

철도구조물 진단기술의 이해



| 서 사 범 |

삼표이앤씨(주) 기술연구소장
공학박사 · 철도기술사

I. 머리말

철도는 토목, 궤도, 전력, 신호 등의 많은 설비로 성립되어 있어 이들 중의 무엇인가 하나라도 좋지 않은 상태가 발생되면 열차의 안전운행에 영향을 미치는 경우가 있다. 또한, 이들의 설비는 나날이 노후 열화되어 간다. 따라서 설비의 건전도를 정확하게 진단하고, 필요시 보수, 보강 또는 갱신 등의 처치를 하여 갈 필요가 있다. 그렇지만, 철도관리자가 맡은 설비의 수량은 팽대하며, 한편으로 설비의 건전도를 진단하는 기술자의 사람 수나 설비의 진단, 보수, 보강 등에 투입되는 자금에는 한계가 있다.

그러므로 한정된 경영자원을 합리적으로 투입하여 열차의 안전한 주행을 가능한 한 보장하기 위해서는 설비의 진단방법, 보수·보강방법 등에 대하여 더욱 연구·개발이 필요하게 된다.

II. 철도설비 진단의 필요성

1. 팽대한 설비 수량

머리말에서도 언급한 것처럼 철도를 구성하는 설비의 수량은 팽대하다. 팽대한 구조물 중에 긴 세월을 지난 것에서도 건전한 상태에 있는 것도 수많

이 있지만, 콘크리트 구조물 중에는 중성화, 염해, 알칼리 골재 반응 등으로 인한 변상, 강교에서는 부식이나 받침부위의 변상 등이 생긴 것이 있다. 또한, 강우, 홍수로 인한 흙 쌓기의 붕괴나 기초의 세굴 등이 생기는 경우도 있다.

이와 같이 철도관리자가 맡은 설비는 팽대함과 함께 주의를 요하는 설비가 적지 않다.

2. 투자의 합리적인 판단

철도설비는 팽대하지만, 경영자원에는 한계가 있다. 한정된 경영자원 하에 안전을 최대한으로 보장하기 위해서는 투자 우선순위를 정확하게 판단할 필요가 있다. 이것을 지원하는 도구로서 리스크 매니지먼트(risk management)나 애셋 매니지먼트(asset management) 등의 방법이 있다. 이들은 정량적으로 리스크를 어림잡아 계산하여 그것을 최소화하기 위한 최적의 처치를 제공하는 방법이다.

그렇지만, 이들의 방법이 유효하게 기능하도록 하기 위해서는 설비 건전도의 정확한 진단 데이터, 보수·보강 효과의 정확한 정량적 데이터 등이 필요하며, 설비의 진단방법, 보수·보강방법 등의 요소(要素)기술 개발의 진전이 불가결하다.

3. 설비의 건전도 진단

팽대한 설비의 건전도를 올바르게 진단하여 어느 정도의 성능을 갖고 있는가(어느 정도의 외력 조

건에 견디는가), 금후 경년에 따라 그 성능이 어떻게 열화되어가는가 등을 정확하게, 게다가 될 수 있는 한 효율적으로 수행하여가는 방법의 연구개발은 극히 중요하다.

토목구조물의 예를 들자면, 교각이나 고가교의 건전도를 진단하는 방법으로서 예를 들어 충격진동시험이 개발되었다. 현재는 케이블을 불요하게 하는 등 시공성을 보다 향상시키고 있다. 레이저 도플러 속도계(LDV)를 이용한 비접촉으로 구조물의 건전도를 진단하는 방법의 개발도 진행되고 있다. 터널변상을 파악하는 것으로는 화상처리기를 이용하여 터널의 변상을 신속하게 파악하는 장치가 개발되었다. 더욱이, 인텔리전트 마테리얼(intelligent material) 등의 새로운 센서도 연구 개발되고 있다.

4. 진단한 데이터의 기록·보존

진단한 데이터는 기록하여 보존함으로써 소유하는 설비의 상태를 올바르게 파악하고, 또한 경년에 따른 변화를 앞으로 보수·보강에 관한 필요성의 판단, 투자 우선순위를 판단하는 일에 유용하다.

지금까지는 수량이 팽대한 설비의 상태를 기록하고, 또한 데이터를 갱신하여 가는 것은 극히 노력과 시간이 걸리는 것이었다. 따라서 외국에서는 이들의 작업을 효율적으로 수행하는 '설비관리시스템'이 개발되었다. 또한, 토목구조물에 관하여는 '구조물유지관리 지원시스템'이 개발되었다.

