

쉴드터널에서의 뒷채움주입에 관한 연구 A Study on Backfill Injection of Shield Tunnelling

민택기, Tuk-Ki Min*, 백진욱, Chin-Wook Paek**

* 정회원, 울산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Ulsan Univ., Kyungsangnam-do

** 정회원, 울산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Ulsan Univ., Kyungsangnam-do

SYNOPSIS : In recent years, urban tunnels have been more deeply constructed due to the congestion of buried structures. In such conditions, the shield method has become one of the popular urban tunnelling methods by reason of several characteristics ; safety of construction, minimum environmental damage, and workability. In tunnelling, the space which is tail-void are created between the ground and the outer face of the primary lining. In order to reduce the ground deformation, it is important backfilling in tail-void. In this paper, the result of an experimental investigation undertaken to evaluate the physical and mechanical properties of grouts composed of various mixtures of backfill materials. And the backfill injection model test was carried out considering the effects of tail-void.

1. 서론

최근 산업이 발전하고 도시의 과밀화 현상이 발생하면서 지하철 등의 대중교통기관의 건설, 상·하수도, 전력, 통신 등 공공 서비스 시설의 급격한 증가, 정비가 필요하게 되고 이러한 시설물들을 교통량이 많은 대도시의 중심이나, 열악한 환경의 도로 밑을 건설하는 상황에 이르렀다. 이같은 상황에서는 종래 널리 쓰였던 개착공법으로는 여러 가지 곤란한 문제가 발생함에 따라 기계 굴착이 보편화되었으나, 지질이 변화하는 구간에서는 기존의 기계 굴착이 여러 가지 어려움에 봉착하여 이를 해결할 수 있는 방안으로 쉴드 공법이 제안되었다.

쉴드공법은 토피가 얇고, 연약한 토사로 이루어진 지반의 지하수면 아래를 굴착하기 위해 쉴드라고 불리는 강제의 통을 고속에 압입하여 토양을 지탱하면서 전면을 굴착하고 세그먼트라 불리는 강재, 주철재 또는 콘크리트재의 복공재료를 조립, 설치한 후 뒷채움을 실시하는 공법으로 연약지반에서 터널시공시 도시의 과밀화와 주변 환경 문제를 극복할 수 있는 효과적인 도시 터널 굴착 방법이다.

쉴드터널에서 설계·시공상 문제가 되는 항목중 하나는 토피가 얇고, 주력이나 구조물 밑을 통과하는 경우의 지표면 침하방지대책에 있다. 쉴드공사에 의한 지반 침하의 원지반의 조건에도 의하지만, 완전한 지반 침하의 억제에는 불가능하다. 공사에 수반하여 지반 침하가 발생하는 요인으로서의 쉴드 장비 외경과 세그먼트 외경과의 사이에 존재하는 공극(테일보이드)이 가장 큰 요인으로 작용하며, 쉴드의 형식, 굴착 방법, 막장의 안정 기구, 추진 방법에 따라서도 크게 좌우한다. 테일보이드에 기인한 지반 침하를 최소한으로 억제하기 위한 방법으로는 뒷채움 주입이 있다. 뒷채움 주입 작업은 쉴드 추진에 따라 발생하는 테일보이드를 세그먼트에 설치되어 있는 주입공(그라우트홀)에서 몰탈 등의 주입재를 그라우트 파이프를 주입하면서 충전하는 작업이다.

본 소고에서는 주입몰탈의 최적배합비를 구하기 위하여 실내재료실험을 실시하였으며, 사철토를 대상으로한 뒷채움 주입 재료의 선정과 주입압, 주입 영향 범위 등 주입 효과를 제시하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 쉴드터널의 지반 변위 메커니즘

쉴드 굴착에 의한 지반변위 메커니즘은 선행침하, 막장전 용기, 테일침하, 테일보이드에 의한 침하, 후속침하로 크게 5가지로 나눌 수 있다. (표 2.1) 침하를 유발하는 요인들로는 쉴드경, 토피, 지반상향등의 현장조건, 쉴드공사의 시공 상태 등에 따라 다르며, 이중 선행, 쉴드경, 토피 등의 계획설계조건과 토층구성, 각층의 강도, 변형특성, 지하수위분포 등의 지반 조건은 노선이 결정된 시점에서 정해지는 고유조건이다. 또한 쉴드기중, 보조공법, 뒷채움주입, 시공관리상태등의 시공조건은 노선이 선정된 후에도 변동하는 것으로 지반변위의 요인이라 할 수 있다. 따라서 지반변위가 나타나는 방식은 지

반의 종류, 쉴드기중, 시공상황에 크게 좌우된다.

