

碩士學位論文

다짐된 세립토의 투수계수에
관한 연구



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學 專攻

張 氣 源

2 0 0 5

碩士學位論文

다짐된 세립토의 투수계수에
관한 연구

指導教授 南正萬



濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

張氣源


2005

다짐된 세립토의 투수계수에 관한 연구

指導教授 南正萬

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2005年 6月

 濟州大學校 産業大學院
제주대학교 중앙도서관
建設環境工學科 土木工學專攻

張氣源의 工學 碩士學位 論文을 認准함

2005年 6月

委員長	印
委長	印
委長	印

The research regarding the coef. of
permeability of the compacted fine-grained
soil

Ki-Won Jang

(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
Table Contents	iii
Figure Contents	iv
Summary	vi
1. 서론	1
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적	2
2. 기존이론	3
2.1 투수시험 방법	5
2.1.1 현장투수시험	6
2.1.2 실내투수시험	8
2.2 투수성에 영향을 미치는 요인	10
2.2.1 유체의 특성	11
2.2.2 흙의 특성	12
2.3 다져진 점토의 특징	15
2.3.1 다져진 점토의 구조	15
2.3.2 다져진 점성토의 투수계수	17
2.3.3 현장 다짐된 점성토에서의 투수계수에 대한 고려사항	19
2.3.4 점토차수재에 대한 함수비-단위중량 기준	21
3. 시험방법	22
3.1 시료채취 및 현장시험	23
3.1.1 불교란 시료 채취	23

3.1.2	들밀도 시험	25
3.2	실내시험	26
3.2.1	입도분석	26
3.2.2	다짐시험	28
3.2.3	실내투수시험	29
4.	시험결과	30
4.1	청수리 지역의 지질학적 특성 및 시험결과	31
4.1.1	지질학적 특성	31
4.1.2	시험결과	32
4.2	시험결과	33
4.2.1	입도분석	33
4.2.2	다짐시험	36
4.2.3	들밀도 시험	38
4.3	투수계수에 영향을 미치는 요인 분석	39
4.3.1	입경	39
4.3.2	소성	43
4.3.3	다짐	44
4.3.4	간극비	45
4.4	투수계수의 모델의 분석	49
5.	결론	52
6.	참고문헌	54

Table Contents

Table 2.1 Advantages and Disadvantage of Methods of Testing	7
Table 2.2 Classification of soils according to their coefficients of permeability	9
Table 2.3 Hydraulic conductivity from Houston Liner Tests	20
Table 3.1 The undisturbed sampler specification	23
Table 3.2 Unified soil classification system which it follows in the grain size of the soil	26
Table 3.3 Types of compaction tests	28
Table 4.1 Classes according to Hydrogeological	31
Table 4.2 The test result of chung su ri area soil	32
Table 4.3 Results of Sand Cone Method	38
Table 4.4 The tendency regarding a passage quantity of the #200 and a silt content	50

Figure Contents

Fig 2.1 Flow path in soil	3
Fig 2.2 Tests to determine the hydraulic conductivity of soil	5
Fig 2.3 Boutwell permeameter	6
Fig 2.4 Permeability Test Setup	8
Fig 2.5 Permeability of kaolinite to various fluids as a function of $e^3/(1 + e)$ where e = void ration	11
Fig 2.6 Void ration versus permeability	13
Fig 2.7 Permeability versus degree of saturation for various sands	14
Fig 2.8 Arrangement of Soil Particle Suggested by Lambe	16
Fig 2.9 Effect of the size of clay clods	17
Fig 2.10 Hydraulic Conductivity versus silty clay	18
Fig 2.11 Pattern of flow through a compacted clay with improper bonding between lifts	20
Fig 2.12 (a) Proctor curves	21
Fig 3.1 Undisturbed sampler	23
Fig 3.2 Peneration of distrubed sampler	24
Fig 3.3 Cap to permeability test and waterlogged	24
Fig 3.4 Excavation in Sand Cone Method	25
Fig 3.5 Stoke's law	27
Fig 3.6 Setup of Compaction Test	28
Fig 3.7 Falling head permeability test	29
Fig 4.1 Chung su - Ri area and distribution of sedimentary	31
Fig 4.2 The grain size analysis of chung su ri area	32
Fig 4.3 The grading carve of the sandly soil	33
Fig 4.4 The grading curve of the silty soil	34
Fig 4.5 The grading curve of the clayey soil	34

Fig 4.6 Plasticity chart	35
Fig 4.7 The compaction curve of the sandy soil	36
Fig 4.8 The compaction curve of the silty soil	37
Fig 4.9 The compaction curve of the clayey soil	37
Fig 4.10 The coef. of permeability distribution which it follows in classification of the soil	39
Fig 4.11 Relation between #200 passing percentage and Coef. of permeability	40
Fig 4.12 Relation between silt content and Coef, of permeability	41
Fig 4.13 Relation between clay content and Coef, of permeability	42
Fig 4.14 Relation between Plastic index Coef, of permeability	43
Fig 4.15 Relation between Relative compaction and Coef. of permeability	44
Fig 4.16 Void ration and permeability	45
Fig 4.17 Relation between e and Coef, of permeability	46
Fig 4.18 Relation between n and Coef. of permeability	46
Fig 4.19 Relation between n and Coef. of permeability	47
Fig 4.20 Relation between n and Coef. of permeability	47
Fig 4.21 The coef. of permeability measured value regarding a passage quantity of the #200 and calculation result	49
Fig 4.22 The coef. of permeability measured value	50

SUMMARY

Unlike the nature of soil in the land, the nature of soil in Cheju Island consists of the good permeable soil that has the high contents of underground water.

Lately, the contamination of ground water, which is the resource of Cheju Island, is concerned, because the use of agricultural chemicals, etc. in order to construct and maintain golf courses and resorts is the main reason of this contamination since Cheju Island was been developed as the international free city and appointed as the land of peace.

However the river drift which has the low permeability exists in western part of Cheju Island, and in this study, the research on field construction was made to get liner effect by taking soils in Chung su-Ri Area where contains high volumes of fine-grained soil.

First, the liner effect is expected because the sample in Chung su-Ri Area has 57% of fine-grained soil and 2.13×10^{-6} cm/sec of coef. of permeability after taking sample and performing indoor test. In the field, the factors which has influence on coef. of permeability were analyzed by using the undisturbed sampler at any points through permeability test, grain size analysis test, compaction test, in-place density test, etc.

The result shows that in the grain size analysis test, the coef. of permeability is getting lower and lower in case #200 passing percentage and the shield contents are more and more. the coef. of permeability is decreased as the degree of compaction is getting higher and higher, and non-permeability is shown in case the degree of compaction is more than 90%.

Likewise in this study, it was difficult to get a conclusion regarding the

clear linear relationship between the void ratio and the coef. of permeability after permeability test concerning fine-grained soil. I think it is because the fine-grained soil is greatly dependent upon the formative and compositive reason of soil in comparison with the coarse-grained soil.

Also, in this study, the tendency formular regarding the component of fine-grained soil and #200 passing percentage has been made. In this formular, the tendency formular regarding the component of fine-grained soil is more accurate but the tendency formular regarding #200 passing percentage is considered more useful in taking time, cost and convenience in performing test into consideration



1. 서론

1.1 연구배경

지리적으로 한반도의 최남단에 위치한 제주도는 화산도로서 신생대 제 3기말에서 제 4기초에 걸쳐 수십 차례의 화산활동에 의해 형성된 휴화산으로 제주도의 지질학적 특성은 육지의 지질학적 특성과 많은 차이를 보이고 있다.

이로 인해, 제주도 토양의 대부분은 화산회토로 구성되어 있으며 물리·화학적 성질은 육지의 토양과 크게 다르다. 물리적 특징으로는 다른 지방과는 달리 단위용적당 밀도가 낮고 이로 인하여 공극률이 높으며 풍식에 대한 저항성이 낮고 투수성이 높아 하향침투가 빠르다.

또한 제주도의 지질학적 특성은 4면의 바다로 둘러싸인 섬이라는 지리학적 위치로 인해 총 강우량이 연간 33억 9천만 m^3 (연 강우량 1,872mm)이고 이중 지하수 함유량이 총 강우량 대비 44%인 연간 14억 9천만 m^3 에 이르는 지하수는 제주도의 저지대 및 고지대에 걸쳐 수십 개의 대수층과 저투수층이 반복적으로 분포한 지층구조를 통하여 상당부분 해안을 따라 용출되고 있으며(농어촌진흥공사, 2000), 제주도의 지하수함양율은 우리나라 내륙평균(18%) 및 하와이 오하우섬(36%)보다 훨씬 높은 수치로 제주도가 투수성이 좋은 지질과 토양으로 이루어져 있음을 반영해 주고 있다.

이러한 제주도의 자원 중 하나인 지하수는 현재 국제 자유 도시 개발과 평화의 섬 지정으로 대규모의 토목공사가 이루어지고 있으며 그 일환으로 골프장 건립에 따른 인·허가의 증가로 인해 골프장 유지에 따른 농약등의 유독성 유체와, 앞으로 각종 쓰레기 매립 및 산업의 발전으로 각종 산업폐기물등의 침출수로 인한 지하수 오염이 우려되며 투수성이 낮은 세립토가 존재하는 제주도 지역 일대에 대한 차수목적의 세립토 연구가 필요한 실정이다.

1.2 연구목적

투수성은 입자들 간의 간극이 서로 연결되어 그 연결 공간 안에 에너지의 변동을 통한 유체의 흐름을 말하며 흙 속에서의 물의 흐름은 흙댐(Earth dam)이나 제방등의 구조물에 있어 안정성에 영향을 준다.

그러나 최근 환경에 대한 관심이 커지고 환경보전에 대한 문제가 사회적인 문제로 대두됨에 따라서 산업폐기물 및 쓰레기 매립으로 인한 침출수의 외부로의 유출과 농약등에서 나오는 유독성 유체의 지하수 유입 차단을 위한 차수재에 대한 투수성의 연구가 많이 진행되고 있다.

더욱이 제주도인 경우 타지역과는 달리 지반 자체가 투수성이 높아 제주의 자원인 지하수의 오염 위험이 높으며 이에 대한 관심은 근래에 들어 매우 높은 실정이다.

본 연구는 최근 한창 건설중인 골프장 및 리조트 건설 등 많은 시설이 건설되면서 유지관리에 사용되는 비료, 농약등 유해성 물질의 지하침투에 따른 토양오염 및 지하수의 오염이 우려되고 있다. 그리하여 유해성물질의 지하수 침투를 방지하기 위하여 세립토 함유량이 많은 제주 서부지역의 흙을 이용하여 차수목적으로 시공이 이루어진 지반의 시료를 채취하고 이를 실내투수시험을 실시하여 그 결과를 비교 분석함으로써 다져진 제주 서부지역의 세립토가 투수성에 영향을 미치는 요소를 분석하고자 하는데 있다.

2. 기존이론

일반적으로 흙은 토립자와 간극, 즉 물과 공기로 이루어져 있으며 흙속의 모든 간극은 토립자가 어떤 형태로 다짐배열(packings)되든 간에 상호 연결되어 있다. 그러므로 흙속의 간극이 상호 연결되어 있기 때문에 가장 조밀한 상태에서도 물이 흐를 수 있다.

그림 2.1에 나타낸 바와 같이 흙속에서의 유체의 흐름은 점A에서 점B로 흐를 수 있다. 실제로 유체의 흐름은 토립자 사이의 간극의 연결을 따라서 그림의 굵은 선으로 나타나 바와 같이 점 A에서 점 B까지 일정한 속도 또는 직선형태로 흐르지 않는다. 그러나 토질공학에서 말하는 유체의 흐름은 그림에서 점A에서 점B의 직선으로 나타내며 단위동수경사에 대한 단위면적의 흙을 통과하는 유체의 길보기 속도이다.



Fig 2.1 Flow path in soil

Darcy는 흙속의 공극 사이로 흐르는 물을 층류로 가정, 속도의 차원으로 투수 속도와 동수경사 사이의 관계를 선형으로 나타내고, Lambe와 Whitman은 공극 비의 함수로서 투수계수를 나타냈다. 투수는 유체의 특성과 흙의 특성에 크게 의존하며 Taylor는 유체와 흙의 특성이 투수성에 미치는 영향을 반영한 식을 Poiseuille법칙을 이용해 제안하였으며 이는 다공질의 매체를 통과하는 흐름은

모세관의 집합체를 통과하는 흐름과 유사함을 근거로 하고 있으며 또한 다공질 매체의 투수성에 대한 식으로서 Kozeny가 제안하고 Carman이 개선한 Kozeny-Carman식이 있다.



2.1 투수시험 방법

투수계수의 결정을 위한 시험 방법은 크게 현장에서 이루어지는 현장투수시험과 실내에서 행하는 실내투수시험 방법이 있다.

현장투수시험은 크게 시추공법(borehole test), 다공질 탐침기법(porous probe), 침투법(infiltrometer), 암거배수법(underdrain 혹은 lysimeter pan)으로 나눌 수 있으며 실내투수시험으로는 정/변수위 투수시험과 간접적으로 투수계수를 측정할 수 있는 압밀시험 및 삼축시험등이 있다.

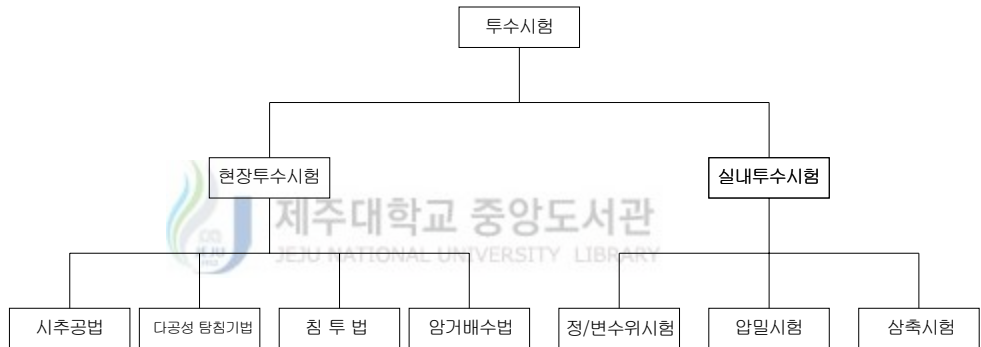


Fig 2.2 Tests to determine the hydraulic conductivity of soil

실내투수시험은 실내에서의 시험을 실시할 경우 일괄성 있는 시험이 이루어지며 이는 현장투수시험시 현장상태에 따른 오차의 범위를 줄일 수 있고, 시간의 절감과 실내에서의 시험으로 인해 효율적인 시험을 실시할 수 있으며 비용이 저렴한 장점이 있다. 그러나 현장시험에 비하여 실험대상의 시료의 크기가 제한되고, 현장조건을 그대로 재현하기가 어려우며, 일반적으로 실내시험은 현장시험보다 투수계수 값이 과소평가 되는 경향이 있다. 이는 실내시험은 그림 2.1과 같이 오직 수직방향의 투수성만을 고려하며 현장시험에서와 같이 대형 수로에서의 수직·수평방향의 투수성을 반영 할 수 없어 투수계수가 과소평가 되는 원인이 된다.

2.1.1 현장투수시험

현장투수시험은 현장상태의 시료에 직접 시행하는 시험이라 실내에서 이루어지는 투수시험보다는 신뢰성이 높으며 실내에서 투수시험을 하기 위해 시료채취시 압축과 같은 교란현상이 비교적 적다. 그러나 현장투수시험은 시료의 완전포화를 이루기가 힘들고 장비의 고가와 복잡성, 그리고 현장에서 이루어 지는 시험이라 기후의 영향을 받으며 투수계수가 매우 낮은 경우 수일에서 수주동안 시험을 실시해야 하는 단점이 있다.

그림 2.2와 같이 현장 투수시험기는 4종류로 구분된다. 시추공(borehole test)과 다공질 탐침기법(porous probe)는 자연적으로 생성된 점토질흠에 침투하기 위해 광범위하게 사용되어 왔다. 침투법(Infiltrometer)과 암거배수법(lysimeter pan)는 비교적 침투성이 큰 농업(상)의 흠에 일상적으로 설치된다.

그림 2.3는 Bourwell 투수시험기를 나타낸 것이며, 표 2.1은 각 현장투수시험기 대한 장비의 장·단점을 나타낸 것이다 .

