 볼 수 있는데 일축관입시험에서는 함수비가 30%이상에서는 거의 증가하지 않고 오히려 줄어드는 것 알 수 있다. Fig. 4-8나타난 일축관입 시험과 쪼캡 인장시험을 비교해보면 함수비가 30%일 때 약 3.5배나 작게 나오는 것을 알 수 있다. 이는 공시체 내부의 중심부분에 냉각되지 않은 부동수분의 존재와 관계가 있다고 볼 수 있다.

4.3.2 축소직경 공시체 ($73.8\text{mm} \times 150\text{mm}$)의 일축관입시험

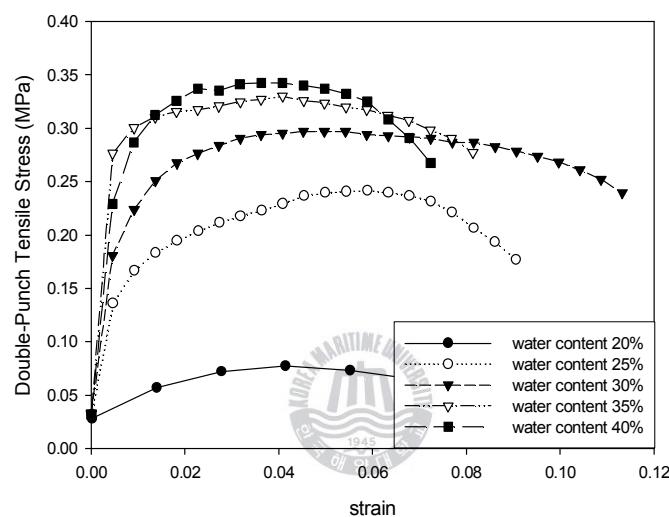


Fig. 4-23 축소직경 공시체의 일축관입시험 1차 결과

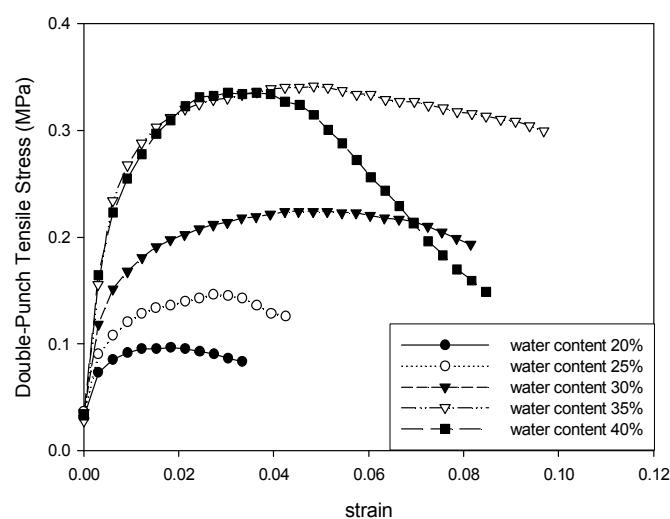


Fig. 4-24 축소직경 공시체의 일축관입시험 2차 결과

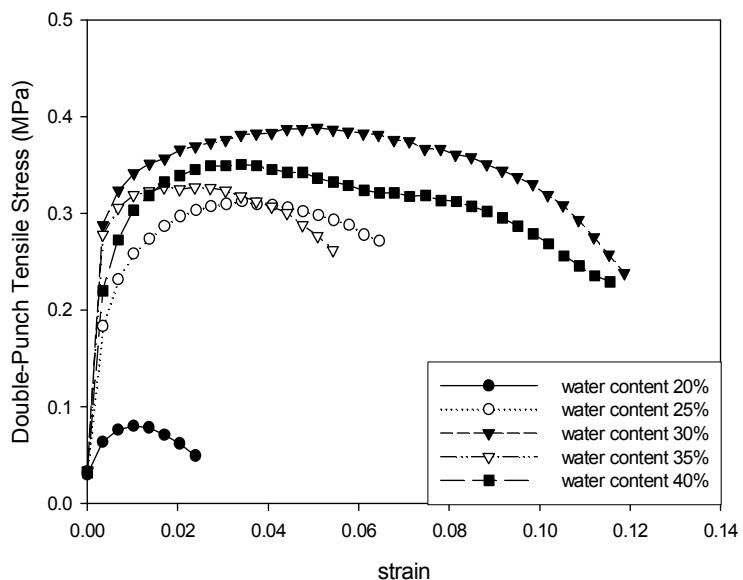


Fig. 4-25 축소직경 공시체의 일축관입시험 3차 결과

Table 4-8 축소직경 공시체의 일축관입시험 결과

Water content	Max Spilt Tensile Strength (MPa)			
	1차	2차	3차	평균
20%	0.080	0.097	0.082	0.087
25%	0.243	0.147	0.313	0.235
30%	0.299	0.233	0.343	0.307
35%	0.330	0.342	0.328	0.333
40%	0.346	0.337	0.352	0.345

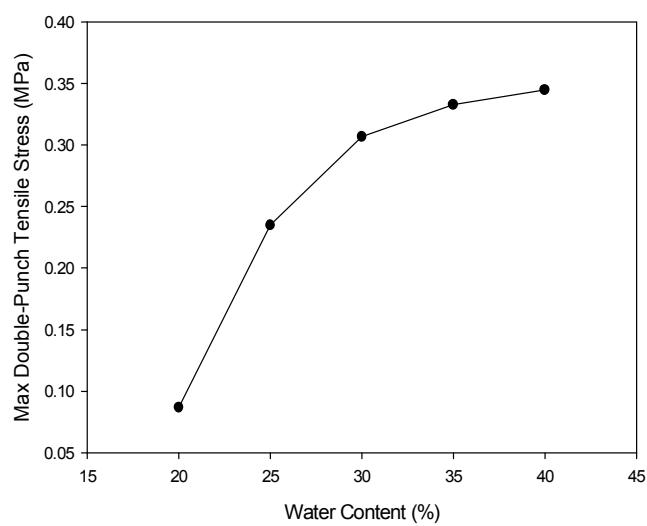


Fig. 4-26 축소직경 공시체의 최대 일축관입인장강도

일축관입시험의 경우 그 인장강도 값이 함수비에 따라 $0.08 \sim 0.35$ MPa로 분포함을 확인할 수 있었다. Fig. 4-26에서 보이는 것과 같이 최대 강도 값은 함수비 40%일 때 나타나지만, 함수비 30%에서부터 그 값은 변동이 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 쪼갬 인장강도 값과 비슷한 경향으로 보이며, 일축관입시험의 인장강도 역시 함수비가 높을수록 얼음의 영향을 많이 받는 것으로 보인다.

4.3.3 공시체 직경에 따른 일축관입인장강도 결과 비교

Table 4-9 공시체 직경에 따른 최대 일축관입인장강도

	Max Double-Punch Tensile Strength (MPa)	
Water content	73.8mm*150mm	100mm*200mm
20%	0.087	0.103
25%	0.235	0.292
30%	0.307	0.348
35%	0.333	0.323
40%	0.345	0.293

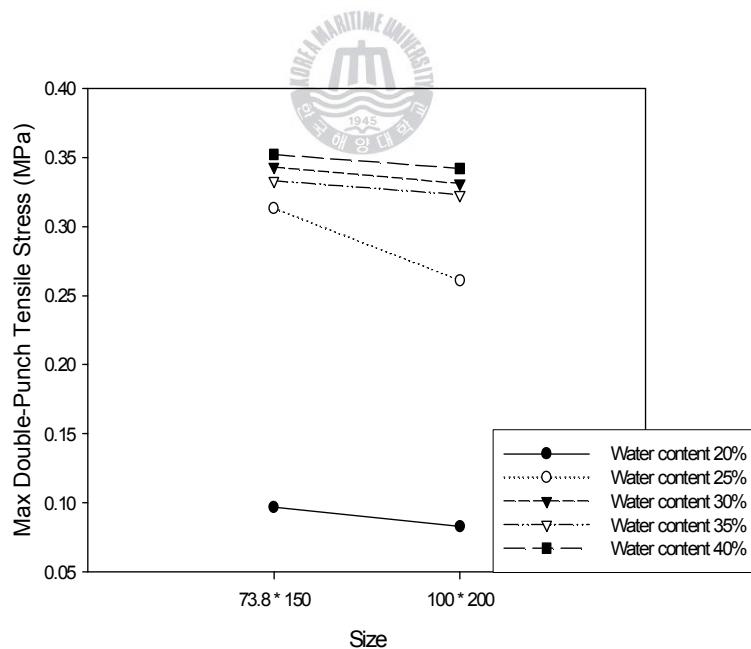


Fig. 4-27 직경 변화에 따른 최대 일축관입인장강도 변화 곡선

일축관입인장강도의 경우 크기변화에 따른 강도 변화를 나타낸 Fig. 4-27과 같이 그 경향이 쪼갬 인장의 경우와 비슷하게 나왔다. 포화함수비 이하의 경우 강도 값의 변화가 비교적 차이가 크게 나타났지만, 포화함수비 이상의 경우 역시 그 차이가 작아져 비슷한 강도가 측정되었다. 이는 공시체가 포화됨에 따라 부빙점토가 되어 공시체 강도가 얼음의 영향에 의해 비슷하게 측정됨을 알 수 있다.

