

단조 반복하중이 작용하는 합성슬래브의 거동에 대한 실험적 연구

An Experimental Study of the Composite Slab under a Repeated Loading

엄 철 환*
Eom, Chul Hwan

김 희 철**
Kim, Hee Cheul

박 진 영***
Park, Jin Young

서 상 훈****
Seo, Sang Hoon

Abstract

The application of metal deck floor system is increasing gradually and especially for office buildings. In the cases of large parking structures and storage structures, the construction period and the cost can be reduced. Also the steel deck system can prevent the crack of a floor and reduce the retrofit expenses. However, the floor should stand for the repeated truck load which is relatively heavier repeated loading. The mechanical behavior of a slab under repeated load is also different from the static loading state. An evaluation of a structural capacity was performed in this study through the dynamic capacity evaluation experiment for an application of a composite deck floor system as a parking structure slab. The period of repeated loadings were set up as 25years and 960,000 times monotone cyclic loads were applied at the center of the specimens. The tension crack propagation and patterns at the center of specimens were examined.

키워드: 거푸집용 데크플레이트, 트러스형 데크플레이트, 반복가력

Keywords: Non-composite form deck, Truss deck plate, Repeated loading

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

콘크리트 합성 데크플레이트(이하, 합성슬래브)에 관한 연구는 미국, 유럽 등 지역에서는 일찍이 1930년도부터 연구되어 현재 미국내에서 철골조건물의 슬래브중 90%가 합성슬래브일 정도로 일반 적용이 활발하지만, 일본은 1980년대, 우리나라는 1990년대에 이르러 합성슬래브의 개념을 도입하여 철골조 건축물의 바닥재에 적용되고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 합성슬래브는 오피스용 건물의 슬래브에 많이 적용되고 있다. 대형주차장이나 창고 등에 적용될 경우 현장에서의 공기 단축 및 공사비 절감, 주차장 바닥의 균열 방지 및 보수보강 비용 절감 등에 기여하고 있다.

합성슬래브의 주차장 적용을 위해서는 반복하중이 작용하는 구조 특성을 고려한 동적 성능평가 실험이 선행되어야 하며, 본 연구는 주차장과 사무실 용도의 슬래브에 대하여 반복하중 재하 실험을 실시하고 시험체의 변위와 균열 양상을 통하여 합성슬래브의 내력 및 강성에 미치

는 영향을 분석하는 것이 목적이다.

1.2 이론적 고찰

현재 우리나라의 데크 플레이트의 사용현황은 일반 데크 플레이트를 사용하는 경우와 합성용 데크 플레이트로 분류할 수 있다.

일반 데크플레이트는 국내에서 많이 사용하고 있는 데크플레이트로 철근 콘크리트 바닥의 거푸집용으로 많이 사용되며 일부는 구조용으로 사용되고 있다. 거푸집용은 콘크리트 경화 전 액상 상태의 콘크리트 자중 및 시공시 하중을 견디는 역할을 하며 콘크리트 경화 후의 바닥 하중은 콘크리트 바닥이 지지하게 된다. 구조용은 콘크리트 경화 후에도 데크플레이트 자중과 바닥전체에 가해지는 전체하중을 데크플레이트가 지지할 수 있도록 설계된다. 이들 중에서 데크바닥판의 윗면 또는 아랫면이 평평한 데크플레이트를 플랫폼데크(Flat Deck)로 분류한다.

합성용 데크 플레이트는 데크플레이트와 슬래브 콘크리트가 일체화된 것을 말하며 이를 위해 엠보싱이나 도브테일(Dove Tail)등의 삼입형 단면형상을 가지고 있는 것이 특징이다. 이 외에 위의 형상들이 비셀형(Noncellular)인데 반해 기존 데크플레이트의 홈을 평강판이나 홈에 맞는 절곡강판으로 막아 셀타입 배선망을 형성한 데크플레이트를 셀룰라(Cellular) 데크플레이트라고 한다. 셀룰

* 주저자, 위덕대학교 건축학부, 조교수, 공학박사

** 경희대학교 건축공학과, 교수, 공학박사

*** (주)아이스트 부설연구소, 선임연구원, 공학박사

**** 교신저자, 경희대학교 대학원, 석사과정
(seosanghoon@khu.ac.kr)

라 데크플레이트는 형성된 셀을 통해 대용량의 전선 배선망 뿐 아니라 셀 윗면에 설치되는 플로어덕트와 헤더 박스를 이용한 전선배선망 등 점차 늘어나는 전기, 전화, 전산망 설치 소요에 대응하기 위한 데크 플레이트이다.

