

교량의 비파괴 재하실험

Nondestructive Load Testing of the Bridges



양 승 이^{1)*}
Yang, Seung Ie

1. 비파괴 재하실험의 목적

현재 공용 중에 있는 교량의 거동 및 하중 통과 능력은 계산에 의한 이론값보다 크다. 이러한 차이는 교량이 가지고 있는 기대했던 것 이외의 하중 저항능력 때문인데, 이러한 것들이 교량을 관리하는 공공기관에 많은 이점을 준다. 비파괴 재하실험은 종류에 따라 주 목적은 다르다. 우리나라에서 수행하고 있는 재하실험의 주 목적은 교량이 가지고 있는 거동특성을 파악하는 것으로 쉽게 말하자면, 실제 교량의 재하실험값들이(처짐 및 변형률 등) 이론치보다 작은 원인을 분석하고 그 원인을 밝히는 데 그 주목적이 있다.

우리나라는 “시설물안전관리에 관한 특별법”에 따라서 정밀점검 및 정밀안전 진단이 연차적으로 수행되고 있다. 정밀안전진단의 경우 재하실험을 수행하지만 그 주목적에 맞게 보고서가 쓰인 것은 거의 찾아보지 못했다.

2. 비파괴 재하실험의 정의

비파괴 재하실험이란 교량의 탄성범위 안에서 그리고 교량에 손상을 주지 않으면서, 이미 결정된 하중을 교량에 재하 하여 그 응답을 측정하는 것이다. 재하실험을 간단하게 설명하자면, 재하실험을 하여 얻은 결과와 선행된 구조

해석 값을 비교하여 교량의 거동상태를 비교하는 것이다.

기본적으로 비파괴 재하실험에는 두 가지 종류의 것이 있다. 그 하나가 Diagnostic Load Test고 나머지가 Proof Load Test이다. 우리나라의 경우 정밀안전진단 시 Diagnostic Load Test를 사용한다. 두 가지 형식 모두 장비를 사용하고 하중을 재하 하는 부분에 서는 같지만 주목적은 다르다.

우리나라에서 사용하는 Diagnostic Load Test의 경우, 하중을 미리 선정된 Load Case에 재하되고 각 부재에 설치된 장비로부터 그 응답을 측정한다.

Diagnostic Load Test의 경우 측정된 값은 이론값과 비교되어야 하고, 실측값과 이론값의 차이는 설명되어야 한다.

우리나라의 경우는 보정계수가 1이 아닌 경우 왜 보정계수가 1이 아닌지에 대한 설명이 필요하지만, 대부분의 보고서에서 이러한 차이가 설명되어있지 않고, 안전성에는 문제가 없다고 결론 내려진다.

Proof Load Test는 교량이 탄성한계에 도달할 때까지 하중을 조금씩 증가시킨다. 탄성한계에 도달할 때, 실험은 중단되고, 이때의 하중과 위치가 기록된다. 또 다른 경우는 실험 전 목표하중(Target Proof Load)을 설정하여 이 하중에 도달될 때까지 시험이 계속 된다.

비파괴 재하실험은 공용중인 교량의 안전한 활하중 통과능력을 측정하는데 충분한 자료를 제공하여야 한다. 일례로, 교량의 내하력이 1보다 작은 경우, 재하실험은 현 공용중인 교량에 대한 실제 활하중 통과능력을 제공하여 약간

1) 한국건설시험연구원 대표이사, 공학박사

* E-mail : kioce@daum.net

의 보수만으로 교량을 사용하기도 한다. 또한 교량이 보강되어 보강된 부재와의 상호작용으로 인하여 교량의 내하력을 정확하게 평가하기 어려운 경우 재하실험은 그러한 교량의 각 부재의 거동을 이해하는데 상당한 도움을 주기도 한다.

교량의 재하실험은 교량을 관리하는 관리기관에서 교량을 효율적으로 관리하기에 굉장히 유용한 도구이지만 우리나라에서는 그렇지 않다. 비파괴 재하실험의 주목적에 대한 이해가 부족하고 단순 안전성에만 관심을 가지고 의무적으로 수행하고 있기 때문에 많은 돈을 들여 재하실험을 수행하지만 정작 재하실험에 대한 보고서에서 교량거동 특성을 파악하는데 얻을 수 있는 정보는 많지 않다.

재하실험을 통하여 높은 보수·보강 비용을 피할 수 있고, 높은 수준의 활하중 통과능력을 관리할 수 있어 교량을 오래 사용할 수 있으나, 이것은 비파괴 재하실험의 주목적에 맞게 재하실험이 수행되고, 보고서 또한 목적에 맞게 써졌을 경우이다.

