



콘크리트 일탈방호시설의 구조성능에 관한 실험 연구

Experiment Study on Structural Performance of Concrete Derailment Containment Provision (DCP)

김지환* · 이나현** · 강윤석*** · 송민아****

Kim, Jihwan*, Yi, Na-Hyun**, Kang, Yun-Suk***, and Song, Mina****

Abstract

A derailment containment provision (DCP) was developed to minimize casualties and damage to vehicles when a train derailed on a railway bridge. In this study, the structural performance of precast concrete DCP connected with a post-installed anchor to a concrete slab (TCL) on a railway bridge was verified. For this purpose, a total of six specimens of TCL and DCP were manufactured and static tests were conducted to evaluate the structural performance of the DCP-TCL specimens. Furthermore, the shear resistance of the connecting anchor for the DCP-TCL specimens was also evaluated. The results show that both the structural performance of the DCP-TCL specimen and the anchor performance of the joint of the DCP-TCL specimen meet performance requirements, and that there is no problem in terms of structural stability.

Key words : Derailment Containment Provision, DCP, Concrete Slab Track, Train Derailment

요 지

철도교량에서 운행 중인 열차가 탈선할 경우 열차의 차륜(wheel)이 1차적으로 접촉하여 열차가 선로에서 크게 벗어나는 것을 방지해 승객과 차량의 피해를 최소화할 수 있는 일탈방호시설(derailment containment provision, DCP)이 최근 국내에서 개발되었다. 본 연구에서는 철도교량의 콘크리트 궤도 슬래브(track concrete layer, TCL)에 후설치 앵커로 연결된 프리캐스트 콘크리트 DCP의 구조적 성능을 검증하였다. 이를 위해 TCL과 DCP로 이루어진 실대형 실험체를 총 7개 제작하였으며, DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 성능과 연결부 앵커의 전단저항 성능 평가를 위한 정적 실험을 수행하였다. 실험 결과 DCP와 DCP-TCL 결합 실험체의 연결부 앵커 모두 요구성능을 만족하여, 구조 안정성 측면에서 문제가 없는 것으로 판단된다.

핵심용어 : 콘크리트 일탈방호시설, DCP, 콘크리트궤도 슬래브, TCL, 열차 탈선

1. 서 론

열차 충돌, 탈선, 화재 및 기타 열차사고로 구성된 열차사고는 최근 10년(2008~2017)간 총 53건(평균 5.3건)이 발생하였다(KOSIS). 이중 열차의 탈선사고는 발생 빈도가 낮으나 사고 발생 시 인명 피해뿐만 아니라 철도 안전성에 대한

이용객의 의구심이 증폭될 수 있어, 이에 대한 대비책이 필요하다.

국내에서는 탈선 열차의 방호와 관련하여 한국철도시설공단 「철도설계지침 및 편람-본선부대 및 안전시설」(KRC 02060, 2013)에는 교량 관련 부대시설로 상판에 부설해야 하는 시설물 중 하나로 ‘탈선 방호벽’을 지정하고 있다.

*교신저자, 정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원(Tel: +82-31-406-5739, Fax: +82-31-406-5739, E-mail: jihwan@krii.re.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

**정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 선임연구원

Member, Senior Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

***정회원, 한국철도기술연구원 첨단궤도토목본부 책임연구원

Member, Principal Researcher, Advanced Railroad Civil Engineering Division, Korea Railroad Research Institute

****정회원, 과학기술연합대학원 교통시스템공학과 석사과정

Member, MS Student, Department of Transportation Systems Engineering, University of Science and Technology

이는 교량구간에서 열차가 탈선하였을 때 차량이 전복하거나 교량 하부로 낙하하는 것을 방지하기 위해 설치하는 시설물로 일반철도에서는 가드레일방식, 고속철도에서는 측면구조물방식으로 정의한다. 국내에 고속철도가 도입되면서 자갈 궤도인 경부고속철도 1단계 교량구간에 방호벽이 약 83 km 설치되었고 콘크리트 궤도인 경부고속철도 2단계 교량구간 약 22 km, 호남고속철도 교량구간 약 73 km에도 방호벽이 설치되었다. 그러나 국내 방호벽의 경우 탈선 시 차량이 레일과의 충돌 이전에 차축이 방호벽과 충돌하도록 설치되어 있어, 충돌에너지가 그대로 방호벽에 전달되어 그 대책이 요구된다.

