

콘크리트궤도 슬래브의 다웰 연결부 파괴 거동

권구성* · 장승엽** · 정원석***

Kwon, Kusung*, Jang, Seung Yup**, Chung, Wonseok***

Fracture Behavior of Dowel Joint of Concrete Slab Track

ABSTRACT

Recently, an interest on joint behavior between adjacent concrete slab tracks has increasing due to large application of such track system. Dowel bars are widely used to improve load transfer capacity across the joints. Dowel bars reduce the deflections and stresses by transferring the load between the slabs. This study proposes the lumped shear spring model to efficiently model dowel joints of adjacent slabs. This model includes bearing stiffness between dowel bar and concrete as well as dowel gap. Strength of the proposed spring model is evaluated based on Concrete Capacity Design method under the assumption of shear failure mode in the joints. Experiments are also performed up to failure to evaluate the accuracy of the proposed model. It has been observed that the proposed model is able to predict initial nonlinearity due to dowel gap, and capture material nonlinearity of the test slabs. Thus, it is recommended that the proposed model can be effectively applied to the dowel joints of concrete slab track.

Key words : Concrete track, Dowel, Anchor, Finite element analysis, CCD

초 록

최근 콘크리트궤도 공법이 증가함에 따라 인접한 슬래브를 연결하는 방법에 대한 관심이 높아지고 있다. 슬래브의 연결부는 효과적인 하중전달, 변형 연속화, 응력 분산을 위해서 다웰 시스템이 다수 적용된다. 본 연구에서는 콘크리트 슬래브 다웰연결부를 효율적으로 이상화할 수 있는 연결부의 집중 전단스프링 (Lumped shear spring) 모델을 제안한다. 전단 스프링 모델의 강성은 다웰바의 강성과 유격을 고려하였으며, 강도는 연결부의 전단파괴에 근거한 Concrete Capacity Design(CCD) 방법에 의해 산정되었다. 해석모델의 타당성을 검증하기 위하여 다웰로 연결된 슬래브 실험체를 제작하고 재하실험을 수행하였다. 제안된 해석모델은 다웰과 콘크리트 간의 유격으로 인한 초기 비선형성 및 콘크리트 재료 비선형성을 합리적으로 반영하고 있는 것으로 분석되었다. 따라서 향후 슬래브 다웰 조인트로 연결된 콘크리트궤도의 파괴 시까지의 비선형 거동을 합리적으로 예측함으로써 철도 궤도의 설계 시 효과적으로 활용될 수 있을 것이다.

검색어 : 콘크리트 궤도, 다웰, 앵커, 유한요소해석, CCD

1. 서론

슬래브궤도의 연결부에는 효과적인 하중전달 뿐만 아니라 변형 연속화, 응력 분산 등을 위해 다웰 시스템(Dowel system)이 적용된다. 선행연구 (Land Transport and Maritime Report, 2011) 결과, 동일 단면적일 경우 강제 다웰바(Dowel bar)를 다수 배치하는 것이 하중전달효율(Load Transfer Efficiency, LTE)이 가장 우수한 것으로 평가되었다. 슬래브궤도 연결부의 설계 시, 이러한 다웰 시스템에 대한 설계는 필수적으로 진행되어야 할 과정이다.

* (주)한화건설 토목환경사업부 사원, 경희대학교 토목공학과 석사 (kskwon09@gmail.com)

** 정회원 · 한국철도기술연구원 책임연구원 (syjang@krti.re.kr)

*** 정회원 · 교신저자 · 경희대학교 토목공학과 부교수 (Corresponding Author · Kyung Hee University · wschung@khu.ac.kr)

Received January 2, 2013/ revised February 19, 2013/ accepted June 18, 2013

다웰연결부에 대한 연구는 도로포장분야를 중심으로 다수 연구되었다. Bhatti et al. (1998)은 콘크리트 포장의 비선형 유한요소해석을 위해 콘크리트 슬래브, 지반, 다웰바 등의 재료비선형을 고려할 수 있는 해석모델을 제시하였다. 다웰바가 변형한다면 인접한 콘크리트도 변형이 발생하므로 이러한 변형을 구현하기 위해서 다웰바는 보요소로 이상화하고 양단에는 스프링을 도입하였다. Kim and Hjelmstad (2003)는 공항 콘크리트 포장의 유한요소해석을 위해 다웰연결부를 고려한 솔리드 요소 기반의 해석을 실시하였다. 착륙 항공기의 공기압, 슬래브 두께, 다웰 유격 등의 다양한 매개변수를 대상으로 해석적 연구를 수행하여 변위기반의 하중전달효율을 산정한 결과, 상당한 하중이 인접한 슬래브로 전달되고 있으며 특히 하중이 작용하는 부분의 다웰바가 국부적으로 95% 이상의 전달력을 전달하는 것으로 분석되었다. Millard and Johnson (1984)은 다웰효과가 직접전단, 비틀림, 휨 등의 3개의 메커니즘으로 구분됨을 밝혔다. 또한 콘크리트 강도가 강재와 가깝게 높다면 다웰은 직접전단과 비틀림에 의해 파괴가 지배되며 반대로 다웰바의 변형 발생시에 콘크리트도 변형이 함께 발생한다면 다웰바의 휨이 고려 대상이 됨을 분석하였다. He and Kwan (2001)은 횡방향 균열이 발생한 콘크리트 다웰바의 거동을 해석과 실험을 통해 분석하였다. 연구에 의하면 다웰바에 가해지는 휨과 발생하는 변위와의 관계는 실험을 통해 보정된 변수들을 기반으로 하는 “Beam on elastic foundation” 이론을 기초로 정의될 수 있으며 이를 유한요소해석에 적용하여 철근콘크리트 구조물의 균열양상, 극한강도, 전단거동에서의 하중-변위 관계를 예측할 수 있음을 분석하였다. “Beam on elastic foundation” 이론의 계속된 연구로 균열 콘크리트에서 다웰바의 거동 (El-Ariss, 2007)은 위 이론을 따르며 이는 철근콘크리트 구조물의 전단거동에측에 고려되어야 할 사항임을 밝혔다. 또한 다웰바의 거동은 철근콘크리트 구조물의 연성거동에 중요한 요소로 작용될 수 있는 것으로 분석하였다. Soroushian et al. (1987)은 콘크리트 지압거동에 관한 효과를 연구하기 위해 철근직경 및 개수, 콘크리트 강도, 콘크리트 블록의 폭 및 깊이 등을 변수로 하여 실험을 실시하였다. 실험에 따르면 철근직경이 감소하고, 콘크리트 강도가 증가함에 따라 지압강성이 증가하는 것으로 확인되었으며 실험을 근거로 하여 조건에 따른 지압강성 실험식을 제안하였다.

