

AASHTO 줄눈폭 예측식 오류에 대한 검토

Evaluation Fallacy in AASHTO Joint Opening Equation

전범준* · 최정근** · 권순민*** · 정진훈**** · 이승우*****

Chon, Beom Jun · Choi, Jeong Keun · Kwon, Soon Min · Jeong, Jin Hoon · Lee, Seung Woo

1. 서론

줄눈 콘크리트 포장은 아스팔트 포장과 달리 줄눈(Joint)을 두고 있는데, 이것은 콘크리트 타설 후 초기 건조수축으로 인해 발생하는 내부 응력으로 인해 발생하는 무작위 균열을 제어하기 위함이다. 이와 같이 줄눈은 줄눈 콘크리트포장의 초기에 구조적인 안정을 위해 설치하는 곳이기도 하지만, 초기 거동 이후에는 구조적인 취약부로 작용하여 파손이 발생 할 수 있으며 장기적인 포장의 공용성을 유지하기 위해서 줄눈폭 움직임의 정확한 예측이 필요하다. 일반적으로 줄눈폭을 예측하는데 1977년 Darter에 의해 제안된 AASHTO식을 사용하고 있는데 이 식은 현재까지도 신뢰성에 대한 체계적 검토 없이 사용되어 왔다. Minkarah(1982)의 Ohio Test Road 줄눈폭 관측결과와 이승우(2001)의 LTPP SMP 줄눈폭 데이터 검토에서 설계재료, 기후조건이 동일한 구간에서도 줄눈폭의 크기가 일정하지 않음을 확인하였다. 이러한 연구들을 토대로 국내 포장에서의 AASHTO 예측식의 적정성을 확인해보고 포장 조건별 줄눈 거동 양상을 알아보고자 한다.

2. AASHTO 줄눈폭 예측식 검토

일반적으로 줄눈폭 예측에 있어 식(1)의 AASHTO식을 사용하고 있다. 86 AASHTO Guide는 1977년 Darter 등에 의해 제안된 줄눈폭 예측식을 이용하고 있다. 그러나 이 식은 단 4군테의 포장 section 의 제한된 현장 데이터를 기초로 개발되었고 그 신뢰성에 대한 체계적 검토 없이 사용되어 왔다.

$$\Delta L = C \cdot JS[(\alpha_c \cdot T) + Z] \quad (1)$$

여기서 C = Subbase를 고려한 보정계수
 α_c = 콘크리트 슬래브 열팽창계수
 T = 연중 슬래브의 최대온도차
 Z = 콘크리트 슬래브 건조 수축 지수
 JS = 줄눈 간격

1982년 Minkarah는 Ohio Test Road에서 줄눈 움직임을 장기간 모니터링 하였다. 이 연구에서는 여러 가지 변수를 고려하다. 슬래브 두께는 23cm, 17cm이고, 슬래브 길이는 5.2m, 6.4m, 12.2m로 달리하고, 하부치반 재료는 안정화 기층과 쇄석기층에 대하여 고려하였다. 이와 같은 변수들을 고려하여 10개 그룹에 대해 각각 10개의 줄눈에 대해 8년간의 측정 분석 결과 줄눈 움직임 양상은 식 1의 AASHTO 줄눈폭 예측식과는 상당한 차이가 있음을 지적하였다. Ohio Test Road 관측 결과는 줄눈열림(Joint Opening)이 하부치반 재료와

* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 박사과정 · (E-mail : beomjun77@nate.com)
** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 석사과정 · (E-mail : nosmoker09@nate.com)
*** 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 연구원
**** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · (e-mail : jhj@inha.ac.kr)
***** 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 조교수 · (E-mail : swl@kangnung.ac.kr)

