

비파괴 검사법에 의한 노후터널의 건전도 평가

Damage Detection of Decrepit Tunnel Structures using the NDT

김동규¹⁾, Dong-Gyou Kim, 정호섭¹⁾, Ho-Seop Jung

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Department of Geotechnical Engineering and Tunnelling research division, KICT

SYNOPSIS : Recently, the construction of road, subway, railroad, and microtunnel for electricity supplement have been increased because of increasement of traffic in urban area, increasement of industrial transportation, and the network between cities in Korea. The deterioration of tunnel structure may occur by various internal and external factors and particularly, tunnel structures tend to contact with either underground water or harmful ions. Therefore, leakage sometimes occurred through the cracks and joints of concrete lining. The leakage in tunnel may affect the durability of concrete lining. In this study, to evaluate the durability and deterioration of concrete lining in tunnel structures, we were performed the various experiments for compressive strength. Compressive strength obtained from nondestructive inspection and compressive strength test varies according to the concrete lining conditions.

Keywords : tunnel structure, deterioration, nondestructive inspection, compressive strength.

1. 서 론

우리나라 터널 구조물은 약 100여 년 전부터 건설되기 시작하여 도로, 철도 및 지하철 터널 등 다양한 형태로 건설되어 왔으며 최근에는 해저터널을 비롯하여 기존 노선을 직선화하기 위하여 도로 및 철도터널의 선형변경에 따른 새로운 터널의 건설이 점점 증가하고 있는 실정이다. 그러나 과거에 건설되어 수십 년이 경과한 현시점에서 그 수명이 다하여 폐쇄된 경우가 많지만 계속하여 공용중인 터널도 존재하고 있다. 터널 구조물은 그 특성상 지반 또는 암반내에 건설되는 구조물로서 터널지보재가 접하는 환경에 따라 탄산화, 동결융해, 알칼리 골재반응 및 화학적 침식 등 다양한 환경에 노출됨에 따라 내구 성능도 크게 달라질 수 있다.

구조물의 공용년수가 증가함에 따라 구조물에 대한 효과적인 조사 및 안전진단이 매우 중요할 뿐만 아니라 대상 구조물에 손상을 주지 않으면서 진단 및 조사를 하는 비파괴검사 기법이 요구되고 있다. 터널 구조물에 발생하는 대부분의 열화 또는 변상은 그 원인이 복합적으로 작용하므로 터널의 변상원인을 정확하게 파악하는 것은 풍부한 현장경험과 상당한 전문지식을 요한다. 기존 터널의 효율적인 유지관리를 위해서는 터널의 건전도를 평가하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 공용년수가 70년 이상 된 노후화된 터널을 대상으로 외관조사를 실시한 후 터널 라이닝 콘크리트의 비파괴 압축강도와 코어 시편에 의한 일축압축강도를 측정하여 라이닝 콘크리트의 품질을 비교 고찰 하였다.

2. 실험개요

노후화된 터널의 건전도를 평가하기 위하여 1937년에 준공되어 60여 년간 운용한 뒤 폐쇄한 노후 터널 구조물을 대상으로 육안관찰에 의한 외관조사를 실시하였으며 아울러 비파괴검사법에 의한 콘크리트

라이닝의 압축강도를 추정하고 코어드릴을 이용하여 코어를 채취한 후 일축압축강도를 측정하여 비교 평가하였다. 그림 1은 압축강도 측정 및 추정을 위한 위치를 나타낸 것이다.

