

줄눈 콘크리트 포장의 줄눈강성 산정 연구

Joint Stiffness Evaluation in Jointed Plain Concrete Pavement

전범준* · 이승우** · 권순민*** · 김성민****

Chon, Beom Jun · Lee, Seung Woo · Kwon, Soon-Min · Kim, Seong-Min

Abstract

The excellent load transfer at transverse joints ensures the high performance of jointed plane concrete pavements(JPCP). Load transfer efficiency(LTE) is affected by dowel-bars, aggregate interlock and types of underlying layers, and these factors have to be modelled adequately for a reasonable analysis of JPCP. Generally, the joint stiffness has been represented by a spring model for the shear transfer by aggregate interlock or dowels. However dowel-bars, aggregate interlock and types of underlying layers have not been considered together in the design of joints. In this study, the joint stiffness that considered those factors was presented by comparing LTE obtained using FWD(Falling Weight Deflectometer) with theoretical results obtained using the finite element analysis. In addition, the effects of temperature and concrete age, on the joint stiffness were investigated.

Keywords : Joint Plained Concrete Pavement (JPCP), Joint Stiffness, Load Transfer Efficiency (LTE), Falling Weight Deflectometer (FWD)

요 지

줄눈 콘크리트 포장에 있어 줄눈부의 하중전달은 다웰바, 골재맞물림, 하부지반의 강성에 의해 발현된다. 콘크리트 포장의 합리적인 역학적 해석을 위해서는 이러한 사항을 적절하게 모델링할 필요가 있다. 줄눈부 하중전달율은 일반적으로 줄눈부에 전단스프링으로 모델링 할 수 있다. 하지만 줄눈부 하중전달이 포장 공용성에 지대한 영향을 미치고 있음에도 위 세가지 모두를 고려한 줄눈부의 줄눈강성(Joint Stiffness)에 대한 연구가 이루어 지지 않아 콘크리트 포장 설계시 적정 줄눈강성값을 적용시키지 못하고 있는 실정이다. 본 연구에서는 국내 콘크리트 포장 여건에 적합한 줄눈부 전단 스프링의 입력요소인 줄눈강성(다웰바, 하부지반, 골재맞물림 고려)을 산정하고자 한다. 이를 위해 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 구한 하중전달율(LTE)에 대해 하부지반 및 다웰바 설치유무에 따른 국내 주요 고속도로 및 시험도로의 데이터를 수집하였다. 또한 국내 포장조건을 고려한 구조해석자료를 통해 하부지반 조건 및 다웰바 유무에 따른 줄눈부의 줄눈강성을 산정하였다. 이 두 가지를 통해 현장의 하중전달율 데이터와 비교분석하여 다웰바 유무, 하부지반 조건별 영향인자에 대해 온도 및 재령을 고려한 국내 조건에 적합한 줄눈강성 산정식을 제시하였다.

핵심용어 : 줄눈콘크리트 포장, 줄눈강성, 하중전달율, FWD

1. 서 론

줄눈 콘크리트포장에서 줄눈은 슬래브내 무작위 균열이 발생하는 것을 제어하기 위하여 설치하지만, 줄눈부 자체가 구조적으로 취약부이기 때문에 포장거동 및 장기 공용성에 지대한 영향을 미친다. 이러한 불연속면(줄눈부)의 합리적 설계를 위해 줄눈간격, 줄눈채움재, 타이바, 하중전달장치 등의 합리적 설계가 필요하다. 이 중 본 연구에서는 한국형 포장 설계법에서 줄눈부의 다웰바에 대한 정량화를 통해 설계 프로

그램에 적용할 수 있는 입력변수로 줄눈강성(Joint Stiffness- K_j)에 대한 모델을 개발 하고자 한다. 지금까지 국내 콘크리트 포장 줄눈부 설계에 있어 하중전달계수(J-Factor)에 대한 연구는 이루어진바 있으나, 줄눈강성에 대한 국내에서의 체계적 연구를 통한 제안이 이루어진 적이 없다. 이에 국내 콘크리트 포장의 상태평가에 가장 널리 쓰이고 있는 FWD (Falling Weight Deflectometer)를 이용한 처짐시험으로 얻어지는 하중전달율(LTE-Load Transfer Efficiency) 자료를 수집하여 분석하고 국내 콘크리트 포장조건을 고려한 구조해