무관하게 나타나는 것을 보였고, 같은 형식의 포장 구간 안에서도 줄눈열림의 크기가 일정하지 않은 결과를 보였다. 특히 줄눈 열림이 0으로 나타나는 곳이 있는가 하면, 줄눈 움직임이 과도하게 크게 나타나는 줄눈도 상당비율 관측되었다. Lee (2001)는 LTPP SMP (Long Term Pavement Performance Seasonal Monitoring Program) 줄눈폭 데이터를 검토하여 그림 1과 같이 줄눈폭의 크기가 설계 재료 기후 조건이 동일한 구간에서도 줄눈폭의 크기가 일정하지 않음을 체계적으로 보여주었다. 동일구간에서도 관측된 최대 줄눈폭이 평균의 10배 이상인 경우도 빈번하였으며 약 30%의 줄눈에서 평균보다 1.5배 이상 큰 줄눈 폭을 보였다. AASHTO 줄눈폭 예측식의 경우 평균값을 제시하는데, 이는 AASHTO 줄눈폭 예측식이 줄눈채움재 설계에 사용될 경우 실제 발생하는 줄눈폭이 예측결과보다 큰 경우가 50% 이상 발생할 수 있기 때문에 줄눈부에 조기 파손을 유발할 가능성이 높다. Lee and Stoffels (2003)은 동일 포장지역에서의 줄눈별로 줄눈폭 크기가 차이가 나는 이유는 콘크리트포장 시공초기 줄눈별로 균열이 유발되는 속도가 일정하지 않은 점, 일부 줄눈에 균열이 유도되지 않은 점 줄눈 잠김(Joint Freezing)등이 원인이라고 보고하였다.

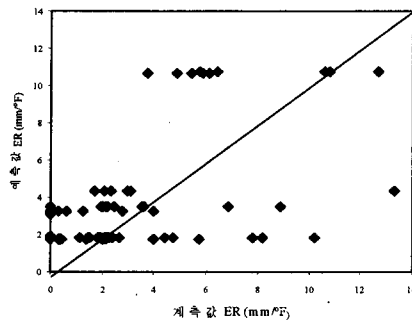


그림 1. 줄눈폭 변위(ΔL)에 대한 AASHTO 예측값과 계측결과의 비교(Lee,2001)

3. 온도 변화에 따른 줄눈폭 변화의 형태

줄눈부의 움직임중 줄눈 잠김이란 줄눈부에 유도 균열이 발생하지 않았을 경우를 말한다. 이런 경우 줄눈 폭을 온도 변화에 따라 측정 하더라도 그림 2와 같이 줄눈폭 변화가 없게 나타난다. 이러한 줄눈 닫힘은 두 가지를 고려할 수 있는데, 그림 3과 같이 온도가 상승함에 따라 슬래브가 팽창하고 줄눈폭

J10-J11 N15

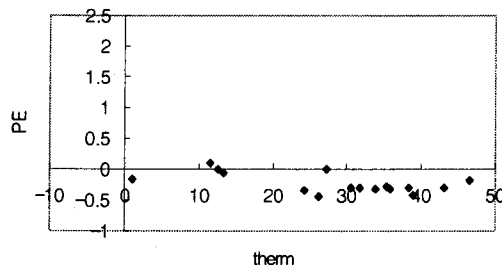


그림 2. 줄눈잠김이 발생한 줄눈

이 점차 좁아지다가 특정 온도가 되면 슬래브가 붙어서 더 이상 팽창하지 못하는 경우이고, 또 하나는 그림 4과 같이 줄눈에 비압축성 물체가 침투 하여 발생한 경우이다. 두 번째 현상의 경우 스폐링의 우려가 있다.

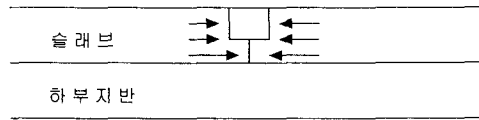


그림 3. 줄눈단합

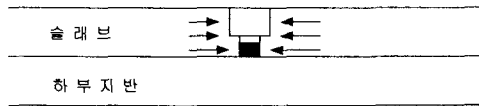


그림 4. 비압축성물체에 의한 줄눈단합

그림 5의 경우 줄눈단합 현상이 발생한 경우로서 약18℃에서 줄눈 단합이 발생하였으며, 18℃밑의 온

J1 Lean25 M08

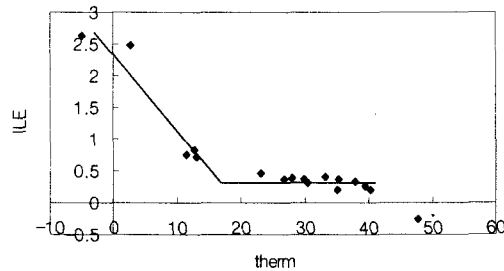


그림 5. 줄눈단합이 발생한 지역

도에서는 줄눈 폭과 온도가 선형으로 거동 하였다. 그 이후의 온도에선 줄눈폭이 더 이상 줄어들지 못하는 것을 볼 수 있다. 여기서 18℃ 지점을 Tc(Temperature at Joint Closure)라 하였다.