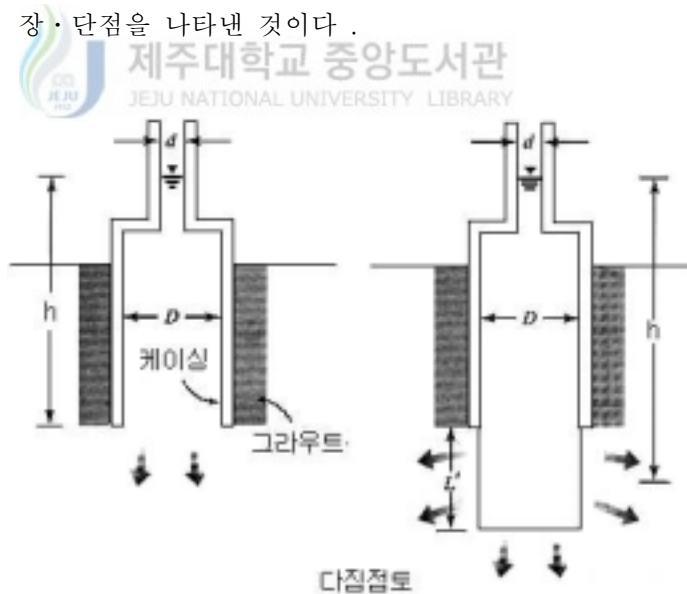


Fig 2.3 Bourwell permeameter

Table 2.1 Advantages and Disadvantage of Methods of Testing

시험방법	장비	장점	단점
시추공법	Bourwell 투수시험기	장비가격이 저렴 설치 용이 수직·수평투수계수 측정가능 낮은 투수계수 측정가능 매우 깊은 곳과 경사에서도 사용가능	시험하는 흙의 체적이 작음 불포화시 정확한 계산할 수 없음 측정시간이 김
	정수위 시추공 투수시험기	장비가격 저렴 설치 용이 불포화에도 사용가능 비교적 짧은 측정시간 가능	시험하는 흙의 체적이 작음 측정된 투수계수는 수평값 투수계수가 매우 낮은 경우 부적합
다공성 탐침기법	BAT 투수시험기	설치 용이 짧은 측정시간 Prove은 간극수압 측정에 사용가증 낮은 투수계수에 사용가능 측정된 투수계수는 수평값 매우 깊은 곳에 사용가증	장비 고가 시험하는 흙의 체적이 작음 설치하는 동안 Prove에 흙을 묻으면 실제보다 낮게 측정 불포화시 정확한 계산이 어려움
침투법	Open, single-ring infiltrometer	가격 저렴 설치가 용이 매우 큰 침투계시험장치로 큰 체적에 사용 가능 수직방향에서의 투수계수가 결정	낮은 투수계수에서는 측정 곤란 증발에 대한 고려 침투계아래에서 물의 측면확산에 대해 수정 측정시간이 김 wetting-front suction 수두는 추정해 야 함
	open, double-ring infiltrometer	장비가격 저렴 수직방향에서의 투수계수가 결정 내부링으로부터 침투되어 물의 측면확산을 최소화	낮은 투수계수 측정 곤란 증발을 없애거나 수정해야함 측정시간이 다소 김 wetting-front suction 수두는 추정해 야 함 가파른 경사에 사용불가
	Closed, single-ring infiltrometer	장비가격이 저렴 수직방향에서의 투수계수 측정 낮은 투수계수에서도 측정가능	링의 직경이 1m 미만 물의 측면확산에 대한 수정이 필요 측정시간이 김 wetting-front suction 수두는 추정해 야 함 가파른 경사에 사용 불가
	Sealed- double-ring infiltrometer	장비가격은 적당 수직방향에서의 투수계수가 결정 낮은 투수계수 측정 가능 내부링으로부터 침투되어 물의 측면확산을 최소화 비교적 큰 체적의 흙에 침투가능	측정시간이 비교적 김 wetting-front suction 수두는 추정해 야 함 가파른 경사에서는 사용 불가
	Air-entry 투수시험기	장비가격은 적당 비교적 짧은 측정시간 수직방향에서의 투수계수가 측정 낮은 투수계수에서도 측정가능 2단계에서의 wetting-front suction 수두는 추정가능	가파른 경사에서는 사용불가 몇 가지 중요한 가정이 요구됨
암거 배수법	Lysimeter pan	가격이 저렴 수직방향에서의 투수계수가 측정 큰 체적의 흙에 시험가능 거의 대부분 실험이 명확하지는 않음	언더드레인을 설치해야 함 비교적 긴 측정시간이 요구됨 언더드레인으로부터 침투수를 모으고 측정해야 하고 보통 물웅덩이와 펌프 가 필요하다.

2.1.2 실내투수시험

실내투수시험은 주로 정수위투수시험과 변수위투수시험을 사용하는데 정수위투수시험은 조립토가 많이 함유되어 투수성이 높은 경우 즉 10^{-4} cm/sec이상의 시료에 사용되며, 변수위 투수시험은 세립토가 많이 함유되어 투수성이 낮은 경우, 즉 10^{-4} cm/sec이하의 시료에서 주로 사용된다.

1) 정수위투수시험

정수위투수시험은 물의 흐름량을 측정하는 동안 입구와 출구 사이의 수두차가 일정하게 유지되도록 하여 물의 흐름량이 일정하게 된 후에 일정한 시간 동안에 시료를 통과한 물을 메스실린더 등에 집수 측정하는 방법으로 $k = \frac{QL}{Aht}$ 으로 나타내어 진다.

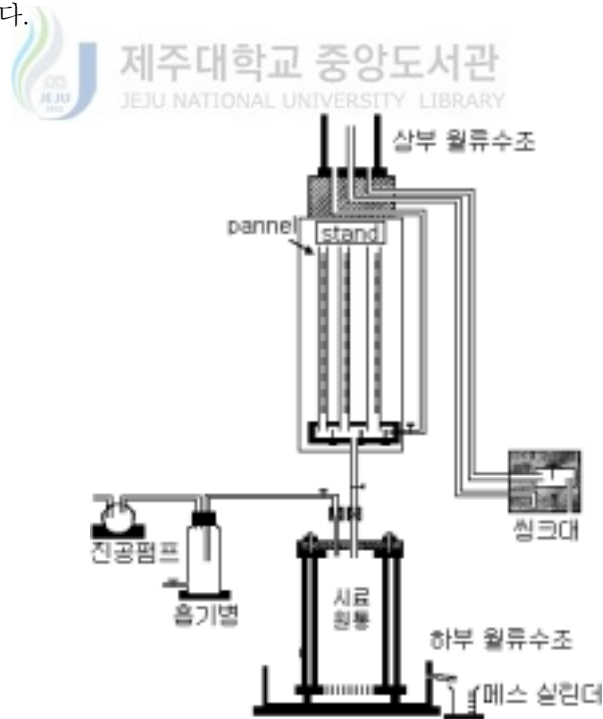


Fig 2.4 Permeability Test Setup

2) 변수위투수시험

변수위 투수시험은 물이 스탠드 파이프를 통하여 일정한 지름과 길이를 가진 시료 속으로 유입하도록 하고, 물이 유입하는 수위의 강하속도를 측정하여 투수 계수를 산정한 것으로 물이 유출할 때의 단위시간당 유량은 Darcy 법칙에 의해 구할 수 있다. stand pipe내의 수위가 dh 만큼 내려갔다 하면 Darcy 법칙에서

$$Q = -a \frac{dh}{dt} = k \frac{h}{L} A$$

측정하기 시작한 순간의 시간을 0(이 때의 수두는 h_1), h_2 에 이르렀을 때의 시간을 t 라 하면 위 식을 적분하면

$$-a \int_{h_1}^{h_2} \frac{dh}{h} = k \frac{A}{L} \int_0^t dt$$

$$-a (\log_e h_2 - \log_e h_1) = k \frac{At}{L}$$

$$\therefore k = \frac{aL}{At} \ln\left(\frac{h_1}{h_2}\right) \quad \text{혹은} \quad k = 2.303 \frac{aL}{At} \log_e \frac{h_1}{h_2}$$

여기서 a : 스탠드 파이프의 단면적

A : 시료의 단면적

t : 투수경과시간

h_1, h_2 : 초기 및 종료 수위

Table 2.2 Classification of soils according to their coefficients of permeability

	10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-8}	10^{-9}
흙의 종류	자갈		모래			실트			균일점토			
						균열점토 및 풍화점토						
투수계수의 측정	정수위 투수시험					변수위 투수시험			압밀시험자료로 계산			
	현장에서 직접측정											
배수	투수 양호					투수 불량			불투수성			

2.2 투수성에 영향을 미치는 요인

투수계수에 영향을 미치는 인자는 다음과 같다.

- ① 입자의 모양
- ② 간극비 : 간극비가 클수록 투수계수는 증가한다.
- ③ 포화도 : 포화도가 클수록 투수계수는 증가한다.
- ④ 점토의 구조 : 면모구조가 이산구조보다 투수계수가 크다.
- ⑤ 유체의 점성계수 : 점성계수가 클수록 투수계수는 작아진다.
- ⑥ 유체의 밀도 및 농도 : 밀도가 클수록 투수계수는 증가한다.
- ⑦ 온도가 높을수록 투수계수는 작다.

이 중 흙의 특성으로는 ①, ②, ③, ④이고, 유체의 특성을 나타낸 것은 ⑤, ⑥, ⑦이다. 이를 형상화 시킨 것이 Kozeny-Carman식으로 다음과 같다.

$$k = \frac{1}{C_s T^2 S^2} \frac{\gamma}{\mu} \frac{e^3}{(1+e)}$$

(2.1)

여기서, C_s 는 형상계수, T 는 굴곡도(Tortuosity), S 는 비표면적(m^2/g)이다.

2.2.1 유체의 특성

투수계수는 물의 단위중량에 비례하고 점성계수(coefficient of viscosity)에 반비례 한다. 그런데 γ_w 는 거의 일정하고 점성계수는 수온에 의하여 변하기 때문에 투수계수는 수온의 함수가 된다. 유체의 점성과 단위중량(γ_w)은 투수성의 크기에 영향 정도는 T에서의 투수성 k_T 는 20°C에서의 투수성을 기준으로 식 (2.2)와 같이 표시 할 수 있다.

$$k_{20^\circ\text{C}} = \frac{\mu_T}{\mu_{20^\circ\text{C}}} k_T \quad (2.2)$$

또한 유체의 종류에 따라 흙의 투수계수는 큰 영향을 받는다. 최근 폐기물 매립지에서 발생한 침출수나 농약등의 유기물 유체는 점성과 단위중량 외에도 투수계수에 영향을 주는 요인으로 분산이중층, 유전상수, 극성 등이 있다고 하며 이러한 유체와 흙사이의 전기·화학적 반응으로 인하여 흙의 조직변화가 생겨 투수계수가 물 일때와는 크게 달라진다고 하며 Mesri와 Olson은 압밀투수시험에서 물을 이용한 것보다 유기물을 이용했을 때 투수계수가 상당히 증가하는 것을 관찰되었다고 한다 .

그림 2.5는 유체의 종류에 따른 카올리나이트의 투수계수를 낸다.

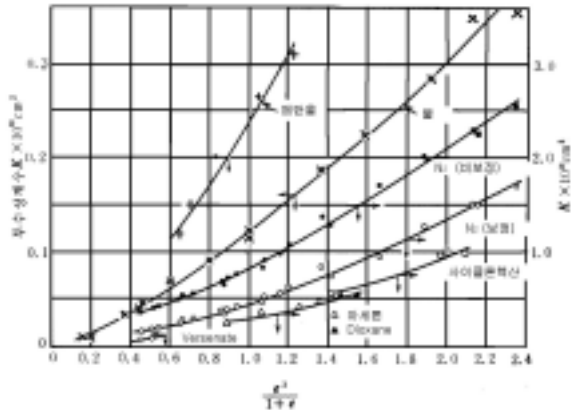


Fig 2.5 Permeability of kaolinite to various fluids as a function of $e^3/(1+e)$ where $e =$ void ration

2.2.2 흙의 특성

투수계수에 영향을 미치는 흙의 특성은 입자의 크기, 간극비, 조직(fabric), 포화도 등이 있으며 식 (2.1)에서는 입자의 크기와 간극비만 고려했으나 나머지 특성들 또한 배열과 구조, 조직특성은 다른 특성들과 연관되어 투수성을 예측하는데 어려움이 있다. 또한 물이외의 유체와 흙사이에 발생하는 전기·화학적인 반응으로 인한 투수성을 고려하기가 어렵다.

(1) 입자의 크기

입자가 점점 작아질수록 간극비의 감소로 인해 투수계수는 점점 낮아지는데 Hazen이 유효입경과 투수계수와의 관계를 발표한 이후 입도분포를 이용하여 투수계수를 예측하는 방법이 여러 연구자들에 의해 시도됐다. 사질토인 경우 입자의 크기를 가지고 투수성을 추정하는 경험식이 있는데 Hazen은 입도분포가 비교적 균등한 모래에 대하여, Casagrande는 잔모래에서 중간크기의 깨끗한 모래에 대하여 간단한 방정식을 제시하기도 하였다.



(2) 간극비

간극비가 투수계수에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며 간극비와 투수계수의 관계를 규명하는 연구가 지속되어 왔다. 이러한 간극비와 투수계수와의 관계식은 Kozeny(1927)와 Carman(1956)의 제안 식이후로 많은 연구가 이루어져 왔으며, Kozeny(1927)와 Carman(1956)이 제안한 식에서 k 는 $\frac{e^3}{(1+e)}$ 에 비례하는 것을 알 수 있다. 다른 이론방정식에서는 k 와 $\frac{e^2}{(1+e)}$ 또는 e^2 의 관계를 제시하기도 하였으며 Samarasinghe(1982)등은 정규압밀 점토의 간극비와 투수계수의 관계는 다음 식으로 표현하였다..

$$k = C \frac{e^n}{(1+e)} \quad (2.3)$$

(3) 흙의 조직 및 구성

흙의 조직은 동일한 간극비에서 먼구구조인 시료는 투수성이 크며 분산구조를 가질수록 투수성이 작다. 분산구조는 입자의 배열이 평행할수록 입자배열에 직각으로 일어나는 흐름의 유로는 더욱 구불구불해지며 먼모구조는 큰 유관을 형성하고 있어서 투수성이 크다.

흙의 구성성분이 투수성에 미치는 영향은 일반적으로 실트, 모래, 자갈(운모와 유기질토는 예외) 등에는 별로 중요하지 않으나 점토에 있어서는 매우 중요하다. 흙의 구성성분이 점토의 투수계수에 미치는 영향은 그림 2.6과 같이 나타낼 수 있다.

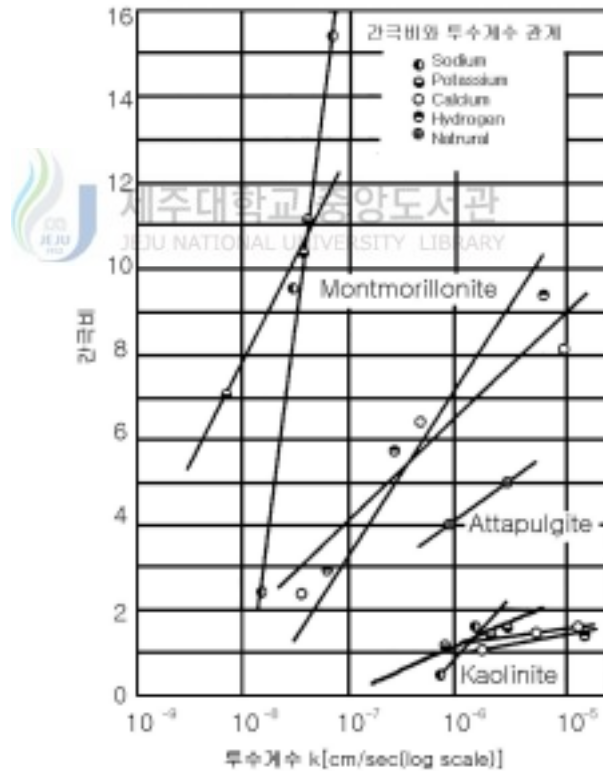


Fig 2.6 Void ration versus permeability

(4) 포화도

포화도 또한 투수성에 영향을 미치는 요소이다. 일반적으로 실험에 있어서 시료를 100% 포화상태로 만들기는 어렵다고 한다. 지하수위 이하에서의 지반은 완전포화 상태로 있으며 이 지반에 공사하기 위해 시험실에서 투수시험 시 완전포화 조건을 따르지 않을 경우 그 결과에 따라 추정된 양의 차이가 크게 되어 배수설비와 양수 pump의 용량 부족 사태를 만들게 된다. 그림 2.7은 포화도가 커짐에 따라 투수성이 높은 것으로 이는 흙의 구성조직의 영향을 배제하지 않은 결과를 나타낸 것이다.