합성 데크 플레이트의 한 종류인 트러스형 데크 플레이트는 시공의 편리함과 내화 구조재로서 인정을 받으면서 빠르게 발전하고 있다. 그러나 일반적인 단면 설계의 과정은 정적인 하중을 기준으로 설계되고 있으며 동적 특성에 대해서는 고유진동수 검토와 변위 예측을 통한 사용성 평가만을 실시하고 있는 실정이다.

구조 부재가 저항할 수 있는 하중보다 작은 하중이 발생하는 경우 발생빈도가 증가한다면 구조체의 내구성이 저하될 수 있으며 지속적으로 반복하중이 가해지는 경우에는 파괴가 발생할 수 있다. 이러한 거동을 피로에 의한 파괴라고 하며 일반적으로 수평 부재에 대하여 연구가 이루어지고 있다. 구조체에 중력하중이 작용하는 1차적인 부재는 슬래브이므로 피로하중에 대하여 면밀한 연구가 요구된다. 그러나 주차장과 같은 차량의 주행과 정차의 반복이 빈번한 구조부위에 대한 피로 거동에 대한 검토는 현재까지 미비한 상태이다. 하중이 큰 자동차나 포크리프트 등의 주행이 빈번한 부위에서는 합성슬래브는 수만회 이상의 수직 반복하중을 받는다. 이와 같은 반복하중을 받는 합성슬래브에서는 슬래브에 작용하는 하중의 크기에 따라 그 역학적 거동은 달라질 것으로 판단된다. 또한 이와 같은 반복하중으로 인한 합성슬래브의 내력 및 강성에 미치는 영향도 문제로 제기되어 왔지만, 아직 국내에는 연구나 데이터가 미비한 실정이고, 미국 등 국외에서도 반복하중이나 동적 재하실험에 대한 연구실적은 소수에 불과하다.

1.3 연구 내용 및 방법

합성슬래브를 주차장이나 창고 등에 적용할 경우, 하중이 큰 자동차나 포크리프트 등의 주행에 의해 합성슬래브는 수만회 이상의 반복하중을 받는다. 이와 같은 반복하중을 받는 합성슬래브에서는 슬래브에 작용하는 하중의 크기에 따라 역학적 거동이 달라질 것으로 판단된다. 따라서 데크플레이트에 작용하는 반복하중의 크기를 실험의 변수로서 설정하였다. 300kN의 액츄에이터를 사용하였으며 하중제어를 통하여 1점가력의 형태로 4Hz의 sine파형 반복하중을 96만회 재하 하였다. 반복하중 재하 후 트러스형 합성슬래브의 수직 변위와 측면의 최종 균열 상황을 측정하고 분석을 실시하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 시험체 형상 및 치수

반복하중에 의한 영향을 평가하기 위하여 제작된 시험체의 크기와 철선 배근도, 단면형상은 그림 1과 같으며

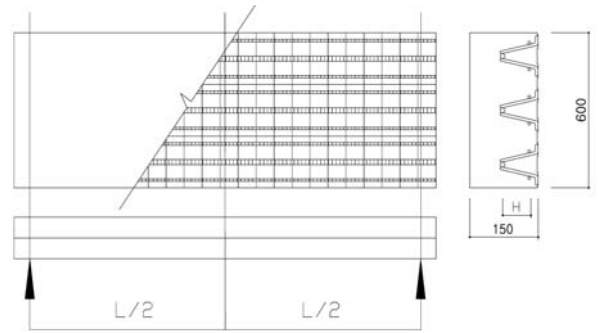


그림 1. 시험체 형상

데크 플레이트의 단면성능은 표 1에서 보는 바와 같다. 콘크리트의 타설은 실험 대상 시험체를 제작 시 동시에 실시하였으며 동일한 토핑 두께와 폭이 적용되었다.

