

충진 모형실험을 통한 NATM Composite 라이닝 터널 뒤채움재의 기포손실 최소화를 위한 적정 이송거리 고찰

A Study on the Proper Transfer Distance for Minimizing Air Flotation Loss of Backfilling Material of NATM Composite lining Tunnel in the Model Test

마상준¹⁾, Sang-Joon Ma, 최희섭²⁾, Hee-Sup Choi, 이흥수²⁾, Heung-Soo Lee, 김경덕³⁾, Kyung-Duk Kim

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 책임연구원, Research Fellow, Geotechnical Disaster & Environment Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 한국건설기술연구원 지반방재환경연구실 연구원, Researcher, Geotechnical Disaster & Environment Research Dept., Korea Institute of Construction Technology

³⁾ 한일시멘트공업(주) 중앙연구소 레미탈팀장, Product Develop Leader, Central Research Center, Hanil Cement CO.

SYNOPSIS : In this paper, result of whole test, When the Transfer Distance is increasing, Strength of Backfilling Material of NATM Composite lining Tunnel due to increasing Gravity was increased, but that is higher the Air Flotation than increasing Strength. So, That was predicted a drop of Permeability. And Performing the placing Lightweight Foamed Mortar, we think that it's performance in drain material was lost. Therefore We conclude that Proper Transfer Distance that taking Permeability through minimizing of Air Flotation Loss and getting the Need Strength is 50m.

Key words : Transfer Distance, Backfilling Material, NATM Composite lining Tunnel, permeability

1. 서 론

국토의 약 70%가 산지로 이루어진 우리나라는 터널건설이 계속 증가하고 있는 추세이며, 도로, 교통 면에서 터널에 대한 의존도도 매우 높다. 이러한 터널건설의 증가 및 높은 의존도에 비해 국내 터널현장에서는 아직까지 현장타설 라이닝공법이 적용되고 있으며, 이로 인해 시공성 및 경제성 측면에서 많은 문제점들이 야기되고 있는 실정이다. 따라서 국내 터널업계에서는 현장타설 라이닝공법에 대한 문제점들의 해결방안 모색과 더불어 새로운 개념의 터널기술 개발을 통해 국내 터널산업의 발전을 꾀하고 나아가 국내 터널기술의 글로벌화를 추구해야 할 것이다.

현재 국토해양부와 민간기업의 주도로 연구·개발 중에 있는 신개념 터널기술인 NATM Composite 라이닝 공법은 공장에서 제작된 고품질 PC 패널을 터널 라이닝으로 적용하고 슛크리트 타설면과 PC 패널 사이 이격공간에 투수성, 압축강도 및 유동성을 갖춘 경량기포 모르타르로 충전하여 터널에 작용하는 상재하중을 효과적으로 라이닝에 전달하여 안정성을 극대화시키는 공법이다. 여기서 배면충진재료인 경량기포모르타르는 지하수 유입 시 하부 유공관으로 배수 시킬 수 있는 충분한 투수성, 지반에 추가적으로 작용하는 이완하중을 터널 라이닝에 효과적으로 전달하는 전달재 역할, 슛크리트 타설면과 라이닝 배면에 공극이 발생되지 않고 고르게 충진을 가능하게 하는 고유동성 등의 3가지 필수요소를 갖추어야 한다. 하지만, 충전장치와 충전구간의 이송거리가 길어질수록, 호스내부의 마찰력 증가로 기포군의 소포발생을 증가가 예상되고, 이로 인해 충전재의 비중이 증가하며, 강도 또한 증가하게 된다. 하지만 강

도와 투수는 일반적으로 서로 반비례관계를 나타내기 때문에, 강도는 증가하는 반면 본 연구에서 충전재가 가져야 할 필수요소 중 하나인 투수성은 감소하게 된다.

