
부재의 깊이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향

Effects of Specimen Depth on Flexural Compressive Strength of Concrete



이성태*

Yi, Seong-Tae



김진근**

Kim, Jin-Keun



김장호***

Kim, Jang-Ho

ABSTRACT

Currently, in evaluating a flexural strength of a concrete member, the effect of specimen depth has not been systematically studied, even though its effect on ultimate strength of a section is very important. For all types of loading conditions, the trend is that the strength of a member tends to decrease when the member depth increases.

In this study, the influence of specimen depth on flexural compressive strength of concrete member was examined experimentally. A series of C-shaped specimens subjected to axial compressive force and bending moment were tested using three geometrically similar specimens with different length-to-depth ratios ($h/c = 1, 2$ and 4) which have compressive strength of 55 MPa.

The results indicate that the flexural compressive strength decreased as the specimen depth increased. A model equation was derived based on regression analyses of the experimental data. Also, the results show that ultimate strain decreases as the specimen depth increases. Finally, a general model equation for the depth effect is proposed.

Keywords : size effect, specimen depth, C-shaped specimen, flexural compressive strength

* 정회원, 한국전력기술(주) 책임기술원

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

*** 정회원, 세종대학교 토목환경공학과 교수

· 본 논문에 대한 토의를 2001년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2001년 4월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

대부분의 설계기준에서는 콘크리트의 압축강도에 대한 크기효과를 고려하지 않고 있으나, 취성 파괴에서 이 효과는 뚜렷이 나타나고 있다. 특히 콘크리트, 암석, 얼음, 세라믹 및 복합체와 같은 유사취성(quasibrittle)재료의 압축파괴에서는 크기효과가 현저히 나타나고 있다. 이러한 압축파괴는 누적된 에너지의 이완이 주요 원인인데 그 전반적인 거동은 과거부터 광범위하게 연구되어 왔으나 현재까지도 인장파괴에 비하여 충분히 밝혀지지 않고 있는 상태이며 이에 대한 크기효과의 연구도 크게 부족한 실정이다.

한편 Fig. 1과 같은 2점 재하되는 철근콘크리트 보 단면의 휨압축강도는 참고문헌 1에서 언급한 바와 같이 두 연직하중과 중립축 사이 부분의 콘크리트 강도와 직접적인 연관이 있다. 따라서 보 단면의 크기효과를 검토할 때는 중립축 깊이(c)를 정확하게 알아야 한다. 그러나 보의 중립축 깊이는 보의 크기, 철근비, 가해진 하중의 크기 및 하중 가력점의 위치 등에 따라 변할 수 있어서 이를 정확하게 알기는 매우 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 두 연직하중 사이의 거리는 일정하게 하고 중립축 깊이만을 실험변수로 하여 이 값이 단면의 휨압축강도에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.

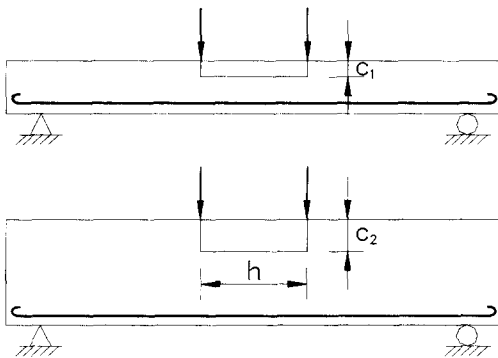


Fig. 1 Reinforced concrete beams

참고문헌 1에서는 휨압축강도의 크기효과에 대한 연구를 수행하였는데 실험체의 크기에 따른 휨압축강도의 변화를 연구하고 모델식을 제시한

바 있다. 그러나 이는 실험체의 길이/깊이의 비가 2/1인 경우에 한해 제한적으로 적용 가능하다. 그리고 참고문헌 2에서는 부재의 깊이는 일정하게 하고 길이(h)만을 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통하여 구하였다. 따라서 이 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 실험체의 길이는 일정하게 하고 깊이만을 변화시킨 경우에 대하여 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 실험을 통해 구한 후, 이 경우와 기존의 자료^(1,2)의 경우에도 동시에 적합한 보다 일반적인 모델식을 제시하고자 한다.

휨하중을 받는 철근콘크리트 보의 크기효과에 대한 이 실험에서는 중립축의 위치를 제어할 수 있으며 보의 압축 부분만을 대상으로 하는 C형 실험체를 선택하였다. 즉, 휨압축력을 받는 C형 실험체를 사용하여 부재의 깊이가 크기효과에 미치는 거동을 실험을 통하여 비교·검토하였으며 여기서 얻어진 결과는 실제 설계시에도 반영할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 실험개요

2.1 실험변수

실험시에는 Hognestad 등⁽³⁻⁶⁾이 사용한 실험 절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트 압축강도가 55 MPa일 때 Fig.2와 같은 C형 실험체의 길이/깊이의 비($h/c=1, 2$ 및 4)였다. 여기서 실험체의 길이는 20.0 cm로 하였으며, 실험체의 두께(b)는 12.5 cm로 일정하게 하였다.

