

보조기층별 콘크리트 포장의 줄눈폭 측정 및 평가

Measurement and Evaluation of Joint Opening of Concrete Pavements by Subbase type

손석철* · 임진선** · 김경철*** · 손영태**** · 남영국***** · 정진훈*****

Son, Suk Chul · Lim, Jin Sun · Nam, Kim, Kyoung Chul · Young Kug-Lee, · Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

국내 고속국도의 대부분은 줄눈 콘크리트 포장(Jointed Concrete Pavement, JCP)으로 시공되고 있다. 줄눈 콘크리트 포장에 설치되는 줄눈의 목적은 콘크리트 타설 후 초기 건조수축과 수화열 등으로 인한 내부 응력을 인위적으로 줄여 무작위 균열의 발생을 제어하기 위함이다. 하지만, 줄눈 콘크리트 포장 재령 초기의 구조적 안정을 위해 설치되는 줄눈은, 장기적으로는 오히려 구조적인 취약부로 작용하여 파손이 발생하는 위치가 될 수 있으므로 포장의 공용성을 장기적으로 유지하기 위해서 줄눈폭 변화의 정확한 예측이 필요하다. 줄눈폭의 변화를 예측하기 위해서 Darter(1977)가 제안한 AASHTO(1986) 줄눈폭 예측식을 일반적으로 사용하고 있지만 이 식은 체계적인 검증 없이 무조건 사용되고 있는 실정이다. 본 연구에서는 국내 줄눈 콘크리트 포장에 대한 AASHTO 줄눈폭 예측식의 적정성을 확인하기 위해, 중부 내륙 고속도로의 시험구간에서 보조기층 별 콘크리트 슬래브를 타설한 후 콘크리트 슬래브 간의 줄눈폭의 변화를 초기 및 장기적으로 측정하였다. 측정 결과, 보조기층별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화는 차이가 크지 않았다. 이러한 조사 결과를 검증하기 위해 동일한 보조기층을 대상으로 실외에서 push-off 시험을 실시하였고, push-off 시험 결과 값을 이용하여 구조해석을 실시하였다.

2. AASHTO 줄눈폭 예측 모델

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 4군데의 포장 부분의 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, ΔL 는 AASHTO 줄눈폭 예측 모델에 의한 줄눈폭(mm), C는 보조기층을 고려한 보정계수(린 콘크리트 = 1.0, 쇠석 = 0.8, 아스팔트 = 0.65), JS는 줄눈 간격, α_c 는 콘크리트 슬래브 열팽창계수(/ $^{\circ}C$), T는 연중 슬래브의 최대 온도차($^{\circ}C$), 그리고 Z는 콘크리트 슬래브 건조 수축 지수를 나타낸다.

* 정회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정 · 032-873-5332(E-mail : ssc3621@naver.com)
** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 · 032-873-5332(E-mail : coreplay@hanmail.net)
*** 정회원 · 코오롱건설 기술연구소 선임연구원 · 010-8898-4676 (E-mail : kckim@kolon.com)
**** 정회원 · (주)한맥기술 도로연구부 부장 · 02-2141-7253(E-mail : lhlove2004@hanmaceng.co.kr)
***** 정회원 · (주)한맥기술 연구원장·공학박사 · 02-2141-7102(E-mail : yknam@incheon.ac.kr)
***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jhj@inha.ac.kr)



3. 현장 줄눈폭 측정

지난 1998년부터 2002년까지 중부내륙 고속도로의 시험도로에서 5.54km의 2차선의 시험 도로를 시공하였다. 시험구간은 22개의 JPCP(Jointed Plain Concrete Pavement) 구간과 3개의 CRCP(Continuously Reinforced Concrete Pavement) 구간, 그리고 33개의 ACP(Asphalt Concrete Pavement) 구간으로 구성하였으며, 시험구간의 JPCP의 횡방향 길이는 6m로 시공하였다.

