

부재의 길이가 폴리머 콘크리트의 휨압축 강도에 미치는 영향

Effects of Specimen Length on Flexural Compressive Strength of Polymer Concrete

연규석* 김남길** 주명기*** 유근우** 권윤환**
Yeon, Kyu Seok Jin, Nan Ji Joo, Myung Ki Ryu, Keun Woo Kwon, Yoon Hwan

ABSTRACT

In this paper the influence of specimen length on flexural compressive strength and parameter of equivalent rectangular stress block of polymer concrete was evaluated. For this purpose, a series of C-shaped specimens subjected to eccentric compression were tested using four different length-to-depth ratios(from 1.0, 2.0, 3.0 and 4.0) of specimens with compressive strength of 1,020 kgf/cm².

Results indicate that for the region of $h/c \leq 3.0$ the reduction in equivalent rectangular stress block depth and flexural compressive strength with increase of length-to-depth ratios was apparent, but for the region of $h/c \geq 3.0$ they were nearly constant. It means that for the region of $h/c \geq 3.0$ effect of specimen length on equivalent rectangular stress block depth and flexural compressive strength was negligible. It was also founded that the effect of specimen length on γ , a coefficient of strength, that was from 0.84 to 0.86 regardless of h/c was petty. Finally, predictive equation is suggested by using modified law of effect of specimen length and results.

1. 서론

최근 건설산업분야에서 신소재로 각광받고 있는 폴리머 콘크리트는 압축, 휨 및 인장강도 등 역학적 성질이 매우 우수할 뿐더러 내약품성 및 내동결융해성이 뛰어나 내구성이 문제시 되고 있는 보통 시멘트 콘크리트를 대신하여 지하, 해양 등 열악한 환경조건하에서의 이용이 증가하고 있으며 그 응용범위도 영구 거푸집, 파일, 교량이나 교각 등 다양한 분야로 확대되고 있는 추세이다.

폴리머 콘크리트의 물리·역학적 성질에 대한 연구는 국내·외적으로 비교적 많이 이루어지고 있으며, 실용화에 대한 연구도 일본, 미국, 독일, 영국 등을 중심으로 활발하게 진행되고 있다. 또한 ACI Committee 548에서는 각종 기초자료를 마련중에 있는 것으로 알려져 있으나 현재까지 구조물 설계에 적용할 수 있는 기준은 제정되어 있지 않은 실정이다²⁾.

한편 콘크리트 구조물의 설계에 사용되는 대부분의 설계기준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기 효과를 고려하지 않고 있으나, 콘크리트, 암석, 세라믹 및 복합체와 같은 취성재료의 압축파괴에서는 크기 효과가 현저히 나타나고 있다³⁾.

본 연구는 고강도 폴리머 콘크리트를 박스 구조물, 슬래브, 보, 기둥 등 구조적 부재로 적용하기 위한 구조적 특성에 관한 기초연구의 일환으로써 등가직사각형 응력블럭 매개변수 및 휨압축강도에 대한 크기효과에 부재의 길이가 미치는 영향을 검토하여 보다 정확한 폴리머 콘크리트 휨부재의 설계나 해석에 기초자료를 제공하는데 그 목적이 있다.

* 정희원, 강원대학교 농업공학부 교수

** 정희원, 강원대학교 농업공학부 대학원

*** 정희원, 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 전임연구원

2. 사용재료

2.1 결합제

결합제는 불포화 폴리에스터 수지(UP)와 메타크릴산 메틸(MMA)을 일정비율로 혼합하여 사용하였으며, 수축감을 위한 수축저감제와 상온경화용 경화제 및 촉진제가 사용되었다.

2.2 충전제 및 골재

충진제로서는 중질 탄산칼슘(heavy calcium carbonate)을 사용했으며, 잔골재는 5 mm이하의 규사를, 굵은 골재는 최대치수가 13 mm인 편마암 쇄석을 사용하였다. 충전제 및 골재는 110±5 °C에서 24시간 건조시킨 후 냉각시켜 사용하였다.

3. 시험체 제작

3.1 공시체 제작

원주형 공시체는 KS F 2419(폴리에스터 레진 콘크리트의 강도 시험용 시험체 제작방법)에 규정된 방법에 의하여 제작하였다.

