

윤하중 시험기를 이용한 프리캐스트 바닥판의 동적성능시험

성익현^{1*}

¹한서대학교 토목공학과

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

Ik-Hyun Sung^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Hanseo University

요 약 본 연구에서는 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위한 교량-차량거동을 파악 하고자 실험적 연구를 수행하였다. 이를 위하여 차량 교량 간 상호작용이 포함된 이동질량 형 윤하중 시험기를 조립식 프리캐스트 패널형식의 단순교량에 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 실험분석 결과 차량-교량간 상호작용은 교량의 동적거동에 예측 가능한 거동뿐 아니라 상반거동 및 반전현상등의 추가적인 다양한 거동을 발생시킴을 알 수 있었다.

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.

Key Words : Moving mass, Vehicle, bridge, Interaction, Wheel tracking machine

1. 서론

우리가 일반적으로 알고 있는 차량의 이동하중이 교량 상판에 미치는 동적응답효과는 충격계수 등 간편한 추정식에 의하여 판단되어져 왔다. 그러나 이동하중인 차량하중에 의한 교량의 동적 응답은 동일한 규모의 정적하중재하에 의한 응답을 초과하며 [8], 차량-교량간의 상호작용에 의해 상반 응력(reversal stress), 반응의 반전거동 등을 발생시켜 교량의 피로수명에 영향을 미친다.[1] 이에 따라 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향에 대해 해석적인 방법과 실험적 방법을 통한 다양한 연구가 진행되어왔다. 해석적인 방법은 교량길이별 충격계수를 사용하는 방법, 범용해석프로그램의 이동하중읍선을 이용한 해석방법, 그리고 차량하중의 이동시 발생하는 다양한 변수들을 고려 할 수 있는 이동질량이론을 적용한 엄밀 해석 방법 등을 들 수 있다.[6,8] 충격계수나 범용해석프로그램을 이용하는 방법은 계산과정이 비교적 간단하므로 차량 주행의 대체적인 영향을 규명할

수 있다. 이동질량 이론을 적용한 해석방법은 차량-교량 상호작용을 비교적 정확히 파악할 수 있으나, 각각의 해석조건별로 독립적인 해석모델이 필요하여 사용상 제한이 따른다. 또한 해석모델 수립 후 실험결과를 이용하여 검증해야 하므로 검증 시 제한이 존재하고, 실험자료가 부족한 경우는 검증에 어려움이 있다. 차량주행실험은 실험조건이 자유로운 변경이 가능하고, 다양한 요인을 고려할 수 있어 차량-교량 간 상호작용이 교량의 동적거동에 미치는 영향을 비교적 정확히 파악할 수 있으나 장소의 선정 및 수반되는 교통통제 등의 제한 요인이 존재한다. 상시진동실험은 반대로 차량의 정확한 조건 선정이 어렵다. 따라서 본 연구에서는 교량바닥판과 차량 간 상호작용효과가 교량의 동적거동에 미치는 영향을 분석하기 위하여 조립식 프리캐스트 콘크리트 패널 바닥판형식의 2주형 단순교량에 차량-교량 상호작용 재현이 가능한 이동질량형식 윤하중 시험기[4,3]를 적용하여 이동질량 반복주행실험을 수행하였다. 최근 해외에서 사용실적이 증가하고 있는 조립식 프리캐스트 콘크리트 패널 형식

*교신저자 : 성익현 (iksung@hanseo.ac.kr)

접수일 09년 12월 23일

수정일 10년 01월 28일

게재확정일 10년 02월 24일

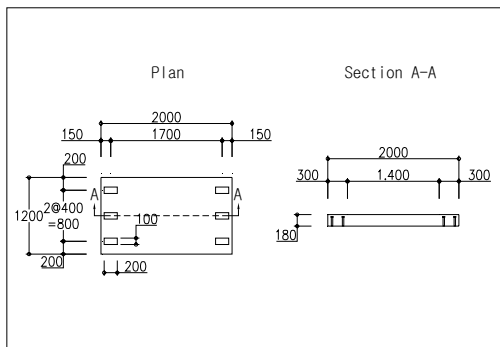
[2,4,5,7]의 소수주형 교량은 현장작업의 단순화로 인한 시공성 향상과 공기단축, 시공 후 미관의 우수성 등 많은 장점을 가지고 있다. 국내에서도 서해대교의 상판에 프리캐스트 형식의 바닥판이 시공된 바 있으며, 다양한 연구가 수행되고 있다.[2,4]

