앵커와 마찰의 영향을 고려한 교량상 급속경화궤도의 궤도-교량 상호작용해석

조 상 현¹ · 이 일 화² · 정 원 석¹ · 이 희 영¹ · 이 경 찬^{2*}

¹경희대학교 사회기반시스템공학과, ²한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부

Track-Structure Interaction Analysis of Fast Hardening Track on Railway Bridge Considering Effect of Anchor and Friction

Sang-Hyeon Cho¹, Il-Wha Lee², Won-Seok Chung¹, Hee-Young Lee¹ and Kyoung-Chan Lee^{2*}

¹Department of Civil Engineering, KyungHee Univ., Yongin, 17104, Korea

²Korea Railroad Research Institute., Uiwang, 16105, Korea

Abstract

Ballast track requires constant maintenance work due to progress of track irregularity. Fast Hardening Track(FHT) has been developed to reduce the maintenance effort done by injecting fast hardening mortar in aged ballast to convert slab track. For the application of FHT to a railway bridge, post-installed anchors should be placed at center of the track segment to fix it on bridge. This paper presents track-bridge interaction analysis results with FHT considering stiffness and strength of post-installed anchor, age of FHT concrete and friction between FHT and bridge deck surface. Based on the analysis results, this study suggests when is good to install the anchors and allow normal operation of passing train.

Keywords : fast hardening track, railway bridge, interaction analysis, anchor, friction

1. 서 론

기존의 노후화된 자갈 궤도는 자갈층의 소성 변형으로 인하여 레일 선형의 틀어짐(궤도틀림)이 발생하므로, 열차의 안정적인 주행을 위한 궤도 선형을 유지하기 위해서는 지속적인 보수가 실시되어야 한다. 주기적인 보수에도 불구하고 자갈 궤도의 예상 수명은 약 30년 정도에 불과하다(Chang *et al.*, 2013). 최근에는 300km/h 이상의 속도로 주행하는 고속열차가 도입되면서 자갈 궤도의 틀림 진전 정도가 더욱 증가하였다. 콘크리트 궤도는 기존의 자갈 궤도와 비교하여 낮은 유지·보수비용과 안정성이 장점이나 시공 시 많은 시간을 필요하여 궤도 교체 작업이 어려운 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 초속경 모르타르를 기존 자갈 궤도에 주입하여 단시간 내에 콘크리트 궤도로 치환하는 급속경화궤도(fast hardening track,

FHT)(Lee, *et al.*, 2004; 2006, Min *et al.*, 2014, Hong, *et al.*, 2015, Choi, *et al.*, 2017)가 개발되고 있다. 급속경화 궤도는 노후화된 자갈 궤도에서 도상 자갈을 채취하여 세척한 후 급속경화 모르타르와 함께 채타설하여 경화시키는 콘크리트 궤도이다. 급속경화 궤도는 기존의 콘크리트 궤도와 달리 최소 열차차단시간(3~4시간)내에 시공을 완료한 후 정상 운행할 수 있다.

교량에 부설된 궤도는 교량의 경간이 길어질수록 교량에 부설된 장대레일에 축방향 응력이 증가하는 궤도-교량 상호작용 문제가 발생한다. 따라서 철도 교량은 종방향 궤도-교량 상호작용 해석을 통하여 장대레일 부가 축응력의 허용응력 초과여부를 해당 지침(KR C-08080, 2014)에 따라 분석하여야 한다.

교량상 고속철도구간의 노후화된 자갈궤도를 빠른 시간 내에 교체하기 위하여 급속경화궤도에 대한 연구를 진행하고 있다.

* Corresponding author:

Tel: +82-31-460-5391; E-mail: klee@krii.re.kr

Received December 5 2017; Revised December 27 2017;

Accepted December 28 2017

©2018 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Lee(2004), Lee 등(2006)는 포장궤도공법의 적용성을 평가하기 위하여 시험개소의 도상 및 노반에 대한 상태조사를 수행하고, 구조최적화를 위한 유한요소해석을 실행하였다. Min 등(2014)는 급속경화궤도 구조에 대한 내구성을 평가하기 위하여 급속경화궤도의 충전층 두께의 변화를 주고 열차하중을 가하여 발생하는 현상을 3차원 유한요소해석 방법으로 분석하였다. Hong 등(2015)는 교량상에 급속경화궤도를 시공할 시의 시공방안과 급속경화궤도의 특성을 고려한 교량상 급속경화궤도 적용성을 분석하였다. Choi 등(2017)은 교량상 급속경화궤도의 레일 및 슬래브의 거동을 분석하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다.