본 연구는 케도슬래브의 다웰 연결부 전단거동 예측을 위한 해석모델을 제시하고 이를 실험적으로 검증한다. 케도슬래브는 하면에 노반이 설치되어 있으므로 근본적인 전단거동의 이해를 위한 강도 및 강성 예측이 설계에 필요하다. 이를 위해 본 연구에서는 콘크리트케도 슬래브 다웰연결부의 지압강성과 유격을 효율적으로 이상화할 수 있는 연결부 전단스프링 모델을 제안한다. 전단 스프링 모델의 강도는 ACI 318-08 (2008) 부록 D 및 콘크리트구조설계기

준(2007) 부록IV에 제시한 앵커설계법인 Concrete Capacity Design (CCD) 방법에 의해 산정하였으며, 유격은 실제 물리적 거동을 모사할 수 있는 모델을 적용하였다. 본 연구에서 제안된 연결부의 전단스프링 요소를 기반으로 비선형 유한요소해석을 실시하였다. 해석모델의 타당성을 검증하기 위하여 다웰로 연결된 슬래브 실험체를 제작하고 재하실험을 수행하여 파괴거동 및 극한 하중을 분석하였다. 또한, CCD 방법에 근거한 슬래브 다웰 연결부의 강도 산정법에 대한 타당성을 검증하였다.

2. 실험프로그램

콘크리트 케도 슬래브 연결부의 파괴거동 분석을 위하여 Fig. 1 과 같이 실험체를 제작하고 재하실험을 실시하였다. 다웰 시스템은 직경 25mm 강재 다웰바를 상부와 하부에 6개씩 총 12개를 매립깊이 400mm로 삽입하여 제작하였다. 본 논문에서는 슬래브에 다웰바가 매립되어 있는 슬래브를 고정측 슬래브(Fixed slab), 다웰바가 삽입되어지는 슬래브를 가동측 슬래브(Movable slab)라 명칭하였다.

고정측 슬래브에는 고정단 지그와 힌지 지그를 설치하였으며, 가동측 슬래브에는 힌지 지그를 Fig. 2와 같이 설치하였다. 이러한 실험체 세팅은 고정측 슬래브 연결부의 전단파괴를 유도하기 위함이다. 실험체의 설치순서는 Fig. 3과 같이 고정단 지그와 힌지 지그를 설치하고 고정측 슬래브를 지그에 고정 후 가동측 슬래브를 고정측 슬래브와 결합하는 순서로 설치하였다.

