

# PSC 거더교의 파괴실험

## Destructive Load Testing of Prestressed Concrete Girder Bridge

오 병 환\*, 김 광 수\*\*, 유 영\*\*, 유 동 우\*\*\*, 김 도 균\*\*\*  
Oh, Byung Hwan Kim, Kwang Soo Lew, Young You, Dong Woo Kim, Do Kyun

### ABSTRACT

This research covers the testing of precast/prestressed concrete I-girder bridge. The research was designed to examine processes for improving the condition evaluation and rating of prestressed concrete bridge. To establish procedures that allow for the full utilization of prestressed concrete bridge capacity, a 28-year old sample was loaded to failure in site. The bridge was constructed with 12 spans, and girders of each span were simply supported. At each loading stage, the deflections, reinforcement strains, prestressing wire strains and concrete strains were examined. Failure behavior was analyzed, and failure load was also evaluated. The test results were compared to the analytical results from the non-linear finite element analysis.

### 1. 서론

지금까지 진행된 많은 재하시험은 현실적으로 사용하중 단계까지의 분석에 그칠 수밖에 없었으며 실질적인 극한하중 결정은 실험실내에서 부재실험을 통하여 수행하게 된다. 본 연구는 PSC 거더교의 실제 파괴실험을 통하여 대상 교량의 사용하중 단계, 초과하중 단계 및 극한하중 단계에서의 거동특성을 분석하는데 그 목적이 있다.

이러한 PSC 거더교의 파괴실험에서는 하중단계별 변형거동 및 균열진전 등의 분석을 통하여 기존 의 철근 콘크리트 교량 및 프리스트레스트 콘크리트 실험부재와의 거동특성을 비교하고 사용중인 노후교량의 거동양상을 분석하고자 한다. 이를 통하여 궁극적으로는 현재 사용되고 있는 내하력 평가방법의 문제점을 제시하고 하중단계에 따른 교량의 실제 거동을 반영하는 개선된 내하력 평가기법을 제시하고자 한다.

### 2. 현장 파괴실험

#### 2.1 시험대상 교량

본 연구의 실험대상 교량은 71년에 준공된 대구시의 서진3교이며, 형식은 12경간의 PSC 거더교이며 왕복 2차선 교량이다. 각 지간길이는 30m로 교량의 총연장은 351m이다. 거더의 개수는 4개이며, 1 경간에 6개의 격벽이 설치되어 있는 설계하중 DB-18의 교량이다.

\* 서울대학교 토목공학과 교수

\*\* 서울대학교 토목공학과 박사수료

\*\*\* 시설안전기술공단

시험대상 교량은 경부고속도로에 대한 접속교량이며 선형 변경등의 이유에 따라 사용이 중지되었고 파괴실험의 실시후 철거가 계획되었다. 그림 1에 시험대상 교량의 전경이 나타나 있으며 첫 번째 지간을 시험대상 구간으로 선정하여 파괴시험을 실시한다.