2. 차륜하중 시험기 반복주행실험

2.1 실험시편 및 실험방법



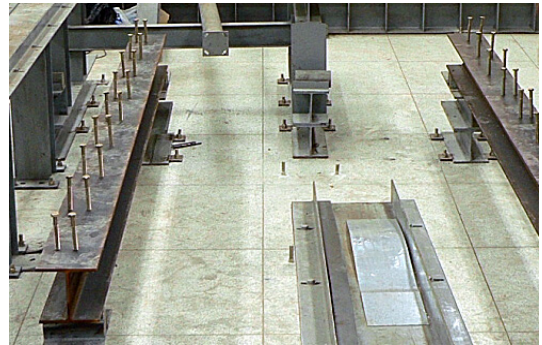
[그림 1] 거치된 프리캐스트패널 시편



[그림 2] 프리캐스트 시편규격



[그림 3] F2F형식의 패널 간 연결부

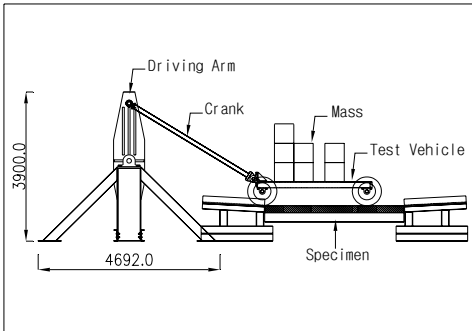


[그림 4] 상판합성을 위한 주형형상

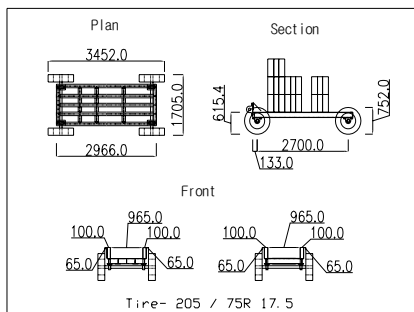
연구에 사용된 실험시편이 그림 1과 그림 2에 나타나 있다. 시편은 2주형 단순교량 형식으로 상판은 각각 1.2m×2m×0.18m 의 프리캐스트 바닥판 패널 3장을 연결하여 구성되었다. 연결부의 형식은 무 수축 모르타르를 이용하는 그림 3과 같은 F2F (Female to Female) 형식이였다. 프리캐스트 상판과 주형의 합성작용을 위하여 STUD 볼트를 그림 4와 같이 체결하였으며 상판과 주형 사이에 베딩 모르타르를 채워 교축방향 전단성능을 보강하였다. 주형은 0.2m×0.2m 규격의 H-beam을 사용하였으며 상판과는 M16규격의 스티드볼트를 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 전술한 제원으로 선정, 제작되었다. 실험과정에서는 실험차량의 축 하중을 검증하는 실험과 이동질량 반복주행실험으로 구분하여 수행되었다. 실험차량 축중 검증실험은 실험차량의 정적 하중을 검증하기 위하여 실험차량 단독으로 수행되었다. 실험차량은 전륜부와 후륜부의 재하하중이 상이하므로 먼저 일정한 하중을 적재 후에 각각의 축중을 측정하여 총 재하하중에 대한 축하중의 바퀴별 분포를 판단하였다. 또한 이동질량 반복주행 실험은 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 5000회 반복시마다 동일한 실험차량을 이용한 정적재하실험을 수행 하였다. 반복재하의 횟수는 현재 이동질량 반복주행실험에 대한 명확한 규정이 존재하지 않으므로 경부고속국도 상, 하행 평일 및 주말 일일평균교통량인 25000회를 기준으로 하였다.[5]