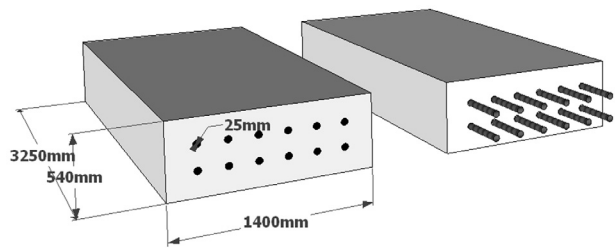


Fig. 1. Concept of Test Slab

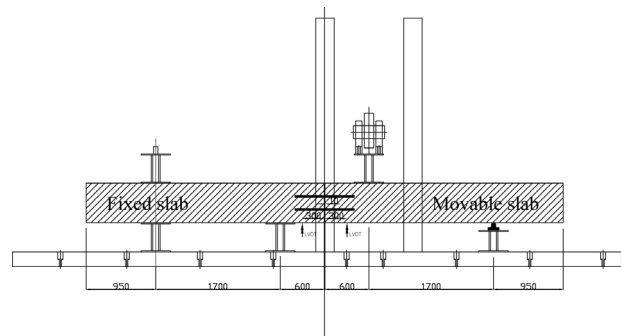


Fig. 2. Test Setup

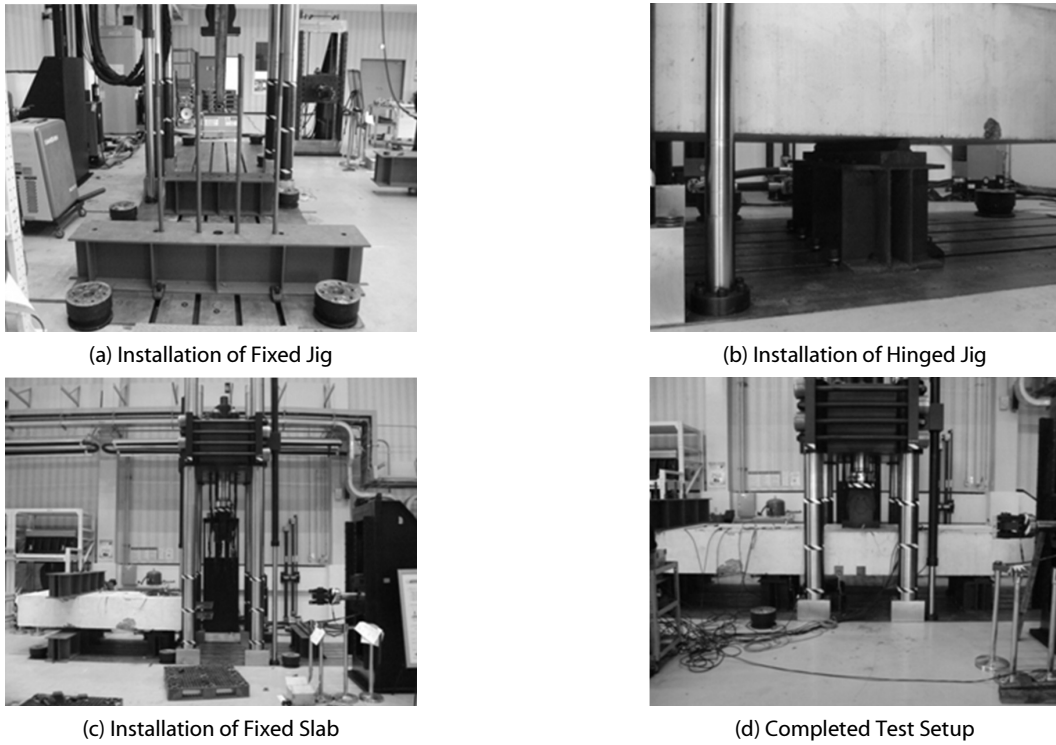


Fig. 3. Installation Process of Test Slab

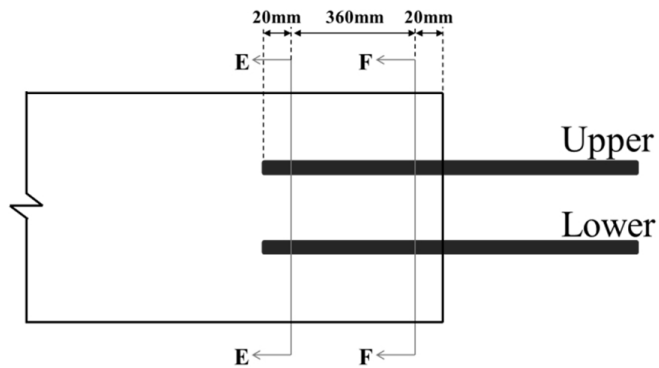
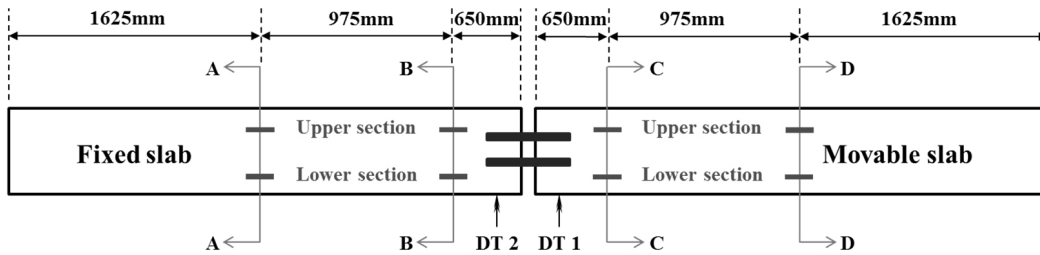


Fig. 4. Sensor Layout

슬래브 연결부의 파괴거동 실험은 Actuator 용량이 2500kN급 인 가력 프레임에서 실시되었다. 하중은 Fig. 2와 같이 가동측

슬래브 내측 600mm 지점에서 재하되었다. 또한 실험체의 구조거 동 분석을 평가하기 위해서 각 실험체에 계측기를 설치하였다.

변형을 개이지는 앞서 실험체 제작 시 콘크리트 타설 전에 매립되었으며 변위계는 실험체 세팅 후에 설치하였다. Fig. 4는 계측기가 설치된 위치를 도시한 것이다.

3. 수치해석

콘크리트 궤도 슬래브 연결부 실험체의 파괴거동을 수치해석적으로 분석하기 위하여 상용 유한요소 프로그램인 ABAQUS (Version 6.71)를 사용하여 해석을 수행하였다. 콘크리트 슬래브는 4절점 적층 셸요소(Layered Shell Element)를 이용하여 모델하였고, 인접 슬래브의 다웰바는 두 절점을 연결하는 비선형 전단 스프링 요소로 이상화하였다. 즉, 본 연구에서는 기존의 다수 연구 (Soroushian et al., 1987; Frantzskakis and Theillout, 1989; Martin-Perez and Pantazopoulou, 2001; He and Kwan, 2001; El-Ariss, 2007)에서 적용한 지압강성(Bearing stiffness)을 이용한 다웰바의 실제 모델링을 대신하여 다웰바의 모델 없이 상호 슬래브를 집중 스프링 요소 (Lumped spring element)로 연결하는 간편하고 효율적인 모델을 제시한다.

실험체의 파괴거동 분석을 위한 재료모델은 ABAQUS에서 제공하는 모듈을 적용하였다. 콘크리트의 재료 비선형 모델은 “Concrete damaged plasticity” 모델을 사용하였다. 이는 손상-소성 모델로서 Lubliner et al.(1989)에 의해 처음 제안되었으며 Lee and Fenves(1998)에 의해 개선된 모델이다. 위 모델은 콘크리트의 손상 거동을 예측하는데 적합한 모델로 구속압력상태의 인장 강화(Tension stiffening), 압축연화(Compression hardening), 강성손상(Damage parameter)과 소성팽창(Inelastic strain)의 특성을 포함하고 있다. 슬래브 주철근은 ABAQUS에서 제공하는 Plastic 재료를 이용하여 안전측으로 완전소성 거동을 고려하였다.

