

재하차량 속도에 따른 PSC-I 거더 교량의 거동분석

Response Analysis of PSC-I Girder Bridges for Vehicle's Velocity

박 문 호*

김 기 욱**

Park, Moon-Ho

Kim, Ki-Wook

Abstract

The response of a bridge can be influenced by span length, bridge's surface condition, vehicle's weight, and vehicle's velocity. It is difficult to predict accurate behavior of a bridge. In the current standard of specifications, such dynamic effect is defined by impact factor and prescribed to consider live load as to increase design load by means of multiplying this value by live load. However, it is not well understood because the Impact factor method differs from every country. Dynamic, static and pseudo-static field loading tests on PSC-I girder bridges were carried out to find out the dynamic property of the bridge. This paper is aimed to figure out actual dynamic property of the bridge by using field loading test. An empirical method based on impact factor is widely used and also argued. Displacement and strain response measured from the tests was compared with one from the empirical method. The former seems to be reasonable since it can consider actual response of a bridge through field tests.

요 지

교량의 거동은 교량의 지간 및 노면조도, 주행차량의 중량, 주행속도등 여러 요인들에 의해 달라지므로 교량의 동적거동을 정확히 예측하여 반영하기는 매우 어렵다. 우리나라 표준 시방 기준은 이러한 동적효과를 충격계수로 정의하고, 활하중에 충격계수를 곱하여 설계하중을 증가시키는 방법으로 동적효과를 고려하고 있다. 그러나 각 나라별로 충격계수를 적용하는 방법이 다르고, 아직까지도 명확하게 규명하지 못하고 있다. 그러므로 본 연구에서는 현재 사용 중인 PSC-I 거더교에 대하여 주행차량에 의한 동적 특성을 규명하기 위하여 동적재하, 정적재하, 의 사정적재하시험을 이용하였다. 현장 재하시험에서 얻어진 결과를 통해 재하 속도에 따른 변위와 Strain관계를 찾을 수 있었으며, 이를 바탕으로 현재 논란이 있는 국내의 충격계수에 관한 경험식에 대하여 보다 합리적이고 실제적인 거동이 포함되도록 일조하는데 본 연구의 목적이 있다.

Keywords : Field loading test, Impact factor, PSC-I girder bridge, Vehicle's velocity

핵심 용어 : 현장재하시험, 충격계수, PSC-I 거더교, 차량속도

* 정회원, 경북대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 정회원, 교신저자, 한국건설교통기술평가원 선임연구원, 공학박사

E-mail : matrix@kictep.re.kr 031-389-6427

•본 논문에 대한 토의를 2008년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2008년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

이동하중을 주로 받는 도로교의 동적거동은 교량의 시간 및 노면조도, 주행차량의 중량, 축간거리, 주행속도 등 여러 요인들에 의해 달라지므로 교량의 동적거동을 정확히 예측하여 반영하기는 매우 어렵다. 이러한 거동 모두를 교량에 적용시킬 수 없기 때문에 모형실험 및 현장실험을 통해 얻어진 자료를 이론해석에 의한 결과와 비교하여 봄으로서 이론해석을 보다 단순화시켜 충격계수라는 무차원 계수를 도입하여 이러한 거동을 고려하고 있다.

충격계수에 영향을 주는 요인은 노면의 상태, 차량의 속도, 지간장, 사하중과 활하중의 비, 구조적 특성, 차량의 현가장치, 노면조도, 신축이음, 받침장치, 지반-구조물간의 상호관계 등 여러 가지이다. 각국의 도로교 시방서에서는 대표적인 요인을 선택하여 충격계수 산정에 적용하는데, 국내^{(1),(5)}와 일본 및 미국의 시방서에는 충격계수를 교량의 지간으로 산정하고 있다. 이와는 달리 캐나다의 OHBDC (Ontario Highway Bridge Design Code)와 스위스의 SIA에서는 충격계수를 고유진동수의 함수로 규정하여 사용하고 있다. 서방 각국은 도로교 시방서에서 충격계수를 산정하는 대표적 요인을 이론적 연구와 실험적 연구를 근거로 산정 방법을 적용하여 그 나라에 적합한 충격계수를 규정하여 사용하고 있으나, 우리나라의 도로교 설계기준^{(1),(5)}은 미국의 도로교 시방서인 AASHTO(1989)에 근간을 두고 있으므로 우리나라의 도로 상태 및 교통상황이 충분히 고려되어 있지 않다. 그러므로 우리나라 교량 및 차량특성이 반영된 정확한 동적응답을 파악하여 충격계수에 반영할 필요가 있고, 교량 정밀 안전진단시 내하력 및 사용성 평가를 위해서도 활하중에 대한 교량의 동적응답을 정확히 파악하는 것이 필요하다. 그래서 현재 사용 중인 주행차량에 의한 동적 특성을 규명하기 위하여 지간장이 비슷한 PSC-I 교량인 봉천교(25m)와 효령교(25.7m) 및 고란교(20m)의 직접 수행한 재하실험결과를 이용하여 분석하였다. 동적재하, 정적재하, 의사정적재하의 속도별 변위, 변형을 관계 그래프를 통해 보다 실제적인 동적특성을 규명하고자 하였으며, 이를 바탕으로 현재 논란이 있는 국내의 충격계수

