

## 알칼리-실리카 반응에 의한 시멘트 콘크리트 포장 파손 사례

홍승호<sup>1)</sup> · 한승환<sup>1)</sup> · 윤경구<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국도로공사 도로교통기술원 포장연구그룹, <sup>2)</sup>강원대학교 토목공학과

## A Case Study for Deterioration due to Alkali-Silica Reaction in the Cement Concrete Pavement

Seung-Ho Hong<sup>1)</sup>, Seung-Hwan Han<sup>1)</sup>, and Kyong-Ku Yun<sup>2)\*</sup>

<sup>1)</sup>Pavement Research Group, HTTI, Korea Highway Corporation Hwaseong 445-812, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Kangwon National University, Kangwon-do 200-701, Korea

**ABSTRACT** The Alkali-Silica Reaction (ASR) may cause a serious failure in the concrete pavements and structures. Several researches in some nations have conducted the continuous studies to prevent failure of the concrete structures by the ASR distress as well as the studies to manifest the mechanism. The researches on the ASR have not been performed affluently in Korea because the distress due to ASR has seldom been reported literarily. In this study, we tried to set up the systematic scheme practically for verifying the cause of distress due to ASR by using the visual inspections in field, the chemical method, petrographic analysis, and Electron Dispersive X-ray Spectrometer (EDX) method of Scanning Electron Microscopy (SEM) in laboratory. The chemical method, petrographic method using SEM, and X-ray method were used to verify the cause of pattern crack on the surface and internal crack in the plain concrete pavement. It can be concluded that the distress of a specific site in plain concrete pavement was mainly due to ASR. The chemical method, the petrographic method and EDX method using SEM may be the effective tools for verifying the cause of AAR distresses.

**Keywords** alkali-silica reaction, asr gel, cracking and spalling, cement concrete pavement

### 1. 서 론

우리나라에서 시멘트 콘크리트 구조물에 알칼리-실리카 반응에 의해 발생한 피해 사례는 거의 보고되지 않고 있다<sup>1-4)</sup>. 그러나, 최근 고속도로의 일부 시멘트 콘크리트 포장에서 알칼리-실리카 반응에 의한 포장 노면 균열 및 스플링 등의 심각한 손상이 목격됨으로써 국내에서도 알칼리-실리카 반응에 대한 판정기준 및 대책수립이 절실히 필요한 시점에 와 있다. 미국, 캐나다 및 일본에서는 알칼리-실리카 반응으로 피해를 입은 시멘트 콘크리트 구조물이 많은 것으로 보고되고 있으며, 피해를 입은 구조물을 복구하기 위한 연구 및 공법 개발이 활발히 진행 중에 있다<sup>5-8)</sup>.

최근에는 하천의 환경오염 방지를 위한 골재 채취 금지로 인한 천연 골재의 고갈로 시멘트 콘크리트 공사에서 양호한 골재를 사용하지 못하고 있는 실정이다. 골재의 품질 저하에 의해 시멘트 콘크리트 구조물의 내구성을 저하시키는 동결-용해 작용 및 알칼리-실리카 반응

의 피해를 받을 수 있는 환경에 노출되어 있다. 특히, 알칼리-실리카 반응에 대한 골재 품질 시험 없이 석산에서 생산된 골재 또는 현장에서 생산된 골재를 사용할 때 알칼리-실리카 반응 피해가 발생할 수 있다.

알칼리-실리카 반응은 시멘트 성분 중  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ 와  $\text{OH}^-$  이온이 골재 중 비결정질의  $\text{SiO}_2$  성분과의 화학 반응에 의해 발생한다. 대부분의 골재는 안정적인 결정 구조를 가지고 있으나, 일부 단백석, 화강암, 화강암질 안산암, 사암, 점판암, 규질암 등은 비결정질의 구조를 가지고 있다<sup>9)</sup>. 알칼리-실리카 반응은 두 단계로 진행된다. 첫 번째 단계에서는 시멘트 콘크리트 구조물의 공극에 높은 농도의  $\text{NaOH}$  용액 또는  $\text{KOH}$  용액이 존재하고 있는데, 높은 농도의 알칼리 용액과 골재의 반응성 실리카 성분이 화학 반응하여 반응성 젤을 생성한다. 두 번째 단계는 반응성 젤이 수분을 흡수하고 팽창하여 콘크리트 강도보다 큰 인장 응력이 발생하는 경우 파손을 유발하게 된다. 본 연구 대상 구조물은 고속도로에 건설된 시멘트 콘크리트 포장으로 표면에 불규칙적인 균열이 발생하였으며, 줄눈부에 심한 스플링 파손이 발생하였다. 본 연구에서는 시멘트 콘크리트 포장의 표면에 발생한 균열의 원인을 구명하고자 주사형 전자현미경 (SEM : Scanning

