
콘크리트의 휨 압축강도의 크기효과

Size Effect for Flexural Compressive Strength of Concrete



김진근*
Kim, Jin-Keun



이성태**
Yi, Seong-Tae



양은익***
Yang, Eun-Ik

ABSTRACT

When the ultimate strength of a concrete flexural member is evaluated, the effect of member size is usually not considered. For various types of loading, however, the strength always decreases with the increment of member size.

In this paper the size effect of a flexural compression member is investigated by experiments. For this purpose, a series of C-shaped specimens subjected to axial compressive load and bending moment was tested using three different sizes of specimens with a compressive strength of 528 kg/cm^2 .

According to test results the size effect on flexural compressive strength was apparent, and more distinct than that for uniaxial compressive strength of cylinders. Finally a model equation was derived using regression analyses with experimental data.

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

* 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 교수

** 정회원, 한국과학기술원 토목공학과 박사과정,
한국전력기술(주) 책임연구원

*** 정회원, 한국해양연구소 선임연구원

·본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트 휨부재의 압축영역에서 비선형적인 응력분포를 측정하거나 적절한 모델식으로 표현하기는 쉽지 않다. 1955년에 Hognestad 등⁽¹⁾은 실험을 통하여 원점에서 최대응력까지는 상승하는 곡선과 이 최대응력 이후로는 감소하는 곡선으로 강도 설계에서의 콘크리트 응력분포를 나타내었다. 이때 제안된 편심하중을 받는 C형 공시체에 대한 실험방법이 현재 ACI 표준식의 유도시에 채택되고 있다.

Hognestad 등의 연구결과는 Kaar 등⁽²⁾과 Swartz 등⁽³⁾에 의해 동일한 절차를 이용하여 실험적으로 타당함이 입증되었으며, 강도 설계이론에 적용 가능성은 등가 사각형 응력분포에 근거를 둔 Mattock 등⁽⁴⁾에 의해 개선되었다. 그러나 지금까지도 실험을 수행함에 있어서 발생하는 각종 어려움으로 인하여 소수의 제한된 연구결과만이 발표되고 있다.

한편 공시체의 크기가 증가함에 따른 강도 감소현상은 1925년 Gonnerman⁽⁵⁾에 의해 최초로 증명된 바 있다. 그 후에도 많은 연구자들에 의해 이 현상이 실험적으로 뒷받침되었으나, 크기효과의 구명을 위한 실험변수의 선택이 다양하여 일관된 해석이 거의 불가능하였다.

1984년에 Bazant⁽⁶⁾는 콘크리트의 균열 진전시 에너지 평형 개념을 고려하여 초기 균열이 있으며 기하학적으로 유사한 다른 크기의 공시체에 대한 차원해석으로 부터 크기효과 법칙(size effect law, SEL)을 제안하였다.

그 후, 많은 연구자들은 다양한 형태의 콘크리트 구조물의 파괴(예를 들면, 보의 사인장 전단파괴⁽⁷⁾, 슬래브의 편칭 전단파괴⁽⁸⁾, bar의 뽑힘파괴⁽⁹⁾, 기타 구조물의 파괴 등등^(10~12))에 대해 파괴역학에 근거하여 크기효과를 구명하는 연구를 수행해왔다.

그러나 대부분의 연구에서 크기효과는 휨압축 하중조건이 아닌 순수 인장이나 전단 등에 대해 검토되어 왔으며, 휨압축 하중조건 하에서의 공시체의 크기가 커질수록 공칭 파괴강도가 감소하는 현상은 과거에서부터 많은 관심을 받아 왔으나 현재까지도 적절한 평가 방법이 없는 실정이다.

