

비파괴기법을 이용한 콘크리트 구조물의 내구성능 평가

이태규* · 이웅중 · 김종우

〈쌍용중앙연구소 건설기술연구실〉

2. 조사 내용

1. 서론

터널 구조는 지반내에 건설되는 대표적인 구조물로서 지반의 물리적 특성, 터널의 기하형상, 지보공의 형식, 지하수위 및 환경적 변화에 의하여 구조의 건전성이 큰 영향을 받는다. 철도터널은 공용기간이 증가함에 따라 차량이동으로 인한 진동, 소음, 매연 및 지하수위의 변화 등과 같은 주변환경에 의하여 라이닝 콘크리트는 산화 또는 중성화되어 간다. 구성재료가 열화되면 구조물의 내하력, 사용성 및 안전성이 저하되므로 장기적인 측면에서 터널구조의 사용성을 증대시키고 효과적인 유지관리를 위하여서는 정기적인 점검과 보수·보강대책을 수립하여야 한다.

라이닝 콘크리트의 점검은 재료적 및 구조적인 측면에서 검토되어야 하며, 특히 재료적인 측면에서의 검토는 그 자체뿐만 아니라 구조적 검토에도 영향을 미치게 되므로 매우 중요한 의미를 갖는다. 따라서 본 논문에서는 중앙선 철도에 위치하고 있는 3개 터널의 라이닝 콘크리트 재료에 대한 특성분석을 위하여 물리적·화학적 방법으로 콘크리트의 구성조직 분석 및 배합 추정을 실시하고, 분석된 결과를 이용하여 콘크리트 재료의 안전성 여부를 판단하고자 한다.

본 논문에서 대상으로 하는 중앙선 철도상의 3개 터널에 대한 구조 개요는 <표 1>과 같다. <표 1>에 나타난 3개의 철도터널에 대한 라이닝 콘크리트의 재료적 물성 평가를 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 조사를 실시하였다.

2.1 강도 조사

라이닝 콘크리트의 비파괴강도 추정을 위하여 슈미트 햄머(Schmidt hammer)와 초음파 측정기(Pundit)로 50m 간격으로 좌우측 벽과 천정부의 강도를 조사하였다. 또한 실제 강도의 추정 및 비파괴 강도와와의 비교를 위하여 1개 터널당 2개씩의 코어를 채취하여 압축강도시험에 의한 압축강도 및 응력-변형률 관계를 분석하였다.

2.2 화학적 조사

대상터널은 모두 준공후 53년 경과된 노후터널로 라이닝 콘크리트가 구성되어 있기 때문에 콘크리트의 화학적 특성이 준공 초기 및 현행 시방서에서 규정하

대상 터널의 구조개요

<표 1>

터널명	준공	총연장	터널고	유효폭	상하구배
Y 터널	1942년	441m	5.9m	3.9m	10/1000
B 터널	1942년	260m	5.9m	4.1m	10/1000
M 터널	1942년	900m	5.9m	3.9m	4/1000

화학분석 항목 및 기기

〈표 2〉

분석항목	분석기기
중성화깊이	· 페놀프탈렌용액 도포법
정량분석	· X-ray Fluoroscope · 습식완전분쇄기
정성분석	· X-Ray Diffractometer
조직관찰	· Scanning Electron Microscope

고 있는 배합기준과 크게 상이할 것으로 판단되기 때문에 채취한 코아에 대하여 〈표 2〉와 같은 화학적 분석을 실시하였다.

3. 재료적 특성 평가

3.1 강도 평가

라이닝 콘크리트에 대한 비파괴강도 추정에 있어서 일본 재료학회의 제안식에 따른 반발경도법과 초음파법 및 일본 건축학회의 제안식에 따른 조합법을 사용하였다. 각 터널 라이닝 콘크리트의 비파괴강도와 코아강도를 추정하면 〈표 3〉과 같다.

〈표 3〉에서 알 수 있듯이 Y터널의 경우에는 초음파법이, M터널의 경우에는 반발경도법이 실제강도와 가장 근접함을 알 수 있고, B터널의 경우에는 비파괴강도와 실제 코아강도가 잘 일치하지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 코아 채취위치와 비파괴강도 측정위치가 다소 차이가 나는 것에 따른 영향도 포함되어 있었지만 근본적으로 비파괴강도가 실제강도를 정확하게 예측하지는 못하고 있음을 나타내고 있다. 또한 조합법에 의한 결과가 항상 실제강도에 근접한 결과를 나타내는 것이 아님을 알 수 있다.

