

급결제 함유량에 따른 습식 Shotcrete 리바운드 감소량에 대한 실험적 연구

Experimental Study on Reduced Amount of Rebound in Wet Process Shotcrete Works by Upon Accelerator Contents

전준태* · 박홍태** · 이양규***

Jeon, Jun Tai · Park, Hong Tae · Lee, Yang Kyu

Abstract

The aim of shotcrete is to increase the bearing capacity and to protect the excavated surface from erosion by preventing falling of rock mass. Shotcreting method is divided into two types as dry process and wet process. Since 1997, wet process method has been used more frequently than dry process method in field works. The failure to bond, so called rebound, occurs in many case during shotcrete works. The excess amount of rebound has a significant effect on the total construction cost. For example, material and craft-man cost increases, the shooting time delays due to deceleration of work execution stage, work efficiency of craft-man decreases and additional cost to remove the muck generates. In this study, therefore, the experimental analysis of rebound amount and strength was conducted by analyzing the actual construction data for wet process type of shotcreting method upon accelerator contents. Also, the effective and rational method was suggested, which can be actually implemented in the Korea construction sites.

Keywords : *accelerator; wet process shotcrete, rebound rate, mix proportion rate, shooting time*

요 지

-shotcrete는 현장에서 빠른 시공을 실시하여 굴착면을 침식으로부터 보호하고 암괴의 전단이동방지, 암괴의 붕괴방지, 개구 절리의 봉합, 응력의 집중완화, 응력전달효과 등에 의하여 후속작업의 원활한 진행이 될 수 있도록 굴착면을 방지하여 지내력을 증대시키는 것이 주목적이다. -shotcrete공법으로는 건식과 습식의 두 가지방법이 있으며, 1997년 이후부터는 건식보다 습식 -shotcrete가 많이 이용되고 있다. 그러나 작업 중 목적물에 부착되지 않고 반발되는 현상, 즉 리바운드가 많이 발생하며 이러한 많은 양의 리바운드는 -shotcrete와 전체 공사비 원가에 중대한 영향을 미치게 된다. 특히 -shotcrete는 재료비, 배합, 타설시간 증가, 재료의 취급과 계량장치에 소요되는 인력 및 버력제거를 위한 비용 증가 발생원인이 되고 있다. 이 연구에서는 국내현장에서 시행한 급결제 함유량에 따른 일반 습식 -shotcrete 및 강섬유 습식 -shotcrete공법의 시공실적을 분석하여 반발 양 및 강도의 실험적인 분석을 실시하였다. 또한 국내 건설공사에 실제 사용할 수 있는 효과적이고 합리적인 방법을 제시하였다.

핵심용어 : 급결제, 습식 -shotcrete, 반발률, 배합비, 타설시간

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

-shotcrete는 현장에서 빠른 시공을 실시하여 굴착면을 침식으로부터 보호하고 지반의 이완방지, 암괴의 전단이동방지, 암괴의 붕괴방지, 개구절리의 봉합, 응력의 집중완화, 응력전달효과 등에 의하여 후속작업의 원활한 진행이 될 수 있도록 굴착면을 방지하여 지내력을 증대시키는 것이다.

-shotcrete공법은 부분적으로 사용되었지만 광범위하게 사용

된 것은 1950년대 후반 Austria의 L. V. Rabcewicz 박사가 NATM공법(New Austrian Tunnelling Method)을 주창하여 터널공사에 적용되면서부터 각 나라에서 활발히 사용되고 있다(Franklin and Dusseault, 1989).

우리나라에서는 NATM공법을 1980년대부터 서울 지하철 3, 4호선이 시작되면서 경부고속철도, 호남고속철도, 춘천선 철도 및 지하철, 도로터널, 지하공동구 등 많이 적용되어 왔다(서울 지하철, 1983; 경부고속철도 건설공사, 2011). 1996년까지는 대부분 건식공법이 널리 적용되어 왔으나, 1997년

*정회원 · 인하공업전문대학 토목환경과 교수 · 공학박사 (E-mail : jtjeon@inhac.ac.kr)

**정회원 · 공주대학교 공과대학 건설환경공학부 교수 · 공학박사 (E-mail : htpark@kongju.ac.kr)

***정회원 · 교신저자 · 대림대학교 토목환경공학과 교수 · 공학박사 (E-mail : yklee@daelim.ac.kr)

부터는 습식 슛크리트공법이 반발률을 감소시키는 실험적 요인이 입증되면서 활발히 진행적용 되고 있다.

우리나라에서는 크게 슛크리트는 건·습식공법으로 나누어 설명할 수 있다. 1997년 이전은 서울지하철공사 지하철 3, 4호선 NATM 기술성과 보고서(1983) 및 한국수자원공사(1993) 등에서도 건식 슛크리트공법으로 연구되어 왔다. 그러나 1998년 이후부터는 일반 습식 슛크리트공법 및 강섬유 슛크리트공법이 개발되어 현재까지 시공되고 있다. 이는 경제적인 측면과 강도적인 측면을 가지고 있으며, 슛크리트의 연구동향은 다음과 같다.