실험에 적용된 트러스형 데크플레이트의 사이즈는 3000×600(mm)이며 반복하중에 의한 영향을 명확히 관찰하기 위하여 단순지지의 형태로 1경간으로 제작되었다. 트러스형데크 플레이트에는 상부와 하부에 전체 3가닥의 이형 철선이 사용된다. 본 연구에서 적용된 상부 철선은 1-D14 ($a_1=154\text{mm}^2$)이 사용되었으며, 하부 철선은 2-D10 ($a_2=157\text{mm}^2$)이 적용되었다. 또한, 래티스는 Φ 5가 사용되었으며 트러스의 간격은 200mm로 제작되었다. 설계 결과에 따라 배력근은 D10@230의 간격으로 배근 되었다. 콘크리트 토핑 두께는 150mm이며 상부와 하부 피복 두께

표 1. 데크플레이트의 단면 성능

항 목	성능값
아연도 강판 두께(mm)	0.5
Xc(mm)	38.8
Xt(mm)	36.2
단면2차모멘트(I, mm ⁴ /m)	1.56×10^6
단면계수(Zc, mm ³ /m)	4.010×10^4
단면계수(Zt, mm ³ /m)	4.302×10^4

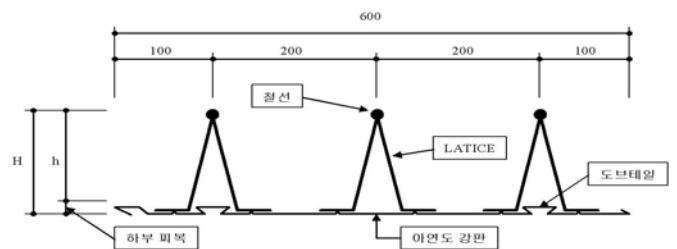


그림 2. 트러스형 데크 플레이트의 단면도

는 20mm로 타설하였다. 다음의 그림 2는 트러스형 데크 플레이트의 단면도이다.

실험에 사용된 데크플레이트 및 철선, 콘크리트의 기계적 성질은 표 2와 같다. 재료의 물성치는 데크플레이트 제작사의 자체 실험 결과이며 국내 표준규격 기준을 만족하고 있다. 데크플레이트의 항복강도는 아연도 강판의

표 2. 재료의 기계적 성질

구분	실험치(MPa)
데크플레이트 (KS-SGC570)	항복강도 (f_y) 275
철선	항복강도 (f_y) 500
콘크리트	압축강도 (f_{ck}) 27

성능을 나타내는 것이다.

2.2 반복하중 실험

본 연구에서 분석하고자 하는 단조 반복하중에 의한 합성데크 플레이트 슬래브의 거동을 파악하기 위하여 반복하중의 가력폭을 2가지로 설정하여 실험을 수행하였다. 96만회의 반복하중을 연속해서 가력하는 것은 가력 유압 장치의 온도상승을 유발할 수 있으므로 4~5회로 나누어 실험을 수행하였다.

재하방법은 표 3에 나타난 것과 같이 4Hz의 sine파형 진폭을 원칙으로 하고 반복하중의 하한치는 1kN으로 하

표 3. 시험체 하중 재하조건

시험체 기호	시험체 높이 H(mm)	SPAN L(mm)	재하조건
			동적하중 Pa(kN)
DECK 1	150	3000	0.25 x Pa
DECK 2	150	3000	1.0 x Pa

注 1.DECK 1의 하중범위 : 최저 1kN, 최대 4kN
 2.DECK 2의 하중범위 : 최저 1kN, 최대 16kN
 3.가력회수: 960,000회 (4Hz 속도로 67시간 가력)

