

타설 경계면을 고려한 철도교 콘크리트궤도 전단키의 전단 거동 해석

Analysis of Shear Behavior of Shear Key for Concrete Track on Railway Bridge Considering Construction Joint

이성철 · 강윤석 · 장승엽*

Seong-Cheol Lee · Yun-Suk Kang · Seung Yup Jang

Abstract Concrete track on railway bridges should be designed to effectively respond to the movement of the super-structure of the bridge. In the design procedure, shear keys are generally placed on the protection concrete layer (PCL) before casting the concrete track so the shear force due to slip between the concrete track and the bridge super-structure can be transferred. In this paper, a nonlinear structural analysis procedure that considers the construction joint has been developed to predict the shear behavior of a shear key. With the developed analysis procedure, it was possible to predict the shear force-shear slip response at the construction joint in a shear key by considering the friction of concrete surface and the dowel action of the rebars. The analysis results showed good agreement with the test results for 4 specimens.

Keywords : Concrete track, Railway bridge, Shear key, Shear, Friction

초 록 철도교량 구간의 콘크리트 궤도는 교량 상부구조의 움직임에 효과적으로 대응할 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해 일반적으로 전단키로 명명되는 전단키를 교면 보호 콘크리트층(PCL) 위에 일정 간격으로 설치하여 그 위에 궤도 슬래브를 타설함으로써 궤도와 교량 상부구조의 상대 변위에 의해 발생하는 전단력을 전달하도록 설계하고 있다. 이 연구에서는 전단키의 전단 거동을 예측하기 위해 타설 경계면을 고려한 비선형 구조 해석 방법을 제시하였다. 제시된 해석 방법은 콘크리트 면에서의 마찰력과 철근의 다월 거동을 고려함으로써 전단키 타설 경계면(시공이음부)에서의 전단력-전단 미끄러짐 거동을 예측할 수 있으며, 해석 결과 4개의 시험체에 대한 실험 결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

주요어 : 콘크리트궤도, 철도교, 전단키, 전단, 마찰

1. 서 론

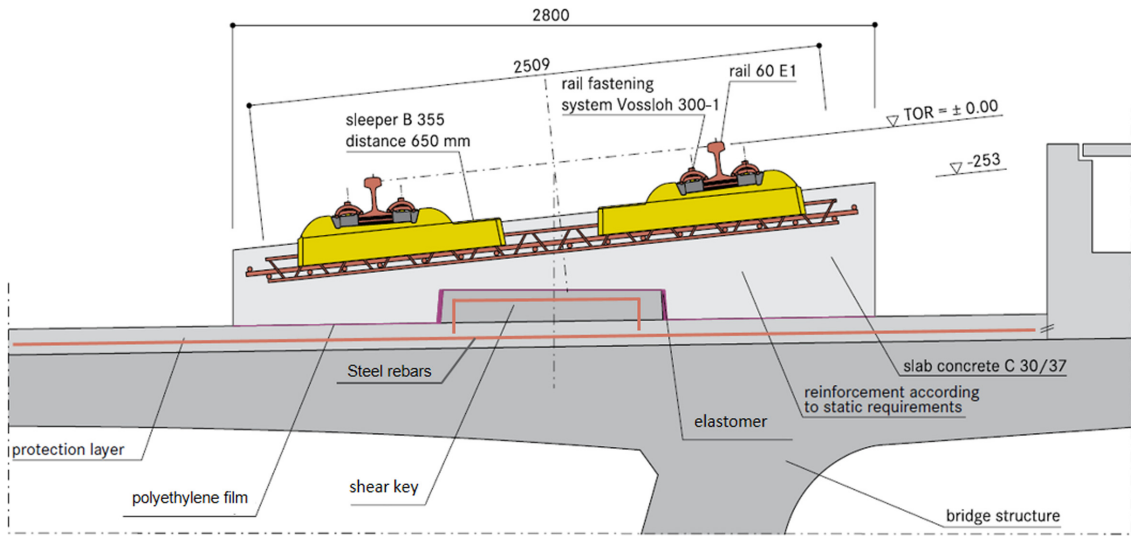
철도교 위에 놓이는 궤도에는 열차 하중에 의한 교량 상부구조의 휨(bending)이나 온도변화에 의한 신축 등 교량의 변형으로 인한 힘이 발생한다[1-3]. 그러므로 철도교 위에 설치되는 콘크리트궤도는 이와 같은 궤도-교량 상호작용에 의해 발생하는 힘을 원활하게 전달할 수 있는 구조로 설계되어야 한다[4,5]. 이 때문에 교량 위의 콘크리트궤도는 일반적으로 Fig. 1에 나타난 바와 같이 교면 보호 콘크리트층(protection concrete layer, PCL) 위에 여러 개의 전단키(shear key 또는 “캠플레이트(camplate)”)를 일정 간격으로 형성시킨 후 각 전단키 측면에 엘라스토머(elastomer)를 부착하고 그 위에 궤도 슬래브(track concrete layer, TCL)를 설치한다. 이로써 궤도와 교량 상부구조 사이에 작용하는 종방향 힘을 여러 개의 전단키들이 나누어 지지할 수 있게 된다[6,7]. PCL 상면에는 분리막(polyethylene film)을 씌워 PCL과 TCL과의 마찰을 최소화한다. 전단키는 궤도 슬래브의 길이 변화를 구속하게 되므로, 교량의 변형이나 열차 시제동 하중 등 궤도 외적 요인에 의한 힘 외에도 궤도 슬래브 자체의 온도변화에 의한 신축에 의해서도 전단력이 발생한다. 전단키는 이렇게 작용하는 모든 전단력에 저항할 수 있도록 설계되어야 하며, 이를 위해 PCL과 전단키 간의 경계를 수직으로 관통하는 철근을 배근한다(Fig. 1 참조).

