터널 배면공동 뒤채움재 개발과 노후터널의 적용에 관한 연구

A study on development of the high-flowable filling material and application in the old tunnel

마상준*[1], 서경원*[2], 배규진*[3], 안상철*[4], 임경하*[5]
Ma, Sang-Joon · Seo, Kyoung-Won · Bae, Gyu-Jin · An, Sang-Chul · Im, Kyung-Ha

Abstract

Most tunnel damage such as cracks or leakage which exist in tunnel liner commonly, is caused by the cavities that exist behind the tunnel liner, through the tunnel safety inspections. These cavities were analysed to check if they affect the stability of tunnels. This study is on the development of the controlled low-strength and flowable filling material which an be applied to the cavity behind the tunnel lining. The backfilling material studied here is crushed sand and stone-dust which is in cake-state and is a by-product obtained in the producing process of aggregate. Varying the compound mixing ratio, laboratory tests of compression test and chemical analyses were carried out. In addition, the material was applied to an old tunnel for the performance assessment.

Keywords: Tunnel lining cavity, backfilling material, mortar

요 지

터널에서의 배면공동은 설계·시공·유지관리중 다양한 원인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. 특히, 터널 천단부 라이닝 부분에는 콘크리트 타설후 재료분리 등으로 인해 터널 천단부에 배면공동이 발생이 되는데, 이러한 터널 배면공동은 라이닝 균열, 누수 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 밝혀지고 있다. 본 연구는 석산에서 발생되는 석분을 이용하여 터널 배면공동 및 지하공동의 충전용 모르타르를 개발하고 이를 노후터널에 적용함으로서 개발재료의 현장적용성 등에 대한 시험을 수행하였다.

주요어: 터널배면공동, 뒤채움재, 충전공법, 모르타르

*1 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원
*2 정회원, 한국건설기술연구원 연구원
*3 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원
*4 리폼시스템, 연구소장
*5 리폼시스템, 연구원

1. 서론

터널에서의 배면공동은 설계·시공·유지관리중 다양한 원인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 된다. ASSM·NATM 터널 모두 천단부에는 재료분리, 주입방법의 문제 등으로 인해 많은 공동이 존재하며 이러한 공동은 라이닝에 국부적으로 불균등한 하중을 작용하는 등 충분한 지반반력을 기대할 수 없게 한다. 또한 터널에서의 배면공동은 라이닝 균열, 누수 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 밝혀지고 있다. 이러한 터널배면공동의 보강공법은 공동을 뒤채움하는 방법이 일반적으로 사용되고 있으며, 사용되는 재료로는 시멘트 페이스트, 폴리우레탄, 경량기포 콘크리트 등이 사용되고 있고 최근에는 산업부산물인 플라이애쉬 등을 사용한 재료들이 개발되고 있다 (대덕공영, 1999).

본 연구는 터널 배면공동 뒤채움용 재료 및 공법 개발을 위한 연구로써 우선 국내외 터널 배면공동 현황에 대한 조사를 하였고, 국내 터널 관련 시방서중 배면공동 뒤채움에 대한 물성값의 기준 및 주입규정에 대한 조사를 하였다. 위의 분석을 바탕으로 기존의 배면공동 뒤채움재를 대신할 수 있는 경제적이면서 친환경적인 뒤채움재 개발을 위한 실내 시험과 노후터널의 현장적용성에 대한 시험을 수행하였다.

2. 터널배면 충전공법

2.1 터널배면공동의 발생원인

터널 라이닝과 지반사이에 공동이 발생하는 원인은 다음 표 1과 같이 설계·시공·유지관리상의 원인으로 구분할 수 있으며 아래의 원인들이 복합적으로 작용하여 발생한다. 그러나, 오래된 터널의 경우 설계 및 시공 자료가 불충분하여 실제 터널의 배면공동의 발생원인과 규모를 추정하는 것은 매우 어려운 일이다.

2.2 터널배면공동 현황

본 연구에서는 터널의 배면공동의 분포 현황을 분석하고자 ASSM 터널과 NATM 터널의 안전진단 보고서중 GPR 탐사자료를 토대로 탐사 길이와 각 측선별로 존재하는 공동의 현황을 분석하였다. 조사대상 터널은 ASSM 터널 7개소, NATM 터널 13개소 등 총 20개소 터널에 대해서 조사하였다.

