

알칼리-골재반응에 의한 콘크리트 포장 팽창과 그에 따른 교량손상 감소방안

우정원¹, 임성순^{2*}

Concrete Pavement Expansion due to Alkali-Aggregate Reaction and Damage Prevention of Bridges

Jeong-Won Woo¹, Sung-Soon Yhim^{2*}

Abstract: The concrete pavement slabs that suffer expansion due to the Alkali-Aggregate Reaction(AAR) increase and the increase consequently causes unexpected displacement of bridge abutment. As the expansion due to the AAR is greater than that due to the temperature change, lethal load can act on bridge abutment. Therefore appropriate preventive measures may be necessary. The degree of expansion by AAR depends on the severity of AAR and geometry condition of concrete pavement and road structure. In order to prevent damage to bridge, it is effective to release the expansion force of the concrete. It would be advantageous to replace the concrete pavement with asphalt for a long section of concrete pavement.

Keywords: Alkali-Aggregate Reaction, Concrete pavement expansion, Abutment displacement, Bridge damage

1. 서 론

알칼리-골재 반응(AAR : Alkali-Aggregate Reaction)은 시멘트에 존재하는 알칼리 성분인 Na^+ 와 K^+ 이온이 pH가 높은 환경에서 경화된 콘크리트의 공극 용액 속에 존재하면서 골재의 반응성 실리카와 반응하여 팽창성 반응겔(ASR gel)을 생성하는 현상이다. 이렇게 생성된 반응겔에 수분이 공급되면 팽창이 더욱 진전되게 된다. 일부 겔은 팽창이 거의 발생하지 않거나 매우 작게 발생하여 콘크리트에 피해를 주지 않지만 반응겔이 일정량 이상 생성되면 팽창압이 발생하고, 이 때 발생한 팽창압이 콘크리트의 인장력을 초과하게 되어 균열이 발생하게 된다. Photo 1, 2는 본 연구에서 대상으로 하는 포장 구간에서 채취한 시편에서 나타난 균열과 현미경으로 확대한 모습을 보여 주고 있다. 국외의 경우 1940년대부터 알칼리-실리카 반응에 의한 피해 사례가 보고되었고, 이에 골재의 알칼리 잠재반응 시험방법에 대한 ASTM 규정이 1950년에 제정되었으며, 현재 전 세계에서 이를 예방하고 조치하는 방안에 대한 연구가 수행되고 있다. 국내 연구사례로는 국내 건설 골

재의 알칼리-골재반응 가능성을 시험을 통해 분석하고(Yun et al., 2008), 고속도로 현장에서 콘크리트 포장의 팽창을 모니터링 한 바 있다(Hong et al., 2015).

한국도로공사의 고속도로는 콘크리트 포장이 65%를 차지하고 있다. 이중 AAR발생구간으로 의심되어 관리하고 있는



Photo 1 Pavement crack by AAR

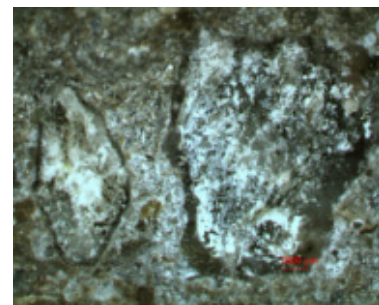


Photo 2 AAR rim between aggregate and cement paste(10x)

¹정회원, 서울시립대학교 박사과정, 한국도로공사 지사장

²정회원, 서울시립대학교 교수, 교신저자

*Corresponding author: yhimss@uos.ac.kr

Dept. of Civil Eng., University of Seoul, Seoul, 02504, KOREA

•본 논문에 대한 토의를 2017년 10월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 11월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

구간은 서해안선 등 16개 노선, 574 km(1차로기준)로 전체 콘크리트 포장의 약 4% 정도를 차지하고 있다. 그러나 공용기간의 증가로 열화가 심해져 Figs. 1, 2와 같이 매년 75 km, 32%씩 증가하는 추세이다.