이에 따라 Fig. 1과 같이 철도교량에서 열차가 탈선한 경우 차량의 바퀴가 1차적으로 충돌하여 선로에서 크게 벗어나는 것을 방지할 수 있도록 하는 일탈방호시설(derailment containment provision, 이하 DCP)이 제안되었다(Bea et al., 2015; Kang et al., 2017). DCP는 직사각형 철근콘크리트(reinforced concrete) 구조물로서 궤간(gage) 내에 설치되는 중앙구조물방식이기 때문에 탈선된 열차의 측면 이동 거리(lateral movement)를 최소화하여 탈선에 대해 차량이 선로에서 크게 벗어나는 것을 방지하고, 방호벽에 작용하는 충돌 에너지를 감소시켜 열차 탈선으로 인한 탑승자의 상해나 차량 파손을 최소화하는 등의 기능을 수행한다.



Fig. 1. Derailment Containment Provision (DCP)

본 연구의 대상이 되는 DCP는 기존 철도교량의 콘크리트 궤도 슬래브(track concrete layer, 이하 TCL)에 적용하기 위해 개발된 프리캐스트 콘크리트 구조 형식이다. 사전 제작형 프리캐스트 콘크리트 DCP는 교량의 TCL에 후 설치 앵커(post-installed anchor)를 이용하여 연결된다. 이러한 형식의 구조물은 DCP-TCL 간 연결부의 일체성 확보가 무엇보다 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 국내 최초로 철도교량 콘크리트 궤도 슬래브와 연결된 프리캐스트 콘크리트 DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 건전성 및 내력을 평가하고자 정적 실험을 수행하였다.

2. 실험 개요 및 방법

2.1 실험체 설계 및 제작

본 실험에서 사용된 프리캐스트 콘크리트 DCP는 호남고속철도 2공구 교량 직선 구간에 적용된 Rheda 2000 콘크리트

궤도 슬래브 TCL 6.9 m 세그먼트를 적용 대상으로 시공·운반을 고려하여 Fig. 2와 같이 3개로 분할 제작되었다.

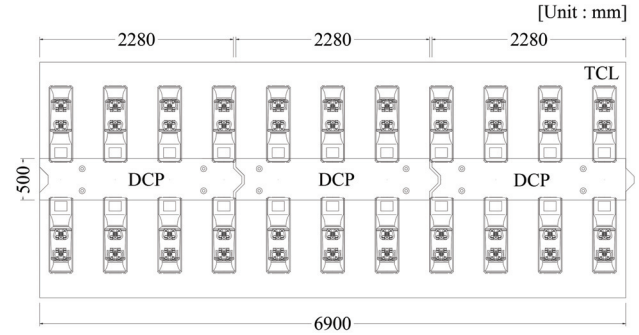


Fig. 2. Segment with 6.9 m Length for Concrete Slab and DCP

철도교량에서 열차 탈선 시 차량의 DCP 충돌로 인해 TCL에 전달되는 하중 시스템을 고려하여 프리캐스트 DCP와 TCL 간 접합은 앵커, 케미컬앵커, 무수축 모르타르를 이용하여 시공하였다. DCP는 실제 교량에 적용되는 크기인 길이 2280 mm, 너비 500 mm, 두께 125 mm로 패널 형태로 제작하였다. TCL은 실제 교량에 적용된 것과 동일한 길이 3,000 mm와 두께 250 mm를 적용하였으며, 운반과 실험환경을 고려하여 너비는 1,000 mm로 제작하였다. 정적 실험에서 사용된 DCP-TCL 결합 실험체의 제원은 Fig. 3과 같다.