\*Corresponding author E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr

Received September 5, 2005, Accepted February 28, 2006

©2006 by Korea Concrete Institute

Electron Microscope)의 에너지 분산 분광기(EDX : Electro Dispersive X-ray Spectrometer)와 AASHTO T299-2000의 화학적인 방법을 사용하여 원인을 분석하였다<sup>10)</sup>. 본 논문에서 분석된 결과는 국내 일부 고속도로 시멘트 콘크리트 포장에 알칼리-실리카 반응에 의한 손상이 존재함을 확인하였다. 국내에서도 알칼리-실리카 반응에 의해 대규모적인 피해 사례가 발생할 수 있음을 입증하여 알칼리-실리카 반응에 대한 연구가 필요한 시점이라고 사료된다.

## 2. 시멘트 콘크리트 포장 건설 현황

본 연구의 조사 대상 시멘트 콘크리트 포장은 1996년 건설되어 7년 경과된 상태이다. 조사 대상 구간에 건설된 시멘트 콘크리트 포장 구조는 6m 줄눈 간격과 차선 폭 3.7m의 왕복 6차선으로 건설되어 있다. 콘크리트 포장에는 차량 진행 방향으로 6m 간격으로 시공된 횡방향 줄눈부에 종방향으로 32mm 강봉 다웰바가 주행 차선에는 300mm 간격으로 추월선은 450mm 간격으로 설치되어 있다. 다웰바는 줄눈부에 작용되는 차량 하중을 인접 포장으로 분산시키는 기능을 한다. 종방향 줄눈은 3.7mm 간격으로 차선이 분리되는 위치에 설치되어 있고, 16mm 이형 철근의 타이바가 750mm 간격으로 배치되어 있다. 타이바는 인접 포장과의 벌어짐을 방지하는 기능을 한다. 포장 건설은 1차로와 2차로는 콘크리트 포장용 포설기로 동시에 시공되었으며, 3차로는 기 시공된 1, 2차로를 28일간 양생한 후 1차로 포설기로 시공하였다. 본 구간에 건설된 시멘트 콘크리트 포장의 배합 기준은 Table 1과 같고, 345kg/m<sup>3</sup>의 단위 시멘트량으로 배합설계 되었다. 굵은 골재의 최대 크기는 32mm가 사용되었다. 굵은 골재는 충남 아산의 석산에서 생산된 쇄석 골재가 사용되었으며, 잔골재는 경기도 인근의 서해상에서 채취된 해사

를 세척하여 사용하였다. 잔골재의 잔류 염분량은 고속도로 전문시방서에서 제시한 시험방법에 의해 합격된 것으로 조사되었다.

## 3. 현장 조사

본 대상 구간의 시멘트 콘크리트 포장에 발생된 불규칙 균열에 대한 원인 분석을 위하여 장비 및 육안 조사를 수행하였다. 전체적인 균열 양상을 분석하기 위하여 표면 균열 조사 장비인 ARAN 장비를 사용하였다. ARAN 장비는 고속도로 포장의 표면 파손을 80 km/h로 주행하면서 연속적으로 1번에 차선폭 3.7m와 차량 진행 방향으로 10m 폭을 조사할 수 있는 장비이다. 본 조사 대상 구간에서는 ARAN 장비를 사용하여 공용 년수 경과에 따른 파손의 진행 상태를 조사하였다. 육안 조사를 통해서는 표면 파손 상태와 코어 채취 위치를 선정하였다.

