지하 구조물의 박락(Spalling)사고 원인 분석 소개

– 신칸센터널(일본) 사고사례 중심으로

글 | **김창수** | 토목기술부 과장 | 전화 02-3433-7767 E-mail : conshot@ssyenc.com

지하철, 고속도로, 신공항, 도로 및 철도 등의 지하 구조물에 발생할 수 있는 문제점은 크게 결함(Defect), 손상(Damage), 열화(Deterioration)의 3가지로 구분될 수 있으며, 이들 원인은 구조물에 균열(Cracking), 누수(Leakage), 처짐(Deflection), 부등침하(Settlement), 재료분리(Segregation), 박리(Delamination), 부식(Corrosion), 박락(Spalling) 등의 현상으로 나타난다. 이상과 같은 현상들은 문제가 발생하기 전에 조기에 진단하여 내하력 저하, 내구성 저하, 노후화 등에 대처하지 못하면 이로 인하여 매우 중요한 사회기반 시설인 지하 콘크리트 구조물의 안정성이 위험 수위까지 이를 수도 있다. 이에 따라 일본 철도터널의 콘크리트 박락사고를 예로 들어 원인을 설명하고 콘크리트 구조물의 열화현상과 앞으로의 대책에 대해 알아보고자 한다.

1 서 론

지금까지, 강제 구조물의 경우에는 부식 문제가 있었지만 콘크리트 구조물의 경우에는 콘크리트가 높은 내구성을 가지고 있다는 인식 때문에 메인트넌스 프리(Maintenance-free)로서 '반영구적'으로 사용할 수 있는 것으로 믿어져 왔다.

그러나 최근에는 많은 연구 결과와 기존 구조물의 조사 결과로부터 콘크리트 구조물도 경년 열화는 피할 수 없고, 그에 상응한 메인트넌스를 실시하지 않으면 장기간 사용할 수 없다는 사실이 명백해지고 있다.

1999년 6월에 산요신칸센(山陽新乾線)의 후쿠오카(福岡)터널에서 라이닝 콘크리트의 박락사고가 발생하여, 매스컴에 대대적으로 보도되었고, 연이어 산요신칸센(山陽新乾線)의 기타규슈(北九州)터널(1999년 10월) 및 室蘭本線의 札文浜터널(1999년 11월)에서도 같은 유형의 사고가 보도되었다. 한편에서는 신칸센(新乾線)의 고가교로부터의 콘크리트 박락과 도로교에서의 콘크리트 박락 등이 매스컴에 보도되어, 갑자기 많은 사람들의 관심을 끌게 되었다.

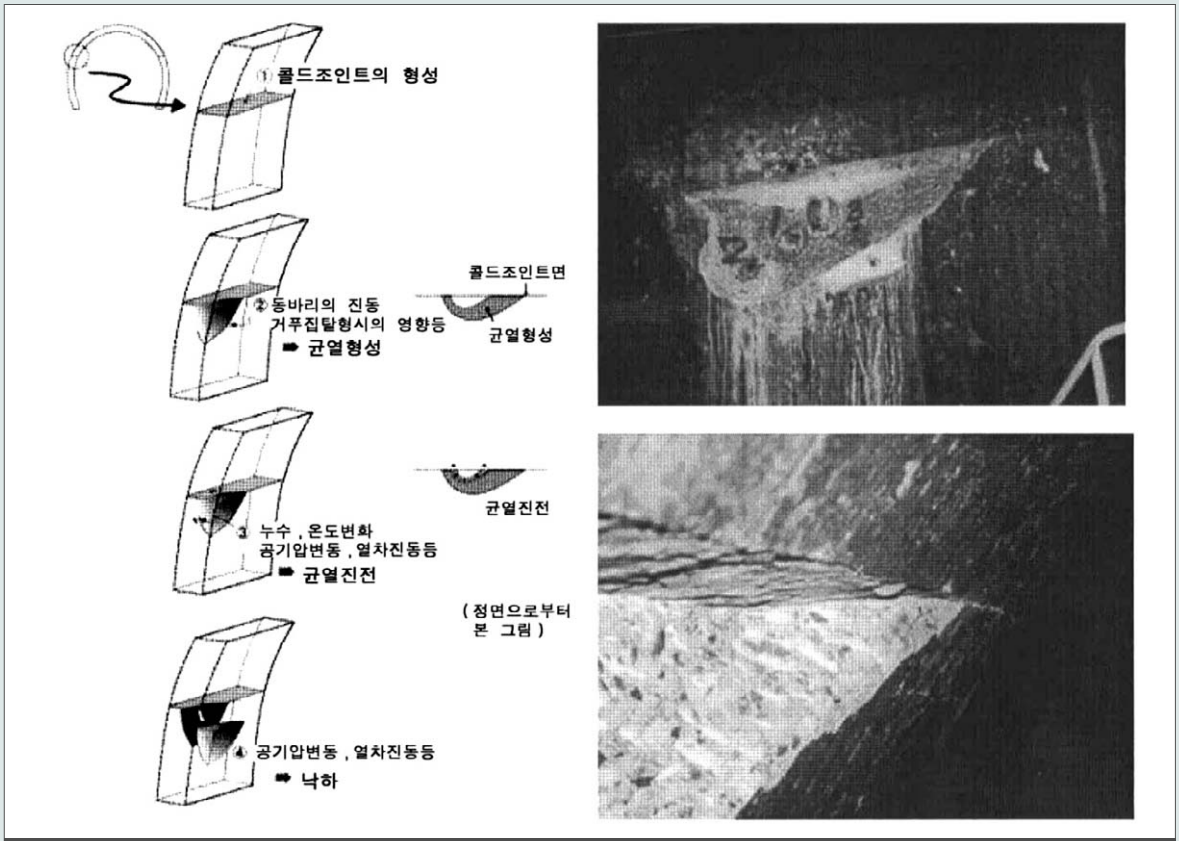
그 결과, 터널안전문제검토위 등 많은 기관에서 다양한 위원회가 설치되어, 사고 원인과 향후 대책에 대해서 다양한 검토가 행해졌다. 일본토목학회에서도 콘크리트위원회를 중심으로 콜드조인트에 관한 조사연구보고서, 터널용 콘크리트시공지침이 발표됨과 더불어 2001년 1월에는 「콘크리트 표준시방서(유지관리편)」가 공표되었다. 또한, 일본콘크리트공학협회에서는 콘크리트구조물의 유지관리를 행하는 과정에서 중요한 「콘크리트 진단사」를 육성하기 위한 제도가 2001년부터 시작되었다.