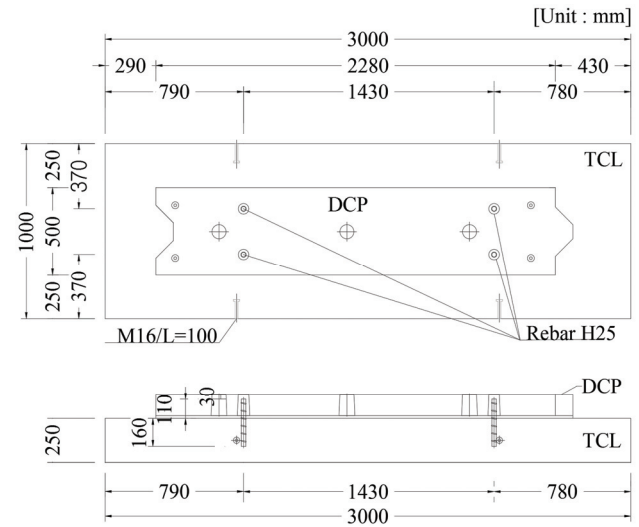


Fig. 3. Dimensions of DCP-TCL Test Specimen

DCP는 TCL에 H25 앵커 4개를 이용하여 고정될 수 있도록 설계·제작되었으며, DCP와 TCL의 앵커 매입 깊이는 각각 110 mm, 160 mm이며, DCP, TCL 콘크리트의 설계압축강도(f_{ck})는 각각 35 MPa, 30 MPa이다. DCP와 TCL은 결합 시 DCP 하부 충전재로 유동성 및 동결기 조기 강도 발현, 수축량과 충전층 15 mm를 고려하여 무수축그라우트(28일 압축강도 60 MPa)를 적용하였다. 후설치 앵커 시공에는 고강도

이형철근(H25, SD400)과 케미컬앵커를 사용하였다.

2.2 실험 방법

DCP-TCL 결합 실험체의 휨과 전단에 대한 구조성능을 평가하고자 DCP-TCL 결합 시험체를 대상으로 최대 휨모멘트가 작용하는 DCP의 중앙점(DCP loaded at center point, C)과 앵커 연결부(DCP loaded at anchor connection, A)에 정적하중을 가하는 실험을 수행하였다. Table 1에는 각 실험별 수량과 명칭을 나타내었다.

H25A-No, 여기서 A는 가력 위치(Anchor), No는 시험체 수를 나타낸다.

Table 1. Static Loading Test Method

Test method	Specimen	Number of specimens
DCP loaded at center point (C)	H25C-01	3
	H25C-02	
	H25C-03	
DCP loaded at anchor connection (A)	H25A-01	4
	H25A-02	
	H25A-03	
	H25A-04	

철도에서 열차 차륜의 DCP 충돌에 대한 재하 형태의 관련 규정이 없다. Yi et al. (2018)은 열차 충돌하중에 대한 DCP의 해석적 거동 검토를 위해 탈선으로 TCL 상부에 위치한 차륜이 DCP에 접촉할 수 있는 면적(55,408 mm²)을 환산하여 시험체에 하중을 재하 하였다. 그러나 이러한 접촉 면적을 본 실험에 적용할 경우 DCP-TCL 사이 그라우트 높이 10 mm와 DCP 높이 125 mm로 인해 차륜이 DCP에 접촉하는 너비는 약 410 mm가 된다. 이러한 하중 재하 폭은 너무 넓어 DCP의 휨거동을 구속할 가능성이 있다. 그러므로 본 실험의 목적은 휨과 전단에 대한 DCP-TCL 결합 시험체의 구조적 건전성 및 내력을 평가하는 것이다. 이 때문에 휨 거동을 구속하지 않도록 DCP와 동일한 높이와 DCP 높이의 2배의 폭을 가지는 강재 지그를 제작하여 실험을 수행하였다. 지그는 설계하중 하에서 항복에 도달하지 않는 상태에서 DCP에 밀착되어 하중을 전달할 수 있도록 충분한 강성을 갖도록 제작되었다. 실험 중에는 지그를 통한 실험체의 균일한 하중 전달을 위해 지그와 시험체 사이에 15 mm 고무를 사용하여 실험을 수행하였다.