표 2.1 지반변위의 메커니즘

침하의 종류	원인	지반상태의 변화	변형메카니즘
① 선행침하	지하수위저하	유효토포압의 증가	압축, 압밀침하
② 막장전침하 융기	막장붕괴, 과대취 입 및 막장압입	지반의 응력 해방, 교란부하도압	탄소성변형
③ 테일침하	쉴드기 통과시 교란	교란	압축
④ 테일보이드 침하	테일보이드의 발생	지반의 응력해방	탄소성변형
⑤ 후속침하	이상전요인 (잔유분)		압축 및 크리프 침하

표 2.2 지반변위의 원인과 영향인자

원인	보조공법	쉴드기	뒷채움 주입	시공관리
지하수위 저하	* 지하수위 저하법 * 압기공법 * 불완전한 약액주입공법	* 막장에서의 수압발란스의 불량	* 뒷채움 불량 의 경우 세그먼트에 서의 누수	* 세그먼트 조 립의 불량에 의한 누수
막장의 붕괴 막장의 압입	* 불완전한 약액주입공법	* 막장에서의 토 압, 수압발란스 성능의 불량	-	* 책추력 및 배 트량의 관리 불량
테일보이드 의 발생	-	* 스킨플레이트 보강 리브의 두께 등	* 주입량의 부족 (주입시기 지연 에 의한)	* 여공, 사행수 정의 불량
지반의 교란	* 과대한 약액작업 * 약액주입시공에 의한 호트 러짐	* 막장굴착시의 교란 및 지반 의 붕괴	-	* 과추력, 과소 추력에 의한 지 반의 과도 변형

- ① 선행침하 : 터널막장이 지표의 측정점의 상당히 앞(수10m정도)에 있는 시점에서 막장이 측정점의 직전에 이르는 동안에 생기는 것으로, 쉴드 굴진에 따른 지하수위저하에 의해 생긴다. 따라서 이것은 지반의 유효토포압이 증가하기 때문에 생기는 압축, 압밀침하라고 말할 수 있다.
- ② 막장전침하 및 융기 : 막장이 지표의 측정점의 바로 앞(수 m 정도)에 달하는 시기로 부터, 막장이 측정점 바로 밑에 도달하는 동안에 생긴 침하, 또는 융기현상, 막장의 붕괴, 쉴드의 과추력 등, 막장에서 토압인바란스에 의해 생기는 것으로 지반의 응력 해방이나 역으로 쉴드막장의 부하도압, 쉴드기의 주변마찰력의 작용에 의한 지반의 탄소성변형이다.
- ③ 테일침하 : 측정점의 직하에 막장이 도달하고 나서 부터, 쉴드기의 테일이 통과하는 동안에 생기는 현상, 주로 흙의 교란에 기인한다.
- ④ 테일보이드 침하 : 쉴드의 테일이 측정점의 직하를 통과한 후에 생기는 침하현상, 테일보이드에 기인하는 지반의 응력해방에 의한 탄소성변형이다.
- ⑤ 주로 지반의 교란에 기인하는 압밀 및 크리프적 잔류침하현상.

이들의 침하는 항상 모두가 함께 발생하는 것이 아니고, 지반조건, 시공상황에 의해 발생하는 침하의 종류가 다르다. 또한 지반변위의 원인과 영향인자를 표 2.2에 나타내었다.

2.2 뒷채움 주입공법의 종류와 특징

현재 쉴드공법은 대표적 도시터널 축조공법으로 자리잡고 있는 실정이다. 이러한 기술개발의 흐름은 막장안정 대책과 지반변형의 방지 대책으로 집약되며, 이러한 이유로 쉴드공법의 숙명이라고도 말해지는 쉴드테일 이탈 후 세그먼트 배면에 발생하는 테일보이드의 충전처리기술, 즉 뒷채움 주입기술의 중요성이 필요하다.

2.2.1 뒷채움 주입의 목적

쉴드시공에서의 뒷채움 주입의 목적은 대략 다음과 같다.

- ① 지반변위의 방지 (주로 테일보이드에 기인한다.)
- ② 터널 지수성의 향상
- ③ 세그먼트부공의 조기안정성의 확보 (작용외력의 균등화)
- ④ 쉴드의 상태·방향제어를 용이하게 함

②, ③은 터널의 기능 유지에 관련된 사항이며, ④는 터널을 계획 선형으로 마무리하기 위한 필요조건이다. 만약 세그먼트의 배면에 공극이 있고, 쉴드 책의 반력대가 되는 세그먼트 링이 움직이면 쉴드굴진의 방향제어가 어렵게 된다. 특히 급곡선 구간에서는 방향제어 뿐만 아니라 세그먼트에 과대한 힘이 작용하지 않도록 제어하는 효과가 있다. 그러나 이상의 4항목중 지반변위의 제어가 가장 중요하며, 이 목적의 달성을 위해서는 주입재료, 주입시기, 주입범위 및 주입방법을 쉴드형식 혹은 굴착대상지반과의 관계에서 정확하게 파악하는 것이 필요하다.

2.2.2 뒷채움 주입 방식의 분류

뒷채움 주입 방식은 그 실시시기에 의해 다음과 같이 분류한다.