2.2 이동질량형식 윤택중 시험기

이동질량반복주행실험은 기존의 크랭크식 윤택중 시험기를 개량한 이동질량형식 윤택중 시험기를 이용하여 수행되었다. 이동질량형식인 주행차량은 하중중심축을 기준으로 상하, 좌우방향 흔들림이 발생한다. 이러한 흔들림은 타이어를 통하여 이동하중의 형태로 대상구조물에 전달되고 이에 의한 대상구조물의 동적거동이 차량의 타이어를 통하여 다시 차량으로 전달되는 과정의 반복을 통해서 복잡한 거동이 발생한다. 이러한 동적거동은 차량 및 교량의 동적거동 각각이 커플링(Coupling) 된 상태로 발생한다.



[그림 5] 이동질량형식 윤택중 시험기



[그림 6] 실험 시 재하차량제원

본 연구에서는 그림 5와 같은 구동Arm부와 재하차량부, 시편거치부등으로 구성된 시험기를 사용하였다. 이때 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. 그림 6에 실험에 사용된 재하차량의 제원을 표시하였으며, 실험차량은 실제 사용되는 타이어를 장착한 4륜 차량 형태로서 독립적으로 구성되어있다. 또한 축거, 윤거, 차량하부 조건 등 차량의 조건이 변화하는 경우에도 손쉽게 적용이 가능하도록 구성되어있다. 시편 거치부는 표 1의 조건에서와 같이 다양한 크기의 시편을 거치할 수 있도록 설계되었다. 그림 6은 본 연구에 사용된 실험차량의 제원이다. 실험차량은 표준차량[5]의 규격에 따라 하중 블록을 이용하여 전륜부에 총 하중의 65%, 후륜부에 총 하중의 35%가 재하 되었다. 표 1은 이동질량형식 윤택중 시험기의 사양 및 본 연구의 실험 조건이다.

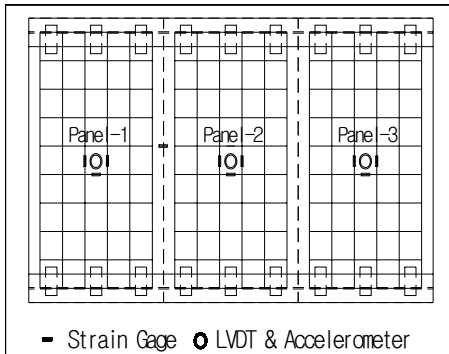
2.3 계측, 데이터 수집 및 분석 장치

표 2에 사용된 장치 사양을 표기하였다. 각 패널 중앙부의 처짐 및 가속도와 주 철근의 변형률과 연결부의 변형률을 측정하였으며 그림 7에 계측지점을 표시하였다. 처짐을 측정하기 위한 계측장치는 100mm 사양의 spring type LVDT를 사용하였으며 변형률의 측정은 5mm 규격의 steel type 스트레인 게이지가 사용되었다. 각 패널중앙부의 가속도는 5G 사양의 가속도계를 이용하였으며, 실험차량의 축중 검증용으로 9.8kN 규격의 로드셀 6기를 1개 세트로 사용하였다. 그림 8에 축 하중 측정 시 사용된 로드셀이 나타나있다. 정밀한 축중 측정을 위하여 타이어 접지 면을 따라 변화하는 타이어의 접지 압을 감안하여 1tonf 규격의 소형 로드셀 6기를 조합하여 사용하였다.

