

뒷채움재의 역학적 특성에 관한 연구

민덕기 · 백진욱*

토목공학과

<요 약>

최근 산업의 발달과 더불어 지하 구조물의 과밀화로 인해 도시 터널의 경우 점점 대심도화되는 경향이 있다. 터널의 시공 중 불가피하게 발생하는 공극 즉 지반과 복공 사이에 존재하게 되는 테일보이드가 지반 변위의 가장 큰 요인으로 작용하게 된다. 그러므로 지반 변위를 최소화하기 위해서는 테일보이드에 대한 뒷채움 효과가 중요하다.

본 논문에서는 다양한 배합비로 구성된 뒷채움 주입재에 대한 각종 실내실험을 통하여 주입재에 대한 물리적, 역학적 특성을 규명하였다.

재료 실험을 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1. 젤타임은 재료의 교반 정도 등 여러 요소의 영향을 받으나, 물시멘트비가 작을수록, 규산비가 작을수록 빨라지는 경향을 보였다. 젤타임은 물시멘트비, 규산비 등에 따라 온도가 20 - 25°C 인 경우 15초 - 1분 30초 정도로 나타났다.
2. 시멘트 함량이 클수록 일축압축강도는 크게 나타났으며, 반면 파괴시의 변형률은 감소하였다. 인장강도는 일축압축강도의 1/15 - 1/20 정도로 나타났다.
3. 삼축압축시험 결과 구속응력이 증가할 수록, 파괴시의 강도, 변형률 모두 증가하였다. 또한 양생기간이 길어질 수록 압축강도는 증가하였으며, 초기 3일간의 양생기간에 현저한 강도 증가를 보였다.

A Study on Mechanical Properties of Backfill Materials

Min, Tukki · Paek, Chinwook
Dept. of Civil Engineering

*현대건설 설계부

<Abstract>

In recent years, urban tunnels have been more deeply constructed due to congestion of buried structures. In shield tunnelling spaces called tail-void are usually created between the ground and the outer face of the primary lining. In order to reduce the ground deformation, it is important to backfill in tail-void.

In this paper, an experimental investigation was undertaken to evaluate the physical and mechanical properties of grouts composed of various mixtures of backfill materials.

The results of test are as follows ;

1. The gel time depends primarily on the cement content. As the w/c ratio decreases from 5:1 to 2:1, the gel time decreases from about 1 minute 30 seconds to 15 seconds at room temperature.
2. With increases of cement content, the strength of cement - silicate grout increases, but, the strain at failure decreases. Tensile strength obtained from the Brazilian test is about one - fifteenth the unconfined compressive strength.
3. With increases of confined stresses, the strength and strain at failure are all increased. The compressive strength of cement - silicate grout increases with curing time ; significant strength increases are obtained in three days.

제 1 장 서 론

최근 국내에서도 암반이 아닌 토사 구간에 다수의 터널 공사가 시도되고 있으며, 토사 구간에 쉴드터널을 실시할 경우 설계 및 시공시 문제가 되는 항목 중의 하나가 지표면 침하 방지이고 이를 위하여 세그먼트 후부의 공극에 대한 뒷채움을 실시하고 있다. 이는 화학약품주입에 의한 일종의 연약지반 고결공법의 일종으로 볼 수 있으며, 이에 대한 연구는 구미제국에서 처음으로 시작되었으며^{(1),(2)}, 최근 국토의 대부분이 해성퇴적층으로 형성되어 있고 면적이 협소한 일본에서 이에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.^{(3),(4)} 우리나라에서는 1978년도부터 이에 대한 연구가 수행된 실적이 있다^{(5),(6)}. 그러나 상기의 연구들은 대부분 토사에 약액을 주입하는 경우에 대한 연구로서, 쉴드터널의 공극과 같은 세그먼트와 쉴드기 사이의 공간을 채우는 뒷채움에 대한 연구가 전혀 이루어 지고 있지 못한 실정이다. 본 논문에서는 쉴드 터널에서 뒷채움재로 일반적으로 사용되고 있는 물유리계의 뒷채움 재료에 대한 역학적 특성을 실험을 통하여 규명하였다.

주입 물질의 최적 배합비를 구하기 위하여 실내 재료 실험을 실시하였으며, 약액은 시멘트, 벤토나이트 및 안정액으로 구성된 A액과 규산인 B액으로 구성하였다. 실험은 이를 배합비를 다양하게 조절함으로서 배합비의 변화에 따른 젠타임의 변화를 측정하였고, 배합된 공시체의 강도를 측정하기 위하여 일축압축실험, Brazilian 인장실험을 실시하였다. 또한 주입재의 응력 - 변형률 특성을 규명하기 위하여 비압밀비배수 삼축압축실험을 실시하였다.

