

Fatigue Test of Concrete Deck Plate Bridge

구민세\* 정 란\*\* 김공환\*\*\* 김종승\*\*\*\* 노영숙 \*\*\*\*

ABSTRACT

In order to investigate the behavior of newly developed PC deck plate bridges, 1/2 scale model specimen was tested under the 2 million cycles of fatigue loading. Forces between PC members were transferred by shear keys located at the faces of deck plate and girders.

The test results showed that the test specimen maintained its original strength after 2 million cycles of fatigue loading.

1. 서 언

조립식 교량공법은 기존의 교량건설 공법의 단점을 개선시킬 수 있는 우수한 공법으로 이에 대한 연구와 함께 여러가지 형태의 조립식 교량 공법이 실용화 되어 이용 되고 있다. 그러나 현재 실용화 되어 주로 사용하고 있는 조립식 교량 공법들은 주형을 PC부재로 제작하고 현장타설 콘크리트 상판을 설치하거나 프리캐스트판을 설치하고 그 위에 철근을 배근하고 현장 콘크리트를 타설하는 방법들이며 교량 상부구조 전체를 조립식화 하지는 못하고 있다. 물론 15m 이하의 단경간 교량에서는 채널 또는 상자형의 프리캐스트 부재를 현장 조립함으로써 교량 상부구조 전체를 조립화 하는 공법도 있으나[1] 중경간 이상에서는 운반 및 설치등의 문제로 이용이 불가능하다. 또한 장경간 교량에서는 세그먼트 PS교량형태로 상부 구조 전체를 조립화 하고 있으나 이 공법은 중경간 (20m-40m)교량에서는 비경제적이다.

본 연구에서는 중경간 교량의 상부 구조 전체를 프리캐스트 콘크리트 부재로 제작하여 조립, 건설하는 공법을 제안하였다. PC 주형, 프리캐스트 상판 및 다이아프램을 현장콘크리트를 사용하지 않고 그라우팅과 볼트로써 긴결시키는 방법으로 시공함으로써 공사 기간을 대폭 단축시킬수 있다.

본 논문의 내용은 제안된 조립식 구조의 구조적 거동을 분석하고 그 적합성을 입증하기 위하여 수행된 실험모형의 피로시험과 파괴시험에 관한 것이다.

2. 실험계획

2.1 시험체

2.1.1 시험체의 설계

시험체는 본연구의 목적에 맞도록 시공의 간편성을 위하여 각 부재사이의 접합부를 철근이나 기타 기계적 정착 장치로 연결시키는것을 피하고 그라우트 모르타르로써 상판 슬라브나 보에 설치된 전단키를 채움으로써 부재와 부재사이의 힘을 전달하도록 설계 되었다.

모델 실험에서 나타날수 있는 오차를 최대한 줄이기 위하여 1/2 축척으로 제작된 시험체의 평면 및 측면, 전단키의 위치 등은 그림 2.1 에서 보는 바와 같다.

시험체에 사용된 철근의 특성은 표 2.1 과 같다. 또한, 콘크리트는 압축강도 300 kg/cm<sup>2</sup>의 것을 사용하였고 접합부에는 유동화제를 혼합한 모르타르를 사용 하였다.

표 2.1 시험체에 사용된 철근의 평균 강도

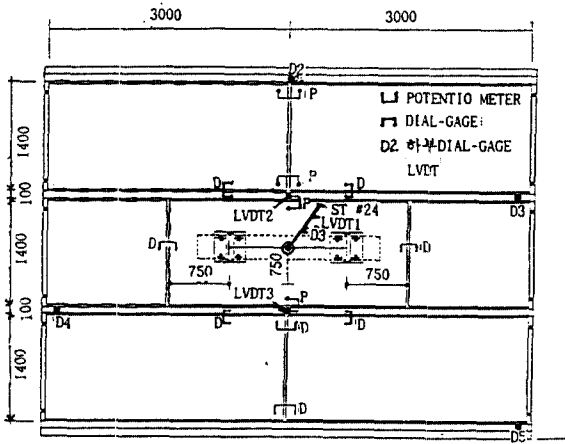
철근	단면적 (cm <sup>2</sup> )	평균항복강도 (kg/cm <sup>2</sup> )	평균파괴강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
D6	0.137	3500	4200
D13	0.71	3800	5500
D16	1.99	3400	4500

