연속철근 콘크리트궤도의 횡균열이 열차 하중에 의한 응력 분포에 미치는 영향

Effects of Transverse Cracks on Stress Distributions of Continuously Reinforced Concrete Tracks Subjected to Train Loads

배성근 · 최성철 · 장승엽* · 차수원

Sung Geun Bae · Seongcheol Choi · Seung Yup Jang · Soo Won Cha

Abstract The restrained volume changes of concrete due to variations of temperature and moisture produce transverse cracks in continuously reinforced concrete tracks (CRCTs). Such cracks are known to significantly affect the behaviors and long-term performance of CRCT. To investigate the effects of the transverse cracks on the behavior of CRCT and to develop more reasonable maintenance standards for cracks, in this study, the stress distribution of the track concrete layers (TCL) and the hydraulically stabilized base course (HSB) with transverse cracks were numerically predicted by a three dimensional finite element analysis when CRCT was subjected to train loads. The results indicate that the bending stresses of TCL and vertical stresses at the interfaces between TCL and HSB increased as the cracks were deepened. In addition, vertical stresses were locally concentrated near reinforcing steel in cracks in TCL when full-depth cracks developed, which may lead to punch-outs in CRCTs. Comparably, the effects of crack width and spacing were not as significant as crack depth. This study indicates that ensuring the long-term performance of CRCTs requires adequate maintenance not only for crack width and spacing but also for crack depth. Our results also show that locating HSB joints between sleepers is beneficial to the long-term performance of CRCTs.

Keywords : Continuously reinforced concrete track (CRCT), Finite element analysis, Transverse crack, Stress distribution, Long-term performance

초 록 연속철근 콘크리트궤도에서는 온도 및 수분 변화에 따른 구속응력에 의해 횡균열이 발생한다. 이러한 균열은 연속철근 콘크리트궤도의 거동과 장기 공용성에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 횡균열이 콘크리트궤도의 거동에 미치는 영향을 분석하고 균열 관리 기준을 보다 합리적으로 결정하기 위해, 이 연구에서는 연속철근 콘크리트궤도에 열차하중이 작용할 때 균열이 발생한 궤도 슬래브(TCL)와 기층(HSB)의 응력 분포를 3차원 유한요소해석 모델을 이용하여 예측하였다. 해석 결과에 따르면 균열 깊이가 증가할 경우 TCL의 휨응력과 TCL-HSB 경계부 수직응력이 증가하고, 균열이 슬래브를 관통할 경우 TCL 균열부에서 철근 주변에 국부적으로 수직 응력이 커져 장기적으로 펀치아웃 발생 가능성이 커질 수 있다. 반면 균열폭과 간격의 영향은 균열 깊이에 비해 크지 않은 것으로 나타났다. 따라서 균열폭과 간격만 관리하는 것보다는 균열 깊이를 동시에 관리할 필요가 있다. 또한 HSB 수축 줄눈의 위치를 침목 사이에 위치하도록 하는 것이 장기 공용성 확보에 더 유리하다.

주요어 : 연속철근 콘크리트궤도, 유한요소해석, 횡균열, 응력 분포, 장기 공용성

1. 서 론

궤도의 안정성을 높이고 유지보수를 줄이기 위해 최근 고속철도나 일반철도의 고속화 구간에서는 콘크리트궤도를 활발히 적용하고 있다. 우리나라에서 고속철도에 적용되고 있는 콘크리트궤도는 대부분 독일의 Rheda 공법을 도입한 것으로 토공구간에 적용된 구조는 연속철근 콘크리트궤도

(continuously reinforced concrete track, 이하 “CRCT”)이다. CRCT는 도로에서 쓰이고 있는 연속철근 콘크리트 포장(continuously reinforced concrete pavement, CRCP)과 같이 조인트가 없이 슬래브를 열차 진행 방향으로 연속적으로 타설하는 공법으로, 콘크리트 내부의 철근 역시 연속적으로 배근된다. 따라서 콘크리트 수화열이나 공용 중 온도 변화, 콘크리트 수축(shrinkage) 등에 의한 콘크리트의 체적 변화가 레일 및 하부구조와의 마찰 등에 의해 구속되면서 상당한 수준의 인장응력이 유발되며, 횡균열(transverse crack)이 매우 촘촘하게 발생하게 된다(Fig. 1 참조)[1].