고속철도 구간에서 높은 비중을 차지하는 교량구간에 급속경화궤도를 시공할 경우 교량과 궤도 사이에 앵커를 설치하여 거동을 일체화한다. 이때 궤도 슬래브의 온도 신축에 의한 응력을 최소화하기 위하여 각 세그먼트의 중앙부에만 앵커를 시공한다. 이 앵커는 열차의 주행에 따른 시제동 하중 및 횡방향 하중을 교량으로 전달하는 역할을 하며, 온도 변화에 의한 교량 신축이 궤도 틀림을 유발하지 않도록 교량과 궤도를 고정하는 역할을 한다. 교량상 급속경화궤도는 앵커를 통하여 교량과 연결되지만, 궤도 저면과 교량 바닥판 상면 사이의 마찰이 서로 간의 거동에 영향을 미친다. 이러한 이유로 급속경화궤도를 교량상에 시공할 때에는 앵커와 마찰의 영향을 동시에 고려할 필요가 있다.

본 연구는 시공단계를 고려하여 교량상 급속경화궤도에 앵커를 설치하기 전, 앵커를 설치한 후로 나누어 교량-급속경화궤도-레일의 종방향 상호작용해석을 실시하였다. 이때 교량상에서의 급속경화궤도의 마찰 거동을 다양한 마찰계수에 대하여 검토하여 교량상 급속경화궤도의 거동을 평가하였다.

2. 궤도/교량 종방향 상호작용해석

범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 교량상

급속경화궤도에 대한 상호작용 해석을 수행하였다. Fig. 1은 급속경화궤도 시스템의 레일, 급속경화궤도 슬래브, PSC 박스거더 교량을 보요소(B23)로 각각 이상화한 그림이다. 본 연구는 레일 100m, 교량 40m를 모델링하였고, 급속경화궤도는 길이 5m인 8개의 세그먼트로 나열하여 모델링하였다. Table 1은 해석 모델에 적용한 PSC 박스거더 교량의 단면제원이고, 레일 제원은 60E1(UIC60)이다(KS R 9106, 2016). 레일체결장치는 스프링 요소(connect two points)를 이용하여 모사하였다. 레일체결장치의 물성치는 철도설계편람 궤도-교량 종방향 상호작용해석(KR C-08080, 2014)에 제시된 수직하중재하 유/무에 따른 체결장치의 종방향 저항력 규정에 따라, 수직하중이 없는 경우 체결장치의 종방향 최대 저항력을 40kN/m/궤도로 고려하고, 수직하중 재하시에는 60kN/m/궤도를 적용하였다. 급속경화궤도와 교량을 연결하는 앵커와 그 경계면의 마찰거동은 스프링 요소(connect two points)를 사용하여 모사하였다.

마찰 거동은 급속경화궤도 마찰특성실험(Hong *et al.*, 2015)을 통하여 산정한 마찰계수-변위 결과 그래프를 기반으로 산정하였다. Fig. 2는 노반에 부설된 급속경화궤도에 대하여 실험으로 측정된 마찰계수-변위 그래프를 에너지법을 이용하여 이중선형 근사 모형화한 그래프이다(Liu, 2011). 마찰계수는 1.2이고 길이 5m, 폭 2.8m, 높이 0.53m인 급속경화궤도 세그먼트의 자중인 178.08kN에 마찰계수를 곱하여 최대 마찰력 214kN을 산정하였다. 실험 결과를 바탕으로 최대 마찰력 도달시의 변위는 5mm로 산정하였다.

Fig. 3(a)는 앵커를 설치한 급속경화궤도의 push-out 시험 결과(Lee, 2017)를 다중직선으로 단순화한 앵커 물성치이다. 본 연구는 급속경화궤도 종방향 상호작용해석 시 마찰 거동을 Fig. 2를 포함한 총 4가지로 나누어 분석하였다. Fig. 3(b)는 Fig. 2를 기준으로 마찰계수와 변위의 변화에 따라 분류한 4가지 마찰 거동을 나타낸 그래프이다. Case A-Fric은 Fig.

Table 1 Parameters of PSC box girder

Case	Span length (m)	Equivalent elastic modulus (MPa)	Area (mm ²)	Neutral axis position (mm)	height (mm)	2nd Moments of inertia	
						I_{xx} (mm ⁴)	I_{yy} (mm ⁴)
PSC box girder	40	28,571	1.19×10^8	790	2,700	12.12×10^7	15.78×10^7

Fig. 1 Analysis model of FHT on bridge

Fig. 2 Frictional behavior of longitudinal resistance

(a) Anchor longitudinal resistance

(b) Friction longitudinal resistance

Fig. 3 Anchor and friction longitudinal resistance

2의 결과와 동일하게 마찰계수 1.2에 최대 마찰력 도달 변위가 5mm인 마찰 물성치이다. Case B-Fric은 마찰계수 1.2에 최대 마찰력 도달 변위를 0.5mm로 변경한 마찰 물성치이다. 교량 바닥판은 노반 구간과 표면의 거칠기가 달라서 급속경화케도와 마찰계수가 저감될 수 있다. 이를 반영하여, Case C-Fric은 마찰계수를 0.6으로 감소시키고, 최대 마찰력 도달

변위를 5mm로 유지한 마찰 물성치이다. Case D-Fric은 마찰계수는 0.6으로 감소시키고, 최대 마찰력 도달변위는 0.5mm로 변경한 물성치이다.

