

석분을 이용한 터널 뒤채움용 경량기포 충전재의 개발과 현장적용에 대한 연구

A Study on Development of Lightweight Foam Filling Material for the Voids behind Tunnel Liner using Stone-dust and Application to the Old Tunnel

마 상 준*

Ma, Sang-Joon

Abstract

The most tunnel damage such as cracks or leakage which exist in tunnel lining commonly, is caused by the voids where exist behind the tunnel lining, through the tunnel safety inspections. These voids were analysed to affect to a stability of a running-tunnel seriously. The aim of this paper is to develop the lightweight foam concrete for tunnel backfilling material using stone-dust of cake state and to apply the lightweight foam concrete developed to the old tunnel. This paper shows the basic properties of lightweight foam concrete mixed with stone-dust including flow rate, unit volume weight, absorption rate and compressive strength. In addition, according to the designed compound ratio, the lightweight foam concrete was applied to the ASSM tunnel for an application assessment. The engineering application of the lightweight foam concrete as the old tunnel's backfilling material was confirmed in this assessment.

요 지

국내 재래식 터널의 대부분에 존재하는 배면공동은 라이닝의 균열, 누수, 응력집중 등을 유발하여 터널 안정성에 큰 영향을 미치게 된다. 이러한 배면공동의 보강은 공동을 뒤채움하는 방법이 일반적으로 적용되고 있는데, 본 연구에서는 현재 산업폐기물로 취급되어 버려지고 있는 석분토를 이용하여 터널 뒤채움용 경량기포 충전재를 개발하였고, 실내물성시험과 노후터널에 대한 현장적용시험을 수행하여 개발 충전재의 적용성 평가를 실시하였다.

Keywords : Stone dust, Lightweight foam concrete, Tunnel backfilling material,

* 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원

E-mail : sjma@kict.re.kr 031-910-0222

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 9월 30일까지 학회로 보내 주시면 2004년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

우리나라는 전국토의 70%가 산악지형으로 구성되어 노선의 직선화와 환경 친화적인 건설공사를 위해 터널 건설이 증가하고 있는 추세이다. 또 기존에 건설된 재래식 터널의 변상현상으로 인한 터널의 구조적, 재료적인 피해로 인해 터널의 유지관리 및 보수·보강에 대한 사회적 관심이 높아가고 있으며, 터널 라이닝의 배면공동 발생으로 인해 터널 안정성에 미치는 영향에 대한 관심이 높아지고 있다. 더욱이 일본철도 종합연구소에서 발간한 보고서에 따르면 터널변상 원인중 시공과정과 운영과정에서 생성된 터널 배면공동이 터널 안정성에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 규정하고 있다.

대부분 국내 지하철 및 철도 터널에서도 배면공동이 존재하며 이러한 공동은 응력집중으로 인하여 터널 구조물의 균열 및 변형을 초래하는 원인이기도 하다. 이러한 터널의 배면공동은 설계·시공·유지관리 중 다양한 원인들이 복합적으로 작용하여 발생하게 되는데, 터널 천단부 라이닝 부분에는 콘크리트 타설 후 재료분리 등으로 인해 배면공동이 발생되며, 라이닝의 균열, 누수 등과 밀접한 연관이 있는 것으로 조사되었다.

본 연구에서는 국내 석산에서 골재생산 과정에서 발생되어, 산업폐기물로 처리되고 있는 석분토를 이용하

여 터널 배면공동 뒤채움용 경량기포콘크리트를 개발하였다. 그리고 개발된 경량기포콘크리트를 국내 노후 터널의 배면공동에 충전, 적용하여 개발재료의 터널 배면공동 충전재로서의 현장적용성에 대한 시험을 수행하였다.