2.2 배합설계

C형 실험체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 Table 1에 주어져 있다. Table 1에 주어진 콘크리트의 압축강도(f_{cu}), 쪼개임장강도(f_{sp}) 및 탄성계수(E_c)는 시리즈 당 3개의 $\phi 10 \times 20$ cm 원주 공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트(1종 시멘트)를 사용하였으며 잔골재는 일반 강모래를

사용하였고 굵은골재는 최대치수 (d_a) 13 mm의 부순자갈을 사용하였다. 실험체의 콘크리트는 수평으로 치기를 하였으며 작업성을 향상시키고 다짐을 원활히 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기를 사용하였다.

치기를 하였다. 모든 원주공시체와 C형 실험체는 치기를 한 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 습윤포(wet burlap/towel)를 덮어 28일 이상 기건양생하였다.

Table 1 Mix proportions and properties of concrete

W/C (%)	S/A (%)	Unit weight(kg/m ³)				S.P.* (%)	MPa		
		w	c	s	g		f_{cu}	f_{sp}	E_c
37	40	178	480	676	1014	1	55	5	3.1×10^4

* superplasticizer(ratio for cement weight)

2.3 실험체의 크기, 형상 및 실험 절차

Fig. 2에는 C형 실험체의 형상, 치수 및 하중 가력점 등이 나타나 있다.

실험의 주요 고려 대상 부위인 실험체의 중앙부는 무근으로 하였으며, 양쪽 단부는 가력 장비로부터의 하중을 이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 휨철근으로는 항복강도가 437 MPa인 SD 40을 사용하였고, 전단철근으로는 D6 철근을 사용하였다. 실험체당 10개의 변형률 게이지를 실험체의 중앙부에 부착하였으며, 실험을 수행하기 시작한 때부터 실험체가 파괴될 때까지 변형률을 측정하였다. 또한 2개의 LVDT를 실험체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 변위(수평방향)를 측정하기 위하여 실험체의 압축 측에 설치하였는데, 여기서 얻은 자료의 평균 값은 휨모멘트의 계산시 이용되는 하중 팔(load level arm, a_1 과 a_2)을 보정하는데 사용되었다.

하중은 먼저 실험체 인장연단의 변형률 게이지 값이 특정한 값(50×10^{-6})이 될 때까지 주 하중(P_1)을 가한 후 이를 정지시키고 이후 종 하중(P_2)을 서서히 증가시키는데, 인장연단의 변형률 게이지 값이 0에 도달하면 P_2 를 정지시켰다. 실험체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행하는데, 콘크리트의 비탄성영역에서는 정확한 실험 자료를 얻기 위하여 변형률 게이지에서의 값을 더욱 작게 취하였다. 각 실험체에 부착된 10개의

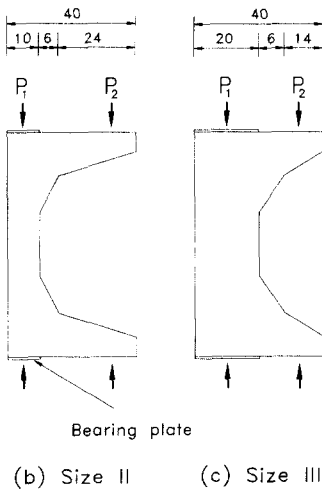
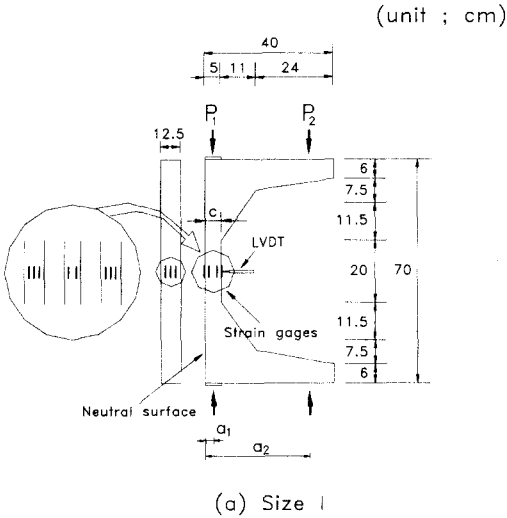


Fig. 2 Size and shape of specimens

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80 리터의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재 그리고 시멘트 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 다음, 물과 고성능 감수제를 동시에 투입하여 3분간 비빔 후 미리 준비된 거푸집에 콘크리트

변형을 게이지 및 2개의 LVDT의 측정값은 전 실험과정에 걸쳐 연속적으로 자료를 축적시키는 계측기기로 취하였다.

축력을 유발시키는 P_1 은 유압으로 조작되는 2500 kN 용량의 만능재료시험기에 의해 가해졌는데 제어방식으로는 변위제어법을 이용했으며, 축력과 휨력을 유발시키는 P_2 는 200 kN 용량의 수동식으로 조작되는 유압잭을 이용하여 가했다. 그리고 P_2 의 가력치를 측정하기 위해서 200 kN 용량의 로드셀을 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

C형 실험체와 원주공시체의 압축강도의 측정은 동일 재령에서 실시되었다. Table 2의 실험체 번호에서 I, II 및 III은 실험체의 크기를, 그리고 아라비아 숫자는 각 실험체 크기의 일련번호를 나타낸다.