교량상 급속경화케도 레일부가응력 해석 시 레일 및 교량 구조물에 작용하는 하중은 철도설계편람에 제시되어 있는 하중 규정으로 설정하였다(KR C-08080, 2014). 레일의 종방향 상호작용해석에는 온도하중, 시/제동하중, 수직하중이 고려되어야 한다. 식 (1)은 온도하중, 시/제동하중, 수직하중에 발생하는 레일부가응력 산정식이다. 교량이 단순지지 경간인 경우, α, β, γ 는 각각 1의 값을 갖는다. 철도설계편람에서는 압축부와 인장부의 레일부가응력 허용치를 92.0MPa로 제한하고 있다(KR C-14050, 2014).

$$\Sigma R = \alpha R(\text{온도하중}) + \beta R(\text{시/제동하중}) + \gamma R(\text{열차수직하중}) \quad (1)$$

온도하중은 레일부가응력을 분석하기 위해 급속경화케도 슬래브 및 교량에는 25℃를 재하하였다. 시동하중과 제동하중 중에서는 40m 단선교량에 적용하였을 때 하중 효과가 큰 시동하중을 적용하였다. 열차의 시동하중은 재하길이 33m에 33kN/m/케도의 하중을 재하하였다. 수직하중은 표준열차하중인 KRL-2012의 여객전용 하중을 적용하였다.

3. 재령일을 고려한 교량구간 급속경화케도의 거동

케도/교량 상호작용 해석을 실시할 때 필요한 앵커부의 물성치는 기본적으로 급속경화케도 재령 28일의 push-out test를 기반으로 산정하였다. 하지만 급속경화케도는 케도의 재령이 28일에 도달하기 전에 앵커가 설치되고 열차 통행이 이루어지기 때문에 조기 재령 콘크리트에 매립된 앵커 거동의 영향을 평가할 필요가 있다.

Topkaya 등(2004)은 조기 재령 콘크리트에 매립된 앵커에 대한 push-out 시험을 수행하였다. Fig. 4는 선행연구(Topkaya *et al.*, 2004)에 제시된 실험 데이터이며, 탄성한계와 최대강도를 각각 설계강도(Q_d), 최대강도(Q_{max})로 정의하였다. 설계강도(Q_d)는 콘크리트에 매립된 앵커에 발생한 변위가 앵커 지름(mm)을 25로 나눈 값인 0.8mm에 다다랐을 때의 하중으로 산정하였다. 시험 결과에 의하면 균열은 재하된 하중이 설계강도(Q_d)를 초과하였을 때 처음으로 발생한다. 최대강도(Q_{max})에 도달한 이후 콘크리트가 파괴되어 측정되는 하중이 점차 감소하였다. 본 연구에서는 선행연구와 마찬가지로 앵커 변위가 0.8mm 발생했을 시의 하중을 설계강도(Q_d)로 정의하였다.

Fig. 4 Design strength and maximum strength

선행연구(Topkaya *et al.*, 2004)는 앵커 주변 콘크리트 압축강도, 설계강도(Q_d), 최대강도(Q_{max})가 콘크리트 재령일에 비례하여 증가하는 것으로 분석하였다. Table 2는 선행연구 결과에 근거하여 재령일에 따라 발현된 급속경화콘크리트의 압축강도에 비례하여 앵커 강도의 비례계수(normalized factor)를 산정한 표이다.

비례계수는 급속경화콘크리트 재령 28일일 때의 압축강도를 기준으로 도출한 재령 t 일 때의 압축강도 비율이다. 콘크리트 강도에 따른 앵커의 강도를 AASHTO LRFD에 제시된 식과 Eurocode4에 제시된 식에 따라 각각 평가하여 비례계수를 식 (2) 및 (3)과 같이 각각 산정하였다. 본 연구는 급속경화콘크리트를 안전측으로 해석하기 위하여 강도비가 더 작은 AASHTO LRFD를 적용하였다.

$$k_{age,AASHTO} = \frac{\sqrt{f_{c,t}' E_{c,t}'}}{\sqrt{f_{c,28}' E_{c,28}'}} = \left(\frac{f_{c,t}'}{f_{c,28}'} \right)^{3/4} \quad (2)$$

$$k_{age,EC4} = \frac{\sqrt{f_{c,t}' E_{c,t}'}}{\sqrt{f_{c,28}' E_{c,28}'}} = \left(\frac{f_{c,t}'}{f_{c,28}'} \right)^{0.65} \quad (3)$$

Fig. 5는 급속경화콘크리트 앵커의 재하 시험 결과와 파괴가 발생하는 세 지점을 표기한 예이다. 본 연구는 선행연구(Topkaya *et al.*, 2004)의 내용을 참고하여 앵커를 설치한 급속경화콘크리트에 총 세 번의 파괴시점이 있다고 분석하였다. 첫 번째는

Fig. 5 Tri-linear curve of anchor load - displacement

재하된 하중이 설계강도(Q_d)를 초과한 시점으로 급속경화콘크리트와 앵커부에 균열이 발생하여 강성 저하가 시작되는 지점이다. 두 번째는 재하된 하중이 지속적으로 증가함에 따라 앵커부 주변 콘크리트의 압축이 발생하는 시점이다. 세 번째는 앵커부 주변 콘크리트의 파괴로 지지력을 현저히 상실하여 앵커에 인장 항복이 발생한 경우이다. 본 연구는 세가지 각각의 파괴 하중을 설계강도(Q_d), 콘크리트 파괴 하중, 앵커 파괴 하중으로 구분하였다.