또한 안상기(1993)는 슛크리트의 리바운드감소에 대한 재료개발 연구시험 및 장동일·손영현(1998)은 강섬유와 실리카흙이 슛크리트의 반발률에 미치는 영향과 이양규·권인환(2001)은 도로현장 NATM터널의 건식 슛크리트 반발률에 대해 실험하여 발표하였다. 2001년 이후부터는 우리나라 NATM터널의 경우 건식 슛크리트보다 습식 슛크리트 우수성이 검증되어 많이 사용되었다. 이를 검증하기 위하여 전준태·이양규(2003)는 습식 슛크리트에 대해 건식보다 습식 반발률이 줄어든다는 것을 발표하였고, 또한 이양규·전준태(2004)는 NATM터널의 건식·습식에 대한 반발률 비교에 대해서도 발표하였다.

과거 콘크리트시방서 및 발주청에서는 상부, 천정, 수직벽에 대한 각 부위별로 반발률 범위를 제시하였으나, 2009년부터는 콘크리트시방서 및 각 발주청에서도 전체적으로 타설한 후 반발된 총량으로 한 반발률의 10~20% 범위의 기준으로 정하고 있다.

스�크리트작업 중 여러 요인으로 인해 목적물에 부착되지 않고 반발되는 현상을 리바운드라고 한다. 적은 량의 리바운드는 작업의 과장상 불가피한 결과라 할 수 있지만 많은 량의 리바운드는 슛크리트와 전체 공사비의 원가 증가에 영향을 미치고 있다.

이 연구에서는 국내현장에서 시행한 철도터널 급결제 함유량에 따른 일반 습식 슛크리트 및 강섬유 습식 슛크리트공법의 시공실적을 분석하여 반발 양 및 강도의 실험적인 분석을 실시하여 제시함으로써 국내 도로터널, 철도터널 및 건설공사에 실제 사용할 수 있는 효과적이고 합리적인 방법을 제시하였다.

1.2 연구방법 및 범위

이 연구는 급결제 함유율에 따른 습식 슛크리트에 급결제(accelerator) 함유율 4%, 6%, 8%로 변화를 주어 일반 습식 슛크리트와 강섬유 습식 슛크리트 시험결과로부터 압축강도, 휨강도, 빔강도시험을 실시하였다. 시험결과로부터 습식 슛크리트공법 반발 양을 분석하여 반발 양을 줄일 수 있는 급결제 함유율 정보를 제시함으로써 국내 건설공사 실정에 알맞게 적용할 수 있는 유용한 자료로 활용할 수 있을 것이다.

2. 이론적 고찰

2.1 분류

습식공법은 물을 포함한 모든 재료를 혼합한 후 분사장치

에 공급하고 노즐에서 압축공기를 더 가하여 분사속도를 증가시켜 확실하게 뿜어붙이는 공법이다. 이와 같은 습식공법에 대한 작업상의 특성은 다음과 같다(이양규, 2010; 한국콘크리트학회, 2009).

- ① 물을 포함하여 각 재료를 미리 정확히 계량하여 다시 충분히 혼합할 수 있으므로 품질 관리가 쉽다.
- ② 재료의 공급에 제한을 받는다.
- ③ 호스로 보내는 거리에 제한을 받는다.
- ④ 뿜어붙이기 작업에서 분진발생이 적다.
- ⑤ 반발 양이 적다(건식공법 보다).
- ⑥ 시간당 토출량이 4~8/hr 정도이다.
- ⑦ 장비가 대형이므로 작업공간이 크다.

2.2 리바운드 매개변수의 정의 및 해석

리바운드의 메커니즘은 리바운드의 구조 및 역학에서 설명한 결과가 리바운드의 주요인으로서 측정이 현실적으로 불가능함으로 인해 매개변수를 도입하여 총체적 결과를 이해하는데 필요하다(이양규·권인환, 2001; 한국수자원공사, 1993).

2.2.1 재료송출율

기본적인 매개변수의 하나는 재료송출율이다. 사출된 총중량(total weight shot)을 그 중량을 사출하기 위한 순시간으로 나눈 것으로 정의된다. 이것은 노즐을 이탈하는 모든 재료의 중량율이다. 이것은 현장에서 근사치로 구할 수 있으며, 순시간을 구하기 위해서는 프러그 현상(plug developing) 등으로 재료가 흐르지 않는 시간은 총 사출시간에서 배제되어야 한다. 재료송출율의 정의는 식 (1)과 같다.

$$MDR = \frac{Ssum}{Time} \quad (1)$$

여기서, MDR : 재료 송출율

Ssum : 사출된 총중량

Time : 사출 순시간

2.2.2 반발률

뿜어붙임 콘크리트를 타설할 때에 벽에 접촉되지 않고 바닥에 떨어지는 물량의 전체물량에 대한 무게비를 반발률(rebound rate, RR)이라 하며, 이것은 전형적으로 초당 0.05~0.23MPa 정도 범위의 순간율이다. 반발률은 1단계 중에서 높고, 최초 임계두께(critical thickness)가 형성된 후 점진적으로 감소한다.

