

## 이동식 재하장치에 의한 프리스트레스트 콘크리트 빔의 안전도 분석

Safety Assessment of Prestressed Concrete Beam By Transferable Loading Tester



박선규\*



천응덕\*\*



유문식\*\*\*



한경봉\*\*\*\*

### 1. 서 론

국내에서 설계·시공되어 유지 관리되는 교량중 Prestressed Concrete(PSC) Beam 교량이 차지하는 비율은 약 15% 정도로 비교적 높은 비율을 차지하고 있다. 시공이 간편하고 경제적이란 이유로 PSC-Beam 교량은 점차 늘어날 전망이다. 그러나 PSC-Beam 자체시험 및 연구는 매우 저조하였으며 대부분의 연구는 PSC-Beam을 축소 제작하거나 Sampling한 시험 결과를 실제 설계와 시공에 적용하였다.

이에 대하여 본 연구는 ○○교 PSC-Beam에 발생한 망상균열을 보수한 상태의 실제 PSC-Beam을 대상으로 기존의 재래적인 재하시험 방법과는 달리 그림 1처럼 국내 최초로 개발된 이

동식 재하장치를 이용하여 현장재하시험을 실시하였고, PSC-Beam의 안전성을 조사하여 PSC-Beam의 물리적, 기능적 특성을 규명하고 균열발생여부를 검증하였다.

일반적으로, PSC-Beam 교량에서는 상부의 전하중을 하부에 위치한 각각의 PSC-Beam이 그 하중을 견뎌내고 있다. 본 연구에서는 상부하중을 한 개의 PSC-Beam이 받는 집중하중으로 환산하여 재하하였고, PSC-Beam 제작시의 설계에 의한 PS 긴장력에 대하여 슛음량을 측정하였다. 그리고, 설계하중이 작용하였을 때 처짐과 변형율을 측정하고, PSC-Beam 하중재하에 의한 콘크리트의 휨강도를 측정하였으며, 외관조사, 강도측정, 부재두께측정, 철근탐사 등을 병행 조사하였다. 최종적으로 그 결과를 분석하여

\* 정희원, 성균관대학교 부교수

\*\* (주)용마엔지니어링 상무이사

\*\*\* (주) KR 기술연구소 책임연구원

\*\*\*\* 성균관대학교 석사과정

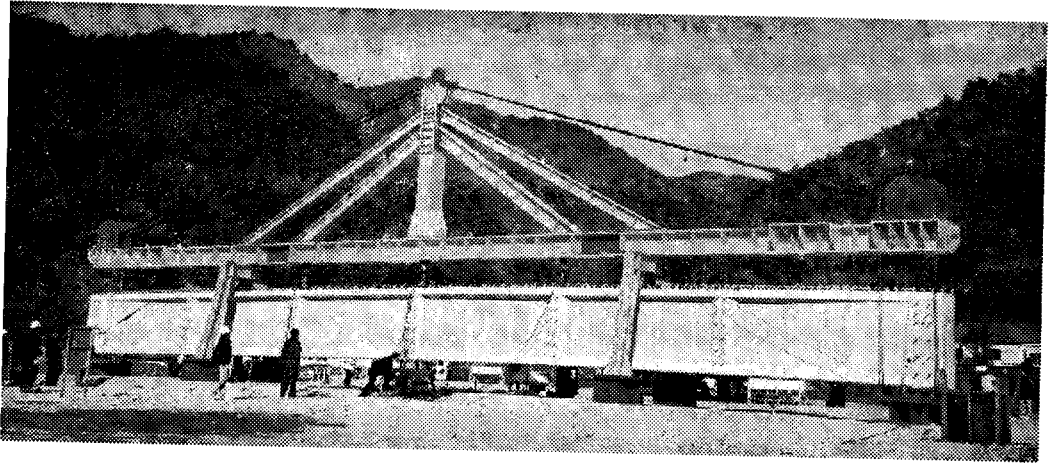


그림 1 이동식 재해장치

PSC-Beam의 안정성 여부를 판단하였다. 일반적인 재하시험 순서도는 그림 2와 같다.