전단키는 일반적으로 PCL 위에 볼록하게 튀어나와 있는 형태이기 때문에 PCL을 먼저 타설하여 경화된 이후에 분할 타설된다. 따라서 전단키의 전단거동을 보다 정확히 해석하기 위해서는 분할 타설에 의해 발생한 타설 경계면(시공이음부)에서의 국부적인 전단 거동 특성을 고려해야 한다. 하지만 현재 콘크리트궤도 설계에서는 이러한 타설 경계면의 전단 거동을 고려하지

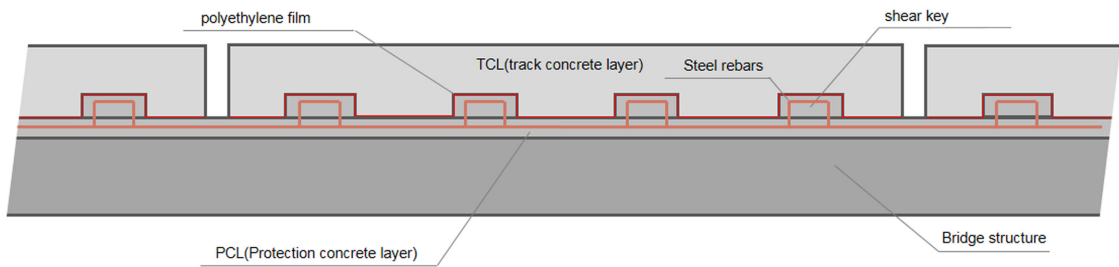
*Corresponding author. Tel.: +82-31-460-5302, E-mail: syjang@krii.re.kr.

© 2016 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2016.19.3.341>



(a) transverse section



(b) longitudinal section

Fig. 1. Structure of concrete track on bridge.

않고 PCL과 전단키가 일체 타설된 구조로 가정하고 있어 전단키의 전단강도를 과대평가할 가능성이 높다.

따라서 이 논문에서는 교량상 콘크리트궤도 전단키의 합리적인 설계방법을 확립하기 위해 전단키의 전단 거동을 보다 정확히 예측하기 위한 해석방법을 제시하는 것을 목적으로 한다. 이를 위해 PCL과 전단키의 분할 타설 경계면에서의 국부적인 전단 거동 특성을 고려하여 전단키의 전단 거동을 해석적으로 분석하고 실험결과와 비교함으로써 해석결과를 검증하였다.

2. 전단키의 설계 - 현재의 설계 방법

경부고속철도 2단계 궤도 실시설계보고서[7]에 따르면 PCL과 전단키가 완전한 단일체인 경우 Fig. 2와 같이 스트럿-타이 (strut-tie) 모델을 가정할 수 있고, 이 때 스트럿과 타이에 작용하는 힘은 Eurocode 2 [8]에 따르면 각각 아래 식과 같이 구할 수 있다.

$$T = \frac{V}{2.5} \leq \frac{f_y A_s}{\gamma_s} \quad (1)$$

$$C = \sqrt{V^2 + T^2} \leq \frac{0.6 \alpha_c f_{ck} A_c}{\gamma_c} \quad (2)$$

여기서, A_s 는 타이에 설치되는 철근면적, A_s 는 스트럿의 면적, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도 특성값이며, α_c 는 콘크리트 장기하중을 고려한 계수로 일반적으로 0.85로 가정한다. 또 γ_s , γ_c 는 각각 철근과 콘크리트에 대한 부분안전계수로 $\gamma_s=1.15$, $\gamma_c=1.5$ 이다. 따

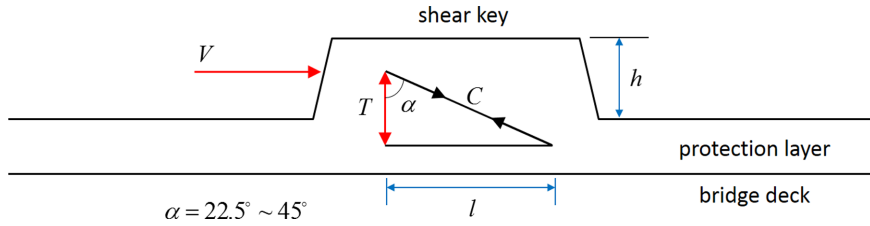


Fig. 2. Strut-Tie model for design of shear key (current design approach).

라서 위 두 식에 의해 하나의 전단키가 받을 수 있는 최대 강도는 아래와 같이 산정할 수 있다.

$$V_{\max} = \min \left[\frac{2.5f_y A_s}{\gamma_s}, 0.93 \left(\frac{0.6\alpha_c f_{ck} A_c}{\gamma_c} \right) \right] \quad (3)$$

전술한 바와 같이 식 (3)과 같이 타설 경계면의 특성을 고려하지 않고 PCL과 전단키를 일체 구조로 가정할 경우 전단강도를 과대평가하게 된다.

3. 타설 경계면을 고려한 전단키의 비선형 전단 거동 해석

3.1 비선형 전단 거동 해석 개요

전단키의 전단 거동을 검토하기 위해서는 PCL과 전단키의 시공 상황을 고려하여야만 한다. 앞서 설명한 바와 같이 전단키는 PCL 위에 블록하게 튀어나온 형태로 되어 있어서 PCL을 먼저 제작한 후 전단키를 타설함으로써 분할 타설의 형태로 제작된다. 이와 같이 분할 타설로 제작될 경우 분할 타설 경계면에서의 국부적인 전단 거동 특성이 전단키의 전단 거동을 지배하게 되며, 따라서 PCL과 전단키 사이의 타설 경계면에 대한 전단 거동 해석이 별도로 필요하게 된다.