*정회원 · 강릉대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : beomjun77@nate.com)

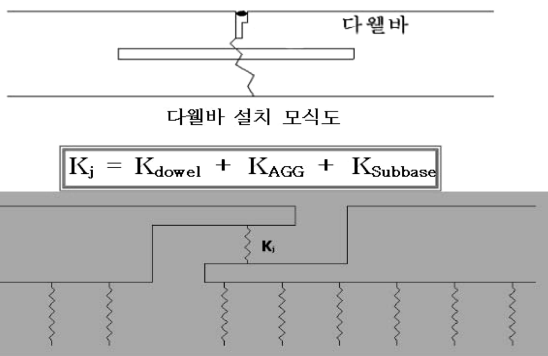
**정회원 · 교신저자 · 강릉대학교 토목공학과 부교수 (E-mail : swl@kangnung.ac.kr)

***한국도로공사 도로교통연구원 전임연구원 (E-mail : soonmini2@ex.co.kr)

****정회원 · 경희대학교 토목건축대학 조교수 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

석을 통해 줄눈강성을 산정 한 후 줄눈부 하중전달에 대한 다웰바 유무, 하부지반 종류에 대한 조건별 줄눈강성 값을 산정하고자 한다.

본 연구를 통해 최종적으로 국내 조건에 적합한 강성계수 (K_j)를 설계법 프로그램에 적용하고자 한다. 줄눈부 강성계수 (K)는 전단스프링계수 K_w 와 모멘트스프링계수 K_θ 로 이루어진다. Ball and Childs(1975)는 하중전달에 있어 줄눈부의 주 전단력에 있어 모멘트 스프링계수는 무시할 만큼 영향이 적다고 보고하고 있다. 이는 다웰바의 기울기에 의한 처짐과 다웰바의 휨 변형이 일어날 수 없을 만큼의 매우 적은 값을 의미한다. 그러므로 인접한 두 슬래브 사이의 변형과 하중에 의한 다웰바 전단변형을 고려한 K_w 만을 고려한다. 본 연구에서는 골재 맞물림과 다웰바에서의 처짐량을 통해 표현하고 있는 K_w 에 그림 1에서와 같이 하부지반의 영향까지 고려한 줄눈강성 K_j 모델을 제시 하였다.

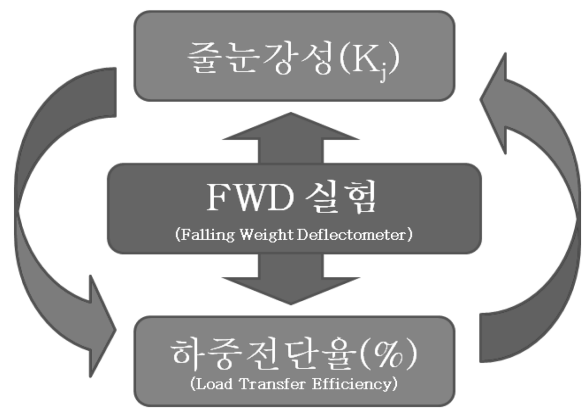


Shear transfer through joint by aggregate interlock(or dowel bar)

그림 1. 줄눈강성 개념도

2. 줄눈강성 산정방안

다웰바의 줄눈강성을 산정하는 방법은 실험을 통해 구하는 방법과 해석 자료를 바탕으로 구하는 방법이 있다. 이중 본 연구에서는 해석을 통해 얻어진 줄눈강성 K_j 와 현재 가장 널리 사용되고 있는 포장상태 평가방법인 FWD를 이용해 손쉽게 획득할 수 있는 하중전달율(%) 자료의 분석을 통해 줄눈강성 K_j 모델을 개발하고자 한다. 이렇게 산정한 줄눈부 강성은 그림 2를 보면 FWD를 통해 줄눈부 처짐을 측정하여 하중전달율값을 얻을 수 있고, 구조해석을 통해 줄눈강성을 구할 수 있다. 이는 하중전달율과 줄눈강성의 상호 연관 관계를 통해 줄눈강성 산정식을 개발할 수 있음을 보여준다.