2 터널 라이닝 박락사고

1999년에 발생한 철도터널의 박락사고는 다음 3가지이다.

- ○ 산요신칸센(山陽新乾線) 후쿠오카(福岡)터널
- ○ 산요신칸센(山陽新乾線) 기타규슈(北九州)터널
- ○ 홋카이도(北海道) 室蘭線 札文浜터널

이들은 모두 무근콘크리트 라이닝이고, 1975년경에 건설되었다.



[그림 1] 후쿠오카(福岡)터널 라이닝 박락원인

이들 박락사고의 원인 등에 대해서는 운수성이 주최한 「터널안전문제 검토회 보고서」에 상세히 기술되어 있고, 각각의 터널에서의 콘크리트 박락원인은 개략적으로 아래와 같은 것으로 평가되고 있다.

2-1. 후쿠오카(福岡)터널

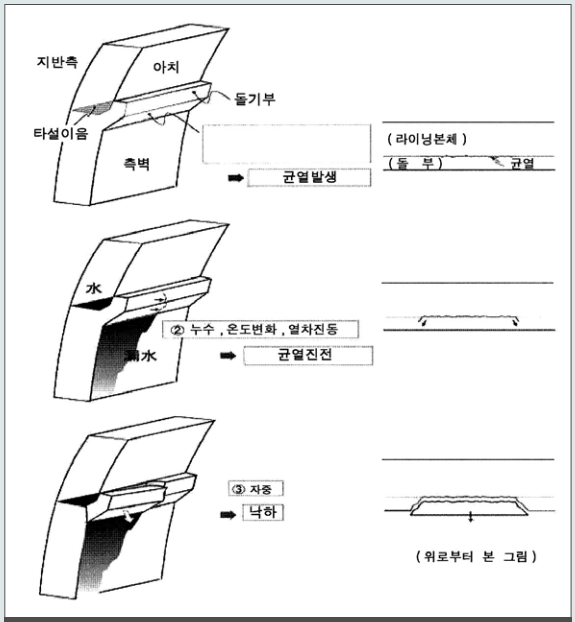
「터널안전문제 검토회 보고서」에서는 후쿠오카(福岡)터널의 사고원인을 다음과 같이 추정하고 있다. [그림 1]에는 그 모식도를 나타내었다.

① 터널 라이닝용 콘크리트 타설 중에 콘크리트 재료의 공급 중단이 발생해 아치하부에 콜드 조인트가 형성되었다.
② 콘크리트 타설시의 동바리(支保工)의 진동, 혹은 거푸집 청소나 박리제의 부족에 의한 거푸집 탈형시의 영향 등에 의해 콜드조인트 하측의 내부에 꽤 광범위하게 균열이 형성되었다.
③ 장기간에 걸친 누수, 온도변화 등의 영향에 공기압 변동, 열차진동의 반복 영향도 가해져, 남아있던 접합면에도 서서히 균열이 진전되었다.
④ 최종적으로 공기압 변동, 열차진동 등에 의해 낙하되었다.

2-2. 기타규슈(北九州)터널

「터널안전문제 검토회 보고서」에서는 기타규슈(北九州)터널의 사고원인을 다음과 같이 추정하고 있다. [그림 2]에는 그 모식도를 나타내었다.

① 돌출부까지 한 번에 타설함으로써 타설 직후의 침하 차의 발생과 측벽 또는 거푸집 저면의 침하, 혹은 조기 탈형에 의한 탈형시의 이상 인장력의 작용 등에 의해 돌출부와 측벽 본체 사이의 일부분을 남기고 균열이 발생하였다.
② 장기간에 걸친 누수, 온도변화 등의 영향에 열차진동의 반복 영향도 가해져 남아있던 접합면에도 서서히 균열이 진전되었다.
③ 그 후, 전체를 지탱하고 있던 양단부에도 균열이 번지고, 최종적으로 자중에 의해 낙하되었다.



[그림 2] 기타규슈(北九州)터널 라이닝 박락의 원인

2-3. 札文浜터널

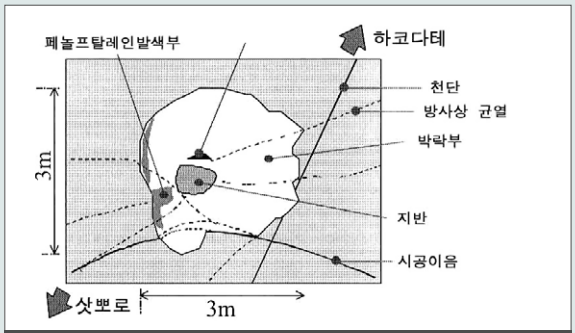
「터널안전문제 검토회 보고서」에서는 札文浜터널의 사고원인을 다음과 같이 추정하고 있다. [그림 3]에는 사고발생 후의 사진과 그 상황을 나타내었다.

① 라이닝 콘크리트의 타설 후, 비교적 빠른 시기에 상부의 지반이 느슨해지고, 아치 천단 부근의 돌출된 암괴로부터 국부적인 지압이 라이닝에 작용하였다.