타설 경계면에서의 전단 내력 검토 시에는 전단 마찰에 의한 콘크리트의 전단 저항 능력과 철근의 다월 작용(dowel action)에 의한 전단 저항 능력을 모두 고려하여, 타설 경계면에서의 전단 저항 능력이 설계에 의한 하중에 충분히 버틸 수 있는지 검토하여야만 한다. 또한, 전단키는 PCL로부터 일정 높이만큼 튀어나온 형태이므로 전단 하중에 의해 전단키 자체에 힘이 발생하게 되며, 이로 인해 타설 경계면이 일정한 축력을 받지 않고 압축과 인장이 작용하는 영역으로 나뉘게 된다. 따라서 이와 같이 힘에 의해 서로 다르게 분포하는 축력으로 인해 전단 마찰에 의한 콘크리트 전단 저항 능력 및 철근의 다월 작용에 의한 거동이 영향을 받게 된다. 따라서 본 논문에서는 실제 전단키의 제작 과정과 힘 및 전단의 복합적인 상호작용을 고려하여, PCL과 전단키 사이의 타설 경계면에서의 전단 거동에 대한 해석 방안을 마련하고, 실험 결과와의 비교를 통해 개발된 해석 방안을 검증하고자 한다.

3.2 타설 경계면 해석 모델링

3.2.1 콘크리트 마찰에 의한 전단 거동

Fig. 3은 전단키에 작용하는 힘과 PCL과 전단키 사이의 타설 경계면에서 발생하는 응력 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 전단키에 수평 전단력을 가하게 되면, PCL 상면으로부터 전단키 높이의 절반만큼 떨어진 곳에 수평 하중의 중심이 형성되게 되며, 이로 인해 전단키에 전단력뿐만 아니라 모멘트가 발생하게 된다. 모멘트에 의해 전단키에 힘이 발생하게 되면 PCL과 전단키 사이의 타설 경계면 중 일부는 압축력을, 일부는 인장력을 받게 된다. 이 때 타설 경계면에서의 콘크리트 인장강도는 거의 무시될 수 있으므로, 결국 타설 경계면 중 인장력을 받는 부분에는 인장력의 크기와 관계없이 균열이 발생하게 된다.

압축력이 발생하는 타설 경계면에서의 콘크리트 전단 마찰에 의한 전단강도(v_{Rdt})는 Eurocode 2 [8]에 제시되어 있는 전단 마찰 모델에서 철근에 의한 부분을 제외함으로써 다음과 같이 산정할 수 있다.

$$v_{Rdt} = c f_{ctd} + \mu \sigma_n \quad (4)$$

여기서, c 및 μ 는 타설 경계면의 상태를 고려하는 계수로서, 타설 경계면이 타설 후 추가적인 조치 없이 방치된 경우 각각

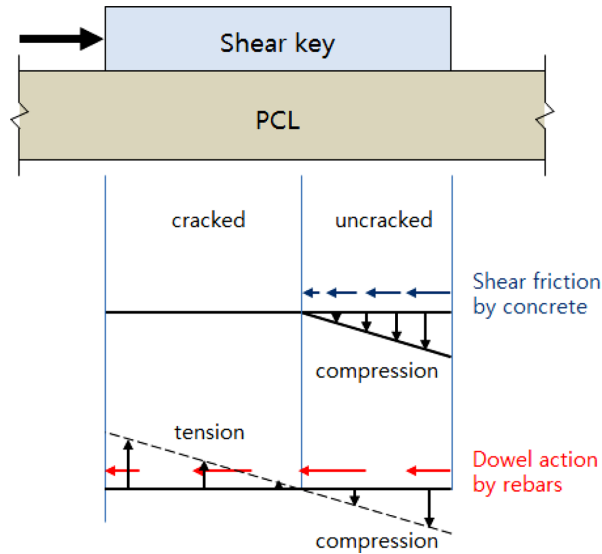


Fig. 3. Stress distribution along the construction joint.

0.35와 0.6으로 정할 수 있다[8]. f_{ctd} 는 콘크리트 인장 강도를, σ_n 은 타설 경계면에 작용하는 압축력을 의미한다.

압축력이 발생하는 타설 경계면에서는 콘크리트의 전단 마찰에 의한 기여도를 고려하여야 하지만, 인장력으로 인해 균열이 발생한 타설 경계면에서는 콘크리트의 전단 마찰에 의한 기여도가 굉장히 작아지게 된다. 일반적으로 보통강도 콘크리트의 균열면에서는 균열이 골재의 계면을 따라 형성한 데 따른 골재 맞물림으로 인한 전단 마찰 기여도가 균열폭이 작은 경우 상당한 것으로 알려져 있다. 하지만, 타설 경계면에서는 타설 시 다짐 등으로 인해 타설 경계면에서의 골공이 상대적으로 굉장히 작게 되며, 이에 따라 골재 맞물림 등으로 인한 타설 경계면에서의 전단 마찰에 의한 기여도가 굉장히 작게 된다. 따라서, 균열이 발생한 타설 경계면에서의 전단 마찰을 무시함으로써 보수적으로 전단기의 전단 저항력을 평가하거나, 또는 기존의 모델에 의한 전단 마찰력을 감소시킴으로써 좀 더 합리적으로 전단기의 전단 저항 능력을 예측할 수 있다.

인장력이 발생하는 타설 경계면에서는 Vecchio & Lai [9]에 의해 제안된 아래의 균열면에서의 전단 응력(v_{ci})-전단 미끄럼(δ_s) 모델을 적용할 수 있다.

$$\delta_s = \delta_2 \sqrt{\frac{\psi}{1-\psi}} \tag{5}$$

$$\delta_2 = \frac{0.5v_{c,max} + v_{co}}{1.8w^{-0.8} + (0.234w^{-0.707} - 0.2)f_{cc}} \tag{6}$$

여기서, $\psi = v_{ci}/v_{c,max}$, $v = f_{cc}/30$, f_{cc} 는 큐브 형태의 시편으로부터 측정된 콘크리트 압축강도, w 는 균열폭이며, 최대 전단 마찰력 $v_{c,max}$ 는 다음과 같이 계산되어진다[10].

$$v_{c,max} = \frac{\sqrt{f'_c}}{0.31 + \frac{24w}{a+16}} \tag{7}$$

여기서, a 는 굵은 골재 최대 치수이다.

