

고강도 폴리머 콘크리트 C 형보의 응력블럭 고찰

The Investigation of Stress Block of C-Shaped Specimen for High-Strength Polymer Concrete

김 관호^{*} 연 규석^{**} 김 남길^{***} 박 광수^{*} 신 수균^{*} 이 준구^{*}
Kim, Kwan Ho Yeon, Kyu Seok Jin, Nan Ji Park, Kwang Su Shin, Su Gyun Lee, Jun Gu

ABSTRACT

This study was conducted to develop a procedural method to produce a high strength polymer concrete using polyester resin to experimentally examine the stress block properties of the high strength polymer concrete. C-shaped specimens were produced and test to compute parameter of the stress block. They were $k_1 = 0.73$ and $\gamma = 0.845$, respectively. k_1 is the ratio of the depth of the maximum compressive strength of the beam

1. 서론

폴리머 콘크리트는 용도가 다양하여 가변성 있게 사용 할 수 있는 신건설 재료로서 많은 연구자들에 의해 그 특성이 해명 되어 오고 있으며, 각종 제품이나 구조물에 대한 응용연구가 활발히 이루어지고 있다. 그러나 우리나라에서는 선진국에 비해 아직 폴리머 콘크리트에 대한 연구개발이 그렇게 활발하게 이루어지고 있지 못한 실정이다. 또한 폴리머 콘크리트를 구조물에 이용키 위해서는 구조적 특성에 대한 연구가 이루어져야 하며, 이에 대한 설계기준도 마련되어야 한다. 그러나 아직 폴리머 콘크리트의 구조적 거동에 대한 기존 연구는 그리 많지 않은 실정이며, 적용기준 역시 제정되어 있지 않다.

앞으로 폴리머 콘크리트를 구조물에 널리 다양하게 이용하기 위해서는 범용화가 가능한 설계기준이 마련되어야 할 것이다. 현재까지 폴리머 콘크리트를 구조물에 적용키 위한 명확한 설계기준은 제정되어 있지 않으나, ACI Committee 548에서 많은 자료를 수집 중에 있으며, 설계기준을 정하기 위해서는 구조적 거동 특성에 대한 많은 연구 자료가 필요하다고 본다. 따라서, 본 연구에서는 고강도 폴리머 콘크리트 C형보의 특성을 실험적으로 구명함으로써 구조해석의 기초자료를 마련하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 결합재

본 실험에 사용한 불포화 폴리에스터 수지는 코발트계 경화촉진제가 첨가되어 있는 울소타입으로서 성분은 Table 1과 같다. 그리고 유기질인 폴리머 매트릭스와 무기질인 골재와의 결합을 증진시키기 위하여 시란(silane)을 사용하였으며, 개시제만 첨가시키면 경화반응을 일으키는 수지를 사용하였다.

* 정회원, 농업기반공사 농어촌연구원 계장
** 정회원, 강원대학교 농공학과 교수
*** 정회원, 강원대학교 농공학과 대학원

Table 1 Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity (25°C)	Viscosity (25°C, mPa · s)	Acid value	Styrene content (%)
1.13	300	20.0	40

2.2 충전재 및 골재

본 실험에 사용된 탄산칼슘은 석회암을 분쇄하여 세분말화 한 것을 사용하였으며, 골재는 춘천인근에서 생산되고 있는 편마암 쇄석으로서 조골재 최대치수 13mm를 사용하였으며, 결합재와 골재간의 접착력을 강화시키기 위해 세척을 하였으며, 세골재는 규사를 사용하였다. 실험에 앞서 골재의 수분은 함수율이 0.1%이하가 되도록 110±5°C인 건조기에서 24시간 건조시킨후 냉각시켜 사용하였다.

3. 시험체 제작

3.1 혼합 및 타설

실험체는 KS F 2419 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용 시험체 제작방법)에 규정된 방법에 의하여 제작하였다. 폴리머 콘크리트의 제조방법은 Table 2의 폴리머 콘크리트 배합비에 맞게 재료를 계량한 후 골재와 충전재를 강제식 콘크리트용 혼합기에서 건비빔을 하고, 수지 혼합용 혼합기에서 수지와 수축저감제를 충분히 혼합한 다음 시란을 첨가하고 경화제를 투입하여 혼합 한 뒤 이를 건비빔한 골재에 다시 넣어 혼합하였다.