Table 2 Experimental results of C shaped specimens

No. of specimen	P_u (kN)	ϵ_{cu} ($\times 10^{-3}$)	χ_u ($\times 10^{-3}/\text{cm}$)	δ (mm)
I-1	283	3.37	0.67	2.33
I-2	272	3.68	0.74	2.13
I-3	279	3.53	0.71	1.96
II-1	531	3.77	0.38	1.81
II-2	532	3.27	0.33	1.43
II-3	518	3.47	0.35	1.26
III-1*	-	-	-	-
III-2	1006	2.94	0.15	1.03
III-3	1004	3.13	0.16	0.90

* failed during testing due to failure of the rod that applies load P_2

P_u , ϵ_{cu} , χ_u 및 δ 는 각각 실험체가 파괴될 때의 주 하중과 종 하중의 합($P_1 + P_2$), 콘크리트 압축연단의 극한변형률, 단면의 곡률과 실험체 중앙부의 수평방향 변위를 의미한다.

실험 시 모든 실험체 중 8개의 실험체가 실험 영역 중앙부의 압축연단에서 성공적으로 파괴되

었으며, 실험체 전체의 파괴에 앞서 중앙부에서 파쇄(spalling)가 발생했다. 실험체 III-1의 경우에는 극한하중에 도달하기 전에 P_2 하중 용량이 파괴되어 재 실험에 들어갔으며, 모든 장치들을 보완한 후 다시 동일한 실험을 수행한 결과 같은 크기의 타 실험체의 극한하중보다 상당히 작은 값의 극한하중을 얻었다. 이는 부재의 거동이 비선형상태에 도달해 있을 때 봉의 파괴가 일어났기 때문으로 판단된다. 따라서 여기에 해당하는 실험값은 결과 분석에서 제외하였다.

3.2 실험체 길이에 따른 강도의 크기효과

Bazant의 크기효과법칙(SEL)⁽⁷⁾이 발표된 이후, 김진근 등^(8,9)은 부재의 크기와 무관한 항인 σ_0 항을 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과법칙(MSEL)을 제안하였다. 이에 대한 응용으로서 휨압축력을 받는 C형 실험체^(1,2) 및 축압축력을 받는 원주공시체^(10,11)에 대한 연구결과가 발표된 바 있다.

축압축 실험체의 경우, 휨압축 실험체에 비하여 균열의 분산이 더 많으므로 크기효과는 적은 반면 휨압축 실험체의 경우 균열이 집중되므로 크기효과는 크게 일어난다. 즉 축압축 실험체와 휨압축 실험체의 strain gradient는 각각 사각형과 삼각형으로 서로 다르다.

아래의 Fig. 3은 Rüsche에 의한 연구결과⁽¹²⁾로써, 최대 모멘트를 받는 콘크리트 단면에서의 압축응력분포의 형태에 따른 압축연단의 극한변형률(ϵ_{cu})을 나타내고 있다.

이 그림에서 중실원은 중립축이 인장철근의 중심에 위치하는 경우이고 중공원은 중립축이 압축연단에 위치하는 경우인데, 대부분의 부재는 이 두 경우의 사이에 있다. 전자는 극단적인 경우의 과다철근콘크리트 보를 나타내는데, 이 경우는 strain gradient의 감소로 인하여 순수 축압축 파괴와 비슷하게 콘크리트의 파괴가 발생하게 된다. 또한 이 그림으로부터 strain gradient가 작을수록 ϵ_{cu} 가 작아짐을, 즉 중립축 깊이가 클수록 strain gradient가 작아짐을 알 수 있다.

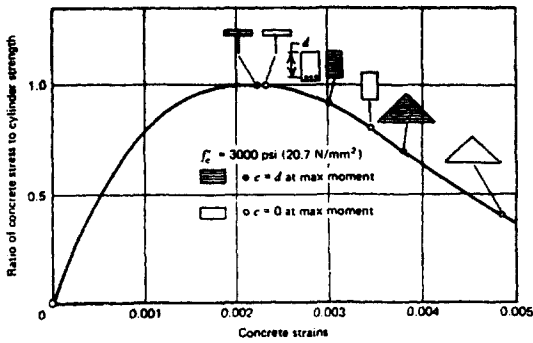


Fig. 3 Effect of section shape on the concrete strain at the extreme compression fiber at maximum moment (12)

따라서 부재의 깊이효과를 예측할 수 있는 모델식을 제안하기 위해서 참고문헌 1의 식(1)을 분모에 $\lambda(c)$ 를 추가함으로써 다음과 같이 수정하였다.

$$f_{cu}(c) = \frac{0.70f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{c}{2.6} \lambda(c)}} + 0.47f_{cu} \quad (1)$$

여기서 $\lambda(c)$ 는 strain gradient에 따른 파괴영역의 크기를 나타내며, strain gradient가 크면 크기효과가 커지는 함수이다. 즉 c 가 크면 strain gradient가 작아지므로 크기효과는 작게 일어난다. 다시말하여 c 가 커지면 $\lambda(c)$ 값은 작아져야 한다. 이를 확인하기 위하여 이 논문에서와 같이 실험체의 길이 h 를 일정하게 두고 깊이 c 를 변화시키는 실험을 수행하였으며 이 경우, c 가 크질 수록 균열이 더욱 분산되어 크기효과가 더 작게 일어날 것으로 예상된다. 또한 이 식에서 MSEL의 B , α , 그리고 l_0 에 해당하는 값은 참고문헌 1의 식(1)에서 해당하는 값과 같음을 알 수 있다.