교량상 급속경화콘크리트에서 앵커의 설치 여부 및 앵커가 매립된 급속경화 콘크리트의 재령에 따라 해석 케이스를 구분하였다. Table 3은 레일 종방향 허용응력 초과 여부, 재령일에 따른 적절한 앵커 설치시점 및 적절한 마찰 거동을 분석하기 위하여 선정한 매개변수이다. 각각의 경우는 앵커와 마찰의 물성치가 고려되었고, 마찰만 존재할 때에는 재령 4시간일 때가 가장 취약하므로 재령 4시간일 경우만을 고려하였다.

Case A는 급속경화콘크리트 슬래브 지면과 교량 바닥판 상면 사이의 표면 마찰의 물성치가 Case A-Fric이고 급속경화콘크리트에 앵커가 설치된 경우이다. F0-1.2-5는 급속경화콘크리트에 앵커가 설치되기 전, 마찰만으로 종방향 거동에 저항하는 경우이다. AF0-1.2-5는 급속경화콘크리트에 앵커가 설치된 후, 재령 4시간 일 때의 물성치이고, 재령일에 따라 AF1-1.2-5, AF3-1.2-5, AF7-1.2-5, AF28-1.2-5로 정하였다.

Case B는 급속경화콘크리트 마찰의 물성치가 Case B-Fric이

Table 2 Normalized factor considering curing days

Curing days(day)	Concrete compressive strength (MPa)	Normalized factor for concrete compressive strength	Normalized factor for anchor strength	
			AASHTO LRFD	Eurocode4
0.167(4hr)	20.0	0.601	0.683	0.719
1	22.6	0.680	0.749	0.778
3	24.0	0.722	0.783	0.809
7	26.3	0.790	0.838	0.858
28	33.3	1.000	1.000	1.000

면서 동일한 앵커 물성치를 포함하는 경우이다. Case B는 Case A와 같이 마찰만 존재할 때의 물성치를 F0-1.2-0.5로 정하고, 앵커와 마찰이 존재하는 물성치를 앵커 주변 콘크리트의 재령일에 따라 AF0-1.2-0.5, AF1-1.2-0.5, AF3-1.2-0.5, AF7-1.2-0.5, AF28-1.2-0.5로 고려하였다.

Case C는 급속경화궤도 마찰의 물성치가 Case C-Fric이고, 앵커의 물성치가 동일한 경우이다. 마찰만 존재할 때의 물성치는 F0-0.6-5라고 했으며 앵커와 마찰이 함께 존재하는 경우 앵커의 물성치는 재령일에 따라 AF0-0.6-5, AF1-0.6-5, AF3-0.6-5, AF7-0.6-5, AF28-0.6-5로 정하였다.

Case D는 급속경화궤도 마찰의 물성치가 Case D-Fric이고, 앵커의 물성치가 동일한 경우이다. 마찰만 존재할 때의 물성치는 F0-0.6-0.5라고 했으며 앵커와 마찰이 존재하는 물성치는 재령일에 따라 AF0-0.6-0.5, AF1-0.6-0.5, AF3-0.6-0.5, AF7-0.6-0.5, AF28-0.6-0.5로 정하였다. 앵커의 강도는 각 배개변수마다 앵커부에 균열이 발생하였을 시(Q_d), 앵커 주변 콘크리트 파괴가 발생했을 시, 앵커 파괴가 발생했을 시로 구분하였다. 설계강도(Q_d)는 균열이 발생하는 하중이므로 급속 경화궤도의 사용성을 판별하는 기준으로 고려하였다.

4. 해석결과

Table 4는 재령일을 고려한 궤도/교량 상호작용해석으로부터 산정된 레일 부가응력이다. Case A는 마찰만 존재할 시 재령 4시간(F0-1.2-5)인 경우의 조합하중(온도하중+시동하중+수직하중)에 의한 레일부가응력이 64.05MPa로 가장 컸다. Case B는 Case A와 마찬가지로 마찰만 존재할 시 재령 4시간(F0-1.2-0.5)인 경우의 조합하중에 의한 레일부가응력이 56.31MPa로 가장 큰 응력이 발생했다.