4.4 동결 사질혼합토 공시체의 일축압축시험 결과 분석

4.4.1 표준직경 공시체 (100mm*200mm)의 일축압축시험

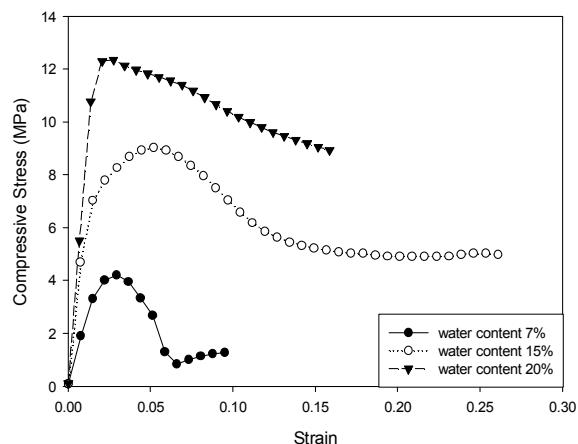


Fig. 4-28 kaolinite 10%의 일축압축시험 1차 결과

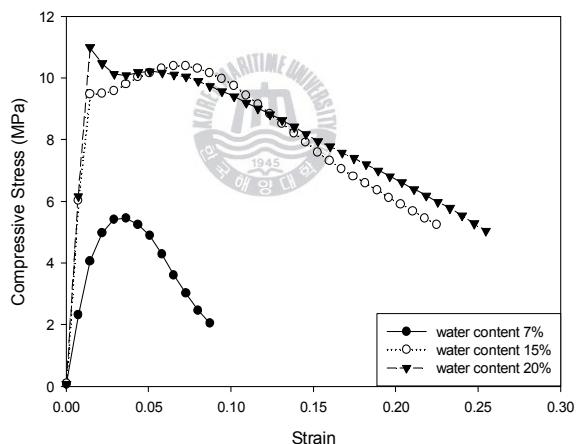


Fig. 4-29 kaolinite 20%의 일축압축시험 1차 결과

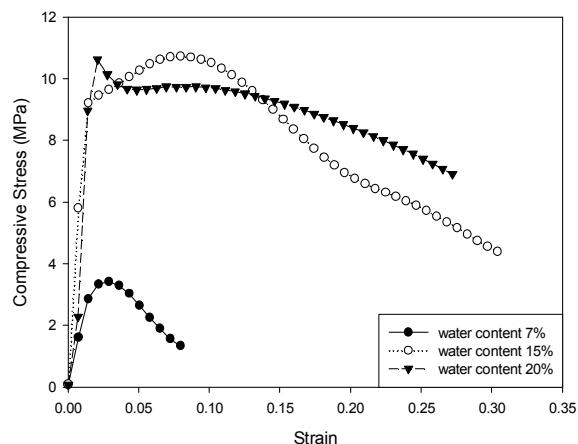


Fig. 4-30 kaolinite 30%의 일축압축시험 1차 결과

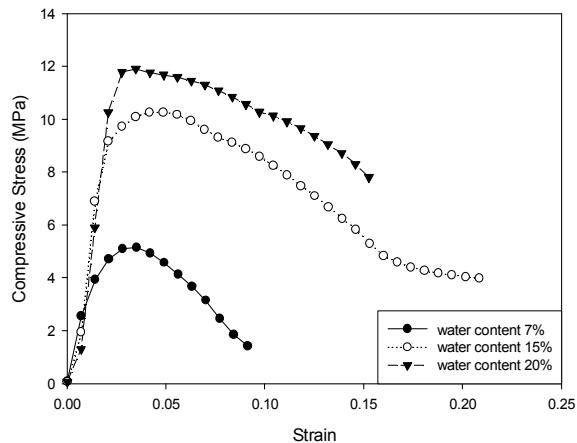


Fig. 4-31 kaolinite 10%의 일축압축시험 2차 결과

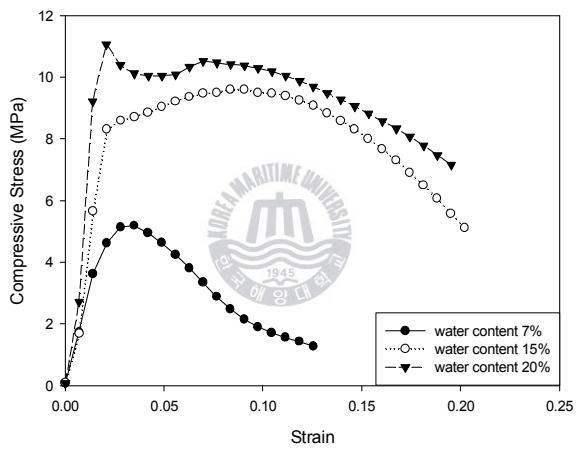


Fig. 4-32 kaolinite 20%의 일축압축시험 2차 결과

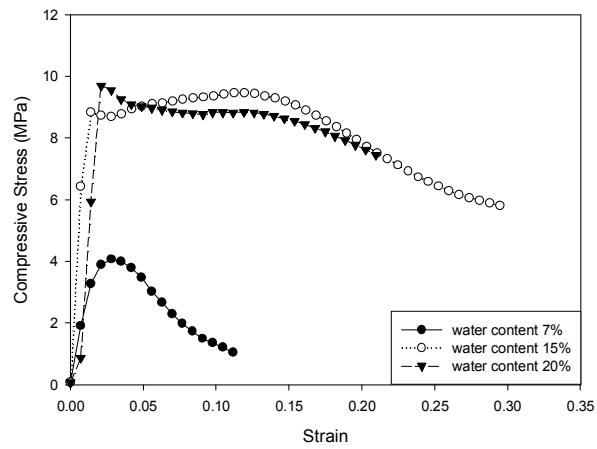


Fig. 4-33 kaolinite 30%의 일축압축시험 2차 결과

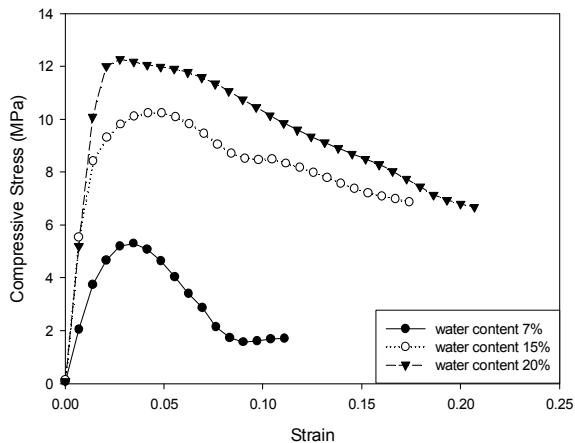


Fig. 4-34 kaolinite 10%의 일축압축시험 3차 결과

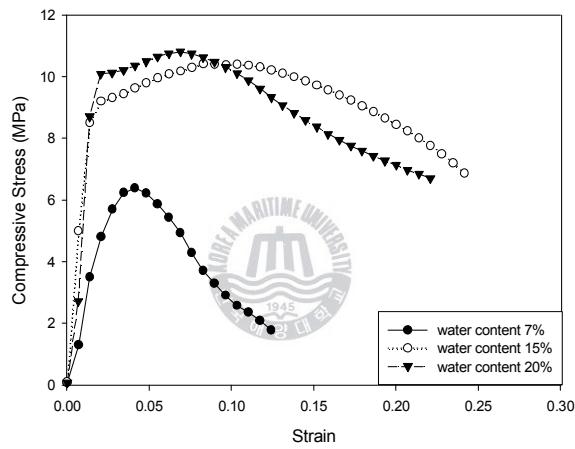


Fig. 4-35 kaolinite 20%의 일축압축시험 3차 결과

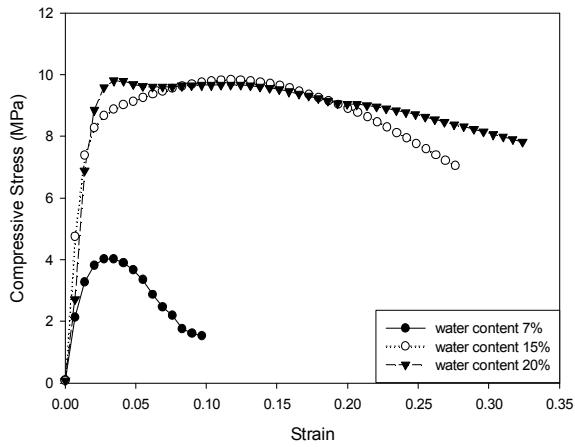


Fig. 4-36 kaolinite 30%의 일축압축시험 3차 결과

Table 4-10 표준직경 공시체의 일축압축시험 결과

kaolinite content	water content	Max Compressive Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	4.214	5.171	5.331	4.905
	15%	9.032	10.298	10.268	9.866
	20%	12.390	11.960	12.276	12.209
20%	7%	5.482	5.221	6.383	5.695
	15%	10.412	9.653	10.430	10.165
	20%	11.051	11.102	10.804	10.986
30%	7%	3.430	4.081	4.052	3.854
	15%	10.743	9.480	9.843	10.022
	20%	10.637	9.809	9.807	10.084

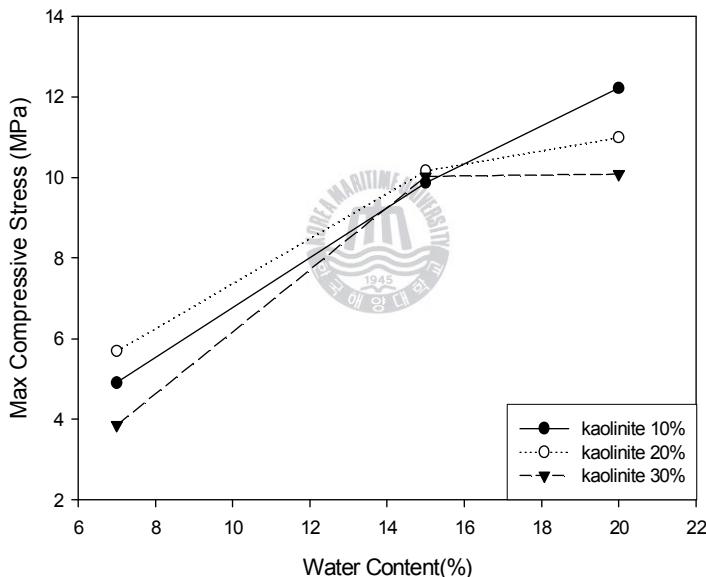


Fig. 4-37 표준직경 공시체의 최대 일축압축강도

주문진 표준사와 kaolinite를 혼합한 사질혼합토는 포화 함수비가 20% 전후로 나타난다. 동결 공시체의 최대 일축압축강도는 함수비 15 ~ 20%에서 측정되었고, 최대 일축압축강도는 9.8 ~ 12.4MPa 이고, 이는 kaolinite의 함유량에 따라 강도 값의 차이는 있으나 9개의 공시체의 대부분이 포화함수비에 가까울수록 최대 압축강도 값을 나타내고 있음을 말해주고 있다.