하중조건은 실험과 동일하게 가동측 슬래브 내측 600mm 지점에 재하하였다. 고정측 슬래브의 외측 950mm 지점은 고정단으로, 내측 600mm 지점은 가동단으로 이상화하였으며 가동측 슬래브의

외측 950mm 지점은 가동단으로 이상화하였다. 최종 해석모델 개념도는 Fig. 5와 같다.

3.1 전단스프링 강성

본 연구에서 제안하는 스프링 모델은 앞서 언급한 바와 같이 별도의 다웰바의 모델 없이 상호 슬래브를 집중 스프링 요소를 이용하여 직접 연결하는 것이다. 제안 모델의 핵심은 전단강성을 산정하는 것으로, 기존의 지압강성을 산정하기 위한 “Beam on elastic foundation” 이론에 근거한다.

본 연구에서는 다웰바를 Winkler의 탄성지지보로 모사하고 보의 끝단 혹은 다웰바의 끝단을 변곡점으로 고려하였다. 이를 식으로 표현하면 Eq. (1)과 같다. (He and Kwan, 2001; El-Ariss, 2007)

$$V_d = (\beta^3 EI) \Delta \tag{1}$$

여기서 $\beta = [dSK_b / 4EI]^{0.25}$, d_b 는 다웰바의 직경, I 는 다웰바의 단면 2차모멘트, E 는 다웰바의 탄성계수이다. V_d 는 전단력, Δ 는 전단변위이다. K_b 는 지압강성으로 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$K_b = 127c_1 \sqrt{f'_c} \left(\frac{1}{d_b}\right)^{2/3} \tag{2}$$

여기서 f'_c 는 콘크리트의 압축강도(Mpa 단위)이고 d_b 는 다웰바의 직경을 의미하며 c_1 은 철근간격에 대한 보정계수로 25.4mm 이하의 순철근 간격에 대해서는 0.6의 값을 가지고 25.4mm 이상에서는 1.0의 값을 갖는다.

제안 모델의 전단강성은 임의의 간격(d)을 두고 설치된 슬래브의 거동을 통해 유도될 수 있다. Fig. 6(a)와 같이 슬래브에 전단력(V_d)이 작용할 경우 다웰 연결부에 발생하는 변위는 매립 혹은 삽입되는 부분에서 발생하는 변위 Δ_1 과 노출된 부분에서 발생하는 변위 Δ_2 로 나뉘어진다. 변위 Δ_1 은 앞서 언급한 “Beam on elastic

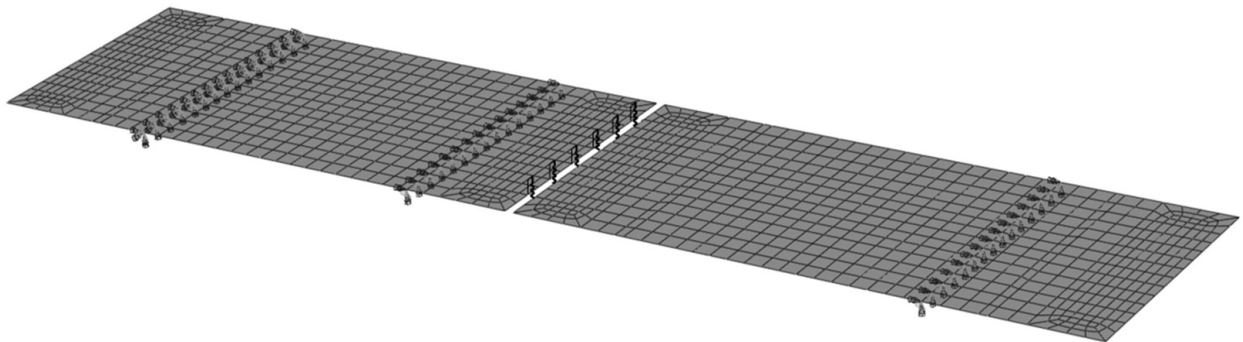


Fig. 5. Concepts of Modeling

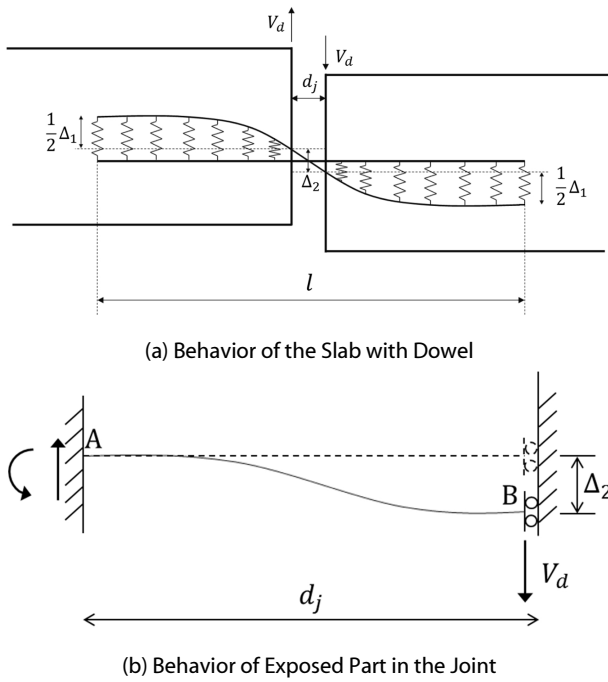


Fig. 6. Dowel Action Model

foundation” 이론에 의해 정의되며 변위 Δ_2 는 Fig. 6(b)와 같이 고정단 지점과 가동 비회전단 지점의 거동으로 이상화할 수 있다. 연결부에 작용하는 전단력과 발생하는 두 변위(Δ_1 , Δ_2)와의 관계를 정리하면 전단강성을 유도할 수 있고 이는 Eq. (3)과 같다.

$$\bar{K}_s = \frac{1}{\frac{1}{EI\beta^3} + \frac{d_j^3}{12EI}} \quad (3)$$

여기서 E는 다웰 연결재료의 탄성계수이며 β 는 다웰연결재의 단면2차모멘트를 의미하며 d_j 는 고정측 슬래브와 가동측 슬래브 사이의 간격을 의미한다.