(1) 동시주입방식

뒷채움 주입의 목적을 고려하면 이상적 방식이라고 말할 수 있는 것으로 테일보이드 발생과 주입·충진처리가 시차가 없는 상태로 실시하는 방식이다. 주입선단장치(주입관)는 일반적으로 쉴드의 외측에 설치된다.

(2) 반동시주입방식

세그먼트에 설치된 그라우트홀과 월드데일에서 이탈함과 동시에 그라우트홀에서 뒷채움주입을 실시하는 방식이다. 테일보이드 발생과 보이드 충전과의 시차를 뿔 수 있는 한 단축하는 것을 목적으로 그라우트홀의 설치 위치를 연구하는 경우가 있다.

(3) 즉시주입방식

가장 시공 실적이 많은 방법으로 1령의 굳진 완료마다 실시하는 방식이다.

(4) 후방주입방식

수개의 링 후방의 그라우트홀에서 뒷채움 주입을 실시하는 방식이다.

이상 외에 주입재료의 제적 수축에 따른 미충진부의 보충 혹은 지수성 향상을 목적으로 월드굳진과는 관계없이 실시하는 경우도 있다. (4)→(1)의 순으로 이상적인 뒷채움 주입이라 할 수 있으나, 주입 방식의 선정에 있어서는 지반 조건을 포함한 주입 장치의 보전 대책, 시공단면에서의 제약 혹은 테일셀 구조와의 관련을 충분히 고려하여 선정하여야 한다.

제 3 장 재료시험 및 결과분석

3.1 사용 재료의 특성

주입재의 선정은 현재 국내 및 국외에서 가장 많이 사용하고 있는 시멘트계 2액 혼합형 주입방식에 사용되는 재료를 이용하였다. 시멘트계 2액 혼합형 주입방식은 물탈을 그라우트 펌프로 주입하는 방법으로 시공성, 충전성이 뛰어난 방법으로 평가받고 있다. 뒷채움 주입재는 A액과 B액으로 나누었으며, A액의 구성 재료로는 시멘트, 벤토나이트, 안정액, 물 그리고 B액은 규산을 사용하였다. 시멘트는 쌍용시멘트에서 제조한 보룡포틀란트 시멘트를 사용하였고, 벤토나이트는 토목용 벤토나이트(TIXOION) 그리고 규산소다 3호를 사용하였다.

3.2 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 물드를 제작하여 실험을 실시하였다.

공시체의 제작은 물시멘트비(C : W)를 1 : 1 부터 1 : 5 까지 변화 시켜 가며 실험을 실시하였고, 규산은 물의 부피를 기준으로 하여 물의 10% 부터 50% 까지 변화 시켜 가며 실시하였다. A액과 B액의 배합비 변화에 따라 겐 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 물드를 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

B - Brazilian Test UC - Unconfined Compression Test UU - UU Triaxial Test	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															

3.3 젤 타임의 결정

젤타임은 경험적인 비이커 따르기 방법(Beaker-Pouring Method)을 이용하여 측정하였다. 겔화는 근본적으로 점성의 함수이므로 온도의 영향을 고려하여 실시하였다. 각 구성 성분에 의한 젤타임을 표현하기 위해 물시멘트비(물/시멘트), 시멘트-규산비(시멘트/규산), 규산비(물/규산)에 대한 시험한 젤타임을 분석한 결과 그림 3.1, 그림 3.2 에 나타내었다. 젤타임은 재료의 교반정도 등 여러 요소가 있으나, 그림에서와 같이 물시멘트비가 작을수록, 규산비가 작을수록 빠른 경향을 보였다. 그러나 시멘트-규산비와는 명확한 관계를 보이지 않았다.

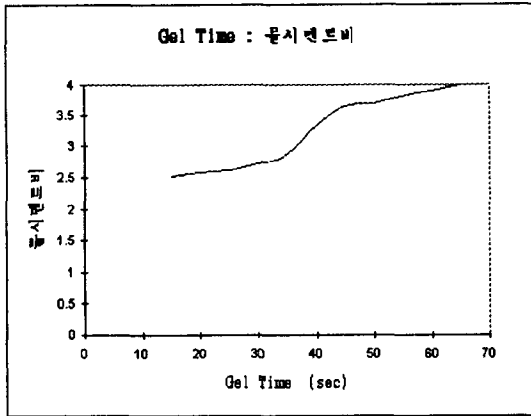


그림 3.1 물시멘트비와 젤타임과의 상관관계

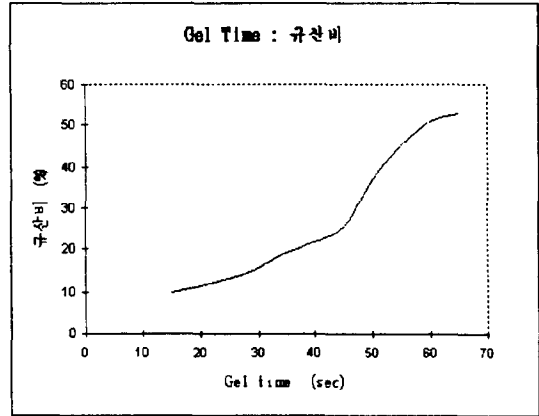


그림 3.2 규산비와 젤타임과의 상관관계

3.4 일축압축강도

공시체의 제작은 실험 계획에 의한 배합비로 믹서를 이용하여 A액을 교반시켜 B액을 혼합시킨 후, 기 제작된 몰드에 부어 양생시켜 강도시험을 수행하였다. 변형 제어 방식에 의한 실험으로 변형비는 0.45 %/min으로 하였다.