반발률은 지상에 낙하하는 재료의 비율이며, 산출율(Yield Rate, YR)은 재료 송출율과 반발률 사이의 차이로서 정의될 수 있다. 따라서 산출율은 초당 재료가 MPa 단위로 벽에 쌓이는 순간율이다. 통상적으로 일정한 재료 분배율, 산출율은 1단계 중에 매우 낮고 다단계 중에 높다. 이 시험에서는 반발률을 아래와 같은 방법으로 산출되며, 다음 식 (2)과 같다(이양규·권인환, 2001; 한국수자원공사, 1993).

$$RR = \frac{Rsum}{Ssum} \times 100 \quad (2)$$

여기서, RR : 반발률

2.2.3 MDR, RR 및 YR간의 상호관계

벽에 슛크리트가 두꺼워지고 리바운드가 시간에 따라 감소하는 점에 대한 관계는 그림 1과 같다. 가로 실선은 재료송출이며, 끊어진 곡선은 반발률이다. X축에서 실선까지의 수직선 길이는 초당 MPa로 표시되는 재료송출의 수치의 값이며, X축과 점 곡선사이의 수직선의 길이는 초당 MPa로 표시되는 반발률의 수치적인 값이다. 점 곡선에서 실선 재료송출까지의 곡선길이는 산출율의 수치적인 값 또는 잔류하는 슛크리트의 초당 MPa 수이다(이양규·권인환, 2001; 한국수자원공사).

가로의 재료송출선 아래의 전체면적은 $R_{sum} + Y_{sum}$ 이며, 그림 1과 같이 타설 곡선의 반발률에 대한 시간 밑의 면적은 리바운드 한 R_{sum} 재료의 총중량이다. 점 곡선과 가로의 재료송출 선사이의 면적은 Y_{sum} 과 같다(권인환, 2000; 한국수자원공사, 1993; 日本土質工學會, 1986). 즉 산출율 $YR = MDR - RR$ 로 표시할 수 있다.

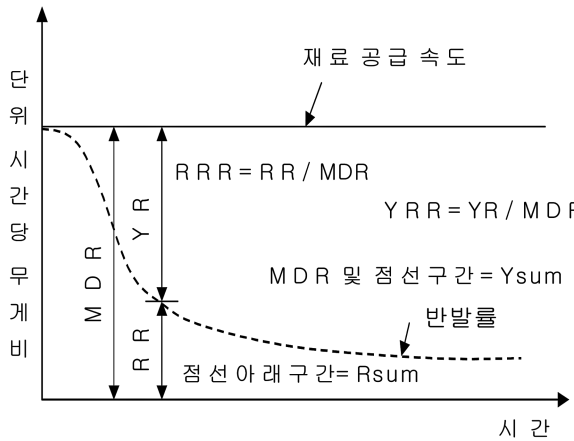


그림 1. 시간에 따른 리바운드의 변동

3. 슛크리트의 재료배합과 시공

3.1 재료

3.1.1 골재

스�크리트에 이용되는 일반적인 잔골재율(S/a)은 55~75% 범위 내에 있어야 한다. 조립률 2.5~3.3% 정도이며, 0.2mm 이하의 미분의 첨가는 조건이 나쁜 시공면에서도 잘 부착되도록 하고, 리바운드도 적어 비교적 두꺼운 층의 시공은 가능하지만 미분이 많으면 물의 소요량이 많아 건조수축량을 증대시키고 시공기계 내부나 호스 내부에서 막힘을 가져온다(한국콘크리트학회, 2009).

습식 슛크리트공법인 경우 표면수량은 3~5% 정도가 적당하며, 7%가 넘으면 뿔어붙이기 전에 시멘트와 수화작용이 시작되고, 특히 분말형 급결제를 사용하는 경우에는 시멘트와 급결제가 반응을 시작하여 호스 폐쇄 및 사고의 원인이 된다.

굵은 골재 최대치수는 최종 시험시공에서 반발률과 노즐의 지름을 감안하여 결정되어야 하며, 19mm 이하 또는 노즐지름의 1/3 이하이어야 한다. 실제 NATM공법의 경우 굵은 골재 10~15mm 범위이나, 이 연구에서는 13mm를 사용하였다.

3.1.2 급결제

습식 슛크리트시공에 있어서 급결제는 소듐 알루미늄산염(sodium aluminat)계, 소듐 규산염(Sodium Silicate)계의 액상 또는 분말급결제 이어야 하며, 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

습식의 경우는 액상형, 건식의 경우는 분말형을 사용하며, 반발 양을 최소화 하면서 압박과 견고하게 부착될 수 있는 것이어야 한다. 또한 초기강도의 발현 및 장기강도에 악영향이 없어야 하며, 인체에 유해한 영향이 최소인 것이어야 한다.

이 연구의 재료선정에서는 급결제는 콘크리트의 부착성과 단시간 내에 초기강도의 발현 리바운드를 감소하기 위해 사용하였으며, 급결제의 사용량은 일반적으로 2~5%, 용수가 있을 때는 7~8%정도 증가한다.

또한 고유동화제 및 감수제에 있어서는 일반적으로 장기강도증진, 단위수량 감소, 워커빌리티 증진에 효과를 나타내어야 하며 리바운드 감소, 초기강도 증진, 부착력 증대, 1회 타설 두께를 증가시킬 수 있는 것이어야 한다(안상기, 1993; 한국콘크리트학회, 2009).

3.2 배합

스�크리트 배합설계는 소요의 강도를 얻을 수 있어야 하며, 반발력이 적고, 부착성이 좋아야 한다. 또한 호스의 막힘 현상이 없어야 하며, 용수의 상황에 적합하여야 하고, 분진발생이 적어야 한다. 그리고 배합은 현장에서 배합시험을 실시하여 배합비를 결정하여야 하며, 강섬유 보강 슛크리트는 휨강도, 압축강도로 일반 슛크리트 압축강도를 기준으로 하여 배합비를 결정하여야 한다.

