

윤하중 실험기를 이용한 프리캐스트 바닥판의 이동질량실험

An Application of Wheel-Tracking-Machine on Moving Mass Test of Precast Concrete Decks

성 익 현[†]
Sung, Ikhyun

Abstract In this paper, an experimental study is performed in order to determine the effects of interaction between vehicle and structure. For this purpose a wheel tracking machine and an adequate precast concrete deck single span bridge are designed. Results presented in the paper show that interaction between vehicle and structure produce additional effects on dynamic behavior of structure including reversal and contrary behavior.

Keywords Moving Mass, Vehicle, Bridge, Interaction, Wheel Tracking Machine

요 지 본 연구에서는 차량-교량 간 상호작용효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차량 교량 간 상호작용이 포함된 이동 질량 형 윤하중 시험기를 조립식 프리캐스트 패널형식의 단순교량에 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 실험분석 결과 차량-교량 간 상호작용은 교량의 동적거동에 예측 가능한 거동뿐 아니라 상반거동 및 반전현상 등의 추가적인 다양한 거동을 발생시킴을 알 수 있었다.

핵 심 어 이동질량, 차량, 교량, 상호작용, 윤하중 실험기

† 교신저자 : 정회원, 한서대학교, 토목공학과, 교수
E-mail : iksung@hanseo.ac.kr
TEL : (041)660-1050

1. 서론

차량과 교량의 상호작용을 발생시키는 교량 상 차량주행은 교량, 차량 각각에 복잡한 반응을 일으킨다. 이동하중인 차량하중에 의한 교량의 동적 응답은 동일한 규모의 정적하중 재하에 의한 응답을 초과하며 (Fryba, 1972; 김규춘, 1994; Yang et al., 1995), 차량-교량간의 상호작용에 의해 상반 응력(reversal stress), 반응의 반전거동 등을 발생시켜 교량의 피로수명에 영향을 미친다.(김규춘, 1994) 이에 따라 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향에 대해 해석적인 방법과 실험적 방법을 통한 다양한 연구가 진행되어왔다. 해석적인 방법은 첫 번째, 교량길이별 충격계수를 사용하는 방법, 두 번째, 범용해석프로그램의 이동하중입선을 이용한 해석방법, 그리고 세 번째, 차량하중의 이동시 발생하는 다양한 변수들을 고려 할 수 있는 이동질량이론을 적용한 엄밀 해석 방법 등을 들 수 있다 (Fryba, 1972; 김규춘, 1994; Yang et al., 1995). 충격계수나 범용해석프로그램을 이용하는 방법은 계산과정이 비교적 간단하므로 차량 주행의 대체적인 영향을 규명할 수 있다. 그러나 이 방법들은 차량-교량 상호작용을 제한적으로 고려하기 때문에 차량주행의 영향에 대한 대체적인 경향 파악에 주로 이용된다. 이동질량 이론을 적용한 해석방법은 차량-교량 상호작용을 비교적 정확히 파악할 수 있으나, 각각의 해석조건별로 독립적인 해석모델이 필요하여 사용상 제한이 따른다. 또한 해석모델 수립 후 실측결과를 이용하여 검증해야 하므로 검증 시 규모 및 장소 등의 제한이 존재하고, 실측자료가 부족한 경우는 검증에 어려움이 있다. 실험적 방법으로는 차량주행실험 및 상시진동실험 등이 있다. 차량주행실험은 실험조건을 자유로운 변경이 가능하고, 결과에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요인을 고려할 수 있어 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 비교적 정확히 파악할 수 있다. 그러나 장소의 선정 및 수반되는 교통통제 등의 제한 요인이 존재한다. 상시진동실험은 반대로 차량의 정확한 조건 선정이 어렵다. 본 연구에서는 차량-교량 간 상호작용효과가 교량의 동적 거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 조립식 프리캐스트 콘크리트 패널 바닥판형식의 2주형 단순교에 차량-교량 상호작용 재현이 가능한 이동질량형 윤하중 실험기(대우건설 등, 2005; 김종현 등, 2007)를 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 최근 해외에서 사용실적이 증가하고 있는 조립식 프리캐스트 콘크리트 패널 형식 (Matsui, 1997; Issa et al., 1998; Fatmir, 2002)의 소수주형 교량은 현장작업의 단순화로 인한 시공성 향상과 공기단축, 시공 후 미관의 우수성 등 많은 장점을 가지고 있다. 국내에서도 서해대교의 상판에 프리캐스트 형식의 바닥판이 시공된 바 있으며, 다양한 연구가 수행되고 있다. (김윤철 등, 2003; 한국도로공사, 1997)