Ⅲ. 교량상부공의 건전도 진단

1. 교량상부공의 진단

철도토목구조물에는 콘크리트구조, 강구조, 기초·흙구조, 터널과 여러 가지 구조물이 있다. 이 중에서 교량상부공을 구성하는 것으로서는 콘크리트 구조물(철근콘크리트 거더, 프리스트레스트 콘크리트 거더 등), 복합 구조물, 강·합성 구조물(합성형, 강형)이 있다. 이들의 구조물은 열차를 안전하게 운행시키기 위하여 용도에 따라서 지형조건, 기술조건, 환경조건 등의 제약 하에서 재료나 구조의 특징을 살려 건설되고 있다. 복합구조물은 비교적 새로운 구조물이지만 강구조물, 콘크리트 구조물은 예전부터의 것도 많고 노후화도 염려되고 있다. 게다가, 검사원

의 감소, 검사업무의 증대 등의 문제도 안고 있다. 더욱이 이들의 구조물은 비교적 보수하기 쉬운 강구조물을 제외하고 한번 건설되면 교체가 곤란하다고 하는 면도 있다. 철도의 안전을 확보하기 위해서는 이들 구조물의 건전도를 적절하게 파악하는 것이 중요하며, 향후 가일층 검사의 효율화와 정밀도 향상이 요구되고 있다. 이와 같은 과제에 대처하기 위해서는 새로운 기술을 함께 담아 구조물의 건전도를 효율적으로 진단하기 위한 기술을 개발할 필요가 있다.

2. 변상이 생기기 쉬운 개소

철도교의 검사는 육안검사를 주체로 하는 전반검사와 상세하게 검사하는 개별검사로 구분된다. 전반검사는 모든 구조물을 대상으로 하여 실시되며, 이 검사에서 문제로 되는 변상이 인지된 구조물에 대하여 개별검사가 행하여진다. 따라서 전반검사의 작업량은 팽대하며, 이것을 효율적으로, 게다가 확실하게 행하는 것이 대단히 중요하다. 그 때문에 콘크리트 구조물과 강구조물 각각에서 변상이 생기기 쉬운 구조물 부위를 잘 이해하여 둘 필요가 있다.

(1) 강철도교

강철도교의 대표적인 변상으로서 부식피로와 받침부위의 변상이 열거된다.

부식은 일반적으로 물이 고이기 쉬운 개소에서 생기기 쉽다. 예를 들어, 부재 연결부분, 받침부위, 상부플랜지의 교량침목 하면, 복부 판의 귀퉁이, 하부플랜지의 상면 등이다. 구조형식별로는 박스단면 거더의 내부도 물이 고이기

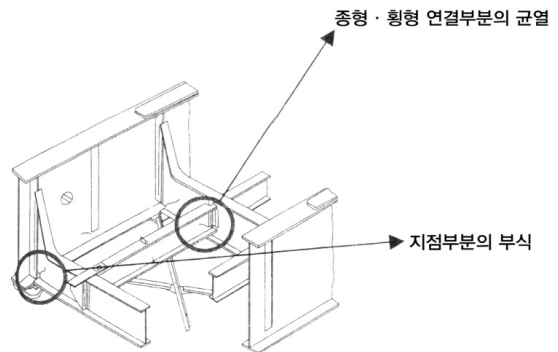


그림 1. 강철도교 변상의 착안개소 예

쉬운 구조로 되어 있다. 우수뿐만 아니라 결로의 영향도 있는 것 같다. 부식의 진행정도에 따라 부재의 내하력이나 이음부분의 내하력, 받침의 기능 등에 영향을 미칠 우려가 있기 때문에 충분한 주의가 필요하다. 더욱이, 현재의 설계에서는 이와 같이 부식하기 쉬운 개소는 배수를 고려한 구조 디테일을 채용하도록 하고 있다.

피로는 열차하중 등이 반복하여 작용함에 따라 부재에 균열이 생기는 현상이다. 피로변상은 통상의 사용상태 하에서 진행되고, 균열이 어떤 길이에 달하면 단번에 부재가 파단되기 때문에 검사가 중요하게 된다. 강철도교에서는 콘크리트 철도교와 비교하여 사하중에 대한 열차하중의 비율이 커서 변상발생 요인의 하나로 되어 있다. 피로변상은 응력이 집중되는 개소, 용접부위, 지점부위 부근에서 발생되기 쉽게 되어 있다. 또한, 강구조물은 보수·보강하기 쉽기 때문에 현장에서 용접되는 케이스가 보인다. 그러나 초기의 리벳 거더에서는 용접에 적합하지 않은 강재가 이용되고 있기 때문에 이와 같은 개소에 대해서도 피로에 대한 주의가 필요하게 된다.

받침부위의 변상으로서의 받침부위의 가동불량, 부등침하 등이 열거된다. 부식, 피로와 관련되어 생기는 변상이며, 결과로서 다음의 변상을 유발하는 원인으로도 된다. 받침부위는 시공성의 영향을 받기 쉬운 개소이지만 오래된 강철도교에서는 시공성에 더하여 장년의 경년에 따라 받침부위에 나쁜 상태가 생겨 있다고 생각된다.

그림 1에 부식과 피로의 대표적인 발생 개소 예를 나타낸다. 변상의 종류와 발생개소는 강철도교의 구조형식이나 변상의 발생개소, 정도에 따라 천차만별이지만, 전반적

사에서는 이와 같은 변상의 요인을 생각한 뒤에 어디에 어떠한 변상이 생길 가능성이 있는가를 파악하여 변상을 확실하게 파악하는 것이 중요하다.

