

# 하수슬러지의 차수재 및 복토재로의 이용타당성에 관한 연구

A Feasibility Study on the Use of Liner and Cover Materials Using Sewage Sludge

유 남 재\*<sup>1</sup> 김 영 길\*<sup>2</sup>  
Yoo, Nam-Jae Kim, Young-Gil  
박 병 수\*<sup>3</sup> 정 하 익\*<sup>4</sup>  
Park, Byung-Soo Jeong, Ha-Ik

---

---

## Abstract

This research is an experimental work of developing a construction material using municipal wastewater sludge as liner and cover materials for waste disposal landfill.

Weathered granite soil and flyash, produced as a by-product in the power plant, were used as the primary additives to improve geotechnical engineering properties of sludge. For secondary additives, bentonite and cement were mixed with sludge to decrease the permeability and to increase the shear strength, respectively.

Various laboratory test required to evaluate the design criteria for liner and cover materials, were carried out by changing the mixing ratio of sludge with the additives. Basic soil properties such as specific gravity, grain size distribution, liquid and plastic limits were measured to analyze their effects on permeability, compaction, compressibility and shear strength properties of mixtures. Laboratory compaction tests were conducted to find the maximum dry densities and the optimum moisture contents of mixtures, and their effectiveness of compaction in field was consequently evaluated. Permeability tests of variable heads with compacted samples, and the stress-controlled consolidation tests with measuring permeabilities of samples during consolidation process were performed to obtain permeability, and to find the compressibility as well as consolidational coefficients of mixtures, respectively. To evaluate the long term stability of sludges, creep tests were also conducted in parallel with permeability tests of variable heads.

On the other hand, for the compacted sludge decomposed for a month, permeability tests were carried out to investigate the effect of decomposition of organic matters in sludges on its permeability.

Direct shear tests were performed to evaluate the shear strength parameters of mixed sludge with weathered granite, flyash and bentonite. For the mixture of sludge with cement, unconfined compression tests were carried out to find their strength with varying mixing ratio and curing time.

- 
- \*1 정회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 부교수
  - \*2 정회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 시간강사
  - \*3 정회원, 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사수료
  - \*4 정회원, 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원

On the other hand, CBR tests for compacted specimen were also conducted to evaluate the trafficability of mixtures.

Various test results with mixtures were assessed to evaluate whether their properties meet the requirements as liner and cover materials in waste disposal landfill.

## 요 지

본 연구는 하수처리장 슬러지를 사용하여 매립지의 복토재 및 차수재의 건설재료로 개발하기 위하여 수행한 실험의 분석결과이다.

하수슬러지에 그의 지반공학적 물성증진을 위하여 화강토와 화력발전소의 부산물인 플라이애쉬를 주첨가물로 사용하고 부첨가물로 시멘트 및 벤토나이트를 소정의 혼합비율로 섞어서 각각 전단강도 증진과 투수계수 감소효과를 도모하였다.

주재료인 하수슬러지와 첨가재의 혼합비율을 변화시킨 혼합물에 대하여 다양한 실내실험을 수행하여 복토재 및 차수재의 설계기준의 적합성 여부를 조사하였다. 각 주재료, 첨가재, 혼합물의 비중, 입도분석, 액·소성한계 실험을 실시하여 기본물성을 구하고 그들이 투수성, 다짐성, 압축성, 전단강도에 미치는 영향에 대하여 분석하였다. 혼합물에 대하여 실내다짐시험을 실시하여 최대건조단위중량과 최적함수비를 구하고 현장 다짐효율성을 평가하였다. 다짐혼합시료에 대하여 변수두 투수시험을 실시하여 투수계수를 구하는 한편 변수두 투수시험을 하중제어식 압밀시험중에 병행 실시하여 그들의 압밀정수 및 투수계수를 측정하였다. 슬러지의 장기적 안정성과 관련하여 크리프실험을 변수두 투수시험과 함께 실시하였다. 한편, 한달간을 부패시킨 다짐시료에 대하여 투수시험을 실시하여 슬러지내 유기물질 부패에 의한 투수계수에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

슬러지에 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트를 일정비율로 섞은 혼합물에 대하여 직접전단시험을 실시하여 전단강도정수를 구하였다. 시멘트와 혼합한 슬러지에 대하여 일축압축 강도시험을 실시하여 혼합비와 재령기간에 따른 압축강도 변화를 분석하였다. 한편, 다짐혼합시료에 대하여 CBR시험을 수행하여 그들의 주행성에 대한 평가를 실시하였다.

이와 같은 다양한 실험결과를 종합분석하여 매립지의 차수재 및 복토재로서 사용조건 만족여부를 검토하였다.

**Keywords** : Sewage sludge, Weathered granite soil, Flyash, Cement, Bentonite, Liner and cover materials, Compaction, Compressibility, Permeability

## 1. 서 론

전국의 산업폐기물 발생량 중 유기물계는 1990년 기준시 전국 산업폐기물에 28.2%를 차지하고 있으며, 그 비율은 계속 증가추세에 있는 실정이다. 특히, 1994년 1년동안 국내 53개의 하수처리시설에서 발생한 슬러지 탈수 케이크량은 961,600m<sup>3</sup>이며 그 중에서 중량하수처리장에

서 205,600m<sup>3</sup>으로 가장 많이 발생되고 있는 현황이다(환경부, 1994). 향후 하수 슬러지의 발생량은 전국적으로 수질개선 및 환경오염 방지를 위한 하수처리장의 신설 및 확장계획으로 더욱 늘어날 것으로 예상된다.

하수 슬러지 매립방법은 도시 폐기물과 혼합 매립 형식으로 매립이 이루어져 왔으며, 매립지에서도 60·70년대 석탄계 연료를 쓰일 때는 무

기물질의 함유량이 높았으나 생활수준이 높아지면서 대체연료인 석유계 사용의 급증으로 유기물 함유량이 증가하여 시간경과에 따른 큰 침하나 오염물질의 유출문제 및 안정화 시간의 증가 등 매립지반의 효율적인 이용에 관련하여 다양한 환경 및 지반공학적 문제를 야기시킬 것으로 판단된다.

이와 같이 매년 대량으로 발생하는 하수슬러지를 매립지의 차수재 및 복토재로 변환하여 사용하게 되면 일반폐기물의 재활용에 따른 환경적 이익 뿐 아니라 천연자원 절약의 긍정적 역할이 예상된다. 또한 다량의 유기물을 함유하고 있는 슬러지의 매립지의 차수재 및 복토재로의 재활용은 지반공학적 측면에서 매우 흥미로운 일이다.

한편, 슬러지 활용에 대한 국내외 연구는 아직 초보적 단계에 있는 실정인데 Alleman과 Berman(1984)은 유기성 슬러지를 고온으로 가열시켜 유기물을 제거한 뒤 경화벽돌을 만들어 활용하는 경우를 제시하였고, Krizek과 Atmatzidis(1987)는 FGD(flue gas desulfurization) 슬러지를 플라이애쉬/소석회와 섞어서 매립재료로서 활용성에 대한 토질실험을 실시하였으며, Ullrich와 Hagerty(1987)는 FGC(flue gas cleaning) 슬러지를 플라이애쉬/소석회와 섞었을 때 안정화에 긍정적임을 발표하였다. 또한 Roy 등(1991)은 중금속 슬러지를 시멘트/플라이애쉬와 섞었을 때 고결과 안정화가 이루어진다고 하였고, Poran(1989)은 시멘트를 안정제로 사용시 투수성이 감소하고 CBR과 전단강도값이 증가해서 채움재나 도로기층재로 효과적임을 발표하였으며, Koenig과 Kay(1996)는 슬러지의 전단강도와 압밀특성 등 공학적 특성을 연구하였다. 국내에서는 천병식 등(1992)이 토공재로서 정수장 슬러지의 토질 공학적 특성을 발표했는데, 그는 정수장 슬러지가 유기물 함유량에 따라 흙의 구조와 공학적 성질이 크게 변화되며, 압축지수가 대단히 높아서 매립후에도 슬러지층이 있는 지반 위에 상재압이 가해지면 압밀침하가 대단히 클 것으로 판단하였고, 계절별

로 슬러지 성상의 변화가 심하여 아직 실용화 단계에는 많은 기술적 제한이 있을 것으로 보고하였고, 이용수와 정하익(1997)은 하수슬러지를 벤토나이트와 혼합하였을 때 벤토나이트의 첨가량이 증가함에 따라 투수계수는 감소하나 혼합재의 강도는 크게 변화가 없다고 하였다. 최근 정문경 등(1998)은 플라이애쉬와 벤토나이트 혼합재를 폐기물 매립장 차수재로 활용하기 위한 연구에서 벤토나이트 첨가에 따라 투수계수가 감소함을 발표하였는데 이는 주로 벤토나이트의 팽창에 의해 간극이 충전되었기 때문인 것으로 결론지었다.

따라서, 본 연구에서는 하수슬러지를 매립지의 차수재 및 복토재로써 재활용 가능성을 조사하기 위하여 슬러지에 다양한 첨가재를 일정한 비율로 혼합하여 그의 지반 공학적 기능의 적정성 여부를 검토하였다. 주재료를 하수장 슬러지로 하며 국내에서 쉽게 구할 수 있는 화강 풍화토, 화력발전소의 부산물인 플라이애쉬, 시멘트, 벤토나이트를 첨가 혼합시켜 각각에 대하여 기본물성실험을 실시하고, 하수장 슬러지를 플라이애쉬/화강 풍화토와 중량백분율로 20%씩 서로 증가시켜 혼합시키고, 첨가재인 벤토나이트와 시멘트는 20%이내에서 혼합한 뒤에 그의 혼합물의 현장다짐성, 압축성, 투수성, 전단강도, 주행성 평가등을 알아보기 위하여 각각 다짐, 압밀, 투수, 직접전단, CBR, 일축압축시험 등을 실시하였다. 한편, 슬러지의 장기적인 안정성, 즉 슬러지내 유기물의 분해에 따른 물성변화를 알아보기 위하여 슬러지 성형후 한달간 분해시킨 뒤 투수시험을 수행하였으며 장기적인 침하 변위 유발에 의한 투수계수 변화 및 그의 특성을 알아보기 위하여 크리프시험을 변수위 투수시험과 병행하여 수행하였다.

따라서, 본 연구에서는 슬러지 혼합물의 혼합에 따른 각종 토질정수의 변화를 실험결과를 바탕으로 비교·분석하여 슬러지를 매립지의 복토재 및 차수재로 활용할 수 있는 방안에 대하여 연구를 수행하였다.

## 2. 하수슬러지 및 첨가재의 선정

매립지의 차수재 및 복토재로서의 기능을 만족하기 위해서는 그의 투수성이 적합하여야 하며 현장에서 시공가능하여야 되고, 장기적으로 안정성을 유지하여야 된다. 본 연구에서는 하수슬러지를 매립지의 차수재 및 복토재로 재활용하는 방안으로 그것을 주재료로 하였으며 그의 물리적 안정성을 도모하기 위하여 국내에서 가장 손쉽게 구할수 있는 화강토를 혼합재로 사용하였다. 한편, 화력발전소의 부산물인 플라이애쉬를 재활용하고 실트질 입경의 물리적 성질과 포졸란 효과의 화학적 성질을 이용하기 위하여 이를 혼합재로 선정하였다. 또한, 차수효과 및 강도증진효과를 보완하기 위하여 시멘트를 첨가재로 선정하였으며 차수기능을 증진하기 위하여 세립질의 벤토나이트를 첨가재로 선정하여 실험을 수행하였다.

### 2.1 하수 슬러지

본 실험에 사용된 슬러지는 국내에서 그의 발생량이 가장 많은 서울시 중랑천 하수 처리장에서 채취한 시료이다. 슬러지는 계절별로 변화가 크며, 여름철에는 강우에 의한 토사의 유입으로 무기물의 함유비가 크고 겨울철에는 반대로 무기물의 함유비가 작은 경향이 있다. 채취 당시 슬러지의 현장 함수비는 483.61%의 높은 함수비를 가지고 있었다.

### 2.2 플라이애쉬

플라이애쉬(플라이 애쉬)는 Class F 와 Class C로 나뉘어지는게 가장 보편적이며, Class F 플라이애쉬는 무연탄이나 유연탄으로부터 발생한 것으로서 칼슘의 함유량이 많지 않으나, 아유연탄 또는 갈탄으로부터 발생한 Class C 플라이애쉬는 많은 양의 칼슘을 포함한다. 플라이애쉬의 종류를 나누는 것은 이러한 성분의 차이에서 오는 시멘트적인 특성과 포졸란적인 특성의 차이를 반영하기 위함으로 일반적으로 Class C 플라이애쉬는 포졸란적인 특성과 시멘트적인 특

성을 함께 지니고 있으나 Class F 플라이애쉬는 시멘트적인 특성을 거의 가지지 않고 포졸란 특성을 지닌 것으로 역청탄을 연소시킬 때 생성된다.

본 실험에 사용한 플라이애쉬는 강원도 명주군 강동면 안인리에 위치한 영동 화력 발전소에서 채취하였다. 당시 시료의 함수비 상태는 회처리장에 운반되기 전 단계로 집진기에서 직접 채취한 상태의 시료로 노건조 상태이다.

### 2.3 화강 풍화토

국내 전 국토의 60% 이상을 차지하고 있는 화강암 및 화강편마암의 풍화토인 화강풍화토는 손쉽게 구할 수 있는 토공 건설재료이다. 이와 같은 화강 풍화토는 일반적으로 장석을 많이 함유한 화강토일수록 비중은 크며, 그 풍화도에 따라 화강토의 토질 특성들은 매우 다양하다.

본 실험에 사용될 화강 풍화토는 강원대학교 내 야산(지표에서 깊이 2m)에서 채취한 시료로 실험실로 가져와 24 시간동안 노건조시킨 뒤 상온에서 24 시간이상 방치 후 본 실험에 사용하였다.

### 2.4 벤토나이트

일반적으로 벤토나이트는 비중이 작고 입경이 작아서 비표면적이 크에 따라 소성적인 성질과 점성적인 성질이 강하며, 친수성이 강하여 토질공학상 특히, 차수효과를 증가시킬 수 있는 지반개량 재료로 많이 사용되고 있는 것으로 알려졌다. 본 실험에 사용한 Montmorillonite계의 점토광물인 벤토나이트는 동양 Bentonite사 제품으로 Ca계 벤토나이트를 사용하였다.

### 2.5 시멘트

본 실험에 사용한 시멘트는 공장제품의 보통 포트랜드시멘트이다. 시멘트는 하수 슬러지에 잔존할 수 있는 중금속 고정화 효과를 얻을 수 있는 것으로 알려졌다. 따라서, 슬러지를 토공 재료로 사용시 지반공학적으로 취약한 투수성,

압축성, 전단강도와 관련하여 그의 물성증진을 위하여 시멘트를 혼합하였으며 경제성을 고려하여 20% 이내의 중량비에서 첨가량을 결정하였다.

### 2.6 혼합비의 결정

하수 슬러지의 물성 및 선정된 혼합재의 첨가량에 따른 전반적인 물성변화는 다양할 것으로 예상되어 표 1에 나타난 바와 같이 혼합비에 따른 실험을 실시하였다.