ASSM 터널은 전체 탐사길이의 5.72%의 구간에서 배면공동이 검사되었고, 비교적 최근에 건설된 NATM 터널들은 전체 탐사 길이중 1.50%의 구간에서 배면공동이 검사되어 전체적으로 총 탐사길이의 3.54%의 구간에서 배면공동이 조사되었다. 또한 조사된 공동의 68%

표 1. 터널 배면공동의 발생원인

설계상의 원인	(1) 부적합한 배수체계 설계로 용출수가 많을 경우 라이닝 배면의 토사가 유출되어 공동이 발생·확대되는 경우가 있다. (2) 지반조사시 석회암 지대 혹은 광산지대 등에서 자연적 혹은 인공적으로 존재하는 공동이 사전지반조사에서 누락되는 경우가 있다.
시공상의 원인	(1) 재래식 터널 굴착중 라이닝과 지반사이의 공간을 목재 등으로 채운 경우 목재의 부식 혹은 뒤채움 과정에서 미충전할 경우 공동으로 남게된다 (2) 최근에 건설된 NATM 터널도 콘크리트 라이닝의 타설 방법과 재료 분리 등으로 지반과 라이닝 사이에 공동이 발생될 수 있고 특히 천단부에는 주입방법, 재료적 문제 등으로 많은 공동이 존재한다. (3) 과대여굴로 인한 공동의 충전이 충분치 못할 경우 공동이 발생된다. (4) 지하수가 과대 유입될 경우 공동이 발생·확대된다. (5) 연약 지반에서 많이 사용되는 와이어 메쉬나 H형강의 기하학적 형태로 인하여 숏크리트 타설시 뒷부분에 공동이 발생된다.
유지관리상의 원인	(1) 지하수와 함께 토사가 유출될 경우 배면의 공동이 발생·확대 될 수 있다. (2) 경과년수로 인한 자연적인 현상으로 라이닝 배면의 공동이 발생·확대 될 수 있다. (3) 지하수 유입에 의한 숏크리트 입자 유출로 숏크리트 두께 경감과 함께 공동이 발생된다.

표 2. 터널 배면공동 현황

터널명	완공년도	시공법	연장 (m)	좌측부 공동길이 (m)	천단부 공동길이 (m)	우측부 공동길이 (m)	탐사 총 연장 (m)
○○터널	1939	ASSM	1,010	3	11	6	1,816
○○터널	1942	ASSM	2,730	7	11	2	1,957
○○터널	1978	ASSM	1,280	10	243	31	4,184
○○터널	1978	ASSM	1,260	107	385	25	3,787
○○터널	1981	ASSM	1,231	53	114	37	1,300
○○터널	1984	ASSM	100	0.8	3.3	0.3	295
○○터널	1984	ASSM	90		0.5	0.3	265
○○터널	1988	NATM	1,296	42	192	51	3,508
○○터널	1991	NATM	502	9	39.4	15.5	
○○터널	1991	NATM	495		47.8	3.52	
○○터널	1991	NATM	752	1.8	6.3	1.2	3,610
○○터널	1991	NATM	743	1.2	11.6	1.8	3,565
○○터널	1991	NATM	286	31	53.2	3	3,454
○○터널	1991	NATM	358	11.7	44.9	3.2	
○○터널	1992	NATM	250	1	1	1	508
○○터널	1992	NATM	250	1	3		596
○○터널	1992	NATM	340				487
○○터널	1992	NATM	400	17	14	3	775
○○터널	1992	NATM	300		3		742
○○터널	1995	NATM	620	4	14		640

는 터널 천단부에 집중된 것으로 조사되었는데 이것은 재료분리, 주입방법 때문인 것으로 사료된다. 그러나 표 2의 GPR 탐사 결과 확인된 공동의 규모와 실제 뒤채움재의 사용량과는 큰 차이를 보이고 있는데, 공동이 지반쪽으로 더 확대되어 나타나는 경우와 상호 연결된 공동, 뒤채움재의 주입압에 의해 유출되는 경우가 많아 GPR 탐사결과와 뒤채움재의 사용량과는 큰 차이를 보이고 있다. 실례로 1개소당 공동 규모의 차이는 크지만 서울지하철의 경우 1공당 0.99m^3의 뒤채움재가 소요되었고 (서강천, 2001), ○○터널의 경우 GPR 탐사에 의해 약 140m^3의 공동이 존재할 것으로 추정하였으나 실제 뒤채움재는 400m^3을 사용하고도 작업을 완료하지 못한 경우도 있다 (한국건설기술연구원, 2000). 또한, 남산2호 터널에서는 2차례의 GPR탐사결과 공동이 약 1,470~1,830m^3으로 추정하였으나 현장실측에서는 17,760m^3으로 터널 총 길이의 85%에서 공동이 조사된 경우가 있다 (이영남, 2001).

