

Sawing and Sealing 공법 구조해석을 위한 기초연구

A Preliminary Study for Structural Analysis of Pavements Using Sawing and Sealing Method

박주영* · 이재준** · 권수안*** · 홍재청**** · 권오성***** · 김철민***** · 정진훈*****

Park, Joo Young · Lee, Jae Jun · Kwon, Soo Ahn · Hong, Jae Cheong

Kwon, Oh sung · Kim, Cheol Min · Jeong, Jin Hoon

1. 서 론

도로포장의 상태는 유지보수 비용에 직·간접적으로 영향을 미치는 동시에 사용자의 승차감, 안전을 보장하는데 중요한 역할을 한다. 국토해양부에서는 포장의 효율적인 유지관리를 위해 1986년 전국적인 국도 유지보수조사 사업에 착수, 1987년 프랑스로부터 기술을 도입하고 1989년 포장조사장비를 도입한 이래, 국내 실정에 보다 적합한 합리적이고 경제적인 도로포장 관리체계로의 개선을 위해 최신의 기술을 적용하여 지속적인 연구를 진행하고 있다.

도로포장의 유지보수는 사용효과를 극대화하는 설계를 통하여, 포장체의 공용설계 수명을 연장할 수 있는 지속적인 연구의 추진이 필요하며, 이에 따라 발전되는 신기술 및 공법들이 유지보수공사에 적용되어야 한다. 현재 국내 유지보수공사에서 콘크리트 포장체가 파손되거나 기능상의 성능을 회복할 목적으로 전단면 보수를 실시해야 하는 경우, 아스팔트콘크리트 덧씌우기가 보편적으로 실시되고 있으나, 기존 콘크리트 포장의 파손 부위나 줄눈으로부터의 반사균열로 인한 파손이 주요 문제점으로 발생하고 있다. 이러한 문제점을 보완하고 공용성을 평가하기 위하여, 국내에서 처음으로 의정부국도 관내 일반국도 37호선에서 50mm와 80mm 두 가지 두께로서 0.500km(2차로 환산)의 길이로 시공된 Sawing and Sealing 공법 적용구간의 공용성을 조사하였다. 반사균열과 기존 콘크리트 포장 파손의 관계를 알아보고자, 아스팔트 덧씌우기 전 콘크리트 포장의 파손 현황을 조사하였고, 계절에 따라 반사균열에 대한 지속적인 추적조사를 실시하였다. 이러한 조사결과를 바탕으로, 구조해석을 통한 Sawing&Sealing 포장공법의 적정 절삭폭과 절삭깊이, 포장두께를 결정하기 위한 유한요소 모델을 개발하고자 하였다.

본 연구는 구조해석을 통하여 Sawing and Sealing 공법의 공용성을 평가하고자 하였다. 2차원 유한요소 해석을 통하여 Sawing and Sealing 공법의 줄눈 파괴를 모사하였다. 그리고 콘크리트 슬래브 상부의 변형을 바탕으로 시험시공에 사용한 줄눈 깊이 및 폭이 적정한지 판단하였다.

2. Sawing and Sealing 공법

Sawing and Sealing 포장공법은 반사균열(reflection cracking)과 이에 이은 균열부의 Spalling 등을 방지하여 공용성을 향상시키기 위한 방법으로서, 줄눈 콘크리트 포장에서와 유사한 방식으로, 기존 콘크리트 위에 덧씌운 아스팔트 포장에 반사균열을 미리 유도하기 위한 목적의 줄눈을 절삭하고, 줄눈재를 설치한 후

* 정회원 · (주) 도화종합기술공사 · 기술개발연구원 · 연구원 · 02-2050-6247(E-mail : pjy0704@dohwa.co.kr)

** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 · 연구원 · 031-910-0434(E-mail : yijaejun@kict.re.kr)

*** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 · 책임연구원 · 031-910-0434(E-mail : sakwon@kict.re.kr)

**** 정회원 · 한국건설기술연구원 도시시설연구실 · 선임기술원 · 031-910-0434(E-mail : jchong@kict.re.kr)

***** 정회원 · 국토해양부 도로운영과 · 과장 · 02-2110-8733(E-mail : okwon@korea.kr)

***** 정회원 · 국토해양부 도로운영과 · 사무관 · 02-2110-8737(E-mail : kimcm57@korea.kr)

***** 정회원 · 인하대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 · 032-860-7574(E-mail : jhj@inha.ac.kr)

실링하는 포장공법이다.



