

# 폴리머 콘크리트 박스 거어더의 구조적 거동

## Structural Behavior of Polymer Concrete Box Girders

연 규석 \*  
Yeon, Kyu-Seok

김 광우 \*\*  
Kim, Kwang-Woo

이 윤수 \*\*\*  
Lee, Youn-Su

김 성순\*\*\*\*  
Kim, Sung-Soon

### ABSTRACT

The box girder was developed using polymer concrete. box girder were made for flexural behavior evaluation. The box girder was reinforced with reinforcing steel bars and fiber glass roving cloths. Failure loads were 13.5 tons and 16.6 tons for steel reinforced girder and fiber glass reinforced girder, respectively. Especially for the fiber glass reinforced girder, the shape was not changed even after failure. It is expected that application of this idea will be useful for developing under ground box, girder, utility tunnel, small stream bridge box, etc.

### 1. 서론

근년에 이르러 산업이 고도로 발전함에 따라 건설 재료에 대한 연구 개발 내용도 다양해져 최근에는 고분자 재료를 사용한 콘크리트 폴리머 복합체가 개발되기에 이르렀다. 폴리머 콘크리트는 기존의 콘크리트보다 고강도이고, 수밀성, 집착성, 내약품성, 내식성, 내마모성, 내동결 융해성 등이 우수한 장점을 가지고 있는 고성능 신소재로 판명되면서부터 건설산업 분야에서 큰 관심을 보이고 있으며, 이에 따라 우수한 성능을 구조물에 응용하기 위한 시도가 활발히 전개되고 있다. 본 연구에서는 기존의 시멘트 콘크리트나 철재를 사용한 박스 거어더의 결점을 보완하기 위해 위에서 언급한 장점들을 가지고 있는 폴리머 콘크리트를 이용한 박스 거어더시험체를 제작하여, 구조적 거동을 구명코져 한다.

### 2. 실험계획

#### 가. 사용재료

- \* 강원대 농공학과 교수
- \*\* 강원대 농공학과 교수
- \*\*\* 강원대 농공학과 대학원
- \*\*\*\* 강원대 농공학과 대학원

#### (1) 불포화 폴리에스터 수지

액상 불포화 폴리에스테르 수지 (unsaturated polyester resin)란 다염기산과 다가알코올을 반응시켜 얻어지는 불포화 폴리에스테르를 이것과 중합하는 단량체(monomer)에 용해한 열경화성 수지이다. 본 실험에 사용한 폴리머는 국내 A사의 울소타입 (ortho type) 불포화 폴리에스터 수지로서 개시제( $C_6O_6$ )가 첨가되어 있다.

#### (2) 촉매제

개시제(initiator)가 첨가된 불포화 폴리에스터 수지는 촉매제만 첨가하면 화학반응이 일어난다. 본 실험에서는 국내 A사 제품으로서 MEKPO 55 %, DMP 45 %로 구성된 표준 경화형 촉매제를 사용하였다.

#### (3) 수축감소제

본 실험에서는 수축량을 감소시키기 위하여 열가소성인 폴리스티렌을 스티렌 모노머에 용해시킨 수축감소제를 사용하였다.

#### (4) 충전재

충전재는 무기질이며 흡수성이 작아야 하는데, 본 실험에서는 저가이며 구입이 용이한 중질 탄산칼슘(heavy calcium carbonate)을 사용하였다.

(5) 골재

폴리머 콘크리트용 골재는 보통의 하천 골재를 사용할 수 있으나, 유기 불순물을 함유하지 않아야 하고, 흡수율이 0.1 % 이하이어야 한다. 본 실험에서 사용된 골재는 홍천강에서 채취한 것이다.

(6) 직조 유리섬유

현재 국내에서 유통되고 있는 유리섬유에는 E-그라스(electrical glass), S-그라스(specific glass) 및 C-그라스(chemical glass) 등이 있는데 본 실험에서 보강재로 사용된 것은 E-그라스이며, 이것의 물리적 성질 표 1과 같다.