2. 경량기포콘크리트의 개발

경량기포콘크리트는 시멘트 페이스트 중에 기포를 균등하게 분포시켜 비중을 낮춘 콘크리트이다. 외국의 경우 구조용 및 비구조용으로서 분류되어 그 활용의 폭이 대단히 넓은 반면, 국내의 경우 건축구조물의 바닥용 단열체에 주로 사용되고 있으며 일부 뒤채움용 및 연약지반 처리용으로 사용되고 있는 정도이다

경량기포 콘크리트 제조에 사용하는 재료는 매우 단순하여 시멘트, 물, 기포제가 주재료이며 혼화제 및 유동화제가 일부 사용되고 있다. 본 연구에서는 현재 산업폐기물로 처리되고 있는 석분토 슬러지를 이용하여 일반적인 경량기포콘크리트 적용분야인 건축구조물과 연약지반 처리용뿐만 아니라 안정적인 터널 배면공동 뒤채움용으로 적용할 수 있는 경량기포콘크리트를 개발함은 물론 폐자원의 유용한 활용과 공해 유발을 방지하고자 한다.

Table 1 경량기포콘크리트의 배합비

	W/B	Unit Weight(kg/m ³)			F (%)
		C	S	W	
1-1	0.38	510	220	270	45.41
1-2	"	459	198	243	49.82
1-3	"	408	176	216	56.43
1-4	"	357	154	189	60.85
2-1	"	440	290	270	43.32
2-2	"	396	261	243	47.94
2-3	"	352	232	216	54.65
2-4	"	308	203	189	59.18
3-1	"	365	365	270	41.64
3-2	"	328	328	243	48.05
3-3	"	292	292	216	54.48
3-4	"	255	255	189	58.55

여기서, W : 물, C : 시멘트, S : 석분토, B : C+S, F : 기포율

2.1 석분토를 이용한 경량기포콘크리트의 개발실험

케익상 석분토는 주로 골재 생산시 자갈 및 골재로 만드는 파분쇄 과정에서 발생되는데, 전국적으로 600 개 이상의 석산등록업체가 있으며 발생량도 연간 80 만m³ 이상 발생하고 있다. 또 기존에 발생한 석분토도 석산에 야적되어 있거나 산업폐기물로 처리되고 있어 환경문제를 유발하고 있는 실정이다.

본 연구에서는 석분토를 시멘트량의 30, 40, 50%로 치환한 세 종류의 슬러리에 대하여 기포발생기에 의해 미리 발포된 기포의 양을 조절하여 굳지 않은 경량기포콘크리트의 비중을 4가지 수준으로 총 12개의 배합으로 실험을 실시하였고, 배합은 Table 1과 같다.

경량기포 콘크리트는 시멘트와 석분토를 물과 혼합하여 페이스트 상태로 만든 후 기포발생기에 의해 발포된 기포를 혼합하는 선기포 방식을 이용하였다. 재료의 혼합은 시멘트, 석분토 및 물을 투입하여 페이스트 상태로 2분30초간 교반한 후 물과 30 : 1의 비율로 섞은 희석 기포제로 기포발생기에 의하여 발포된 기포가 충분히 혼합되도록 약 30초간 교반하였다. 석분토는 현장상태의 함수비가 유지된 상태로 사용하였다.

실험항목으로는 플로우 시험, 단위체적중량(굳지 않은 상태의 단위체적중량, 절대건조 단위체적중량 등)시험, 흡수율 시험, 압축강도 시험 등을 수행하였다.