기존 연구에서는 균열면에서의 전단 응력-전단 미끄럼 모델이 제시되어 있다[9,10]. Fig. 4는 이 중에서 Vecchio & Lai [9]에 의해 제안된 모델을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 균열폭이 증가할수록 전단 마찰에 의해 저항되는 최대 전단 응력은 급격히 감소하는 것을 볼 수 있으며, 전단 미끄럼이 증가함에 따라 최대 전단 응력에 도달하는 속도 또한 각각 다른 것을 볼 수 있다.

한편, Eurocode 2 [8]에서는 타설 경계면에 압축 응력이 작용할 경우 식 (4)와 같이 골재 맞물림 등에 의한 전단 마찰 능력

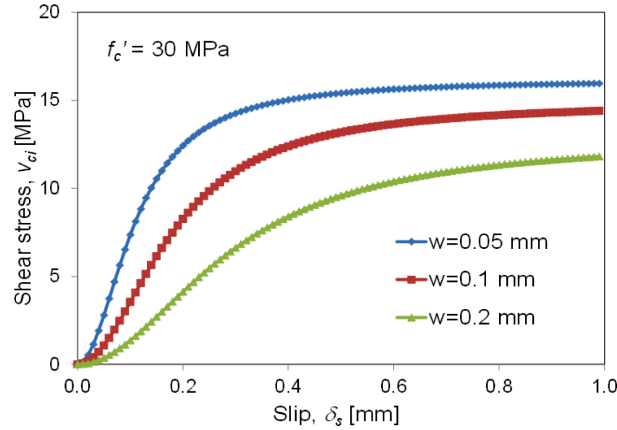


Fig. 4. Shear stress and slip response from Vecchio & Lai [9].

으로 인정하지만, 타설 경계면에 압축 응력이 작용하지 않을 경우 전단 마찰 저항 능력이 없는 것으로 가정하고 있다. 일반적으로 타설 경계면이 일반적인 균열면에 비해 평탄한 것으로 고려할 때, 타설 경계면에 균열이 발생할 경우 골재 맞물림 등을 고려하여 인정되는 전단 마찰 저항 능력이 일반적인 균열면에서의 전단 저항 능력보다 굉장히 작은 것을 알 수 있다. 따라서, 전단키 타설 경계면에서의 전단 거동 해석 시에는 Vecchio & Lai [9]가 제시한 모델을 상당히 감소시켜 적용해야 된다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 철근의 다월 거동에 의한 전단 거동

PCL과 전단키 타설 경계면에서의 전단 거동 해석 시에는 콘크리트의 전단 마찰 거동뿐만 아니라 타설 경계면을 관통하는 철근들, 즉 전단 철근들의 다월 작용을 고려해야 한다. 철근의 다월 작용은 Fig. 5에서 보는 바와 같이 철근의 배근 위치에 따라, 콘크리트 피복 두께에 따라 콘크리트 코어에 대한 철근의 다월 작용[11]과 콘크리트 피복의 탈락을 고려한 철근의 다월 작용 [12] 등 두 가지로 구분될 수 있다. 실제 전단키에 배근된 전단 철근들 중 일부는 수평하중을 커버하는 콘크리트 피복 두께가 상대적으로 작은 전단키 외곽에 배근되기 때문에, PCL과 전단키 타설 경계면에 대한 전단 거동 해석 시에는 철근의 배근 위치에 따라 서로 다른 철근의 다월 작용 모델을 적용해야 한다.

콘크리트 코어에 대한 철근의 다월 작용을 고려할 경우 Soroushian *et al.* [11]에 의해 제시된 다음의 모델을 적용할 수 있다.

$$V = V_u(S/S_u)^{0.5} \quad \text{단, } S \leq S_u \quad (8)$$

여기서, S 는 전단미끄러짐을 의미한다. V_u 와 S_u 는 다월 거동에 의한 최대 전단력과 이에 상응하는 전단 미끄러짐을 의미하며, 다음의 식으로부터 구할 수 있다.

$$V_u = 0.05f_b(0.37\gamma d_b - c)^2 + 0.45f_y d_b^2 (1 - T^2/T_y^2) \gamma \quad (9)$$

$$S_u = 2.43 \times 10^{-5} D_u + 0.24 \quad (10)$$

여기서, d_b 는 다월 철근의 직경, D_u 는 S_u 도달 시의 전단미끄러짐, $\gamma = 4\sqrt{E_s/K_f d_b}$, K_f 는 콘크리트 기반 계수로서 271.7MPa/mm, $E_s = 200000$ MPa, $f_b = 37.6\sqrt{f'_c}/\sqrt[3]{d_b}$, T 및 T_y 는 다월 철근의 인장력 및 항복 시의 인장력, 그리고 $c = 0.05f_y d_b/f'_c$ 이다.

상기의 모델에서 Soroushian *et al.* [11]은 최대 전단력 도달 이후 전단 미끄러짐이 증가함에 따라 가력 방향으로의 콘크리트 쪼개짐 현상으로 인해 전단력이 감소하는 것으로 제시하고 있으나, Randle [13]은 다월 철근 하나의 거동을 개별적으로 예측함으로써 최대 전단력 이후 소성 구간이 나타나는 것으로 제시하고 있다. 실제 전단키의 경우 Soroushian *et al.* [11]이 수행한 시험체들보다 크기 때문에 가력 방향으로의 콘크리트 쪼개짐 현상의 영향이 미미할 것으로 판단되며, 따라서 본 논문에서는 최대 전단력 도달 이후 소성 구간이 나타나는 것으로 철근의 다월 거동을 고려하였다.