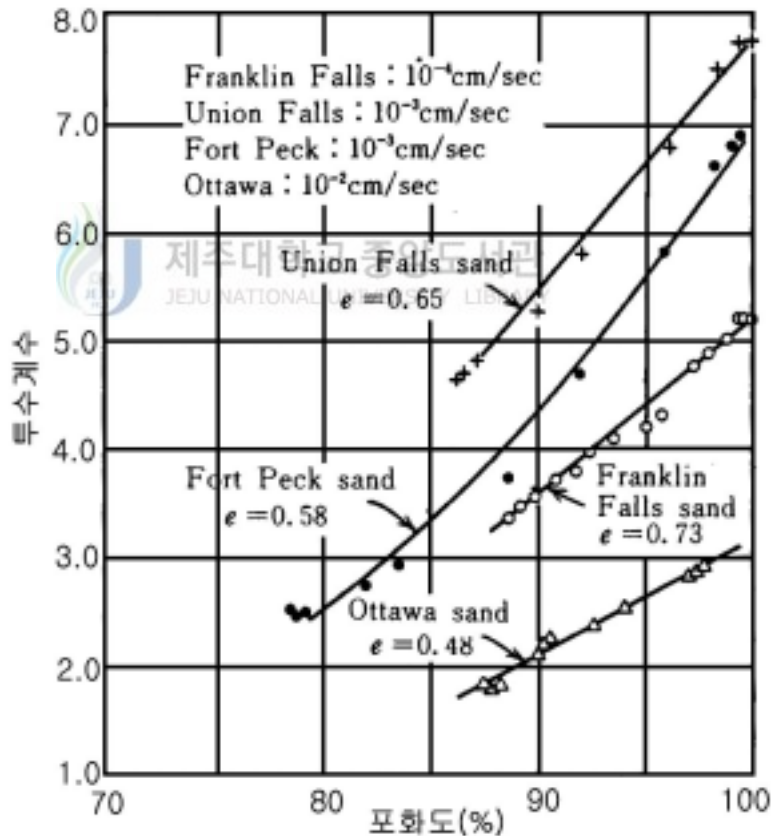


Fig 2.7 Permeability versus degree of saturation for various sands

2.3 다져진 점토의 특징

2.3.1 다져진 점토의 구조

본 연구에서 투수시험에 사용한 흙은 세립토 함유량이 많은 청수리 지역의 흙을 확보하여 차수재의 역할을 하기 위해, 시공을 실시하여 투수계수가 낮은 흙으로 개량이 이루어진 다져진 세립토이다.

자연점토로 차수재료를 사용하는 것은 다른 불투수 재료(점토-모래 혼합물, 모래-벤토나이트 혼합물, geosynthetic-clay, geomembrane 등)를 사용하는 것보다 투수계수 상대적으로 높다. 그러나 자연점토를 이용한 차수재료는 그 외의 합성 재료를 보다는 환경적인 문제의 야기가 적으며 점토함유량이 높은 토양을 통해 재료의 구입이 값싸게 이루어 질수 있다. 또한 보통 토질역학에서 말하는 불투수는 투수계수가 10^{-7} cm/sec이하를 말하며, 점토의 특징에 맞는 다짐방법의 제시와 이를 바탕으로 시공이 이루어질 경우 불투수층로서의 차수효과를 얻을 수 있으며 오염된 유체(농약, 폐기물 매립지에서 발생하는 침출수 등)에는 이온교환 능력과 흡착능력으로 유해오염물질의 차단능력 및 정화효과를 기대할 수 있다.

다짐의 목적은 일반적으로 자연상태의 흙을 개량 없이 사용하기에는 강도는 낮고 압밀은 크며 투수성 역시 크기 때문에 이러한 흙의 공학적 특성을 개선하여 방조제, 하천, 제방, 쓰레기 매립장의 차수재로서의 투수성을 감소시키고 침하를 방지하여 사면의 안전을 유지하며, 도로나 활주로 등에서의 지지력을 증대시켜 체적의 변화를 최소화하여 동상이나 침하를 방지하는데 있다.

Lambe은 1962년에 다짐이 흙의 구조에 미치는 영향을 제시하였는데, 같은 다짐에너지 및 건조밀도에 대하여 습윤축보다 건조축이 면모구조(flocculent structure)를 가지게 된다고 하였다.

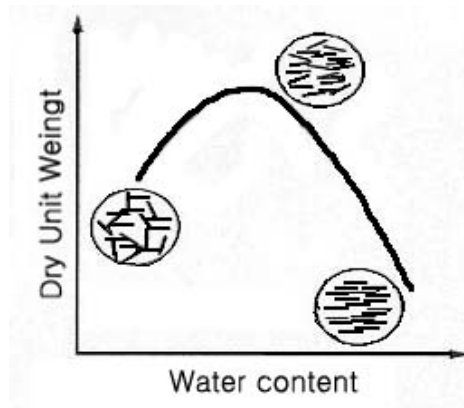


Fig 2.8 Arrangement of Soil Particle Suggested by Lambe

점토의 다짐에서 물은 흙입자 사이의 윤회재 역할을 한다. 점토표면에 물을 흡착수막이라 하는데 이는 점토의 점성을 띠게 하며 이는 다짐효과에서 흙 입자들 간에 유동성이 발달하여 서로 미끄러지고 조밀한 상태로 움직이게 하여 단위부피 안의 중량을 증가 시키게 된다. 낮은 함수비를 가진 점토는 점토 입자주위의 흡착수막이 발달하지 못하여 입자들의 배열이 불규칙하게 되며 건조단위중량은 감소한다.

계속해서 함수비를 증가시키면 흙 입자 주위의 흡착수막이 증가하여 흙 입자 간의 유동성을 증가시키고 면모화 정도를 감소시켜 건조단위중량은 증가한다. 최적함수비에서는 건조단위중량이 최대가 되며 이때의 건조축 건조 단위중량에서는 강도가 크게 나타낸다. 그 이후로는 함수비를 증가 시키면 이산구조로 변화되어 흡착수막이 더욱 팽창하고 입자간의 반발력이 증가하여 입자들이 배열성을 띄게 되어 물이 흙입자의 공간을 차지하므로 건조단위중량이 감소하면서 흙의 강도도 감소하기 시작한다. 최적함수비에서 2~4%이내의 습윤축에서는 투수계수는 최저가 되다가 이후 함수비를 증가시키면 다시 투수계수는 증가하게 된다. 이처럼 최대건조단위중량을 기준으로 습윤축이 건조축에 비해 투수성이 낮은 이유는 입자 상호간에 윤회 작용으로 단단해지고 유로의 비틀림이 커져서 점토입자의 배열이 더욱 불규칙하게 되어 불투수 형태의 구조가 된 것이다.

2.3.2 다져진 점성토의 투수계수

위에서 설명한 바와 같이, 저함수비 상태에서 점토를 다짐하게 되면 면모구조를 가지게 되며 다짐시 함수비가 증가하게 되면 입자의 방향성은 크게 나타난다. 그러나, 첨가된 물에 의해 단위체적당 흡입자의 비율이 적게 되므로 건조단위중량은 감소하게 된다.

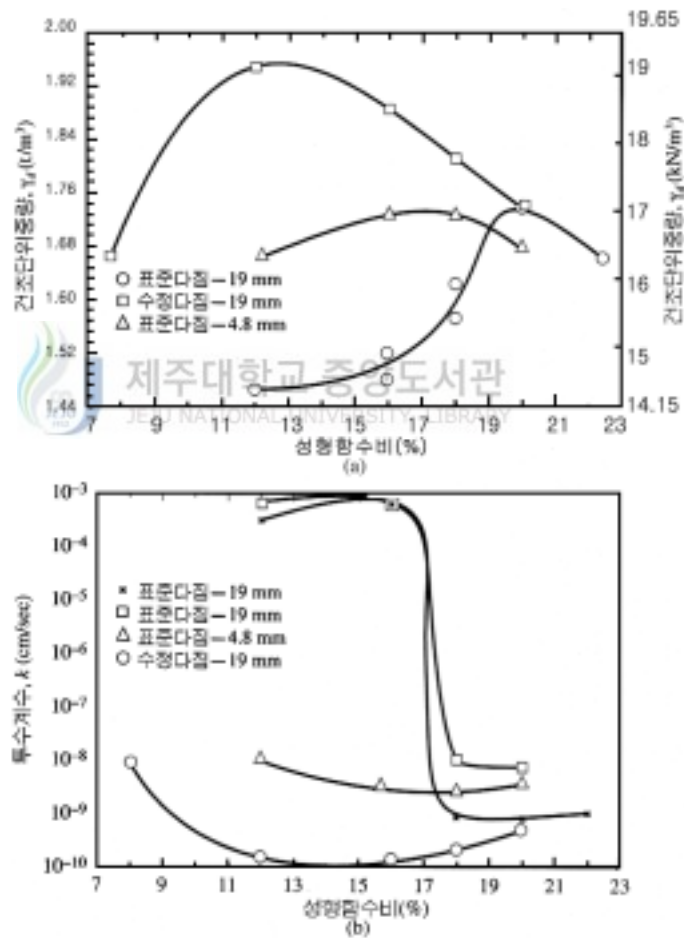


Fig 2.9 Effect of the size of clay clods
 (a) Standard and Modified Proctor Compaction
 (b) Hydraulic Conductivity versus Molding Water Content

그림 2.9는 점성토에 대한 실내다짐시험 결과와 함께 다짐점토에 따른 투수계수의 변화를 나타낸 것으로 이 결과로부터 관찰된 사항은 다음과 같다.

1. 동일한 다짐시험과 재성형함수비의 경우, 입자의 크기가 감소됨에 따라 k 값은 감소하게 된다.
2. 동일한 다짐시험에서 재성형함수비와 최적함수비에서 도달하는 최소값이 증가함에 따라 투수계수는 감소하게 된다.(즉, 높은 면모화의 정도가 낮은 점토 입자에 대하여 높은 단위중량을 갖는다.) 최적함수비를 넘어선 경우 투수계수는 미소하게 증가한다.
3. 동일한 다짐시험과 건조단위중량의 경우, 최적함수비의 습윤측에서 다짐시 낮은 투수계수를 갖는다.

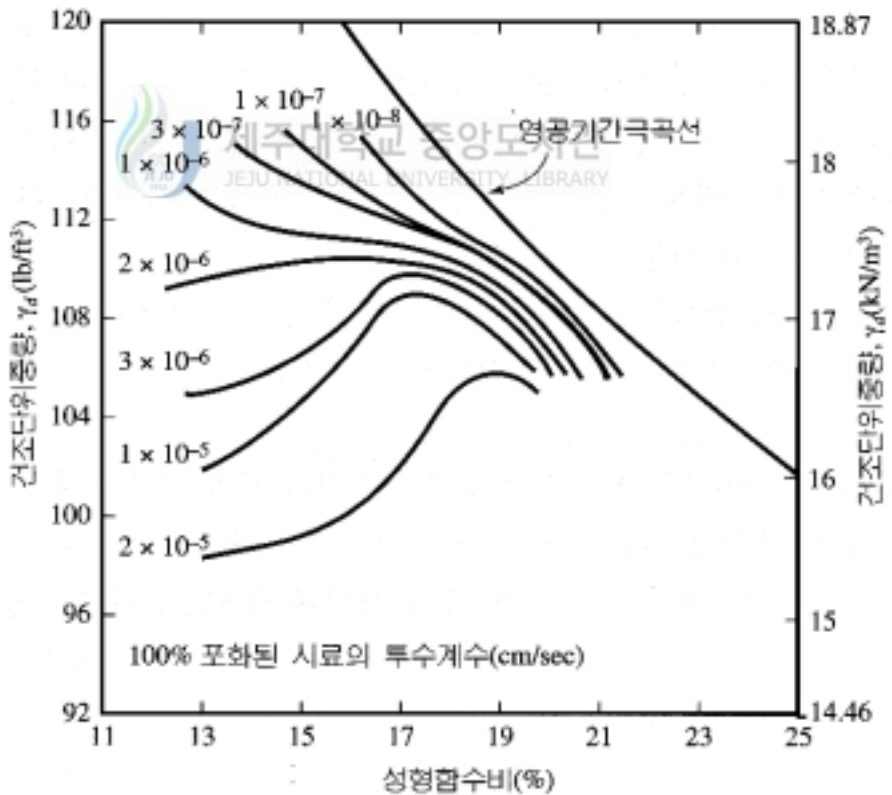


Fig 2.10 Hydraulic Conductivity versus silty clay
(Mitchell, Hooper & Campanella, 1965)

2.3.3 현장 다짐된 점성토에서의 투수계수에 대한 고려사항

점성토지반에 다짐을 실시할 경우, 다짐은 흙의 투수계수의 상한치를 얻을 때까지 실시되어야 한다. 이러한 작업은 흙댐의 심벽다짐을 실시할 경우와 고품폐기물 처리지역에서의 점성토 라이너를 설치할 경우 실시된다.

고형폐기물 처리지역으로부터 발생하는 침출수에 의한 지하수의 오염을 막기 위하여, 미국 환경보호청(U.S Environmental Protection Agency, EPA)에서는 점토 차수재의 투수계수를 10^{-7} cm/sec 또는 그 이하로 요구하고 있다. 각 차수층의 최소두께는 합성차수막의 경우 0.75mm이고 점토층의 경우에는 유해폐기물 매립자의 경우 90cm, 일반폐기물 매립장의 경우 60cm이다. 여기서 두께는 최소두께이며 실제 설계시에는 지형여건이나 시공의 용이성 등을 고려하도록 하고 있다. 점토를 라이너재료로 사용하기 위한 여러조건들을 만족해야 하는데 그 내용은 다음과 같다.

1. 투수계수가 1×10^{-7} cm/sec 이하
2. 적어도 20%의 세립토(세립질 실트와 점토크기의 입자)이상 포함
3. 소성지수(PI)는 10이상, 단, PI가 약 30 이상인 흙은 현장에서 다짐작업이 어려움
4. 자갈크기의 입자가 10%이하
5. 25~50mm(1~2in)보다 큰 흙입자 또는 암조각이 포함되어 있으면 안 된다.

시공현장에서 접하는 흙은 약간 비소성일 것이다. 이러한 흙에 대하여 원하는 범위의 투수계수를 얻기 위하여는 sodium 벤토나이트와 같은 점토광물과 혼합 사용하여야 한다. 또한, 무거운 양쪽 로울러를 이용하면 다짐시 흙 속에 많은 이산구조가 생성되며 큰 전단 변형률이 발생될 것이다. 이렇게 다져진 흙은 낮은 투수계수를 갖게 될 것이다. 다짐시 부설토층의 두께는 얇게 함이 바람직하다. 부설토층의 두께가 얇으면 다짐장비의 돌기(foot)가 느슨한 층 전체의 두께를 관통할 수 있다.

점성토 덩어리의 크기는 다짐점성토의 투수계수에 커다란 영향을 미친다. 그러

므로, 다짐시 입자들은 가능한한 작게 부수어야 할 것이다. 아주 무거운 로울러는 입자를 부수어 다지는데 이롭다.

여러 층으로 나누어 다짐을 실시할 경우 각 부설토층 사이의 부착 또한 중요한 요소가 된다. 그림 2.11에 개략적으로 도시한 것처럼 다짐점토에서의 수직균열을 따라 침투가 일어나며, 다른 균열이 발생될 때까지는 두 부설토층 사이의 경계면을 따라 이동하게 된다. 부착의 정도는 대체로 다짐점토의 전체 투수계수를 감소시킬 수 있다. 그림 2.11은 부착상태가 불량하던 예는 1986년 Houston에서 실시된 시험 패드(pad) 공사를 나타낸 것이다.