(2) 콘크리트 철도교

콘크리트 철도교에서 변상이 생기기 쉬운 부위로서는 시공하기 어려운 개소가 우선 열거된다. 예를 들어, 거더의 받침부위는 대표적인 예의 하나이다. 고무 슈가 적용되기 이전의 거더에는 철강제의 받침이 이용되었지만 철강제 받침의 부식 등으로 인하여 가동 슈가 거더의 온도변형 등을 구속함에 따라 그림 2와 같이 거더에 균열이 생기는 일 이 있다. 또한, 고무 슈를 사용하고 있는 경우에도 거더 시 공 시의 형틀로부터 모르타가 빠져 고화되어버려 이것이 균열 등과 같은 변상의 원인으로 되는 일 이 있다.

배근이 곤란하여 피복이 작게 되는 경향이 있는 부위도 주의를 요한다. 예를 들어, 켄틸레버 슬래브의 선단은 시공 시에 철근이 처져 피복이 작게 되는 경향이 있다. 이 부위는 우수의 영향도 받기 쉬우므로 철근 부식이 생기고, 콘크리트의 벗겨 떨어짐이 생기기 쉽게 된다.

PC거더의 그라우트 주입도 시공하기 어렵기 때문에 충전 불량에 따라 그림 3과 같이 PC 거더의 PC 강봉이 부식 파단되어 돌출되는 경우도 있다. 다만, 최근에는 PC 그라우트의 시공기술도 상당히 진보되어 있기 때문에 근년의 구조물에는 문제가 없게 되어왔다고 생각된다.

변상의 발생에는 구조물 주위 환경의 영향도 크게 관계 된다. 환경에는 마이크로 영향과 매크로 영향이 있다.

마이크로 영향으로서 하나의 구조물 중에서도 부위에 따

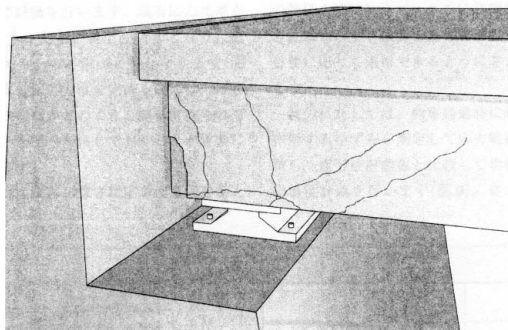


그림 2. 콘크리트 철도교 받침부위에서의 변상

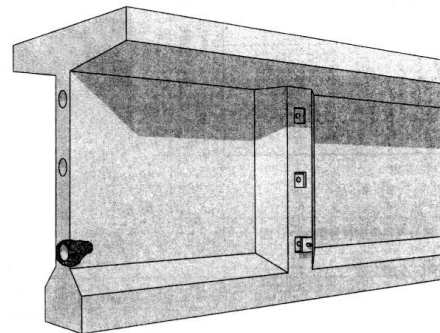


그림 3. PC 철도교에서 그라우트 불량에 따른 변상

라 우수 등과 같은 수분의 공급 상태가 다른 점이 열거된다. 예를 들어, 고가교의 상면이나 측면에는 우수가 직접 공급되지만 고가교 하면의 콘크리트는 1년 중 건조 상태에 있다. 일반적으로 습윤 면에서는 콘크리트의 전기저항이 저하되어 철근의 부식속도가 크게 되기 때문에 콘크리트가 벗겨져 떨어지기 쉽게 된다. 우수가 직접 관계되는 난간 부위에서는 콘크리트의 벗겨 떨어짐이 생기기 쉬움에 비하여 고가교 하면에서는 철근위까지 중성화가 진행되고 있어도 철근 부식이 인지되지 않는 일이 자주 있다.

마크로 영향으로서는 해안 부근에서 염해에 따른 철근 부식, 한냉지에서의 콘크리트의 변상 등이 열거된다. 예를 들어, 동해의 경우에도 교각두부 등은 우수 등이 체수되기 쉬어 변상이 현저하게 진행되는 경우가 있다.

또한, 당연하지만 단면력이 큰 개소에서는 구조적인 균열이 생기기 쉽게 된다. 대표적인 구조물에 대하여는 어떠한 하중, 단면력으로 구조물의 단면이 결정되고 있는가를 알아두는 것은 대단히 중요하다.

3. 상세한 건전도 평가

전반검사에서 문제로 되는 변상이 발견된 경우에는 개별검사를 한다. 상세하게 검사하여 건전도를 평가한다. 상세한 조사에서는 정성을 들인 육안검사와 함께 필요에 따라 측정기기를 이용한 조사도 한다.

(1) 강철도교

강철도교에서는 실제교량 측정을 함으로써 부식과 피로를 대표로 하는 변상에 관한 정량적인 건전도 평가 시스템이 확립되고 있다.