\* 인하대 토목과 조교수

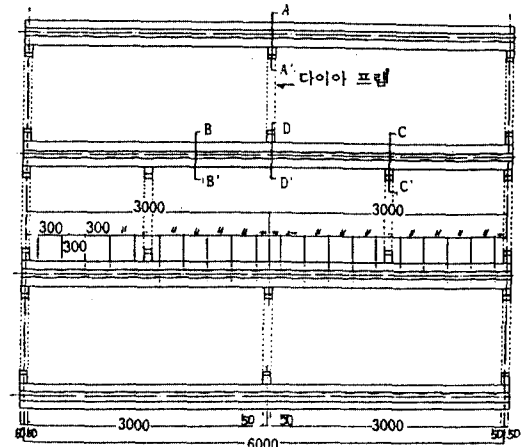
\*\* 단국대 건축과 부교수

\*\*\* 건설기술연구원 구조실장

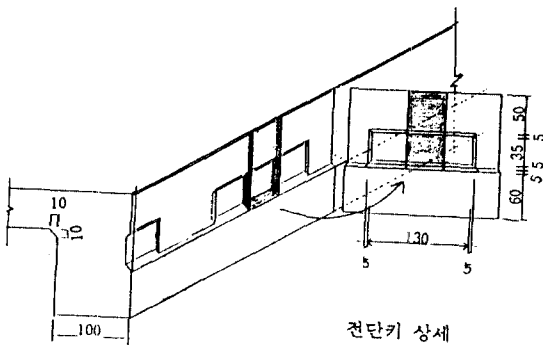
\*\*\*\* 단국대 대학원



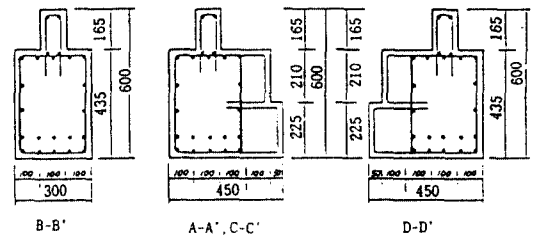
전단키 위치와 측정기기 위치



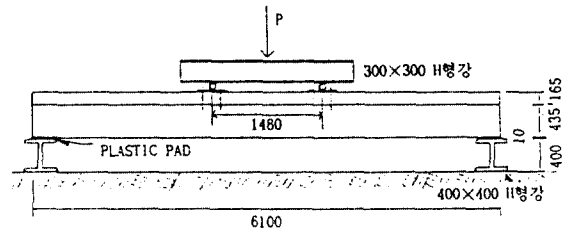
다이아프램



전단키 상세



보부분의 철근배근 현황



하중 재하위치

그림 2.1 시험체의 설계

### 2.1.2 시험체의 조립

시험체는 28일간 양생한후 실험실에서 조립 하였다. 실험대(H-400x400) 위에 프리캐스트 주형을 설치하고 다이아프램은 철판과 볼트를 이용해서 접합하였고, 다이아프램 접합후 PC 상판을 제 위치에 놓은후 상판과 주형 사이의 접합부에는 그라우트 모르타르를 주입 하였다. 하중재하시 지점에서 교량의 횡방향 이동을 방지하기 위하여 안쪽보의 네 귀퉁이에 스톱퍼를 설치 하였다. 접착 그라우트 모르타르에는 타설시 시공성을 높이기 위하여 유동화제가 정량 계량되어 사용되었으며, 시멘트는 조강시멘트를 사용하였다. 재하용 actuator에는 하중분산용 형강을 부착하여(사진 2.1 참조) 실물크기 4.2m 간격의 각 하중점에 하중이 P/2 가 되게끔 설치하여 트럭하중의 후륜하중을 모델링하였다.