2.3 터널배면공동 충전 규정

최근 국내에서 시행되고 있는 터널 배면공동 뒤채움재 관련 규정을 요약하면 다음 표 3과 같다. 각 규정마다 뒤채움재의 재료적 성질이 유사하게 규정되어 있는데, 신설터널 혹은 변상터널의 배면공동 뒤채움재의 물리적 특성 중 일축압축강도는 보통 10kgf/cm^2 이상, 플로우값은 25±5cm, 주입압은 2kgf/cm^2 이상으로 규정하고 있지만 상기의 물성값들의 규정이 강제적이진 않고 현장여건에 따라 물성값을 달리 적용하고 있다. 한 예로 조남

표 3. 국내 터널 관련 시방서의 뒤채움재에 관한 물성 규정

터널 구분	기관명	보고서 명	배합비의 강도	주입압	플로우 값(cm)
변상 터널	시설안전기술공단 (1996)	터널의 배면공동 충전을 위한 현장 적용성 연구	20kgf/cm^2	2kgf/cm^2	–
	한국도로공사 (1992)	도로설계 요령	10kgf/cm^2	–	–
	일본 (철도총합기술연구소)(昭和61年)	변상터널 대책공 설계 메뉴얼	10kgf/cm^2 (붕괴성지반 : 20～30 kgf/cm^2)	1～2 kgf/cm^2	25±5
신설 터널	한국수자원공사 (1997)	수로터널 설계 및 시공지침 (안)	–	–	–
	철도청(1999)	철도공사 전문시방서	–	2～4 kgf/cm^2	25±5
	한국건설기술연구원 (1998)	국내터널설계 기술력 향상을 위한 신기술 연구 (I)	10kgf/cm^2	–	–
	건설교통부 (1996)	터널표준시방서 (NATM편)	–	–	–
	대한터널협회 (1999)	터널표준시방서	–	1～2 kgf/cm^2	–
	고속전철사업 기획단 (1991)	고속철도 터널 표준시방서 (안)	10kgf/cm^2	–	25±5

1터널 하부의 폐광은 50kgf/cm^{2}의 경량기포 모르타르로 충전되었고 (금호건설, 1998), 상리터널 하부구간에서 발견된 지하갱도는 60kgf/cm^{2}의 경량기포 모르타르로 충전되었고 (서강천, 2001), 서울 지하철의 배면공동은 100kgf/cm^{2}의 경량기포 모르타르로 충전된 사례가 (서강천, 2001) 있다.

3. 석분을 이용한 터널배면공동 충전재 개발

본 연구에서 개발된 뒤채움재의 주성분은 석분과 부순모래로서 전국의 5개 석산에서 발생되는 재료를 이용하였다. 부순 모래는 평균 조립률 3.30을 보이고 있고, 비중은 2.41～2.71이며, 석분은 비중이 1.86～2.18이고 배합비 설계에 중요한 함수비는 5.6～33.4%로 다양한 값을 보이고 있는데 이는 부순모래의 제조과정중 발생하는 석분을 응집시키기 위한 응집제의 사용차이 및 탈수 상태의 차이 때문인 것으로 분석된다. 석분의 함수비는 뒤채움재의 배합비 설정에 밀접한 관계를 가지므로 함수비를 사전에 분석하는 것이 매우 중요하다.

3.1 실내시험 방법

본 연구에서는 우선 전국의 5개 석산에서 채취한 부순모래와 이의 제조과정에서 발생하는 석분을 수집하여 국내 터널 배면공동 뒤채움재의 물성규정에 맞도록 배합비를 설계하고 압축강도, 플로우, 동결융해시험, 투수계수, 길이변화율에 대한 시험을 수행하였다. 본 연구에서는 뒤채움재의 일반적 규정인 압축강도 10kgf/cm^{2}과 플로우 값 250±50mm를 만족하는 범위내에서 사전 배합비 분석을 통하여 (한국건설기술연구원, 2000) 다음 표 4와 같은 각 석산별 배합비를 설계하였다. 또한 각 석산의 배합비는 최근 지반 개량 및 보강재로서 시멘트 사용이 환경문제가 되고 있으므로 (천병식, 2001) 시멘트 사용량을 최대로 억제하여 10% 이하로 낮추어 배합비를 설계하였다.