내하력의 평가에서는 부식된 강부재의 단면을 상세히 측정하여 강 부재에 발생하는 응력과 설계 시의 허용 응력도를 할증한 보수한도 응력도를 비교한 현유(現有)응력 비율을 이용하여 평가한다. 예를 들어, 현유응력 비율이 100%를 하회하면 건전도 AA(국토해양부의 시설물의 안전 점검 및 정밀 안전진단 지침에서는 제Ⅵ장 제3절과 같이 다르게 규정)로 되며, 곧바로 무엇인가의 대책이 필요하게 된다. 보수한도 응력도를 정할 때에는 기존의 강철도교가 어떠한 강재로 만들어져 있는가를 밝혀두는 것이 중요하게 된다.

피로에 대하여는 열차통과 시에 강형에 작용하는 스트



그림 4. 건전도 평가시스템(콘크리트 구조)

레이를 측정하여 응력범위를 계수(計數)하여 피로설계 곡선과 비교하여 누적 피로 손상도를 평가한다. 지금까지는 실제 교량측정에 시간을 요하였지만 근년에는 측정기기의 향상이나 디지털 데이터 처리속도의 향상에 따라 다수의 측정 점을 동시에 측정할 수가 있어 상세한 검토도 가능하게 되어 있다. 한편, 건전도 평가 시스템은 자동적으로 평가하기 때문에 기술자는 무엇을 목적으로 하여 어디에 스트레인 게이지를 설치하는가, 출력된 파형을 보고 결과가 타당한 것인가의 여부를 판단하는 능력이 중요하게 된다.

이상과 같이 상세한 건전도 진단에서는 차례로 최근의 식견을 받아들이면서 정밀도가 좋게 건전도를 진단함과 함께 금후의 검사에서 중요한 사항을 유의점으로서 제시하여 효율적인 검사에 유용하게 이바지되도록 할 필요가 있다.

(2) 콘크리트 철도교

콘크리트 철도교에 관하여는 교량을 지키는 건전도 평가 시스템이 개발되고 있다. 이 시스템은 그림 4에 나타난 것처럼 측정시스템과 평가시스템으로 구성되어 있다.

측정시스템은 육안검사와 조사기기를 이용한 실제교량의 변위, 스트레인 등의 측정이나 중성화, 염화물 이온 등의 재료적인 측정을 지원하는 툴을 포함하고 있다. 평가시

검사의 관계에서 필요하게 되는 방법, 정밀도가 다르다.

전반검사는 모든 터널을 대상으로 하여 정기적(예를 들어, 2년마다)으로 수행하는 것이다. 예를 들어, 초회, 통상, 특별의 세 가지로 구분된다. 육안이나 타격 음으로 변상을 추출하여 건전도를 판정한다. 터널에서는 표 1의 성능항목에 대하여 예를 들어 A, B, C, S의 4 단계로 구분하고(국토해양부의 시설물의 안전점검 및 정밀 안전진단 지침에서는 결함의 범위와 정도에 따라 최상인 A를 비롯하여, B, C, D, E의 5 단계로 구분하며, 본고와는 다르게 규정), 성능항목 ④(벗겨 떨어짐)에 대하여는 추출된 변상 등에 대하여 α, β, γ 의 3 단계로 구분한다.

개별검사는 건전도 A로 판정된 경우에 변상에 따라 상세하게 조사하는 것이다. 변상원인의 추정과 장애의 예측을 한 후에 자세히 건전도를 판정하여 대책의 필요여부·시기·방법을 특정한다. 필요에 따라 변상의 진행성을 평가하기 위한 감시(육안이나 계측)도 한다.

4. 터널의 변상원인

건전도를 진단하기 위해서는 변상원인을 파악할 필요가 있다. 그를 위해서는 터널의 변상 메커니즘을 이해하는 것이 중요하다.

터널의 변상원인으로는 일반적으로 다음의 것이 있다.

- (1) 외인 : 토압 등과 같은 외력의 작용이나 복공재료의 열화 요인, 누수 등의 외적 요인
- (2) 내인 : 복공에 이용된 재료, 터널의 설계·시공 등에 기인하는 내적 요인

이들의 외인과 내인이 복잡하게 조합되어 여러 가지 형의 변상이 나타난다. 이하에서는 외인인 ① 토압 등의 외력, ② 복공재료의 열화요인, 여러 가지 점에서 유지관리상의 문제로 되는 ③ 누수·동결의 세 가지로 나누어 변상원인과 현상의 관계를 기술한다.

5. 토압 등 외력의 작용에 따른 변상

토압 등의 외력이 작용하면, 변형이나 균열 등이 생겨 터널구조의 불안정화나 건축한계 지장, 노반부분의 안정성 저하, 벗겨 떨어짐, 열차운행의 안전성을 위협하는 여러 가지 현상이 생긴다. 그 때문에 때로는 부득이 보강이나 개축을 한다.