10개 구간에서 JPCP의 97개의 줄눈폭 변화는 디랙 설치 후인 2005년 5월과 슬래브 온도가 가장 높은 8월 그리고 슬래브 온도가 가장 낮은 다음 해의 1월에 3차례에 걸쳐 슬래브 온도를 측정하였고, 콘크리트 슬래브의 측정을 시행하는 기간 동안의 최고 및 최저의 온도 차이는 51.5℃였다. 줄눈폭 변화는 줄눈부에 인접한 콘크리트 슬래브 표면에 두 개의 디랙 포인트를 설치하여 줄눈폭을 측정하였다. 시험구간은 3개의 서로 다른 보조기층 재료(린 콘크리트, 쇄석, 아스팔트)와 3개의 서로 다른 슬래브 두께(250mm, 300mm, 350mm)로 선정하였다. 시험구간의 세부사항은 다음 표 1과 같다.

표 1. 시험구간 세부사항

구간	슬래브 두께 (mm)	보조기층 재료	줄눈폭 측정 수
J1	250	린 콘크리트	10
J5-1	300		10
J9-J8	350		10
J10	250	쇄석	10
J11	300		11
J12	350		10
J13	250	아스팔트	10
J14	300		10
J15	350		10
J6	250	린 콘크리트	6

다음 그림 1. (a)~(c)는 시공 후 2005년까지 매 계절마다 슬래브 줄눈폭 변화를 측정된 결과, 보조기층 재료에 따른 시험구간에서 측정된 줄눈폭 변화의 분포를 나타냈다. 그림 1. (a)는 린콘크리트 보조기층, (b)는 쇄석 보조기층 그리고 (c)는 아스팔트 보조기층으로서, 각 보조기층 별로 1mm 내의 줄눈폭 변화는 50%이상 나타남을 알 수 있었다. 또한, 그림 1. (d)는 중부내륙 고속도로에서 보조기층 종류별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화 평균 값과 AASHTO 줄눈폭 예측식을 이용한 줄눈폭을 비교한 것이다.