표 1 E-Glass 의 물리적 성질

비 중	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	인장탄성계수 (kg/mm <sup>2</sup> )	비 고
2.55	350	7,400	

(7) 철근

본 실험에서 사용된 철근은 KS D 3504에 규정되어 있는 10 mm 고강도 철근으로서, 항복점 4,300 kg/cm<sup>2</sup>, 인장강도 6,800 kg/cm<sup>2</sup>을 갖는 이형철근이다.

(8) 스트레인 게이지

원주형 공시체의 변형도와 박스거어더의 변형도의 측정에는 70mm Phester Strain Gauge (KC-70-AH1)를 사용하였고, 철근의 변형도 측정에는 5 mm Phester Foil Strain Gauge (KFC-5-C1-11)를 사용하였다.

나. 시험체 제작

(1). 철근 보강 박스 거어더

(가) 단면 형상 및 치수

본 실험에서 사용한 박스 거어더는 직사각형 단면으로서 장·단변비, 즉 폭(b)과 높이(h)의 비는 1:√2 로 하였다. 제작된 시험체의 형상 및 치수는 그림 1과 같다.

(나) 콘크리트 제조

폴리머 콘크리트를 불포화 폴리에스터 수지 14.4 wt. %, 수축 감소제 1.6 wt.%, 골재 71.4 wt.% 충전재 12.6 wt.% 로 구성되어 있으며, 혼합은 소형 믹서를, 진동은 탁상식 바이브레이터(3,000 rpm)

를 사용하였다. 진동 시간은 다짐이 충분히 될 수 있도록 15분 정도로 하였으며, 양생은 20±3 °C, 습도 50~60 % 인 실험실 내에서 기건 양생하였다.

(2) 직조 유리섬유 보강 박스 거어더

(가) 단면 형상 및 치수

직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 단면 형상 및 치수는 철근 보강 박스 거어더와 동일하게 하였다. 제작된 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 형상 및 치수는 그림 1과 같다.

(나) 시험체 제작

직조 유리섬유 보강 박스 거어더에 사용된 폴리머 콘크리트의 배합비는 철근 보강 박스 거어더에 사용된 배합비와 같고, 보강재인 직조 유리섬유는 시판되고 있는 로빙 크로스로서 인장축과 양쪽 측면에만 3층으로 적층시켰다.

다. 시험 방법

휨파괴 시험은 재령 7일에서 실시 하였으며, 사용된 기기는 국내 D사의 휨강도 시험장치로서 가압은 3등분점 재하법에 의해 시험체가 파괴될 때까지 10 kgf/sec 의 속도로 일정하게 하였다. 처짐과 변형도는 하중 500 kgf 증가시 마다 측정하였다. 주응력과 인장, 압축축의 변형도 측정을 위한 스트레인 게이지를 부착시켰으며, 휨파괴 시험장치의 개략도는 그림 2와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

가. 철근보강 박스거어더의 휨 파괴특징

(1) 하중-처짐 관계

철근으로 보강된 폴리머 모르타 박스 거어더에 대한 재하 단계별 하중-처짐 관계를 구하였던 바 그 결과는 그림 3과 같다. 이 결과에서 하중-처짐 관계는 선형적인 변화를 나타냄을 알 수 있다. 그리고 파괴하중 13.5 t에서 처짐은 14 mm로서 단위 하중당 처짐량은 약 1 mm/t로 산출 되었다. 이러한 결과로부터 하중이 증가 할수록 처짐은 선형적으로 증가함을 알 수 있다.

(2) 휨모멘트-압축축 변형도 관계

재하 단계별 휨모멘트와 압축축 변형도의 관계를 나타낸 것이 그림 4이다. 이 결과에서 휨모멘트의 증가에 따라 변형도가 비례적으로 증가함을 알 수 있고 370×10<sup>3</sup> kg·m일 때 1차항복이 일어 났으

며, 그 이후에도 다시 직선적인 변화를 보이다가 파괴되었다. 파괴하중인 13.5 t이 재하될 때 최대 휨모멘트는  $460 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 였으며, 이 때의 변형도는  $550 \times 10^{-6}$ 으로 나타났다.