취성재료인 콘크리트는 압축을 받을 경우에도 궁극적으로는 균열의 발생으로 인하여 파괴에 도달하므로 크기효과가 항상 존재할 것으로 판단된다. 또한 최근에 들어서는 콘크리트 구조물의 설계기술이 매우 높은 단계까지 향상되었으며 그 크기도 점점 대형화되고 있으므로 원형의 크기(full scale)로 강도를 예측하기 위한 실험을 수행하기는 매우 어려운 실정이다. 이와 같은 경우에는 축소된 실험실 규모에서 얻은 결과에 외삽법(extrapolation)을 적용하여 구조물의 거동을 파악하고 있다. 그리고 설계시 사용하는 콘크리트의 압축강도는 $\phi 10 \times 20$ cm나 $\phi 15 \times 30$ cm 크기의 실린더 공시체에 의한 것으로 실제 구조물의 강도는 이 보다 작을 가능성을 내재하고 있다. 따라서 최근에 들어서는 휨압축 부재의 크기가 증가함에 따라 강도가 감소하는 크기효과에 대한 연구를 충분히 수행하여 설계시에 이를 반영하고자 하는 노력이 점점 확대되고 있다.

아래의 Fig. 1에는 전형적인 철근콘크리트 보가 3가지 크기로 나타나 있다. 과다 철근콘크리트 보(over reinforced concrete beam)에서의 휨강도는 주로 두 연직하중과 중립축 사이 부분의 콘크리트 강도와 연관이 있다. 반면, 과소 철근콘크리트 보(under reinforced concrete beam)에서의 휨강도는 인장철근량에 주로 지배되는데 하중이 증가하여 인장철근이 항복한 후에도 균열과 처짐은 계속 발달하여 중립축이 압축축으로 이동하면서 모멘트 팔길이 길어져 콘크리트의 연단변형률이 극한변형률에 이를 때까지 모멘트가 증가한 후 보가 파괴에 이른다. 따라서 이 경우도 결국은 콘크리트의 압축강도와 관계가 있게 된다.

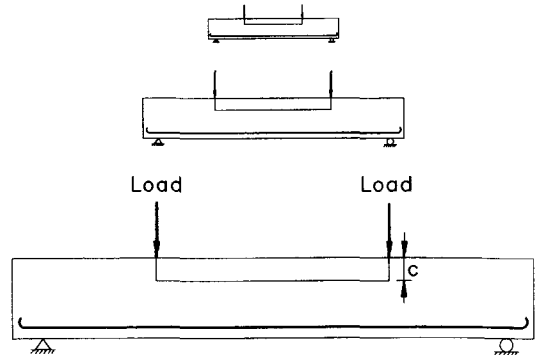


Fig. 1 Reinforced concrete beams

그리고 휨하중을 받는 철근콘크리트 보의 크기 효과에 대한 대부분의 실험에서는 Fig. 1에서와 같은 보를 사용하고 있으나 이와 같은 보에 있어서 중립축의 위치는 부재의 크기, 철근비, 가해진 하중의 크기 및 하중 가력점의 위치 등에 따라 변할 수 있으므로 본 실험에서는 이를 제어할 수 있으며 보의 압축 부분만을 대상으로 하는 C형 공시체를 선택하였다.

본 연구에서는 이와 같이 휨압축력을 받는 부재에서의 크기효과 범칙의 적용성을 검토하기 위한 일환으로서 축하중과 휨모멘트를 동시에 받는 C형의 콘크리트 부재에 대한 실험적·확률적 검토를 통해 보의 중립축에서 압축연단까지의 다양한 거동을 비교·검토하였으며 여기서 얻어진 결과는 실제 설계 시에 반영될 수 있을 것으로 사료된다.

한편 균형 철근비 이하로 설계된 보통의 철근 콘크리트 보의 변형거동에 대해서는 콘크리트의 역할로 인하여 크기효과를 고려해야 한다. 철근을 매우 적게 넣은 보 혹은 전혀 넣지 않은 보에 하중이 가해지는 경우, 이 보는 균열의 발생과 동시에 갑작스럽게 파괴되므로 이러한 보의 크기효과는 최소 철근비 이상의 보에 대한 크기효과와는 크게 다르다. 따라서 이 논문이 적용 가능한 범위는 이와 같은 파괴를 피하기 위하여 철근비를 설계기준에서 요구하는 최소 철근비 이상으로 사용한 보에 국한하였다.

2. 실험개요

2.1 실험변수

실험시에는 Hognestad 등⁽¹⁾이 사용한 실험절차가 채택되었으며 주요 실험변수는 콘크리트 압축강도가 528 kg/cm²일 때 Hognestad 등이 사용한 C형 공시체(Fig. 2 참조)와의 크기 비(100%, 50%와 25%)였다. 한편 공시체의 두께가 크기효과에 미치는 영향은 크지 않으므로 모든 공시체의 두께는 12.5 cm로 일정하게 하였다.

