

플로팅궤도 연결부의 하중전달효율 산정을 위한 수치해석

Numerical Study on Load Transfer Efficiency of Floating Slab Track

정원석[†] 장 훈* 박성재* 박명균**
Chung, Wonseok Jang, Hoon Park, Sungjae Park, Myungkyun

ABSTRACT

Recently, many railway stations are built under the railway line in urban area. The passage of railway vehicles generates mechanical vibrations of a wide range of frequency. Thus, it is required to place structural vibration isolation systems to reduce vibration and noise originating from surrounding environments. This study utilizes elastometric bearings as a vibration isolation system. The slab track system on elastometric bearings is called "low vibration track" or "floating slab track." In this low vibration track system, dowel bars or plates can be installed to minimize the discontinuity of displacement between adjacent floating slab tracks. This study is to numerically investigate the effects of dowel members on static behavior of the low vibration track. The study involves two steel dowel systems including dowel bars and dowel plates. Each dowel system is analyzed under the service load condition to assess load transfer efficiency (LTE).

1. 서 론

최근에 도심지역을 중심으로 선하역사의 건설이 증가하고 있다. 선상의 열차가 통과함에 따라 역사의 승객에게 진동과 소음이 전달되므로 이를 감소시키려는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 탄성 방진장치 상에 슬래브 궤도가 설치된 저진동 궤도 혹은 플로팅 궤도를 대상으로, 인접한 두 개의 플로팅 슬래브의 연결을 위해 다웰시스템을 고려하였다. 다웰시스템은 효과적인 하중전달, 변형 연속화, 응력분산 등을 위해서 필요하며 국내외에서 옹벽 및 도로포장 분야를 중심으로 다양한 시스템이 개발되고 있다. 이러한 다웰시스템의 플로팅 궤도 적용을 위해 현재 다양한 다웰연결자의 재료 및 단면으로 플로팅 슬래브 연결부의 구조성능시험이 진행 중이다. 본 연구에서는 다웰바를 적용한 슬래브 시스템을 대상으로 비선형 유한요소해석을 실시하고 각 경우에 대해 하중전달효율을 산정하였다.

기존의 연구에 의하면 다웰효과는 직접전단, 비틀림(kinking), 휨 등의 3개의 메카니즘으로 구분하였다. 만약 콘크리트 강도가 강체와 가깝게 높다면 다웰은 직접전단과 kinking에 의해 파괴가 지배된다. 그러나 다웰바의 변형 발생할 시에 콘크리트도 변형이 함께 발생한다면 다웰바의 휨이 고려대상이 된다. WisDOT에서는 2001년부터 2006년까지 출간된 18건의 콘크리트 포장구조의 다웰 바 크기와 간격에 관한 문헌조사에 의하면 다웰바의 크기는 19mm에서 25mm까지이며 간격은 20mm에서 38mm인 것으로 조사되었다. Teller and Cashell(1958)는 다웰바의 연결부 간격, 다웰직경, 다웰 매립깊이, 반복하중 횟수 등이 하중전달효과에 미치는 연구를 수행하였다. 다웰직경과 하중전달능력과는 지수관계가 있으며 연결부 간격이 감소할수록 하중전달능력

† 정회원, 경희대학교, 토목공학과, 조교수
E-mail : wschung@khu.ac.kr
TEL : (031)201-2550 FAX : (031)201-0000
** 경희대학교, 석사과정
** 정회원, 삼보기술단, 기술연구팀장
** 정회원, 삼보기술단, 부사장

이 증가하는 것으로 연구되었다. 또한 다웰바의 유격의 손실 및 시공손실이 하중전달능력에 직접적인 영향을 미치고 있음을 확인하였다. 본 연구에서는 플로팅 슬래브 웨도시스템 적용을 위한 슬래브 연결부를 다양한 형태와 재료로 제안하고 이를 실험적인 연구를 통해 검증한다. 또한 실용적인 해석모델을 제시하여 매개변수 연구를 수행한다. 슬래브 연결부의 성능을 판단하는 기준으로 변위 기반의 하중전달효율(Load Transfer Efficiency, LTE)을 적용하였다.

$$LTE = \frac{2\delta_2}{\delta_1 + \delta_2} \times 100 (\%)$$

그림 1과 같이 연결부가 있을 경우는 플로팅 웨도는 인접한 두 개의 슬래브가 각기 다른 변위(δ_1, δ_2)를 나타낸다. 만약 연결부가 존재하지 않아 연속으로 변형이 발생하는 경우는 δ_1 과 δ_2 가 같으므로 하중전달효율은 100%가 된다. 반면에 한쪽만 슬래브가 설치된 경우는 δ_2 가 발생하지 않으므로 하중전달효율은 0%가 된다. 본 연구에서는 인접한 플로팅 슬래브 연결부의 처짐 기반 하중전달효율을 90% 이상으로 유지하는 것을 목표로 설정하였다.