따라서, 본 연구에서는 충전모형실험을 통해 NATM Composite 라이닝 터널 뒤채움재의 기포손실을 최소화하는 적정 이송거리의 범위를 제안하여, 당초 계획된 투수성과 강도를 유지하게 하고자 실내실험에서 얻어진 경량기포모르타르 최종배합에 이송거리 변화에 따라 기포슬러리 비중(KS F 4039), 강도변화(KS F 2405) 및 투수(KS F 2322)성의 비교·분석을 통해 이송거리에 따른 기포손실 평가를 수행하였다.

2. 경량기포모르타르 충전 모형실험

본 충전 모형실험은 터널 배면에 충전되는 경량기포 모르타르 및 현장타설 콘크리트 라이닝의 충전 효과를 육안으로 관찰이 가능하여, 실제 터널 배면 충전성의 직접 평가가 가능하며, 추가적으로 배수능을 평가할 수 있어 터널 배면의 충전된 모르타르 및 콘크리트의 메커니즘을 가장 효과적으로 규명할 수 있는 실험으로 판단된다.

충전 모형실험 장치는 실제 터널 현장에서 라이닝 표면에 작업창을 이용하여 부분적인 충전 효과를 육안으로 관찰하는 수준으로 설계되었으며, 실제 터널 현장을 모사하여 터널 배면부의 보이지 않는 부분에 대한 충전재의 역학적 메커니즘을 규명할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 실험을 통하여 충전재료의 충전성 및 충전 장비의 효율성을 평가 할 수 있어 NATM Composite 라이닝 공법의 현장 적용성 평가를 수행함과 동시에 경량기포 모르타르의 재료 및 장치 설계에 필요한 양질의 데이터 획득이 가능할 것이다. 따라서, 본 충전 모형실험을 통해 국내 터널의 배면채움재로 사용 중인 일부재료의 충전성 평가기준 마련에 기여할 것으로 판단된다.



3. 실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 실내실험을 통하여 얻어진 최종배합을 적용하여 이송거리를 0, 50, 100, 150, 200, 300m로 변화한 후, NATM Composite 라이닝 터널 뒤채움재인 경량기포모르타르의 충전성 평가 및 현장 적용성 평가를 위해 충전 모형실험을 수행하였다. 실험항목으로는 굳지 않은 기포모르타르(KS F 4039)와 경화된 기포콘크리트(KS F 2459) 및 변수위 투수시험(KS F 2322)에 의거하여, 비중, 플로우, 압축강도, 투수계수 시험을 실시하였으며, 이를 통해 경량기포모르타르의 기포손실을 최소화 할 수 있는 적정 이송거리를 제안하고자 하였다.

3.2 실험재료 및 배합표

3.2.1 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 물리적 특성은 표와 같다.

항목	분말도(cm^2/g)	응결시간(hr:min)		압축강도(kgf/cm^2)				비중
		초결	종결	1일	3일	7일	28일	
측정값	3200	3:50	6:15	98	223	275	342	3.15

3.2.2 혼화제

본 연구에 사용된 혼화제는 3종 슬래그 분말이며, 분말도는 $4200\text{cm}^2/\text{g}$ 인 재료를 사용하였다.

성분	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig-loss	비중
함량	33.02	13.85	0.31	43.46	5.64	1.54	0.97	2.90

3.2.3 기포제(Foam Agent)

본 연구에 사용된 기포제는 배수성을 고려하여 식물성 기포제를 물에 2% 희석한 후 발포압력을 0.45MPa로 적용하여 발포하였다.

3.2.4 배합표

본 연구에 사용된 배합표는 다음 표와 같다.

구분		슬러리			기포균			총계
		레미탈	단위수량	소계	기포제	희석수량	소계	
최종배합	중량(kg)	450	293	743	0.7	32.4	33.1	776
	용적(L)	146.8	293.0	439.8	0.6	32.4	660.7	1100

3.3 실험결과 및 분석

이송거리 변화에 따른 경량기포모르타르에 대한 일련의 실험을 통하여 다음 그림 1~그림 5의 결과를 도출하였으며, 각각의 실험결과는 다음과 같다.