### 3.1 장비 및 육안조사

ARAN 장비로 조사된 한 구간의 파손 상태는 Fig. 1에서 보는 바와 같다. 본 구간에 발생한 균열의 형태는 불규칙적인 형태이며, 포장 전체에 발생되어 있는 것으로 나타났다. 일부 줄눈부는 균열이 심하게 발생하여 스풀링 파손으로 진행된 것으로 조사되었다. 줄눈부에 발생된 스풀링은 차량 하중의 반복적인 작용으로 파손이 급격하게 진행되는 것으로 조사되었다. 육안조사에서 포장체에 나타난 균열은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 균열의 방향성이 매우 불규칙하게 발생되어 있는 것으로 조사되었고, 줄눈부에서는 스풀링으로 진행되어 아스팔트로 응급 보수되어 있는 것을 볼 수 있다. 길어깨와 인접된 포장부에서는 균열부가 검게 변색되어 균열이 쉽게 관찰될 수 있다. 길어깨부는 아스팔트 포장부로 물이 쉽게 유입

Table 1 Mix proportion of cement concrete pavement

Flexural strength s <sub>bk</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	Slump (cm)	Air (%)	Type of aggregate (mm)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	W/C (%)	S/A (%)	Sand (kg/m <sup>3</sup> )	Coarse (kg/m <sup>3</sup> )	A.E	
										g/m <sup>3</sup>	%
45	4	4	32~19 19~5	152	345	44	40	734	1,139	518	0.15

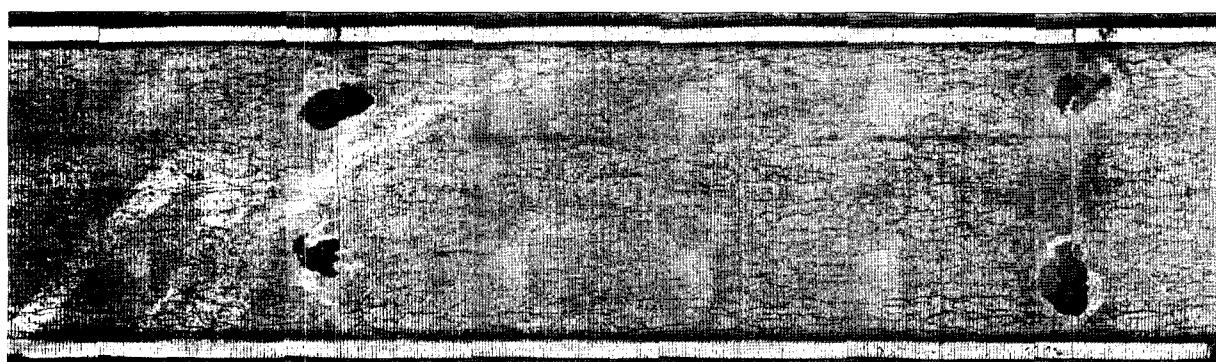


Fig. 1 Cracking and spalling on cement concrete pavement (10m × 3.7m)

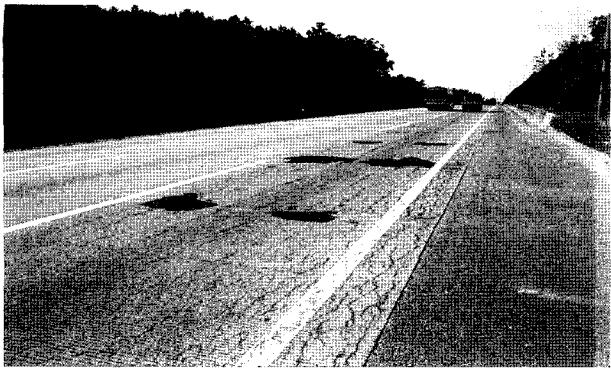


Fig. 2 Random cracking and spalling



Fig. 3 Internal cracking

될 수 있고, 콘크리트포장보다 연성으로 1차로 또는 2차로의 콘크리트포장과 연결된 위치와 비교하여 구속이 낮게 작용되는 지점이다. 이로 인하여 구속이 적은 줄눈 또는 길어깨 인접부에서 포장 팽창으로 인해 많은 균열이 발생되고, 균열폭이 크게 발생하는 것으로 판단된다. 포장체에 발생된 균열은 차량 진행 방향과 줄눈 인접부에서는 심한 스팔링 파손으로 진행되는 것으로 조사되었다. Fig. 2 구간의 1차로와 2차로에서는 불규칙한 균열이 관찰되지 않아 콘크리트 포장 타설 시기에 따라 균열의 발생 범위가 달라지는 것으로 판단된다.