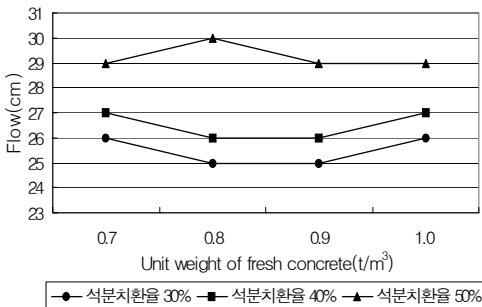


Fig. 1 석분치환율에 따른 플로우 값과 단위체적중량과의 관계

2.2 경량기포콘크리트 시험 결과 및 고찰

2.2.1 플로우

비중에 따른 석분토 치환율별 플로우 값을 Fig. 1에 나타내었다. 일반적으로 페이스트에 비해서 기포의 비율이 커져 비중이 낮아지면 페이스트의 흐름이 기포에 의해 억제되어 플로우가 감소하는 경향이 있지만, Fig. 1에서 보는 것과 같이 일정한 경향이 없이 물-시멘트비가 같을 경우 기포침가에 의한 비중의 변화가 플로우에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 다만 석분토 치환율에 따른 플로우의 경우 치환율이 10% 증가함에 따라서 플로우가 1~2cm 증가하는 경향을 보였는데, 이는 본래 석분토가 가지고 있는 함수율에 의해서 치환율이 증가함에 따라 물-시멘트비가 결과적으로 증가하는 것에 의한 영향으로 분석된다. 본 연구에서 개발한 경량기포콘크리트의 플로우 값은 27±3 cm로서 양호한 플로우 값을 보여주고 있다.

2.2.2 단위체적중량

Fig. 2는 굳지 않은 콘크리트의 단위체적중량과 습윤단위체적중량과의 관계를 보여주고 있다. 여기서 습윤단위체적중량은 습윤상태로 채령 28일간 양생한 콘크리트의 단위체적중량을 나타낸다. Fig. 2에서 굳지 않은 콘크리트 단위체적중량과 비교하여 습윤단위체적중량이 거의 같거나 약간 낮은 것을 알 수 있으며, 굳지 않은 콘크리트 단위체적중량이 클수록 습윤단위체적중량과의 차이가 적은 것을 알 수 있다.

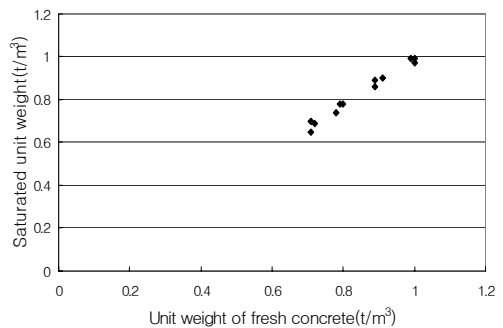


Fig. 2 슬러리 상태에서 콘크리트의 단위체적중량과 습윤단위체적중량과의 관계

Fig. 3은 굳지 않은 콘크리트 단위체적중량과 절대 건조 단위체적중량과의 관계를 보여주고 있다. 절대 건조 단위체적중량은 굳지 않은 콘크리트 단위체적중량에 비해서 상당히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 일반적으로 안전측의 설계를 위해서 굳지 않은 상태의 단위체적중량을 설계단위체적중량으로 사용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

2.2.3 흡수율

Fig. 4와 5는 석분토 치환율별 흡수특성을 나타낸 그래프이다. Fig. 4는 굳지 않은 상태의 단위체적중량을 기준으로 28일간 수중양생한 공시체의 흡수특성을 나타낸 것이며, Fig. 5는 KS F 2459에 따라서 구한 흡수율 관계 그래프이다.

Fig. 4와 5에서 모두 단위체적중량이 증가함에 따라서 흡수율은 낮아지는 경향을 보이고 있는데, 이는 공시체가 가지고 있는 기포량과 밀접한 관계가 있는 것으로 단위체적중량이 증가할수록 내부의 기포량이 적어지고 밀실해져 수분의 침투가 적어지는 것으로 판단된다.

2.2.4 압축강도

경량기포콘크리트 강도에 영향을 미치는 요소로서는 경험적으로 기포의 크기로 알려져 있으며, 모래가 되는 시멘트 페이스트 부분과 기포율 역시 영향을 미친다는 것이 실험적으로 알려져 있다.

Fig. 6과 7은 각각 재령 7일과 28일에서 기포율과 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 기포율이 증가함에 따라 압축강도는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 압축강도와 기포율이 직접적인 함수관계를 가지고 있다는 일반적인 연구결과와 일치하고 있다.

Fig. 8과 9는 각각 재령 7일과 28일에서 석분토 치환율별 비중과 압축강도의 관계를 나타낸 것인데, 재령 7일과 28일에서 석분토 치환율 변화에 따라 재령에 관계없이 동일한 경향의 압축강도 변화를 보였다. 즉, 석분토 치환율이 높아질수록 압축강도가 낮아지는 경향을 보였는데, 이는 석분토 치환율이 높아짐에 따라 단위시멘트량이 적어지기 때문이며, 석분토가

결합재로서가 아닌 단순한 충전재로서의 역할만 하는 것이라 판단할 수 있다.