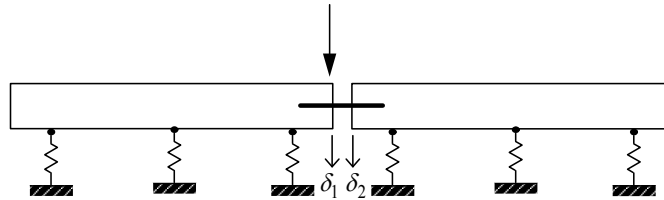
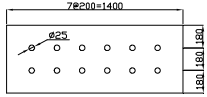
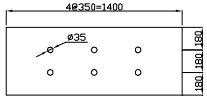
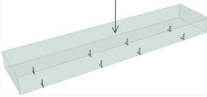
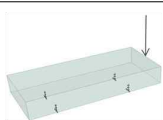


그림 1. 인접한 슬래브의 상대처짐

2. 다웰 실험체

슬래브 연결부는 표 1에 제시한 바와 같이 재료, 연결재 배치 등을 매개변수로 실험체를 제작하였다. 매립 깊이는 선행 민감도 해석연구에서 처짐에 민감하지 않았으므로 400mm를 적용하였다. 먼저 슬래브의 연결부의 성능을 정량적으로 평가하기 위해서 2개의 control slab를 제작하여 실험하였다. 첫 번째 control slab는 인접한 2개의 슬래브가 연결된 형태, 즉, 연결부가 존재하지 않는 실험체이다. 두 번째 control slab는 인접한 2개의 슬래브 중에서 한쪽 슬래브만 존재하는 실험체이다. 실험체 1은 직경이 25mm인 강재 다웰바 12개로 구성되었으며, 실험체 2는 실험체와 동일한 배치와 단면적을 갖는 다웰바이나 구성재료가 강재가 아닌 GFRP를 이용한 실험체이다. GFRP는 우수한 강도와 강성을 가지면서 부식에 강한 재료이므로 플로팅 슬래브의 연결부와 같이 대기 중에 노출되는 부분의 보강재로 적용이 가능한 재료이다. 따라서 본 연구에서는 GFRP를 적용한 다웰바의 성능을 강재 보강재와 비교 분석하기 위해 실험체 2를 제작하였다. 실험체 3은 강재 다웰바를 매립한 실험체로 실험체 1과 동일한 다웰바이나 다웰배치에서 직경이 35mm인 다웰바를 6개 매립하였다.

표 1. 고려대상 다웰연결부

실험체	연결부	재료	단면
1	다웰바	강재	
2	다웰바	GFRP	
3	다웰바	강재	
Control 1	없음	없음	
Control 2	없음	없음	

3. 유한요소 모델링

본 연구에서는 그림 2와 같이 고정측 슬래브와 다웰연결부의 연결을 Rigid Link를 이용하여 강절로 가정하였으며, 접합측 슬래브와 다웰 연결부는 비선형 스프링 요소를 도입하여 다웰과 슬래브 간의 유격을 고려할 수 있게 하였다. 고정측 슬래브와 접합측 슬래브는 ABAQUS 쉘요소 S4를 이용하여 이상화하였으며 다웰바는 보요소인 B33, 다웰플레이트는 쉘요소인 S4로 모델하였다. 접합측 슬래브와 다웰바 간의 스프링 요소는 두 절점을 연결하는 SPRING2 요소를 이용하였으며 방진장치는 지반과 절점을 연결하는 SPRING1 요소를 적용하였다.