토압 등의 외력으로서 ① 소성 압(塑性壓), ② 지층의

이완에 따른 연직 압, ③ 편압·사면 크리프, 사태가 대표적이다. 또한, ④ 수압, ⑤ 지반침하나 내하력 부족, ⑥ 근접시공, ⑦ 지진 등도 중요한 요인이다.

변상을 유발시키는 요인(측벽이 동그스름하지 않고 수직으로 일어서있는 것이나 인버트가 없는 것 등), 시공상의 요인(배면공동, 라이닝두께 부족, 타설 이음의 불량 등)이 있으며, 이들의 개재에 따라 복공의 내하력이 저하되고, 약간의 외력에도 변상이 촉진된다.

① 토압의 작용으로 인한 변상은 단계적으로 서서히 진행되는 것이며, 변상을 파악한 후에 계속하여 감시하면 계획적으로 대책을 세울 수 있다. ② 불량은 현저한 구조결합이 있는 경우에 한하여 생기므로 결함의 사전제거가 중요하다.

6. 복공재료의 열화와 벗겨 떨어짐

복공재료의 열화는 누수에 관련되는 것이 많고 유해한 물, 동결, 매연, 염분, 중성화 등의 외인과 재질불량 등의 내인이 복합하여 생긴다.

어느 정도 양의 누수가 장기간 계속하여 발생되면 콘크리트가 용해 유출되는 일이 있다. 한냉지에서는 물의 동결 팽창에 따라 복공재료가 열화되는 동해가 발생된다. 도시 터널 등에서 RC구조인 경우는 중성화나 염해가 문제로 되는 일이다.

이상의 요인에 의하여 재료열화가 진행되면 복공 편이 벗겨 떨어짐이 생긴다. 열화가 더욱 진행되면 구조의 안정성에 영향을 주는 일도 생각된다.

그렇지만, 터널 갱내는 습도가 높기는 하나 환경은 안정되어 있으므로 노천의 구조물에 비하면 열화속도가 현저히 늦다고 한다. 또한, 철근 콘크리트나 블록 쌓기 복공에서는 중성화나 염해로 인한 열화의 걱정이 없다. 따라서 복공은 열화되기 어렵다고 생각된다. 그렇지만 처음부터 재질이 불량한 경우는 열화요인이 적더라도 개재되면 열화된다. 재료열화가 문제로 되는 이유이다.

한편, 보수재(뿔어 붙이기 모르타 등)와 복공과의 부착력이 저하되어 벗겨 떨어짐에 이르는 사례가 근년에 많이 보인다. 충분한 부착력과 내구성이 있는 공법의 적용이 요망된다.

고속선로 터널에서의 벗겨 떨어짐 사고의 원인을 규명한 사례를 보면, 균열은 발생 후 10~20년에서 서서히 진전

하여 불룩화되어 벗겨 떨어지는 경우가 있는 점이 확인되었다. 또한, 열차가 주행할 때마다 갱내의 공기압이 변동됨에 따라서 균열이 서서히 진행된다고 생각된다. 그러나 진전속도는 대단히 완만하므로 2년마다의 전반검사를 확실하게 시행하여 적절한 조치를 하면 벗겨 떨어짐을 미연에 방지할 수 있다. 다만, 이것을 게을리 하면 벗겨 떨어질 리스크가 높아진다.

7. 누수와 동결에 따른 문제

누수는 터널전장의 반수 이상에서 발생되고 있다. 최근의 NATM이나 실드터널에서는 방수기술이 진보되어 누수가 문제로 되는 케이스는 적게 되었지만 경년 20~25년 이상의 재래공법의 터널에서는 지금도 누수로 고민하고 있다.

누수와 동결은 다음과 같이 열차운행 등의 여러 가지 변상에 관여하므로 대책이 극히 중요하다.

- 1) 열차운행에 대한 영향: 고드름이나 측면결빙은 하룻밤에 열차에 닿을 정도로 성장하는 사례도 있다. 누수가 가선에 직접 걸침에 따른 지락(地絡)이나 열차의 공전에도 연결된다.
- 2) 갱내 설비에 대한 영향: 레일 등의 부식을 촉진하여 교환주기를 짧게 한다.
- 3) 노반구조에 대한 영향: 열차주행에 따라 노반이 반복하여 두드려져 지층재료가 누수와 함께 유출되어 노반부분이 침하된다고 하는 심각한 변상이 생기는 경우가 있다.

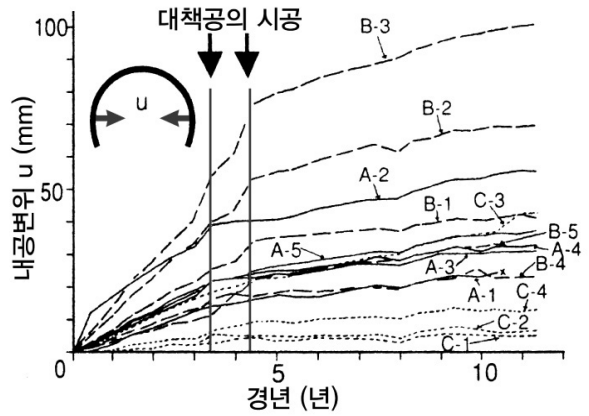
8. 건전도 진단의 요점

여기서는 진단에 필요하게 되는 정보를 어떻게 파악하는가를 정리하고 건전도 진단의 요점을 설명한다.

