

프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도의 정적 거동에 관한 연구

Static behavior of precast concrete slab track

이승정* 지광습** 김유봉*** 백인혁**** 김나영*****

Lee, Seung Jung · Zi, Goangseup · Kim, Yoo Bong · Baek, In Hyuk · Kim, Na Young

1. 서론

지속적인 궤도변형 발생 가능성과 궤도 좌굴의 위험성 등의 구조적인 약점을 가지고 있으며 분기 자갈 등으로 인한 환경문제를 지속적으로 야기하는 자갈도상 궤도는 점차 콘크리트 슬래브 궤도로 대체되고 있는 실정에 있다. 콘크리트 슬래브 궤도의 경우 다소 높은 초기 건설비용에도 불구하고 자갈도상 궤도에 비해 구조적 안정성이 뛰어나고 유지 및 보수에 들어가는 비용이 적어 혁신적인 궤도 구조로 평가받고 있다. 이러한 콘크리트 슬래브 궤도는 현장타설 콘크리트 슬래브 궤도와 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도로 구분할 수 있는데, 현장타설의 경우 콘크리트의 품질 저하가 우려되며 프리캐스트에 비해 시공속도가 느리며 기계화 시공의 제한이 있다는 단점이 있다. 이에 비해 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도는 고품질, 고강도의 콘크리트 시공이 가능하며 기계화 시공으로 시공속도가 빠르다는 장점이 있기 때문에 현재 독일, 일본 등에서 여러 형태의 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도가 연구 및 개발되고 있다. 특히, 국내에서는 2006년 삼표이앤씨(주)와 한국철도기술연구원이 개발한 PST 시스템이 개발되어 시험부설 및 성능검증을 마친 상태에 있다.

본 연구에서는 삼표이앤씨(주)와 한국철도기술연구원에 의해 개발된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도를 국내 설계규준에 적합하도록 본 논문의 저자들이 재정립한 설계법을 이용하여 새로운 프리캐스트 콘크리트 슬래브 궤도를 설계하였다. 또한 설계된 슬래브 궤도의 거동을 유한요소해석을 통한 수치적 해석과 정적 실험과 슬래브 궤도 단부의 실스케일 인발 시험으로 분석 및 고찰하였다.

2. 프리캐스트 슬래브 궤도의 설계

본 연구의 대상 구조물인 프리캐스트 슬래브 궤도는 그림 1과 같이 공장에서 제작된 프리캐스트 콘크리트 슬래브 패널과 도상강화층(Hydraulic Sub Base, 콘크리트 기층)을 기본구성으로 한다. 슬래브 궤도의 설계 시 응력은 유한요소해석에 의해 산정되었으며 자세한 내용은 3장에서 설명하기로 한다.

허용응력 설계법으로 설계된 슬래브 궤도의 경우 그림 2와 같이 전체 작용응력(최대 인장응력)이 허용응력 수준에 있는지와 차륜에 의한 피로응력의 변동 폭이 허용 폭 내에 있는지에 대하여 검토하여 설계되었다.

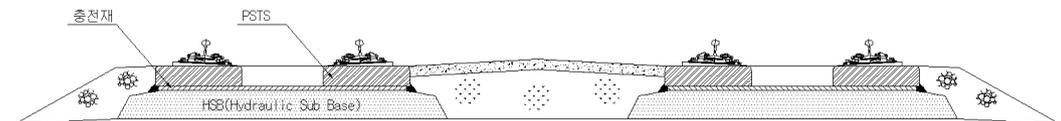


그림 1. 프리캐스트 슬래브 궤도 표준단면

* 학생회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 · 박사과정 · E-mail: fincher7vn@korea.ac.kr - 발표자

** 정회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 · 공학박사 · E-mail: g-zi@korea.ac.kr

*** 정회원 · 삼표이앤씨(주) PSTS팀 · 공학석사 · E-mail: kiddy72@sampoenc.com

**** 비회원 · 삼표이앤씨(주) PSTS팀 · 공학석사 · E-mail: cafri100@sampoenc.com

***** 비회원 · 고려대학교 건축·사회환경공학과 · 석사과정 · E-mail: kny0112@korea.ac.kr

슬래브 궤도의 종방향의 경우 PSC로 설계되었으며 횡방향의 경우 RC로 설계되었다. 설계에 대한 자세한 내용은 지광습 등(2010), 이승정 등(2010)으로 대체하며 이는 Eisenmann(2001, 2006)이 제안한 설계개념을 기본으로 한다[1,2,3,4].