(a) Sawing & Sealing 포장 적용 도로



(b) Sawing 단면 수분 제거

그림 1. Sawing and Sealing 포장공법

2.1 시험시공

의정부국도관내 일반국도 37호선 여주군/양평군+1.370 구간 0.500km(2차로 환산)에 반사균열을 유도하기 위한 Sawing and Sealing공법을 시험시공 하였다. 시험시공 구간은 그림 2와 같이 아스팔트 덧씌우기 두께를 50mm, 80mm 두 경우로 시공하였으며, 각 두께별로 비교구간을 선정하여 절삭과 실링 유무에 따른 반사균열의 유도 형태, 그리고 아스팔트 덧씌우기 두께에 따른 반사균열의 발생 및 유도 형상을 비교할 수 있도록 하였다. 여기서, 50mm 아스팔트 덧씌우기 구간의 절삭폭은 8mm, 절삭깊이는 34mm로 하였으며, 80mm 아스팔트 덧씌우기 구간의 절삭폭은 8mm, 절삭깊이는 52mm로 시공하였다.

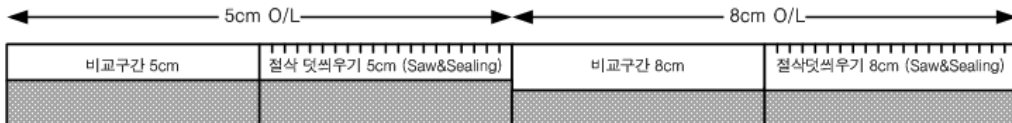


그림 2. Sawing & Sealing 포장 구간 측면도

2.2 Sawing and Sealing 현장 코어 채취

유한요소해석과 연계하여 시험시공 구간의 공용성과 성능을 판단하기 위해 50mm Sawing and Sealing 구간 중 두 곳의 코어를 채취하여 각 층간의 두께와 각 층의 재료를 파악하였다. 코어 채취 결과 그림 3과 같이 두 지점 모두 아스팔트 덧씌우기 표층 50mm, 콘크리트 슬래브 기층 250mm로 계측되었으며, 그 밑에 층은 쇠석기층으로 판단되었다.



(a) 코어 채취 전경



(b) 각 층의 두께 및 재료

그림 3. 50mm Sawing and Sealing 코어 채취 현장

2.3 Sawing and Sealing 포장온도 측정

아스팔트층과 하부의 콘크리트 슬래브층의 온도 자료는 구조해석을 위한 입력변수로 활용할 수 있다. 포장의 온도를 계측하고 온도변화에 따른 포장의 거동을 구조적으로 해석하기 위하여, 2009년 7월 30일 아스팔트 표층 50mm 비교구간 길어깨 2곳에 온도계측기를 매설하였다. 그림 4와 같이 표면 상부에서부터 25mm, 76mm, 178mm, 275mm로 결정하여 아스팔트 표층 1곳과 콘크리트 기층 3곳의 깊이에서 매 2시간 간격으로 온도를 측정하였다.