Case C는 앵커가 설치되어 앵커와 마찰이 함께 존재하고 재령 4시간(AF0-0.6-5)인 경우의 조합하중에서 가장 큰 레일 부가응력인 58.36MPa이 발생하였다. Case D는 Case C와 마찬가지로 앵커와 마찰이 함께 존재하고 재령 4시간(AF0-0.6-0.5)인 경우에 조합하중에 의해서 가장 큰 레일부가응력 56.36MPa이 나타났다. 모든 경우에서 레일부가응력이 허용 기준 92MPa을 만족하였다. 모든 경우에서 온도하중에 의한 레일 부가응력은 재령일이 경과할수록 증가하였고, 시동하중에 의한 레일부가응력은 감소하였다. 수직하중에 의한 레일부가응력은 재령에 관계없이 일정한 레일부가응력을 가지는 것으로

Table 3 Analysis cases and parameters

Cases		Curing days (day)	Max. static friction disp. (mm)	Max. kinetic friction force (kN)	Anchor strength(kN)		
					Design load (Q_d)	Concrete fracture load	Anchor fracture load
Case A	F0-1.2-5	0.167(4hr)	5	214	0	0	0
	AF0-1.2-5	0.167(4hr)	5	214	166.2	345.8	405.1
	AF1-1.2-5	1	5	214	182.3	379.1	458.4
	AF3-1.2-5	3	5	214	190.6	396.6	486.7
	AF7-1.2-5	7	5	214	204.0	424.2	532.5
	AF28-1.2-5	28	5	214	243.4	506.3	674.1
Case B	F0-1.2-0.5	0.167(4hr)	0.5	214	0	0	0
	AF0-1.2-0.5	0.167(4hr)	0.5	214	166.2	345.8	405.1
	AF1-1.2-0.5	1	0.5	214	182.3	379.1	458.4
	AF3-1.2-0.5	3	0.5	214	190.6	396.6	486.7
	AF7-1.2-0.5	7	0.5	214	204.0	424.2	532.5
	AF28-1.2-0.5	28	0.5	214	243.4	506.3	674.1
Case C	F0-0.6-5	0.167(4hr)	5	107	0	0	0
	AF0-0.6-5	0.167(4hr)	5	107	166.2	345.8	405.1
	AF1-0.6-5	1	5	107	182.3	379.1	458.4
	AF3-0.6-5	3	5	107	190.6	396.6	486.7
	AF7-0.6-5	7	5	107	204.0	424.2	532.5
	AF28-0.6-5	28	5	107	243.4	506.3	674.1
Case D	F0-0.6-0.5	0.167(4hr)	0.5	107	0	0	0
	AF0-0.6-0.5	0.167(4hr)	0.5	107	166.2	345.8	405.1
	AF1-0.6-0.5	1	0.5	107	182.3	379.1	458.4
	AF3-0.6-0.5	3	0.5	107	190.6	396.6	486.7
	AF7-0.6-0.5	7	0.5	107	204.0	424.2	532.5
	AF28-0.6-0.5	28	0.5	107	243.4	506.3	674.1

Table 4 Result of additional rail stress

Cases		Temperature load		Traction load		Vertical load		Combined load	
		Com(-)	Ten(+)	Com(-)	Ten(+)	Com(-)	Ten(+)	Com(-)	Ten(+)
Case A	F0-1.2-5	-20.69	35.73	-18.38	24.62	-3.50	+3.70	-42.57	64.05
	AF0-1.2-5	-29.47	42.76	-10.28	11.56	-3.50	+3.70	-43.25	58.02
	AF1-1.2-5	-29.72	42.85	-10.04	11.19	-3.50	+3.70	-43.26	57.74
	AF3-1.2-5	-29.84	42.90	-9.93	11.02	-3.50	+3.70	-43.27	57.62
	AF7-1.2-5	-30.02	42.96	-9.76	10.76	-3.50	+3.70	-43.28	57.42
	AF28-1.2-5	-30.49	43.12	-9.35	10.13	-3.50	+3.70	-43.34	56.95
Case B	F0-1.2-0.5	-31.02	43.26	-8.85	9.35	-3.50	+3.70	-43.37	56.31
	AF0-1.2-0.5	-31.85	43.44	-8.08	8.19	-3.50	+3.70	-43.43	55.33
	AF1-1.2-0.5	-31.90	43.45	-8.03	8.11	-3.50	+3.70	-43.43	55.26
	AF3-1.2-0.5	-31.93	43.45	-8.00	8.07	-3.50	+3.70	-43.43	55.22
	AF7-1.2-0.5	-31.97	43.46	-7.96	8.01	-3.50	+3.70	-43.43	55.17
	AF28-1.2-0.5	-32.08	43.48	-7.85	7.85	-3.50	+3.70	-43.43	55.03
Case C	F0-0.6-5	-14.41	22.65	-22.40	30.06	-3.50	+3.70	-40.31	56.41
	AF0-0.6-5	-29.17	42.65	-10.57	12.01	-3.50	+3.70	-43.24	58.36
	AF1-0.6-5	-29.45	42.76	-10.30	11.59	-3.50	+3.70	-43.25	58.05
	AF3-0.6-5	-29.58	42.81	-10.17	11.39	-3.50	+3.70	-43.25	57.90
	AF7-0.6-5	-29.79	42.88	-9.98	11.10	-3.50	+3.70	-43.27	57.68
	AF28-0.6-5	-30.30	43.06	-9.52	10.38	-3.50	+3.70	-43.32	57.14
Case D	F0-0.6-0.5	-21.06	26.95	-12.02	13.66	-3.50	+3.70	-36.58	44.31
	AF0-0.6-0.5	-30.99	43.26	-8.88	9.40	-3.50	+3.70	-43.37	56.36
	AF1-0.6-0.5	-31.09	43.28	-8.77	9.25	-3.50	+3.70	-43.36	56.23
	AF3-0.6-0.5	-31.15	43.29	-8.72	9.17	-3.50	+3.70	-43.37	56.13
	AF7-0.6-0.5	-31.23	43.31	-8.65	9.05	-3.50	+3.70	-43.38	56.06
	AF28-0.6-0.5	-31.45	43.37	-8.45	8.75	-3.50	+3.70	-43.4	55.82