4.4.2 축소직경 공시체 (73.8mm*150m)의 일축압축시험

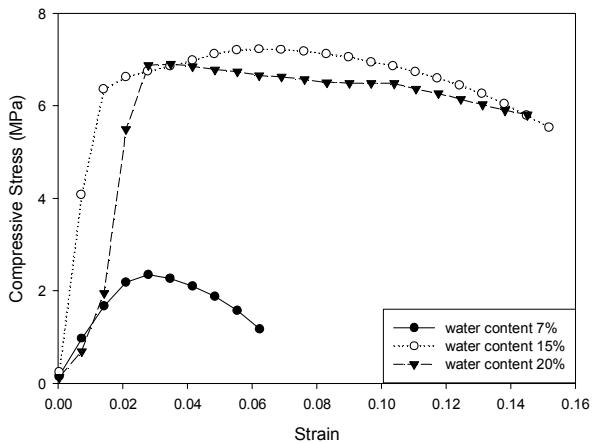


Fig. 4-38 kaolinite 10%의 일축압축시험 1차 결과

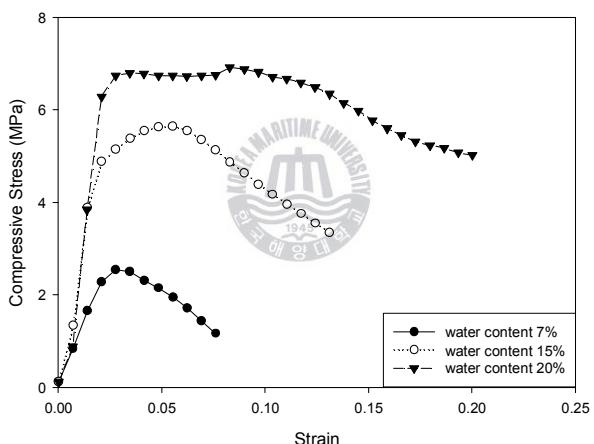


Fig. 4-39 kaolinite 20%의 일축압축시험 1차 결과

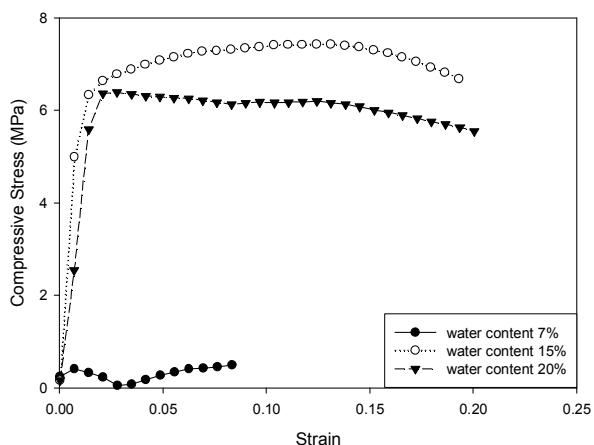


Fig. 4-40 kaolinite 30%의 일축압축시험 1차 결과

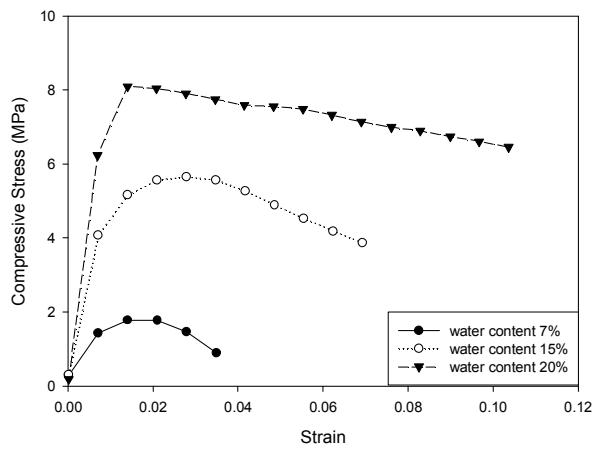


Fig. 4-41 kaolinite 10%의 일축압축시험 2차 결과

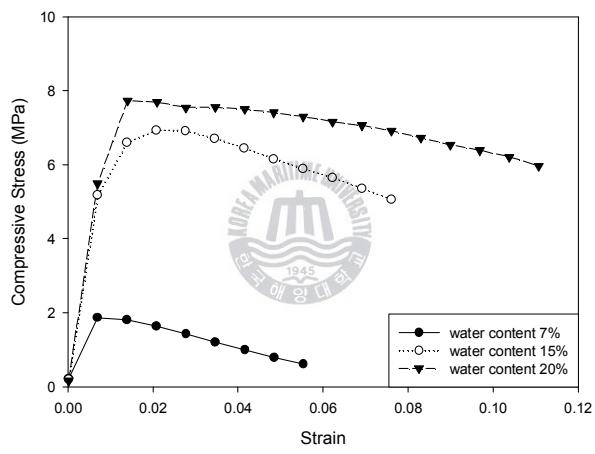


Fig. 4-42 kaolinite 20%의 일축압축시험 2차 결과

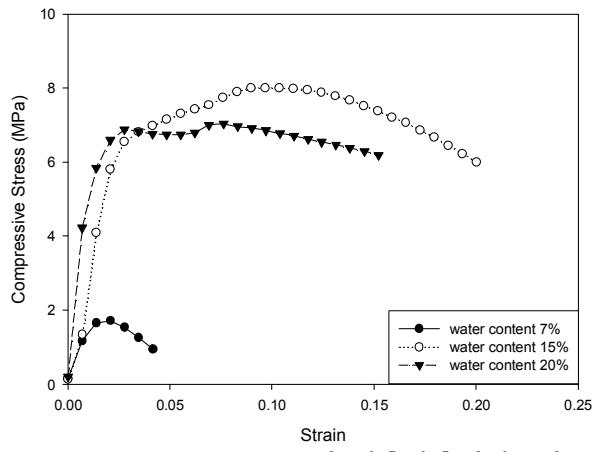


Fig. 4-43 kaolinite 30%의 일축압축시험 2차 결과

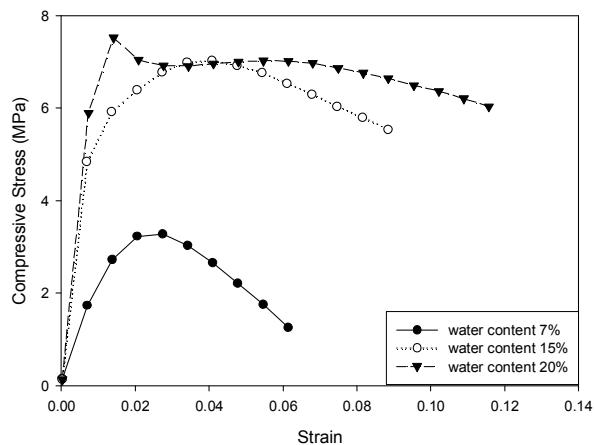


Fig. 4-44 kaolinite 10%의 일축압축시험 3차 결과

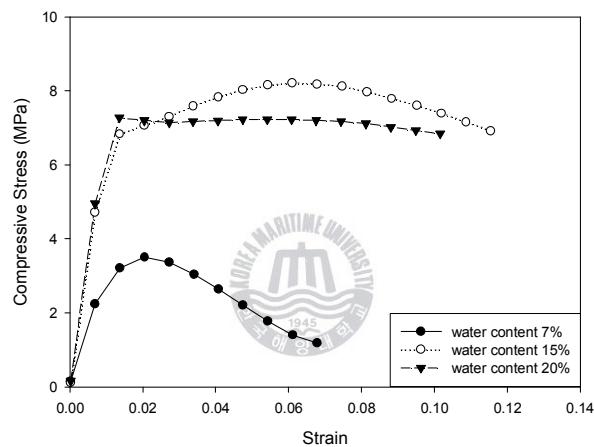


Fig. 4-45 kaolinite 20%의 일축압축시험 3차 결과

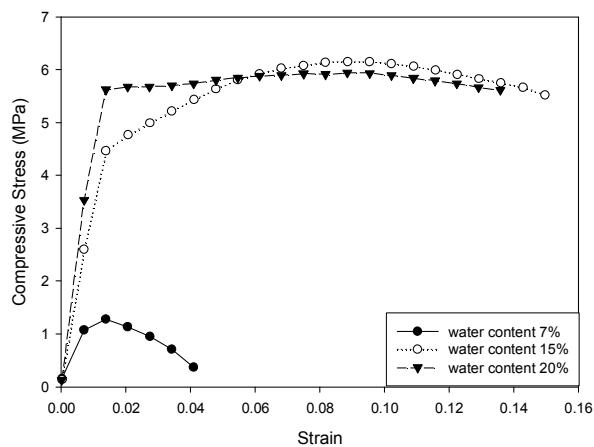


Fig. 4-46 kaolinite 30%의 일축압축시험 3차 결과

Table 4-11 축소직경 공시체의 일축압축시험 결과

kaolinite content	water content	Max Compressive Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	3.302	2.581	1.823	2.574
	15%	7.041	5.673	5.681	6.133
	20%	7.633	6.942	8.123	7.567
20%	7%	3.501	2.366	1.915	2.598
	15%	8.253	7.256	6.962	7.493
	20%	7.322	6.947	7.799	7.356
30%	7%	0.501	1.801	1.346	1.216
	15%	6.163	7.466	8.059	7.226
	20%	5.978	6.410	7.049	6.481

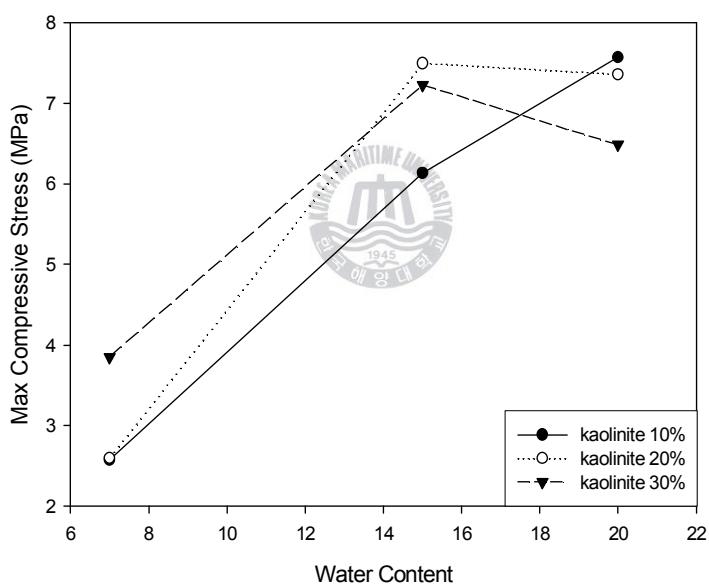


Fig. 4-47 축소직경 공시체의 최대 일축압축강도

Fig. 4-47에 나타난 함수비에 따른 최대 일축압축강도는 시료가 포화될 때 까지는 함수비가 증가함에 따라 강도 역시 증가하는 것을 알 수 있었다. 포화 상태 이후의 함수비에 대해서는 실험에 대해서는 공시체 자체가 액성이 너무 심해 다짐을 할 수 없을 정도여서 시험에 대해 수행이 불가했다. 20%함수비일 경우보다 15%함수비일 때의 강도가 더 높게 나타나는 결과도 나타났는데 이는 시험 수행 과정에서 수분이 첨가되었거나, Cold Room 내에서 동결시키는 도중 rapping이 잘 되지 않아서 수분이 증발했을 경우의 오차로 판단되어서, 재시험을 한 결과, 역시 같은 현상이 나타나 kaolinite함유량에 있어 20%를 넘어서면서부터 20%함수비를 가지는 공시체는 다짐 시 7% 함수비의 공시체보다 별장현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있었다. 따라서 이 결과 차이는 다짐에너지의 차이 때문인 것으로 판단된다.

4.4.3 공시체 직경에 따른 일축압축강도 결과 비교

Table 4-12 공시체 직경에 따른 최대 일축압축강도

kaolinite content	water content	Max Compressive Strength (MPa)	
		73.8mm*150mm	100mm*200mm
10%	7%	2.574	4.905
	15%	6.133	9.866
	20%	7.567	12.209
20%	7%	2.598	5.695
	15%	7.493	10.165
	20%	7.356	10.986
30%	7%	1.216	3.854
	15%	7.226	10.022
	20%	6.481	10.084

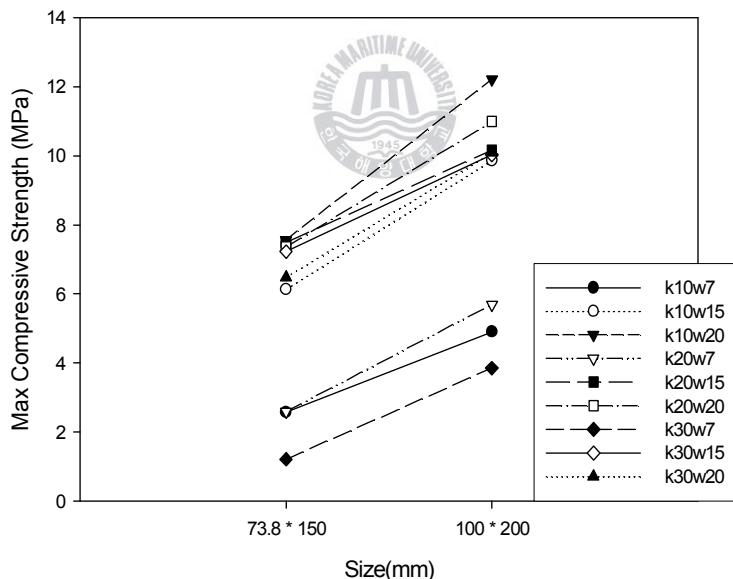


Fig. 4-48 직경 변화에 따른 최대 일축압축강도 변화 곡선

본 논문은 직경에 관련해 공시체의 재료와 함수비, 점토 함유량에 따라 강도가 어떻게 변하는지에 대해 서술하고 있다. 다른 경우의 시험과는 대조적으로 사질혼합토의 일축압축강도는 직경크기에 비례하여 커지고 있는 것을 발견하게 되었는데, 이는 몇 차례 재시험을 통한 재검토에도 역시 마찬가지로 발견 되었다. 점토로만 구성된 화강풍화토와는 다르게 혼합토의 경우 그 강도가 직경의 두께보다는 포화함수비와 적은 점토 함유율에 관계하여 최대값을 가진다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 사질토가 점토보다 높은 강도 값을 가지고 있다. 따라서 점토 함유량이 높을수록 그 강도 값이 적게 측정된다.