두 시험 모두 하중이 DCP와 TCL 면으로 작용하기 때문에 DCP-TCL 결합 시험체의 TCL은 앵커의 거동에 영향을 미치지 않게 실험실 바닥에 고정하여 밀립을 방지하였다. 또한, DCP의 들림으로 인해 연직 방향으로 앵커에 인장을 발생시킬 수 있어 특수 제작된 브라켓을 이용하여 시험체의 들림을 최소화할 수 있도록 하였다. Fig. 4는 DCP-TCL 결합 시험체



Fig. 4. Laboratory Test Setup

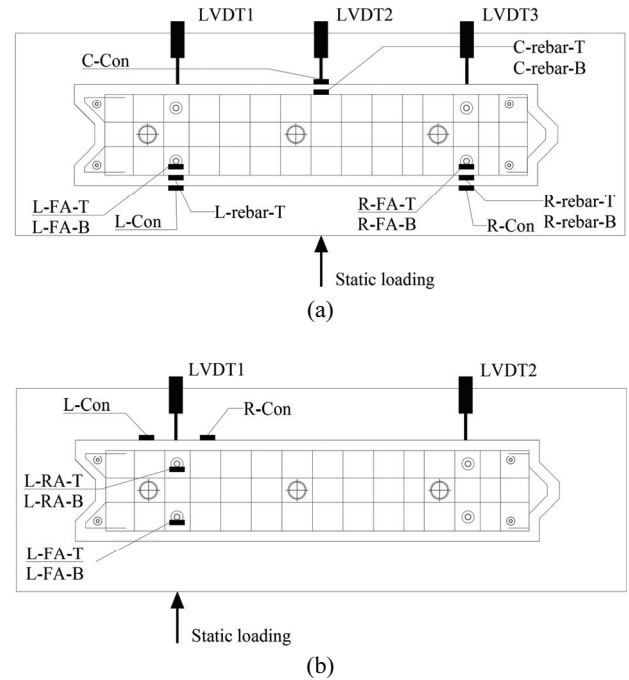


Fig. 5. Sensor Locations on (a) the specimen loaded at center point and (b) specimen loaded on the anchor connection

의 구조성능을 평가하기 위한 실험 전경이다.

시험체의 정적하중에 대한 거동 특성 분석을 위해 앵커와 DCP 주요부위에 철근과 콘크리트 변형률 게이지 그리고 변위계(LVDT)를 설치하였다. 변위계와 변형률 게이지의 상세 위치는 Fig. 5와 같다. 총 7개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 모든 시험은 분당 2 mm의 변위 제어(displacement control) 방식으로 하중을 가하였고, DCP가 파괴될 때까지 정적하중을 가하여 시험체에 가해지는 최대 하중과 변위를 측정하였다. 각 시험체의 파괴형태를 파악하기 위하여 하중 단계에 따라 균열 진전상황을 고찰하였다.

시험에 사용된 가력장비는 MTS사의 500 kN 동적 액추에이터(dynamic actuator)를 사용하였고 데이터 취득은 일본 동경측기사 제품인 TDS-601 데이터로거가 사용되었다. 변

위측정 장비로는 50 mm, 100 mm 용량의 LVDT가 사용되었으며, 철근과 콘크리트의 변형률을 계측할 수 있는 변형률 게이지(strain gauge)를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 DCP-TCL 구조성능 실험(DCP 중앙점 가력)

3.1.1 Load-Displacement Relationship

Fig. 6은 DCP-TCL 실험체의 구조성능 평가를 위해 DCP의 중앙에 가력한 각 시험체의 하중-변위 곡선이다. 여기에서 변위는 각 DCP의 중앙에서 측정된 변위이다. Table 2에는 각 실험체의 최대 하중 값인 극한하중을 정리하였다. 시험체의 평균 최대하중은 352.7 kN으로 나타나 모든 실험체가 설계하중(182.4 kN)을 만족하는 것으로 나타났다. 설계하중은 충돌해석 결과로 얻어진 열차 탈선 시 차량의 충돌로 인해 DCP에 가해지는 하중 114 kN에 충돌하중계수 1.6을 곱한 하중이다(Bea, 2015).