한편, 가력 방향으로의 콘크리트 피복 두께가 작을 경우 최대 다월 하중이 콘크리트 피복의 탈락에 의해 결정되며, 이 때의 최대 다월 하중은 다음의 식으로부터 계산되어진다[12].

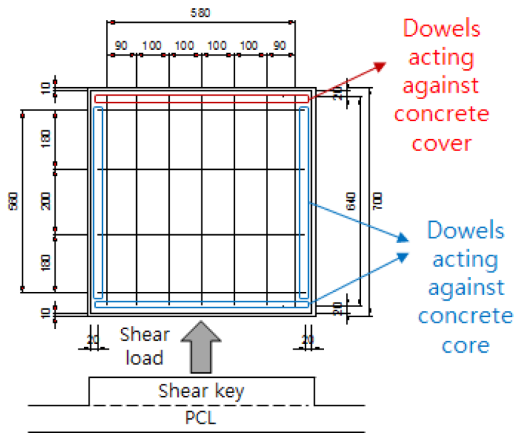


Fig. 5. Dowel bar configurations in the shear key.

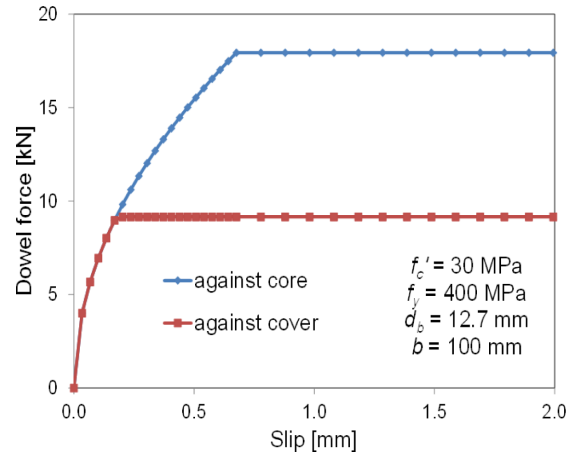


Fig. 6. Dowel force-slip response of a reinforcing bar.

$$V_{cr} = 0.83(b-d_b) \times c_1 \times f_t \tag{11}$$

여기서, b 는 다웰 철근 한 개에 해당하는 콘크리트 유효폭이며, $c_1 = \pi / (2^4 \sqrt{(K_f d_b) / (4E_s I_b)})$, $f_t = 0.63 \sqrt{f'_c}$, 그리고 $I_b = \pi d_b^4 / 64$ 이다.

본 논문에서는 수평 하중 작용 시 옆면에서 봤을 때 최외곽에 배치된 철근들, 즉 콘크리트 커버의 탈락이 가능할 것으로 판단되는 가력 반대편 최외곽 철근에 대해서는 콘크리트 피복의 탈락을 고려한 철근 다웰 작용으로, 나머지 철근들에 대해서는 콘크리트 코어에 대한 철근 다웰 작용으로 고려하였다.

Fig. 6은 상기의 두 모델들을 토대로 압축강도가 30MPa인 콘크리트에 인장강도가 400MPa인 철근이 균열면 또는 타설 경계면에 수직으로 묻혀있을 경우 다웰 거동을 콘크리트 피복 탈락 유무에 따라 상호 비교한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 콘크리트 피복의 탈락 등에 의해 최외곽에 위치한 철근의 경우 상대적으로 최대 저항할 수 있는 다웰 작용이 다른 위치에 배근된 철근들보다 작을 것으로 예상할 수 있다.

3.3 해석 알고리즘

전단기 타설 경계면의 전단 거동을 해석하기 위해서는 기본적으로 두 가지 해석을 동시에 수행해야 한다. 즉, 수평 하중으로 인한 모멘트를 고려한 전단기 휨 해석 및 PCL과 전단기 사이의 타설 경계면에 대한 전단력-전단 미끄럼 해석을 수행해야 한다. 특히, 휨 해석으로부터 타설 경계면에서의 균열폭을 산정하고 이로부터 골재 맞물림 등에 의한 콘크리트 전단 마찰 거동을 산정할 수 있으며, 휨 해석 시 고려된 수평 하중의 크기가 타설 경계면에서의 전단력과 같아야 되기 때문에, 휨 및 전단 미끄럼 해석은 별도로 수행되는 것이 아니라 서로의 영향을 고려한 반복 계산 작업이 필요하게 된다.

Fig. 7은 주어진 타설 경계면에서의 전단 미끄럼으로부터 수평 하중 크기를 산정하는 해석 알고리즘을 나타낸 것이다. 그림에서 나타낸 바와 같이, 주어진 타설 경계면에서의 미끄럼에 대해 바로 전 반복 계산 단계에서의 휨 해석 결과를 이용하여 균열폭 및 전단 철근의 응력을 산정하고, 이로부터 타설 경계면에서의 전단력 및 모멘트를 계산하고 현재의 반복 계산 단계에서 가정된 수평 하중 크기와 동일해야 한다는 조건을 확인함으로써 해석을 수행할 수 있다. 즉, 휨 해석 이후 타설 경계면 전단 거동 해석 시, 주어진 전단 미끄럼에 대해 먼저 수평력을 가정하고, 전단 미끄럼에 상응하는 전단력을 휨 해석으로부터 주어진 인장영역과 압축영역에 대해 콘크리트 마찰에 의한 전단력을 각각 산정하며, 전단 철근의 다웰 작용에 의한 전단력을 계산하게 된다. 이후 식 (12)를 통해 가정된 수평력에 대한 평형조건을 만족하는지 확인할 수 있으며, 반복 계산을 통해 주어진 미끄럼에 대해 평형조건을 만족하는 수평력을 찾을 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{총 수평 전단력} = & (\text{압축영역에서의 콘크리트 마찰력}) + (\text{인장영역에서의 콘크리트 마찰력}) \\ & + (\text{전단철근 다웰작용에 의한 전단력}) \end{aligned} \tag{12}$$

전단기의 타설 경계면 전단 거동 해석은 전단 미끄럼을 점차적으로 증가시킴으로써 수행할 수 있으며, 이로부터 전단기 수평 하중-수평 변위(타설 경계면 전단 미끄럼) 거동을 예측할 수 있다.