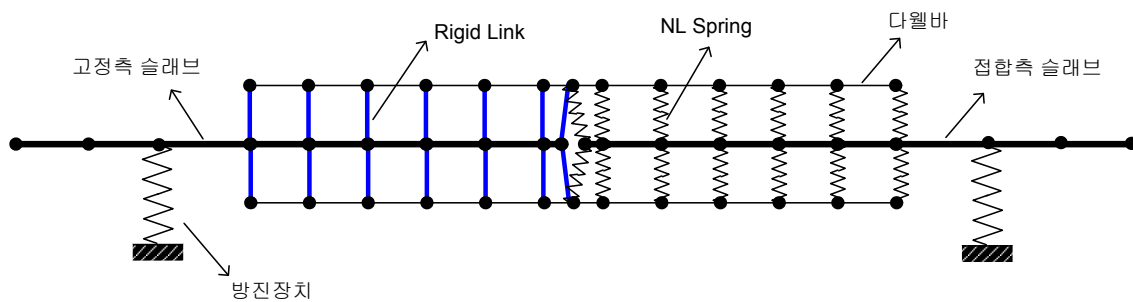


그림 2. 유한요소 모델 개념도

접합측 슬래브와 다웰바는 일정한 유격(δ_d)을 두고 제작되었다. 앞선 문헌연구에서 Teller and Cashell(1958)의 연구결과와 같이 유격은 하중전달능력에 직접적인 영향을 미치고 있다고 보고되고 있다. 따라서 이러한 유격을 반영할 수 있는 스프링 강성을 정의하는 것이 필요하다. 사용하중 하에서의 스프링은 일정한 유격 내에서는 자유롭게 거동하므로 강성이 존재하지 않으며 슬래브와 다웰이 접촉이 발생하는 시점부터 일정한 강성을 가지게 된다. 따라서 그림 3(a)와 같이 다중직선으로 스프링 강성을 표현할 수 있다. 그러나 강성이 0인 부분은 Newton-Rahson 방법을 적용한 ABAQUS 비선형해석에서는 수렴하지 않으므로 가상의 스프링 강성을 가하여 그림 3(b)와 같이 이상화하여 모델링을 실시하였다.

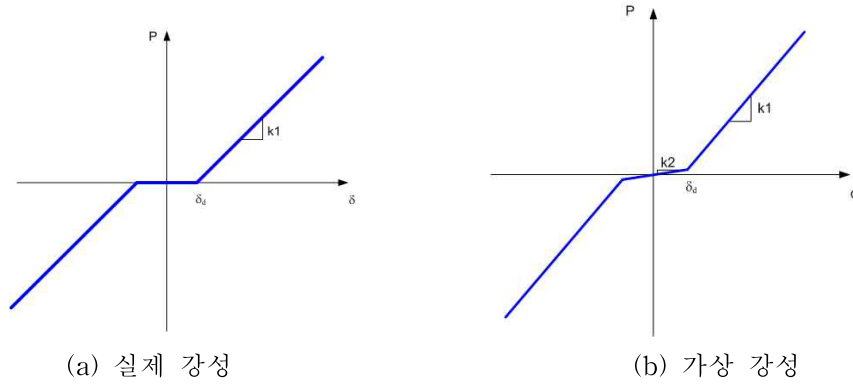


그림 3. 비선형 스프링 강성

슬래브와 다웰의 접촉이 발생할 시에 인접한 두 개의 슬래브에서 그림 4와 같이 변형이 발생한다면 콘크리트에 매립된 다웰바는 다웰변위(η)를 발생한다. 다웰력(S_d)과 다웰변위와의 상관관계는 다웰강성(K_d)을 도입하여 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$S_d = K_d \eta$$

기존의 연구(Martin-Perez and Pantazopoulou 2001)에서 다웰력과 변위의 관계를 정의하기 위해 “Beam on elastic Foundation” 이론을 적용하였다. 이 이론에 의하면 다웰바를 그림 4와 같이 탄성지반위에 놓인 보요소로 가정하고 보요소의 끝단을 그림 4의 변곡점으로 고려한다. 또한 임의의 위치에서의 지반반력은 보의 처짐에 비례한다고 가정하였다. 다웰력과 다웰변위와의 관계는 다음과 같이 정의된다.

$$S_d = (\lambda^3 E_s I) \eta$$

여기서 $\lambda = \left(\frac{d_b G_f}{4 E_s I} \right)^{0.25}$, $I = \pi d_b^4 / 64$, 다웰바의 단면 이차모멘트, E_s = 다웰 재료의 탄성계수, d_b = 다웰바의 직경 (mm), G_f = 콘크리트의 강성계수 혹은 지압강성이다.