험결과 신뢰성을 확보하기 위하여 현재 공증을 받은 콘크리트 압축강도 추정 제안식들을 적용하여 평균값으로 PSC-Beam의 압축강도를 추정하

## 2. 시험대상 PSC-Beam

시험 대상 PSC-Beam은 ○○교 상부구조에 설치될 연장 30m의 표준단면 PSC-Beam으로 제작장에서 1996년 12월 23일에 타설 완료되어 현장에 보관중인 상태였다. 양생은 증기양생을 실시하였다. PS 긴장전부터 상부단면에 미세균열이 발생하였고, 양쪽 단부에 수직 및 사방향 균열이 나타나고 있었으며, 상부 플랜지와 가로보 상단에서 수직균열이 나타나고 있었다. 일부는 상부 플랜지 양면으로 균열이 한바퀴 돌아 발생되었으며, PSC-Beam 전 표면에 망상균열 형태를 나타내고 있었다. 이에 대하여 재하시험을 실시할 당시는 표면처리 및 보수를 실시한 상태였다.

본 연구는 이미 균열에 대한 보수가 실시된 PSC-Beam을 대상으로 외관조사를 실시하였으므로 외관상 별다른 문제점은 발견되지 않았다.

본 연구에서는 PSC-Beam의 품질상태 및 시공상태를 파악하기 위하여 콘크리트 비파괴 강도를 추정하기 위한 반발경도 시험 및 초음파 탐사 시험을 수행하였으며, 철근배근 상태조사도 실시하였다. 각 항목별 시험위치 및 측정개소는 미리 외관조사를 실시한 후에 구조부재 및 외관상태를 고려하여 선정하였다. 콘크리트 강도의 비파괴 시

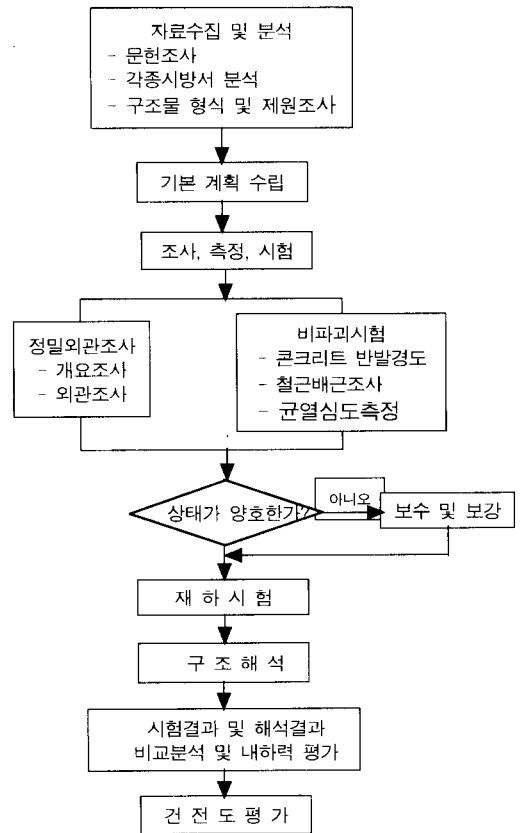


그림 2 과업수행 순서도

였다. 그 결과 반발경도법은 콘크리트 압축강도가 347 kg/cm<sup>2</sup>, 복합법은 396 kg/cm<sup>2</sup>로 추정되어 구조상 안전 기준치를 상회하므로 강도 측면에서는 이상이 없다고 판단하였다. 또한 철근탐사 결과 콘크리트 피복 두께 및 철근 배근간격은 설계도면과 일치하는 것으로 나타났다.

### 3. 현장재하시험

현장재하시험은 대상 구조물의 실제 거동을 파악하여 안전성 및 내하력을 평가하기 위하여 필요한 자료를 획득할 목적으로 실시한다. 따라서 구조물의 특징에 따라 측정부위 및 요소의 선정이 중요하며 이에 따른 재하방법의 선택이 중요하다.