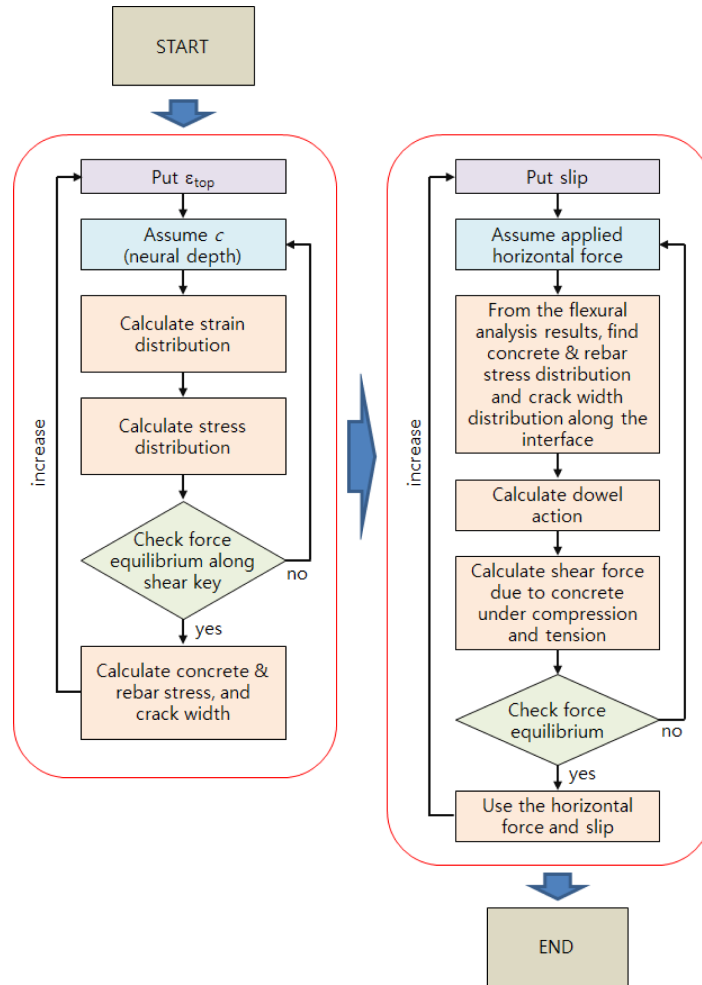


Fig. 7. Analysis algorithm for the shear behavior of shear key.

4. PCL 전단키 전단 실험 결과와의 비교 및 검증

4.1 해석 대상 시험체

제안된 해석 방안의 검증을 위해 전단키의 전단 거동을 분석하기 위해 실험이 수행된 4개의 시험체[14]에 대해 해석을 수행하였다. 참고로 본 논문에서 고려된 4개의 시험체는 실제의 철도교량 콘크리트 궤도에 적용되는 전단키를 그대로 묘사한 것으로서 제작 과정 또한 실제 현장의 방법을 준용하여 제작된 것이다. 검증을 위해 고려된 시험체에서의 실험 변수는 전단키의 크기 및 다웰 철근의 수량이며, 변수에 따른 각 시험체의 상세와 실험으로부터 측정된 최대 전단강도, 그리고 식 (3)으로부터 구한 설계 전단강도를 Table 1에 정리하였다. 모든 시험체에는 현재 콘크리트 궤도에 적용되는 콘크리트 및 철근의 강도를 고려

Table 1. Specimens to determine shear behavior of shear key.

Specimen	Shear key size (mm)	Nominal size and number of vertical rebars (Loading direction × Transverse direction)	Ultimate shear force (kN)			
			Test [14]	Design (by Eq. (3))	This study w/ aggregate interlock	This study w/o aggregate interlock
S11	700×700×130	H13, 4×7	408.1	440.7	424.2	353.3
S12	700×700×130	H13, 7×4	428.9	771.2	492.3	422.5
S21	500×500×130	H13, 3×5	308.3	330.5	293.6	258.6
S22	500×500×130	H13, 5×3	323.7	550.9	342.8	308.5



Fig. 8. Test set-up for shear key [14].

하여 압축강도 30MPa의 콘크리트 및 인장강도 400MPa의 철근이 사용되었으며, 2×2×0.15m의 콘크리트 판이 PCL로 고려되었다. Fig. 8은 시험체의 형상 및 시험 모습을 나타낸 것이며, 시험체 배근 상세 및 크기는 Fig. 5에 나타내었다.

Table 1에서 설계 전단강도는 모든 경우 측정된 전단강도보다 더 크며, 따라서 식 (3)은 전단강도를 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 이는 식 (3)에서 가정한 수직 철근의 항복이나 콘크리트 압축파괴에 의해 전단키가 파괴되지 않는다는 것을 보여준다.