② 이 지압의 작용에 의해 돌출암괴를 중심으로 한 방사상의 균열이 발생한 후, 압출(눌러 뽑기) 전단파괴가 발생해 파괴면이 형성되었다.

③ 열차 진동과 동결융해의 반복 등에 의해 파괴면의 선단부에 서서히 균열이 진전되었다.

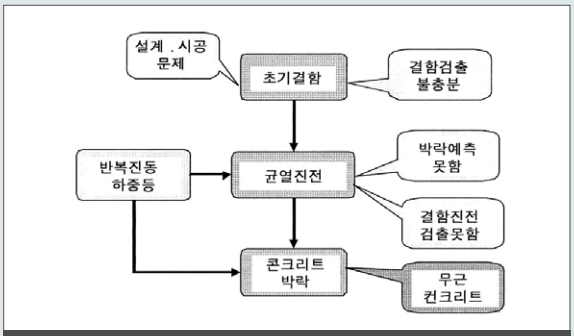
④ 최종적으로는 박리조각을 지탱하고 있던 부분에 자중에 의한 새로운 파괴면이 발생하여 낙하되었다.



[그림 3] 札文浜터널의 박락상황 설명도

이상 3개 터널의 라이닝 콘크리트 박락사고는 모두 건설시 또는 타설 완료 후 극히 초기 단계에서 발생한 균열이 서서히 진전되어 박락된 것으로, [그림 4]에 나타낸 바와 같이 주된 원인은 시공에 기인한 사고였다고 할 수 있을 것이다.

또한, 박락사고 전에 육안관찰검사 등이 행하여지고 있었지만, 어느 쪽도 특별히 문제인 것으로는 여겨지지 않았다는 사실로부터 검사방법에도 문제가 있는 것으로 생각할 수 있다.



[그림 4] 터널 라이닝으로부터의 콘크리트 박락 사고원인

3 열화원인과 지역성

콘크리트 구조물의 열화는 여러 가지가 있지만, 주된 것을 모으면 〈표 1〉에 나타낸 바와 같다. 이 표에는 본래는 직접적인 열화원인은 아니지만, 일부러 시공불량을 열화원인의 하나로 들었다. 이는 철근의 피복부족으로 대표되는 바와 같이 '시공불량' 은 많은 구조물이 '조기열화' 된 중요한 원인의 하나이기 때문이다.

콘크리트 구조물의 설계, 제조로부터 양생에 이르기까지 관리 · 검사를 현장 등에서 확실히 행할 수 있다면 환경 등에 기인하는 '조기열화' 를 방지할 수 있지만, 시간, 비용, 기술자 부족 등 때문에 그렇게 행하여질 수 없는 경우에는 환경 등에 의한 '조기열화' 로 이어지기 쉽다. 산요신칸센(山陽新乾線)의 후쿠오카(福岡)터널 라이닝의 박락사고도 건설당초의 초기 결함 · 균열이 원인의 하나가 되고 있다.

그렇다면, 시공불량이 없으면 열화되지 않는 것일까? 이 〈표 1〉로부터도 알 수 있는 바와 같이 시공불량이 없는 경우라도 콘크리트 구조물은 사용하는 재료 및 구조물이 설치된 환경에 의해 열화된다.

이 당시는 이들 열화원인 및 대책이 충분히 규명되지 않았고, 많은 연구기관 등에서 검토된 결과를 바탕으로 현실적인 대책이 고려되었다.

그 결과, 1985년 이후, 열화원인이 되는 재료(골재, 시멘트 등)의

〈표 1〉 콘크리트의 열화와 대책

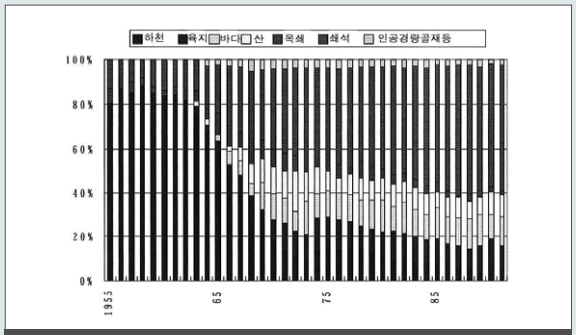
열화 종류	분류	원 인	대 책
마모	환경	모래 등에 의한 마모감소	골재선정, 배합선정
피로	외력	반복하중의 작용	피로한계 이하의 응력
동결 융해	환경	내부수의 동결융해 반복	AE제에 의한 공기포의 연행
알칼리골재반응	재료	골재와 알칼리의 화학반응	반응성 골재의 배제, 알칼리량의 제한
강재부식(중성화)	환경	탄산가스에 의한 콘크리트의 알칼리성 상실	피복증대, 표면코팅 등
강재부식(염분)	재료	콘크리트 함유 염화물에 의한 부식	바다모래의 제염, 재료중의 염분규제
	환경	콘크리트 내로의 염화물 침투	피복증대, 저W/C, 코팅, 도장철근의 사용, 전기방식
미생물, 산 등	환경	수화물과 산등의 화학반응	피복증대, 저W/C, 코팅 등
황산염	환경	해수 등으로부터의 염에 의한 팽창 등	내황산시멘트의 사용
고온화재	환경	수화물 조직	표층콘크리트의 방호(防護) 등
균열(외력 등)	외력	하중 등에 의한 응력	배근, 안전계수, 배합
균열(온도 등)	환경	변형의 구속	변형제어
기타(시공불량)	재료	콘크리트 재료 및 배합불비	콘크리트 제조시 관리, 운반관리
	시공	피복부족, 그라우트 충전 부족 등	배근관리, 그라우트 관리
		충전 불량(골재 노출), 시공이음 불량(콜드조인트), 재료분리, 양생 부족 등	시공시의 타설, 양생관리

사용이 제한되어, 그 후에 건설된 구조물에 대해서는 어느 정도 대처할 수 있게 된 것으로 사료되지만, 유효한 대책을 강구하기 전에 건설된 구조물은 열화가 나타나고 있는 경우도 있다.