표 4. 석산별 뒤채움재 배합비 **(단위: %)**

시료번호	물	시멘트	석분	부순모래	유동화제	고화제
김해석산의 배합비						
K1	13.04	4.35	39.12	43.47	0.02	–
K2	13.04	4.35	38.14	43.47	0.02	0.98
K3	13.04	4.35	36.55	43.97	0.02	1.98
K4	13.04	6.52	36.94	43.46	0.03	–
K5	13.04	6.52	36.02	43.46	0.03	0.92
K6	13.04	6.52	35.10	43.46	0.03	1.85
K7	13.04	8.69	34.77	43.46	0.04	–
K8	13.04	8.69	33.90	43.46	0.04	0.87
K9	13.04	8.69	33.03	43.46	0.04	1.74
삼동석산의 배합비						
S1	17.69	6.17	34.97	41.14	0.03	–
S2	17.54	6.12	33.80	40.78	0.03	1.73
S3	17.39	6.06	32.65	40.43	0.03	3.44
S4	17.69	8.23	32.91	41.14	0.04	–
S5	17.69	8.23	32.09	41.14	0.04	0.82
S6	17.69	8.23	31.26	41.14	0.04	1.65
쌍용석산의 배합비						
SY1	13.04	6.52	36.94	43.46	0.03	–
SY2	12.92	6.46	35.69	43.07	0.03	1.83
SY3	12.80	6.40	34.46	42.68	0.03	3.63
SY4	13.04	8.69	34.77	43.46	0.04	–
SY5	13.04	8.69	33.90	43.46	0.04	0.87
SY6	13.04	8.69	33.03	43.46	0.04	1.74
일산석산의 배합비						
I1	13.04	6.52	36.94	43.46	0.03	–
I2	12.92	6.46	35.69	43.07	0.03	1.83
I3	12.80	6.40	34.46	42.68	0.03	3.63
I4	13.04	8.69	34.77	43.46	0.04	–
I5	13.04	8.69	33.90	43.46	0.04	0.87
I6	13.04	8.69	33.03	43.46	0.04	1.74
남양석산의 배합비						
N1	13.04	6.52	36.94	43.46	0.03	–
N2	12.92	6.46	35.69	43.07	0.03	1.83
N3	12.80	6.40	34.46	42.68	0.03	3.63
N4	13.04	8.69	34.77	43.46	0.04	–
N5	13.04	8.69	33.90	43.46	0.04	0.87
N6	13.04	8.69	33.03	43.46	0.04	1.74

3.3 실내시험 결과

3.3.1 일축압축강도

표 5에는 각 석산 뒤채움재의 재령 7일, 28일의 일축압축강도 값을 보여주고 있다. 본 연구에서 개발된 뒤채움재의 일축압축강도는 각 석산의 배합비에 따라 큰 편차를 보이고 있지만 일부 배합비를 제외하고는 10kgf/cm^2 이상을 만족하는 것으로 분석되었다. 특히 김해, 삼동, 쌍용석산의 일부시료는 강도값이 30kgf/cm^{2}를 상회하는 결과를 보이고 있어 시멘트와 경화제 사용을 줄여도 기준강도에 만족하는 것으로 분석되었다. 이와 같이 석분의 혼합비가 유사하더라도 각 석산별로 강도의 큰 차이를 보이는 것은 석산별 함수비와 사용한 부순모래의 입도 분포가 다르기 때문인 것으로 사료된다.

3.3.2 플로우 시험

뒤채움재의 플로우 시험은 표 3의 국내외 터널 배면공동 뒤채움재의 관련 규정을 참고로 250±50mm 이상이 되도록 물량 및 유동화제의 양을 조절하여 시험하였다. 특히 석분은 교반시 입자들의 응집에 의해 교반이 잘 않되고 석산마다 함수비 등에 따라 다른 교반 특징을 보이고 있으므로 물량조절이 중요하다.