에 관한 경험식에 대하여 보다 합리적이고 실제적인 거동이 포함되도록 일조하는데 본 연구의 목적이 있다.

2. 재하시험

2.1 실측충격계수

이동차량이 교량을 통과할 때 교량의 최대 정적처짐은 일반적으로 정적하중이 교량의 경간 중앙점 부근에 위치할 때 발생하지만, 최대 동적처짐은 교량의 노면조도와 고유진동수 및 차량의 특성 등에 의해 이동차량이 경간중앙 부근에 위치할 때 반드시 발생하는 것은 아니다. 교량을 통과하는 차량하중은 교량의 노면조도, 차량의 가속 및 감속, 전후 차량의 상호작용 등의 여러 가지 원인으로 정적하중보다 큰 영향을 교량에 미친다. 일반적으로 이것을 동적증폭(dynamic amplification : DA)이라고 부른다.

교량의 동적증폭계수는 이동차량이 교량을 통과할 때 발생하는 교량의 경간 중앙점에서의 처짐에 대한 시간-이력곡선으로부터 구할 수 있다. Fig. 1은 처짐에 대한 시간 이력곡선을 나타내고 있다.

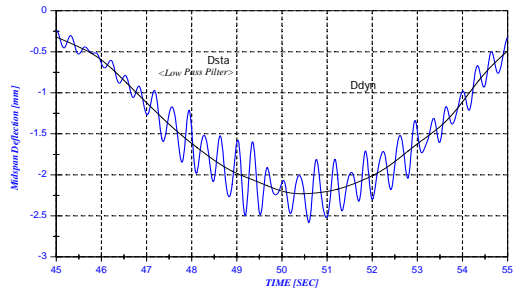


Fig. 1. 재하차량에 의한 구조물의 이력곡선

Fig. 1로부터 동적증폭은 식(1)로 나타낼 수 있다.

$$DA = \frac{D_{dyn} - D_{sta}}{D_{sta}} \quad (1)$$

여기서, D_{dyn} : 최대 동적응답

D_{sta} : 최대 정적응답

식(1)로부터 D_{dyn} 은 식(2)로 나타낼 수 있다.

$$R_{dyn} = R_{sta}(1 + DA) \quad (2)$$

여기서, $(1+DA)$ 를 동적증폭계수(dynamic amplification factor: DAF)라 하고, 우리나라 도로교설계 기준^{(1),(5)}에서는 동적증폭 DA를 충격계수(I)라 한다.

2.2 내하력 평가

내하력 평가는 구조물에 적용하는 실하중의 조사와 비파괴시험에 의한 부재강도의 조사, 정·동적 재하시험에 의한 부재강도 및 변형을, 변위, 진동의 특성등을 기초로 작용외력에 대한 구조물의 저항능력을 평가하는 것이며, 공용하중을 결정하여 안전한 교량을 사용하기 위한 평가치를 결정하기 위한 것이다. 교량 내하력 평가는 1968년 국립건설연구소에서 국도를 대상으로 실시한 이후 현재에 이르기까지 꾸준히 그 측정 조사 및 연구⁽²⁾⁻⁽⁴⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾에 의해 발전을 해왔다. 특히, 조사방법 및 측정결과 해석에는 선진국 수준에 이르고 있으나 내하력 판정 방법은 아직도 그 기준이 미비한 채 재래적인 방법에 의존하고 있다. 그러나 점차적으로 내하력 판정방법도 많이 개선되어 왔으며, 현재 도로교와 철도교는 강교의 경우 허용응력 설계법, 콘크리트교의 경우 강도설계법으로 설계되고 있으며, 기존 교량의 내하력 산정에 있어서 신설 교량의 설계개념과 일관성을 기하는 것이 바람직하나, 평가결과를 상호 보완하기 위하여 두 방법을 모두 사용하도록 정밀안전진단 세부지침에서 규정⁽⁴⁾하고 있다.