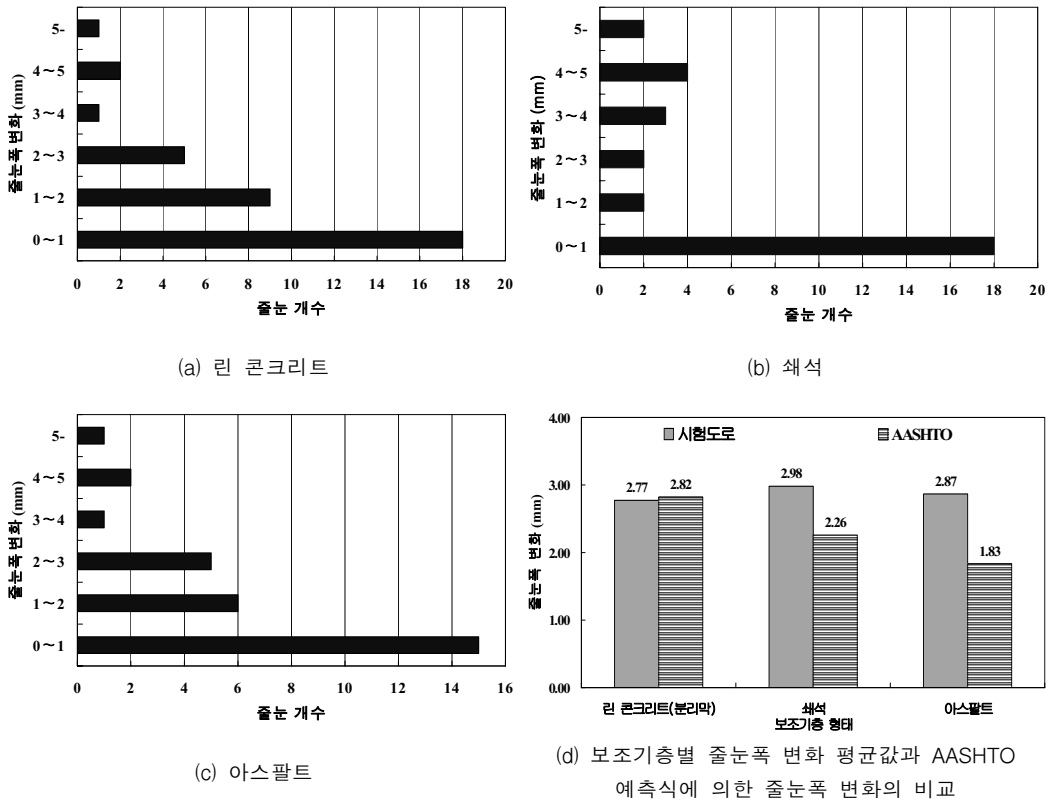


그림 1. 보조기층별 줄눈폭 변화(a)~(c) 및 보조기층별 줄눈폭 변화 평균값과 AASHTO 예측식에 의한 줄눈폭의 비교(d)

그림1. (d)를 살펴보면 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변화와 AASHTO 줄눈폭 예측식을 통한 줄눈폭을 비교한 결과, 줄눈폭은 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 쇄석 보조기층과 아스팔트 보조기층의 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변화는 AASHTO 줄눈폭 예측식을 통한 줄눈폭과는 차이가 큰 것으로 나타났다.

4. push-off 시험

4.1 시험방법 및 절차

보조기층 별 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변화와 AASHTO 줄눈폭 예측식을 통한 줄눈폭의 차이를 검증하기 위하여, 국내에서 사용하고 있는 줄눈 콘크리트 포장에 대한 다섯 가지의 보조기층 마찰 특성을 파악하기 위해 push-off 시험을 실시하였다. 다섯 가지 보조기층의 종류는 린 콘크리트 보조기층, 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층, 쇄석 보조기층, 분리막을 설치한 쇄석 보조기층, 그리고 아스팔트 보조기층이다. 이와 같이 다섯 가지의 보조기층을 시공한 후, 30일 뒤에 콘크리트 슬래브를 타설하였다. 콘크리트 슬래브의 크기는 1m×0.75m×0.2m이며, 린 콘크리트 보조기층과 쇄석 보조기층의 크기는 4m×4m×0.1m이고, 아스팔트 보조기층은 4m×4m×0.04m이다. 기존의 push-off 시험절차를 근거로 하여, 1.11×10⁻⁵m/s로 수평하중 재하를 실시하였다. 그림 2 push-off 시험 구성도를 나타내며, 반력벽은 하중 재하 장치의 밀립현상을 방지하기 위하여 설치

하였다. 수평하중 재하 시 콘크리트 슬래브의 변위를 측정하기 위하여 LVDT를 설치하였고, 데이터 로거를 통해 수평하중과 변위는 측정 및 기록하였다. 각각의 보조기층에 따라 콘크리트 슬래브는 4번의 수평하중 재하를 실시하였다.