### 3.2 포장 내부 상태

포장체 내부 상태를 관찰하기 위하여 불규칙 균열이 발생된 부위에서 100mm 코어 시편을 채취하였다. 코어 시편의 일부 위치에서 국부적으로 물기가 지속적으로 남아 있는 것을 볼 수 있다. 코어 시편의 내부는 불규칙한 높이에 수평 방향과 수직 방향으로 균열이 관찰되었다. 코어 시편은 실험실에서 대기 건조 상태에서 1일 정도 경과한 후 관찰한 결과 균열부와 시편 외부에 노출된 일부 골재에서 반응 생성물이 관찰되었으며, 시간 경과에 따라 반응 생성물은 젤리 상태에서 경화되는 현상이 관찰되었다. 코어 시편의 수평 균열이 발생된 부위는 인력에 의해 쉽게 분리될 수 있다. 채취된 코어 시편으로 강도 특성을 분석하기 위한 실험을 수행하고자 하였으나, 내부에 발생된 수평한 균열로 인하여 압축강도 측정은 불가능하였다. 콘크리트 포장에서 강도 추정으로 많이 사용되고 있는 할렬인장 강도 시험에서도 내부에 발생된 균열로 인하여 강도 측정시 편차가 심하게 발생하여 일관성이 있는 강도 분석은 불가능하였다.

균열이 발생한 포장체를 Fig. 3과 같이 측면을 절단하여 관찰한 결과 내부에는 수평한 균열이 많이 발생되어 있는 것으로 나타났다. 내부에 발생한 수평한 균열은 불특정한 위치에 발생되어 있으며, 일부 균열은 상부와 하부에서 발생된 균열과 연결되어 있는 것으로 조사되었다. 포장체 내부에 수평한 균열이 발생한 코어 시편에서는 Fig. 4와 같이 골재 주위에 발생한 반응환이 관찰되었다. 반응환이 관찰된 골재는 Fig. 4에서 약 10mm 크기의 굵

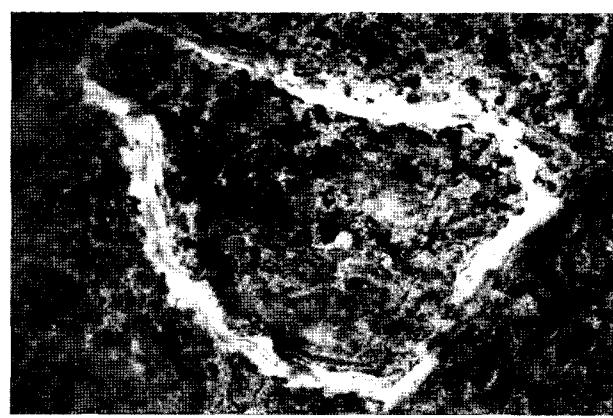


Fig. 4 Rim of alkali silica reaction

은골재이며, 다른 위치의 일부 골재 주위에도 백색의 반응환이 발생되어 있는 것으로 조사되었다.

## 4. 결과 분석 및 고찰

### 4.1 골재 암석학적 분석

현장에서 균열이 있는 코어 시편을 채취하여 시편에 포함되어 있는 굵은 골재를 분리하여 편광현미경을 이용한 암석학적인 분석을 수행하였다. 표면 균열이 발생한 한 개의 코어 시편에서 분리된 11종의 굵은 골재는 변성암(Metamorphic rock)으로 분석되었다. 각 골재에 포함되어 있는 성분은 Table 2과 같다. 편마암(Gneiss) 골재의 주성분으로는 석영(Quartz), 사장석(Plagioclase), 흑운모(Biotite), 방해석(Calcite) 등이다. 편암(Schist) 골재의 주성분은 석영, 정장석(Orthoclase), 사장석, 흑운모(Muscovite), 불투명 광물(Opaque Mineral)로 구성되어 있는 것으로 조사되었다. 편마암 및 편암에 포함되어 있는 석영은 파동소광(波動消光) 현상(편광 현미경의 교차리콜하에서 석영 입자의 간섭색이 서로 같지 않아 각각의 석영 입자에서 소광이 동시에 일어나지 않는 현상)을 보이며, 이와 같은 파동소광(波動消光) 현상을 보이는 석영이 시멘트의 알칼리 성분과 반응성이 있는 것으로 보고된 광물이다. 현장에서 채취된 코어 시편의 균열 절단면에서 편암과 편마암 골재 주위로 백색 생성물을 관찰할