줄눈강성(Joint Stiffness) 산정 개념도

그림 2. 줄눈강성(Joint Stiffness) 산정 개념도

3. 줄눈강성과 하중전달율의 관계

3.1 구조해석을 통한 관계 유출

구조해석을 통해 국내 콘크리트 포장의 포장단면에서의 줄눈강성 산정은 국내 콘크리트 포장 조건에 맞추었으며, 우선 구조해석을 위해 사용된 변수중 하부합성 지지력의 경우 AASHTO에서 린층 두께에 따른 지지력 계수 범위와 ‘고속국도 제45호선 여주~양평간 건설공사 포장 구조 해석 및 검증 연구’ 보고서(이승우, 2002)의 린층의 지지력 계수에 따르면 지지력 계수의 범위가 최소 650pci에서 최대 1000pci의 값을 타내었으며, 쇠석층과 린층의 차이를 뚜렷이 보기 위하여 이중 최대값인 1000pci를 사용하였다. 또한 쇠석층의 경우 역시 200~500pci의 값중 최대값인 500pci를 사용하였다. 그리고 단면, 간격, 직경, 탄성계수, 강성계수, 하중재하 등에 대하여 표 1에 나타내었다. 그림 3과 같이 하중을 재하하여 표 1에 보이는 바와 같이 하부지반 조건에 따라 각각 값을 달리 하였으며, 줄눈부 강성계수를 변화시키며 각 하중전달율에 따른 줄눈강성을 산정하였다. 구조해석을 통해 하부합성지지력 쇠석기층(500pci), 린 기층(1000pci)별 하중전달율 vs 줄눈강성은 그림 4와 같으며, 하부지반의 지지력 계수가 큰 경우 줄눈강성도 큰 값을 보임을 알 수 있다.

3.2 국내 주요도로 하중전달율 자료구축

데이터 베이스 구축의 편의를 위해 다웰바의 유무와 기층의 종류에 따라서 D-L(Doweled 구간-Lean Subbase), D-A(Doweled 구간-Aggregate Subbase), U-L(Undoweled 구간-

표 1. 구조해석에 사용된 변수 값

구분	단면/간격/직경	물성지수	하부합성 지지력 (k)	줄눈부 강성계수 변화범위	하중재하
내용	슬래브두께: 30cm 줄눈간격: 6m 슬래브폭: 3.6m 다웰바직경/간격: 25mm/30cm	콘크리트 탄성 계수/프아송비: 30GPa/0.15 다웰바 탄성 계수/프아송비: 200GPa/0.15	136MN/m ³ (500pci)	1.0~1.0×10 ¹⁵ (N/m)	 (한칸 = 5cm×5cm)
			272MN/m ³ (1000pci)		

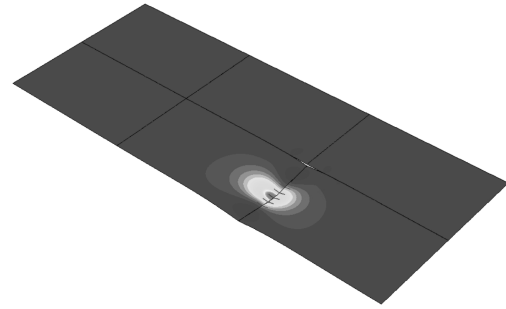
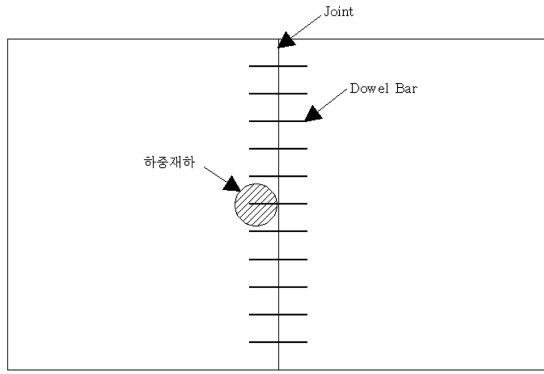