### (3) 휨모멘트-인장축 변형도 관계

휨모멘트-인장축 변형도의 관계를 도출하여 보았던 바 그 결과는 그림 5와 같다. 이 결과에서 보면 변형도가 비례적인 증가를 보이다가 휨모멘트가  $370 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 일 때 1차항복을 보였는데, 이는 압축축 변형도에서 보인 양상과 동일한 것이다. 그러나 1차항복 이후에는 급격한 변형도 증가로 비선형적인 변화를 보였다. 파괴점에서의 최대 변형도는 약  $1,200 \times 10^{-6}$ 으로서 압축축 최대 변형도의 2배에 달했다.

### (4) 휨모멘트-인장철근의 변형도 관계

하중 증가에 따른 휨모멘트-인장철근의 변형도 관계를 나타낸 것이 그림 6이다. 이 결과를 앞의 인장축 변형도와 비교해 볼 때, 인장축의 1차항복이 나타난 휨모멘트값  $370 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 에서 인장철근도 1차항복을 보였으며 이 때까지의 기울기도 비슷하게 나타났다. 이것은 인장철근의 덮개가 얇을 뿐 아니라 폴리머 콘크리트의 우수한 접착력으로 인하여 충분한 일체성을 발휘하고 있음을 보여주는 결과라 하겠다.

### (5) 재하 단계별 변형도 분포

박스 거어더 구조에서도 하중이 재하되면서 시험체의 각 높이별 변형도 차이를 볼 수 있는데 이 과정을 나타낸 것이 그림 7이다.

이 결과는 측정된 많은 자료 중에서 일정한 간격으로 5개를 선택해 각 점에서의 변형도를 높이별로 측정된 것을 도시한 것이다.

### (6) 주응력 산출

물체의 평면응력 상태에서 최대·최소 주응력과 주응력 방향을 산출하였는데 그 결과는 아래와 같다.

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) = 58.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 - \epsilon_1) = 29.9 \text{ kg/cm}^2$$

주응력 방향  $\phi = 35.8^\circ$

### (7) 균열 및 파괴 양상

철근보강 폴리머 콘크리트 박스 거어더의 재하시 균열 양상은 그림 8과 같다. 하중 9 t 작용시 미세한 균열이 생기다가 하중 11.25 t 작용시에는 인장축에 굵은 균열이 생겼으며, 13.5 t에서 사인장 파괴로 시험체가 파괴되었다.

## 나. 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의

### 휨파괴 특성

#### (1) 하중-처짐 관계

직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 하중-처짐 관계를 도출하여 보았던 바 그림 9와 같다. 이 결과를 보면 11 t 재하시 1차 항복이 일어났으며, 파괴 직전인 16 t 재하시 2차 항복이 일어났으나 직조 유리섬유 표면부는 파단이 일어나지 않았다.

파괴하중은 동일한 단면을 갖는 철근 보강 박스 거어더의 13.5 t 보다 3 t 정도 높은 16.5 t이었으며 처짐도 철근보강 박스 거어더의 14 mm보다 훨씬 큰 36 mm를 보였는데, 이것은 인성이 강한 직조 유리섬유로 보강되었기 때문이며, 측면 적층으로 인한 사인장 보강 효과 때문이라 생각된다.

#### (2) 휨모멘트-압축축 변형도 관계

그림 10은 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 휨모멘트 - 압축축 변형도의 관계를 나타낸 것이다. 이 결과에서 보는 바와 같이 휨모멘트가 약  $350 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 일 때 1차 항복을 보였는데 이는 하중-처짐 관계에서 1차 항복을 보인 11 t의 재하점과 일치하는 것이다. 또한 이 시험결과에서 최대 휨모멘트는 약  $520 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 이며 이 때의 극한 변형도는  $1,320 \times 10^{-6}$ 로서 매우 작게 나타났다.