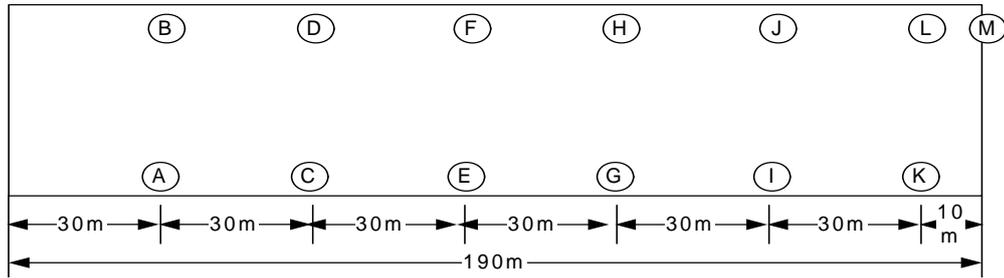


그림 1. 코어 채취 및 비파괴 검사 측정 위치도

코어 시편의 압축강도는 KS에 준하여 $\phi 100 \times 200 \text{mm}$ 원주형 코어 공시체를 대상으로 하여 압축강도를 측정하였다. 라이닝 콘크리트 코어 공시체의 압축강도를 측정하기 위해서 코어공시체를 채취한 다음 샘플의 상·하부를 콘크리트 커터기로 절단한 다음 상하부면을 연마기로 연마한 후 유압식 만능시험기로 압축강도를 측정하였다.

반발경도법에 의한 비파괴 압축강도는 콘크리트 표면경도를 측정하여 콘크리트의 압축강도를 추정하는 검사기법으로서 현장에서 간단하게 작업을 수행할 수 있다. 본 연구에서는 슈미트해머를 이용하여 라이닝 콘크리트 표면에 종횡으로 4~5열의 선을 그어 직교하는 20점을 타격하여 반발경도값을 결정하였으며, 압축강도 추정은 다음 식들을 사용하였다.

$$(1) \text{일본재료학회(JMI)} \quad F_c = 1.3R_o + 18.4 \text{ (MPa)}$$

$$(2) \text{일본재료시험소(TMI)} \quad F_c = 1.0R_o - 11.0 \text{ (MPa)}$$

$$(3) \text{일본건축학회(JAI)} \quad F_c = 0.73R_o + 10.0 \text{ (MPa)}$$

한편 슈미트 해머법은 해머타격시의 반발계수를 측정하여 콘크리트의 강도를 추정하는 방법으로 비파괴라고 하는 방법에서는 비교적 정밀도가 높은 강도 추정법으로 평가되지만 콘크리트 표면 조건에 따라 영향을 받는 문제점이 있다. 한편 콘크리트 구조물을 반무한 탄성체로 간주하여 콘크리트의 탄성과 전탄속도를 측정하여 콘크리트의 강도를 추정하는 장비를 이용하여 콘크리트 압축강도를 추정하였다.

3. 실험결과

노후 터널 구조물 라이닝 콘크리트의 성능저하도 및 원인을 규명하기 위하여 공용년수 70년 이상 된 터널을 대상으로 실시한 외관조사와 역학적 특성을 고찰하였다. 현장 외관조사 결과, 조사대상 터널 내부 대부분이 다양한 형태의 균열이 존재하였으며, 균열로 인한 누수와 박리 및 박락 등 심각한 성능저하 현상이 조사되었다.

또한 균열 및 시공이음부에서 콘크리트 라이닝의 노후화 정도와 내구성이 취약해졌음을 나타내는 누수를 동반한 백태가 상당한 개소에서 조사되었다. 특히 측벽 라이닝 콘크리트의 joint 부분은 결합력의 감소로 인하여 백화현상이 두드러지게 많았으며, 이 물질이 건설의 반복으로 인하여 결정상으로 존재하여 광폭의 균열이 생성된 것으로 조사되었다(그림 2 및 3 참조).

터널 라이닝 콘크리트의 표면 반발경도를 측정하여 압축강도를 추정한 결과는 라이닝 콘크리트 자체의 압축강도를 의미하는 것은 아니며, 라이닝 콘크리트가 성능저하 요인에 의하여 침식정도, 특히 라이닝 콘크리트 표면부에서 표면연화작용에 의한 성능저하 정도를 알아보기 위한 것이다. 즉 라이닝 콘크

리트의 표면이 누수 및 반응생성물의 영향을 받았을 경우 반발경도가 적게 나타나며, 상대적으로 건전한 상태로 존재할 경우 반발경도는 보다 크게 평가된다. 조사대상 터널구조물은 설계기준강도 미상의 콘크리트를 사용하였으나 내부 건전부위에 대한 압축강도 측정을 통하여 분석한 결과 약 15 ~ 25MPa 정도로 추정되었다.