제 2 장 약액의 특성

주입재의 신정은 현재 국내 및 국외에서 가장 많이 사용하고 있는 시멘트계 2액 혼합형 주입방식에 사용되는 재료를 이용하였다. 주입방식은 몰탈을 그라우트 펌프로 주입하는 방법으로 시공성, 충진성이 뛰어난 방법으로 평가받고 있다. 뒷채움 주입재는 A액과 B액으로 나누었으며, A액의 구성 재료로는 시멘트, 벤토나이트, 안정액, 물 그리고 B액은 규산을 사용하였다. 시멘트는 (주)쌍용시멘트에서 제조한 보통포틀란트 시멘트를 사용하였고, 벤토나이트, 규산의 재료 특성을 표 2.1, 표 2.2에 각각 나타내었다.

표 2.1 벤토나이트의 시험 분석 성적서

품명 : 토목용 벤토나이트 (TIXOION)		
시험항목	단위	시험결과
SiO ₂	%	66.6
Al ₂ O ₃	%	13.6
Fe ₂ O ₃	%	2.21
CaO	%	2.22
MgO	%	3.31
K ₂ O	%	0.22
Na ₂ O	%	5.29
MOISTURE CONTENT	%	10.9
PH		10.2
LOOSE BULK DENSITY	kg/l	0.82
RESIDUE ON 200 MESH	%	32.3
SPECIFIC GRAVITY	g/cm ³	2.6
MARSH VISCOSITY(1h)	sec	45.8
GEL STRENGTH	lbs/100 sq ft	11.5

표 2.2 규산의 시험 분석 성적서

품명 : 규산소다 3호		
시험항목	단위	시험결과
비중 (20°C)		1.4
BERYLIUM ($20^{\circ}\text{C Be}^{\circ}$)		41.2
산화나트륨(Na_2O)	%	9.16
이산화규소(SiO_2)	%	29.93
수분(H_2O)	%	60.69
몰 비 (M.R)		3.37
물불용분	%	0.2
Fe (Fe_2O_3)	%	0.02

제 3 장 실험 방법

실험 계획(표 3.1)에 따라 여러 배합비의 경우에 실험을 실시하였다. 각 재료들의 성분비에 따른 재료의 역학 특성을 규명하기 위해 직경 30 mm, 높이 70 mm의 원통형 몰드를 제작하여 실험을 실시하였다.

공시체의 제작은 물시멘트비(W / C)를 1 : 1 부터 1 : 5 까지 변화시켜 가며 실험을 실시하였고, 규산온 물의 부피를 기준으로 하여 물의 10% 부터 50% 까지 변화시켜 가며 실시하였다. 본 연구에서는 경제성, 시공성 등을 고려하여 배합의 경우를 위와 같이 제한하여 실시하였다. 또한 A액과 B액의 배합비 변화에 따라 젤 타임을 측정하였고, 배합된 공시체의 강도를 측정하기 위해 일축압축강도시험, Brazilian 인장시험을 실시하였다. 지반의 이완을 최대한 억제하는 것에 연구의 초점이 맞추어 있으므로, 초기 강도의 변화에 역점을 두어, 같은 배합의 경우 최소 3개의 몰드를 제작해 양생 기간을 1시간 간격(1hr, 2hr, 3hr)으로 각각에 대해 실험하였다. 또한 장기적인 강도 추이나 변형 특성을 규명하기 위해 삼축압축시험(UU Test)을 실시하였다.

표 3.1 실험 계획표

		물-시멘트비 (by weight)														
		2:1			2.5:1			3:1			4:1			5:1		
		CURING TIME (hours) , 1d = 1 day , 3d = 3 days , 7d = 7 days														
% volume of Sodium Silicate (W/G)		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
10 %	B				◎	◎	◎									
	UC				◎	◎	◎									
	UU				◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)									
20%	B	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	UC	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	UU	◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)	◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)	◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)	◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)			
30%	B				◎	◎	◎									
	UC				◎	◎	◎									
	UU				◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)									
40%	B				◎	◎	◎									
	UC				◎	◎	◎									
	UU				◎ (1d)	◎ (3d)	◎ (7d)									
50%	B				◎	◎	◎									
	UC				◎	◎	◎									
	UU															