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

실험결과는 그림 3.3과 그림 3.4에 나타내었다. 결과에서 보듯이 강도에 직접적 영향을 미치는 재료는 시멘트임을 알 수 있었고, 규산의 경우 일시적으로 강도의 증가를 유발시키지만 배합비가 커지면 커질수록 규산에 함유된 물로 인해 상대적으로 물시멘트비의 증가 효과가 있어 강도의 증가는 일어나지 않았다. 그림 3.3은 물시멘트비의 증가로 인한 강도 감소를 나타낸다. 실험 결과에 의하면 물시멘트비가 작을수록 초기 강도의 증가가 컸으며, 물시멘트비가 4이상인 경우는 강도의 증가 효과가 거의 없었으며, 시멘트와 규산의 비중 차이에서 오는 재료분리 경향을 약간 보였다. 그림 3.4는 규산비의 증가로 인한 강도의 증감 효과를 보여준다. 그림에서처럼 규산의 양이 20% 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.

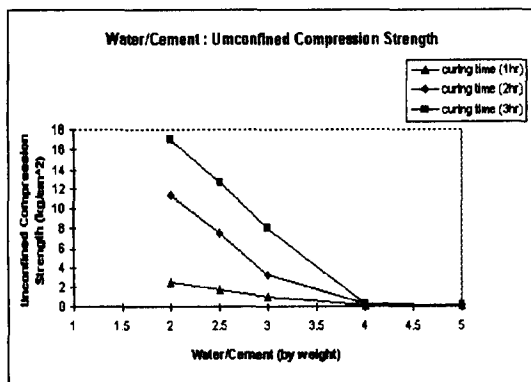


그림 3.3 물시멘트비에 따른 강도증감 효과

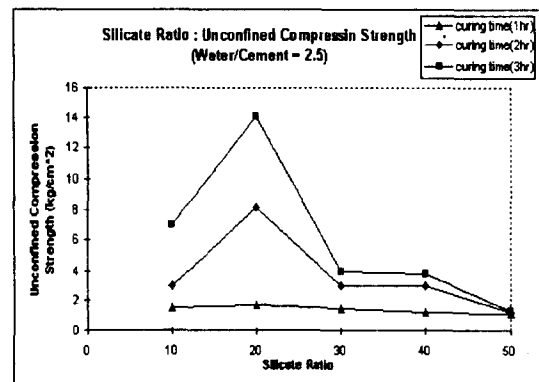


그림 3.4 규산비에 따른 강도 증감 효과

3.5 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. 각 재료에 따른 강도 증가의 효과는 일축압축의 강도 증감 추이와 거의 유사하였다. 단 몰시멘트비가 2일 경우 강도의 증가 속도가 매우 컸다.

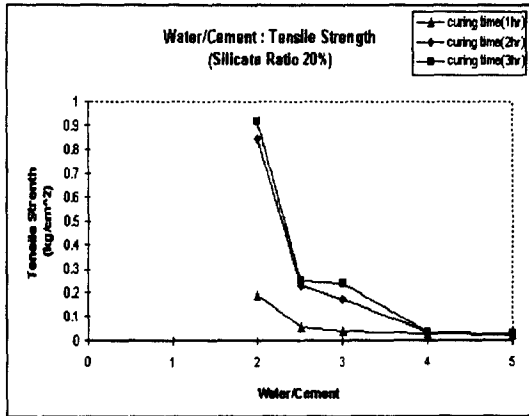


그림 3.5 몰시멘트비에 따른 강도 증감 효과

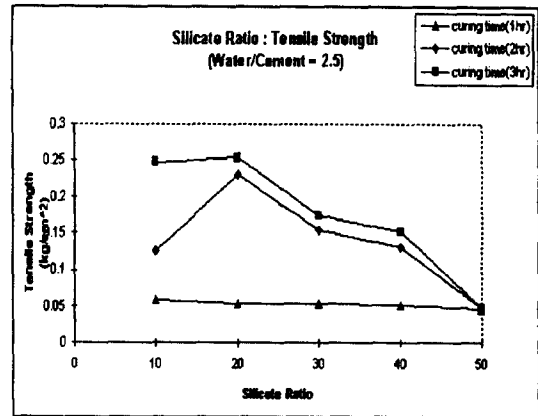


그림 3.6 규산비에 따른 강도 증감 효과

3.6 응력-변형 관계

뒷채움재의 변형 특성을 규명하기 위해 삼축압축시험을 실시하였다. 공시체는 기계작된 몰드 ($\phi 30 \text{ mm} \times H 70 \text{ mm}$)를 사용하였다. 양생방법은 양생 일수를 1일, 3일, 7일로 나누어 수중양생하였으며, 이때의 수온은 20~22 °C 정도였다.