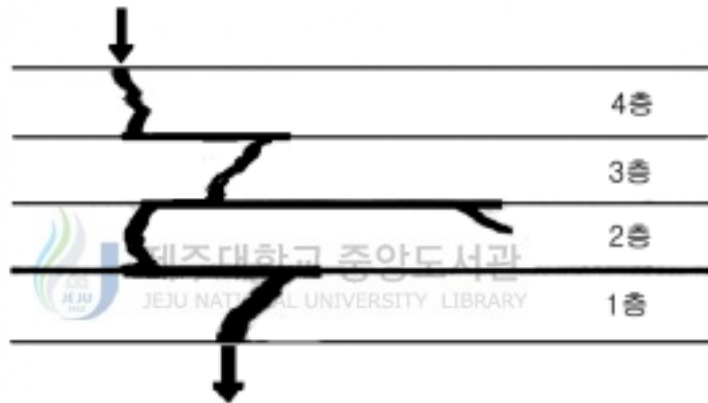


Fig 2.11 Pattern of flow through a compacted clay with improper bonding between lifts

Table 2.3 Hydraulic conductivity from Houston Liner Tests

위치	시료	실내시험으로 구한 $k(\text{cm}/\text{sec})$
하부층	76mm($\approx 3\text{in.}$) 튜브	$4 \times 10^{-9} \text{ cm}/\text{sec}$
상부층	76mm($\approx 3\text{in.}$) 튜브	$1 \times 10^{-9} \text{ cm}/\text{sec}$
층경계면	76mm($\approx 3\text{in.}$) 튜브	$1 \times 10^{-7} \text{ cm}/\text{sec}$
하부층	블럭	$8 \times 10^{-5} \text{ cm}/\text{sec}$
상부층	블럭	$1 \times 10^{-8} \text{ cm}/\text{sec}$
현장의 전체 $k=1 \times 10^{-4} \text{ cm}/\text{sec}$		

2.3.4 점토차수재에 대한 함수비-단위중량 기준

본 연구대상이 된 곳은 10^{-6} cm/sec 이하의 차수효과를 얻기 위해 시공이 이루어졌다. 그러나 고품폐기물 처리지역에 점토 차수재를 시공할 경우, 다짐점토는 10^{-7} cm/sec 이하의 투수계수를 가져야 하는 것이 통상적이다. Daniel & Benson(1990)은 소요 투수계수를 갖는 점토에 대한 함수비-단위중량의 기준을 확립하기 위한 순서를 개발하였으며, 그림 2.12는 각각의 다짐시험과 투수계수 시험결과를 통한 허용범위의 결정을 나타낸 것이다.

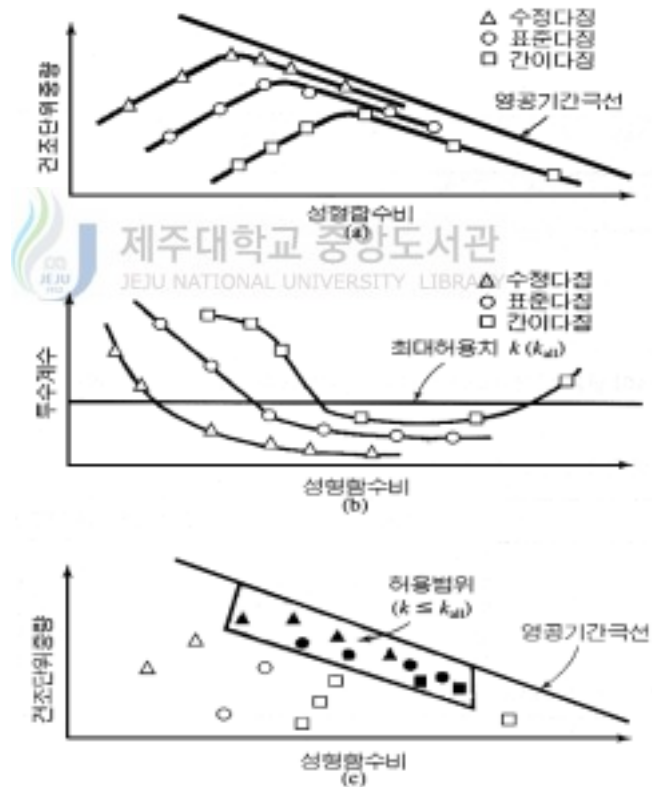


Fig 2.12 (a) Proctor curves
 (b) variation of hydraulic conductivity of compacted specimens
 (c) determination of acceptable zone

3. 시험방법

본 연구는 세립토 함유량이 높은 흙을 이용한 차수재를 시공하는 현장에서 현장투수시험을 하기에는 수일에서 수주가 걸리고 비용문제와 그리고 기후등의 문제로 인해 현장투수시험을 하기에는 어려운 점이 많다. 또한 시험실에서 실내시험은 현장투수시험에 비해 시험의 일관성과 효율성은 높으나 재성형으로 인한 투수계수의 과소평가가 될 우려가 있다.

그리하여 현장에서 불교란 시료 채취기를 이용하여 시료를 채취하고 시료를 실내에서 투수시험을 시행하는 방법을 선택했다.

또한 현장에서 들밀도 시험을 시행하여 다짐시험 결과와 비교, 다짐도에 대한 투수계수의 연관성을 나타냈으며, 들밀도 시험 결과를 가지고 불교란 시료 채취가 어렵거나 교란정도가 심한 경우를 대비하여 시험실에서 현장상태의 조건에 근접하게 재성형하여 투수시험이 이루어 질수 있도록 들밀도 시험을 시행하였다. 그러나 본 연구에서는 시공된 지역의 시료는 세립토 함유량이 높고 모래질 흙의 이상의 입경을 가진 비율이 적었으며 함수비가 20~30%가지고 있어 시료를 채취하기에는 양호한 조건이었다. 또한 주위 흙을 채취하여 실내시험으로 입도분석과 비중, 액·소성시험, 다짐시험 등은 실시하였으며 그 결과를 가지고 투수계수와 연관성을 분석하였다.

3.1 시료채취 및 현장시험

3.1.1 불교란 시료 채취

불교란 시료를 얻기 위해 그림 3.1과 같이 현장투수시험용 시료샘플러를 이용하여 불교란 시료를 채취하였다. 본 불교란 시료채취기는 3개의 원통이 하나로 연결되도록 되어 있다. 관입부분은 외압에 의해 관입이 잘 되도록 하였으며 중간부분은 시료채취 후 실내에서 분리, 투수시험용 캡(cap)을 덮고 투수시험을 할 수 있도록 하였으며 상부는 외압을 받을 수 있도록 하였다.



Fig 3.1 Undisturbed sampler

Table 3.1 The undisturbed sampler specification

구 분	외 경	내 경	길 이	면적비
샘플러	11.5cm	10.2cm	14.7~15.2cm	21.3%

불교란 시료 채취기를 지반에 소정의 깊이까지 관입한 후 시료의 채취여부를 확인하고 관입된 불교란 시료 채취기를 지반에서 빼낼 때는 주위 흙의 점착력으로 인하여 시료의 이탈을 방지하기 위해 주변의 흙을 거둬낸 뒤 빼냈다.

그러나 불교란 시료 채취기는 조립토에서 불교란 시료를 채취하기엔 어려움 점이 많다. 우선 강한 외압을 가했을 때 자갈에 의해 불교란 시료 채취기의 관입이 불가능 하거나 관입과정에서의 손상이 많이 일어났다. 또한 시료를 채취했다고 해도 실내에서 투수계수 시험을 할 수 있도록 캡을 씌우는 과정에서 시료의 유실이 발생하는 경우가 많다.



Fig 3.2 Penetration of distributed sampler

하지만 본 연구의 대상이 되는 현장지역은 0.075mm이하 통과량이 50%가 넘는 세립토이고, 시공후의 함수비는 들밀도 시험 결과에 따르면 보통 30% 정도로 관입과정에서 큰 어려움이 없이 불교란 시료를 얻을 수 있는 양호한 조건이었으며, 실내에서의 투수시험을 위한 채취기의 표면 마무리 손질과정에서 점성이 많아 시료의 유실이 적어 투수시험에 있어 현장상태의 시료 조건으로 실내에서 투수계수시험이 시행되었으리라 사료된다.

위 과정을 통해 얻어진 불교란 시료는 투수시험을 시행할 수 있도록 투수용 캡을 설치한다. 이때 캡의 유체 주입부분에 시료의 유실을 방지하기 위해 거름종이를 설치하고 누수방지를 위한 고무링 설치와 시료의 내려 앉음을 방지하기 위해 투수성이 좋은 표준사를 넣어 캡을 씌웠다. 그리고 캔 하부에 호스를 연결한 뒤 24시간 정도 수침 시킨 후 강제 포화과정을 거쳐 투수시험을 시행하였다.

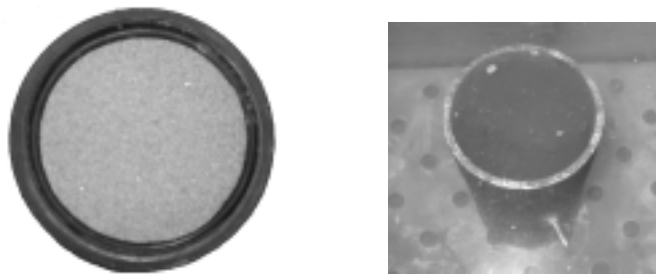


Fig 3.3 Cap to permeability test and waterlogged

3.1.2 들밀도 시험

본 연구대상인 현장은 세립토가 많이 함유되어 불교란 시료 채취기를 통한 시료의 채취가 상당히 용이 하였다. 그러나 실내에서의 표면 마무리 과정이나 포화과정 혹은 채취기내의 시료 내에 직경이 큰 자갈 및 호박돌로 인하여 투수계수시험의 결과가 그 현장 해당지역의 투수계수를 대표하지 못할 경우를 우려하여 불교란 시료 채취지역 바로 옆에 들밀도 시험을 실시하여 재성형 후 투수시험을 할 수 있도록 시료의 현장상태를 측정하였다. 그 외에 들밀도 시험결과를 바탕으로 다짐도에 대한 투수계수의 연관성을 분석해보았다.

다짐정도의 판정에 있어서는 건조단위중량으로 규정하는 경우와 포화도 또는 간극율로 규정하는 경우가 있으며 현장에서 측정한 건조단위중량(γ_d)과 실내 다짐시험으로 구한 최대건조단위중량(γ_{dmax})을 이용하여 현장의 다짐도(C_d)를 구하였다.

$$C_d = \frac{\gamma_d}{\gamma_{dmax}} \times 100 \quad (3.1)$$



Fig 3.4 Excavation in Sand Cone Method

3.2 실내시험

실내시험으로는 투수계수에 영향을 미치는 요소를 알고자 기본적인 물성치 시험, 즉 비중, 입도분석, 액·소성시험과 다짐시험, 투수시험을 실시하였다. 비중은 한국산업규격에서 KS F 2308, 액·소성시험은 KS F 2303, 2304에 규정되어 있다. 다음은 입도분석과 다짐시험 그리고 투수계수 시험에 관한 설명이다.

3.2.1 입도분석

투수시험에 있어 흙 입자의 입경은 투수계수에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 본 연구에서 세립토 및 점토의 함유량을 측정하기 위한 방법으로 체분석과 비중계분석을 실시하였다. 현장에서 채취한 흙을 투수계수를 낮게 하기 위해 세립자가 많이 포함된 흙을 가지고 다짐하여 시공이 이루어진 곳으로 채취된 시료에 대하여 시료를 노건조시킨 후, 덩어리진 흙덩어리를 고무망치로 잘게 부수어야 하나 점착력이 있는 시료의 경우 타격에 의한 흙의 원입자의 파쇄될 우려가 있고, 미세한 흙 입자들이 공기 중으로 흩날릴 가능성이 있으며, 이 과정에서 많은 시간이 소요된다. 그래서 통일분류법에서 기준으로 하는 점토의 #200체의 통과율 50%를 확인하기 위해서는 청수로 시료를 씻어서 건조 후 측정하는 것이 용이한 것으로 판단되어 시료 300g을 #200체에 청수로 씻겨 남은 시료에 대해 건조 후 입도분석을 실시하였다.

Table 3.2 Unified soil classification system which it follows in the grain size of the soil

ASTM D-422-61T	gravel	sand			silt	clay	colloids	
JIS A-1204		coarse	medium	fine				
		4.75	2.0	0.42	0.075	0.005	0.001	
MIT - 31	gravel	sand			silt(Schluff in din)			clay
DIN-4022-55		굵은	중간	가는	coarse	medium	fine	Ton in Din
BS-1377-61		2.0	0.5	0.2	0.02	0.006	0.002	
자갈(G: Gravel)	모래(S:Sand)				실트: "Mo" in Swedish"			점토(C: Clay)
	굵은(coarse)		가는(fine)		"Silt" in English			
		4.75(#4)		0.425(#40)		0.075(#200)		0.002

비중계 분석은 물 속에 가라앉는 흙 입자의 침강원리를 바탕으로 한다. 흙 시료가 물속에서 분산되면 흙 입자들은 입자들은 입자의 형상, 크기, 중량, 물의 점성에 따라 각각 다른 속도로 가라앉는데 토립자가 침강하는 속도를 Stoke's Law을 적용해서 입경별(d.mm), 함유율(P,%)을 산출해서 입도분포 곡선을 그릴 수 있다.

비중계 분석의 이론적 배경을 살펴보면 그림 3.5와 같이 하나의 완전한 구(球)로 가정한 토립자가 물 속에 침강하는 경우, 구의 침강속도는 Stoke's Law으로 구할 수 있다. 토립자가 굵을수록 침강속도가 빠르며 작은 입자는 이와 반대로 느릴 것이다. 그러나 침강하는 입자가 너무 크다면 침강할 때 교란이 심하고, 미립자는 브라운 운동(Brown's motion)이 심하므로 Stoke's Law은 구의 직경이 0.2mm~0.002mm에서만 유효하다.



Fig 3.5 Stoke's law

Stoke's Law에 의하면,

$$v = \frac{(G_s - G_w)}{18\mu} g \cdot d^2 \quad (3.2)$$

$$v(cm/sec) = \frac{L}{60 \cdot t} = \frac{(G_s - G_w) \gamma_w \cdot g}{18\mu} \cdot \left(\frac{d(mm)}{10}\right)^2 \quad (3.3)$$

$$\therefore d = \sqrt{\frac{30\mu \cdot L}{980(G_s - G_w)\gamma_w \cdot t}} = C\sqrt{\frac{L}{t}} \quad (3.4)$$

여기서, v, d는 각각 완전한 구로 가정한 토립자의 침강속도 및 직경

t, L은 토립자의 침강시간 및 거리

μ, γ_w 는 각각 흙탕물의 점성계수 및 밀도

G_s, G_w 는 각각 토립자 및 물의 비중

3.2.2 다짐시험

샘플러 주위의 시료를 채취하여 다짐시험을 결과와 들밀도 시험 결과를 다짐도를 비교함으로써 다짐 효과에 따른 투수계수의 특성을 알고자 표준다짐시험법을 시행하였다. 표준다짐 시험은 내경 10cm, 높이 12.7cm의 몰드에 시료를 3층으로 나누어 각 층에 2.5kg의 햄머를 30cm의 높이에서 25회 다져 실시하였다. 그림 3.6은 표준다짐시험에 사용되는 몰드와 래머를 나타낸 것이다.