AAR로 콘크리트 포장이 팽창하면 균열이 발생하면서 포장상태가 열악해진다. 이러한 콘크리트의 팽창은 인근 교량에 직접적으로 영향을 주게 된다. 고속도로 콘크리트 포장구간 내 위치하면서 포장의 팽창 영향을 받을 가능성이 있는 고속도로 교량은 대략 4,000여 개소(라멘형식 제외)로 파악되고 있다. 교대변위는 고성토부에 말뚝기초로 시공된 교대의 뒷채움부 침하로 인하여 발생하는 것이 주요인으로 알려져 있으나 본 연구는 콘크리트 포장에서 발생하는 AAR에 의한 팽창과 그로 인해 교대 변위가 발생할 수 있음을 사례를 통해 분석하였다. 그리고 AAR에 의한 콘크리트 포장의 팽창 정도를 파악하기 위해 다수 지점에 대해 현장 조사를 실시하였으며, 그 결과를 분석하고 팽창을 결정하는 영향인자에 대해 고찰하였으며, 교량손상의 감소방안에 대해서 검토하였다.

Table 1 Pavement in expressway(2016)

sum(4-lane)	asphalt pavement	concrete pavement
3,514 km	1,216 km(35%)	2,299 km(65%)

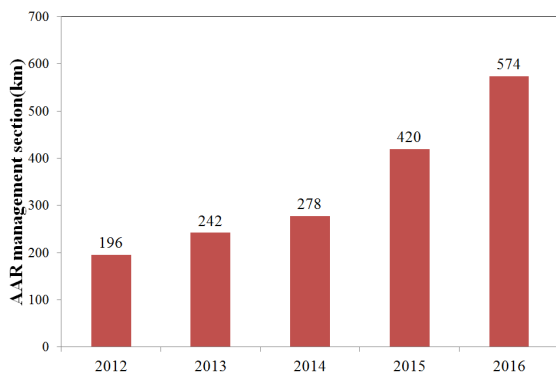


Fig. 1 Yearly AAR management length

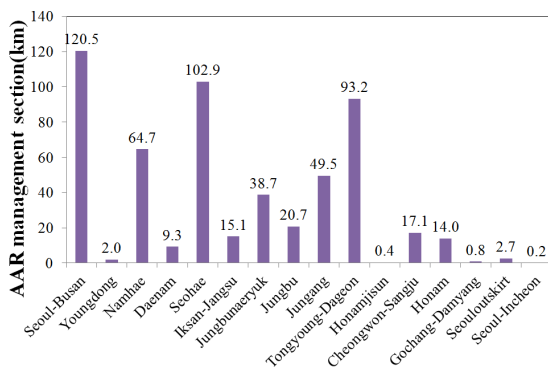


Fig. 2 AAR management length by route

2. 본 론

2.1 콘크리트 포장의 팽창에 의한 교량의 손상

2.1.1 콘크리트 포장팽창과 교량의 손상 매카니즘

AAR에 의해 콘크리트 포장이 팽창하면 시공줄눈이 밀착되고 Fig. 3과 같이 교대에 수평력으로 작용하면서 교대변위를 발생시키게 된다.

교대 변위가 발생하게 되면 Fig. 4와 같이 교량에서 나타나는 손상은 다양하다. 첫째, 신축이음장치가 협착되어 온도신축에 의한 유간이 없어지게 된다. 그리고 바닥판 단부 또는 거더 단부가 교대의 흉벽과 밀착되면서 박락이 발생하기도 한다. 둘째, 받침부에서는 받침이 편기되면서 이동 여유량이 없어지고, 이동이 구속될 경우 받침 무수축모르타르에서 균열이 발생하게 된다. 셋째, 확대기초 교대부에서는 교대 변위가 발생하는 대신 흉벽 배면이나 날개벽에서 인장균열이 나타나게 된다.

2.1.2 교량 손상 현황

최근 한국도로공사 연구원에서 수행한 현장자문에 따르면 고속도로 현장의 100여 개소에서 이와 같은 손상이 보고되고 있으며, 콘크리트 포장의 팽창 사례가 많고 교량의 점검자가 인지하지 못할 수가 있기 때문에 실제 현장에선 이 보다 많이 나타나고 있을 것으로 추정한다.

2.2 콘크리트 포장의 팽창량 조사

2.2.1 현장조사

AAR에 의한 콘크리트 포장의 팽창량은 교량에 가해지는 수평력의 힘을 가늠하고 현장에서 팽창에 대한 감소방안을 수립할 때 중요한 요소가 된다. 본 연구 조사대상 콘크리트 포장은 1998년 준공되어 2017년 기준 19년 공용 중인 서해안선 50 km구간으로 2008년 AAR로 판정된 구간에 위치하고 있다.