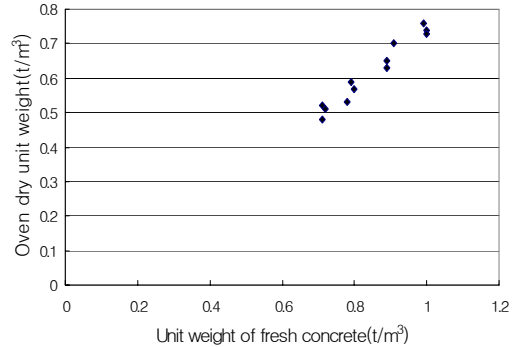


Fig. 3 슬러리 상태에서 콘크리트의 단위체적중량과 절대 건조체적중량과의 관계

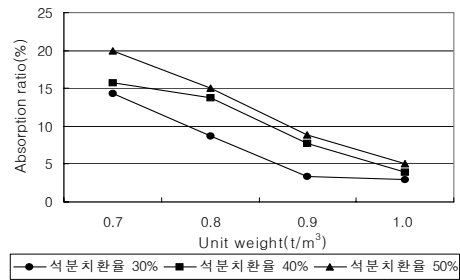


Fig. 4 석분치환율에 따른 단위체적중량과 흡수율과의 관계

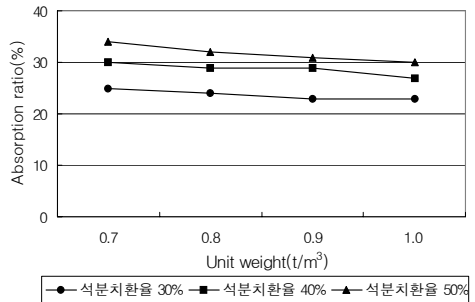


Fig. 5 석분치환율에 따른 단위체적중량과 흡수율과의 관계(KS F 2459)

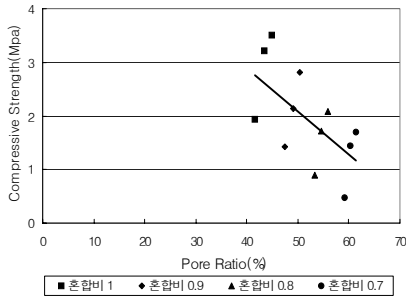


Fig. 6 기포율과 재령 7일의 일축압축강도와의 관계

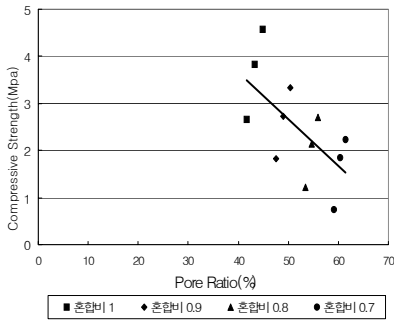


Fig. 7 기포율과 재령 28일의 일축압축강도와의 관계

일반적으로 터널 뒤채움재는 재령 28일에서 0.98~1.96 Mpa의 정도의 압축강도를 요구하고 있는데, 본 재료의 경우 석분토 치환율 50%, 단위체적중량 0.7 t/m³ 배합만 재령 28일 압축강도가 0.74 Mpa로서 이 조건에서 벗어나며, 나머지 배합에서는 0.98~1.96 Mpa의 조건을 만족하거나 1.96 Mpa 이상의 상당히 양호한 결과를 얻을 수 있었다.