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

3.6.1 배합비 변화에 의한 응력 변형 관계

배합비 변화에 따른 삼축압축시험 결과의 응력-변형 곡선이 그림 3.7에 나와 있으며, 이는 1일간의 양생기간을 거쳐 1.0 kg/cm^2 의 구속응력에서 몰시멘트비의 변화가 2, 2.5, 3, 4 인 공시체의 응력-변형 곡선이다. 그림에서와 같이 몰시멘트비가 증가할수록 파괴는 취성적으로 일어나며 파괴시의 축차응력도 증가하였다. 또한 이러한 현상은 다른 구속응력과 3일 혹은 7일의 양생기간을 거친 공시체의 경우도 매우 유사한 경향을 보였다. 또한 몰시멘트비가 4인 경우에 비해 몰시멘트비가 2인 경우의 파괴시 강도가 평균 약 3배 증가하였다.

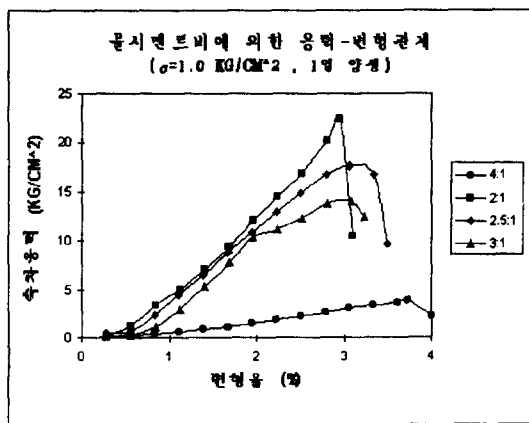


그림 3.7 몰시멘트비에 의한 응력-변형 관계

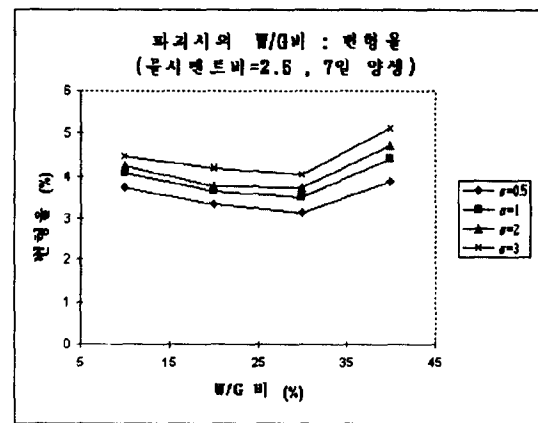


그림 3.8 파괴시 규산비의 변화에 따른 변형률

그림 3.8은 규산비에 의한 파괴시 변형을 추이이다. 이때의 물시멘트비는 2.5이고, 7일 양생한 경우이다. 그림 3.8의 결과에서와 같이 변형률은 규산비가 20~30 % 까지는 미세하게 감소하였고, 규산비가 40% 인 경우는 변형률이 급격히 증가하였다.

3.6.2 양생일수에 따른 파괴시의 축차응력

그림 3.9는 양생일수에 따른 파괴시 축차응력의 변화 추이이다. 그림에서 알 수 있듯이 양생일수가 1일에서 7일로 증가함에 따라 파괴시의 강도는 증대되는 경향을 보이지만, 가장 큰 강도 증대는 배합비에 상관없이 양생 3일 동안에 나타나고 그후는 완만하게 증가하였다.