혼합된 폴리머 콘크리트를 원주공시체(φ7.5×15 cm)는 3층, 각주공시체(6×6×24 cm)는 2층으로 투입한 후 진동기(3,000 rpm)로 충분히 다짐을 하였다. 실험체는 온도 25±3°C, 습도 50~60%의 실험실에서 7일간 건조양생을 실시하였고, 원주공시체의 표면은 편심이 발생하지 않도록 폴리머 페이스트로 캡핑을 하였다.

Table 2 Mix proportion of polymer concrete

(unit : wt. %)

		Binder		Filler	Aggregate	
UP+ST	S.R.A	Initiator content (phr [*])	Silane (phr [*])		Coarse aggregate	Fine aggregate
8.27	2.75	1.0	2.0	12	27.2	49.8

Note : UP ; Unsaturated polyester resin
 ST ; Styrene monomer
 S.R.A ; Shrinkage reducing agent
 phr^{*} ; parts per hundred parts of resin

3.2 C형 시험체제작

고강도 폴리머 콘크리트의 응력블럭 특성인 휨압축 거동을 측정하기 위하여 C형 공시체를 제작하였으며, 실험시 주요 거동부위인 실험체의 중앙부는 무근이며, 양쪽 단부는 하중을 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 휨철근으로는 SD 40인 D10을 사용하였고, 전단철근으로는 D6을 사용하였으며, 실험체 제작시 C형 공시체 거푸집에 폴리머 콘크리트를 타설한 후 진동기로 다짐을 충분히 하였다.

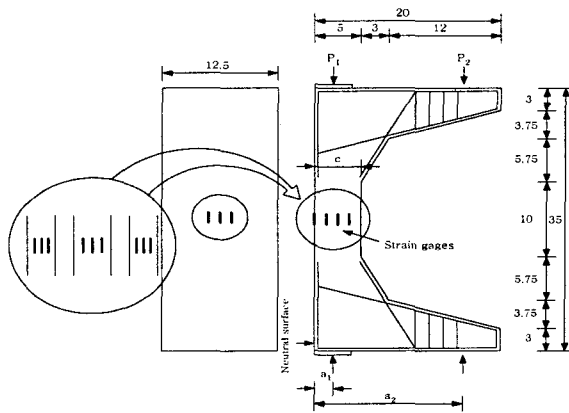


Fig. 1 Detail of C type beam

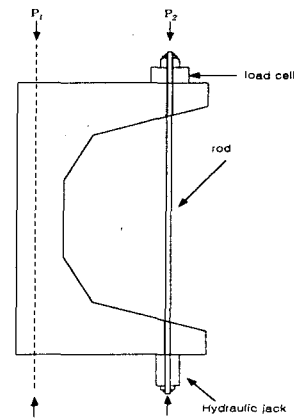


Fig.2 Loading equipment of C type beam

4. 실험방법

보의 휨압축 거동을 실험적으로 구명하기 위하여 C형 공시체를 사용하였으며, C형 공시체의 형상, 치수 및 하중, 가력점 등은 Fig. 1에 나타난 바와 같다. 이 때 공시체 1개 당 12개의 스트레인 게이지를 중앙부에 부착하였다. 재하 과정은 먼저 공시체 인장측 연단에 부착된 스트레인 게이지의 초기 값이 특정값(100×10^{-6})에 이를 때까지 주하중(P_1)을 가한 후 이를 정지시키고, 이어서 종하중(P_2)을 서서히 증가시켜 인장측 연단의 변형률이 0에 도달하면 P_2 를 정지시킨다. 이와 같은 과정을 공시체가 파괴될 때까지 수행하며, 비탄성영역에서 콘크리트에 대한 정확한 실험자료를 얻기 위하여 인장측 연단 게이지 값의 증분을 더욱 작게 하였다. 공시체에 부착된 12개의 스트레인 게이지와 2개의 LVDT로부터 실험 과정을 통해 자료를 연속적으로 얻었다. Fig. 2는 C형 공시체의 재하장치를 나타낸 것이다.