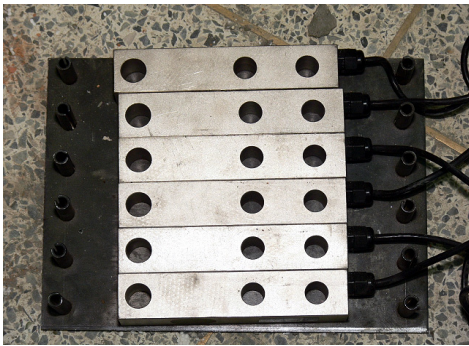
계측 데이터 수집 및 분석 장치로는 signal amplifier 기능과 데이터 수집기능을 겸하는 IO Systems사의 Data Shuttle Express(32ch사양)와 Kyowa사의 UCAM-60A를 제어프로그램을 이용하여 PC와 연결하여 사용하였다. 다수의 채널을 이용하기 때문에 정확한 연결을 위하여 전용 Terminal Block과 Signal Cable을 이용하였다. 윤택중 시험기에는 실험차량의 주행에 이용되는 대형모터가 부착되어있어 Noise 유발의 가능성이 있다. 따라서 안정된 미소전류 및 미소저항의 측정을 위하여 계측장치의 Circuit 상에서 접지점을 통일하였고, 교류전원 관련 잔류잡음의 저감을 위하여 Data Shuttle Express 및 UCAM-60A와 PC 각각의 전원부에 독립적이고 정밀한 AC Noise Filter를 적용하였다.

[표 1] 윤하중 실험장치의 사양 및 실험조건

항 목	사 양	실 험 조 건
차 량 주 행 거 리	3.4m (±1.7m)	3.4m (±1.7m)
구동ARM 회전속도	1.6 rpm ~ 31.2 rpm	7.8 rpm
시편크기(가로x세로)	최대 5.0m x 10.0m	2.0m x 3.6m
하 중 범 위	1.96kN - 245 kN	44.1kN
Tire 의 Rim 외경	최소 15"	17"



[그림 7] 계측지점



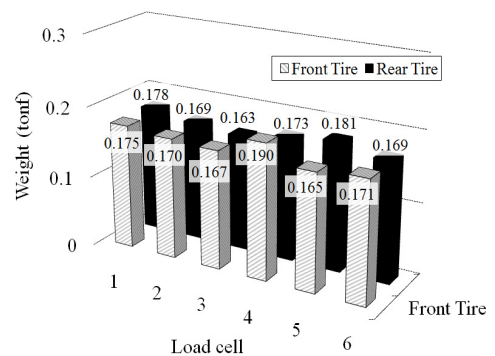
[그림 8] 축하중 검증용 로드셀

[표 2] 계측, 데이터 수집 및 분석장치

장 치	사 양	제 작 회 사
Strain Gage	5mm (steel type)	Kyowa
LVDT	100mm (spring type)	Kyowa
Accelerometer	5G	Kyowa
Load Cell	9.8kN	CAS
Data Shuttle Express	2 * 16ch	IO systems
UCAM-60A	16ch	Kyowa