2.3 재하시험 방법

현장 재하시험⁽²⁾은 하중의 재하방법에 따라 정적재하시험 및 의사정적재하시험, 동적주행시험으로 대별된다. 이 방법 모두는 교량의 완공후의 강도·강성의 측정치를 확보하여 향후 유지관리계획의 효율성을 도모하고 계측 시스템이 구축된 교량의 체계적이고 합리적인 유지관리에 필요한 초기 데이터 획득 및 보수·

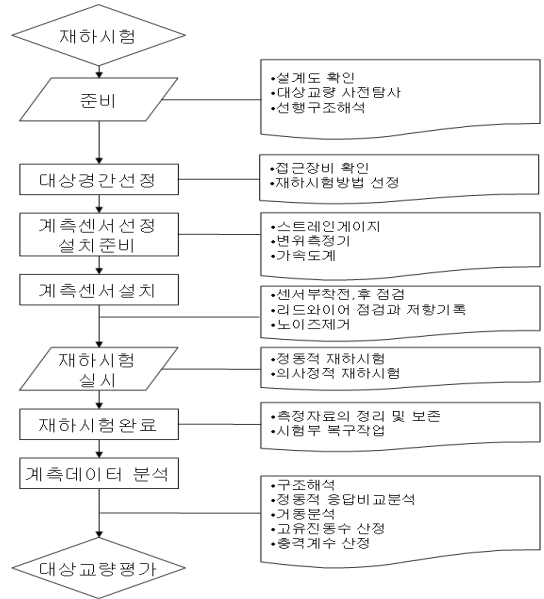


Fig. 2 재하시험절차

보강·교체 등으로 인한 구조물의 변화된 상태를 반영하기 위해 주기적 또는 필요시 실시하며, 일반적인 재하시험의 절차는 Fig. 2와 같이 나타난다.

2.3.1 동적재하시험

동적주행시험은 기본적으로 동적거동을 조사, 측정하기 위한 것으로 교량의 실 충격계수와 실 고유진동수 등의 동적특성을 측정 기록하여 교량의 안전성을 검토하기위한 기본 자료를 구하기 위해 실시하였다. 교량에 동적외력을 가하는 동적주행시험은 주행하중에 의한 동적응답을 구하는 시험으로 주행하중은 Fig. 5의 재하차량을 사용하였다. 시험측정은 교량이 통제된 상태에서 속도별로 실시하였고, 5km/hr의 서행에 의한 의사정적시험을 실시한 후에 10km/hr 간격으로 주행하면서 동적 변형률, 동적 처짐의 동적 데이터를 측정하였다. 각각 재하시험에 대하여 동적 처짐은 MT16(50mm)을 이용하여 측정하였고, 고유진동수를 구하기 위하여 가속도계(1G)를 사용하여 가속도를 측정하였다. 처짐 및 가속도는 동적변형률측정기(MT16)를 이용하여 각각의 신호를 100Hz로 획득하였으며, Fig. 3에서는 현장계측과정을 나타낸 것이다.

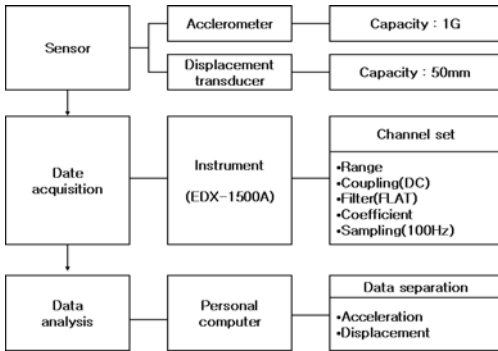


Fig. 3 현장계측과정도

Table 1 재하시험 교량의 제원

교량명	교량형식	지간(m)	교폭(m)	교량위치
고란교	PSC-I	20.0@8=160.0	7.5	안동시 길안면 고란리
봉촌교	PSC-I	25.0@3=75.0	4.8	대구시 달성군 하빈면 봉촌리
효령교	PSC-I	25.65	10.0	군위 효령 중구

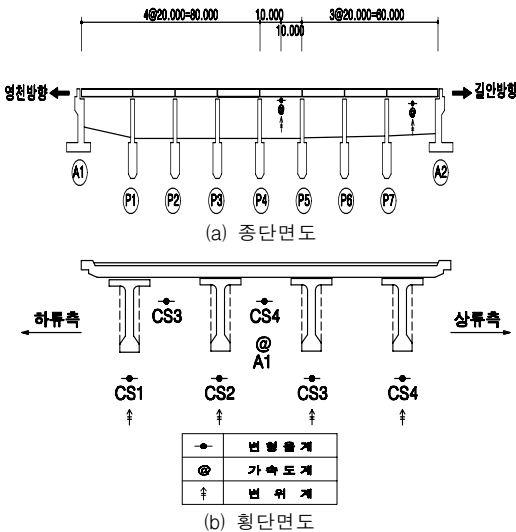


Fig. 4 계측기 설치 위치도

본 연구에서는 단경간 형식의 PSC-I 거더교에 대하여 주로 재하차량 속도가 교량의 동적 처짐 및 동적 변형률에 미치는 영향에 대하여 다루었다. 즉, 교량의 동특성인 고유진동수, 감쇠비 분석 보다는 실험범위 내에서의 거동특성 분석에 주안을 두어 기술하였다.