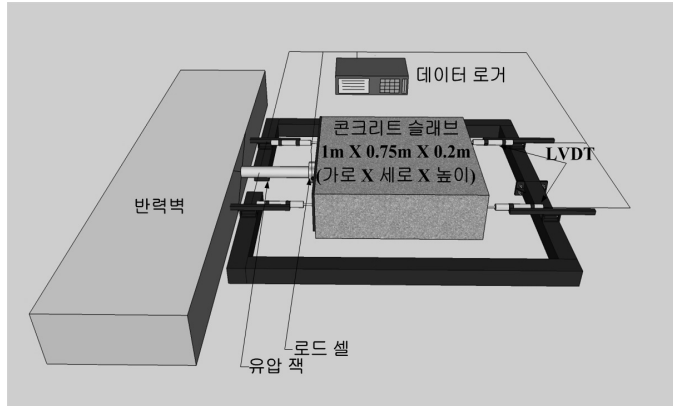


그림 2. push-off 시험 구성도

4.2 시험 결과 및 분석

콘크리트 슬래브와 보조기층 면의 파괴는 첫 번째 수평하중 재하 시 파괴가 발생하였다. 그러나 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층의 경우, 유압잭으로 수평 하중 재하 시 파괴가 발생하지 않아 불도저를 사용하여 인위적으로 파괴를 실시하였다. 분리막을 설치한 쇠석 보조기층의 push-off 시험 결과는 그림 3과 같고, 마찰 저항-변위 곡선에서 첫 번째 수평하중 재하 시 콘크리트 슬래브-쇠석 보조기층 면에 파괴를 유발 시킬 때 큰 하중이 필요하였고, 나머지 수평 하중 재하 시에는 유사한 경향이 나타남을 알 수 있다. 수평 하중 재하를 하는 동안 콘크리트 슬래브와 보조기층 면을 계속 관찰을 하였으며, 시험이 끝난 후 콘크리트 슬래브 하부와 보조기층의 상부를 확인하였다. 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층과 쇠석기층은 콘크리트 슬래브 하부가 매끈한 것을 확인할 수 있었다. 반면, 분리막을 설치하지 않은 쇠석 보조기층과 아스팔트 보조기층의 경우 강성의 차이로 인하여 찢어짐이 발생하였다.

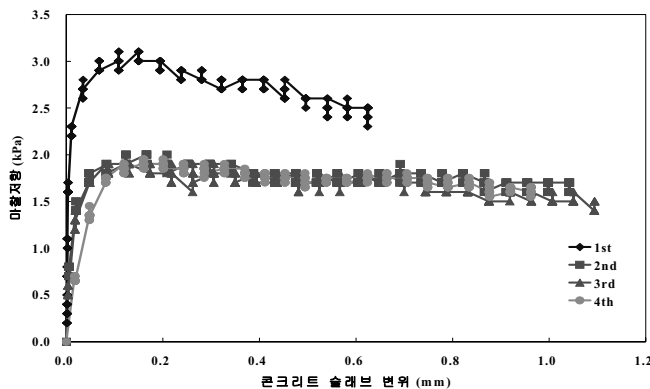


그림 3. 분리막을 설치한 쇠석보조기층의 push-off 시험 결과

push-off 시험 결과는 그림 4와 같이 기존 문헌의 push-off 시험 결과와 비교했을 때 마찰저항과 변위의 형태는 유사한 경향을 나타냈다. 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층은 마찰력이 거의 발생하지 않았으

며, 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 마찰 저항과 변위 곡선은 분리막을 설치한 쇠석 보조기층의 마찰 저항과 변위 곡선이 유사하다. 또한 분리막을 설치한 쇠석 보조기층의 마찰 저항과 변위 곡선은 초기 강성이 높은 것을 알 수 있는데 이는 콘크리트 슬래브와 쇠석 골재의 맞물림이 작용하였다고 판단된다. 분리막을 설치하지 않은 쇠석 보조기층과 아스팔트 보조기층은 콘크리트 슬래브에 수평 하중을 재하 하는 동안 찢어짐이 발생하였고, 아스팔트 보조기층의 마찰 저항은 쇠석 보조기층의 마찰 저항의 약 두 배가 발생 됨을 알 수 있다.