5. 결과 및 고찰

5.1 강도특성

폴리머 콘크리트의 강도를 지배하는 요인은 결합재의 종류, 결합재의 양, 골재의 치수, 배합비, 배합방법 및 양생조건 등에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 압축강도는 콘크리트의 역학적 특성을 나타내는 중요한 요소 중의 하나로서 구조물을 설계할 경우뿐만 아니라 품질관리를 하는데 있어도 기준이 된다. Table 3은 $\phi 7.5 \times 15$ cm 크기의 원주공시체와 $6 \times 6 \times 24$ cm인 각주공시체에 대한 강도특성을 나타내었다.

Table 3 Mechanical properties of polymer concrete

Description	Compressive strength (kgf/cm ²)	Splitting tensile strength (kgf/cm ²)	Flexural strength (kgf/cm ²)
Number of specimens (n)	30	30	30
Mean (\bar{x})	1,397.0	120.6	303.8
Standard deviation (s)	41.0	5.5	13.5

5.2 C형보의 응력블럭 특성

폴리머 콘크리트 C형보의 극한 강도 예측은 일반 시멘트 콘크리트에서 사용되는 등가 직사각응력 분포의 개념을 적용하는데 다소의 무리가 있다. 즉, 폴리머 콘크리트의 극한 변형률의 차이를 고려해야 할 필요성이 있다. 이에 따라 폴리머 콘크리트의 압축응력 분포를 해석하기 위하여 Fig. 3에 나타난 C형 실험체의 응력-변형률 관계로부터 등가 직사각응력분포에 필요한 매개변수를 구하였다. Fig. 4는 극한하중 상태에서의 C형 실험체에 대한 응력분포를 나타낸 것이며, Fig. 5는 폴리머 콘크리트 휨부재에서의 압축응력분포를 나타낸 것이다.

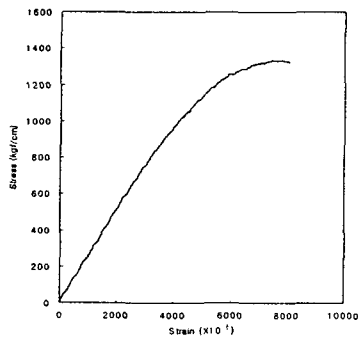


Fig.3 Compressive stress-strain curve of C-type beam

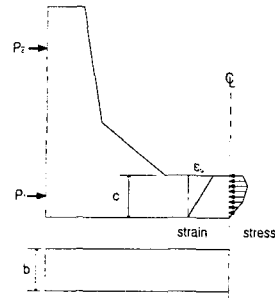


Fig.4 Stress block of C-type beam at ultimate load

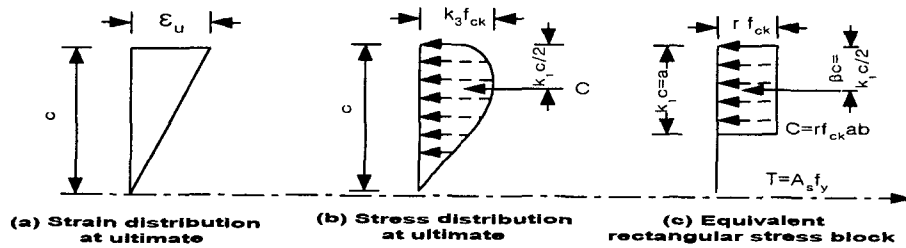


Fig. 5 Equivalent rectangular stress block

폴리머 콘크리트의 응력분포 해석을 위한 변수들을 정의하면 다음과 같다.

k_1 = 압축축 연단에서 중립축까지의 거리에 대한 압축력 C까지의 거리비

k_3 = 원주형 공시체의 최대 압축응력에 대한 C형 실험체의 최대 압축 응력의 비

γ = 부재에서의 최대 압축력에 대한 평균 압축응력의 비

폴리머 콘크리트의 압축응력 분포도(Fig. 5)에서 단면에 대한 평형 방정식은 (1)식과 같으며, 중립축의 깊이 c 는 (2)식으로 계산된다.