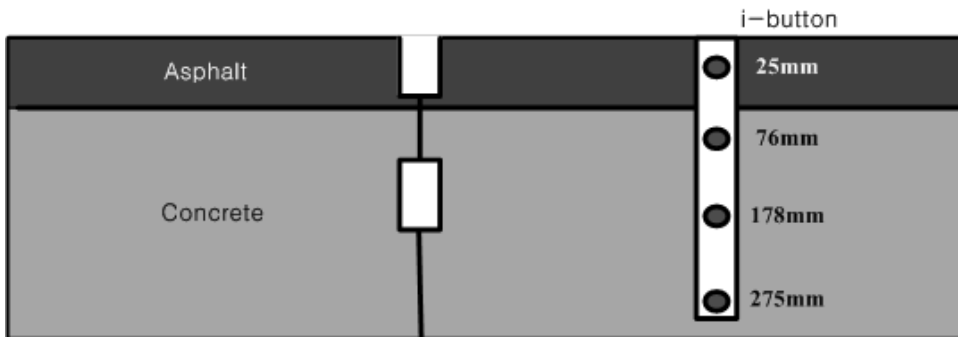


그림 4. 온도 계측기 매설도

그림 5는 7월 31일 0시부터 8월 10일 0시까지 2시간 간격으로 측정한 온도 데이터이다. 아스팔트 표층인 25mm 깊이에서 가장 큰 온도 변화를 보였으며, 하부로 갈수록 온도 차이는 작아졌다. 또한 8월 3일, 7일, 8일은 우천의 영향으로 깊이별로 온도 차이가 작은 것으로 확인되었다.

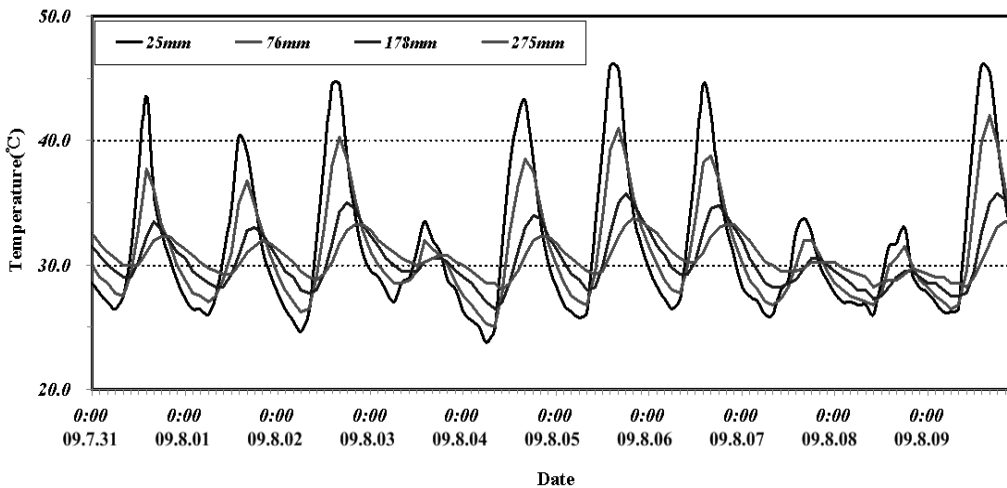


그림 5. 50mm Sawing and Sealing 비교구간 포장온도 측정 결과

3. 유한요소 해석

본 연구는 Sawing and Sealing공법 구조해석을 위한 기초연구로서, 국내에서 최초로 시공된 구간을 2차원으로 모사하였으며, 유한요소 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 구조해석을 실시하였다.



3.1 모델링 구성

콘크리트 슬래브 줄눈폭 변위에 따른 아스팔트층의 인장응력 변화를 구현하기 위해 표 1과 같은 입력변수를 사용하였다. 아스팔트 콘크리트의 물성치는 기존문헌을 참조하였고, 여기서 아스팔트 탄성계수란 회복 탄성계수를 의미한다. 나머지 콘크리트 슬래브, 쇠석기층, 노상에는 일반적인 물성치를 입력하였다.

표 1. 유한요소해석에 사용된 물성

기층 종류	탄성계수(MPa)	포아송비
아스팔트 콘크리트 (20℃ 기준)	3992	0.39
콘크리트 슬래브	28000	0.18
쇄석 기층	200	0.35
노상	50	0.30

아스팔트층 6000×50mm, 콘크리트 슬래브 6000×250mm, 쇠석 보조기층 6000×150mm, 노상 6000×450mm으로 유한요소모델을 구현하였으며 다음 그림6과 같다. 아스팔트층과 콘크리트 슬래브층은 tie constraint 연결요소를 사용하였으며, 콘크리트 슬래브와 쇠석기층은 비선형 전달 연결 요소를 사용하였다. 또한, 쇠석기층과 노상은 tie constraint 연결 요소를 사용하였다.