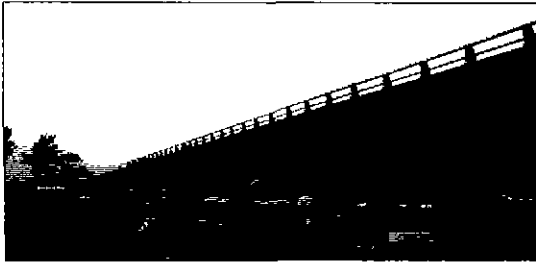


그림 1 시험대상 교량 전경

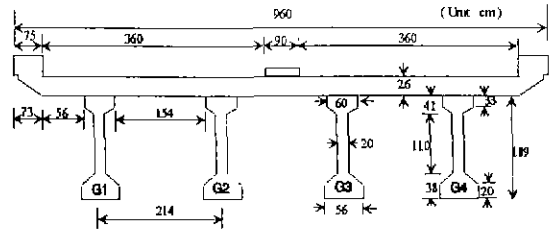


그림 2 시험대상 교량의 단면제원

## 2.2 하중재하 방식

하중재하 위치는 상행선의 거더 2개위에 직접 재하하게 되며 한 거더에 대하여 2점재하를 하게 되므로 총 4점 재하를 하게 된다. 대상교량의 파괴실험을 위하여 하중재하는 반력을 이용한 방식과 Earth Anchor에 직접 인장력을 가하는 방식의 2가지 형태로 설계되었다. 반력을 이용한 하중재하 방식은 Flat Jack을 이용하여 재하하게 되므로 재하 하중의 직접적인 제어가 가능하고 무엇보다 반복재하에 용이하다. 그러나 잭의 Stroke에 있어서의 한계 때문에 교량의 파괴하중까지 재하하는 것이 불가능하다. 따라서 반복적인 재하는 불가능하지만 Stroke에 있어서의 한계가 없는 직접재하 방식을 설계하여 2가지 형태의 하중재하를 설계하였다.

먼저 반력을 이용한 재하방식은 교량 상부슬래브에 H형강등을 이용하여 반력프레임을 설치하고 이를 Earth Anchor를 이용하여 고정하게 된다. 반력 프레임과 상부슬래브의 재하판 사이에 유압잭을 설치하여 재하하게 되는데 250ton 용량의 Flat Jack을 사용하였다.

이러한 반력을 이용한 방식은 파괴하중에 이르기 전의 반복하중을 재하하기 위하여 설계되었다. 상대적으로 낮은 하중단계에서 재하되는 하중을 보다 정교하게 조정할 수 있을 뿐 아니라 무엇보다도 Unloading이 용이한 방식이다. 특히 Cyclic Loading이 가능하기 때문에 하중단계에 따른 교량의 거동특성, 균열의 Reopening등에 대한 분석이 가능하다.

그러나 일반적으로 Flat Jack은 Stroke이 크지 않으며 특히 용량이 커질수록 작은 Stroke을 갖는 것이 일반적이다. 본 실험에 적용된 유압잭 또한 Stroke은 100mm의 것으로 비교적 장지간의 구조물을 치짐이 급격히 증가하는 파괴시까지 재하하기에는 부적절하다. 이를 위하여 다음과 같은 직접 인장을 통한 하중재하 방식이 설계되었다.