다음 표 6에는 배합비별 플로우 값을 나타내는데 김해석산의 경우 평균 29.6cm, 삼동석산 27.9cm, 쌍용석산 30.5cm, 일산석산 28.33cm, 남양석산 32.1cm의 값을 보여주고 있어 전체적으로 250±50mm 이상의 값을 나

표 5. 석산별 배면공동 뒤채움재의 일축압축강도 값 (단위: kgf/cm^2)

김해석산

시료 / 재령	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9
7일	5.9	6.8	8.9	9.8	11.0	14.1	10.9	11.9	18.1
28일	7.1	10.6	12.4	13.0	15.7	21.1	15.3	16.8	24.7

삼동석산

시료 / 재령	S1	S2	S3	S4	S5	S6
7 일	14.8	16.4	16.9	20.5	24.0	30.1
28 일	19.2	23.2	25.5	29.4	34.5	45.2

쌍용석산

시료 / 재령	SY1	SY2	SY3	SY4	SY5	SY6
7일	9.4	13.5	16.2	19.4	26.7	31.9
28 일	11.7	16.8	19.8	27.1	32.8	43.4

일산석산

시료 / 재령	I1	I2	I3	I4	I5	I6
7일	6.2	7.8	9.3	12.4	13.4	16.7
28일	7.5	9.8	11.9	14.8	16.1	20.5

남양석산

시료 / 재령	N1	N2	N3	N4	N5	N6
7 일	5.8	7.3	9.4	10.0	11.8	13.6
28 일	7.9	9.1	14.0	13.9	16.6	18.4

표 6. 석산별 배면공동 뒤채움재의 플로우 값 (단위 : cm)

김해 석산										
시료 번호	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	K9	평균
플로우값	32.0	28.0	28.0	29.5	28.0	28.5	30.5	32.0	30.0	29.6

삼동 석산							
시료번호	S1	S2	S3	S4	S5	S6	평균
플로우값	28.0	27.0	26.5	28.0	30.0	28.0	27.9

쌍용 석산							
시료번호	SY1	SY2	SY3	SY4	SY5	SY6	평균
플로우값	31.5	32.0	30.0	30.0	30.0	29.5	30.5

일산 석산							
시료번호	I1	I2	I3	I4	I5	I6	평균
플로우값	31.5	30.0	27.0	29.5	27.0	28.0	28.8

남양 석산							
시료번호	N1	N2	N3	N4	N5	N6	평균
플로우값	32.0	31.0	34.0	31.5	32.0	32.0	32.1

타내고 있다. 또한 남양석산의 플로우 값이 타 석산의 플로우 값보다 큰 경향을 보이고 있는데, 일축압축강도 값은 상대적으로 제일 작은 값을 보이고 있다. 이는 주 사용재료인 석분, 부순모래의 입도 분포 특성, 함수비 등에 의한 영향인 것으로 사료된다.

3.3.3 동결융해시험

뒤채움재와 같은 저강도 고유동 재료는 심한 기상작용 특히 저온과 고온이 반복되는 지방에서 뒤채움재내 수분의 동결융해에 의하여 체적이 팽창하고, 미소균열이 발생하여 강도저하는 물론 심할 경우에는 표면에 박리현상이 일어난다. 이와 같은 성능저하는 동결과 융해가 반복되는 현상에 의해 촉진되고, 동해는 일반적으로 이 작용을 반복해 주는 동결융해시험에 의해 평가된다.

동결융해시험에는 동결과 융해의 반복시 동탄성계수를 측정하는 방법 (KS F 2456)과 압축강도 및 손실량 (KS F 2332)을 측정하는 방법이 있는데, 본 시험에서는 KS F 2332에 의해 부피변화 및 압축강도, 손실량의 변화를 측정하였다.

시험에 사용된 배합비는 표 4의 K8의 배합비인 "석분 : 부순모래 : 시멘트 : 경화제 : 물 : 유동화제 = 33.90 : 43.46 : 8.69 : 0.87 : 13.04 : 0.04"의 배합으로 시험하였다. 시험은 그림 1에서 보듯이 동결과 융해의 6주기가 끝난 후 종료되었으며 이후에는 심한 부피변화 및 시료의 손실로 인해 시험 수행이 불가능하였다. 시험 결과 시료 손실은 1주기 후 0.11%에서 6주기 후 6.95%로 손실량이 증가하였고 2주기 이후 급격한 손실량이 발생하였다. 이때의 부피 변화는 1.12%에서 6.35%로 팽창된 결과를 보이고 있다. 공시체의 압축강도는 동결과 융해의 주기가 반복될 때마다 현저히 저하되어 1주기 후 압축강도는 13.6kgf/cm^{2}에서 6주기 후 2.1kgf/cm^{2}로 저하되었으며 6주기 이후에는 공시체가 자립하지 못