슬럼프는 혼화제 혼입 후 100mm를 표준으로 하며, 급결제의 종류에 따라 다르므로 물-시멘트비는 50% 이하로 정하고 있다.

3.2.1 습식공법

압축된 슛크리트에 대하여 골재함량을 보정하면서 배합은 기본적으로 일반 배합설계법에 의하여 실시될 수 있다. 이와 같이 배합설계법에서 굵은 골재 함유량은 다소 높을 수 있으나 일반적으로 타설 제한에 부합하는 최대함유량이 사용되어야 한다.

또한 습식 슛크리트의 슬럼프는 일반 펌프에 사용가능한 최소치가 되도록 하며, 이는 4~7.5cm의 슬럼프범위가 적합하고, 습식배합 슛크리트는 공기가 연행될 수 있으므로 펌프에서 전체공기의 5~8% 정도의 범위가 좋다. 그리고 일반 습식 슛크리트 및 강섬유 슛크리트 반발률은 10~20% 범위로 시방서에 명기하고 있다(한국콘크리트학회, 2009).

3.3 슛크리트의 시공

3.3.1 슛크리트의 타설

스�크리트작업은 시공의 정확성, 작업의 효율성을 향상시킬 수 있는 장비를 선정하여 하며, 노즐의 방향은 슛크리트면에 직각이 되도록 하고, 타설면과 노즐간의 거리는 1m 정도로 하고 있다.

습식 슛크리트의 압송압력은 노즐선단에서 0.2~0.5MPa 내

외가 양호하다. 또한 굴착위치에 따른 반발률은 타설 시의 각도는 면에 직각으로, 노즐과 타설 부위에서의 거리는 0.75~1.25m 정도가 적당하고, 1m 떨어졌을 때 반발 양이 최소가 된다. 굴착위치에 따른 반발률 및 노즐과의 거리에 따른 반발률은 그림 2와 같다.

또한 1회 슛크리트타설 두께는 5cm 이내이며, 특히 슛크리트시공 시의 측벽은 아래에서 위쪽으로 천장은 한쪽 끝에서 다른 쪽 끝으로 연속하여 시공하여야 한다.

스�크리트작업 시에는 철망, 철근, 강지보재 등의 뒷부분에 공극이 남지 않도록 하여야 한다. 또한 슛크리트타설 후에는 저온·건조·급격한 온도변화 등 해로운 영향을 받지 않도록 보호하여 양생하고, 슛크리트 이음부는 작업이 끝나기 전 30cm부터 두께를 얇게 한다.

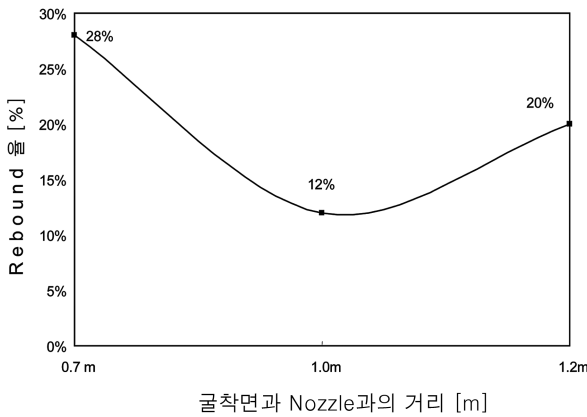


그림 2. 벽체의 노즐거리의 반발률

3.3.2 슛크리트강도

습식 슛크리트의 압축강도, 휨강도, 코어압축강도는 표 1과 같다.

표 1. 습식 슛크리트 혼합물의 강도

강도	MPa			
	8시간	1일	3일	28일
압축강도	5.5	-	13.0	20.0
휨강도	-	2.1	3.0	4.5
코어압축강도	-	-	-	17.0

표 2. 터널용 습식 슛크리트의 품질표준

시공부위의 구분	일반부위에 긴급 슛크리트가 요구됨	2차 슛크리트 부위	지보보강 부위
제일 중요한 요소	초기 고강도	좋은 품질	매우 우수한 품질
-	휨강도/분진/리바운드 적을 것	우수한시공성/분진/리바운드 적을 것	우수한시공성/분진/리바운드 적을 것
표준 물량	10~20%(2~4cm)	20~40%(4~8cm)	40~70%(5~15cm)
시공방식	습식	습식	습식
콘크리트강도(12시간) 수밀성 동경 저항성	15MPa<40mm 필요 없음	7MPa<30mm>60(평균)	<20mm>100(최대)
골재	0~16mm	8~16mm(15~20%)	0~16mm(표준)
리바운드(보강 없음)	<5%	<5%	<5%
리바운드(보강 있음)	<10%	<10%	<10%

3.3.3 슛크리트의 품질관리

시험시공 시 또는 이 시공 중에는 표 2와 같은 기준으로 품질관리를 하여야 한다.

4. 시험 및 고찰

4.1 재료의 배합

4.1.1 시방배합

이 연구는 현장배합설계공법은 콘크리트재료를 배합하여 사전에 시멘트, 강섬유, 골재, 물을 혼합하여 운반하고 노즐에서 급결제 함유율 4%, 6%, 8%로 변화를 주어 확인하였다. 이것은 습식 슛크리트 공시체 압축강도 1일강도 10N/mm² 이상 및 3일강도 14N/mm² 이상, 코어채취 28일 압축강도품질기준 20N/mm² 이상을 확보하기 위해서는 급결제 6% 사용이 적합한 것으로 판단되며, 일반 습식 슛크리트와 강섬유 습식 슛크리트 시방배합 및 현장배합수정은 표 3 및 표 4와 같다.