2. 윤하중 실험기를 이용한 이동질량 반복주행실험

연구에 사용된 실험시편이 Fig. 1 과 Fig. 2에 나타나 있다. 시편은 2주형 단순교 형식으로 상판은 각각 $1.2\text{m} \times 2\text{m} \times 0.18\text{m}$ 의 프리캐스트 바닥판 패널 3장을 연결하여 구성되었다. 연결부의 형식은 무수축 모르타르를 이용하는 F2F (Female to Female) 형식이었다. 주형에는 스테드 볼트를 체결하여 주형과 바닥판을 일체화 하도록 하였다. 주형은 $0.2\text{m} \times 0.2\text{m}$ 규격의 H-beam을 사용하였으며 상판과는 M16규격의 스테드 볼트를 이용하여 일체화 하였다. 시편의 제원은 첫 번째, 시편의 제작 시 크기 및 물성의 상사에 의한 오차 발생가능성을 억제하여 정밀성을 확보하고, 두 번째, 시편 자체의 중량과 실험차량의 반복주행으로 발생 가능한 위험을 최소화하여 실험안전을 확보하기 위하여 실제 시공이 가능한 최소규모를 면밀히 분석하여 적절한 제원으로 선정, 제작되었다. 실험은 Fig. 3과 같은 실험차량의 축중검증실험과 이동질량 반복주행실험으로 구분하여 수행되었다. 실험차량 축중검증실험은 실험차량의 정적 하중을 검증하기 위하여 실험차량 단독으로 수행되었다. 실험차량은 전륜부와 후륜부의 재하하중이 상이하므로 먼저 일정한 하중을 적재 후에 각 축하중을 측정하여 재하하중의 정확성을 검증하였다. 이동질량 반복주행실험은 실험 시편의 교축방향으로 재하차량을 반복 주행하여 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 이동질량의 반복주행으로 인한 동적거동과 정적거동의 비교를 위하여 반복주행 초기인 반복횟수 300회와 각 5,000회 반복 시마다 동일한 실험차량을 이용한 정적재하실험을 수행 하였다. 반복재하의 횟수는 현재 이동질량 반복주행실험에 대한 명확한 규정이 존재하지 않으므로 경부고속국도 상, 하행 평일 및 주말 일일평균교통량인 25,000회를 기준으로 하였다. (한국도로공사, 1997)