앞서 언급한 바와 같이 콘크리트의 거동특성치인 β 에는 지압강성이 포함되어있다. 전단강성 식은 콘크리트의 거동특성치가 포함되기 때문에 지압강성 또한 전단강성에 포함된다고 볼 수 있다. 따라서 지압강성과 전단강성 모두 “Beam on elastic foundation” 이론에 근거함을 확인할 수 있다.

가동측 슬래브와 다웰바 사이에는 유격(Gap)이 존재한다. 이는 실험체 결합을 쉽게 하기 위해 실제 다웰바의 직경보다 크게 가동측 슬래브를 제작하였기 때문이다. 이상적으로 표면이 깨끗한 유격은 유격의 크기만큼 강성이 없는 거동을 하게 된다. 그러나 실제 가동측 슬래브 유격은 슬래브 결합 시 발생하는 파손과 시공오차 등에

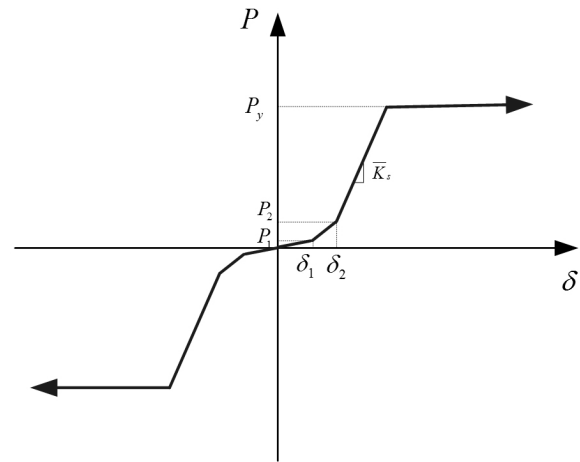


Fig. 7. Spring Model by Shear Stiffness

Table 1. Parameters of Shear Spring Model

Parameter	Value	Model description
P_y	257,000 N	Shear strength
\bar{K}_s	61,470 N/mm	Shear stiffness
δ_1	2 mm	dowel gap
P_1	12,000 N	dowel gap
δ_2	4 mm	dowel gap
P_2	48,000 N	dowel gap

Table 2. Parameters for Shear Stiffness

Parameter	Value
\bar{K}_s	61,470 N/mm
K_b	97.404
β	0.02
E	200 GPa
I	19174.76
d_j	10 mm

의해 강성을 갖게 된다. 따라서 연결부 비선형 스프링의 강성은 Fig. 7과 같이 초기에는 다중직선의 강성을 가정하였다. 본 연구에서 사용한 전단스프링 모델의 강성과 가정한 다웰 유격의 값은 Table 1에 제시하였으며 Table 2는 전단스프링 모델의 강성 계산에 필요한 변수들을 정리한 것이다.

3.2 전단스프링 강도

슬래브 연결부의 전단 스프링 강도는 다웰바를 콘크리트 앵커로 가정하고 설계기준(KCI, 2007)에서 제시한 앵커설계법을 적용하여 산정하였다. 현행 앵커 설계법은 앵커의 강도를 보다 손쉽게, 그리고 정확히 평가하기 위해 파괴역학에 근거한 CCD(Concrete Capacity Design) 방법에 근거를 두고 있다(Choi and Chun,

2007). CCD방법은 앵커 단부에서 35°의 파괴면과 사각뿔 형태의 파괴체를 가정한다. 앵커는 설치시기에 따라 선 설치앵커(Cast-in-plane anchor)와 후 설치앵커(Post-installed anchor)로 나뉜다. 선 설치 앵커는 콘크리트 타설 이전에 설치되는 앵커를 의미하며 후 설치 앵커는 굳은 콘크리트에 천공 후 설치하는 앵커를 의미한다. 본 슬래브 연결부의 다웰바는 실험체 제작 시 콘크리트 타설 전에 설치되므로 선 설치앵커로 판단하였다.

앵커의 강도는 강재의 강도뿐만 아니라 앵커의 묻힘 부분과 연관된 강도 모두 고려해 주어야 한다. 앵커의 파괴모드는 인장하중에 의한 파괴와 전단하중에 의한 파괴로 나뉜다(KCI, 2007). 슬래브궤도 실험체의 거동 분석 결과, 고정측 슬래브의 다웰바는 전단하중을 저항하며 이에 따른 파괴 모드는 콘크리트 전단파괴가 지배적인 것으로 확인되었다. 콘크리트 파괴 모드에 의한 앵커 그룹의 공칭 콘크리트 파괴강도(V_{cbg})는 Eq. (4)를 따른다.

$$V_{cbg} = \frac{A_{vc}}{A_{vco}} \psi_{ed,V} \psi_{c,V} \psi_{h,V} \psi_{ec,V} V_b \quad (4)$$

