

碩士學位論文

현무암 석분 슬러지를 이용한
차수재의 적합성에 관한 연구



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 光 日

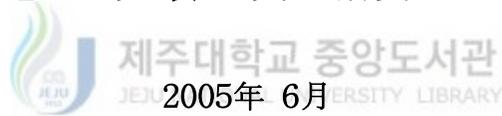
2005年 6月

현무암 석분 슬러지를 이용한 차수재의 적합성에 관한 연구

指導教授 南 正 萬

金 光 日

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함



金光日의 工學 碩士學位 論文을 認准함

審査委員長 _____ (印)

委 員 _____ (印)

委 員 _____ (印)

濟州大學校 大學院

2005年 6月

A Study on Suitability of the Liner by
Powdered Basalt Sludge

JIN GUANG RI

(Supervised by Professor Jung-Man Nam)



A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements
for the degree of Master of Engineering

2005. 6.

This thesis has been examined and approved.

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

<목 차>

목 차	i
List of Tables	iii
List of Figures	iv
Abstract	vii
1. 서론	1
1.1 연구의 배경 및 목적	1
1.2 연구내용 및 범위	2
2. 이론적 배경	4
2.1 석재산업 현황조사	4
2.1.1 석재의 정의	4
2.1.2 채석 공정	5
2.1.3 제주석재산업의 현황	5
2.1.4 석재산업의 환경영향	5
2.2 차수재의 현황	6
2.2.1 점토	6
2.2.2 토양-벤토나이트 혼합토	7
2.2.3 지오펜브레인(Geomembrane)	7
2.2.4 토목합성수지라이너	7
2.3 투수계수	8
2.3.1 정수두 및 변수두 투수시험	10
2.3.2 방사상투수계수	12
2.4 포졸란 반응	14

3. 실험과정	16
3.1 실험재료의 특성	16
3.1.1 현무암 석분(Powdered Basalt)	16
3.1.2 현장토	28
3.1.3 시멘트 및 혼화제	31
3.2 실험을 위한 시험편의 성형	32
3.2.1 현무암 석분 및 시멘트 혼합시료	32
3.2.2 현무암 석분 및 현장토의 투수시험을 위한 시험체의 성형	36
3.2.3 압축강도시험을 위한 시험편의 성형	36
3.3 시험장치	37
3.3.1 투수시험 장치	37
3.3.2 압축강도 시험장치	42
3.4 시험방법	42
3.4.1 투수시험	42
3.4.2 압축강도시험	44
3.4.3 포졸란 반응의 관찰	44
4. 결과 및 고찰	45
4.1 투수시험	45
4.1.1 현무암 석분과 시멘트 시험체의 투수계수	45
4.1.2 현무암 석분과 현장토 시험체의 투수계수	47
4.2 압축강도시험	52
4.2.1 현무암 석분과 시멘트 시험체의 압축강도	52
4.3 포졸란 반응	56
4.4 향후연구 계획	58
5. 결론	59
6. 참고문헌	61

<List of Tables>

Table. 3.1 The Test Method for the Powered Basalt	17
Table. 3.2 The physical of the Powdered basalt	18
Table. 3.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt	19
Table. 3.4 Direct shear test result	21
Table. 3.5 Chemical composition of Powdered basalt	27
Table. 3.6 The Test Method for the Powered Basalt	28
Table. 3.7 The physical of the soil	29
Table. 3.8 chemical composition of cement	31
Table. 3.9 Physical composition of cement	32
Table. 3.10 Chemical composition of quick setting admixtures	32
Table. 4.1 Coefficient of permeability of Specimen	46
Table. 4.2 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 3	48
Table. 4.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 3	48
Table. 4.4 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 5	49
Table. 4.5 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 5	49
Table. 4.6 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen	51
Table. 4.7 Compressive strength of water curing specimen	53
Table. 4.8 Compressive strength of air curing specimen	53

<List of Figures>

Fig. 2.1 Constant head permeability and falling head permeability test	10
Fig. 2.2 Plane Schematic diagram of radial flow	13
Fig. 2.3 Sectional view of specimen	13
Fig. 3.1 Grain-size distribution curve of Powdered basalt	18
Fig. 3.2 Compaction curve of Powdered basalt	19
Fig. 3.3 Relationship between degree of compaction and coefficient of permeability	20
Fig. 3.4 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr30%)	22
Fig. 3.5 Relationship between Shear stress and Norma stress (Dr30%)	22
Fig. 3.6 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr50%)	23
Fig. 3.7 Relationship between Shear stress and Norma stress (Dr50%)	23
Fig. 3.8 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr70%)	24
Fig. 3.9 Relationship between Shear stress and Norma stress (Dr70%)	24
Fig. 3.10 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (compaction)	25
Fig. 3.11 Relationship between Shear stress and Norma stress (compaction)	25
Fig. 3.12 Chemical composition of Powdered basalt	27
Fig. 3.13 Grain-size distribution curve of site soil sample 3	29
Fig. 3.14 Compaction curve of site soil sample 3	30

Fig. 3.15 Grain-size distribution curve of site soil sample 5	30
Fig. 3.16 Compaction curve of site soil sample 5	31
Fig. 3.17 Electric ASphalt Core Drilling Machine	33
Fig. 3.18 Specimen prepared for this study	34
Fig. 3.19 Curing Apparatus	34
Fig. 3.20 Schematic diagram of test setup	35
Fig. 3.21 The making process of specimen	35
Fig. 3.22 Remolded sample	36
Fig. 3.23 Samples saturation	36
Fig. 3.24 Three Gang Mortar Cylinder Mold	37
Fig. 3.25 Permeability Test Apparatus of concrete	37
Fig. 3.26 Schematic diagram of Permeability test setup	38
Fig. 3.27 Support Mold	39
Fig. 3.28 Setting feature	39
Fig. 3.29 Fixing Cap	39
Fig. 3.30 Setting feature	39
Fig. 3.31 Container Lid	40
Fig. 3.32 Setting feature	40
Fig. 3.33 Measurement Equipment	40
Fig. 3.34 Falling head permeability tester	41
Fig. 3.35 Schematic diagram of falling head Permeability test setup	41
Fig. 3.36 Digital Portable Compression Tester	42
Fig. 3.37 Schematic diagram of Permeability test container	43
Fig. 4.1 Relationship between coefficient of permeability and Cement Content	47
Fig. 4.2 Relationship between coefficient of permeability and Curing time	47
Fig. 4.3 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 3	50

Fig. 4.4 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 5	50
Fig. 4.5 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content (field density)	51
Fig. 4.6 Relationship between compressive strength and Cement Content	54
Fig. 4.7 Relationship between compressive strength and Cement Content	54
Fig. 4.8 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen)	55
Fig. 4.9 Relationship between compressive strength and Curing time	55
Fig. 4.10 The shape/surface in relation to the Cement Content by scanning electron micrograph	57



Abstract

This study evaluated the suitability of the Powdered basalt, which was produced during collecting and processing the building stone, as Liner using physical and mechanical method. The liner compound was mostly composed of Powdered basalt. The cement and sodium silicate compounds were used as additivity. As results, the compressive strength was bigger than $14\text{kg}/\text{cm}^2$ which satisfied the reclaimed land standard, $5\text{kg}/\text{cm}^2$. The constant of percolation was 9.863×10^{-8} when it contained 83%(5 versus 1) of powdered basalt in 28 days and this data also satisfied the Liner standard, 1×10^{-7} . So the quantity of the Powdered basalt should be less than 83% of the whole compounds when mixing with cement and be carry out under humid environment. when mixing the Powdered basalt with the field solid, a member of the sandy soil family, the quantity of the Powdered basalt was reduced up to 60% at first and ,then, it was appeared to be increasing. Lacks of the activity, Powdered basalt can not be hardened by itself. So, if adding the $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a resistant factor of pozzolanic reaction, into the mixture, may make it possible to be used as the material of the Liner.

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 국내에서는 산업의 급속한 성장으로 인하여 산업현장에서 발생하는 각종 산업 폐기물의 처리 및 환경오염이 심각한 사회적 문제로 대두 되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 각종 폐기물을 산업용 재료나 건설재료로 재활용하여 폐기물 처리량을 최소화 시키는 방안들이 추진되고 있다.

제주도 지질에 관한 조사는 Nakanmura(1925) 처음으로 이루어졌으나 Haraguchi (1931)에 의해서 최초로 제주도 화산층서가 확립되었다. 제주도는 최고봉인 한라산 (1950m)을 중심으로 장축인 동-서방향의 길이는 약 80km이고 단축인 남-북 방향의 길이는 40km인 순상화산 형태를 나타낸다. 제주도는 주로 제3말기 플라이오세의 서귀포층 제4기 플라이스토세에의 성산층, 화순층 및 신양리층의 퇴적층과 현무암, 조면암질안삼암 및 조면암 등의 화산암류 그리고 기생화산에서 분출된 화산성 쇄설암 (volcaniclastic rock) 등으로 분포되어 있다(윤선 외 2인, 1995). 제주도에 분포되어 있는 화산암류는 알카리 현무암, 하와이아이트, 뮤저라이트, 안산암, 벤모라이트, 조면암, 및 소량의 소레아니트(Lee,1989: 박준범, 권성택,1991)등이다. 알카리현무암은 반정광물의 종류에 따라서 휘석현무암, 장석현무암, 및 감람석현무암류로 세분된다.

제주도에는 현무암을 가공하여 석재를 가공 생산하는 공장들이 수십개소가 있다. 이들 가공공장에서 현무암을 석재로 가공하는 과정에서 발생하는 폐석이나 석분슬러지(Powdered basalt)로 인하여 자연환경이 심하게 오염되거나 훼손되는 경우가 있다. 채석장에서 원석을 채굴하여 건축용 석재 등으로 가공하는 과정에 석재의 약 60% 정도가 폐석이나 석분 슬러지로 손실되고 있다. 이중 폐석의 일부분만이 도로 포장용 쇄석골재로 재활용되고 있으며, 대부분의 석분슬러지는 석재의 가공이나 파쇄 공정에서 분말형태로 물에 혼합되어 슬러지 탱크에 침전되어 쌓이게 된다. 이 침전물이 방류되거나 지표에 살포되면 지표나 지중의 공극이 메워져, 지표수의 지중침투, 지하수의 흐름, 공기의 소통이 원활하게 이루어지지 않아 생태계에 상당한

악영향을 끼치게 된다. 석분슬러지는 국내 현행 폐기물 관리법에서는 사업장내에서 발생하는 산업폐기물로 분류 되고 있으나 별도의 처리방법이나 재활용 방법이 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 석재 가공 시 발생하는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하는 방안을 모색하고자 한다. 이를 위하여 석분슬러지에 대한 일련의 실내실험을 실시하여 물리적, 역학적 특성을 조사하였다. 또한, 석분슬러지를 차수용 재료로서의 적합성여부를 확인하기 위하여 석분슬러지와 시멘트 및 혼화제가 교반 혼합된 시험체에 대하여 일축압축시험 및 투수시험을 실시하였으며, 석분을 현장토에 직접 배합하였을 경우 현장토와 석분 슬러지의 각 배합비별 혼합시험체의 투수 특성을 연구하였다. 이들 실험결과를 토대로 석분슬러지의 차수재료로서의 적합성을 판단하고자 하였다.

1.2 연구내용 및 범위

매립장에서 차수시설은 침출수의 누출방지와 집수 및 배수, 지하수의 유입을 방지하는 기능을 한다. 매립지 차수시설은 일반적으로 투수성이 낮은 점토재료의 차수재를 사용한다.

본 연구에서는 각 채석장 및 석재 가공공장에서 발생하는 석분 슬러지를 활용하여 환경오염 요인을 최대한 억제하고 폐자원의 재활용을 극대화하여 자원의 지속적인 확보와 공급에 기여하고 환경적으로 안전한 차수재료의 특성을 파악하고자 하였다.

석분슬러지를 이용한 매립장 혼합차수재의 물리·역학적 특성을 파악하고 차수재 설계기준에 적합한 배합비를 제공하고자 다음과 같은 연구를 실시하였다.

- (1) 현무암석분, 시멘트, 혼화재의 기본물성과 화학적성분에 대하여 분석, 연구한다.
- (2) 현무암 석분의 물리적 특성과 화학적 특성을 고려하여 폐석분이 시멘트와 혼합되었을 경우 차수기능 항상 효과여부를 연구하기 위해 석분과 시멘트를 일정량 혼합하여 투수시험을 시행한 후 혼합한 공시체에 대해 투수기준을 만족하는 최소의 시멘트 첨가율을 도출한다. 이를 바탕으로 압축강도 시험을 하여 투수기준과 압축강도기준을 만족하는 최종의 배합비를 도출한다.

- (3) 현무암 석분과 현장토 혼합시료의 각 배합비별 시료에 대하여 다짐시험을 수행한 후 다짐시험결과에 의하여 현무암 석분·현장토를 소정의 배합비로 배합하였을 경우 혼합시료의 투수특성을 연구한다.
- (4) 현무암 석분-시멘트, 현무암 석분과 현장토를 배합했을 시 차수재로서 석분의 적합성을 분석한다.



2. 이론적 배경

2.1 석재산업 현황조사

석재 자원은 비교적 풍부하여 전국토의 약 25%에 석재가 매장되어 있으며 추정 매장량은 약 70억 톤으로 가채 연한은 약 160년이다.

그러나 대부분의 채석장에서는 체계적인 채석시스템의 개발이 미흡한 실정으로 인력에 의존하는 경험적인 채석방법을 적용하고 있기 때문에 자연환경이 훼손되고 채취수율이 선진국의 30~40%에 불과하므로 풍부한 부존자원을 최대한 활용하지 못하고 있는 실정이다. 그러므로 원석의 절단 및 채취, 원석의 전도, 할석, 규격석 절단, 운반 및 적재 등 각 분야의 기술을 개발하여 생산능률을 향상시키고 생산원가를 절감하는 것이 필요하다. 또한 부존조건에 맞는 체계적인 채석 시스템을 적용하여 원석 채석시의 폐석량을 최대한 줄일 필요가 있다.

석재산업에 대한 정부로부터의 지원은 거의 없는 상태이며, 석재산업을 환경파괴산업, 공해산업 등으로 분류하여 각종 단속 및 규제가 심한 실정으로 이로 인해 폐기물을 사업장내부에 야적하고 있으며, 석재 산업체는 폐수처리장의 부지 부족 등으로 곤란을 겪고 있다. 또한 석산 개발 시 소음과 분진, 진동 등의 발생으로 인접한 마을이나 전답과 관련한 민원사항이 발생하게 되는데, 이 때문에 상당액을 보상하는 등 경영손실이 초래되므로 이의 방지 및 보완을 위하여 소음 방지, 분진 발생의 제어, 진동방지에 관하여 연구할 필요가 있다. 따라서 폐석과 석분 슬러지에 대한 처리 및 활용을 위한 종합적인 연구는 폐자원의 재활용은 물론 환경오염과 자연파괴를 최소화할 수 있으며 석재 산업의 활성화에 기여할 수 있을 것으로 생각된다.

2.1.1 석재의 정의

석재에 대하여 많은 정의가 있으나 크게 석·골재를 포함하는 넓은 의미의 석재 즉, 토목, 건축, 조각품 등의 재료로 사용할 수 있는 모든 종류의 암석, 골재, 자갈, 암분 등을 지칭하는 경우와 좁은 의미의 건축, 조각 재료로서의 석재를 칭하여 구별한다.

한국 공업규격(KS F1504, 1900)에 "석재란 소요의 모양으로 만든 암석"으로 규정되어 있으며 대한광업진흥공사 석재산업자금융자 및 관리 규정에는 "석재라 함은 암석을 채취 또는 가공하여 석건재, 석공예 및 토공용에 사용하기 위한 암석재를 말한다."로 정의되어 있다

2.1.2 채석 공정

주요 생산 활동은 광산으로부터의 원석절단, 일정 규격의 block채취, 채취된 block의 전도 및 상품화를 위한 원석의 소할(小割)작업과 운전 및 적재 등으로 구분 할 수 있다.

2.1.3 제주석재산업의 현황

제주도내에는 석재 가공공장이 약 15개 업체정도 분포하고 있다. 연간 60억원 정도의 생산액으로서 생산량은 약 25천 톤/년으로 추정되고 있다.

도로 경계석만으로 그 수요량은 약 310천개/년 소요량으로 예상되고 가공 시 현 무암 석분 슬러지 발생량은 2,500t/년 정도로 석분슬러지만 그 발생량이 상당히 많은 것으로 나타나고 있다. 현재 석분슬러지는 건조 후 매립지 등 일부 복토재로 약 10% 정도만 활용되고 있는 실정이다. 석분 슬러지의 건조 및 매립처리 비용으로 업체에 부담이 가중해지고 있는 실정이다.

2.1.4 석재산업의 환경영향

석재산업의 폐수문제와 채석 장비인 화염절단기(jet burner)에 의한 소음과 분진은 석재개발에 따른 필연적인 문제로서 석재의 보다 안전한 생산 및 환경오염 예방을 위하여 해결되어야 한다.

채석업의 경우 주로 화염절단기를 사용하고 있어 암반 절단 시 소음과 분진으로 인한 공해뿐만 아니라 단위 면적당 소요 비용도 많이 든다는 것이 단점으로 지적된다. 또한 가공공장에서는 석재절단기와 연마기 등을 가동함으로써 배출되는 폐수는 하천의 물밑 바닥에 침적해서 생태계에 영향을 주는 등 하천을 오염시키고 있으므로 예방 대책을 강구해야 할 것이다.

