

역학적-경험적 콘크리트 포장 줄눈간격 설계방법 개발

Development of Mechanistic-empirical Joint Spacing Design Method for Concrete Pavements

박 주 영	Park, Joo Young	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : pjy0704@naver.com)
홍 동 성	Hong, Dong Seong	인하대학교 토목공학과 석사과정 (E-mail : astroe@nate.com)
임 진 선	Lim, Jin Sun	정회원 · 인하대학교 토목공학과 박사 후 연구원 (E-mail : coreplay@hanmail.net)
정 진 훈	Jeong, Jin Hoon	정회원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 교신저자 (E-mail : jhj@inha.ac.kr)

ABSTRACT

Tensile stress occurs and random crack develops in concrete pavement slab when it contracts by variation of temperature and humidity. The tensile stress decreases and the random crack is minimized by sawcutting the slab and inducing the crack with regular spacing. The random crack, joint damage, decrease of load transfer efficiency are caused by too wide joint spacing while too narrow joint spacing leads to increase of construction cost and decrease of comfort. A mechanistic-empirical joint spacing design method for the concrete pavement was developed in this study. Structurally and environmentally weakest sections were found among the sections showing good performance, and design strengths were determined by finite element analysis on the sections. The joint width for which the load transfer efficiency is suddenly lowered was determined as allowable joint with referring to existing research results. The maximum joint spacing for which the maximum tensile stress calculated by the finite element analysis did not exceed the design strength were found. And the maximum joint width expected by the maximum joint spacing were compared to the allowable joint width. The new method developed in this study was applied to two zones of Hamyang-Woolsan Expressway being designed. The same joint spacing as a test section constructed by 8.0m of joint spacing wider than usual was calculated by the design method. Very low cracking measured at 6 years after opening of the test section verified the design method developed in this study.

KEYWORDS

concrete pavement, joint spacing, joint width, mechanistic-empirical design, finite element analysis

요지

온도와 습도 변화에 의해 수축될 경우 콘크리트 포장 슬래브에는 인장응력이 생기고 이로 인해 무작위 균열이 발생한다. 일정한 간격으로 줄눈을 설치하고 균열을 유도함으로써 슬래브에 발생하는 인장응력을 줄이고 무작위 균열을 최소화할 수 있다. 줄눈간격이 너무 넓으면 무작위 균열, 줄눈부 파손, 하중전달률 저하가 일어나고, 반대로 줄눈간격이 너무 좁으면 공사비 증가와 승차감 저하가 유발된다. 본 연구에서는 콘크리트 포장의 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법을 개발하였다. 이를 위하여 우수한 공용성을 보이는 콘크리트 포장 구간 중 구조적 및 환경적으로 가장 취약한 구간을 찾고 그 구간에 대한 유한요소해석으로 설계기준강도를 결정하였다. 기존 연구결과를 참고하여 하중전달률이 급격히 낮아질 때의 줄눈폭을 허용줄눈폭으로 결정하였다. 유한요소해석으로 계산된 설계대상구간의 최대인장응력이 설계기준강도를 초과하지 않는 최대줄눈간격을 찾아냈다. 그리고 이 줄눈간격으로 예측된 최대줄눈폭을 허용줄눈폭과 비교하였다. 본 연구에서 개발된 방법을 설계 중인 함양-울산 고속도로의 두 공구에 적용해 보았다. 기존보다 넓은 8.0m의 줄눈간격으로 시험시공된 구간과 동일한 줄눈간격이 본 연구의 설계방법으로 계산되었다. 공용 6년 후 측정된 시험시공 구간의 매우 낮은 균열률로 본 연구에서 개발된 설계방법이 검증되었다.

핵심용어

콘크리트 포장, 줄눈간격, 줄눈폭, 역학적-경험적 설계, 유한요소해석

1. 서론

국내 줄눈 콘크리트 포장은 AASHTO ROAD 시험을 통해 개발된 AASHTO 설계법에 따라 300mm의 두께를 주로 사용하며, 줄눈간격은 경험적으로 두께의 약 20배인 6m를 사용하고 있다. 국내 최초의 콘크리트 포장은 88 고속도로에 두께 280mm의 슬래브가 5.5m의 줄눈간격으로 시공되었으며, 그 후 슬래브 두께 300mm, 줄눈간격 6m의 획일적이고 경험적인 설계가 주로 사용되었다. 최근 콘크리트 포장의 역학적 메커니즘에 대한 이해 및 수치해석 기법의 발달로 역학적으로 콘크리트 포장체를 설계하는 방안이 다양하게 제시되고 있으며, 줄눈간격에 대해서도 보다 합리적이고 정확하게 결정되어야 할 필요성이 대두되고 있다(전범준 외, 2005; 손석철 외, 2010).