2.3.2 재하차량

정적 및 동적 재하시험에 사용된 재하차량은 총중량 25ton의 표준 덤프트럭으로, 최대하중을 재하하기 위하여 모래를 만재하여 계량소에서 차량을 계량하였다. 차량의 차축거리 및 차축하중에 대한 제원은 Fig. 5에 도시하였다.

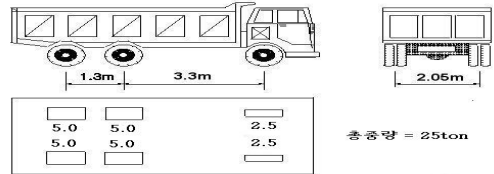


Fig. 5 재하차량의 제원

2.3.3 재하방법

정적 및 동적재하시험은 시험 하중에 대한 대상 구조물의 거동 특성을 파악하고 변위 및 응력값을 얻어 실험값과 구조 해석값을 비교하여 내하력 평가를 위한 자료를 얻고자 하는 것이며, Fig. 6은 정적 및 동적 재하시험의 각 경우에 대한 재하차량의 횡방향 재하위치를 나타낸다. 의사정적재하란 정적재하에 최대한 가깝게 차량이 움직일 수 있는 최저속도로 차량을 이동시킴으로써 모든 종방향에 위치한 차량으로부터의 정적효과를 얻기 위해서 수행되었으며, 정적재하의 결과와 상호 비교 검토함으로써 측정결과의 신뢰성을 점검하는 데에도 사용된다. 동적재하는 속도를 달리하여 10km/hr에서부터 10km/hr씩 증가시켜 60km/hr까지 시행하였으며, 폭원 위치에 따른 재하 Case는 폭원 중앙부와 측면부로 2가지 경우로 구분하여 실시하였다.

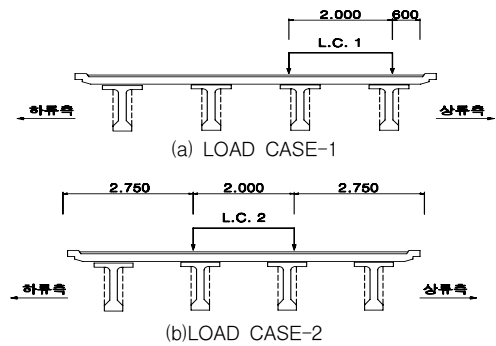


Fig. 6 폭원 위치별 재하 CASE

Table 2 교량의 재하 CASE

재하방향	재하Case	재하속도	횡방향 재하 Case
영천 ↓ 길안	① 1-1	정적재하	트럭 재하시험 1
	② 2-1	정적재하	트럭 재하시험 2
	③ 1-2	의사정적재하	트럭 재하시험 1
	④ 2-2	의사정적재하	트럭 재하시험 2
	⑤ 1-3	10 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑥ 2-3	10 km/hr	트럭 재하시험 2
	⑦ 1-4	20 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑧ 2-4	20 km/hr	트럭 재하시험 2
	⑨ 1-5	30 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑩ 2-5	30 km/hr	트럭 재하시험 2
	⑪ 1-6	40 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑫ 2-6	40 km/hr	트럭 재하시험 2
	⑬ 1-7	50 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑭ 2-7	50 km/hr	트럭 재하시험 2
	⑮ 1-8	60 km/hr	트럭 재하시험 1
	⑯ 2-8	60 km/hr	트럭 재하시험 2

Table 2는 총 16개의 재하 Case를 나타낸 것이고, 폭원 위치별 재하 Case는 Fig. 6과 같다.

3. 재하시험 결과 및 결과고찰

3.1 주행 속도에 따른 변위, Strain관계

Fig. 7은 주행 속도(0~60km/h)에 따른 변위 측정 그래프이고, Fig. 8은 주행 속도(0~60km/h)에 따른 Strain 측정 그래프이다. 재하차량의 진입시간이 측정시마다 다르기 때문에 곡선이 가로축에 대해 다양하게 나타난 것이며, Fig. 7과 Fig. 8의 최대점을 막대그래프로 나타낸 것이 Fig. 9와 Fig. 10이다.