석재의 폐수는 일반적으로 침전지를 거쳐 흘러보내고 있다. 침전지에 토적된 침전물을 석분 슬러지라고 부르는데, 석재 가공 량이 많을수록 그 발생량은 더욱 증가한다. 석분 슬러지는 미세한 입자로 탈수, 건조하면 분진상태로 되기 때문에 적절한 처리가 요망된다. 석분 슬러지는 일반적으로 가공 공장 내에 방치되고 있으나, 물질의 특성상 분진 발생이 우려 되므로 매립처리가 요망되는 폐기물이다. 석분 슬러지는 유해중금속을 함유되어 있지 않고 석재와 동일한 재질이므로, 이를 재활용할 수 있는 방안을 강구하는 것이 석재 산업체의 절실한 요구이다. 석분 슬러지의 재활용은 매립비용의 절감은 물론 폐자원의 재활용에 의한 새로운 부가가치 창출도 가능하다고 할 수 있다.

2.2 차수제의 현황

일반적으로 대표적인 차수재료는 다짐점토가 있으며, 차수층 자체는 물과 침출수에 대하여 “불투수층”일 뿐만 아니라 오염수, 이온교환 및 희석(확산 및 분산에 의한)을 통하여 거동을 방해하는 기능을 가지고 있다.

차수층 설계는 보통 점토의 투수계수 안에서 오염물질의 이동, 확산, 화학적 특성 및 동수경사 등에 대하여 층의 두께를 어떻게 결정하는가에 기준을 두고 있다. 그러나 실제적으로 차수층의 설계에 있어서 중요한 것은 설계기준에 맞는 투수계수(국내·외 기준 $1 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하)를 가질 수 있는 적당한 차수물질을 선택하는 것이다. 차수층의 조건으로는 이류와 확산으로 인한 오염물 이동의 최소화, 오염물에 대한 높은 흡착력과 지연효과, 화학물질과 침식에 대한 저항성, 자가 치유능력 등이 있으며, 차수물질과 라이너 사이에서 발생하는 반응을 파악하여야 한다.

2.2.1 점토

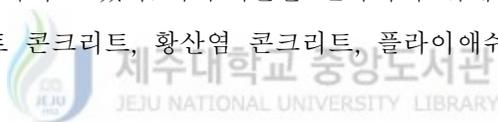
점토는 토양의 분류에서 점토함량의 정도에 따라 낮은 투수계수를 보장하기 때문에 차수층의 가장 중요한 구성 성분이다. 대체로 두 가지 토양분류 시스템이 사용되며, 그중 하나인 American Society of Testing and Materials(ASTM, 美國材料試驗協會)에 의한 토양분류법이 우선적으로 사용되며, 또는 The U.S Department of

Agriculture's(USDA's, 美國農務部)과 American Association of State Highway and Transportation Officials(AASHTO, 美國公立道路局) 혹은 Unified Soil Classification System(USCS, 統一分類法)등의 토양분류시스템은 주로 토양학자, 농업경제학자, 그리고 토양 물리학자들에 의해 사용된다.

점토는 일반적으로 소성과 낮은 투수계수($K=10^{-6} \sim 10^{-7} \text{cm/sec}$)를 갖고 있다. 자연 상태의 점토는 내륙 지역의 양질의 점토 또는 해안지역의 해성점토를 예로 들 수 있다. 차수재로 선정된 차수점토재료는 입도분포, 액·소성한계, 다짐, 투수성, 전단강도 등의 실험을 실시하여 차수재료로서의 적합성을 검사하여야 한다.

2.2.2 토양-벤토나이트 혼합토

차수재 층을 형성함에 있어 투수계수가 낮은 점토가 충분하지 않은 실정으므로 현장토에 소성이 높은 외부 점토 또는 벤토나이트와 같은 상업적 점토 등을 혼합함으로써 투수기준을 만족하고 있다. 투수기준을 만족하기 위해 토양-벤토나이트, 토양-시멘트, 일반시멘트 콘크리트, 황산염 콘크리트, 플라이애쉬-시멘트/석회/벤토나이트 등이 있다.



2.2.3 지오멤브레인(Geomembrane)

최근 인공차수재인 지오멤브레인이 차수재로서 많이 사용되고 있는데 지오멤브레인은 화학성분에 대한 내화학성이 크고 투수계수가 $10^{-12} \sim 10^{-14} \text{cm/sec}$ 로서 매우 낮은 장점을 가지고 있다.

지오멤브레인에는 합성수지류, 합성고무류 및 아스팔트가 있는데 이중에서 주로 많이 사용되는 것은 HDPE(High Density poly Ethylene), EPDM(Ethylene propylene Diene)등이다.

2.2.4 토목합성수지라이너

Geosynthetic Clay Liner(GCL)ms 지오멤브레인과 점토의 장점을 고루 갖고 있는 차수재라고 할 수 있는데 취급이 용이하며 점토보다 상대적으로 두께가 얇은 특성을 가지고 있다.

지오멤브레인은 친공이 되면 자체 복원 능력이 없으나 GCL차수재는 벤토나이트의 팽창 및 점성에 의하여 자체복원능력이 있기 때문에 친공에 의한 누수저감 효과가 크다.

2.3 투수계수

투수율이 비교적 큰 점토질 암석이나 토사의 투수계수를 실험실내에서 측정하는 경우, 보통 전통적인 투수계수 측정법은 정상류를 이용한다. 시험편 내에 정상류가 형성되면 단위시간동안 시험편을 통과한 유량과 시험편 양단의 수두구배를 측정하여 이를 Darcy 법칙에 적용하는 것에 의해 투수계수를 계산할 수 있으며 이에는 다음과 같은 두 가지 방법이 있다.

- (1) 시험편에 일정유량(constant flow rate) 조건을 부여하고 공극수가 시험편 내를 통과함에 따라 시험편의 상, 하부에서 발생하는 공극수압의 차이를 일정 시간동안 측정하는 방법
- (2) 시험편 내에 일정공극압력수두(Constant pore pressure head) 조건을 부여하고 일정시간동안 시험편내로 유동하는 유량을 측정하는 방법

본 연구에서는 다공질 시험편 내 유체 유동을 설명하는 기본 유동식인 Darcy 방정식을 이용한다. Darcy 방정식은 다음과 같은 가정이 전제 되어 있다.

(1) 비압축성 유동

압력변화에 따라 부피의 변화가 없으므로 밀도는 일정하다.

(2) 층류유동

유체입자들이 하나의 유선을 따라 층을 이루며, 전체 흐름을 입자들의 거동이 아닌 층서적인 개념으로 파악한다.

(3) 뉴턴유체운동

유동의 용이도는 점성계수 혹은 점성도, μ 라는 성질에 반비례하여 결정된다.

(4) 투수계수 k 가 다공질 매체의 특징을 대표하는 유일한 물성이므로 k 가 정의되기 위해서는 다공질 매체의 균질한 단상유체가 100%포화 되었다고 가정한다.

(5) 다공질 매체의 고체입자와 유체 간에 상호 화학반응이 일어나지 않아야 한다.

일반적인 Darcy 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{Q}{A} = u = \frac{dl}{dt} = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{dp}{dl} \right] \quad (2.1)$$

여기서,

Q =유량,

k =투수계수

A =시험편의 단면적

u = 단위면적당 유체의 유속으로 다공질 매체 체적에 대한 평균속도

μ =유체의 점성

l =시험편의 길이

p =시험편에 가해지는 공극수압

dp/dl = 다공질 시험편에 발생하는 공극수압구배

상기 식에서 -부호는 공극수압이 감소하는 방향으로 유체가 흐른다는 것을 뜻한다.

2.3.1 정수두 및 변수두 투수시험

실내시험에 의한 흙의 투수계수를 측정하는 방법에는 2가지의 표준 실험방법 즉, 정수두 투수시험과 변수두 투수시험이 있다.

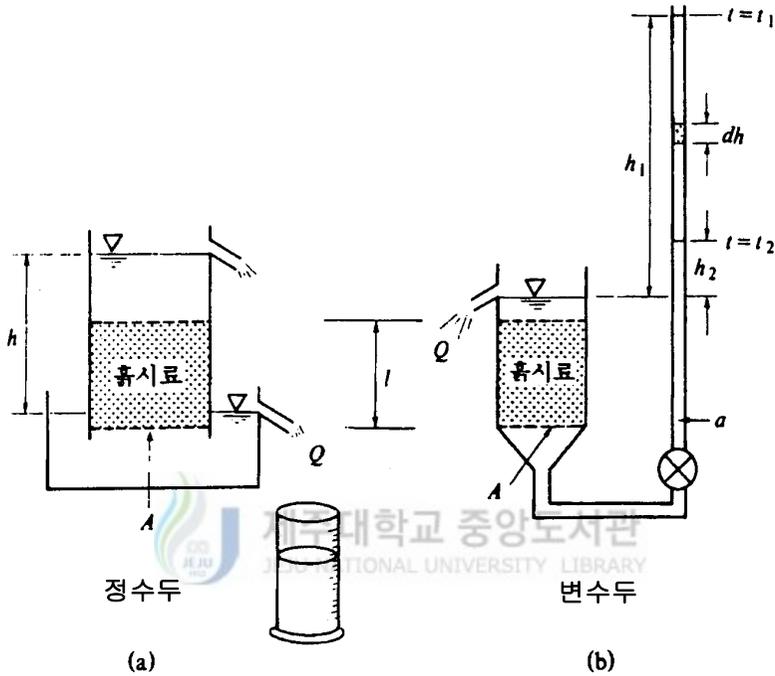


Fig. 2.1 Constant head permeability and falling head permeability test

정수두 투수시험의 대표적인 장치는 Fig. 2.1a와 같다. 실험 장치에서는 물을 공급하는 입구를 조정함으로써 실험하는 동안 물의 입구와 출구사이의 수두차를 일정하게 유지하도록 한다. 물의 흐르는 양이 일정하게 되었을 때, 물을 일정한 시간동안 실린더에 접수한다. 접수된 총 유량으로부터 투수계수를 다음과 같이 계산한다. 일반적으로 투수계수가 높은 사질토에 적용한다.

$$k = \frac{QL}{Aht} \quad (2.2)$$

여기서,

k: 투수계수

Q: 집수량

A: 흙시료의 단면적

t : 집수시간

i : 동수경사 ($\frac{h}{L}$)

변수두 투수시험의 대표적인 시험 장치는 Fig. 2.1b와 같다. 그림에 나타난 바와 같이 물이 스탠드파이프를 통하여 흙 속으로 자유롭게 유입하도록 하고, 유입하는 수위의 침하속도를 측정하여 투수계수를 산정한다.

임의의 시간 t에서 시료를 통해 흐르는 유량은 다음과 같다.

$$-a \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{l} A \quad (2.3)$$

$$-a \frac{dh}{h} = k \frac{A}{l} dt \quad (2.4)$$



만일, t_1 시간에서 수위가 h_1 이고, t_2 시간에서 수위가 h_2 라면

$$- \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{l} \int_{t_1}^{t_2} dt \quad (2.5)$$

이것을 적분하여 정리하면 투수계수 k는 다음과 같다.

$$k = \frac{al}{A} \frac{l}{t_2 - t_1} \ln \left(\frac{h_1}{h_2} \right) \quad (2.6)$$

2.3.2 방사상투수계수

일반적으로 Darcy 방정식을 방사상 유동에 대하여 적용 시켜보자. 여기서 한 가지 주의 할 점은 선형유동에서는 단면적이 상수인 반면 방사상 유동에서는 단면적이 거리 변수인 r의 함수라는 것이다.

Fig. 2.2와 Fig. 2.3은 이러한 방사상 유동의 모형을 보여 주고 있다.

일반적인 Darcy 방정식 (2.1)을 이용하여 비압축성유체의 정상 방사상 유동식을 유도할 수 있다. 수평 방사상 유동의 정의로부터

$$dl = dr \quad (2.7)$$

이므로, 식(2.1)을 다시 쓰면

$$\frac{Q}{A} = u = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{dp}{dr} \right] \quad (2.8)$$

따라서

$$\frac{Q}{2\pi rh} = -\frac{k}{\mu} \left[\frac{dp}{dr} \right] \quad (2.9)$$

식 (2.4)를 변수 분리하여 적분하면

$$\frac{Q}{2\pi h} \int_r^R \frac{dr}{r} = -\frac{k}{\mu} \left[\int_{p_0}^p dp \right] \quad (2.10)$$

p_0 는 내부 압력, p 는 외부압력, R 은 시료의 외부반경, r 은 시료의 내부반경이다.

이식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Q = \frac{2\pi kh \Delta p}{\mu \ln(R/r)} \quad (2.11)$$

식(2.6)을 투수계수에 대한 식으로 다시 정리 하면

$$k = \frac{Q \mu \ln(R/r)}{2\pi h \Delta p} \quad (2.12)$$

여기서 R 은 외부반경, r 은 내부반경, $\Delta p = p_i - p_0$, p_i 는 내부 압력, p_0 는 외부 압력으로 대기압과 같다.

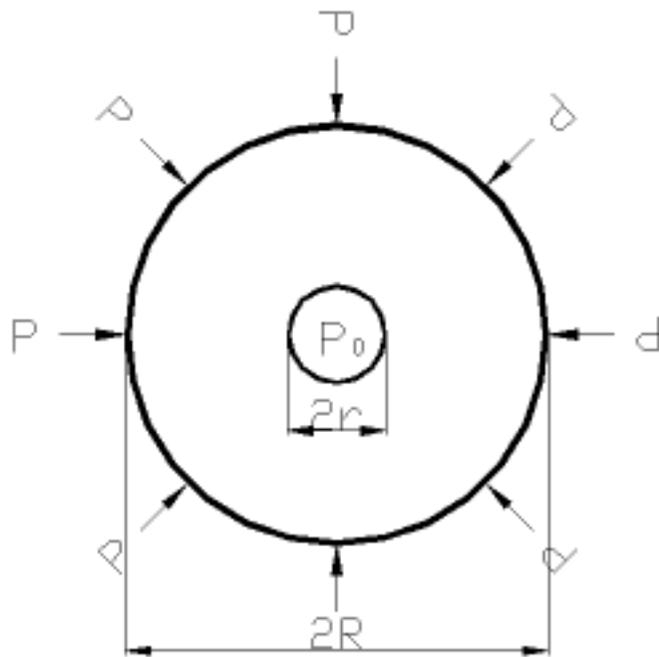


Fig. 2.2 Plane Schematic diagram of radial flow

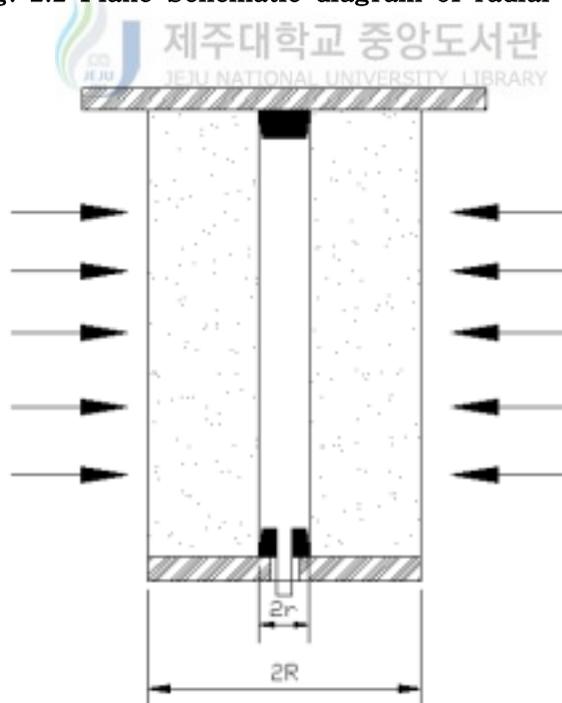
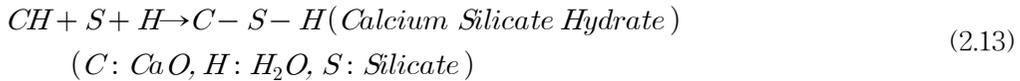


Fig. 2.3 Sectional view of specimen

2.4 포졸란 반응

포졸란이란 활성이 없어 그 자체로는 경화성이 없으나 물의 존재로 상온에서 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 안정된 불용해성 화합물을 생성하여 경화 할 수 있는 물질을 말한다.



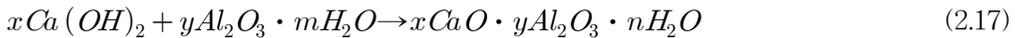
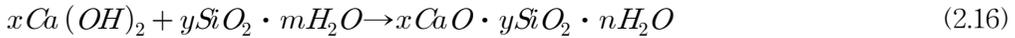
이들은 SiO_2 가 많으며 활성으로서 $Ca(OH)_2$ 와 화합하기 쉬운 가용성 실리카 및 가용성 알루미늄이 높은 것 이어야 한다. 알루미늄이 많은 것은 초기강도가 높아지고 또한 가용성 실리카가 많은 것은 장기강도가 높아진다.

포졸란 활성을 가지는 물질로는 화산재나 응화암 등의 자연산과 Fly Ash와 같은 인공적인 것이 있다. 자연산의 포졸란 물질중의 하나인 규조토(Diatomate)도 있다. 규조토는 규조(Diatom)의 껍질로 바다 또는 호수 밑바닥에 침적하여 이루어지며 연질의 암석 또는 토양으로서 약 95%가 Silica로 구성 되어 있으며, 포졸란 물질 중에 가장 많이 사용 되는 비산재는 전형적으로 SiO_2 45%, Fe_2O_3 15%, CaO 10%, MgO 1%, K_2O 1%, Na_2O 1%, SO_3 1%로 구성 되었다.