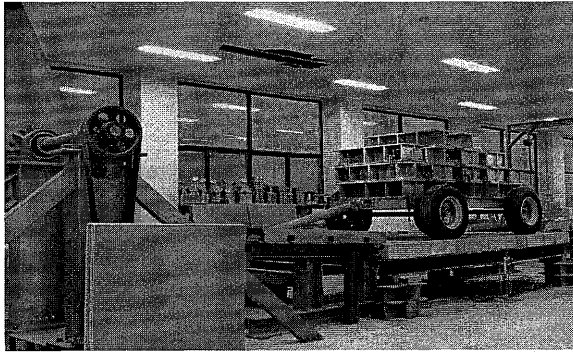


Fig. 1. 이동질량형 윤하중 실험기

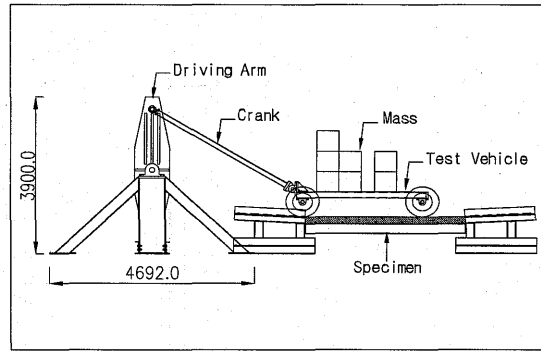


Fig. 2. 이동질량형 윤하중 실험기 단면도

이동질량반복주행실험은 기존의 크랭크식 윤하중 실험기를 개량한 이동질량형 윤하중 실험기를 이용하여 수행되었다. 이동질량하중인 주행차량은 하중중심축을 기준으로 상하, 좌우방향 흔들림이 발생한다. 이러한 흔들림은 타이어를 통하여 이동하중의 형태로 대상구조물에 전달되고 이에 의한 대상구조물의 동적 거동이 차량의 타이어를 통하여 다시 차량으로 전달되는 과정의 반복을 통해서 복잡한 거동이 발생한다. 이동질량에 의한 반응은 정적반응 혹은 하중자체의 흔들림이 무시된 이동하중에 의한 반응을 초과하는 경우가 나타난다. (Fryba, 1972; 김규춘, 1994; Yang et al., 1995) 이러한 동적거동은 차량 및 교량의 동적거동 각각이 커플링(coupling) 된 상태로 발생한다. 본 연구에서는 차량주행 시 발생하는 상호작용 효과를 나타낼 수 있는 이동질량형 윤하중 실험기를 이용하여 실험을 수행하였다. Fig. 1과 Fig. 2에 사용된 윤하중 실험기가 나타나 있다. 이동질량형 윤하중 실험기는 구동arm부와 재하차량 부, 시편거치부등으로 구성되어 있다. 구동arm의 회전운동은 크랭크를 통하여 실험차량의 병진운동으로 변환된다. 하중의 이동질량 효과는 주행 중 재하차량 및 대상 시편의 연직방향 자유도가 보장되어야 재현이 가능하다. 이를 위하여 구동arm과 크랭크 및 재하차량간의 연결부는 각각 1개의 universal joint만을 이용하였다. Fig. 3에 연구에 사용된 실험차량의 형태가 나타나 있다. 실험차량은 실제 사용되는 타이어를 장착한 4륜 차량 형태로서 독립적으로 구성되어 있다. 차량 상부에 하중 적재가 가능하도록 하여 실험 조건에 따라 재하 하중 및 하중위치의 변경이 가능한 형태이다. 또한 축거, 윤거, 차량하부 조건 등 차량의 조건이 변화하는 경우에도 손쉽게 적응이 가능하도록 구성되어 있다.