2.2 배합설계

C형 공시체를 만들기 위해 선택된 콘크리트 배합표는 Table 1에 주어지 있다. 공시체는 수평으로 타설되었으며 굵은골재의 최대치수(d_a)는 13 mm였다. 콘크리트를 치밀하게 하고 작업성을 좋게 하기 위하여 고성능 감수제와 진동기가 사용되었다.

콘크리트의 비빔에 사용된 믹서는 공칭용량 80 리터의 강제식 믹서이며, 재료를 굵은골재, 잔골재 및 시멘트의 순으로 투입하여 1분간 건비빔한 다음 물과 고성능 감수제를 동시에 투입하여 3분간 비빔 후 미리 준비된 거푸집에 타설하였다. 모든 실린더와 공시체는 타설 후 24시간이 경과하여 탈형했으며, 실험 수행시까지 습윤포(wet burlap/towel)하에서 기건양생되었다.

Table 1 Mix proportions and properties of concrete

W/C (%)	S/A (%)	unit weight(kg/m ³)				S.P.* (%)	(kg/cm ²)		
		W	C	S	G		f'_c	f_{sp}	E_c
37	40	178	480	676	1014	1	528	50	3.15×10^5

* superplasticizer(ratio for cement weight)

2.3 공시체의 크기, 형상 및 실험절차

보의 휨압축 거동을 실험적으로 검토하기 위한 공시체를 Fig. 2에 나타내었는데, 이 그림에는 C형 공시체의 형상, 치수 및 하중 가력점 등이 나타나 있다. 실험시의 주요 고려 대상 부위인 공시체의 중앙부는 무근이며, 양쪽 단부는 가력 장비로부터의 하중을 이 중앙부에 전달하기 위하여 휨철근과 전단철근으로 보강하였다. 한편, 공시체 크기 III의 경우에는 공시체의 크기가 상대적으로 작아 오차의 발생이 클 수 있으므로 다른 크기의 공시체보다 많은 9개의 공시체를 제작하였다.

실험을 수행하는 동안에는 아래의 Fig. 2와 같이 공시체 당 12개의 변형률 게이지를 공시체의 중앙부에 설치하였으며 파괴될 때까지의 변형률이 측정되었다. 또한, 2개의 LVDT가 공시체의 단부에 대한 중앙부의 상대적 처짐을 측정하기 위하여 공시체의 압축 측에 설치되었는데, 여기서 얻은 자료의 평균치는 휨모멘트의 계산시 이용되

는 하중팔(load level arm, a_1 과 a_2)을 보정하는데 사용되었다.