줄눈 잠김과 줄눈단합 현상이 나타나는 경우를 제외한 나머지 게이지들은 그림 6과 같이 온도와 줄눈폭 변위가 선형으로 거동 하였다. 이와 같이 선형으로 거동하는 것들과 줄눈 단합에서 선형으로 거동하는 Tc이하의 자료들을 이용하여 식(2)와 같이 온도 변화에 따른 줄눈폭 변위의 비로 정의 되는 ER(effect ratio)을 산정하였다.

$$ER(mm/℃) = \frac{\text{줄눈폭변위}}{\text{포장 온도(포장체 표면온도)}} \tag{2}$$

J9-J8 B04

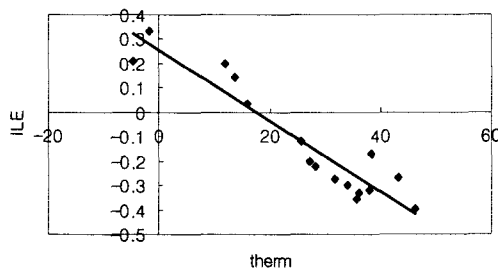


그림 6. 포장온도 vs 줄눈움직임

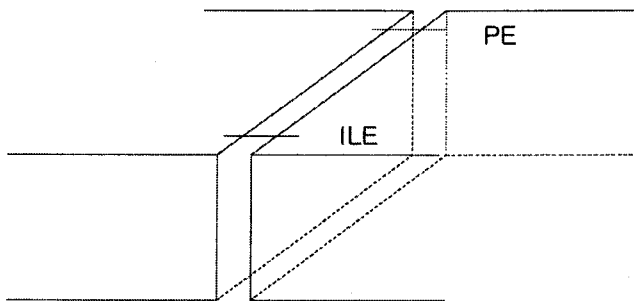
4. 시험도로 분석 대상 선정 및 분석 기준

본 연구는 중부내륙 고속도로 상에 위치하고 있는 시험도로의 줄눈콘크리트 포장에서 이루어졌다. 슬래브 두께, 보조기층 두께, 보조기층 재료에 따라 다양한 변수를 가진 22개의 줄눈콘크리트 포장 단면 중 하부지반 재료에 변수를 두어 대상을 선정하였다. AASHTO 예측식에서는 하부지반 재료에 따라 보정계수를 달리 하고 있어 이를 검증해 보기 위해 린(Lean)층, 쇄석층, BB3층을 선정하였다. 디멕 게이지(Demec gauge)로 줄눈폭 움직임을 측정함에 있어서 오차를 줄이고 정확한 측정값을 얻기 위해 동일한 조건마다 10개의 줄눈을 조사대상으로 선택하였고 조사구간의 모든 줄눈에 디멕 게이지를 설치하였다.

표 1. 시험도로 줄눈벌어짐 측정구간

SECTION	두께	하부지반 재료	실런트 유무	줄눈 갯수	비고
J1	25cm	lean	O	10개	
J5-1	30cm	lean	O	10개	
J9-J8	35cm	lean	O	10개	
J10	25cm	쇄석	O	10개	
J11	30cm	쇄석	O	10개	
J12	35cm	쇄석	O	11개	
J13	25cm	BB3	O	10개	
J14	30cm	BB3	O	10개	
J15	35cm	BB3	O	10개	
합계				91개	