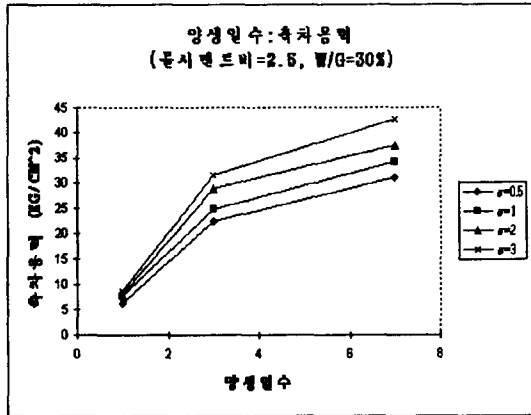


그림 3.9 양생일수에 따른 강도 추이

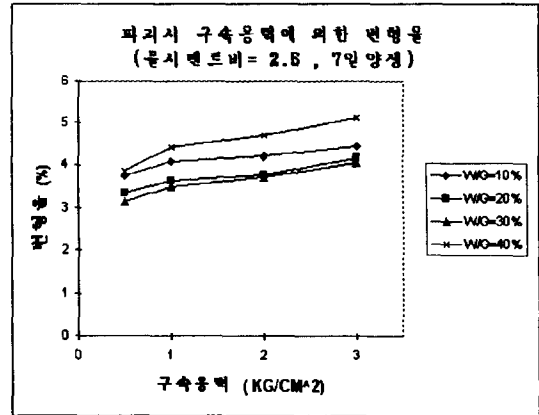


그림 3.10 구속응력에 의한 파괴시 변형률 추이

3.6.3 구속응력에 따른 파괴시의 축차응력

파괴시 구속응력의 변화에 의한 변형률 변화 추이를 그림 3.10에 나타내었다. 물시멘트비가 2.5, 양생기간이 7일인 경우, 구속응력을 0.5 kg/cm², 1 kg/cm², 2 kg/cm², 3 kg/cm²로 변화시켜 삼축압축실험한 결과를 도시한 것으로 구속응력을 증가함에 따라 변형이 증대됨을 알 수 있다. 물드의 파괴시 강도는 구속응력을 0.5 kg/cm²에서 3 kg/cm²으로 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.

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

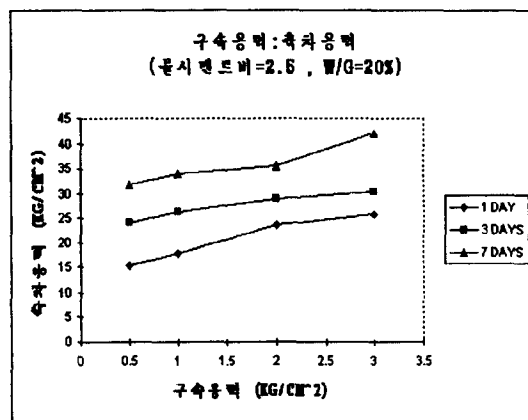


그림 3.11 구속응력에 의한 파괴시 축차응력

제 4 장 모형주입시험 및 결과분석

일반적으로 뒷채움 주입은 세그먼트가 실드테일에서 이탈할 때 발생하는 테일보이드(스킨플레이트 두께 + 테일크리어런스에 의해 결정되는 세그먼트 배면의 공극)에의 주입·충진 기술로 생각된다. 그렇지만 세그먼트 배면에 존재하는 공극은 이 테일보이드만은 아니고 막장 굴착에 따른 여굴 혹은 부분 붕괴에 기인하는 공극, 지중응력해방에 의한 지반의 이완(교란)에 따른 토립자 간극의 증가가 예상된다. 뒷채움주입의 최대 목표가 지반변형방지라는 것을 고려하면 뒷채움주입이 대상으로 해야 할 공극은 실드굴진시 발생하는 전공극을 대상으로 삼아야 할 것이다.

4.1 시료 및 실험 장치

시험에 사용한 시료의 경우 점착은 무시할 정도로 작고 내부마찰각만을 갖는 모래를 입경별로 체분석하여 표 4.1과 같은 입경을 가진 3종류(No. I, No. II, No. III)로 구분하여 사용하였다. 단 No. II의 경우는 주문진 표준사를 사용하였다.

표 4.1 모래의 물리적 특성

시료	입경 (mm)	간극비 (e)
No. I	10 ^φ ~30 ^φ (0.59~2.00)	0.4
No. II	30 ^φ ~50 ^φ (0.297~0.59)	0.65
No. III	50 ^φ ~70 ^φ (0.210~0.297)	0.8

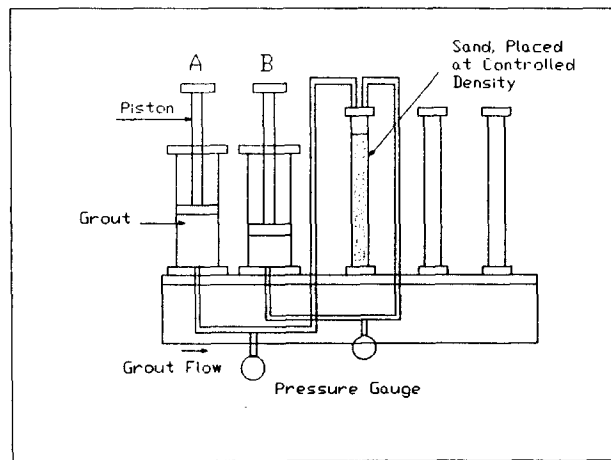


그림 4.1 모형실험장치 개략도

주입제는 앞 장에서 다루었던 배합비중 물시멘트비 2.5, 규산비=20%인 배합을 선택하여 실시하였다. 실험에 사용한 실험 장치의 개략도를 그림 4.1에 나타내었다.

실험 장치는 A액과 B액을 구별할 수 있도록 2개의 그라우트 탱크를 마련하였다. 주입시의 주입압은 수동으로 조절할 수 있으며, 시료가 들어가는 관은 투명한 아크릴 관으로서 직경 6 cm, 높이 33 cm 로 체적은 933.05 cm³ 이다.