여기서는 파괴시 C형 실험체의 깊이에 따라 휨 압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 얻기 위해 수정된 크기효과법칙과 본 실험에서 얻은 8개 (Table 2)의 실험값에 대한 회귀분석(Levenberg-Marquardt의 최소자승법(Least Square Method, LSM))^(13,14)을 수행하여 식(2)를 얻었으며, 그 결과는 Fig. 4에 나타나 있다.

$$f_{cu}(c) = \frac{0.70f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{c}{2.6} \left\{ 4.17 \left(\frac{1}{c} \right)^{0.53} \right\}}} + 0.47f_{cu} \quad (2)$$

여기서 $f_{cu}(c)$ 는 P_u/bc 에 의해 계산된 C형 실험체의 휨압축강도이고, f_{cu} 는 원주공시체 ($\phi 10 \times 20$ cm)에 대한 콘크리트의 압축강도를 각각 나타내는데 단위는 MPa이다. 그리고 실험체의 깊이를 나타내는 c 의 단위는 cm이다.

Fig. 4에서 원은 C형 실험체에서 얻은 실험자료, 굵은 실선은 식(2)로부터의 결과를 나타낸다. 이 그림은 부재의 깊이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도는 점점 감소함을 나타내고 있다.

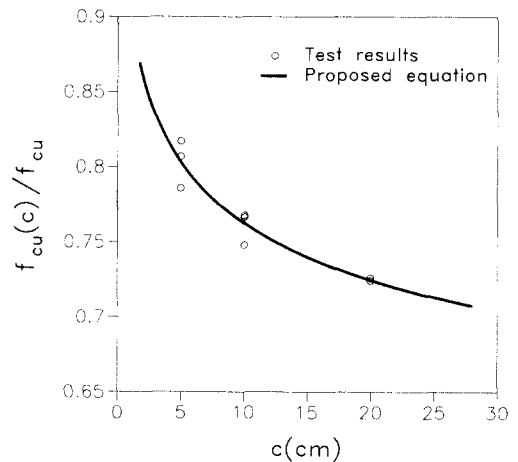


Fig. 4 $f_{cu}(c)/f_{cu}$ as function of the specimen depth

위의 식(2)를 실험자료와 직접 비교하기 위한 통계해석 결과가 Fig. 5에 나타나 있다.

이 그림에서 가로축과 세로축은 각각 식(2)에 의해 계산된 값과 실험결과에서 얻은 값을 나타내는데, 상관계수(r)는 0.953이었으며 표준편차(s)는 0.011이었다. 또한, 이 그림에 의하면 예측 값과 실험 값 사이에 흩어짐은 있으나 근사적으로 선형관계가 성립함을 알 수 있다. 따라서, 깊이가 20 cm인 부재에 있어서 임의의 중립축 깊이를 갖는 보의 단면에 대한 휨압축강도는 이 부재의 깊이 및 원주공시체의 압축강도를 식(2)에 대입시키면 얻을 수 있다.

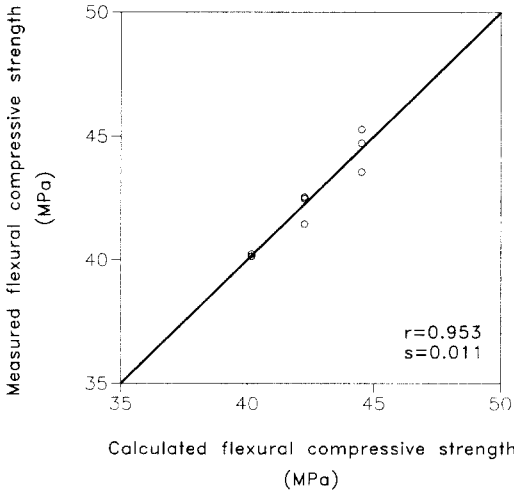


Fig. 5 Comparisons of the measured and calculated values of flexural compressive strength

Fig. 6에는 SEL에 의한 $\log(f_{cu}(c)/Bf_{cu})$ 와 $\log(D/D_0)$ 의 관계가 나타나 있는데, 여기서 D_0 는 $\lambda_0 d_a$ 를 나타낸다. 또한 D 는 부재의 특성길이를, B 와 λ_0 는 실험상수를, 그리고 d_a 와 f_{cu} 는 각각 굽은골재 최대치수와 콘크리트의 압축강도를 나타낸다.