현재 교량 유지관리에 종사하는 업계 및 관공서에서 비파괴 재하실험에 대한 깊은 이해와 연구가 필요하다.

3. 비파괴 재하실험

3.1 Diagnostic Load Test(DLT)

정밀안전진단 시 우리나라에서 수행하는 모든 재하실험은 Diagnostic Load Test 이다. DLT은 하중이 재하 되었을 경우 부재의 발생하는 하중효과(모멘트, 전단력, 축방향력, 응력 또는 처짐)을 측정한다. DLT에서 측정된 값과 이론값은 비교하여, 교량을 평가할 경우 그 차이는 내하력 값에 반영되어야 한다. DLT는 다음에 관련하여 수행된다.

- a. 교량거동에 대한 불확실성 : 재료에 대한 특성(콘크리트의 경우 28일 강도 등), Boundary Condition, 보수에 대한 효과, Unintended Composite Action, 그리고 손상이나 열화의 영향 등.
- b. 교량에 사용되는 설계 계수 : 충격계수 그리고 횡분배 방법에 의한 분배율 등

DLT는 해석모델에 의한 결과를 증명 및 조정을 위하여 사용될 수 있다. 측정된 응답과 해석 모델을 이용하여 예상된 값은 일치해야하며, 차이가 있을 경우 측정값과 해석 값에 대한 차이는 설명되어야 한다.

3.2 Proof Load Test(PLT)

PLT는 교량의 손상이 없는 범위 내에서 교량이 지탱할 수 있는 최대하중을 측정한다. PLT는 선행 계산된 최대하중에 도달하거나 또는 교량이 비선형 거동을 보일 경우 종료된다. PLT는 수행의 어려움에도 불구하고, 공용중인 교량의 통과능력을 평가하는데 굉장히 가치 있는 도구이다. 또한 스위스에서는 새롭게 준공된 교량에 대하여 의무적으로 실시되고 있는 재하실험이다.

4. 교량의 하중 통과 능력에 영향을 주는 인자들

4.1 개요

이장에서는 교량의 하중통과 능력에 영향을 주는 인자들에 대하여 설명한다. 이러한 인자들 중 상당수는 교량의 설계나 평가 시 고려되지 않는다. 하지만 이것들로 인하여 실제거동과 이론 거동과 차이가 발생하고, 교량의 활하중 통과능력을 증가 시켜주기도 한다. 이러한 인자 중 몇몇은 높은 하중재하시 사라질 수도 있다. 이러한 인자들은 다음과 같다.

- a. Unintended Composite Action
- b. Load Distribution Effect
- c. Participation of Parapets, Railings and Utilities
- d. Material Properties Difference
- e. Unintended Continuity
- f. Participation of Secondary Members
- g. Effect of Skew

이들 중 Unintended Composite Action, Unintended Continuity, Material Properties Difference 그리고 Load Distribution Effect에 대하여 설명한다.

4.2 Unintended Composite Action

50년대 이전에 만들어진 교량의 경우 거더와 슬래브를 연결하는 전단 연결재 없이 교량이 시공 되었다. 이 경우 교량의 거동은 거더만이 하중을 지지하는 비합성 거동을 하여야 하는데, 재하실험결과 거더와 슬래브가 합성단면처럼 거동한다. 이것을 Unintended Composite Action 이라고 한다. 하지만 하중이 증가하여 교량이 최고하중에 도달하게 되면 Unintended Composite Action은 사라지게 된다.

Unintended Composite Action이 보고된 보고서는 많

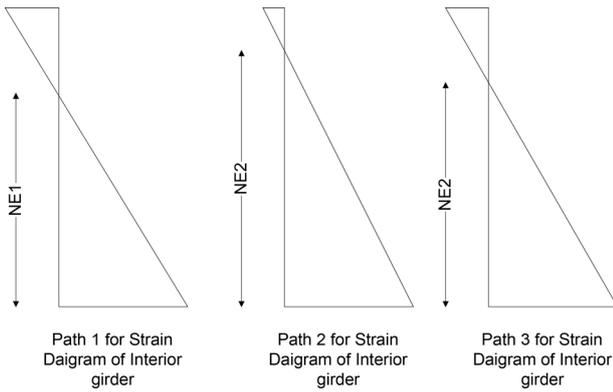


Fig. 1 Strain Gage Diagram

다. 그중 Chajes's et al.(1997)는 비합성 단면을 가지고 있는 교량에 대하여 재하시험을 수행하였다. 그의 보고서에서는 합성거동을 알아내기 위해 Steel의 상부와 하부 플랜지에 Strain Gage를 부착하여 실험하였다. 그 결과 교량의 중립축이 각 Load Path마다 Fig. 1과 같이 나타났다.