표 3. 일반 습식 슛크리트 시방배합 및 현장배합(MPa)

구분	배합			
	시방배합	현장배합		
설계기준강도(MPa)	21	21	21	21
굵은골재의 최대치수(mm)	13	13	13	13
슬럼프(mm)	100	100	100	100
공기량(%)	4.5	4.5	4.5	4.5
단위수량(W)	203	164	164	164
단위시멘트량(C)	452	452	452	452
물/시멘트비(W/C)	45	45	45	45
절대잔골재율(S/a)	65.0	65	65	65
단위잔골재량(S)	1,056	1,049	1,049	1,049
단위굵은골재량(G)	580	626	626	626
유동화제(kg/m ³)	4.52	4.52	4.52	4.52
강섬유(kg/m ³)	0	0	0	0
혼화제(kg)	4.52	4.52	4.52	4.52
급결제(CX, kg)	-	18.08 (C×4%)	27.12 (C×6%)	36.16 (C×8%)
전중량(kg)	2,296	2,314	2,323	2,332

표 4. 강섬유 습식 숏크리트 시방배합 및 현장배합(MPa)

구 분	배 합			
	시방배합	현장배합		
설계기준강도(MPa)	4.5	4.5	4.5	4.5
굵은골재의 최대치수(mm)	13	13	13	13
슬럼프(mm)	100	100	100	100
공기량(%)	4.5	4.5	4.5	4.5
단위수량(W)	211	178	178	178
단위시멘트량(C)	470	470	470	470
물/시멘트비(W/C)	44.9	44.9	44.9	44.9
절대잔골재율(S/a)	65.0	65.0	65.0	65.0
단위잔골재량(S)	1,040	1,028	1,028	1,028
단위굵은골재량(G)	572	617	617	617
유동화제(kg/m ³)	4.70	4.70	4.70	4.70
강섬유(kg/m ³)	40	40	40	40
혼화제(kg)	4.70	4.70	4.70	4.70
금결재(CX, kg)	27.12 (C×6%)	18.80 (C×4%)	28.20 (C×6%)	37.60 (C×8%)
전중량(kg)	2,338	2,357	2,366	2,375

4.1.2 현장배합

설계 상의 시방배합을 연구대상 현장의 골재 표면수 및 입

도시험을 통한 조건에 부합하도록 현장배합으로 설계하였다.

(1) 일반 습식 숏크리트배합

- 모래의 표면수량(c)=2.3%
- 자갈의 표면수량(d)=0%
- 모래가 No.4체에 남는 양(a)=3.9%
- 자갈이 No.4체를 통과하는 양(b)=11.1%

(2) 강섬유 습식 숏크리트배합

- 모래의 표면수량(c)=2.3%
- 자갈의 표면수량(d)=0%
- 모래가 No.4체에 남는 양(a)=3.3%
- 자갈이 No.4체를 통과하는 양(b)=11.1%

습식 숏크리트 현장배합을 설계하기 위해 입도를 고려하여 골재량을 설계하면 다음 식 (3) 및 (4)과 같다.

$$X = \frac{100S - b(S+G)}{100 - (a+b)} \quad (3)$$

$$Y = \frac{100G - a(S+G)}{100 - (a+b)} \quad (4)$$

다시 표면수를 고려하여 수정한 골재와 공급수량으로 환산 하면 다음 식 (5)-(7)와 같다.

$$\text{모래 } X' = \frac{X(100+c)}{100} \quad (5)$$

표 5. 몰드공시체 일반 습식 숏크리트 압축강도시험 성과

시료 번호	배합비 (W/C) %	면적 (mm ²)	시료 (D×H)	재령	금결재 (%)	시험결과			평균 (N/mm ²)	비고	
						하중(KN)	보정 계수	강도결과치 (N/mm ²)			
1	45	22500	15×15	f1	4	197.93	1	8.8	8.6		
2						190.75	1	8.5			
3						192.36	1	8.5			
1					6	241.45	1	10.7	10.7		
2						244.20	1	10.9			
3						238.40	1	10.6			
1					8	253.45	1	11.3	11.3		
2						257.40	1	11.4			
3						248.65	1	11.1			
1					f3	4	281.45	1	12.5		12.7
2							294.05	1	13.1		
3							283.60	1	12.6		
1				6		306.87	1	13.6	14.1		
2						316.75	1	14.1			
3						326.64	1	14.5			
1				8		335.10	1	14.9	15.3		
2						350.90	1	15.6			
3						348.65	1	15.5			
1				f28		4	479.55	1	21.3	21.4	
2							492.40	1	21.9		
3							470.45	1	20.9		
1					6	549.80	1	24.4	24.7		
2						578.40	1	25.7			
3						541.05	1	24.0			
1	8	601.05	1		26.7	27.8					
2		653.35	1		29.0						
3		624.50	1		27.8						

$$\text{자갈 } Y' = \frac{Y(100+d)}{100} \quad (6)$$

$$\text{물 } Z' = \frac{100W-(cX+dY)}{100} \quad (7)$$

4.2 압축강도시험 결과 및 분석

이 연구의 시험을 실시하기 위해 공시체를 제작하여 재령 1일, 3일 및 28일에 대해 각 3회식 그리고 급결제 4%, 6%, 8%에 대해 시험한 결과는 일반 습식 숏크리트 및 강섬유 습식숏크리트 압축강도는 표 5와 같고, 급결제 변화량에 의한 압축강도는 그림 3과 같다.