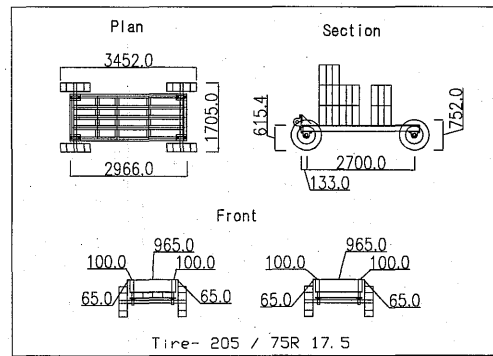


Fig. 3. 실험차량제원

3. 이동질량 주행시험 결과

3.1 축중검증시험

실험차량의 하중재하는 하중블록을 조합하므로 하중블록 설치 시 정확한 하중의 재하여부를 파악하여야 한다. 이를 위하여 실험차량의 축중검증실험을 수행하였다. Fig. 5와 Table 1에 실험차량의 축중검증실험 결과가 나타나 있다. 축중검증실험은 다음 단계로 수행되었다. 먼저 실험차량상부에 전,후륜 타이어 각각에 1.0tonf의 축중이 재하 되도록 목표재하하중을 선정하여 하중블록을 조합 후 설치하였다. 두 번째로 정확한 축중을 측정하기 위하여 Fig. 4에서와 같이 소형 로드셀 6기를 조합하여 제작된 축중 측정장치를 목표재하하중이 설치된 실험차량의 전륜 및 후륜 하부에 각각에 설치하였다. 끝으로 축중 측정장치내의 6기의 로드셀에 작용하는 각각의 접지압을 측정한 후 각 측정 결과의 합을 합산하여 전륜 및 후륜의 총 축중을 파악하고 이를 목표재하하중과 비교하여 축중을 검증하였다. 축중 측정장치내 각 로드셀의 번호는 타이어의 외측에서 내측으로 부여되었으며 총 15cm의 접지압 분포를 나타내며 Fig. 5에 접지압 분포가 나타나 있다. 타이어의 접지압은 외측보다 타이어의 중심에 가까운 중앙부

로드셀(전륜의 경우 4번 로드셀, 후륜의 경우 5번 로드셀)에서 최대치를 나타냄을 알 수 있었으며 Table 1의 비교와 같이 목표재하하중에 근접한 정확한 재하가 가능함을 알 수 있었다.

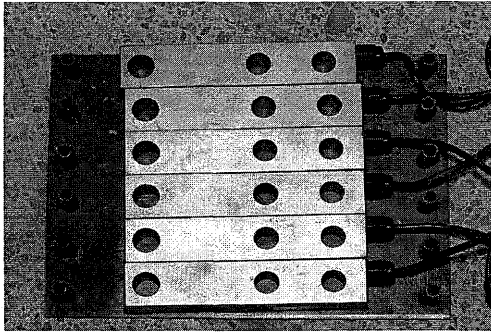


Fig. 4. 축하중 검증용 로드셀

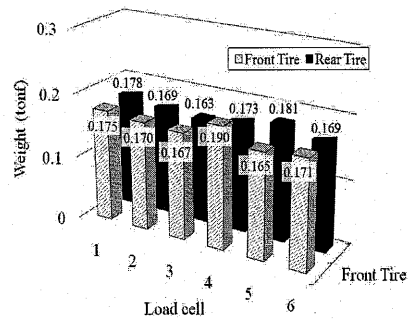


Fig. 5. 축하중 검증실험결과

Table 1. 축중 검증실험 결과 (단위 : tonf)

구분	1	2	3	4	5	6	합계	목표재하하중	오차 (%)
전륜	0.175	0.168	0.166	0.189	0.165	0.171	1.034	1.000	3.4
후륜	0.178	0.169	0.163	0.173	0.181	0.169	1.033	1.000	3.3

3.2 반응의 상반거동 및 반전거동

Fig. 6과 Fig. 7은 차량-교량 간 상호작용이 포함된 윤하중 재하실험에 의한 동적거동의 반전거동 및 상반거동이다. Fig.의 패널 1, 2, 3은 각각 시점부패널, 중앙부패널, 종점부패널을 나타낸다. 방향은 0을 기준으로 연직 하(下)방향가속도를 (-)의 부호로 표현하였다. Fig. 6에서는 약 1초인 [A]에서 외측패널과 내측패널의 상반거동 발생 후 약 4.5초인 [B]에서 중앙부 패널 2의 반응이 [A]의 0.01g에서부터 [B]의 0.194g로 급증하며, 약 7.5초인 [C]에서 각 패널 모두 하중의 재하방향인 연직하(下)방향과 반대되는 연직 상(上)방향 거동이 나타났다. Fig. 7에서는 약 1.5초인 [A]에서 패널 2의 상방향 움직임이 나타나며 5초인 [B]에서부터 5.5초인 [C]까지 각 패널의 가속도의 급격한 반전현상이 나타나 있다.