제 4 장 실험 결과 및 분석

4.1 젤 타임의 결정

겔타임은 경험적인 비이커 따르기 방법(Beaker-Pouring Method)을 이용하여 측정하였다. 젤화는 근본적으로 점성의 함수이므로 온도의 영향을 고려하여 20~25 °C 의 실온에서 실시하였다. 각 구성 성분에 의한 젤타임을 표현하기 위해 물시멘트비(물/시멘트), 시멘트-규산비(시멘트/규산), 규산비(물/규산)에 대한 시험한 젤타임을 분석한 결과의 대표적인 그림을 그림 4.1 및 그림 4.2에 나타내었다. 젤타임은 재료의 교반정도 등 여러 요소가 있으며 표 3.1 실험계획표 상의 제한된 배합비의 경우, 그림에서와 같이 물시멘트비가 작을수록, 규산비가 작을수록 빠른 경향을 보였다. 그러나 시멘트-규산비와는 명확한 관계를 보이지 않았다.

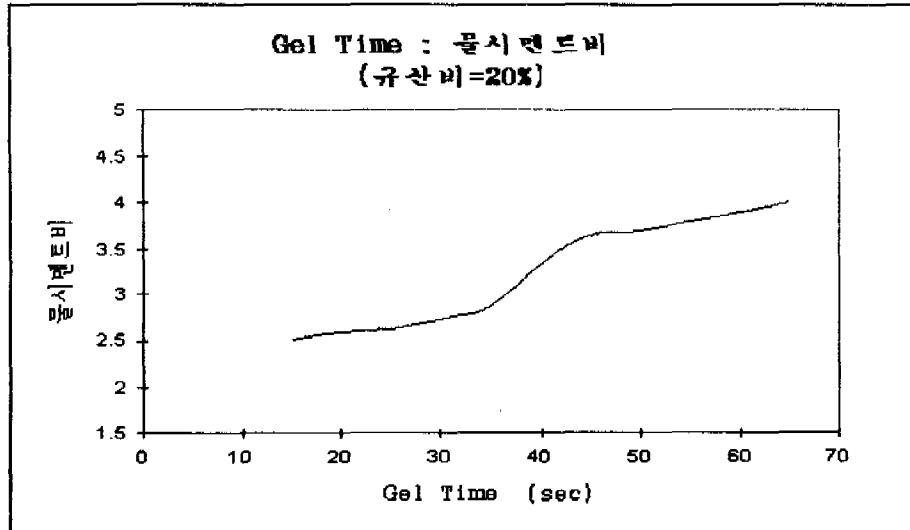


그림 4.1 물시멘트비와 젤타임과의 상관관계

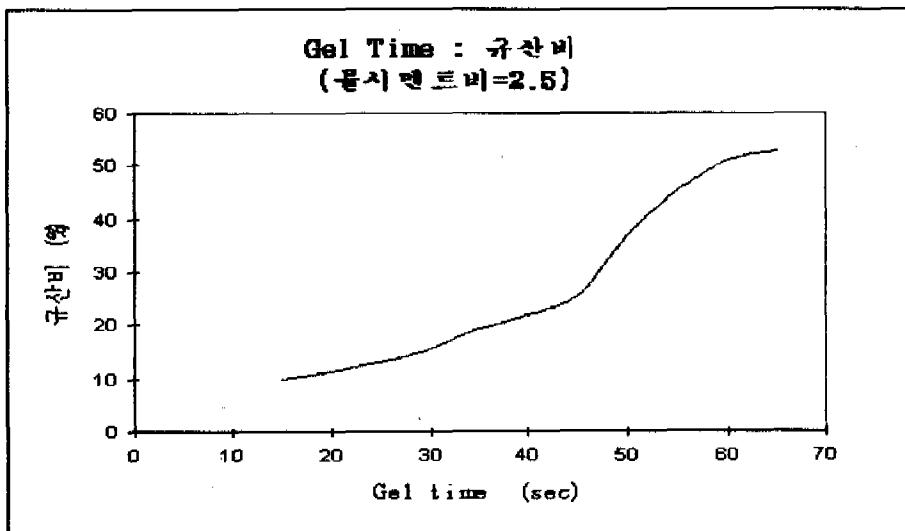


그림 4.2 규산비와 젤타임과의 상관관계

4.2 일축압축강도

공시체의 제작은 실험 계획에 의한 배합비로 믹서를 이용하여 A액을 교반시켜 B액을

혼합시킨 후, 기 제작된 몰드에 부이 양생시켜 일축압축강도시험을 수행하였다. 변형 계이방식에 의한 실험으로 변형비는 0.45 %/min으로 하였다.