3. 유한요소해석

슬래브 궤도가 저항해야 하는 하중에는 차륜에 의한 하중과 외기의 온도변화에 의한 온도변형 및 수축하중, 시·제동 및 원심하중을 포함하는 수평하중 등이 있다. 온도변화에 의하여 발생하는 응력 및 슬래브 궤도의 거동은 주기가 긴 특성이 있기 때문에 피로거동에는 큰 영향을 주지 않으나 차륜에 의한 응력의 변화와 거동은 매우 짧은 주기를 가지므로 피로거동에 직접적인 영향을 미친다. 설계 시에는 전체응력의 비교 외에 차륜에 의한 발생응력 및 거동을 분석해야 한다. 따라서 본 연구에서는 유한요소해석을 통하여 차륜에 의한 슬래브 궤도의 거동만을 분석하기로 한다.

차륜하중에 의한 프리캐스트 슬래브 궤도의 거동 분석에 사용된 유한요소 모델은 그림 2와 같다. 본 연구의 대상 구조물과 같이 길이에 비해 두께가 얇은 구조물의 거동을 모사하기에 적절한 휨 거동 능력이 향상된 요소인 C3D8I를 사용하였으며 상용 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석을 수행하였다. 각 체결구에 분배된 차륜하중에 의한 지지점력을 하중으로 대입하였다. 설계 시의 보수적인 측면으로 슬래브층과 도상강화층 사이의 충전층에서 미끄러짐이 발생하는 경우를 고려하여 슬래브-기층 경계면에서 상대변위를 허용하도록 모델링하여 해석한 결과 그림 2와 같이 슬래브층과 도상강화층의 거동을 얻을 수 있다. 이와 같은 모델로부터 얻은 슬래브 패널 하면의 응력은 그림 3과 같다.

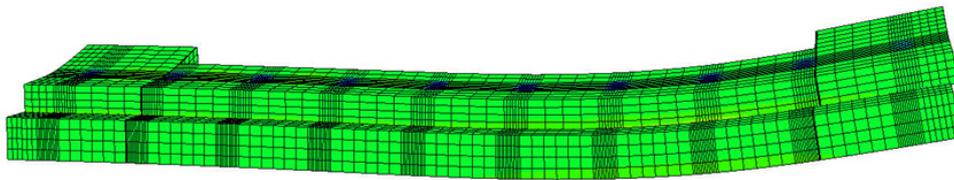


그림 2. 유한요소모델 및 슬래브 패널과 도상강화층이 비구속된 결과

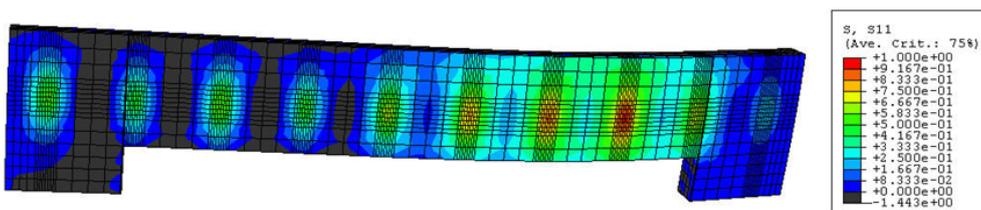


그림 3. 슬래브 패널 하면의 종방향 응력도

유한요소해석 결과 그림 2와 같은 변형형상을 얻을 수 있다. 이는 지지점력으로 계산된 각 체결구에 작용하는 하중이 슬래브 패널의 후미로 갈수록 작아짐에 따라 슬래브 앞의 상대적인 처짐에 의한 것으로 이해할 수 있다. 따라서 이러한 변형형상에 의해 슬래브 패널의 후미 부근의 변형 지점에서 종방향 최대 응력이 발생함을 그림 3을 통해 확인할 수 있다. 이러한 현상은 슬래브 후미 체결구의 지지점력이 감소할수록 더 크게 나타난다.