비록 교량은 비합성 단면으로 시공되었어도, 실험결과 교량은 합성단면으로 거동하였다. Unintended Composite Action 으로 인해 내하력 값은 증가한다. 이러한 작용의 원인으로는 슬래브와 거더사이의 화학작용 및 마찰이다. Unintended Composite Action은 높은 하중이 작용할 경우 사라진다.

4.3 Unintended Continuity

단순 지지된 교량의 경우, 이론 해석시 지지점의 조건은 힌지나 롤로 그리고 모멘트는 지지할 수 없다고 가정된다. 하지만 실험결과 단순 지지된 힌지나 롤로에 상당한 양의 모멘트가 발생하고 있다. 굳어버린 받침과 deck 슬래브의 연속화가 그 원인이라고 할 수 있다. 단순지지 된 교량의 지점의 모멘트가 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우의 모멘트 Diagram은 Fig. 2와 같다.

지지점의 모멘트가 발생했을 경우 중앙부의 정모멘트가 감소함을 알 수 있다. 이 경우도 내하력 평가시 내하율이 증가한다.

문헌조사 결과 교량평가 시 몇몇 교량평가자들은 지지점의 모멘트를 고려하여 내하력을 계산하였다. Fu's et al. (1997)의 재하시험의 경우, 실험값을 이용한 내하력값이 이론치보다 크게 나와 그 이유를 찾으려 노력하였다. 두 가지 경우에 대하여 이론 내하력을 계산하였는데 그중 하나는 힌지와 롤로로 지지점을 가정하였고, 또 다른 하나는

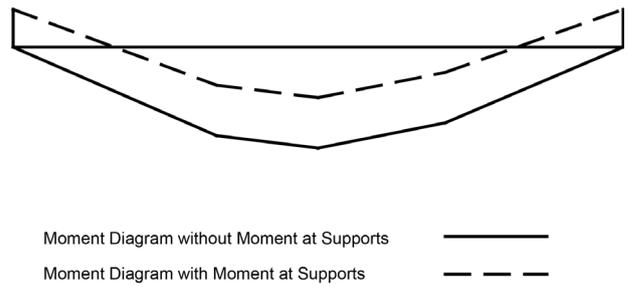


Fig. 2 Moment Diagram of the Simple Beam with and without Unintended Continuity

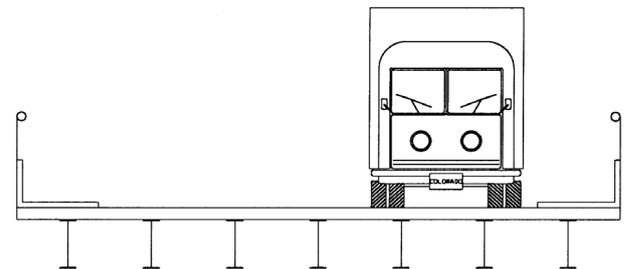


Fig. 3 Cross Section of Concrete Slab Steel Girder

고정과 힌지로 가정하여 내하력을 계산 하였다. 평가 결과 고정과 힌지로 가정된 결과가 실험결과 값과 유사하여, 보고서는 지지점이 구속되었다고 결론 내렸다.

4.4 Material Properties Difference

교량의 재하시험에 의한 처짐 또는 변형율을 계산하기 위하여 실제 교량의 재료 특성을 알아야 한다. 보통의 경우 계산 처짐 및 변형율에 사용되는 값은 설계 값으로 실제 재료의 재료 특성 값보다 작다. 실제 교량의 재료특성을 파악하기 위하여 시간과 비용이 발생하므로 실제값이 필요한지에 대한 판단을 내려야 한다. 콘크리트의 경우는 실제값과 이론값의 차이가 내하력값에 영향을 많이 미치지 않는다.

4.5 Load Distribution Effect

Fig. 3과 같이 트럭이 교량을 통과 할 경우 트럭하중은 상부 슬래브를 통해 steel 거더로 전달된다. 트럭하중 바로 밑에 위치한 거더는 트럭하중의 대부분을 지탱한다.

트럭하중을 거더에 전달하는 이론적인 방법으로는 거더와 거더 사이를 단순경간으로 놓고 하중을 재하는 방법이다. 이 경우 실제 보다 과하게 분배된 하중이 거더에 재하되게 된다.