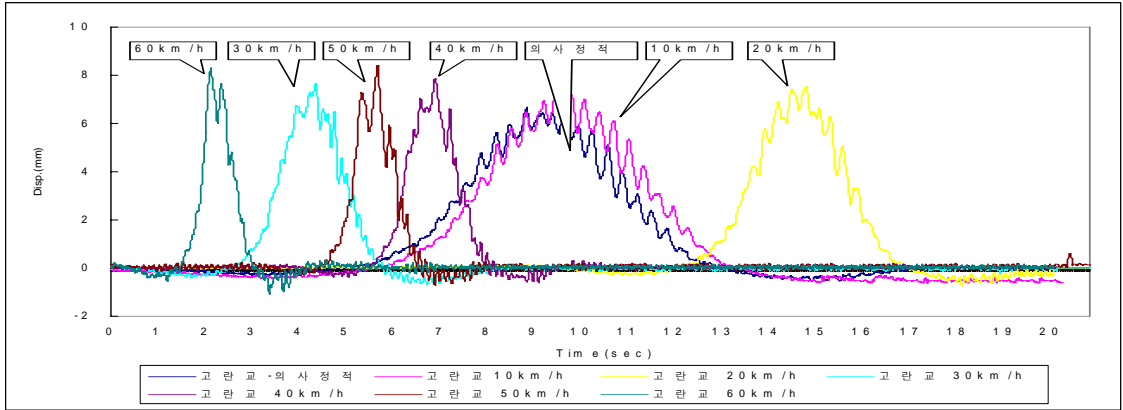


Fig. 7 주행 속도(0~60km/h)에 따른 변위 측정 그래프

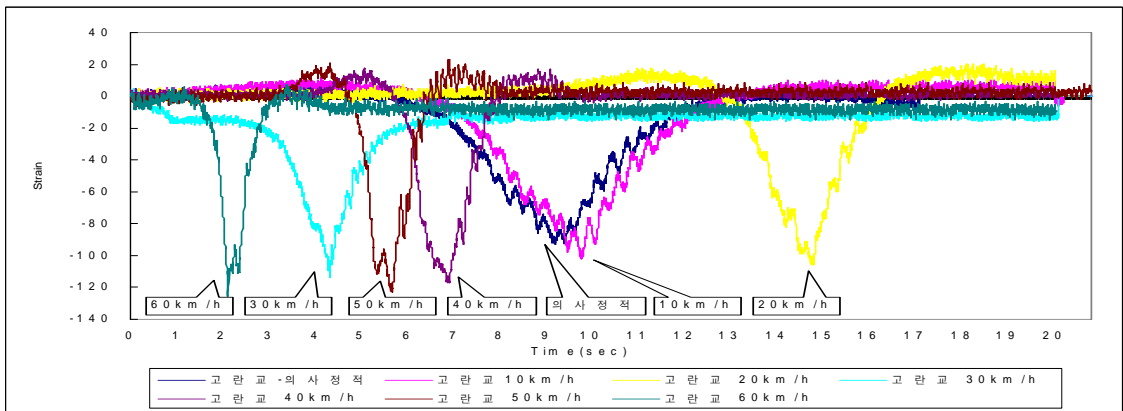


Fig. 8 주행 속도(0~60km/h)에 따른 Strain 측정 그래프

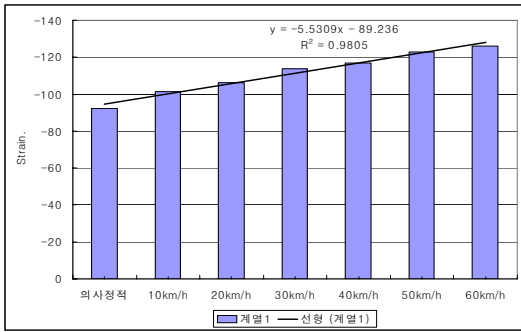


Fig. 9 고란교의 재하속도와 Strain 관계 곡선

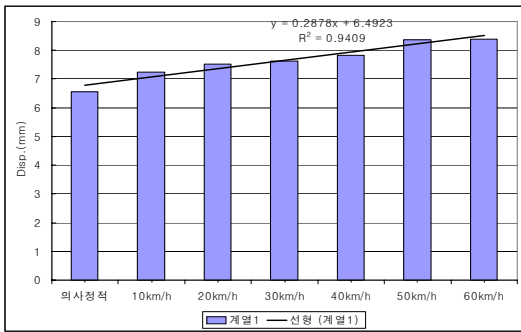


Fig. 10 고란교의 재하속도와 변위 관계 곡선

여기에서 나타난 바와 같이 재하속도와 Strain과의 관계는 결정계수 0.98이상의 선형 비례관계로 나타났으며, 또한 재하속도와 변위와의 관계도 결정계수 0.94이상의 선형 비례관계로 나타났다. 일반적으로 재하속도에 따른 변형을 및 처짐과의 관계가 미비한 것으로 알려져 있으나 본 연구에 실험의 결과로 PSC-I 거더교에서는 선형 비례관계라는 의외의 결과 고찰을 확인할 수 있었다. 본 연구에 포함시키지는 않았으나 교량 길이가 다른 PSC-I 거더교에서도 상기와 같은 결과를 확인할 수 있었다. 물론 60Km/h까지의 측정으로 속도에 비례한 응답증가라는 결론에는 다소 무리가 따르나, 향후 연구에서는 60Km/h 이상의 재하속도에 따른 거동특성도 검토해 볼 필요가 있다고 판단된다. 그리고 본 연구에서는 PSC-I 단순교 및 단순형식의 다경간 거더교에 대하여 검토한 결과이며, 향후 다른 형식의 교량도 이에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

3.2 교량별 변위, Strain관계

Fig. 11에서부터 Fig. 14는 교량형식이 같고, 시간장이 비슷한 고란교, 봉춘교, 효령교에 주행 속도에 따른 변위와 Strain 측정값을 그래프로 나타낸 것이다.

봉춘교는 변위와 Strain의 반응시간이 짧게 나타나고, 고란교와 효령교는 반응시간이 길게 나타났다. 이는 Table 1의 교량재원을 보면, 3개의 교량이 경간당 비슷한 경간장을 갖고 모두 단순교 또는 단순교 형식의 다경간 교량이지만 교폭이 각각 4.8m, 7.5m, 10m로 서로 다르기 때문으로 판단된다. 여기서 일반적으로 반응시간이 통과시간과 밀접한 관계가 있지만 봉춘교의 경우 경간장이 비슷하여 통과시간이 비슷하게 나와야 하지만 통과시간이 짧게 나타나는 거동현상을 나타내고 있는 것도 같은 이유라고 판단된다.

그리고 같은 재하속도에서 교량별로 Strain은 서로 다르게 나타났지만 변위는 비슷하게 나타났는데, 이는 허용처짐의 제한조건에 의한 것으로 판단된다.

Fig. 11과 Fig. 12에서 고란교의 경우 단순교 형식인데도 변형률계에서 연속교의 거동현상이 나타났으나, 변위계의 경우는 단순교의 거동이 나타났다.