3. 현장적용시험

터널 배면공동 뒤채움 재료의 현장시험은 석분과 부순모래를 주재료로 하여 기포를 포함시켜 개발된 경량 기포콘크리트를 터널 배면공동에 주입함으로써, 라이닝과 지반을 일체화시켜 라이닝이 받는 지반하중을 터널 구조물에 균등하게 분포시키는데 있다. 그리고 공

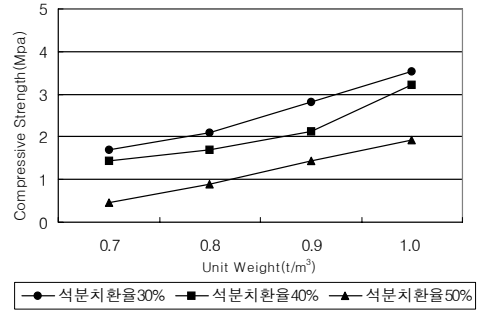


Fig. 8 석분치환율에 따른 단위체적중량과 재령 7일의 일축압축강도와의 관계

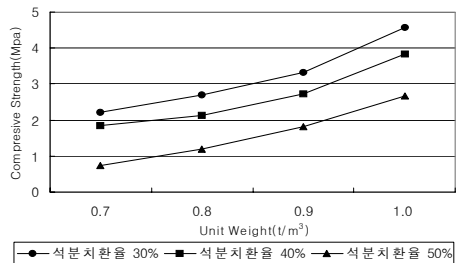


Fig. 9 석분치환율에 따른 단위체적중량과 재령 28일의 일축압축강도와의 관계

동 뒤채움 후 효과를 확인하며 장기간에 걸친 터널 공동을 예측하고 향후에 주입된 뒤채움재의 성능평가를 통해 개발하는 뒤채움재의 물성 향상을 목적으로 한다.

본 현장 적용시험에서는 터널 상태의 공동에 대한 뒤채움 시험을 Fig. 10과 같은 순서로 진행하였다. 먼저 터널시공자료, 해머타격 등을 통해 배면공동이 존재할 가능성이 있는 4개소에 대하여 주입구는 직경 100mm로, 확인구는 직경 50mm로 천공하여 배면공동을 확인하였다. 배면공동 충전시 일반적으로 직경 50mm를 주입구로 하나 본 시험에서는 주입장치의 문제로 직경 100mm로 하였다.

천공결과 본 터널에서는 4개소 모두 공동이 존재하였다. 공동이 존재하는 코어링 공에는 개발한 패커를 삽입하고 실내시험을 통하여 얻어진 최적의 배합비로 재료를 교반하여 주입하였다.

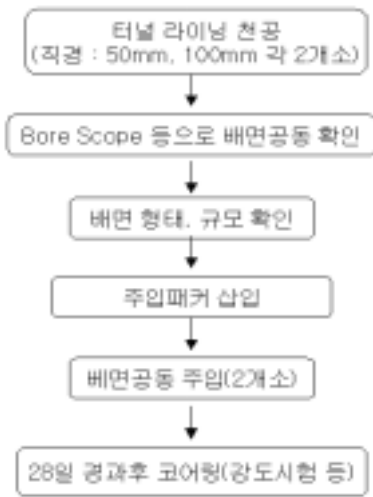


Fig. 10 현장시험 순서도

이때 주입은 확인구와 압력계를 통하여 공동에 다 충전될 때까지 주입하였으며 주입하면서 주입시간, 교반시간 등의 작업성 평가를 수행하였다. 4개소의 코어링 중 2개 공에 대하여 주입을 완료하고 28일 경과 후 주입위치 부근에 다시 직경 50mm 보어링을 수행하여 주입재료의 고화정도, 압축강도 등에 대한 평가를 수행하였다.

3.1 현장상황

○○터널은 연장 320m의 편도 1차선 도로터널로써 1986년에 준공되어 현재 상용중인 터널이다. 현장시험 시공시 4개소에서의 천공 결과(φ50mm, 100mm), 장마철임에도 불구하고 누수는 발생하지 않았으며 시험시공전에 터널 라이닝에 대한 물청소 실시 후, 라이닝의 육안조사에서도 균열 등이 거의 발생하지 않았으며 터널의 백태 등도 관찰되지 않았고 전체적으로 터널의 상태는 매우 양호한 것으로 나타났다. Table 2는 ○○터널의 일반적인 사항에 대해 설명한 것이다.