4.5 동결 사질혼합토 공시체의 쪼慨인장시험 결과 분석

4.5.1 표준직경 공시체 (100mm*200m)의 쪼慨인장시험

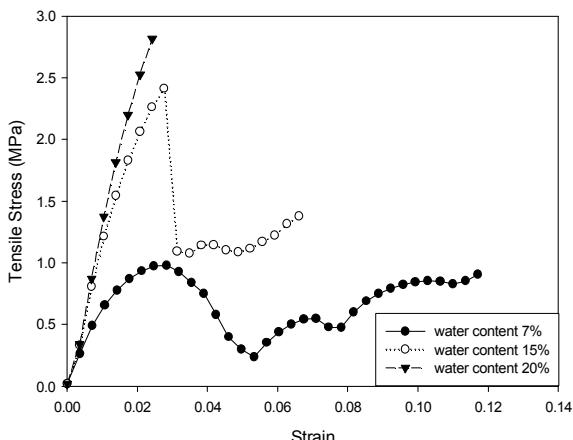


Fig. 4-49 kaolinite 10%의 쪼慨인장시험 1차 결과

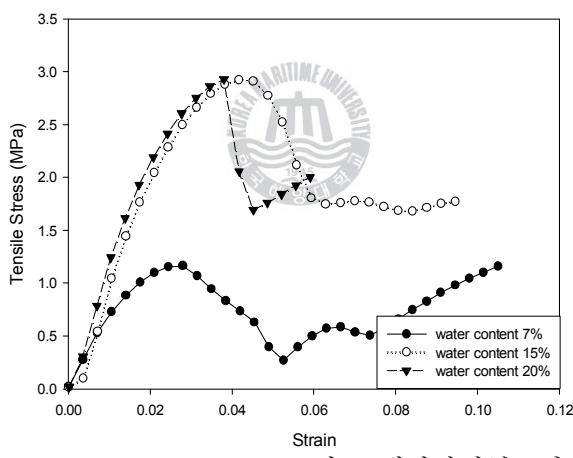


Fig. 4-50 kaolinite 20%의 쪼慨인장시험 1차 결과

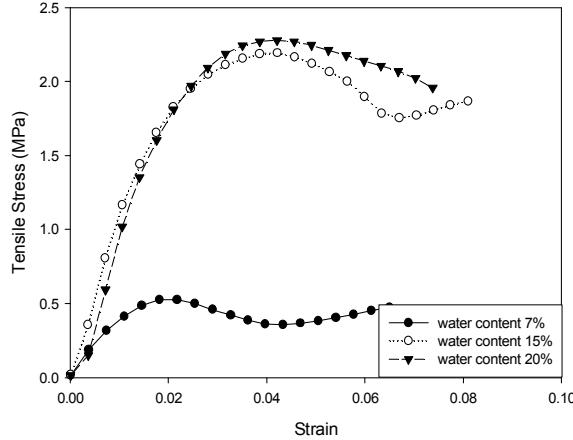


Fig. 4-51 kaolinite 30%의 쪼慨인장시험 1차 결과

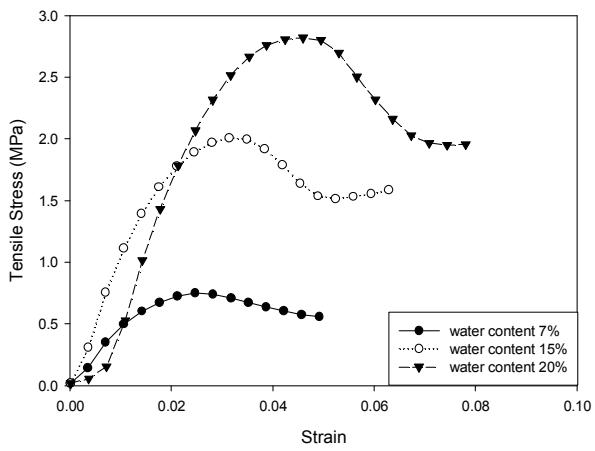


Fig. 4-52 kaolinite 10%의 쪼갬인장시험 2차 결과

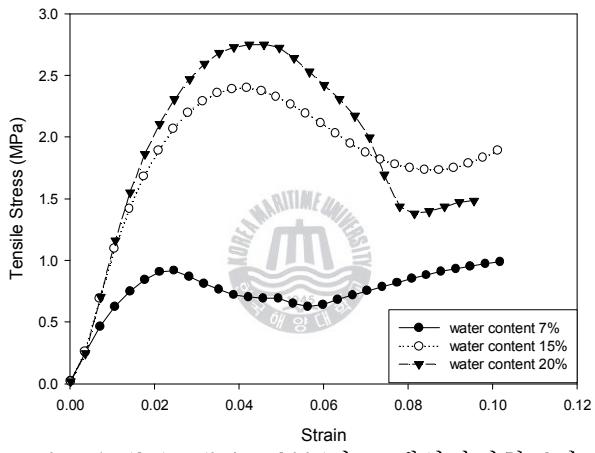


Fig. 4-53 kaolinite 20%의 쪼갬인장시험 2차 결과

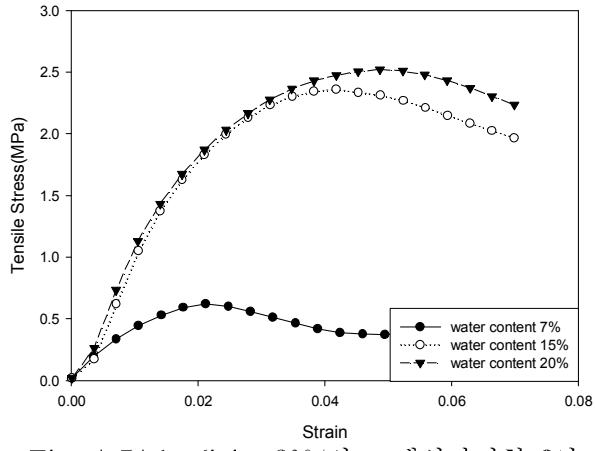


Fig. 4-54 kaolinite 30%의 쪼갬인장시험 2차 결과

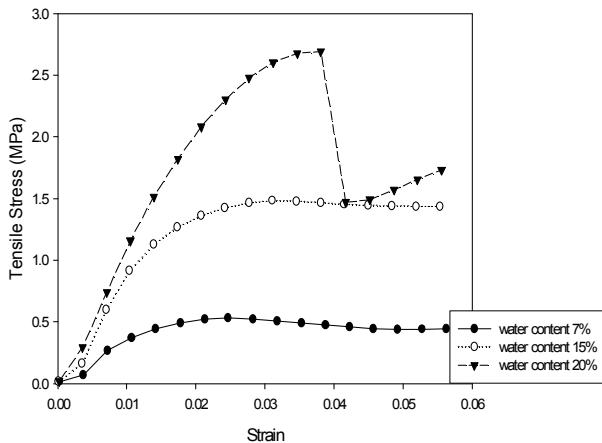


Fig. 4-55 kaolinite 10%의 쪼갬인장시험 3차 결과

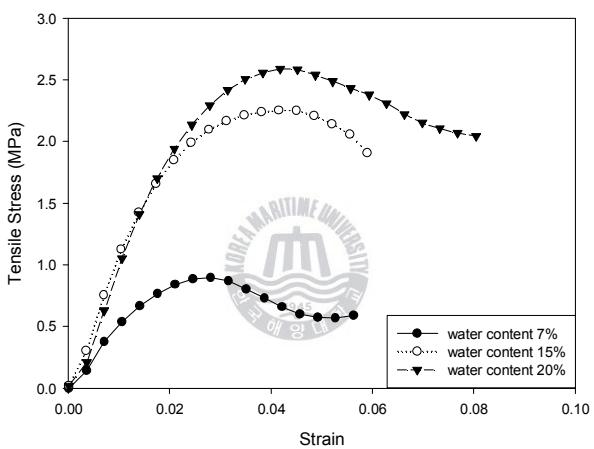


Fig. 4-56 kaolinite 20%의 쪼갬인장시험 3차 결과

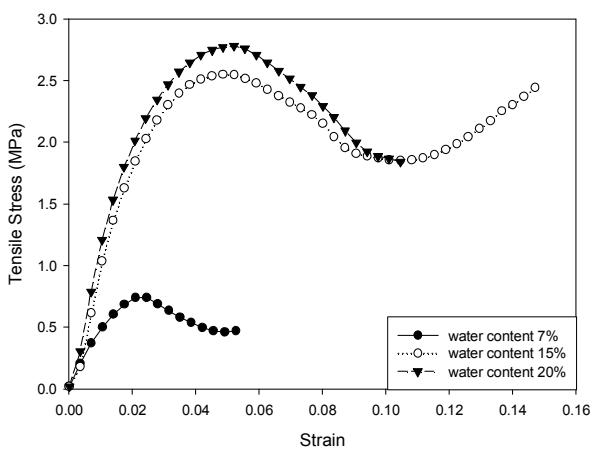


Fig. 4-57 kaolinite 30%의 쪼갬인장시험 3차 결과

Table 4-13 표준직경 공시체의 쪼갬인장시험 결과

kaolinite content	water content	Max Tensile Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	0.982	0.820	0.533	0.778
	15%	2.488	2.014	1.487	1.996
	20%	2.878	2.820	2.694	2.795
20%	7%	1.171	0.992	0.899	1.021
	15%	2.932	2.401	2.257	2.530
	20%	2.960	2.756	2.590	2.769
30%	7%	0.532	0.075	0.747	0.640
	15%	2.197	2.363	2.554	2.371
	20%	2.282	2.524	2.782	2.529

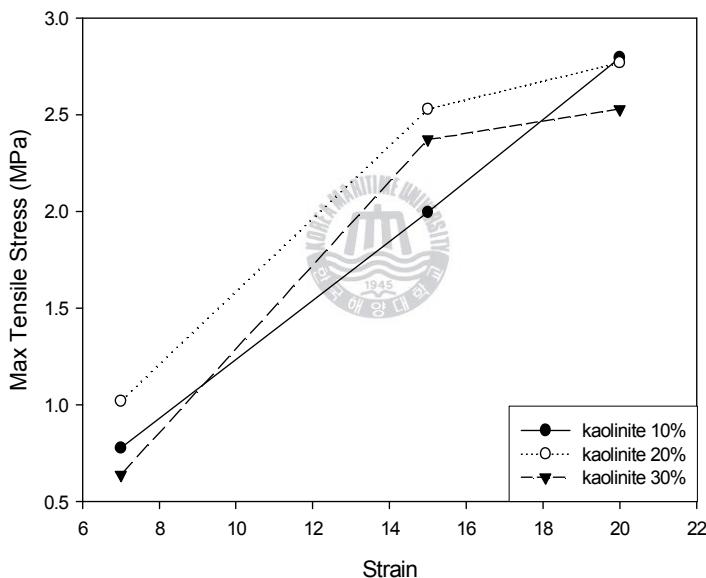


Fig. 4-58 표준직경 공시체의 최대 쪼갬인장강도

함수비의 증가에 따라 최대 인장강도가 증가하고 있음을 알 수 있다. 불포화일 경우 강도 증가량이 빠르게 증가하나 포화 함수비의 근처에서는 그 증가량이 줄어들고 있다. 점토의 합유량에 상관없이 9개의 공시체 모두 포화함수비 근처에서 최대 강도를 갖는다. 이는 다짐 시험후의 공시체 속 간극이 거의 공기가 빠져나가고, 그 자리를 수분이 차지하고 동결되기 때문에 최대 강도가 측정되는 것으로 판단된다.