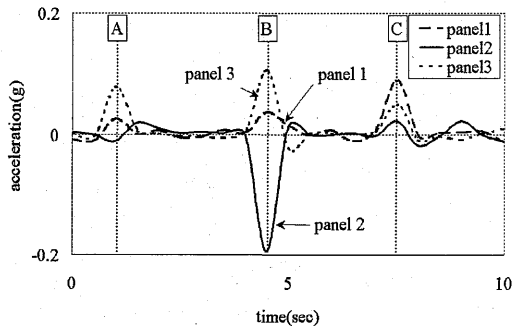


Fig. 6. 상반거동
(시편의 연직 가속도)

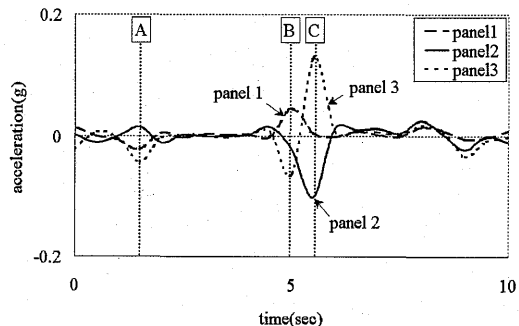


Fig. 7. 반전거동
(시편의 연직가속도)

이러한 가속도의 반전 및 상반현상은 대상시편뿐 아니라 재하하중인 차량에서도 자유로운 연직방향의 움직임이 발생함을 보여준다. 이와 같은 상반현상 및 반전현상은 처짐 및 변형률을 포함한 모든 반응에서 발생하며 차량-교량 상호작용에 의한 대표적인 현상으로서 단순교 형식 교량에서도 발생이 가능한 것으로 알려져 있다 (Fryba, 1972; 김규춘, 1995; 김종현 등, 2007).

3.3 연결부 변형률 특성

Fig. 8과 Fig. 9는 이동질량 반복주행실험 시 패널 연결부의 변형률을 나타낸다. 인장변형률을 (+)의 부호로 표현하였다. 패널 간의 연결부는 F2F 형식으로서 400kg/cm² 강도의 무수축 모르타르를 이용하여 연결하였다. 연결부의 인장변형률은 반복재하초기 62με에서 25,000회 재하 시 70με으로 증가하며 압축변형률은 -37με에서 25,000회 반복재하 시 -41με으로 증가한다. Table 2에 패널연결부 인장변형률에 대한 압축변형률의 비율이 나타나있다. 패널연결부 압축변형률은 인장변형률의 최대 58.6%에 해당하며 반복주행횟수가 증가함에 따라 이 비율도 증가하는 추세를 나타낸다. 이러한 인장변형과 압축변형의 발생은 시편이 교축방향으로 자유로운 움직임이 발생함을 보여주고 있다.

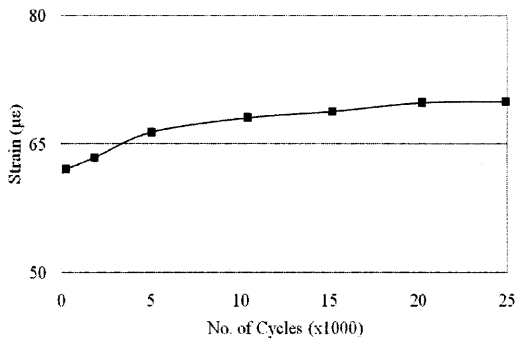


Fig. 8. 연결부 변형률(1)
(인장 변형률)

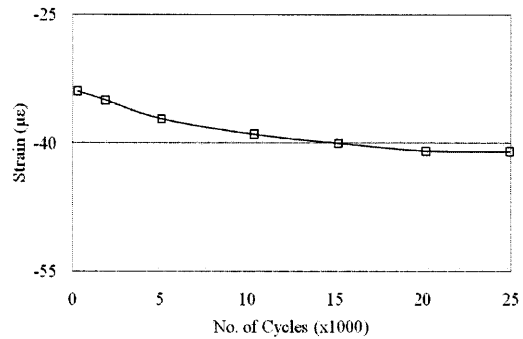


Fig. 9. 연결부 변형률(2)
(압축 변형률)