양성철 외(1999)는 줄눈간격이 5.1m에서 6.1m로 증가함에 따라 응력확대계수 및 벌어진 균열의 변위가 증가하나, 7.1m에서는 다시 감소하는 결과를 얻었다고 보고하여, 기존보다 줄눈간격을 늘릴 수 있는 가능성을 확인하였다. 전범준 외(2005)는 86 AASHTO Guide에 제시된 줄눈폭 예측식에 신뢰도 개념을 도입하여, 국내 지역별 기후에 맞는 적정 줄눈간격을 6.0m~8.0m로 잠정적으로 제안하였다. 손석철 외(2010)는 국내 콘크리트 포장 줄눈간격을 슬래브 두께와 보조기층의 종류에 따라 제안하였다. 슬래브 두께 250mm에 대하여 4.0m~5.2m, 슬래브 두께 300mm에 대해서는 6.0m~7.4m로 줄눈간격을 제안하였으며, 분리막이 설치된 린콘크리트 보조기층 사용 시의 줄눈간격은 분리막이 설치되지 않은 린콘크리트 보조기층 사용 시의 줄눈간격보다 1.0m~1.1m 더 넓다고 제안하였다. 분리막 미설치 린콘크리트 보조기층을 제외한 나머지 보조기층(분리막 설치 린콘크리트, 분리막 설치 쇄석, 분리막 미설치 쇄석, 아스팔트)에서는 슬래브 두께가 변하여도 줄눈간격은 유사하게 계산된다고 보고하였다. Darter 외(1977)는 미국 미네소타 주와 미시간 주 도로 시험의 결과를 토대로, 슬래브 두께 203mm에 대한 줄눈간격이 7.6m를 넘어가면 횡방향 균열이 급격히 증가하였다고 보고하였다. 이상의 연구결과는 현재 우리나라에서 시공되는 일반적인 줄눈간격과 상당한 차이가 있다.

콘크리트 슬래브는 온도 및 습도에 의한 수평방향 거동은 물론 컬링 및 와핑 현상을 일으킨다. 이러한 거동은 보조기층과의 마찰을 유발하여 슬래브에는 인장응력이 발생하며, 줄눈 이외의 부분에서 임의 균열이 발생할 수 있다. 줄눈간격이 과대하면, 길어진 슬래브에 과도한

인장응력이 발생할 수 있다. 또한 줄눈폭 증가로 인해 하중전달률이 감소하고, 줄눈 채움재의 이탈 및 파손과 스플링 등의 다양한 손상이 발생할 수 있다. 반면 줄눈 간격이 과소할 경우, 늘어나는 줄눈의 수량에 의해 관련 공사비(줄눈 절단, 줄눈채움재, 다웰바)가 증가하고, 불연속면 개수의 증가로 승차감이 저하된다. 또한 줄눈부에 균열이 유도되지 않을 확률이 높아져 슬래브가 길어지는 효과가 있으므로 이로 인하여 과도한 인장응력이 발생할 수 있다(이승우, 2001). Green 외(1994)는 타설 후 콘크리트 슬래브의 수분 증발로 인한 초기 건조수축과 온도에 의한 수축, 팽창으로 인하여 컬링 및 와핑이 발생하고, 슬래브와 기층 간에 마찰이 작용하여 줄눈간격 4.0m~8.0m의 줄눈 콘크리트 포장에서 균열이 발생할 수 있다고 보고하였다.

본 연구에서 개발된 줄눈간격 설계방법은 공용성이 보장된 기존 콘크리트 포장의 최대인장응력(설계기준강도)을 설계대상지역의 최대인장응력과 비교하고 설계대상지역의 줄눈폭을 허용줄눈폭과 비교하여 줄눈간격을 결정하는 비교적 간단한 방법이다. 향후 추가적인 장기 추적조사를 통해 공용성을 확인할 필요가 있다.

2. 역학적 줄눈간격 설계순서

본 연구에서는 먼저, 설계기준구간을 결정하기 위해 국내 고속도로 콘크리트 포장 지역 중 환경적으로 가장 열악한 지역을 조사하였다. 일반국도 콘크리트 포장의 총 연장은 불과 수십 km에 불과하여 연구범위에서 제외하였다. 포장 슬래브의 인장응력을 유발하는 주요한 환경인자는 온도와 습도이다. 먼저, 지역에 상관없이 슬래브 두께가 300mm로 동일하다고 가정하였다. 안덕순 외(2004)가 개발한 프로그램으로 예측된 슬래브 깊이 따른 비선형 온도분포를 Mohamed 외(1996)의 모형에 대입하여 비선형 온도분포와 동일한 응력을 유발하는 슬래브 상하부 간 등가선형 온도차이를 구하였다. 습도의 영향을 고려하기 위해 Jeong 외(2012)가 ACI 209R-92 건조수축 예측모형을 참고하여 현장계측을 통해 제안한 모형으로 부등건조수축 양을 예측하고, 크리프까지 고려하여(박정우 외, 2009) 슬래브 상하부 간 온도차이로 환산하였다. 그리고 두 온도차이를 합한 후 최대 하향컬링(Bottom-up)을 발생시키는 양(+의 온도차이), 최대 상향컬링(Top-down)을 발생시키는 음(-)의 온도차이를 나타내는 지역을 표 1과 같이 찾았다. 여기서 양(+의 온도차이)란 슬래브 상부의 온도가 하부보

다 높다는 것을 의미한다.