그림 4는 조사 대상 터널 구조물에서 채취한 코어 시편을 대상으로 일축압축강도를 측정하여 정리한 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 동일한 터널 구조물일지라도 코어 공시체의 채취 위치에 따라 압축강도가 약 13 - 42MPa 정도로 크게 상이하게 나타남을 알 수 있으며, 특히 육안으로 관찰이 가능할 정도의 균열 및 누수가 발생한 지역에서 채취한 코어의 경우 다른 곳에서 채취한 것보다 훨씬 작은 압축강도 결과를 나타내었다(지점 E). 그림 5는 코어 시편의 압축강도결과와 비파괴 검사결과를 비교하기 위하여 반발계수를 이용하여 추정된 3개의 압축강도 추정 제안식으로 구하여 정리한 것이다. 슈미트 해머로 측정된 반발계수는 구조물의 재령에 따른 보정계수를 고려하여 산출하였으며, 각각 10.5 - 25.7MPa 정도로 나타났다. 전체적인 평균값으로 비교해보면 코어 시편에 의하여 구한 압축강도결과는 22.6MPa이며 비파괴 검사에 의한 결과는 각각 15.3, 13.8 및 22.0MPa로서 일본건축학회에서 제안한 식이 코어 강도결과와 가장 유사한 결과를 나타내었다. 한편 그림 6은 탄성파를 이용하여 콘크리트 압축강도를 측정하여 정리한 것으로 이것 또한 가속도계를 콘크리트 표면에 두드리는 방법으로 측정하는 것이기 때문에 콘크리트 표면조건에 따라 압축강도 값의 차이가 발생할 수 있다. 그러나 슈미트 해머에 비하여 비교적 정확한 값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 그림 7은 코어 시편에 의한 압축강도 결과값에 대한 비파괴 압축강도비로 나타낸 것이다. 이 그림에서와 같이 6개소에서 측정된 코어 강도와 반발계수에 의한 비파괴압축강도 및 탄성파에 의한 비파괴 압축강도 추정값을 비교한 결과 탄성파에 의한 압축강도 추정 평균값이 99.1%로 가장 근접한 결과를 나타내었으며 일본건축학회와 재료학회 순으로 나타났다. 이는 앞에서 서술한바와 같이 슈미트 해머법은 해머타격시 콘크리트 표면조건에 따라 영향을 많이 받기 때문에 탄성파를 이용하여 압축강도를 추정하는 것에 비하여 정확도가 떨어지는 것으로 판단된다.

4. 결 론

지하 콘크리트 구조물의 경우는 항상 지하수 또는 습기에 노출되어 있으며 콘크리트내의 수분이나 유해한 이온 등의 이동은 모든 열화현상을 야기하는 원인이 되고 있다. 이런 수분 또는 유해이온의 이동은 공극을 통해서 이동되지만 내부의 균열을 포함하고 있는 경우 이동이 가속화되어 균열이 주된 열화의 경로가 되고 있다. 콘크리트 구조물은 시간이 경과함에 따라 균열 및 누수 등 구조물의 성능이 저하되는 것은 필연적이라 할 수 있다.

이와 같은 콘크리트 구조물의 품질관리를 위하여 진단 및 조사시에 압축강도를 측정하여 평가하는 것은 대단히 중요한 요소이며, 특히 조사 대상 구조물에 손상을 주지 않으면서 보다 정확하게 구조물을 진단하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 표면조건에 따라 민감한 반발계수법에 의한 비파괴 검사결과보다 탄성파에 의하여 측정된 압축강도 추정값이 보다 실구조물과 잘 일치하는 결과를 나타내었다.

참고문헌

- 1) 古賀裕久ほか(2001), 反發度法による新設構造物検査に關する檢討, 日本道路協會第24回日本道路會議一般論文集(A), pp. 342-343.
- 2) 日本非破壊検査協會(2001), 彈性波法によるコンクリート強度の推定, 年度秋季大會講演概要集, pp.111-114.