50mm 아스팔트 덧씌우기 구간의 절삭폭은 8mm, 절삭깊이는 34mm로 하였으며, 이는 시험시공 구간과 비교하여 모사하기 위함이다. 또한, 콘크리트 슬래브의 mesh는 최대 골재 입경 크기를 고려하여 40×40mm로 설정하였다. 아스팔트 콘크리트 층에도 최대 골재 입경 크기를 고려해야하지만, 줄눈부의 세부적인 응력분포를 파악하기 위해 4×4mm의 메쉬로 설정하였다.

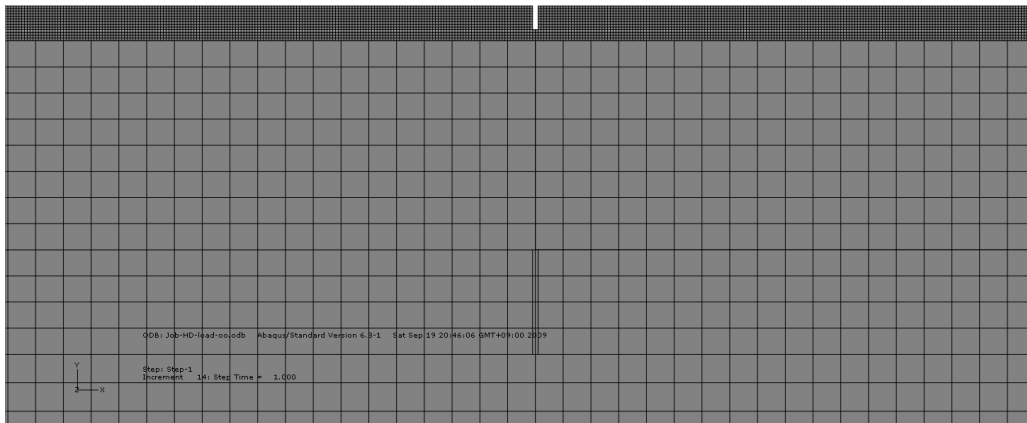


그림 6. Sawing and Sealing 포장공법의 유한요소해석 모델링

3.2 모델링 결과

기존문헌에 따르면 아스팔트 콘크리트가 20℃일 때, 간접인장강도가 1.33MPa 부근에서 파괴된다. (김낙석, 2003) 이러한 연구결과를 참고하여 아래 그림과 같이 콘크리트 슬래브에 변위를 제어, 아스팔트 줄눈부의 파괴양상을 파악하였다. 본 연구에서는 유한요소법을 이용, 파괴 양상을 예측하기 위해 기존 문헌을 참조하여 요소삭제방법을 도입하였다. (김성민, 2007)

그림 7에서 콘크리트 슬래브의 줄눈부에 0.02mm의 압축변위를 주고, 아스팔트 콘크리트 절삭부 최하단으로부터 상단 4mm element의 인장응력분포를 검토하였는데, 1.406MPa의 응력이 발생하여 파괴가 발생한 것이 모사되었다. 여기서, 줄눈부의 압축변위란 콘크리트 슬래브의 수축을 의미한다. 다음 그림에 최하단 element부터 차례로 번호를 부여하고, 응력과 누적 응력값을 나타내었다.

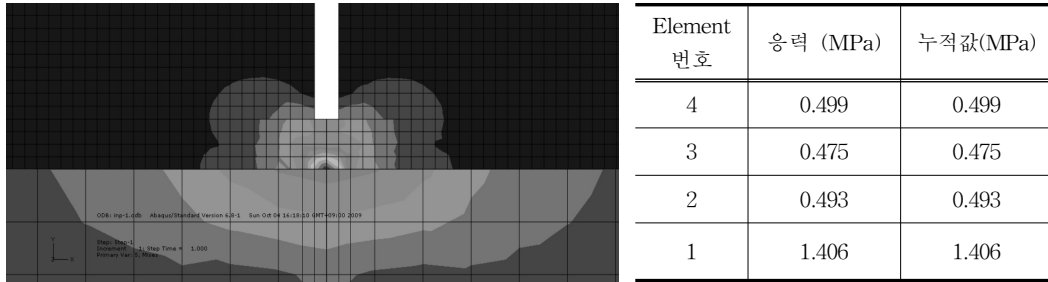


그림 7. 유한요소해석 모델의 element 응력 분포와 누적값

그림 8은 이미 파괴가 일어난 아스팔트 콘크리트 element 1번의 탄성계수를 0으로 입력하고 콘크리트 슬래브 줄눈부에 0.018mm의 압축변위를 추가하였는데, element 2번 부분에 0.885MPa의 응력이 추가되므로써 파괴가 모사되었다.