표 1. 슬래브 상하부 간 온도차이가 큰 지역 순위

순위	양(+)의 온도차이	음(-)의 온도차이
1	남원 (17.1°C)	의성 (-20.3°C)
2	의성 (17.0°C)	원주 (-19.9°C)
3	밀양 (16.1°C)	보은 (-19.7°C)
4	부안 (15.9°C)	제천 (-19.6°C)
5	정읍 (15.7°C)	문경 (-19.5°C)
6	양평 (15.6°C)	밀양 (-19.4°C)
7	영천 (15.5°C)	산청 (-19.3°C)
8	해남 (15.4°C)	포항 (-19.2°C)
9	문경 (15.3°C)	남원 (-19.1°C)
10	거창 (15.2°C)	충주 (-19.1°C)

환경적으로 열악한 고속도로 구간들은 대부분 슬래브 두께 300mm에 줄눈간격 6m이나, 88고속도로 남원구간(주생2교~남원분기점)은 슬래브 두께 260mm에 줄눈간격 6m로 표 1의 환경적으로 취약한 지역에 속하면서 구조적으로도 가장 열악한 구간으로 확인되었다. 열악한 환경적 및 구조적 조건 하에서도 양호한 공용성을 나타내는 구간을 설계기준구간으로 정하기 위해 88고속도로 남원구간의 균열률을 조사하였다. 교통 및 환경 하중에 의한 인장응력으로 인해 주로 발생하는 파손이 횡방향 균열이기 때문이다. 1984년 준공된 1.5km 연장의 88고속도로 남원구간은 공용된지 25년째인 2009년에 균열률 1.89%로 국토해양부(2009)가 제시한 고속도로 균열률에 의한 공용성 판정기준(표 2)의 최고등급인 '매우 우수'를 만족시켰다(국토해양부, 2009; (주)로드코리아, 2009). 따라서 본 연구에서는 88고속도로 남원구간을 설계기준구간으로 결정하고, 이 구간에서 상향 및 하향컬링 시에 차량하중이 추가로 재하되어 발생된 최대인장응력을 설계기준강도로 결정하였다.

표 2. 고속도로 균열률에 의한 공용성 판정기준 (국토해양부, 2009)

균열률 (%)	판정기준
0~2	매우 우수
2~5	우수
5~10	보통
10~15	불량
15 초과	매우 불량

교통인자는 국내 고속도로 12차종 축하중 분포(건설교통부, 2003)로부터 슬래브 인장응력에 가장 큰 영향을 미치는 5종과 6종 차량의 95% 신뢰도 최대축하중을

사용하였다. 환경인자는 앞서 설명한 바와 같이 콘크리트 슬래브의 컬링 거동에 영향을 미치는 온도와 건조수축을 동시에 고려하였다. 포장구조 및 재료 물성은 기존 연구자들(건설교통부, 2005; 윤영미 외, 2008; 이승준, 2010; 임진선 외, 2010)과 콘크리트 포장 유한요소해석 프로그램인 EverFE 내의 추천값을 기초로 결정하였다. 이러한 인자들을 입력값으로 설계대상구간에 대한 유한요소해석을 실시하여 최대인장응력을 산출하고 설계기준구간의 설계기준강도와 비교하였다.

또한, AASHTO(1986)에서 제시한 줄눈폭 예측식을 사용하여 설계대상지역의 예측줄눈폭을 구하고 Jeong 외(2006)의 연구로부터 결정된 허용줄눈폭과 비교함으로써 줄눈간격을 검토하였다. 만일 예측된 줄눈폭이 허용줄눈폭을 초과할 경우에는 줄눈간격을 줄이고 유한요소해석을 다시 수행하도록 하였다. 그림 1은 이상에서 설명된 콘크리트 포장 줄눈간격 설계의 순서도이다.

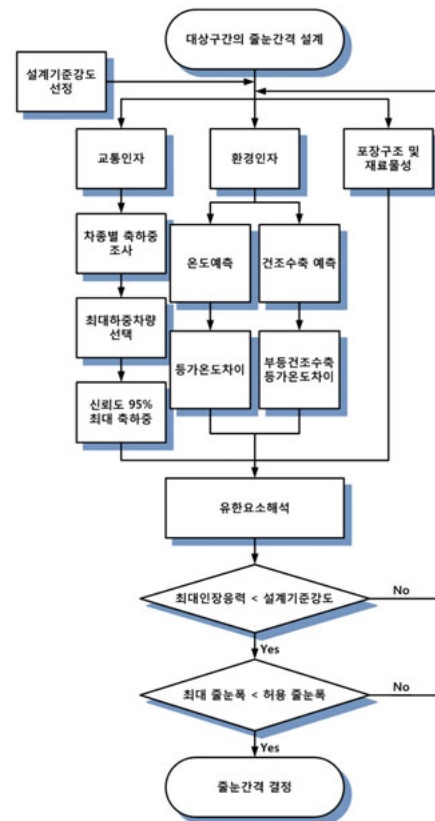


그림 1. 콘크리트 포장 줄눈간격 설계 순서도

3. 역학적 줄눈간격 설계방법

Davidson(2003)가 개발하고, 다른 프로그램과의 비교를 통하여 이미 검증된 마친 충분히 신뢰할 만한 수준의 유한요소 프로그램인 EverFE 2.24(정길수 외, 2008)

를 본 연구의 구조해석에 사용하였다. 교통 및 환경인자와 포장구조 및 재료물성을 입력하여 산출된 최대인장응력을 설계기준강도와 비교하여 역학적 줄눈간격 설계를 실시하였다.

3.1. 유한요소모형

3차원 유한요소해석에 사용된 모형은 그림 2와 같으며, 기층 위에 차량 주행방향으로 3개의 슬래브를 다웰바로 연결하였다. 슬래브와 기층은 20개의 절점을 갖는 직육면체 요소(20-noded brick element)로 구성하였고, 줄눈부 및 슬래브와 기층 간 접촉면은 16개의 절점을 갖고 두께가 없는 접촉면 요소(16-noded interface element)를 사용하였다. 슬래브 요소 사이에 다웰바의 빔요소(Embedded beam element)를 삽입하고 컨넥터로 슬래브의 절점과 연결하여 수직방향의 강성만을 갖도록 모형화하였으며, 노상은 8개의 절점을 갖는 Dense liquid 요소와 Tensionless 스프링 요소를 사용하였다(Davids, 2003).