포졸란 물질 중에는 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , 등이 함유되어 있으며 이들 중 활성에 기여하는 성분은 SiO_2 , Al_2O_3 로서 이것들이 시멘트와 수화할 때 생성되는 $Ca(OH)_2$ 와 반응하므로 콘크리트의 강도 증가에 효과가 있고 일반적으로 다음과 같은 식이 사용 되어 왔다.



그리고 이러한 유리 $Ca(OH)_2$ 와 더불어 Soluble Silica 및 Alumina를 함유하고 있는 포졸란 물질이 작용할 때 일어나는 반응은 아래식과 같이 되어 Calcium Silica 및 Calcium Aluminate의 수화물이 생성됨으로서 $Ca(OH)_2$ 의 용출이 방지되고 포졸란 효과를 얻게 되는 것이다.



본 연구에서는 폐석분내의 실리카와 알루미나가 시멘트내의 Ca성분과의 결합인 포졸란 반응과 현무암 석분의 입자변화에 대해 SEM(Scanning Electron Microscopy)을 통해 관찰하도록 한다.



3. 실험과정

3.1 실험재료의 특성

본 연구는 현무암 석분과 시멘트 및 혼화제를 첨가한 혼합시료, 현무암 석분과 현장토 및 혼화제의 혼합시료를 차수재로서의 적합성을 연구하는 것으로서 석분의 시멘트 및 혼화제, 현장토의 기본성질을 파악하여야 한다.

3.1.1 현무암 석분(Powdered Basalt)

(1) 물리적 특성

제주도는 서귀포, 성산포, 모슬포 지역을 제외하고 제주도 대부분이 신생대 제4기 화산암류와 화산분출물로서 현무암층이 분포하여 있다.

이번 연구에서 핵심이 되는 현무암 석분은 석산, 골재채취장에서 골재 채취 및 석재 가공 과정에서 발생하는 돌가루로서 폐기물류로 분류할 수 있다.

본 연구에서는 제주도지역의 제주시 S석산에서 발생하는 현무암 석분을 대상 시료로 사용하였다. 석분은 암회색으로 나타났다. 석산위치에 따라 색상이나 화학적성분이 다를 수 있다.

대상 시료의 물리적, 역학적 화학특성을 파악하기 위하여 각종 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시료는 $100C^{\circ}$ 이상으로 24시간 이상 완전 건조 한 다음 재분쇄하여 No.4체를 통과한 시료를 사용하였다.

Table. 3.1에는 폐석분의 기본 물성을 파악하기 위해 실시한 실험의 한국산업규격(Korean Industrial Standards)을 나타내었다.

실험 결과는 Table. 3.2에 제시하였다. 각 측정치는 3회 측정치의 평균값이다. Fig.3.1에는 연구에 사용된 현무암 석분의 입도분포 곡선을 나타내었다. 입도분포곡선에서 미세입자들의 함량이 비교적 크게 나타났다. 입자의 직경이 0.002mm보다 작은 부분이 약 20%정도로 나타나고 있다. 비중이 값은 2.87~2.97로서 일반적인

토사의 비중값, 2.65~2.7에 비해 크다. 액성 및 소성한계는 시험결과 액성한계는 22.3%~23.00%, 소성한계는 16.57%~18.7%로; 소성지수는 3.46%~5.73%로 소성이 작은 것으로 나타났다. 석분에 대해 수행된 다짐시험결과 최적함수비는 21%~25%에 분포하며, 최대건조단위중량은 1.62g/cm³~1.675g/cm³의 범위에 분포하고 있다. Fig.3.2는 석분의 다짐곡선을 보여주고 있다. 다짐석분의 투수계수는 5.42E-06cm/sec으로 나타나고 있다.

현무암 석분은 토양과 다르므로 토양의 분류기준을 적용하기는 어려우나 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의하여 분류하면 ML-CL과 유사한 것으로 나타났다.

Table. 3.1 The Test Method for the powered basalt

Item	Korean Industrial Standards
비중시험	KS F2308
액·소성한계 시험	KS F2303, KS F2304,
입도분석	KS F2309, KS F2302
다짐시험	KS F2312
투수시험	KS F2322-95
직접전단시험	KS F2343

Table. 3.2 The physical of the powdered basalt

Tests	Test Result	
	Contents	Powdered basalt
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.92
Water contents	Water contents(%)	35%
Liquid & Plastic	Liquid limit (LL,%)	22.67
	Plastic limit (PL,%)	17.97
	plastic index (PI)	4.7
Shrinkage Limit	Shrinkage Limit (SL,%)	15.32
	Shrinkage Ratio (SR)	2.43
	Volume Change (Sv,%)	9.77
	Linear Shrinkage (Ls,%)	3.06
A compaction	Optimum moisture content(%)	21.57
	Maximum dry unit weight (g/cm ³)	1.65


제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY
Grain-size distribution curve

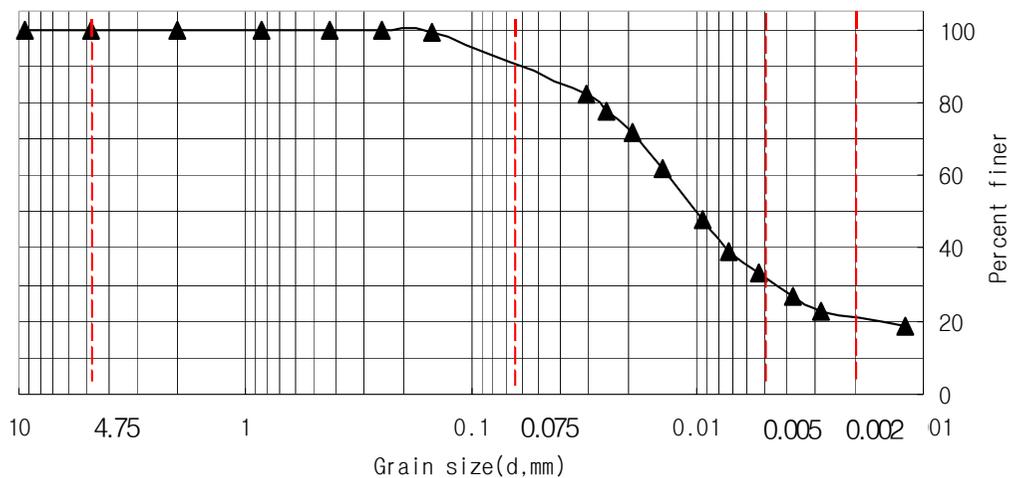


Fig. 3.1 Grain-size distribution curve of powdered basalt

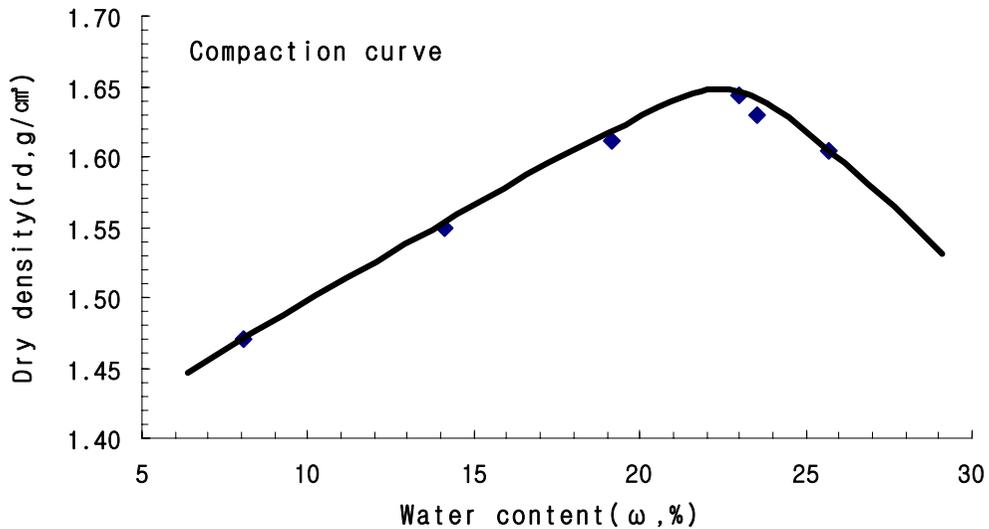


Fig. 3.2 Compaction curve of powdered basalt

Table. 3.3은 석분의 다짐도에 따른 투수계수와 간극비를 나타낸 것이다. 시험결과로부터 다짐도가 높아짐에 따라 석분의 간극비는 감소하고 투수계수도 이에 비례하여 감소하는 것을 알 수 있다. Fig. 3.3은 다짐도와 투수계수의 관계를 나타낸 것이다.

Table. 3.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt

degree of compaction	void ratio e	K(cm/sec)
100%	0.747	3.905E-06
90%	0.845	1.072E-05
80%	1.191	2.790E-05
70%	1.503	1.616E-04
65%	1.605	2.636E-04

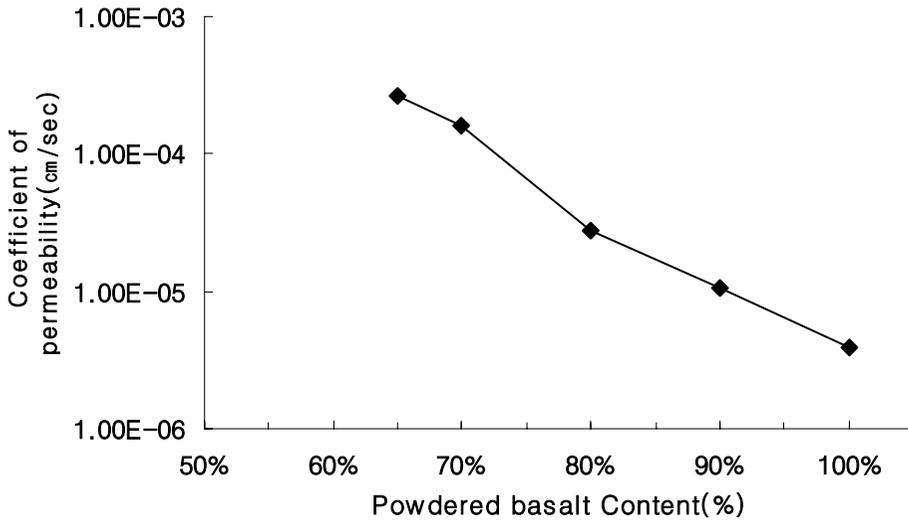


Fig. 3.3 Relationship between degree of compaction and coefficient of permeability

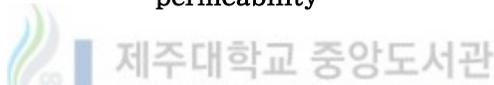


Table.3.4는 폐석분에 대하여 상대밀도가 각각 30%, 50%, 70%인 경우와 다짐시험 결과 시료에 대하여 직접전단시험을 한 결과를 나타내었다.

Fig. 3.4~Fig. 3.9는 상대밀도로 시료를 성형하여 실시한 전단시험의 전단응력과 수평변위관계 및 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내었고 Fig. 3.10과 Fig. 3.11은 다짐시험결과로 시료를 성형하여 실시한 전단시험의 전단응력과 수평변위관계 및 전단응력과 수직응력의 관계를 나타내었다. 전단 시험 결과 전단저항각은 29.2도, 31.5도, 33.7도로 다짐시험결과로 성형한 시료의 전단강도는 37.34도로 나타내었다.

상대밀도가 증가할수록 파괴강도는 증가하는 것으로 나타나고 있으나 파괴점이 명확히 나타나지 않고 있다. 전단응력이 파괴응력(τ_f)에 도달할 때까지 전단변위는 계속적으로 증가하는 경향을 보이고 있다. 그리고 그 이후에는 변형률이 계속 증가하더라도 응력은 감소하지 않고 일정하게 수렴되고 있어 느슨한 모래의 거동과 매우 유사한 것을 알 수 있다.

현무암 석분슬러지의 전단저항각(ϕ)은 29°~34° 정도이고, 점착력(c)은 0.01~

0.15kg/cm² 정도 이다. 따라서 다짐시험 및 직접전단시험 결과에 의하면 석분슬러지는 느슨한 모래와 유사한 역학적 특성을 지니고 있음을 알 수 있다.

Table. 3.4 Direct shear test result

Tests	Test Result		
	Contents		Powdered basalt
direct shear	angle of shear resistance(ϕ)	relative density30%	29.16°
		relative density50%	31.49°
		relative density70%	33.74°
		compaction test result	37.34°
	cohesion(c)	relative density30%	0.0962
		relative density50%	0.1565
		relative density70%	0.0144
		compaction test result	0.7628

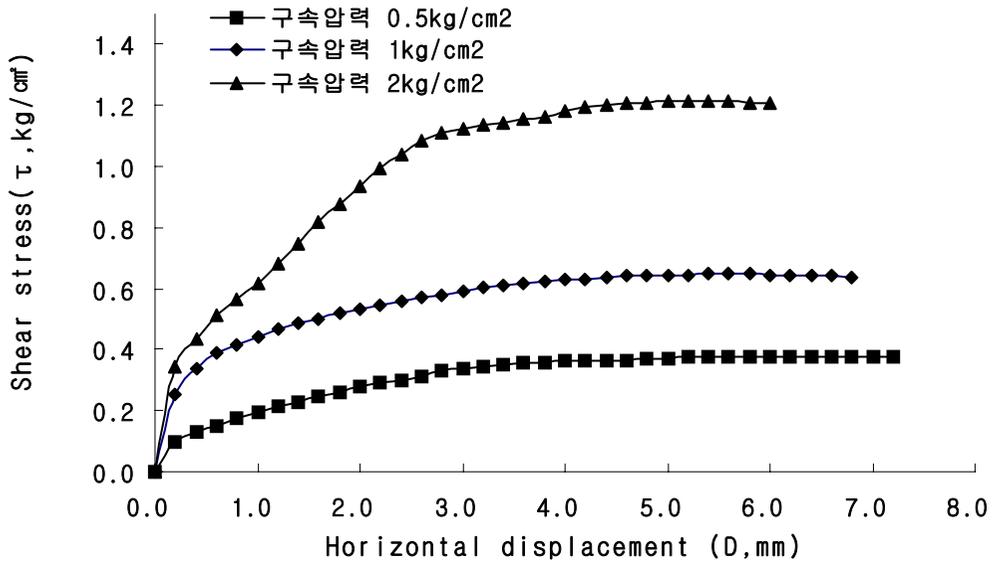


Fig. 3.4 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr30%)

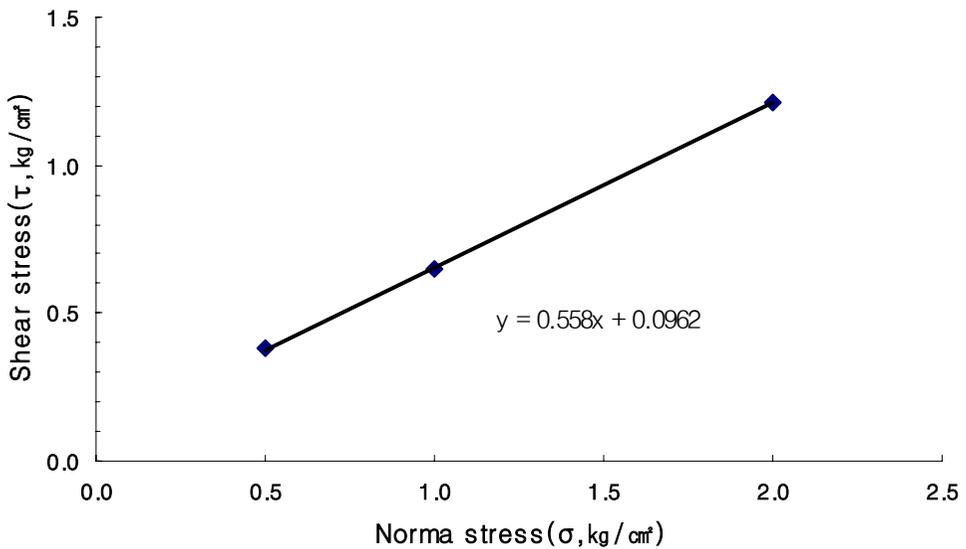


Fig. 3.5 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr30%)

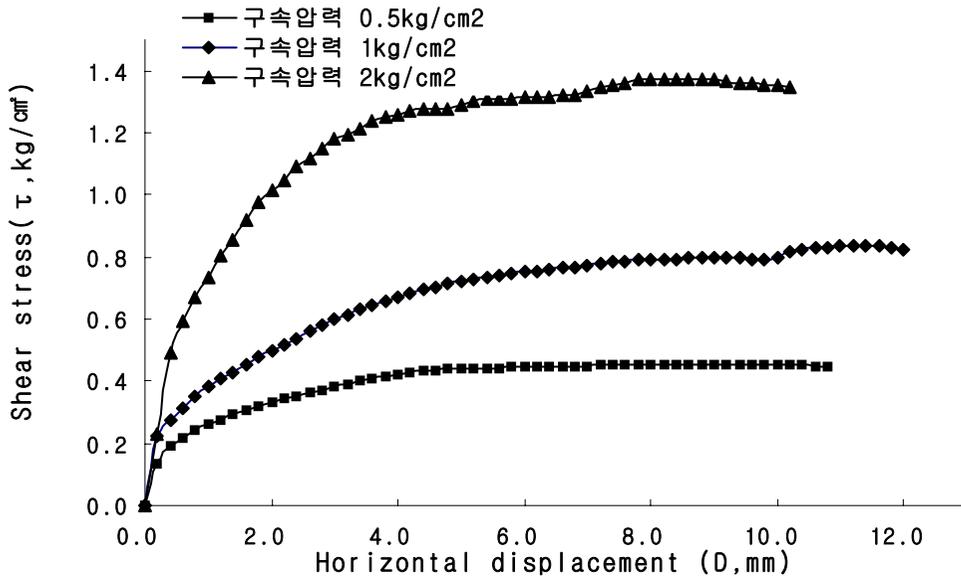


Fig. 3.6 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr50%)