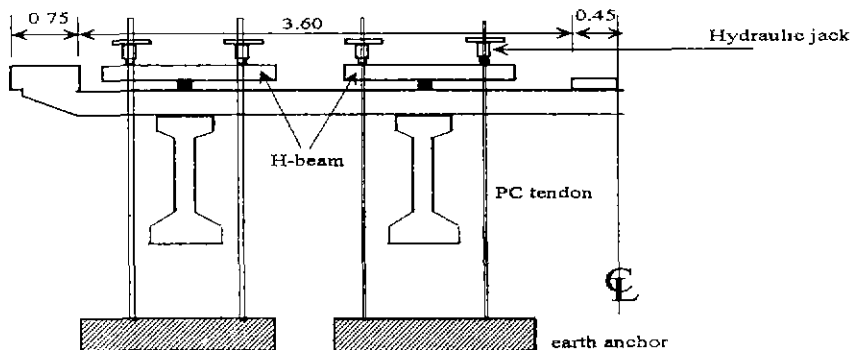


그림 3 직접인장 방식을 이용한 하중재하 시스템

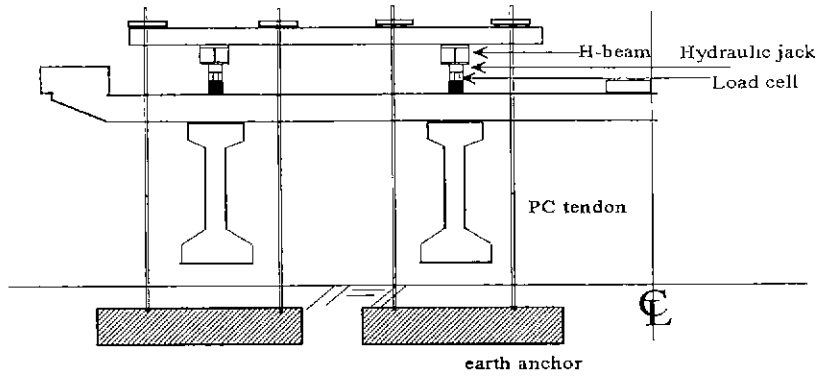


그림 4 반력을 이용한 하중재하 시스템

이러한 직접인장 방식을 이용한 하중재하 시스템은 반력을 이용한 재하 시스템과 마찬가지로 사전에 준비된 Earth Anchor를 이용한다. 반력 시스템에서 적용된 동일한 재하판을 재하점에 위치시키고 그림에 나타난 바와 같이 형강을 설치한다. 형강위에 설치된 유압잭이 PC tendon을 직접 긴장하여 하중이 형강으로 전달되고 이러한 하중은 PSC 거더위에 놓여진 재하판을 통하여 교량에 전달되는 재하 방식이다.

### 3. 실험결과 및 분석

#### 3.1 게이지 부착위치

본 파괴실험을 통하여 일반적인 재하시험에서 사용하는 하중의 수준을 초과하는 하중을 재하함으로써 교량의 선형거동 뿐이 아니라 비선형 거동 및 파괴시까지의 거동특성을 파악할 수 있다. 이를 위하여 대상 교량의 거더, 격벽, 슬래브등에 변형률 게이지와 LVDT, 경사계, 균열 게이지등을 부착 및 설치하였다. 특히 각 거더에는 하중-처짐 관계, 하중-철근 변형률 관계, 하중-강선 변형률 관계, 하중-콘크리트 변형률 관계등을 분석할 수 있도록 하였다.

#### 3.2 단일거더 재하 (2점 재하)

##### 3.2.1 하중-처짐 관계

사용하중 단계에서 다양한 재하방식이 계획되었는데 먼저 전체 교량시스템에서 집중하중을 받는 단일거더의 거동분석 및 하중 횡분배 특성의 분석을 위하여 거더 1에만 30ton까지 각 단계별로 재하하여 측정하였다. 이러한 하중경우는 거더 2에도 동일하게 적용되었으며 각 경우에 대하여 Loading 과 Unloading을 통해 점진적으로 하중을 증가시켰다. 그림 5, 6, 7, 8은 이러한 거더 1 그리고 거더 2에만 각각 하중이 재하된 경우에 있어서의 하중-처짐 관계를 나타내주고 있다.

##### 3.2.2 거더의 하중-철근 변형률, 하중-강선 변형률 관계

초기상태에서 재하를 한 후, 재하(unloading)를 하였을 때 철근의 변형률이 압축으로 나타났다. 특히 거더 4에서는 재하(loading)시에 압축변형률을 일으켜 상향처짐이 일어난다는 사실과 부합하고 있다. 거더의 강선 변형률에서의 측정 결과도 역시 철근의 경우와 동일한 경향을 보이고 있다. 거더 1에만 재하한 경우에 대하여 하중-철근 변형률 곡선이 그림 9에 나타나 있고 그림 10은 동일한 경우에 대한 강선의 하중-변형률 곡선이다.