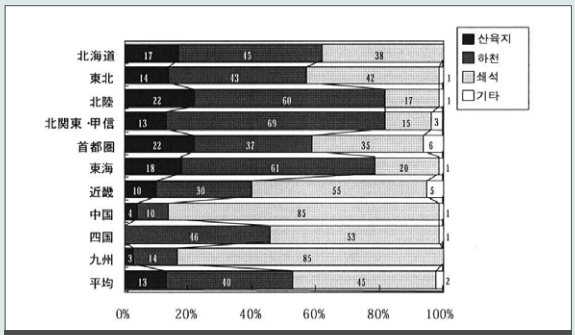
상기의 바다모래 및 반응성 골재에 기인하는 골재열화는 [그림 5]에 나타낸 사용골재의 변화와 [그림 6] 및 [그림 7]에 나타낸 1983년도의 레미콘플랜트에서 사용된 콘크리트용 골재의 사용 분포로부터 알 수 있는 바와 같이 시기 및 지역에 따라서도 꽤 다른 것으로 되어 있다.

산요신칸센(山陽新乾線)의 경우에는 구조물의 건설시기가 각종 규제개시 이전에 해당되고 있었기 때문에 염분제거가 충분하지 않은 바다모래의 사용과 더불어 알칼리량이 많은 시멘트와 반응성 골재가 사용되고 있었던 것이 분명해지고 있다.

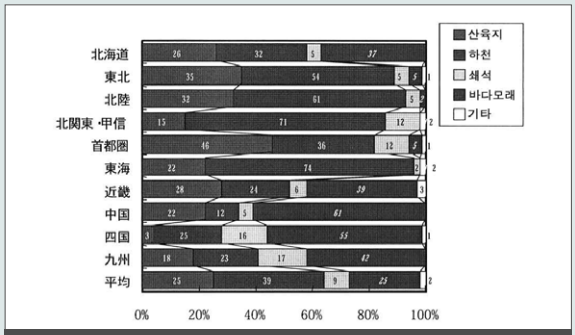
이 때문에 철근 부식과 콘크리트 균열이 다수 발생하고 있는 구조물도 보이고, [그림 8]에 나타낸 바와 같이 코팅을 실시하더라도 더욱 철근 부식이 진행되고 있는 구조물도 보인다. 이들 구조물은 이미 중요한 구조물로서 이용되고 있기 때문에 열화가 진행되지 않



[그림 5] 종류별 골재의 공급비율



[그림 6] 세골재의 지역별 사용비율



[그림 7] 조골재의 지역별 사용비율

도록 대규모 열화방지 대책을 강구함과 더불어 효과적인 보수대책 등을 실시해 가는 것이 급선무가 되고 있다. 이에 따라 종래 행하여져 온 코팅공법뿐만 아니라 경비가 소요되는 전기방식의 적용이나 염화물 이온의 전기유동에 의한 제염 등도 검토되고 있다.

'환경' 이 주된 원인이 되고 있는 열화에는 지역성이 나타난다. 예를 들면, 동해(東海) 연안 지역에서는 겨울의 계절풍이 가져온 염화

[그림 8] 코팅을 실시한 후 더욱 강재부식이 진행된 철근콘크리트보

물에 의한 콘크리트 내부의 강재부식이 문제가 되고 있고, 동결융해작용에 의한 콘크리트의 열화는 토호쿠(東北)지방과 홋카이도(北海道)지구의 구조물에서 문제가 되고 있다.

같은 염화물 문제라도 '융설제(融雪劑)' 의 경우에는 노면동결이 문제가 되는 지역이 중심이지만, 중성화에 의한 강재부식 문제는 수중구조물을 빼고 일본전국의 문제이다. 피로하중에 의한 열화도 우오모토(魚本), 요시자와(吉澤) 등이 지적하고 있는 바와 같이 대형차량의 통행량이 많은 구조물의 경우에 나타나고 있다. 이상 기술한 바와 같이 각각의 구조물이 놓여진 환경에 따라 고려해야 할 열화 및 정도가 다른 경우가 많다.

4 구조물의 내구성과 한계 상태

콘크리트 구조물의 내구성은 몇 년 정도일 것인가? 포틀랜드 시멘트가 영국에서 개발되고부터 아직 200년 정도밖에 지나고 있지 않지만, 확실한 설계 · 시공이 행하여지고 유지관리를 계속하며 이용하여 온 일본의 콘크리트 구조물은 오래된 것은 80년 이상의 것도 있다.

일본에서 포틀랜드 시멘트가 제조된 지 100년 정도인 것을 감안해 보면, 일본에서 처음으로 콘크리트 구조물이 건설된 시대의 것이더라도 현재까지 이용되고 있는 셈이 된다. 이들 구조물은 앞으로도 사용되게 될 것이지만, 향후에도 유지관리를 적절히 실시하면 더욱 장기 사용도 가능하다.

한편, 전술한 바와 같이 열화된 구조물도 다량 존재한다. 그 원인도 다양하지만, 여기서 주의해 두어야 할 것은 지금까지 열화를 일으킨 구조물이더라도 구조적으로 사용에 견딜 수 없다는 것은 아니고 그대로 방치하면 미관이 손상되고 콘크리트편의 박락 등에 의해 제3자 장해를 일으킬 가능성이 높아졌다는 것이다.

구조적인 문제로는 아직 어느 구조물도 내용 연한에 도달되어 있지 않다고도 할 수 있을 것이다. 이 점을 확실히 하기 위해 콘크리트 구조물의 내구성에 관한 한계상태를 설명한다. 크게 순차적으로 열화의 한계상태를 분류하면 다음과 같다.