$$k_3 r f_{ck} b c = A_s f_y \quad \dots \dots \dots (1)$$

$$c = \frac{A_s f_y}{k_3 \gamma f_{ck} b} \quad \dots \dots \dots (2)$$

그리고 휨강도 M_n 은 식(3)과 같이 계산된다.

$$M_n = r k_3 f_{ck} b c (d - k_1 c) \quad \dots \dots \dots (3)$$

(1)식과 (2)식을 (3)식에 대입하면 M_n 은 아래와 같은 일반식으로 표현 할 수 있다.

$$M_n = A_s f_y d \left[1 - \frac{k_1}{rk_3} \rho \frac{f_y}{f_{ck}} \right] \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $\rho = \frac{A_s}{bd}$ (5)

그리고 휨상태에서의 응력 변형률 관계는 $f_c = f(\epsilon) = a_1\epsilon + a_2\epsilon^2 + a_3\epsilon^3 \dots a_n\epsilon^n$ 으로 표시할 수 있고, 이를 4차 다항식⁴⁾으로 표현하면

$$f(\epsilon) = 0.2547\epsilon + 7.979 \times 10^{-6}\epsilon^2 - 3.203 \times 10^{-9}\epsilon^3 + 1.011 \times 10^{-13}\epsilon^4$$

으로 나타낼 수 있으며, 방정식의 상관계수는 0.99였다.

콘크리트의 압축력 C 는 위의 다항식 $f(\epsilon)$ 을 극한변형률까지 적분하면

$$\int_0^{8.043} f(\epsilon) d\epsilon = 6.95 \times 10^6 \text{ 이었다.}$$

그리고 응력-변형률 곡선의 무게중심을 구하면

$$\bar{x} = \frac{\int f(\epsilon) y dy}{\int f(\epsilon) dy} = \frac{3.55 \times 10^{10}}{6.95 \times 10^6} = 5,107 \text{ 이었다.}$$

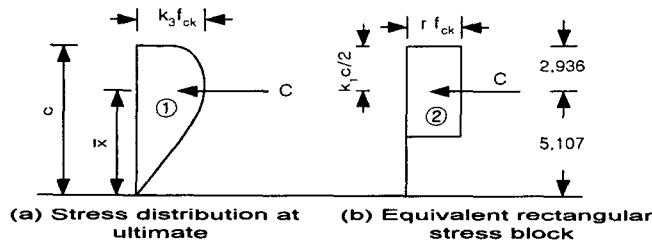


Fig. 6 Analysis of rectangular stress block

극한상태에서의 응력분포 ①와 등가직사각 응력분포 ②의 면적은 같으므로 $6.95 \times 10^6 = r \times 1,400 \times 2,936 \times 2$ 에 의해 $r = 0.845$ 로 산출되었다. c 의 작용점도 실제의 경우와 등가 조건의 경우가 같아야 한다. 따라서, $\beta c = \frac{1}{2} k_1 c$, $k_1 = 2\beta$ 이므로 극한 응력상태에서 압축축 연단에서부터 깊이 c 까지의 무게중심은 $\beta = (8,043 - 5,107) / 8,043 = 0.365$ 이고, $k_1 = 2\beta = 0.730$ 이며, k_3 는 원주공시체의 최대압축응력 $1,400 \text{ kgf/cm}^2$ 에 대한 C형 공시체의 최대 축력 $1,324 \text{ kgf/cm}^2$ 의 비이므로 $k_3 = 1,324 / 1,400 = 0.94$ 로 산출된다. Table 4는 C형 실험체에 대한 극한 강도에서의 응력 블록에 대한 요소들을 나타낸 것이다. 여기서 β 값은 0.36이고, k_3 의 값은 0.94였다. 이 때의 최대 변형률은 0.0076 cm/cm 으로 나타났으며, 각각 보의 파괴직전 압축축 극한변형은 0.008 cm/cm 으로 나타났다.