일반적으로 콘크리트궤도에서 균열은 두 가지 목적에서 제

*Corresponding author.

Tel.: +82-31-460-5302, E-mail : syjang@krii.re.kr

©The Korean Society for Railway 2014

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2014.17.5.355>

어되어야 한다. 그 하나는 콘크리트 내부의 철근 부식을 방지하기 위한 것이고, 다른 하나는 균열부에서 충분한 하중 전달 성능을 확보하기 위한 것이다. 균열폭이 크면 외부에서 수분이나 염분이 더 쉽게 철근 위치까지 침투하여 철근 부식의 위험이 증가하며, 균열면에서 골재 맞물림(aggregate interlock) 효과가 감소하여 하중 전달 성능이 떨어진다. 철근의 파단이나 하중 전달 성능의 감소는 모두 균열부에서의 펀치아웃이나 스포링(spalling)을 초래할 수 있다. 그러나 연속철근 콘크리트궤도에서 철근은 휨 보강의 목적이 아니라 균열 제어의 목적으로 단면의 중심에 배근되므로 피복두께가 상당히 클 뿐 아니라 도로 포장이나 교량 구조물과 달리 제설염(deicing slat)을 사용하지 않으므로 철근 부식에 대한 위험이 상대적으로 낮다. 따라서 콘크리트궤도에서는 하중 전달 성능에 초점을 두고 균열폭을 제한하는 것이 바람직하다.

Eisenmann and Leykauff[2]에 따르면 균열부에서의 하중 전달 성능은 골재 맞물림(aggregate interlock) 효과와 철근이나 다웰바에 의한 다웰 작용(dowel action)에 크게 의존하

며, 철근이 연속적으로 배근된 연속 철근 콘크리트궤도에서는 균열부에서도 충분한 하중 전달 성능을 확보할 수 있다. 그러나, 균열부 주변의 응력이 증가하면서 장기적으로 피로 파괴나 국부적인 손상이 발생하여 목표 내구수명을 확보하지 못할 수 있으며, 지반 침식에 의해 지지력 손실이 발생하면 이러한 파괴가 더욱 빠르게 진전될 수 있다. 도로 포장의 예를 보면 균열부에서 펀치아웃(punch-out)이나 스포링과 같은 국부적인 파손이 유발된다[3].

그러나 도로 포장의 경우와 비교하여 철도 콘크리트궤도의 균열부에서 응력 분포나 손상 발생 메커니즘을 검토한 사례는 거의 없다. 콘크리트궤도는 레일을 통해 하중이 분배되어 전달되므로 직접 윤하중이 작용하는 도로 포장에 비해 하중이 분산되어 작용하는 반면, 단일 윤하중의 크기는 차량 하중보다 적어도 2~3배 가량 크기 때문에 도로 포장과는 응력의 크기나 분포에서 상당한 차이를 보일 것으로 예상된다.

따라서 이 연구에서는 콘크리트궤도의 균열 관리 방안 확립을 위해 횡균열이 콘크리트궤도의 열차하중에 의한 슬래

(a) Basic structure of CRCT

(b) Cracks developed in CRCT

Fig. 1 Structure of CRCT and examples of cracks

브와 기층의 응력 분포에 미치는 영향을 파악하기 위해 3차원 유한요소 해석 모델을 이용하여 균열 유무와 균열 깊이, 폭, 간격, 그리고 하부 기층의 수축 줄눈 위치 등에 따른 영향을 분석하고, 이것이 콘크리트 궤도의 설계와 균열 관리에 미치는 시사점에 대해 논하였다.

2. 해석 모델

토공구간 CRCT(Rheda-KCT2)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 FPL, HSB, TCL, 침목으로 구성되며, TCL 중심에 약 0.8~0.9%의 철근을 배근하고, HSB는 약 5m 간격의 수축 줄눈(contraction joint 또는 saw-cut joint)을 둔다[1,4-5].

CRCT의 응력 분포를 해석하기 위해 상용 유한요소 해석 프로그램인 DIANA [6]를 이용하여 3차원 유한요소로 연속철근 콘크리트궤도를 모델링 하였다. 경부고속철도에 적용된 Rheda 궤도의 설계에 따라 Fig. 2와 같이 형상 및 치수를

를 적용하였고, 각 구성 요소에 적용된 요소의 종류와 재료 특성은 Table 1과 같이 가정하였다[5].