① 미관의 저하

② 제3자 장해를 일으킬 위험성

③ 사용상의 안전성

④ 구조물의 안전성

이들에서 ①부터 ④의 순으로 열화에 따르는 지장이 많아진다. 각각의 한계상태에 달한 때에 채택되고 있는 대책은 다음과 같다.

지금까지는 ①의 미관에 관해서는 토목구조물의 경우 그다지 큰 문제로서 다루어지지 않았던 경향이 있지만, 건물의 경우에는 꽤 중요하여 어느 정도 미관이 저하되면 보수공사 등이 행하여지는 일도 많았다. ②의 제3자 장해의 문제는 산요신칸센(山陽新乾線)의 터널 라이닝 박락사고가 하나의 계기가 되어 매스컴 등에서 부각된 것이다. 그러나 지금까지 보수된 구조물 · 부위의 다수는 제3자 장해를 방지할 목적으로 실시된 것이고, 이 목적은 공사에 필요한 예산을 확보하는 문제에 있어 이해를 구하기가 쉽다. 역으로 말하면, 제3자 장해의 위험성 등이 명백해지지 않으면 보수비용을 확보하기가 어렵다고도 할 수 있을 것이다.

교량의 처짐 증가 등이 발생되어 오면 ③의 주행차량에 의한 사용안전성 등이 문제로 된다. 영국의 교각 예에 있는 바와 같이 경우에 따라서는 보강 등을 행할 필요성이 발생한다. 또한, 부재의 문제이면 그 부재만을 교체하는 등의 조치도 취해지고 있다. ④가 문제로 되는 경우에는 구조물의 대폭적인 보강 혹은 해체가 필요하게 되지만, 열화가 원인인 경우에 구조물의 재건축이 행하여진 예는 적다. 주행차량의 피로하중에 의한 도로상판의 압출전단 파괴의 예가 미국 등에서 보여지는 정도이다.

이상의 설명으로부터도 알 수 있는 바와 같이 지금까지 건설되어 온 콘크리트 구조물의 열화정도는 상기 한계 상태의 ① 또는 ②정도까지이고, 이 레벨에서 확실히 대처해 두면 ③과 ④의 단계까지 진행되기에는 꽤 많은 기간이 소요된다. 단, 앞에서도 기술한 바와 같이 시공불량이 있으면 현저한 조기열화를 일으키는 경우가 있음을 잊어서는 안 된다.

터널 콘크리트의 박락사고는 모두 시공직후 조기에 내부균열이 발생되어 있었고, 그 후 열차의 진동, 부압 등에 의해 균열진전이 일어나 박락된 것으로 생각되고 있다. 시공완료 후에 행하여진 육안관찰검사 등에서는 발견하지 못한 것도 있지만, 검사원도 짐작하지 못한 박리콘크리트도 있어, 종래의 검사항목만으로는 충분하지 않은 점도 있다.

따라서 필요시에는 유지관리를 위한 타음법, 초음파법, 레이더법, 레이저법, 적외선법, X선법 등의 비파괴검사를 실시하여야 하고 특

히, 적외선, 레이저, 가시광선 등은 떨어진 장소로부터 구조물 전체의 열화부위를 검출하는 검사에 사용되고, 초음파나 X선 등은 상세한 검사에 사용되기 때문에 각각의 특징을 살린 이용방법을 도모하는 것이 필요하다.

5 결 론

기술 이외의 문제로서 중요한 것으로 주목할 필요가 있는 것은 '유지관리' 에 대한 사회 및 기술자의 인식이다. 지금까지 콘크리트 구조물은 메인트넌스 프리인 것을 염두에 두어 왔기 때문에 일반적으로 새로운 구조물을 건설하는 기술자에 비해 구조물의 유지관리를 담당하고 있는 기술자에 대해서 높은 평가를 해오지 않은 경향이 있다. 이는 건설 분야에 한정된 문제는 아니고 자동차, 비행기, 전기제품 등을 제조하는 경우에도 마찬가지이다.

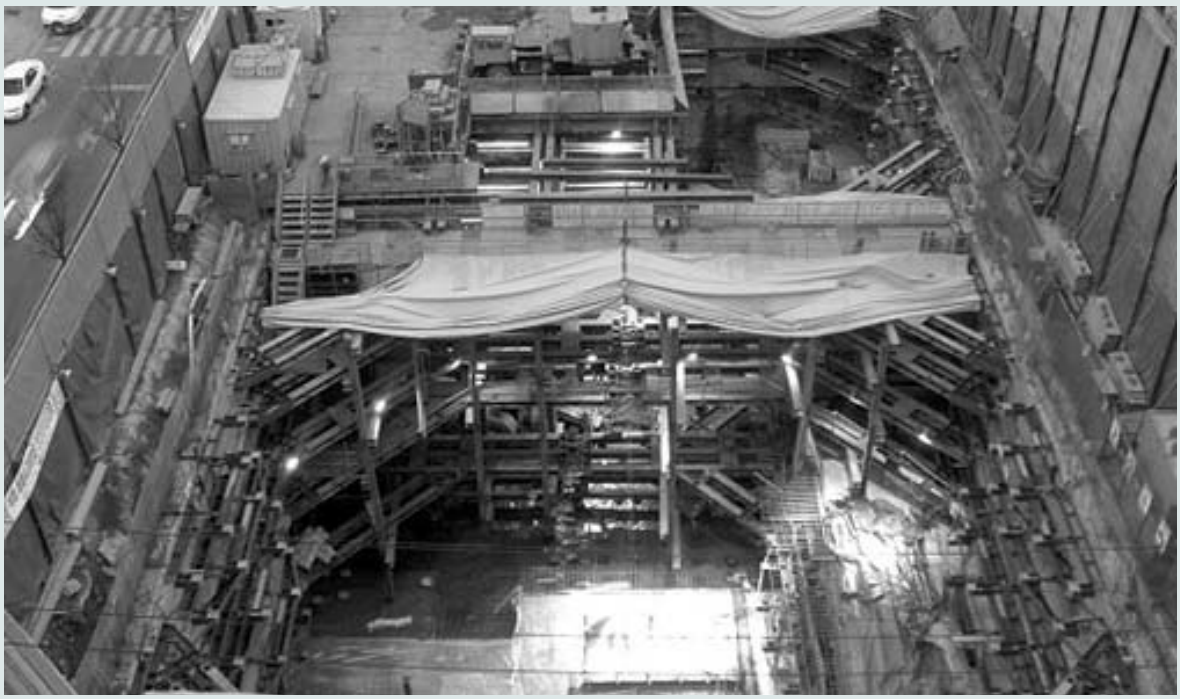
그 결과, 유지관리를 담당하게 된 기술자는 가능하면 신설 구조물을 건설하는 부서로 배치전환받기를 원하는 사람이 많다. 그러나 유지관리를 행하는 기술자 쪽이 새로운 구조물을 설계, 시공하는 쪽보다도 많은 지식, 경험, 기량 등이 요구된다. 유지관리를 담당하는 기술자는 대상물의 설계, 시공방법을 알고 있을 뿐만 아니라, 어떠한 방법을 사용하면 어떠한 문제가 발생하는가, 어떠한 결함이 있으면 어떠한 문제가 발생하는가 등을 알고, 나아가 발생된 문제의 원인을 해명하여 대처해나가야 한다.