콘크리트시방서에 따르면 구조물의 콘크리트가 공사중 동해를 받았을 우려가 있을 때, 콘크리트 압축강도 시험결과 강도에 의심이 있는 경우, 공사중 구조물의 안전성에 어떤 근거가 있는 의심이 생겼을 경우 등에 책임기술자가 필요하다고

인정할 때 재하시험을 실시하도록 하고 있다.

본 PSC-Beam에 대한 현장 재하시험은 PSC-Beam의 휨거동에 대한 연구이므로 앞에서 논한 바와 같이 이동식 재하시험장치를 통하여 하중을 0.5ton씩 단계별로 하중을 증가시켰으며 PSC-Beam에 고른 하중으로 재하 하기 위하여 3개의 유압잭이 일정한 유압을 유지하도록 조정하였다. 하중재하는 유압잭당 14 ton까지 하중을 가하였다. 하중에 따르는 PSC-Beam의 휨거동에 대한 처짐 및 변형률을 계측장비인 EDX-1500A를 통하여 측정하였다.

### 3.1 재하시험장치

#### 3.1.1 이동식 재하장치

국내 최초로 개발된 이동식 재하장치로서 재하 방식은 삼각 트러스 타입의 재하대에 PSC-Beam 거치 후 유압잭을 이용하여 하중을 재하하는 유압 하중 형식이다.

기존의 재래식 현장 재하장치와는 달리 조립식

표 1 재래식 재하장치와 이동식 재하장치의 비교

구분	이동식 재하시험장치	콘크리트 블럭재하방식	어스앵커 이용 재하방식
방식	삼각 트러스 타입의 재하대에 PSC-Beam 거치후 유압 잭을 이용하여 하중을 재하하는 유압 하중 형식	현장제작된 콘크리트 받침대에 PSC-Beam을 거치하여 고정된 후 콘크리트 블럭으로 하중을 증가시키며 재하하는 하중재하 방법	PSC-Beam 위에 유압잭을 설치하고 그 위에 하중재하 받침대를 어스앵커로 고정시킨후 유압 잭을 이용하여 하중을 재하하는 유압 하중 형식
장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>교량의 정·동적재하시험 가능</li> <li>반복재하 가능</li> <li>PSC-Beam 외 단위부재 구조물 재하 가능</li> <li>재하 하중을 자유롭게 변경 가능</li> <li>조립 및 해체 이동 가능</li> <li>재하시험의 안전성 및 신뢰도가 높음.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>현장제작 가능</li> <li>시험이 비교적 단순</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>유압 하중 형식으로 재하 하중을 자유롭게 변경할 수 있다.</li> </ul>
단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>재하시험 장치의 자중이 무겁다.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>1회성 사용으로 반복사용 불가</li> <li>PSC-Beam만 재하 가능</li> <li>콘크리트 블럭 재하시 안전사고 위험</li> <li>콘크리트 블럭의 자중외에 하중 변화 불가</li> <li>하중재하시 초기값 설정의 어려움</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>비용이 고가</li> <li>1회성 사용으로 반복사용 불가</li> <li>앵커의 뺄힘 현상으로 안전사고 위험</li> </ul>
그림			

으로 설치하기 때문에 이동이 가능하며, PSC-Beam의 길이나 모양에 상관없이 자유롭게 현장 재하시험이 가능하다. 그리고, 반복적인 재하가 가능하기 때문에 정·동적 재하시험이 가능하다. 또한 기존의 1점 재하 방식과는 다르게 3점 재하 방식을 채택하여 국부적인 파괴를 방지할 수 있다.

### 3.1.2 재래식 재하장치와 이동식 재하장치의 비교

이동식 재하시험 장치와 기존의 재래식 재하장치와의 상세비교는 표 1과 같다.

이동식 재하시험 장치는 하중이 3개의 유압잭을 통하여 PSC-Beam에 재하된다. 그리고 각각의 유압잭에 작용하는 유압을 동일하게 조정하여 동일한 하중을 3점 재하할 수 있도록 한다.