Fig. 2에 나타난 바와 같이 궤도 단면의 1/2를 모델링 하였다. TCL과 HSB의 대칭면에는 수직방향의 자유도만 허용하였고, TCL과 HSB 양단의 경계조건은 평면 인터페이스 요소를 사용하여 수직방향과 수평방향으로 선형 스프링 특성을 적용하고, 회전은 구속하지 않았다. 경계면에서의 스프링 강성을 결정하기 위해 Fig. 3과 같이 길이가 매우 긴 슬래브에 하중을 재하하여 처짐과 중앙부 슬래브 응력을 구한 후, 길이 7.8m의 슬래브 양 단의 스프링 강성값을 변화시키면서 여러 차례 반복계산을 수행하여 두 해석결과가 유사하게 되는 스프링 강성값을 결정하였다. 이렇게 결정된 수직 및 수평방향의 스프링계수는 각각 0.06N/mm³과 1.0N/mm³이다(배성근 등 참조[1]).

HSB-TCL, HSB-FPL의 경계면 특성과 철근과 콘크리트 부착 특성을 Fig. 4와 같이 가정하였다[1,2,7,8]. HSB-TCL 경

Table 1 Element types and properties of CRCT

Components		Element type	Strength [†] (MPa)	Elastic of modulus (MPa)	Poisson's ratio
Sleeper concrete		Solid brick element	55	3.97×10 ⁴ *	0.17
TCL	Concrete	Solid brick element	30	3.36×10 ⁴ *	0.17
	Steel rebar(D19)	3D Beam element	400	2.00×10 ⁵	0.3
HSB concrete		Solid brick element	15	2.84×10 ⁴ *	0.17

Note: [†]for concrete, design compressive strength of concrete (f_{ck}); for steel, yield strength of steel (f_y)

*calculated based on CEB-FIP Model Code 1990[9]

Fig. 2 Schematics of finite element (FE) model of continuously Reinforced Concrete Track (CRCT)(1/2 model)

Fig. 3 Comparison of deflections of long and short CRCTs

계면은 수평 방향으로의 수평력이 마찰저항을 초과할 때 슬립 발생을 허용하는 bilinear 하중-변위 특성을 나타내고 수직 방향으로의 선형 스프링 특성을 나타내는 인터페이스 요소를 적용하였다. TCL과 HSB 사이의 수직 강성은 상대변위를 방지할 만큼 충분히 크게 가정하였다. 그리고 FPL층은 별도로 모델링하지 않고, 스프링으로 대체하였다. 스프링 특성은 Fig. 4(b)와 같이 수평방향으로는 임진선 등[7]의 실험결과를 토대로 강성값과 한계 변위를 설정하였고, 수직방향으로는 아래 식 (1)과 같이 Eisenmann and Leykauf[2]가 제시한 모델을 이용하여 계산한 압축 수직강성을 적용하였으며, 인장 수직강성은 0으로 적용하여 인장력이 작용할 때

는 HSB와 FPL의 분리를 허용할 수 있도록 하였다.

$$k_{FPL,v} = \frac{E_u}{h_{eq}} = \frac{E_u}{0.83h_1\sqrt{\frac{E_u}{E_1}} + ch_2\sqrt{\frac{E_u}{E_2}}} \quad (1)$$

여기서, E_u 는 FPL층의 탄성계수, E_1 , E_2 는 각각 TCL과 HSB층 탄성계수, h_1 , h_2 는 각각 TCL과 HSB층 두께, c 는 TCL과 HSB층간의 결합특성을 나타내는 상수로 역청질 결합의 경우, 0.9, 수정성 결합의 경우 0.83이다. 또한, 철근과 콘크리트 부착 특성은 김성민 등[8]의 연구에서 제시된 Fig. 4(c)와 같은 부착 모델을 적용하였다.

균열에 따른 응력 분포의 변화를 검토하기 위해서는 균열면에서의 전단 응력-변위 관계를 반영해야 한다. 일반적으로 균열은 골재의 경계면을 따라 형성되므로 골재 간의 맞물림 작용으로 하중을 전달하게 된다. 따라서 균열폭이 증가할수록 전단 강성이 낮아진다(Wattar[10]). 이러한 영향을 고려하기 위해 여기서는 Fig. 4(d)에 나타낸 Wattar[10]의 모델로부터 균열폭에 따른 균열면에서의 전단 강성을 산정하고, 계산된 전단 강성값을 갖는 선형의 인터페이스 요소로 균열면의 거동을 모사하였다. 실제의 전단 응력-변위 관계는 한계 변위 이하일 때는 선형에 가깝지만 한계 변위에 도달하면 응력은 증가하지 않고 슬립이 증가하는 형태로 나타나지만, 여기서는 미소 변위의 조건을 전제로 선형으로 가정하였다.