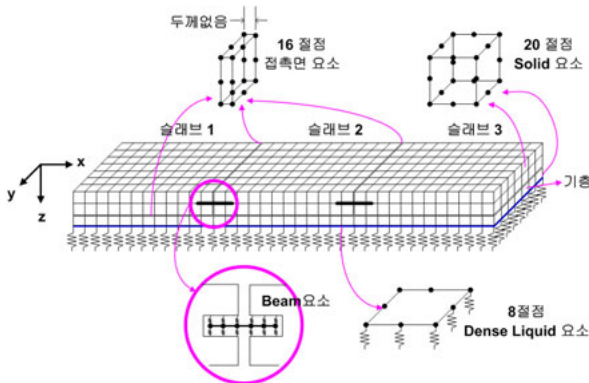


그림 2. 3차원 유한요소모형

3.2. 교통인자 정량화

교통인자로 사용할 차량하중은 교통량 조사 차종 분류 가이드(건설교통부, 2006)와 고속국도 차종별 축하중 분포(건설교통부, 2004)를 참고하였다. 차종에 상관없이 축종류 별 최대 축하중을 비교한 결과, 단륜단축은 100kN, 복륜단축은 105kN, 복륜복축은 211kN, 그리고 복륜삼축은 301kN이었다. 최대 윤하중은 최대 축하중을 차륜 수로 나누어 계산하였다. 그 결과, 단륜단축은 50kN, 복륜단축은 26kN, 복륜복축은 26kN, 그리고 복륜삼축은 25kN으로 계산되어, 단륜단축이 슬래브의 응력발생에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그림 3에서 보듯이, 고속도로 전체 12종 차종 가운데 6

종 차량의 단륜단축 하중이 가장 컸고, 5종 차량의 단륜단축 하중이 그 다음으로 컸다. 5종 차량의 최대 축하중이 6종에 비해 약간 작으나, 차량의 제원과 슬래브의 구조에 따라 최대인장응력은 더 클 수 있으므로 5종과 6종 차량을 설계에 사용하기로 결정하였다.

AASHTO(1986)에서는 도로포장 설계의 신뢰도를 50.0%~99.9%로 제안하고 있다. Texas 교통국(TxDOT)은 경험에 근거하여 등가단축하중(ESAL)이 500만회보다 많으면 강성포장 설계에 95%의 신뢰도를 사용해야 한다고 하였고(TxDOT, 2011), Darter 외(1996)는 예측 ESALs과 실제 ESALs을 신뢰도 95%에서 비교하였다. 본 연구에서도 표 3과 같이 5종 및 6종 차량의 누적빈도 95%에 해당되는 축하중을 축종류 별로 구하여 구조해석에 사용하였다.

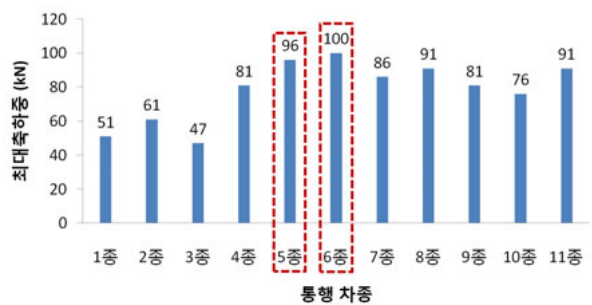


그림 3. 고속도로 차종별 최대 단륜단축 하중

표 3. 5종 및 6종 차량의 축종류 별 누적빈도 95% 축하중

차종	단륜단축(kN)	복륜단축(kN)	복륜복축(kN)
5종	76	-	179
6종	90	90	195

3.3. 환경인자 정량화

건조수축, 크리프, 열팽창과 같은 콘크리트의 재료적 특성이 온도 및 습도와 같은 환경적 요인에 영향을 받아 슬래브 상부와 하부 간에는 체적 변화에 차이가 생기므로 인해 상향 및 하향의 컬링이 발생된다. 이러한 컬링 거동은 자중이나 마찰 등에 의해 구속되므로 슬래브에는 인장응력이 발생된다. 그림 4는 슬래브의 단면을 나타낸 것으로 컬링 형상에 따른 인장응력 발생 위치를 보여준다. 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮거나 상부의 건조수축이 하부보다 큰 경우 상향컬링이 유발된다. 이 상향컬링이 구속되면 슬래브 상부에 인장응력이 발생되고, 이와 반대의 경우 슬래브 하부에 인장응력이 발생된다.

본 연구에서는 상향 및 하향컬링을 유발하는 슬래브 상하부 간 온도 차이를 안덕순 외(2004)가 개발한 포장 온도 예측 프로그램으로 계산하였다. 프로그램은 각 월의 대표일에 대하여 매 시간마다 슬래브의 온도를 깊이 에 따라 비선형으로 예측한다. 슬래브 내부의 비선형 온도분포와 동일한 응력을 유발하는 슬래브 상하부 간 선형 온도차이를 계산하기 위하여 Mohamed 외(1996)가 제안한 식 (1)과 식 (2)를 사용하였다.

$$\Delta T = A + Bz + Cz^2 + Dz^3 \quad (1)$$

여기서, ΔT 는 슬래브 특정 깊이와 중간 깊이 간의 온도 차이(°C), A, B, C, D 는 슬래브 내 비선형 온도 분포에 대한 3차 포물선의 계수, z 는 위쪽은 음, 아래쪽은 양으로 정의된 슬래브 중간 깊이부터 특정 깊이까지의 거리 (inch)이다.