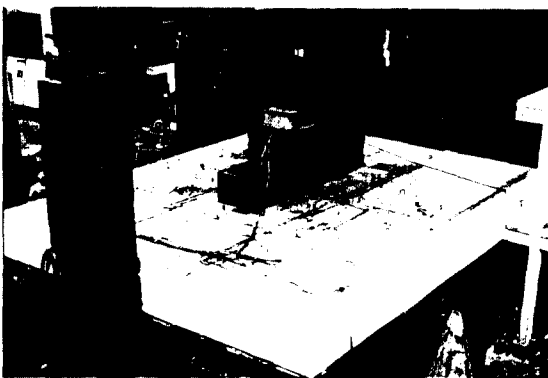


사진 2.1 시험체와 실험장치

## 2.2 실험 방법

### 2.2.1 하중

실물크기 시험체의 피로실험하중은 다음과 같이 산정되었다. 도로교표준시방서의 DB24 트럭 운하중 9.6t에 충격계수 1.38, 피로하중계수 1.25를 고려하여 피로시험을 위한 최대 재하 운하중은  $9.6 \times 1.38 \times 1.25 = 16.6 \text{ t/wheel}$ 로 산정하였다. 또한 평균피로하중은 설계 운하중인 9.6t으로 하여 최소하중은 2.6t으로 산정하였다. 1/2 축소모형인 본 시험체는 최대  $16.6/4 = 4.15 \text{ t/wheel}$ , 최대  $2.6/4 = 0.65 \text{ t/wheel}$  사이의 피로하중으로 실험되었다.

본 실험에서는 2점 재하 하였으므로 actuator에서는  $4.15 \times 2 = 8.3\text{t}$  이 최대피로하중,  $0.65 \times 2 = 1.3\text{t}$  이 최소하중으로 작용하도록 계획 하였다.

시험체에 재하된 하중은 약  $210 \text{ kg/cm}^2$ 의 유압으로 구동되는 25t Hydraulic Actuator 를 사용하여 3Hz 의 Sine Curve 로써 작용 되었다.

총 200만회로 계획된 피로 하중의 재하는 컴퓨터에 의해 제어 되는 MTS system을 이용 하였다 (그림 2.2 참조). 시험체의 재하 위치는 그림 2.1 에서 보는 바와 같다.

### 2.2.2 재하 장치

재하 장치로는 MTS사의 용량 25t actuator 를 사용하여 actuator 와 시험체 사이에 부착된 load cell 과 변위계(LVDT) 로부터 얻어지는 하중과 변위는 증폭되어 MTS 본체와 연결되고 다시 컴퓨터 터미날을 통하여 기록장치에 자동 기록 되었다.

### 2.2.3 측정 기기

측정기기로는 상판과 주형사이의 벌어짐을 측정하기 위하여 potentiometers와 dial-gages가 병용되었고, 상판 하부와 주형의 수직 처짐을 관찰하기 위하여는 LVDT 와 dial-gages 가 사용 되었다. 또한 각부 응력을 계산하기 위하여 철근에 strain gages가 부위별로 부착 되었다. 각 기구별 측정기기의 위치는 그림 2.1에서 보는 바와 같다.

총 36개의 채널로 이루어진 수집장치에 의해 수집된 실험결과는 컴퓨터에 연결된 digital voltmeter를 통하여 입력되어 자동적으로 기록 되었다.