분석되었다.

레일체결장치는 온도하중이 가해질 때는 40kN/m/케도, 시/제동하중일 때는 60kN/m/케도의 저항력을 가진다. 이에 근거하여 5m 세그먼트에 1세트가 설치된 앵커에 재하되는 최대 하중은 온도하중일 때 200kN, 시/제동하중일 때 300kN이다. 하지만 케도와 교량 사이의 마찰 저항이 함께 작용하기 때문에 마찰력을 제외한 하중을 앵커가 부담하게 된다. 이 연구에서는 재령에 따른 앵커의 설계하중(Q_d)에 대한 앵커에 재하되는 하중의 비율을 내하력 비로 정의하여 앵커의 건전성의 지표로 제시하였다. 내하력 비가 1을 초과하면 앵커에 재하되는 하중이 설계하중을 초과하여 앵커부에 파손이 발생할 수 있다.

마찰 거동을 마찰계수가 1.2이고 최대 마찰력 도달 변위가 5mm로 가정한 Case A에서 마찰만 있는 경우(F0) 시동하중에 따른 하중 효과는 20.98kN이고, 이후 앵커와 마찰을 동시에 고려할 시에는 재령일에 따라 각각 36.41kN, 36.86kN, 37.05kN, 37.31kN, 37.79kN으로 분석되었다. Fig. 6(a)는 Case A에서 온도 증가에 따른 앵커의 내하력 비를 나타낸 것이다. 앵커가 설치되지 않아 마찰만 존재할 경우에는 온도변화량이 17.00℃ 이내로 유지되어야 안전한 것으로 분석되었다. 앵커를 설치한 후 급속경화케도 재령 4시간, 1일, 3일, 7일일

때에는 각각 온도변화량이 4.75℃, 5.25℃, 5.75℃, 6.25℃ 이내로 발생되어야 안전한 것으로 분석되었다. 시동하중과 온도하중을 재하했을 때에는 재령 28일인 경우에만 앵커부에 손상이 발생하지 않는 것으로 확인되었다. 온도하중만 재하했을 경우에는 앵커가 있는 경우와 없는 경우 모두 안전한 것으로 확인되었다. 따라서 케도의 마찰 거동이 마찰계수가 1.2이고 최대 마찰력 도달 변위가 5mm인 Case A에서는 급속경화케도 부설 후 적어도 7일 동안은 시동하중이 발생하지 않도록 서행하여야 한다.

마찰계수가 1.2로 Case A와 동일하고 최대 마찰력 도달 변위가 0.5mm인 Case B에서의 시동하중 효과는 마찰만 있는 경우 20.98kN이고, 이후 앵커와 마찰을 동시에 해석할 시에는 재령일에 따라 각각 13.18kN, 13.96kN, 14.3kN, 14.92kN, 16.45kN으로 분석되었다. Fig. 6(b)는 Case B에서의 내하력 비와 온도 하중과의 관계를 나타낸 것이다. 마찰만 존재할 때에는 온도 변화가 4.50℃ 이내로 발생되어야 안전한 것으로 분석되었고, 온도하중만 재하했을 시에는 온도 변화량에 관계없이 안전한 것으로 분석되었다. 앵커가 설치된 이후는 재령일에 상관 없이 모두 안전한 것으로 분석되었다. 따라서 Case B-Fric 마찰 거동을 가질 경우 앵커 설치 전에는 열차를 서행운행하고, 앵커

Fig. 6 Results of [anchor force]/[design load] ratio under traction load plus temperature variation

설치 후에는 급속경화 콘크리트의 재령 및 온도 변화에 관계없이 정상 운행을 하여도 무방한 것으로 판단된다.