$$\Delta T_{eq} = -12 \left(\frac{Bh}{12} + \frac{Dh^3}{80} \right) \quad (2)$$

여기서, ΔT_{eq} 는 등가선형 온도차이(°C), h 는 슬래브의 두께(inch)이다. 기상조건에 의하여 콘크리트 슬래브에는 온도 변화뿐 아니라 건조수축이 발생한다. 슬래브 상하부 간의 부등건조수축을 Jeong 외(2012)가 제시한 식 (3)의 모형을 사용하여 부등건조수축 등가선형 온도차이로 환산하였다.

$$\Delta T_{sh} = \frac{\alpha_h}{\alpha_c} \epsilon_{sr} \quad (3)$$

여기서, ΔT_{sh} 는 부등건조수축 등가선형 온도차이(°C), h 는 슬래브의 두께(mm), α_c 는 콘크리트의 열팽창계수 (/°C)이며, ϵ_{sr} 는 ACI 209R-92(ACI, 1997)에서 제안한 최종 건조수축 변형률이다. 박정우 외(2009)가 제시한 식 (4)의 모형으로 부등건조수축에 대한 크리프를 고려하였다.

$$\Delta T_{sh-cr} = \Delta T_{sh}(1 - \Phi) \quad (4)$$

여기서, ΔT_{sh-cr} 는 크리프를 고려한 부등건조수축 등가선형 온도차이(°C), Φ 는 응력감소율($\Phi = alt + b$, a 는 -1.775, b 는 0.6, t 는 재령(일))이다. 식 (2)의 등가선형 온도차이와 식 (4)의 크리프를 고려한 부등건조수축 등가선형 온도차이를 합하면 콘크리트 포장 슬래브의 컬링응력에 영향을 미치는 주요 환경인자인 온도, 건조

수축, 크리프를 모두 고려하게 된다.

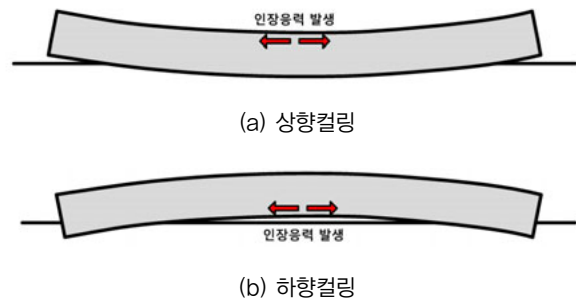


그림 4. 컬링형상에 따른 인장응력 발생 위치

3.4. 재료물성 결정

표 4에 보인 콘크리트의 탄성계수, 콘크리트 및 린콘크리트의 포아송비, 콘크리트의 단위중량, 하부 지지력 계수는 EverFE 프로그램에서 추천한 값이며, 콘크리트의 열팽창계수는 $1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$ 를 적용하였다(윤영미 외, 2008). 또한, 린콘크리트 기층의 탄성계수는 15GPa(건설교통부, 2005), 쇠석기층의 탄성계수는 0.5GPa(이승준, 2010)을 사용하였다. 표 5는 보조기층의 종류에 따른 슬래브와 보조기층 간 마찰강성과 초기 미끄럼 변위이다(임진선 외, 2010).

표 4. 유한요소해석을 위한 재료물성

물성	값
콘크리트 탄성계수	28GPa
콘크리트 포아송비	0.2
콘크리트 단위중량	2400kg/m ³
콘크리트 열팽창계수	$1.0 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$
린콘크리트 보조기층 탄성계수	15GPa
린콘크리트 보조기층 포아송비	0.2
쇠석 보조기층 탄성계수	0.5GPa
쇠석 보조기층 포아송비	0.2
하부 지지력 계수	0.03MPa/mm

표 5. 보조기층의 종류 별 마찰강성 및 초기 미끄럼 변위 (임진선 외, 2010)

보조기층 종류	마찰강성(MPa/mm)	초기 미끄럼 변위(mm)
린콘크리트(분리막)	0.002352	0.766
쇠석(분리막)	0.04755	0.04

3.5. 설계기준강도 결정

설계기준구간으로 결정된 88고속도로 남원구간은 주생2교에서 남원분기점 간의 연장 1.5km 구간이며, 슬래브 두께 260mm, 줄눈간격 6.0m, 두께 200mm의 쇠

석 보조기층으로 구성되었다(국토해양부, 2009; (주)로 드코리아, 2009). 앞서 설명된 식 (1)부터 식 (4)까지를 사용하여 설계기준구간의 슬래브 상하부 간 온도차이를 산출하였다. 설계기준구간의 슬래브 상하부 간 연중 최대 양의 등가선형 온도차이는 24.8℃, 최대 음의 등가선형 온도차이는 -10.2℃였으며, 크리프를 고려한 부등건조수축 등가선형 온도차이는 -8.5℃이었다. 등가선형 온도차이와 크리프를 고려한 부등건조수축 등가선형 온도차이를 합한 양의 온도차이는 16.3℃, 음의 온도차이는 -18.7℃로 계산되었다. 이상의 결과를 정리하면 표 6과 같다.