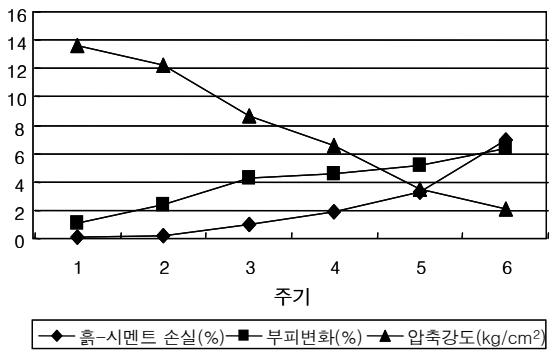


그림 1. 동결융해 시험 결과

할 정도로 시료가 훼손되었다.

본 연구에서는 동결융해에 저항할 수 있는 첨가제 및 배합비는 설계되지 않았으나 기존의 입상 뒤채움재에 비해 동결 저항성에 대해 낮은 투수성 및 수축 특성이 작아 현장 사용시 양호한 뒤채움 결과를 얻을 것으로 사료된다.

3.3.4 길이변화율 시험

건조-수축에 의한 길이변화율은 뒤채움재가 터널 배면공동에 주입되었을 경우 모르타르 경화에 의한 수분의 감소가 발생하고 수분의 양에 따라 모르타르의 길이 변화가 발생하게 된다. 본 연구에서는 뒤채움재의 양생에 따른 길이의 변화를 측정하기 위하여 표 6 K8의 배합비인 "석분 : 부순모래 : 시멘트 : 경화제 : 물 : 유동화제 = 33.90 : 43.46 : 8.69 : 0.87 : 13.04 : 0.04"의 배합에 따라 공시체를 만들고 이를 7일 동안 수중 양생한 후 온도 20±1℃, 습도 60±5%의 상태로 28일간 양생한 후 현미경에 부착된 콤포레이터를 이용하여 길이 변화율을 측정하였다 (KSF 2424). 시험 결과 0.44%의 수축이 발생하였다.

4. 노후터널의 현장적용

배면공동 뒤채움 재료의 현장시험 목적은 석분과 부순모래를 주재료로 개발된 일반 모르타르를 터널 배면공동에 주입함으로써 라이닝과 지반을 일체화시켜 라이닝에 작용하는 지반하중을 터널 구조물에 균등하게 분포시키는데 있다. 그리고 공동 뒤채움 후 효과를 확인하며 장기간에 걸친 터널 거동을 계측하고 향후에 주입된 뒤채움재의 성능평가를 통하여 제품의 품질 개량과 동시에 현재 지반공동의 뒤채움재로 일반적으로 사용되고 있는 시멘트 모르타르와의 성능 비교를 통해 개발하는 뒤채움재의 물성 향상을 목적으로 한다.

4.1 사례 1터널

4.1.1 적용현장 상황

○○터널은 1974년에 준공된 연장 237m의 편도 1차선 도로터널로서 현재 터보씰주입, 모르타르 패칭 등의 보강작업이 수행되었다. 라이닝 천공시 지하수는 물기가 비치는 정도였다.

본 터널은 안전진단 수행시 약 140m^3 규모의 공동이 존재할 것으로 예상하였으나 터널 보강작업시 400m^3을 뒤채움하고도 완전히 충전하지 못하고 작업을 중단한 상태이다. 따라서 본 터널의 경우 지반과 라이닝 사이에 존재하는 공동은 공동상호간 혹은 지반의 불연속면과 상호연결되어 있어 탐사규모보다 훨씬 큰 공동이 존재하는 것으로 예상된다.

현장시험은 안전진단자료, GPR 탐사 자료 등을 기초로 공동이 존재하는 터널입구부를 중심으로 라이닝을 천공 (Φ50mm)하여 배면공동을 확인하고 실내시험을 통하여 설계된 배합비로 뒤채움 재료를 현장에서 조달하여 교반후 주입하였다. 또한 배면공동 주입 28일 후 천공하여 충전된 뒤채움재의 강도시험을 통하여 실내에서 수행된 시험과 비교하여 뒤채움재의 강도 특성을 분석하였다.