그림 2. Joint 부분 균열누수 백태



그림 3. 콘크리트 탈락, 골재노출

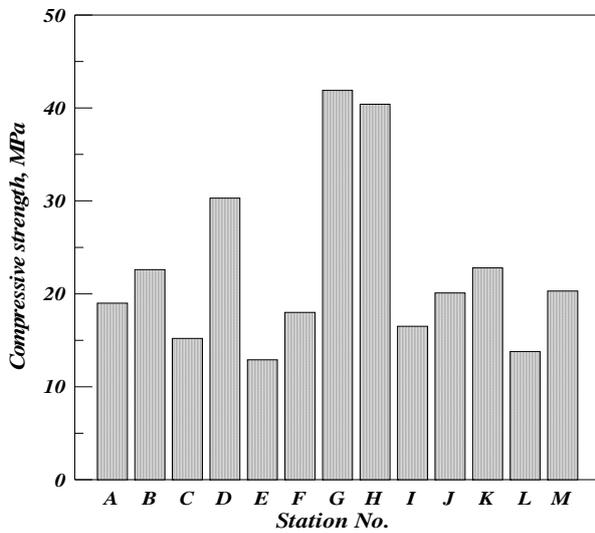


그림 4. 코어 압축강도

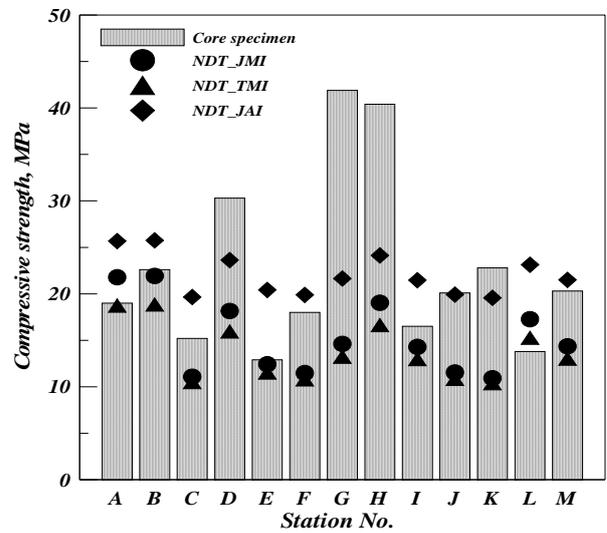


그림 5. 비파괴 압축강도(슈미트해머)

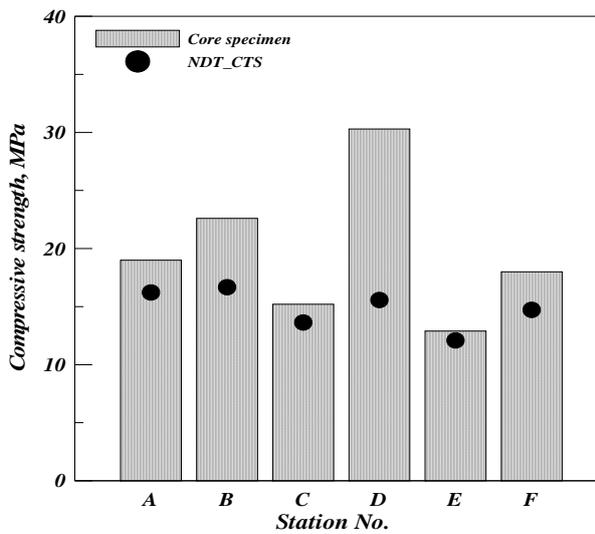


그림 6. 비파괴 압축강도(탄성파)

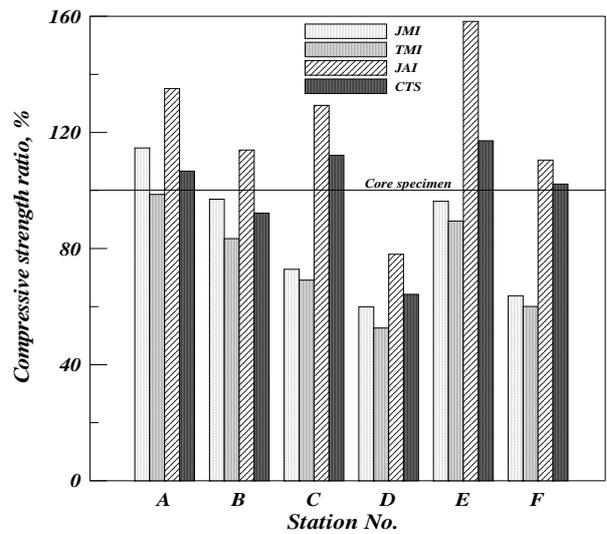


그림 7. 코어시편에 대한 비파괴 압축강도비