마찰계수가 0.6이고 최대 마찰력 도달 변위가 5mm인 Case C에서 시동하중 효과는 앵커가 설치되지 않아 마찰만 존재할 때 20.98kN이고, 이후 앵커와 마찰을 동시에 고려할 시에는 재령일에 따라 각각 39.88kN, 40.14kN, 40.24kN, 40.35kN, 40.47kN으로 분석되었다. Fig. 6(c)는 Case C에서의 내하력 비와 온도 하중과의 관계를 나타낸 그래프이다. 마찰만 존재할 때에는 온도변화량이 13.00℃ 이내로 유지되면 최대 마찰력에 도달하지 않는 것으로 분석되었다. 앵커와 마찰이 동시에 존재할 때 재령 4시간, 1일, 3일, 7일일 경우에는 온도 변화량이 4.50℃, 4.75℃, 5.00℃, 5.50℃로 유지되어야 앵커부 파손이 발생하지 않는 것으로 분석되었고 재령 28일은 모든 경우에서 안전한 것으로 분석되었다.

온도하중만 재하했을 때에는 마찰만 존재 시 16.25℃, 앵커와 마찰 동시에 존재할 시 재령 4시간 1일은 6.25℃, 7.50℃ 이내로 온도변화량이 발생되어야 안전하고, 이후에는 모든 재령 일에서 안전한 것으로 분석되었다. Case C-Fric 마찰 거동을

가진 Case C의 경우에는 급속경화콘크리트의 재령이 28일 이전인 경우에는 시동하중이 재하되지 않도록 열차를 서행 운행하여야 앵커부에 파손이 발생하지 않은 것으로 판단되며, 이때 온도 변화도 16℃ 이내가 되어야 안전하다. 또한, 1일 이내의 초기 재령 콘크리트에 앵커를 설치할 경우 온도 하중만에 의하여도 앵커부 파손이 발생할 수 있으므로, 앵커는 1일 이후에 설치하는 것이 바람직하다.

마찰계수가 0.6이고 최대 마찰력 도달 변위가 0.5mm인 Case D에서 시동하중 효과는 마찰만 존재할 시 49.56kN, 앵커와 마찰 동시에 존재할 시 재령일에 따라 20.86kN, 21.73kN, 22.14kN, 22.76kN, 24.29kN이 발생하였다. Fig. 6(d)는 Case D에서의 내하력 비와 온도하중 관계를 나타내는 그래프이다. 급속경화경도에 마찰만 존재할 때에는 시동하중이 재하된 경우 온도변화가 1.75℃만 발생하여도 최대 마찰력에 도달하고, 시동하중 없이 온도하중만 재하할 때에는 온도변화량이 3.50℃ 이내로 유지되어야 안전한 것으로 분석되었다. 앵커를 설치한 후에는 모든 경우에서 안전한 것으로 분석되었다. 따라서 Case D-Fric 마찰 거동을 가진 Case D의

경우에는 급속경화궤도 타설과 동시에 앵커를 설치해야 하며, 앵커 설치 후에는 열차의 정상 운행이 가능한 것으로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 교량상 급속경화궤도에 대하여 마찰 거동과 궤도 재령에 따른 앵커의 물성치를 고려한 궤도/교량 상호작용 해석을 수행하였다. 해석 결과로부터 다음의 결론을 도출하였다.

해석 대상 교량인 40m 단순교에 있어서 앵커의 설치 유무에 관계없이 레일의 부가 축응력은 모두 허용 한계인 92MPa를 만족하는 것으로 확인되었다.

급속경화궤도를 타설하고 앵커를 설치하기 전 마찰만으로 종방향 변위에 저항할 때에는 제한된 온도 변화에 대하여만 최대 마찰력에 도달하지 않는 것으로 확인되었다. Case A, Case C와 같이 최대 마찰력 도달 변위가 5mm로 큰 경우에는 시동하중이 재하된 경우에는 허용 온도변화량이 각각 17.00℃, 13.00℃로 분석되었고 서행운행하여 시동하중이 재하되지 않는 경우에는 각각 25.00℃, 16.25℃로 분석되었다. Case B, Case D와 같이 최대 마찰력 도달 변위가 0.5mm로 작은 경우에는 시동하중이 재하된 경우 허용 온도변화량이 각각 4.50℃, 1.75℃로 분석되었고, 서행할 때에는 각각 25.00℃, 3.50℃로 분석되었다.

앵커를 설치한 후 Case A, Case C와 같은 경우에는 재령 28일만 안전하다고 분석되어, 28일 이후 열차의 정상 운행이 가능한 것으로 확인되었다. 열차가 서행운행하여 온도하중만 재하된 경우 Case A는 모든 경우에서 안전하며 Case B는 재령 4시간, 재령 1일일 때 허용 온도변화량이 각각 6.25℃, 7.50℃ 이었고, 이후에는 서행운행이 가능한 것으로 분석되었다.

Case A와 Case C 같이 최대 마찰력 도달 변위가 5mm일 때에는 급속경화궤도 재령 7일 이후에 충분한 강도가 발현된 후 열차의 고속 운행이 가능한 것으로 확인되었다. Case B와 Case D 같이 최대 마찰력 도달 변위가 0.5mm일 때에는 앵커를 설치했을 시 재령일에 관계없이 고속 운행이 가능한 것으로 분석되었다.