**Table 2** Type of mineral of aggregate

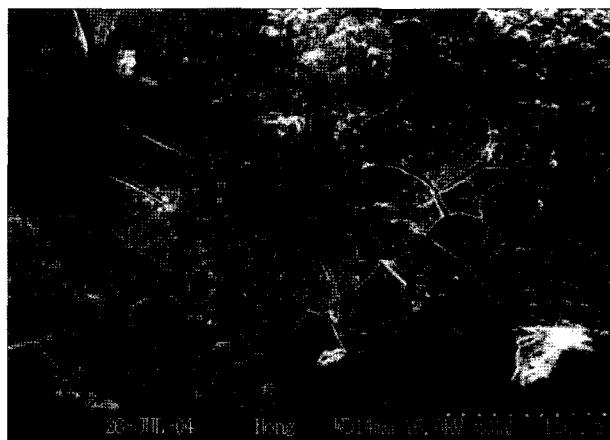
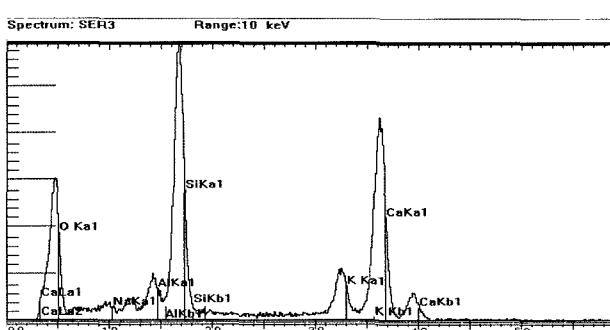
No.	Rock types	Mineral	Sub mineral
1	gneiss	quartz, plagioclase	micro-plagioclase, perthite, calcite
2	metamorphic sandstone	quartz, orthoclase, muscovite, calcite, epidote, chlorite, opaque mineral	
3	quartz porphyry	quartz, orthoclase, plagioclase, muscovite, calcite, chlorite, opaque mineral, felsic ground mass	
4	schist	quartz, orthoclase, plagioclase, muscovite, opaque mineral	
5	mable	calcite, diopside, hornblende, chlorite, epidote	
6	hornblende gneiss	quartz, hornblende	plagioclase, epidote, sphen, calcite
7	phyllite	quartz, muscovite, calcite, mud-mineral, felsic matrix	
8	gneiss	quartz, plagioclase	calcite
9	mud slate	quartz, biotite, chlorite, opaque mineral	
10	mable	calcite	quartz, muscovite
11	mable	calcite	quartz, hornblende, joicite

수 있었다. 시멘트 콘크리트 포장에 사용된 일부 편암 및 편마암 종류의 굵은 골재주위에서 백색 반응환이 나타났고, 골재의 성분으로 분석된 파동소광(波動消光) 석영에 의해 골재의 반응환이 형성된 알칼리-실리카 반응이 발생한 것으로 사료된다.

#### 4.2 포장체 내부 반응 생성물

본 연구에서 사용된 SEM은 일본 H사의 Model S-3200N이고, EDX 장치는 미국 K사의 Model Sigma MS2이다. SEM의 EDX 분석을 위하여 코어 시편의 시멘트와 골재 경계부에서 시료를 채취하여 관찰 및 분석을 위해 표면 처리하였다.

SEM 관찰에서 시멘트와 골재의 경계부는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 시멘트페이스트부는 거친 상태이며, 반