#### (3) 휨모멘트-인장축 변형도 관계

그림 11은 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 휨모멘트-인장축 변형도를 나타낸 것이다. 이 결과에서도 휨모멘트가  $350 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 일 때 1차 항복을 나타냈는데 이 때까지의 변형도는 압축축 변형도와 큰 차이를 보이지 않았다. 여기서도 최대 휨모멘트는  $520 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{cm}$ 이었으며, 최대 변형도는 압축축 최대 변형도의 약 5배인  $7,200 \times 10^{-6}$ 에 달하여 매우 큰 변형도를 나타내었던 바, 이는 인성이 큰 직조 유리섬유의 보강효과 때문이라고 분석된다.

#### (4) 재하단계별 변형도 분포

직조 유리섬유 보강 박스 거어더의 깊이에 따른 재하단계별 변형도 시험결과는 그림 12와 같다. 이 결과에서 볼 때 10 t 재하시까지는 압축측과 인장측 변형도가 거의 같았으나 그 이상의 재하시에는 압축측보다 인장측 변형도가 훨씬 크게 나타났다. 이는 인장측에 적층된 직조 유리섬유의 큰 변형성에 기인하는 것으로 판단된다. 이에 따라 중립축은 10 t 재하시까지는 이동을 발견할 수 없었으나 그 이후에는 급속히 상승하는 경향을 보였다.

#### (5) 주응력 산출

철근 보강 박스 거어더의 주응력 계산에서 제시된 식을 이용하여 주응력을 산출 하였다.

$$\sigma_{\max} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_1 - \epsilon_2) = 59.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\min} = \frac{E}{1 - \nu^2} (\epsilon_2 - \epsilon_1) = 28.0 \text{ kg/cm}^2$$

주응력 방향  $\varphi = 36.6^\circ$

#### (6) 균열 및 파괴 양상

직조 유리섬유 보강 폴리머 모르타 박스 거어더의 균열 양상은 그림 13과 같다. 직조 유리섬유 보강 박스 거어더에서는 철근 보강 박스 거어더와 달리 유리섬유 내측에서 균열이 발생하므로 확실한 균열 양상의 파악이 곤란하였다. 파괴는 재하하중 16.5 t에서 일어났으며 파괴는 전단 지간의 압축측에서 일어났는데, 인장측과 양측면이 직조 유리섬유로 적층되어 있어 폴리머 모르타 부분의 파괴후 이탈을 억제하여 주기 때문이라고 생각된다.

### 4. 결 론

본 연구는 폴리에스터 폴리머 콘크리트를 사용한 박스 거어더를 개발하기 위한 기초 연구로서 철근과 직조 유리섬유로 보강된 시험체를 제작하여 휨파괴 거동을 구명하여 보았던바 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 보강재로서 철근과 직조 유리섬유를 사용하였을 때의 파괴하중은 철근 보강시 13.5 t, 유리섬유 보강시는 16.5 t으로서 섬유보강의 경우가 약 3 t 정도 하중이 높게 나타났다.

2) 균열 및 파괴 양상을 보면 철근 보강의 경우

갑작스러운 취성 파괴가 일어났으나 섬유보강의 경우는 미세한 균열이 많이 있었지만 직조 유리섬유로 보강되었기 때문에 취성 파괴는 일어나지 않았다.

3) 직조 유리섬유 보강의 경우는 철근 보강의 경우보다 제작도 쉽고 인성도 강한 것으로 판명되었으며, 이는 기존의 박스 구조물에서 발생하는 복잡한 재하조건에 견디어 낼 수 있는 우수한 성능을 가졌다고 판단된다.

4) 앞으로 이에 대한 연구를 더욱 발전시킨다면 기존의 박스 구조물이 갖는 취약점을 개선할 수 있어 계속적인 보수가 불가능한 지하 매설관, 전선 케이블관, 지하연결 박스, 수로를 겸한 소교량 등에 이용에 유용 할 것으로 기대된다.