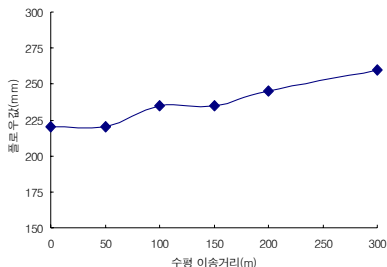


그림 1. 이송거리에 따른 플로우값

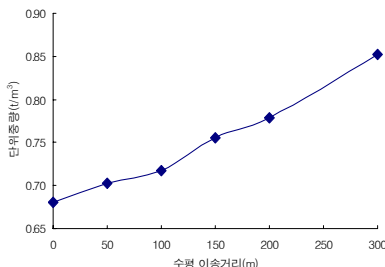


그림 2. 이송거리에 따른 비중

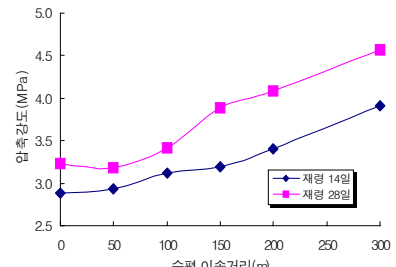


그림 3. 이송거리에 따른 압축강도

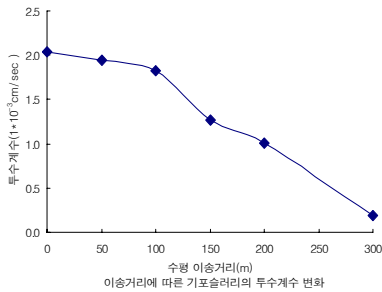


그림 4. 이송거리에 따른 투수계수

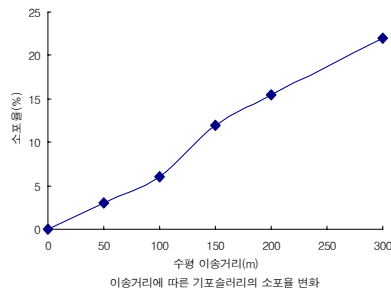


그림 5. 이송거리에 따른 소포율

3.3.1 플로우값

플로우값은 터널 배면 충전용 경량기포모르타르의 시공성을 나타내는 척도로서 매우 중요한 인자로 여겨진다. 그림 1은 이송거리에 따른 기포슬러리의 플로우값 변화를 나타낸 그래프로서, KS F 4039에 제시되어 있는 플로우값은 180mm 이상으로 결과값은 모두 기준을 상회하는 결과를 보였다. 그러나 이송거리가 0부터 50m까지는 플로우값이 220mm로 변화가 없었지만, 50m를 넘어선 지점부터는 220mm에서 점차 증가하여 이송거리가 300m 일때 플로우값은 260mm를 나타냈다. 이는 이송거리가 길어질수록 독립적으로 분포되어 있는 기포가 소포되어 기포의 소포율이 높아지며, 이로 인해 자중이 증가하여 페이스트 자중에 의한 흐름이 자유로워진 것으로 판단된다.

3.3.2 비중

본 연구에서 나타난 비중은 이송거리가 각각 0, 50, 100, 150, 200, 300m 일때 0.681, 0.703, 0.718, 0.756, 0.779, 0.852t/m³의 비중값이 각각 나타났으며, 그 결과는 그림 2와 같다. KS F 4039에 의거해 당초 0.6품으로 비중값을 결정하였지만 이송거리가 100m 이상에서는 비중값이 모두 약 5~20%정도 기준을

벗어나는 경향을 보였다. 이러한 경향은 경량기포모르타르를 타설할 때 현장에서 고압으로 압송하기 때문에 압송거리에 따른 기포의 소포가 발생되며, 이로 인해 비중이 증가하는 것으로 판단된다.