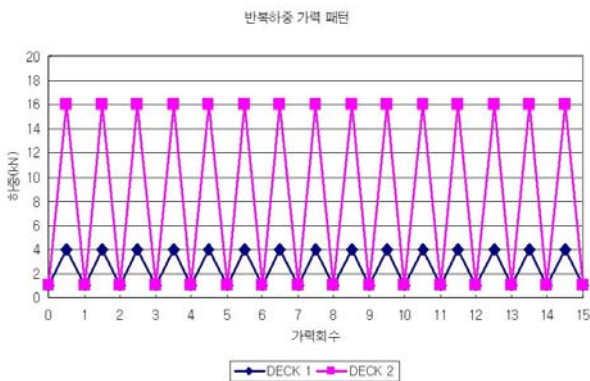


그림 3. 반복하중 가력 패턴

고 상한값은 각 시험체에 대해 슬래브의 장기허용하중 (Pa=16kN)에 대한 배율을 설정해서 4kN, 16kN으로 하였다.

집중하중의 형태로 실험을 하여야하므로 설정한 하중 조건에 의하여 발생하는 모멘트의 크기와 재하 시 발생 모멘트가 동일하도록 반복하중의 최대값을 설정하였다. 동적하중 재하 시 하중 조건은 Pa=16kN인 경우 주차장 슬래브의 최대적재하중 값인 16.0kN/m²와 고정하중 1.5 kN/m²을 고려하였으며 0.25Pa=4kN은 사무실 적재하중 값인 2.5kN/m²과 고정하중 2.0kN/m²을 고려한 수치이다. 최저값인 1kN은 반복하중 재하 시에 바닥판에 충격

이 발생하지 않도록 적용한 것이며 제어유니트가 조절할 수 있는 최소 범위이다.

반복하중의 가력 회수는 96만회이며 건물의 사용기간 중에 받을 것으로 예상되어는 회수로서 설정을 하였다. 1 시간에 24회, 1일 8시간, 년 200일의 25년간 하중반복이 발생하는 것으로 가정해서 96만회로 설정하였다.

그림 3은 반복하중의 가력 패턴을 도식화 한 것이다. 재하조건에 따라 최저 1kN에서 최대 4kN와 16kN으로 설정하였으며 표 3과 그림 3에서와 같이 2가지 하중 재하조건을 나타내고 있다.

2.3 시험체 세팅

그림 4는 시험체 제작을 위하여 거푸집을 설치한 데크 플레이트를 보여주고 있다. 콘크리트 타설 전의 시험체의 사진이며, 타설 과정에 의한 처짐과 양생 과정 중의 처짐을 방지하기 위하여 콘크리트 타설은 바닥에 면하도록 하여 타설과 양생을 실시하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 정확한 시험체의 제작을 위하여 1.5mm 철판을 용접하여 거푸집으로 적용하였다. 또한, 동일한 시험체에 대하여 하중 패턴의 변화에 따라 결과를 비교하는 것이 목적이므로 최대한 동일한 크기와 콘크리트 강도를 나타내도록 제작을 하였다.

그림 5는 가력 장치를 제어하고 데이터를 수집하기 위한 장치이며 가력 패턴을 프로그램에 입력하여 하중제어로서 실험을 수행하였다.

그림 6은 반복하중 재하를 위한 실험장치를 나타낸 도면이다. 반복하중의 가력방법은 그림7과 같이 가력프레임에 장착한 300kN의 액츄에이터를 이용하여 가압관을 통해 시험체 중앙에 반복하중을 가한다. 이 실험에 적용한 액츄에이터와 가압관은 회전이 가능하도록 세팅을 하였다.

실험은 하중제어로 진행되었으며 피로하중 실험을 위한 장비가 아니므로 가력 장비의 오일 온도 상승에 의한 약간의 부하가 발생하였으며 실제 실험 시에는 가압관과 가력장비와의 핀 접촉에서의 간격으로 인하여 시스템에 오류가 발생하기도 하였다. 약 10만회의 하중 재하 후에



그림 4. 트러스형 데크플레이트



그림 5. 액추에이터 제어 벤치

장비를 점검하고 데이터를 수집한 후 장비의 온도가 정상범위로 안정되도록 하였다.