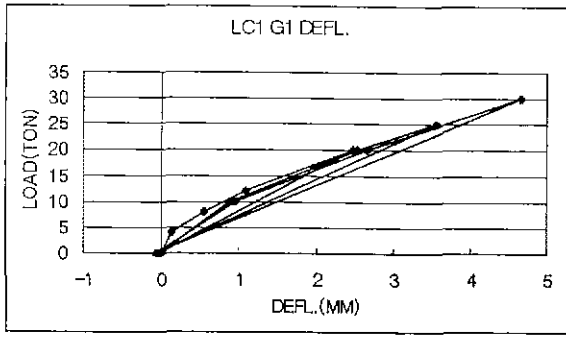


그림 5 거더 1의 하중-처짐 곡선(거더 1 재하)

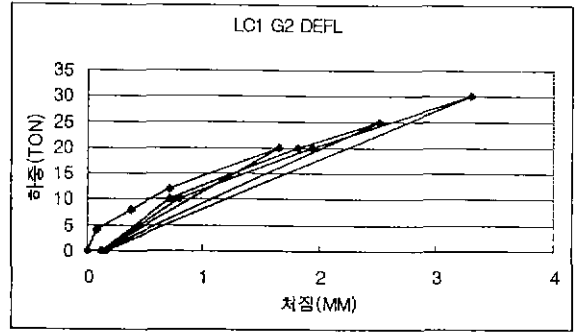


그림 6 거더 2의 하중-처짐 곡선(거더 1 재하)

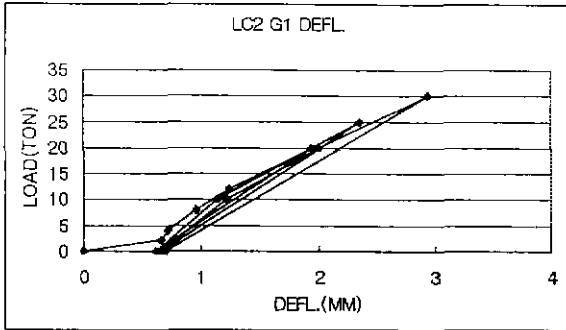


그림 7 거더 1의 하중-처짐 곡선(거더 2 재하)

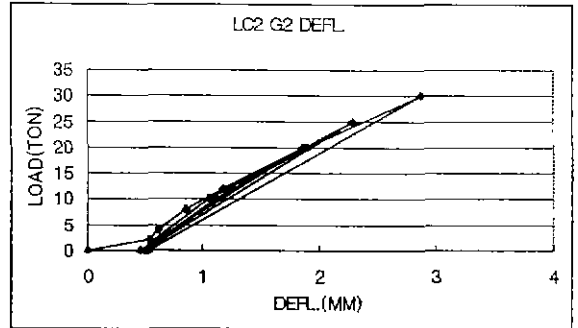


그림 8 거더 1의 하중-처짐 곡선(거더 2 재하)

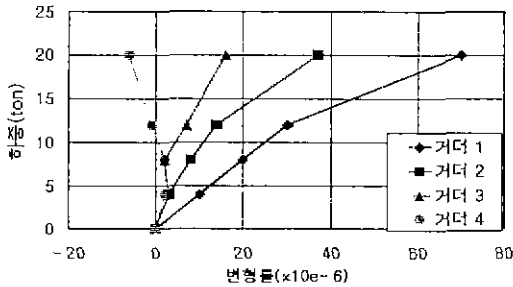


그림 9 하중-철근변형률 곡선(거더 1 재하)

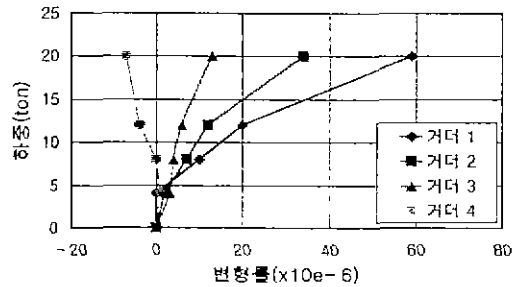


그림 10 하중-강선변형률 곡선(거더 1 재하)

### 3.3.4 4점 재하 (거더 1, 거더 2)

4점 재하는 거더 1과 거더 2에 동시에 재하되었다. 각 재하판에는 동일한 하중이 재하되며 재하단계는 총하중 기준으로 설정되었다. 그림 11은 4점 재하의 경우 재하 위치를 나타내며 그림 12는 각 하중단계별 거더의 하중-처짐 곡선을 나타낸다. 이 경우 총 하중 32t이 재하되었을 때 잔류처짐이 발생하는 것으로 관측되었다. 또한 그림 13은 각 하중단계별 거더의 하중-철근 변형률 곡선을 나타내는데 강선의 경우에 있어서도 철근의 경우와 유사하게 나타나고 있다.