## 2.3 실험

시험체는 피로하중에 의한 본 실험에 들어 가기

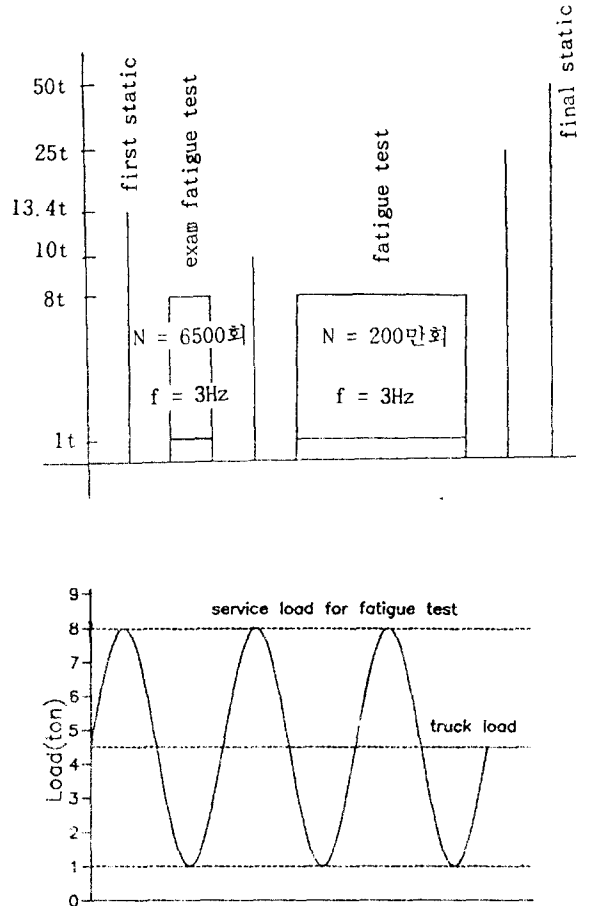


그림 2.2 재하하중 이력곡선

전 설계하중의 2배에 상당하는 약 13.4t 까지 2회 가력하여 각부의 처짐량, 연결부의 벌어짐, 변형량 등을 측정하였고 다시 원상복귀 되는 것을 확인한 후 약 200만회의 피로하중을 가하는 본 실험을 실시하였다. 피로실험 후에는 최종 파괴실험을 실시하여 최대 재하능력을 측정하였다. 약 200만회의 피로실험중 약 30만 cycle 단위로 1~8t까지의 정적하중을 실시하여 기록한 data와 관찰점은 다음과 같다.

- 재하된 하중과 stroke.
- 교량 각 부위의 수직 처짐과 하중 전달 상태.
- 조립된 상판과 상판 사이, 상판과 주형 사이의 벌어짐.
- 판의 길이 방향과 폭 방향 철근, 그리고 보 길이 방향 철근의 변형율.
- 상판 상, 하부와 주형, diaphragm의 균열 등.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 전체적인 거동과 균열 진행 상태

실험전 상판 표면 자체에는 건조수축에 의한 균열이 없었으나 모르타르에 의해 접착된 부분에는 약간의 건조수축에 의한 균열이 있었다.

상판에 있어서 균열의 발생 여부는 각 정적하중 실험때 마다 주의깊게 관찰 되었다. 상판 상부에서 주형과 상판의 연결 부위에서 최초의 소규모 균열이 발생된 것은 70만회의 피로실험 후의 정적하중 실험에서 였으나 거의 무시 할만 하였고, 이후 피로실험이 끝날 때까지 별다른 진전은 보이지 않았다. 반면 상판 하부에서는 균열이 하중회수의 증가에 따라 진전됨을 관찰할수 있었다.

8만회의 피로실험 이후에서 부터 발달하기 시작한 상판 하부와 중앙의 다이아프램의 균열은 약 100만회 까지 재하점을 중심으로 조금씩 증가 되었고, 100만회 이후 중앙의 다이아프램에 급격한 균열의 진전이 있는 뒤로는 더이상 균열의 진전은 없었다. 상판하부 균열의 형태는 재하점을 중심으로 상판의 네 변을 향해 방사선 형태로 퍼져 갔으며, 주된 균열은 중심에서 상판의 네 모서리를 향하여 항복선에 따라 X자 형태로 발전 되었다.

##### 3.1.1 PRE-FATIGUE STATIC TEST

초기 정적하중 실험은 설계하중의 2배에 해당하는 13.4t까지 가력되었다. 그중 약 9t 정도에서 상판하부에 미세한 균열이 발견되었고, 상판상부에는 균열이나 연결부의 벌어짐은 관찰 되지 않았으며, 다이아프램에는 균열이 관찰되지 않았다.

또한, 7t정도에서 내측주형의 처짐량은 약 0.7mm 정도였으며, 외측주형의 처짐량은 약 0.3mm로 해석치와 거의 일치함을 볼수있었다(표 3.1 참조).