Table 4 Stress block parameters at the ultimate strength

Description	$f_{ck}^{a)}$ (kgf/cm ²)	f_{max} (kgf/cm ²)	ϵ_{peak} ($\times 10^{-6}$)	ϵ_{ult} ($\times 10^{-6}$)	α	β	k_1 ($=2\beta$)	k_3	γ
C-type beam	1,395	1,332	7,623	8,034	0.61	0.36	0.73	0.94	0.845

Note : ^{a)} Mean value of cylinder specimens ($\phi 7.5 \times 15 \text{ cm}$)

Table 5는 압축강도 560 kgf/cm²이상인 시멘트 콘크리트²⁾와 700 kgf/cm²인 MMA 폴리머 콘크리트⁴⁾의 응력분포에 대한 매개변수값을 비교하여 나타낸 것이다. 시멘트 콘크리트의 경우와 본 실험에서 얻은 응력강도계수 γ 을 비교해 보면 0.845와 0.86으로 값이 차이가 거의 없어 압축강도와는 관계가 없는 것으로 나타났으며, k_1 값은 콘크리트 압축강도가 증가하면 선형적으로 감소하지만 그 값은 0.65 이상이라는 것³⁾과 비교해 보면 높게 나타났다. 압축강도 700 kgf/cm²인 MMA 폴리머 콘크리트의 경우와 비교해 보면 모든 매개변수 값들이 작게 나타나 고강도 콘크리트일수록 α 및 β 값이 감소한다는 기존의 연구결과³⁾에 나타난 바와 같이 본 실험의 폴리머 콘크리트가 고강도이면서 취성적이라는 사실을 뒷받침해 주는 분석결과를 얻었다.

Table 5 Comparison of parameter coefficients of stress block

Description	α	β	k_1	γ
Cement concrete ³⁾	0.56	0.325	0.65	0.86
MMA polymer concrete	0.71	0.434	0.86	0.85
UP polymer concrete ^{test)}	0.61	0.36	0.73	0.845

6. 결 론

- 1) 휨을 받는 고강도 폴리머 콘크리트 C형보에서 압축측 연단에서의 최대압축변형률은 0.0076이었고, 극한변형률은 0.0080 이었다.
- 2) 극한하중을 받을 때 C형보의 압축측 영역에서 매개변수 γ 와 k_1 은 각각 0.845, 0.73인 등가직사각응력분포도로 나타낼수 있었다. k_1 은 중립축 깊이에 대한 압력축까지의 깊이비이며, γ 은 부재에서 최대 압축력에 대한 평균 압축응력의 비이다.
- 3) 일반 시멘트 콘크리트에서 사용되는 등가직사각 응력분포의 매개변수와 고강도 폴리머 콘크리트의 등가직사각 응력분포의 매개변수와는 다른 차이를 보였다.
- 4) 폴리머 콘크리트에 대한 구조물의 정확한 설계적용을 위해서는 압축강도와 C형보의 다양한 변수를 주어 보다 많은 실험적 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 강원대학교 석재복합신소재제품 연구센터의 연구비 지원에 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다

참고문헌

1. Eldarwish, I. A., Shehata, H. E., "Structural Properties of Concrete Polymer Materials", Proceedings of the Third ICPIC, pp. 56-67, 1981
2. 광 계환, 박 종건, "고강도 철근 콘크리트보의 전단 거동에 관한 연구", 한국농공학회지. Vol., 40, No. 5, pp. 68-79, 1998
3. 문 한영, "건설재료학", 동명사, pp.109-127, 1989
4. Hsu, H. T., "Flexural Behavior of Polymer Concrete Beams", Ph. D. Dissertation, University of Texas at Austin, 1984
5. Knab, L. I., "Flexural Behavior of Conventionally Reinforced Polyester Concrete Beams", the Degree of Doctor of Philosophy, the University of Cincinnati, 197
6. Yeon, K. S., Kim, K. H., Jin, N. J., and, Shin Y. S., "Shear Performance of Reinforced Polymer Concrete Beams with High Strength", IX ICPIC, pp. 303-312, 1998.