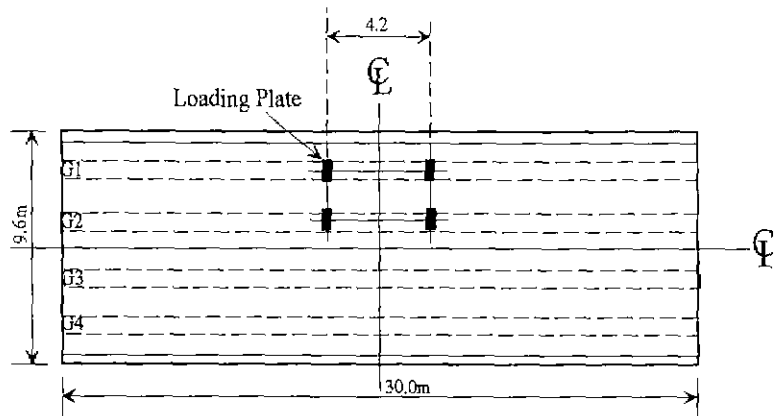


그림 11 4점 재하시의 재하위치

### 3.4 초과하중 및 극한하중단계 실험결과

반력 시스템에 의한 초기하중 분석을 수행한 후 파괴하중까지의 재하를 위하여 직접 인장방식의 재하를 수행하였다. 총 하중 400t이 재하되었을 때 상부측 콘크리트의 파괴가 관찰되기 시작하였으며 이후 총하중 440t 재하시에 교량의 압축측 콘크리트에 있어서 심각한 손상이 발생함에 따라 추가적인 하중의 재하는 중단하였다. 무엇보다 상부의 연석부가 가장 먼저 파손되기 시작하였으며 최종적인 하중단계에서는 상부 슬래브에서도 심각한 균열이 발생하기 시작하였다.

본 실험결과에 의하면 파괴시의 거더 1의 중앙치짐은 약 240mm, 거더 2는 170mm, 거더 3는 약 80mm, 거더 4는 약 20mm로 나타났다. 직접재하가 이루어지는 거더 1과 거더 2는 상당히 큰 치짐을 보이고 있으며, 특히 약 80톤 이후의 하중에 대하여 치짐의 급격한 증가가 나타나고 있다. 그림 14는 최종하중 단계까지의 하중-치짐 곡선을 나타내고 있으며 그림 15는 거더의 하중-철근 변형을 곡선을 나타내고 있다.

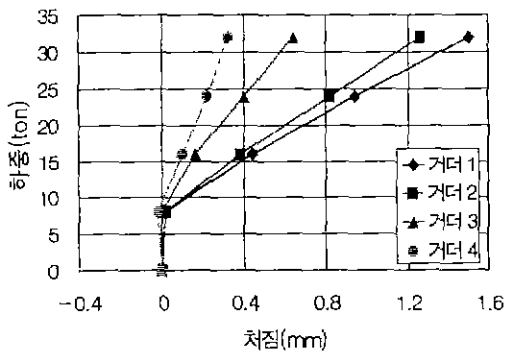


그림 12 거더의 하중-치짐 곡선(4점 재하)