수십회의 실험을 하여본 결과, 제작된 몰드의 색으로 강도를 예측할 수 있었다. 보통 짙은 회청색을 떨수록 강도가 크게 도출되었다. 이는 A액과 B액의 교반정도가 좋은 경우이며, 같은 배합비일지라도 A액과 B액의 교반 정도에 따라 강도의 차이를 보였다.

실험결과는 그림 4.3과 그림 4.4에 나타내었다. 결과에서 보듯이 강도에 직접적 영향을 미치는 재료는 시멘트임을 알 수 있고, 규산의 경우 일시적으로 강도의 증가를 유발시키지만 배합비가 커지면 커질수록 규산에 함유된 물로 인해 상대적으로 물시멘트비의 증가 효과가 있어 강도의 증가는 일어나지 않았다. 그림 4.3은 물시멘트비의 증가로 인한 강도 감소를 나타낸다. 실험 결과에 의하면 물시멘트비가 작을수록 초기 강도의 증가가 커으며, 물시멘트비가 4이상인 경우는 강도의 증가 효과가 거의 없었으며, 시멘트와 규산의 비중 차이에서 오는 재료분리 경향을 약간 보였다. 그림 4.4는 규산비의 증가로 인한 강도의 증감 효과를 보여준다. 그림에서처럼 규산의 양이 A액의 20%정도(부피)까지의 경우는 강도의 증가가 있었고, 그 보다 많은 경우에 있어서는 강도의 증가 효과가 20%에 비해 크지 않았다. 또한 1시간 강도의 경우 거의 일정한 강도를 보였으며 이는 규산의 화학반응의 속도에 기인하는 것으로 판단된다.