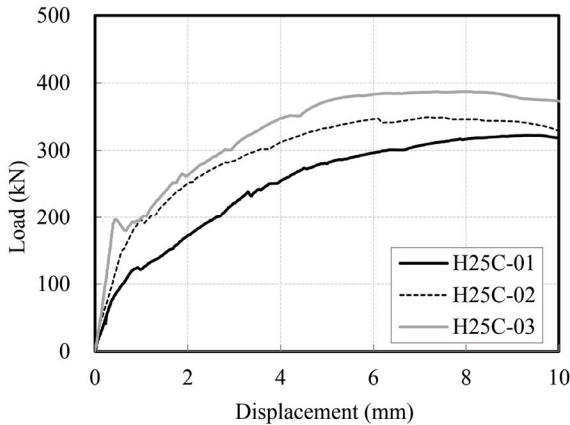


Fig. 6. Load-Displacement Relationship of the DCP Loaded at Center Point

Table 2. Test Results

Test method	Specimen	Ultimate strength (kN)	Mean ultimate strength (kN)
DCP loaded at center point	H25C-01	322.3	352.7
	H25C-02	349.1	
	H25C-03	386.9	
DCP loaded at anchor connection	H25A-01	391.1	368.2
	H25A-02	342.1	
	H25A-03	452.9	
	H25A-04	286.6	

그림에서 보는 바와 같이 모든 시험체가 하중이 증가함에 따라 변위가 증가하는 것으로 나타났으며, 설계하중(182.4

kN) 상태에서의 DCP 중앙점의 변위는 모두 2.2 mm 이내로 나타났다. 앵커 설치 시 그라우트의 재료 상태와 크라우트 채움, 그리고 앵커홀 크기 등을 최적화할 경우 철도 차량의 충돌로 인한 DCP의 횡방향 변위를 최소화할 수 있을 것으로 판단된다.

3.1.2 Load-Strain Relationship of the Anchor

DCP-TCL 결합체의 구성 요소 중 결합 구조성능 확보를 위해 가장 큰 역할을 담당하는 요소는 앵커이다. 따라서 하중 증가에 따른 앵커의 변형률 이력을 바탕으로 결합 시험체의 거동 특성을 분석하였다. Fig. 7은 H25C-01 시험체의 양단(L/R) 고정부 전면(FA) 앵커의 접합면 위(T), 아래(B)에서 각각 측정된 하중-앵커 변형률 관계 곡선이다. 그림으로부터 양쪽 앵커에서 측정된 초기 하중-앵커 변형률이 거의 유사한 것으로 나타났다. 또한, 121.4 kN 까지는 앵커의 변형이 거의 발생하지 않았지만, 121.4 kN 이후 SD400 철근 앵커의 변형률은 항복변형률인 0.002를 초과하여 계속해서 변형률이 증가하였다. 이러한 앵커의 변형률 결과로 볼 때, 121.4 kN의 하중에서 DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달하는 것으로 판단할 수 있으며, 앵커의 항복 전에 목표 성능(182.4 kN)을 만족하는 것으로 나타났다.

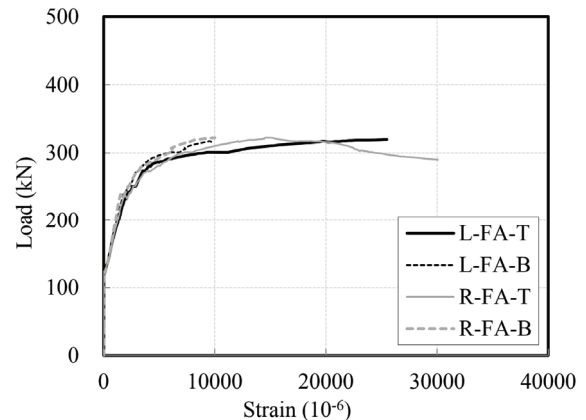


Fig. 7. Load-Strain Relationship of the Anchor (H25C-01)