이와 같은 인자들을 입력값으로 사용하여 설계기준구간 콘크리트 포장에 대한 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과, 슬래브 내에 발생한 최대인장응력은 상향컬링 시 3.29MPa, 하향컬링 시 3.63MPa로 계산되어 이를 설계기준강도로 결정하였다. 상향컬링일 때의 인장응력이 하향컬링일 때보다 작았지만, 상향컬링일 때의 차량하중 재하 빈도가 더 많기 때문에, 본 연구에서는 두 경우 모두에 대해 검토하였다. 설계대상지역의 콘크리트 포장의 경우에도 이와 동일하게 유한요소해석을 실시하고 계산된 최대인장응력이 설계기준강도를 넘지 않을 경우에 한해서 다음 단계로서 줄눈폭을 검토하였다.

표 6. 설계기준구간의 슬래브 상하부 간 온도차이

구 간	등가선형(+) 온도차이(℃)	등가선형(-) 온도차이(℃)	부등건조수축 등가선형 온도차이(℃)	합산 (+) 온도차이(℃)	합산 (-) 온도차이(℃)
88고속도로 남원구간	24.8	-10.2	-8.5	16.3	-18.7

4. 경험적 줄눈폭 검토

줄눈간격이 늘어나면 인장응력이 증가할뿐만 아니라 줄눈폭도 벌어지게 되고 이로 인하여 채움재의 파손, 스폴링 등의 손상이 발생하게 된다. 또한 줄눈폭이 벌어짐으로 인해 골재 맞물림 효과가 감소하여 인접 슬래브 간의 하중전달 효율이 저하되고, 줄눈부에는 단차가 발생된다. 따라서, 앞서 설명된 역학적 방법에 이어 줄눈폭을 검토하는 경험적 방법이 추가적으로 수행되어야 한다.

AASHTO(1986)는 식 (5)의 줄눈폭 예측식을 제안하였으며, 여기서 ΔL 은 줄눈폭(mm), C 는 마찰 보정계수, L 은 슬래브 길이(mm), α_c 는 콘크리트 열팽창계수($1/^\circ\text{C}$), ΔT 는 연중 최대 슬래브 온도변화($^\circ\text{C}$), ϵ_{ush} 는 최

종건조수축 변형률이다. 최종건조수축 변형률은 식 (3)의 ACI 209R-92(ACI, 1997) 모형으로 구하였다.

$$\Delta L = C \times L \times (\alpha_c \Delta T + \epsilon_{ush}) \quad (5)$$

Jeong 외(2006)의 연구에서는 그림 5에서 보듯이, 줄눈 또는 균열이 5mm 이상으로 벌어지면 하중전달률이 급격하게 감소하며, 이때의 하중전달률이 약 80% 내외인 것으로 조사되었다. 이에 근거하여, 역학적 방법으로 결정된 줄눈간격에 대해 식 (5)로 예측된 최대줄눈폭이 허용줄눈폭 5mm를 초과하면 허용줄눈폭을 만족할 때까지 줄눈간격을 줄여 나갔다.

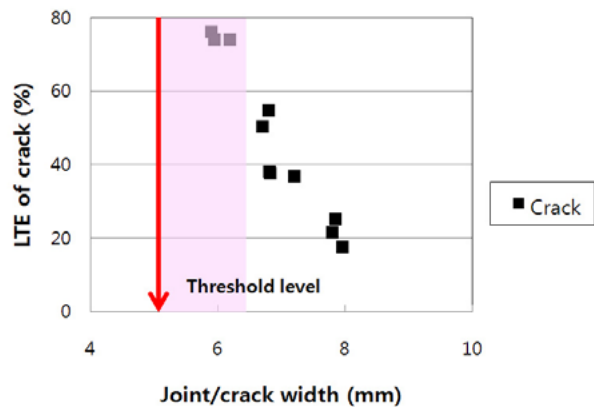


그림 5. 줄눈폭 또는 균열폭과 하중전달률의 상관관계 (Jeong 외, 2006)

5. 줄눈간격 설계 예

본 연구에서 개발된 줄눈간격 설계방법을 착공 예정인 함양-울산 고속도로 19공구, 21공구를 대상으로 줄눈간격 설계를 실시하였다. 우선, 슬래브 두께 280mm, 300mm, 330mm에 대해 줄눈간격을 7.0m부터 10.0m까지 1.0m씩 변화시키며 상향 및 하향컬링 시의 최대인장응력을 앞서 설명한 유한요소해석으로 구하였다. 계산된 각 공구의 최대인장응력이 설계기준강도를 초과하지 않는지 검토하여 줄눈간격을 정한 후 식 (5)에 의해 최대줄눈폭을 예측하고 허용줄눈폭과 비교하는 절차로 줄눈간격을 최종적으로 결정하였다.

표 7에서 보듯이, 함양-울산 고속도로 19공구는 슬래브 두께가 280mm인 경우 줄눈간격 8.0m에 대한 상향컬링 시의 최대인장응력이 설계기준강도를 초과하여 7.0m가 최적의 줄눈간격으로 계산되었다. 슬래브 두께가 300mm와 330mm로 두꺼워지면서 응력보다는 줄눈

폭이 줄눈간격 설계에 영향을 미쳐 각각 8.0m와 9.0m가 최적의 줄눈간격으로 결정되었다. 표 8에서 보듯이, 21공구의 경우에도 슬래브 두께가 얇을수록 인장응력이 줄눈간격 결정에 영향을 미쳐 슬래브 두께가 280mm인 경우 응력 검토로 정해진 7.0m가 최적의 줄눈간격으로 결정되었다. 슬래브 두께가 300mm인 경우에는 인장응력과 줄눈폭 모두에 의해 줄눈간격 8.0m가 최적으로 설계되었고 슬래브 두께가 330mm로 두꺼운 경우에는 줄눈폭 검토에 의해 9.0m가 최적의 줄눈간격으로 설계되었다. 표