Table 2 ○○터널의 일반사항

터널명	폭	높이	연장	차선	형식
○○터널	11.2m	8.3m	320m	왕복 2차선	마제형

3.2 터널 라이닝 천공조사

터널 라이닝의 천공은 주로 천단부쪽에서 실시하였는데, Fig. 11은 터널에서 배면공동 주입구와 확인구의 코어링 위치를 보여주고 있다. 천공작업시 일부 코어링 공에서는 목재가 나왔으며 지하수는 유출되지 않았고, 콘크리트의 상태는 매우 양호한 것으로 판단되었다. Table 3은 시추지점에서의 라이닝두께와 공동의 깊이를 보여주고 있다. 공동부의 두께는 최소 350mm 최대 580mm 로서 평균 457mm를 보이고 있는데 이러한 공동의 발생은 다음과 같이 생각할 수 있다. 본 터널은 라이닝 타설시 발파부석을 이용한 것이 아니고 거푸집을 이용한 라이닝 타설시 미충전에 의한 공동과 재료분리에 의한 공동, 그리고 토사의 유출로 인한 공동의 확대 등으로 공동이 형성된 것으로 판단된다.

또한, 설계상으로는 A, B 지점의 경우는 라이닝 두께가 600mm, C, D 지점은 라이닝 두께가 500mm로 설계되었으나 실제 천공 결과 라이닝 두께는 최

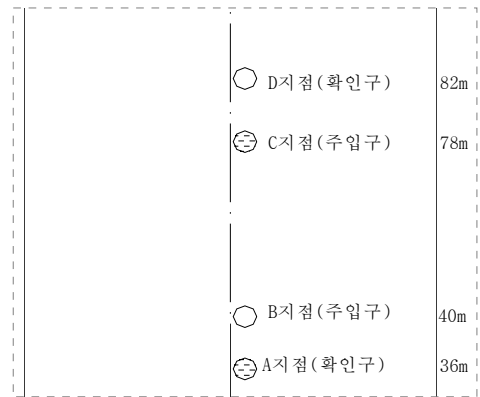


Fig. 11 배면공동 주입구와 확인구의 코어링 위치

Table 3 코어링 지점의 라이닝 및 공동두께

위치	A		B		C		D	
	1	2	1	2	1	2	1	2
두께(mm)	390	800	370	-	500	135	540	-
공동깊이(mm)	580		500		400		350	
설계라이닝 두께(mm)	600		600		500		500	

소 135mm로 매우 작은 곳도 있었으며, 배면공동 주입 후 확인시험에서 천공된 라이닝 두께는 최대 800mm로 나타난 곳도 있어 발파시의 여굴에 따라 라이닝 두께의 차이가 큰 것으로 나타났다.

Fig. 12는 천공된 라이닝 뒷면의 배면공동을 산업용 내시경을 이용하여 촬영한 사진으로 공동의 크기 등은 명확하게 나타나지 않지만 지하수 상태, 공동의 분포 방향 등을 개략적으로 알 수 있다. 공동내부는 습한 정도이며, 터널 배면공동은 1차 콘크리트 라이닝 뒤쪽으로 배면공동이 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

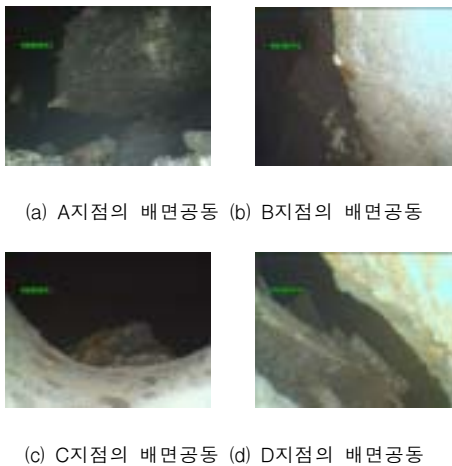


Fig. 12 ○○터널의 배면공동 사진

3.3 터널 배면공동 주입

본 주입시험에서 사용한 재료 중 석분은 현장시험을 수행한 ○○터널 인근의 ○○석산에서 운반하여 사용하였다. 본 현장주입에서는 시료배합을 실내시험의 결과와 석분의 함수비를 참고하여 Table 4의 배합비에 따라 수행하였다. 석분은 수분의 함유량에 따라 플로우 값, 배합비 등이 큰 변화를 나타내므로 현장에서 다시 플로우 시험을 수행하여 규정치인 250±50mm 범위에 드는 278mm로 물 배합비를 결정하였다. 또한 작업도중 석분의 대기 노출에 의해 수분이 계속 감소하여 오전, 오후 각 1회씩 플로우값을 확인하여 플로우값의 범위가 250±50mm 이상이 되도록 배합비를 수정하였다.