따라서 콘크리트의 지압강성을 결정하는 것이 다웰바의 거동을 정의하는데 중요한 사항이다. Soroushian 등(1987)은 콘크리트의 지압강성을 실험적으로 다음과 같은 식으로 제시하였다.

$$K_f = 127 \beta \sqrt{f'_c} \left(\frac{1}{d_b} \right)^{2/3} \quad (\text{in mm, MPa})$$

여기서 f'_c 은 콘크리트의 압축강도(MPa 단위)이고 β 는 철근간격에 대한 보정계수로 25.4mm 이하의 순철근간격에 대해서는 0.6의 값을 가지고, 25.4mm 이상에서는 1.0의 값을 갖는다. 앞선 식은 콘크리트가 항복하지 않는 범위에서 적용이 가능한 식으로 항복이 발생한다면 콘크리트의 강도감소 등으로 인해 지반응력의 재분배가 발생되어 비선형 거동을 보이게 된다. 본 연구에서는 사용하중 하에서의 슬래브 연결부의 거동을 분석하므로 앞서 제시한 강성으로 유한요소 모델의 스프링 강성을 산정하였다.

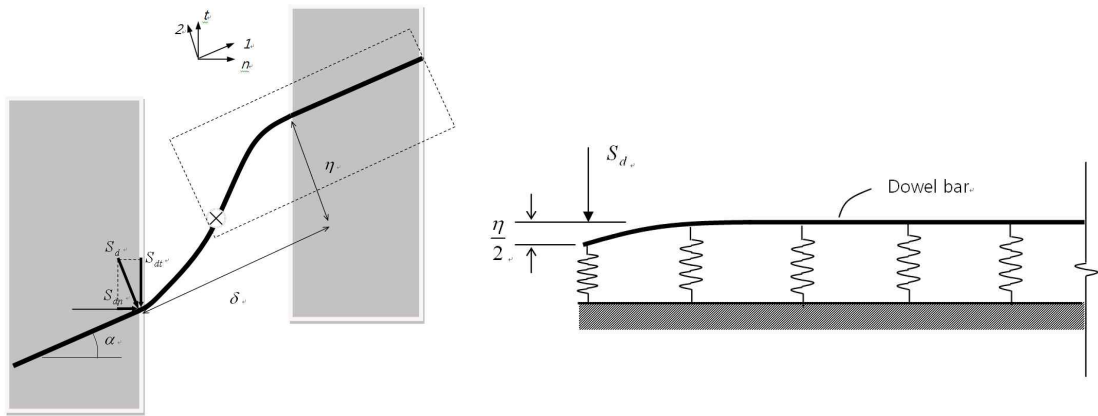
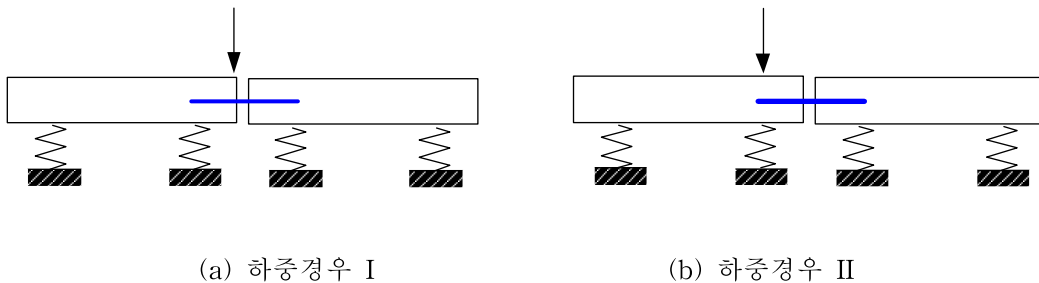


그림 4. 다웰바의 다웰효과 (Beam on Elastic Foundation)