3. 실험 결과

3.1 축중 검증실험



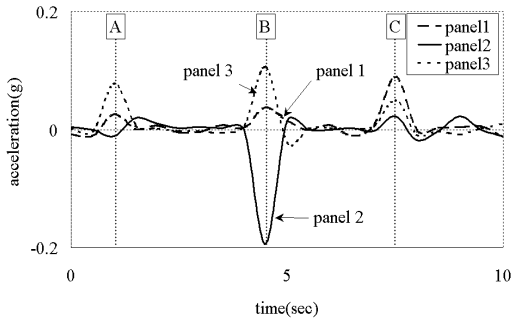
[그림 9] 축 하중 검증실험결과

실험차량의 블록 재하위치를 정하기 위해서는 정확한 하중의 재하여부를 파악하여야 한다. 이를 위하여 실험차량의 축중 검증실험을 수행하였다. 그림 9에서와 같이 타이어 횡 방향으로 하중분포가 일정하지 않음을 알 수 있다. 축중 검증실험은 다음 단계로 수행되었다. 먼저 실험차량상부에 전,후륜 타이어 각각에 9.8kN의 축중이 재하되도록 목표재하중을 선정하여 하중 블럭을 조합 후 설치하였다. 두 번째로 정확한 축중을 측정하기 위하여 그림 9에서와 같이 소형 로드셀 6기를 조합하여 제작된 축중 측정 장치를 목표재하중이 설치된 실험차량의 전륜 및 후륜 하부에 각각에 설치하였다. 끝으로 축중 측정 장치내의 6기의 로드셀에 작용하는 각각의 접지압을 측정한 후 각 측정 결과의 합을 합산하여 전륜 및 후륜의 총 축중을 파악하고 이를 목표재하중과 비교하여 축중을 검증하였다. 축중 측정장치 내 각 로드셀의 변호는 타이어의 외측에서 내측으로 부여되었으며 타이어의 접지압은 외측보다 타이어의 중심에 가까운 중앙부 로드셀(전륜의 경우 4번 로드셀, 후륜의 경우 5번 로드셀)에서 최대치를 나타냄을 알 수 있었으며 목표재하중에 근접한 정확한 재하가 가능함을 알 수 있었다.

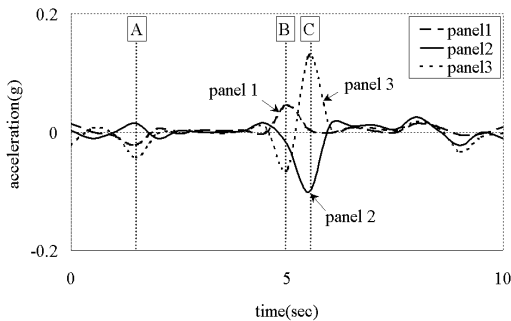
3.2 이동질량반복주행실험

3.2.1 반응의 상반거동 및 반전거동

그림 10과 그림 11은 차량-교량 간 상호작용이 포함된 윤회중 재하실험에 의한 동적거동의 반전거동 및 상반거동이다. 그림의 패널 1,2,3은 각각 시점 부 패널, 중앙부 패널, 종점 부 패널을 나타낸다. 방향은 0을 기준으로 연직 하(下)방향가속도를 (-) 의 부호로 표현하였다. 그림 10에서는 약 1초인 [A]에서 외측패널과 내측패널의 상반거동 발생 후 약 4.5초인 [B]에서 중앙부 패널 2의 반응이 [A]의 0.01G 에서부터 [B]의 0.194G로 급증하며, 약7.5초인 [C] 에서 각 패널 모두 하중의 재하방향인 연직 하(下) 방향과 반대되는 연직 상(上)방향 거동이 나타났다. [그림11]에서는 약 1.5초인 [A]에서 패널 2의 상 방향 움직임이 나타나며 5초인 [B]에서부터 5.5초인 [C] 까지 각 패널의 가속도의 급격한 반전현상이 나타나 있다. 이러한 가속도의 반전 및 상반현상은 대상시편뿐 아니라 재하하중인 차량에서도 자유로운 연직방향의 움직임이 발생함을 보여준다.



[그림 10] 상반거동 및 반전거동 (연직 가속도)



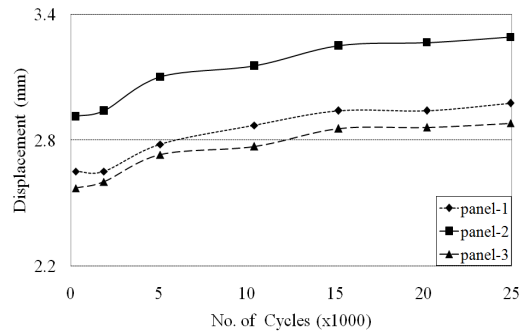
[그림 11] 반전거동(연직가속도)