콘크리트의 누적팽창량을 파악하기 위해선 초기팽창량과

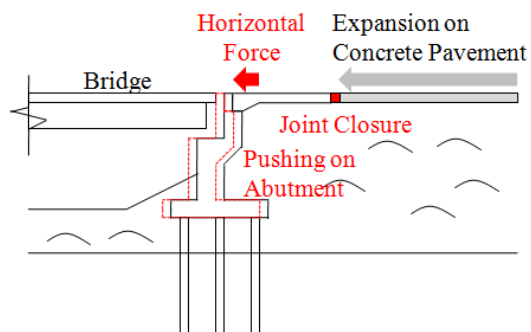
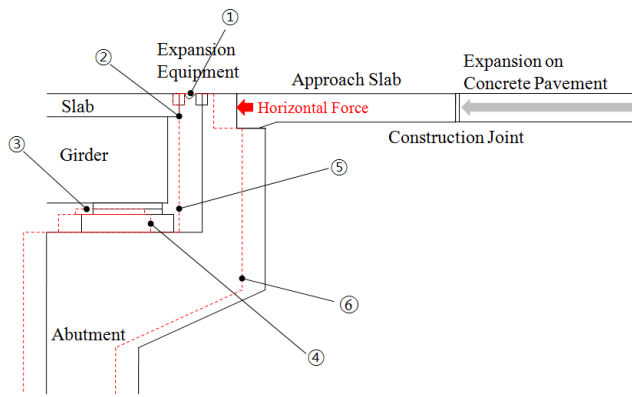


Fig. 3 Concrete pav. expansion and abutment displacement



① Expansion joint narrowness



② Deck end spalling



③ Shoe offset



④ Shoe mortar crack

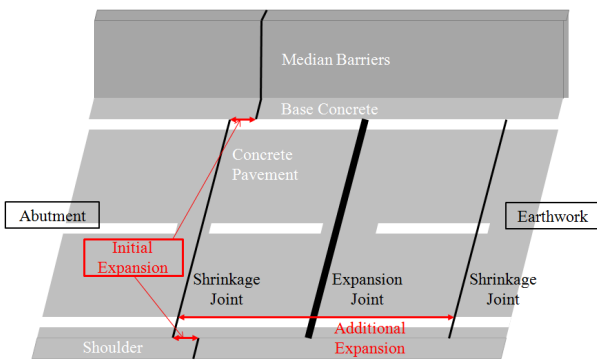


⑤ Abutment parapet crack



⑥ Abutment wing-wall crack

Fig. 4 Bridge damages by concrete pavement expansion



(a) Field measurement concept



(b) Shoulder side



(c) Median side

Fig. 5 Field measurement

추가팽창량 등을 조사하여야 한다. 콘크리트 포장의 수축줄눈과 중분대 기초 또는 갓길측의 수축줄눈은 일치(6 m간격)하여 시공하고 있다. 콘크리트 포장이 팽창하면 중분대 기초의 수축줄눈과 이격되는 현상이 발생하며 이 값을 초기팽창량이라고 정의하였다. 그리고 조사대상 구간은 콘크리트 포장의 팽창력을 보완하기 위해 2010년 이후 팽창줄눈(50 mm)

시공, 팽창줄눈 협착, 팽창줄눈 재시공(50 mm)이 수차례 실시되었다. 이러한 팽창량을 추가팽창량이라 부르며, 그 크기는 수축줄눈 간격(당초 6 m)의 감소량 측정값을 사용하였다.

콘크리트 포장이 팽창하면 우선 시공줄눈(간격 300 m)이 협착되기 때문에 전체 팽창량에 이를 포함하여 산정하였다. AAR에 의한 콘크리트 포장의 정도를 파악하기 위해 포장연장 대비 팽창률을 분석할 필요가 있다. 이를 위해 팽창량 이외 포장의 연장에 대한 정의가 필요하다. 포장의 연장은 교량에 인접한 포장의 길이지만 구속조건(교량-교량, 교량-라멘교 등)에 따라 실제 팽창에 관여하는 포장길이가 달라지는데 이를 유효포장길이라고 정의하였다.