표 1. Sludge Mixing Ratio

시료명	슬러지	화강풍화토/ 플라이애쉬	슬러지	벤토나이트/ 시멘트
혼합비 (%)	100	0	97	3
	80	20	95	5
	60	40	90	10
	40	60	85	15
	20	80	80	20
	0	100		

## 3. 실내시험 및 결과분석

### 3.1 기본물성시험

슬러지, 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트, 시멘트 및 각 혼합시료의 비중, 입도분포, 액·소성한계와 관련된 기본 물성 시험 결과를 표 2에 요약하였다. 비중 시험은 KS F2308 규정에 의거하여 시험을 실시하였으며, 혼합재에 대해서는 중량비에 따라 조합평균을 사용하여 구하였다. 중량천 하수슬러지의 비중은 1.60 정도로 일반적인 토립자의 비중값에 비하여 낮은 비중값이 측정된 바, 이것은 강열감량 시험결과 측정된 유기물이 64.7% 범위로 함유된 것에 기인한 것으로 판단된다. 한편, 본 실험에 사용한 플라이애쉬의 비중은 2.45 정도로 화강 풍화토의 비중, 2.68보다 작은 값을 보였다. 벤토나이트, 시멘트의 비중은 각각 2.58, 3.14가 측정되었다. 슬러지와 화강 풍화토, 플라이애쉬, 벤토나이트

등의 혼합비가 증가할수록 슬러지 혼합물의 비중은 증가하였다.

그림 1은 슬러지, 시멘트, 벤토나이트, 플라이애쉬, 화강 풍화토에 대한 입도 분석 시험 결과를 나타내며 표 2에 보인 입도분포 관련 혼합시료의 토질정수( $D_{10}$ ,  $C_u$ ,  $C_c$ )는 각 혼합시료의 중량비에 따른 산술평균을 실시한 결과이다.

하수장 슬러지는 세립질인 No.200(0.074mm) 체 통과율이 12.02% 정도이며, 유효경( $D_{10}$ )은 0.068mm 실트입경의 세립질로 구성되어 있다. 플라이애쉬의 균등계수가 2.18, 곡률계수가 1.61로 입도가 균등하며, No.200(0.074mm)체 통과율이 98.1%를 나타내었다. 그러나, 플라이애쉬의 입경은 사용하는 석탄의 종류나 연소조건, 석탄분쇄기의 분쇄정도 등에 따라 다양하게 나타나는 것으로 알려졌다. 화강 풍화토는 실트나 점토크기의 토립자가 거의 함유되지 않은 흙으로써 통일분류법으로 SP의 빈입도였다. 벤토나이트는 주로 실트나 점토크기의 입도분포로 공장제품인 관계로 균등계수가 47.0으로 매우 균등한 것으로 나타났고, 유효경( $D_{10}$ )도 0.002mm로 하수 슬러지의 유효경에 비해 작은 세립질을 많이 함유하고 있어 벤토나이트를 슬러지에 혼합하게 되면 투수계수를 크게 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

표 2에 나타난 바와 같이 하수 슬러지에 화강 풍화토 혼합비를 증가시키에 따라 균등계수는 증가하고, 곡률계수는 증가하였다가 감소하는 경향을 보여준다. 그러나, S20:G80(슬러지:화강토=20:80)에서는 1.64로 증가하였는데 이는 혼합재가 모래질 크기의 화강 풍화토와 실트입경의 하수 슬러지로 입도분포가 이루어졌기 때문으로 판단된다.

하수 슬러지에 플라이애쉬 첨가율 증가에 따라 균등계수는 계속 감소하여 S20:F80(슬러지:플라이애쉬=20:80)에서는 2.38까지 감소하였다. 이 혼합비에서 곡률계수는 1.33으로 S80:F20(슬러지:플라이애쉬=80:20)의 1.10과 비교하여 거의 변화를 보이지 않아 플라이애쉬 첨가 슬러지의 경우 입도분포가 양호함을 알 수 있다.

벤토나이트 첨가 슬러지에서 매우 작은 입경의 벤토나이트 첨가비 증가에 따라 균등계수는 크게 증가되어 S80:B20(슬러지:벤토나이트=80:20)에서는 16.83을 나타내었고, 곡률계수는 1.49로 벤토나이트 첨가량 증가에 따라 곡률계수의 변화가 일관성이 없음을 알 수 있다.

따라서, 입도분석 시험에서 슬러지에 모래질 입경의 화강 풍화토나 점토 입경의 벤토나이트 첨가량을 증가시킬 경우 균등계수는 증가하지만 곡률계수 변화에는 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

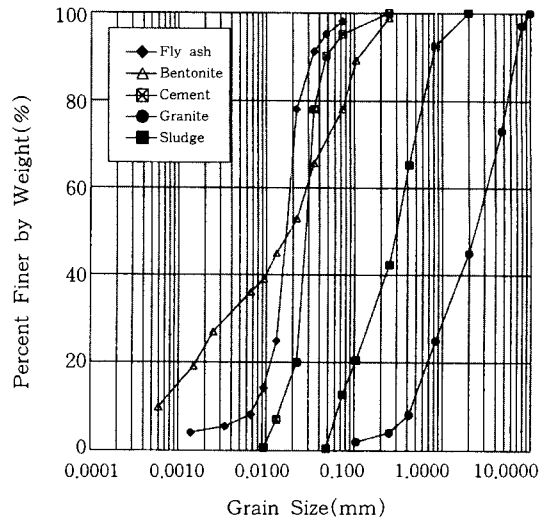


그림 1. Grain Size Distribution

표 2. The Geotechnical Properties of Mixtures

시료명	혼합비	비중	통일분류법	No.200 통과량(%)	LL(%)	Pl(%)	D <sub>10</sub> (mm)	C <sub>u</sub>	C <sub>c</sub>
슬러지 : 화강 풍화토	100 : 0	1.60	Pt	12.02	91.52	NP	0.068	5.56	1.06
	80 : 20	1.81	SM	10.24	62.48	NP	0.075	6.6	1.30
	60 : 40	2.03	SM-SP	8.46	56.93	NP	0.087	7.81	2.57
	40 : 60	2.24	SM-SP	6.68	50.89	NP	0.108	12.5	2.15
	20 : 80	2.46	SP	4.9	36.56	NP	0.201	12.19	1.64
	0 : 100	2.67	SP	3.12	NP	NP	0.476	7.14	0.69
슬러지 : 플라이 애쉬	80 : 20	1.77	SM	29.24	66.65	NP	0.017	17.65	1.10
	60 : 40	1.94	SM	46.45	43.67	NP	0.014	12.5	0.19
	40 : 60	2.11	ML	63.67	35.50	NP	0.011	5.36	0.44
	20 : 80	2.28	ML	80.88	21.66	NP	0.009	2.38	1.33
	0 : 100	2.45	ML	98.1	NP	NP	0.008	2.19	1.61
슬러지 : 벤토 나이트	97 : 3	1.63	Pt	14.12	84.85	NP	0.064	5.86	1.04
	95 : 5	1.65	SM	15.52	88.12	NP	0.062	6	0.97
	90 : 10	1.70	SM	19.03	78.99	NP	0.055	6.38	0.94
	85 : 15	1.74	SM	22.53	81.86	NP	0.035	9.17	0.98
	80 : 20	1.80	SM	26.04	72.56	NP	0.018	16.8	1.49
	0 : 100	2.58	MH	82.1	114.46	88.7	0.0006	47	0.68
슬러지 : 시멘트	97 : 3	1.65	-	14.16	-	-	0.064	5.84	1.07
	95 : 5	1.68	-	15.58	-	-	0.062	5.81	1.03
	90 : 10	1.75	-	19.15	-	-	0.050	7	0.82
	85 : 15	1.83	-	22.71	-	-	0.030	10.67	0.92
	80 : 20	1.91	-	26.28	-	-	0.028	10.71	0.72
	0 : 100	3.14	-	83.3	-	-	0.016	1.88	1.2

그림 2에 나타난 바와 같이 슬러지 함유율에 따른 액성한계의 변화는 화강토 혼합시에는 슬러지혼합비 80%, 플라이애쉬 혼합시 60%에서 급격히 증가함을 알 수 있다. 따라서, 혼합재의 액성한계 변화는 슬러지 혼합비 60~80%의 범위에서 급격한 변화가 있음을 알 수 있다. 한편, 벤토나이트와 슬러지 혼합물에서 슬러지 함유율 증가에 따라 액성한계는 증가하는 경향을 보인다.

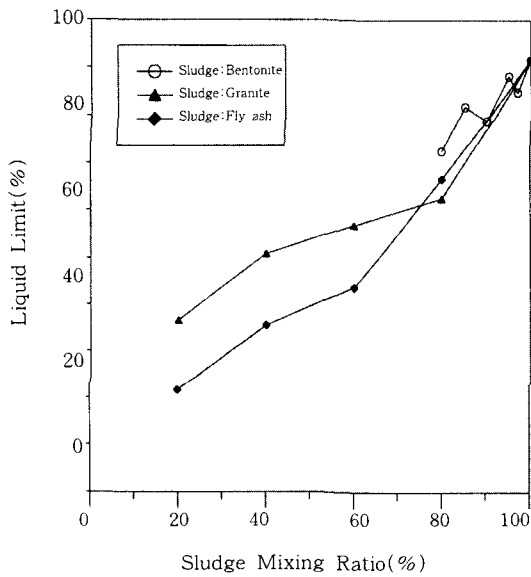


그림 2. Changes of Liquid Limit with Sludge Contents

### 3.2 다짐시험

매립장에서 흙을 차수재 및 복토재로 활용할 경우 현장다짐을 실시하므로써 입자의 재성형과 조밀화했을 때 투수계수의 감소는 물론 다짐에 의한 구조적 안정으로 매립중 장비의 주행성 및 시공성 증진을 기할 수 있다. 본 시험의 목적은 각 혼합비에 따른 최대건조단위중량,  $\gamma_{dmax}$ 와 최적함수비, OMC 를 산정하여 현장시공 조건에서 경제적으로 최대건조단위중량,  $\gamma_{dmax}$ 를 얻기 위한 가장 적절한 함수비를 얻기 위함과 현장 다짐도의 결정을 위함이다.

실험은 KSF 2312규정에 준한 A 방법(3층-층

당 25회 다짐)과 D방법(5층-층당 55회 다짐)으로 실시하였다.

그림 3~6은 기본시료 및 혼합재 다짐 시험 결과 얻은 다짐곡선을 보여주고 있다.

화강토와 슬러지의 혼합비 변화에 따른 다짐곡선은 그림 3에 보인바와 같다. 조립질의 화강토의 경우는 다짐곡선의 기울기가 급한 형상을 보여주고 있으며 슬러지의 함유량이 증가할수록 곡선의 기울기가 완만해지면서 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보여주고 있다. 일반적으로 토사에서 세립질이 증가할수록 얻을 수 있는 유사한 다짐곡선의 경향, 즉 세립질이 많을수록 최적함수비는 증가하며 최대건조단위중량이 감소하고 곡선 기울기가 완만한 형상을 보여주고 있다. 화강토와 슬러지의 혼합물에서 A다짐방법과 D다짐방법에 의한 실험결과를 비교하면 동일한 혼합비에 대하여 D다짐방법시 A방법에 비하여 다짐 에너지가 크기 때문에 최대건조단위중량이 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 4의 슬러지와 벤토나이트의 혼합물에 대한 다짐시험 결과에서는 벤토나이트의 함유량이 증가할수록 다짐효과는 부분적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 벤토나이트 역시 세립질 점토로서 불량한 성토재료로 판단되나 유기물이 매우 많이 함유되어 있는 슬러지에 비하여 그의 다짐효과가 부분적으로 개선되고 있음을 알 수 있다.

그림 5에서 보인바와 같이 슬러지와 플라이애쉬의 혼합물에 대한 다짐시험 결과는 그림 3의 슬러지와 화강토의 실험결과에서 보인 것과 매우 유사한 경향을 보여주고 있음을 알 수 있다.

그림 6의 슬러지와 시멘트의 혼합물에 대한 다짐시험 결과도 시멘트 함유량이 증가할수록 부분적으로 다짐효과가 개선되고 있음을 알 수 있다.

그림 7은 A방법과 D방법에 의한 다짐시험 결과에서 슬러지의 혼합비율에 따른 최대건조단위중량의 변화를 보여주고 있다. 슬러지의 함

유율이 증가할수록 최대건조단위중량 값이 감소하는 경향을 보여주고 있으며 동일한 슬러지 함유율에 대하여 화강토가 타첨가재에 비하여 최대건조단위중량이 큰 경향을 나타내고 있으나, 슬러지 함유율이 40%이상인 경우에는 거의 유사한 감소율을 보여주고 있는 것으로 보아 슬러지의 함유율이 혼합물의 최대건조단위중량에 영향을 미치는 결정적인 인자임을 알 수 있다. 한편, D방법에 의한 실험결과는 A방법에 의한 것보다 단위체적당 다짐에너지량이 크므로 다짐효과가 증가하고 있음을 알 수 있으며 슬러지 함유율에 대한 최대건조단위중량의 변화율도 큼을 알 수 있다. 또한, 벤토나이트나 시멘트도 그의 함유율이 증가할수록 최대건조단위중량이 증가하는 경향으로 보아 다짐증진 효

과에 기여하고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 A방법과 D방법에 의한 다짐시험 결과 중 슬러지 함유율의 변화에 따른 최적함수비의 변화를 나타내고 있다. 화강토나 플라이애쉬를 사용할 때에는 그의 변화가 유사한 경향을 보여주고 있으나 벤토나이트나 시멘트를 사용할 때에는 그의 변화율이 화강토나 플라이애쉬를 사용할 때에 비하여 급격함을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 벤토나이트의 친수성과 시멘트의 흡습성과 관련한 발열반응으로 함수비 변화에 예민하게 반응하고 있음을 알 수 있다.

따라서, 차수목적의 현장다짐시 다짐에너지를 증가시키고 습윤측 다짐을 실시하여 투수계수를 저하시킬 것을 추천한다.