Table 4 현장시험에 사용된 배합비

재료	석분	시멘트	물	기포율
중량비(%)	29	44	27	0
부피비(%)	45.32			54.68

Table 5 공동별 주입량

공동	B	C	총계
주입량	7.5m ³	3.5m ³	11m ³

Table 4에 나타난 현장시험에 사용된 배합비가 실내시험보다 물량이 약간 증가한 것은 실내시험에서 사용한 석분과 현장에서 구입한 석분의 함수비 차이로 인해 충전재의 유동성 확보를 위해 증가된 것이다.

현장주입은 Fig. 13과 같이 주입패커를 설치하고 본 연구에서 석분토를 이용하여 개발된 배면공동 충전재를 Table 4의 배합비로 교반한 다음, 기포 발생기에서 기포와 혼합하여 경량기포콘크리트를 만든 후 주입관을 통하여 터널내로 운반하고 주입구를 통하여 주입하였다.

주입압-주입량의 관계는 기포발생기에 부착된 압력계로 측정되며, 주입량은 교반 hopper에서 소모되는 일반모르타르의 체적과 기포혼입률에 의해 계산된다. 충전이 완료된 것은 주입구와 4m 이격된 확인구에서 충전재가 유출되거나 주입관을 통한 압력저감을 고려하여 기포발생기에 설치된 압력계가 3kgf/cm² 정도까지 걸리면 주입이 완료되는 것으로 판정하여 이때의 주입량과 주입시간 등을 분석하였다. 주입량은 B공동에 7.5m³, C 공동에 3.5m³이 주입되었으며 총 11m³이 주입되었지만 B공동 주입시에는 시공이음부에서 충전재가 유출되어 작업을 중단하였다.



Fig. 13 현장 주입 광경

3.4 현장적용시험 결과

현장적용시험 결과의 평가는 뒤채움한 경량기포콘크리트의 코어를 채취하여 압축강도를 측정하였다. 모두 2 지점을 천공하여 코어 채취를 시도하였는데, 현장여건상 코어 채취의 어려움으로 한 지점의 코어만을 채취하여 압축강도를 측정할 수 있었다.

다음 Table 6은 시험 시공시 뒤채움한 경량기포콘크리트를 채취한 공시체의 압축강도 시험결과를 보여주고 있는데, 1.56 Mpa의 값을 보였다. 이는 국내외 터널 배면공동 충전재의 압축강도 규정을 만족시키고 있고, 실내에서 시험된 값과 유사한 값을 보이고 있어 본 연구에서 개발된 경량기포콘크리트가 터널 배면공동 충전에 효율적으로 이용될 수 있는 것으로 분석된다.

4. 결 론

본 연구는 시멘트의 일정량을 산업폐기물인 석분토로 치환하고, 여기에 기포를 첨가하여 개발된 경량기포콘크리트에서 석분토가 물성에 어떠한 영향을 미치는지 실험을 통하여 분석하였고, 개발된 경량기포콘크리트의 노후터널 현장적용시험을 실시하여 터널배면공동 주입효과를 분석하였다. 경량기포콘크리트의 실내물성실험과 현장적용시험에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플로우 시험결과 석분토의 시멘트 치환율이 높을수록 플로우 값은 높아지는 경향을 보였다. 이는 현장상태 석분토의 함수율이 30% 정도여서 나온 결과로 판단되며, 물-결합재비 0.38에서는 단위체적중량에 관계없이 양호한 플로우 값을 얻을 수 있었다.
- 2) 흡수율은 단위체적중량이 증가할수록 감소하는 경향이 있으며, 석분토 치환율이 증가할수록 증가하는 경향이 있다.
- 3) 석분을 이용하여 개발된 경량기포콘크리트의 압축강도는 단위체적중량이 증가할수록, 석분 토 치환율이 감소할수록 증가하는 경향을 보였다. 그리고 터널 배면공동 뒤채움재로서 일 반적으로 요구되