4.2 해석 및 실험 결과와의 비교

전단키 시험체에 대한 전단 거동을 예측하는데 있어, 균열이 발생한 경계면에서의 콘크리트 전단 마찰력의 고려 여부에 따라 크게 두 가지의 경우로 해석을 수행하였다. 즉, PCL과 전단키 타설 경계면에서의 콘크리트 전단 마찰을 무시한 보수적인 해석 방법과, 이에 반해 일반적인 철근콘크리트 부재의 균열면에 대한 전단 마찰력에 아래의 식과 같이 감소계수를 고려하여 해석하는 방법 등 두 가지의 해석을 수행하였다.

$$v_{c,max,red} = \kappa_{red} v_{c,max} = \frac{\kappa_{red} \sqrt{f'_c}}{0.31 + \frac{24w}{a+16}} \quad (13)$$

여기서, κ_{red} 은 감소계수로서 타설 경계면이 일반적으로 발생하는 균열면보다 훨씬 부드러운 것을 고려하여 0.01로 가정하였으며, 이는 BCDM(Basic Contact Density Model)[15]에서 균열면이 부드러울 경우 골재 맞물림 효과가 급격히 감소한다는 것에 근거한 것이다. $v_{c,max}$ 는 식 (7)로부터 계산되어지는 일반적인 균열면에서의 최대 전단 저항 능력, $v_{c,max,red}$ 는 타설 경계면에서의 감소된 최대 전단 저항 능력으로서 타설 경계면에서의 전단응력(v_{ci}) 산정 시 $v_{c,max}$ 를 대신하여 사용된다.

PCL과 전단키 타설 경계면에서의 전단 거동 해석 결과를 실험 결과와 함께 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 S11 및 S21 시험체의 경우 골재 맞물림에 의한 균열면에서의 전단 마찰 효과를 부분적으로 고려한 해석 결과가 초기 강성 및 최대 전단 강도를 비교적 정확하게 예측하는 것으로 나타난 반면, S12 시험체의 경우 균열면에서의 골재 맞물림 효과를 무시한 해석 결과가 실험 결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 즉, 타설 경계면의 거칠기나 부착상태에 따라 골재 맞물림 효과가 달라지기 때문에 시험체마다 골재 맞물림 효과 고려 여부에 따른 해석 결과의 정확성이 달라지는 것으로 판단된다. S22 시험체의 경우 실험 결과 초기 강성이 다른 시험체에 비해 작게 측정되어 해석 결과가 초기 강성을 크게 예측하는 것으로 나타났으나, 최대 전단강도는 골재 맞물림 효과를 무시한 해석 결과가 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. S22 시험체의 초기 강성이 상대적으로 낮은 것은 시험체 제작 시 발생한 실험 오차로 추정된다.

이와 같이, 타설 경계면에서의 전단 마찰 효과의 영향에 따라 예측의 정확성이 다소 영향을 받지만, 이 연구에서 제시한 해석 방법은 실제 전단키의 전단 거동을 전반적으로 잘 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 특히, Table 1에서 나타난 바와 같이, 전단강도에 대한 실험 결과와의 비교에서 실험결과/예측값 비가 식 (3)을 이용한 기존의 방법은 평균 0.75, 변동계수 0.24로 나타난 반면, 본 논문에서 제안한 해석방법의 경우 골재 맞물림 효과 고려 유무에 따라 각각 평균 0.96 및 1.10, 변동계수는 모두 0.07로 나타났다. 즉, 불확실한 타설 경계면 상태의 영향이 다소 존재하긴 하나, 본 논문에서 제안한 해석방법이 전단키의 전단 강도를 보다 합리적으로 평가하는 것으로 나타났다. 이는 전단키가 PCL과 분할 타설될 경우 타설 경계면의 전단 거동 특성, 즉 콘크리트 전단 마찰과 철근의 다월 작용에 의해 전단강도가 결정된다는 것을 보여주는 결과이다. 따라서 전단키에 작용하는 휨

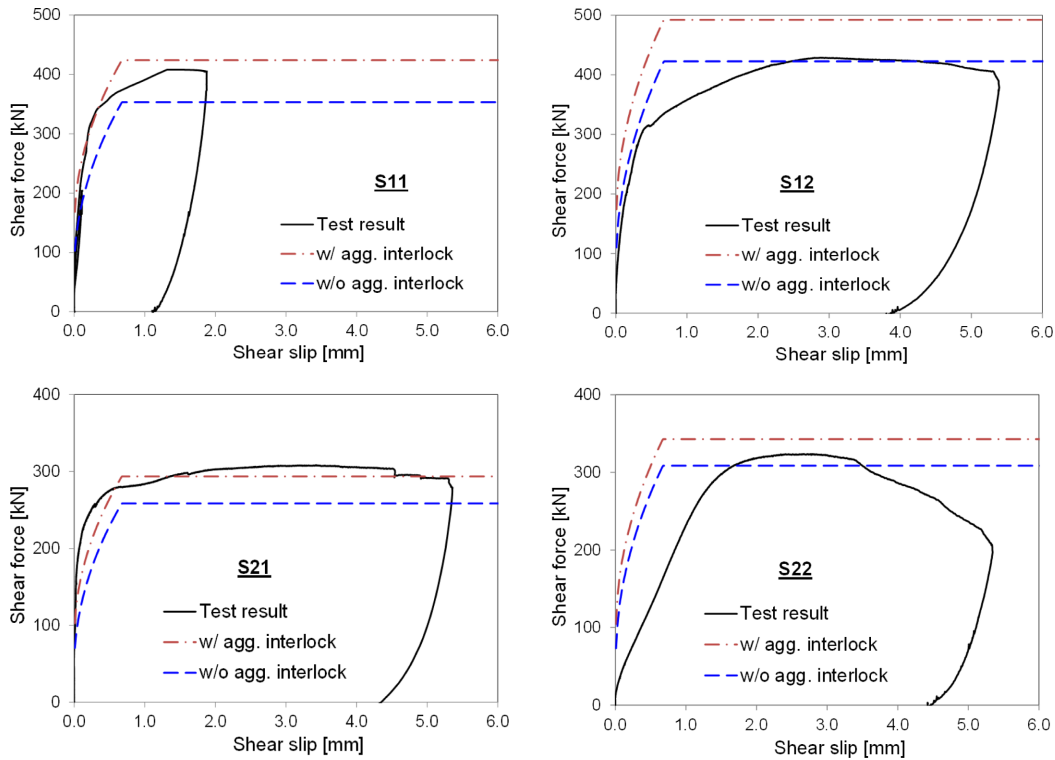


Fig. 9. Comparison of predictions and test results for shear behavior of shear keys.