Table 2. 패널연결부 인장변형률과 압축변형률의 비율(%)

No. of Cycles	300	2000	5000	10000	15000	20000	25000
Ratio	54.8	55.2	56.1	57.3	58.2	58.6	58.6

3.4 동적 증폭 계수

Fig. 10은 이동질량 반복주행실험과 정적상태에서의 패널 중앙부 연직처짐을 비교한 결과이다. Fig.의 (S)는 정적처짐을 나타내며 (W)는 이동질량 반복주행실험을 나타낸다. 정적처짐은 반복주행실험 초기인 300회와 반복주행실험 중 각 5,000회 반복시마다 실험차량을 정지시킨 후 측정된 것이다. 반복횟수의 증가에 따라 정적처짐의 증가에 비해 이동질량 반복주행실험시의 처짐의 증가가 커짐을 알 수 있으며, 반복주행횟수가 5,000회를 넘어서면서 그 차이가 더 커짐을 알 수 있다. Fig. 11에 동적증폭계수가 나타나있다. 반복횟수 5,000회 미만에서는 이동질량반복주행시의 처짐이 정적처짐을 최대 5.8% 상회하였으나, 5,000회를 지나면서 최대 11% 상회하며 25,000회 재하 후 최대 동적증폭계수는 패널 2에서 1.16을 나타내게 된다. 이러한 동적증폭계수는 충격계수로 사용하는 1.30보다는 작은 값에 해당하나 추가적으로 연직 하방향 거동의 51.5%에서 58.2%에 이르는 연직상방향거동도 발생하므로 실제로 시편의 동적증폭계수는 Fig. 11에 나타난 결과를 초과함을 알 수 있다. 이에 따라 차량-교량 간 상호작용이 발생하는 실제 차량주행조건을 고려하여 교량의 동적거동을 규명하는 경우, 연직하방향의 거동뿐만 아니라 추가적으로 연직상방향의 거동을 고려하여야 할 것으로 판단된다.

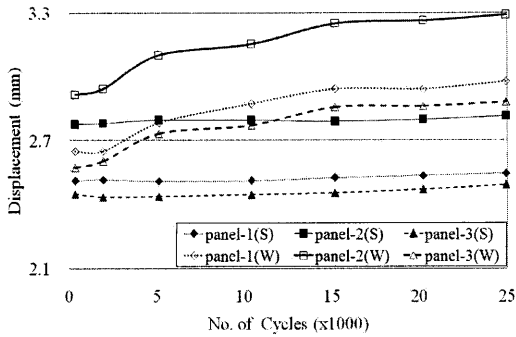


Fig. 10. 패널중앙부연직처짐
(정적처짐과 동적처짐 비교)

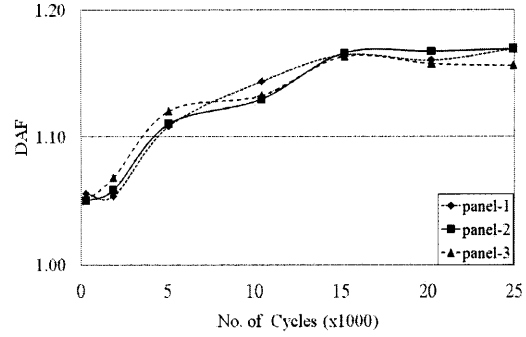


Fig. 11. 동적중폭계수
(처짐)