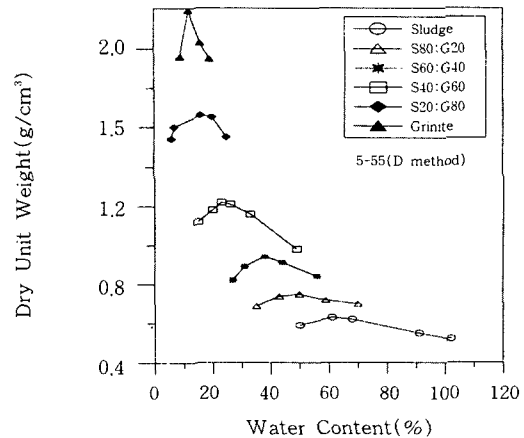
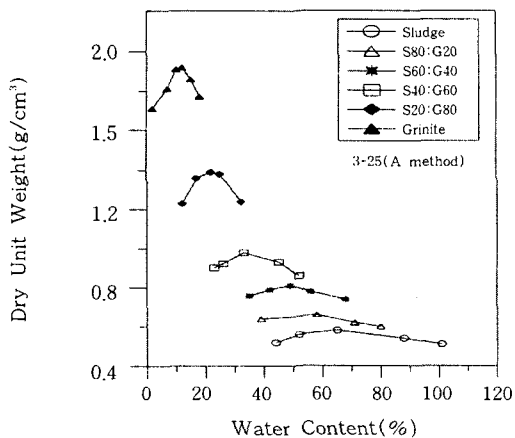


그림 3. Relationship between Dry Unit Weight and Moisture Content(Sludge and Granite)

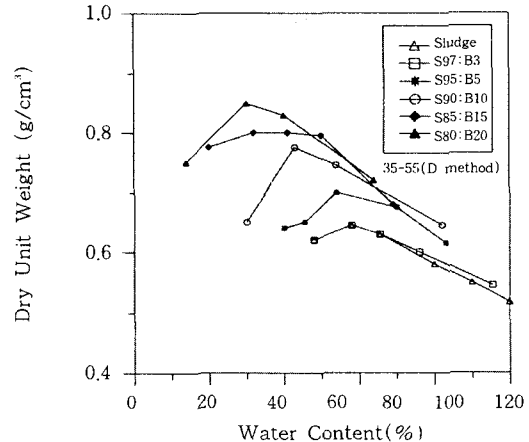
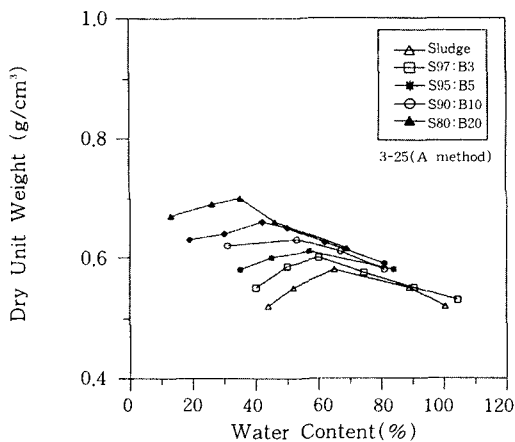


그림 4. Relationship between Dry Unit Weight and Moisture Content(Sludge and Bentonite)



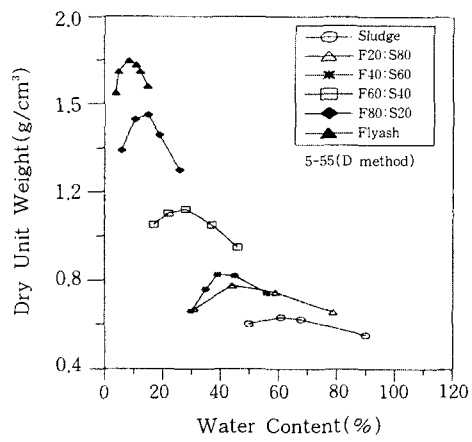
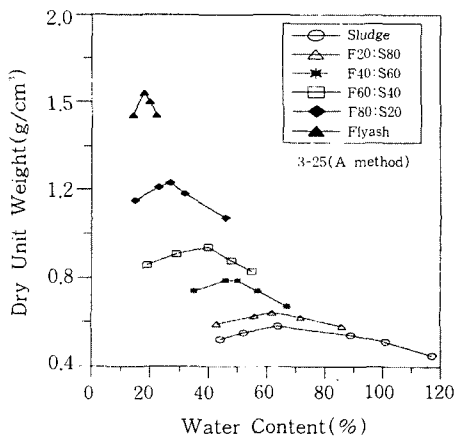


그림 5. Relationship between Dry Unit Weight and Moisture Content(Sludge and Flyash)

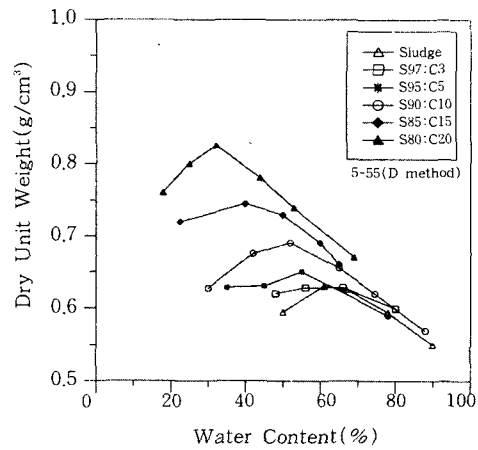
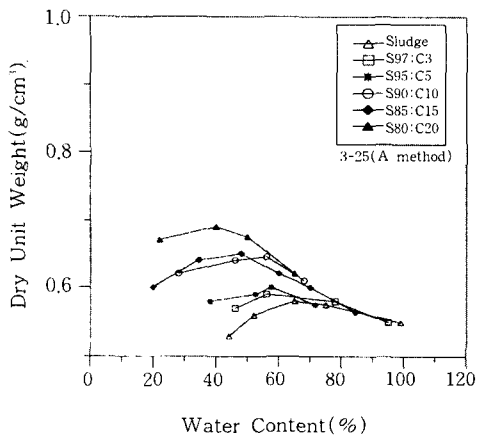


그림 6. Relationship between Dry Unit Weight and Moisture Content(Sludge and Cement)

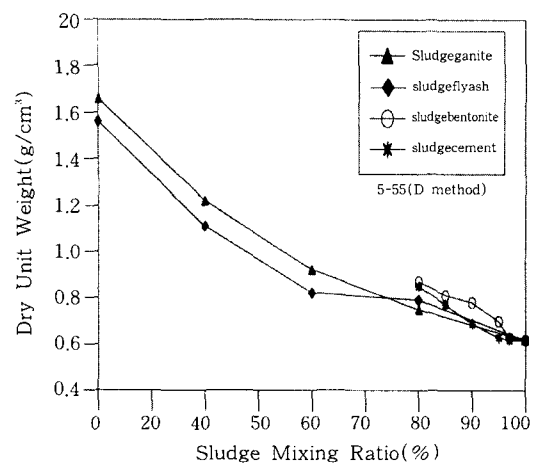
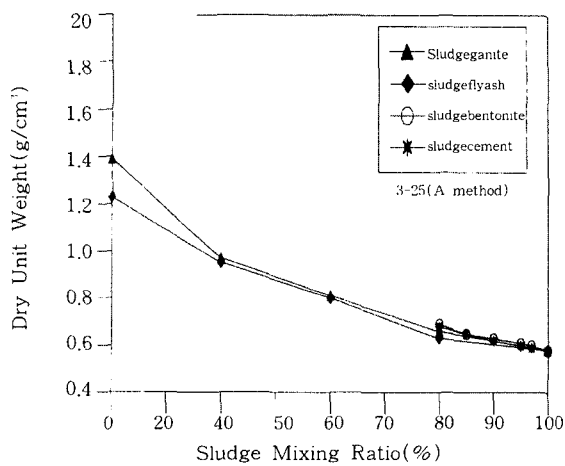


그림 7. Changes of Dry Unit Weight with Sludge Contents

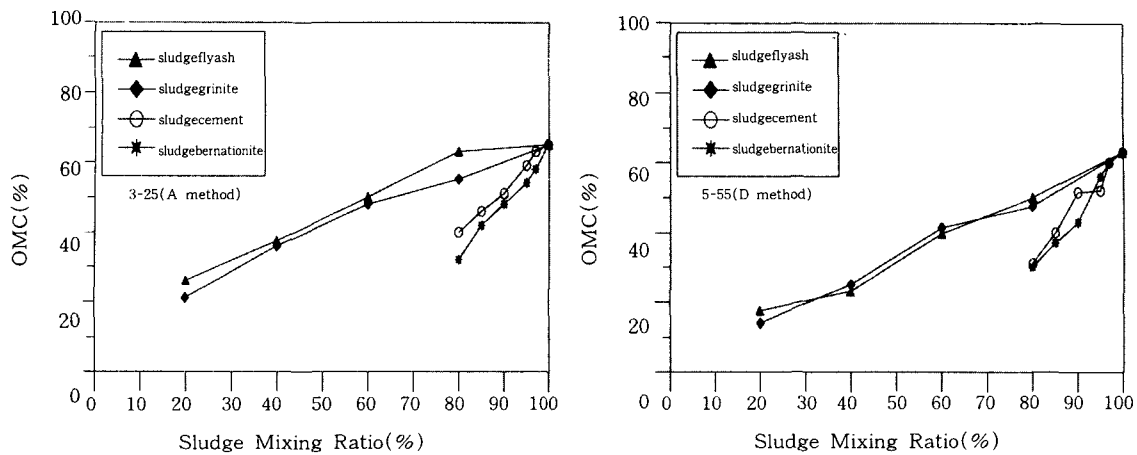


그림 8. Changes of Optimum Moisture Content with Sludge Contents

### 3.3 압밀시험

압밀시험은 KS F 2316 규정에 의거한 점증하중 재하에 의한 하중제어식 압밀실험을 실시하였다.

그림 9에 보이는 간극비-유효응력 관계곡선은 다짐효과가 슬러지의 압밀특성 중 압축지수 및 팽창지수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수행한 실험결과이다.

동일한 다짐으로  $\gamma_{dmax}$  다짐, 95% 습윤축 다짐 시료, 95% 건조축 다짐 시료를 사용하여 압밀 실험을 수행하여 그의 압축성 및 팽창성을 비교하였다. 그림에서 보인 바와 같이 하중재하 및 제하 상태의 곡선 기울기를 나타내고 있는 압축지수,  $C_c$ (0.869, 0.915, 0.948)와 팽창지수,  $C_s$ (0.254, 0.258, 0.228)가 다짐도 및 함수비 변화와 관계없이 유사한 범위 값에서 변화되고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 10과 11은 슬러지와 벤토나이트, 슬러지와 화강토, 슬러지와 플라이애쉬 혼합물에서 슬러지의 혼합비에 따라 압축지수와 팽창지수의 변화를 나타내고 있다. 본 결과에서는 슬러지 혼합비에 따라 압축지수와 팽창지수가 비교적 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이는 타점가재에 비하여 슬러지의 압축성이 가장 크므로 그의 혼합비 증가에 비례하여 압

축성 및 팽창성이 증가하고 있음을 알 수 있으며 팽창지수는 압축지수의 약 1/4범위에서 변화되고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 각 혼합물의 연직응력 변화에 대한 체적 변화율,  $m_v$ 의 변화를 나타내는 것으로 전반적으로 연직응력의 증가에 따라 체적 변화율이 감소하는 일반적 경향을 보여주고 있다. 슬러지와 화강토 혼합물, 슬러지와 플라이애쉬의 혼합물의 경우에는 동일한 연직응력에 대하여 슬러지 혼합비의 증가에 따라 체적 변화율이 증가하는 경향을 알 수 있으나 슬러지와 벤토나이트의 경우에는 그의 뚜렷한 경향을 파악할 수 없다. 한편, 슬러지 시료의 다짐효과가 체적 변화율에 미치는 영향에 대하여도 그의 미치는 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

그림 13은 각 혼합물의 연직응력에 대한 압밀계수,  $C_v$ 의 변화를 도시한 결과이다. 전반적으로 각 혼합물에 대하여 슬러지 혼합비가 압밀계수에 미치는 영향은 일관성이 없게 나타났다. 이는 각 혼합물에서 압밀계수,  $C_v$ 에 미치는 영향 요소중 체적 변화율,  $m_v$ 와 투수계수,  $k$ 가 복합적으로 작용되고 있기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 전반적으로 과압밀 상태, 즉, 다짐 효과에 의한 선행압밀 하중보다 작은 응력 상태에서는 다짐효과 또는 슬러지 혼합비에 관계

없이 대체적으로 일정한  $C_v$  값을 유지하나 그보다 큰 하중상태, 즉, 정규압밀 상태에서는 연직 유효응력의 증가에 따라  $C_v$  값이 감소하는 경향이 있음을 알 수 있다.

그림 14는 각 혼합물에 대하여 압밀계수,  $C_v$  를 산정한 후 다시 투수계수,  $k(=C_v m_v \gamma_w)$  를 산정하여 도시한 결과이며 그림 15는 각 혼합물에 대한 변수위 투수시험 결과이다.

서로 다른 방법으로 구한 두 결과에 대하여 슬러지, 슬러지와 벤토나이트 혼합물에 대하여는 임의의 간극비에 대하여 유사한 투수계수 값을 구할 수 있으나 슬러지와 플라이애쉬, 슬러지와 화강토의 혼합물에서는 실험에 의한 실측결과가 계산에 의한 추정치보다 크게 산정되고 있음을 알 수 있다.

그림 14의 슬러지에 대한 투수계수 산정 결과를 보면 간극비 감소에 따라 투수계수가 감소하는 일반적인 경향을 보이고 있음을 알 수 있으며 그림 15의 슬러지에 대한 실측결과와 비교할 때 자료의 분산 범위가 비교적 적으며 간극비 변화에 대한 투수계수 변화 경향을 비교적 잘 나타내고 있다. EPA의 차수재로서의 투수계수 기준을 10-7cm/sec 이하에 있음을 고려할 때 그에 대응하는 간극비가 0.5~1에 있음을 알 수 있고 그에 대응하는 유효연직응력은 3~12kg/cm<sup>2</sup>임을 알 수 있다.

슬러지와 화강토의 혼합물에 대한 투수계수 변화는 동일한 간극비에서 화강토의 함유율이 클수록 투수계수가 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히, 과압밀 상태에서 그의 경향이 크며 연직유효응력이 큰 정규압밀 상태에서는 슬러지 함유율에 대한 영향이 감소하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 과압밀 상태에서는 슬러지 입경이 화강토의 입경보다 미세하기 때문에 동일한 간극비에서 그 입경의 영향이 크게 작용하였을 것으로 판단되며 연직 유효응력이 증가할수록 간극비가 감소하며 투수계수의 결정 주인자가 타요소보다 간극비에 의하여 지배되고 있음을 알 수 있다. 따라서 연직유효응력이 증가할수록 혼합물의 함유율의 영향은