**Fig. 5** Interface of cement paste and gel**Fig. 6** Surface on asr gel**Fig. 7** X-ray spectrum of cement paste

응 생성물 부위는 매끄러운 상태임을 알 수 있다. 반응 생성물은 Fig. 6에서 보는 것과 같이 표면에 불규칙 균열이 많이 발생되어 있는 것으로 관찰되었다. SEM의 EDX 분석에서 변색 및 반응 물질이 관찰되지 않은 시멘트 시편에서 골재의 X-ray 스펙트럼은  $Si^{4+}$  성분만 높은 피크값을 보이는 것으로 분석되었다. 시편의 변색과 반응 생성물이 관찰된 Fig. 5의 시멘트페이스트는 Fig. 7에서 보는 바와 같이  $Si^{4+} > Ca^{2+} > K^+ > Al^{3+}$  성분 순으로 높은 스펙트럼 피크 값이 분석되었다. 시멘트페이스트부에도 반응 생성물이 많이 포함되어 있는 것으로 사료된다. 반응 생성물인 Fig. 6에서는 Fig. 9에서 보는 바와 같이  $Si^{4+} > K^+$  성분이 주로 분석되었고, 다른 물질은 매우 적게 포함되어 있는 것을 알 수 있었다. 외부로 노출된 반응 생성물은 주로  $Si^{4+}$ ,  $K^+$  성분으로 구성되어 있고,  $Ca^{2+}$  성분이 매우 낮은 반응성 물질임을 알 수 있었다. 국내 시멘트의 알칼리 이온은  $K^+$  성분이 많이 포함되고 있고,  $Na^+$  성분은 낮게 포함되어 있다. 본 연구에서 분석된 알칼리-실리카 반응 생성물은 시멘트의  $K^+$  성분에 의해 발생된 것으로 판단된다. SEM의 EDX 분석을 통하여 알칼리-실리카 반응에 의해 생성된 전형적인 반응 물질의 스펙트럼이 확인되어 조사 대상 시멘트 콘크리트 포장에 발생한 불규칙 균열은 알칼리-실리카 반응에 의한 것으로 사료된다. 또한, 본 구간의 줄눈부에 발생된, 스팔링

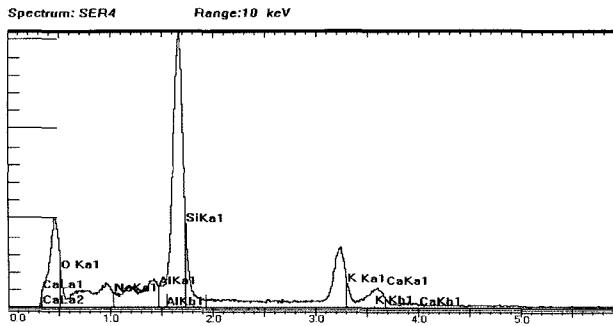


Fig. 8 X-ray spectrum of reaction product



Fig. 9 UV-light condition

파손은 알칼리-실리카 반응의 심한 진행과 차량 하중의 복합적인 작용에 의해 발생된 것으로 판단된다.

#### 4.3 화학적인 분석

본 연구에서는 미국에서 최근에 콘크리트 구조물의 알칼리 골재 반응 확인을 위해 적용하고 있는 “AASHTO T299-2000” 방법을 적용하여 실험을 수행하였다. 이 실험법은 알칼리-실리카 반응이 발생된 콘크리트 시편에 반응성 물질과 반응하는 형광 시약을 살포한 후 254nm 파장의 특정 강도 자외선을 비추게 되면 반응성 물질이 발생된 지점에서 형광 시약이 발광하는 현상 관찰을 통하여 알칼리-실리카 반응을 확인할 수 있다. 본 실험 시편은 자연 광선에서는 알칼리-실리카 반응을 확인할 수 없는 반면에, 이 시험 방법으로는 채취된 시편에 형광 시약을 처리한 후 254nm 파장의 자외선 광선을 비추게 되면 Fig. 9와 같이 알칼리-실리카 반응부에 화학반응에 의해 노란색 형광 빛이 나타나는 것을 관찰할 수 있었다. 화학적인 분석을 통하여 알칼리-실리카 반응에 의해 생성된 반응 물질부의 발광현상으로 조사 대상 시멘트 콘크리트 포장의 외부 및 내부에 발생한 균열은 알칼리-실리카 반응에 의한 것으로 사료된다.

## 5. 결론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 육안조사와 장비조사에서 포장면에 발생한 균열은 차량 진행 방향으로 균열의 폭이 크고, 줄눈부와 길 어깨 인접부에서 균열이 발생하였고, 코어 시편의 내부는 불규칙한 높이에 수평 방향과 수직 방향으로 균열이 관찰되었고, 균열부와 시편 외부에 노출된 일부 골재에서 반응생성물이 관찰되었다.
- 2) 암석학적인 분석에서 현장에서 채취된 코어 시편의 균열 절단면에서 편암과 편마암 골재 주위로 백색으로 변색된 반응화가 관찰되었다.
- 3) 시편의 변색과 반응 물질이 관찰된 시편 시멘트페이스트 위치에서 스펙트럼의 피크값이  $\text{Si}^{4+} > \text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Al}^{3+}$  순으로 분석되었고, 반응 생성물에서는  $\text{Si}^{4+} > \text{K}^+$  성분이 주로 분석되었다.
- 4) 채취된 시편에 형광 시약을 처리한 후 254nm파장의 자외선 광선을 비추게 되면 알칼리-실리카 반응부에 화학반응에 의하여 노란색 형광 빛을 나타나는 것으로 분석되었다.