(a) TCL-HSB interface (Lim et al.[7])

(b) HSB-FPL (Lim et al.[7])

(c) Steel-concrete bond model (Kim et al.[8])

(d) Model for Stiffness of cracked surface(Wattar[10])

Fig. 4 Models for stiffness of interface elements

Fig. 5 Loads on sleepers

열차 하중이 레일과 레일체결장치에 의해 분배되어 침목에 전달되므로 레일을 연속 Winkler spring으로 지지하는 단일 보 모델로부터 KTX 열차 축 하중에 의해 침목에 작용하는 하중을 Zimmermann 식[11]을 이용하여 계산한 다음 각 해당 침목에 작용시켰다(Fig. 5). 이 때 레일 종류는 UIC 60, 레일 지지 간격은 650mm로 하고, 레일 체결장치의 스프링계수는 40kN/m로 가정하였다. 최대응력이 발생하는 경우를 고려하여 수축 줄눈이 있는 침목 바로 위에 열차 축 하중이 놓이도록 하였다. 하중은 1/2 모델인 점을 고려하여 좌우 대칭으로 작용하고, 충격계수는 설계에서 적용하고 있는 1.5를 적용하였다.

3. 결과 및 분석

3.1 TCL 균열이 없는 경우

TCL에 균열이 없는 경우 열차하중 재하 시 CRCT 응력 분포를 Fig. 6에 나타냈다. Fig. 7은 해석 모델 중심부 위치에서 A, B, C 각 단면에서의 응력 분포를 나타내고 있다. 여기서 section A는 HSB 수축 줄눈 위치, section B는 침목과 TCL의 경계면, section C는 침목 사이의 중앙부를 나타내며(Fig. 3 참조), (+)가 인장응력을, (-)는 압축응력을 나타낸다.

해석 결과를 보면 TCL의 최대 응력은 횡, 수직, 종 방향 모두 해석모델의 중앙부이자 열차 축 하중이 위치하는 HSB 수축 줄눈 위치에서 발생하고 있다. 다른 또 하나의 축 하중이 작용하는 위치보다 상대적으로 응력이 더 큰 것은 수

축 줄눈 위치에서 HSB 층의 처짐이 불연속점이 되기 때문이라고 판단된다.

종방향 응력이 횡방향 응력에 비해 더 큰 응력이 발생하고 있음을 알 수 있는데, 이 결과는 Table 2에 나타난 Westerggard 해를 이용한 해석 결과[4]와는 다른 경향을 보여 주는 것이다. Westerggard 해에서는 HSB층에 있는 수축 줄눈의 영향을 정확히 고려할 수 없기 때문에 HSB층을 균열이 발생한 상태로 가정하여 탄성계수를 50% 낮춰서 적용한다. 따라서 TCL의 종방향과 횡방향 응력이 모두 증가하는 것으로 나타난다. 반면, 실제 수축 줄눈은 횡방향으로 형성되어 있기 때문에 수축줄눈 위치에서는 종방향 응력만 증가하고 횡방향 응력의 증가는 크지 않다는 것을 알 수 있다. 따라서 HSB 수축 줄눈의 영향을 고려한다면 종방향 응력이 장기적으로 휨 피로파괴에 더 지배적인 영향을 미칠 것으로 예상된다. 그러나, Westerggard 해를 이용한 계산 결과가 유한 요소 해석에 의한 계산 결과보다 더 크기 때문에 설계에서는 줄눈의 영향을 고려했을 때와 유사한 수준의 응력이 고려된다.