3.5 시험 바닥판 균열도

Fig. 12와 Fig. 13은 25,000회의 윤하중 반복 재하실험 이후 시편의 상, 하부의 균열도이다. 차량-교량 간 상호작용으로 인한 상반현상 및 반전현상으로 인하여 비교적 적은 반복 횟수에서 균열이 발생하며 또한 시편 하부의 균열뿐만 아니라 시편 상부에도 균열이 발생하였다. 시편 상부의 균열은 연직 상방향 반응이 연직 하방향 반응에 비해 최대 58.2%로서 시편하부에 비해 균열의 발생개소는 차이를 보이나, 전체적인 경향은 유사함을 알 수 있다. 균열의 폭은 평균 0.1mm 에서부터 최대처짐 발생부인 패널 2의 하부에서는 0.2mm 이상으로 나타났다. 패널1에서는 중앙부에서 양측 거더쪽 방향으로 휨균열이 있고 특히 지점 방향으로 외측에서 패널 안쪽으로 경사방향의 인장균열도 발생하였다. 또한 패널 중앙부 방향으로 휨의 방향을 따라 균열이 발생되어 있으며 패널1과 패널2간의 연결부 주위로 연결부의 무수축 모르타르강성과 패널강성의 차이로 인하여 다수의 균열들이 패널의 중앙부 쪽으로 나타났다. 패널2(중앙부 패널)에는 패널1과 패널3간에 양쪽으로 무수축 모르타르로 이어진 전단연결부가 위치하고 또한 최대처짐부를 이루고 있어 균열의 형성이 매우 다양함을 볼 수 있다. 연결부를 중심으로 다수의 균열이 발생하였고, 패널 중앙부 방향의 인장균열이 발생되었다. 패널 2와 3간의 연결부 주위에도 패널 1과 패널2의 연결부와 마찬가지로 연결부의 무수축 모르타르의 강성과 패널의 강성 차에 의하여 다수의 균열이 발생하였다. 패널3의 경우 재하 하중이 패널1에 비해서 작기 때문에 패널 1, 패널2에 비해 균열의 발생이 적으며 주로 패널 중심부의 인장균열이 발생하였다. 시편 상부의 균열은 패널 1과 2의 경우 패널 중앙부를 중심으로 인장균열이 발생하였고, 패널 간 연결부를 중심으로 다수의 균열이 발생하였다. 패널3의 경우 상대적으로 적은개소의 인장균열이 패널 2의 방향으로 발생되었다. 또한 패널 2와 패널3의 연결부를 중심으로 다수의 균열이 발생함을 알 수 있었다.

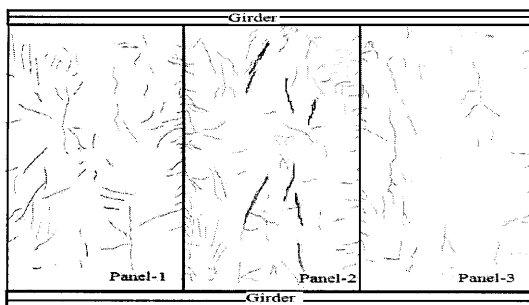


Fig. 12. 균열도(1)
(시편하부)

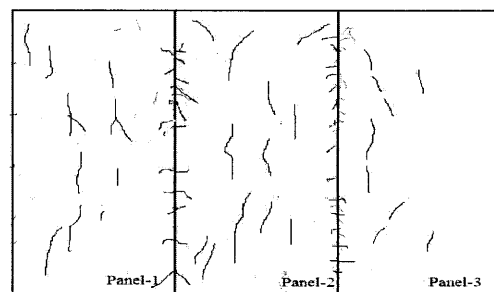


Fig. 13. 균열도(2)
(시편상부)