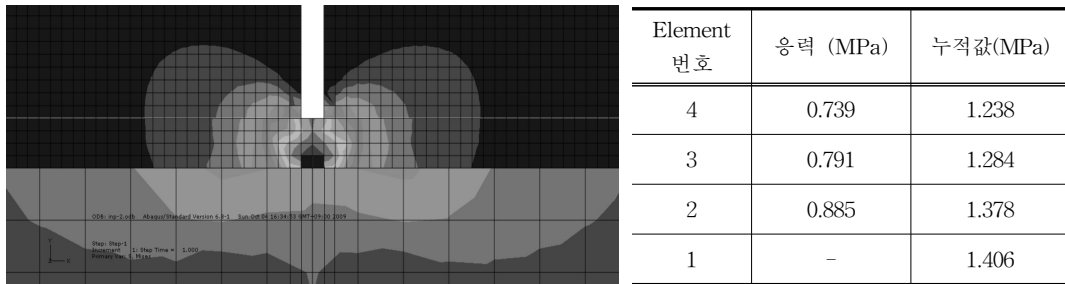


그림 8. element 1번의 탄성계수를 0으로 했을 때의 응력 분포와 누적값

그림 9은 파괴가 일어난 아스팔트 콘크리트 element 1번과 element 2번의 탄성계수를 0으로 입력하고, 최하단으로부터 8mm~12mm까지의 파괴를 모사하기 위하여 콘크리트 슬래브에 0.002mm의 변위를 추가한 결과, 아스팔트 콘크리트의 인장강도 누적값은 1.423MPa이 발생하여 최대인장강도가 초과됨을 알 수 있었다. 이 때, 최하단으로부터 12mm~16mm element 또한 1.357MPa이 발생하여 동시에 파괴가 진행되었다. 아스팔트 콘크리트 줄눈부에 총 누적변형량이 0.04mm가 되었을 때, 줄눈부 균열이 발생하였다.

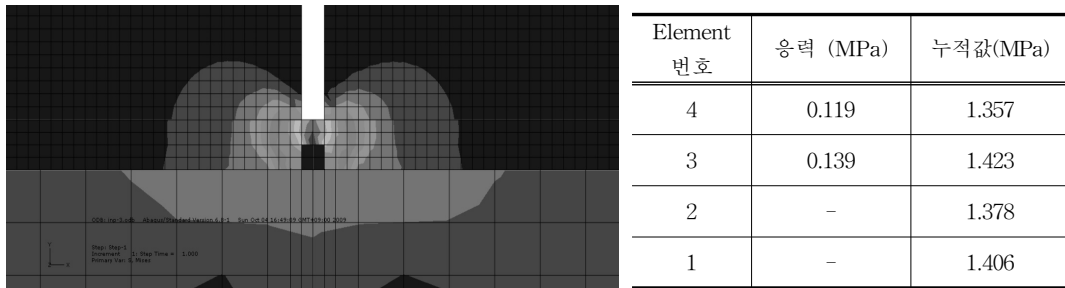


그림 9. element 1, 2번의 탄성계수를 0으로 했을 때의 응력 분포와 누적값

위와 같은 방법으로 아스팔트 콘크리트 두께(t)와 줄눈 커팅 너비(w), 깊이(d)를 변화시키며 유한요소해석



모델링을 실시하였다. 시험시공 구간과의 비교를 용이하게 하기 위해 커팅 너비는 시공 절삭 너비의 $\pm 2\text{mm}$ 로, 커팅 깊이는 시공 절삭 깊이의 $\pm 5\text{mm}$ 의 차이를 두어 모델링 하였다. 그 결과 아스팔트 덧씌우기의 두께가 50mm, 80mm일 경우 모두, 절삭 깊이와 폭이 가장 작은 구간에 최대인장강도를 초과하는 변위 값이 가장 크게 나타났고, 반대로 절삭 깊이와 폭이 가장 큰 구간은 최대인장강도를 초과하는 변위 값이 가장 작게 나타났다. 그리고 절삭 깊이의 변화는 절삭 폭의 변화보다 변위 값에 대해 더 민감한 것으로 분석되었다.