기존의 재하방식은 PSC-Beam에 1점 재하하는 방식인데 비하여 본 연구에서 사용한 이동식 재하시험 장치는 3점 재하방식을 채택하였다. 이러한 3점 재하방식은 하중작용지점에서의 국부적인 파괴를 방지할 수 있는 장점이 있으며 PSC-Beam의 집중하중에 대한 영향과 동시에 자중과 같은 분포하중의 영향 또한 동시에 고려할 수 있다.

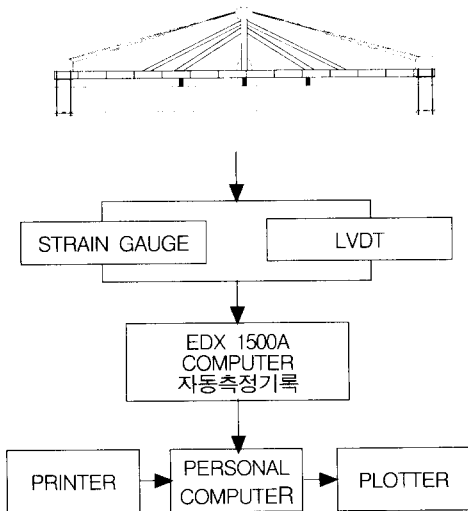


그림 3 재하시험 현장측정 시스템 개략도

## 3.2 재하시험

### 3.2.1 재하시험 현장측정 시스템

재하시험의 현장측정 시스템의 개략적 내용과 순서 그림 3과 같다.

### 3.2.2 계측기 설치

Strain Gauge는 휨변형율을 계측하기 위하여 그림 3과 같은 위치에 10개를 설치하였으며

LVDT는 휨에 의한 처짐을 계측하기 위하여 PSC-Beam 하단부에 3개를 설치하였고, 이동식 재하장치와 PSC-Beam 사이에 1개의 LVDT를 설치하여 이동식 재하장치와 PSC-Beam 사이의 상대변위를 측정하였다. 또한, 하중변화에 따른 변형률이나 처짐값을 정확히 측정하기 위하여 하중이 재하되는 3개의 유압잭중 중앙에 위치한 유압잭 상단에 Load Cell을 설치하여 유압에 의한 하중값을 측정하였다. 게이지별 상세도는 그림 4, 5, 6, 7, 8과 같다.