4.5.2 축소직경 공시체 (73.8mm*150m)의 쪼慨인장시험

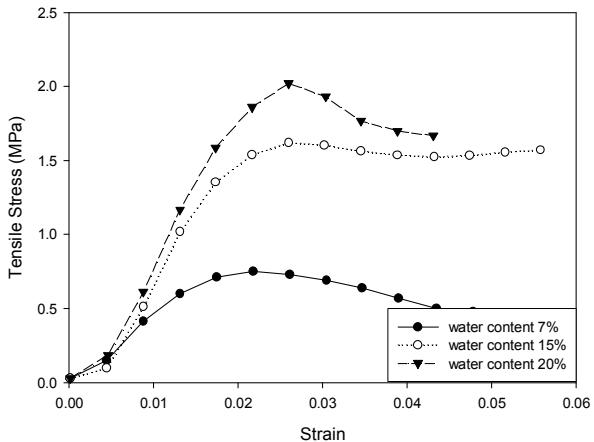


Fig. 4-59 kaolinite 10%의 쪼慨인장시험 1차 결과

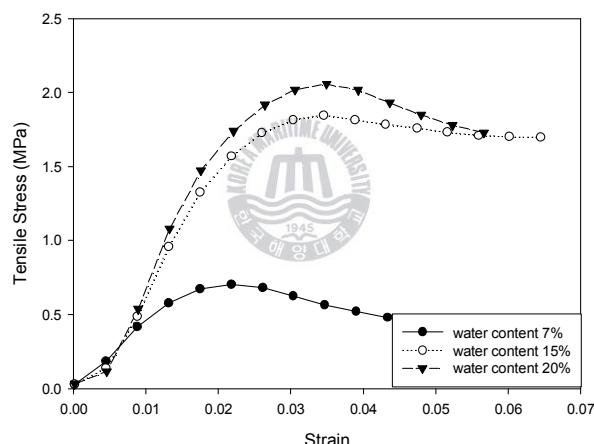


Fig. 4-60 kaolinite 20%의 쪼慨인장시험 1차 결과

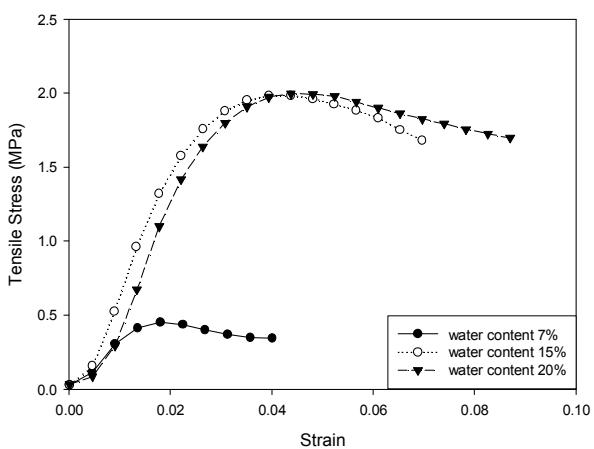


Fig. 4-61 kaolinite 30%의 쪼慨인장시험 1차 결과

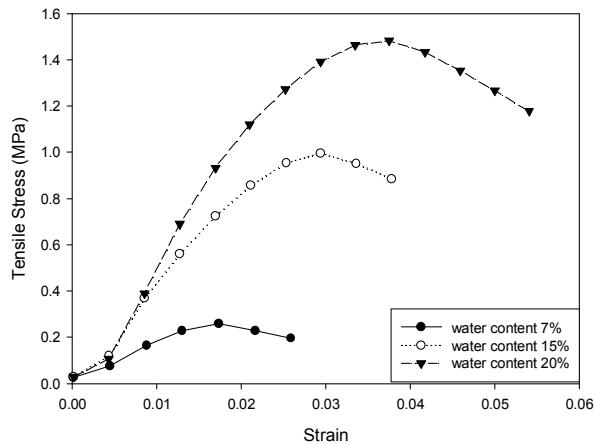


Fig. 4-62 kaolinite 10%의 쪼갬인장시험 2차 결과

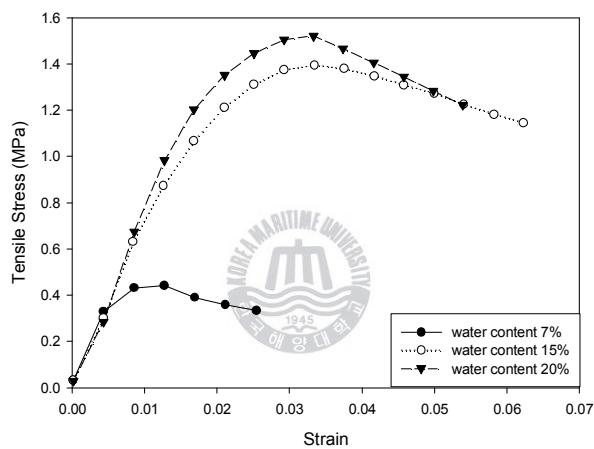


Fig. 4-63 kaolinite 20%의 쪼갬인장시험 2차 결과

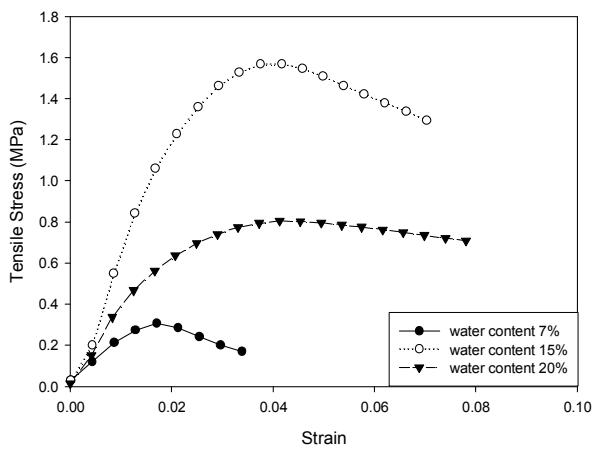


Fig. 4-64 kaolinite 30%의 쪼갬인장시험 2차 결과

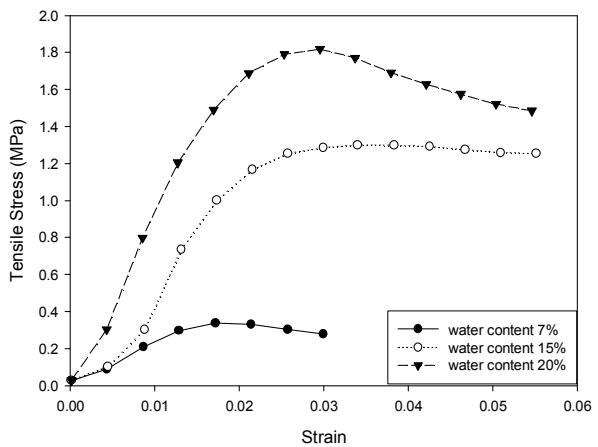


Fig. 4-65 kaolinite 10%의 쪼갬인장시험 3차 결과

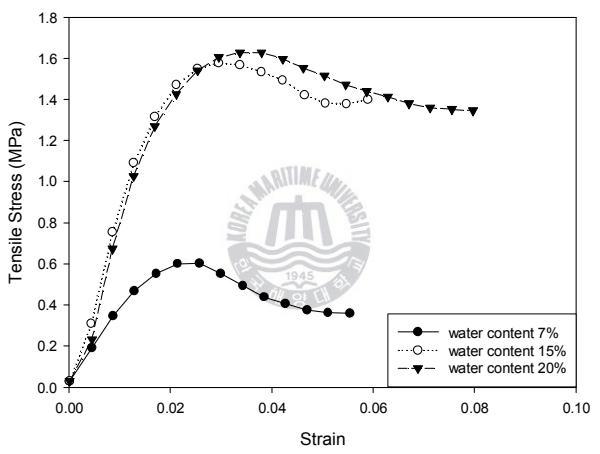


Fig. 4-66 kaolinite 20%의 쪼갬인장시험 3차 결과

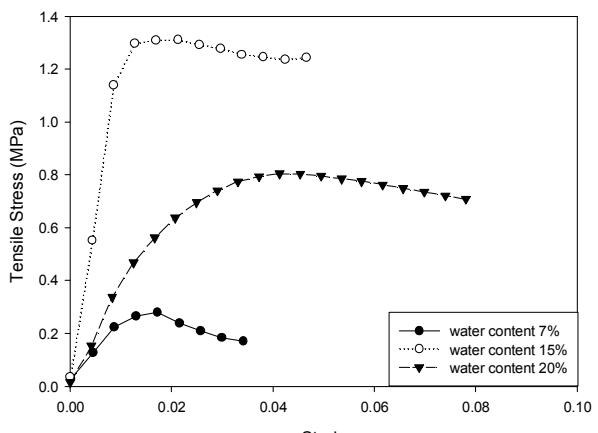


Fig. 4-67 kaolinite 30%의 쪼갬인장시험 3차 결과

Table 4-14 축소직경 공시체의 쪐캡인장시험 결과

kaolinite content	water content	Max Tensile Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	0.752	0.261	0.343	0.452
	15%	1.625	0.999	1.303	1.309
	20%	2.046	1.485	2.221	1.917
20%	7%	0.706	0.449	0.613	0.589
	15%	1.848	1.398	1.581	1.609
	20%	2.061	1.523	1.636	1.740
30%	7%	0.452	0.311	0.283	0.355
	15%	1.984	1.571	1.317	1.624
	20%	2.004	0.808	0.808	1.207

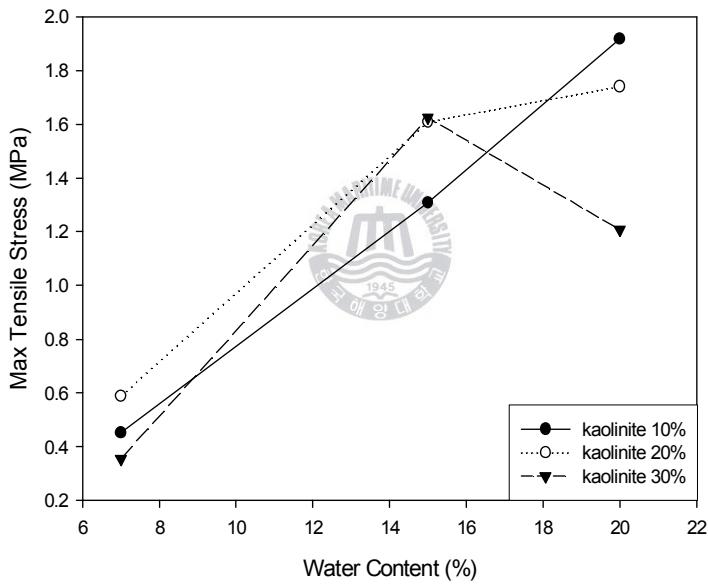


Fig. 4-68 축소직경 공시체의 최대 쪐캡인장강도

사질혼합토의 축소직경 최대 쪐캡인장강도는 Fig 4-68에서 볼 수 있듯이 함수비가 증가함에 따라 최대 강도 값도 같이 증가하고 있음을 알 수 있다. 대체적으로 최대 강도 값은 포화함수비 근처에서 나타났으며 이는 직경과는 상관이 없음을 알 수 있다. 하지만 점토 함유량이 많고 함수비가 높으면 액성화 되기 쉬워서 오히려 강도 값은 감소하게 되고, 이는 직경이 작을수록 더 심하게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4.5.3 공시체 직경에 따른 쪼갬인장강도 결과 비교

Table 4-15 공시체 직경에 따른 최대 쪼갬인장강도

kaolinite content	water content	Max Tensile Strength (MPa)	
		73.8mm*150mm	100mm*200mm
10%	7%	0.452	0.778
	15%	1.309	1.996
	20%	1.917	2.795
20%	7%	0.589	1.021
	15%	1.609	2.530
	20%	1.740	2.769
30%	7%	0.355	0.640
	15%	1.624	2.371
	20%	1.207	2.529

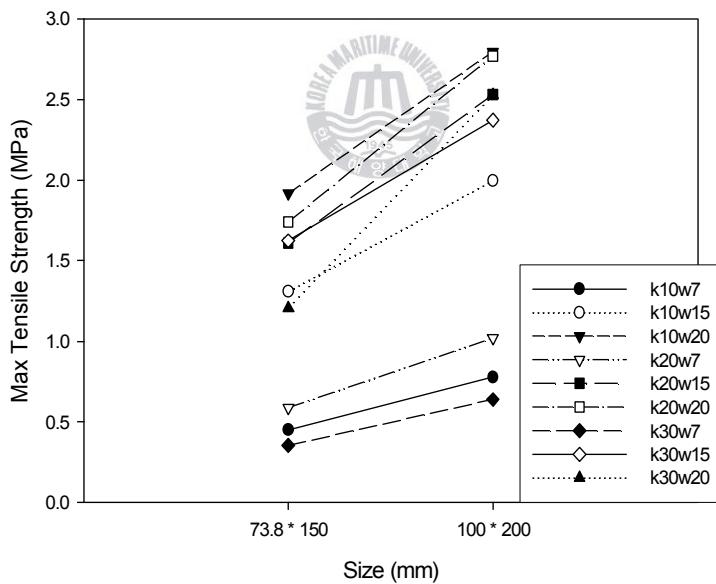


Fig. 4-69 직경 변화에 따른 최대 쪼갬인장강도 변화 곡선

Fig. 4-69에서 나타나듯이 직경이 클수록 강도 역시 더 커짐을 알 수 있다. 이는 점토만으로 구성된 화강풍화토와는 대조적인 결과로서, 점토와 사질토의 혼합토는 직경의 크기보다는 구성하고 있는 점토와 수분의 비율이 강도에 더 큰 영향을 미친다는 것을 나타내는 것이다.