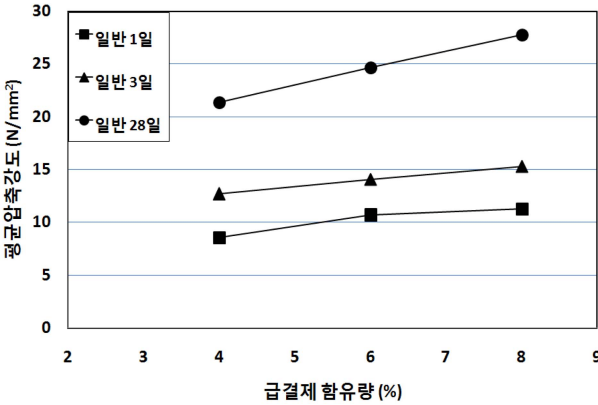


그림 3. 급결제 변화량에 의한 압축강도

일반 습식 숏크리트 압축강도 재령 1일 일 때 급결제 4%는 8.6N/mm², 6%는 10.7N/mm², 8%는 11.3N/mm²이며, 재령 3일의 경우 4%는 12.7N/mm², 6%는 14.1N/mm², 8%는 15.3N/mm²이고, 재령 28일 경우 4%는 21.4N/mm²,

6%는 24.7N/mm², 8%는 27.8N/mm²으로 나타나고 있다. 그리고 강섬유 습식 숏크리트 공시체 압축강도 1일강도 10N/mm² 이상 및 3일강도 14N/mm² 이상, 코어채취 28일 압축강도품질기준 20N/mm² 이상을 확보하기 위해서는 급결제 6% 사용이 적합한 것으로 판단되었다.

이 철도터널 현장에 사용하기 위해 급결제 6%에 대한 일반 습식 숏크리트 재령 3일은 14.1N/mm², 재령 28일은 24.7N/mm²이며, 강섬유 습식 숏크리트 재령 3일의 경우 3.5N/mm², 재령 28일 5.7N/mm²으로 나타나고 있다. 그러므로 습식 숏크리트의 중요성은 품질과 강도에 좌우되고 강도는 골재배합의 영향에 따라 다르게 나타나므로 현장배합시의 세심한 주의가 요구되어 반듯이 사전에 시험을 실시한 후에 시공하여야 한다.

4.3 휨강도 시험

이 연구의 시험을 실시하기 위해 공시체를 제작하여 재령 3일 및 28일에 대해 각 3회식 그리고 급결제 4%, 6%, 8%에 대해 시험한 결과 강섬유 습식 숏크리트 압축강도는 표 6과 같고, 급결제 변화량에 의한 휨강도는 그림 4와 같다. 또한 강섬유 습식 숏크리트의 휨강도 재령 3일 일 때 급결제 4%는 2.8N/mm², 6%는 3.5N/mm², 8%는 4.5N/mm²이며, 재령 28일의 경우 4%는 4.6N/mm², 6%는 5.7N/mm², 8%는 7.2N/mm²으로 나타나고 있다.

4.4 코어압축강도 시험결과 및 분석

이 연구의 시험을 실시하기 위해 공시체를 제작하여 재령 28일에 대해 각 3회식 그리고 급결제 4%, 6%, 8%에 대해 시험한 결과는 일반 습식 숏크리트 및 강섬유 습식 숏크리트 코어압축강도는 표 7 및 8과 같다.

표 6. 습식 현장배합 휨강도시험

시료 번호	배합비 (W/C) %	면적 (mm ²)	시료 (D×H)	재령	급결제 (%)	시험결과			평균 (N/mm ²)	비고
						하중(KN)	보정계수	강도결과치 (N/mm ²)		
1	44.9	67500	15×15×45	f3	4	21.15	1	2.8	2.8	
2						21.50	1	2.9		
3						20.30	1	2.7		
1					6	25.30	1	3.4	3.5	
2						26.27	1	3.5		
3						26.70	1	3.6		
1					8	32.80	1	4.4	4.5	
2						34.40	1	4.6		
3						35.15	1	4.7		
1				f28		4	35.95	1	4.8	4.6
2							34.50	1	4.6	
3							32.55	1	4.3	
1	6	44.95	1			6.0	5.7			
2		41.35	1			5.5				
3		41.00	1			5.5				
1	8	55.20	1			7.4	7.2			
2		51.25	1			6.8				
3		54.95	1			7.3				