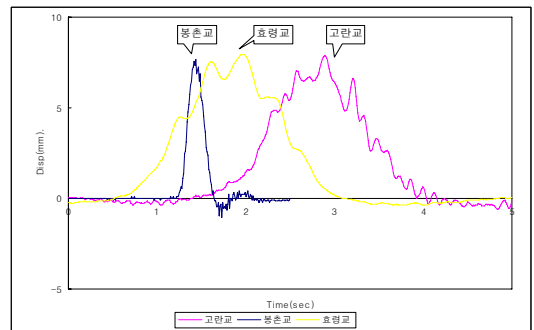


Fig. 11 재하속도(40km/h)에 의한 교량별 변위

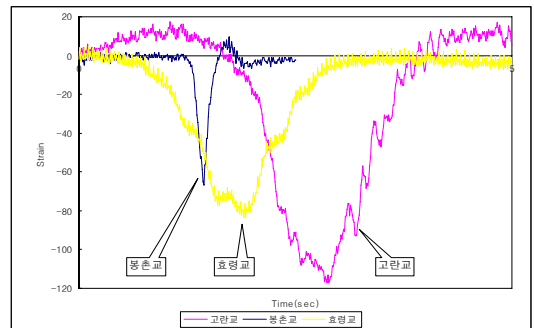


Fig. 12 재하속도(40km/h)에 의한 교량별 Strain

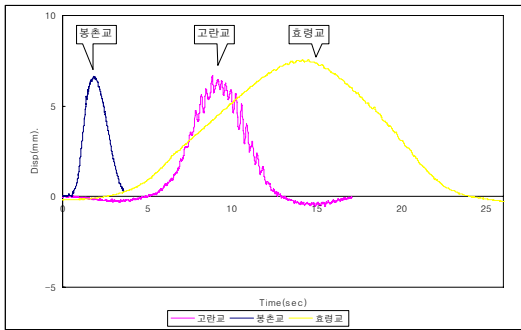


Fig. 13 의사정적 재하시험 의한 교량별 변위

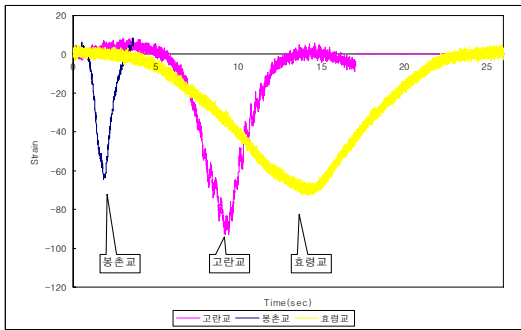


Fig. 14 의사정적 재하시험 의한 교량별 변형률

이는 단순교 형식의 PSC -I거더교 이지만 상부 바닥 포장의 연속성과 교량의 최대 변형률값이 다른 교량보다 크기 때문에 동적거동에 대한 반응이 연속교의 거동형태로 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 15에서부터 Fig. 20은 각 교량별, 재하속도별로 변위-변형률 관계를 알아보려 하나 하나의 그래프로 나타낸 것이다. 앞서 Fig. 7과 Fig. 8을 비교해 보면 가로축을 기준으로 Strain과 변위가 대칭적인 모습을 나타낸 것을 알 수 있다. 측정된 Strain이 (-)값 이므로 세로축의 (-)값을 위쪽으로 정의하고, 세로축을 변위와 Strain의 양측으로 두고 비슷한 scale로 조정하면 Fig. 15부터 Fig. 20까지의 그래프가 도출된다.

후크의 탄성이론을 바탕으로 단순보위에 집중하중이 작용한다고 가정하여 변위와 Strain의 관계를 도출하면 선형비례관계이지만 실제거동에서는 재하속도, 노면상태 및 기타 여러 요인들의 복합작용으로 인하여 비선형적인 거동을 하게 되어 다소 상이한 부분이 나타나며, 아래의 Fig. 15부터 Fig. 20까지 이를 잘 설명해