Y터널 및 B터널의 코아에 대한 응력-변형률 관계는 〈그림 1〉, 〈그림 2〉와 같으며, 기존의 모델식과 비교하여 볼 때 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 한편 라이닝 콘크리트는 타설시 측벽부보다는 천정부위가 노슨한(loose) 구조가 되며, 사용환경하에서도 천정부가 더 많이 열화되기 때문에 〈그림 3〉과 같이 터널의 길이에 따른 강도분포를 살펴보면 천정부의 강도가 측벽부보다 낮게 측정되었다.

한편 일본 콘크리트학회의 평가기준에 따라 보통 등급 이상의 품질상태가 되려면 설계기준강도의 90% 이상이 되는 강도를 유지하여야 한다. 그런데 3개 터널 라이닝 콘크리트에 대한 설계기준강도를 알 수 없으므로 1984년 개정된 철도청의 「터널표준도」에 근거하여 압축강도가 180kg/cm²으로 설계되었다고 가정하면, 90%인 162kg/cm²을 모두 초과하는 것으로 볼 수 있으므로 철도터널에서 발생하는 각종 열화진행에 대하여 콘크리트 강도는 아직 건전한 상태에 있는 것으로 평가된다.

3.2 화학적 평가

1) 중성화 정도

대상터널에 대한 중성화 깊이의 측정결과는 〈표 4〉와 같으며, 분석결과 대기중에 노출된 라이닝 콘크리트는 표면에서 평균 8cm의 중성화 깊이를 나타내었다.

일반적으로 콘크리트의 중성화 진행속도는 1~2 mm/year 또는 $7.2 \times \sqrt{t}$ mm 인 것으로 알려져 있으나, 철도터널의 경우에는 기관차에서 배출되는 배기가스의 영향으로 터널내부에 이산화탄소 및 아황산가스의 농도가 상대적으로 높기 때문에 일반적인 콘크리트의 중성화 진행속도보다 다소 빠르게 중성화가 진행됨을 알 수 있다.

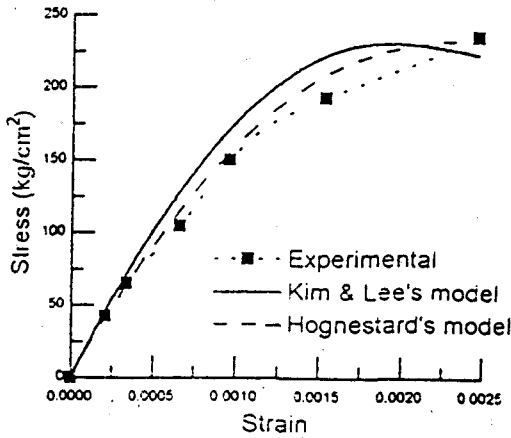
라이닝 콘크리트의 추정 강도

〈표 3〉

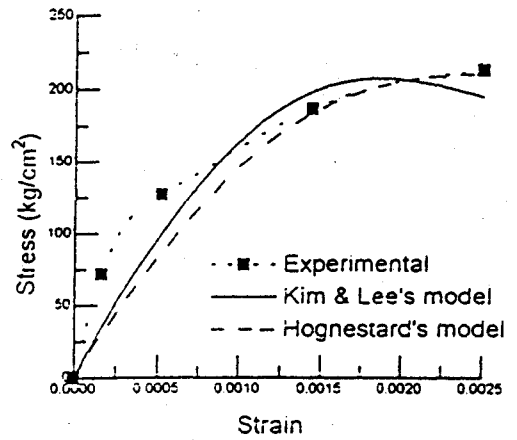
(단위 : kg/cm²)

위 치	비 파 괴 강 도			코아강도
	반발경도법	초음파법	조합법	
Y 터널	135~219(145)	160~247(214)	157~270(210)	213
B 터널	153~207(194)	139~247(158)	141~235(189)	236
M 터널	168~293(243)	172~256(178)	170~334(263)	229

() : 코아 채취위치에서의 비파괴강도



〈그림 1〉 Y 터널 콘크리트 응력-변형률 곡선



〈그림 2〉 B 터널 콘크리트 응력-변형률 곡선

중성화 깊이

〈표 4〉

터널	설측치(cm)	이론치(cm)	설측/이론
Y 터널	8.0	5.2	1.54
B 터널	8.2		1.58
M 터널	7.7		1.48

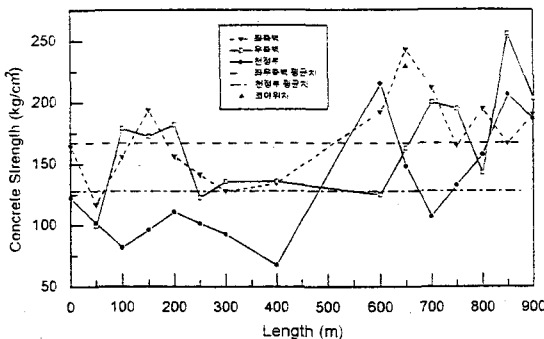
2) 정성분석 (XRD)