그림 3. 하중재하 위치와 구조해석 결과

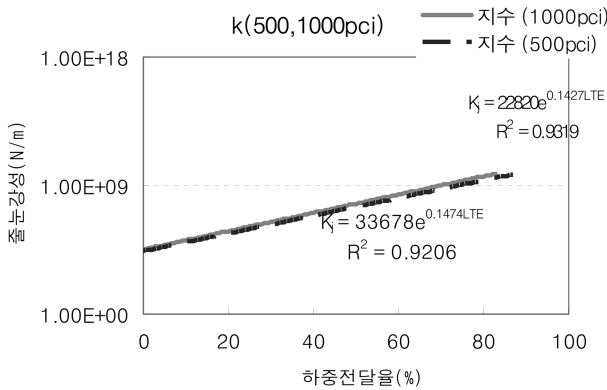


그림 4. 하부합성지지력별 하중전달율과 줄눈강성

Lean Subbase), U-A(Undoweled 구간-Aggregate Subbase)로 구분되었으며 중부, 호남, 88고속도로, 중부내륙시험도로 및 고창-담양간 신설도로의 시험시공 데이터를 통해 표 2와 같이 정리하였다.

4. 줄눈강성 산정식 개발

줄눈강성의 경우 줄눈부의 다웰바 설치 여부에 의해 큰 차이를 보이게 되며, 하부지반의 종류에 따라 지지력의 영향을 받게 된다. 따라서 다웰바 설치여부와 하부지반 종류를 고려한 모델을 개발하고자 한다. 우선 국내 줄눈콘크리트 포장에 대한 구조해석을 통해 보조기층별 하중전달율에 따른

줄눈강성 산정 모델을 개발하고 이렇게 개발한 모델의 하중 전달율적용에 있어 국내 및 국외의 하중전달율 데이터를 수집하고 콘크리트 포장의 공용년수에 따라 줄눈강성의 변화와 온도 영향에 따른 줄눈부 거동 영향을 고려할 수 있는 줄눈강성 산정 모델을 제시하였다.

4.1 다웰바가 있는경우

4.1.1 린 보조기층일 경우

앞서 언급한 3.1절의 구조해석에서 하부지반이 린층인 경우에 대하여 해석하여 줄눈강성(K_j)와 하중전달율(%) 사이의 관계를 찾을 수 있었으며 둘의 관계식은 식 (1)과 같이 지수의 관계를 가짐을 알 수 있다.

$$\text{린기층} : K_j (\text{N/m}) = 33678 * e^{0.1474 * \text{LTE}(\%)} \quad (1)$$

그리고 식 (1)의 하중전달율(%)의 경우 현장 데이터인 중부내륙시험도로, 중부고속도로, 호남고속도로의 하중전달율(%) 자료를 분석한 결과 그림 5와 같이 슬래브 내의 온도가 20°C 이하일 때는 온도의 증가에 따라 하중전달율이 증가하며 약 20°C의 기점 이후의 온도증가에선 하중전달율의 영향이 없음을 알 수 있다. 다웰구간중 린보조기층의 하중전달율 데이터 수집에 있어 더 많은 데이터의 확보가 어려웠지만 재령에 따라 하중전달율이 변화하는 양상은 확인할 수 있었다. 그림 6은 줄눈 콘크리트 포장의 공용 20년 이후에 하중전달이 약 11% 감소함을 보여주고 있다.