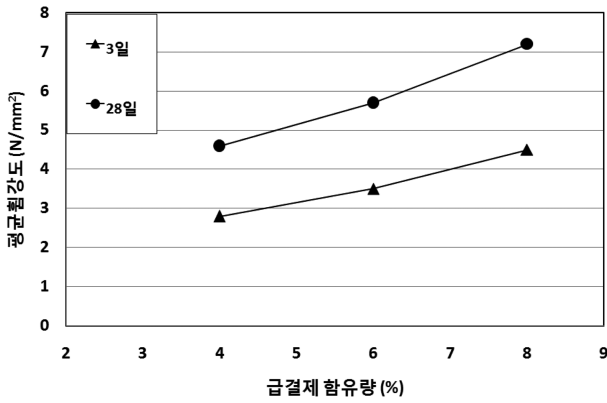


그림 4. 급결제 변화량에 의한 힘강도

일반 습식 숏크리트 평균 코어압축강도는 재령 28일에 급결제 4%는 19.3N/mm², 6%는 21.1N/mm², 8%는 22.6N/mm²이며, 강섬유 습식 숏크리트 공시체 평균 코어압축강도는 재령 28일에 급결제 4%는 19.4N/mm², 6%는 24.0N/mm², 8%는 22.1N/mm²로 나타나고 있다. 코어채취 28일 압축강도품질기준 20N/mm² 이상을 확보하기 위해서는 급결제 6% 사용이 적합한 것으로 판단되고, 급결제 함유량에 따른 코어압축강도는 그림 5와 같다.

4.5 리바운드의 결과 분석

NATM 급결제 함유량에 따른 습식 숏크리트타설 시 리바

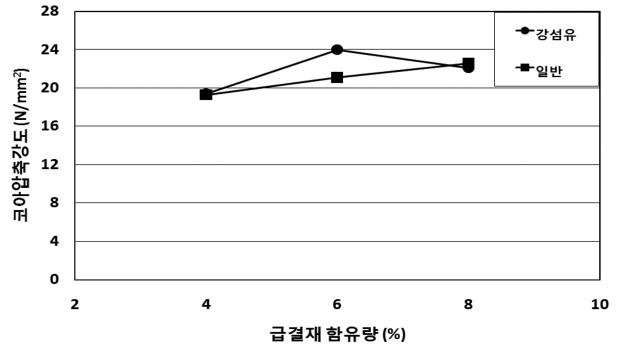


그림 5. 급결제 함유량에 따른 코어압축강도

운드 된 터널바닥에 전체적으로 시트를 깔고, 타설 후 이를 수거하여 계량함으로써 반발 양을 구하였다. 숏크리트 1m³를 뽑어 붙이기를 시행하여 시트위에 리바운드 된 반발 양을 계량하여 다음 식 (8)으로 산출하였다.

$$\text{반발률} = \frac{\text{리바운드 된 재료의 중량}}{\text{시료의 총중량}} \times 100 \quad (8)$$

이 연구에서는 급결제 함유율 4%, 6%, 8%로 변화를 주어 식 (8)에 의하여 계산한 결과 일반 습식 숏크리트의 4%일 때 16.8%, 6%일 때 12.7%, 8%일 때 9.8%로 나타내고 있다. 또한 강섬유 습식 숏크리트의 경우는 4%일 때

표 7. 일반 습식 숏크리트 평균 코어압축강도

시료 번호	급결제 (%)	CORE SIZE			최대하중 (KN)	최대강도 (N/mm ²)	보정 계수	압축강도 (N/mm ²)	평균강도 (N/mm ²)
		평균지름 (mm)	단면적 (mm ²)	평균높이 (mm)					
1	4	100	7850	105	166.6	21.2	0.90	19.1	19.3
2				122	164.2	20.9	0.93	19.5	
3				94	169.4	21.6	0.89	19.2	
1	6	100	7850	83	179.8	22.9	0.89	20.4	21.1
2				92	182.4	23.2	0.89	20.7	
3				95	196.2	25.0	0.89	22.2	
1	8	100	7850	75	188.2	24.0	0.89	21.3	22.6
2				90	204.6	26.1	0.89	23.2	
3				74	206.0	26.2	0.89	23.4	

표 8. 강섬유 습식 숏크리트 평균 코어압축강도

시료 번호	급결제 (%)	CORE SIZE			최대하중 (KN)	최대강도 (N/mm ²)	보정 계수	압축강도 (N/mm ²)	평균강도 (N/mm ²)
		평균지름 (mm)	단면적 (mm ²)	평균높이 (mm)					
1	4	100	7850	84	171.2	21.8	0.89	19.4	19.4
2				85	174.8	22.3	0.89	19.8	
3				93	166.4	21.2	0.89	18.9	
1	6	100	7850	76	217.4	27.7	0.89	24.6	24.0
2				77	206.2	26.3	0.89	23.4	
3				82	210.8	26.9	0.89	23.9	
1	8	100	7850	86	187.8	23.9	0.89	21.3	22.1
2				87	195.2	24.9	0.89	22.1	
3				95	202.4	25.8	0.89	22.9	

표 9. 일반 습식 슛크리트 반발률

시료번호	급결제 함유량 (%)	공시체 압축강도(MPa)			코어 압축강도(MPa)	반발률 (%)
		1일	3일	28일	28일	
1	4	8.6	12.7	21.4	19.3	16.8
2	6	10.7	14.1	24.7	21.1	12.7
3	8	11.3	15.3	27.8	22.6	9.8

표 10. 강섬유 습식 슛크리트 반발률

시료번호	급결제 함유량 (%)	공시체 휨강도(MPa)		휨인성계수율(%)	반발률 (%)	강섬유 혼입율(%)		코어 압축강도 (MPa)
		3일	28일	28일		셋기시험	코어채취	
1	4	2.8	4.6	79.9	15.6	95.7	87.8	19.4
2	6	3.5	5.7	89.6	12.1		90.5	24.0
3	8	4.5	7.2	76.2	10.6			22.1

15.6% 6%일 때 12.1%, 8%일 때 10.6%로서 일반 습식 슛크리트보다 강섬유 습식 슛크리트가 반발률이 적게 나타나고 있으며, 표 9 및 표 10과 같다.