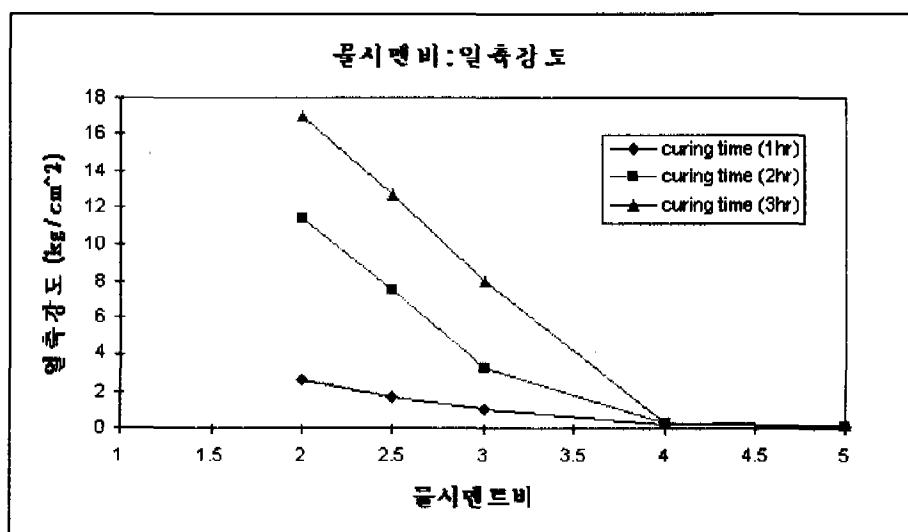


그림 4.3 물시멘트비에 따른 일축강도 증감 효과

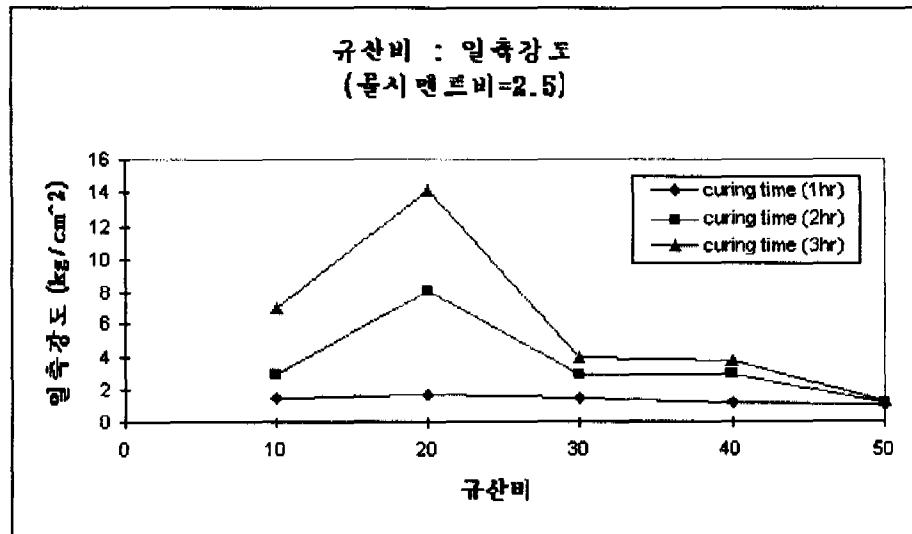


그림 4.4 규산비에 따른 일축강도 증감 효과

4.3 인장강도

몰드의 인장강도 특성을 규명하기 위해 간접인장시험 방법인 브라질 시험법(Brazilian tensile test)으로 수행하였다. 파괴는 선하중이 가해지는 부분을 따라 일어났으며 보통 일축압축강도의 1/15~1/20 정도의 강도를 보였다. 그림 4.5와 그림 4.6에 보이는 바와 같이 각 재료에 따른 강도 증가의 효과는 일축압축의 강도 증감 추이와 거의 유사하였다.