3.1.3 Crack Shape

Fig. 8에는 대표적으로 H25C-01 시험체에 대한 극한하중 상태에서 DCP-TCL 결합 실험체에 발생한 균열의 양상을 보여주고 있다. 초기 균열은 DCP-TCL 접합면에서 발생되었으며, 하중이 증가됨에 따라 DCP와 TCL 접합면이 분리되었다. 이후 DCP 중앙부 재하점의 최대 휨모멘트가 작용되는 구간의 휨인장측 연단에서 균열이 발생하였으며, 이러한 휨인장균열들은 하중 증가와 함께 사인장균열로 발전되어 진전되었다. 최대내력에 이르러 DCP 양단 앵커 고정부의 휨모멘트가 발생하는 인장부 연단 콘크리트 단부에서 파괴

가 발생하였으며, 이후 작용 하중이 증가됨에 따라 연결부 앵커의 항복으로 인한 변위 증가로 실험이 종료되었다. 이러한 파괴양상으로 볼 때, 차륜 충돌로 인해 DCP 콘크리트 가장자리에 대하여 직각 방향으로 앵커에 큰 전단력이 작용하기 때문에 앵커 시공에 주의가 요구된다.



Fig. 8. Crack Shape of Specimen Loaded at Center Point

3.2 DCP-TCL 연결부 앵커의 전단 실험

3.2.1 Load-Displacement Relationship

Fig. 9는 DCP-TCL 연결부 앵커의 구조성능 평가를 위해 DCP-TCL 시험체 연결부에 가력한 각 시험체의 하중-변위 곡선이다. 여기에서 변위는 각 DCP의 가력점 앵커 연결부에서 측정된 변위이다. 각 실험체의 DCP-TCL 최대 하중 값인 극한하중은 Table 2에 정리하였다. 시험체의 평균 최대하중은 368.2 kN으로 나타나 모든 실험체가 설계하중을 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 하중 초기부터 극한하중에 이르기까지 하중이 증가함에 따라 변위가 선형으로 증가하는 것으로 나타났으며, 모든 시험체가 극한하중에서 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 또한, 하중 초기 시험체의 밀림과 DCP 앵커홀 채움재 일부의 지압파괴 등으로 인한 슬립 등을 제외한다면 시험체 대부분이 극한하중 상태에서의 DCP-TCL 연결부 변위가 1 mm 이내로 나타났다. 이는 앵커와 DCP 앵커홀 주변의 그라우트 접촉면에서 국부적인 그라우트 지압파괴에 의한 것으로 판단된다.

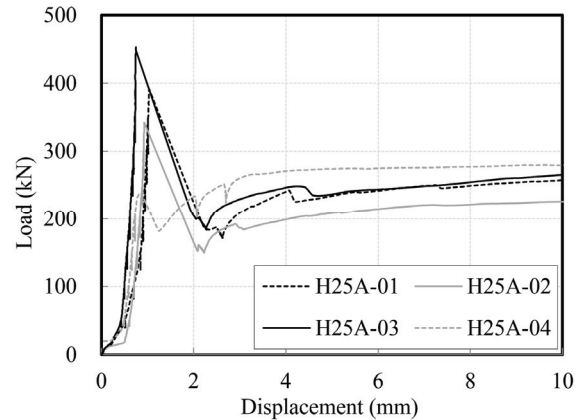


Fig. 9. Load-Displacement Relationship of the DCP Loaded at Anchor Connection

3.2.2 Load-Strain Relationship of the Anchor

Fig. 10은 H25A-01 시험체 양단에 고정된 전면(FA), 후면(RA) 앵커의 DCP-TCL 접합면 위(T), 아래(B)에서, 각각 측정된 하중-앵커 변형률 관계 곡선이다. 그림으로부터 앵커의 항복 전에 목표 성능(1824 kN)을 만족하는 것으로 나타났으며, 앵커에 발생한 변형률은 극한하중 상태에서도 항복변형률에는 훨씬 못 미치는 비교적 작은 범위였다. 하중 초기에는 전면/후면 앵커에 하중이 유사하게 분산되었지만, 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커의 변형이 더 크게 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 전면 앵커의 경우 180 kN 이후 앵커의 변형률은 하중에 비례하여 선형으로 급격히 증가하였다. 이러한 앵커의 변형률 결과로부터, 180 kN의 하중에서 DCP-TCL 접합면이 분리되어 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커에 변형이 집중되었고, 가장자리와 가까운 모르타르와 콘크리트에 지압 파괴가 발생한 것으로 판단된다. 그러므로 후설치앵커 적용 시에는 앵커 자체의 강도뿐만 아니라 앵커와 콘크리트를 일체화시키는 그라우트의 저항능력에 대해서도 충분한 사전 검토 및 시공에 주의가 요구된다.