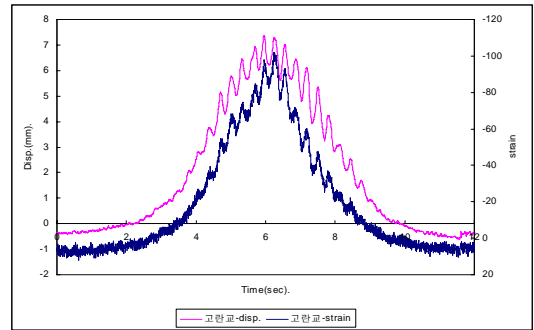


Fig. 15 고랑교의 재하속도(10km/h)에 의한 변위-변형률 관계

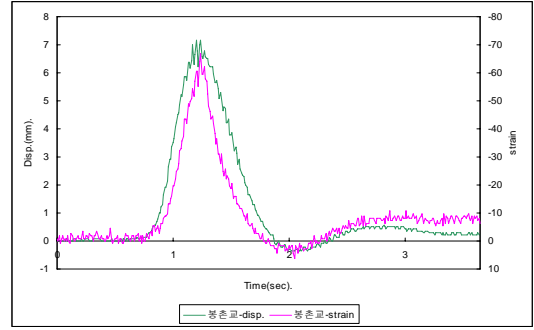


Fig. 16 봉천교의 재하속도(10km/h)에 의한 변위-변형률 관계

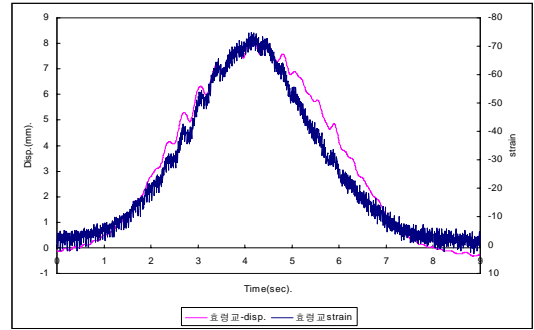


Fig. 17 효령교의 재하속도(10km/h)에 의한 변위-변형률 관계

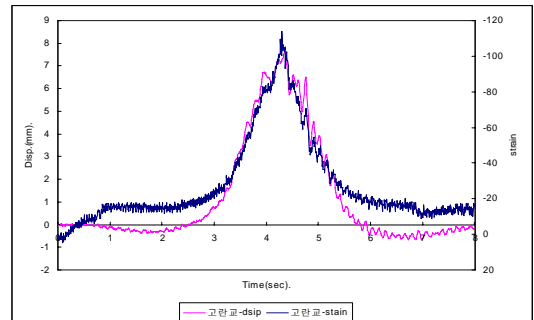


Fig. 18 고랑교의 재하속도(30km/h)에 의한 변위-변형률 관계

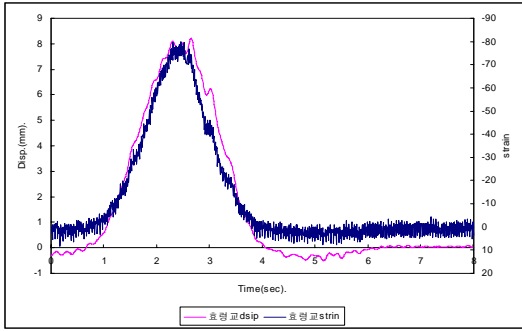


Fig. 19 효령교의 재하속도(30km/h)에 의한 변위-변형률 관계

주고 있다. Fig. 15, Fig. 17, Fig. 20는 변위(δ)와 Strain(ϵ)이 거의 일치하는 거동이 나타났지만 Fig. 16, Fig. 18, Fig. 19의 그래프는 부분적으로 불일치하는 구간이 나타났다. 일반적으로 교량의 동적거동에 영향을 미치는 인자는 무수히 많고, 실제 도로교에서 실하중은 매우 random 하므로, 이에 대한 보다 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 건설교통부, 안전점검 및 정밀안전진단 세부지침에 의해 국내 PSC-I 단순교 및 단순교 형식의 다경간 교량에 대해 재하시험을 실시하였고, 동적재하, 정적재하, 의사정적재하의 속도별 변위, Strain 관계 그래프를 통해 보다 실제적인 동적특성을 규명하고자 하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 재하속도와 Strain과의 관계는 결정계수 0.98이상의 선형 비례관계로 나타났으며, 또한 재하속도와 변위와의 관계도 결정계수 0.94이상의 선형 비례관계로 나타났다. 그러므로 교량 진입시 교통흐름을 고려하여 차량속도를 감속 운행토록 유도하면 교량의 공용수명을 늘릴 수 있다고 판단된다. 또한 국내 설계시 사용되는 충격계수나 내하력 평가시 사용하는 보정계수항목에 차량속도에 대한 항목이 전무하므로 향후 이에 대한 연구도 함께 이루어져야 할 것이다.