4.2 실험방법

실험은 먼저 시료로 사용하는 모래를 24시간 건조로에서 건조시킨 후 밀도를 조정하여 주입용 몰드에 설치하였다. 시료의 설치시 테일보이드를 고려하기 위해 기 계산된 밀도를 이용해 공극으로 남아 있는 주입용 몰드의 상단부를 테일보이드로 간주하였다. 실험에서는 먼저 주입압을 관리하였다. 주입압은 0.5, 1, 1.5, 2 (kg/cm²)로 각각 변화시켜 가며 세 종류의 시료에 주입하였다. 실제 시공된 경우를 보면 주입압은 세그먼트 주입구에서 1~3 kg/cm² 이 일반적으로 사용하고 있다. 또한 주입 방식을 1.5 Shot System, 2 Shot System으로 변화시켜 가며 주입하였다. 또한 현장에서 많이 사용하는 방식인 주입량에 의한 관리도 해보았다. 이는 테일보이드의 체적을 계산하여 기 계산된 체적만큼의 주입제를 주입하는 방식이다. 마지막으로 각 시료를 100% 포화시켜 주입하였다.

4.3 주입압에 의한 주입 효과

표 4.2 및 그림 4.2. 는 주입압의 변화에 따른 주입비를 나타내고 있다. 주입압은 0.5~2 kg/cm² 로 변화 시켜가며 실험하였다. 대체적으로 압력이 증가할수록 시료 I은 26.09%~36.73%, 시료 II인 경우는 20.82%~35.55%, 시료 III인 경우는 19.09%~25.18%의 주입비를 보였다. 즉 주입압이 커질수록, 간극비가 작을수록 주입의 효과가 크고, 주입압은 토질의 투수성에 반비례함을 알 수 있었다. 이는 약액이 흙입자를 일반적인 층류의 흐름인 Darcy의 법칙을 따르기 때문이다.

또한 주입방식에 의한 주입비의 차이는 2 Shot System의 경우가 1.5 Shot System에 비해 약 3% 정도 주입비가 큰것으로 나타났으며, 이는 짧은 젤 타임 때문에 1.5 Shot System의 경우 2 Shot System에 비해 테일보이드와 시료의 공극에서의 상대적 반응속도가 빠르기 때문으로 판단된다.

표 4.2 주입압의 변화에 따른 주입비 (단위 : %)

시료 \ 주입압	0.5 kg/cm ²		1 kg/cm ²		1.5 kg/cm ²		2 kg/cm ²	
	1.5계	2계	1.5계	2계	1.5계	2계	1.5계	2계
I	26.09	25.36	28.55	28.27	32.91	32.45	36.73	34.82
II	20.82	19.09	22.91	22.36	27.64	26.18	35.55	27.91
III	19.09	17.64	20.73	19.18	23.36	21.64	25.18	22.64

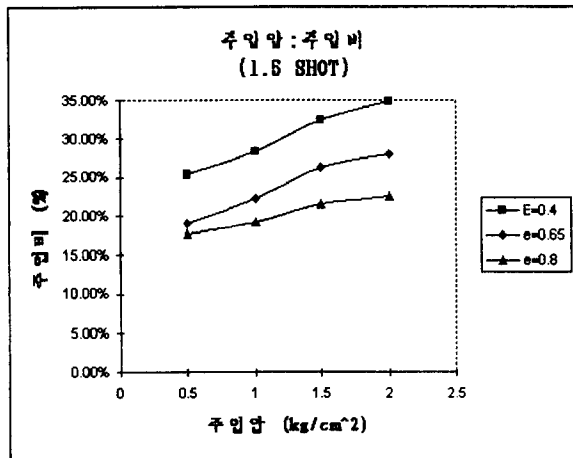


그림 4.2. 주입압의 변화에 의한 주입비

4.4 주입량에 의한 주입효과

뒷채움주입량은 기하학적으로 결정되는 테일보이드 체적을 기본으로 산정하며, 이 테일보이드 양에 대한 실주입량의 비로서 결정할 수 있다. 전공극량에 대한 실주입량을 충전율이라 정의할 수 있으며, 충전율은 다음의 식으로 표시할 수 있다.

$$\text{충진율} = \frac{\text{주입량} \times \text{유효율}}{\text{전공극량}} \quad \text{식 4.1}$$

여기서, 유효율은 뒷채움주입량중 공극에 충전된 유효 뒷채움주입량의 주입량에 대한 비율을 의미한다. 그러나 뒷채움 주입공의 특성상 쉘드테일 이 탈 후 신속하게 이루어 지는 작업이므로, 미리 지반의 특성을 파악하여 주입량을 결정하여야 한다.