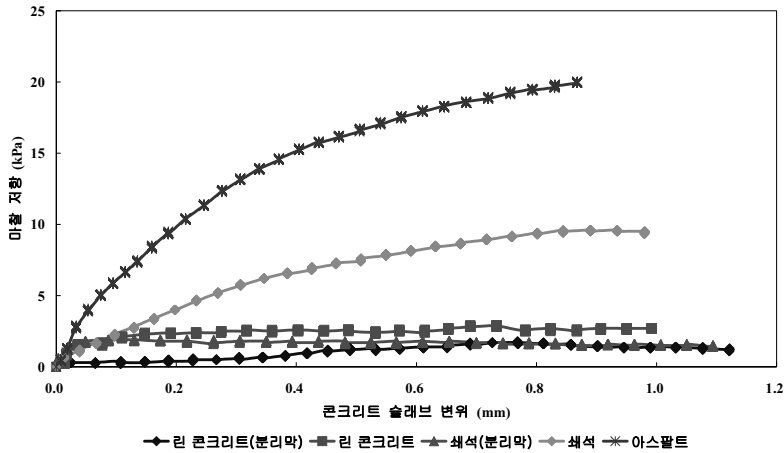


그림 4. 마찰저항-변위 곡선

5. 시험결과를 이용한 3차원 유한요소 모델링

마찰 저항-변위의 비선형 곡선을 3차원 유한요소모델에 적용하여 현장 push-off 시험을 모사하였다. 3차원 유한요소모델에서 슬래브와 보조기층은 20절점요소를 사용하였다. 노상의 일부는 8절점요소를 사용하였고, 나머지는 무한요소를 그림 5와 같이 사용하였다. 슬래브와 보조기층 사이에는 비선형 전단 연결을 사용하였고, 보조기층과 노상층은 tie constraints를 사용하여 정의하였다. 3차원 유한요소모델을 증명하기 위해 표 2와 같이 입력변수를 사용하였다.

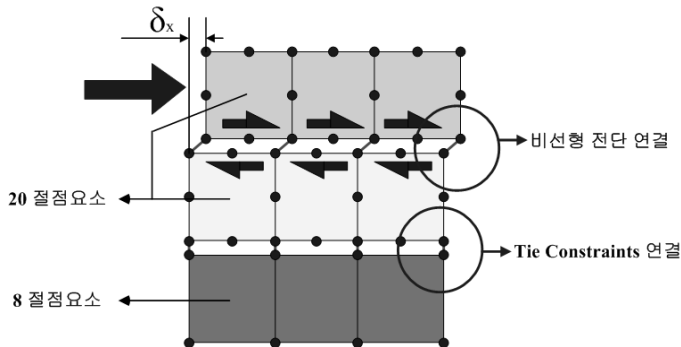


그림 5. 마찰저항 모사를 위한 3차원 유한요소 개념도

표 2. push-off 시험의 유한요소 모델링에 사용된 입력변수

	크기(m)	탄성(MPa)	포아송비	열팽창계수
슬래브	1x0.75x0.2	28000	0.18	9.41x10 ⁻⁶
린콘크리트 보조기층	4x4x0.1	15000	0.2	-
쇄석 보조기층	4x4x0.1	200	0.35	-
아스팔트 보조기층	4x4x0.04	3000	0.4	-
노상	4x4x1	50	0.3	-

유한요소모델을 검증하기 위하여 push-off 시험 결과 값을 입력하였다. 변위 제어를 사용하여 하중을 모사하였고, 비선형 전단 연결을 사용하여 반력을 검토하였다. push-off 시험과 유한요소모델의 수평하중-변위의 곡선은 그림 6과 같이 유사하게 나타났다. 따라서, 유한요소모델은 슬래브와 보조기층의 마찰거동의 모사가 합리적임을 알 수 있다.

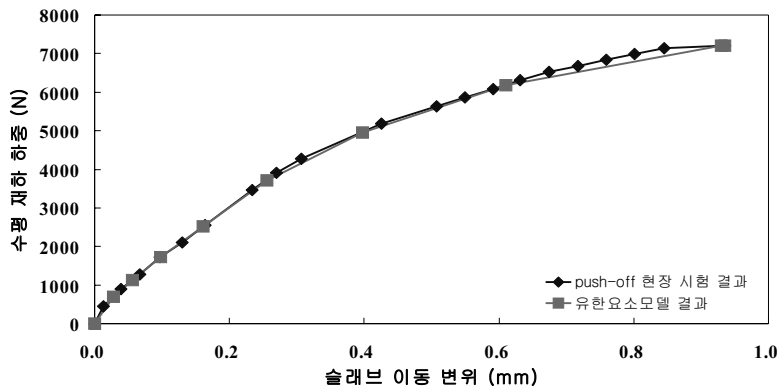


그림 6. push-off 현장 시험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교

보조기층 별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화를 검증하기 위하여 국내 고속도로에 사용되는 콘크리트 포장의 크기 및 입력변수를 표 3과 같이 유한요소모델을 구현하였다. 슬래브와 보조기층 면에 비선형 전단 연결을 하였으며, 보조기층과 노상은 tie constraints를 사용하였다.