TCL과 HSB의 경계면 근처에서 종방향 및 횡방향 응력의 분포가 불연속으로 나타난다. 즉, TCL 하면은 인장응력이 발생하는 반면, HSB 상면은 압축응력이 발생하고 있다. 따라서 TCL과 HSB 경계면에서 상대 변위와 전단 응력이 유발된다. 이는 TCL과 HSB 간의 부착 특성을 Fig. 4에 나타난 바와 같이 선형 탄성-완전 소성의 상태로 가정하고 있기 때문이다. 그러나 임진선 등[7]의 실험에서는 분리막을 사용하지 않은 콘크리트 기층 위에 콘크리트 슬래브를 타설한 경우 최대 실험 하중까지도 기층과 슬래브의 분리가 발생하지 않아 증장비를 이용하여 강제로 분리시킨 후에 하중-슬립 특성을 측정할 수 있었다. 본 연구에서 적용한 인터페이스 모델은 분리가 발생한 후의 하중-슬립 특성을 적용한 것이므로 Table 2의 결과와 비교해 보면 완전 부착 상태보다 TCL 인장 응력이 더 크게 발생하는 비부착 상태에 가까운 결과를 보여준다는 것을 알 수 있으며, 따라서 이 해석 결과는 실제보다는 다소 보수적인 결과라고 볼 수 있다.

수직 방향 응력 역시 HSB 수축 줄눈 위치의 TCL과 HSB 줄눈 경계면에서 최대 응력이 발생하지만, 수축 줄눈에서 멀어지면서 급격히 감소하여 Section B와 C에서는 응력이 전혀 발생하지 않았다. 즉, HSB층 처짐의 불연속점인 수축 줄

Fig. 6 3-D contour of stress of CRCT (uncracked TCL)

Fig. 7 Stress distribution of TCL and HSB at cross-section (uncracked TCL)

Table 2 Comparison of maximum stress calculated by Westergaard equation [4] and finite element analysis

Components	Maximum tensile stress(MPa)					
	Westergaard(Bonded)		Westergaard(Unbonded)		FE analysis	
	Longitudinal	Transverse	Longitudinal	Transverse	Longitudinal	Transverse
TCL	0.07	0.07	0.92	1.03	1.00	0.40
HSB	0.35	0.39	0.49	0.54	0.24	0.23

눈 위치에서만 국부적으로 인장응력이 집중된다는 것을 알 수 있다. 인장응력이 두 층 간의 인장 부착강도를 초과하면 TCL과 HSB의 분리(debonding)가 발생할 수 있다. 문헌[12]을 참조하면 두 콘크리트 간의 인장 부착강도는 표면 처리 상태에 따라 다르지만 콘크리트 압축강도의 대략 5% 내외로 추정해 볼 수 있다. 그렇다면 인장 부착강도는 HSB층 압축강도 12MPa의 5%인 0.6MPa정도가 되고, 최대 수직 응력 0.74MPa에서 곡선부의 하중 증가(통상 20%)를 고려한다면 동적 응력은 $0.74 \times 1.2 = 0.89\text{MPa}$ 정도까지 증가되므로 부착강도를 초과할 가능성이 있다.

3.2 TCL 균열이 있는 경우

TCL에 균열이 발생한 경우 응력 분포의 차이를 살펴보기 위해 Fig. 8과 같이 TCL의 균열을 고려하여 모델링 하였다. 현장조사 결과에 따르면 TCL의 균열은 거의 대부분 침목과 TCL 경계면을 따라 발생하며, TCL 표면에서 발생하여 아래로 발전해 가는 패턴을 보여 준다[1]. 따라서 모델에서 모든 균열은 침목과 TCL 경계면에서 발생하는 것으로 가정하였다. 균열 깊이에 대한 영향을 분석하기 위해서 균열이 TCL 중심 위치까지 진전한 경우와 균열이 TCL 전 깊이를 관통하는 경우를 각각 모델링 하였다. 이 때 균열폭은 설계 목

Fig. 8 FE Model for CRCT with cracked TCL

표값인 0.5mm를 기본으로 하고, 균열이 TCL의 전 두께를 관통한 경우에는 균열폭의 영향을 분석하기 위해 균열폭을 0~2.0mm 범위에서 다르게 적용하였다. 또한 균열 간격에 따른 영향을 분석하기 위해 TCL 균열 간격을 650~1950mm 범위에서 변화시켰다(Fig. 8 참조).