Eq. (4)에서 A_{vco} 는 단일앵커 파괴면의 최대투영면적이며, A_{vc} 는 전단강도 산정을 위한 단일앵커 또는 앵커 그룹의 콘크리트 파괴면 투영면적, $\psi_{ed,V}$ 는 연단거리에 대한 전단강도의 수정계수, $\psi_{c,V}$ 는 콘크리트 균열 및 보조철근의 유무에 따른 전단강도에 대한 수정계수, $\psi_{h,V}$ 는 콘크리트에 매립된 앵커에 대한 수정계수, $\psi_{ec,V}$ 는 앵커 그룹이 편심하중을 받는 경우의 전단강도에 대한 수정계수이다. 또한 V_b 는 전단에 대한 기본 콘크리트의 파괴강도로서 이는 Eq. (5)와 같다.

$$V_b = 0.6 \left(\frac{l_e}{d_o}\right)^{0.2} \sqrt{d_o} \sqrt{f_{ck}} (c_{a1})^{1.5} \quad (5)$$

여기서 l_e 는 전단에 대해 앵커가 지압을 받는 길이, d_o 는 앵커의 직경, f_{ck} 은 콘크리트 압축강도이다. c_{a1} 은 앵커중심부터 콘크리트 단부까지의 거리이다.

본 연구에서 고려한 슬래브 연결부의 전단강도는 앞서 기술한 CCD방법의 콘크리트 전단파괴 모드 적용 시에 약 257kN으로 산정되었다. 이는 본 연구에서 제안한 전단스프링의 강도를 나타낸 것으로 Fig. 7의 P_y 에 해당된다. 즉, 제안 모델은 앞서 기술한 바와 같이 전단스프링의 강성, 다웰의 유격을 고려한 비선형성, 전단강도를 고려하였다. Table 1은 제안 모델에서 사용한 입력치를 정리한 것이며 Table 3은 연결부의 전단강도 산정을 위한 변수의 입력치를 정리한 것이다.

Table 3. Parameters for Shear Strength

Parameter	Value
$P_y = V_{cvg}$	257,000 N
A_{vco}	583,200mm ²
A_{vc}	756,000mm ²
V_b	203,670 N
l_e	200 mm
d_o	25 mm
c_{a1}	360 mm
f_{ck}	43 MPa
$\psi_{ed,V}$	0.81
$\psi_{c,V}$	1.2
$\psi_{h,V}$	1
$\psi_{ec,V}$	1

4. 결과분석

제안된 슬래브 연결부 모델의 검증을 위해 슬래브 연결부 실험체를 제작하고 재하실험을 수행하였다. Fig. 8은 실험체의 하중-변위 결과를 도시한 것이다. 고정측 슬래브의 처짐(DT 2)은 최종 재하하중인 약 845kN까지 선형거동을 보였으며 측면에서의 심각한 균열은 발생하지 않았다. 반면, 가동측 슬래브의 처짐(DT 1)은 하중재하 초기에는 다웰바와 가동측 슬래브 유격 등의 영향으로 하중증가와 처짐이 비선형성을 보이다가 약 200kN부터 선형의 관계를 나타내었다. 가동측 슬래브에서는 약 600kN부터 측면에 균열이 발생하면서 전단파괴 형태로 진행되었으며, 약 870kN에서 하중저항능력을 상실하는 것으로 분석되었다.

실험체의 재하실험 후 파괴양상은 Fig. 9와 같다. 고정측 슬래브 단면은 횡방향 균열이 발생하였으나, 측면에서는 심각한 균열이 감지되지 않은 반면, 가동측 슬래브 단면은 심각한 횡방향 균열과 측면의 전단균열이 진전되면서 파괴되는 양상을 보였다. 따라서 슬래브궤도의 하중전달능력은 고정측 슬래브의 다웰강도보다 가동측 슬래브의 강도가 지배적인 것으로 분석되었다.

Fig. 10은 고정측 슬래브와 가동측 슬래브의 철근에 매립된 변형률계의 계측 및 해석 결과이다. 실험과 해석 공통적으로 고정측 슬래브는 상부가 압축상태, 하부가 인장상태에 존재하며, 가동측 슬래브는 상부가 인장상태, 하부가 압축상태임을 확인할 수 있다. 실험 결과, 고정측 및 가동측 슬래브 section B와 section C의 철근은 인장상태에서 약 500kN의 하중에 항복하는 것으로 분석되었으나, 해석에서는 모든 철근이 항복하지 않는 것으로 분석되었다.

Fig. 11은 고정측 슬래브에 매립된 다웰바 상면의 하중-변형률

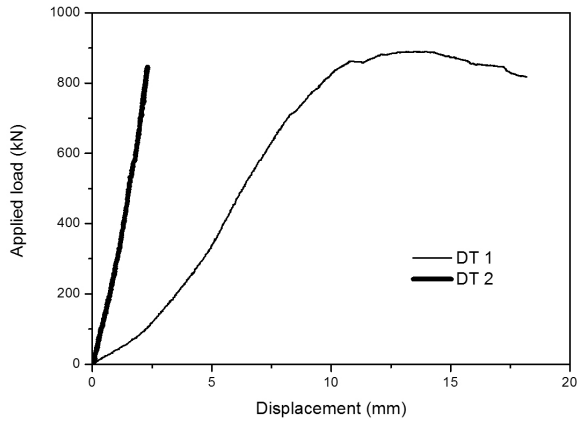
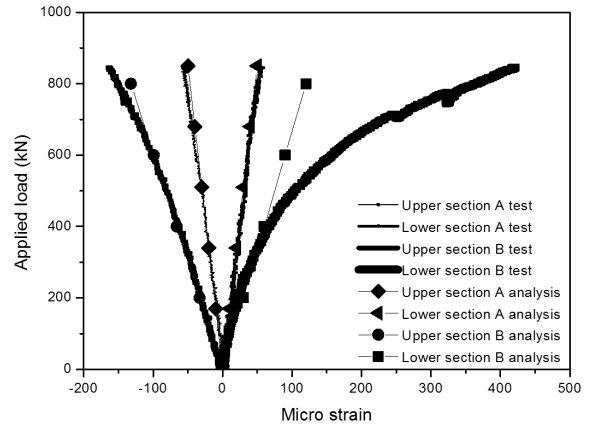
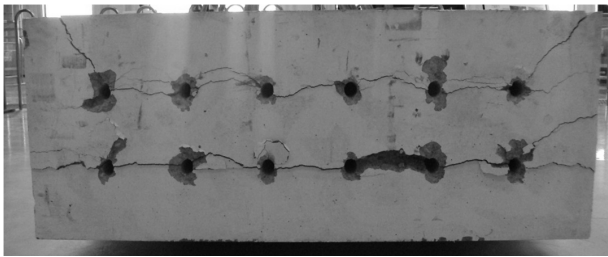