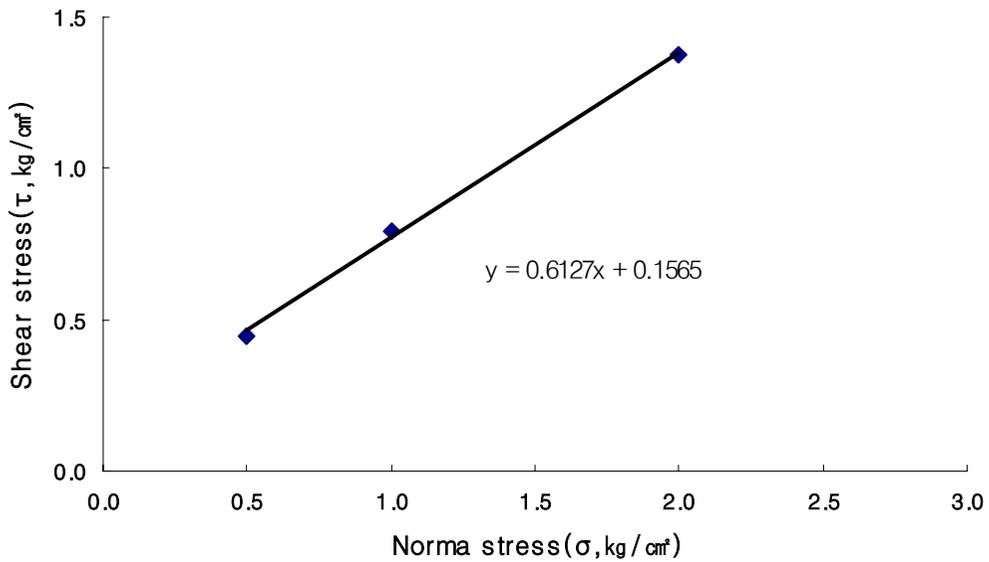


Fig. 3.7 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr50%)

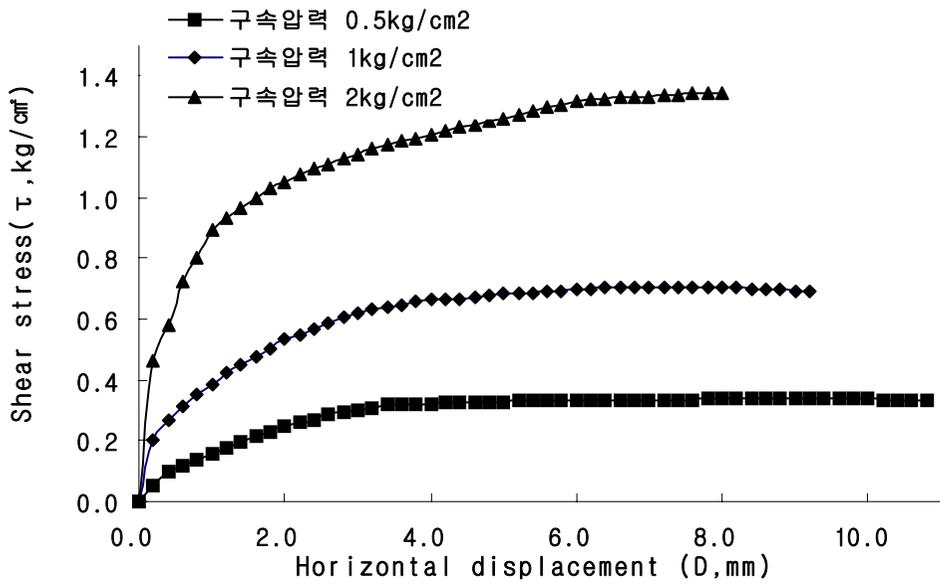


Fig. 3.8 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (Dr70%)

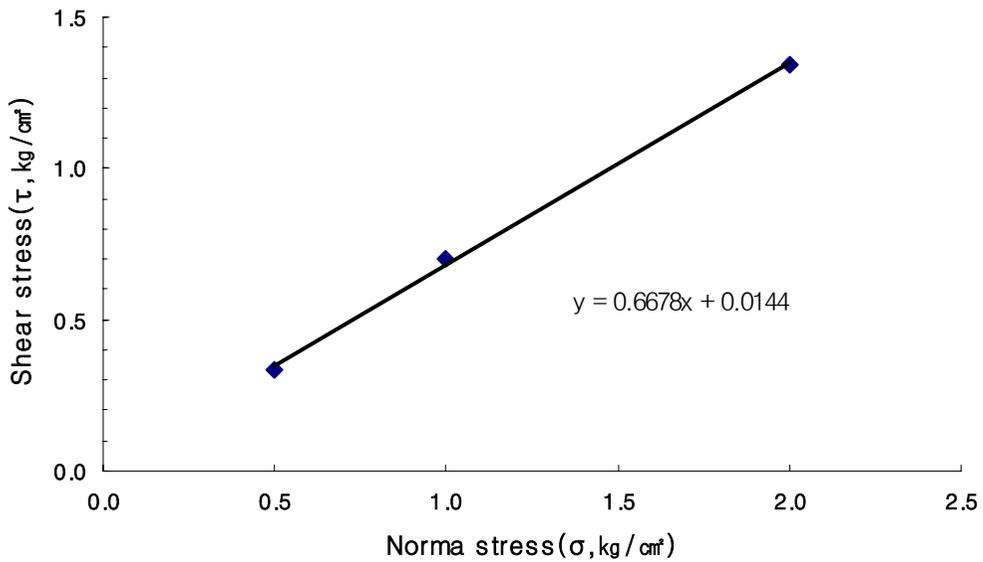


Fig. 3.9 Relationship between Shear stress and Normal stress (Dr70%)

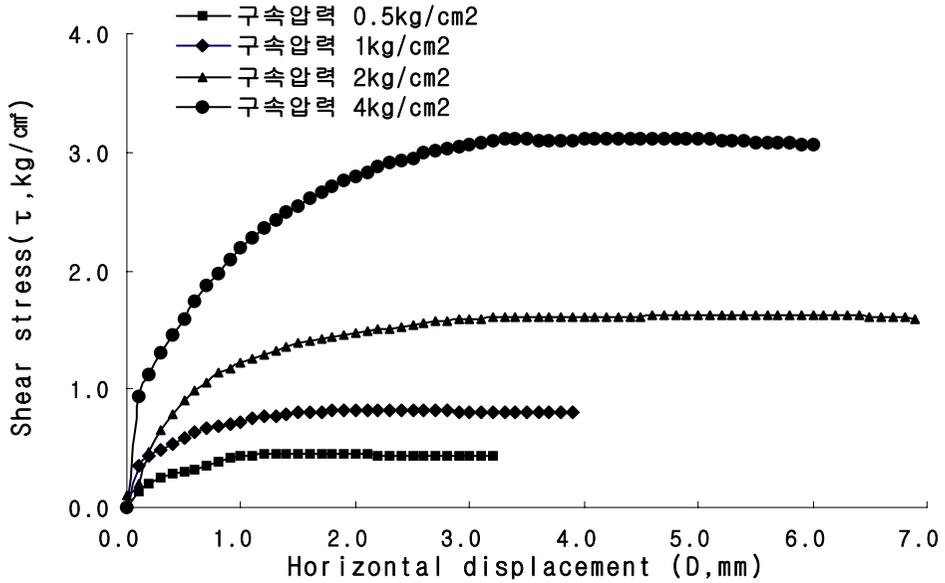


Fig. 3.10 Relationship between Shear stress and horizontal displacement (compaction)

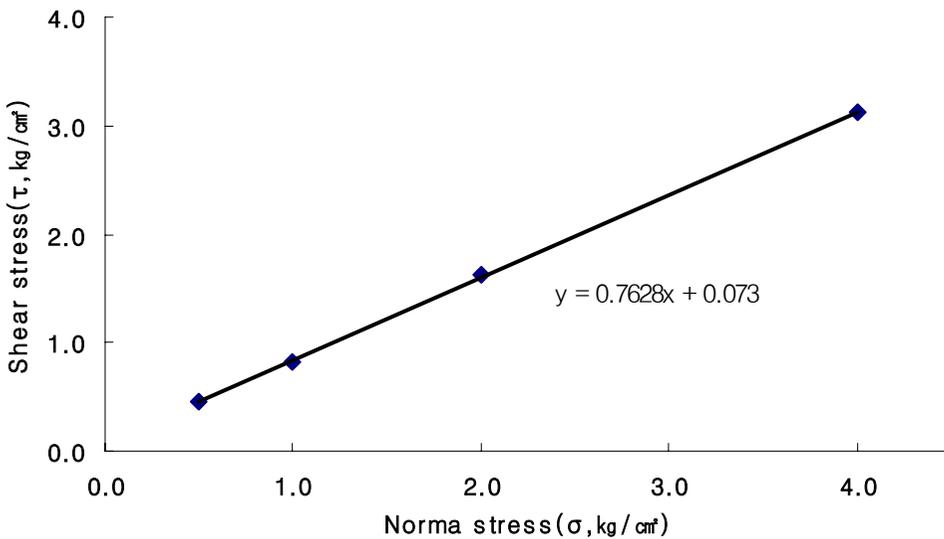
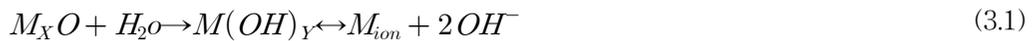


Fig. 3.11 Relationship between Shear stress and Normal stress (compaction)

(2) 화학적 특성

현무암 석분슬러지의 화학적 특성을 알아보기로 X선 형광분석기(X-Ray Fluorescence, XRF)를 통해 주요성분을 분석하였다.

석분의 PH는 약 8.67로 나타나 약알카리성을 띠고 있다. 주성분은 $SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$ 가 78.39%로 주종을 이루고 있는 것으로 나타났다. 또한 PH 상승물질인 CaO 와 MgO , K_2O , Na_2O 가 약 18%를 차지하고 있어 이들의 가수분해 작용에 의해 생성된 2 mole 의 OH^- 에 의해 약알카리성 상태를 나타내는 것으로 판단된다(조재범 외 3인, 2002).(식(3.1))



여기서 M: Ca, Mg, Mg, K, Na

Table. 3.5와 Fig. 3.12에는 XRF를 통해 현무암 석분에 대하여 분석한 현무암 석분의 화학적 조성 분석결과를 나타내었다. 화학적 조성을 보면 실리카성분인 SiO_2 의 함량이 52.66%로 나타나 가장 많은 비율을 나타내었으며 CaO 의 함유율은 8.31%로 Al_2O_3 가 14.67%, Fe_2O_3 가 11.06%로 나타났다.

SiO_2 및 Al_2O_3 는 경화과정 중에 형성되는 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 터버모라이트(tobermorite : $CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$)를 형성할 수 있을 것으로 판단된다.(조재범 외 3인, 2002) Al_2O_3 의 경우 $Ca(OH)_2$ 와 반응하여 $3CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$ 를 형성하며 석고와 반응하여 에트링가이트를 형성하는 포졸란반응을 일으킬 것으로 판단된다.(조재범 외 2인, 2004).

Table. 3.5 Chemical composition of Powdered basalt

Sample constituent	Contents (%)
SiO_2	52.66
Al_2O_3	14.67
TiO_2	1.93
Fe_2O_3	11.06
MgO	6.33
CaO	8.31
Na_2O	2.84
K_2O	0.98
MnO	0.14
P_2O_5	0.34
LOI	-
total	99.26

LOI : Loss of Ignition

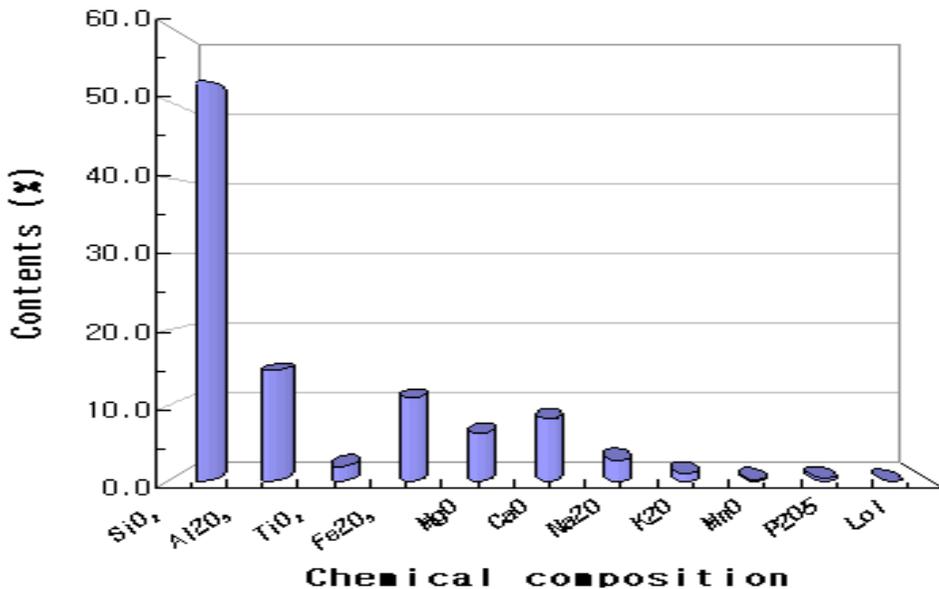


Fig. 3.12 Chemical composition of Powdered basalt

3.1.2 현장토

(1) 물리적 및 역학적 특성

본 연구에서는 제주도지역의 S공사 현장토를 시료로 사용하여 연구하였다. 본 실험에서는 3H와 5H 두개 지점의 시료만을 채취하여 연구대상으로 하였다.

현장토의 물리적 및 역학적 특성을 파악하기 위하여 각종 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 시료는 100°C 이상으로 24시간 이상 완전히 건조한 시료를 사용하였다.

Table. 3.6에는 현장토의 기본 물성을 파악하기 위해 실시한 실험의 한국산업규격(Korean Industrial Standards)을 나타내었다.

실험 결과는 Table. 3.7에 제시하였다. 각 측정치는 3회 측정치의 평균값이다. Fig. 3.13과 Fig. 3.15는 현장상태 시료의 입도분포곡선을 나타내었다. 비중의 값은 2.58~2.67로서 일반적인 토사와 모래의 추정 비중값 2.65와 비슷한 수치를 나타낸다. 액성 및 소성한계는 시험결과 액성한계는 40%~41%, 소성한계는 22.65%~25.48%로; 소성지수는 15.52~17.35로 나타났다. 현장상태의 시료에 대해 다짐 시험한 결과 최적함수비는 18.6%~19%, 최대건조단위중량은 1.715g/cm³~1.73g/cm³ 으로 나타나고 있다. Fig. 3.14와 Fig. 3.16은 현장상태시료의 다짐곡선을 보여주고 있다.

토양의 분류기준인 통일분류법(Unified Soil Classification System)에 의하여 분류하면 현장토는 SW에 분류되는 것으로 나타났다.