3.2.1 균열 깊이의 영향

Fig. 9와 10은 균열폭이 0.5mm이고, 균열이 TCL을 관통

한 경우(full-depth crack)와 TCL 중심 위치까지 진전한 경우(half-depth crack)의 각 단면에서의 응력 분포를 보여주고 있다. 최대 응력의 발생 위치는 균열이 없는 경우와 동일하게 HSB 수축 줄눈 위치인 section A에서 발생하며, 균열이 없는 경우(Fig. 7)에 비해 TCL의 응력이 증가했음을 알 수 있다. 특히 TCL-HSB 경계면에서의 수직응력의 증가가 두드러지게 나타났다. 수직 응력의 증가로 인해 국부적으로 분

Fig. 9 Stress distribution at cross-section (full-depth crack, crack width = 0.5mm)

Fig. 10 Stress distribution at cross-section (half-depth crack, crack width = 0.5mm)

Fig. 11 Comparison of TCL stress according to crack depth

리(debonding)가 발생할 가능성이 더 높아진다.

균열 깊이에 따라 section A에서의 최대 응력을 도식해 보면(Fig. 11) TCL의 균열이 아래로 진전될수록 응력이 대체로 증가하며, 수직 응력이 가장 크게 증가한다는 것을 확인할 수 있다. 종방향과 횡방향 응력의 증가는 10~25% 수준으로 상대적으로 작게 나타났다. 반면 HSB층 하부의 횡방향 및 종방향 응력에는 균열 깊이는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

균열이 관통할 경우 TCL 균열이 위치한 TCL-침목 간 경계면(section B)에서는 철근 주변에서 비교적 큰 수직 응력이 유발되는 것으로 나타났다. 이는 철근이 dowel 작용을 하면서 하중이 작용하는 쪽의 철근 상부에는 압축응력을, 하부에는 인장응력을 유발하기 때문이다[13]. 이러한 응력이 반복적으로 작용하게 되면 슬래브 중심선을 따라 수평 균열(horizontal crack)이 형성되면서 슬래브의 철근 위 부분이 떨어져 나가는 펀치아웃(punch-out) 현상이 발생할 가능성이 높아진다[14]. 따라서 슬래브를 관통하는 균열이 발생하지 않도록 관리해야만 공용 수명을 더 높일 수 있을 것으로 판단된다.

3.2.2 균열폭의 영향

균열폭에 따른 차이를 비교하면 Fig. 12에 나타난 바와 같이 TCL에 균열이 발생하면 균열이 없는 경우에 비해 응력이 증가하지만, 균열폭이 0.1~2mm 범위에서는 TCL 응력의 변화는 거의 없는 것으로 나타났다. 균열 위치에서 철근 주변의 수직 응력은 균열폭이 증가함에 따라 소폭 증가하는 것으로 나타났으나, 그 증가폭은 무시할만한 수준이다. 이는 철근만으로 충분한 하중전달능을 확보할 수 있다는 것을 시사하는 것이다.

앞서 서술한 바와 같이 균열은 궤도 슬래브의 응력을 증가시키므로 콘크리트궤도의 공용성 저하에 영향을 미치지만 해석 결과에서 알 수 있듯이 균열의 유무에 영향을 받을 뿐 균열폭에 따른 영향은 크지 않으며 허용 균열폭 이내로 유지된다면 충분한 하중전달능을 확보할 수 있다고 판단된다. 다만 이러한 해석 결과는 하부 지지조건이 양호하게 유지된다는 것을 전제로 한 것이므로 만약 지반 침식 등에 의해 궤도 하부에 국부적인 지지력의 손실이 발생한다면 균열 부에서 슬래브의 파손이 발생하거나 철근 주변의 응력 증가

(a) Section A

(b) Section B

(c) Section C

Fig. 12 TCL Stress according to crack width

로 인해 수평 균열의 발생과 이로 인한 펀치아웃 발생 가능성이 높아질 수 있다[14]. 따라서 궤도 하부의 지지조건이 건전한 상태로 유지되도록 관리하는 것이 중요하다.

3.2.3 균열 간격의 영향

Fig. 13은 균열 간격에 따른 해석결과를 보여주고 있다. 균열 간격이 좁아지면 횡방향 응력이 증가하면서 펀치아웃이

Fig. 13 TCL Stress according to crack spacing

발생할 가능성이 높은 것으로 보고되었으나[15] 해석 결과에서는 모든 경우 응력이 거의 동일하게 나타났다. 이 차이는 문헌에서는 펀치아웃이 발생하는 메커니즘을 설명하기 위해 하부 지반이 침식 등에 의해 불량할 때의 조건을 전제로 하기 때문이라고 판단된다. 따라서 이 해석 결과에 따르면 하부 지지조건이 건전한 상태에서는 균열 간격에 따른 영향이 거의 무시할만한 수준이라고 볼 수 있다.