현장조사 결과를 보면, 콘크리트 포장에 팽창력이 작용하면 포장길이 전반에 걸쳐 일률적으로 팽창하는 것이 아니라 포장 단부의 팽창량이 커지는 것을 알 수 있었다. 이는 콘크리트 포장층과 하부 기층 사이 경계면의 마찰에 의한 것으로 추정된다. 현장조사는 콘크리트 포장을 거슬러 올라가면서 수축줄눈의 이격이 없는 지점까지의 거리를 측정하여 팽창된 포장의 길이로 가정하였다. 또한 유효포장길이에 대한 비율로 마찰보정계수라고 정의하고 이를 산정하였다.

2.2.2 현장조사 결과

Table 2와 같이 40여 개소에 대한 측정 중 유효한 데이터 11 개소에 대한 누적 팽창량의 평균은 202 mm, 최대 400 mm까지 발생한 것으로 나타났다.

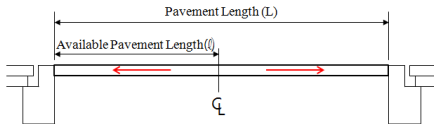
Fig. 6을 보면, 포장의 길이를 고려한 팽창률은 평균 0.04%,

Table 2 Field measurement of concrete pavement expansion by AAR

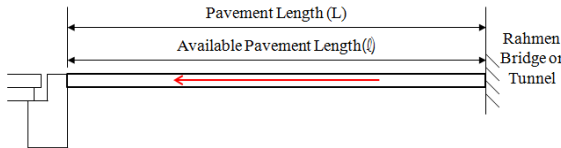
Meas. No.	Initial expansion (mm)	Add expansion (mm)	Construction joint (mm)	Accumulative expansion (mm)	Pavement length (L) (m)	Available Pav. Leng. (l) (m)	Expansion Ratio (%)	Expanded Pav. Leng. (l _e) (m)	Correction factor for friction (C _A)
①	120	120	20	260	330	330	0.079	270	0.82
②	100	70	20	190	820	410	0.046	233	0.57
③	20	50	20	90	820	410	0.022	170	0.41
④	60	70	80	210	1420	1420	0.015	220	0.15
⑤	0	160	20	180	590	590	0.031	370	0.63
⑥	120	140	20	280	525	525	0.053	311	0.59
⑦	40	30	20	90	330	330	0.027	208	0.63
⑧	40	70	20	130	830	415	0.031	121	0.29
⑨	180	30	20	230	590	590	0.039	379	0.64
⑩	110	110	180	400	2830	2830	0.014	560	0.20
⑪	20	120	20	160	525	525	0.030	281	0.54

- 1) Initial expansion : expansion amount before expansion joint
- 2) Additional expansion : expansion amount after expansion joint
- 3) Construction joint : 20mm for each 300m
- 4) Accumulative expansion (ΔL_A)= Initial+Add+ Construction joint
- 5) Pavement length(L) = Pavement length between bridges
- 6) Available Pavement length(l)
: Pavement length according to constraint(rahmen, tunnel etc)

(a) Typical section

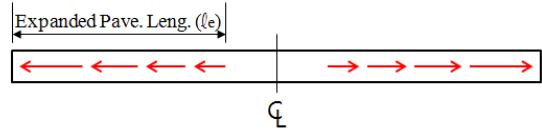


(b) Constrained section in one side



7) Expansion ratio(%) = $\frac{\Delta L_A}{l} \times 100$

- 8) Expanded pavement length(l_e)
: Realistic expansion length in pavement



9) Correction factor for friction(C_A) = $\frac{l_e}{l}$

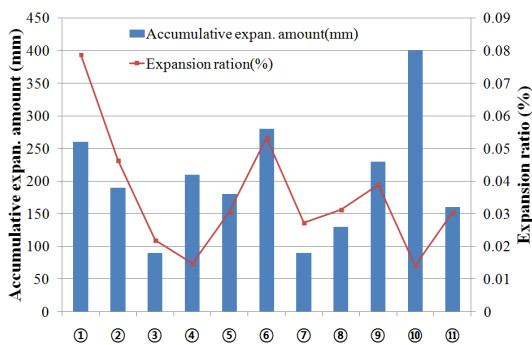


Fig. 6 Expansion amount and expansion ratio

최대 0.08%로 나타나고 있다. 철근콘크리트교량의 온도팽창률(-5~35°C)이 교량의 연장 대비 0.04% 임을 감안할 때 최대 값 0.08%은 온도 팽창의 2배 정도로서 상당히 큰 팽창량임을 알 수 있다.