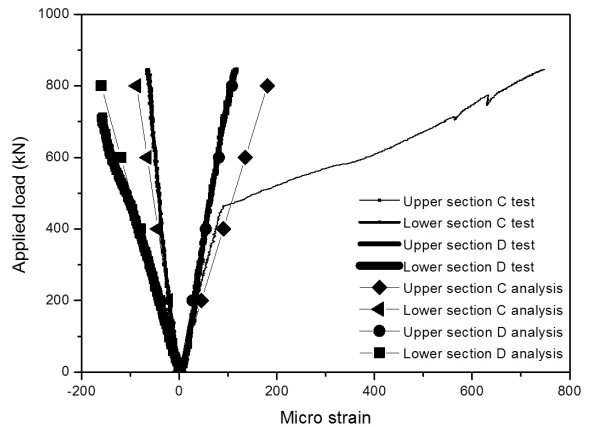
Fig. 8. Load-Deflection Results of Test



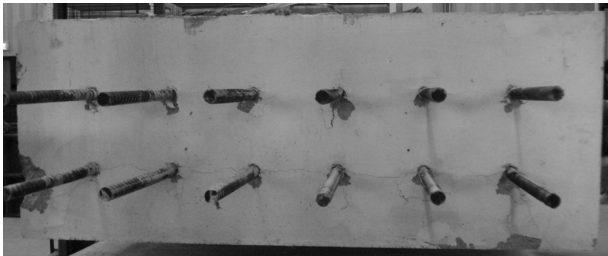
(a) Fixed Slab



(a) Cracks on Movable Slab



(b) Movable Slab



(b) Cracks on Fixed Slab

Fig. 9. Cracks on Floating Slab

Fig. 10. Strain Results of Embedded Reinforcements

관계이다. 그림에서와 같이 상부 및 하부 다웰바가 모두 인장상태에 존재하였다. Fig. 10과 Fig. 11의 결과를 종합하여 분석하면 고정측 슬래브의 다웰바의 상부 변형률이 인장(위로 볼록)에서 중앙부 철근 변형률이 아래로 볼록으로 변화하고 있으므로 변곡점이 고정측 슬래브에 존재하는 것으로 분석된다.

슬래브케도 실험체의 파괴거동을 수치해석적으로 분석하기 위하여 앞서 기술한 바와 같이 비선형 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 12는 실험체의 하중-변위 해석 결과를 실험결과와 함께 도시한 것이다. 고정측 슬래브의 해석처짐은 초기에는 선형거동을 보이다 재하하중이 약 300kN부터 가동측 슬래브의 균열에 의해 미세한 비선형 거동을 보였다. 이는 고정측 슬래브 처짐(DT 2)의 실험결과와 유사한 값이다. 가동측 슬래브의 해석결과, 처짐은 앞서 언급한

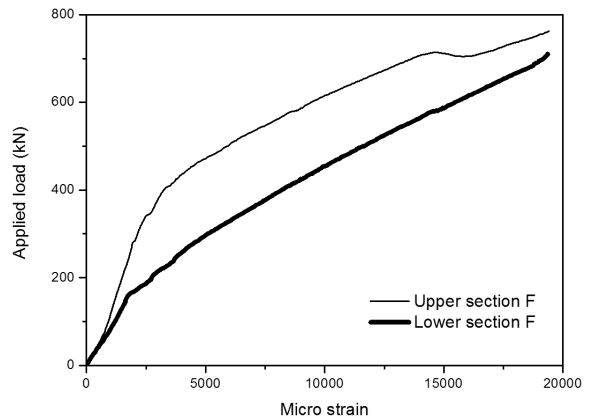


Fig. 11. Strain Results in Dowel Joint

바와 같이 유격의 크기와 강성을 고려한 스프링 요소를 사용하여 하중 재하 초기의 비선형성이 구현된다. 선형구간을 지나 약 530kN에서 휨균열에 의한 비선형 거동이 시작되다가 약 850kN의 하중에서 전단스프링이 극한치에 이르며 해석이 종료되었다. 극한하중은