3.2.4 HSB 수축 줄눈 위치의 영향

수축 줄눈의 위치에 따른 영향을 분석하기 위하여 Fig. 14와 같이 수축 줄눈의 위치를 section A에서, section B와 C로 변경하여 해석을 수행하였다.

Fig. 15은 수축 줄눈의 위치에서 단면 응력 분포를 보여주고 있다. Fig. 15에서 알 수 있듯이 TCL의 바닥면에서 발생하는 응력은 수축 줄눈이 침목 직하부에 위치할 때 가장

크고, 수축 줄눈이 침목과 TCL 경계면, 즉 TCL 균열 위치와 일치할 때 가장 작은 응력 크기를 나타내며, 수축 줄눈이 침목과 침목 사이 중앙에 위치할 때 중간 정도의 응력을 나타낸다. 하지만 수축 줄눈이 침목과 TCL 경계면에 위치할 경우 TCL 균열 위치에서 TCL의 응력이 작아지는 것은 균열에 의해 응력이 줄어들기 때문이므로 TCL의 응력은 작더라도 TCL의 균열과 HSB의 수축줄눈이 수직으로 연결되면 균열면에서 철근 주변의 응력이 증가하게 된다(Fig. 14(b) 참조). 따라서 수축 줄눈이 각 침목 사이에 놓이도록 설계·시공하는 것이 장기 공용성을 확보하는 데 있어 가장 유리할 것으로 판단된다.

4. 결 론

이 연구에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 균열이 발생한 연속철근 콘크리트궤도(CRCT)에서의 열차하중에 의한 응력 분포를 산정하고 균열폭, 간격, 깊이, 수축 줄눈 위치, 지반강성 등에 따른 영향을 검토하였다. 이 연구에서 도출된 주요 결론은 다음과 같다.

(1) 수축 줄눈 위치에서 HSB 층의 처짐이 불연속점을 나타내기 때문에 TCL의 종방향, 횡방향 및 수직방향 모두 최대 응력은 HSB 수축 줄눈 위치에서 발생하는 것으로 나타났다. HSB층의 수축 줄눈을 고려할 경우 설계에서 적용하고 있는 Westergaard 해를 이용한 해석 결과와는 다르게 종방향 응력이 횡방향 응력보다 더 크게 나타나 장기적으로 종방향 응력이 휨 피로파괴에 더 지배적인 영향을 미칠 것

Fig. 14 Joint positions

Fig. 15 Stress distribution at cross-section according to HSB joint position

으로 예상된다.

(2) TCL의 균열 깊이가 증가할수록 TCL 바닥면의 응력이 증가하는 것으로 나타났다. 횡방향 및 종방향 응력보다는 수직응력이 더 증가폭이 크게 나타나 균열 깊이에 가장 큰 영향을 받는다. 또한 균열이 관통할 경우 TCL 균열이 위치한 TCL-침목 간 경계면에서 철근 주변에서 비교적 큰 수직 응력이 유발되어 편치아웃 발생 가능성이 높아질 것으로 예상된다. 따라서 슬래브를 관통하는 균열이 발생하지 않도록 하는 것이 장기 공용성 확보를 위해 중요하다.

(3) TCL에 균열이 없는 경우에 비해 균열이 있는 경우 TCL의 응력이 증가하나, 균열폭 2.0mm까지 균열폭에 따른 응력의 변화는 거의 없는 것으로 나타났으며, 균열 간격에 따라서도 응력 변화는 거의 나타나지 않았다. 따라서 지반의 침식에 의한 지지력 손실이 없다면 균열폭과 균열 간격에 따른 영향은 무시할만한 수준이라고 볼 수 있으므로 유지보수 시 균열폭이나 간격을 관리하는 것보다는 균열 깊이를 동시에 관리하고, 레도 하부의 지지조건이 건전한 상태로 유지되도록 관리하는 것이 중요하다.