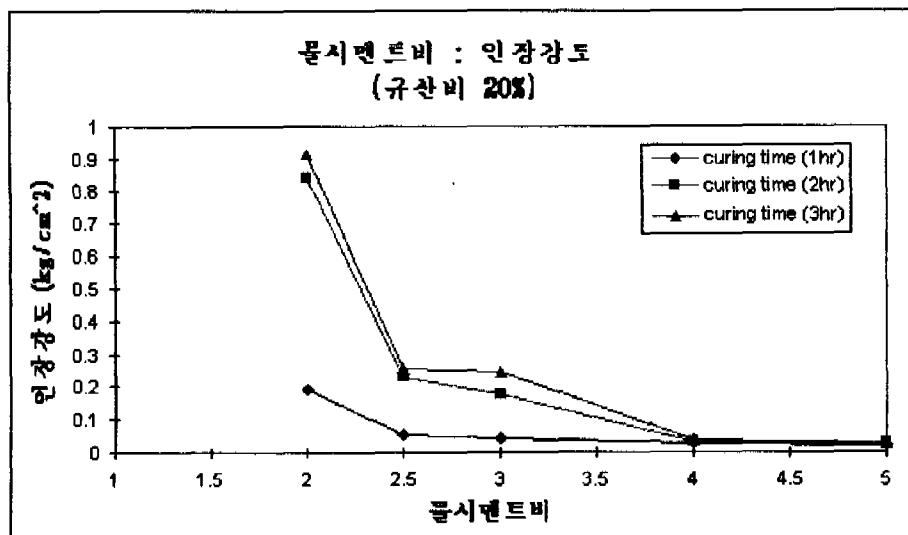


그림 4.5 몰시멘트비에 따른 인장강도 증감 효과

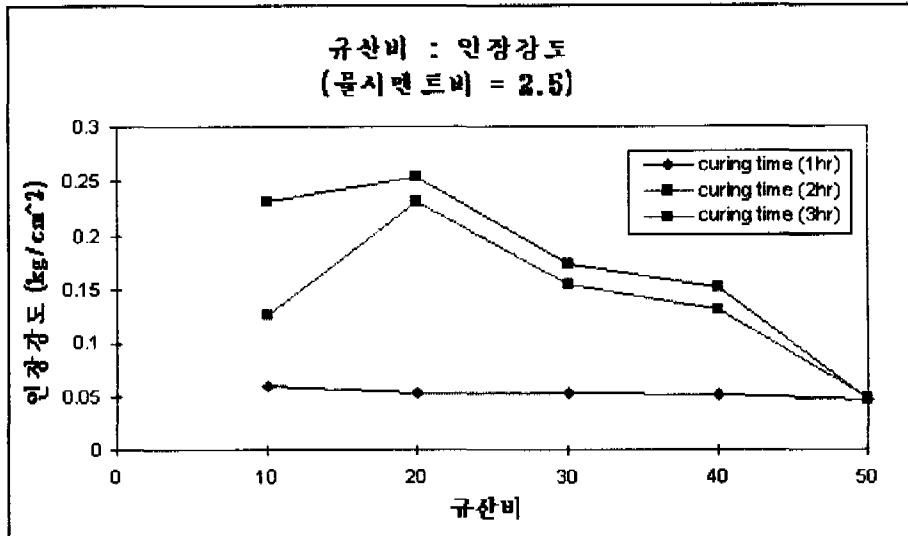


그림 4.6 규산비에 따른 인장강도 증감 효과

4.4 응력-변형 관계

뒷채움재의 변형 특성을 규명하기 위해 삼축압축시험을 실시하였다. 공시체는 기제작된 몰드 ($\phi 30 \text{ mm} \times H 70 \text{ mm}$)를 사용하였다. 양생방법은 양생 일수를 1일, 3일, 7일로 나누어 수중양생하였으며, 이때의 수온은 $20\sim22^\circ\text{C}$ 정도였다.

시험은 소정의 구속응력 ($0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $1.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $1.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$)에서 시료를 비압밀 비배수 상태로 전단하는 비배수비압밀 삼축압축시험 (UU - TEST)을 실시하였으며, 변형 속도는 $0.45\%/\text{min}$ 으로 하였다.

4.4.1 배합비 변화에 의한 응력-변형 관계

배합비 변화에 따른 삼축압축시험 결과의 응력-변형 곡선이 그림 4.7에 나와 있으며, 이는 1일간의 양생기간을 거쳐 $1.0 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 구속응력에서 물시멘트비의 변화가 2, 2.5, 3, 4인 공시체의 응력-변형 곡선이다. 그림에서와 같이 물시멘트비가 증가할수록 파괴는 취성적으로 일어나며 파괴시의 축차응력도 증가하였다. 또한 이러한 현상은 다른 구속응력과 3일 혹은 7일의 양생기간을 거친 공시체의 경우도 매우 흡사한 경향을 보였다.

물시멘트비가 2에서 4로 증가함에 따라 파괴시 변형은 2.9%에서 3.4% (약 17.24%)로 증가하였다. 일반적으로 파괴시 축차응력은 물시멘트비의 증가에 따라 감소하였다.

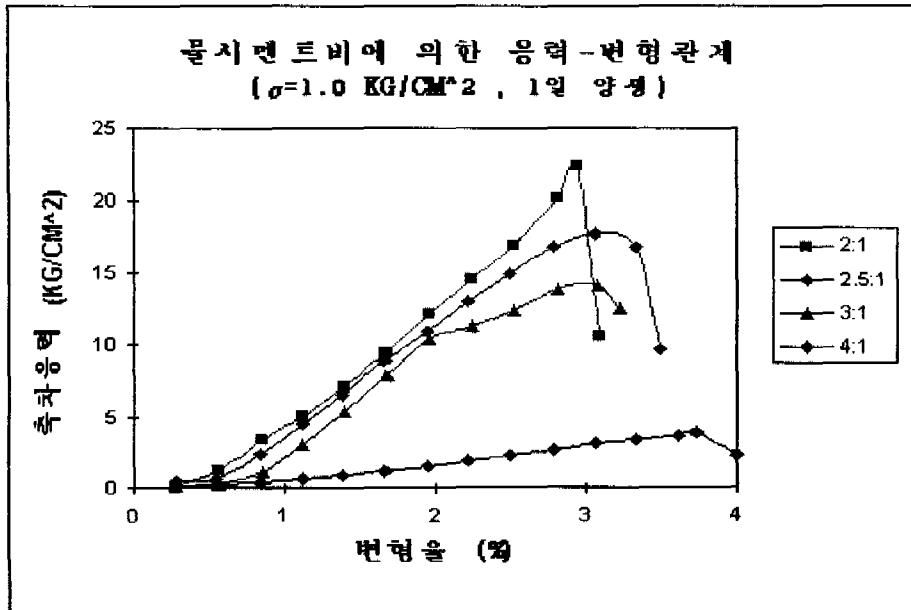


그림 4.7 물시멘트비에 의한 응력-변형 관계

그림 4.8에는 규산비에 의한 파괴시 변형률 추이이다. 이때의 물시멘트비는 2.5이고, 7일 양생한 경우이다. 그림 4.8의 결과에서와 같이 변형률은 규산비가 20~30 % 까지는 미세하게 감소하였고, 규산비가 40% 인 경우는 변형률이 급격히 증가하였다.