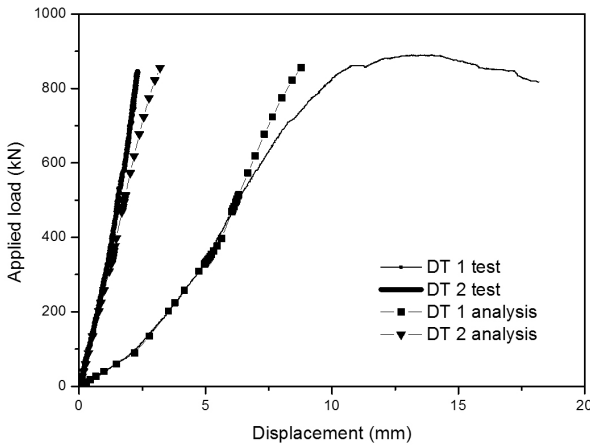


Fig. 12. Load-Deflection Results of Test and Analysis

해석치와 실험치가 약 1%의 오차를 보여 우수한 상관관계를 나타내었다. 실험체의 거동은 파괴 시에 연성거동을 나타내고 있으나 해석모델은 집중 스프링 요소가 전단강도에서 항복하면서 전체 해석이 종료되고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구에서는 전단파괴를 가정하여 CCD방법에 근거한 전단강도를 산정하고 이를 연결부 전단 스프링 강도로 적용하여 비선형 유한요소해석을 실시하였다. 해석 결과가 실험체의 거동과 유사한 것으로 분석되는 바, 본 연구에서 제안한 연결부 해석모델은 타당한 것으로 판단된다. 또한 슬래브궤도 다웰연결부는 앵커설계법에 근거한 CCD 방법으로 설계강도를 산정하여도 합리적인 것으로 분석된다.

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 다웰바를 직접 모델하고 다수의 지압강성을 고려한 스프링 요소를 이용하는 기존의 해석모델을 대체할 수 있는 간편하면서도 정확성이 우수한 슬래브 연결부 해석모델을 제안하였다. 제안 모델은 다웰바를 모델하지 않고 집중 전단스프링 요소로 대체하는 방법이다. 전단스프링의 강성은 기존의 Beam on elastic foundation 이론에 근거하고 슬래브의 간격을 고려하여 산정되었으며 다웰의 유격을 고려하여 초기강성을 결정하였다. 전단스프링의 강도는 콘크리트 전단파괴를 가정한 CCD 방법에 의해 산정하였다. 제안모델의 타당성을 입증하기 위해 실험체의 재하실험을 실시하였다. 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험적 연구 결과, 가동측 슬래브는 전단하중이 약 870kN에서 전단파괴 형태의 균열이 진전되며 하중저항능력을 상실하였다. 고정측 슬래브는 최종 재하하중까지 선형거동을 보였다. 따라서, 슬래브 궤도의 하중전달능력은 가동측 슬래브의 강도가

지배적인 것으로 분석되었다.

- (2) 실험체 연결부의 전단강도는 전단파괴 모드를 가정한 CCD 방법에 근거하여 257kN으로 산정되었다. 이를 본 연구에서 제안한 해석모델의 연결부 최대강도로 도입하여 비선형 해석을 실시한 결과, 실험체와 초기 다웰 유격에 의한 비선형성 균열하중, 파괴하중 등에서 유사한 파괴거동을 보였다.
- (3) CCD 방법에 근거한 앵커설계법은 본 연구에서와 같은 슬래브 궤도 연결부의 설계 시에 설계강도 산정을 위해 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- (4) 제안된 해석 모델은 슬래브 다웰 조인트를 포함한 콘크리트 포장, 콘크리트궤도 등의 파괴 시까지의 비선형 거동을 합리적으로 예측함으로써 도로 포장 및 철도 궤도의 설계 시 효과적으로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부 미래철도기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 07차세대고속철도A01)에 의해 수행되었습니다.

References

ABAQUS, Inc. (2007). *ABAQUS/Standard, Version 6.7.1*. Pawtucket, R.I., USA.

ACI Committee 318. (2008). *Building code requirements for structural concrete and commentary (ACI 318M-08)*, American Concrete Institute, Detroit, Mich.

Bhatti, M., Molinas-Vega, I. and Stoner, J. (1998). "Nonlinear analysis of jointed concrete pavements." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1629, pp. 50-57.

Choi, D. and Chun, S. (2007). "Anchoring to concrete." *Magazine of Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 4, pp. 41-44 (in Korean).

El-Ariss, B. (2007). "Behavior of beams with dowel action." *Engineering Structures*, vol. 29, No. 6, pp. 899-903.

Frantzeskakis, C. and Theillout, J. N. (1989). "Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete structures with a particular strategy following the cracking process." *Computers & Structures*, Vol. 31, No. 3, pp. 395-412.

He, X. G. and Kwan, A. K. H. (2001). "Modeling dowel action of reinforcement bars for finite element analysis of concrete structures." *Computers & Structures*, Vol. 79, No. 6, pp. 595-604.

Kim, J. and Hjelmstad, K. (2003). "Three-dimensional finite element analysis of doweled joints for airport pavements." *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, Vol. 1853, pp 100-109.

Korea Concrete Institute (2007). *Design code for concrete structures*, Appendix IV, pp. 462-494 (in Korean).

- Land Transport and Maritime R&D Report. (2011). *Development of low vibration track (Floating slab track) and technology for improvement of performance of long-span bridges* (in Korean).
- Lee, J. and Fenves, G. L. (1998). "Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures." *Journal of Engineering Mechanics Division, ASCE*, Vol. 124, No. 8, pp. 892-900.
- Lubliner, J., Oliver, J., Oller, S. and Oñate, E. (1989). "A Plastic-damage model for concrete." *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 25, No. 3, pp. 299-326.
- Martin-Perez, B. and Pantazopoulou, S. J. (2001). "Effect of bond, aggregate interlock and dowel action on the shear strength degradation of reinforced concrete." *Engineering Structures*, Vol. 23, No. 2, pp. 214-227.
- Millard, S. G. and Johnson, R. P. (1984). "Shear transfer across cracks in reinforced concrete due to aggregate interlock and to dowel action." *Magazine of Concrete Research*, Vol. 36, No. 126, pp. 9-21.
- Soroushian, P., Obaseki, K. and Rojas, M. C. (1987). "Bearing strength and stiffness of concrete under reinforcing bars." *ACI Material Journal*, Vol. 84, No. 3, pp. 179-184.