Table. 3.6 The Test Method for the Powered Basalt

Item	Korean Industrial Standards
비중시험	KS F2308
액·소성한계 시험	KS F2303, KS F2304,
입도분석	KS F2309, KS F2302
다짐시험	KS F2312
투수시험	KS F2322-95

Table. 3.7 The physical of the soil

Tests	Test Result		
	Contents	Soil.3H	Soil.5H
Specific gravity	Specific gravity(Gs)	2.58	2.67
Field density	dry unit weight (g/cm ³)	1.48	1.49
Water contents	Water contents(%)	15.27	13.51%
grain size analysis	coefficient of uniformity C_u	13.33	13.33
	coefficient of curvature C_c	1.67	1.67
Liquid & Plastic	Liquid limit (LL,%)	41.00	40
	Plastic limit (PL,%)	25.48	22.65
	plastic index (PI)	15.52	17.35
A compaction	Optimum moisture content(%)	18.60	19.00
	Maximum dry unit weight (g/cm ³)	1.715	1.73
permeability Test	coefficient of permeability of compaction sample (cm/sec)	7.50E-04	1.01E-05

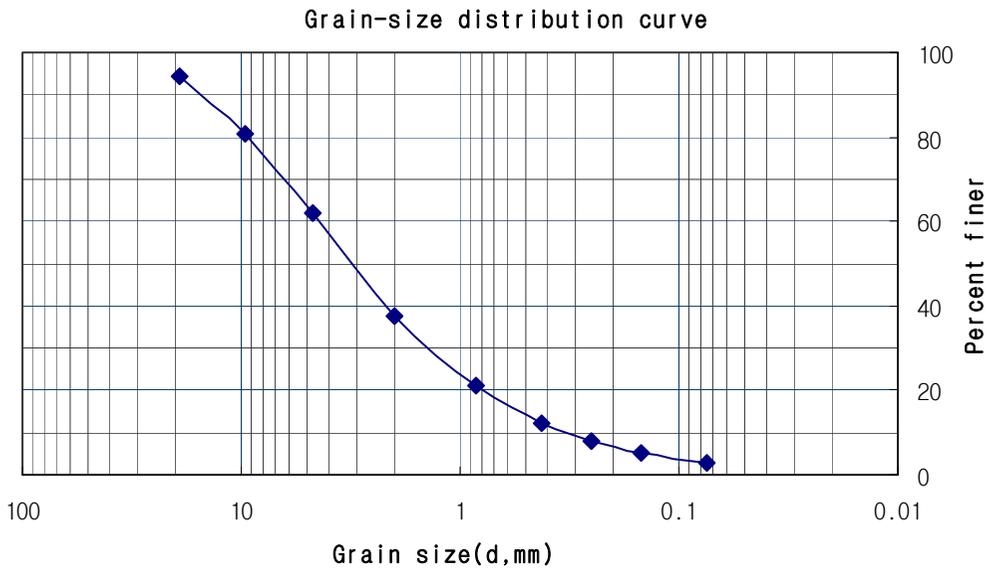
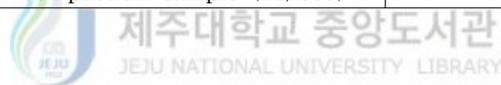


Fig. 3.13 Grain-size distribution curve of site soil sample 3

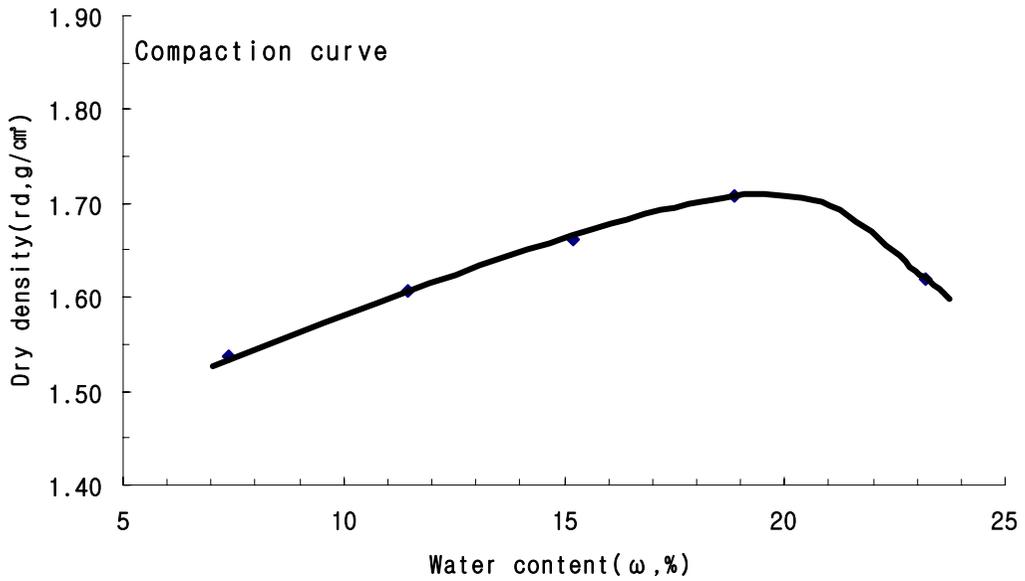


Fig. 3.14 Compaction curve of site soil sample 3

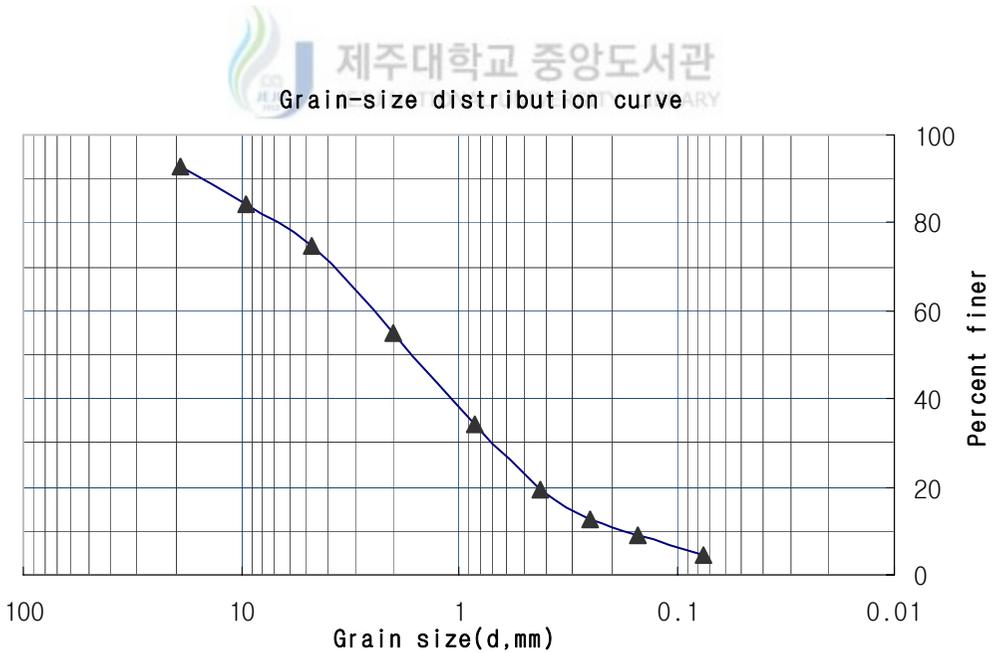


Fig. 3.15 Grain-size distribution curve of site soil sample 5

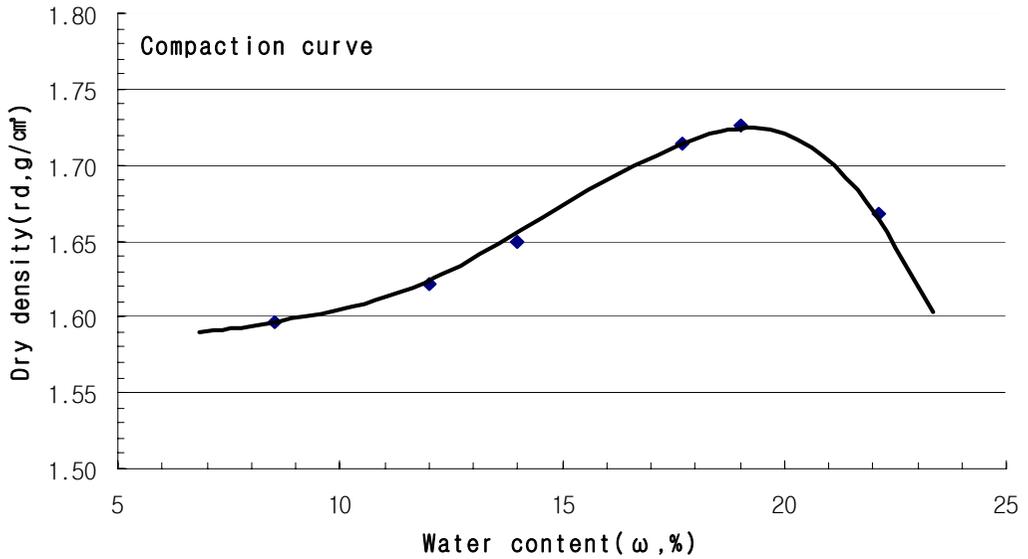


Fig. 3.16 Compaction curve of site soil sample 5

3.1.3 시멘트 및 혼화제  제주대학교 중앙도서관
JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

(1) 시멘트

시험에 사용한 시멘트는 국내에서 생산되는 C사 특급 고로슬래그 시멘트를 사용하였으며 혼화제는 D사 제품을 사용하였다. 사용된 시멘트 화학적·물리적 특성은 Table. 3.8~Table. 3.9에 나타내었다. Table. 3.10은 혼화제의 화학적 특성을 나타내었다.

Table. 3.8 chemical composition of cement

constituent	chemical composition (%)
SiO_2	30~36
Al_2O_3	12~18
Fe_2O_3	0.25~0.35
CaO	38~45
MgO	10.0이하
SO_3	2.74
S(황분)	1.0

Table. 3.9 Physical composition of cement

Contents	physical composition
강열감량 (%)	0.99
밀도 (kg/m ³)	2.9~2.95
잔분 (>45 μ m)	2.0 이하
평균입경(μ m)	10~13
비표면적 (cm ² /g)	4,210
모르타의 공기함유량 (%)	3.46
비중	3.04

Table. 3.10 Chemical composition of quick setting admixtures

constituent	<i>SiO₂</i>	<i>Al₂O₃</i>	<i>Fe₂O₃</i>	<i>CaO</i>	<i>Na₂O</i>	<i>K₂O</i>	<i>MnO</i>	<i>P₂O₅</i>	<i>LOI</i>	<i>total</i>
Contents (%)	-	6.59	-	-	36.41	-	-	-	37.87	80.86

LOI : Loss of Ignition



3.2 실험을 위한 시험편의 성형

3.2.1 현무암 석분 및 시멘트 혼합시료

(1) 투수시험을 위한 시험편의 성형

현무암 석분슬러지와 시멘트 배합비는 0:1, 1:1, 4:1, 5:1, 6:1, 9:1로 하였으며 혼합체의 첨가량은 시멘트 중량의 1%로 하였으며, 각 배합비에 대한 슬럼프 실험을 통하여 W/(C+SG)(C: 시멘트, SG: 석분)비는 37.5%로 정하였다. 이때 슬럼프의 값은 7.5~12.5로 나타났다.

중공 원통(hollow cylinder)형 시험편의 성형 방법은 모르타 혼합기를 사용하여 혼합시료를 혼합한 다음 HD-215(ϕ 10×20cm)몰드를 사용하여 시험체를 성형한다. 다음 몰드에 넣은 상태에서 20~24시간이상 습윤 양생한다. 다음 몰드 밑판만 해체한 상태에서 코어 머신(Fig. 3.17)을 이용하여 직경이 20mm인 드릴 비트를 이용하여 Fig. 3.18에 제시된 것과 같이 시험체 중심에 천공을 한다. 천공 과정 중에서 기

계의 진동으로 하여 공시체가 균열이 갈수 있는데 이는 투수시험결과에 영향이 있을 것으로 사료된다.

천공을 한 다음 몰드를 해제 하여 Fig. 3.19에서와 같이 시험체를 향한 양생수조의 깨끗한 물에 담그어 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ 의 온도에서 수침 양생을 하였다. 시험체는 수중에서 7일, 14일, 28일 동안 양생하여 투수시험에 사용하였다.

다음 소정의 시간을 양생한 다음 투수시험 시험체를 만들기 위하여 시험체를 수조에서 꺼낸 다음 인차 표면의 물기를 제거한다. Fig. 3.20은 투수시험을 위한 공시체의 모식도를 나타낸다.

Fig 3.21a에서와 같이 상부 구멍을 실리콘으로 봉한 다음 고무판을 긴밀히 접촉시킨다. 하부 구멍은 Fig. 3.21b에서와 같이 실리콘으로 봉하되 중심이 뚫리어 고무호스가 들어갈 수 있도록 한다. 다음 중심을 뚫은 원형 고무판을 긴밀히 접촉시킨다. Fig. 3.21c는 시험체의 밑 부분을 나타낸다. Fig. 3.21d 는 성형된 투수시험 공시체를 나타낸다. 고무판으로 시험체 내부와 외부를 연결시키는 유출 경로를 만들어 줌으로서 시험체와 투수시험기 몰드사이의 불충분한 접촉으로 인한 누수와는 상관없이 공시체만을 통과한 물의 양으로 투수계수를 측정함으로써 시험기와 시험체의 결함으로 인한 오차를 줄일 수 있다.



Fig. 3.17 Electric ASphalt Core Drilling Machine



Fig. 3.18 Specimen prepared for this study



Fig. 3.19 Curing Apparatus

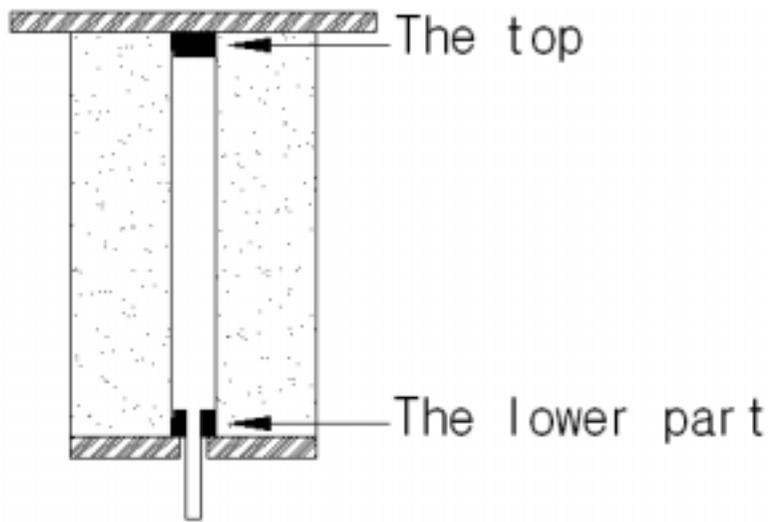


Fig. 3.20 Schematic diagram of test setup



Fig. 3.21 The making process of specimen

3.2.2 현무암 석분 및 현장토의 투수시험을 위한 시험체의 성형

투수시험을 위한 공시체는 현무암 석분과 현장토3, 5번 혼합시료로서 석분의 함량이 0%, 10%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%로 하여 다짐시험을 수행하여 최적함수비와 최대건조밀도에 의하여 투수시험 시험체를 성형하여 사용하였다. 또 현장 들 밀도 시험결과에 의하여 상대밀도 91.0%와 89.5%로 재성형하여 투수시험 시험체를 성형하였다.

Fig. 3.22은 다짐시험결과에 의하여 소정의 밀도로 투수시험 시료를 별도로 주문 제작한 투수시험용기에 성형하는 장면이다. Fig. 3.23 는 성형 후 시료를 포화를 시키는 장면이다.



Fig. 3.22 Remolded sample



Fig. 3.23 Samples saturation

3.2.3 압축강도시험을 위한 시험편의 성형

압축강도용 공시체는 Fig. 3.24와 같이 $\phi 5 \times 10$ cm인 삼연형 시린더 몰드(Three Gang Mortar Cylinder Mold)로 현무암 석분슬러지와 시멘트혼합시료의 압축강도용 공시체를 제작 하였다.

혼합시료는 몰탈 혼합기를 이용하여 혼합한 다음 몰드에 넣어 다진다. 다음 성형이 끝나면 몰드에 넣은 상태에서 24시간 이상 습윤 양생한다. 몰드를 해체 하고 시험체를 몰드에서 빼내고 항온양생수조의 깨끗한 물에 담그어 놓는다. 양생수조의 온도는 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지한다.



Fig. 3.24 Three Gang Mortar Cylinder Mold

3.3 시험장치

3.3.1 투수시험 장치

(1)현무암 석분과 시멘트 및 혼화제 혼합시료의 투수시험은 외압식 콘크리트 투수 시험기를 이용하여 시험 하였다. Fig. 3.25는 투수시험기를 나타낸 그림이다. 시험기는 가압펌프, 투수시험용기, 측정부분 3개 주요 부위로 나눌 수 있다. Fig. 3.26은 투수시험기의 모식도를 나타낸다.