### 참 고 문 헌

- 1) Hsu, Huey-Tsann, "Flexural Behavior of Polymer Concrete Beams", Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, May, 1984.
- 2) Fowler, D.W. and Hsu, Huey-Tsann., "Static and Cyclic Behavior of Polymer Concrete Beams", Polymers in Concrete, Proceedings of the Fourth International Congress on Polymers in Concrete, Darmstadt, 1984, pp. 159~164.
- 3) Yeon, Kyu-Seok., D. W. Fowler., and Dan L. Wheat, "Static Flexural Behavior of Various Polymer Concrete Beams", Proceedings of the Fifth International Congress on Polymers in Concrete, Brighton, England, September 1987, pp. 85~37.
- 4) Schuchard, Mark J. and D. W. Fowler, "A Study of Flexural Behavior and The Development Length of a Polymer Concrete System Made From Recycled Plastics", Research Report TATRP-7, The University of Texas at Austin, May, 1991.
- 5) Building Code Requirement-ACI 318-89, American Concrete Institute, Detroit, 1989.
- 6) 연 규석, 박 제선, 김 광우, 김 태경, "폴리에스터 폴리머 콘크리트의 파괴거동", 한국 콘크리트학회 논문집, 제 5 권 제 1호, pp. 53~58, 1993.

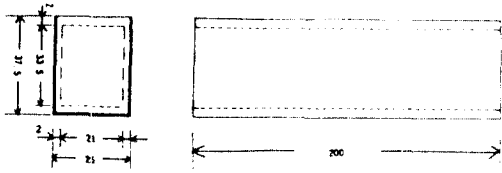


그림 1. 박스 거어더의 형상 및 치수 (단위 : cm)