4. 정적 시험

슬래브 궤도의 정적 거동을 실험적으로 고찰하기 위해 휨 시험과 실스케일 인발 시험을 수행하였다. 파괴 하중, 파괴형상, 하중-변위 곡선, 내부에 매설된 철근의 변형률 등의 거동을 분석하여 종방향 및 횡방향 슬래브 궤도의 기본적인 휨 성능을 검증하였다. 또한 슬래브 궤도에 축력으로 가해지는 온도 및 수축하중에 의한 슬래브 궤도의 거동을 확인하기 위해 두 개의 슬래브 궤도를 연결하고 있는 연결철근의 위치 및 형태에 따른 거동을 실스케일 인발 시험을 통하여 분석하였다.

휨 시험의 경우 1,000kN 용량의 UTM을 이용하여 변위제어 방법으로 수행되었으며 그림 4와 같이 하중을 재하하고 변위계는 시편의 상면에 설치하여 상부의 처짐을 측정하였다.

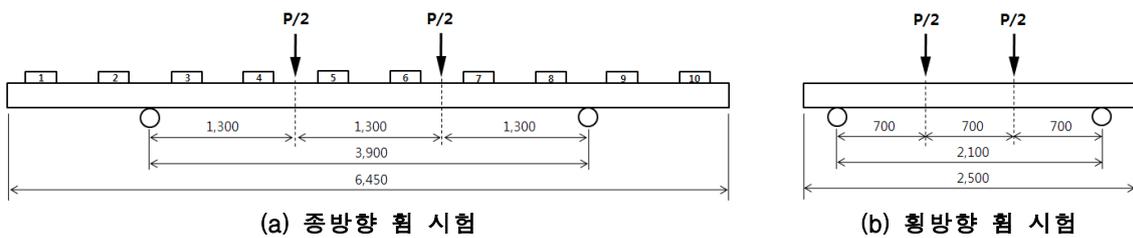


그림 4. 슬래브 궤도 휨 시험 방법

슬래브 궤도의 종방향 휨 시험의 경우 약 10mm 처짐에서 균열발생 및 변형경화가 시작되었으며 공칭 휨 강도 59.56kN·m의 약 1.5배인 89.11kN·m의 휨 강도를 가졌으며 약 74mm 처짐에서 최종 파괴를 확인하였다. 횡방향의 경우 약 15mm 처짐에서 초기 균열이 발생하였으며 약 20mm 처짐에서 변형경화가 시작되었다. 설계 휨 강도 69.72kN·m의 약 1.44배인 101.03kN·m의 휨 강도를 가졌으며 약 67mm 처짐에서 최종 파괴를 확인하였다. 휨 시험의 결과를 그림 5에 도시하였다.