3.3.3 압축강도

이송거리에 따른 압축강도의 변화는 재령 14일과 재령 28일로 나누어 측정하였으며, 결과는 그림 3과 같다. 실험결과 이송거리 0m를 기준으로 재령 14일 측정값은 2.88MPa이며, 이송거리가 늘어날수록 1.7, 7.7, 9.6, 15.3, 26.1% 정도 강도가 증가하였으며, 재령 28일 측정값은 3.23MPa이며, 50m 일때를 제외하고는 각각 5.3, 17.0, 20.1, 29.3% 정도 강도가 증가하는 경향을 나타내었다. 즉, 재령 14, 28일 강도값은 비례하지는 않았지만 유사하게 증가하는 경향을 보였으며, 이는 비중이 증가할수록 기포율이 감소하여 상대적으로 공극이 줄어들기 때문에 조직이 치밀해지며, 이로 인해 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.

3.3.4 투수계수

이송거리에 따른 투수계수의 변화는 재령 28일을 기준으로 하여 각 시험체의 투수계수를 측정하였으며, 이의 결과는 그림 4와 같다. 이송거리에 따른 기포슬러리의 투수계수 변화는 이송거리가 각각 0, 50, 100, 150, 200, 300m 일때 2.04, 1.94, 1.82, 1.27, 1.01, 0.19($1 \times 10^{-3} \text{cm/sec}$)로 나타났으며, 이송거리 0m를 기준으로 각각 5, 10.8, 37.7, 50.4, 90.7%의 투수저감을 나타냈다. 이는 비례적이지는 않지만 일반적인 투수계수와 강도의 관계와 유사한 결과를 나타내었다.

3.3.5 소포율

이송거리에 따른 기포슬러리의 소포율 변화는 그림 5와 같으며, 이송거리 0m를 기준으로 소포율이 각각 3, 6, 12, 15.5, 22%로 나타났다. 일반적으로 기포균과 슬러기 혼합시 또는 혼합후 압송중 기포균의 소포율을 보정하기 위해 1m³에 대한 기포균을 10% 할증하여 계산하는 것을 감안하였을 때 최대 150m 까지도 이송이 가능할 것으로 판단된다. 하지만 기포손실로 인한 투수성능 저하 때문에 이송거리는 최대 100m 이하로 타설하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결 론

터널 뒤채움재인 경량기포모르타르의 이송거리에 따른 물리적 성능평가에 관한 결론은 다음과 같다.

- 1) 이송거리가 길어질수록 독립적으로 분포되어 있는 기포가 소포되어 기포의 소포율이 높아지며, 이로 인해 자중이 증가하여 페이스트 자중에 의한 흐름이 자유로워진 것으로 판단된다.
- 2) 경량기포모르타르를 타설할 때 현장에서 고압으로 압송하기 때문에 압송거리에 따른 기포의 소포가 발생되며, 이로 인해 비중이 증가하는 것으로 판단된다.
- 3) 비중이 증가할수록 기포율이 감소하여 상대적으로 공극이 줄어들기 때문에 조직이 치밀해지며, 이로 인해 압축강도가 증가하는 것으로 판단된다.
- 4) 투수계수는 강도가 증가할수록 낮게 나타났으며, 이는 강도는 투수계수와 반비례 관계를 가지는 일반적인 이론과 유사하게 나타났다.

본 연구에서는 각 실험의 결과에 비춰볼 때 이송거리가 길어질수록 비중 증가로 인한 강도는 증진되지만 기포의 손실이 커서 이로 인한 투수성능 저하가 불가피하여 터널 배면 충전시 배수재인 경량기포모르타르의 기능이 상실될 것으로 판단된다. 그러므로 배수역할의 기능상실을 가장 최소화 시킬 수 있는 이송거리는 0~100m 이내가 적당하며, 기포손실 최소화를 통해 투수성능을 가지며, 일정 소요강도를 유지하는 적정 이송거리는 50m 이내가 가장 적당하다고 판단된다.

참고문헌

1. 국토해양부(1996), “경량기포콘크리트 재료개발 연구”
2. 구해식(1998), “경량기포콘크리트의 압축강도에 대한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집
3. 이세현(1993), “경량기포모르타르의 성능규명 및 개선을 위한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집
4. 한국건설기술연구원(2004), “BIO경량기포모르타르를 충전하는 친환경 스틸스터드 패널형 복합화 중층 건축공법 개발”