4.1.2 현장 주입

본 현장주입에서는 시료배합을 실내시험의 결과와 남양 석산 (화강암)에서 운반된 석분과 터널인근의 화강암 석산의 부순모래를 이용하였다. 석분은 수분의 함유량에 따라 플로우 값이 큰 변화를 나타내므로 현장에서 플로우 시험을 수행하여 다음 표 7과 같은 배합비를 설정하였다.

본 시험터널의 주입은 3개소의 공동에 주입은 모노펌프에 장착된 압력계로 주입압을 8~10bar로 주입하고 배면공동이 완전히 충전되어 주입압이 15bar까지 올라갈 때 주입을 멈추었다. 표 8에는 공동별 주입량을 나타내었는데, 총 3개소의 배면 공동에 10.9m^3의 뒤채움재

표 7. 현장시험에 사용된 배합비

재료	부순모래	석분	시멘트	물	유동화제	경화제
중량비(%)	43.46	33.90	8.69	13.01	0.04	0.87

표 8. 공동별 주입량

공 동	A	B	C	D
주입량(m^3)	3.5	4.2	3.2	–

가 주입되고, 각 공동 A, B, C에 비슷한 양이 주입된 것으로 시험되었다.

4.1.3 뒤채움재 강도시험결과

본시험에서는 뒤채움된 모르타르의 양생정도와 경화특성을 분석하기 위하여 시추한 원형코어의 일축압축강도 시험 결과 D:H=1:2의 경우 28.5kgf/cm^2, D:H=1:1인 경우 33.9kgf/cm^2으로 나타나 이것을 150mm의 정육면체 시료의 압축강도로 나타내면 각각 33kgf/cm^2, 40kgf/cm^2의 압축강도를 보이는 것으로 분석된다. 현장시험에 사용된 뒤채움재를 실내에서 50×50×50mm의 정육면체 몰드로 제작한 공시체의 압축강도 결과인 45.2kgf/cm^2, 20.5kgf/cm^2와 비교해 볼 때 지하수가 존재하고 밀폐된 공간에서도 개발된 뒤채움재의 양생이 잘되는 것으로 사료되고 국내 터널 배면 공동 뒤채움재의 일축압축강도 규정인 10~20kgf/cm^2을 만족하는 것으로 사료된다.

4.2 사례 2터널

4.2.1 적용현장 상황

○○터널은 1958년에 건설된 길이 520m의 철도터널로서 1980년에 선형개량으로 폐선된 터널로서 주입시험은 터널 갱구부에서 시행하였으며 지하수는 강우로 인해 물이 소량 유출되는 정도였다.

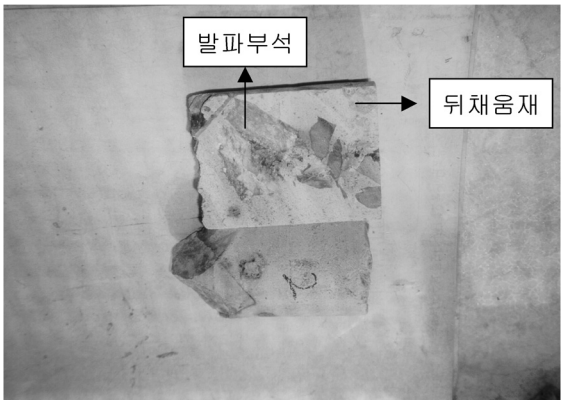


그림 2. ○○터널 배면공동에 뒤채움된 재료의 28일 경과후 코어 사진

4.2.2 현장적용 및 분석

현재 국내 터널 배면공동 주입시 터널구조물에 미치는 영향에 대한 계측 분석 및 계측 사례 분석은 전무한 실정이며 단지 주입압과 주입량과의 관계나 수치해석에 의한 보강효과에 대한 검증이 주를 이루고 있다.

본 연구에서는 현장시험시 뒤채움의 터널배면공동에서의 양생상태를 분석하고자 28일 경과후 코어링에 의한 주입재의 경화정도를 분석하였다.

그림 2는 ○○터널에 주입된 뒤채움재의 28일 후의 주입된 뒤채움재를 보여주고 있는데 그림과 같이 뒤채움재가 발파부석 사이로 잘 부착된 것을 확인할 수 있으며, 시료성형이 곤란하여 포인트로드 시험으로 압축강도를 측정한 결과 30kg/cm^2의 값을 보이고 있다.