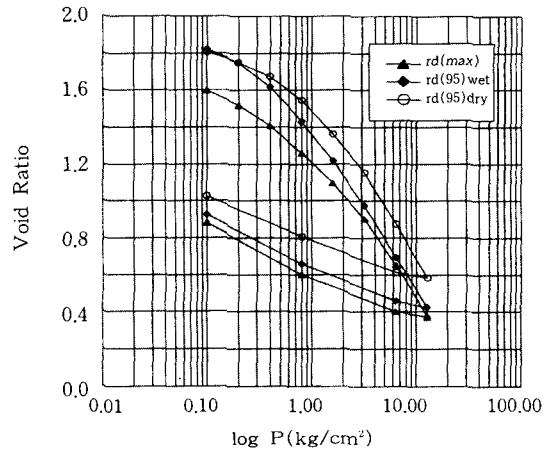


그림 9. Relationship between Void Ratio and Vertical Effective Stress

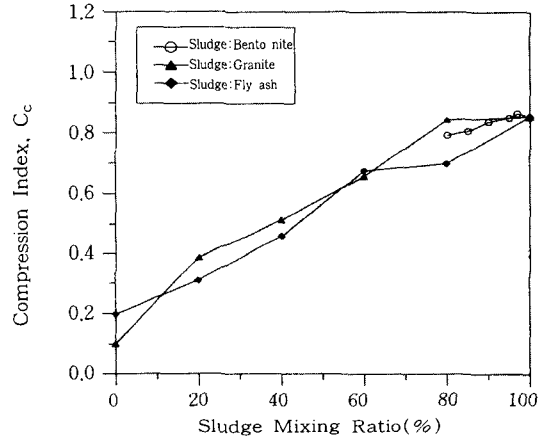


그림 10. Changes of Compression Index with Sludge Contents

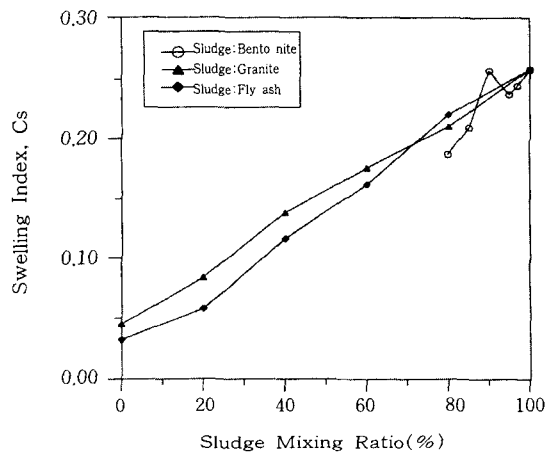


그림 11. Changes of Swelling Index with Sludge Contents

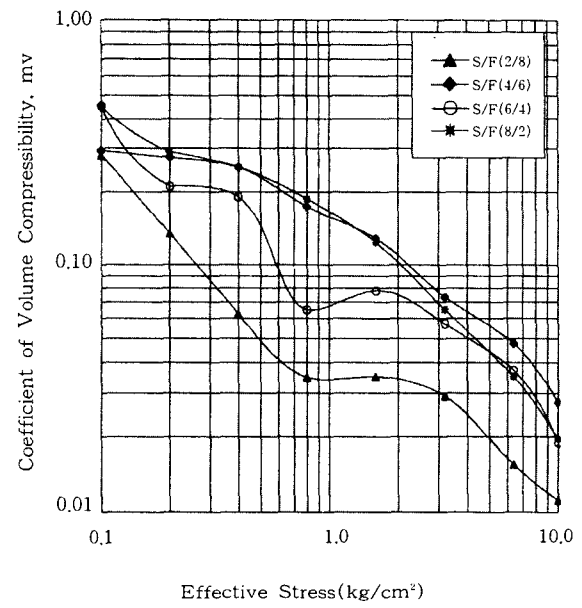
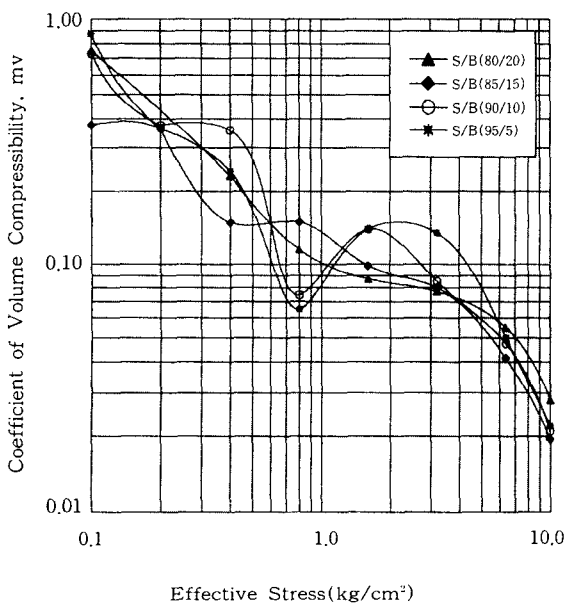
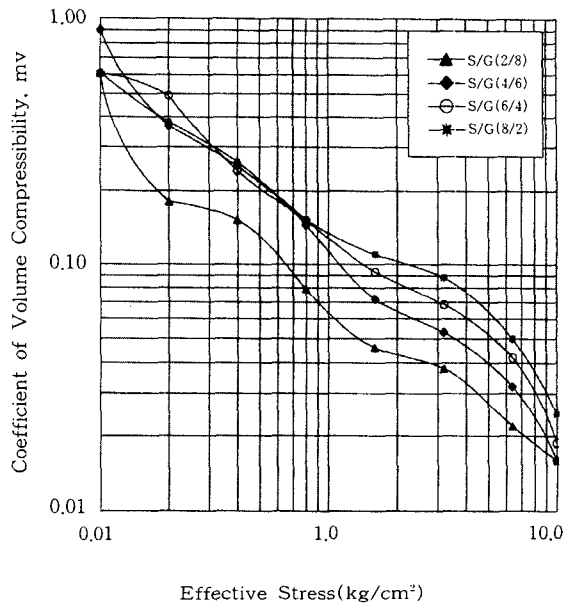
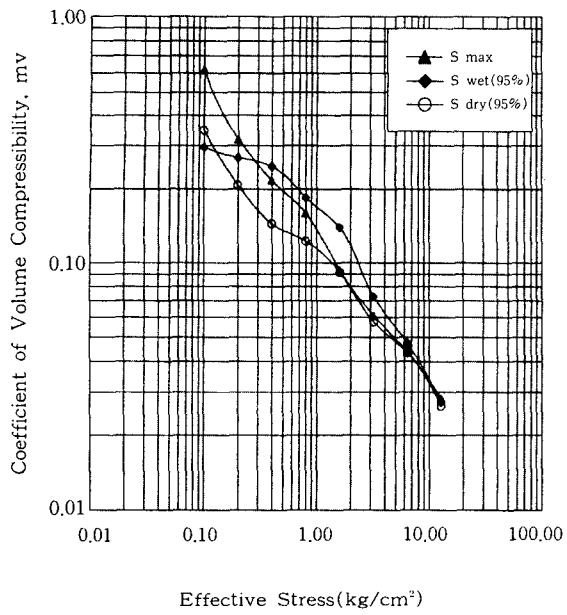


그림 12. Relationship between Effective Stress and Coefficient of Volume Compressibility

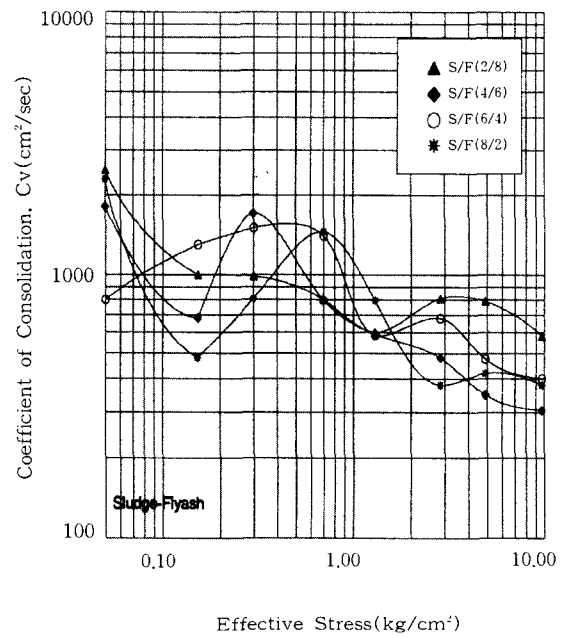
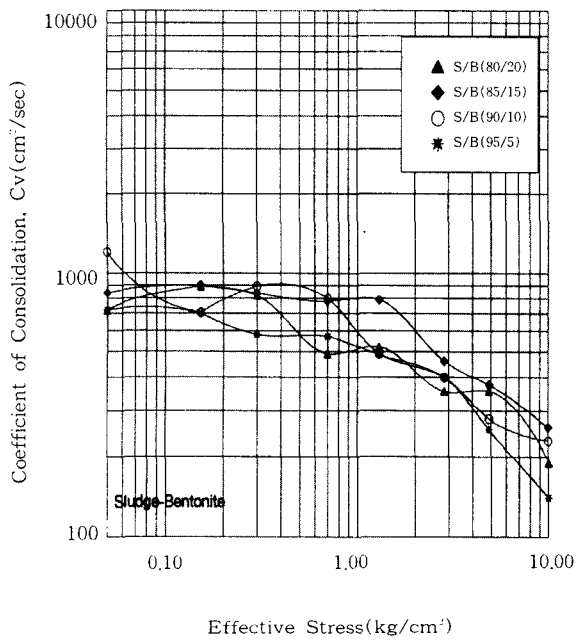
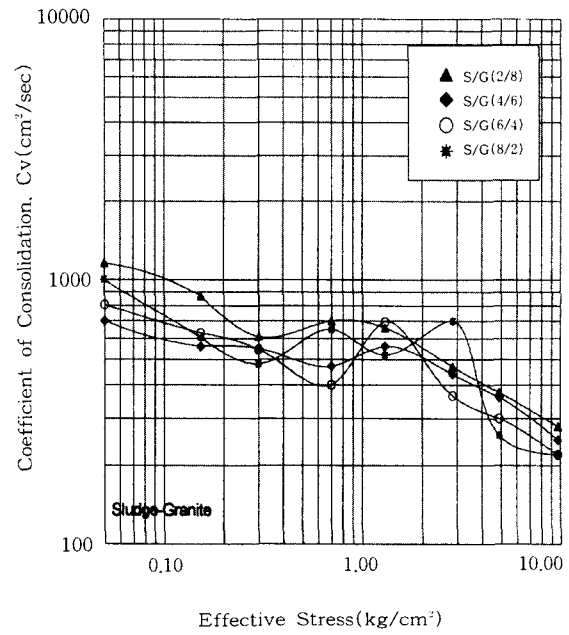
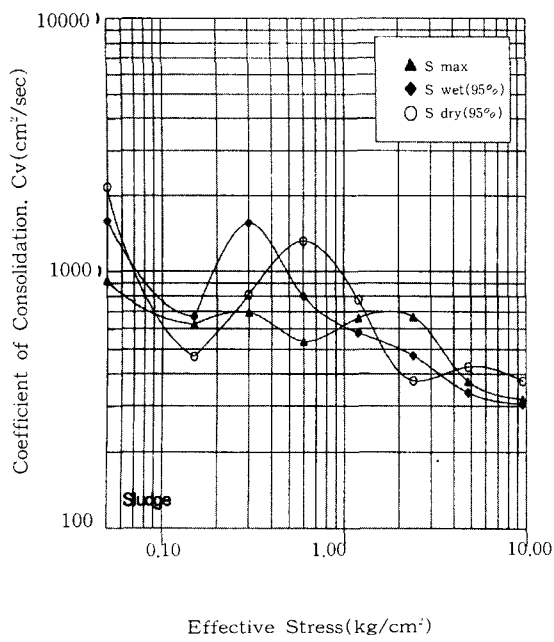


그림 13. Relationship between Effective Stress and Coefficient of Consolidation

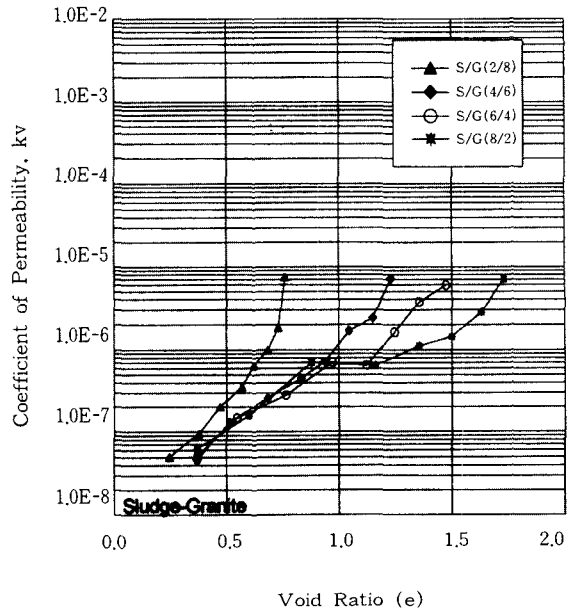
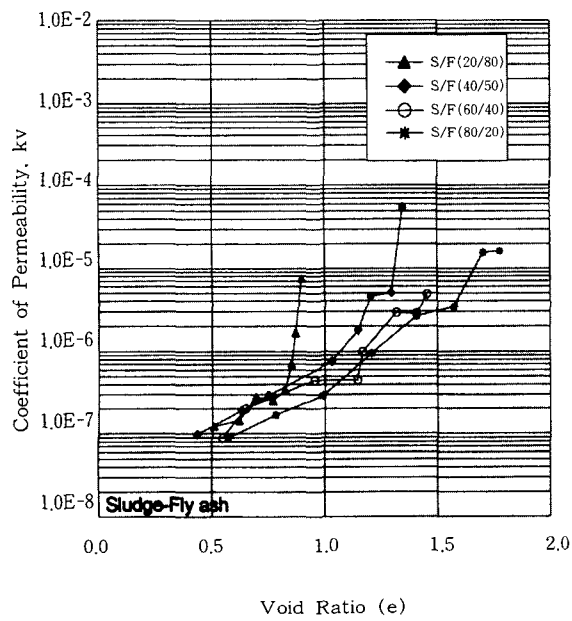
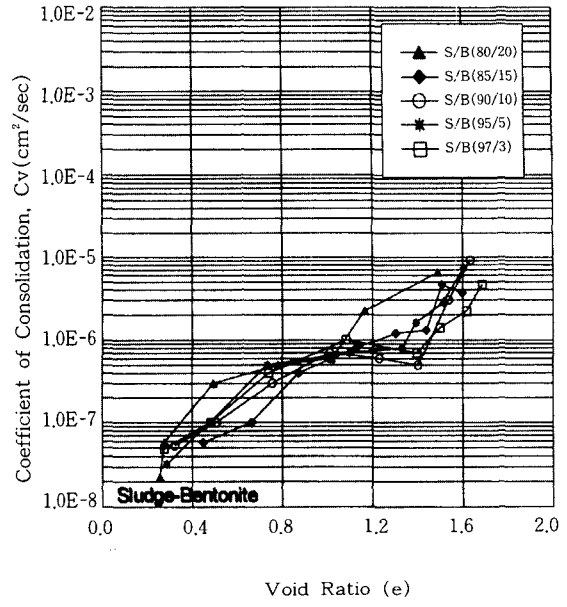
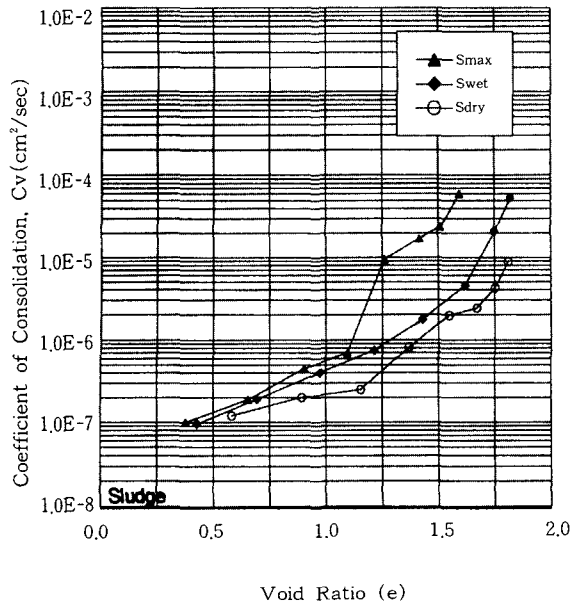


그림 14. Relationship between Void Ratio and Coefficient of Permeability(Permeability Coefficient from Consolidation Test)