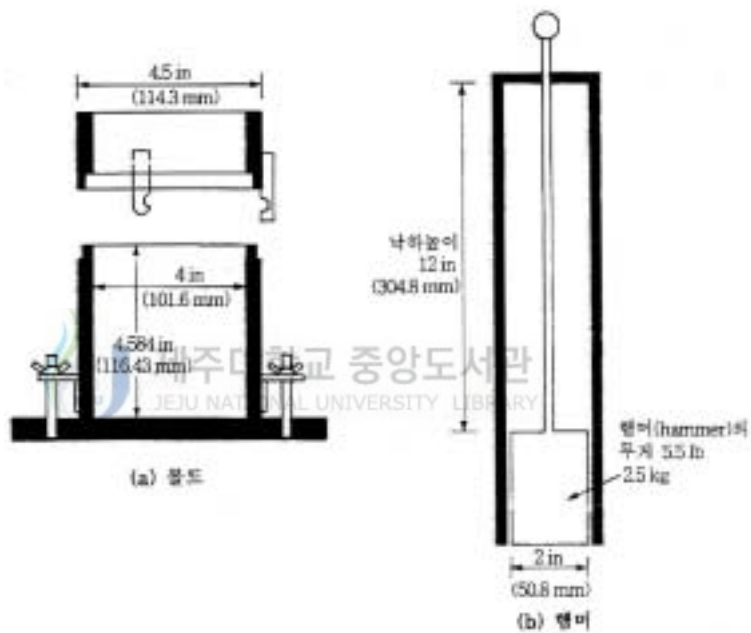


Fig 3.6 Setup of Compaction Test

Table 3.3 Types of compaction tests

방 법	햄머무게 (kg)	낙하고 (cm)	각 층당 타격회수	층 수	몰드직경 (mm)	최대허용 입경(mm)
A	2.5	30	25	3	100	19.0
B	2.5	30	25	3	150	37.5
C	4.5	45	25	5	100	19.0
D	4.5	45	55	5	150	19.0
E	4.5	45	92	5	150	37.5

3.2.3 실내투수시험

불교란 시료 채취기를 이용하여 얻은 불교란 시료의 대부분은 육안으로도 세립자가 많이 포함되어 있음을 확인 할 수가 있다. 세립자가 많다는 것은 흙의 분류상 실트질 혹은 점토질 흙으로 분류되며 이러한 흙들은 일반적으로 투수성이 낮아 투수계수측정에는 변수위 투수시험을 적용하였다.

현장에서 불교란 시료를 채취한 후 24시간 수침된 시료를 진공펌프 및 수두차를 두어 강제포화시켰다. 강제포화를 시키는 이유는 포화도에 따라 투수성의 차이가 생기기 때문이며, 하부에 주입된 물이 상부로 표출될 때 시료가 완전포화상태임을 가정하여 변수위 투수시험을 시행하였다.

그림 3.7은 변수위 투수시험의 모형을 대략적으로 나타낸 것이다.

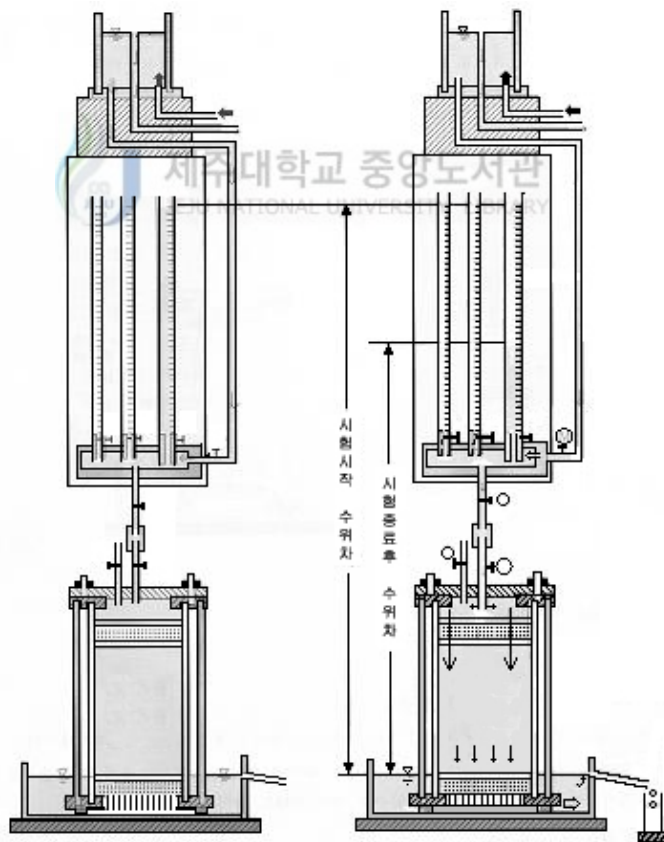


Fig 3.7 Falling head permeability test

4. 시험결과

본 연구는 우선 청수리 지역의 흙을 대표로 할 수 있는 시료를 채취하여 시험실에서 기본 물성치 및 다짐시험, 투수시험을 실시하였으며 표준다짐시험의 결과의 95%이내의 건조단위중량으로 투수시험용 시료를 성형하여 투수계수를 구하였다.

위 시험을 토대로 청수리 지역의 흙을 반입하여 차수 목적으로 시공이 이루어진 현장에 임의의 여러 지점에 불교란 시료 채취기 및 주위 시료를 채취하여 실내 시험을 통해 투수계수에 영향을 미치는 요인을 알기 위해 흙의 입경에 대해서는 입도분석 시험, 점토함유량과 흙의 흡착성을 간접적으로 알 수 있는 액·소성시험, 다짐시험과 들밀도 시험을 비교 통한 다짐도를 구하고 각 시험별로 투수계수와의 연관성을 검토하였다.



4.1 청수리 지역의 지질학적 특성 및 시험결과

4.1.1 지질학적 특성

제주도내 수문지질 특성을 고려, 단순화 하면 현무암류, 조면암류, 퇴적층, 사구층 등 4가지로 분류할 수 있으며 이중 퇴적층은 응회암, 역암, 서귀포층, 성산층, 고토양층 등을 포함하며 투수성이 매우 낮은 특징을 지니고 있다고 한다.

시료를 채취한 청수리 지역은 투수성이 낮은 특징을 지닌 퇴적층이 분포된 지역에 위치해 있으며 표 4.1은 수문지질로 분류한 것이며 그림 4.1은 퇴적층의 분포 및 청수리 지역을 나타낸 것이다 .

Table 4.1 Classes according to Hydrogeological

암 상	특 징
현무암류	다공질, 치밀질 등 각종 현무암류 포함
조면암류	치밀질로 현무암류에 비해 투수성이 낮음
퇴 적 층	저투수성 퇴적층
사 구 층	-



Fig 4.1 Chung su - Ri area and distribution of sedimentary

4.1.2 시험결과

지질적 특성을 바탕으로 차수효과 및 시공가능 여부를 알고자 청수리 지역의 흙을 채취하여 실내시험을 시행하였다. 그 결과 청수리 지역은 세립토 함유량이 57%이고 이중 점토함유량(0.002mm이하)은 18%정도로 미세한 토립자로 구성되어 있으며 소성지수는 점토 라이너 조건인 10이상 30이하인 23.7을 보여주고 있다. 또한 투수계수는 최대건조단위중량의 95% 이내로 재성형하여 시험한 결과 2.13×10^{-6} cm/sec이하로 거의 차수효과를 기대할 수 있는 결과를 얻을 수 있었다. 표 4.2는 청수리 지역을 대표로 하는 시료에 대한 시험결과이며 그림 4.2는 입도분포곡선을 나타낸 것이다 .

Table 4.2 The test result of chung su ri area soil

비중 (Gs)	액성 · 소성시험			다짐시험		투수시험 (cm/sec)	U.S.C.S
	LL (%)	PL (%)	PI	γ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)		
2.78	59.0	35.3	23.7	1.31	33	2.13E-06	MH

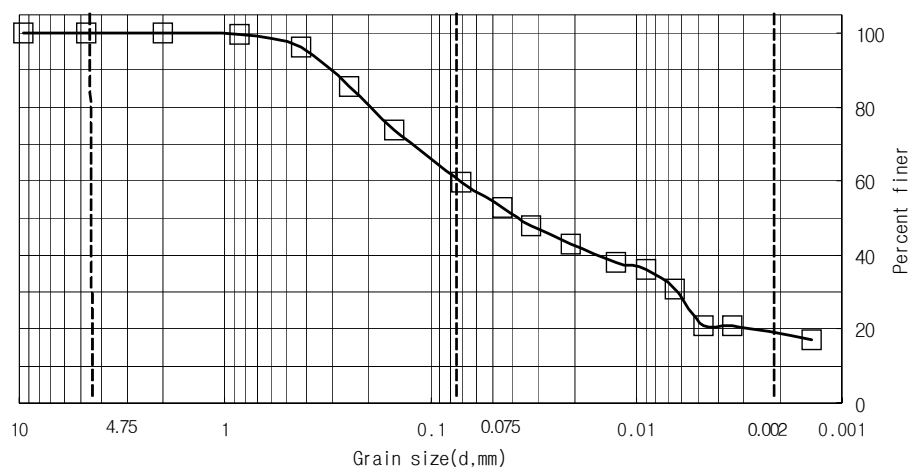


Fig 4.2 The grain size analysis of chung su ri area

4.2 시험결과

4.2.1 입도분석

다짐 시공된 현장에서 불교란 시료 채취기로 채취한 시료를 가지고 투수시험한 결과와 흙 입경의 크기 사이에 연관성을 알고, 토립자의 입경의 분포를 측정하기 위해 입도분석을 시행하였다. 그. 통일분류법에서의 세립토는 #200체 통과량 즉 흙의 입경이 0.075mm이하의 통과량의 50%이상인 되는 흙을 세립토라 하며 그 이하는 조립토라고 한다. 세립토는 다시 실트질 입경을 갖는 흙(0.075mm~0.002mm)과 점토질 입경을 갖는 흙(0.002mm이하)으로 나눌 수 있으며 또한 소성도를 통해서 좀더 상세한 흙의 분류가 이루어 질 수 있다. 그림 4.3~5은 통일분류법에 의해 모래질 흙, 실트질 흙, 점토질 흙에 대한 입도분포를 나타낸 것이다

자갈/모래/실트/점토/콜로이드 등의 입경 범위(mm)				
Gravel	Sand		Silt	Clay
	coarse	fine		
4.75	0.425	0.075	0.005	0.002

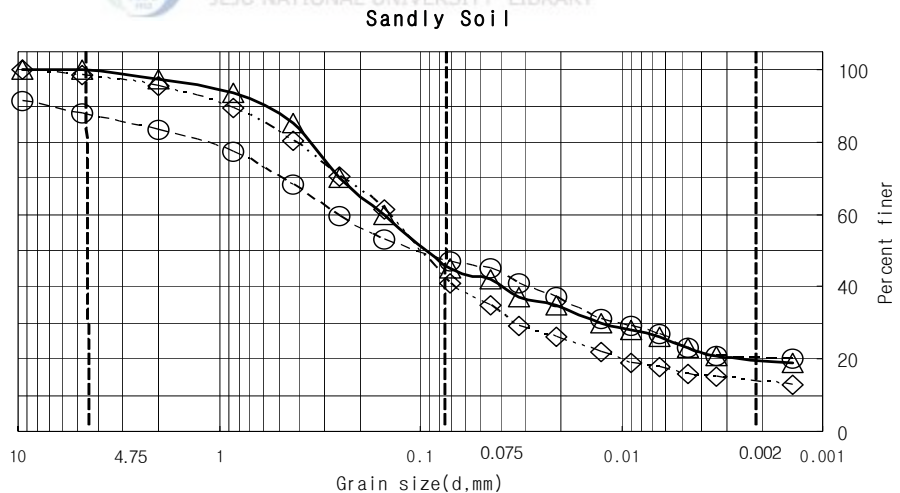


Fig 4.3 The grading curve of the sandy soil

자갈/모래/실트/점토/콜로이드 등의 입경 범위(mm)				
Gravel	Sand		Silt	Clay
	coarse	fine		
4.75	0.425	0.075	0.005	0.002

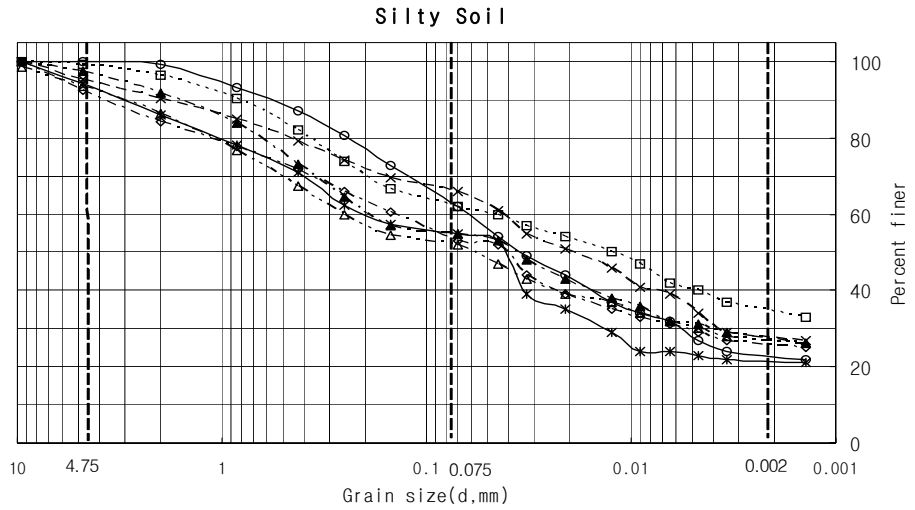


Fig 4.4 The grading curve of the silty soil

제주대학교 중앙도서관
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

자갈/모래/실트/점토/콜로이드 등의 입경 범위(mm)				
Gravel	Sand		Silt	Clay
	coarse	fine		
4.75	0.425	0.075	0.005	0.002

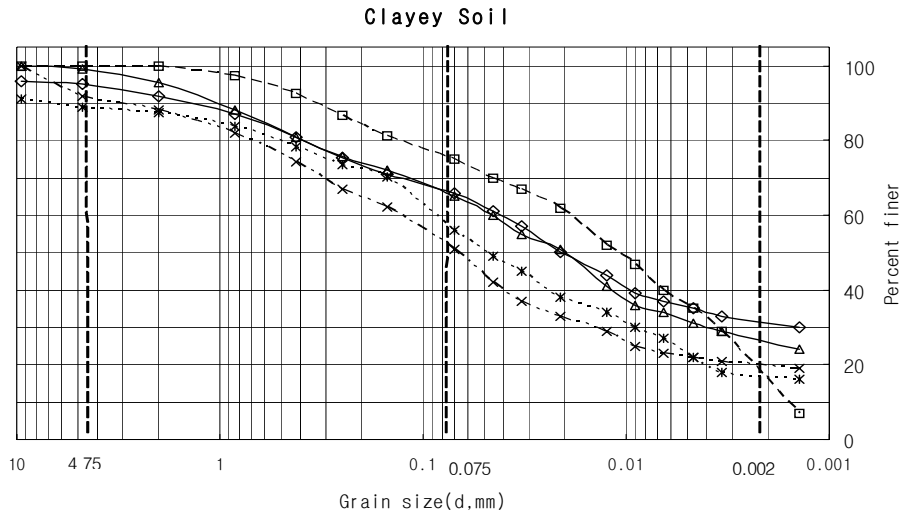


Fig 4.5 The grading curve of the clayey soil

그림 4.3는 모래질 흙에 대한 입도분석 결과로 #200체의 통과량은 50%이하 즉 42~48%사이의 결과를 보여주고 있다. 그러나 모래질 흙으로 분류되나 세립토의 함유량이 높으며 이중 점토함유량은 13~20%사이를 보이고 있다. 그림 4.4~5는 세립토의 기준이 되는 #200체 통과량이 모두 50%이상인 결과를 보여주고 있다.

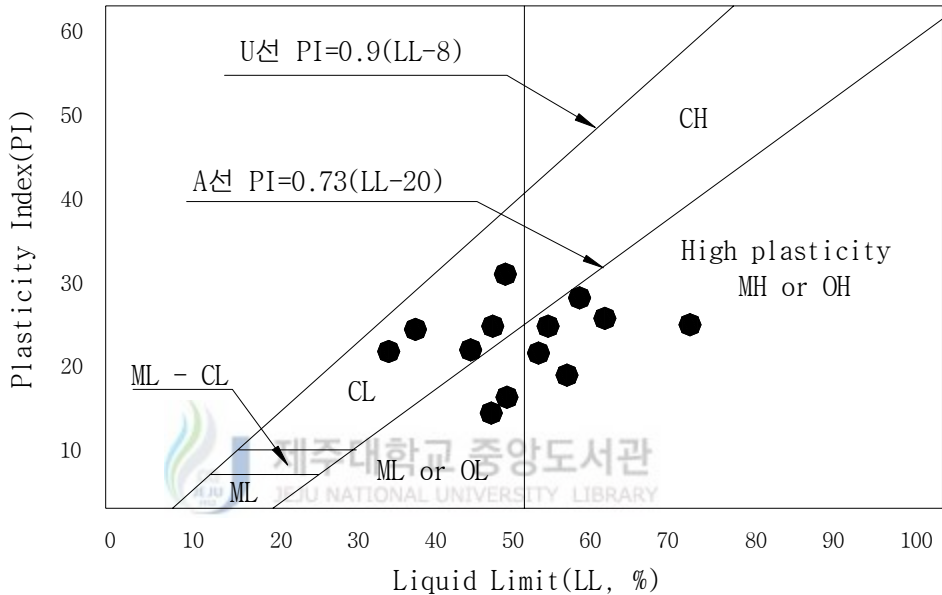


Fig 4.6 Plasticity chart

그림 4.6는 입도분석결과 세립토 함유량이 50%가 넘는 흙에 대해 액·소성시험결과 액성한계는 39.2~58.75%, 소성지수는 12.63~29.43의 값을 나타내고 있으며 이를 통해 소성도에 표시함으로써 좀더 흙을 상세하게 나타내었다. 그 결과 ML혹은 OL에 속하는 시료는 2개, MH~OH에 속하는 시료는 6개 그리고 CL에 속하는 흙은 5개이다.