M터널 라이닝 콘크리트의 정성분석 결과는 〈그림 4〉와 같으며, 그림에서의 피크값은 대상 콘크리트 시편에 포함되어 있는 광물을 나타내는 것이다.

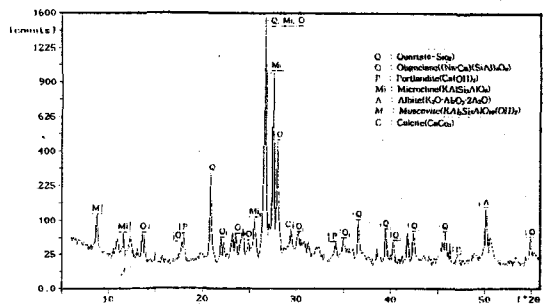
정성분석 결과를 살펴보면 모든 시편에 대하여 Quarts 성분이 많은데 이는 골재의 특성에 기인하는

것으로 사용된 골재의 품질은 양호한 것으로 평가되며, Portlandite와 Calcite 성분이 소량 포함되어 있는 것을 볼 때 대상터널의 라이닝 콘크리트는 모두 초기 콘크리트의 타설 및 양생이 양호하였으나 공용기간이 경과함에 따라 $Ca(OH)_2$ 가 점차적으로 감소되어 열화되었음을 알 수 있다.

또한 라이닝 콘크리트는 모두 석영 및 장식 계통의 골재를 사용하였으며, 현재 중성화가 크게 진행되어 있으나 시공초기의 배합과정에서 콘크리트 수화반응에 의한 유해한 중금속이나 광물은 포함되지 않았던 것으로 판단되어 사용성의 측면에서 아직 양호한 상태인 것으로 평가된다.



〈그림 3〉 Y터널의 길이에 따른 강도분포



〈그림 4〉 M 터널 라이닝 콘크리트의 정성분석 결과

대상터널의 정량분석결과

〈표 5〉

위치	Chemical Composition (%)											SUM	Insol Residue	비중(t/m ³)	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	P ₂ O ₅	Na ₂ O	K ₂ O	Ig. loss	표건			절건	
Y 터널	콘크리트	62.7	11.2	1.5	9.4	1.0	0.20	0.05	1.47	3.46	9.0	100.0	68.62	2.38	2.31
	모르터	63.7	10.3	1.2	10.3	0.5	0.18	0.06	1.27	3.19	9.2	99.9	67.72	-	-
	조골재	74.0	13.3	1.1	1.9	0.2	0.16	0.05	2.77	3.97	2.6	100.0	88.06	-	-
B 터널	콘크리트	59.1	13.4	3.2	9.4	1.1	0.39	0.09	1.31	3.43	8.5	99.9	66.05	2.41	2.33
	모르터	54.1	9.8	2.3	16.9	0.4	0.31	0.08	0.90	2.11	13.1	100.0	52.15	-	-
	조골재	63.7	15.2	6.5	3.1	0.9	0.87	0.47	2.62	2.41	4.2	100.0	78.98	-	-
M 터널	콘크리트	69.7	9.1	2.0	7.9	0.7	0.28	0.15	0.99	2.32	6.8	99.9	73.44	2.39	2.31
	모르터	62.8	9.9	2.3	11.2	1.0	0.32	0.05	1.27	2.47	8.7	100.0	65.47	-	-
	조골재	86.0	7.6	1.2	0.7	0.1	0.16	0.22	1.09	2.12	0.7	99.9	90.91	-	-

3) 정량분석 (XRF)

정량분석은 X-Ray Fluoroscope 시험기를 이용한 자동분석법으로 콘크리트 시편에 포함되어 있는 CaO, Ig.loss, Insol.-residue 등을 정량적으로 분석하여 구성광물의 양을 추정하는 방법으로, 건조된 충분한 양의 시료를 예비분쇄한 후 이를 다시 유발분쇄하여 200번 체로 체가름된 분말시료를 축분법에 의하여 채취한 것을 사용하였다. 터널별 라이닝 콘크리트의 정량분석 결과는 〈표 5〉와 같다.