4.6 동결 사질혼합토 공시체의 일축관입시험 결과 분석

4.6.1 표준직경 공시체 (100mm*200m)의 일축관입시험

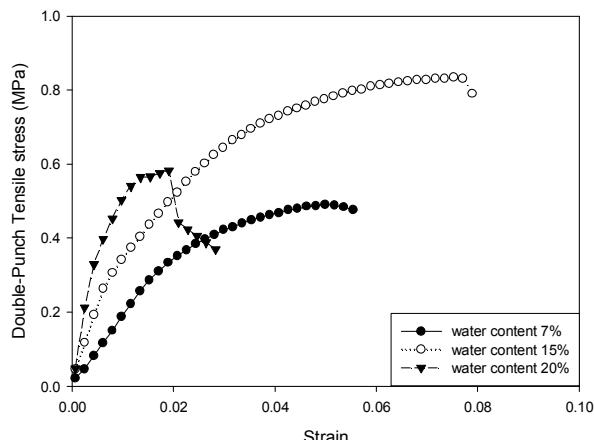


Fig. 4-70 kaolinite 10%의 일축관입시험 1차 결과

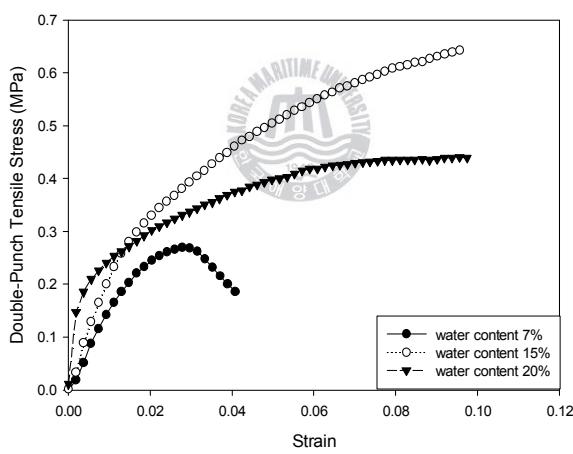


Fig. 4-71 kaolinite 20%의 일축관입시험 1차 결과

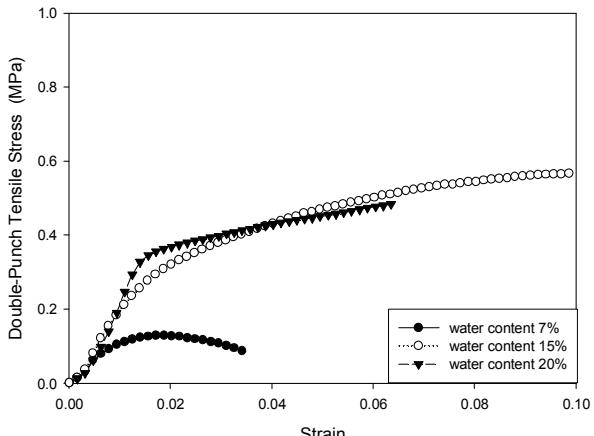


Fig. 4-72 kaolinite 30%의 일축관입시험 1차 결과

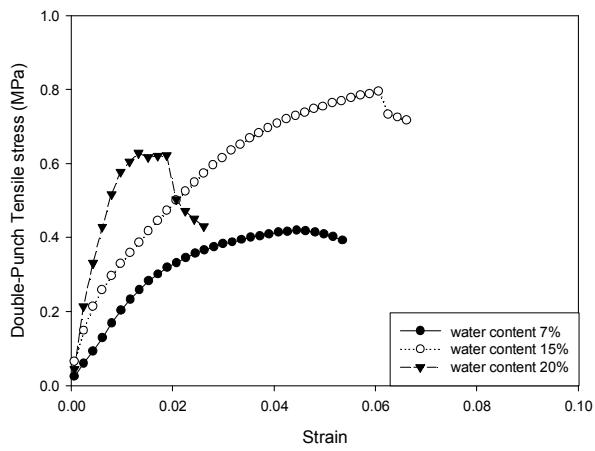


Fig. 4-73 kaolinite 10%의 일축관입시험 2차 결과

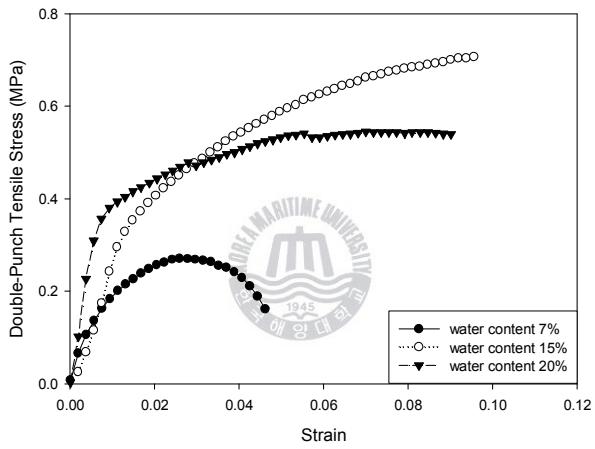


Fig. 4-74 kaolinite 20%의 일축관입시험 2차 결과

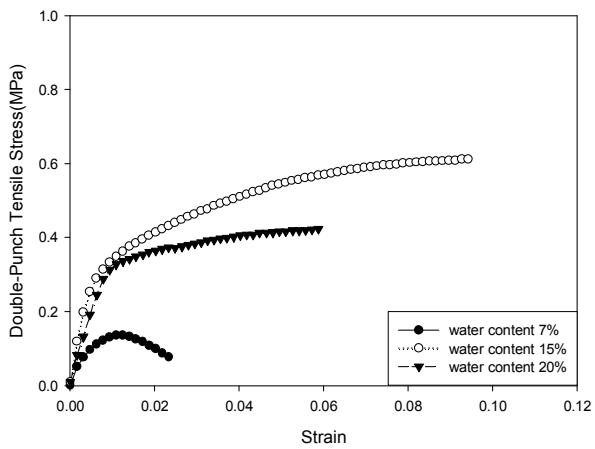


Fig. 4-75 kaolinite 30%의 일축관입시험 2차 결과

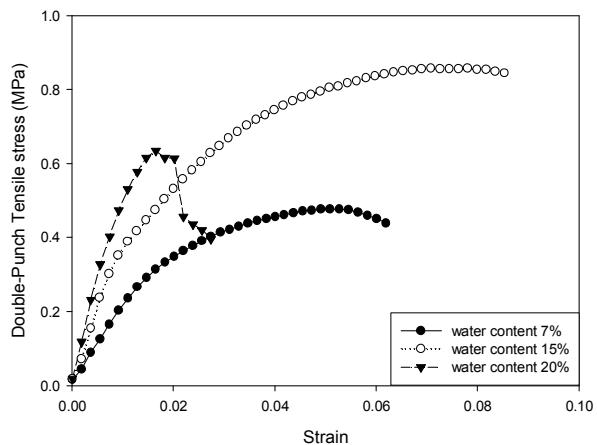


Fig. 4-76 kaolinite 10%의 일축관입시험 3차 결과

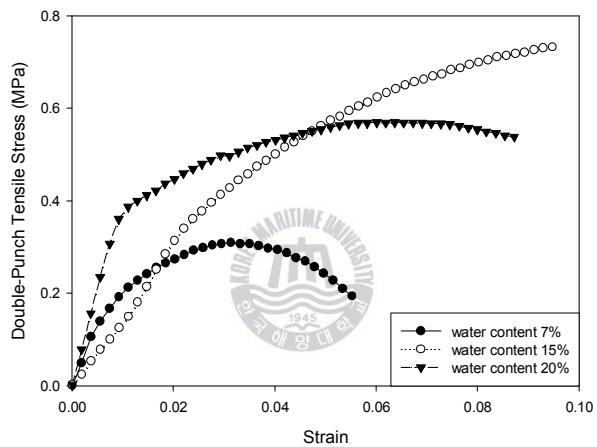


Fig. 4-77 kaolinite 20%의 일축관입시험 3차 결과

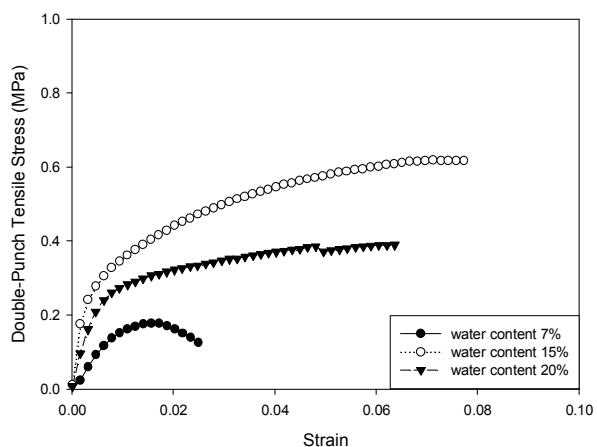


Fig. 4-78 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과

Table 4-16 표준직경 공시체의 일축관입시험 결과

kaolinite content	water content	Max Double-Punch Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	0.493	0.419	0.478	0.463
	15%	0.834	0.795	0.859	0.829
	20%	0.584	0.628	0.648	0.620
20%	7%	0.270	0.272	0.310	0.284
	15%	0.645	0.709	0.735	0.696
	20%	0.441	0.546	0.571	0.519
30%	7%	0.130	0.137	0.178	0.148
	15%	0.568	0.612	0.619	0.599
	20%	0.484	0.424	0.390	0.433

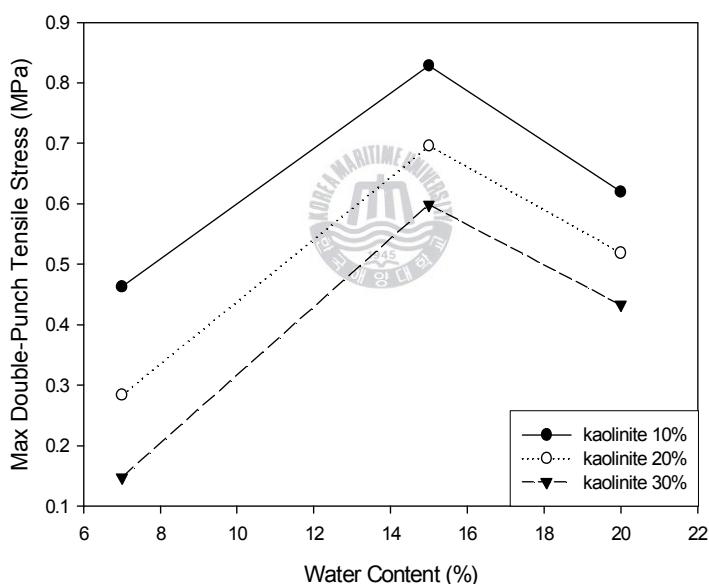


Fig. 4-79 표준직경 공시체의 최대 일축관입인장강도

Fig. 4-79에서 나타나듯이 표준직경의 사질혼합토 공시체에서는 포화함수비로 접근하면서 강도 값이 크게 측정되었다. 하지만 함수비 20%일 때 액성화가 쉽게 발생하기 때문에 강도가 낮아지는 결과를 볼 수 있었다. 따라서 상대적으로 높은 강도 값을 가지는 15%함수비 일 때 최대 강도 값이 나타났다. 표준직경 공시체의 최대 일축관입인장강도는 kaolinite 10%의 함수비 15%일 때 최대 인장강도가 발생하였다.