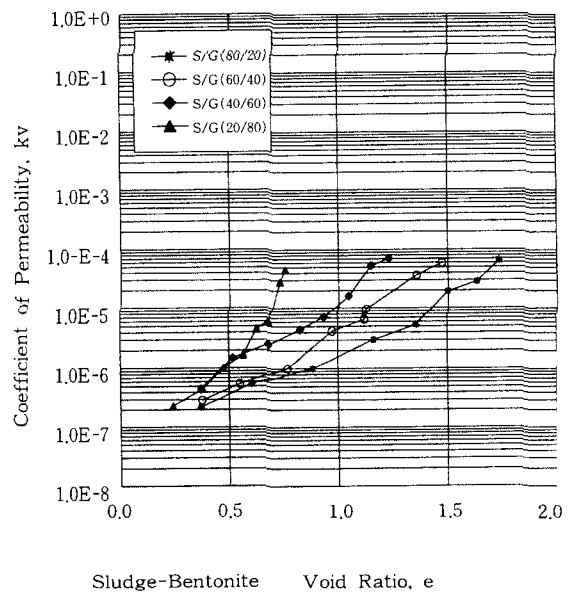
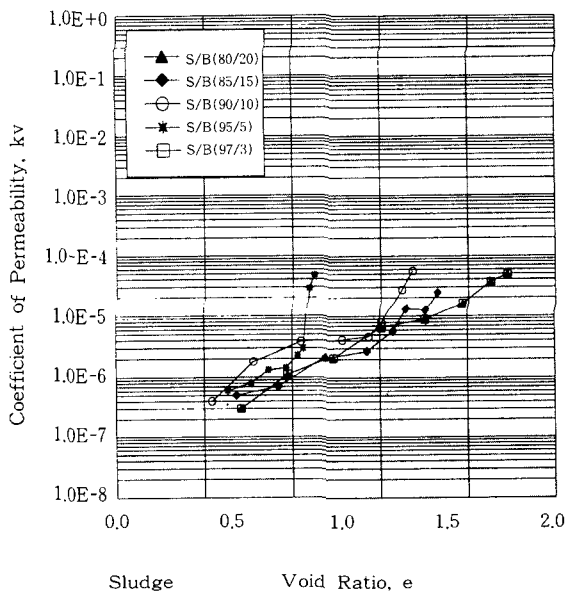
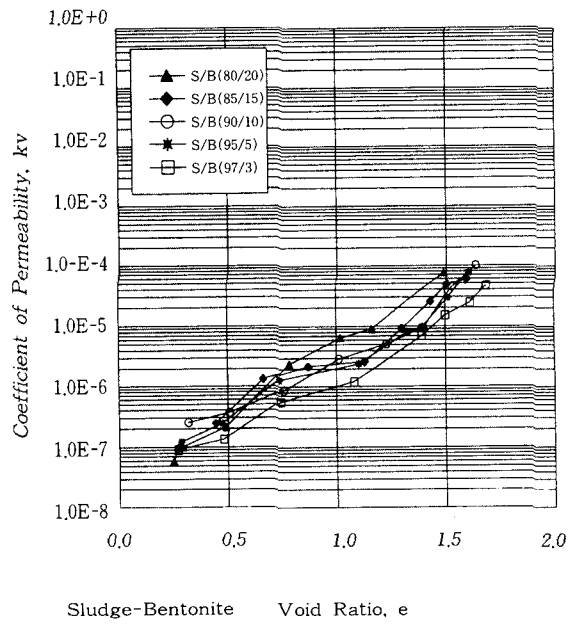
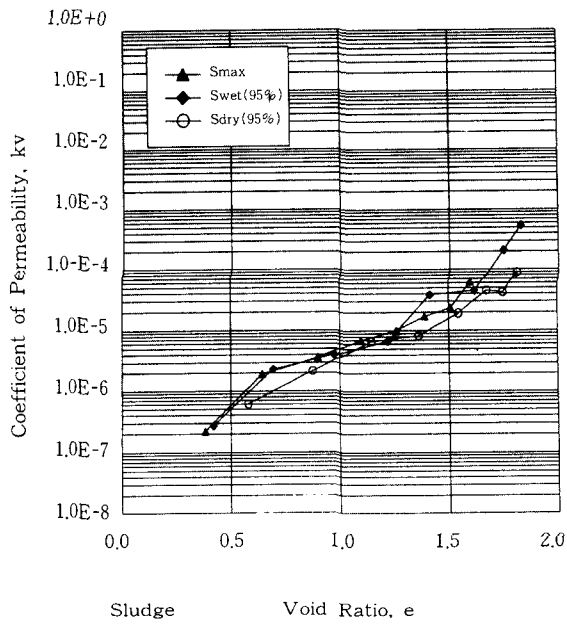


그림 15. Relationship between Void Ratio and Coefficient of Permeability(Permeability Coefficient from Variable Head Test)

감소되고 있음을 알 수 있다.

슬러지와 플라이애쉬의 혼합물에서는 슬러지와 화강토의 혼합물과 유사한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 동일한 간극비에서 두 혼합물의 투수계수는 유사한 범위에 있음을 알 수 있고 실험치와 추정치를 비교하여 볼 때 간극비가 1.0 이상인 경우는 비교적 유사한 범위 값을 가지고 있으나 간극가 0.5~0.8범위에서는 실험치가 추정치보다 항상 크게 측정된 결과를 보이고 있다. 이와 같은 결과는 실험시 간극비가 1.0 이상인 경우의 변수두 차이와 비교하여 간극비 0.5~0.8 에서는 상대적으로 매우 작은 양의 변수두 차이를 읽는 어려움에서 발생한 오차로 인하여 투수계수가 크게 측정된 것으로 판단된다. 슬러지와 벤토나이트의 혼합물에 대하여는 벤토나이트의 함유량 증가에 따른 투수계수의 감소 경향을 예상 하였으나 그의 뚜렷한 경향을 구할 수 없었다. 그러나, 슬러지의 투수계수와 비교하였을 때 동일한 간극비에서 투수계수가 감소하였음을 알 수 있다.

### 3.4 크리프시험

슬러지의 장기적인 침하 및 안정성과 관련하여 현장채취 슬러지를 사용하여 압밀링에 시료를 성형한 후 각각 다른 연직유효응력( $\sigma_v = 0.4 \text{ kg/cm}^2, 1.6 \text{ kg/cm}^2, 3.2 \text{ kg/cm}^2$ )을 장기적으로 유지시키면서 지속적인 침하량을 측정하는 크리프시험을 수행하였다. 또한, 크리프 효과에 의한 체적감소에 따라서 투수계수의 변화가 예상되므로 일정한 경과시간별로 변수위 투수시험을 병행 실시하였다.

그림 16은 슬러지에 각 연직하중을 가한 후 한달동안 지속적으로 측정된 침하량의 변화를 보여준다. 일반적으로 토사시료에 대하여 대수 시간축에 대하여 침하는 직선적으로 변화되는 경향에 반하여 시간이 장기적으로 증가하면서 침하-대수시간 곡선의 기울기가 점진적으로 급하게 변화됨을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 유기물질계의 비정질 혼합물의 점·소성적인 물성에 기인하는 것으로 판단된다. 특히, 하중

강도가 증가할수록 그의 경향이 뚜렷하게 나타남을 알 수 있다. 연직응력,  $\sigma_v = 3.2 \text{ kg/cm}^2$ 인 경우에는 약 100시간 정도 경과후에는 급격한 침하가 발생함을 알 수 있다. 이와 같은 것은 불균질한 슬러지의 시료성상에 의하여 점·소성적인 이차압밀진행동안 부분적으로 bridge역할을 하던 fabric에서 급격한 소성적인 변형이 발생하였을 것으로 추정된다. 이것은 급격한 변형 발생후 실험 종료시간까지 다시 시간 변화에 대하여 침하가 일정한 기울기를 유지하고 있음을 알 수 있다.

한편, 그림 17은 연직응력 변화에 대한 이차압밀계수,  $C_a (= \frac{\Delta H/H}{\Delta \log t})$ 를 나타낸 것으로 연직응력 증가에 따라  $C_a$ 값이 증가하고 있음을 보여주고 있으며 일반토사에 비하여 상당히 큰 값을 나타내고 있다.

그림 18은 크리프시험동안 변수위 투수시험을 수행한 결과를 간극비 변화에 대한 투수계수의 변화로 도시한 것이다. 주어진 연직응력하에서 크리프에 의한 간극비 감소로 인한 투수계수가 감소하는 경향을 보이고 있으며, 크리프에 의한 간극비 감소에 따른 투수계수 감소속도는 연직응력 크기에 대하여 크게 영향을 받지 않는 경향이 있음을 알 수 있다.

그러나, 투수계수가 일반적으로 간극비의 함수로 표현될 수 있으며 간극비의 감소가 연직유효응력의 증가 또는 크리프에 의한 체적감소 효과로 구별할 때 본 실험결과에서는 연직유효응력의 증가로 인한 간극비의 감소에 대한 투수계수의 저하속도보다 크리프에 의한 간극비 감소로 인한 투수계수 저하속도가 큼을 알 수 있다.

따라서, 크리프에 의한 체적 축소의 변화에 의한 투수계수 감소효과가 상재하중 증가에 의한 간극비 감소와 병행하여 슬러지의 차수효과에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

### 3.5 변수위 투수시험 결과

본 변수위 투수시험에서는 슬러지에 화강토, 벤토나이트, 플라이애쉬를 소정의 혼합비율로



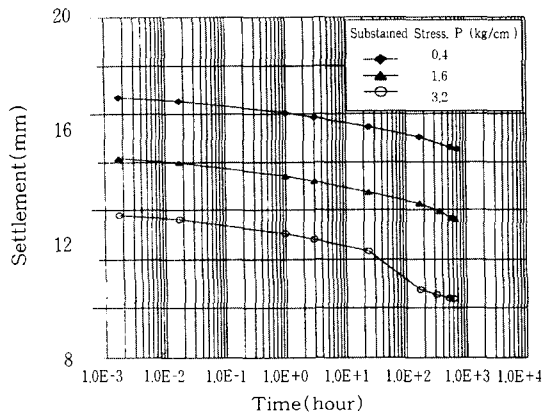


그림 16. Relationship between Settlement and Time

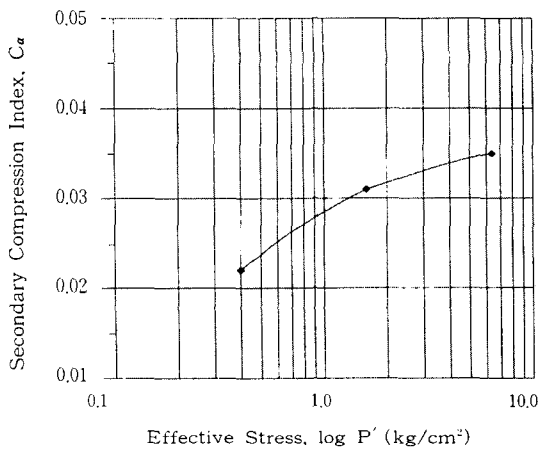


그림 17. Relationship between Secondary Compression Index and Effective Stress

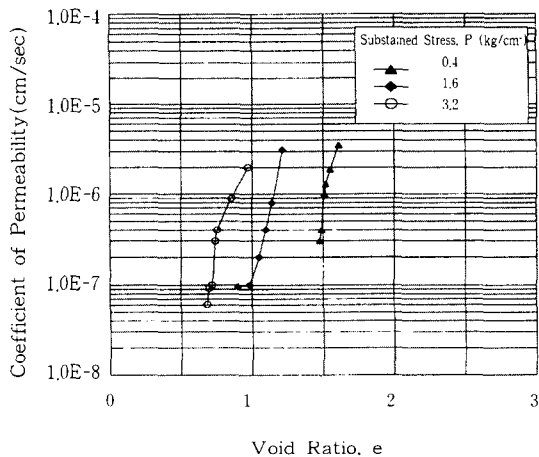


그림 18. Relationship between Coefficient of Permeability and Void Ratio

섞은 혼합시료에 대하여 95%  $\gamma_{dmax}$  습윤측으로 다짐을 실시한 시료에 대하여 실험을 수행하였다. 한편, 현장에서 슬러지를 차수재 및 복토재로 사용하는 경우에 슬러지에 함유되어 있는 유기물의 분해가 예상되며 그에 따른 유기물의 체적 감소 및 간극의 발생에 따른 투수계수의 변화가 예상되므로 슬러지를 95%  $\gamma_{dmax}$  습윤측 다짐으로 성형한 다짐시료를 한달간 보관한 후 투수시험을 수행하였다.

### 3.5.1 다짐시료

화강토, 벤토나이트, 플라이애쉬를 혼합한 그림 19는 슬러지 시료에 대하여 슬러지 혼합비율에 대한 95%  $\gamma_{dmax}$  습윤측 다짐시료의 변수위 투수시험 결과이다. 슬러지의 함유율이 감소할수록 투수계수가 감소하는 경향을 보여주고 있으며, 투수계수의 슬러지 함유량에 대한 감소율이 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트의 순으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 벤토나이트, 플라이애쉬, 화강토의 유효입경에 비례하고 있음을 알 수 있다. 즉, 세립질의 첨가재가 섞일수록 투수계수 감소율이 증가함을 알 수 있다. 따라서, 차수재로서의 기능을 최대화하기 위하여 세립질의 첨가재를 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있다. 그러나, 대부분의 혼합 다짐시료의 투수계수가 10-5cm/sec 이상의 크기를 가짐을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 그림 20의 혼합시료의 간극비에 대한 투수계수의 변화를 나타낸 결과로 설명할 수 있다.

그림에서 도시한 바와 같이 슬러지와 화강토의 혼합시료는 슬러지의 함유율이 증가할수록 다짐시료의 간극비가 증가함을 알 수 있고, 그에 대응하는 투수계수도 증가함을 알 수 있다. 이와 동일하게 플라이애쉬와 벤토나이트에 대하여도 슬러지의 함유율이 증가할수록 간극비가 증가하며 그에 대응하여 투수계수가 증가함을 알 수 있다. 이와 같은 실험결과는 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트순으로 조립질의 첨가재를 사용하였을때는 다짐효과가 극대화되어 다짐시료의 간극비가 감소하는 효과를 기대할 수 있으나, 입경이 큰 조립질 시료를 사용한 경우

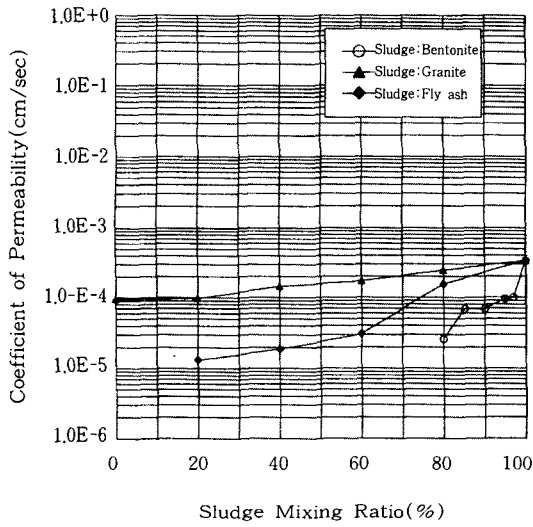


그림 19. Changes of Coefficient of Permeability with Sludge Contents

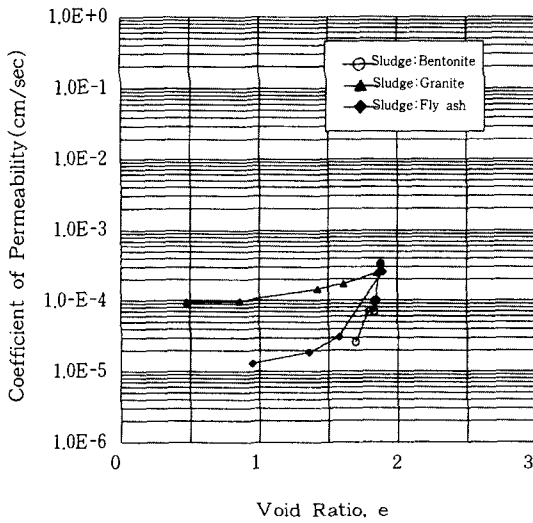


그림 20. Changes of Coefficient of Permeability with Void Ratio

에는 그에 대응하는 투수계수가 증가하는 결과를 얻을 수 있다.

따라서, 그림 19, 20의 도시결과로 보아 화강토 및 플라이애쉬처럼 비교적 조립질의 혼합재

를 사용한 경우에는 다짐효과를 극대화하여 다짐시의 초기간극비를 감소시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있으나, 실제적으로 간극비의 저하가 투수계수의 감소로 직접적으로 연계될 수 없는 결과를 얻을 수 있다. 한편, 세립질의 첨가재를 사용하는 경우에는 주어진 다짐에너지에 대하여 조립질의 첨가재를 사용한 경우처럼 간극비를 감소시킬 수 있는 다짐효과를 얻을 수 없으나 세립질의 첨가재 혼합에 의하여 투수계수를 감소시킬 수 있는 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

따라서, 차수재로서의 기능을 극대화하기 위하여 가능하면 세립질이 많이 함유되어 있는 첨가재를 사용함으로써 투수계수를 감소시킬 수 있으며, 향후 매립지에서 상부의 성토재하중 및 토피하중에 의한 연직응력의 증가로 인한 압축 및 압밀진행에 의한 간극비 감소의 효과를 고려할 때 세립질이 많이 함유되어 있는 혼합재를 사용하는 것이 그의 기능을 극대화할 수 있음을 예측할 수 있다.