3.2 C형 시험체 제작

휨압축 거동을 실험적으로 검토하기 위한 C형 시험체에 대한 형상 및 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 실험시 주요 거동부위인 시험체의 중앙부는 무근으로 하였으며, 양쪽 단부는 외부에서 가해지는 축력과 편심압축력을 자체 파괴없이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 주요 실험변수는 C형 공시체 중앙부 길이/깊이 비($h/c=1.0, 2.0, 3.0$ 및 4.0)인데 공시체 중앙부의 깊이 c 는 10.0 cm로 하였고, 공시체의 두께 b 는 크기효과에 미치는 영향이 적으므로 12.5 cm로 고정하였다.

4. 시험방법

4.1 공시체 강도 및 탄성계수

압축강도 시험은 KS F 2481(폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 규정된 방법에 따라 실시하였고, $\Phi 7.5 \times 15$ cm인 원주형 공시체를 사용하였다. 탄성계수는 KS F 2438(콘크리트 원주공시체의 정탄성계수 및 프야송비 시험방법)에 규정된 2가지 측정방법 중 와이어 스트레인 게이지법을 이용하여 구해진 응력-변형률 곡선의 할선탄성계수로 하였다.

4.2 C형 시험체의 휨 압축 실험

C형 시험체 중앙부의 깊이별 변형률을 측정하기 위해 중앙부의 압축, 인장 및 측면에 12개의 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 시험체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 처짐을 측정하기 위해 시험체 중앙부의 압축측에 2개의 변위측정기(LVDT)를 설치하였으며, 여기서 얻은 데이터의 평균치는 휨모멘트의 재하시 편심거리 보정에 사용되었다.

재하과정은 Fig. 2 에서와 같이 먼저 시험체 중앙부 인장측 연단에 부착된 스트레인 게이지의 초기값이 특정값(100×10^6)에 도달할 때까지 주하중(P_1)을 가한 후, 이 상태에서 인장측 연단의 변형률이 0에 도달 할 때 까지 편심하중(P_2)을 서서히 증가시켰다. 이렇게 인장측 변형률이 0이 되게 주하중(P_1)과 편심하중(P_2)을 비례적으로 증가시키면서 시험체가 파괴될 때까지 반

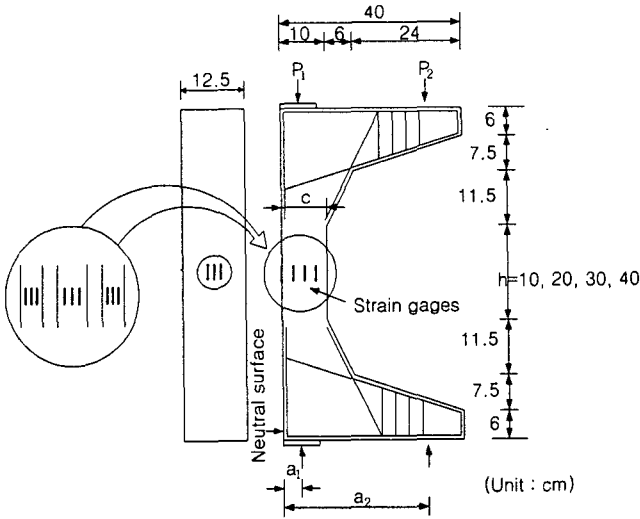


Fig. 1 Size and shape of specimens

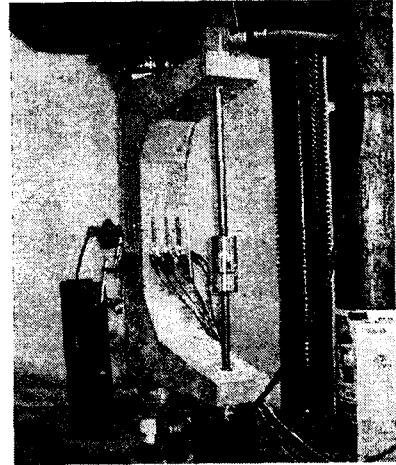


Fig. 2 View of test for C shaped specimens

복하였다. 이때 단계별 하중과 위치별 변형률 및 LVDT 값은 데이터 로그에 의해 연속적으로 기록되었다.

축력을 유발시키는 주하중(P_1)은 200 tonf 용량의 만능시험기로 변위 제어방식에 의해 가력하였으며, 휨모멘트를 유발시키는 편심하중(P_2)는 20 tonf 용량의 수동식 유압재과 20 tonf 용량의 로드셀을 사용하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 강도 및 탄성계수

시험결과 폴리머 콘크리트의 압축강도는 $1,020 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났으며, 탄성계수는 응력-변형률 곡선으로부터 파괴강도의 40%수준에서 환산탄성계수로 구한 결과, 그 값은 $2.25 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 나타났다. 이는 압축강도 $1,000 \sim 1,300 \text{ kgf/cm}^2$ 인 초고강도 시멘트 콘크리트의 탄성계수 $4.10 \sim 4.48 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 인 것과 비교하면 상당히 작은 값이다. 또한 극한 변형률은 약 0.008로서 보통 시멘트 콘크리트의 극한 변형률이 0.003인 것에 비해 상당히 크게 나타났다.