4.6.2 축소직경 공시체 (73.8mm*150m)의 일축관입시험

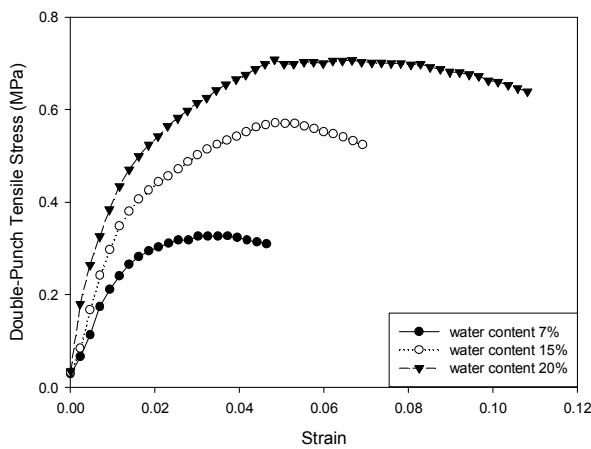


Fig. 4-80 kaolinite 10%의 일축관입시험 1차 결과

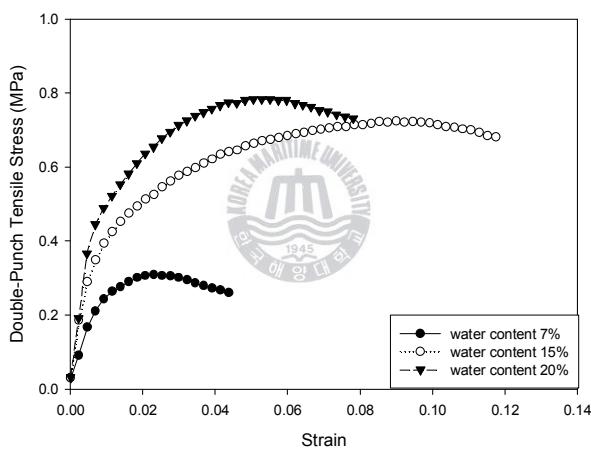


Fig. 4-81 kaolinite 20%의 일축관입시험 1차 결과

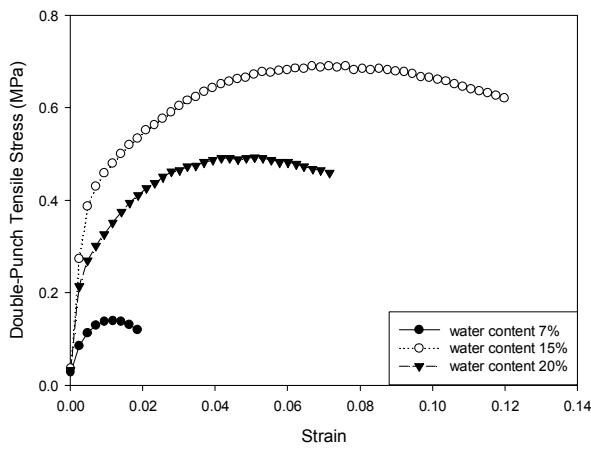


Fig. 4-82 kaolinite 30%의 일축관입시험 1차 결과

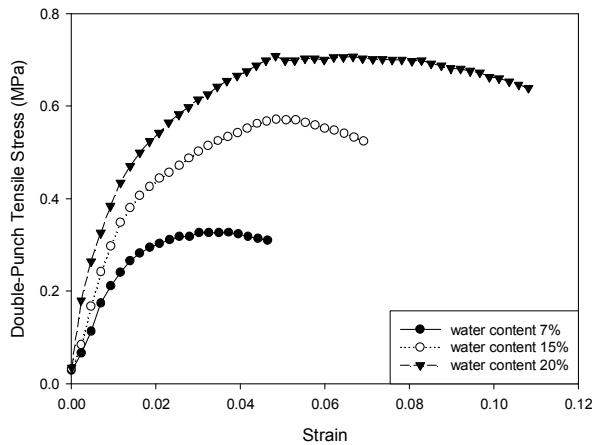


Fig. 4-83 kaolinite 10%의 일축관입시험 2차 결과

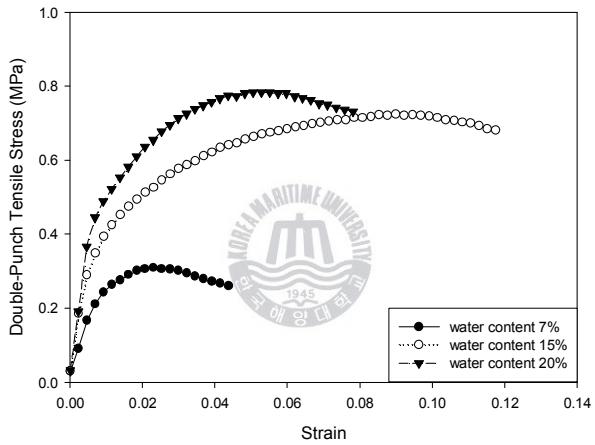


Fig. 4-84 kaolinite 20%의 일축관입시험 2차 결과

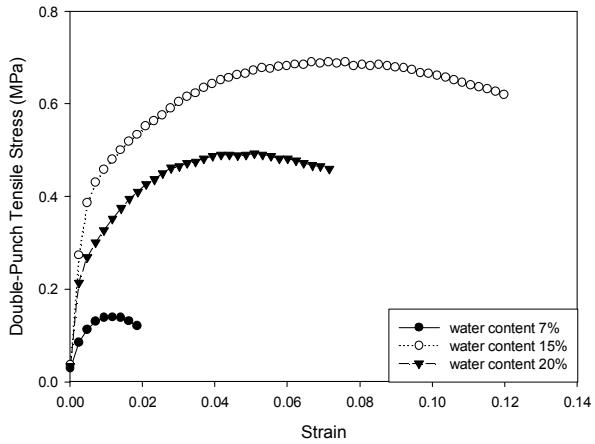


Fig. 4-85 kaolinite 30%의 일축관입시험 2차 결과

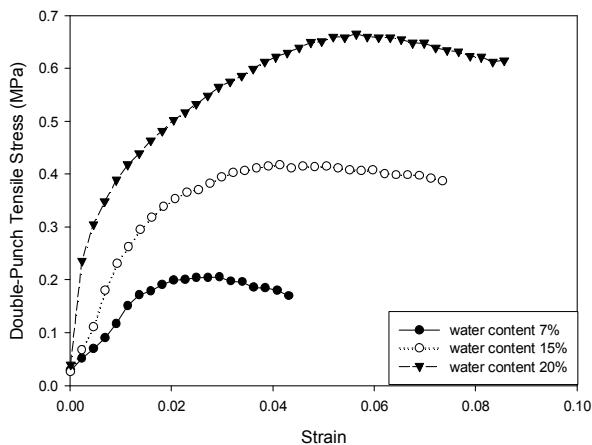


Fig. 4-86 kaolinite 10%의 일축관입시험 3차 결과

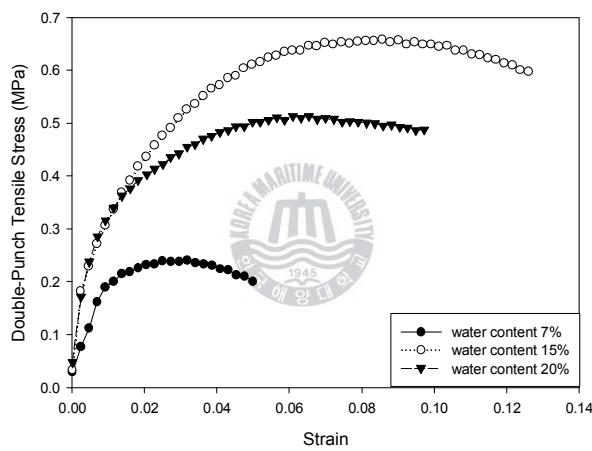


Fig. 4-87 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과

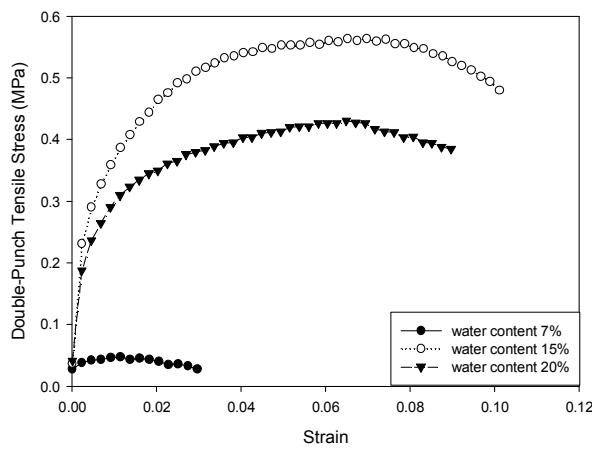


Fig. 4-88 kaolinite 30%의 일축관입시험 3차 결과

Table 4-17 축소직경 공시체의 일축관입시험 결과

kaolinite content	water content	Max Double-Punch Strength (MPa)			
		1차	2차	3차	평균
10%	7%	0.328	0.332	0.208	0.289
	15%	0.575	0.557	0.420	0.517
	20%	0.709	0.779	0.667	0.718
20%	7%	0.312	0.331	0.241	0.295
	15%	0.725	0.772	0.660	0.719
	20%	0.786	0.787	0.514	0.696
30%	7%	0.143	0.134	0.049	0.109
	15%	0.691	0.701	0.566	0.653
	20%	0.494	0.489	0.433	0.472

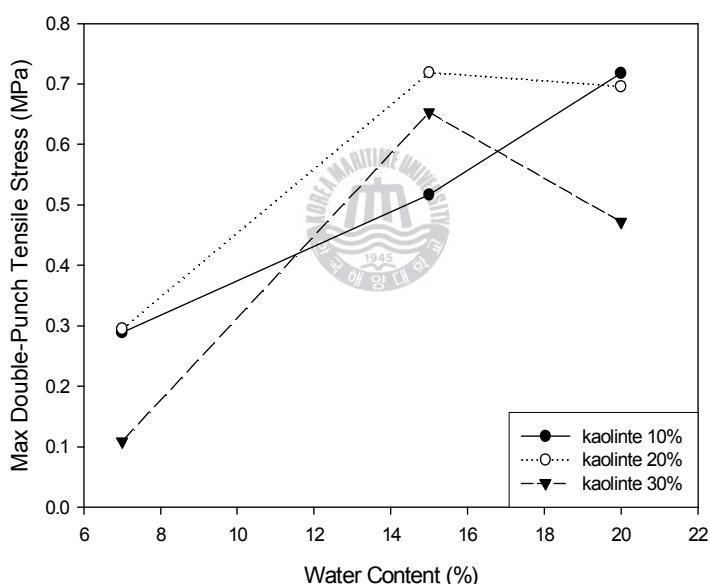


Fig. 4-89 축소직경 공시체의 최대 일축관입인장강도

Fig. 4-89에서 나타나듯이 포화함수비로 올라가면서 강도 값 역시 증가됨을 알 수 있다. 하지만 함수비 10%인 공시체에서는 kaolinite 30%일 때 비교적 높은 강도 값이 나왔으나, 함수비 30%인 공시체에서는 kaolinite 30%일 때 높은 액상화로 인해 강도 값이 떨어지는 것을 볼 수 있다. 직경이 축소된 공시체에서도 높은 점토 함유량과 함수비는 강도 값을 떨어뜨리는 요인으로 볼 수 있다.

4.6.3 공시체 직경에 따른 일축관입인장강도 결과 비교

Table 4-18 공시체 직경에 따른 최대 일축관입인장강도

kaolinite content	water content	Max Double-Punch Tensile Strength (MPa)	
		73.8mm*150mm	100mm*200mm
10%	7%	0.332	0.419
	15%	0.575	0.657
	20%	0.635	0.735
20%	7%	0.241	0.284
	15%	0.600	0.709
	20%	0.514	0.571
30%	7%	0.109	0.148
	15%	0.566	0.619
	20%	0.433	0.484

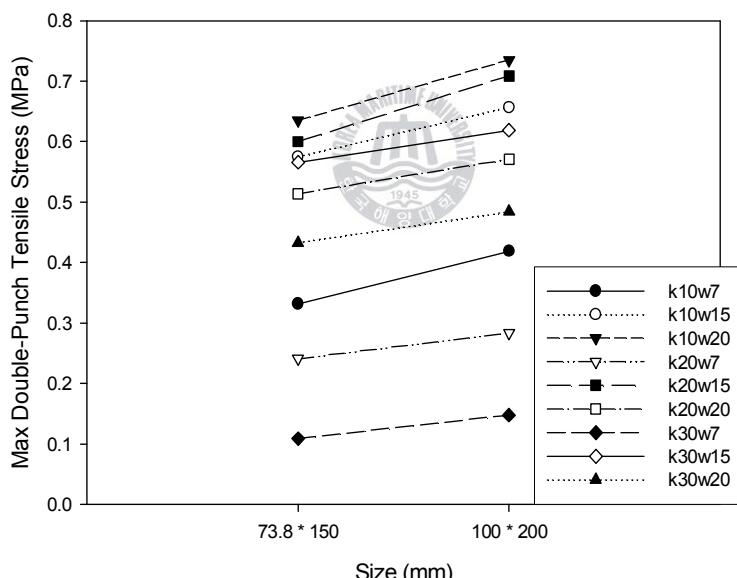


Fig. 4-90 직경 변화에 따른 최대 일축관입인장강도 변화 곡선

공시체를 동결시키기 때문에 점토 함유량과 함수비가 높을수록 인장강도 값은 더 높아질 것이라는 예상과는 달리 점토 함유량은 낮고, 함수비는 포화함수비에 가까워질수록 강도 값은 높이 측정되었다. 전체적으로 직경이 클수록 강도 값은 비교적 크게 측정되었으나 큰 차이는 보이지 않았다. 이는 공시체 정중앙을 단면적이 작은 디스크로 압밀하면서 파괴되는 형상을 보이는 관입인장시험에서 공시체 내부에 완전히 열지 않은 부동수분 충이 존재해서 부동수분의 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. (김영진 2003) 일반적으로 부동수분은 동토의 경우 그 범위가 특정지어지지 않지만 동결 공시체의 경우 그 시료 직경이 작고, 다짐 시험 후 동결시키는 것이므로 부동수분이 공시체 중앙에 위치하는 경우가 많기 때문이다.