이상과 같이 구조물의 유지관리를 담당하고 있는 기술자는 대단히 우수한 기술자여야 할뿐만 아니라, 더욱 사회적으로도 높은 평가를 받아야 한다. 대학에서도 새로운 구조물을 계획, 설계하는 일에 관해서는 많은 시간을 할애하고 있지만, 구조물의 유지관리에 관한 강의는 일반적으로 적고, 또한 학생에게 있어서도 매력적인 화제는 아닐 것으로 생각된다.

그러나, 이제부터는 철도나 고속도로와 같이 없어서는 안 될 중요 구조물을 유지관리 하는 일이 가장 중요해 질 것은 당연지사이고, 그를 위한 교육도 불가피할 것으로 사료된다. 앞으로 선배들이 건설한 구조물을 계속해서 평가하고, 새로운 시점에서 보다 높은 내구성을 갖는 구조물을 건설, 유지관리 하는 환경을 조성할 수 있도록 더욱 노력해야 할 것이다.

특히 지하철과 같은 지하 박스 콘크리트 구조물의 경우에는 오늘날 사회적, 경제적인 면에서 중요한 기반시설로 자리 잡고 있으므로 문제점 발생시 그 파급 효과를 생각할 때 고도의 내구성능이 요구된다. 따라서 이러한 지하 박스 콘크리트 구조물에 발생할 수 있는 문제점을 체계적으로 분류하고 그에 따른 평가기법과 보수 · 보강 및 제어대책을 수립하는 것은 매우 중요한 과제이다.

비록 지하 구조물의 위치적인 특성 및 사용 특성상 문제점을 조기 발견하고, 적절한 대책을 수립하기가 어려운 것이 사실이다. 따라서 구조물의 내구성능 및 내구수명을 보다 효과적이고 정확하게 평가하고 예측할 수 있는 기법을 체계화 하고, 문제점 발생시 적절한 보수 · 보강공법을 선택 · 시공할 수 있는 기준을 체계화하며, 합리적인 유지관리 방법을 설정하는 것이 요구된다.



유 공간 확보 및 예비배관 설치가 쉽지 않기 때문에 배점을 받기 어렵다.

4) 고려사항

본 항목은 장수명 주택 및 자원의 재활용 차원에서 세대의 통합분리를 고려한 설비 및 전기 설비의 여유 공간 확보에 초점이 맞추어져 있다. 따라서 현재 일반적인 계획방법으로는 배점을 받기 힘든 상황이며, 본 항목에서 높은 등급을 받기 위해서는 최적설계가 아니라 목표한 등급을 획득하기 위해 현재는 필요하지 않은 과다한 설계가 될 가능성도 있다.

그리고 앞장의 가변성 항목에서는 세대 내부의 가변성 여부만 고려하는데 비해 본 항목은 2호를 1호를 통합하는 경우를 고려하고 있으므로 평가기준이 상이한 부분에 대한 검토가 있어야 하지 않을까?

2-3. 내구성

1) 관련 법령

한국산업규격(KS)에서는 건축물의 부위별 성능분류 방법으로 내구성 항목에 대해서 연 단위로 측정하며, 이를 7개 등급으로 구분하고 있다.

〈표 3〉 KS F 1010 : 2005 건축물의 부위별 성능 분류

급별호수 / 성능항목	(0)	1	2	3	4	5	6	(7)	비 고	
									측정항목	측정단위
내구성	5	8	12	20	32	50	80		내구연한	년

주택건설기준 등에 관한 규칙 제13조(공업화주택의 성능 및 생산기준)에서는 방청 · 방부성능, 방수 · 배수성능, 유지관리 성능 등으로 구분하고 있으며, 이 중 방청 · 방부성능은 철근의 피복두께, 철재 및 접합철물의 방청처리, 목재의 방부 및 살충처리 등을 주요 내용으로 하고 있다.

콘크리트 구조설계기준(2003)에서는 내구성을 별도의 항목으로 고려하고 있으며, 내구성 설계기준과 내구성 허용기준으로 구분하고 있다. 그러나 내구성 설계기준은 정성적인 내용으로 구성되어 있어 계량적인 평가를 위한 기준으로 활용할 수 없으며, 내구성 허용기준은 동결, 융해 및 제빙 화학물에 노출되는 콘크리트가 준수해야 할 공기량, 수밀콘크리트 또는 습한 상태에서 동결, 융해되는 노출조건 하의 콘크리트의 배합기준, 황산염을 포함한 용액에 노출된 콘크리트의 저항성능, 그리고 철근부식방지를 위한 최대 수용성 염소이온 비율 등을 정량적으로 제시하고 있지만 특수 환경에 노출된 콘크리트에 대한 기준으로 일반적인 환경에 노출된 콘크리트에 대해서는 기준이 제시되어 있지 않은 상태이다.