위의 해석 케이스를 살펴본 결과, Case A와 같이 마찰계수가 크더라도 최대 마찰력 도달 변위가 커서 마찰 강성이 작은 경우에는 앵커에 부담이 커져서 콘크리트가 충분히 경화된 후 앵커를 설치하여야 한다. Case B와 같이 마찰계수가 크고 최대 마찰력 도달 변위는 작은 경우가 가장 바람직하다. 이때는 앵커 시공 전에 열차를 서행운행하고, 앵커 시공 후에 정상 운행시킬 수 있다. Case C와 같이 마찰계수가 작고 마찰 강성도 작은 경우가 가장 불리하며, 궤도 슬래브에 종방향 변위 발생이 불가피할 것으로 판단된다. Case D와 같이 마찰계수가 작고 최대

마찰력 도달 변위도 작은 경우에는 궤도 타설 후 바로 앵커를 함께 시공하고 4시간 이후 열차를 정상운행할 수 있다.

이 연구 결과를 바탕으로 급속경화궤도 부설 후 안정적인 거동을 보장하기 위해서는 마찰계수 뿐만 아니라 마찰 강성또한 중요한 인자인 것으로 확인되었다. 향후 실제 궤도에 대한 마찰 거동을 바탕으로 교량상 급속경화궤도의 전체 궤도/교량 상호 작용 거동을 평가하는 추가 연구가 필요할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원(고속 철도 자갈궤도 급속경화기술 개발, 17RTRP-B065581-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- ABAQUS (2007) ABAQUS/Standard User's Manual, Version 6.7.1, ABAQUS, Inc., Pawtucket, R.I.
- Chang, S.Y., Lee, I.W., Kang, Y.S. (2013) Track System Technology for Future Advanced Railway Construction, *J. Korean Soc. Civil Eng.*, 61(9), pp.41~51.
- Choi, W.S., Lee, H.Y., Lee, I.H., Jang, S.Y., et al. (2017) Behavior Analysis of Fast Hardening Track on the Bridge, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 17, pp.203~208.
- Hong, J.H., Lee, I.H., Chung, W.S. (2015) Behavior of the FHT on Earthwork Section Considering Thermal Stress, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 15(3), pp.207~213.
- Kim, M.S., Yun, K.M., Lee, C.O., Lim, N.H. (2012) Comparative Study According to Method for Considering Loading History in Track-Bridge Interaction Analysis, *Fall Conference of the Korean Society for Railway*, Korean Society for Railway, pp.1663~1666.
- Korean Standards Association (2006) KS R 9106 : 2006R Rails.
- Korea Rail Network Authority (2014) KR C-08080 Track-Bridge Longitudinal Interaction Analysis.
- Korea Rail Network Authority (2014) KR C-14050 CWR.
- Lee, I.H., Hwang, S.K., Park, T.S., Lee, B.H., et al. (2004) The Investigation of the In-Situ State to Determine the Paved Track Structure, *Fall Conference of the Korean Society for Railway*,

- Korean Society for Railway, pp.48~53.
- Lee, I.W.** (2006) Optimal Design of Cement Mortar Pouring Type Paved Track, *J. Korean Soc. Railway*, 9(2), pp.222~229.
- Lee, K.C., Lee, I.W., Lee, S.C., Chung, W.S.** (2017), Development of Quick Hardening Track System, Proceedings of 4th International Conference on Green Smart Technology (GST 2017), The Korea Academia-Industrial Cooperation Society.
- Liu, J.H.** (2011) Modeling of Friction Resistance between Concrete Pavement Slab and Subbase, Master Thesis, Inha University, p.63.
- Min, K.C., Lee, I.W., Lee, J.S.** (2014) A Study for the Characteristic of Static Stress on the Standard Crosssection of Rapid-Hardening Track, *Spring Conference of the Korean Society for Railway*, Korean Society for Railway, pp.1240~1246.
- Topkaya, C., Yura, J.A., Williamson, E.B.** (2004) Composite Shear Stud Strength at Early Concrete Ages, *J. Struct. Eng.*, 130(6), pp.952~960.

요 지

자갈 궤도는 부설 후 궤도틀림이 발생하여 지속적인 유지·보수 작업이 필요하다. 이를 개선하기 위하여 기존의 자갈 궤도에 급속경화 모르타르를 주입하여 단시간 내에 콘크리트 궤도로 치환할 수 있는 급속경화궤도가 개발되었다. 교량에 부설되는 급속경화궤도는 교량과 궤도의 거동을 일치시키기 위하여 후설치 앵커를 궤도 세그먼트 중앙부에 시공한다. 본 논문은 앵커로 교량과 연결된 급속경화궤도와 교량의 궤도-교량 상호작용 해석을 수행하여 레일 및 앵커의 안전성을 검토하였다. 이때 앵커의 강성 및 강도, 급속경화 콘크리트의 재령, 급속경화궤도와 교량 사이의 마찰을 고려하였다. 이를 바탕으로 급속경화궤도 부설 후 적절한 앵커의 설치시기 및 열차 정상운행 가능시기를 검토하였다.

핵심용어 : 급속경화궤도, 철도교량, 상호작용해석, 앵커, 마찰