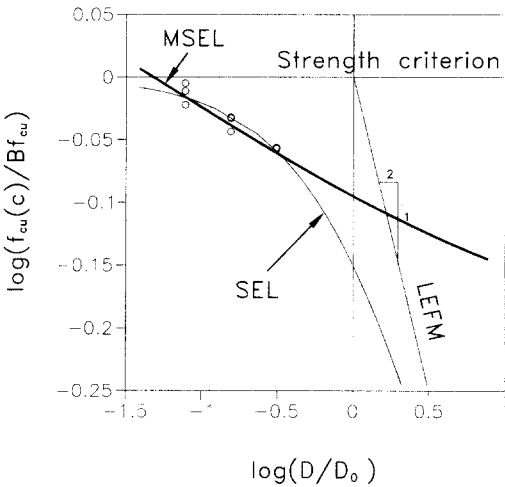


Fig. 6 Size effect measured for C-shaped specimen in SEL

이 그림으로부터 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 즉, (1)깊이효과에서도 파괴시의 강도는 크기효과를 나타낸다. (2)부재의 크기가 증가함에

따라 SEL에서는 강도기준에서 LEFM으로 점차적인 transition을 보이지만 MSEL에 있어서는 부재의 크기가 증가할수록 강도가 일정한 값에 수렴해 가는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 사실은 설계 시와 안정성의 평가 시에 고려되어야 하며, 특히 소규모의 실험결과에서 실제 크기의 구조물로 외삽법을 적용할 때 중요하다.

또한 이 그림으로부터 실험결과가 특정영역($\log(D/D_0)$ 가 0.0보다 작은)에 집중됨을 알 수 있다. 이로부터 부재의 크기 범위(h/c)가 4보다 작으면 크기효과가 뚜렷이 나타나지 않을 수 있으며 추후에 실험이 추가로 수행된다면 이 비가 더 큰 실험체를 선택해야 함을 알 수 있다.

3.3 등가 직사각응력분포의 깊이에 대한 검토

아래의 Fig. 7은 이 연구의 실험결과를 이용하여 등가 직사각응력블록의 깊이(β_1)에 대한 검토를 수행한 결과이다.

수평으로 그려진 굽은 파선은 우리 설계기준⁽¹⁵⁾에 의해 등가응력으로 $0.85f_{cu}$ 를 택하였을 때, 이 실험에서 사용한 콘크리트의 강도가 55 MPa이므로 이에 대한 β_1 값인 0.65를 나타내며 원은 다음의 식(3)으로부터 얻은 실험 값을 의미한다.

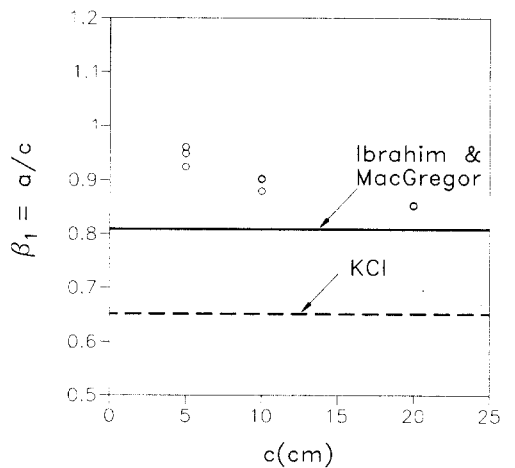


Fig. 7 Depth of the equivalent rectangular stress block as function of the specimen depth

$$\beta_1 = a/c = \frac{P_u}{0.85 \times 55 \times 0.125 \times 0.1} \times \frac{1}{1000} \quad (3)$$

이로부터 β_1 은 c 가 증가함에 따라 점차 감소하지만 우리 설계기준에서 제시하는 값보다는 상당히 큰 값을 보이고 있음을 알 수 있다.

한편 고강도 콘크리트에 있어서의 등가 직사각형력분포에 대한 검토가 Ibrahim과 MacGregor⁽¹⁶⁾에 의해 수행되었으며 아래식은 이들이 제시한 모델식이다.

$$\beta_1 = 0.95 - \frac{f_{cu}}{400} \geq 0.70 \quad (4.a)$$

$$\alpha_1 = 0.85 - \frac{f_{cu}}{800} \geq 0.725 \quad (4.b)$$

고강도의 콘크리트일수록 위 식으로부터의 결과가 우리 설계기준보다 β_1 은 커지고 α_1 은 작아 질 것임을 예측할 수 있는데, 이는 우리 설계기준에서 β_1 이 f_{cu} 에 따라 $0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$ 의 범위에 있고 α_1 은 0.85로 고정되어 있기 때문이다. Fig. 7에서 굵은 실선은 식(4.a)로부터 $f_{cu} = 55$ MPa인 경우, 즉, $\alpha_1 = 0.85 - 55/800 \approx 0.78$ 일 때의 $\beta_1 = 0.81$ 을 나타내고 있는데 c 가 증가함에 따라 식(4.a)가 실험결과와 더 잘 맞음을 알 수 있다. 즉, ACI 설계기준에서 β_1 값을 규정할 때 근거로 삼은 실험체의 크기와 같고 길이만 다른 $c = 20$ cm 실험체의 경우, β_1 은 서로 비슷함을 알 수 있다.