콘크리트 표준시방서 내구성편(2004)은 콘크리트 구조물의 공사 착공단계에서 내구성을 평가하기 위한 것으로서 내구성 평가 원칙, 설계에 따라 시공된 콘크리트 구조물에 대한 내구성 평가방법, 시공계획에 따라 시공된 콘크리트 구조물에 시공 직후에 발생될 수 있는 균열의 평가방법, 시공에 사용되기 위해 배합 설계된 콘크리트의 재료 자체에 대한 내구성 평가방법에 대한 일반적이고 기본적인 표준을 규정하고 있다.

콘크리트 구조물의 목표 내구수명은 구조물이 특별한 유지관리 없이 일상적인 유지관리 하에서 내구적 한계상태에 도달하기까지의 기간으로 정하게 되는데, 시공된 콘크리트 구조물의 내구등급의 결정은 구조물의 설계시 설정된 콘크리트 구조물의 목표 내구수명에 따라 다음 표에 의한다.

〈표 4〉 목표 내구수명에 따른 내구성 등급

등급	구조물의 내용	목표 내용년수
1등급	특별히 높은 내구성이 요구되는 구조물	100년
2등급	높은 내구성이 요구되는 구조물	65년
3등급	비교적 낮은 내구성이 요구되는 구조물	30년

2) 성능등급 기준 및 평가방법

공동주택의 내구성 성능등급은 KS F 1010 : 2005 에서 규정하는 바에 따라 내구성의 측정항목을 연단위의 내용연수로 설정하였고, 여기서 내구연수라 함은 건축물의 물리적 수명을 의미한다.

내구성 등급의 내용연수는 콘크리트 표준시방서 내구성편에서 나타난 바와 같이 100년, 65년, 30년을 기본으로 하였고, 100년은 3대가 거주할 수 있는 정도, 65년은 2대가 거주할 수 있는 정도, 30년은 1대가 거주하는 정도를 기대한 것이다.

〈표 5〉 내구성 등급 평가기준

구분	물리적 수명
1급	100년
2급	65년
3급	30년

일상의 유지관리 조건하에서 대규모 이상의 보수보강을 필요로 하지 않는다.

3) 기술적 대응전략

내구성 평가기준 #1에서 '건물의 형상 · 디테일' 은 내구성 측면에서 약점이 되는 단면 감소부(외부의 난간벽, 파라펫 등)가 생기지 않도록 하거나 유효한 보호대책 및 유지관리계획을 수립하는 것을 기본으로 하였고, 돌출부의 최소 두께는 굵은 골재의 최대 치수로 평가하도록 되어 있다. 그러나 외부의 난간벽, 파라펫 등은 주요 구조부재가 아니므로 설계단계에서 중요하게 고려되고 있지 않았지만 본 항목의 도입으로 보호대책 및 유지관리계획 등이 주요 부재

항 목				내구성 성능등급		
				1급	2급	3급
건물형상·디테일		일반사양		단면감소부 : 단면감소 부분의 콘크리트 및 철근에 대한 보호대책 및 제반 유지관리·보수계획 수립		
				단면의 두께가 작은 돌출부의 최소두께		
				굵은골재 최대치 수의 4배 이상	굵은골재 최대치수의 3배 이상	
		염해위험지역		해수 및 해염입자의 정체 및 부착이 어려운 형태		
		동해위험지역		융설수·우수의 정체, 벽면상의 유수가 어려운 형태		
구조응력상 요구되는 설계상의 허용 균열폭		구조계획		건물 부재의 규모·형상·지반조건 등에 따라 유효한 균열억제대책 수립		특기 없음
		설계상의 허용균열폭 (염해 및 동해위험지역)		0.2mm 이하 (0.1mm 이하)	0.3mm 이하 (0.2mm 이하)	
부재의 최소단면 (지역구분과 무관)		외벽		180mm 이상		150mm 이상
		슬래브		150mm 이상		130mm 이상
철근의 피복두께 (mm)	일반지역 : 동해위험지역 / 흙에 접하지 않는 부분	지붕슬래브 바닥슬래브 비내력벽	실내	40	30	
			실외	50 (마감면 40)	40 (마감면 30)	
		기둥·보 내력벽	실내	50	40	
			실외	60 (마감면 50)	50 (마감면 40)	
		옹 벽		60	50	
	흙에 접하는 부분	기둥 보 바닥슬래브 ·내력벽		50	50	
		기초·옹벽		70	70	
	염해위험지역	구분	S4	90 (방형철근)	90	
			S3	90 (방형철근)	80	
			S2	80 (마감면 70)	70 (마감면 60)	
			S1	60	50	
* 피복두께 완화 조건 : 건설신기술로 지정되거나, 공인된 방식공법(방식피복, 방전제 전기방식, 방청철근 등)을 적용하는 경우 2등급 요건이 만족되어도 1등급을 인정함. ** 최소피복두께는 상기 치수에서 10mm 를 공제한 값 이상으로 함.						