4. 결론

본 연구에서는 차량-교량간의 상호작용 효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 실험적 연구를 통하여 분석하였다. 실제 주행조건에 근사한 차량-교량간 상호작용이 포함된 이동질량형 윤하중 실험장치를 이용하여 프리캐스트 콘크리트 패널 상판의 단순교 형식의 교량에 적용하였다. 계측은 연직가속도, 연직처짐, 주철근 변형률 그리고 연결부 변형률에 대해 수행하였다. 이상의 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 차량-교량간의 상호작용은 단순교형식의 교량에서도 일반적으로 예측할수 있는 거동뿐 아니라 다양한 형태의 거동을 나타냄을 알 수 있었다.
- (2) 차량-교량간의 상호작용은 연직가속도, 연직처짐의 경우 단순교형식의 경우에도 재하방향과 일치하는 연직하(下)방향의 가속도 및 처짐뿐만 아니라 추가적인 연직상(上)방향 가속도 및 처짐이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 연직 상(上)방향의 가속도 및 처짐은 연직하방향 가속도 및 처짐의 58%를 상회하기도 하였다. 또한 주철근 변형률과 연결부 변형률의 경우 연직하방향 재하에 의해 예측 가능한 인장변형뿐만 아니라 추가적인 압축변형을 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 압축변형은 인장변형의 58%를 상회하기도 하였다. 따라서 차량-교량간 상호작용이 포함된 실 주행조건을 고려하는 교량의 성능 평가에는 이러한 연직 하(下)방향의 거동 및 인장변형 등에 추가적으로 발생 가능한 연직 상(上)방향 거동 및 압축거동을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.
- (3) 차량-교량간의 상호작용은 추가적인 연직상(上)방향 거동 및 압축거동으로 인하여 비교적 적은 반복재하횟수에서 균열을 발생시킬 수 있음을 알았다. 또한 단순교 형식의 교량에도 하부균열뿐 아니라 상부균열을 발생시킴을 알 수 있었다.
- (4) 본 연구에 사용된 이동질량형 윤하중 실험기를 이용한 실험적 방법은 기존의 다양한 연구방법들과 더불어 차량-교량간 상호작용의 규명에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 이를 통하여 좀더 현실에 가까운 조건에서 교량의 동적피로성능 규명 등과 보다 더 정확한 차량-교량상호작용 이론 연구 등에 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] Fatmir, M. (2002). Horizontal Shear Connectors for Precast Prestressed Bridge Deck Panels. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, USA.
- [2] Fryba, L. (1972). Vibration of Solids and Structures under Moving Loads. Noordhoff International Publishing.
- [3] Issa, M.A., Yousif, A.A., Kaspar, I.I., Khayyat, S.Y. (1998). "Analysis of full depth precast concrete bridge deck panels." PCI Journal, Vol.43, No.1, pp.74-85.
- [4] Matsui, S. (1997). "Technology development of bridge deck - Innovation, durability and construction." Journal of Bridge and Foundation Engineering, Vol.31, No.8, pp.84-94.
- [5] Yang, Y.B., Liao, S.S., Lin, B.H. (1995). "Impact formulas for vehicle moving over simple and continuous beams." Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.121, No.11, pp.1644-1650.
- [6] 김규춘 (1994). 차량통행 및 제동으로 인한 도로교의 동적거동 해석. 박사학위논문, 고려대학교.
- [7] 김윤철, 박종진 (2003). "루프조인트로 연결된 프리캐스트 바닥판의 윤하중 주행시험." 대한토목학회 논문집, Vol.23 No.5A, pp.807-814.
- [8] 김종현, 성익현, 김상철, 김승억 (2007). "윤하중 실험기를 이용한 이동질량 실험." 대한토목학회 논문집, Vol.27, No.6A, pp.789-795.
- [9] 대우건설, 세종대학교, 한국도로공사 (2005). 승용차 전용 조립식 고가도로 건설기술 개발. 건설교통부 건설기술 연구 개발보고서.
- [10] 한국도로공사 (1997). "강형교의 교통분석 및 발생응력의 모형화 연구." 한국도로공사 도로연구소 기술개발보고서.

- ▶ 논문접수일 : 2011년 07월 11일
- ▶ 심사의뢰일 : 2011년 07월 12일
- ▶ 심사완료일 : 2011년 07월 22일