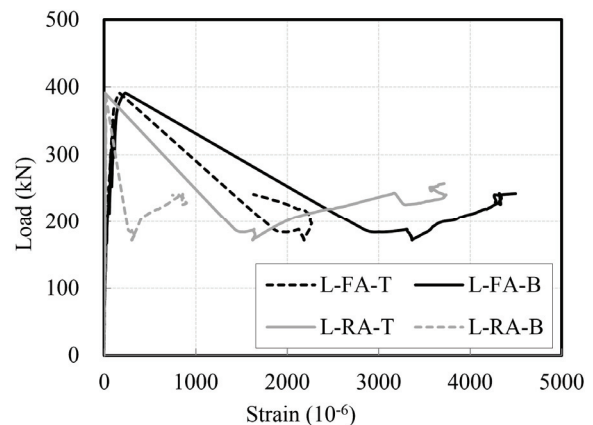


Fig. 10. Load-Strain Relationship of the Anchor (H25A-01)

3.2.3 Crack Shape

Fig. 11에는 극한하중 상태에서 DCP에 발생한 대표적 균열의 양상을 보여주고 있다. 실험결과 하중 초기 DCP와 TCL 접합면 분리로 인한 균열이 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 앵커 주변 그라우트가 손상으로 인한 슬립이 발생하였다. 이후 DCP에서 휨과 전단에 의한 균열과 앵커 연결부 콘크리트 단부에서 균열이 발생하였다.



Fig. 11. Crack Shape of Specimen Loaded at Anchor Connection

전단을 받는 앵커의 파괴는 일반적으로 강재 파괴, 콘크리트 파괴, 콘크리트 프라이아웃(pryout) 파괴로 구분된다(KCI, 2012; ACI 318, 2014). 본 실험과 같이 콘크리트 가장자리에 대하여 직각 방향으로 앵커에 전단력이 작용할 경우, 앵커 파괴보다는 Fig. 12와 같은 콘크리트 파괴에 취약하다. 본 실험 결과에서도 극한하중 상태에서 SD400 앵커의 파괴는 발생하지 않았고 최대 하중에 다다른 이후 취성적인(brittle) 콘크리트 단부파괴로 인해 갑자기 강도가 대폭 감소하는 것으로 나타나, 전단하중에 대해 앵커의 파괴보다 콘크리트 단부의 파괴가 선행하는 것으로 나타났다.

이러한 결과로부터 열차 탈선으로 인해 열차 차륜이 DCP에 충돌할 경우 연성적인(ductile) 거동을 확보하기 위해서는 앵커의 파괴가 선행되도록 앵커 설계와 시공 시 추가적인 연단 거리 확보와 더불어 앵커 그라우트의 충분한 저항성능 확보가 필요하겠다.

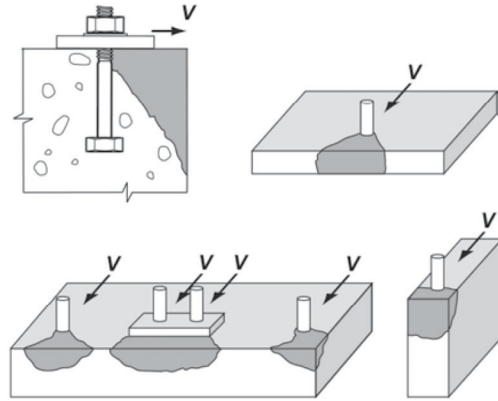


Fig. 12. Concrete Breakout Failure of Anchors in Shear (ACI 2014, KCI 2012)