따라서 터널 전체적으로 슛크리트를 타설한 후 반발 양을 산출해 이 결과 급결제 함유량이 4%에서 8%로 커질수록 반발률이 작아진다는 것을 알 수 있으며, 반발률은 10~20% 범위 이내로서 시방서기준에 비추어 볼 때 적합하다고 사료된다.

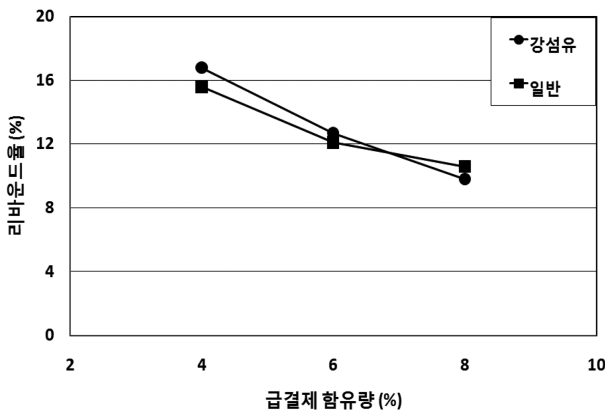


그림 6. 급결제 변화량에 의한 반발률

5. 결 론

- 이 연구는 철도터널 습식 슛크리트에 급결제(accelerator) 함유율 4%, 6%, 8%로 변화를 주어 일반 습식 슛크리트와 강섬유 습식 슛크리트 시험결과로부터 압축강도, 휨강도, 빔강도 시험을 실시함과 동시에 습식 슛크리트공법 반발 양을 분석하여 반발 양을 줄일 수 있는 급결제 함유율 정보를 제시하고자 하였다.
- 시험결과 일반 습식스�크리트의 경우 급결제의 함유율이 커질수록 재령에 관계없이 압축강도도 커진다는 것을 알 수 있었으며, 강섬유 습식스�크리트 공시체 압축강도 1일강도 10N/mm² 이상 및 3일강도 14N/mm² 이상, 코어채취 28일 압축강도품질기준 20N/mm² 이상을 확보하기 위해서는 급결제 6% 사용이 적합하다고 사료된다.
- 또한 리바운드시험 결과는 급결제 함유율 4%, 6%, 8%로 변화를 주었을 때 일반 습식 슛크리트의 4%는 16.8%,

6%는 12.7%, 8%는 9.8%로 나타내고 있다. 그리고 강섬유 습식 슛크리트의 경우 4%는 15.6% 6%는 12.1%, 8%는 10.6%로서 일반 습식 슛크리트 보다 반발률이 적게 나타났으며, 그러므로 급결제 함유율이 커질수록 반발률이 작아진다는 것을 알 수 있었다.

- 이 연구결과 습식 슛크리트의 반발률은 급결제의 함유율이 커질수록 작아진다는 것과 일반 슛크리트보다 강섬유 슛크리트의 반발률이 작다는 결론을 얻었다. 앞으로 급결제의 함유율과 경제성과의 관계, 일반 슛크리트와 강섬유 슛크리트의 경제성분석을 반발률과 비교하여 실시함으로써 공법선정 시 기술적 및 경제적 종합평가기준을 마련할 필요가 있다.

참고문헌

권인환(2000) 개정 NATM 터널공법, 원기술.
 서울지하철공사(1983) 지하철 3, 4호선 NATM 기술성과 보고서.
 이양규(2010) 토목시공학, 보문당, pp. 572-578.
 이양규 · 권인환(2001) Shotcrete 리바운드량 감소를 위한 실험적 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제21권 제4호, pp. 499-508.
 이양규 · 전준태 · 김종열(2004) NATM 터널의 건 · 습식 슛크리트 강도시험에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권 제2호, pp. 239-245.
 안상기(1993) 슛크리트의 리바운드 감소에 대한 재료개발 연구시험, 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제5권.
 전준태 · 이양규(2003) 습식 슛크리트 리바운드량 감소를 위한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권 제1호, pp. 89-95.
 장동일 · 손영현(1998) 강섬유와 실리카흄이 슛크리트의 리바운드율에 미치는 영향. 한국콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제10권.
 한국수자원공사(1993) 슛크리트 설계 및 시공. NATM 기술성.
 한국콘크리트학회(2009) 콘크리트표준시방서.
 한국철도시설공단(2011) 경부고속철도 건설공사(-2), pp. 389-472.
 樓井春輔, 足立紀尙(1992) 도시 터널의 NATM공법, 창우출판사,
 土質工學會(1986) NATM工法の調査, 設計から施工まで, 日本土質工學會.
 Franklin, John and Maurice B. Dusseault (1989) Rock Engineering, McGraw-Hill, pp. 552-553.
 Hausmann, Anfred R (1990) Engineering Principles of Ground Modification, McGraw-Hill, pp. 321-335.

(접수일: 2012.3.23/심사일: 2012.7.12/심사완료일: 2012.8.14)