표 9. 현장에 주입된 뒤채움재의 일축압축강도

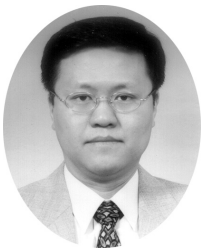
시료 크기	(D : H = 1 : 2) 원형코어				정육면체 시편으로 환산
시료번호	1	2	3	평균	
일축압축강도 (kgf/cm^2)	29.5	28.5	27.5	28.5	33
시료 크기	(D : H = 1 : 1) 원형코어				정육면체 시편으로 환산
시료번호	1	2	3	평균	
일축압축강도 (kgf/cm^2)	34.5	33.3	34.1	33.9	40

5. 결론

1. 본 연구에서는 석산에서 발생되는 부순모래와 석분을 이용한 노후터널 및 지하공동의 뒤채움재로 사용할 수 있는 고유동 저강도 뒤채움재를 개발하였다.
2. 본 연구를 통하여 개발된 뒤채움재의 물성값중 일축압축강도는 평균 30.4kgf/cm^2 이며 뒤채움재의 유동성에 영향을 미치는 플로우 값은 평균 297mm로 분석되었다. 또한 동결융해시험결과 6주기후에는 시료가 심하게 훼손되었으며, 길이변화율 시험결과 0.44%의 수축이 발생하였다.
3. 개발된 뒤채움재의 현장시험 결과 양구터널의 터널의 경우 실내시험에서 양생한 뒤채움재의 일축압축강도 값과 유사하며, 노후터널의 뒤채움재 규정을 만족하는 33kgf/cm^{2}과 40kgf/cm^{2}의 값을 보이고 있다.
4. 터널배면공동의 대책공법으로는 터널배면공동의 충전에 의한 보강이 주를 이루지만 현재 뒤채움재의 공동충전에 의한 터널의 구조개선 등에 관한 계측 및 분석방법은 전무한 실정으로 이에 대한 기준연구가 필요하다.

참고문헌

1. 강선덕, 이동남 (1998), “암석미분 폐스러지를 이용한 경량기포 콘크리트 제조에 관한 연구”, 한국자원공학회지, Vol.35, pp.264-269.
2. 건설교통부 (1996), “터널표준시방서”, pp.86-87.
3. 금호건설 (1998), “고속철도 제1-2공구 조남1터널 폐광보강공법 완료 보고서”, pp.43-48.
4. 대덕공영 (1999), “터널의 배면공동 충전을 위한 현장 적용성 연구”, pp.50-120.
5. 대한터널협회 (1999), “건설교통부 제정 터널표준시방서”, pp.122-123.
6. 대한토목학회 (1996), “건설교통부제정 콘크리트 표준시방서”, pp.30-40.
7. 서강천 (2001), “도심 터널의 맹점과 보수 보강 사례”, 터널기술, Vol.3, No.4, pp.69-79.
8. 이영남외 2인 (2001), “남산 2호터널 개수공사 사례”, 터널워크샵, 중앙대학교.
9. 이진용, 박상규 (2000), “터널 배면 공동 뒤채움 재료의 개발”, 콘크리트학회지, 제12권 제5호, pp.56-60.
10. 천병식 (2001), “지반개량 재료로서의 시멘트 사용에 의한 지반오염문제 및 대책”, 지반공학소식지, Vol.17, No.8, pp.19-22.
11. 철도청 (1999), “철도공사 전문시방서 (토목편)”, pp.544-547.
12. 철도종합기술연구소 (1992), “변상터널 대책공 설계 메뉴얼-터널편”, pp.127.
13. 한국건설기술연구원 (2000), “고속전철 구조물 안전성 기술 개발 (2단계 1차년도 보고서)”, 건설교통부, pp.115-130.
14. 한국도로공사 (1992), “도로설계요령-터널편”, pp.127.
15. 한국수자원공사 (1997), “수로터널 설계 및 시공지침(안)”, pp.264.
16. 研友社 (昭和61年), “注入の設計施工指針”, pp.103-117.



마상준
한국건설기술연구원 토목연구부
선임연구원
sjma@kict.re.kr

배규진
한국건설기술연구원 토목연구부
연구위원
gjbae@kict.re.kr

임경하
리폼시스템 기술연구소, 연구원
beton@hanmail.net

서경원
한국건설기술연구원 토목연구부
연구원
kwseo@kict.re.kr

안상철
리폼시스템 기술연구소, 연구소장
sangchul@reform.co.kr