(1) 변상현상의 파악

터널갱내는 길고 단조롭게 어두우므로 변상을 정확하게 포착하기가 용이하지 않다. 그러나 1 개소라도 변상이 생기면 터널을 포함하는 노선전체의 기능이 저해되므로 빠뜨림이 없이 질이 가지런한 조사가 필요하다.

그를 위해서는 어떻게 하면 좋은가? 이것은 복공의 상태를 육안과 타격 음으로 세밀히 조사하고 충실히 기록하는 것이다. 세밀히 조사하기 위해서는 암흑의 갱내전체를 밝



소성압에 의해 변상이 진행되는 터널에 대하여 10년 이상에 걸쳐 내공 변위계 계측이 행해지고 있다. 대책공의 필요시간이나 대책 후의 효과를 파악할 수 있다.

그림 6. 장기간에 걸친 변상감시의 예

히는 조명이 필요하다. 아치부분에도 지근거리(직접 해머를 이용한 타격 음이 가능)에서의 조사가 필요하다. 충실히 기록하기 위해서는 변상을 빠뜨리지 않고 도상에 표현할 수 있는 ‘변상 전개도’의 작성이 가장 좋은 방법이다. 이 작업은 시간이 걸리지만 중요하고 기본적인 작업이며 지도에 겹치는 것이 적절한 유지관리로 이어진다.

근년에는 여러 가지 비파괴 검사방법이 실용화되고 있다. 잠시 후에 설명하는 복공 촬영시스템도 그 하나이며, 이러한 방법을 활용하면 각별히 검사능률과 정밀도가 향상된다.

(2) 변상의 진행성 파악

변상은 시계열적인 파악이 중요하다. 그러나 전술과 같이 변상의 진행성은 완만하므로 검사기록은 오래 계속 축적하여 비교하는 것이 요구된다. 예를 들면, 2년간의 추적에서는 변상의 진행성 파악이 곤란한 것이다.

그림 6은 소성 압에 의한 변상 터널에서 내공변위 계측을 10년 이상 계속한 예이다. 이와 같이 검사를 지도로 계속함으로써 변상을 올바르게 포착할 수가 있고 장래 예측도 가능하게 되어 정확한 대책계획을 입안할 수 있게 된다.

(3) 지형·지질등환경조건에의 파악

터널의 검사에서는 변상개소에 대한 상부의 지형이나

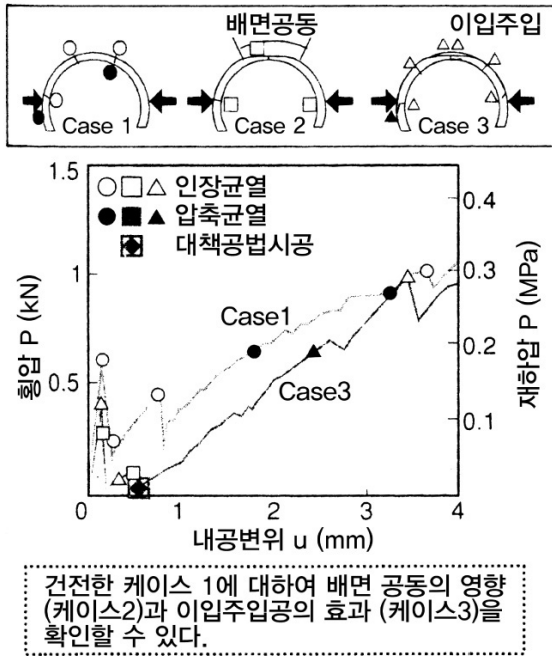


그림 7. 복공 모형실험에 의한 복공 변형거동의 비교

토지 이용의 상태, 지질을 아는 것이 중요하다.

이들을 파악하기 위해서는 먼저 지표답사에 의하여 지형도, 항공사진, 지질도 등을 조사한다. 토압으로 인한 변상의 경우는 지질조사 보링이 필요하게 되는 일도 있다.

(4) 터널구조 · 시공법의파악

재래공법의 터널에서는 아치 천단의 두께부족과 복공배면에 공동이 생겨 있는 것이 보통이다. 이와 같은 구조결함이 있으면, 복공의 내력(耐力)이나 변형성능이 현저히 저하된다(그림 7). 그 때문에 구조결함의 파악은 건전성을 유지하기 위하여 대단히 중요하다. 이 조사에는 전자파 탐사가 널리 활용되고 있으며, 삭공(削孔)조사를 병용하면 더욱 정확하게 파악할 수 있다.