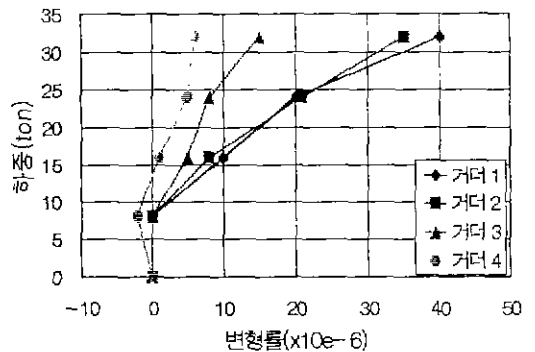


그림 13 거더의 하중-치짐 곡선(4점 재하)

### 3.5 대상 교량의 구조해석

구조해석은 단일거더와 전체 교량에 대하여 수행되었다. 단일 거더의 경우 2차원 비선형 해석으로 층요소(Layered Element)를 사용하여 재료비선형 및 기하비선형을 고려한 구조해석을 수행하였다. 전체교량은 3차원 비선형해석으로 수행하였는데 일반적인 해석방법에 따라 상부 슬래브는 셸(Shell

요소로, 거더와 격벽은 뼈대(Frame) 요소로, 강선은 트러스(Truss) 요소로 모델링하였으며 거더와 강선은 강체로 연결시켰다.

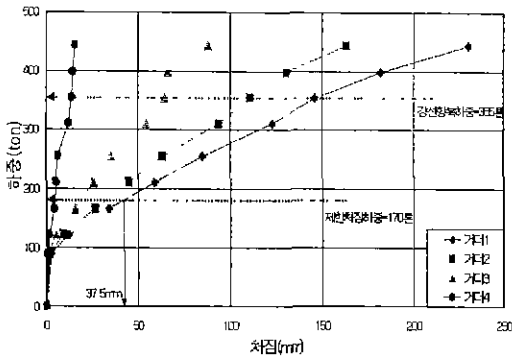


그림 14 거더의 하중-처짐곡선

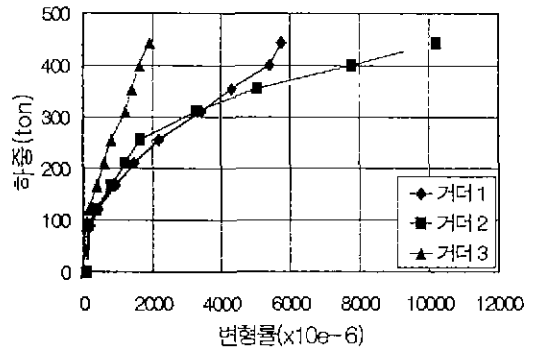


그림 15 거더의 하중-회전변형곡선

#### 4. 결론

본 연구에서는 교량의 실제거동을 하나의 시스템으로서 분석하고 실제교량의 거동을 좀더 정확히 평가할 수 있는 방안의 도출을 위하여 노선변경으로 사용하지 않게 되는 실제의 PSC교량을 극한(파괴)상태까지 직접 재하할 수 있도록 실험을 수행하였다. 이를 통하여 실제 PSC거더교량의 구조적 거동특성을 사용하중단계로부터 극한상태까지 실험하였고, 각 중요부위별로 교량의 응답과 거동을 계측하였다. 특히 반복재하를 통하여 교량의 강성저하과정을 하중단계별로 관찰하였고, 단일거더가 아닌 교량의 전체시스템으로서 하중에 저항하는 거동을 분석하였다.

#### 감사의 글

실험수행에 적극 협력하여 주신 (주)삼정스트랜드콘 및 삼부토건(구미-동대구 확장 5공구 현장) 관계자 여러분께 진심으로 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 건설교통부, 시설안전기술공단 "교량 정밀안전진단 및 통과허용하중 산정기법 개선" 1999
2. Aktan, A. E. et al., Nondestructive and Destructive Testing of a Reinforced Concrete Slab Bridge and Associated Analytical Studies,, Federal Highway Administration, Washington, DC, 1992
3. Shenoy, C. V., and Frantz, G. C., Structural Tests of 27-Year-Old Prestressed Concrete Bridge Beams, PCI Journal, Sep.-Oct., 1991, pp.80-90