5.2 등가 직사각형 응력분포

휨부재에서의 콘크리트의 휨압축응력의 분포형상에 대한 가설은 포물선 응력분포, 삼각형 응력분포, 직사각형 응력분포, 사다리꼴 응력분포 등이 있다. 그러나 응력분포의 형상에 관계없이 콘크리트 부재단면에서의 압축합력 C 와 그 작용점의 위치를 알 수 있다면 실제의 응력분포가 어떠한 부재의 단면에 대한 등가적 이론해석이 가능하다. 또한 휨압축부재에서의 압축력 C 와 그 작용점의 위치는 Hognestad 등이 제안한 C형 시험체에 대한 휨압축시험을 통하여 시험적으로 구할 수 있다. 본 연구에서는 Whitney가 제안한 기하학적 형상이 비교적 단순한 직사각형 응력분포에 대한 파라미터 α , β_1 및 ν 를 C형 시험체에 대한 휨압축시험을 통하여 구명하였다⁴⁵⁾.

C형 시험체의 응력-변형률 곡선은 하중단계별로 측정되는 축력 P_1 , 편심압축력 P_2 및 편심거리 그리고 C형시험체 중앙부의 수평 변위 δ , 과 시험체 중앙부의 단면적, 단면 2차 모멘트 등에 의해 결정되는 압축부의 응력과 압축부에 부착된 스트레인게이지에 의해 측정되는 변형률로부터 나타낼 수 있다.

또한 Bernoulli 가정에 의해 변형률 (ϵ)과 보의 깊이 (y)관계를 식 (1)과 같이 표시 할 수 있다.

$$\epsilon = k \cdot y \quad (1)$$

아울러 휨부재에서의 응력-변형을 관계는 식(2)와 같은 다항식으로 표시할 수 있다.

$$f(\epsilon) = a_1\epsilon + a_2\epsilon^2 + a_3\epsilon^3 + \dots + a_n\epsilon^n \quad (2)$$

여기서, $a_1, a_2, a_3 \dots a_n$ 은 Fig. 5와 같이 C형 시험체 중앙부에서 폴리머 콘크리트에 의한 단면 저항모멘트와 외력 P_1, P_2 에 생기는 모멘트의 차이를 최소화 (최소자승법) 시키는 데서 얻어지는 미정계수이다. 이를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta_{min} = \sum_{i=1}^n \left\{ b \cdot \int f(\epsilon_i) y dy - [P_{1i} a_1 + P_{2i} (\delta_i + a_2 - a_1)] \right\}^2 \quad (3)$$

여기서, δ_i 는 C형 시험체 중앙부 수평변위이다.

식(2)를 4차다항식으로 표시하고 식(3)과 같이 회귀분석하여 구하면 아래와 같은 휨압축부재 길이에 따른 응력-변형을 상관관계식의 계수를 얻을 수 있다.

$h/c=1.0$ 일때 $a_1=5E-13, a_2=-1E-8, a_3=3E-5, a_4=0.2295$

$h/c=2.0$ 일때 $a_1=7E-14, a_2=-4E-9, a_3=1E-5, a_4=0.1974$

$h/c=3.0$ 일때 $a_1=5E-13, a_2=-9E-9, a_3=3E-5, a_4=0.1604$

$h/c=4.0$ 일때 $a_1=4E-13, a_2=-8E-9, a_3=3E-5, a_4=0.1676$

Fig. 3과 같이 극한상태에서의 실제응력분포를 직사각형 응력분포로 등가변화 시키기위해서는 다음과 같은 두가지 조건을 만족해야 한다.

1) 합력의 크기 C 가 같아야 한다.

$$C = \int f(\epsilon) dy = \alpha f_{ck} cb = \gamma f_{ck} ab \quad (4)$$

2) 합력의 작용점 위치가 같아야 한다.

$$\frac{\beta_1}{2} c = \frac{a}{2} = c - \frac{\int f(\epsilon) y dy}{\int f(\epsilon) dy} \quad (5)$$

여기서, α : 부재에서의 최대 압축력에 대한 평균 압축응력 비

β_1 : 부재의 중립축길이에 대한 압축연단에서 압축합력까지의 거리비

γ : 등가직사각형 응력블럭에서 최대압축응력에 대한(공시체 압축응력) 평균압축응력 비

식 (1), (2), (4), (5)을 연립하여 풀면 Table 1과 같이 등가직사각형 응력블럭의 파라미터 α, β_1 및 γ 를 구할 수 있다.