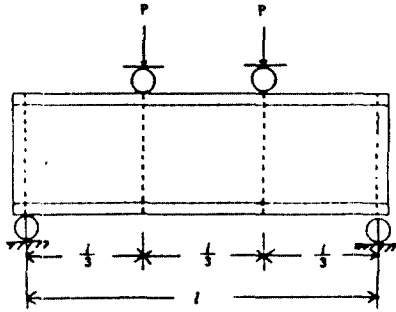


그림 2. 휨 파괴 시험장치의 개략도

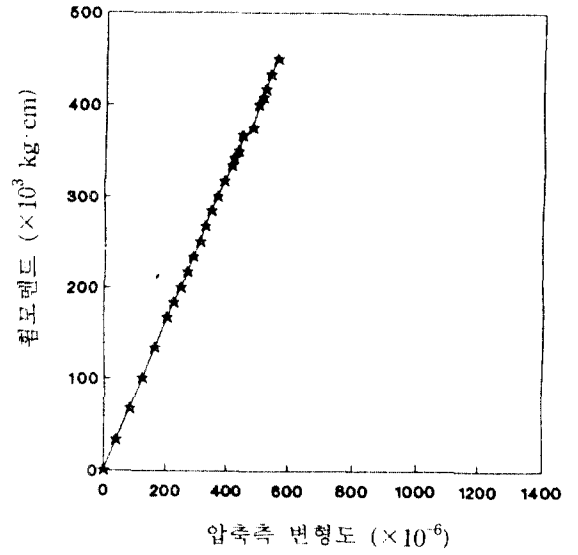


그림 4. 철근 보강 박스거어더의 휨 모멘트-압축측 변형도 관계

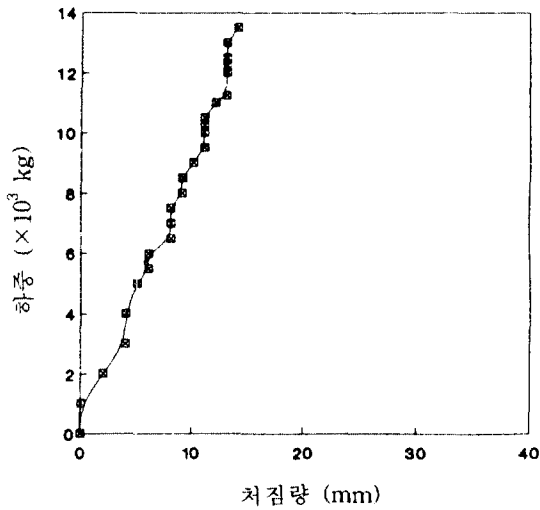


그림 3. 철근보강 박스 거어더의 하중-처짐관계

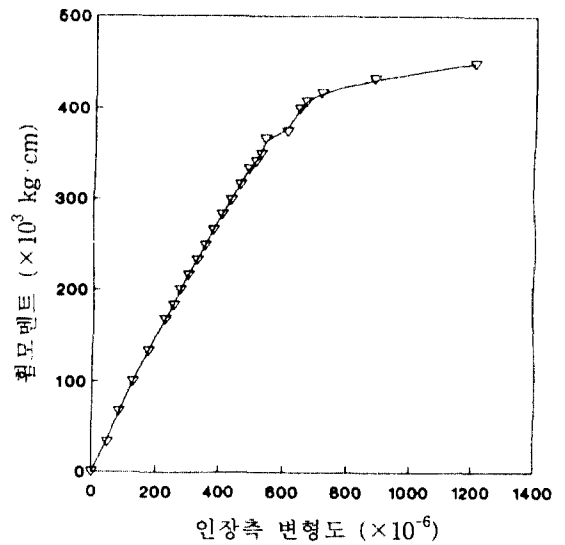


그림 5. 철근 보강 박스거어더의 휨 모멘트-인장측 변형도 관계

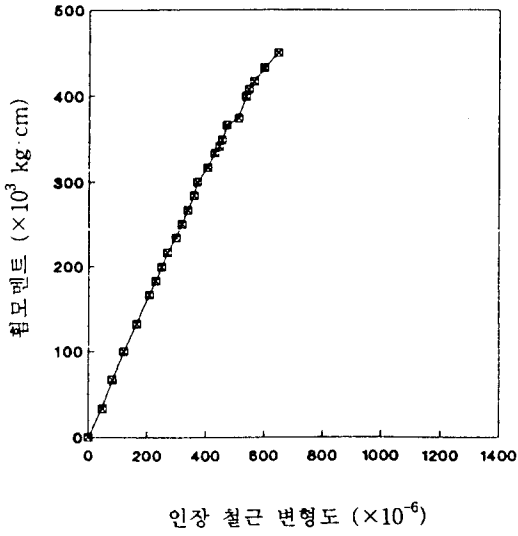


그림 6. 철근 보강 박스거더의 휨 모멘트-인장 철근 변형도 관계



그림 8. 철근 보강 박스 거더의 균열양상

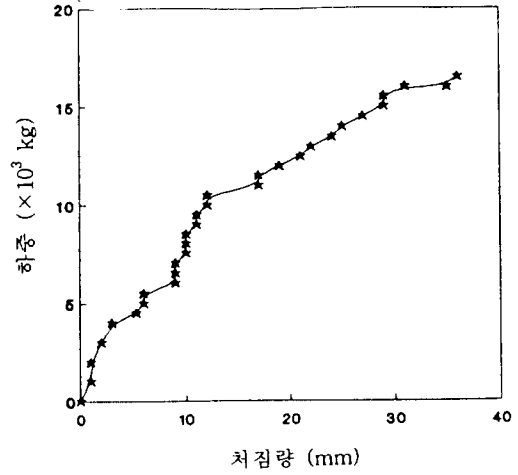


그림 9. 직조 유리섬유 보강 박스 거더의 하중-처짐 관계