표 3. 콘크리트 포장의 유한요소 모델링에 사용된 입력변수

	크기(m)	탄성계수(MPa)	포아송비	열팽창계수
슬래브	6x3.6x0.3	28000	0.18	9.41x10 ⁻⁶
보조기층	6x3.6x0.15	15000	0.2	-
노상	10x10x0.45	50	0.3	-

시험도로 타설 후 약 4년이 경과하였으므로 건조수축은 고려할 필요가 없다고 판단되어, 콘크리트 슬래브 표면온도의 최대 및 최저 온도 차인 51.5℃의 온도하중 변화를 입력하였다. 유한요소모델 해석결과 보조기층의 종류에 관계없이 그림 7과 같이 줄눈폭 변화는 비슷한 경향이 나타났다.

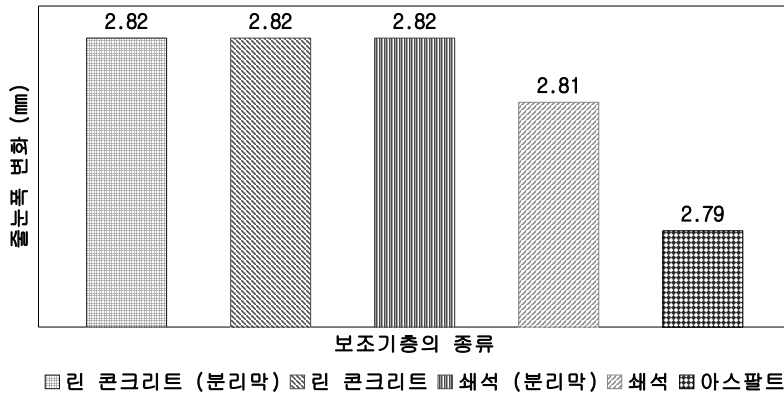


그림 7. 온도하중에 의한 보조기층별 유한요소 해석 결과

6. AASHTO 줄눈폭 예측식의 평가

AASHTO 줄눈폭 예측식에 의한 줄눈폭과 중부 내륙 고속도로에서 측정된 시험구간의 평균 줄눈폭 변화 값 그리고 유한요소모델 해석결과 값을 비교 및 분석을 하였다. 그림 8과 같이 시험구간의 평균 줄눈폭 변화 값과 유한요소모델 해석결과값은 유사한 것을 알 수 있었다. 하지만 AASHTO 줄눈폭 예측식에 의한 줄눈폭은 분리막을 설치한 린 콘크리트를 제외한 쇠석과 아스팔트는 줄눈폭 변화에 큰 차이가 나타남을 알 수 있다. 따라서, 1986년도에 제안된 줄눈폭 예측식은 개선이 필요할 수도 있다고 판단된다.