##### 3.1.2 FATIGUE TEST

총 200만회 가력된 피로시험중 초기 실험주기 6500회에서 상판하부의 균열이 증가되었고 중앙의 다이아프램에 미세한 균열이 발견되었으며 약 8만회 까지는 더이상의 균열의 진전은 없었다. 정적하중실험은 대략 30만회 단위로 실시 되었고 이를 통하여 피로하중에 의한 미세한 양의 응력 퇴보 현상을 확인 하였다.

##### 3.1.3 POST-FATIGUE STATIC TEST

200만회의 피로실험후 전체적으로 교량을 점검 관찰하였고 최종 정적하중실험이 실시되었다. 약

50t 정도에서 상판의 편칭전단에 의한 파괴로 실험은 종료되었다.

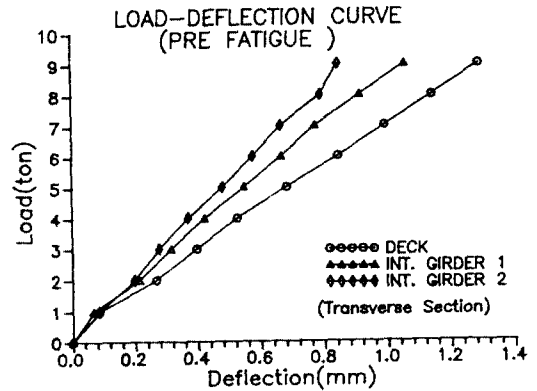


그림 3.1

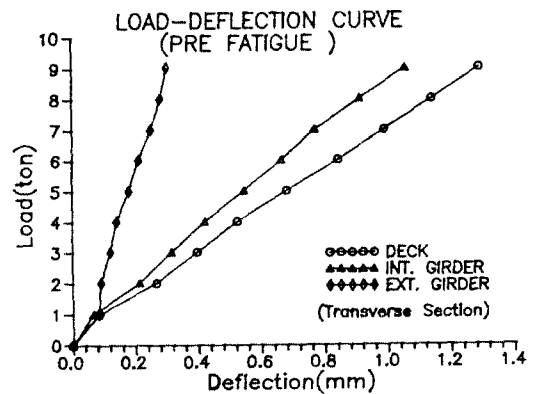


그림 3.2-1

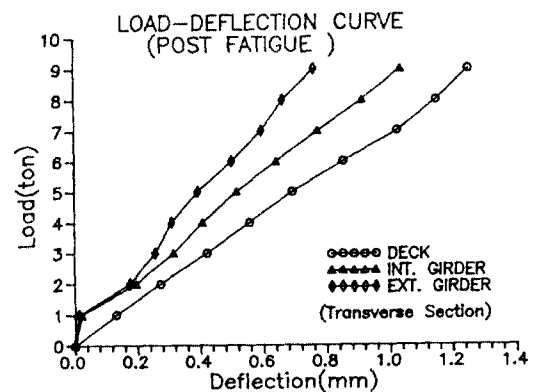


그림 3.2-2

### 3.2 하중 - 처짐 관계

4개의 linear potentiometers와 3개의 LVDT, 14개의 dial gages(상부 8개, 하부 6개)가 상판연결

부의 벌어짐과 수직처짐 그리고 주형의 수직처짐을 측정하기 위해 사용되었다. 각 위치에서의 대표적인 하중-처짐의 관계를 그림 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5에 제시하였다.