조사대상으로 삼은 모든 줄눈에는 그림 7의 PE, ILE의 위치에 디멕 포인트를 설치하여 온도변화에 따른 줄눈폭 움직임을 측정하였다. 시험도로 자체에 매설되어 있는 계측기가 있음에도 불구하고 디멕 게이지를 설치하는 이유는 실제 줄눈파손에 많은 영향을 미치는 것은 포장 표면의 줄눈 거동이나 현재 시험도로에 설치되어 있는 계측기는 포장 표면에서 5cm 아래에 설치가 되어 있고 설치된 포장 구간도 린층으로 제한적이어서 줄눈폭 움직임 크기에 대한 신뢰성 해석을 위한 데이터로서 부족하고 표면 줄눈 거동과 상이 할 수 있어서 그림 7.과 같이 측정하고자 하는 줄눈부의 중앙선 부근과 길 어깨 쪽에 각각 하나씩 디멕 포인트를 설치하였다. 데이터 측정은 디멕 포인트 설치 후인 5월, 8월, 1월에 총 16번에 걸쳐 시행되었다. 측정 시간은 슬래브 온도변화를 고려해 약 3시간 주기로 측정하였다. 각각의 측정기간 사이에 시험도로의 교통이 개방되었음에도 불구하고 디멕 포인트가 전혀 손상이 없었으므로 각각의 데이터를 연계하여 사용하였다.



PE : Pavement Edge
 ILE : Inner Line Edge

그림 7. 디멕게이지 설치위치



5. 측정결과 분석

전 구간에 걸쳐 ER값을 산정한 후 동일조건 구간의 평균값을 산정하여 동일 하부지반별로 ER값을 비교해 보았다.

5.1 보조기층 구간별 ER값 비교

현재 도로설계에 사용되고 있는 줄눈 벌어진 예측식인 AASHTO 예측식은 하부 지반에 따라 보정계수를 린층은 1, 쇠석층은 0.8, BB3층은 0.65로 달리하여 줄눈폭 움직임의 크기가 차이가 날 것이라고 제시하고 있다. 그러나 시험도로의 줄눈폭 움직임 계측 결과 BB3층, 쇠석층, 린층의 순으로 줄눈폭 움직임의 크기가 크게 나타났다. 각각의 보조기층 재료에 따른 ER 평균값이 다소 차이는 있었지만 그림 8에서 보인바와 같이 평균에 대한 편차가 하부지반별로 크기 때문에 평균값의 차이는 통계학적 측면에서 없다고 판단된다.

하부 지반별 ER 비교

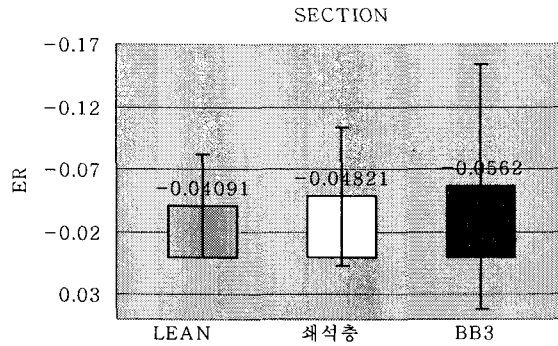


그림 8. 동일 하부지반별 ER 비교

5.2 줄눈단힘 현상과 줄눈잠김 현상

각 구간별 줄눈 단힘과 줄눈 잠김의 발생 비율은 표 2와 같다. 각 구간에서의 ILE, PE를 합한 갯수에 대한 줄눈 단힘과 줄눈 잠김의 발생 횟수의 비로 나타내었다. 줄눈 단힘의 경우 전체 209개의 계측점 중 70개인 33.5%의 줄눈부에서 줄눈 단힘이 관측되었는데 전체 구간에서 고루 나타남을 알 수 있다. 줄눈 잠김의 경우 6개인 2.9%의 발생 비율을 보였고 그 중 세 곳은 하부기층이 BB3인 줄눈에서 관측되었으며 나머지 세 곳은 린기층(Unsealed 구간 두 곳)인 줄눈에서 관측되었다.

표 2. 구간별 줄눈 단힘과 줄눈 잠김의 발생비율

	Lean25	Lean30	Lean35	쇠석25	쇠석30	쇠석35	BB3 25	BB3 30	BB3 35	Unsealed 쇠석30	Unsealed Lean30	총 비율
줄눈단힘 (%)	20/6(30)	20/6(30)	19/7(36.7)	19/7(36.7)	18/6(33.3)	22/10(45)	19/8(42.1)	20/8(40)	20/6(30)	20/4(20)	12/2(16.7)	33.5%
줄눈잠김 (%)	20/1(5)						19/1(5.3)	20/2(10)			12/2(16.7)	2.9%