(4) TCL의 바닥면에서 발생하는 응력은 HSB 수축 줄눈이 열차 하중이 놓이는 침목 하부에 위치할 때 TCL의 응력이 가장 크게 나타났다. 침목과 TCL의 경계면이 HSB 수축줄눈과 일치할 때 TCL의 응력이 가장 작지만, 이 경우에는 TCL의 균열과 HSB의 수축줄눈이 수직으로 연결되면서 균열이 관통하고, 균열면에서 철근 주변의 응력이 증가하게 된다. 따라서 침목의 직하부나 침목-TCL 경계면을 피하고, 침목과 침목 사이에 HSB 조인트가 위치하도록 하는 것이 장기 공용성 확보에 가장 효과적이다.

이 연구에서 제시한 결과는 수치해석에 의한 파라미터 분석 결과이므로 향후 실제 콘크리트레도의 거동과 비교함으로써 검증 및 보완되어야 하며, 이를 통해 콘크리트레도의 균열이 장기적으로 어떻게 손상과 파괴로 이어지는가를 분석함으로써 콘크리트레도의 균열 관리 방안을 확립하는 데 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국토교통부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호13RTRP-B065581-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] S.G. Bae, S.C. Choi, S.Y. Jang, S.W. Cha (2014) Prediction of crack pattern of continuously reinforced concrete track induced by temperature change and shrinkage of concrete, *Journal of Korean Society for Railway*, 17(4), pp. 270-280.
- [2] J. Eisenmann, H.G. Leykauf (2001) *Betonfahrbahnen*, Ernst & Sohn, Berlin, 321p.
- [3] D.G. Zollinger, E.J. Barenberg (1990) Continuously reinforced pavement, Punchouts and other distresses and implications for design, Project No. IHR-518, Illinois Cooperative Research Program Series No.227.
- [4] J. Eisenmann, H.G. Leykauf (2000) *Feste Fahrbahn für Schienenbahnen*, Betonkalender, pp. 291-326.
- [5] KRTC (2006) *Execute Design of Track for Gyeong-Bu High Speed Line 2nd Phase(Dong-Daegu~Busan)*, Korea Railway Network Authority.
- [6] TNO DIANA (2003) *DIANA-Finite Element Analysis user's manual*, TNO DIANA, The Netherlands
- [7] L.S. Lim, M.G. Park, Y.K. Nam, J.H. Jeong (2009) Investigation of friction characteristics between concrete slab and sub-base layers, *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, 29(6D), pp. 719-726.
- [8] S.M. Kim, M.C. Won, B.F. McCullough (2000) Three-dimensional analysis of continuously reinforced concrete pavements, *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No. 1730, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 43-52.
- [9] CEB-FIP Model Code 1990 (1990) *Comité Euro-International du Béton (CEB)*.
- [10] S.W. Wattar (2001) Aggregate interlock behavior of large crack width concrete joints in PCC airport pavements, *PhD Thesis*, University of Illinois at Urbana-Champaign.
- [11] C. Esveld (2001) *Modern railway track*, 3rd ed., MRT productions, Zaltbommel, 654p.
- [12] E.N.B.S. Júlio, F.A.B. Branco, V.D. Silva (2004) Concrete-to-concrete bond strength, Influence of the roughness of the substrate surface, *Construction and Building Materials*, 18(9), pp. 675-681.
- [13] S.G. Millard, R.P. Johnson (1984) Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action. *Magazine of Concrete Research*, 36(126), pp. 9-21.
- [14] M.C. Won (2011) continuously reinforce concrete pavement, identification of distress mechanisms and improvement of mechanistic-empirical design procedures, *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No.2226, pp. 51-59.
- [15] NCHRP (2003) *Guide for mechanistic-empirical design of new and rehabilitated pavement structures*, Appendix LL: Punchouts in continuously reinforced concrete pavements.

접수일(2014년 3월 24일), 수정일(2014년 5월 20일),
게재확정일(2014년 9월 24일)

Sung Geun Bae: bsg23@ulsan.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Daehak-ro 93, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea

Seongcheol Choi: schoi@cau.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, Chung-Ang University, Heukseok-ro 84, Dongjak-gu, Seoul 156-756, Korea

Seung Yup Jang: syjang@krii.re.kr

High-speed Railroad Research Center, Korea Railroad Research Institute, Chuldo-banmulgan-ro 176, Uiwang, Gyeonggi-do 437-757, Korea

Soo Won Cha: chasw@ulsan.ac.kr

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan, Daehak-ro 93, Nam-gu, Ulsan 680-749, Korea