표 4.3은 정량적인 주입실험에 의한 결과치이다. 간극비가 작을수록 주입비는 크게 나타났으며, 주입시의 최대 주입압을 측정된 결과 시료 I인 경우 약 1.35 kg/cm², 시료 II인 경우 약 1.45 kg/cm², 시료 III인 경우는 약 1.6 kg/cm²의 압력을 나타냈다. 결과에서 알 수 있듯이 뒷채움 주입시 테일보이드 뿐만 아니라 침투로 인해 발생하는 주입압은 토질의 투수성에 반비례함을 알 수 있다. 또한 주입비는 시료 I일 경우가 주입 용적의 약 33.7%, 시료 II인 경우 약 26.33%, 시료 III인 경우 약 21.09%로 나타났다. 따라서 주입후 발생하는 2차 공극을 방지하기 위해 주입량의 결정은 매우 중요하리라 판단된다.

표 4.3 정량적 주입에 의한 주입비 (단위 : %)

시료	2 SHOT	1.5 SHOT
I	33.70%	33.24
II	26.33%	24.85
III	21.09%	20.45

제 4 장 결 론

시멘트, 벤토나이트, 안정액, 물 그리고 규산으로 이루어진 슬러리의 뒷채움 재료에 대한 기본 역학시험 및 주입시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

① 켈타입은 재료의 교반정도 등 여러 영향요소가 있으나, 몰시멘트비가 작을수록, 규산비가 작을 수록 빨라지는 경향을 보였다. 몰시멘트비, 규산비 등 에따라 온도가 20~25℃인 경우 15초~1분 30초 정도로 나타났다.

② 일축압축시험 결과에 의하면 몰시멘트비가 작을수록 강도의 증가 추이가 컸으며 규산비에 따른 강도 추이는 몰시멘트비가 2.5일 때 일시적 강도 증가가 있었으나, 몰시멘트비가 그 이상되면 일축압축강도는 오히려 감소 하였다. 이는 규산에 포함되어 있는 수분함유량으로 인해 몰시멘트비가 증가 했기 때문으로 판단된다.

③ 인장강도는 일축압축강도의 1/15~1/20 정도로 나타났으며, 몰시멘트비, 규산비에 의한 강도 증감 추이는 일축압축시험의 결과와 비슷하였다.

④ 삼축압축시험 결과에 의하면 몰시멘트비가 감소할수록 파괴는 취성적으로 일어났으며, 변형률도 감소하였다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 파괴 시 강도와 변형률도 증가하였다. 양생일수에 의한 파괴시의 강도는 양생 3일동안에 가장 큰 강도증가를 보였으며, 변형률은 양생일수가 길어질수록 감소하였다.

⑤ 주입모형실험 결과 시료가 입자균등인 경우 간극비가 작을수록 주입압이 커질수록 주입의 효과는 크고 주입압은 토질의 투수성에 반비례하였다.

참고문헌

- (1) Arvind V. Shroff & Dhananjay L. Shah , "GROUTING TECHNOLOGY in Tunnelling and Dam Construction" , pp 33~72, 1993
- (2) Clough. G. W., et al., "Development of Design Procedures for Stabilized Soil Support system for Soft Ground Tunnelling", U.S Department of Transportation Report , 1977
- (3) Clough. G. W., et al., "Silicate-stabilized Sands", ASCE, Vol.105, No.GT1, 1979, pp65~82
- (4) Cording,E.J. et al.(1976), "Displacements around tunnels in soil", Report to U.S. Dept. of Trans. prepared at the Univ. of Illinois at Urbana-Champaign. DOT-TST-76T-22
- (5) Gunn,M.J.(1992), "The Prediction of surface settlement profiles due to tunnelling. Predictive Soil Mechanics", Thomas Telford, pp.304 - 316
- (6) Komine,H., Y.Tanaka & K.Nishi(1994), "Factors Affecting Settlements Above Shield Driven Tunnels", XIII ICSMFE, New Delhi, India. pp.187 -190
- (7) Krizek, R.J., et al., "Mechanical Behavior of Chemically Grouted Sand," ASCE, Vol.108, 1982.
- (8) O'Reilly,M.P. & New,B.M.(1982), "Settlements above Tunnels in the United Kingdom - their magnitude and prediction", Tunneling '82, The institution of Mining and Metallurgy. pp.173 - 181

- (9) Peck,R.B.(1969), "Deep Excavation and Tunnelling in Soft Ground", State-of-the-Art Report, Proc. 7th Int. Conf. on Soil Mech. and Found.Eng., Vol.3,pp.225-290.
- (10) Yanting Chang & Lars Hässler,"An analytical solution of ground reaction curves for grouted tunnels",
- (11) PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL CONFERENCE ON GROUTING IN ROCK AND CONCRETE, pp 481~487, 1993
- (12) 秦柄益, 千柄植, "藥液注入에 의한 固結土의 工學的 特性", 大韓土木學會誌, Vol. 28, No. 6, pp.97~107, 1980.12
- (13) 秦柄益, 千柄植, "물유리계 注入材를 주로 한 地盤強度增大", 大韓土木學會論文集, 第4卷, 第2號, pp89~99, 1984.6