5.3 줄눈 위치에 따른 ER 분포

그림 9 (a)~(d)는 하부지반별로 줄눈 위치에 따른 ER값의 변화를 나타낸 것이다. 특징을 살펴보면 대부분의 곳에서 한 슬래브에 이웃해 있는 두 줄눈 중 한 곳만 줄눈폭이 크게 움직인다는 것을 알 수 있다. 이러한

현상은 줄눈 콘크리트 포장 줄눈부 시공시 줄눈 컷팅 시간대가 짧아 공사현장이 길 경우 현장에서 줄눈컷팅을 우선 하나 건너 하나씩 컷팅한 후 나머지 줄눈을 컷팅하는 경우와 초기 균열유도에 시간차에 따른 결과로 판단되어 진다. 온도 및 습도변화에 기인하여 발생하는 슬래브 내의 무작위 균열을 제어할 목적으로 줄눈이 설계 되는데 약화단면인 줄눈에서의 균열유도가 모든 줄눈에 동시에 발생하는 것이 아니라 불규칙하게 일어나고(이승우, 2001), 이러한 균열 유도 발생의 시간차는 장기적으로 줄눈폭 움직임에 영향을 주는 것으로 관찰되었다(정진훈 등, 2005). 그림 9 (a)~(d)에서 나타난 이러한 특징은 포장의 초기 균열 유도 양상에 의한 줄눈폭 움직임의 결과라고 볼 수 있다.

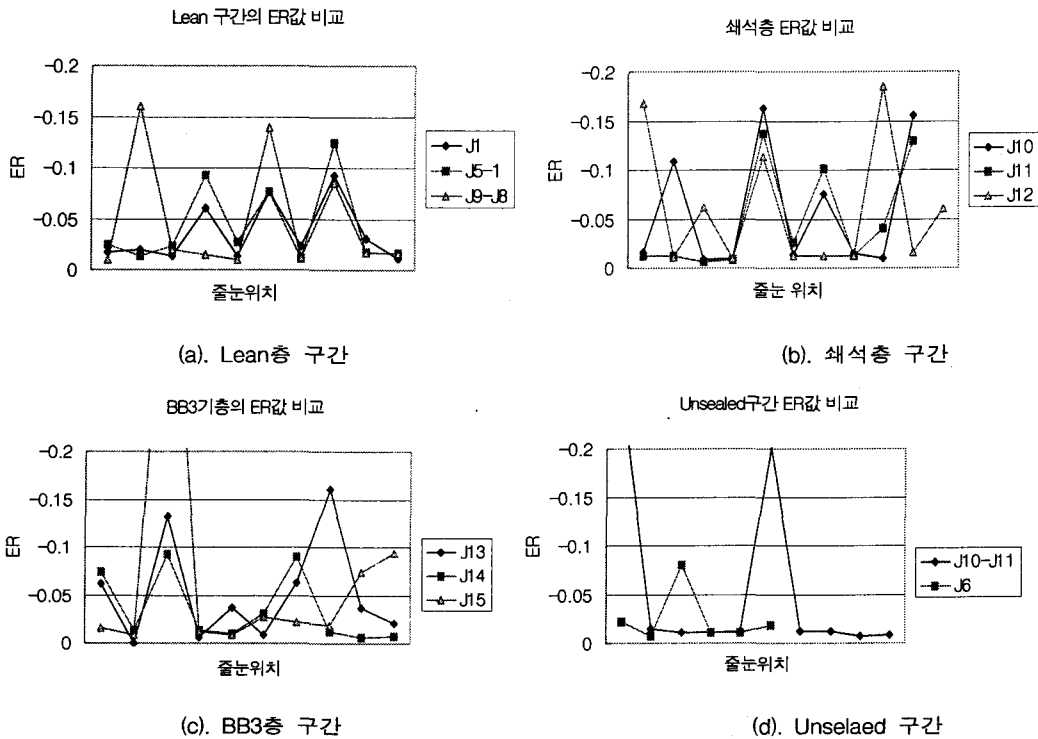


그림 9. 각보조기층별구간의ER값비교

6. AASHTO식 예측값과 계측값의 비교

시험도로에서 측정된 줄눈폭 움직임에 대한 AASHTO 줄눈폭 예측식의 예측치를 구하기 위해서 슬래브의 연중 최대온도 변화 대신에 시험도로에서 측정시의 온도를 사용하였으며 시험도로 구간은 시공완료가 된 지 3년이 지났고 단기간 동안의 측정이기 때문에 건조수축의 영향은 미미하다고 판단하여 고려하지 않았다. 하부지반 재료에 대한 보정계수는 린층은 1, 쇠석층은 0.8, BB3층은 0.65를 줄눈 간격은 6m를 사용하였으며 열팽창계수는 $8.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다.