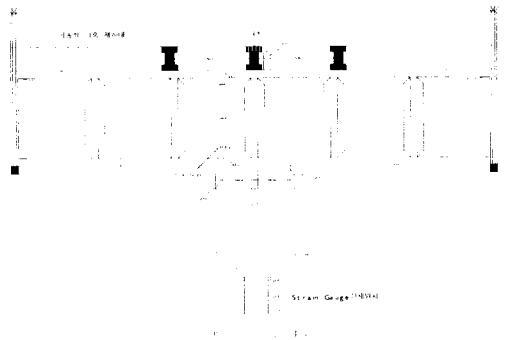


그림 4 계측 위치



그림 5 변형률 게이지 부착

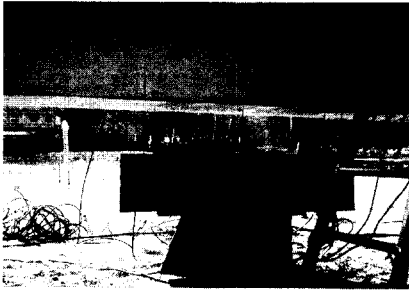


그림 6 PSC-Beam 하단부 LVDT 설치

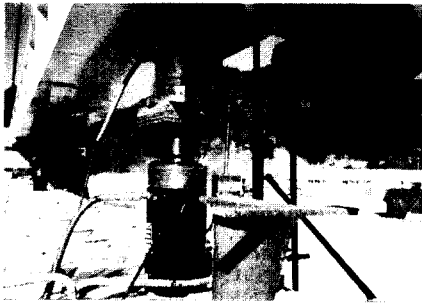


그림 7 로드셀 및 유압잭 설치

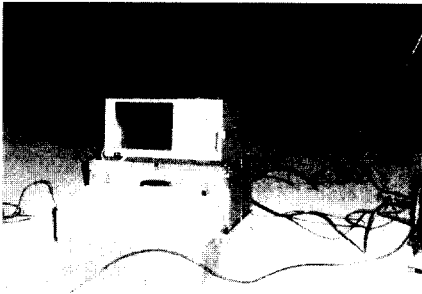


그림 8 재하시험 측정

#### 4. 시험결과

현장재하시험은 측정 대상인 PSC-Beam에 대하여 3점 재하시 1점당 최고 14ton까지 단계별로 하중을 증가시키며 3회 재하시험을 실시하였다. 이에 대한 처짐값 및 변형률 값은 그림 9, 10, 11 과 같다.

P80 Beam 현장재하시험1

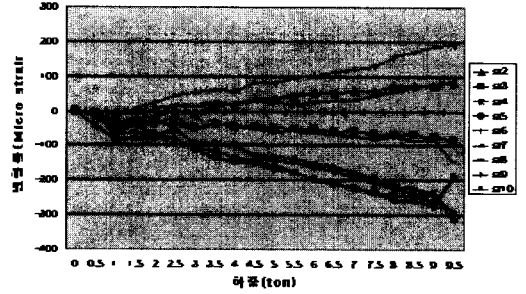
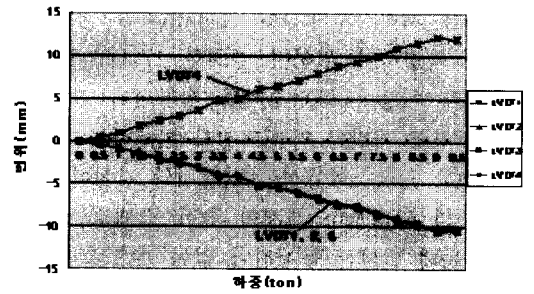
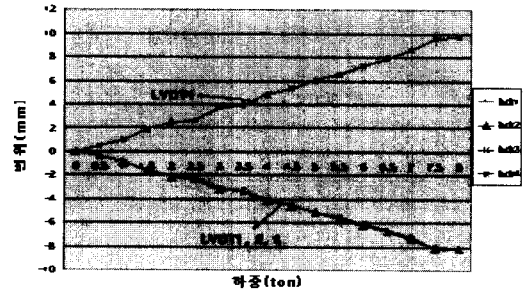


그림 9 하중-처짐관계 및 하중변형률 관계 (재하시험 1)

P80 Beam 현장재하시험2



P80 Beam 현장재하시험2

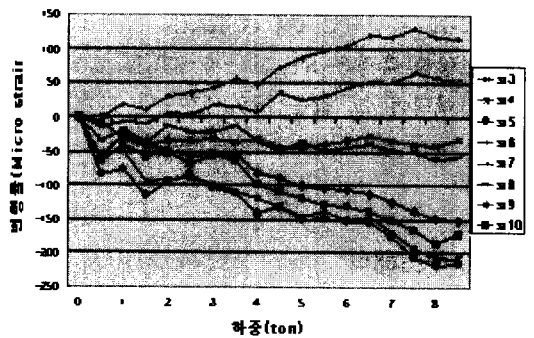


그림 10 하중-처짐관계 및 하중변형률 관계 (재하시험 2)