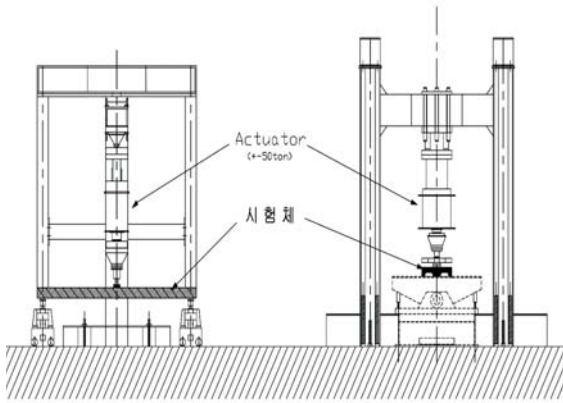


그림 6. 반복하중 실험장치

그림 8은 가력면 하부에 위치한 변위계의 설치장면이다. 일반적인 철근 콘크리트 보의 피로하중 실험에서와 같이 변형을 측정하고자 하였으나 합성슬래브인 경우에는 아연도 강판과 콘크리트의 박리현상에 의하여 명확한 변형률 결과를 확보할 수 없었다. 따라서 본 실험에서는 하중의 반복회수에 따른 수직 변위의 추이에 대하여 결과를 분석하였다.

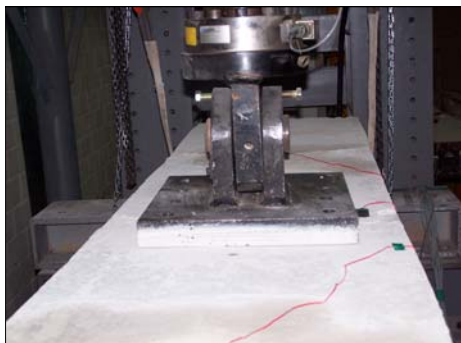


그림 7. 액추에이터 가력면



그림 8. LVDT 설치

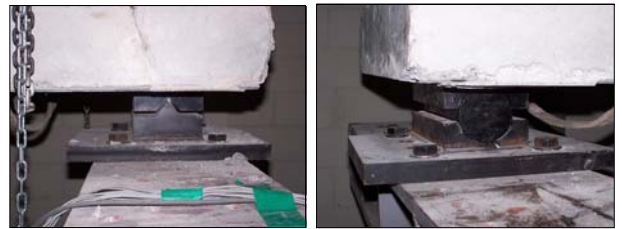


그림 9. Pin 지지점

그림 10. Roller 지지



그림 11. 시험체 세팅

그림 9와 그림 10은 합성슬래브의 단부 지지 조건을 보여주는 그림이다. 그림 9는 Pin 지지, 그림 10은 Roller 지지로서, 1경간 단순지지의 형태로 반복하중 실험을 수행하였다.

그림 11은 실험에 앞서 최종 세팅을 보여주는 사진이다. 액추에이터가 하중제어로 프로그램에 적용되어 있으므로 장시간 반복하중을 가력할 시에 오류가 발생할 가능성을 고려하여 양단 지지부 주변에 체인 블록을 설치하였다. 또한, 유압 케이블에 반복적인 진동이 발생하므로 부분적으로 케이블을 고정하여 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 반복하중에 의한 각 시험체의 변위

단면성능 계산에 따른 탄성 처짐의 계산 결과 Deck 1의 최대 하중($P_a=4\text{kN}$) 적용 시에 0.11cm 로 나타났으며

Deck 2 시험체의 경우에는 0.45cm의 처짐을 예측할 수 있었다.

트러스형 합성 슬래브에 대하여 96만회의 반복가력 실험을 수행하였다. 그림12~13은 트러스형 데크플레이트를 이용한 시험체의 하중재하 시에 있어 동적 재하에 의한 스패ن 중앙의 수직 변위의 추이를 나타낸다.