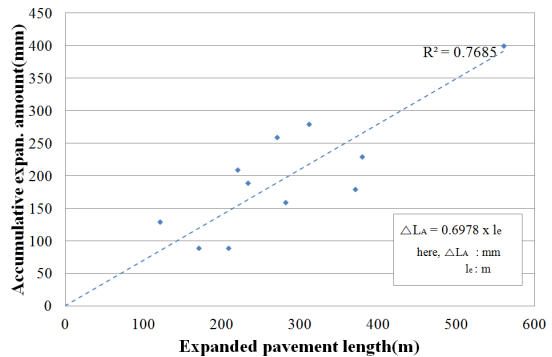


Fig. 7 Expansion amount according to expanded pavement length

Fig. 7에서 팽창량 ΔL_A 는 팽창된 포장의 길이 l_e 와 상관성이 높는데, 팽창된 포장길이가 증가할수록 선형적으로 비례함을 알 수 있다. 즉, 고속도로 현장 콘크리트 포장에서 수축 줄눈의 이격 여부를 조사하여 팽창된 포장의 길이를 알면 교

대 변위 발생 크기를 추정할 수 있을 것이다.

2.3 AAR에 의한 콘크리트 포장의 팽창 영향인자

전술한 바와 같이 AAR구간 콘크리트 포장의 팽창량과 팽창률은 다양하게 나타났다. 본 절은 팽창량과 팽창률의 크기와 관련이 있는 영향인자를 분석하였다.

2.3.1 알칼리-골재반응의 발생 정도

알칼리-골재반응의 정도는 우선 반응성 골재의 종류(Yun, 2008)에 따라 달라진다. ASTM C 1293 시험법에 따르더라도 시험 기준인 포장 연장의 0.04%/년은 가속 환경 조건이고 실제 현장의 환경조건과 다르므로 현장 포장의 팽창량을 예측하기는 쉽지 않다.

팽창량은 콘크리트 포장의 열화 정도에 따라서도 달라진다. 콘크리트 포장의 열화가 심할수록 수분의 공급이 많아지게 되고 수분공급에 따라 팽창량도 달라진다.

2.3.2 포장 길이

교량 구조물에서 온도 팽창량은 연장에 비례한다. 마찬가지로 콘크리트 포장의 팽창량 및 팽창률도 유효 포장의 길이가 커질수록 증가한다. 그러나 마찰계수가 미소한 교량에서와 같이 비례하는 관계를 나타내진 않는다.

현장조사 결과, 마찰보정계수는 0.15~0.82로 나타나고 있으며, 온도 팽창에 대한 AASHTO 제안 값인 0.65(시멘트안정처리층)와 같이 일정하진 않으며 포장 길이에 따라 달라지는(Lee, 2000) 모델이 타당한 것으로 판단된다. 그러나 AAR에 따른 포장 길이별 마찰보정계수에 대해선 추가적인 연구가 필요하다.

결론적으로 포장의 팽창량은 포장의 연장이 길어짐에 따라 비례하여 증가하는 것이 아니라 콘크리트 포장의 슬래브와 보조기층 경계면의 마찰로 일정길이 이상이 되면 수렴하는 로그함수 형태를 취할 것으로 추정한다.

Fig. 8을 참조하고, 구조물의 온도 팽창식과 유사하게 AAR에 의한 콘크리트 포장의 팽창식도 다음과 같이 표현할 수 있을 것이다. 팽창량을 식 (1)과 같이 간략히 표현하였지만 각각의 변수는 여전히 불확실성이 높다. 향후 이에 대한 추가 연구

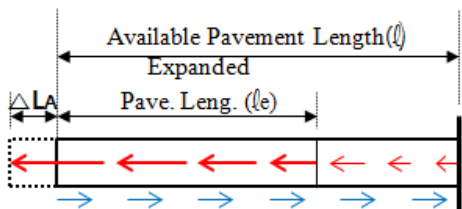


Fig. 8 Concrete pavement expansion model by AAR

가 필요하다.

$$\Delta L_A = C_A \cdot l \cdot \epsilon_A \quad (1)$$

여기서, ΔL_A : AAR에 의한 포장의 팽창량

C_A : 보조기층과 슬래브 마찰저항에 대한 보정계수
포장길이, 현재 0.15~0.82로 AAR 상태에 따라 달라질 것임

l : 유효 포장길이, 현장조건에 따라 정해짐

ϵ_A : AAR 팽창계수, C_A 가 0.65(AASHTO)일 경우
0.0002~0.0012로 나타남

2.3.3 도로 구조

Table 3을 보면, 유효 포장길이 등 기타조건이 동일하고 종단구배가 있는 지점에 대한 분석에서 종단이 낮은 쪽이 높은 쪽보다 팽창량이 크다는 것을 알 수 있다. 즉, 도로 기하구조에 따라서도 팽창량이 달라짐을 알 수 있다.