한편, 터널의 재산도 등에는 복공두께, 인버트, 지보공의 제원 등의 실적 등이 기재되어 있다. 이들의 실적에서 시공이나 지질의 양부 등을 추정할 수 있다. 붕괴 등 건설시의 트러블이 공사지 등에 기록되어 있으면 유익한 정보를 주게 된다. 이와 같은 자료를 총동원하여 조사하는 것은 올바른 진단을 위한 관건으로 되는 일이다.

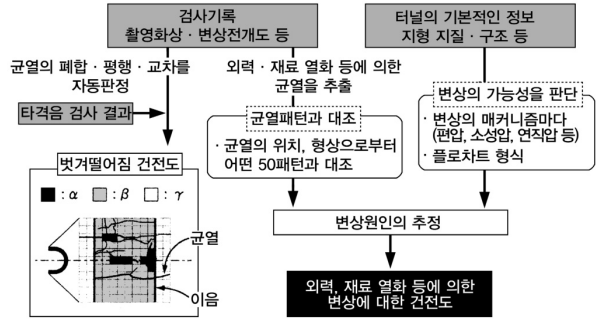


그림 8. 터널 건전도 진단 시스템

8. 유지관리에 관한 기술개발

(1) 검사·검사방법

외국에서는 육안이나 타격 음의 자동화를 목적으로 하여 다음의 두 가지 검사시스템이 개발·실용화되고 있다.

- 1) 복공벽면의 연속전개 화상을 촬영하고 변상을 추출하여 전개도를 작성하는 시스템
- 2) 타격 음 검사장치(타격 음의 주파수와 감쇠특성을 해석하여 복공두께나 내부결함을 평가하는 것이다. 경량으로 콘크리트에 장치화되어 있어 다루기 쉽게 되어 있다.)

(2) 변상감시방법

변상의 진행성을 자동 감시하는 방법으로서 광파이버에 의한 감시법과 보다 가격이 낮은 도전 재료에 의한 감시방법이 개발되고 있다.

(3) 진단시스템

건전도 진단과 변상원인 추정을 자동적으로 행하는 시스템(그림 8)이 개발되고 있다.

(4) 기타

- 1) 변상의 평가·예측방법 : RC 터널의 변상 관리방법, 블록 쌓기 공의 내력(耐力)평가방법, 지압에 의한 변상의 진행성장기 예측방법의 연구
- 2) 보수·보강 : 내면 보강공의 설계방법, 연해에 의한 조골재탈락대책, 철박테리아오니 발생 억제대책의 연구
- 3) 환경영향 평가방법 : 근접시공에 의한 기설 터널에 대

한 영향(흙 쌓 · 흙깎기), 실드터널의 시공에 의한 영향, 터널 내 열차진동에 의한 영향평가방법의 연구

- 4) 유지관리 계획방법 : 유지관리 계획을 진행하기 위한 한 방법으로서 최근에 주목되고 있는 리스크 매니지먼트 방법의 적용성에 관한 연구
- 5) 지진대책법 : 지진피해 메커니즘과 피해경감책의 연구

9. 터널검사에 대한 화상처리방법의 응용

(1) 화상처리 기술의 응용과 배경

화상처리를 균열계측에 응용한 사례로서 0.5 mm 정도의 분해능이 보고되어 있다. 그러나 실제의 터널벽면에는 균열 이외의 흠이나 오점이 있는 점을 고려하면 가시화상을 이용한 방법에는 한계가 있는 것도 사실이다.

(2) 연속주사 화상에 의한 복공면 촬영

끊어짐이 없는 선명한 화상이 연속적으로 얻어지는 라인센서 카메라와 이 고해상도 화상으로부터 변상전개도를 반자동으로 작성하는 터널검사 시스템이 개발되었다. 전용의 촬영차량을 이용하거나, 필요한 기능을 콤팩트하게 집약한 저비용형 촬영시스템(그림 9)을 이용한다. 어느 쪽의 방식도 촬영속도 약 10 km/h, 화상 해상도 0.5~1 mm의 상세한 화상을 촬영할 수가 있다. 또한, 복공 촬영 시에 카메라 배치로 장척(長尺) 화상이 얻어지며, 각 카메라 영상을 접합하여 전(全)단면 전개도를 얻는다.