4.2.2 다짐시험

다져진 흙의 조직은 투수계수에 미치는 영향은 중요한 요소 중 하나며 동일한 간극비를 갖는 흙시료를 비교할 경우 면모구조를 가질수록 시료의 투수성이 크고 분산구조를 가질수록 투수성이 작다. 습윤측으로 다짐 시행 시 투수계수는 건조측으로 다짐을 시행한 경우보다 낮다. 그림 4.7~9은 모래질 흙, 실트질 흙, 점토질 흙으로 분류하여 각각의 최대건조단위중량과 최적함수비를 나타낸 것이다.

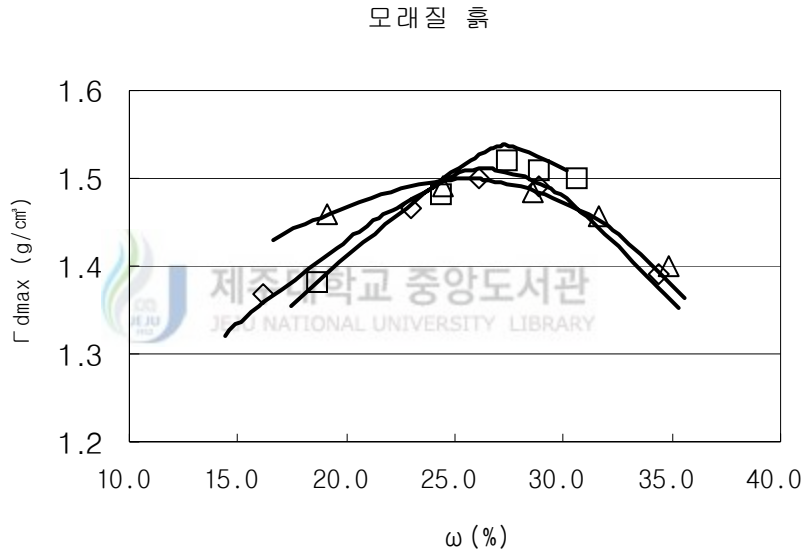


Fig 4.7 The compaction curve of the sandy soil

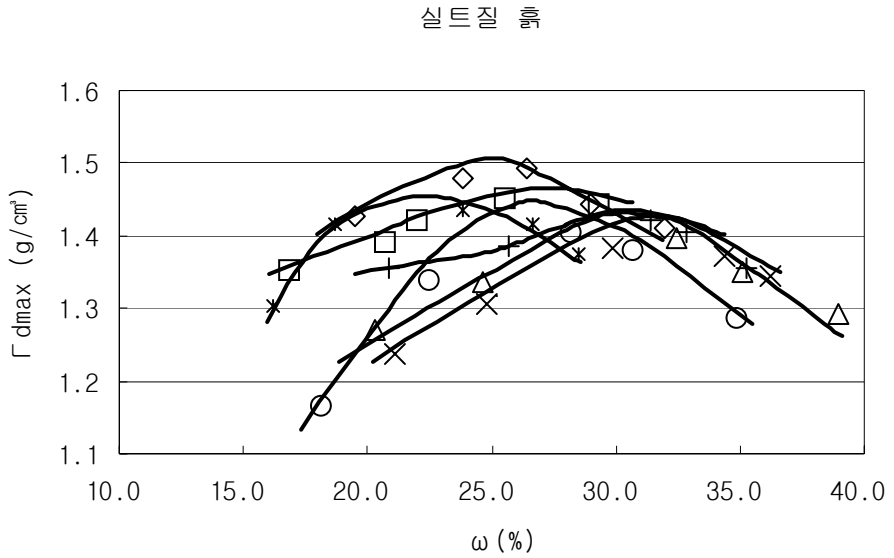


Fig 4.8 The compaction curve of the silty soil

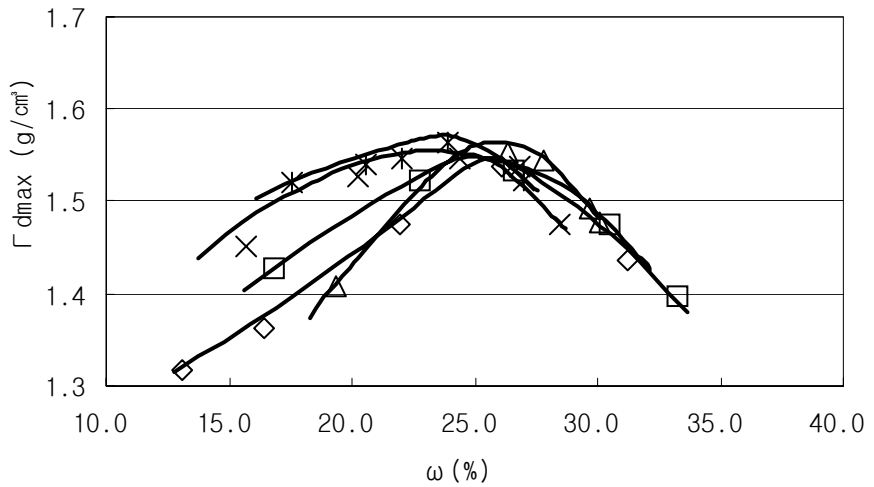


Fig 4.9 The compaction curve of the clayey soil

그림 4.7과 같이 모래질 흙에서는 최대건조단위중량이 1.48~1.53g/cm³이고 최적함수비는 26~28.5%의 범위에 있으며 그림 4.8에서는 실트질 흙은 최대건조단위중량이 1.41~1.50g/cm³이고, 최적함수비는 24~32%이다. 또한 그림 4.9에서는 최대건조단위중량이 1.54~1.57g/cm³이고 최적함수비가 21~26.2%임을 나타내고 있다.

4.2.3 들밀도 시험

본 연구에서는 불교란 시료 채취기를 이용한 투수시험용 시료를 채취하는 동안 그 부근에서 들밀도 시험이 이루어 졌다. 들밀도 시험을 통해 시료상태를 알 수 있고 다짐시험과 비교하여 다짐도를 구할 수 있다. 표 4.3은 들밀도 시험결과를 나타낸 것이고 모래질 흙, 실트질 흙, 점토질 흙의 다짐도를 나타내었다. 이 결과 모래질 흙에서는 다짐도가 대체적으로 실트질 흙이나 점토질 흙보다 낮은 결과를 나타냈으며 이 같은 원인으로는 현장에서 시공 시 세립토에 적합한 다짐방법을 사용하므로서 조립도로 분류된 모래질 흙에서는 다짐효과가 낮은 것으로 사료된다.

Table 4.3 Results of Sand Cone Method

구 분	습윤단위중량 (kg/cm ³)	건조단위중량 (kg/cm ³)	함수비 (%)	다짐도 (%)
모래질 흙	1.53~1.78	1.11~1.34	33.0~38.5	77.3~88.5
실트질 흙	1.60~1.89	1.33~1.52	16.5~33.8	83.2~106.5
점토질 흙	1.80~2.03	1.40~1.73	17.5~32.2	91.1~104.91

4.3 투수계수에 영향을 미치는 요인 분석

Taylor는 유체와 흙의 특성이 투수계수에 미치는 영향을 반영한 식을 Poiseuille법칙을 이용하였으며 Kozeny 다공질 매체의 투수성에 대한 식으로 Kozeny가 제안하고 Carman이 개선하였다. 이들 식은 유체와 흙의 특징에 의존한 식이다. 하지만 세립토에 적용하기에는 식 외의 조건, 즉 입자간의 화학적 작용, 조직, 포화도등도 중대한 영향을 미친다. 본 연구는 흙의 투수계수에 있어 영향을 미치는 요인들 분석하였다.

4.3.1 입경

우선 입도분석 및 액·소성시험결과를 토대로 통일분류법으로 SM, SC, MH, ML, CL와 같이 분류할 수 있었다. 그림 4.10는 분류한 흙의 종류에 따른 투수계수의 분포를 나타냈으며 미립자로 분류될 수록 투수계수는 낮아지는 경향을 보이고 이다.

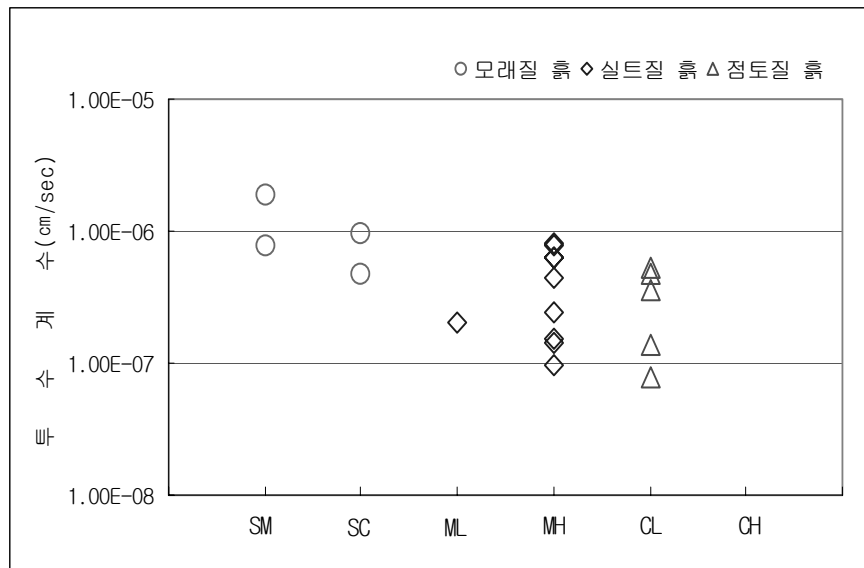


Fig 4.10 The coef. of permeability distribution which it follows in classification of the soil

Hazen(1911), Kenney, Lau & Ofoegbu 등은 흙시료의 입경의 크기를 가지고 투수계수에 대한 경험적 관계식을 제안했었는데, 입자의 크기는 투수계수를 결정하는데 있어 중요한 요소이다. 다음 식은 Hazen이 제안한 식으로 균등한 모래 및 자갈에서 경험적 관계를 나타낸 것이다.

$$k(cm/sec) = cD_{10}^2$$

(4.1)

식 4.1에서 입자의 크기가 작을수록 투수성을 낮게 나타내고 있음을 알 수가 있으나 그러나 이 식은 입도분포가 균등한 모래나 자갈에 사용되며, 세립토인 경우 유효입경 D_{10} 을 구하기란 상당히 곤란하다. 그림 4.3~5처럼 점토함유량이 많은 경우, 비중계분석으로 구할 수 있는 최소 입경은 0.002mm로 그이하의 점토함유량이 10%이상인 경우 유효입경을 구하기가 곤란하며, Hazen의 경험식을 가지고 투수계수를 추정하기란 불가능 하다.

그래서 본 연구에서 세립토인 경우 입정보다는 세립토의 기준이 #200체 통과량과 실트함유량 그리고 점토함유량과 투수계수와의 관계를 연구해 보았으며 그림 4.11은 #200체 통과량에 대한 투수계수를 나타내었다.

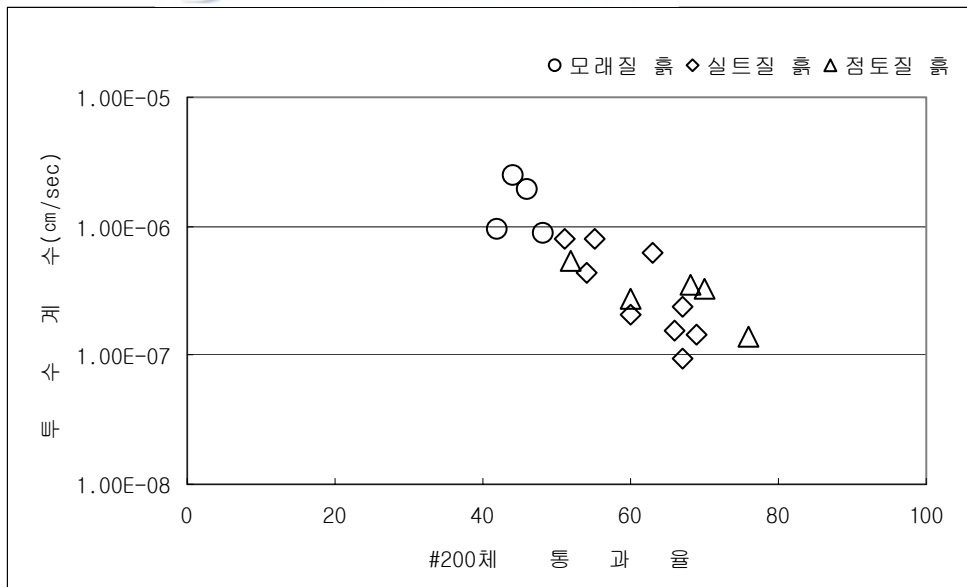


Fig 4.11 Relation between #200 passing percentage and Coef. of permeability

그림 4.10 결과 #200체 통과량 즉 세립토가 많을수록 투수계수가 낮아짐을 볼 수 있다. 또한 모래질 흙, 실트질 흙, 점토질 흙으로 분류한 경우에도 대체적으로 #200체 통과량에 대해 투수계수는 감소하고 있다.

#200체 통과량이 많다는 것은 물이 통과하는데 자갈이나 모래의 입경에 비해 간극이 적고 통과 시 유로의 길이가 길게 되어 결과적으로 투수계수를 낮게 하는 결과로 나타내며 이에 대한 상관관계식을 나타낼 수 있을 거라 사료된다.

세립토는 점토와 실트로 나뉘는데, 실트는 0.075mm에서 0.002mm사이의 입경을 가진 토립자를 말하며 그 이하인 입경을 가진 토립자는 점토라 하며 혹은 0.005mm이하로 하는 경우도 있다. 그림 4.11은 모든 시료를 실트함유량과 투수계수와의 관계를 나타내 봤다.

그 결과 실트함유량이 많을수록 투수계수가 낮아짐을 보여주고 있는데 이 또한 작은 입경으로 인해 유로의 길이가 길어진 결과라고 생각된다.

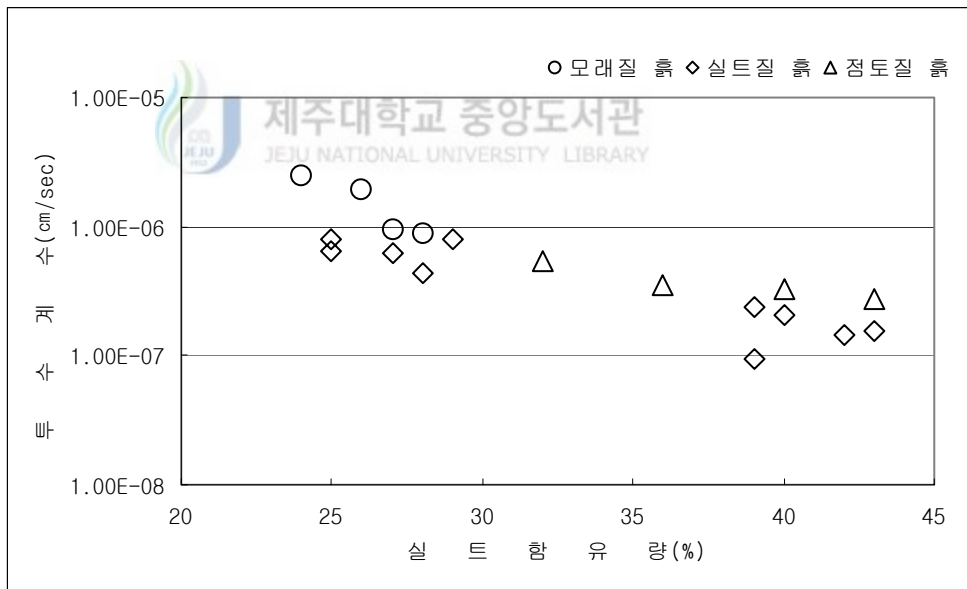


Fig 4.12 Relation between silt content and Coef, of permeability

또한 세립토에서 점토함유량과 투수계수와의 관계를 그림 4.13와 같이 나타내 보았다. 앞에서의 그림 4.11과 그림 4.12하고는 달리 점토함유량에 대해서 투수

계수의 경향을 나타내기에는 분산정도가 심한 결과를 보이고 있다.