- 2) 교량에서 변위와 Strain의 관계를 보면 후크의 탄성이론에서는 선형 탄성비례 관계이지만, 실제거동에서는 관계곡선이 국부적으로 불일치하는 것을 볼 수

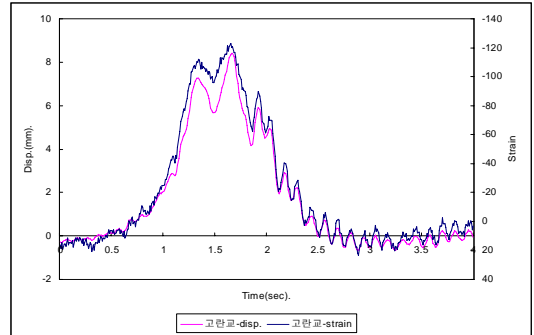


Fig. 20 고란교의 재하속도(50km/h)에 의한 변위-변형률 관계

있었다. 또한 변위와 Strain의 관계곡선에서 곡선의 폭이 교폭에 의해서 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 재하속도, 교폭 및 기타 여러 요인들의 복합 작용으로 인하여 비선형적인 거동을 하게 되므로 이에 대한 보다 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

이상에서와 같이 본 연구에서는 주로 단경간 형식의 PSC-I 거더 교량에 대한 분석이 실시되었으며, 향후 보다 합리적인 충격계수의 산정과 설계를 위해서는 다양한 교량형식에 대해 현장 재하실험을 반영한 더 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

1. 건설교통부, “도로교 표준 시방서”, 한국도로교통협회, 2005. 2, p. 332.
2. 건설교통부, “도로교의 내하력평가 실무 매뉴얼”, 한국건설기술연구원, 2002, p. 118.
3. 건설교통부, “도로설계편람(III)”, 한국건설기술연구원, 2001. 3, p. 968.
4. 건설교통부, “안전점검 및 정밀안전진단 세부지침(교량)”, 한국시설안전관리공단, 2003. 12, p. 150.
5. 대한토목학회, “도로교 설계기준·해설”, 기문당, 2003. 1, p. 770.
6. 이원태, 박영석, 정태주, “고속도로 교량의 충격계수에 관한 실험적 연구”, 대한토목학회 논문집, 제20권 제3-A호, 2000, pp. 395-406.
7. 전귀현, “강거더교의 재하시험을 통한 내하력평가”, 구조물진단학회논문집, 제2권 제1호, 1998. 1, pp. 89-97.

(접수일자 : 2007년 3월 15일)