표 2. 추적조사 자료수집

구분		줄눈수	공용년수	평균 하중 전달율 (%)	표준편차	
D-L	고창-담양 시험도로	6m	10	신설(0)	9.90	
		7m	10	신설(0)	10.54	
	중부내륙시험도로			2	-	-
	중부고속도로		45	12	89.66	0.54
호남고속도로		58	13	90.3	6.20	
D-A	중부내륙시험도로		1	2	95.91	0.64
	88고속도로		8	1	90.42	1.52
U-L	중부내륙시험도로		12	2	65.15	19.86
	중부고속도로		57	12	80.38	13.24
	호남고속도로		76	13	88.7	5.8
U-A	88고속도로		4	1	50.01	20.63

- D-L(다웰설치구간 - 린 보조기층) • D-A(다웰구간 - 쇄석보조기층)
- U-L(다웰미설치구간 - 린 보조기층) • U-A(다웰미설치구간 - 쇄석보조기층)

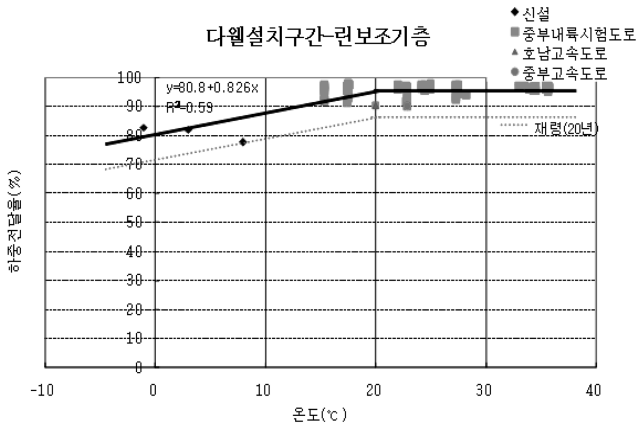


그림 5. 하중전달율과 온도와의 관계(린 보조기층)

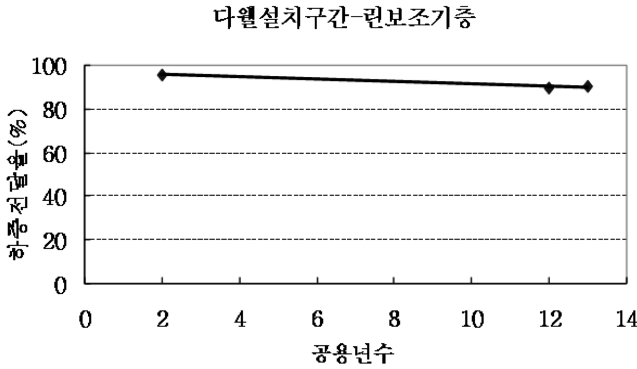


그림 6. 하중전달율과 콘크리트 포장 재령과의 관계

그림 5, 6에서의 결과를 통해 재령과 온도별 하중전달율(%)의 관계에 따라 아래 식 (2)같은 결과를 얻을 수 있었다.

$$LTE(\%) = LTE_0 - 0.54 * year(\text{재령})$$

단, $LTE(\%) = \text{최소값}[40\%]$ (2)

$$LTE_0(\%) = 80.8 + 0.826 * \text{Temp} \quad \text{Temp} < 20^\circ\text{C} \text{ 일때}$$

$$LTE_0(\%) = 97.3 \quad \text{Temp} \geq 20^\circ\text{C} \text{ 일때}$$

여기에서, $LTE_0(\%) = \text{초기 하중전달율}$
 $\text{Temp} = \text{슬래브 온도}$

4.1.2 쇄석 보조기층일 경우

린 보조기층과 마찬가지로 구조해석의 결과를 통해 줄눈강성(K_j)와 하중전달율(%)의 관계는 식 (3)과 같다. 식 (3)의 하중전달율(%)의 경우 그림 7에서 보는바와 같이 린 보조기층의 경우와 유사하게 20°C를 기점으로 변화가 있음을 알 수 있다. 반면 린 보조기층에 비하여 약 10% 내외로 하중전달율(%) 값이 적게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

$$\text{쇄석기층} : K_j (\text{N/m}) = 22820 * e^{0.1427 * LTE(\%)} \quad (3)$$

$$LTE(\%) = LTE_0 - 0.54 * year(\text{재령})$$

단, $LTE(\%) = \text{최소값}[20\%]$ (4)