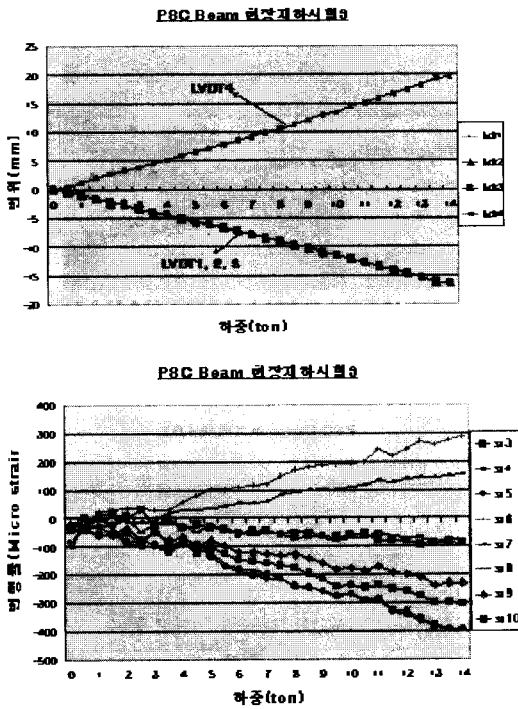


그림 11 하중-처짐관계 및 하중변형률 관계 (재하시험 3)

이동식 재하장치와 PSC-Beam과의 상대적인 변위를 측정하기 위하여 설치한 LVDT No4의 계측결과 이동식 재하장치의 상향변위는 PSC-Beam 하향 처짐의 약15%정도 발생하는 것으로 나타났다. 결국, 이동식 재하장치의 강성이 PSC-Beam의 강성보다 현저히 높아 실제로 하중을 재하하는데 별다른 문제점이 없는 것으로 판명되었다.

LVDT에 의한 처짐측정은 계측기의 이상없이 양호하게 측정되었으며 STRAIN GAUGE에 의한 변형률 측정은 ST No1과 ST No2가 시험도중 단락되어 그 값을 제외시켰으나 다른 데이터 값이 많아 전체적인 경향을 표현하는데는 문제가 없었다.

### 5. 구조해석

시험 구조물인 PSC-Beam이 보유하고 있는 내하력을 평가하기 위한 기초자료를 얻기 위하여

대상 구조물에 대해서 범용 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 구조해석을 수행하였다. 구조해석은 재하된 하중단계별로 구분하여 해석하였다.

구조물이 보유하고 있는 안전도를 추정하기 위한 내하력 평가는 내하력 분석 및 평가기법의 합리성과 결과의 신뢰도가 중요한 문제로 대두된다.

내하력 평가방법은 건설교통부의 『안전점검 및 정밀안전진단 세부지침, 1996』을 준용하였고 구조해석을 수행한 결과와 현장측정을 통하여 획득한 재하시험의 실측자료를 토대로 PSC-Beam의 안전성을 평가하였다.

### 5.1 구조해석

연구대상구조물인 PSC-Beam에 대한 구조해석은 Frame요소를 사용하여 해석하였다. 이때 입력자료로 사용된 부재의 단면특성 및 재료의 물성은 표 2와 같다.

표 2 단면 특성 및 재료 물성

부재명	단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (t/m <sup>2</sup> )	단면2차모멘트 (m <sup>4</sup> )
PSC-Beam	2.5	3.00×10 <sup>6</sup>	0.3841

단계별 하중에 대한 구조해석은 재하하중에 의한 구조해석값과 현장측정값과의 비교분석을 통하여 응답비를 도출하기 위하여 수행하였다. 실측값은 현장 재하시험3의 경우를 사용하여 3점 재하시 1점의 하중이 14ton이 재하될때까지의 값을 구조해석값과 비교하였다. 이때 실측응력은 측정된 변형률에 콘크리트의 탄성계수값을 곱하여 얻어진 값이다. 결과는 다음 표 3.4,5와 같다.

### 5.2 안전성 평가

하중 경우별 처짐이나 응력의 실측치를 계산치와 상대적으로 비교한 응답비를 가지고 본 과업 수행의 구조물인 PSC-Beam의 안전성을 평가하였다.