2가지 하중 조건에 대하여 실험을 수행한 결과 중앙부 수직변위의 재하회수에 따른 증가 형태는 유사한 것으로 나타났다. 양 시험체 모두 반복하중의 초기 단계에서 잔류변위가 발생하여 2만회정도까지 급격히 변위가 증가하였다. 그 이후는 반복회수의 증가에 따른 변위의 증가는 완만한 기울기를 나타내었다. 또한, 반복하중이 클수록 초기의 잔류변위의 변화량이 급격하게 변하지만, 10만회 이후로는 유사한 경향을 나타내었다.

최종 변위는 DECK 1의 경우 1.511cm로 나타났으며 DECK 2의 경우 2.089cm로 측정되었다. Deck 1의 경우 초기 17000회 정도에서 0.77cm 변위를 나타내었으며 이후 급격한 강성 저하를 나타내었다. DECK 2의 경우에는 15000회 가력 후 1.05cm의 변위를 나타내었으며 변위측정기의 슬립 현상이 관찰되었다. 그림14는 하중 재하의 크기에 따른 cycle-disp.그래프를 비교한 것이다. 그래프의 기울기가 거의 유사한 거동을 보이고 있으므로 두 시험체의 중앙부 변위의 변화는 하중의 크기에 대하여 독립적으로 발생하는 것으로 볼 수 있다.

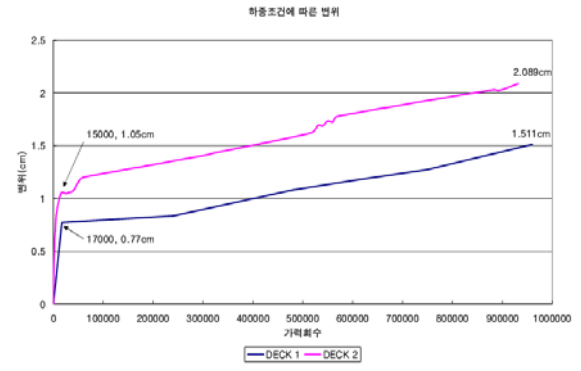


그림 14. 하중 조건에 따른 cycle-disp.비교

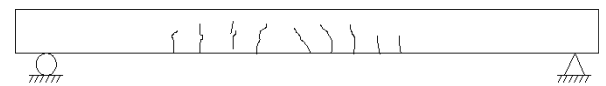
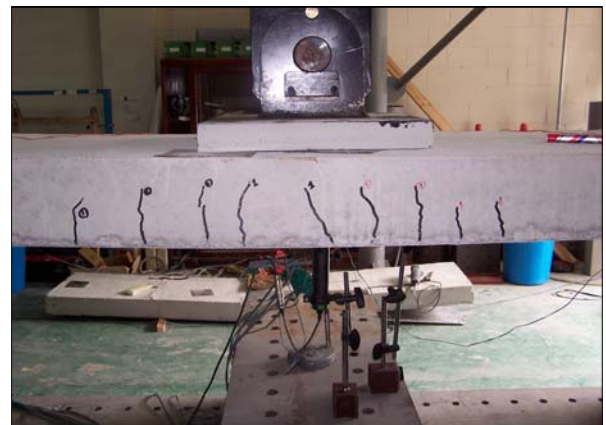