거동과 함께 타설 경계면의 전단 거동 특성을 고려할 경우, 분할 타설된 전단키의 전단 거동을 합리적으로 예측할 수 있다고 판단된다. 또한, 분할 타설된 전단키를 설계할 때 균열이 발생하는 경계면에서의 콘크리트 전단 마찰력을 무시함으로써 안전율을 고려한 합리적인 전단 설계가 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 논문에서는 분할 타설된 철도교 콘크리트궤도 전단키의 수평 전단 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 타설 경계면 해석 방법을 제시하였다. 제안된 해석 방법은 전단키를 모사한 시험체의 실험 결과와의 비교를 통해 검증하였다. 이 연구를 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 이 연구에서 제시한 전단키에 작용하는 힘에 의한 영향과 함께 PCL과 전단키 사이의 타설 경계면의 전단 거동 특성, 즉 콘크리트 전단 마찰과 수직 철근의 다월 작용을 고려한 해석 방법은 실험으로부터 측정된 전단력-전단 미끄러짐 거동을 전반적으로 잘 예측하는 것으로 나타났다.

(2) 실제 타설 경계면의 거칠기나 부착상태 등에 따라 인장 영역에서의 골재 맞물림에 의한 콘크리트 마찰력이 달라지므로 골재 맞물림 효과의 고려 여부에 따른 해석 결과의 정확도는 시험체마다 다르게 나타났으나, 골재 맞물림에 의한 효과를 무시할 경우 모든 시험체의 전단강도를 안전측으로 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 따라서 실제 설계에서는 골재 맞물림 효과를 무시함으로써 안전율을 고려한 전단키의 합리적인 전단 설계가 가능할 것으로 판단된다.

(3) 또한 이 연구에서 제안한 해석 방법은 향후 휨과 전단을 동시에 받는 타설 경계면을 갖는 유사 구조물의 전단 설계에도 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업(과제번호: 15RTRP-B067919-03)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] International Union of Railways (2001) *Track/bridge Interaction Recommendations for Calculations, UIC Code 774-3R*.
- [2] I.-Y. Choi, H.-C. Cho, S.-C. Yang, J.-Y. Choi (2009) Development of design chart for investigating an additional rail stress and displacements on CWR (II) Design chart for railway bridge of conventional line, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(4), pp. 574-581.
- [3] I.-Y. Choi, H.-C. Cho, S.-C. Yang, J.-Y. Choi, J.Y. Yu (2009) Development of design chart for investigating an additional rail stress and displacements on CWR (I) Design chart for high-speed railway bridge, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(4), pp. 565-573.
- [4] C. Esveld (2001) *Modern Railway Track*, MRT-Productions, Zaltbommel, The Netherlands, p. 653.
- [5] DB Systemtechnik (2002) *Requirements Catalog for the Construction of Fixed Track*, 4th ed. (in German).
- [6] <http://www.railone.de/en/products-solutions/railways-and-commuter-traffic/ballastless-track-systems/rheda-2000r.html> (Accessed on June 2016).
- [7] Korea Railroad Technical Corporation (2006) *Execute Design of Track for Gyeong-Bu High Speed Line 2nd Phase(Dong-Daegu~Busan)*, Korea Railway Network Authority.
- [8] British Standards Association (2004) *Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General Rules and Rules for Buildings*, BS EN 1992-1-1.
- [9] F.J. Vecchio, D. Lai (2004) Crack shear-slip in reinforced concrete elements, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 2(3), pp. 289-300.
- [10] J.C. Walraven (1981) Fundamental analysis of aggregate interlock, *ASCE Journal of the Structural Division*, 107(11), pp. 2245-2270.
- [11] P. Soroushian, K. Obaseki, M.C. Rojas, J. Shim (1986) Analysis of dowel bars acting against concrete core, *ACI Structural Journal*, 83(4), pp. 642-649.
- [12] P. Soroushian, K. Obaseki, M.C. Rojas, H.S. Najm (1987) Behavior of bars in dowel action against concrete cover, *ACI Structural Journal*, 84(2), pp. 170-175.
- [13] N. Randl (2007) Load bearing behaviour of cast-in shear dowels, *Beton-und-Stahlbetonbau*, 102, pp. 31-37.
- [14] Y.-S. Kang *et al.* (2015) *Study on Design Standards of Track Systems for the High-Speed Railway at 400km/h*, Final Report, Korea Railroad Research Institute, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement, Korea Ministry of Land, Infrastructure and Transport.
- [15] K. Maekawa, H. Okamura, A. Pimanmas (2003) *Non-linear mechanics of reinforced concrete*, CRC Press, p. 768.

(Received 20 January 2016; Revised 8 April 2016; Accepted 4 May 2016)

Seong-Cheol Lee : scllee@kings.ac.kr

Department of NPP Engineering, KEPCO International Nuclear Graduate School, 658-91, Haemaji-ro, Seosaeng-myeon, Ulsan-gun, Ulsan 45014, Korea

Yun-Suk Kang : yskang@krri.re.kr

Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea

Seung Yup Jang : syjang@krri.re.kr

High-Speed Railroad System Research Center, Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do 16105, Korea