표 7. 함양 - 울산고속도로 19공구 줄눈간격 설계 결과

슬래브 두께 (mm)	줄눈간격 (m)	컬링형상	최대인장 응력(MPa)	최대줄눈폭 (mm)	비고
280	7.0	상향	3.20	4.1	OK
		하향	3.32		
	8.0	상향	3.31 > 3.29	4.6	NG
		하향	3.37		
300	8.0	상향	3.12	4.6	OK
		하향	3.28		
	9.0	상향	3.24	5.1 > 5.0	NG
		하향	3.35		
330	9.0	상향	3.02	5.0	OK
		하향	3.17		
	10.0	상향	3.16	5.6 > 5.0	NG
		하향	3.31		

표 8. 함양 - 울산고속도로 21공구 줄눈간격 설계 결과

슬래브 두께 (mm)	줄눈간격 (m)	컬링형상	최대인장 응력(MPa)	최대줄눈폭 (mm)	비고
280	7.0	상향	3.28	4.2	OK
		하향	3.46		
	8.0	상향	3.47 > 3.29	4.7	NG
		하향	3.52		
300	8.0	상향	3.29	4.6	OK
		하향	3.39		
	9.0	상향	3.43 > 3.29	5.2 > 5.0	NG
		하향	3.48		
330	9.0	상향	3.17	5.0	OK
		하향	3.31		
	10.0	상향	3.33 > 3.29	5.5 > 5.0	NG
		하향	3.47		

6. 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법의 검증

한국도로공사는 2003년에 경부고속도로 부산-언양

확장공사 제 3공구 (내송IC-구서IC) 콘크리트 포장 구간에서 슬래브 두께 330mm, 줄눈간격 8.0m로 연장 688m에 걸쳐 시험시공을 실시하고 2005년에 개통하였다(국토해양부, 2009; 한국도로공사, 2004). 본 연구에서 개발된 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법을 검증하기 위하여 시험시공 구간의 줄눈간격을 다시 설계하였다. 표 9와 같이, 줄눈간격 8.0m, 9.0m, 10.0m에 대하여 유한요소해석으로 구한 최대인장응력은 상향컬링 시와 하향컬링 시 모두 설계기준강도를 만족하였다. 줄눈폭을 검토한 결과, 식 (5)로 예측된 줄눈폭은 줄눈간격이 8.0m일 때만 허용줄눈폭 5mm 미만이었고 9.0m와 10.0m일 때는 허용줄눈폭을 초과하였다. 결과적으로, 과거에 시험시공된 구간의 줄눈간격 8.0m는 본 연구에서 개발된 역학적-경험적 설계에 의해서도 최적인 것으로 나타났다.

한국도로공사의 PMS에서 공용년수 6년이 되는 2011년에 조사된 본 구간의 균열률은 0.01%로 매우 낮아 ((주)로드코리아, 2009) 표 2의 공용성 판정기준 '매우 우수'를 충분히 만족시켰다. 여기서, 균열률은 줄눈간격에 영향을 받는 균열인 횡방향 균열을 포함한 각종 균열의 길이를 포장 전체면적으로 나눈 후 백분율로 나타낸 것이다. 이로써, 본 연구에서 개발된 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법의 적절성이 검증되었다.

표 9. 경부고속도로 부산 - 언양 제 3공구 시험시공 구간 줄눈간격 산정 결과

슬래브 두께(mm)	줄눈간격 (m)	컬링 형상	최대인장 응력(MPa)	최대줄눈폭 (mm)	비고
330	8.0	상향	2.81	4.9	O.K.
		하향	1.97		
	9.0	상향	2.93	5.5 > 5.0	N.G.
		하향	2.03		

7. 결론

콘크리트 도로포장의 줄눈간격을 최적으로 결정하기 위하여 역학적-경험적 설계방법을 개발한 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

1. 일정 수준 이상의 공용성을 보이는 국내 콘크리트 포장 구간 중 환경적 및 구조적으로 가장 취약한 88고속도로 남원구간에 대해 유한요소해석으로 구한 최대인장응력을 설계기준강도로 결정하고, 기존 연구를 참고하여 하중전달률이 급격히 낮아지는 5mm의 줄눈폭을 허용줄눈폭으로 결정하였다.

2. 교통인자, 환경인자, 포장구조, 그리고 재료물성을 입력값으로 하는 유한요소해석을 통해 대상구간 콘크리트 포장 슬래브의 최대인장응력이 설계기준강도의 범위 내인 최적의 줄눈간격을 찾아낸 후 줄눈폭 예측식으로 계산된 최대줄눈폭을 허용줄눈폭과 비교하는 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법을 개발하였다.
3. 개발된 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법으로 함양-울산 고속도로 19공구와 21공구에 대해 슬래브 두께 별 줄눈간격을 산정한 결과, 두 공구 모두 슬래브 두께 280mm, 300mm, 330mm에 대해 각각 7.0m, 8.0m, 9.0m의 줄눈간격이 최적이라는 결과를 얻었다. 슬래브 두께가 얇은 경우 줄눈간격은 줄눈폭보다 인장응력에 의해 결정되었으나 슬래브 두께가 두꺼워지면서 줄눈폭이 더 큰 영향을 미쳤다.
4. 기존보다 넓은 8.0m의 줄눈간격으로 시공된 경부고속도로 부산-언양 확장공사 제 3공구의 시험시공 구간간의 줄눈간격을 본 연구에서 개발된 방법으로 설계한 결과, 시험시공과 동일한 8.0m가 최적의 줄눈간격으로 결정되었다. 또한, 공용 후 6년이 지난 시점까지 매우 낮은 균열률을 나타내 본 연구에서 개발된 역학적-경험적 줄눈간격 설계방법의 적정성이 검증되었다.
5. 향후 국내 전 지역을 몇 개의 권역으로 나누어 도로 등급, 포장재료, 포장두께 등에 따라 최적의 줄눈간격을 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 주식회사 다산컨설팅과 인하대학교의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 연구에 도움을 주신 한국도로공사에 감사드립니다.