그림 15. DECK 1의 측면 균열 상황

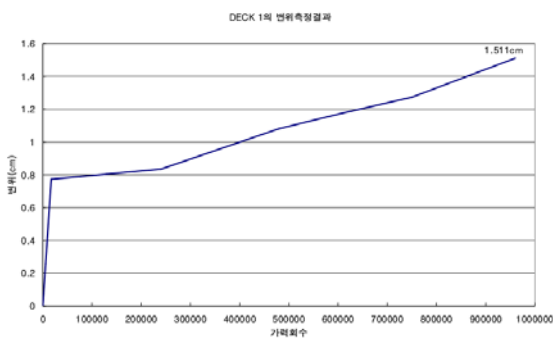


그림 12. DECK 1의 변위 추이

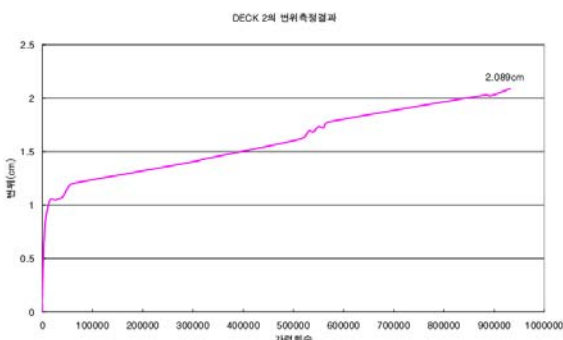


그림 13. DECK 2의 변위 추이

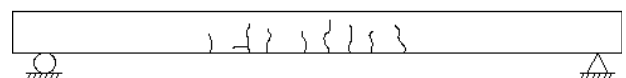
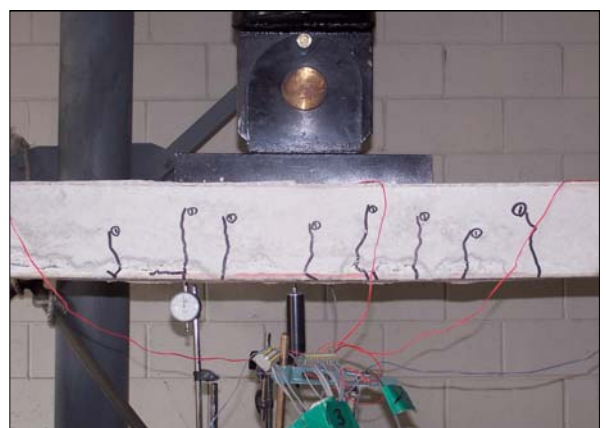


그림 16. DECK 2의 측면 균열 상황

3.2 시험체 균열상황

본 연구에서는 하중의 크기를 일정한 것으로 가정하여 반복회수에 따른 변위와 균열의 진행을 관찰하고 분석하였다. 단조 반복하중을 가력한 경우이므로 균열의 진행이 서서히 발생하였으나 실제 작용하는 반복하중의 크기는 구조물의 사용목적에 따라 변동폭이 크며 따라서 점진적인 균열의 진행이 발생하지는 않는다.

그림 15~16에 반복재하 96만회 종료 후의 시험체 균열 상황을 나타냈다. 두 시험체 모두 초기의 반복재하에 의해 시험체 측면의 스펀중앙부에 균열이 발생하였고, 반복하중 회수의 증가와 함께 스펀방향으로 진전하였다.

반복하중이 클수록 균열의 진전은 현저하였지만, 10만회 이후의 진전은 적은 것으로 나타났다. 10만회 이후의 완만한 균열 진행은 콘크리트 단면의 피로에 의한 손상이 발생한 이후에 하부 철선과 아연도 강판의 지지에 의하여 균열제어 작용이 지속적으로 작용하고 있기 때문이라고 판단된다. 콘크리트의 균열현상이 발생한 후부터 수직 변위의 크기와 균열의 진행 양상은 합성 데크플레이트의 인장재의 거동에 의하여 지배된다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 트러스형 합성 데크슬래브의 사용반복하중에 의한 휨거동에 대한 손상을 분석하기 위하여 실험적으로 연구를 수행하였다. 시편 중앙부의 수직 변위와 균열 진행을 측정하여 거동을 분석하였다. 주차장과 사무실에 대하여 설계사용하중 조합의 하중 크기를 반복하중의 최대값으로 설정하였다. 하중재하기간은 건축물의 일반적인 사용 주기인 25년으로 설정하고 96만회의 재하실험을 수행하였으며 실험결과는 다음과 같다.