미국의 AASHTO Standard(1992)의 허용응력 설계법 및 강도설계법에서는 Distribution Factor(DF)을 이용하여 거더에 활하중을 분배한다. DF는 거더의 간격과 슬래브와 거더의 조합에 따라 다양한 값을 가진다.

하지만 이러한 이론적인 횡분배 계수는 거더에 실제 작용하는 작용력 보다 큰 값을 주어 내하력을 낮춘다. 문헌조사 결과 실제 DF를 구하기 위하여 많은 연구가 수행되었다.

Chajes' et al. (1997)는 DF를 계산하기 위하여 재하실험 결과가 반영된 유한요소 모델을 이용하였다.

$$DF = \frac{M_{max}}{M_{wheel}} \quad (1)$$

여기서 M_{max} 는 실험결과가 반영된 유한 요소모델을 이용하여 거더에 발생하는 최대 모멘트 이다. M_{wheel} 은 이론적으로 구한 거더에 발생하는 모멘트이다.

Stalling and Yoo(1993)는 다음 공식을 이용하여 DF를 계산하였다.

$$DF = \frac{n\epsilon_i}{\sum_{j=1}^k \epsilon_j w_j} \quad (2)$$

여기서 n은 재하된 차선의수, ϵ_i 는 거더 i의 하부 플랜에서 측정된 변형률, k는 거더의 수, w_j 는 대표적인 내부 거더 단면계수에 대한 i거더 단면계수의 비이다.

Moses' et al.(1985)는 다음 공식을 이용하여 거더의 DF를 계산 하였다.

$$DF = \frac{\epsilon_i}{\sum_{j=1}^k \epsilon_j} \quad (3)$$

여기서 k는 거더의 수이고, ϵ_i DF계산을 위한 거더에 측정된 변형률이다.

5. 결 론

우리나라에서 정밀안전진단 시 수행하는 재하실험은 Diagnostic Load Test이다. 보고서 재하실험 부분 및 내하력 평가부

분은 고유진동수 비교, 충격계수, 횡분배, 그리고 보정계수에 대하여 설명하고 마지막으로 공용내하력을 계산한다.

자문회의나 기술심의 시 자문위원이나 심의위원은 고유진동수를 비교하여 그 차이가 많이 날 경우는 모델링 또는 실험이 잘못됐다고 말한다. 뭐가 잘못 되었다는 것인가? 보정계수가 클 경우도 마찬가지로 뭔가 잘못됐다고 결론내리는 자문위원도 있다. 뭐가 잘못되었다는 것인가?

현재 수행되는 교량의 재하실험 방법은 Diagnostic Load Test로 그 주목적은 교량의 거동특성을 파악하는데 있다. 고유진동수값을 비교하여 그 값에 차이가 많이 발생하였다면, 보고서에서 그 값이 차이가 나는 이유에 대하여 설명이 필요하다. 마찬가지로 보정계수가 1이 아닌 경우 실험값과 이론값의 차이에 대하여 보고서에서 반드시 언급이 되어야 한다.

하지만 아직까지 한 번도 거동특성(보정계수가 1이 아닌 이유)에 대한 언급을 한 보고서는 본적이 없으면, 이에 대한 자문을 한 위원도 한 번도 본적이 없다.

나설 있는 재하실험 보고서가 되려면 교량의 거동특성을 파악하기 위한 센서의 부착위치 및 개수에 대한 연구가 진행되어야하고, 이에 대한 규정 또한 개정되어야 한다.

또한 유지관리 기술자와 관공서 관련부서에서 재하실험에 대한 깊은 이해와 연구가 필요하다고 생각된다.

참고문헌

1. Chajes, M. J., Mertz, D. R. and Commander, B., "Experimental load rating of a posted bridge", ASCE Journal of Bridge Engineering, Vol. 2, No. 1, 1997, pp.1-10.
2. Fu, G., Pezze, F. P. and Alampalli, S., "Diagnostic Load Testing for Bridge Load Rating", Transportation Research Record, No. 1594, 1997, pp.125-133.
3. Moses, F., Ghosn, M. and Gobieski, J., "Weigh-in-motion applied to bridge evaluation", FHWA/OH-85/012, Case Western Reserve University, 1985, p.168.
4. Stallings, J. M. and Yoo, C. H., "Tests and ratings of short-span steel bridges", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 119, No. 7, 1993, pp.2150-2168.
5. Standard specification for highway bridges, American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, D.C., 1992, p.686.

담당 편집위원: 박성우
(한국시설안전공단 진단본부 차장)
sungwoo@kistec.or.kr