열팽창계수의 경우 한국형 포장 설계법 개발 연구중 재료물성 정량화 연구에서 제시한 시험도로의 열팽창계수 $8.0 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ 를 사용하였다. 그림 10을 보면 린층, 쇠석층, BB3층의 줄눈움직임을 나타낸 그래프에서 각 보조기층별로 시험도로의 줄눈폭의 움직임이 AASHTO 예측치를 벗어나는 움직임이 많음을 확인할 수 있다. 실제 줄눈폭 크기가 AASHTO 예측값보다 큰 값들은 전체 줄눈 중 34.6%를 차지하며, 그 중 AASHTO 예측값의 2배가 넘는 값들이 차지하는 비율이 23.4%이다. 측정된 각 줄눈별 줄눈 움직임폭을 보



면 23.4%에 해당하는 값들은 약 2배에서 많게는 15배(J15, 00줄눈)까지의 큰 움직임을 나타냄을 알 수 있다. 이러한 줄눈에서는 줄눈채움재의 파손에 의한 표면수 침투를 유발할 수 있으며 그로인한 하부층의 약화를 야기 시킬 수 있다. 또한 비압축성 물질의 끼어듦으로 인해 포장의 파손을 야기 시킬 수 있으며 하중전달에도 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

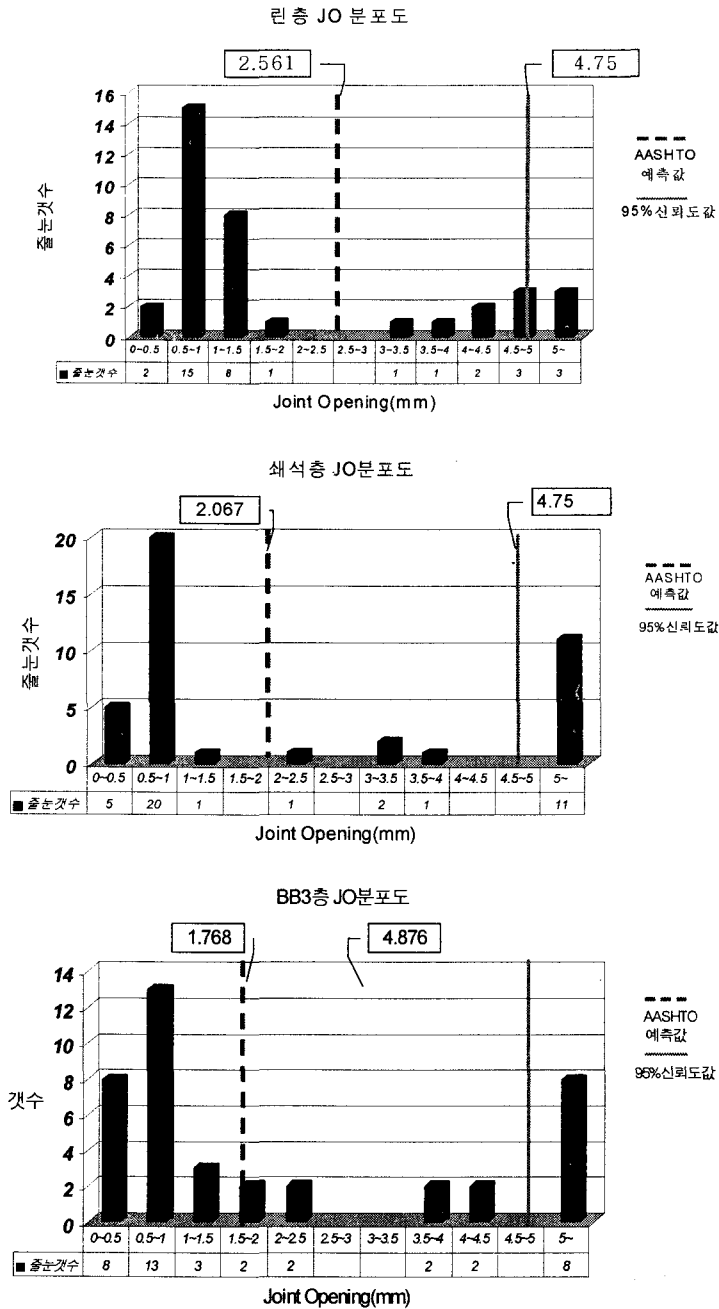


그림 10. 시험도로의 각 보조기층별 줄눈폭 움직임



7. 결론

현재 사용하고 있는 AASHTO 줄눈폭 예측식은 줄눈폭 움직임을 정확히 예측할 수 없으며, 줄눈폭 움직임의 예측이 부정확할 경우 발생하는 여러 가지 문제에 대해 검토하였다. 본 연구에서는 국내 줄눈콘크리트 포장에서 AASHTO 줄눈폭 예측식의 적정성을 판단하기 위하여 시험도로 줄눈콘크리트포장의 줄눈폭 움직임에 대해서 알아보았으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) AASHTO 예측식에서 하부지반별 줄눈폭 움직임의 크기가 다를 것이라고 제시하고 있는데 실제 줄눈폭 움직임을 확인해본 결과 린층, 쇠석층, BB3층 각각 AASHTO 예측값의 80%, 150%, 170%의 크기로 나타났다. 이러한 점으로 미루어보아 AASHTO 예측식에서 제시하고 있는 보정계수(C)에 문제점이 있는 것으로 판단이 된다.

(2) 줄눈 단합 현상이나 줄눈 잠김 현상은 슬래브의 역학적 길이를 증가시켜 슬래브에 작용하는 인장응력의 증가를 초래할 뿐만 아니라 이웃하고 있는 줄눈의 줄눈 움직임 폭을 증가시켜 줄눈부 파손을 야기 시킬 수 있는데 전체 조사 구간 중 30%이상의 줄눈에서 줄눈단합 현상이, 2.9%의 줄눈에서 줄눈 잠김 현상이 발생하였다.

(3) 줄눈 콘크리트 포장의 초기 거동 양상이 장기적으로 줄눈폭 움직임에 영향을 미친다는 것이 고찰되었다.