$$LTE_0(\%) = 65.8 + 1.53 * \text{Temp} \quad \text{Temp} < 20^\circ\text{C} \text{ 일때}$$

$$LTE_0(\%) = 96.4 \quad \text{Temp} \geq 20^\circ\text{C} \text{ 일때}$$

여기에서, $LTE_0(\%) = \text{초기 하중전달율}$
 $\text{Temp} = \text{슬래브 온도}$

재령에 따라 하중전달율(%)가 감소함으로 줄눈강성(K_j) 또한 감소하게 되는데 이때 줄눈강성의 재령별 변화를 그림 8

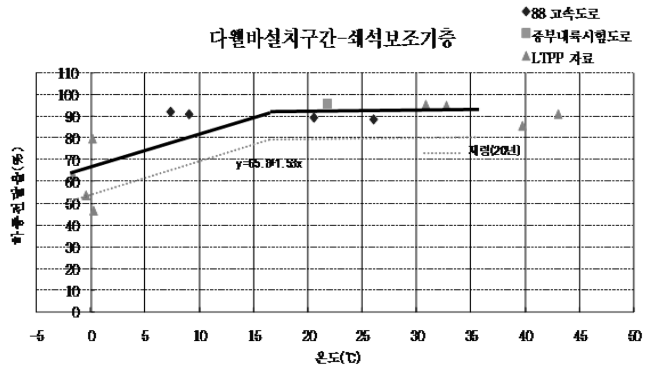


그림 7. 하중전달율과 온도와의 관계(쇄석보조기층)

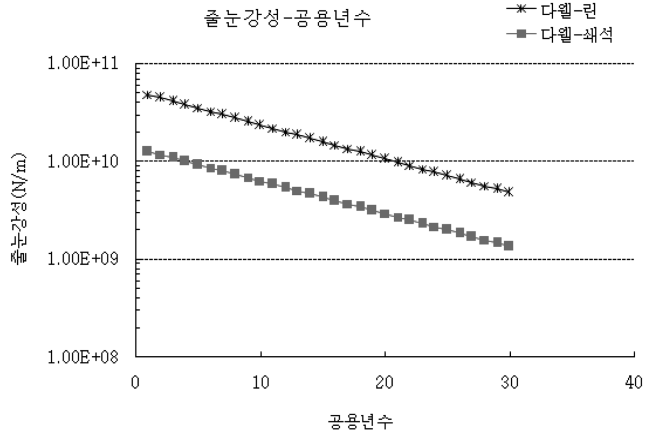


그림 8. 공용년수 증가에 따른 줄눈강성(K_j)의 감소

과 같이 log-normal 그래프로 나타내면 강성계수가 공용년수의 증가에 따라 선형으로 값이 감소함을 볼 수 있다.

4.2 다월바가 없는 경우

4.2.1 린 보조기층일 경우

다월바 미설치 구간의 경우 재령에 대한 영향은 찾기가 힘든 반면, 온도에 의한 영향은 뚜렷이 나타났다. 온도에 따른 콘크리트 슬래브의 수축, 팽창으로 줄눈부의 골재 맞물림에 영향을 주게되어 온도가 증가할 수록 줄눈부의 골재 맞물림 효과가 증대되어 그림 9와 같이 하중전달율(%)이 증가함을 볼 수 있다.

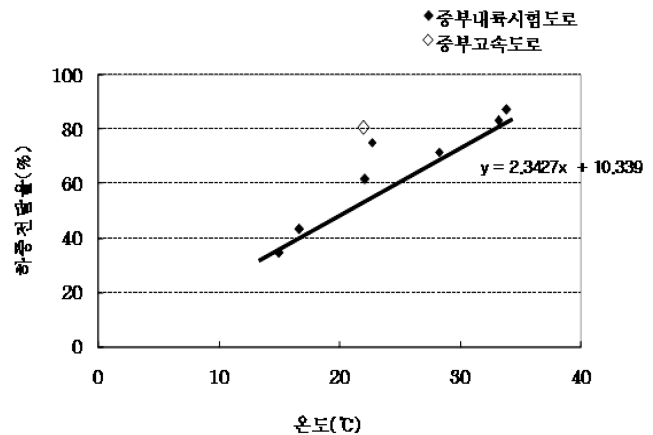


그림 9. 하중전달율과 온도와의 관계(무다월 구간-린 보조기층)