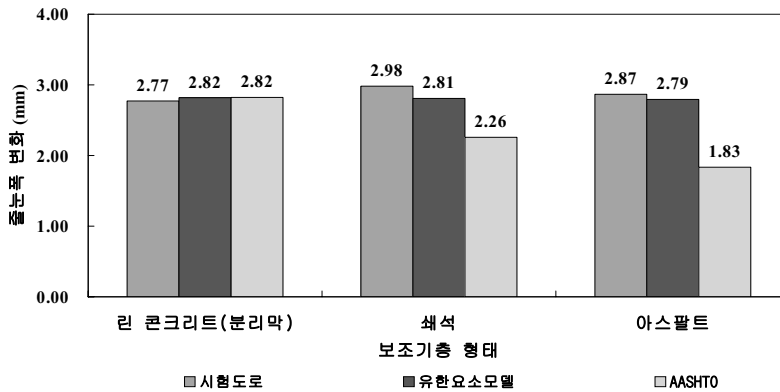


그림 8. 보조기층별 줄눈폭 측정, 해석, 예측 결과의 비교

7. 결 론

본 연구에서는 국내 줄눈 콘크리트 포장에 대한 AASHTO 줄눈폭 예측식의 적정성을 확인하기 위해, 중부내륙고속도로의 시험도로 구간에서 세 가지 보조기층(분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층, 쇠석 보조기층, 아스팔트 보조기층)에서 콘크리트 슬래브 줄눈폭의 변화를 중부내륙 고속도로의 시험도로에서 조사하였다. 측정 결과, 보조기층별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화는 차이가 크지 않았다. 이러한 측정 결과를 검증하기 위해 동일한 보조기층을 대상으로 실외에서 push-off 시험을 실시하였다. 시험 결과, 하중-변위 곡선은 비선형으로서 보조기층에 따라 서로 다른 결과를 나타내었다. 상용 구조해석 프로그램인 아바쿠스



(ABAQUS) 비선형 전단요소로 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이를 연결하여 push-off 시험을 모사함으로써 결과를 검증하였다. 또한, 아바쿠스(ABAQUS)로 JPCP를 모델링한 후, 콘크리트 슬래브에 온도하중을 재하하여 슬래브의 줄눈폭의 변화에 대한 구조해석 결과, 줄눈폭 변화에는 큰 차이가 없음이 확인되었다.

AASHTO 줄눈폭 예측식, 시험도로 그리고 유한요소모델 구조해석의 줄눈폭을 비교한 결과, 시험도로에서 측정된 평균 줄눈폭과 유한요소모델에 의하여 계산된 줄눈폭은 유사한 것으로 나타났다. 하지만 시험도로에서 측정된 줄눈폭을 AASHTO 줄눈폭 예측식과 비교했을 때, 딥 콘크리트 보조기층을 제외한 쇠석 보조기층과 아스팔트 보조기층은 차이가 큰 것으로 나타났다. 따라서, 보조기층 종류에 따라 줄눈폭 변화에 큰 차이가 있는 것으로 계산되는 AASHTO 예측식은 개선이 필요할 수도 있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설 핵심기술 연구개발 사업의 구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구과제(06건설핵심C20) 3차년도 연구비에 의해 수행되었습니다.

참고 문헌

1. 박문길(2009). "콘크리트 포장의 슬래브-기층 종류별 마찰력 연구." 공학석사 학위논문. 인하대학교.
2. 진범준, 최정근, 권순민, 정진훈, 이승우(2006) "AASHTO 줄눈폭 예측식 오류에 대한 검토", 한국도로학회 학술발표회 논문집, 제8권, 한국도로학회, pp. 251~257.
3. 정진훈, 이재훈, 권순민(2005) "콘크리트 타설 시간에 따른 줄눈의 초기 및 장기거동", 대한토목학회 정기 학술대회 논문집, pp. 3888~3891
4. (1986). American Association of State Highway and Transportation Officials. *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures*. AASHTO.
5. Jeong, J. H. (2008) "Environmental Effects on Development of Pavement Joint Cracks", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers ICE*, Vol. 161, No. 2, 55-63.
6. Lee, S.W., Jeong, J. H., Chon, B. J. (2009) "A Probabilistic Approach to Modeling of Pavement Joint Opening", *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*, ICE, in press
6. Suh, Y.C., Lee, S. W., Kang, M.S. (2002) "Evaluation of Subbase Friction for Typical Korean Concrete Pavement", In *Transportation Research Record*, No. 1809, TRB, Washington, D.C., pp. 66~73.
7. Wesevich, J.W., B. K. McCullough, and N. H. Burns (1987). "Stabilized Sub-base Friction Study for Concrete Pavements.", *Research Report 459-1*, Center for Transportation Research, University of Texas at Austin