2.4 교량의 손상 방지를 위한 팽창력 감소방안

전절에서 AAR구간 콘크리트 포장이 팽창 시 온도응력 보다 큰 하중이 작용할 수 있음을 알 수 있었다. 따라서 팽창에 의한 수평력이 교량에 직접 작용하지 않도록 조치할 필요가 있다. 현재 고속도로는 2가지 방법을 실시하고 있다. 본 절은 각 방법의 특징과 적용 방안을 간단히 설명하고자 한다.

2.4.1 팽창줄눈 시공

팽창줄눈 시공법은 Fig. 10, Photo 3과 같이 유간을 확보하기 위해 교량 인접한 위치에 포장 전폭에 대해 포장하부까지 절단하는 방법이다. 토공부 처짐에 따른 평탄성을 고려하여 시공줄눈에서 약 15 m 떨어진 위치에 시공하며, 줄눈 폭은 주행차량의 단차를 고려하여 50~80 mm 정도를 적용하고 있다.

팽창줄눈 시공방법은 비교적 비용이 적게 들고, 시공 방법이 단순하여 현재 수십 여건의 시공 사례가 있다.

Table 3 Expansion according to gradient(On-site)

Low side(②)		High side(③)	
Expansion amount(mm)	Expansion ratio(%)	Expansion amount(mm)	Expansion ratio(%)
190	0.046	90	0.022



Fig. 9 Expansion difference according to gradient(On-site)

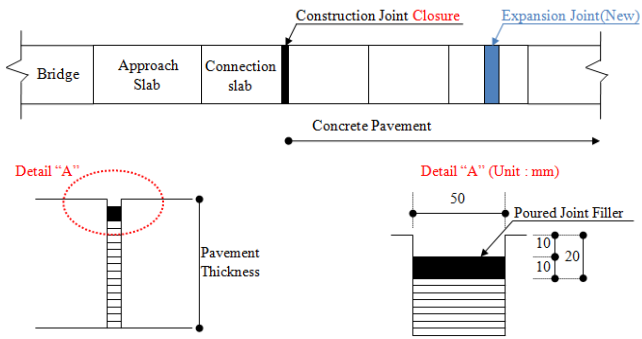


Fig. 10 Expansion joint construction



Photo 3 Expansion joint construction(On-site)

현장조사결과에 따르면 팽창줄눈 시공 후 일정기간이 지나면 또다시 시공된 팽창줄눈이 협착되는 경우가 많다. 이는 구속되어 있던 포장의 팽창이 이완되면서 또는 AAR이 더욱 진전되어 나타나는 현상이다. 따라서 팽창줄눈 유간을 주기적으로 조사하여야 하고, 팽창줄눈 협착 시 반복하여 재시공하는 불편함이 있다.

2.4.2 아스팔트 치환공법

아스팔트 치환공법은 Fig. 11, Photo 4와 같이 기존 콘크리트 포장을 일부 절취하여 아스팔트 포장으로 치환하는 공법이다. 교량에 인접한 위치에 콘크리트 포장의 일부 즉, 수축줄눈 사이 4~5 m의 전단면을 아스팔트 콘크리트로 치환하는 방법이다.

아스팔트 치환공법은 팽창줄눈 시공방법과 달리, 팽창에 대한 충분한 유간을 확보할 수 있어 교량에 대한 손상방지효과가 높다. 반면에 콘크리트 포장이 팽창하면서 치환된 아스팔트에 융기현상이 나타나므로 아스팔트를 절삭하여 평탄성을 확보할 필요가 있다.