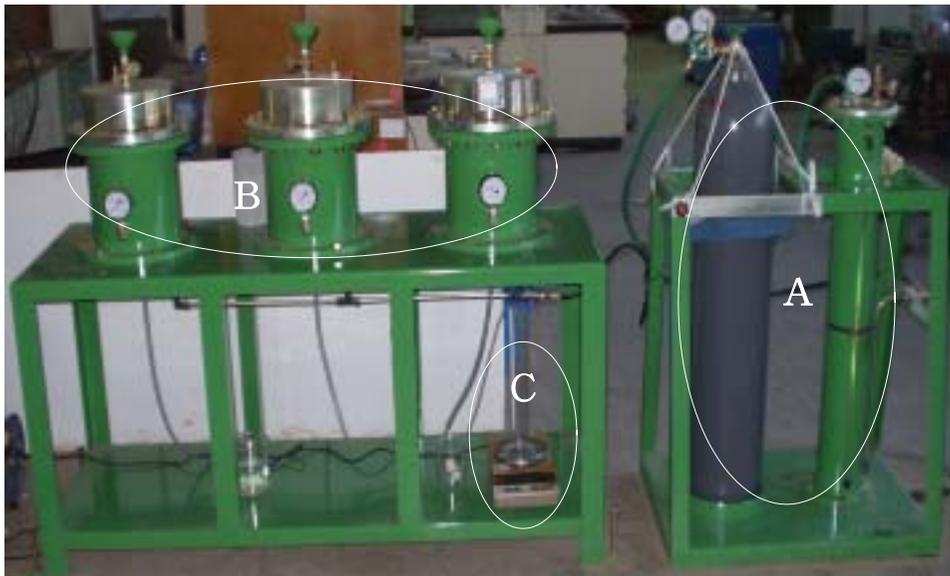


Fig. 3.25 Permeability Test Apparatus of concrete

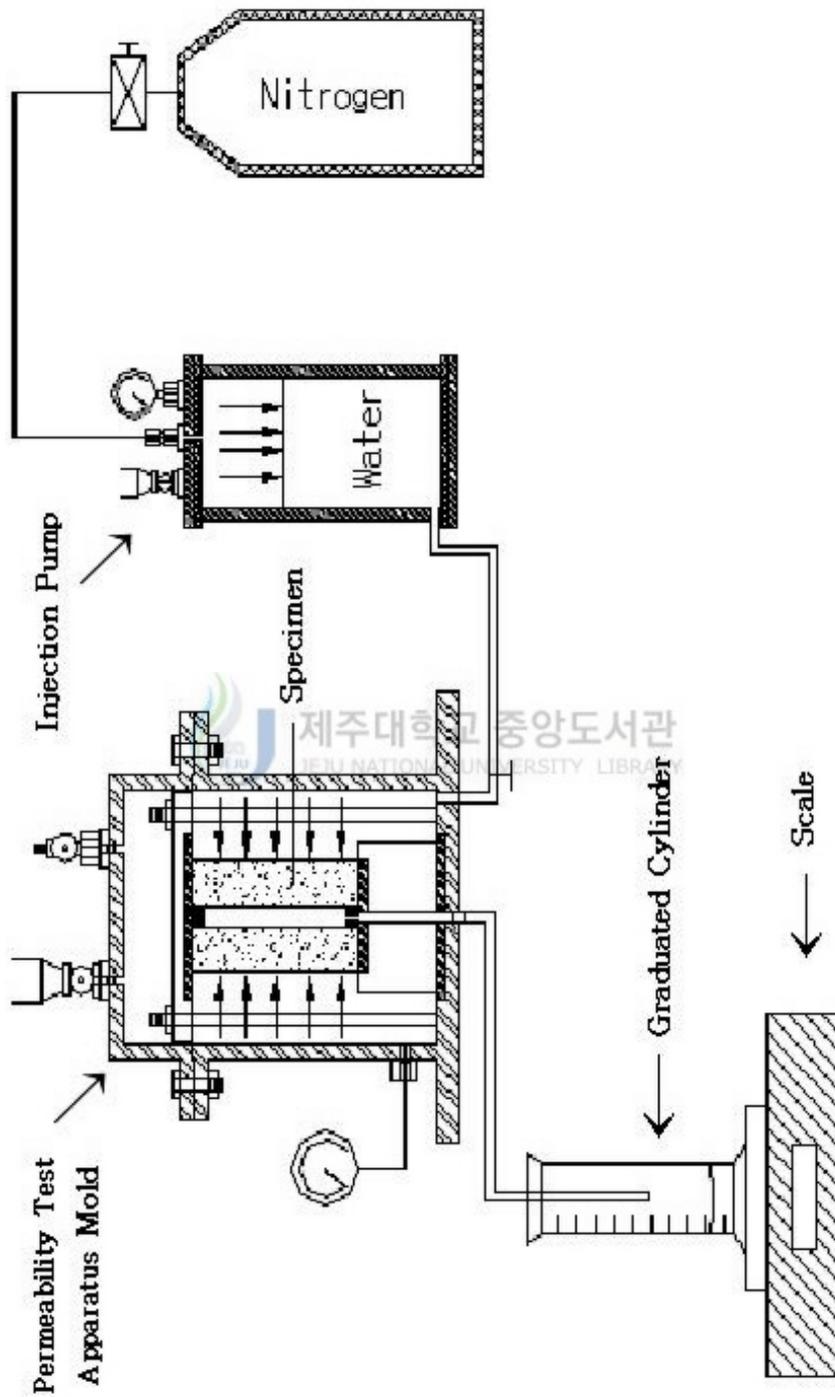


Fig. 3.26 Schematic diagram of Permeability test setup

위 그림에 제시된 마와 같이 가압펌프는 축압수조와 액화질소 가스통으로 이루어져 일정한 수압을 가해주는 역할을 한다. 질소 가스는 레귤레이터와 밸브를 통하여 일정한 압력으로 축압수조 상단에 주입 되고 이 압력을 이용하여 축압수조에 있는 물을 일정한 수압으로 밀어 준다. 수압을 시험편으로 그대로 전달시키기 위한 연결 부분은 가해지는 수압을 충분히 견딜 수 있는 파이프로 연결 되었다. 투수용기는 내부의 하부에는 있는 Fig. 3.27과 Fig. 3.28와 같이 공시체 받침 몰드와 상부에는 Fig. 3.29과 Fig. 3.30과 같이 공시체를 고정할 수 있는 접촉면에 고무판으로 되어 있는 캡이 볼트로 고정 되어 있다. 투수용기 상부에는 용기덮개(Fig. 3.31)가 수압을 충분히 견디 내도록 Fig. 3.32와 같이 볼트에 의하여 단단히 조여져 있다. 접촉면에는 용기가 충분히 밀봉 되도록 O-ring을 사용하여 물의 유출을 막을 수 있다.



Fig. 3.27 Support Mold



Fig. 3.28 Setting feature



Fig. 3.29 Fixing Cap



Fig. 3.30 Setting feature



Fig. 3.31 Container Lid



Fig. 3.32 Setting feature

유량을 측정하기 위하여 Fig. 3.33과 같이 시험편 하단에 비커 혹은 메스실린더를 놓아 시험편을 통과하여 나오는 유출수를 모아 최소 눈금이 0.5ml인 메스실린더와 정밀도가 0.01g인 전자저울을 동시에 사용하여 유량을 측정하였다.



Fig. 3.33 Measurement Equipment

(2) 현무암 석분과 현장토 및 혼화제 혼합시료의 투수시험은 별도로 주문제작한 투수시험용기를 사용하였다. Fig. 3.34에서 나타낸바와 같이 A다짐 몰드와 같은 규격으로 제작한 시험기로서 소정의 밀도 및 함수비로 투수시험용 시료를 직접다짐으로서 시험체를 성형하여 시험할 수 있도록 설계하였다. Fig. 3.35는 투수시험기의 모식도를 나타낸다.



Fig. 3.34 Falling head permeability tester

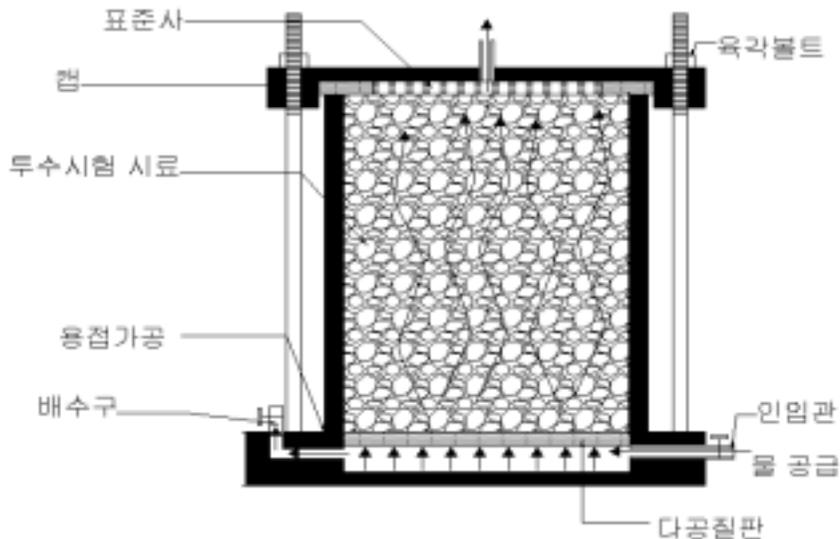


Fig. 3.35 Schematic diagram of falling head Permeability test setup

3.3.2 압축강도 시험장치

압축강도 시험장치는 몰탈 압축강도 시험기(Fig. 3.36참조)를 사용하였다.



Fig. 3.36 Digital Portable Compression Tester



3.4 시험방법

3.4.1 투수시험

본 연구는 현무암 석분을 주요 연구대상으로 석분, 시멘트 및 혼화제; 석분, 현장토, 혼화제의 최적 배합비를 도출하고 그 특성을 파악하는데 중점을 두었다.

현무암 석분의 물리·화학적 특성을 파악하고 현무암 석분에 시멘트와 혼화제를 첨가한 각 배합비 혼합시료의 투수계수를 연구하고 이에 따른 강도특성을 연구하여 혼합시료의 차수재로서의 적합성을 연구하는 것이다.

(1) 현무암 석분과 시멘트 및 혼화제의 투수시험은 아래와 같이 시행하였다. Fig. 3.21에서와 같이 준비된 시료를 Fig. 3.37에서 제시된 것처럼 투수용기 내부에 있는 몰드 ②위에 올려놓고 ①처럼 공시체와 몰드접촉부위의 간극을 실리콘으로 봉한다. 다음 캡(③)으로 공시체를 고정시킨다.

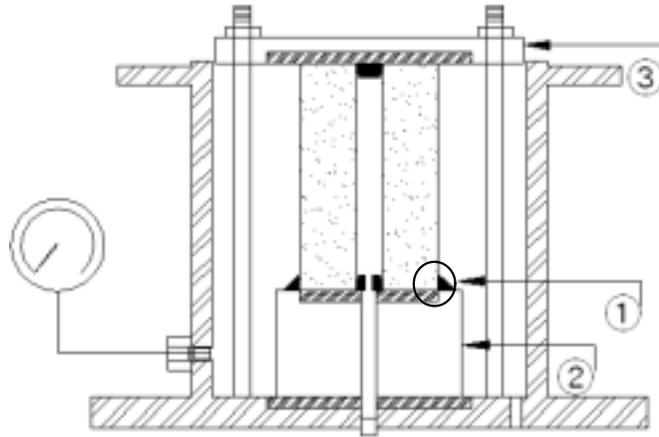


Fig. 3.37 Schematic diagram of Permeability test container

이렇게 고정시키고 투수시험 용기 덮개로 고정 시킨 후 시험 용기내에 물을 채운 후 1시간 정도 시험 시 가해지는 수압보다 큰 수압으로 유지한다. 이것은 시험편의 패킹여부를 확인하고 패킹 과정 중 시험편의 건조문제를 해결하여 다시 포화 상태로 만드는 역할을 한다.

이러한 작업을 거친 후 Fig. 3.26과 같이 실험 준비를 완료 한다. 실험 준비가 끝나면 1시간 정도 포화 시킨 후 시험을 시작한다. 액화 질소 가스통과 압축수조의 밸브와 레귤레이터를 통하여 수압을 조절한다. 이때 가스통, 압축수조, 시험용기의 레귤레이터는 같은 수압을 나타낸다.

소정의 수압에 도달 하면 다시 한번 투수시험 용기의 수압을 확인하고 메스실린더와 저울을 이용하여 일정한 시간동안의 유량을 측정한다. 식 2.12에 의하여 투수계수를 구한다.

(2) 현무암 석분과 현장토 및 혼화제의 혼합시료의 투수시험은 다음과 같은 방법으로 시행하였다. 준비한 시료를 충분히 포화 시킨 후 배수구가 달린 덮개로 덮어 물이 새어 나오지 않도록 O-ring끼워 넣어 볼트로 고정 시킨다. 다음 변수위 투수시험방법으로 투수계수를 측정한다.

3.4.2 압축강도시험

압축강도 시험은 수중양생과 공기양생을 한 각 현무암석분과 시멘트 배합설계 시험체에 대하여 각 배합비 시험체로 7일, 14일, 28일 재령의 압축강도를 측정하여 공시체의 강도특성을 연구한다.

3.4.3 포졸란 반응의 관찰

석분과 시멘트, 혼화제 배합설계에서는 혼합시료에 함유되어 있는 Silicate와 Aluminate 및 Ca성분과의 포졸란 반응을 관찰하기 위하여 SEM을 통해 석분의 입자 형상 및 표면, 혼합 공시체의 입자 형상을 관찰 분석 하였다.



4. 결과 및 고찰

4.1 투수시험

4.1.1 현무암 석분과 시멘트 시험체의 투수계수

현무암 석분에 대하여 다짐시험결과에 의하여 투수시험공시체를 성형하여 투수시험을 한 결과 다짐 석분의 투수계수는 $4.670E-06\text{cm/sec}$ 로 나타났다.

각 혼합비 투수시험결과는 Table. 4.1에 나타내었다. 각각의 배합비에 따른 투수계수는 시멘트 함유율이 증가 할수록 즉 석분의 함량이 감소될수록; 양생일수가 증가할수록 감소되는 것으로 나타났다.

폐기물 관리법상 투수기준 1×10^{-7} 이하를 만족하는 배합비는 시멘트의 함량이 17%부터 28일 양생 시험체에서 만족하는 것으로 나타났다. 시멘트 함량이 13%와 10%는 기준을 만족하지 않으나 기준치에 접근하는 것으로 나타난다. 시멘트 함량이 17%이상인 경우 28일 양생 시험체만 투수기준을 만족하고 7일과 14일 양생 시험체는 만족하지 않고 시멘트 함량이 20%인 경우 14일 양생과 28일 양생 시험체만 투수기준을 만족하고 7일 양생 시험체는 투수기준을 만족하지 않는 것으로 나타났다. 시멘트 함량이 17%시험체로부터 시멘트의 함유율에 관계없이 28일 양생 시험체의 투수계수가 폐기물관리법의 매립지 품질기준을 만족하는 것으로 나타나 차수재로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

차수재에 있어서 가장 중요한 것은 차수특성이다. 투수계수는 첨가된 시멘트 함량의 증가에 따라 점차적으로 감소하였다.(Fig. 4.1참조) 모든 배합비의 공시체는 양생시간의 경과에 따라 투수계수가 지속적으로 감소하였다.(Fig. 4.2참조) 이는 현무암 석분과 시멘트가 작용하여 형성된 칼슘실리케이트 침전물이 혼합시료의 공극을 메우게 되어 이루어지는 현상에 기인 한다(Kenneth,1995). 시간의 경과에 따라 투수계수가 감소하는 것은 수중 양생하는 동안 시간의 경과에 따라 포졸란 반응이 진행 되는 것으로 사료된다.

공시체 제작과정에서 몰드의 해체 및 천공과정에서 시험체에 대한 진동으로 시험체에 미세한 균열이 갈수 있다. 이로 인하여 투수계수 측정에 일정한 오차가 있을 것으로 사료된다.

Fig. 4.1은 투수계수와 시멘트 함유율 사이의 관계를 나타내었다. 그림에서 나타난 것처럼 시멘트의 함량이 증가 할수록 투수계수는 감소하는 경향을 나타내었으며 시멘트의 함량이 50%이하인 경우 투수계수 변동 폭이 매우 큰 것으로 나타났다. 시멘트 함량이 50%를 넘으면 투수계수는 작은 변화폭으로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

양생 시간의 경과에 따라 각각의 배합비 별 7일부터 14일 양생기간의 시험체 투수계수는 급속히 감소하는 것으로 나타나고 있지만 그 이후부터는 시간이 경과할수록 투수계수의 감소가 매우 둔화되고 있다. (Fig. 4.2)

Table. 4.1 Coefficient of permeability of specimen

Curing time (day)	7	14	28
	cm/sec	cm/sec	cm/sec
100% (0:1)	1.638E-08	1.180E-08	7.323E-09
50% (1:1)	5.294E-08	2.225E-08	1.110E-08
20% (4:1)	4.328E-06	9.481E-08	8.942E-08
17% (5:1)	6.271E-06	1.738E-07	9.836E-08
13% (6:1)	8.693E-06	2.438E-07	1.925E-07
10% (9:1)	1.493E-05	9.342E-07	8.38E-07
0% (1:0)	4.670E-06		

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

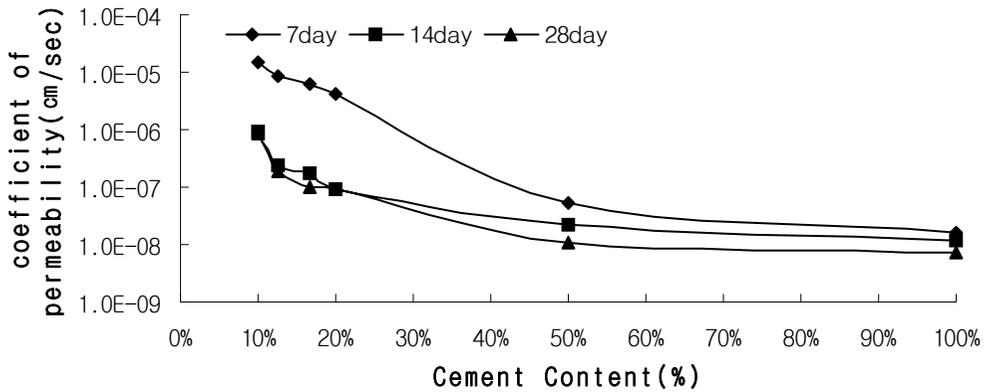


Fig. 4.1 Relationship between coefficient of permeability and Cement Content

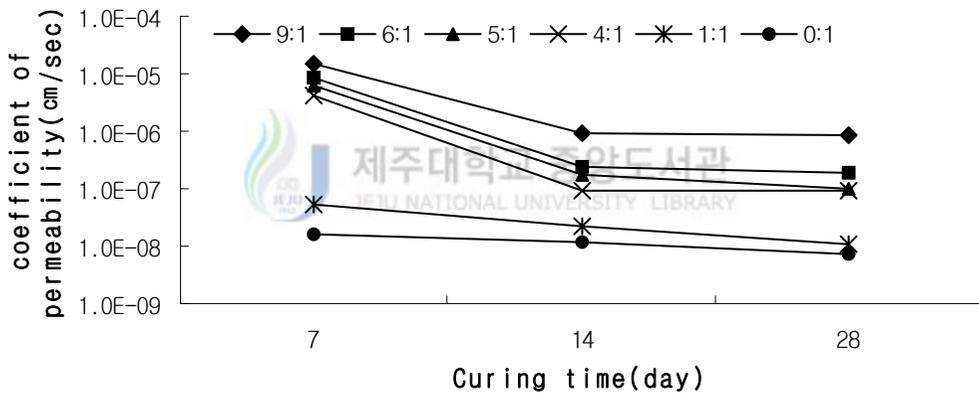


Fig. 4.2 Relationship between coefficient of permeability and Curing time

4.1.2 현무암 석분과 현장토 시험체의 투수계수

Table. 4.2는 석분과 3H현장토 시료의 No.4체 통과 시료 및 혼화제의 배합설계에 서의 혼합시료의 A다짐시험 결과를 나타내었다. Table. 4.4는 5H현장토 시료의 No.4체 통과 시료 및 혼화제의 배합설계에서의 혼합시료의 A다짐시험 결과를 나타내었다. 혼화제는 현무암 석분의 1%로 고정하여 투수시험 시험체를 배합설계 다짐 시험결과에 의하여 성형하여 실행하였다. 다짐시험결과 석분의 함량이 많아질수록 최대건조밀도가 상승하는 경향을 나타내고 최적함수비는 작아지는 경향을 나타내고

있다. 이것은 혼합시료의 석분함량 증가에 인한 것으로 사료된다. Table. 4.3과 Table. 4.5는 다짐 시험결과에 의하여 배합비 별 성형한 3H, 5H현장토로 혼합한 시료의 투수계수와 시험 후 간극비를 나타내고 있다.