참고 문헌

- 건설교통부 (2003) 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 : 콘크리트 포장 설계법 개발(1단계 2차년도 최종), 건설교통부.
- 건설교통부 (2004) 콘크리트 포장설계법 개발 : 한국형 포장설계법 1단계 3차년도 최종보고서, 건설교통부.
- 건설교통부 (2005) 국내 노후 콘크리트 포장의 원위차파쇄 기층화 공법 개발, 건설교통부.
- 건설교통부 (2006) 교통량 조사 차종 분류 가이드, 건설교통부.
- 국토해양부 (2009) 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구 : 포장 장기 공용성 연구, 국토해양부.

- (주)로드코리아 (2009) 최종보고서 고속도로 포장상태 조사 및 분석 (HPMS 부문), (주)로드코리아.
- 박정우, 정영도, 임진선, 정진훈 (2009) "콘크리트 슬래브 건소수축응력 감소에 관한 초기 연구", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 11권, 제 4호, pp. 87-94.
- 손석철, 임진선, 남영국, 정진훈 (2010) "국내 줄눈 콘크리트 포장의 줄눈간격 연구", 한국도로학회 2010년 봄 학술대회 논문집, 한국도로학회, pp. 89-97.
- 안덕순, 박희문 (2004) "현장 계측자료를 이용한 포장체 온도예측모델 개발 연구", 한국도로학회 2004년 학술대회 논문집, 한국도로학회, 제 6권, pp. 17-20.
- 양성철, 홍승호 (1999) "파괴역학을 이용한 콘크리트 포장체의 해석", 제 16회 도로기술연구성과 발표회 논문집 : 포장분야, 한국건설기술연구원.
- 윤영미, 서영찬, 김형배 (2008) "콘크리트 포장의 초기 열팽창계수 및 건조수축 측정 연구", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 10권, 제 1호, pp. 117-122.
- 이승우 (2001) "콘크리트포장의 줄눈의 잠김에 대한 연구", 한국도로학회논문집, 한국도로학회, 제 3권, 제 1호, pp. 165-176.
- 이승준 (2010) 삼축압축시험을 이용한 쇄석기층재료와 순환 골재의 강성도 평가, 동의대학교 석사학위 논문.
- 임진선, 손석철, 유주호, 정진훈 (2010) "콘크리트 포장 슬래브와 보조기층 간 마찰특성 모형화", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 12권, 제 4호, pp. 211-218.
- 전범준, 이승우 (2005) "줄눈 콘크리트포장의 적정 줄눈간격에 대한 연구", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 7권, 제 4호, pp. 69-77.
- 정길수, 김인태, 류성우, 조운호 (2008) "유한 요소법을 이용한 줄눈 콘크리트 포장 응력식 개발", 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, 제 10권, 제 2호, pp. 167-181.
- 한국도로공사 (2004) 콘크리트 포장 확장부의 현장조사 및 계측, 한국도로공사 도로교통 연구원.
- AASHTO (1986) *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
- ACI Committee 209 (1997) *Prediction of Creep, Shrinkage, and Temperature Effects in Concrete Structures ACI 209R-92*, ACI Manual of Concrete Practice, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
- Darter, M. I. and Barenberg, E. J. (1977) "Design of Zero-Maintenance Plain Jointed Concrete Pavement", *Report FHWA-RD-77-111*, Vol. 1, Federal Highway Administration.
- Darter, M. I., Owusu-Antwi, E., and Ahmad, R. (1996) "Evaluation of AASHTO rigid pavement design model using long-term pavement performance data base" *Transportation Research Record : Journal of the transportation Research Board 1525*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 57-71.
- Daivids, W. G. (2003) *EverFE theory manual*, University of Maine,

- Orono, pp. 1-18.
- Green, R. L. and Morse, A. A. (1994) "Pavement Design and Rehabilitation", *Handbook in Highway Engineering*(Brockenbrugh R. L. and Boedecker K. J. (eds)), McGraw-Hill, Washington.
- Jeong, J. H., Lee J. H., Suh, Y. C., and Zollinger, D. G (2006) "Effect of slab curling on movement and load transfer Capacity", *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1947*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 34-42.
- Jeong, J. H., Lim, J. S., Sun, R. J., and Zollinger, D. G. (2012) "Modeling of Differential Shrinkage for Pavement Design" *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Transport*, in press.
- Mohamed, A. R. and Hansen, W. (1996) "Effect of Nonlinear Temperature Gradient on Curling stress in Concrete Pavement" *Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board 1568*, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp. 65-71.
- TxDOT (2011) *Pavement Design Guide*, Texas Department of Transportation.

접 수 일 : 2011. 8. 11

심 사 일 : 2011. 8. 14

심사완료일 : 2011. 11. 15