시공된 팽창줄눈의 협착이 반복되는 구간이나 콘크리트 포장 길이가 긴 구간은 일반적으로 팽창줄눈 시공방법보다 아

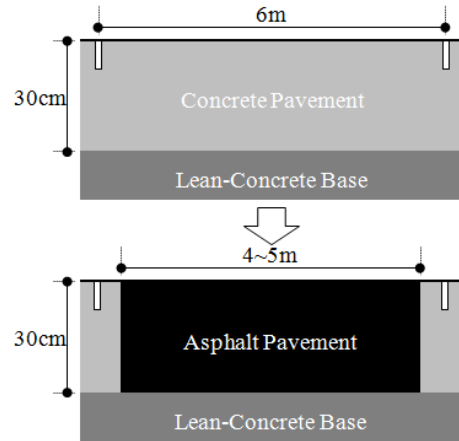


Fig. 11 Replacement with asphalt



Photo 4 Replacement with asphalt(On-site)

스팔트 치환공법이 유리할 것이다.

3. 결론

고속도로 건설 당시 천연골재의 고갈로 쇄석 등 반응성 골재를 사용하게 되었고, 포장의 열화로 수분이 공급되면서 알칼리-골재반응이 발생하는 구간이 증가하는 추세에 있다.

콘크리트 포장구간에 알칼리-골재반응이 발생하면 포장체가 팽창하면서 인접한 교량으로 전달되게 된다. 이에 따라 바닥판과 거더의 단부, 받침부 및 교대 흉벽 등에 다수의 손상이 발생하고 있다.

알칼리-골재반응이 발생한 콘크리트 포장 구간에서 팽창정도를 조사한 결과, 콘크리트 포장의 팽창량은 평균 202 mm (최대 400 mm), 포장연장 대비 팽창률은 평균 0.04%(최대 0.08%)로서 교량의 온도 신축양보다 커질 수 있음을 알 수 있었다.

알칼리-골재반응에 의한 콘크리트 포장의 팽창 정도는 알

칼리-골재 반응의 상태, 포장의 길이 및 도로구조 등에 따라 영향을 받는 것으로 추정된다. 그러나 보다 정확한 원인 및 영향 분석을 위해선 알칼리-골재반응에 관여하는 포장의 재료 등 각 요인에 대한 추가 연구가 필요할 것이다.

콘크리트 포장의 팽창력 감소방안으로 팽창줄눈 시공방법과 아스팔트 치환 공법을 적용한 사례를 통해 각 방법에 대한 장·단점을 비교하였다. 시공된 팽창줄눈의 협착이 반복되는 구간 또는 콘크리트 포장 길이가 긴 구간은 아스팔트 치환공법이 보다 유리할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문을 위하여 현장계측과 자료준비를 도와준 한국도로공사와 도로교통연구원 이일근 박사에게 감사드립니다.

References

- Hong, S. -H. and Shim, Y. -H. (2015), Long-term Monitoring of Expansion of Cement Concrete Pavement Affected by Alkali-Aggregate Reaction, *International Journal of Highway Engineering*, 17(2), 13-20.
- Hong, S. -H., Han, S. -H., and Yun, K. -K. (2006), A Case Study for Deterioration due to Alkali-Silica Reaction in the Cement Concrete Pavement, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 18(3), 355-360.
- Lee, S. W. (2000), Horizontal Joint Movement in Rigid Pavements, Pennsylvania State University, Doctor of Philosophy, 67-118.
- Yun, K. -K., Hong, S. -H., and Han, S. -H. (2008), Expansion Behavior of Aggregate of Korea due to Alkali-Silica Reaction by ASTM C 1260 Method, *Journal of the Korea Concrete Institute*, KCI, 20(4), 431-437.

Received : 07/31/2017

Revised : 08/07/2017

Accepted : 08/14/2017

요 지 : 고속도로에서 콘크리트 포장의 알칼리-골재반응 발생 구간이 증가하고 있다. 알칼리-골재반응이 발생한 콘크리트 포장은 팽창하면서 인접 교량에 교대 변위를 발생시켜 다수의 손상을 발생시키고 있다. 현장 조사 결과 콘크리트 포장의 팽창량은 온도 신축에 의한 팽창률을 상회하면서 교량에 치명적인 하중으로 작용하고 있어 손상 방지를 위한 선제적인 조치가 필요하다. 알칼리-골재 반응에 의한 팽창 정도는 알칼리-골재반응의 상태, 포장의 길이 및 도로구조에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 교량의 손상 방지를 위해선 콘크리트 포장의 팽창력을 이완시켜 주는 방안이 효과적이며 콘크리트 포장의 길이가 긴 구간은 아스팔트 치환공법이 유리할 것이다.

핵심용어 : 알칼리-골재반응, 콘크리트 포장 팽창, 교대 변위, 교량 손상