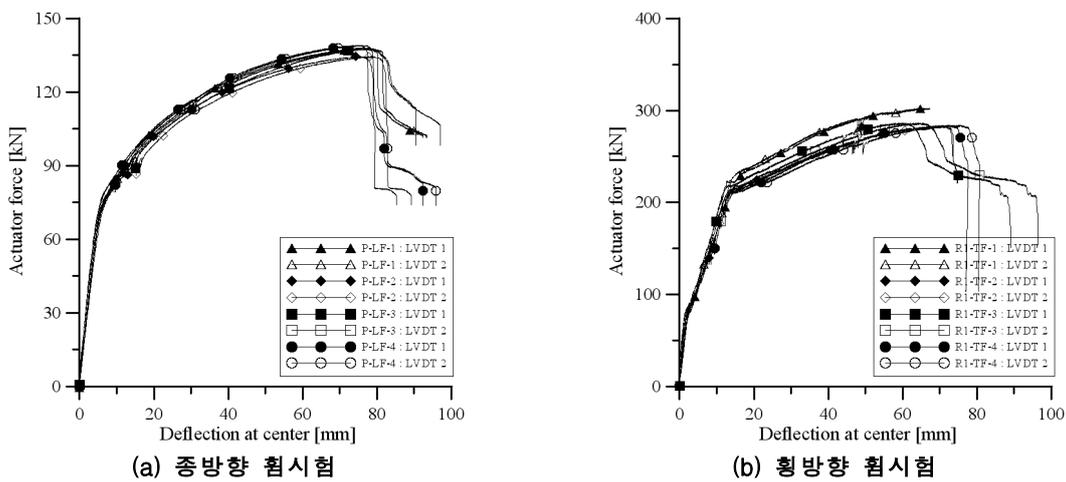


그림 5. 슬래브 궤도 휨 시험 결과

기 개발된 PST 시스템의 연결철근의 경우 슬래브 궤도 단부의 중앙부에 헤드드 바 형태의 연결철근이 2개 존재하였다. 기존의 연결철근의 경우 단부 중앙부의 연결철근 주위의 콘크리트가 파쇄되었으며 설계 시 계산된 온도하중과 체결력인 약 800kN을 저항할 수 없음을 확인하였다. 따라서 단부 측면에 일반 철근형태의 변경된 연결철근을 매설한 경우 온도하중과 체결력을 충분히 저항할 수 있었으며 콘크리트의 파쇄 등의 파괴형상은 나타나지 않았다. 인발 시험의 결과를 그림 6에 도시하였다.

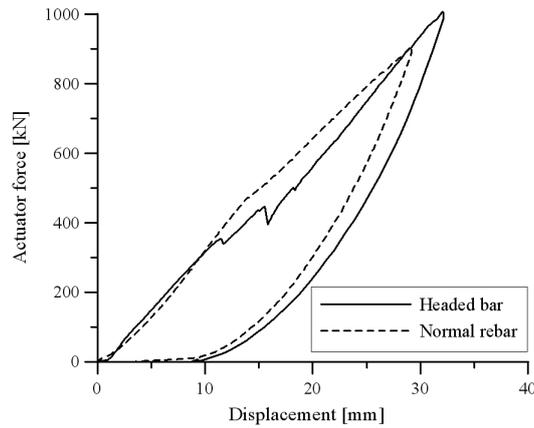


그림 6. 슬래브 웨도 인발 시험 결과

5. 결 론

본 연구에서는 기 개발된 PST 시스템을 개량한 새로운 시스템을 설계하였으며 그에 대한 정적 거동에 관하여 분석하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 유한요소해석을 통해 보수적인 측면에서의 슬래브 웨도의 거동을 확인하였으며 차륜에 의한 하중이 작용한 경우 슬래브 웨도의 변형 형상과 발생응력에 대하여 분석하였다.
2. 슬래브 웨도의 중방향 및 횡방향 휨 시험 결과 정적 하중 재하 시 설계된 슬래브 웨도가 적절하게 하중을 저항할 수 있음을 확인하였다.
3. 연결철근의 위치 및 형태에 따른 실스케일 인발 시험의 결과 슬래브 웨도 단부의 중앙부에 헤디드바 형태의 연결철근을 사용한 경우 온도하중과 체결력을 저항할 수 없음을 확인하였다. 따라서 단부의 측면에 일반 철근형태의 연결철근의 설치가 타당한 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2009년 정인옥학술장학재단의 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 정인옥학술장학재단에 감사드립니다.

참고문헌

1. 지광습, 이승정, 장승엽. (2010) 한국형 프리캐스트 슬래브 웨도 설계, 2010년도 한국철도학회 춘계 학술대회 논문집, pp. 1423-1429.
2. 이승정, 지광습, 장승엽, 김유봉. (2010) 프리캐스트 콘크리트 슬래브 웨도의 개발 및 설계, 2010년도 대한토목학회 정기학술대회 논문집.
3. Eisenmann, J., Leykauf, G. (2001) Beton-fahrbahnen, 2nd ed., Ernst & Sohn, Berlin
4. Eisenmann, J. (2006) Introduction : Ballasted tracks and the goals of slab track development, RTR special