이 같은 결과의 원인은 #200체 통과량에 대한 세립토의 대부분은 실트가 차지하고 있으며 점토함유량은 상대적으로 적은 양으로 인해 점토함유량만을 가지고 투수계수와 연관성을 도출하기에는 어려울 것으로 사료된다. 그러나 0.002mm이하를 같은 토립자는 흙의 소성을 증가시키고 흡착수막을 유도하여 유로를 더욱 복잡하게 만들어 투수계수에는 영향을 미칠 것으로 사료된다.

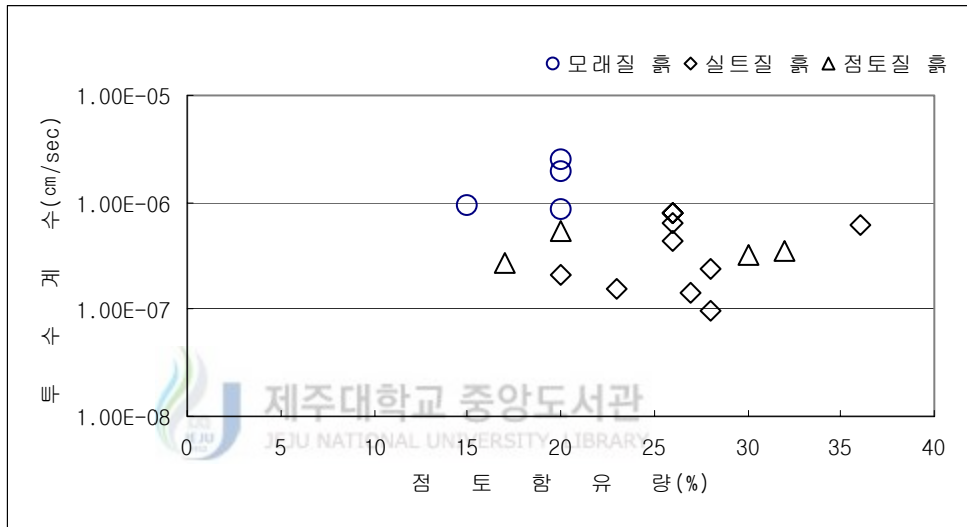


Fig 4.13 Relation between clay content and Coef, of permeability

4.3.2 소성

흙의 소성은 점토입자를 둘러싸고 있는 흡착수에 의해 발생되며 Skempton(1953)은 흙의 소성지수와 점토크기 입자의 백분율은 정비례한다고 했다. 점토함유량이 클수록 액성한계, 소성한계, 소성지수는 증가하는데 소성지수는 점토 함유량을 나타내고 또한 소성지수가 클수록 입자표면으로 물을 끌어들이는 경향이 크며 소성지표에서 A선 위쪽, 즉 소성지수가 클수록 흙은 투수성이 낮아진다고 한다. 그러나 그림 4.14은 투수성과 소성지수와 관계를 나타낸 것으로 어떠한 관계를 나타내기에는 많이 분산된 것을 알 수 있다. 그 이유로는 소성지수는 점토함유량(0.002mm이하)에 관계를 나타내며 이는 전체중량에 따른 소량의 점토함유량에 대해 투수계수를 도출하기엔 무리가 있을 것으로 판단되며, 다른 이유로는 채취시 약간의 교란의 원인이 있을 것으로 판단된다.

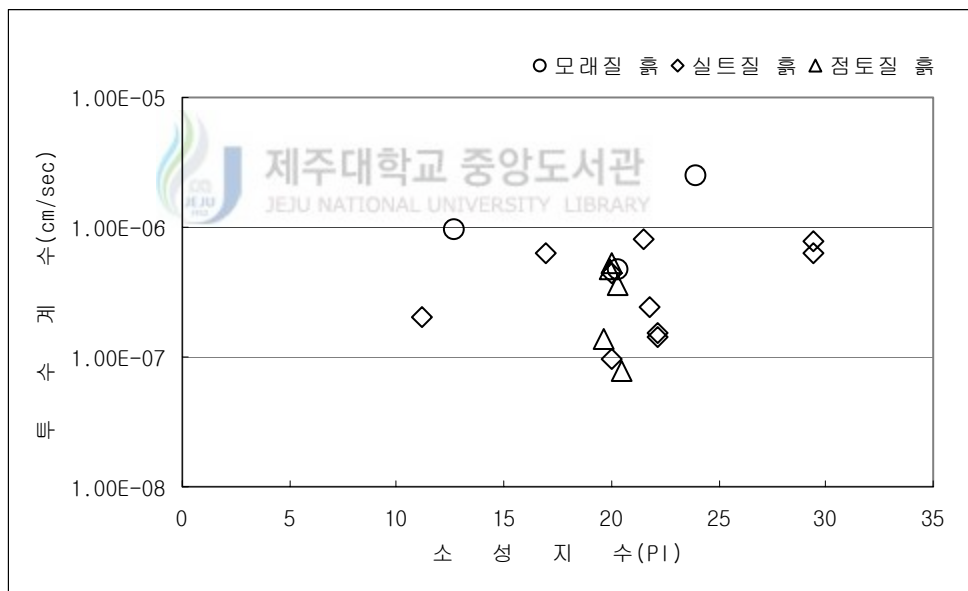


Fig 4.14 Relation between Plastic index Coef, of permeability

4.3.3 다짐

다짐은 일반적으로 자연상태의 흙을 공학적 특성 즉 강도의 증가, 침하의 방지 그리고 투수성을 감소시킨다. 현장에 시공함에 있어 다짐은 물에 많은 영향을 받으며 더욱이 세립토에서의 다짐은 흙입자 사이의 유험재 역할을 하고 면모구조에서 좀더 함수비를 증가함에 따라 이산구조로 변화하여 최적함수비를 기준으로 습윤층에서는 투수계수가 최저가 되는 결과를 나타낸다. 이처럼 다짐에 있어 최대건조단위중량을 기준으로 습윤층이 건조층에 비해 투수성이 낮은 이유는 입자 상호간에 유험 작용으로 단단해지고 유험의 비틀림이 커지며 세립토입자간의 배열이 더욱 불규칙하게 되기 때문이다.

그림 4.15은 들밀도 시험과 다짐 시험 결과를 비교하여 다짐도를 구했으며 이를 투수계수와 비교해 보았다.

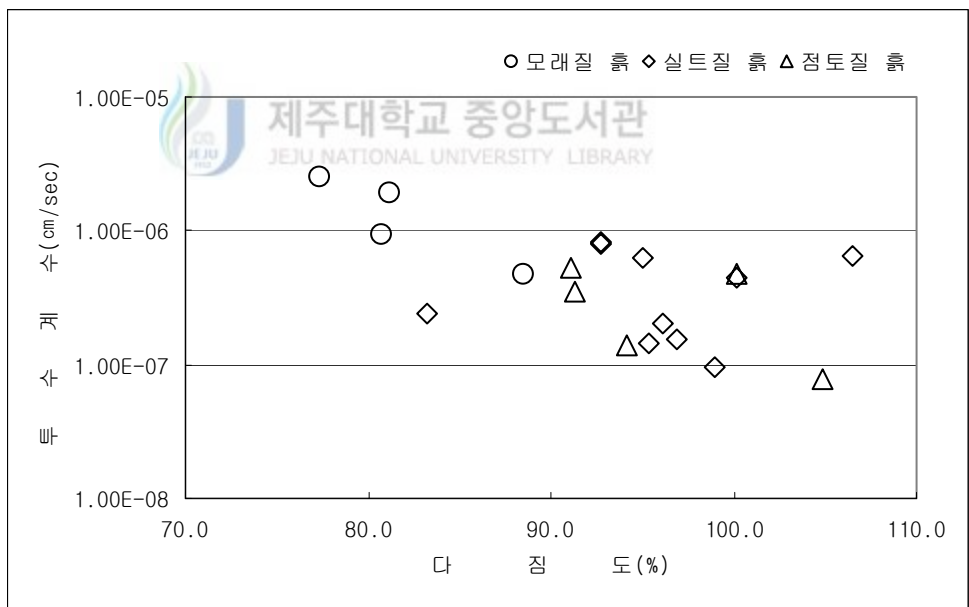


Fig 4.15 Relation between Relative compaction and Coef. of permeability

대체적으로 다짐도가 증가함에 따라 투수계수도 낮아지고 있으며, 다짐도가 90%이상인 경우, 투수계수는 일정한 범위(10^{-6} cm/sec)에 있는 것을 알 수 있다. 또한 상대적으로 모래질 흙인 경우 다짐도가 낮아 투수계수가 다짐도가 높

은 실트질 흙과 점토질 흙에 비해 투수계수가 높은 경향을 보이고 있는데, 이는 상대적으로 조립토 함유량이 많고 입경이 크며, 세립토에 유리한 다짐 시공이 이루어져 투수계수가 큰 것으로 사료된다.

4.3.4 간극비

간극비는 흙의 투수계수 영향을 미치는 중대한 요인이다. 입자사이의 공간의 감소로 간극비가 감소한다는 것은 투수계수의 감소를 가져온다. 일반적으로 점토나 실트를 많이 함유한 경우 표면에 흡착수막으로 인하여 모래에 비해 간극비가 같더라도 투수계수는 더 낮다. Kozeny-Carman식에서는 투수계수 k 와 $\frac{e^3}{(1+e)}$ 는 선형관계로 나타내고 있으며, 그림 4.16과 같이 다른 이론방정식은 k 와 $\frac{e^2}{(1+e)}$ 또는 k 와 e^2 의 관계를 직선으로 제시하기도 했다.

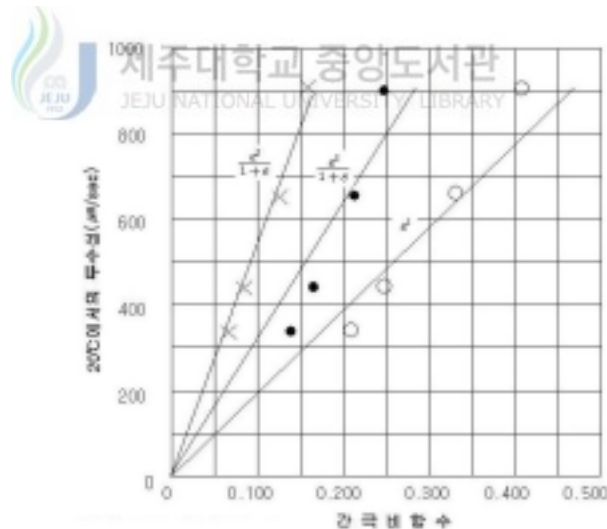


Fig 4.16 Void ration and permeability

본 연구에서는 간극비에 대한 함수를 나타내 보면서 투수계수와의 연관성을 알고자 그림 4.17~4.20와 같이 투수계수와 e , e^2 , $\frac{e^2}{(1+e)}$, $\frac{e^3}{(1+e)}$ 에 대해 나타내 보았다.