Table. 4.2 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 3

Specimen	Maximum wet unit weight(g/cm ³)	Maximum dry unit weight(g/cm ³)	optimum moisture content(%)
	No.4	No.4	No.4
0% (0:1)	1.969	1.487	24.50
10% (1:9)	2.060	1.525	26.00
20% (2:8)	2.031	1.542	24.10
40% (4:6)	2.037	1.593	21.80
60% (6:4)	2.046	1.615	21.10
80% (8:2)	2.039	1.642	19.50
100% (1:0)	2.001	1.66	21.8

Powdered basalt Content (Powdered basalt : soil)

Table. 4.3 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 3

Specimen	K (cm/sec)	void ratio
	No.4	e
0% (0:1)	1.56E-05	0.748
10% (1:9)	2.35E-06	0.726
20% (2:8)	1.51E-06	0.725
40% (4:6)	9.89E-07	0.729
60% (6:4)	1.62E-06	0.741
80% (8:2)	1.98E-06	0.765
100% (1:0)	4.670E-0	0.747

Powdered basalt Content (Powdered basalt : soil)

Table. 4.4 Compaction test result of Powdered basalt and soil sample 5

Specimen	Maximum wet unit weight(g/cm ³)	Maximum dry unit weight(g/cm ³)	optimum moisture content(%)
	No.4	No.4	No.4
0% (0:1)	1.874	1.49	25.8
10% (1:9)	1.943	1.53	27.0
20% (2:8)	1.938	1.55	25.0
40% (4:6)	1.957	1.59	23.5
60% (6:4)	1.952	1.60	22.0
80% (8:2)	1.999	1.65	21.2
100% (1:0)	2.001	1.66	21.8

Powdered basalt Content (Powdered basalt : soil)

Table. 4.5 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen 5

Specimen	K (cm/sec)	void ratio
	No.4	e
0% (0:1)	1.010E-05	0.836
10% (1:9)	2.132E-06	0.845
20% (2:8)	1.087E-06	0.825
40% (4:6)	2.345E-07	0.779
60% (6:4)	1.861E-07	0.788
80% (8:2)	2.058E-06	0.875
100% (1:0)	4.670E-06	0.747

Powdered basalt Content (Powdered basalt : soil)

Fig. 4.3과 Fig. 4.4는 각 배합비에 따른 투수계수를 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이 투수계수는 석분의 함량이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보이다가 석분의 함량이 60% 정도로 증가하면 투수계수가 최소치를 나타내고 있다. 그러나 석분함량이 그 이상으로 증가하면 투수계수가 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 이것은 Table. 4.3, Table. 4.5에 나타낸 바와 같이 각 배합비에 따른 간극비가 감소할수록 투수계수도 이에 비례하여 감소하는 것으로 해석할 수 있다.

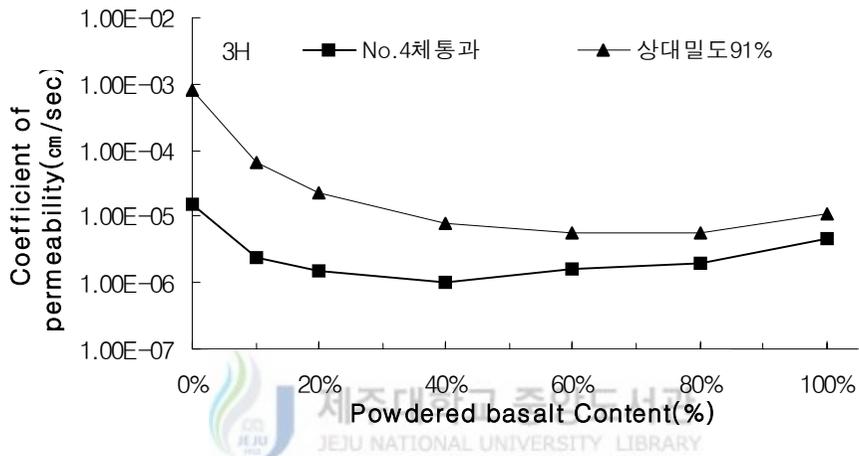


Fig. 4.3 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 3

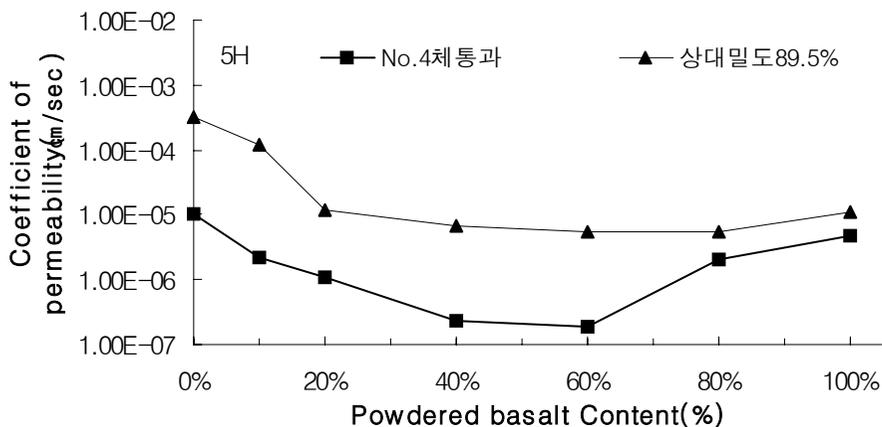


Fig. 4.4 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content of Soil 5

Table. 4.6는 현장들밀도 결과에 의하여 3홀은 상대밀도 91%, 5홀은 상대밀도 89%에 의하여 시험체를 성형하여 투수시험을 한 결과이다. 투수계수는 간극비에 정비례하여 Fig. 4.5에서 나타낸 바와 같이 석분의 함량이 증가함에 따라 투수계수는 간극비에 비례하여 감소하다 증가하는 경향을 보이고 있다.

Table. 4.6 Coefficient of permeability of Powdered basalt and soil Specimen

Specimen	3H relative density Dr 91%		5H relative density Dr 89%	
	K(cm/sec)	void ratio e	K(cm/sec)	void ratio e
0% (0:1)	7.840E-04	0.868	3.140E-04	1.353
10% (1:9)	6.755E-05	0.795	1.162E-04	0.777
20% (2:8)	2.321E-05	0.788	1.212E-05	0.756
40% (4:6)	8.013E-06	0.785	6.842E-06	0.741
60% (6:4)	5.850E-06	0.767	5.439E-06	0.731
80% (8:2)	5.705E-06	0.835	5.520E-06	0.757
100% (1:0)	1.072E-05	0.845	1.072E-05	0.845

Powdered basalt Content (Powdered basalt : soil)

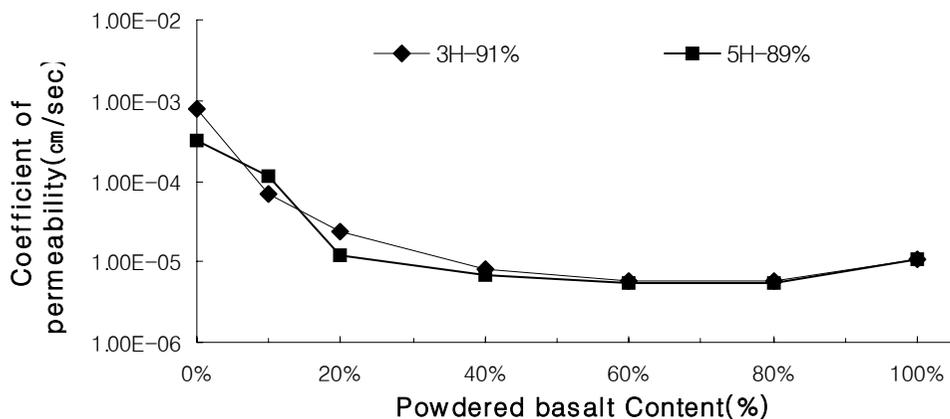


Fig. 4.5 Relationship between coefficient of permeability and Powdered basalt Content (field density)

4.2 압축강도시험

4.2.1 현무암 석분과 시멘트 시험체의 압축강도

투수계수에 따른 각 배합비별 압축강도를 조사하기 위하여 공시체를 제작 후 수중양생과 공기양생 시험체에 대하여 양생일수 7일, 14일, 28일의 압축강도를 측정하였다. Table. 4.7은 수중양생공시체의 압축강도시험 결과를 나타내고 Table. 4.8은 공기양생공시체의 압축강도시험 결과를 나타냈다. 시멘트의 함량의 증가에 따라 수중양생과 공기양생의 시험체의 압축강도는 모두 증가하는 경향을 나타내었다. 각 배합비 별 수중양생의 시험체인 경우 양생일수의 경과에 비례하여 압축강도도 증가하였다. 공기양생의 시험체인 경우 시멘트의 함량의 일부 공시체에서 강도가 감소하는 경향을 나타내었다.

Fig. 4.6와 Fig. 4.7은 수중 양생시험체와 공기 양생시험체의 압축강도와 시멘트 함유율 사이의 관계를 나타내었다. 공기양생과 수중양생 두 경우 모두 시멘트 함량이 증가할수록 압축강도도 증가하는 경향을 나타낸다. 이는 시멘트에 다량 존재하는 CaO의 가수분해 반응에 의해 생성된 $Ca(OH)_2$ 가 석분에 포함되어 있는 규소(Si)와 알루미늄(Al)과 반응하여 tobermorite($CaO \cdot SiO_2 \cdot H_2O$) 수화침전물을 형성하여 경화되기 때문이다(조재범,2004). 시멘트의 함량이 혼합시료 시험체 압축강도에 증진에 상당한 영향을 줄 것으로 사료된다. 수중양생의 경우 양생일수의 경과에 따라 압축강도는 지속적으로 증가되는 것으로 나타나고 있다(Fig. 4.8).

공기양생 과정에서 이와 반대로 같은 배합비에서 압축강도는 시간이 경과함에 따라 강도가 감소하였다(Fig. 4.9). 공기 양생의 경우 시멘트 함량이 20% 미만인 공시체에서 양생 시간이 길어짐에 따라 강도가 낮아지고 양생과정에서 부분적 공시체에서 균열이 발생하였으며 공시체가 건조해짐에 따라 표면에 분말이 발생하였으며 시험체내부에 균열이 관찰 되었다. 이는 공시체가 공기 중에 노출 되어 수분의 증발함에 따라 수화반응이 억제 되는 것으로 사료된다.

Table. 4.7 Compressive strength of water curing specimen

Curing time (day)	7	14	28
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
Specimen			
100% (0:1)	222.18	321.91	370.80
50% (1:1)	166.97	227.77	243.41
20% (1:1)	66.99	94.46	140.32
17% (5:1)	50.57	83.96	106.93
13% (6:1)	51.86	73.69	103.14
10% (9:1)	51.73	57.77	83.15

Cement Content (Powdered basalt : Cement)



Table. 4.8 Compressive strength of air curing specimen

Curing time (day)	7	14	28
	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)	(kg/cm ²)
Specimen			
100% (0:1)	191.54	186.30	227.23
50% (1:1)	114.75	143.16	173.65
20% (1:1)	64.57	61.63	53.01
17% (5:1)	57.26	55.92	49.80
13% (6:1)	55.23	51.36	38.25
10% (9:1)	25.68	14.63	14.23

Cement Content (Powdered basalt : Cement)

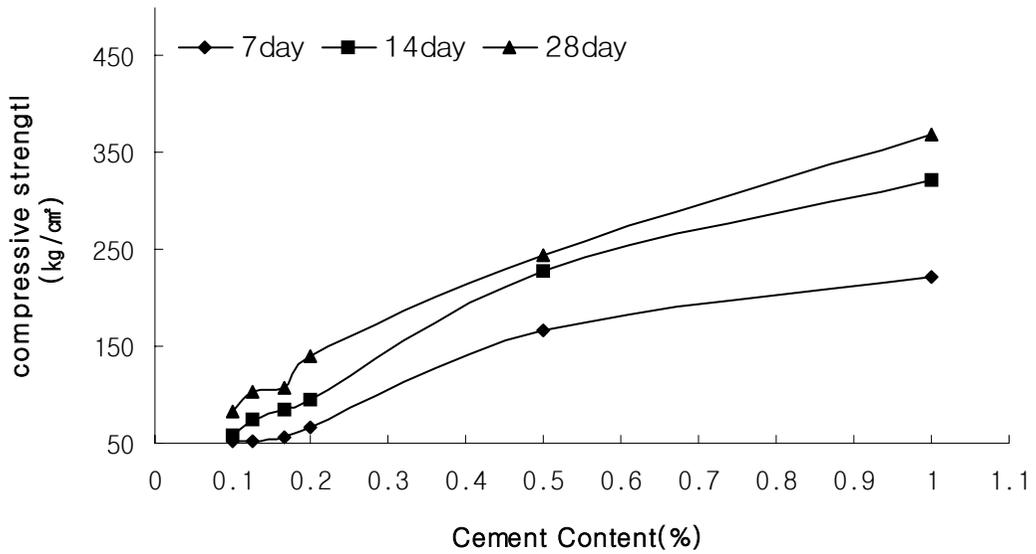


Fig. 4.6 Relationship between compressive strength and Cement Content (water curing specimen)

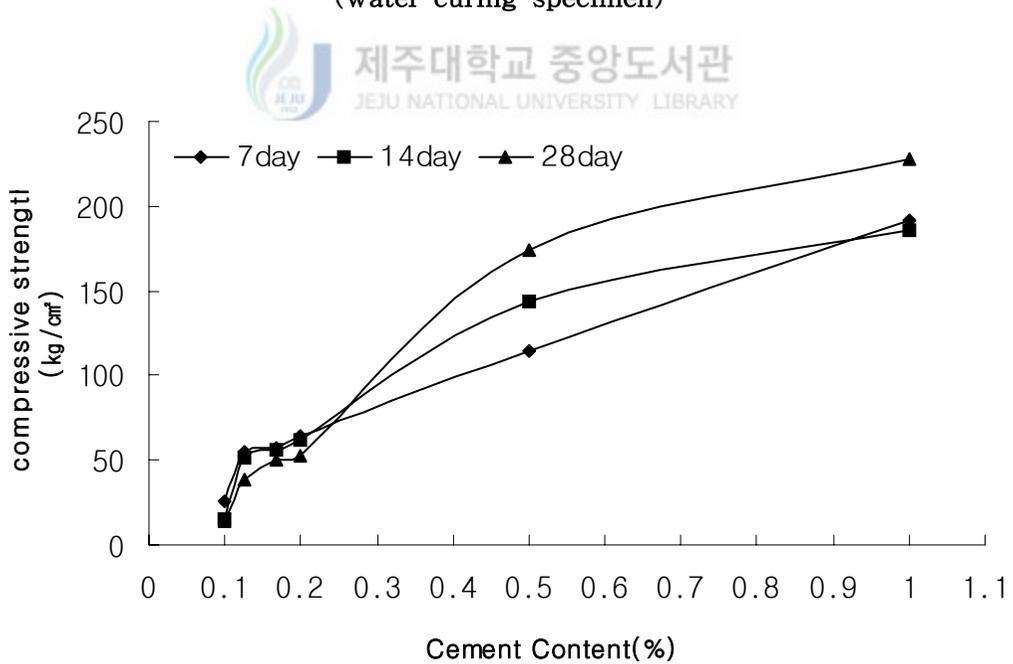


Fig. 4.7 Relationship between compressive strength and Cement Content (air curing specimen)

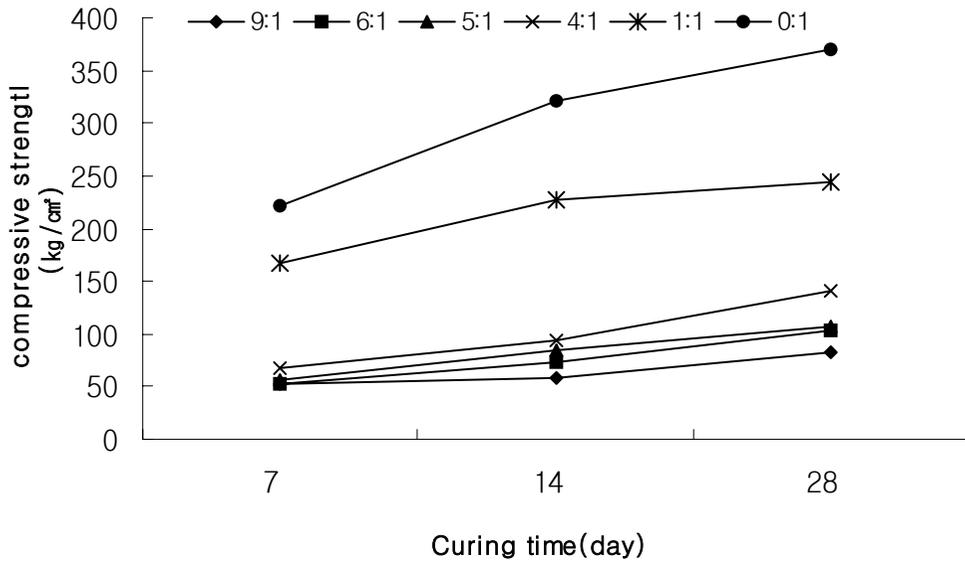


Fig. 4.8 Relationship between compressive strength and Curing time (water curing specimen)