표 2. 50mm 덧씌우기의 줄눈 깊이, 폭에 따른 최대인장변위

줄눈 깊이	줄눈 폭		
	6mm	8mm	10mm
30mm	0.070mm	0.057mm	0.055mm
35mm	0.064mm	0.040mm	0.040mm
40mm	0.033mm	0.033mm	0.032mm

표 3. 80mm 덧씌우기의 줄눈 깊이, 폭에 따른 최대인장변위

줄눈 깊이	줄눈 폭		
	6mm	8mm	10mm
30mm	0.062mm	0.060mm	0.059mm
35mm	0.054mm	0.050mm	0.048mm
40mm	0.048mm	0.044mm	0.043mm

4. 적정 줄눈 깊이 및 폭

Sawing and Sealing 공법에서의 반사균열은 하부 콘크리트 슬래브의 팽창 및 수축이 가장 큰 원인이다. 측정된 온도데이터를 바탕으로 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화를 예측하고, 시험시공된 아스팔트 표층에 설치된 줄눈 깊이 및 폭이 적정한지 조사하였다. 콘크리트 슬래브의 열팽창계수는 일반적으로 알려진 $12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 결정하였으며(양성철, 2002), 측정된 콘크리트의 온도 중 변화 폭이 가장 큰 날인 2009년 8월 5일의 온도를 사용하였다. 6m의 길이를 갖는 콘크리트 슬래브의 하루동안의 줄눈폭의 변화는 식 (1)의 AASHTO 예측식을 사용하여 예측되었다.

$$\Delta L = C \times \alpha \times \Delta T \times L \quad (1)$$

- 여기서, ΔL = 콘크리트 슬래브 줄눈폭 (mm)
- C = 보조기층 종류에 따른 계수
- α = 열 팽창 계수 ($1/^{\circ}\text{C}$)
- ΔT = 온도 차 ($^{\circ}\text{C}$)
- L = 슬래브 길이 (mm)

아스팔트층 바로 아래의 콘크리트 슬래브의 줄눈은 하루에 약 0.6mm 거동하는 것으로 계산되어 표 2와 표 3에 보인 아스팔트 표층에 균열이 유도되기 필요한 슬래브의 줄눈폭 변화보다 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서, 시험시공된 아스팔트 표층에 설치된 줄눈의 깊이와 폭은 균열을 유도하기에 충분하다고 판단되었다.

그러나 본 연구에서 가정한 것과는 달리 아스팔트는 점탄성 재료이며, 아스팔트층과 콘크리트 슬래브의 부착정도 및 하중조건을 고려한다면 이와는 다른 결과를 얻을 것으로 예상된다. 따라서, 향후 다양한 조건을 고려하여 구조해석을 실시하고, 지속적인 추적조사를 통하여 적정 줄눈 깊이 및 폭을 제시하고자 한다.

5. 결론 및 향후계획

시험시공 구간은 아스팔트 덧씌우기 두께를 50mm, 80mm 두 경우로 시공하였으며, 유한요소해석과 연계하여 시험시공 구간의 공용성과 성능을 판단하기 위해 50mm Sawing and Sealing 구간 중 두 곳의 코어를 채취하고, 각 층간의 두께와 재료를 파악하였다. 코어 채취 결과, 아스팔트 덧씌우기 표층 50mm, 콘크리트 슬래브 기층은 250mm로 계측되었고, 그 밑에 층은 쇠석기층으로 판단되었다. 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변위에 따른 아스팔트층의 인장응력 변화를 2차원 유한요소모델을 구현하였으며, 콘크리트 슬래브의 변위 제어에 따른 아스팔트 콘크리트 응력분포를 확인하였다. 아스팔트 콘크리트의 온도를 20℃ 기준으로 하여 회복탄성계수를 입력하고, 콘크리트 슬래브의 변위를 0.02mm로 제어하였을 때, 아스팔트 콘크리트 최하단으로부터 균열이 나타났다. 콘크리트 슬래브 줄눈부에 0.04mm의 변위(콘크리트 슬래브의 수축)가 발생하면 아스팔트 콘크리트의 모든 줄눈부 구간에서는 파괴가 모사되었다. 아스팔트 콘크리트 포장 두께(t), 줄눈 커팅 너비(w) 그리고, 깊이(d)를 변화시켜가며 최대 인장 변위값을 측정해본 결과, 줄눈커팅 너비(w) 보다는 줄눈 깊이(d)가 더 민감함을 알 수 있었다. AASHTO 예측식에 의하여 계산된 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화는 충분히 큰 것으로 나타나 구조해석보다 작은 줄눈 깊이와 폭으로도 충분히 아스팔트 표층에 균열을 발생시킬 것으로 예상되었다.