이와 같은 결과를 바탕으로 본 구간의 시멘트 콘크리트 포장에 발생한 불규칙 균열은 알칼리-실리카 반응에 의해 발생한 것으로 사료된다.

본 논문에서 분석된 결과는 국내 일부 고속도로 시멘트 콘크리트 포장에 알칼리-실리카 반응에 의한 손상이 존재함을 확인하였고, 국내에서도 알칼리-실리카 반응에 의해 대규모적인 피해 사례가 발생할 수 있음을 입증하여 알칼리-실리카 반응에 대한 연구가 필요한 시점이라고 사료된다.

## 참고문헌

1. 하성호, 김경수, 김무한, 정지곤, “콘크리트 골재용 각종 암석의 알칼리-실리카 반응에 대한 연구”, 한국광물학회지, 3-1, 1990, pp.18-33.
2. 송명근, 알카리 골재 반응에 대한 고찰, [http://www.ktx.or.kr/kor/news/n405\\_1.html](http://www.ktx.or.kr/kor/news/n405_1.html).
3. 한국건설기술연구원, 국내 쇄석골재의 화학반응성 연구, 1993. 12.
4. 이도현, 김병환 외, 콘크리트용 부순 모래의 실용화 연구(II), 대한주택공사 주택연구소, 1997. 12.
5. James A. Farny and Steven H. Kosmatka, *Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reaction in Concrete*, Portland Cement Association, 1997.
6. FHWA(Federal Highway Administration), *Guidelines for Detection, Analysis, and Treatment of Materials-Related Distress in Concrete Pavement*, FHWA Contract DTFH61-96-C-00073, FHWA-RD-01-163, March 2002.
7. Cement Association of Canada, *Alkali-Aggregate Reactivity*, <http://www.cement.ca/cement.nsf/searchFin>

- / FCA86C927D5B /, 2003.
8. 社團法人 日本コソクリト工學協會 アルカリ 骨材 反應 調査研究委員會, アルカリ 骨材 反應 調査研究委員會 報告書, 平成元年 7月.
9. Guide specifications for Concrete Subjects to Alkali-Silica Reactions, Mid-Atlantic Regional Technical Committee, Available through NRMCA, Silver Spring, Maryland, June 1993.
10. AASHTO, Rapid Identification of Alkali-Silica Reaction Products in Concrete, AASHTO T299-93(2000), 2002.

---

**요 약** 알칼리-실리카 반응은 시멘트 콘크리트 포장 및 구조물에 매우 심각한 손상을 일으킬 수 있다. 국내의 경우 알칼리-실리카 반응에 의한 피해 사례가 거의 보고되지 않아 연구는 적게 수행되고 있는 실정이다. 본 연구는 국내 고속도로 일부 노선의 시멘트 콘크리트 포장에서 발생한 불규칙균열과 스플링의 발생 원인을 분석하기 위해 수행되었다. 본 연구에서는 현장조사, 화학적인 방법 및 전자현미경(SEM)의 에너지 분석기(EDX)를 사용하여 파손 원인을 분석하였다. 조사 대상 시멘트 콘크리트 포장의 파손 유형은 불규칙 균열과 스플링이다. 코어 시편의 균열 절단면에서 편암과 편마암 골재 주위로 백색으로 변색된 반응화이 관찰되었고, 반응 생성물에서는  $\text{Si}^{4+} > \text{K}^+$  성분이 주로 분석되었다. 254nm 포장의 자외선 광선을 비추게 되면 알칼리-실리카 반응부에 화학반응에 의하여 노란색 형광 빛을 나타나는 것으로 분석되었다. 본 연구를 통하여 조사 대상 시멘트 콘크리트 포장에 발생한 불규칙 균열 및 스플링은 주로 알칼리-실리카 반응에 의해 유발된 것으로 판정하였다.

**핵심용어** 알칼리-실리카 반응, 반응 생성물, 균열 및 스플링, 시멘트 콘크리트 포장