구조해석을 통해 줄눈강성(K_j)와 하중전달율(%) 관계 식 (1)에 위 그림 9의 온도영향에 대해 하중전달율(%) 관계식을

나타내면 식 (5)와 같다. 그리고 식 (5)의 하중전달율(%)의 경우 온도가 계속 저하될 경우 하중전달값이 음의 값을 가지게 된다. 이에 미국의 AASHTO 2002 Design Guide에서 린기층의 경우 최소 40% 이상의 하중전달율(%) 값을 갖는다는 연구 내용에 근거하여 최소값을 40%로 정하였다(AASHTO 2002 Design Guide).

- 린기층 : $LTE(\%) = 10.34 + 2.34 * \text{temp}(\text{온도})$ (5)
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[40\%]$

4.2.2 쇠석 보조기층일 경우

보조기층이 쇠석일 경우의 자료는 88 올림픽 고속도로 자료뿐이어서 재령에 대한 분석을 할 수 없었다. 하지만 온도 영향의 경우 린기층과 비슷한 양상을 보여 온도의 증가에 따라 하중전달율(%)이 증가함을 볼 수 있다. 슬래브와 하부지반이 서로 상이함에 따라 린기층과 쇠석기층을 비교하여 보면 쇠석기층의 온도에 대한 하중전달율 증가율이 완만하고 적은 것을 알 수 있다. 린 보조기층과 마찬가지로 구조해석을 통해 줄눈강성(K_j)와 하중전달율(%) 관계 식 (3)에 그림 10의 온도영향에 대해 하중전달율(%) 관계식을 나타내면 식 (6)과 같으며, 린기층의 최소 하중전달율(%) 값과 마찬가지로 쇠석기층의 경우 최소값을 20% 이상으로 정하였다(AASHTO 2002 Design Guide).

- 쇠석기층 : $LTE(\%) = 19.54 + 1.94 * \text{temp}(\text{온도})$ (6)
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[20\%]$

각 보조기층별 온도영향에 대한 줄눈강성을 그림 11에서

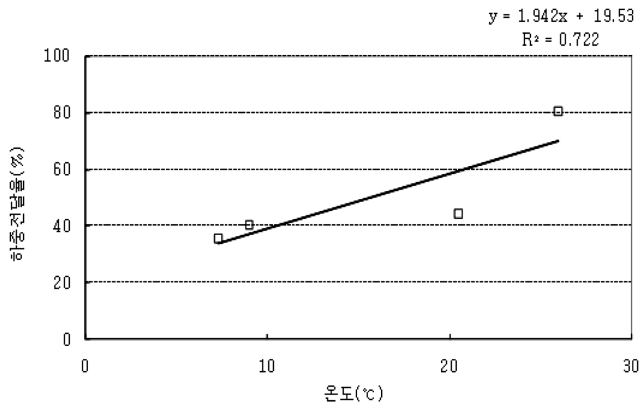


그림 10. 하중전달율 vs 온도(무다웰 구간-쇠석 보조기층)

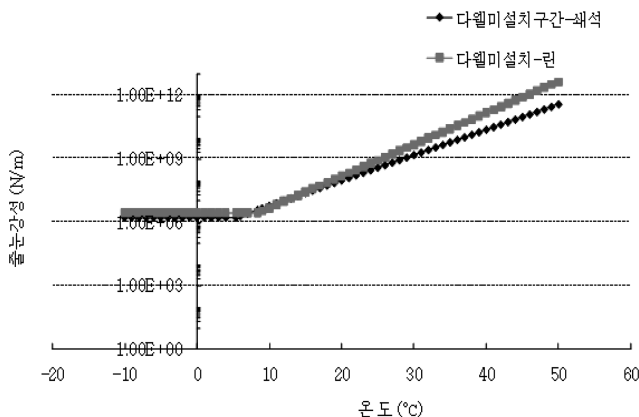


그림 11. 줄눈강성(K_j)와 온도와의 관계(무다웰 린기층 및 쇠석기층)

살펴보면 약 8°C 근처에서 각각 줄눈강성(K_j)가 변화없이 값이 유지 되는것을 볼 수 있다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 각 보조기층별 최소 하중전달율을 지정하였기 때문이다.