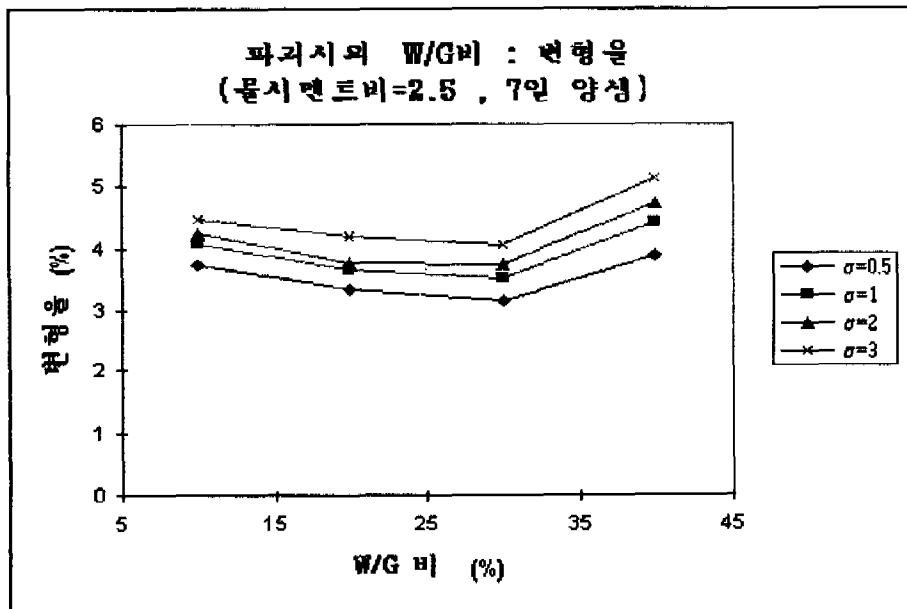
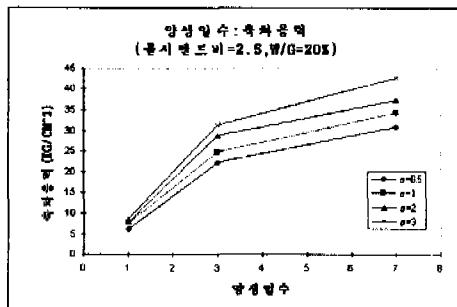


그림 4.8 파괴시 규산비의 변화에 따른 변형률

4.4.2 양생일수에 따른 파괴시의 축차응력

그림 4.9는 양생일수에 따른 파괴시 축차응력의 변화 추이이다. 그림에서 알 수 있듯이 양생일수가 1일에서 7일로 증가함에 따라 파괴시의 강도는 증대되는 경향을 보이지만, 가상 큰 강도 증대는 배합비에 상관없이 양생 3일 동안에 나타나고 그후는 완만하게 증가하였다.



물시멘트비=2.5, W/G=20%

그림 4.9 양생일수에 따른 강도 추이

4.4.3 구속응력에 따른 파괴시의 축차응력

파괴시 구속응력의 변화에 의한 변형률 변화 추이를 그림 4.10에 나타내었다. 물시멘트비가 2.5, 양생기간이 7일인 경우, 구속응력을 $0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $1 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $2 \text{ kg}/\text{cm}^2$, $3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 로 변화시켜 삼축압축실험한 결과를 도시한 것으로 구속응력을 증가함에 따라 변형이 증대됨을 알 수 있다. 몰드의 파괴시 강도는 구속응력을 $0.5 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 에서 $3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 로 증가시킴에 따라 파괴시의 강도는 규산비에 따라 약간의 차이는 있으나 평균 약 1.4배 증가하였으며 파괴시 변형도 규산비가 커짐에 따라 19 ~ 33 %로 증가한 것으로 나타났다.

Mitchell⁽⁷⁾은 구속응력이 증가할수록 토질 상태에 관계없이 강도가 증가한다고 보고하고 있다. 본 연구에서도 구속응력이 클수록 강도가 증가해 Mitchell의 연구 결과와 같은 경향을 보였다.

구속응력은 고결된 입자의 이동을 저지시키는 요소로 작용하여 구속응력이 클수록 전단저항이 커지게 되어 강도가 증대되고 또한 파괴 변형도 커지게 되는 것으로 판단된다.