4.7 공시체의 직경에 대한 쪼캠인장시험과 일축관입시험의 비교

4.7.1 화강풍화토의 비교

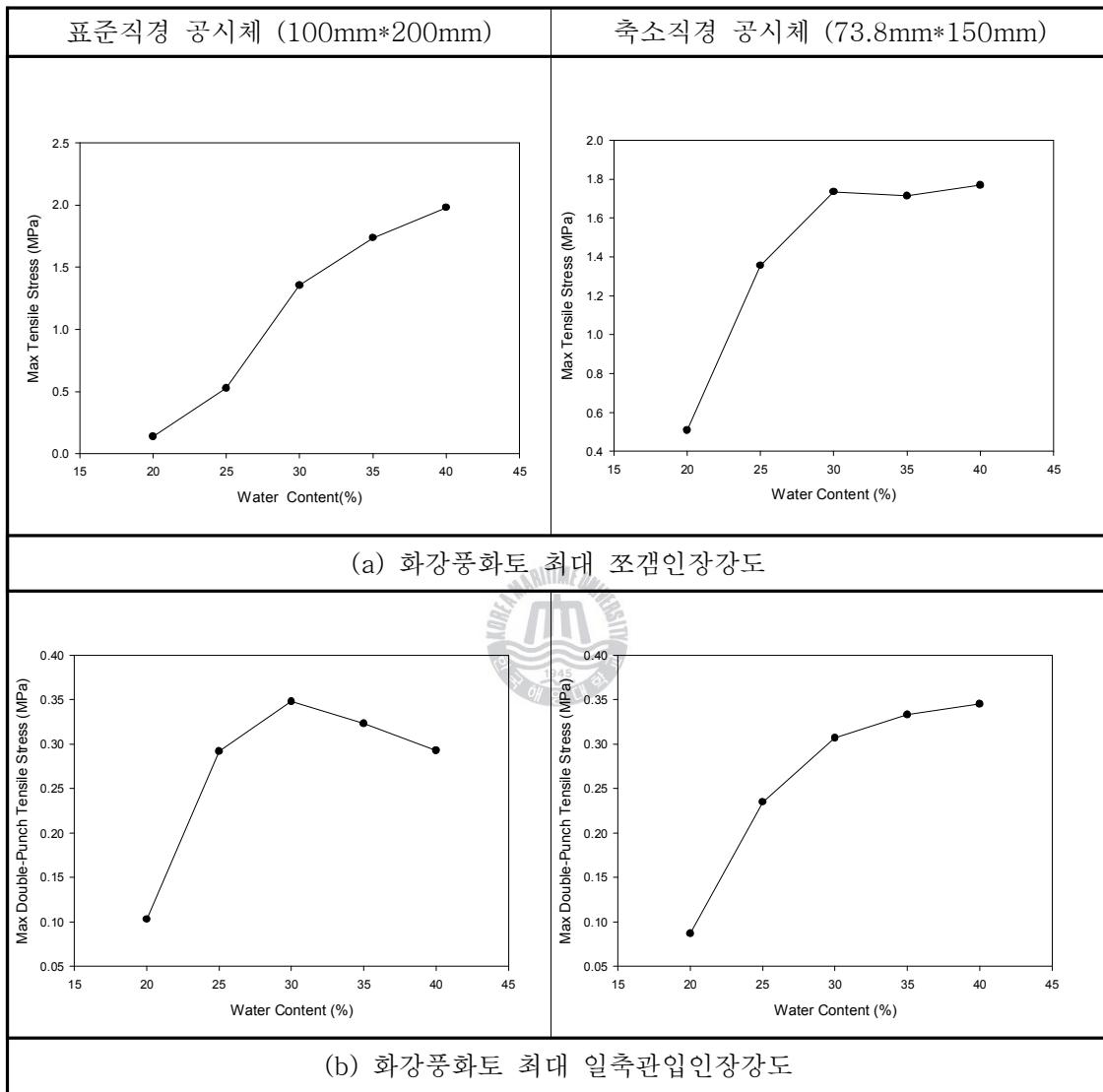


Fig. 4-91 화강풍화토의 직경별 인장강도의 비교

Fig. 4-91의 (a)의 결과에서 표준직경의 경우 쪼캠인장강도가 $0.2 \sim 2.0$ MPa이 측정되었고 (b)에서의 표준직경 공시체의 강도는 $0.1 \sim 0.36$ MPa이 측정되었다. 이는 최대 인장강도차이의 비가 약 5.7배 차이가 난다고 할 수 있다. 이는 두 시험법의 시험방법 및 결과 예측방법과 계산식이 다르기 때문에 이런 결과가 나왔다고 판단된다.

같은 결과로 일축관입인장강도의 경우 그 강도차이는 약 5배차이가 난다. 많은 차이는 아니지만 축소직경 공시체의 경우 인장강도의 차이가 더 적게 나타나고 있다.

4.7.2 사질혼합토의 비교

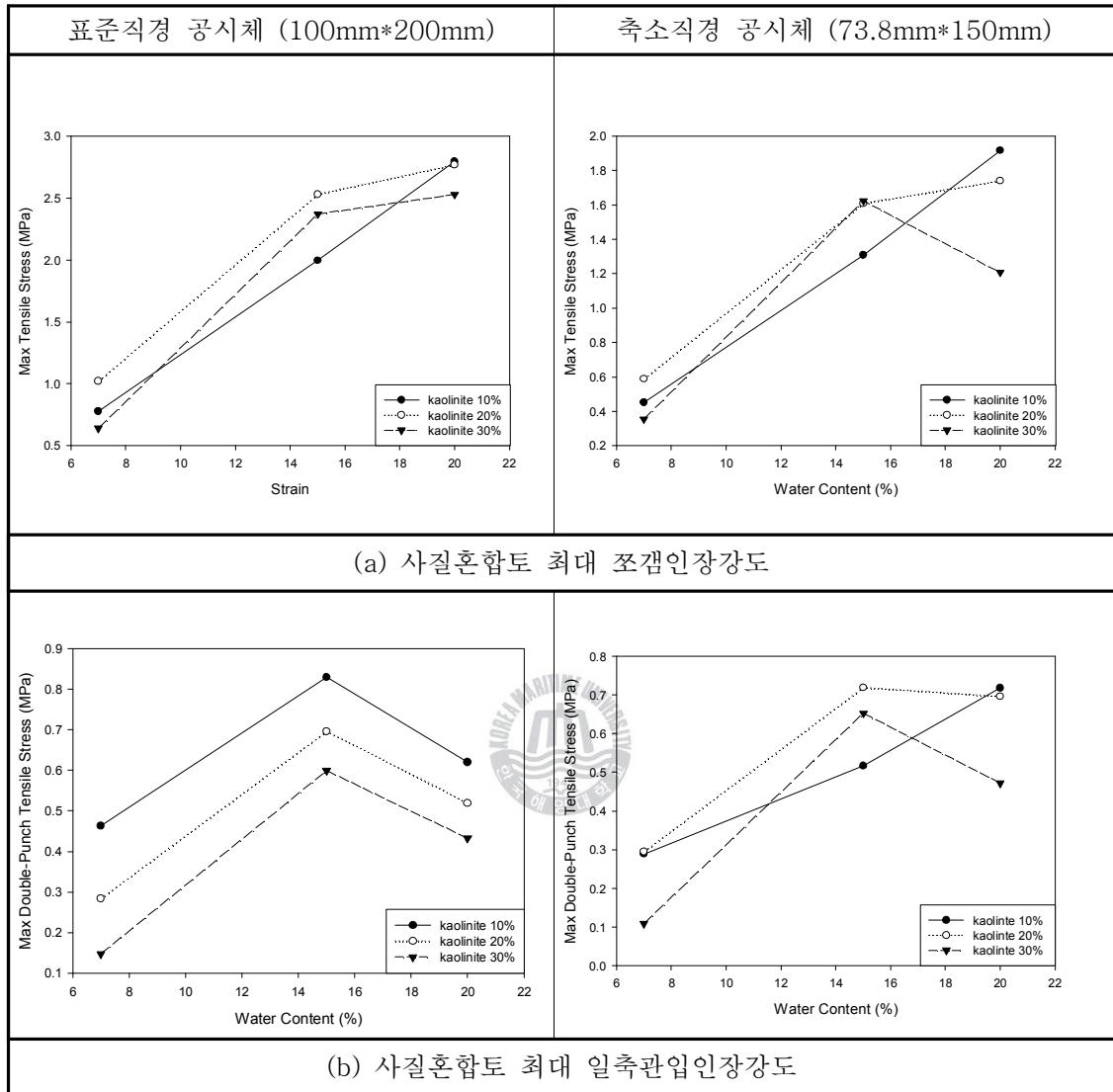


Fig. 4-92 사질혼합토의 직경별 인장강도의 비교

Fig. 4-92의 (a)의 결과에서 표준직경 공시체의 경우 쪼慨인장강도와 일축관입인장강도의 차이의 비가 쪼慨인장강도의 경우가 약 4.5배정도 높게 측정되었다.

축소직경 공시체의 경우 그 차이의 비가 쪼慨인장강도의 경우가 약 2.8배정도 높게 측정되었다.

이런 결과로 두 인장강도시험법의 경우 강도 특성 경향은 비슷하지만, 직경이 작아질수록 그 인장강도의 차이가 줄어들고 있다고 할 수 있다. 이는 직경이 작아지면 공시체의 내부에 존재하는 부동수분의 범위 차이와 관계가 있다고 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 2종류의 직경을 가진 동결 공시체를 화강풍화토와 사질혼합토의 2가지 시료를 사용하여 3가지 방법으로 시험하여 그 강도차이를 설명하고 있다.

이를 종합적으로 판단할 때 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- 1) 화강풍화토에서 직경차이에 의한 강도 값의 차이는 대체적으로 직경이 작은 공시체에서 높게 측정되어 공시체의 크기가 강도 값에 영향을 주는 요인 중 하나임을 알 수 있다.
- 2) 사질혼합토에서 3가지 시험에 대한 강도 값의 해석은 함수비가 표준함수비이면서, 포함된 점토의 양이 적을 경우 최대 강도 값을 가진다는 것을 알 수 있었다. 이는 직경의 차이 보다는 kaolinte의 함유량과 함수비의 조건이 강도 값에 더 큰 요인이 된다는 것을 알 수 있다.
- 3) 사질혼합토에서 포화함수비를 넘어서서는 액성화가 너무 심해서 시험 자체가 불가능하다는 것을 알 수 있었다. 화강풍화토의 경우는 그 공시체 자체가 모두 점토이기 때문에 포화함수비를 넘어서서도 공시체 제작이 용이했지만, 사질혼합토의 경우 70%이상이 사질토이기 때문에 그 제작이 힘들어 시험이 불가능 했다.
- 4) 사질혼합토의 인장강도 시험은 비교적 높은 함수비의 공시체에서 공시체가 순간적으로 파괴되는 취성파괴의 현상이 나타났다. 이는 공시체가 얼음이 파괴되듯 일시에 균열이 생겨 파괴되는 현상으로 콘크리트에서 자주 발생한다. 이는 동결된 흙은 일반 흙과는 다르게 콘크리트 정도의 큰 압축강도를 갖기 때문임을 알 수 있다.
- 5) 3가지 시험 중 쪼갬인장시험과 일축관입시험은 인장강도를 측정하기 위한 시험이다. 이에 화강풍화토와 사질혼합토를 직경에 대해 두 시험의 강도 값을 비교했을 때, 직경이 작은 쪽이 큰 쪽보다 그 인장강도의 차이가 더 작다는 것을 알 수 있었다. 이는 공시체 내부의 부동수분의 존재에 기인하는 결과임을 알 수 있다.
- 6) 본 논문은 기획 초기에 3가지의 공시체 직경을 분류하여 동일하게 시험하여 그 결과에 대한 강도특성을 파악하기 위한 논문이었지만, 부득이한 사정으로 직경 50mm*100mm의 가장 작은 직경의 공시체는 시험 할 수 없었음을 알려 드리며, 추후 재시험하여 본 논문에 추가 하여 그 결과를 다시 판단해야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 서영교, 강효섭 (2008), “시험 방법에 따른 동결토의 인장강도”, 한국지반학회, 제24 권 , 제4호, pp.57-66.
- [2] 류만용, 이재환, 전찬기, 김윤성, 박우진 (2007), 토목재료학, 구미서관, 서울, pp.3-13.
- [3] 변동균, 신현묵, 문제길 (2005), 철근콘크리트, 동명사, 서울, pp.14-15.
- [4] 김영진(2006), “시베리아와 남극대륙 진출시 필요한 동토 관련 건설기술”, 건설기술정보, pp.1-4
- [5] 김은섭 (2006) “Cold Room 실험을 통한 동결토의 강도특성에 관한 연구” 한국 해양대학교 석사학위 논문 pp. 22-55.
- [6] 김영진 (2003) “동결토의 일축압축 강도와 부동수분, 초음파 속도와의 관계” 대한토목학회논문집 제23호 pp. 309-317.
- [7] 김영진, 배정호, 송원근 (2003) “동결토의 온도변화에 따른 부동수분과 초음파 속도의 변화에 관한 실험적 연구 대한토목학회논문집 제22호 pp. 207-217.
- [8] 정철호(2003) “지반실무적용” 구미서관, pp. 41-55, 529-553.
- [9] 조천환, 손준익, 이원제, 김학삼(1993) “동결토의 특성과 동토지역에서의 말뚝 기초 연구” 한국건설기술연구원
- [10] Fang, H. Y. and Chen, W. F.(1972), “New Method for Determination of Tensile Strength of Soils”, Highway Research Record 354, pp. 62-68.
- [11] Fang, H. Y. and Fernandez(1981), “Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined-Penetration Test”, ASTM STP 740, pp. 130-144.
- [12] Fang, H. Y. and Chen, W. F.(1972), ” Further Study Of Double-Punch Test For Tensile Strength Of soils” pp. 211-215.
- [13] 한국산업규격 (KS F 2312) (1991) “흙의 다짐시험방법“