### 3.5.2 부패시료

현장에서 슬러지를 차수재 및 복토재로 사용하는 경우 슬러지에 함유되어 있는 유기물의 분해에 의해 체적감소 및 간극의 발생으로 인하여 장기적으로 투수계수가 증가할 수 있는 가능성을 배제할 수 없다. 따라서, 슬러지를 현장상태의 다짐(95%  $\gamma_{dmax}$ 을 실시한 후 소정의 기간동안(한달간) 유기물이 분해되도록 보관한 후 투수시험을 실시하여 그의 변화를 측정하였다.

시료성형은 직경 10cm, 높이 12.7cm의 플라스틱 다짐 몰드를 4개를 제작하여 95% 습윤축으로 다짐시료를 성형제작한 후, 유기물의 분해를 가속화시키기 위하여 상온 상습을 유지할 수 있는 밀폐용기에 삽입하여 한달(30일)간 보관한 후 다짐시료를 꺼내어 변수두 투수시험을 수행하였다.

표 3은 투수시험 결과를 보여준다.

다짐 완료직후 투수시험을 실시한 시료는  $3.34 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 의 투수계수가 측정되었으며,

한달간 부패시킨 시료는  $2.53 \times 10^{-4} \sim 5.03 \times 10^{-4}$  cm/sec의 범위의 투수계수가 측정되었다. 본 실험결과로 한달간의 시간이 슬러지에 함유되

표 3. Measured Permeability of Decomposed Specimens

시 료	투수계수 ( $\times 10^{-4}$ cm/sec)
원 시 료	3.34
부패시료	2.93
	2.53
	5.03
	4.35

어 있는 시료의 분해 정도를 추정하기는 어려우나 다짐완료 직후의 시료에서 측정된 투수계수와 유사한 범위에서 측정되었음을 알 수 있다. 따라서, 주어진 분해기간 범위내에서는 유기물 분해에 따른 투수계수의 변화 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

제한적으로 수행된 본 실험결과로 보아 유기물의 분해에 따른 투수계수의 증가는 예상할 수 있으나, 현장조건에서 지속적인 매립재의 성토에 따른 상재압의 증가로 간극비가 감소되어 투수계수가 저하될 수 있는 상황을 고려할 때 유기물의 분해에 따른 투수계수의 증가 효과는 상쇄될 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 그러나, 현장에서 국부적인 유기물의 집중 분해등에 의하여 유로 형성시에 투수계수가 급격히 상승할 가능성은 배제할 수 없다.

### 3.6 CBR시험

슬러지를 매립지의 차수재 및 복토재로 활용할 경우 현장에서 다짐수행을 위한 다짐장비의 주행성을 판단하기 위하여 각 혼합재에 대하여 선별적으로 CBR실험을 수행하였다. CBR시험은 KSF 2320 기준에 의하여 수행하였으며, 실험내역은 화강토, 슬러지:화강토=60:40, 슬러지:플라이애쉬=60:40, 슬러지:시멘트=80:20, 슬

러지:벤토나이트=80:20의 각 시료에 대하여 수행하였다.

각 시료의 시험 결과는 표 4에 정리 하였다.

표 4에 나타난 바와같이 화강토의 95%  $\gamma_{dmax}$  다짐 시료에 대한 CBR 값은 12.77로써 주행성이 매우 양호한 편이나 그 이외의 시료는 CBR

표 4. Results of CBR Test

시 료	수정 CBR(%)
화강토	12.77
슬러지:화강토 = 60:40	2.46
슬러지:플라이애쉬 = 60:40	2.12
슬러지:시멘트 = 80:20	3.68
슬러지:벤토나이트 = 80:20	1.87

값이 1.87 ~ 3.68 사이의 범위로 비교적 불량한 편에 속하고 있다. 특히, 슬러지와 벤토나이트 혼합 시료는 기본적으로 연약한 물성을 지닌 재료로 구성되어 있기 때문에 CBR 값이 1.87로 매우 낮은 편이며 슬러지와 화강토 및 플라이애쉬 혼합 시료는 각각 2.46 및 2.12로 그의 CBR 값이 낮은 편에 속하여 장비의 주행에 어려움이 있음을 알 수 있다.

한편, 슬러지와 시멘트의 혼합 시료는 화강토 및 플라이애쉬의 혼합 시료보다는 CBR 값이 약간 증가한 실험 결과를 나타내고 있다. 이와 같은 현상은 시멘트의 고화에 따른 혼합재의 지반 반발계수 및 탄성계수의 증가에 기인한 것으로 판단된다.

따라서, 본 제한된 혼합 시료에 대한 CBR 실험 결과로는 장비 차량의 주행성이 양호하지 않은 결과를 보여주기 때문에 그의 주행성을 향상시키기 위하여 적정의 지반 개량공법이 병행수행 되어야 할 것으로 예상된다.

### 3.7 직접전단 시험

슬러지와 혼합물 및 첨가재의 전단특성 및 전단강도 정수를 구하기 위하여 직접전단시험을 실시하였다.

A 다짐방법에 의하여 최적다짐 상태에서 다

집한 시료를 추출기로 추출하여 직경 60mm, 높이 20mm의 원형의 직접전단기에 삽입 후 실험을 실시하였다. 전단변형속도는 2% / min로 하였고, 연직응력은 0.5, 1.0, 2.0 kg/cm<sup>2</sup>로 구속시켜 실험을 실시하였다. 실험은 슬러지에 대하여 화강토 및 플라이애쉬를 중량비로 0%, 20%, 60%, 80%, 100%의 20%씩 증가시킨 혼합시료에 대하여 시험을 수행하였으며 벤토나이트는 그의 중량비로 3%, 5%, 10%, 15%, 20%를 첨가하여 실시하였다.

그림 21은 슬러지, 화강토, 플라이애쉬의 직접전단시험시 전단응력-변위 관계를 나타낸 것으로 슬러지 전단시험시 전단응력-변위 관계는 전단응력이 단조 증가하는 변형률 경화형태로 나타나고 파괴시 변위가 비교적 큼을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 세립질이 많이 함유되어 있는 연약 지반이나 유기질토에서 유사하게 얻을 수 있는 것으로 슬러지가 세립질 토립자 및 다량의 유기물질을 함유하고 있기 때문으로 판단된다. 이에 비하여 플라이애쉬와 화강토의 실험결과에서는 비교적 뚜렷한 최대 강도(peak strength)점을 확인할 수 있는 변형률 연화현상이 나타나고 있음을 알 수 있다. 그림 21과 22에 보인 바와 같이 슬러지와 벤토나이트의 혼합물에 대한 전단응력-변위 곡선의 결과는 두 재료가 비교적 점·소성이 큰 세립질의 토립자로 구성되어 있어서 변형률 경화 현상을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 23의 슬러지와 플라이애쉬의 혼합물에서도 뚜렷한 최대강도를 구할수 없는 변형률 경화 현상을 보이며 슬러지와 벤토나이트의 혼합물에 비하여 최대강도에 도달하는 변위가 작음을 알 수 있다. 이는 플라이애쉬가 비교적 벤토나이트에 비하여 조립질로 구성되어 있어서 그의 강성도가 크기 때문으로 판단된다. 그림 24의 화강토와 슬러지의 혼합물에 대하여는 변형률 연화현상을 볼 수 있다. 그림 25는 슬러지와 화강토, 슬러지와 플라이애쉬, 슬러지와 벤토나이트 혼합물에 대하여 슬러지 혼합비에 따른 전단강도정수(점착력 c, 내부마찰각  $\phi$ )의 변화를 분석한 결과이다.

슬러지와 화강토의 혼합물에서는 내부마찰각은 슬러지 혼합비에 따라 감소 경향이 있으며 특히 슬러지 혼합비 40% 정도에서는 슬러지의 내부마찰각인 25°에 수렴하고 있음을 알 수 있다. 한편, 점착력은 슬러지 혼합비에 따라 거의 변화가 없이 일정한 값을 유지하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 실험 결과에서 전단 강도정수의 변화는 본 혼합물에 대하여는 점착력과 내부마찰각이 매우 예민하게 변화되고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 혼합물에서 화강토화토가 지닌 소정의 마찰저항력을 유지하기 위하여는 화강토의 혼합비율을 60% 이상으로 유지할 것이 추천된다.

슬러지와 플라이애쉬의 혼합물에서는 내부마찰각의 슬러지 혼합비가 증가함에 따라 30°에서 25°로 감소하고 있으며 점착력은 0.65kg/cm<sup>2</sup>에서 0.34kg/cm<sup>2</sup>로 뚜렷히 감소하는 경향을 나타내고 있다. 따라서, 본 혼합물의 경우 전단강도 증진에서 플라이애쉬의 혼합비에 따라 내부마찰각의 증가는 크게 기대할 수 없으나 점착력의 증가는 기대할 수 있음을 알 수 있다.

슬러지와 벤토나이트 혼합물에서는 슬러지 혼합비 증가에 따라 점착력의 감소 경향을 알 수 있으나 내부마찰각의 변화에 대하여 뚜렷한 경향을 발견할 수 없다. 이것은 슬러지와 벤토나이트의 두 재료가 기본적으로 점성적인 경향이 강하여 내부마찰각의 변화에 의한 마찰 저항에 관련된 전단강도 변화가 크지 않기 때문으로 판단된다.

### 3.8 일축압축강도시험

슬러지와 시멘트 혼합물의 재령기간 및 혼합비에 따른 일축압축강도를 측정하기 위하여 일축압축시험을 실시하였다. 시험은 직경 55mm, 높이 120mm의 절개형의 플라스틱 몰드를 사용하여 함수비 20%로 시료를 성형하고 소정의 재령기간이 지난 뒤 플라스틱 몰드를 제거한 후 시험을 수행하였다. 한편 시료의 재령기간동안 함수비의 변화를 방지하기 위하여 항온항습을 유지하여 실험을 수행하였다.

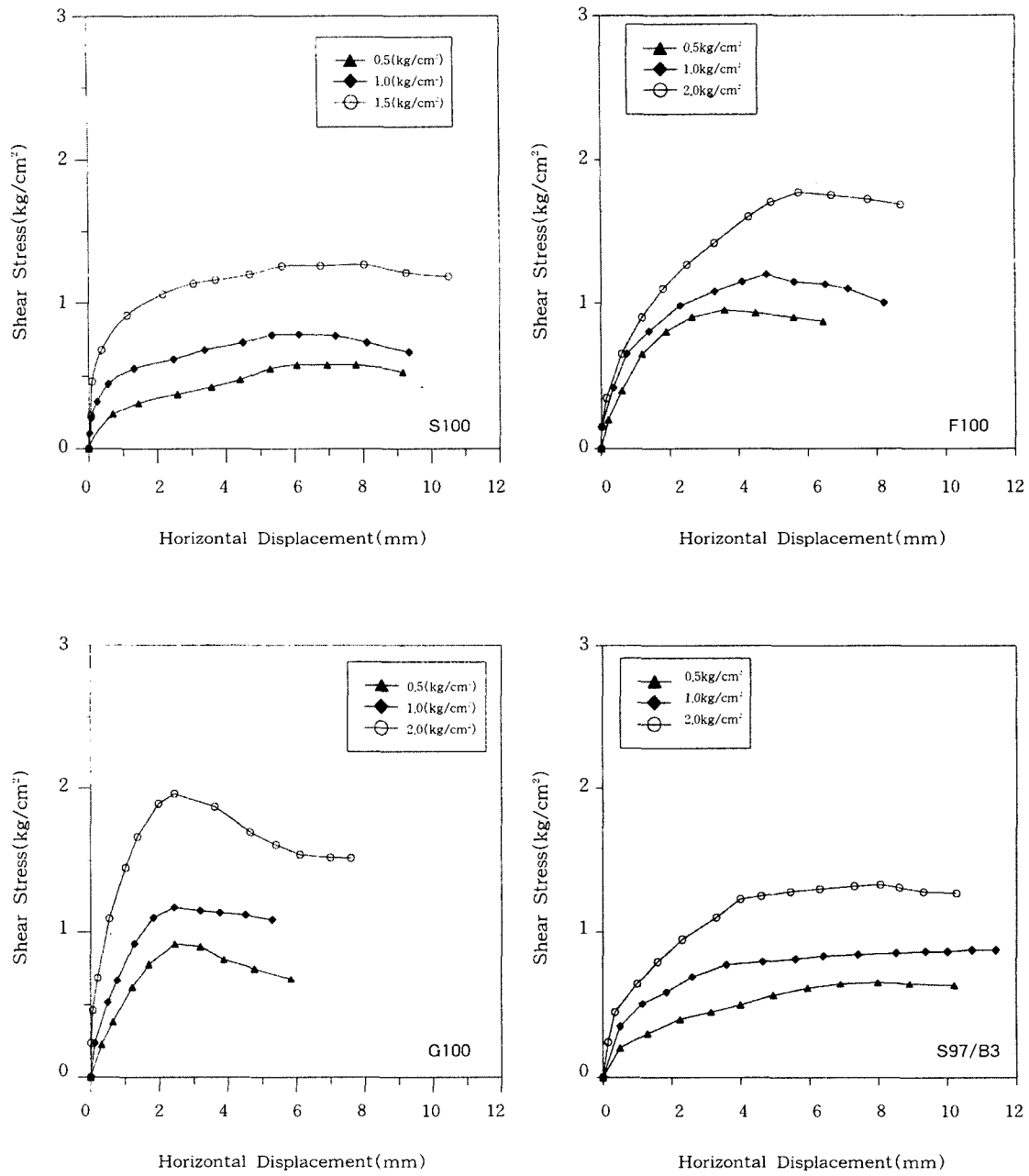


그림 21. Relationship between Shear Stress and Horizontal Displacement (Sludge and Bentonite, Flyash, Granite)