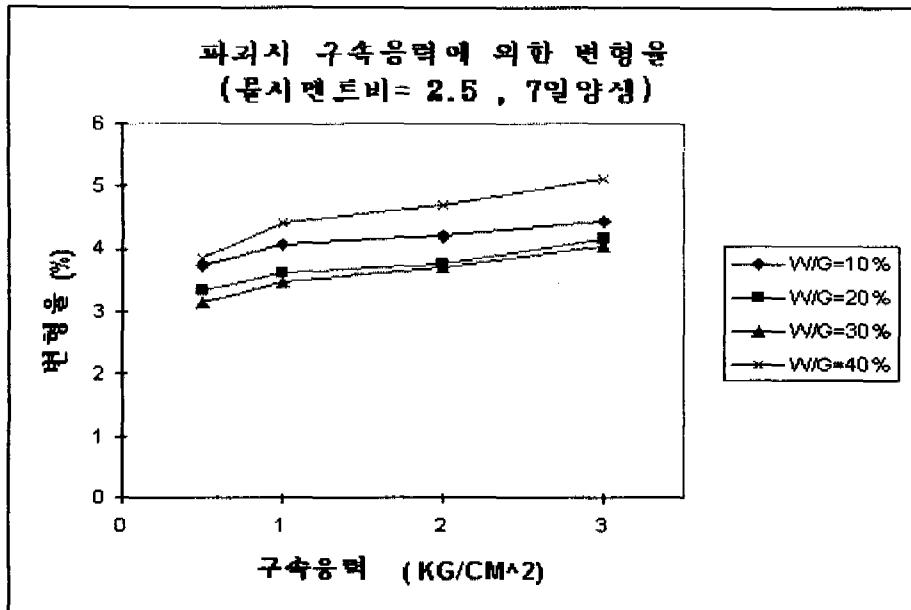


그림 4.10 구속응력에 의한 파괴시 변형률 추이

제 5 장 결 론

현재 국내 및 국외에서 가장 널리 사용되고 있는 시멘트계 2액 혼합형 주입 방식에 사용되고 있는 재료를 이용하여 뒷채움재의 역학적 특성을 연구하였다. 시멘트, 벤토나이트, 안정액, 물 그리고 규산으로 이루어진 뒷채움재료의 배합비를 다양하게 변화시키며 역학 실험을 수행하였으며, 실험의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 겔타임은 재료의 교반 정도 등 여러 영향 요소가 있으나 물시멘트비가 작을 수록, 규산비가 작을 수록 빨라지는 경향을 보였다. 물시멘트비, 규산비 등에 따라 온도가 20 - 25°C인 경우 15초 - 1분 30초 정도로 나타났다.
- 일축 압축 실험 결과에 의하면 물시멘트비가 작을수록 강도 증가 추이가 컸으며, 규산비에 따른 강도 추이는 물시멘트비가 2.5일 때 일시적으로 강도의 증가가 있었으나, 물시멘트비가 그 이상이 되면 일축압축강도는 오히려 감소하였다. 이는 규산에 포함되어 있는 수분함유량으로 인해 물시멘트비가 증가했기 때문으로 판단된다.
- 인장 강도는 일축압축강도의 1/15 - 1/20 정도로 나타났으며, 물시멘트비, 규산비에 의한 강도 증감 추이는 일축압축강도와 유사하였다.
- 삼축압축실험 결과에 의하면 물시멘트비가 감소할수록 파괴는 취성적으로 나타났으며, 변형률도 감소하였다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 파괴시 강도와 변형률도 증가하였다. 양생일수에 의한 파괴시의 강도는 양생 3일 동안에 가장 큰 강도 증가를 보였으며, 변형률은 양생일수가 길어질 수록 감소하였다.

참 고 문 헌

1. King, J. C., "Grouting of granular materials", J. of Soil Mechanics and Foundation Engineering Div., ASCE, Vol. 87, 1961
2. Jones, G. K., "Chemistry and Flow Properties of Bentonite Grouts", Conference for Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice, Butterworths, London, 1963
3. 日本材料學會 土質安定材料委員會編, “藥液注入工法”, 鹿島出版社 發行, 東京, P.154 - 233, 1971
4. 森麟, “藥液注入工法の現状と將來の展望”, 土と基礎, Vol.26, No. 8, pp.1-2, 1978
5. 진병익, “약액주입에 의한 연약지반 처리 공법의 개발 연구”, 대한토목학회지, 제27권 제3호, pp. 89 - 97, 1979
6. 진병익, 천병식, “화학약액에 의한 연약지반 고결공법의 개발 연구”, 대한토목학회지, 제28권 제5호, pp 121 - 129, 1980
7. Michell, J. K., "Foundation of Soil Behavior", Jhon Wiley and Sons, 1976