3.2.2 패널 중앙부의 처짐

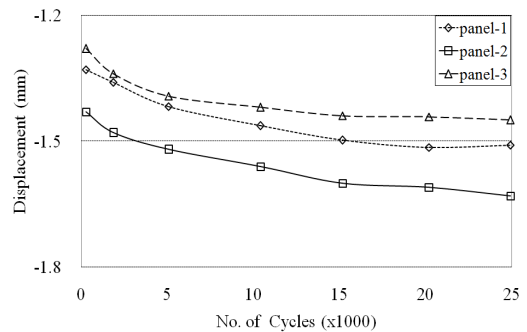
그림 12부터 그림 13은 각 패널 중앙부의 연직 처짐이

며, 연직 하(下)방향 처짐을 (+)의 부호로 표현하였다. 상반현상 및 반전현상으로 인하여 중앙부의 처짐은 연직 하 방향 처짐뿐만 아니라 추가적인 연직 상 방향 처짐도 발생한다. 연직 하 방향 처짐은 반복재하초기 2.65mm(패널1), 2.91mm(패널2), 2.57mm(패널3)에서부터 25000회 재하시 2.98mm(패널1), 3.29mm(패널2), 2.88mm(패널3) 까지 증가한다. 연직 상 방향 처짐은 반복재하 초기 -1.33mm(패널1), -1.43mm(패널2), -1.28mm(패널3)에서부터 25000회 재하 시 -1.51

mm(패널1), -1.63mm(패널2), -1.45mm(패널3) 으로 증가한다. 표 3과 같이 연직 상 방향 처짐은 연직 하 방향 처짐의 최대 51.5%에 해당하며 이는 단순지지에서도 노면조도에 따른 타이어탄성효과로 판단된다.



[그림 12] 패널 중앙부 처짐(연직 하 방향)

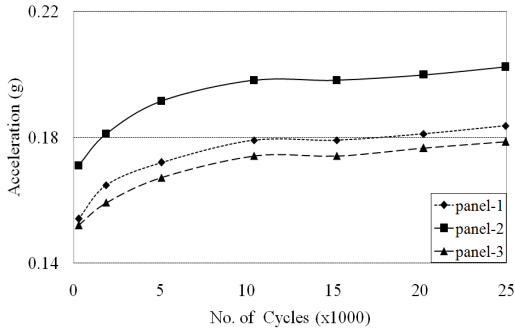


[그림 13] 패널 중앙부 처짐(연직상방향)

[표 3] 연직하방향대상방향처짐의 비율 (%)

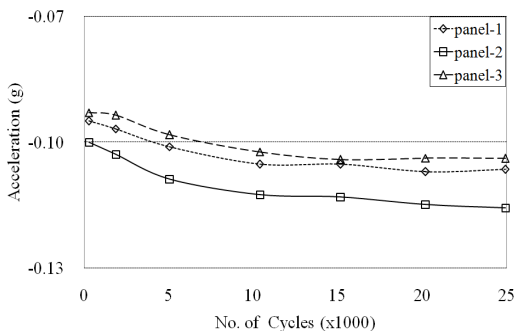
사이클	300	2000	5000	10000	15000	20000	25000
패널1	50.2	51.3	51.0	51.0	51.0	51.5	50.7
패널2	49.1	50.3	49.0	49.5	49.2	49.3	49.6
패널3	49.8	51.5	51.0	51.3	50.4	50.4	50.3

3.2.3 패널 중앙부의 가속도



[그림 14] 패널중앙부가속도(연직하방향)

그림 14부터 그림 15는 이동질량 반복주행시험 시 각 패널 중앙부의 연직 가속도이다. 연직 하(下)방향을 (+)의 부호로 표현하였다. 연직 하 방향 가속도는 반복주행초기 0.15g(패널1), 0.17g(패널2), 0.15g(패널3)에서 25000회 재하시 0.18g(패널1), 0.20g(패널2), 0.18g(패널3)까지 증가한다. 연직 하 방향 가속도는 반복주행횟수 10000회까지 비교적 크게 증가하며 15000회를 지나면서 다시 증가하는 추세를 나타낸다.



[그림 15] 패널중앙부가속도(연직상방향)

[표 4] 연직하방향대상방향 가속도비율 (%)

사이클	300	2000	5000	10000	15000	20000	25000
패널1	61.7	58.8	58.8	58.8	58.8	58.8	58.0
패널2	58.5	56.8	56.8	56.8	56.8	57.1	57.1
패널3	61.2	58.8	58.8	58.8	59.5	58.8	58.2

연직 상 방향 가속도는 연직 하 방향 가속도의 최대 61.7%에 해당하며 표 4에 연직하방향가속도에 대한 연직상방향가속도의 비율을 표시했다.