한편, ACI에서는 시멘트 콘크리트에서의 응력블럭 파라미터 α, β_1 값을 강도의 증가에 따라 작은 값을 취하는데 $f_{ck} \geq 560 \text{ kgf/cm}^2$ 이면 $\alpha=0.56, \beta_1=0.65$ 의 일정한 값을 취하도록 규정되어 있다. 본 실험에서 채택된 압축강도 $1,020 \text{ kgf/cm}^2$ 수준의 폴리머 콘크리트의 h/c 와 β_1 의 상관관계를 Fig. 4에 김³⁾ 등의 연구결과와 비교하여 나타내었다.

5.3 부재 길이에 따른 휨압축 강도의 크기효과

Bazant의 크기효과 법칙이 발표된 이후, 김³⁾ 등은 부재의 크기와 무관한 항인 σ_0 항을 고려함으로써 초기균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과 법칙을 제안하였다. 이에 대한 응용으로서 축압축력을 받는 원주 공시체 및 휨압축력을 받는 C형 공시체에 대한 연구결과가 발표되었다. 한편, Jansen과 Shah도 콘크리트 압축강도가 450 및 900 kgf/cm^2 인 원주형공시체에 대한 실험을 수행하여 단

위 면적당 pre-peak 에너지는 부재의 길이가 증가함에 따라 비례하여 증가하지만 부재의 길이/지름의 비가 2.0을 넘으면 일정한 값을 갖는다고 보고하였다. 또한 김^{6,7)} 등은 이러한 비가 약 3.0이상일 때 휨압축강도에 대한 크기 효과에 변화가 없다고 발표하였다.

본 실험에서는 C형 공시체의 길이에 대한 휨압축강도를 예측할 수 모델을 얻기 위해 수정된 크기효과 법칙을 이용하여 12개의 실험값에 대한 회귀분석을 통하여 식 (6.a, 6.b)를 얻었으며 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

$$f_{cu}(h/c) = \frac{2.59f_{cu}}{\sqrt{1+110.9(h/c)}} + 0.56f_{cu} \quad (h/c \leq 3.0) \quad (6. a)$$

$$f_{cu}(h/c) = 0.70f_{cu} \quad (h/c > 3.0) \quad (6. b)$$

여기서, $f_{cu}(h/c)$ 는 P_u/bc 에 의해 계산되는 C형 시험체의 휨압축강도이고, f_{cu} 는 원주공시체에 대한 콘크리트의 압축강도를 나타내는데 단위는 kgf/cm^2 이다.

Fig 5에서 알수 있듯이 부재의 길이가 증가할수록 휨압축강도는 감소하는 경향을 나타내며, h/c 가 큰 경우에는 ($h/c > 3.0$) 휨압축강도가 일정한 값에 수렴한다. 또한 일반적인 휨부재는 h/c 가 3.0이상이므로 풀리며 콘크리트 휨부재의 휨압축강도는 약 $0.7 f_{cu}$ 로 하면 적당할 것으로 판단된다.

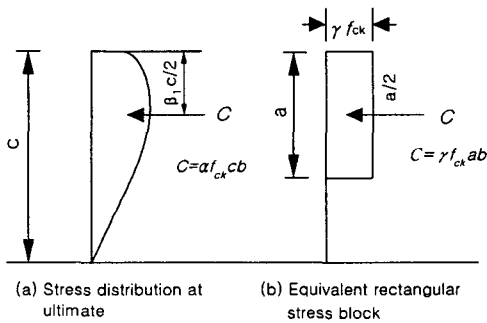


Fig. 3 Analysis of rectangular stress block

Table 1 Test results of C shape specimens

h/c	a	P_u (tonf)	ϵ_{max} ($\times 10^{-3}$)	β_1	ν
1	0.694	101.75	7.84	0.830	0.836
	0.689	102.97	7.95	0.811	0.850
	0.687	103.25	7.98	0.815	0.843
2	0.647	94.01	8.02	0.762	0.849
	0.650	93.15	8.10	0.759	0.856
	0.627	91.87	8.08	0.730	0.859
3	0.624	90.05	8.08	0.743	0.840
	0.620	89.20	7.98	0.737	0.841
	0.621	88.98	7.89	0.720	0.863
4	0.616	90.25	7.88	0.719	0.856
	0.615	89.23	7.96	0.741	0.830
	0.613	88.42	8.03	0.710	0.863