본 연구는 탄성체로 가정한 아스팔트 포장이 하부의 콘크리트 포장의 수평거동을 할 때, Sawing & Sealing 포장의 아스팔트 줄눈 부에서의 균열발생 현상을 유한요소프로그램인 ABAQUS를 사용하여 모사하였다. 콘크리트 슬래브는 상·하부의 온도 및 습도차이로 인하여 켈링과 와핑현상이 발생하며, 아스팔트 포장은 본 연구에서 가정한 것과는 달리 점탄성 재료이다. 향후 연구에서는 현장으로부터 얻은 온도 등의 입력변수를 추가하고, 켈링이 발생하는 콘크리트 포장과, 점탄성재료의 역학적 특성을 반영하여 3차원으로 유한요소 모델을 구현하는, 보다 더 합리적인 구조해석을 실시할 예정이다.

아스팔트 덧씌우기 층의 보온효과로 인해 콘크리트 슬래브 상부의 온도가 높을 수 있으므로 슬래브 상하부 간의 온도차이가 크리라고 판단이 된다. 그럴 경우, 콘크리트 슬래브의 켈링이 상당히 커지리라 사료되므로 이에 의한 Sawing & sealing 부위의 거동도 향후 연구할 계획이다. 켈링이 발생하면 아스팔트 콘크리트하부와 콘크리트 슬래브 상부의 경계면에 마찰응력이 발생함으로 인하여 부착이 떨어질 수 있으므로 부착력 실내실험을 실시하여 마찰강도를 얻고, 켈링발생시의 구조해석 결과와 비교하여 부착상태가 유지될지에 관해서도 연구하고자 한다. 그리고 Sawing & Sealing 줄눈 부위의 차량에 의한 충격하중이 재하 될 때, 아스팔트 포장의 파손 가능성에 대해 구조해석을 실시할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 『시험시공구간 추적조사 및 분석』의 수행결과의 일부로써, 연구지원에 깊은 감사드립니다.

참고 문헌

1. 한국도로포장공학회 (1999), 아스팔트 포장공학 원론, 한국도로포장공학회 편저.

2. 김낙석 (2003), "페타이어활용 아스팔트 콘크리트의 실험적 공용특성". 한국도시방재학회논문집, 제3권, 제 2호, pp.89-97
3. 김성민 (2007), "환경하중에 의한 연속철근콘크리트포장의 균열 발생 및 진전 특성 분석". 한국도로학회 논문집, 제9권, 제 2호, pp.39-49
4. 양성철 (2002), "콘크리트 팽창계수 측정 실험". 한국도로포장공학 제 4권, 제 1호, pp. 161-164
5. ABAQUS (2006) User's Manual Version 6.6, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I.
6. ASTM D4123-82(1995), Test Method for Indirect Tension Test for Resilient Modulus of Bituminous Mixtures, Annual Book of ASTM Standards, Section 4 Construction
7. Dıyar Bozkurt and William G. Buttlar(2002), Three-Dimensional finite element modeling to evaluate benefits of interlayer stress absorbing composite for reflective crack mitigation. Advanced Transportation Research and Engineering Laboratory(ATREL)
8. J.H Emmanuel and J. L. Hulse(1997), Prediction of the Thermal Coefficient of Expansion of Concrete, ACI Proceedings, Vol. 74, No. 4, American Concrete Institute, pp. 149-155