4. 해석결과 분석

앞서 언급한 3개의 실험체와 2개의 Control Slab를 대상으로 앞서 기술한 방법으로 유한요소 모델을 구성하고 비선형 스프링의 거동을 고려하여 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 해석 시 하중의 재하위치는 그림 5에서와 같이 고정측 슬래브 끝단에 하중을 가하는 하중경우 I과 고정측 슬래브 방진장치 위치에 하중을 가하는 하중경우 II를 각각 고려하였다. 재하하중의 크기는 100kN이며 콘크리트의 탄성계수는 28.6GPa, 강제 다웰의 탄성계수는 200GPa, FRP의 탄성계수는 50GPa이다. 표 2는 고려한 2개의 하중경우에 대해 그림 1에서 정의한 고정측 슬래브 변위(δ_1)와 접합측 슬래브 변위(δ_2)를 나타내고 이에 따른 하중전달효율(LTE) 결과이다. Control Slab 1은 연결부가 없는 실험체로 고정측 슬래브와 접합측 슬래브의 변위가 일치하므로 하중전달효율은 100%이다. Control Slab 2는 고정측 슬래브만 존재하여 하중전달효율은 0%이다. 즉, Control Slab 1은 처짐의 Lower Bound이고 Control Slab 2는 처짐의 Upper Bound이다. 강제 다웰바를 적용한 실험체 1과 실험체 3을 비교하면 실험체 1이 약 5.5% 우수한 하중전달효율을 보였다. 동일단면적을 갖는 다웰 연결체를 설치할 시에는 다웰바의 수를 증가시키분산 배치하는 것이 하중전달효율을 증가시키는데 유리한 것으로 분석되었다. 실험체 1과 실험체 2는 다웰바 연결부에서 동일한 배치와 단면적을 갖는다. 그러나 강재를 사용한 실험체 1이 GFRP를 적용한 실험체 2와 비교하여 약 2% 우수한 처짐기반 하중전달효율을 나타내고 있음을 알 수 있다. 모든 실험체에서 처짐기반 하중전달효율을 산정해 본 결과, 본 연구의 목표치인 90%를 만족하는 것으로 분석되었다. 추후 실험체의 실험결과와의 비교분석을 통해 추가 연구가 진행되어야 할 것이다.



(a) 하중경우 I

(b) 하중경우 II

그림 5. 하중 경우

표 2. 하중전달효율 비교

실험체	LTE	
	하중 경우 I	하중 경우 II
실험체 1	97.8%	97.7%
실험체 2	95.8%	95.8%
실험체 3	92.7%	92.6%
Control 1	100%	100%
Control 2	0%	0%

5. 요약 및 결론

최근에 도심지역을 중심으로 선하역사의 건설이 증가하고 있다. 선상의 열차가 통과함에 따라 역사의 승객에게 진동과 소음이 전달되므로 이를 감소시키려는 연구가 진행되고 있다. 본 연구에서는 탄성 방진장치 상에 슬래브 궤도가 설치된 저진동 궤도 혹은 플로팅 궤도를 대상으로, 인접한 두 개의 플로팅 슬래브의 연결을 위해 다웰시스템을 고려하였다. 다웰시스템은 효과적인 하중전달, 변형 연속화, 응력분산 등을 위해서 필요하며 국내외에서 웅벽 및 도로포장 분야를 중심으로 다양한 시스템이 개발되고 있다. 본 연구에서는 강재 다웰바를 이용한 다웰 시스템을 대상으로 단면과 재료를 변화시키며 변위 기반 하중전달효율을 분석하였다. 모든 경우에서 처짐기반 하중전달효율이 90%를 상회하는 것으로 분석되었으며, 동일 단면적에서는 다웰바를 다수 배치하는 방식이 하중전달효율이 우수함을 확인하였다. 추후 실험체의 실험결과와의 비교분석을 통해 연구가 진행될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 차세대고속철도기술개발사업의 3차년도 연구비 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Martin-Perez, B and Pantazopoulou, S.J. "Effect of Bond, Aggregate Interlock and Dowel Action on the Shear Strength Degradation of Reinforced Concrete," Engineering Structures, Vol. 23, pp 214-227, 2001
2. Soroushian, P., Obaseki, K., and Rojas, M.C. "Bearing Strength and Stiffness of Concrete under Reinforcing Bars." ACI Material Journal, Vol. 84, No. 3, pp 179-184, 1987
3. 국토해양부 저진동 궤도(플로팅 슬래브궤도) 개발 및 특수교량 성능향성 기술 개발, 2009
4. Teller, L. W., and Cashell, H. "Performance of Doweled Joints Under Repetitive Loading," Public Roads, Vol. 30, pp. 1-24, 1958