5. 결 론

본 연구를 통해 줄눈강성에 대해 다음과 같은 결과를 도출할 수 있었다.

1. 국내 콘크리트 포장에 대한 구조해석을 통해 줄눈부 줄눈강성과 하중전달율의 관계를 하부조건에 따라 다음과 같이 도출할 수 있었다.

- 린기층 : $K_j (\text{N/m}) = 33678 * e^{0.1474 * LTE(\%)}$
 - 쇠석기층 : $K_j (\text{N/m}) = 22820 * e^{0.1427 * LTE(\%)}$

2. 다웰바를 설치할 경우 결과(1)의 각 보조기층별로 적용하여 온도와 재령에 대한 영향을 고려하여 결과를 도출하였다.

- 린기층 : $LTE(\%) = LTE_0 - 0.54 * \text{year}(\text{재령})$
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[40\%]$
 $LTE_0 = 80.8 + 0.826 * \text{Temp}$ $\text{Temp} < 20^\circ\text{C}$ 일때
 $LTE_0 = 97.3$ $\text{Temp} \geq 20^\circ\text{C}$ 일때

- 쇠석기층 : $LTE(\%) = LTE_0 - 0.54 * \text{year}(\text{재령})$
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[20\%]$
 $LTE_0 = 65.8 + 1.53 * \text{Temp}$ $\text{Temp} < 20^\circ\text{C}$ 일때
 $LTE_0 = 96.4$ $\text{Temp} \geq 20^\circ\text{C}$ 일때

3. 무다웰바일 경우 결과(1)의 각 보조기층별로 아래의 온도 영향을 고려한 하중전달율(%)를 구하여 적용할 수 있다.

- 린기층 : $LTE(\%) = 10.34 + 2.34 * \text{Temp}(\text{온도})$
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[40\%]$

- 쇠석기층 : $LTE(\%) = 19.54 + 1.94 * \text{Temp}(\text{온도})$
 단, $LTE(\%) = \text{최소값}[20\%]$

본 연구에서는 무다웰 구간에서의 데이터 수집에 있어 다웰구간의 데이터에 비하여 자료의 양이 적고 또한 쇠석기층의 경우 한 곳의 데이터만을 수집할 수 있었다. 향후 무다웰 구간의 하중전달율 데이터를 더 확보하여 본 연구에서 제시한 모델들에 대한 추가 검증 연구가 이루어 져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건교부 수탁과제인 한국형 포장설계법 개발과 포장성능개선 연구의 일부 성과물로 이에 감사를 표합니다.

참고문헌

김현욱, 조운호, 권수안(2002) 줄눈 콘크리트 포장에서 하중전달 계수에 관한 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제22권, 제1-D호 pp. 37-44.

이승우(2002) 고속국도 제45호선 여주~양평간 건설공사 포장 구조 해석 및 검증 연구, 연구보고서.
한국도로공사(1998) 줄눈콘크리트포장의 줄눈손상 해석 및 대책 연구, 연구보고서.
Yang H. Huang (1993) *Pavement Analysis and Design*, Prentice-Hall Inc.
NCHRP (2003) 2002 Design Guide : Design of New and Rehabili-

tated Pavement Structures.

Ruiz, Rasmussen, Faridazar (2003) *Evaluation of Load Transfer Efficiency for SMP Sections in the LTPP Database*, Transportation Research Board (2003).

(접수일: 2007.8.6/심사일: 2007.9.28/심사완료일: 2008.10.27)