한편 참고문헌 1에서의 Size I 실험체는 ACI에서 β_1 을 정할 때 참조로 한 실험체의 크기⁽³⁻⁶⁾와 같으며, 실험결과도 ACI에서 채택하고 있는 결과와 거의 대등한 수준인 것으로 밝혀진 바 있다.⁽²⁾ Fig. 7의 결과는 참고문헌 1에서 Size II 실험체의 깊이만을 변화시킨 경우로서 ACI의 경우와는 부재의 크기와 콘크리트의 압축강도가 다르고 사용된 굵은골재 최대 치수도 다른 등 서로의 조건이 다르기 때문으로 생각된다. 또한 이와

같은 경향은 참고문헌 1의 응력-변형률 곡선이 부재의 크기에 따라 변한다는 사실로부터도 확인할 수 있다.

따라서 추후에는 콘크리트의 압축강도 뿐만 아니라 부재의 크기가 ACI에서 사용한 것과 다른 경우에도 등가응력으로 $0.85f_{cu}$ 를 사용하는 것과 $f_{cu} = 55$ MPa 정도의 강도에 대하여 $\beta_1 = 0.65$ 를 사용하는 것에 대하여 더욱 심도 깊은 검토가 필요하다고 판단된다.

3.4 극한변형률, 응력-변형률 곡선 및 실험체 중앙부의 수평방향 변위에 대한 검토

직사각형 단면 보가 휨압축을 받아 파괴에 이를 때 압축연단 콘크리트의 극한변형률(ϵ_{cu})은 대개 0.003~0.004의 범위에 있다는 사실은 보의 실험을 통하여 널리 알려져 있으며 이 C형 실험체 실험에 의해서도 비슷한 결과를 얻었다. Fig. 8에서 수평으로 그려진 굵은 파선은 우리 설계기준에서 제시한 0.003을 의미하는데, 이 그림은 실험결과의 값이 0.003에 비하여 어떻게 변하는 지를 보이고 있다.

이로부터 모든 실험체의 극한변형률은 0.003보다 크며 이 극한변형률에도 부재의 깊이에 따른 크기효과가 존재함을 알 수 있었다.

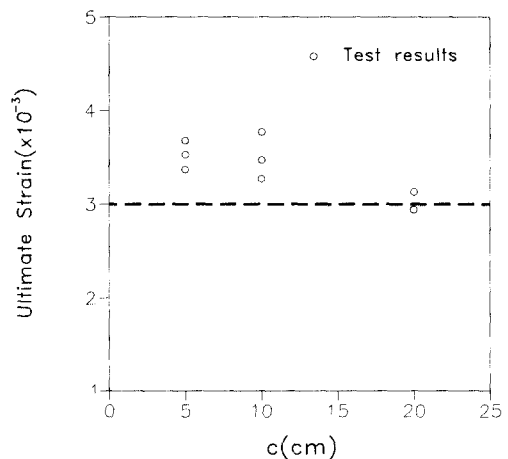


Fig. 8 Ultimate strains as function of the specimen depth

Fig. 9에는 C형 실험체 압축연단에서의 응력 (f_c)과 변형률(ϵ_c)의 관계가 나타나 있다. 얇은 실선은 3차의 비선형 다항식을 이용한 회귀분석을 통해 얻었으며 굵은 실선은 원주공시체에서 얻은 결과이다. 깊이효과에서도 f_{cu} 까지는 원주공시체와 C형 실험체의 거동이 유사함을 알 수 있다. 그러나 이 영역을 넘어서면 부재의 깊이가 줄어들수록 C형 실험체의 최대 응력 및 이 최대 응력에 대응하는 변형률은 커지며, 더욱 연성적인 거동을 보이고 있다.

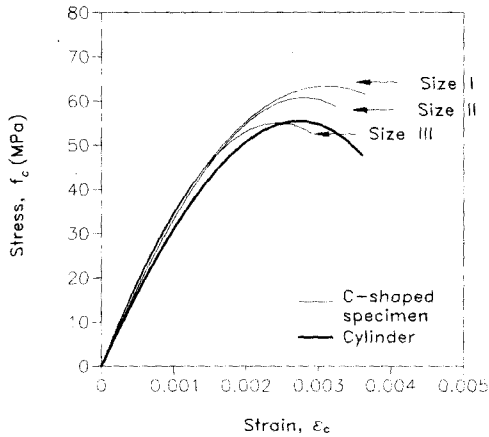


Fig. 9 Comparisons of stress-strain relationship in C-shaped specimens and cylinders

한편 f_c 와 ϵ_c 의 관계는 단면의 모든 층(layer)에서 유효하므로 임의로 측정된 변형률에 대한 휨압축강도는 이 관계로부터 구할 수 있다.