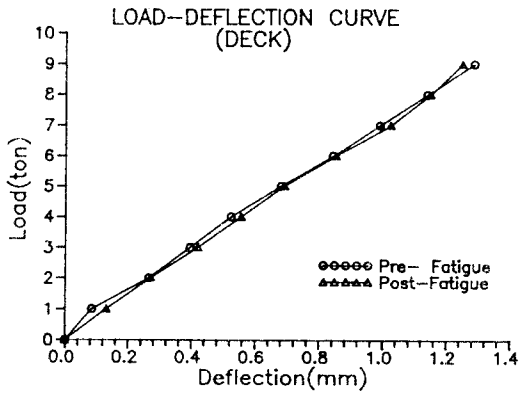


그림 3.3

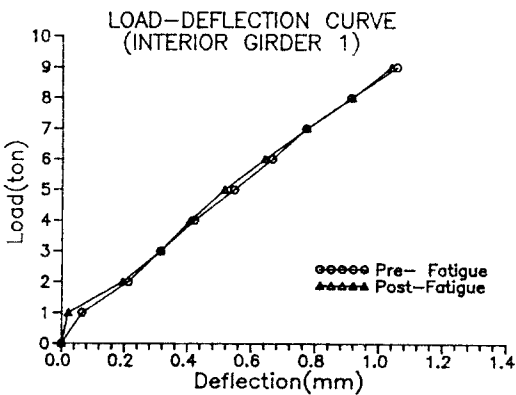


그림 3.4

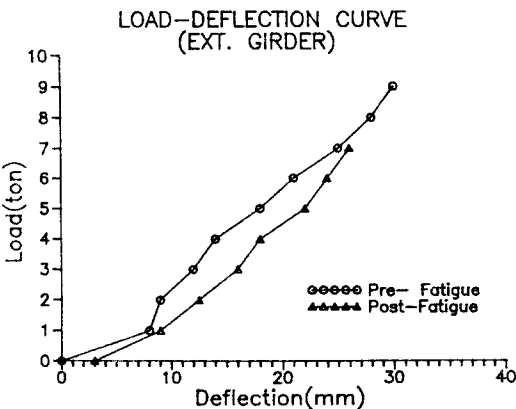


그림 3.5

그림 3.1은 상판에 균열이 발생되기전의 정적하중실험의 하중-변형 관계이다. 하중점 사이의 판의 중앙부를 가로지르는 판보와 같은 선상의 안쪽보를 관찰 하였다. 관찰에 의하면 하중이 재하됨에 따른 각 위치에서의 하중-변형 관계는 13.5t 까지 거의 선형이며 이 pre-fatigue static test는 2회 실시 되었다.

그림 3.2는 가력점 중간보, 바깥보의 하중-처짐 곡선을 각각 피로실험전과 피로실험후로 나누어 보여주고 있다. 피로실험전이나 후에도 강성변화를 거의 보이지 않고 있어 본 시험체는 약 200만회의 피로하중에도 불구하고 강도에 손상을 입지 않고 있음을 알 수있다. 이것은 상판하부의 미세한 균열이 피로실험 후에도 상판의 강성에 큰 변화를 주지 못했다는 것을 뜻한다. 마찬가지로 방법으로 측정치를 각 부위별로 구분하여 피로실험 전후로 비교한 것이 그림 3.3, 3.4, 3.5이다. 이 그림에서도 피로 실험 전, 후의 거동이 선형으로 거의 흡사함을 볼 수 있다.

시험체의 가력점 상판(LVDT1), 중간보(LVDT2), 바깥보의 중앙에 각각 설치된 LVDT와 dial-gage에 의해 얻어진 하중-처짐 관계는 그림3.2와 같다. 8t 까지 거의 탄성변형을 하고 있으며 처짐은 하중을 제거하자 곧 원점으로 회복되었다.

피로실험후 최종 파괴시험시 측정된 세부위의 하중-처짐관계 곡선은 그림 3.6에서 보는 바와 같다.