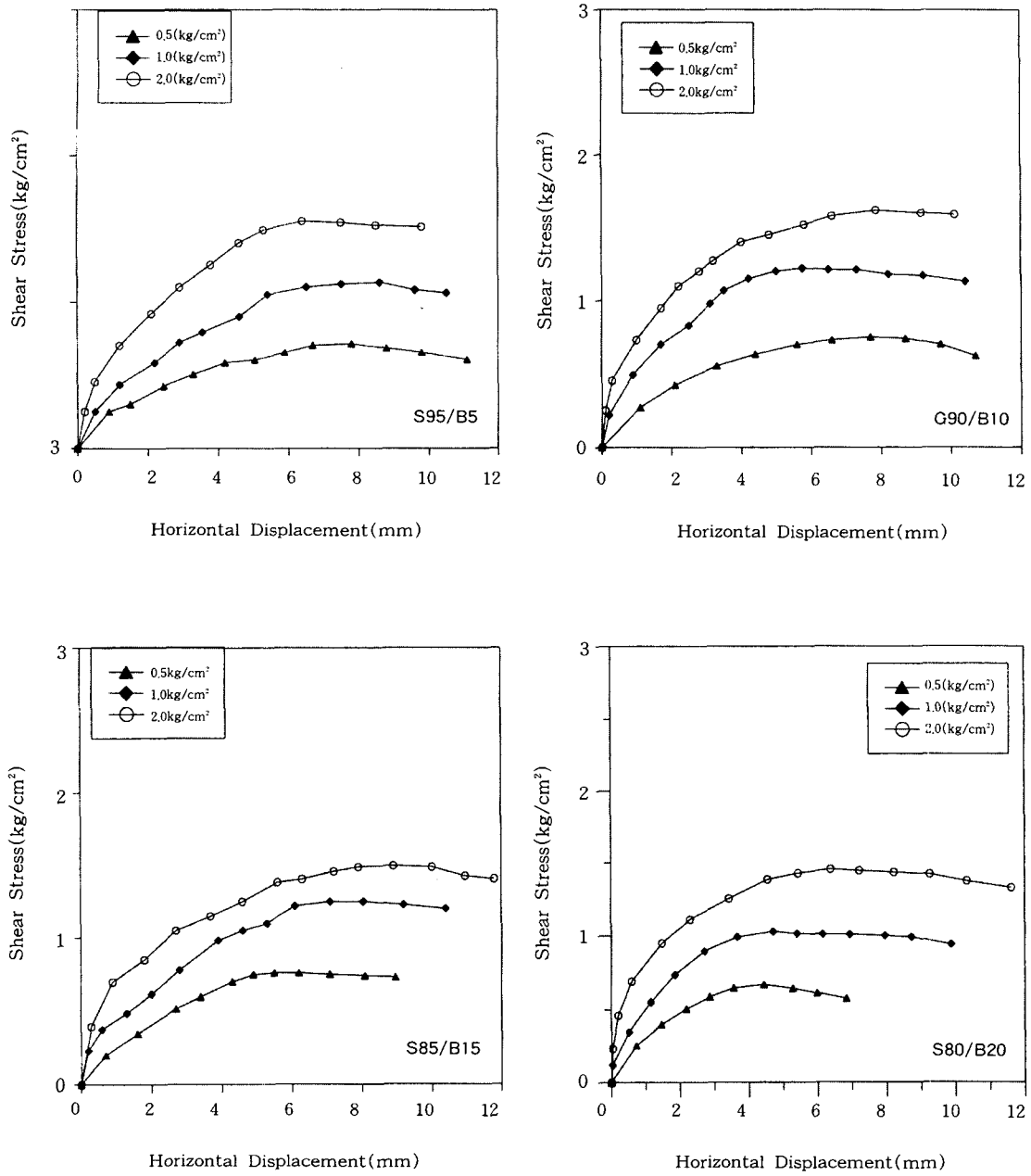


그림 22. Relationship between Shear Stress and Horizontal Displacement(Sludge and Bentonite)

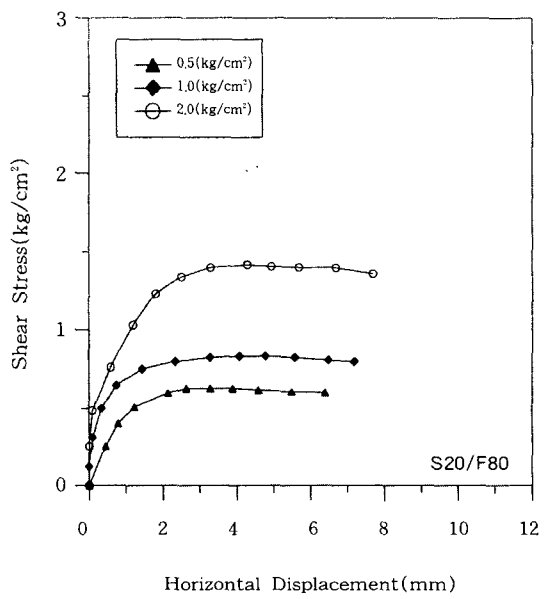
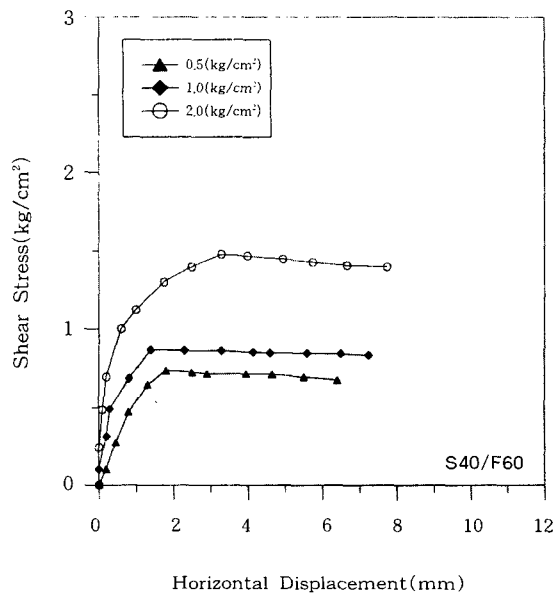
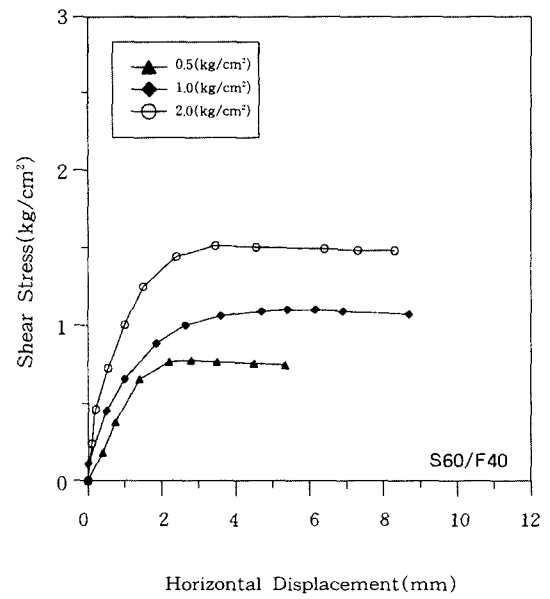
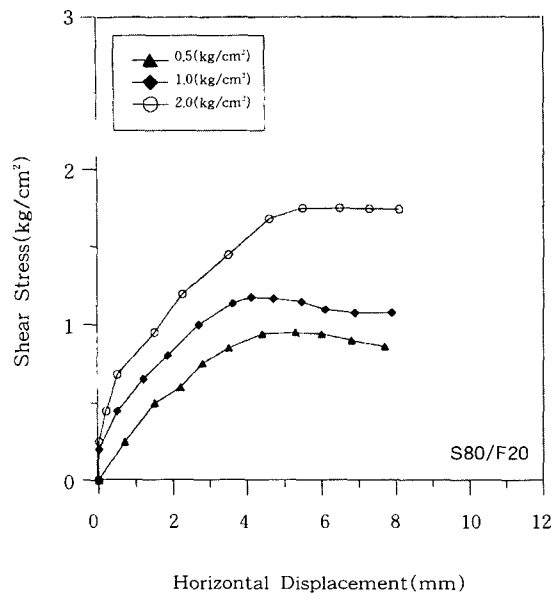


그림 23. Relationship between Shear Stress and Horizontal Displacement(Sludge and Flyash)

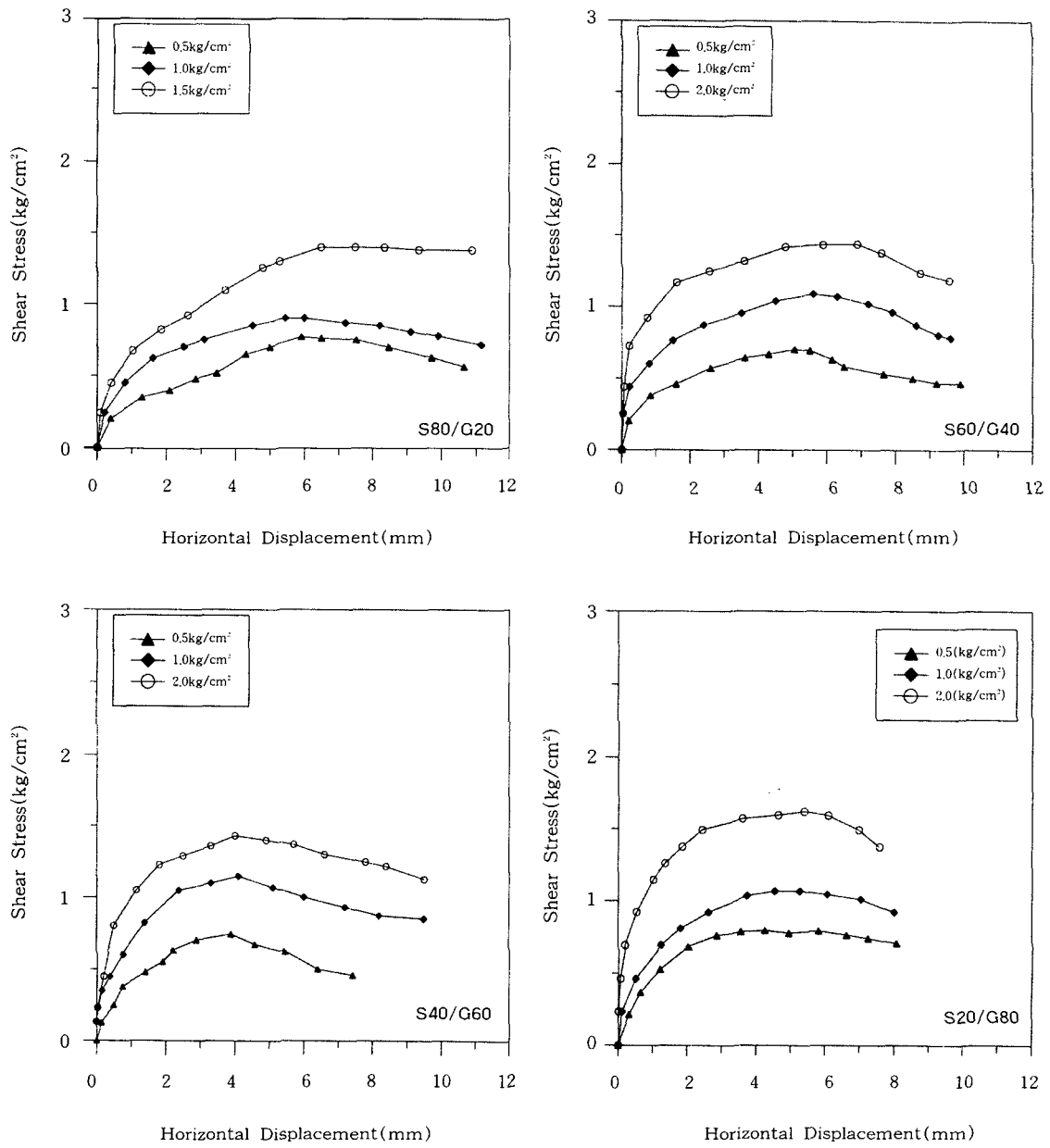


그림 24. Relationship between Shear Stress and Horizontal Displacement (Sludge and Granite)



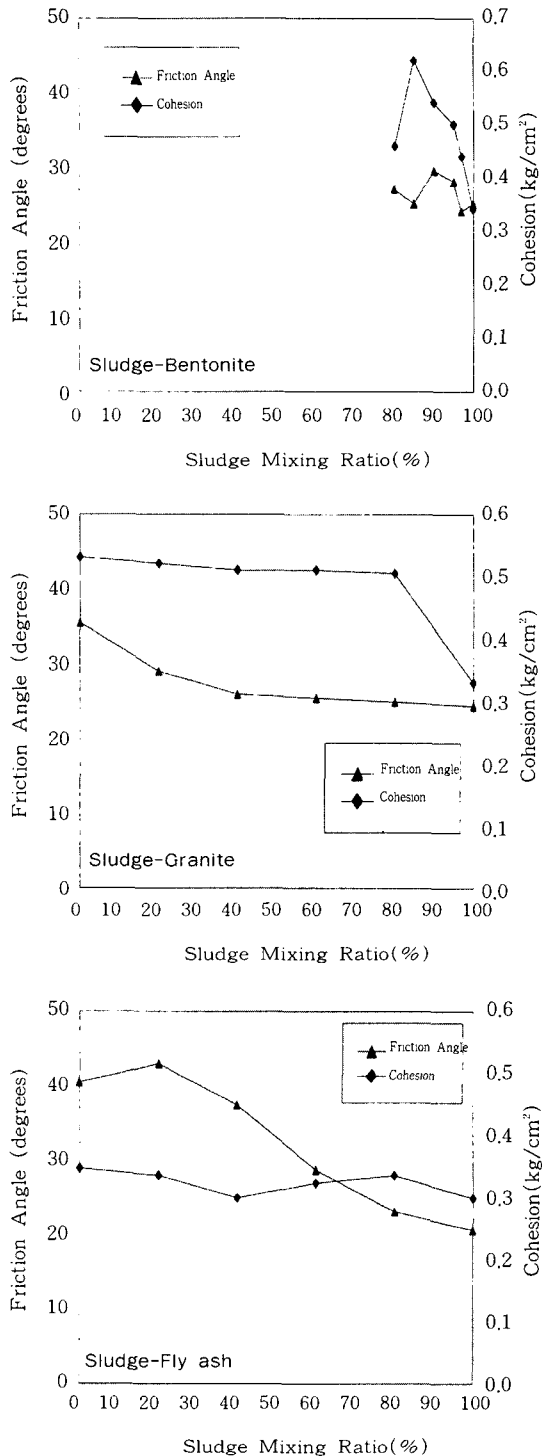


그림 25. Relationship between Sludge Mixing Ratio and Shear Strength Parameters

표 5는 일축압축실험내역을 보여준다.

그림 26의 응력-변형률 곡선에 나타난 바와 같이 시멘트의 혼합비가 적은 경우(S97 : C3) 또는 재령기간이 짧은 경우(1일)를 제외하고 대부분 최대강도(Peak Strength)에서 파괴가 발생하고 파괴이후 급격한 강도저하를 나타내는

표 5. Experimental Contents of Unconfined Compression Test

시멘트 혼합비(%)	3
	5
	10
	15
	20
재령기간(일)	1
	7
	14
	28

취성파괴(Brittle Failure)의 양상을 보여주고 있음을 알 수 있다. 한편, 일반 토사 및 슬러지의 강도시험과 다르게 파괴에 도달하기 위한 연직 변형율이 대부분 1%이내에 있음을 보아서 취성파괴의 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 시멘트 첨가에 의한 경화 효과에 따른 것으로 판단된다.

본 결과에서 동일한 재령기간에서 시멘트 혼합비가 증가할수록, 또는 동일한 시멘트 혼합비에서 재령기간이 증가할수록 일축압축강도가 증가함을 알 수 있고 응력-변형률 곡선의 기울기, 즉 탄성계수가 같은 경향으로 일관성 있게 증가하고 있음을 알 수 있다. 따라서, 본 실험 결과에서 슬러지에 시멘트를 혼합함으로써 일축압축강도 및 탄성계수가 예상하였던 것처럼 일관성있게 증가함을 알 수 있다.