또한 이 그림으로부터 본 실험에서는 고강도 콘크리트의 사용으로 인해서 취성파괴가 발생했으며 곡선들이 최대 응력을 넘어서자 곧 끝났음을 알 수 있다. 따라서 보다 낮은 강도의 콘크리트를 사용하면 연성에 가까운 파괴를 보일 것이므로 최대 응력 이후 상당한 부분까지도 이 곡선들을 얻을 수 있음을 예측할 수 있다. 그리고 휨압축을 받는 콘크리트 부재의 응력-변형률 곡선은 원주공시체의 1축압축강도에 대한 관계곡선과 최대응력 이후의 부분에서 특히 차이가 남을 알 수 있다.

Fig. 10에는 C형 실험체에 대한 극한하중($P_u = P_1 + P_2$)과 LVDT로부터 얻은 실험체 중앙부

의 수평방향 처짐(δ)과의 관계가 나타나 있다.

이 그림으로부터 실험체의 깊이가 작아질수록 가해진 하중은 줄어들고 실험체 중앙부의 수평방향 처짐은 증가함을 알 수 있다. 또한 모든 곡선의 뒷 부분으로 갈수록 비선형성은 증가하는데, 이는 C형 실험체 단면에서의 응력분포가 선형에서 비선형으로 약간 변화하기 때문으로 생각된다.

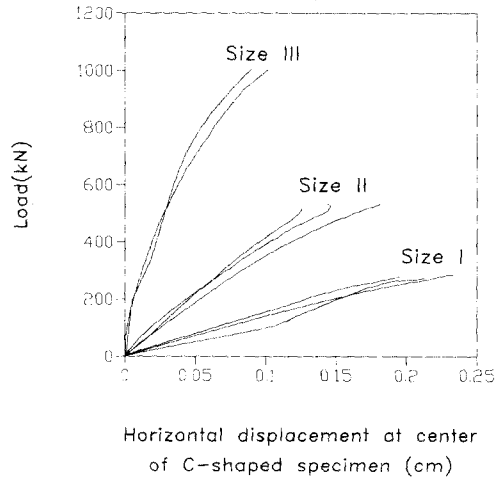


Fig. 10 Comparisons of load-displacement curve

3.5 C형 실험체에 대한 크기효과 법칙의 일반화

식(5)는 이 연구의 실험결과와 기존의 연구결과^(1,2)를 동시에 만족할 수 있는 총 39개의 C형 실험체에 대한 일반화된 모델식으로서 회귀분석을 통해 얻어졌다.

$$f_c(c, h) = \frac{0.70f_{cu}}{\sqrt{1 + \frac{c}{2.6} \left\{ 0.77 \left(\frac{h}{c} \right)^{0.56} - 0.13 \right\}}} + 0.47f_{cu} \quad (5)$$

f_{cu} 는 $\phi 10 \times 20$ cm 원주공시체에 대한 콘크리트의 압축강도를, c 와 h 는 각각 부재의 중립축 깊이와 부재의 길이를 의미하며 그 단위는 MPa와 cm이다. 그리고 $h/c \geq 3$ 이면 $h/c = 3$ 으로 해야 하며⁽²⁾ $h/c = 2$ 이면 $\lambda(h/c)$ 는 1.0이 됨을 알 수 있다. 따라서 이 경우 위의 식이 참고 문헌 1의 식(1)과 같이 됨을 알 수 있다. Fig.

11에서 원은 실험 값을 굵은 실선은 식(5)로부터의 결과를 나타내는데 식(5)가 실험결과를 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 이 경우에 대한 상관 계수(r)는 0.931이었으며 표준편차(s)는 0.023이었다. 따라서 임의의 부재 깊이와 길이를 갖는 보의 휨압축강도는 이 부재의 중립축 깊이, 길이 및 콘크리트의 압축강도를 식(5)에 대입시키면 얻을 수 있다.

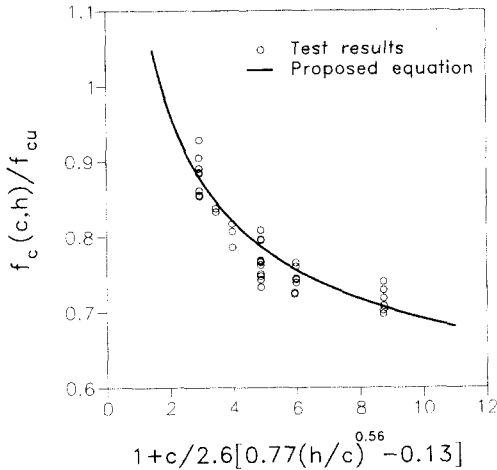


Fig. 11 $f_c(c, h)/f_{cu}$ as function of the $1 + c/2.6[0.77(h/c)^{0.56} - 0.13]$

4. 결론

휨을 받는 철근콘크리트 부재에서 휨압축강도의 크기효과에 부재의 깊이가 미치는 영향을 실험적으로 검토한 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

- 1) 부재의 깊이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 현상이 뚜렷이 나타남을 확인했으며, 실험결과를 이용하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제시하였다. 또한 이 실험에서 얻은 실험결과와 기존의 실험결과^(1,2)를 동시에 고려하여 보다 일반적인 휨압축강도에 대한 크기효과 모델식을 제안하였다.
- 2) β_1 은 부재의 깊이가 증가함에 따라 점차 감소하지만 우리 설계기준에서 제시하는 값보다 높은 여전히 큰 경향을 보였다. 따라서 이에

대해서는 더 많은 연구가 필요하다고 판단된다.