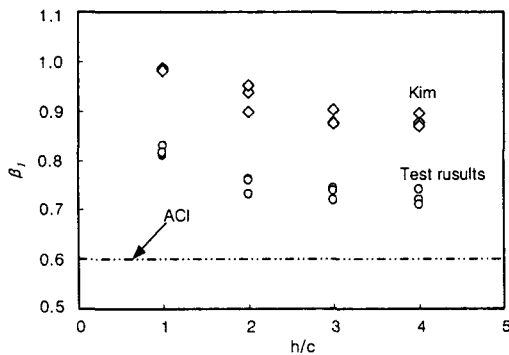


Fig. 4 Depth of the equivalent rectangular stress block as function of the specimen length/width ratio

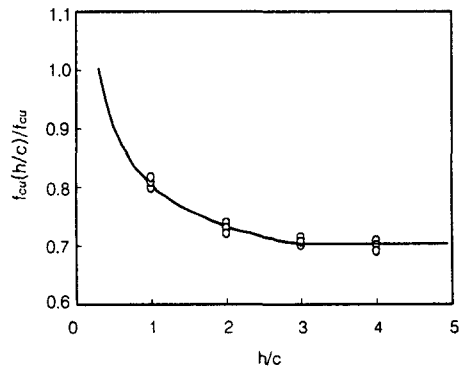


Fig. 5 $f_{cu}(h/c)/f_{cu}$ as function of the specimen length/depth ratio

6. 결론

폴리머 콘크리트 휨부재의 증가직사각형 응력블럭 매개변수 및 휨압축강도에 대한 크기효과에 부재의 길이가 미치는 영향을 검토하기 위해 압축강도 $1,020 \text{ kgf/cm}^2$ 수준인 폴리머 콘크리트 C형 시험체에 대한 편심압축시험을 수행하였으며, 이로부터 얻어진 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 압축강도 $1,020 \text{ kgf/cm}^2$ 를 갖는 폴리머 콘크리트의 탄성계수는 $2.25 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 로 비슷한 강도수준의 고강도 시멘트 콘크리트에 비해 현저히 작게 나타났으며, 극한변형률은 $0.0078 \sim 0.0081$ 로 보통시멘트 콘크리트의 0.003 보다 훨씬 큰 값을 나타내었다.

2) h/c 가 1에서 3로 증가함에 따라 β_1 값은 약 0.83 에서 0.71 로 감소하는 경향을 나타내었고 h/c 가 약 3.0 이상에서는 약 0.72 의 일정한 값을 보여 h/c 가 3.0 이상인 폴리머 콘크리트 휨부재에서는 응력블럭 깊이 β_1 은 0.72 을 사용하는 것이 적합함을 알 수 있다.

3) h/c 가 1.0 에서 3.0 로 증가함에 따라 C형 시험체의 $f_{cm}(h/c)/f_{cm}$ 는 약 $0.81 \sim 0.71$ 로 감소하는 경향을 나타내었고, h/c 가 약 3.0 이상에서는 약 0.70 의 일정한 값을 보여 h/c 가 3.0 이상인 부재에서는 휨압축강도에 대한 크기효과가 거의 없음을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 환경부(차세대 핵심환경기술개발)의 연구비 지원에 의하여 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 연구석 외 5인 "고강도 폴리머 콘크리트 C형보의 응력블럭 고찰", 한국콘크리트학회 봄학술발표회, 제13권 1호, 2001, pp.1023~1028
2. Yeon, K. S., Fowler, D. W. and Wheat, D. L., "Static Flexural Behavior of Various Polymer Concrete Beams," 5th International Congress on Polymer in Concrete, Brighton, U. K., 1987, pp.85~90
3. 김진근, 이성태, 이태규, "부재의 길이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향", 한국콘크리트학회, 제11권 4호, 1999, pp.63~71
4. 변동균, 신현목, 문재길, "철근 콘크리트공학", 동명사 pp.59~60
5. Hognestad, E., Hanson, N. W. and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design", Journal of ACI, V.27, No.4, Dec. 1955, pp.455~479, also PCA Development Bulletin D6
6. Jansen, D. C and Shah, S. P., "Effect of Length on Compressive Strain Softening of Concrete", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, V.123 No.1, Jan, 1997, pp.25~35
7. Nilson, A. H and Slate, F. O., "Structural Properties of Very High Strength Concrete", Second Progress Report, Dept. of Structural Engineering Cornell University, Mar. 1979, pp. 62