시료의 파괴형태를 실험수행후 개괄적으로 관찰하여 본 결과, 시멘트의 함유량이 많은 경우(S80 : C20)에는 시료의 양단부에서 연직방향의 인장 균열이 발생하여 파괴되는 인장파괴 형태를 보여주고 있으며 그 이외의 시료는 대부분 시료의 사방향으로 전단면이 형성되어 파

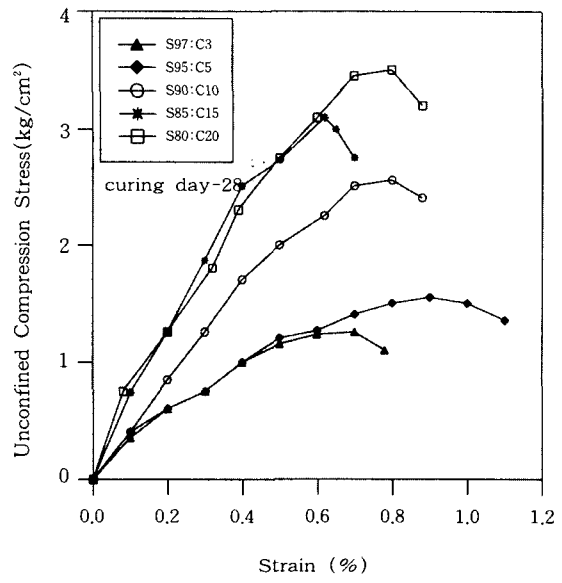
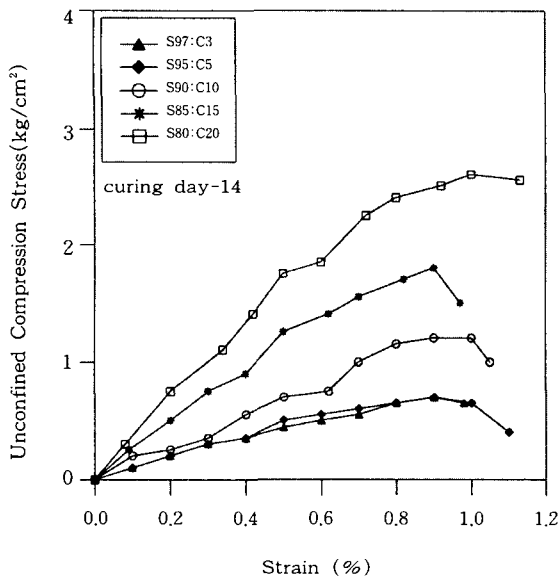
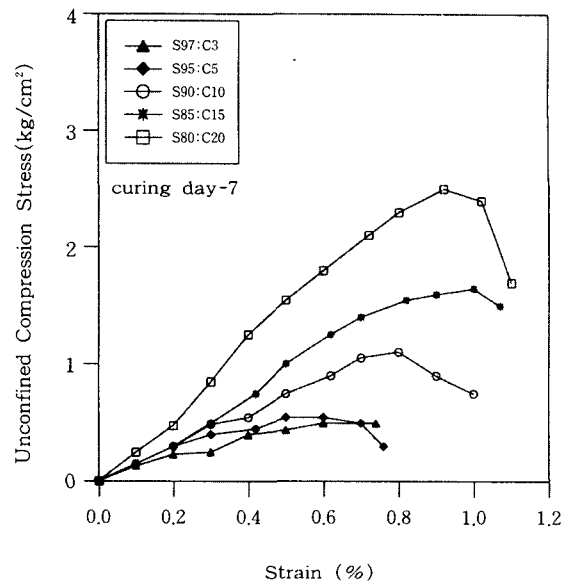
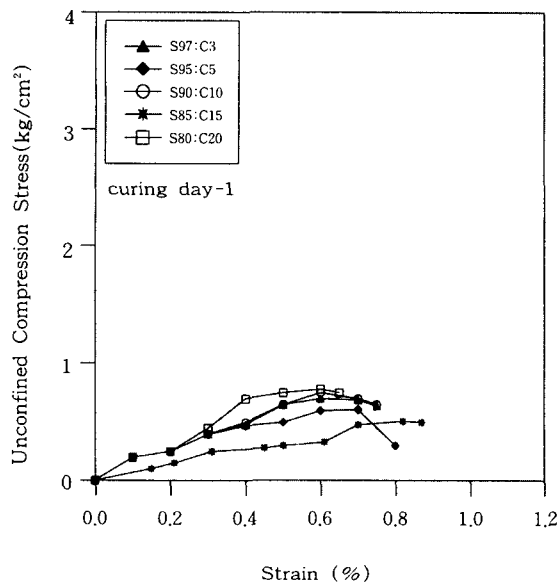


그림 26. Results of Unconfined Compression Test

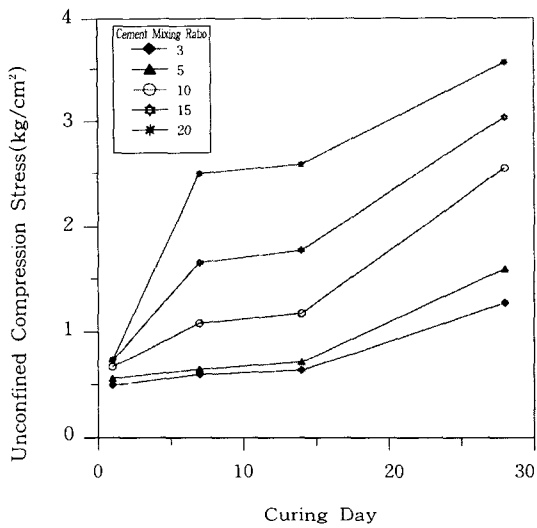


그림 27. Relationship between Unconfined Strength and Curing Day

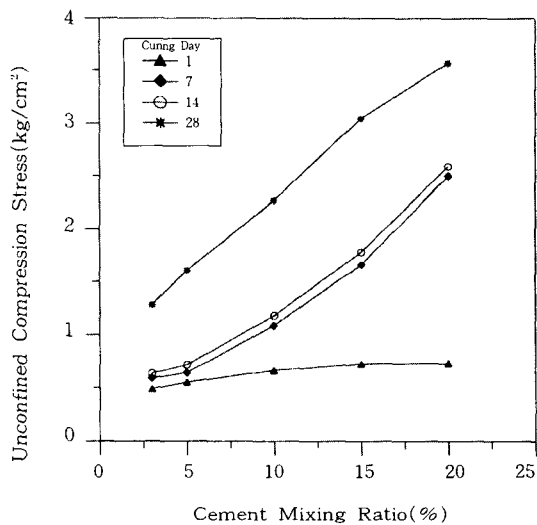


그림 28. Relationship between Unconfined Strength and Cement Mixing Ratio

괴되는 것으로 보아 전단에 의한 파괴가 일반적인 파괴 규준이 되고 있음을 알 수 있었다.

재령기간이 일축압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 27에 나타낸 바와 같이 시멘트 함유율별 재령기간 변화에 따른 일축압

축강도변화를 도시하였다. 그림에 보인 바와 같이 시멘트 혼합비와 무관하게 재령기간이 증가할수록 압축강도가 증가함을 알 수 있다. 특히, 재령일 15일 이후 압축강도의 급격한 증가를 보이고 있음을 알 수 있으며 재령일 28일 이후까지도 압축강도가 지속적으로 증가함을 볼 수 있다. 그러나, 28일 이후의 재령기간에 관한 압축강도의 자료가 없어서 그의 추정을 예측할 수 없으나 일반적으로 시멘트의 강도가 28일을 기준으로 고려할 때 그 이후는 강도의 수렴이 될 가능성이 있다.

시멘트 혼합비가 압축강도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 그림 28과 같이 도시하였다. 그림에서 나타낸 바와 같이 시멘트 혼합비에 따라서 일축압축강도가 증가함을 알 수 있다. 재령 28일에 대하여 일축압축강도가 시멘트 혼합비에 따라 비교적 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 일축압축강도에 대한 지반개량효과를  $q_u = 2 \sim 3 \text{ kg/cm}^2$  으로 적정의 목표를 설정하였을 경우 적정의 시멘트 함유량이 10~15% 선임을 알 수 있으며 그의 값이 추천된다.

#### 4. 결 론

중량천 하수 처리장 슬러지에 혼합재(화강토, 플라이애쉬) 및 첨가재(시멘트, 벤토나이트)를 혼합하여 매립지의 차수재 및 복토재로 이용 가능성에 대하여 각종 기본물성실험 및 다짐, 압밀, 크리프, 투수시험, CBR시험, 직접전단시험, 일축압축강도시험 등을 수행한 결과 다음과 같은 결론과 문제점을 얻었다.

1) 슬러지의 혼합량이 증가함에 따라 최대건조단위중량은 감소하고 최적함수비는 증가하는 경향을 보이며 슬러지와 화강풍화토의 혼합물은 슬러지 혼합비 80%에서, 슬러지와 플라이애쉬 혼합물은 슬러지 혼합물 60%에서 최대건조단위중량과 최적함수비의 변화가 큼을 알 수 있다. 시멘트와 벤토나이트 혼합물은 각 첨가재의 증가에 따라 최대건조단위중량은 증가하고 최적함수비는 감소 하는 경향을 보여준다.

2) 슬러지의 다짐효과( $\gamma_{dmax}$ ,  $\gamma_{dmax}$  95% 습윤측 다짐,  $\gamma_{dmax}$  95%건조측 다짐)가 슬러지의 압축성 및 팽창성을 나타내는 압축지수 및 팽창지수에 미치는 영향은 적음을 알 수 있었으며 슬러지에 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트의 첨가량 증가에 따라 압축지수와 팽창지수는 선형적으로 감소하는 경향을 보여준다.

3) 다짐효과 또는 슬러지 혼합비가 압밀계수  $C_v$ 에 미치는 영향에 관련하여 과압밀상태에서는 다짐효과 또는 슬러지 혼합비에 관계없이 대체적으로 일정한  $C_v$ 값을 유지하나 정규압밀 상태에서는 연직유효응력의 증가에 따라  $C_v$ 값이 감소하는 경향을 보여준다.

4) 슬러지와 화강토, 슬러지와 플라이애쉬 혼합물에서 과압밀응력상태에서는 동일한 간극비에서 슬러지 함유량이 증가할수록 투수계수는 감소하는 경향을 보이나 정규압밀상태에서는 혼합비의 영향이 감소하고 간극비의 영향이 주 인자로 작용한다.

5) 슬러지의 이차압밀계수는 연직유효응력 크기에 따라 다소 증가하는 경향을 보이며 크리프에 따른 간극비 감소로 인한 투수계수 감소율이 연직유효응력 증가에 따른 간극비 감소로 인한 투수계수 감소율보다 매우 큼을 알 수 있다.

6) 다짐시료에 대한 투수시험결과 대부분의 시료가  $10^{-5}$  cm/s이상의 투수계수가 측정되었으며 슬러지 함유율의 증가에 따라 투수계수가 증가하는 경향을 나타내고 있으며 동일한 슬러지 함유율에 대하여 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트 순으로 투수계수가 감소됨을 알았다. 한편, 벤토나이트 등 세립질의 첨가재 사용할 때에는 현장다짐효과를 증진시키는데 한계가 있음이 예상되나 향후 매립성토 하중 및 토피 하중 증가에 의한 큰 압축성 유발로 간극비의 감소가 예상되어 투수계수의 저하를 도모할 수 있다.

7) 한달간 부패시킨 슬러지의 95%  $\gamma_{dmax}$  습윤측 시료의 투수계수 측정치와 시료성형 직후 실험을 수행한 시료에 대한 투수계수 측정치에

크게 변화가 없음을 알 수 있었다.

8) 매립지에서 차수목적의 차수재 및 복토재로 사용할 때 초기다짐 장비에 의하여 현장다짐시 화강토 및 플라이애쉬의 혼합에 의하여 다짐밀도는 그의 혼합량의 증가에 따라 다짐효과를 극대화하여 초기 간극비는 감소시킬 수 있으나 비교적 그의 입경이 실트나 가는 모래질의 크기로 구성되어 있어서 투수계수의 감소효과를 도모할 수 없는 한계성이 예상된다. 따라서 차수효과를 극대화하기 위하여 점토나 실트입경의 세립질이 많이 함유되어 있는 화강토, 플라이애쉬, 벤토나이트의 사용이 추천된다.

9) 플라이애쉬의 매립지 차수재 및 복토재의 사용은 차수효과 및 다짐성에 대하여 긍정적인 효과를 나타내며 부산물의 재활용 측면에서 매우 경제적인 재료로 판단된다.

10) 시멘트의 첨가는 개략적으로 경제성을 고려하여 첨가비 20% 범위내에서 실험을 수행한 바 차수목적으로는 그의 범위내에서는 경제성을 감안한 효율성은 크지 않은 것으로 판단된다.

11) 슬러지와 혼합물에 대한 다짐시료의 CBR 시험결과, 화강토와 플라이애쉬는 슬러지 함유율이 60%, 시멘트와 벤토나이트는 슬러지 함유율이 80%인 경우 CBR값이 각각 2.46, 2.12, 3.68, 1.87로 비교적 불량한 상태로 장비주행에 어려움이 있을 것으로 판단된다.

12) 슬러지와 화강토 혼합물의 직접전단실험 결과, 내부마찰각은 화강토 혼합물 60%이하에서 슬러지의 내부마찰각으로 수렴하는 경향을 보이며 점착력은 화강토 혼합물 20%이상까지 화강토의 점착력을 유지한다.

13) 슬러지와 플라이애쉬 혼합물의 직접전단 실험에서 내부마찰각은 슬러지 혼합비에 따라 다소 감소하는 경향을 보이나 점착력은 슬러지 혼합비에 따라 뚜렷히 감소하는 경향을 나타낸다.

14) 슬러지와 벤토나이트 혼합물에서 슬러지 혼합비 증가에 따라 점착력은 감소하는 경향을 보이나 내부마찰각은 그의 변화에 따른 뚜렷한 경향을 얻을 수 없다.

15) 슬러지와 시멘트 혼합물에 관한 일축압 축시험 결과, 시멘트 혼합비와 재령일이 증가할 수록 혼합물의 일축압축강도가 증가하는 경향이 있다.

### 감사의 글

본 연구는 환경부 환경 공학기술 개발사업 '인공차수재 및 복토재 개발' 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. Alleman, J. E., and Berman, N. A.(1984), Constructive Sludge Management : Biobrick, J. Envir. Engrg. Div., ASCE, 110(2), pp. 346.
2. Koenig, A., and Kay J. N.(1996), "The Geotechnical Characterization of Dewatered Sludge from Wastewater Treatment Plants", Proceedings of the 3rd International Symposium Environmental Geotechnolgy, pp.73-82.
3. Krizek, R. J., and Atmatzidis, D. K.(1987), "Geotechnical Properties and Landfill Disposal of FGD Sludge", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, No. 13, pp.

625-639.

4. Poran, C.(1989) "Properties of Solid Waste Incinerator Fly Ash", Geotech. Engr. Div., ASCE, Vol. 115, No.8, pp.1118-1133.
5. Roy, A., Eaton, H. C., Cartledge, F. K., and Tittlebaum, M. E.(1991), "Solidification/Stabilization of A Heavy Metal Sludge by A Portland Cement/Fly ash Binding Mixture", Harzardous Waste and Hazardous Materials, 8(1), pp. 33-41.
6. Ullrich C. R., and Hagerty D. J.(1987), "Stabilization of FGC Wastes", Geotechnical Practice for Waste Disposal '87, No. 13, pp.797-796.
7. 이용수, 정하익(1998), "폐기물 매립장의 차수재 및 복토재로서 하수슬러지 재활용", 한국지반공학회지, Vol. 13, No. 4, pp. 5 - 11.
8. 정문경, 서경원, 이용수(1997), "플라이애쉬 혼합차수재의 투수특성과 미세구조분석", 한국지반공학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 109 - 124.
9. 천병식, 김영한, 오민열(1992), "토공재로서의 정수장 슬러지의 토질공학적 특성" 대한토목학회 학술발표회 개요집, pp. 543 - 546.
10. 환경통계연감(1994), 환경부

(접수일자 1998. 7. 21)