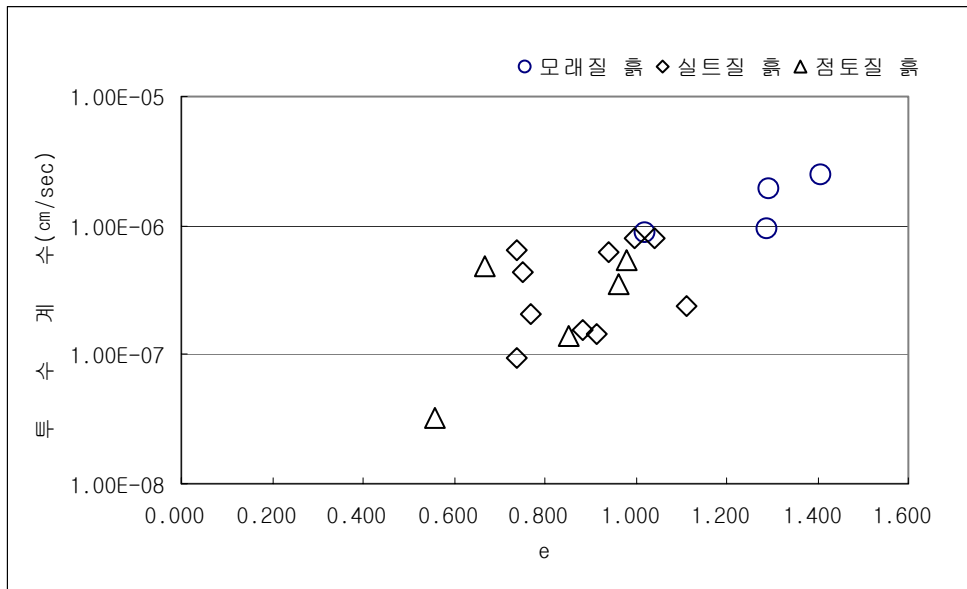


Fig 4.17 Relation between e and Coef, of permeability

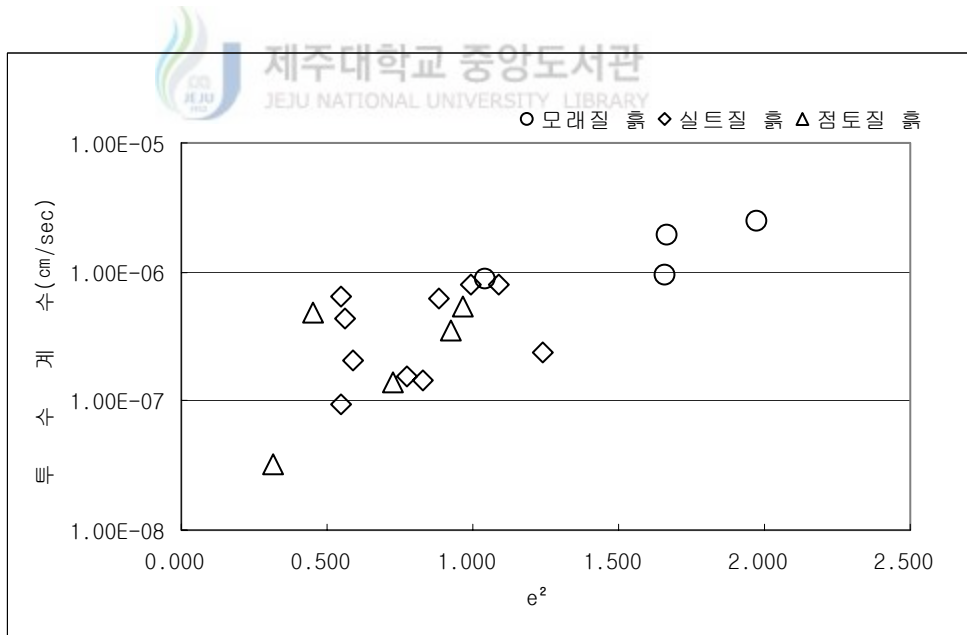


Fig 4.18 Relation between e^2 and Coef. of permeability

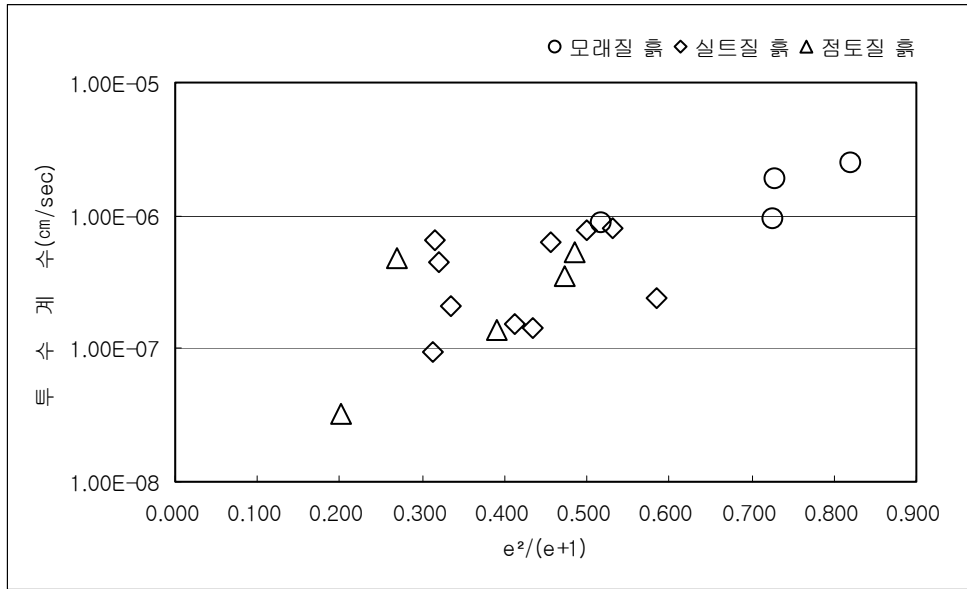


Fig 4.19 Relation between $\frac{e^2}{e+1}$ and Coef. of permeability

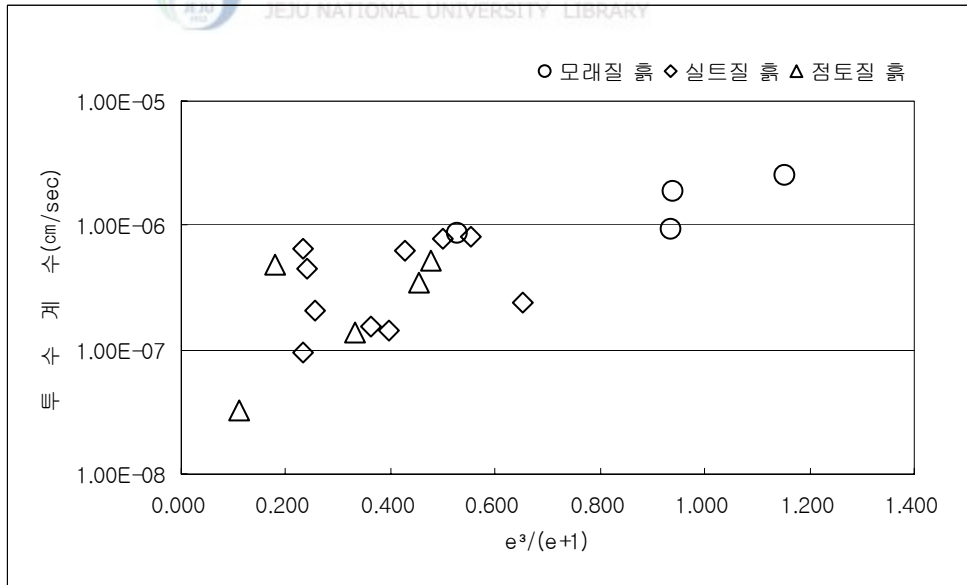


Fig 4.20 Relation between $\frac{e^3}{e+1}$ and Coef. of permeability

그림 4.17~20에 보는 바와 같이 투수계수는 간극비가 낮을수록 투수계수가 낮아지는 경향을 보이고 있으나 뚜렷한 선형관계를 나타내기는 어려울 것으로 사료된다.

모래질 흙에 대해서는 간극비가 낮아질수록 투수계수와의 관계가 일정한 직선을 보이면서 낮아지는 경향을 보이고 있다. 그러나 실트질 흙과 점토질 흙인 경우, 대체적으로 낮아지는 경향을 보이고 있으나 분산정도가 심하게 나타내고 있는데 그 이유로는 세립토에 있어 간극비는 구조와 배열과 유로의 크기와 길이의 복잡성등 있을 것으로 사료된다. 또한 강성벽을 이용한 투수계수 측정으로 인해 간극비에 대한 결과예측에 어려움이 따를 것이라 판단되어 진다.



4.4 투수계수의 모델의 분석

본 연구에서 수집된 자료의 분석을 실시한 결과 투수계수에 영향을 미치는 많은 변화요소들이 있는 것을 알 수 있었다. 그중 흙의 입경은 투수계수에 있어 많은 영향을 미치며 조립토에서는 D_{10} 혹은 D_5 를 이용한 투수계수를 구할 수 있는 경험식이 많이 연구되었다. 그러나 세립토 즉 점토함유량이 많은 경우 D_{10} 나 D_5 를 구하기란 어려우며 세립토 함유량에 대한 투수계수를 추정하는 것이 오히려 효과적일거라 사료된다. 시험결과를 통해 #200체 통과량과 실트함유량 대해서는 세립자가 많을 수록 투수계수가 낮아짐을 알 수 있었으며 그림 4.21~22으로부터 표 4.3와 같은 식을 얻을 수 있었다.

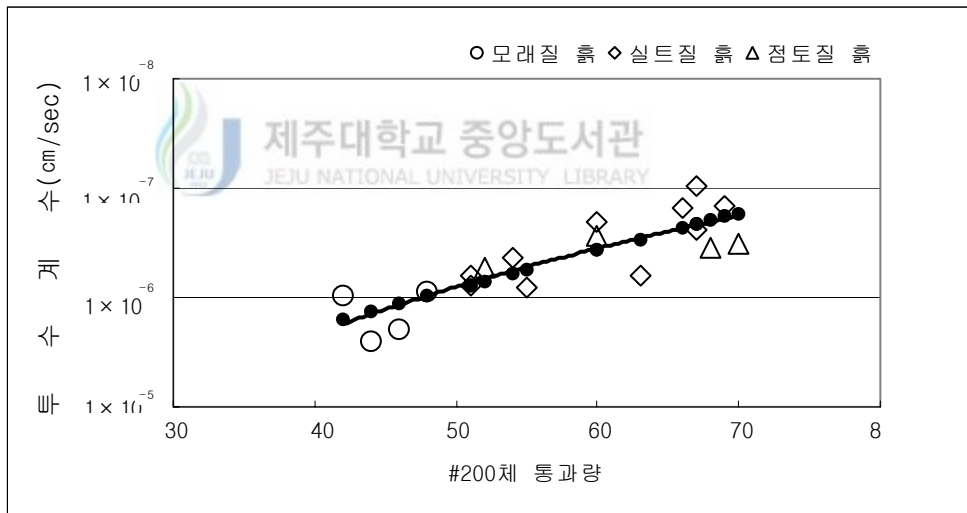


Fig 4.21 The coef. of permeability measured value regarding a passage quantity of the #200 and calculation result

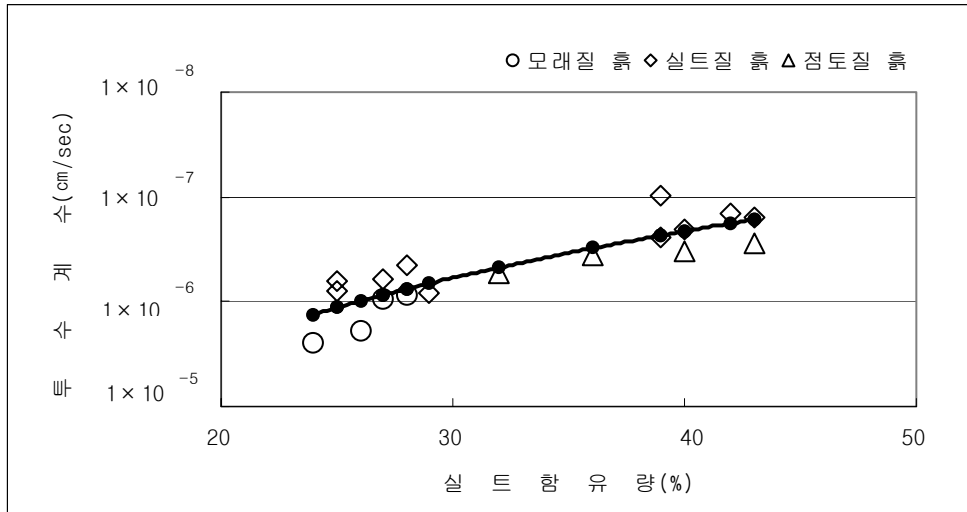


Fig 4.22 The coef. of permeability measured value regarding a silt content and calculation result

Table 4.4 The tendency regarding a passage quantity of the #200 and a silt content

구 분	추세식	R^2	비 고
#200체 통과량	$k = 10R^{-(3.44R+4.36)}$	0.7011	R: #200체 통과량
실트 함유량	$k = 10M^{-(1.55\ln(M)+8.09)}$	0.7629	M: 실트 함유량

표 4.4에서처럼 R^2 이 1에 가까울수록 변동을 설명하는 정도가 크다고 하나 표 추정된 식들은 정도가 높지 않은 것을 알 수 있다. 이는 세립토의 투수계수는 세립토의 함유량 혹은 실트 함유량 외에 간극비, 흙의 구조 및 조직, 포화도등 고려되지 않은 요소들로 인해 결과로 보인다.

실트 함유량에 대한 식은 #200체 통과량에 제시한 식에 비해 정도가 좀더 높게 나타났다. 그러나 실트 함유량을 측정하는 것보다는 #200체 통과량 즉 세립토 함유량을 측정하여 위 공식에 적용하는 것이 더 편리하다고 생각된다. 그것은 실트 함유량을 측정하는데 있어 체가름 시험, 액·소성시험, 비중시험, 비중계 검정, 비중계 분석 등의 시험들이 필요하고 시험과정이 복잡하며, 시험하는데 있어 많은 시간이 걸린다. 또한 체가름 시험에서의 #200체 통과량을 측정하는

것 보다 약간 신뢰성이 낮을 것으로 사료된다.

그리하여 #200체 통과량을 이용하는 방법은 간단히 체가름 시험만으로도 위에서 제시한 식에 대입하므로써 도출하기가 용이하다고 사료되며 이는 실트 함유량을 이용한 투수계수를 도출하는 것보다는 #200체 통과량을 측정하여 투수계수를 이용하는 것이 시간적으로나 시험방법등에서 더 간편하다고 생각된다.



5. 결론

본 연구에서는 청수리 지역의 흙을 반입하여 차수목적으로 시공이 이루어진 현장에서 불교란 시료를 채취하고 입도분석, 다짐시험, 실내 투수시험 등을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 청수리 지역을 대표할 수 있는 시료를 채취하여 현장 시공 전 시험을 해본 결과 투수시험 결과는 최대건조단위중량의 95% 이내로 재성형시 투수계수는 2.13×10^{-6} cm/sec이고, 소성지수는 23.7, 세립토 함유량은 57%정도이며 통일분류법을 이용한 결과 MH~OH를 보이며 25~50mm이상의 입경을 가지는 큰 흩입자 또는 암조각이 포함되지 않아 차수효과를 기대할 수 있는 흙으로 사료된다.
2. 이러한 청수리 지역의 흙을 반입하여 현장 시공된 흙을 불교란 시료 채취기로 채취하여 시험한 결과 입도분석에서는 대부분은 실트질 흙, 또는 점토질 흙으로 판별되고, 모래질 흙으로 판별된 흙은 세립토 함유량이 41~48%이다.
3. 세립토인 경우 투수계수에 영향을 미치는 요인으로는 입경의 크기, 간극비, 다짐정도, 흙의 조직 및 구성, 포화도등이 있으며 본 연구 결과 입경에는 #200체 통과량과, 실트질 함유량이 많을수록 투수계수는 낮아지는 경향을 보이고 있으며 점토함유량에 대해서는 투수계수와 연관성을 보이기에 분산정도가 심하게 나타났다.
4. 흙의 소성은 흙의 점성과 관계가 있으며 이는 흩착수막을 형성 투수계수를 낮게하는 경향이 있다고 하나 시험 결과 소성과 투수계수에서 분산정도가 심하게 나와 연관성을 찾기가 어려웠으며 다짐도를 통해서도 다짐도가 증가할수록 투수계수는 낮아지는 경향을 보이며, 다짐도가 90%이상일 때는 1×10^{-6} cm/sec 이하의 일정한 값을 보이고 있다.

4. 간극비를 통해 e , e^2 , $\frac{e^2}{(1+e)}$, $\frac{e^3}{(1+e)}$ 와 투수계수의 관계를 나타낸 결과 대체적으로 간극비가 낮을수록 투수계수는 낮아지는 성향을 보이고 있으나 분산 정도가 심하여 투수계수와의 관계를 뚜렷하게 나타내기란 어려울 것으로 사료되며, 원인으로서는 세립토의 구조변화에 의한 영향이 있을 것으로 판단된다.

5. 투수계수에 대한 추세식을 #200체 통과량과 실트함유량에 대해 분석한 결과 $k = 10R^{-(3.44R+4.36)}$, $k = 10M^{-(1.55\ln(M)+8.09)}$ 으로 나타났으며, 이중 실트함유량에 대한 정도가 높으나 시험에 있어서는 #200체 통과량을 이용한 투수계수를 도출하는 것이 더 용이하다고 사료된다.

본 연구에서는 불교란 시료 채취기를 이용한 투수계수 측정과 그에 대한 영향요소를 분석하고 추세식을 구해보았다. 그러나 조립토인 경우 불교란 시료 채취기로 시료를 채취하기에는 어려움이 따르는 것으로 판단되며, 투수계수와 간극비에 대한 연관성을 정확히 측정하고자 할 때는 연성벽을 이용한 투수계수 측정보다는 신뢰성이 있을 것으로 판단되며 보다 정확한 투수계수값을 얻기 위해서는 향후 많은 연구가 필요할 것이다.

6. 참고문헌

Lambe, T. W., 1958, The Engineering Behavior of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundation, Prentice-Hall, Inc, pp 275~292

Lambe, T. W., The Structure of Compacted Clay, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.84, No. Sm2, Proc. pp.1654~1658

Benon, C. H., and Daniel, D. E., Influence of Clods on Hydraulic conductivity of Compacted Clay, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.116, No. 8, pp1231~1248

Daniel. D. E., and Benson, Water content-Density Criteria for Compacted Soil Liners, Journal of Geotechnical Engineering , ASCE, Vol, 116, No.12, 1811~1830



Braja M. Das, 1997, Principles of Geotechnical Engineering, PWS Publishing Company, 99. pp105~150

신방웅, 박홍규, 2002, 토질시험법, 구미서관, pp143~154

이송, 김태훈, 이재훈, 2002, 토질시험법, 구미서관, pp181~209

박춘수, 2000, 다짐粘土와 자연粘土의 透水係數 豫測, pp6~10

전상욱, 1996, 有機透過物이 自然粘土의 透水性에 미치는 影響에 대한 研究, pp8~9, pp15~17

김중오, 1999, 透水性과 다짐에 미치는 風化土破碎에 대한 實驗的 研究, pp11~12

조영웅, 2003, 물유리계(L.W) 그라우팅에 의한 지반보강시 차수효과에 관한 연구, pp33~35

김신남, 2004, 노상 흙쌓기 다짐밀도측정에 관한 연구, pp27~33



감사의 글

이 논문을 완성하기까지 학문에 대한 지식을 아낌없이 주시고 논문지도에 격려를 해주신 남정만 교수님께 진심으로 감사드립니다.

아울러 대학원 과정에서 제자를 위해 학문적 지식은 물론 인생의 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 이병걸 교수님, 박상렬 교수님, 김상진 교수님께도 머리 숙여 감사드립니다.

또한 이 논문이 완성되기까지 현장조사 및 실험실에서 동고동락하며 도와준 대학원 김광일, 김승범, 김준호, 조성환에게도 따뜻한 마음을 전합니다.

멀리서 유학하느라 집안일에 소홀한 나를 대신해 모든 집안대소사와 우리가족을 위해 희생해준 내 인생의 반려자 박용경님께 정말 고생 많았다고 말하고 싶습니다.

그리고 엄마, 아빠가 사랑하는 이쁘고 씩씩하게 자라준 이쁜 딸 주영, 멋진 장남 병욱, 귀염둥이 막내 운영에게도 고맙다는 말을 하고 싶습니다.

끝으로 저를 낳아 길러주시고 고생만하시다 하늘나라로 가신 어머니, 아버지께 이 모든 것을 바치겠습니다

모두를 사랑합니다.

2005년 6월

장 기 원 올림