- 3) C형 실험체에서도 극한변형률은 0.003~0.004의 범위에 있으며 부재의 깊이에 따른 크기효과가 존재함을 확인하였다.
- 4) 응력-변형률 곡선에서 부재의 깊이가 작을수록 최대압축강도와 이 최대압축강도에 대응하는 변형률이 부재의 깊이가 큰 실험체에 대한 값보다 더 커짐을 알 수 있었다.
- 5) 본 논문의 결과로부터 현재 실제 설계에 사용되고 있는 강도기준이 개선되어야 함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 국가지정연구소(NRL)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Kim, J.K., Yi, S.T. and Yang, E.I., "Size Effect on Flexural Compressive Strength of Concrete Specimens," ACI Structural Journal, V.97, No.2, Mar.-Apr. 2000, pp.291-296.
2. 김진근, 이성태, 이태규, "부재의 깊이가 콘크리트의 휨압축강도에 미치는 영향," 콘크리트학회논문집, 제 11권 4호, 1999, pp.63-71.
3. Hognestad, E., Hanson, N.W. and McHenry, D., "Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of ACI, V.27, No.4, Dec. 1955(Proceedings V.52), pp.455-479.
4. Kaar, P.H., Hanson, N.W. and Capell, H.T., "Stress-Strain Characteristics of High-Strength Concrete," PCA Research and Development Bulletin RD051.01D, 1977, pp.1-10.
5. Swartz, S.E., Nikaeen, A., Narayan Babu, H.D., Periyakaruppan, N. and Refai, T.M.E., "Structural Bending Properties of Higher Strength Concrete," High-Strength Concrete, SP-87, ACI, 1985, pp.147-178.
6. Mattock, A.H., Kriz, L.B. and Hognestad, E., "Rectangular Concrete Stress Distribution in Ultimate Strength Design," Journal of ACI, V.32, No.8, Feb. 1961. (Proceedings V.57), pp.875-928, also PCA Development Bulletin D49.

7. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture: Concrete, Rock," *Metal, Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, V.110, No.4, Apr. 1984, pp.518-535.
8. Kim, J.K. and Eo, S.H., "Size Effect in Concrete Specimens with Dissimilar Initial Cracks," *Magazine of Concrete Research*, V.42, No.153, Dec. 1990, pp.233-238.
9. Kim, J.K., Eo, S.H. and Park, H.K., "Size Effect in Concrete Structures without Initial Crack," *Fracture Mechanics: Application to Concrete*, SP-118, ACI, Detroit, 1989, pp.179-196.
10. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과," *콘크리트학회논문집*, 제9권 1호, 1997, pp.105-113.
11. Kim, J.K., Yi, S.T., Park, C.K. and Eo, S.H., "Size Effect on Compressive Strength of Plain and Spirally Reinforced Concrete Cylinders," *ACI Structural Journal*, V.96, No.1, Jan.-Feb. 1999, pp.88-94.
12. Rüschi, H., "Researches Toward a General Flexural Theory for Structural Concrete," *Journal ACI*, V.57, No.1, Jul. 1960, pp.1-28. Discussion in *Journal ACI*, V.57, No.9, Mar. 1961, pp.1147-1164.
13. IMSL, Library, Edition 8, IMSL, Inc., Sixth Floor, NBC Building, 7500 Bellaire Blvd., Houston, Texas 77036.
14. Benjamin, J.R. and Cornell, C.A., "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers," McGraw-Hill, New York, 1970, Section 4.3.
15. 한국콘크리트학회, "콘크리트구조설계기준," 1999, pp.222
16. Ibrahim, H.H.H. and MacGregor, J.G., "Modification of the ACI Rectangular Stress Block for High-Strength Concrete," *ACI Structural Journal*, V.94, No.1, Jan.-Feb. 1997, pp.40-48.

요 약

현재까지도 콘크리트 휨부재에 있어서 부재의 깊이가 임의 단면의 극한강도에 미치는 영향은 체계적으로 연구되지 않고 있다. 그러나 깊이효과는 부재의 설계에 고려되어야 할 사항으로 매우 중요하며 콘크리트는 여러 형태의 하중에 대하여 부재의 깊이가 증가함에 따라 강도가 감소하는 깊이효과를 항상 나타낸다.

따라서 본 논문에서는 휨압축 부재에 대한 실험을 수행하여 깊이효과를 검토하고자 한다. 이를 위하여 축압축력과 휨모멘트를 동시에 받는 일련의 C형 실험체에 대한 실험을 수행하였다. 실험체의 크기는 3가지였으며 콘크리트의 압축강도는 55 MPa이었다.

실험결과로부터 부재의 깊이가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 깊이효과가 존재하며, 극한변형률에도 부재의 깊이에 따른 크기효과가 존재함을 확인하였다. 최종적으로 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.

(접수일자 : 2000. 7. 7)