Table 6 시험시공시 충전된 충전재 압축강도시험 결과

재령(일)	28일
일축압축강도(Mpa)	1.56



Fig. 14 뒤채움된 모르타르의 천공 후 모습

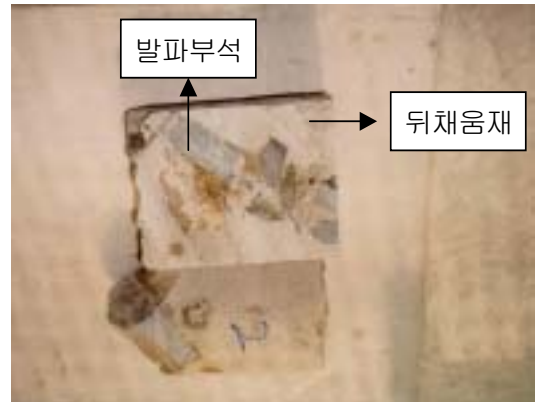


Fig. 15 ○○터널 배면공동에 뒤채움된 재료의 28일 경과 후 코어 사진

는 0.98~1.96 Mpa 이상의 압 축강도를 만족할 수 있었다.

- 4) 석분을 이용한 경량기포콘크리트의 경우 터널배면공동 충전 28일 경과 후 충전재의 강도특성 분석결과, 현장시험에서 충전된 충전재는 1.56 Mpa의 강도를 보여, 국내외 터널 배면공동 충전규정의 재료적 특성을 만족시키는 것으로 나타났다.
- 5) 본 연구를 통해 경량기포콘크리트에 사용되고 있는 플라이애쉬 및 고로슬래그와 같은 혼화 재료의 대

체재료로서, 현재 산업 폐기물로 버려지고 있는 석분토가 충분히 사용 가능함을 물성시험을 통해 확인할 수 있었다.

- 6) 석분토를 이용하여 개발된 경량기포콘크리트의 노후터널 현장 적용시험을 통해, 터널 배면 공동 뒤 채움재로서의 현장 적용성과 공동 충전효과를 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 건설교통부, “경량기포콘크리트 재료개발 연구”, 1997.
2. 조호진, 송하원, 변근주, “경량기포콘크리트 탄성계수의 미시역학적 추정”, 콘크리트학회지, 제9권, 4호, 1997. 8. pp125~135.
3. 변근주, 송하원, 박상순, “고분자기포제를 이용한 경량기포콘크리트의 개발(I)”, 콘크리트학회지, 제9권, 1호, 1997.
4. 변근주, 송하원, 박상순, “고분자기포제를 이용한 경량기포콘크리트의 역학적 특성(II)”, 콘크리트학회지, 제9권, 1호, 1997. 2. pp.173~181.
5. 한국건설기술연구원, “고속전철 구조물 안전성 기술 개발(터널부문)”, 2000. 10. pp.118~147.
6. 강신덕, 이동남, “암석미분 폐슬러지를 이용한 경량기포콘크리트 제조에 관한 연구”, 한국자 원공학회지, Vol 35, 1997. pp.264~269.
7. 한국건설기술연구원, “고속전철 구조물 안전성 기술개발(터널부문)”, 2001. 10. pp.22~86.
8. 이도현, 전명훈, 고진수, “플라이애쉬를 혼입한 현장타설 경량기포콘크리트의 물리적 특성 및 품질관리”, 콘크리트학회지, 제13권 1호, 2001. pp.69~76.
9. 노재성, 이범재, 홍성수, 황의환, “비중의 변화 와 발수제 첨가가 경량기포콘크리트의 물성에 미치는 영향”, 콘크리트학회지, 제9권, 2호, 1997. pp.137~143.

(접수일자 : 2003년 7월 1일)