정량분석 결과에서 볼 수 있듯이 콘크리트의 Ig.loss는 10% 내외로 대상터널 모두에서 적절하지만, Y터널과 B터널의 경우에는 잔골재의 Insol-residue가 일반 평균치인 95% 보다 적고 Ig.loss는 평균치인 1.3% 보다 크며 CaO의 함유량도 평균치인 0.5%보다 높게 나타나 상대적으로 볼 때 M터널에 비하여 콘크리트 품질이 다소 저하되었음을 알 수 있다.

이와 같은 정량분석 결과로부터 일본 시멘트협회의 「콘크리트 전문위원회 보고서 F-18」에 규정된 방법에 의하여 콘크리트 배합을 역추정하여 보면 〈표 6〉과 같다.

대상터널의 배합추정을 살펴 보면 전체적으로 W/C비가 60~70% 이상인 빈배합 콘크리트가 사용된 것으로 추정되며, 이는 현장타설시 작업성 확보의 측면에서 배합시 단위수량이외의 별도의 가수가 실시

대상터널의 배합추정 결과

〈표 6〉

	단위재료량 (kg/m ³)			W/C비 (%)
	잔골재	시멘트	물	
Y 터널	1045.85	184.96	133.15	72.0
B 터널	894.72	309.62	176.83	57.1
M 터널	975.60	222.97	150.63	67.6

된 것으로 판단된다.

4) 수화조직 관찰

대상터널의 중앙부 라이닝 콘크리트 조직을 전자식 주사현미경(SEM)으로 관찰한 결과는 사진 1~사진 3과 같다. 사진에서 볼 수 있듯이 대상터널은 매연의 농도 또는 습도가 높아 콘크리트 중의 다공성 증가와 함께 Porous한 조직(검은 부분) 및 미수화 물질인 침상의 겔(Gel)이 존재하고 있어 수화조직이 다소 훼손되었으며, 경화체를 구성하는 판상 조직도 손상되어 있음을 알 수 있다. 특히 Y터널의 경우에는 콘크리트 결합조직이 일반적인 콘크리트 구조와 다소 상이한 것으로 나타났는데 이는 라이닝 콘크리트의 타설 및 보수시 이물질이 혼입되었거나 콘크리트와 화학반응을 수반하는 성분이 함유되어 있었던 것으로 판단된다.

한편 수화조직 구성의 대부분이 침상의 겔과 육



사진 1. Y 터널 콘크리트의 SEM 촬영결과



사진 2. B 터널 콘크리트의 SEM 촬영결과



사진 3. M 터널 콘크리트의 SEM 촬영결과

각판상형의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 로 이루어져 있고 그외의 특별한 결정구조는 보이지 않는 것으로 보아 플라이애쉬 등의 혼화재료는 사용되지 않은 것으로 판단된다.

4. 결론

비파괴 검사와 코어분석을 통한 강도조사와 중성화, 정량·정성분석 및 수화조직 관찰을 통한 물리·화학적 검사에 의하여 노후된 철도터널 라이닝 콘크리트에 대한 재료적 안전성 평가를 실시하였다.

강도조사시 비파괴강도와 실제강도를 비교 평가하기 위하여, 비파괴검사법으로 반발경도법과 초음파법 및 조합법을 적용하였고 실제 코어강도를 측정하였다. 분석결과 비파괴강도법에 의한 추정강도는 실제 강도와는 다소 차이가 있는 것으로 평가되었으며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다. 또한 정량·정성분석 및 수화조직 관찰로부터 콘크리트 내의 광물조직과 품질상태 및 배합 추정을 통해 재료의 안전성 여부를 평가할 수 있었다.

대상터널의 경우 53년이 경과되었으므로 콘크리트 품질이 상당히 저하되어 있는 것으로 평가되지만, 안전성 및 사용성의 측면에서 볼 때 아직까지는 양호한 상태인 것으로 평가할 수 있다.

〈참고문헌〉

1. "터널표준도", 철도청, 1984.
2. "중앙선 구둔-매곡간 매월터널의 2개소 터널안전진단", 서울지방철도청, 1994년 12월, 543pp.
3. Idorn, G.M., Thaulow, N., "Examination of 136 Years Old Portland Cement Concrete," Cement and Concrete Research, Vol. 13, 1983, pp.739~743.
4. 岡田清, "鐵道事例にみる土木構造物の診断", 山海堂, 1990, 310pp.
5. 小林一輔, "コンクリートの組織構造の診断", 北出版(株), 1993, 266pp.