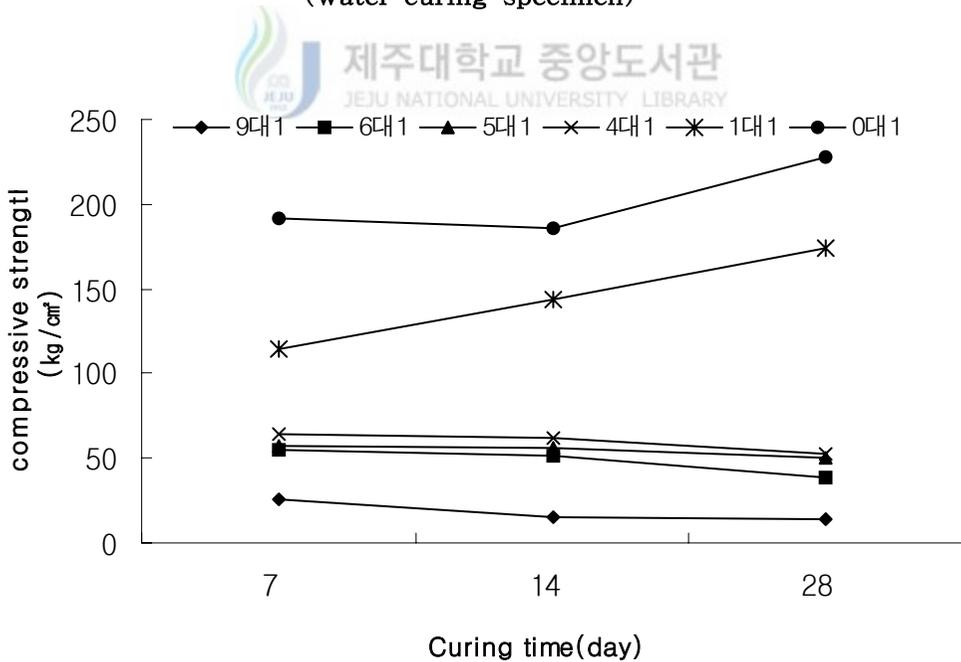


Fig. 4.9 Relationship between compressive strength and Curing time (air curing specimen)

4.3 포졸란 반응

현무암 석분과 시멘트 및 혼화제 내에 함유되어 있는 포졸란 유발물질로 인해 발생할 수 있는 반응을 관찰하기 위하여 순수한 현무암 석분의 입상과 혼합 시료로 공시시체를 성형하여 14일 양생한 후의 각 배합비별 입상을 장방출주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope)을 통해 관찰하였다.

Fig. 4.10은 순수한 석분의 입상으로부터 시멘트 함량의 변화에 따른 입자의 형상을 나타낸 것이다.

그림에 나타낸바와 같이 시멘트의 함량이 증가할수록 즉 석분의 함유량이 감소할수록 입자와 입자사이의 결합이 더욱 견고하게 이루어지고 있으며, 입자의 표면에 덧씌워지는 현상이 나타나고 있다. 이러한 현상은 석분슬러지의 함유량이 감소할수록 포졸란 반응이 더욱 뚜렷하게 관찰되고 이와 같은 포졸란 반응이 활발히 이루어지면 포졸란 반응 중 생성되는 Calcium Silica 및 Calcium Aluminate가 입자간의 결합을 더욱 견고하게 하고, 시험체 내의 공극을 메워주기 때문에 투수계수는 감소하고 압축강도는 증가하는 것으로 사료된다.(Ingles,1972; Horzog, 1964).

시멘트함량의 증가에 따라 혼합시료의 변화가 선명히 나타나는 것은 시멘트가 수화반응 일으킬 때 생성되는 $Ca(OH)_2$ 양의 제한을 받는 것으로 사료된다.

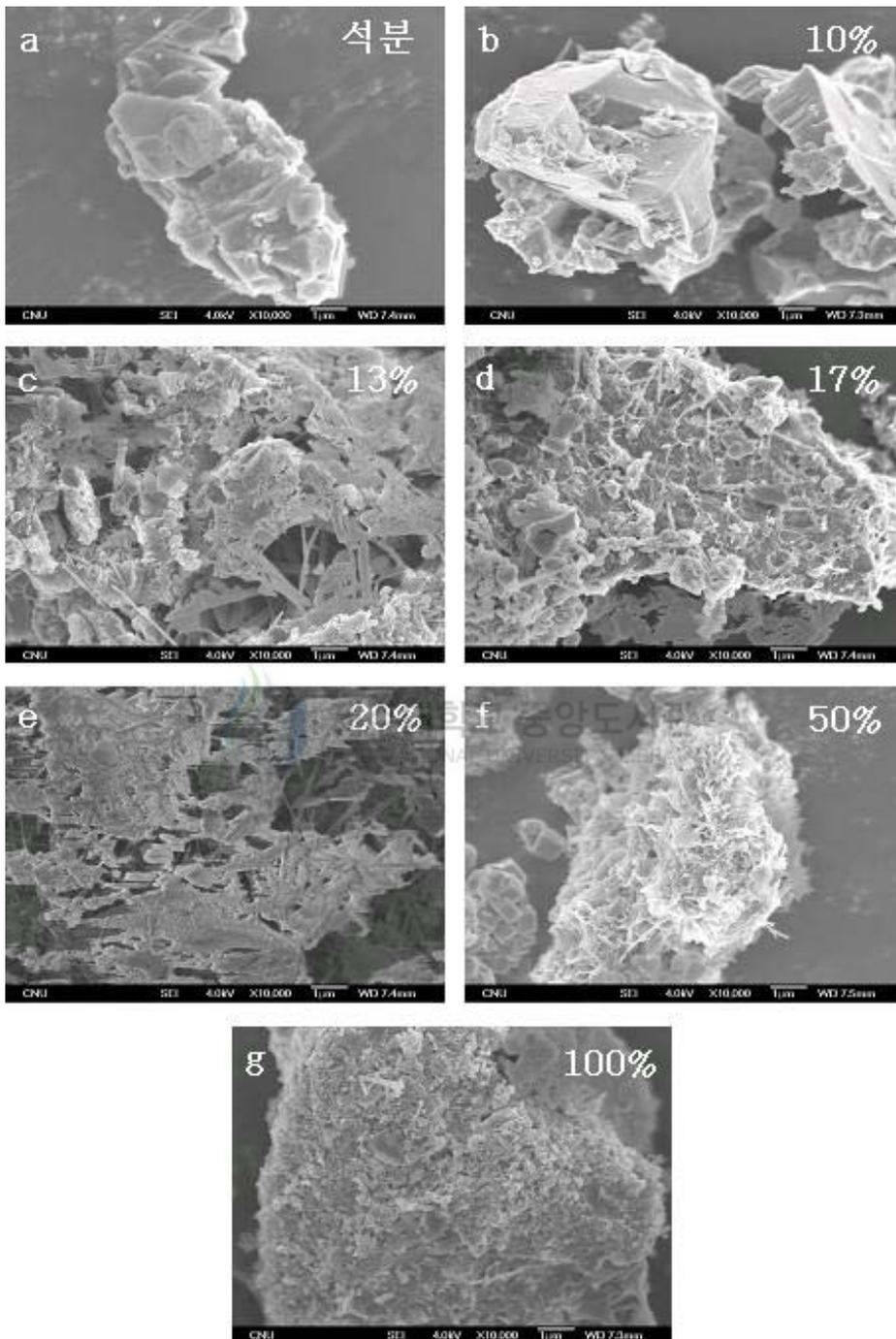


Fig. 4.10 The shape/surface in relation to the Cement Content by scanning electron micrograph

4.4 향후연구 계획

현장 적용성을 평가하려면 흙의 분류에 따른 적절한 배합비 즉 자갈 섞인 흙, 모래질 흙, 실트질 흙-점토질 등 각종 현장조건 상태의 시료에 현무암 석분을 배합하였을 경우에 이에 따른 특성을 연구하여야 할 것으로 사료되며, 석분자체는 활성이 없으므로 석분이 경화 할수 있도록 그에 적합한 혼화제를 첨가하여 연구해야 할 것으로 사료된다. 또한 차수재로서의 조건을 완전하게 충족할 수 있는 석분슬러지의 침출수내의 중금속 흡착능, 건조/수축 및 동결융해 등 극한 상태에 관한 특성을 연구하는 것이 바람직 할 것으로 사료된다.



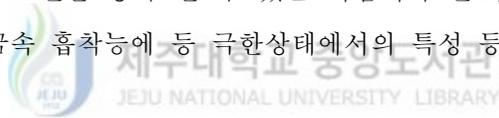
5. 결론

국내 골재원이나 석산에서 발생하는 석분 슬러지는 그 양이 많고 사업장내 폐기물류로 처리가 이루어 져야 하는데 현재의 재활용은 극히 저조하다. 이러한 폐석분의 재활용을 위해 차수재로서의 기능을 연구하고자 하였다.

본 연구에서는 현무암 석분슬러지를 차수용 재료로 재활용하는데 있어서 그 적합성 여부를 확인하기 위하여 일련의 실내실험을 실시하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 현무암 석분슬러지의 소성이 매우 적은 재료로서 느슨한 모래와 유사한 역학적 특성을 지니고 있다.
2. 현무암 석분슬러지 · 시멘트 혼합 시험체의 압축강도는 현무암 석분슬러지의 함유량이 증가 할수록 감소하지만 폐기물관리법상의 품질기준을 만족한다.
3. 현무암 석분슬러지 · 시멘트 혼합 시료의 수중양생 된 시험체의 압축강도는 양생 기간에 비례하여 지속적으로 증가하지만 공기중에서 양생된 시험체는 현무암 석분슬러지 함유량이 80% 이상이 되면 압축강도는 양생기간이 증가할수록 감소한다. 이는 양생기간 동안 수분이 증발하여 시험체 내에서 수화 반응이 억제되기 때문이다. 따라서 현무암 석분슬러지를 건설재료로 현장에 적용할 경우 습윤상태로 사용할 것을 권장한다.
4. 현무암 석분슬러지 · 시멘트 혼합 시험체의 투수계수는 석분슬러지 함유량이 감소할수록 작아지지만 현무암 석분슬러지 함유량이 50% 이하가 되면 투수계수의 변화는 매우 작다. 그리고 석분함량이 83%이하인 시험체에서 양생기간이 28일이상이 되면 석분슬러지의 함유량에 관계없이 시험체의 투수계수는 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로 나타나고 있어 현무암 석분슬러지는 차수재로 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

5. 현무암 석분슬러지·시멘트 혼합 시험체의 석분함량이 83%이하가 되면 28일 양생 고화체의 투수계수가 $1.0 \times 10^{-7} \text{cm/sec}$ 이하로 나타나 매립지 품질기준을 만족하며, 또 석분발생량이 매우 많고 그 활용처가 많지 않으므로 폐기물류인 석분을 재활용한다는 측면에서 적용이 고려되어야 한다.
6. 현무암 석분슬러지·현장토 혼합 시료의 투수계수는 석분의 함량이 60%정도에서 최소치를 나타내며 그 이후로는 다시 증가하는 경향을 보이고 있다. 현장토로 배합시 석분의 함량은 60%이하로 조절해야 할 것으로 사료되며, 현무암 석분 자체는 활성이 없으므로 그 차체로는 경화할 수 없으나 포졸란 반응의 주요 요소인 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 를 제공한다면 차수재로서의 적용 가능성이 있을 것으로 판단된다.
7. 향후 연구 계획으로는 각종 흙의 분류에 따른 현무암 석분을 배합시 그 특성을 연구하고 차수재의 조건을 충족 할 수 있는 시험체의 건조/수축 균열, 동결융해 및 침출수내의 중금속 흡착능에 등 극한상태에서의 특성 등을 연구하는 것이 바람직하다.



6. 참고문헌

1. 김정인, 1999, 역학적하중이 암석의 투수계수 변화에 미치는 영향, 서울대학교 석사학위논문, pp.4-6
2. 김용필, 1997, 지반공학시험법 및 응용, 세진사, p.
3. 박범준, 권성택, 1993, 제주도 화산암의 지화학적 진화: 제주 북부지역의 하산층서에 따른 화산암류의 암석기재 및 암석화학적특징, 지질학회지, 29권, pp.39-60
4. 안건상, 이현구, 임현철, 1995, 제주도에서 산출되는 화강암에 대한 연구, 자원환경지질, 28권, pp.513-518.
5. 윤용균, 1992, 荷重條件가 節理의 거칠기가 岩石의 透水性에 미치는 影響, 서울대학교 박사학위논문, pp.7-8.
6. 정종암, 2002, 폐석분을 이용한 폐기물 매립지 차수재층 기능 평가에 관한 연구, 서울시립대학교 석사학위논문, p.
7. 조재범, 현재혁, 조성택, 최경훈, 2002, 매립지 차수재로서의 준설햄토 활용에 관한 연구, 대한환경공학회지, 제24권, 5호, P.380
8. 조재범, 현재혁, 황윤섭, 2004, 현장토내의 유기물질이 고화 차수층에 미치는 영향(II), 균열보완을 중심으로, 한국폐기물학회지, 제 21권, 5호, pp.870-871
9. 한국자원연구소, 한국산업자원부, 2000, 석분 슬러지 활용기술 개발에 관한 연구: 최종보고서, pp.3-32
10. 한국산업규격, KS F2308, KS F2303, KS F2304, KS F2309, KS F2302, KS F2312, KS F2343
11. Haraguchi, K., 1931, Geology of Jeju Island, Geological Survey of Korea, 10-1, pp.1-34
12. Horzog, A., 1964, "The structure of clay-cement, colloquium on mechanisms soil stabilization ." Div. of Soil Mechanics, CSIRO, Melbourne, April
13. Ingles, O. G and Metcalf. JB., 1972, Soil Stabilization, Butterworths. Sydney, pp.119-120
14. Kenneth. J. et al., 1995, "Zeolite encapsulated metal complexes." J. Inclusion

Phenom. Mol. Recognit. Chem., 21. pp.159-184

15. Lee, J. S., 1989, Petrology and tectonic setting of the Cretaceous to Cenozoics Volcanics of South Korea: geodynamics implications on the East-Eurasian margin. Thesis of Doctor Degree, Univ. DOR-LEANS.
16. Lee, M. W., 1982, Petrology and geochemistry of Jeju volcanic island, Korea., Sci. Rep. Tohoku Univ., Series 3, 15, pp.177-256.



감사의 글

2년간 학업과 일상생활에서 가르침을 주시고 논문이 완성되기까지 많은 지도를 해주신 지도교수 남정만 교수님께 감사를 드립니다. 그리고 학업뿐만 아니라 여러 가지 면에서 충고를 아끼지 않으신 김상진 교수님께 감사를 드리며, 대학원 과정에서 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 이병걸 교수님 박상렬 교수님께 감사를 드립니다. 또한 먼 길을 오가시는 수고를 아끼지 않으시고 학업과 여러 면에서 많은 가르침과 조언을 해주신 중앙대학교 흥원표 교수님께도 감사를 드립니다.

논문이 완성되기까지 많은 심려를 아끼지 않으신 김기영 선배님, 조영웅 선배님, 소재관 선배님, 오동일 선배님께 감사를 드립니다. 그리고 실험 재료를 제공해주신 박광열 사장님께도 감사를 드립니다.

대학원 생활을 시작하면서 저에게 많은 도움을 주신 충훈이형, 보규형 그리고 2년동안 함께 실험실에서 같이 실험해온 성환이형, 저의 일에 노고를 아끼지 않으시고 도와주신 승범이형, 함께 공부하고 연구하면서 토론해온 준호형에게 감사를 드립니다. 그리고 몸이 아플 때 약까지 챙겨주시던 정한형에게도 감사를 드립니다. 실험에 많은 도움을 주신 도형이형, 영근이와 정원이한테도 감사를 드립니다.

그리고 유학생할 동안 많은 면에서 도와주신 홍선생님, 최선생님께 감사를 드립니다. 그리고 큰누님마냥 매사에 관심해주신 미선누나, 저한테 많은 조언을 해주신 현이형, 수길형 혁춘형 문봉형 한테 감사 드립니다.

항상 노심초사하시며 막내아들이 잘되길 기원하시고 계시는 부모님의 사랑과 은혜는 그 무엇보다 소중한입니다. 이 작은 결실을 부모님께 바칩니다. 그리고 언제나 저를 관심해주시고 많은 사랑을 주신 형님께 감사를 드립니다.

마지막으로 어렵고 힘든 시간들을 잘 견뎌낼 수 있도록 많은 사랑과 관심을 준 사랑하는 미란이와 함께 이 기쁨을 나누고자 합니다.

2005년 6월

김 광 일 올림