표 3 하중단계별 처짐의 응답비 (mm)

계측 번호	구분	Load Case (t)							
		0	2	4	6	8	10	12	14
LVD1	실측치	0	2.24	4.56	6.80	9.17	11.42	14.16	16.50
	계산치	0	2.91	5.83	8.75	11.66	14.58	17.49	20.41
	응답비	0	0.77	0.78	0.77	0.78	0.78	0.81	0.81
LVD2	실측치	0	2.22	4.52	6.71	9.09	11.42	14.11	16.42
	계산치	0	2.89	5.81	8.73	11.64	14.56	17.47	20.39
	응답비	0	0.77	0.78	0.77	0.79	0.78	0.81	0.81
LVD3	실측치	0	2.19	4.50	6.75	9.13	11.47	14.13	16.45
	계산치	0	2.89	5.81	8.73	11.64	14.56	17.47	20.39
	응답비	0	0.77	0.78	0.77	0.79	0.78	0.81	0.81

표 4 하중단계별 PSC-Beam 중앙단부의 모멘트

하중 (t)	Load Case (t)							
	0	2	4	6	8	10	12	14
모멘트 (t · m)	0	33.65	67.3	100.95	134.6	168.25	201.9	235.55

표 5 하중단계별 응력의 응답비 (kg/cm<sup>2</sup>)

계측 부위	구분	Load Case (t)							
		0	2	4	6	8	10	12	14
하부 Flange	실측치	0	3.78	11.20	21.80	28.82	36.29	54.28	57.28
	계산치	0	8.73	17.46	26.18	34.91	43.64	52.37	61.10
	응답비	0	0.45	0.64	0.83	0.84	0.83	1.03	0.94
하부 Flange	실측치	0	3.78	8.40	15.95	19.48	26.28	31.78	35.47
	계산치	0	5.42	10.83	16.25	21.66	27.08	32.49	37.96
	응답비	0	0.70	0.78	0.98	0.90	0.97	0.98	0.93
상부 Flange	실측치	0	-5.04	14.00	-20.7	22.55	-30.44	-37.70	-46.57
	계산치	0	6.89	-13.77	20.66	-27.55	34.41	-41.35	-48.21
	응답비	0	0.73	1.02	1.00	0.82	0.88	0.91	0.97
상부 Flange	실측치	0	-2.52	14.00	-31.63	-40.71	-48.23	-54.29	-68.36
	계산치	0	-10.21	-20.40	-30.60	-40.80	-51.00	-61.20	-71.40
	응답비	0	0.25	0.69	1.03	1.00	0.95	0.89	0.96

응답비가 1보다 작다는 것은 실제 구조물이 가지고 있는 내하력이 계산된 내하력 보다 커서 구조물이 안전하다는 것을 의미하는데, 본 과업에서 수행한 PSC-Beam의 처짐에 대한 응답비는 0.77~0.81 정도로 그 값들이 일정한 분포로 나타났으나 응력의 경우는 0.25~1.02 사이여서 그 변동폭이 컸다. 그러나 작용하중이 증가할수록 그 값들이 일정한 분포를 보였다.

현장재하시험 결과는 하중-처짐 응답비가 0.77~0.81로 나타났고, 변형률도 평균 0.85로 나타나 PSC-Beam은 구조적인 안전성을 보유하고 있는 것으로 나타났다. 따라서, 시험대상인 ○○교 PSC-Beam은 소요의 안전성을 확보하고 있어 실 구조물로 사용이 가능하다고 판단하였다.

## 6. 결 론

PSC-Beam은 시공상 오류, 즉 PS긴장 과정, 콘크리트 타설 과정, 양생과정 등과 운반상 취급 부주의, 주락 등으로 손상을 받을 수 있으며, 설계하중 이상의 과적하중에 의해 손상을 받기 쉬운 구조물이다. 손상 정도와 내하력 판단을 위해 현장에서 재하시험을 실시할 경우 현장여건상 그 적용이 불가능한 현실이었다. 이에 본 연구에서는 국내 최초로 제작된 이동식 재하장치를 개발하여 PSC-Beam의 내하력을 손쉽게 측정할 수 있었다. 본 연구에서 개발된 이동식 재하장치를 이용하여 향후 폐교량의 내하력 평가시험, 실물재하시험, 노후 교량의 정·동적 재하시험 등에 안전하고 신속하게 구조물의 안전성을 평가할 수 있을 것으로 기대한다. □