4. 결론

본 연구에서는 철도교량 콘크리트 궤도 슬래브(TCL)와 연결된 프리캐스트 콘크리트 일탈방호시설(DCP)의 구조성능의 검증을 위해 정적 실험을 수행하였다. DCP는 TCL에 후 설치 앵커를 이용하여 설치되기 때문에 DCP-TCL 결합 시험체의 휨과 전단에 대한 내하 성능을 평가하였다. 실험 결과로부터 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) DCP를 H25 앵커 4개로 TCL에 시공한 DCP-TCL 결합 시험체의 구조성능과 앵커 전단성능은 모두 설계 요구성능(182.4 kN)을 만족하였으며, 충분한 안전성을 확보하는 것으로 나타났다.
- (2) DCP-TCL 결합 시험체의 중앙점(DCP loaded at center point, C) 재하 정적실험에서 시험체의 최종 파괴 유형은 앵커의 항복에 의한 것으로 나타났다. DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달되는 것으로 나타났고, 앵커의 항복 전에 목표 성능을 만족하였다. DCP의 휨에 의한 파괴보다는 DCP-TCL 간 연결부 앵커 파괴가 우선하는 것으로 나타났다.
- (3) DCP-TCL 결합 시험체의 앵커 연결부(DCP loaded at anchor connection, A) 재하 정적실험에서는 앵커 연단 콘크리트 단부의 취성적 파괴가 발생하였다. DCP-TCL 경계면이 분리된 후 DCP에 작용하는 하중이 앵커를 통해 TCL로 전달하는 것으로 판단할 수 있으며, 앵커의 항복 전에 목표 성능을 만족하는 것으로 나타났다. 또한, 하중 초기에는 전면/후면 앵커에 하중이 유사하게 분산되었지만, 하중이 증가함에 따라 가력점과 가까운 앵커의 변형이 더 크게 증가하는 것으로 나타났으며, DCP-TCL 접합면 분리 후 하중이 집중되어 모르타르와 콘크리트에 파괴가 발생한 것으로 판단된다.

실험 결과로부터 열차의 차륜이 DCP에 충돌할 경우 프리 캐스트 DCP와 TCL 간의 일체성이 확보될수록 내력이 증가할 것으로 판단된다. 그러므로 후 설치 앵커를 이용한 DCP 시공 시에는 앵커 자체의 강도뿐만 아니라 앵커가 설치되는 콘크리트의 연단 거리 확보, 앵커와 콘크리트를 일체화시키는 그라우트의 저항능력에 대해서도 충분한 사전 검토가 필요하다.

앞으로 철도 차륜의 실제 충돌 속도와 차륜과 DCP의 접촉 면적을 고려한 적절한 재하 형태에 대한 실험 및 해석적 요구가 추가적으로 수행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (19RTRP-B122273-04)에 의해 수행되었습니다.

References

ACI Committee 318. (2014). *Building code requirements for structural concrete and commentary*. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, pp. 221-262.

Bae, H.U. (2015). *Advanced design concept of derailment containment provisions using collision simulation after train derailment*. Ph.D. dissertation, Chungnam National University.

Bea, H.U., Moon, J.H., Kim, J.J., and Lim, N.H. (2015). Concept of derailment containment provisions for

minimizing expansion of damage by train derailment. *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, Vol. 27, No. 2, pp. 42-46.

Kang, Y.S., Lim, Y.J., Kim, J.J., Yoon, H.T., Yi, N.H., and Kim, J.H. (2017). Conceptual design and technical specifications of derailment containment provisions. *The Magazine of The Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 65, No. 8, pp. 24-31.

Korea Concrete Institute (KCI). (2012). *Concrete design code and commentary*. Seoul: Kimoondang Publishing Company.

Korean Statistical Information Service (KOSIS). Retrieved from <http://kosis.kr/>

KR C-02060. (2013). *Railway design guidelines and handbooks - Subsidiary and safety facilities of main lined*. Korea Rail Network Authority.

Railroad Safety Act (2015).

Yi, N.H., Kim, J.H., and Kang, Y.S. (2018). Analytical behavior of concrete derailment containment provision (DCP) according to train impact loading. *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 19, No. 11, pp. 604-613.

<i>Received</i>	■	May 2, 2019
<i>Revised</i>	■	May 14, 2019
<i>Accepted</i>	■	May 27, 2019