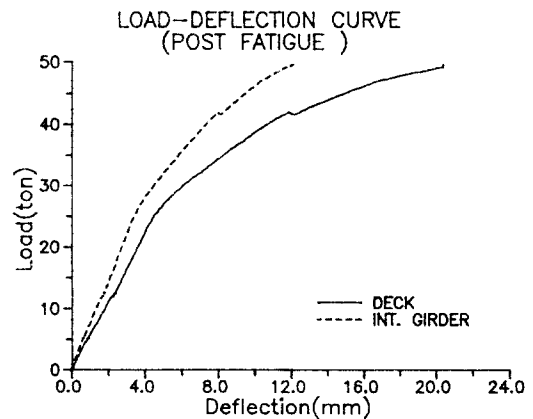


그림 3.6

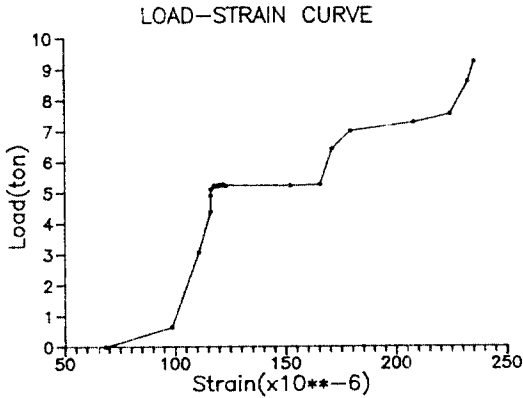
### 3.3 상판과 상판사이의 벌어짐

육안 및 dial-gage에 의한 벌어짐의 정도는 시중 일관되게 전무한 상태였다. 다만 포텐셜미터에 의한 기록에 의하면 중앙 우측의 것 만이 극미한

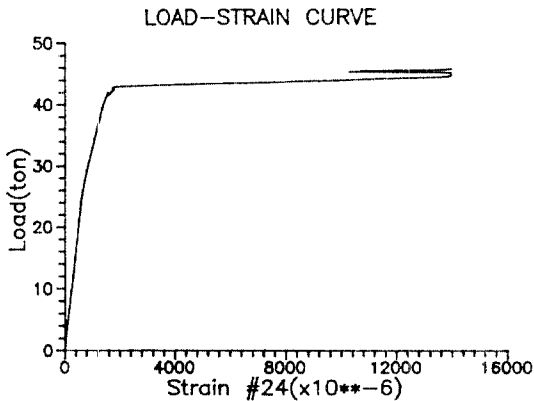
값을 나타내고 있으나 이것 또한 외부에서 인입된 noise현상 인듯하다.

### 3.4 철근의 변형도

그림 3.7 (a), (b)는 가력점(actuator의 위치) 아래 슬라브 상판내의 작은보 하단근에 묻힌 strain gage(#24)에 의해 측정된 철근의 변형율을 보여주고 있다. 그림에서 보는바와 같이 피로 실험 후에도 철근의 변형율은 원점으로 복귀 하였고 약 40t 부근 까지도 탄성변형 하는것을 관찰할수 있다.



(a) pre-fatigue



(b) post-fatigue

그림 3.7 가력점 아래 보 하단근의 철근 변형율의 변화

### 3.5 이론적인 해석결과와의 비교

본 시험체의 거동을 범용 프로그램인 ADINA를 이용하여 이론적으로 해석한 결과를 비교하면 표 3.1 와 같다.

표 3.1 하중 P = 7.0t에서 각 부위 처짐비교 단위 : mm

위치	이론치	pre-fatigue	post-fatigue
A	1.133	0.989	1.023
B	0.708	0.668	0.593
C	0.306	0.25	0.026

A : 상판의 중앙부  
B : 내측 주형 중앙부  
C : 외측 주형 중앙부

### 4. 결론

실험 결과를 분석하여 요약 하면 다음과 같다.

(1) 제안된 중 경간용 상판 조립식 프리 캐스트 콘크리트 교량의 접합부 시스템은 총 200만회 의 피로 시험 후에도 충분한 강도를 유지하여 본 교량 구조물을 실용화 시키는데 문제가 없으리라 판단 된다.

(2) 제안된 PC 교량 시스템은 AASHTO 트럭 휠 하중의 약 5배정도 큰 강도를 유지 하였다.

### 감사의 글

본 연구의 실험을 적극 후원 해주신 대농산업 (주) 김 일농 사장님과 대농건설(주) 박 후근 사장 님께 감사 드립니다. 또한 실험에 필요한 장소 및 실험장치를 제공해주신 해사기술연구소 구조실험실 실장님 이하 직원 여러분들께 감사 드립니다.

### 참고 문헌

1. 구민세등, 찬널형 P.C교의 실물 실험 연구, 한국 콘크리트학회 학술발표회 논문집 제2권 제2호 1990.11.
2. Fang, I. Behavior of Ontario-type bridge deck on steel girders, Ph.D dissertation, University of Texas at Austin, 1985.
3. 도로교표준시방서, 건설부