내구성 평가기준 #1

항 목			내구성 성능등급		
			1급	2급	3급
콘크리트 품질	설계기준강도 f_{ck}		표준 27~36N/㎟	24~36N/㎟	21~36N/㎟
			경량 콘크리트		21~27N/㎟
			품질관리기준		
			1회의 시험결과 f_{ck} 이상 3회의 시험결과 f_{ck} 이상	1회의 시험결과 $0.9f_{ck}$ 이상 3회의 시험결과 f_{ck} 이상	1회의 시험결과 $0.85f_{ck}$ 이상 3회의 시험결과 f_{ck} 이상
	슬럼프		표준 12cm 이하	15cm 이하	18cm 이하 fck≥27 N/㎟ 15cm 이하
			유동화콘크리트 18cm 이하	21cm 이하	21cm 이하
			슬럼프의 허용범위 : ±2.5cm		
	단위수량		표준 175kg/㎥ 이하	표준 175kg/㎥ 이하	표준 185kg/㎥ 이하 최대 200kg/㎥
	단위시멘트량		보통콘크리트 330kg/㎥ 이상	300 kg/㎥ 이상	270 kg/㎥ 이상
			경량콘크리트		300 kg/㎥ 이상
	물시멘트비	일반지역	보통콘크리트 50% 이하	55% 이하	65% 이하
			경량콘크리트		60% 이하
		동해위험지역	동해 위험도 P3		
			보통콘크리트 50% 이하	보통콘크리트 55% 이하	보통콘크리트 60% 이하 경량콘크리트 55% 이하
			동해 위험도 P4		
			보통콘크리트 45% 이하	보통콘크리트 50% 이하	보통콘크리트 55% 이하 경량콘크리트 50% 이하
			동해 위험도 P5		
			보통콘크리트 40% 이하	보통콘크리트 45% 이하	보통콘크리트 50% 이하 경량콘크리트 45% 이하
		염해위험지역	염해 염화 외력 S4 40% 이하	40% 이하	45% 이하
			S3 40% 이하	45% 이하	50% 이하
			S2 50% 이하	50% 이하	55% 이하
			S1 55% 이하	55% 이하	60% 이하
	공기량	일반지역			4.0 ~ 6.0%
		동해위험지역	동해위험도 P3 굵은골재최대치수 20, 25mm 40mm		4.5 ~ 6.0% 4.0 ~ 6.0%
			동해위험도 P4 굵은골재최대치수 20, 25mm 40mm		5.0 ~ 6.0% 4.5 ~ 6.0%
			동해위험도 P5 굵은골재최대치수 20, 25mm 40mm		5.0 ~ 6.0% 4.5 ~ 6.0%
			공기량의 허용범위 : ±1.5%		
	염화물량		0.2 kg/㎥		0.3 kg/㎥

내구성 평가기준 #2

뿐만 아니라 기타 부재까지도 포괄적으로 제시되어야 한다.

'구조 응력상 요구되는 설계상의 허용 균열폭' 은 정량적으로 0.3mm 이하, 0.2mm 이하로 제시하고 있지만 현실적으로 0.2mm 이하를 만족하는 것은 쉽지 않기 때문에 1급을 확보하기 위해서는 특별한 대책이 요구된다.

'부재의 최소 단면' 은 외벽과 슬래브만 규정하고 있는데 구조 응력상 필요한 두께 이하를 기준으로 하고 있기 때문에 충분히 1급이 가능한 항목이다.

가장 문제가 되는 '철근의 피복두께' 는 건축공사 표준시방서(1999)를 따르고 있는데, 콘크리트 구조설계기준(2003)에서는 옥외의 공기나 흙에 직접 접하지 않는 콘크리트의 경우 슬래브, 벽체, 장선의 경우 D35 이하인 철근은 20mm로 규정하고 있으며, 새롭게 바뀌는 건축공사 표준시방서(2006)에 따르면 최소 피복두께는 1999년 기준값보다 10mm 공제한 대신 설계 피복두께는 최소 피복두께보다 10mm 두껍게 하도록 규정함으로써 신 · 구 기준값에 차이가 없게 되었다. 결국 실무적으로 가장 문제가 되는 부분은 '내력벽' 의 피복두께인데, 현재는 콘크리트 구조설계기준에 따라 구조해석적인 최소 피복두께인 20mm를 고려하고 있지만 설계에서는 40mm를 반영해야 하므로 벽체가 두꺼워지게 되고 그로 인한 영향을 검토해야만 한다.

다음으로 내구성 평가기준 #2에 따른 평가는 배합설계를 기준으로 재료의 물성을 향상시키는 방향으로 등급 기준이 설정되었으며, 건축공사 표준시방서를 따를 경우 등급에 따른 설계는 충분히 가능할 것으로 판단된다.

4) 고려사항

본 평가항목은 구조설계적인 요소를 평가함에 있어서 건축공사 표준시방서를 기준으로 설정되었기 때문에 등급에 부합하는 설계를 함에 있어서 구조설계자의 시각이 구조설계기준에서 시방서 기준으로 바꿔야 한다는 전제가 내포되어 있다. 단순히 구조계산에 필요한 최소값이 아니라 시공 중 발생할 수 있는 오차요인까지 감안한 설계가 진행되어야 하기 때문에 콘크리트 물량 및 철근 물량이 증가하는 경우도 발생할 수 있을 것이다. 특히 구조적으로 해결이 어려운 부분에 대해서는 사전검토를 통하여 항목을 도출하고 대응방안에 대한 연구를 진행하는 등의 등급향상을 위해서는 기초적인 연구가 필요할 수도 있을 것이다.

그리고 본 항목은 현재 대부분의 공동주택이 철근콘크리트조로 시공되고 있다는 이유로 철근콘크리트에 국한된 평가기준을 제시하고 있는데, 장기적인 측면에서 다른 구조요소에 대한 평가기준도 고려해야 하지 않을까?

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 「공동주택 성능등급 표시제도에 관한 연구」, 건설교통부, 2005
2. 건설교통부고시 제2006-14호, "주택성능등급 인정 및 관리기준"
3. 주택성능등급 인정센터 홈페이지, http://www.goodhousing.or.kr
4. 콘크리트 표준시방서, 건설교통부, 2003
5. 콘크리트 표준시방서 내구성편, 건설교통부, 2004
5. 콘크리트 구조설계기준, 건설교통부, 2003
6. 건축공사 표준시방서, 건설교통부, 1999
7. 건축공사 표준시방서, 건설교통부, 2006