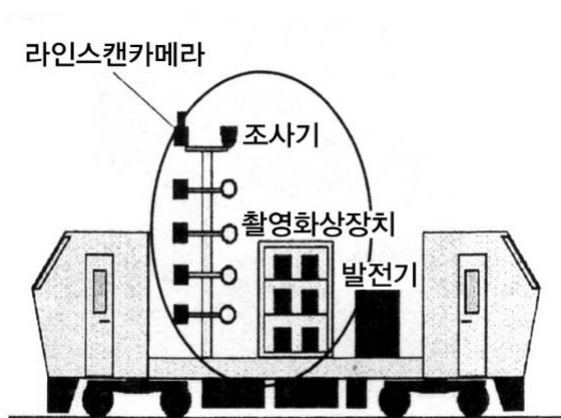


그림 9. 터널 스캐너의 촬영

(3) 단면화상을 생성하기 위한 화상의 자동접합 기술

촬영시스템으로 얻어진 각 카메라의 화상을 단면방향으로 이어 맞추는 작업은 수고와 시간을 요하는 작업이다. 그래서 색이나 모양의 차이에 의거하여 특징 점을 복수의 화상으로부터 자동적으로 검출하여 대응하는 특징 점간의 관계로부터 자동적으로 접합하는 방법(모자이킹)을 적용할 경우에 전개화상을 종래의 1/2 정도의 시간으로 정밀도가 좋게 작성할 수 있도록 되었다. 최초에, 카메라 간의 중복 촬영부분을 확인하고 모자이크 화상용의 화상(서로 겹치는 화상 pair)을 정의한다. 다음에, 색이나 텍스처(texture)의 차이에 착안한 특징 점{에지(edge)가 교차하는 점 등}을 자동적으로 검출한다. 화상 간에서 동일한 특징 점을 탐색하여 사영(射影) 변환행렬을 구한다. 이 변환식에 의거하여 각 화상을 접합한다.

10. 화상처리방법에 의한 균열 등과 같은 변상의 추출

(1) 화상의 고(高)콘트라스트(contrast)화(化)의 검토

철도터널의 벽면은 일반적으로 매연 등으로 더러워져 있어 촬영화상의 화질은 그다지 좋지 않은 것이 일반적이다. 화상의 콘트라스트를 높이기 위하여 통상의 256 계조(階調, gradation)에 비하여 레인지(range)가 넓은(12 bit : 4,096 계조) 화상이 얻어지는 카메라를 적용하였다. 8 bit 화상에서는 알 수 없었던 많은 화상정보가 획득될 수 있다.

(2) 균열과 노이즈 성분의 식별

추출대상으로 하고 있는 균열은 주위보다도 상대적으로 어둡고 검게 깊이 들어가 있는 선모양의 형상을 가진 영역이며, 일정 크기 이상, 일정 폭 이하로 한다. 한편, 균열과 비슷한 특징을 가진 콘크리트의 종횡의 시공이음이나 카메라 노이즈라고 생각되는 세로줄무늬(縱縞)는 불필요한 성분이라고 간주하여 미리 제거하도록 전(前)처리를 적용한다. 실제의 균열은 복수의 성분이 교차하기도 하고 도중에 누수 등의 오염과 일체화하기도 하여 단순하지는 않으므로 희망의 출력이 얻어지지 않는 경우가 있다. 그러므로 본래 연속적인 균열이 결과적으로 중단되어 검출되어도 극력 접속되도록, 또한 부분적인 수렴 성분은 제거되도록 처리 알고리즘을 검토하였다.

- ① 수평 · 연직방향 프로젝션 처리와 원 화상과의 차분

(差分)으로 시공이음 등의 중첩 성분을 제거한다.

- ② 휘도(輝度)값의 최대·최소치를 구하여 이것이 최대 휘도, 최소 휘도로 되도록 선형 농도변환을 한다.
- ③ 라플라시안가우시안 필터를 사용한 제로 교차 검출에 의해 에지 영역을 서브 픽셀 정밀도로 검출한다. 스미싱 필터 계수로 추출하고 싶은 선의 폭을 지정한다.
- ④ 상한/하한의 한계치를 이용하는 히스테리시스 한계치 처리로 추출하고 싶은 에지의 강도를 지정한다.
- ⑤ 같은 방향을 갖는 인접하는 직선적인 등고선 군을 등고선의 끝점 최대거리, 방향의 최대차이에 기초하여 융합한다. 더욱이, 평행 등고선이 있는 경우에 근린의 등고선을 융합할 가능성이 있지만, 극력 융합되지 않도록 하였다.
- ⑥ 타원 근사한 장경 R_a , 단경 R_b 에 관하여 R_a/R_b 를 계산하여 일정한 크기 이상의 영역을 제거한다.
- ⑦ 균열을 중심선과 이것을 둘러싼 등고선으로 모델화하여 융합 후의 등고선의 회귀 직선의 파라미터를 계산하고 균열길이나 최대치를 계측한다. 더욱이, 추출

영역은 마우스로 자유로이 선택하는 것도 가능하다.

V. 맺음말

철도사업에서 안전한 수송의 확보는 극히 중요한 과제이다. 그를 위해서는 철도수송을 지탱하는 많은 설비의 건전도를 적확하게 진단하고, 필요한 것에 대해서는 적의 적절하게 보수, 보강 등의 처치를 하여갈 필요가 있다.

정밀도가 높은 구조물 건전도 진단에는 설계, 시공, 열화에 관한 지식 등, 건설공사 이상으로 폭넓고 종합적인 지식, 경험이 필요하며, 이들의 데이터를 제대로 축적하여 가는 것이 중요하다.

한편, 터널은 다른 구조물에 비하여 크고 긴 구조물이다. 그러나 변상이 생기면 그 대책은 용이하지 않다. 터널을 영원히 안전하게 계속하여 사용하기 위해서는 세밀한 유지관리가 요구된다. ☺