(4) 시험도로의 줄눈폭 움직임을 분석해 본 결과 약 34.6%의 줄눈에서 실측된 줄눈폭 움직임이 AASHTO 줄눈폭 예측식보다 큰 값을 보였으며 그 중 23.4% 이상이 2배 이상의 큰 줄눈폭 움직임이 나타나는 것을 확인하였다. 이렇게 예측하지 못한 큰 줄눈 움직임 폭은 줄눈채움재의 파손에 의한 표면수 침투를 유발할 수 있으며 그로인한 하부층의 약화를 야기 시킬 수 있으며 또한 비압축성 물질의 끼어듦으로 인해 포장의 파손을 일으킬 것으로 보이며 하중전달에도 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 콘크리트 포장 설계법 개발 최종보고서, 2003. 10
2. 이승우(2001), LTPP SMP 줄눈 콘크리트포장에서의 줄눈 파손 영향인자 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제21권, 제 5-D호, pp. 655-664
3. 이승우(2001), 콘크리트포장의 줄눈의 잠김에 대한 연구, 한국도로포장공학회 학회지, 제 3권 1호, pp.165~176
4. 정진훈, 이재훈, 권순민(2005), 콘크리트 타설 시간에 따른 줄눈의 초기 및 장기거동, 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회 논문집, 대한토목학회, pp.3888~3891
5. Seung-Woo Lee and Shelley M. Stoffels(2003), Effects of Excessive Pavement Joint Opening and Freezing on Sealant, ASCE, Volume 129, pp. 444-450
6. Seung-Woo Lee and Shelley M. Stoffels(2001), Analysis of in Situ Horizontal Joint Movement in Rigid Pavement, TRB 1778, pp. 9-16
7. American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, AASHTO, 1986
8. I. Minkarah(1982), Magnitude of Horizontal Movement in Jointed Concrete Pavements, TRR821
9. Roberto Otto Rasmussen(2003), Evaluation of Load Transfer Efficiency for SMP Sections in the LTPP Database, TRB
10. Yang H. Huang(1993), Pavement Analysis and Design, University of Kentucky