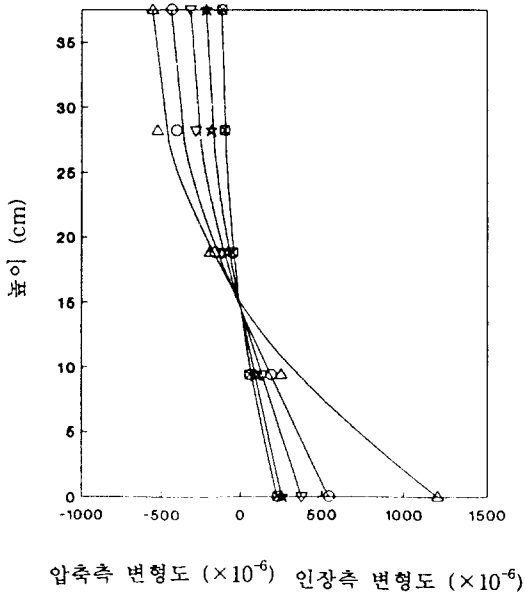


그림 7. 철근 보강 박스 거더의 재하 단계별 변형도 관계

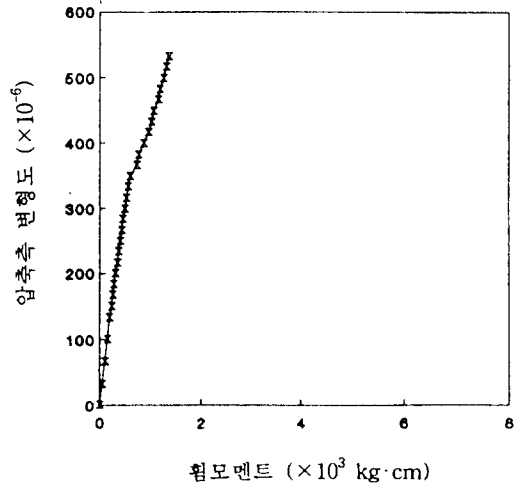


그림 10. 직조 유리섬유 보강 박스 거더의 휨 모멘트-압축측 변형도 관계

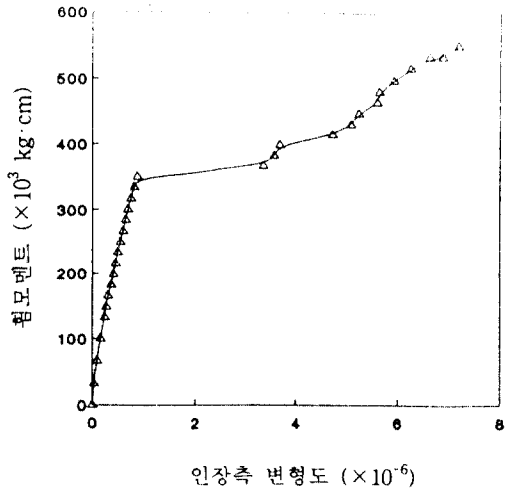


그림 11. 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의  
휨 모멘트-인장측 변형도 관계

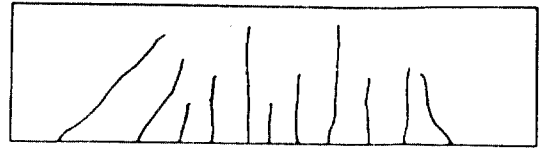


그림 13. 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의  
균형양상

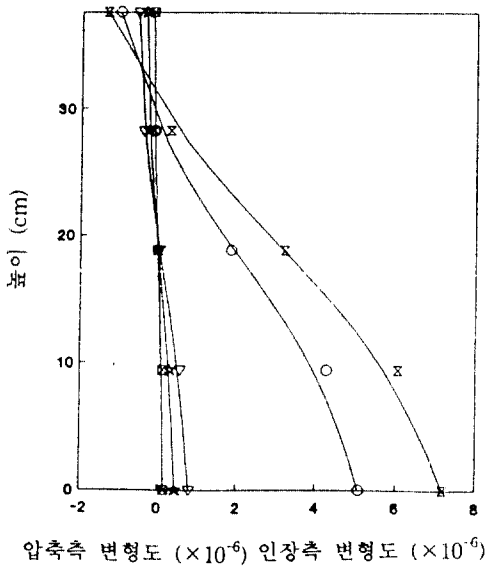


그림 12. 직조 유리섬유 보강 박스 거어더의  
재하 단계별 변형도 분포