1) 반복하중의 크기에 따라 최종 수직 변위가 증가하였으나 재하회수-변위 그래프는 유사한 기울기를 보였다. 하중의 크기에 관계없이 2만회 이전의 초기 반복재하 구간에서는 변위가 급격히 상승하였지만, 이후의 반복재하에 의한 변위 증가는 유사한 양상을 나타내었다. 콘크리트의 피로하중에 의한 단면손실이 작용 하중의 크기와 관계없이 양 시편에서 유사한 반복회수에서 발생하며 데크 플레이트의 인장재에 의하여 전체 거동이 지배되는 것으로 분석된다.

2) 반복하중이 클수록 균열의 진전은 현저하였지만, 10만회 이후의 진전은 적은 것으로 나타났다. 10만회 이후의 완만한 균열 진행은 콘크리트 단면의 피로에 의한 손상이 발생한 이후에 하부 철선과 아연도 강판의 지지에 의하여 균열제어 작용이 지속적으로 작용하고 있기 때문이라고 판단된다.

3) 본 연구에서 실험한 결과에 의하면 초기 반복하중 회수에서 콘크리트의 단면 손실이 발생한 이후부터는 인장재의 거동이 처짐의 크기를 지배하며 균열의 진행을 제어하고 있는 것으로 볼 수 있다. 처짐의 크기가 사용성에 문제를 발생하는 수준은 아니지만 초기 설계 시의 강성 구현을 하지 못하는 것으로 나타나므로 구조물 전체의 안정성 확보를 위하여 정확한 평가가 이루어져야 할 것이다.

데크 플레이트가 적용된 합성 슬래브는 하부에서 균열의 양상을 관찰할 수 없으므로 정확한 구조물의 안전 평가를 시행할 수 있도록 추가적인 실험과 해석이 수행되어야 할 것이다. 또한, 반복하중에 대하여 장기 처짐과 탄성처짐이 동시에 고려된 안전성 및 사용성 평가 기준을 마련하여야 할 것이다.

감사의글

본 연구는 [2단계 BK21사업]의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, 제일 TRUSS DECK 구조설계편람, 2001.11.
2. 대한건축학회, 합성데크 바닥구조 설계기준(안) 및 해설, 1998. 5.
3. 대한건축학회, 합성데크 바닥구조 시공지침서, 1998. 5.
4. 日本建築學會, 各種合成構造設計指針同解説, 1985.
5. D. L. Mullett, Composite Floor Systems, The Steel Construction Institute, 1998.
6. 한국건설기술연구원, 데크플레이트를 이용한 합성바닥판의 구조성능 평가 연구, 2000. 1.
7. 윤명호, 최중수, 엄철환, 김동규, 신형상 데크플레이트를 사용한 합성슬래브의 구조성능에 관한 연구, 大韓建築學會 論文集, 2000. 1.
8. 엄철환, 윤명호, 합성슬래브용 신형상 데크플레이트의 전단부착강도에 관한 실험적 연구, 韓國鋼構造學會 論文集, 1999. 12.
9. 김희철, 김우영, 엄철환, 변수에 따른 합성데크플레이트 슬래브의 고유진동수 변화, 韓國鋼構造學會 論文集, 1999. 10.
10. 김희철, 김우영, 엄철환, 합성데크 플레이트 슬래브의 지지조건 및 크기변화에 따른 고유진동수의 측정 및 해석, 韓國鋼構造學會 論文集, 1999. 10.
11. 김동석, 지구현, 엄철환, 윤명호, 김동규, 신형상 데크플레이트를 이용한 합성슬래브의 전단부착강도에 대한 실험적 연구, 大韓建築學會 論文集, 1999. 6.
12. 김창우, 최성모, 엄철환, 강도안, 최완철, 문태섭, 김규석, 김덕재, 김동규, 신형상의 데크플레이트를 이용한 합성슬래브의 구조적거동에 관한 연구, 大韓建築學會 論文集, 1997. 4.
13. 권용근, 강도안, 최성모, 엄철환, 최완철, 문태섭, 김규석, 김덕재, 김동규, 일반거푸집용 데크플레이트를 이용한 합성슬래브의 구조적 거동에 관한 연구, 韓國鋼構造學會 論文集, 1996. 9.