4. 결론

본 연구에서는 실제 주행조건에 근사한 차량-교량 간 상호작용이 포함된 이동질량형식 윤하중 시험 장치를 이용하여 프리캐스트 콘크리트 패널 상판의 단순교량 형식의 교량에 적용하였다. 이상의 연구로 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 타이어하중에 대한 단순교량의 거동은 타이어 탄성 재하에 따라 응력반전현상이 나타났다.
2. 실험차량과 구조물의 상호작용은 단순교형식의 경우에도 재하방향과 일치하지 않는 추가적인 연직 상(上)방향 가속도 및 처짐이 발생함을 알 수 있었다. 이러한 연직 상(上)방향의 가속도 및 처짐은 연직 하 방향 가속도 및 처짐의 58%를 상회하기도 하였다. 따라서 차량-교량 간 상호작용이 포함된 실 주행조건을 고려하는 교량의 성능평가에는 이러한 연직 하(下)방향의 거동에 추가적으로 발생 가능한 연직 상(上)방향 거동을 고려하여야 할 것으로 판단되었다.
3. 차량-교량간의 상호작용은 추가적인 연직 상(上)방향 거동 및 압축거동으로 인하여 비교적 적은 반복 재하횟수에서 균열을 발생시킬 수 있음을 알았다. 또한 단순교량 형식의 교량에도 하부균열뿐 아니라 상부균열을 발생시킴을 알 수 있었다.
4. 본 연구에 사용된 이동질량형식 윤하중 시험기를 이용한 실험적 방법은 기존의 다양한 연구방법들과 더불어 차량-교량 간 상호작용의 규명에 효과적인 것으로 판단된다. 또한 이를 통하여 좀 더 현실에 가까운 조건에서 교량의 동적피로성능 규명등과 보다 더 정확한 차량-교량상호작용 이론 연구 등에 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

참고문헌

- [1] 김규춘 차량통행 및 제동으로 인한 도로교의 동적거동 해석, 박사학위논문, 고려대학교, 1994.
- [2] 김윤철, 박종진, “루프조인트로 연결된 프리캐스트 바닥판의 윤하중 주행시험”, 대한토목학회 논문집, 제 23권 제5A호, 2003.9, pp.807-814, 2003.
- [3] 김종현, 성익현, 김상철, 김승억, “윤하중 실험기를 이용한 이동질량 실험”, 대한토목학회 논문집, 제 27권 제6A호, 2007.11, pp.789-795, 2007.
- [4] (주)대우건설, 세종대학교, 한국도로공사, 승용차 전용

- 조립식 고가도로 건설기술 개발, 건설교통부 건설기술 연구개발보고서, 2005.
- [5] 한국도로공사, “강형교의 교통분석 및 발생응력의 모형화 연구”, 한국도로공사 도로연구소 기술개발보고서, pp.214-215, 1997.
- [6] Argyris, J. and Mlejnek, H-P., Dynamics of structures, Elsevier Science Publishing. pp. 562-565, 1991.
Fatmir Menkulasi, Horizontal shear connectors for precastprestressed bridge deck panels, Virginia Polytechnic Instituteand State University, 2002.
- [7] Fryba, L., Vibration of solids and structures under movingloads. Noordhoff International Publishing, 1972.
- [8] Yang, Y.B., Liao, S.S., and Lin, B.H. Impact formulas forvehicle moving over simple and continuous beams., Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 121, No. 11, pp. 1644-1650, 1995.

성 익 현(Ik-Hyun Sung)

[정회원]



- 1988년 10월 ~ 1990년 6월 : 한국과학기술원 과학기술대학 연구원
- 1995년 8월 : 고려대학교 토목환경공학과 (구조공학박사)
- 1995년 10월 ~ 1998년 2월 : 한국도로공사 책임연구원
- 1998년 3월 ~ 현재 : 한서대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

구조공학, 비선형동역학