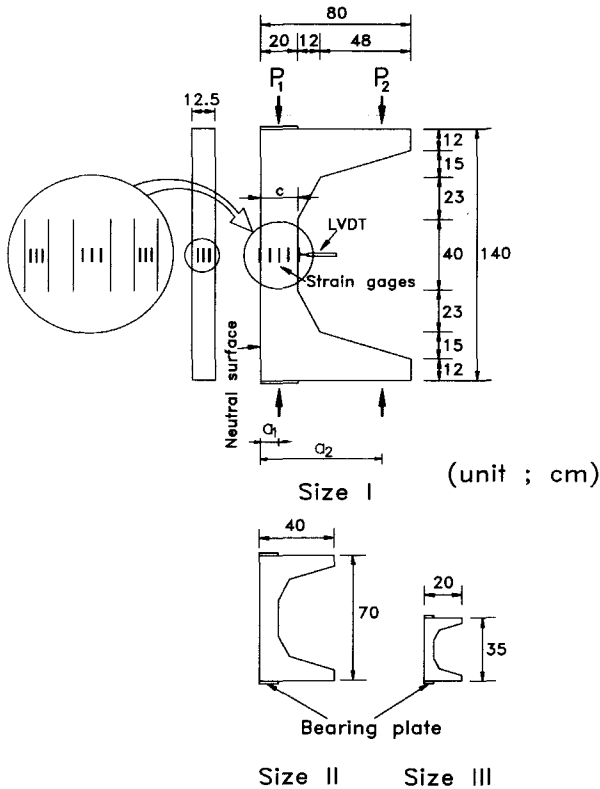


Fig. 2 Size and shape of specimens

재하에 대한 상세 절차로는 먼저 공시체 인장연단에서의 변형률 게이지의 초기 값이 특정값(공시체의 크기 I, II, III의 경우에 각각 100×10^{-6} , 50×10^{-6} , 50×10^{-6} 이 선택되었음)이 될 때까지 P_1 을 가한 후 이를 정지시키고 이후 P_2 를 서서히 증가시키는데 인장연단의 변형률 게이지 값이 0에 도달하면 P_2 를 정지시킨다. 공시체가 파괴될 때까지 이 절차를 반복 수행하는데, 콘크리트의 비탄성영역에서는 보다 정확한 실험자료를 얻기 위하여 인장연단 게이지 값의 증분을 더욱 작게 취한다. 각 공시체에 설치된 12개의 변형률 게이지 및 2개의 LVDT에서의 측정 값은 전 실험과정에 걸쳐 연속적으로 자료를 측정시키는 계측기기로 취하였다.

축력을 유발시키는 주 하중(P_1)은 유압으로

조작되는 250ton 용량의 만능재료시험기(UTM)에 의해 가해졌는데 제어방식으로는 변위제어법을 이용하였다. 축력과 휨력을 유발시키는 종 하중(P_2)은 20ton 용량의 수동식으로 조작되는 유압잭(hydraulic jack)을 이용하여 가했으며 공시체 III의 경우에는 크기가 작아 유압잭의 자중효과가 커지므로 볼트, 너트 및 강봉으로 구성되는 회전집합체(rotating assembly)를 이용하여 가력하였다. 그리고 종 하중의 가력치를 측정하기 위해서는 부재의 크기에 따라 20ton과 5ton 용량의 로드셀(load cell)을 사용하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험결과

C형 공시체와 실린더 압축강도의 실험은 동일 재령에 실시되었다. Table 2의 공시체 번호에서 I, II, III은 공시체의 크기를, 그리고 아라비아 숫자는 각 공시체의 일련번호를 나타낸다.

Table 2 Experimental results of C shaped specimens

No. of specimen	P_{ulti} (ton)	ϵ_{ulti} ($\times 10^{-3}$)	χ_{ulti} ($\times 10^{-3}/\text{cm}$)	δ (mm)
I-1	92.03	3.31	0.17	2.83
I-2	96.21	4.22	0.21	2.99
I-3	92.67	3.08	0.15	2.92
I-4	94.77	3.35	0.17	3.03
I-5	97.69	3.38	0.17	3.17
I-6	93.46	2.83	0.14	2.66
II-1	48.40	4.37	0.44	1.49
II-2	49.53	3.56	0.36	1.52
II-3	50.73	3.94	0.39	1.74
II-4	50.67	3.42	0.34	1.58
II-5	52.51	3.40	0.34	1.51
II-6	49.04	3.73	0.37	1.47
III-1	29.39	4.47	0.89	0.75
III-2	28.22	4.40	0.88	0.55
III-3	30.64	5.03	1.01	0.78
III-4	29.18	4.04	0.81	0.69
III-5	28.41	3.95	0.79	0.77
III-6	29.21	4.68	0.94	0.65
III-7*	-	-	-	-
III-8	28.18	4.48	0.90	0.71
III-9	29.86	4.38	0.88	0.77

* fails due to collapse of loading point

Table 2에 주어진 콘크리트 압축강도(f_c')는 시리즈 당 3개의 $\phi 10 \times 20$ cm 실린더 공시체에서 얻은 값을 평균한 결과이며 528 kg/cm^2 의 값을 얻었다. P_{ulti} , ϵ_{ulti} , x_{ulti} 및 δ 는 각각 공시체가 파괴될 때의 주 하중과 종 하중의 합 ($P_1 + P_2$), 콘크리트 압축연단의 변형을 및 곡률 그리고 공시체 중앙부에서의 처짐을 의미한다.

실험시, C형 공시체 중 20개의 공시체가 실험영역 중앙부의 압축연단에서 파괴되었으며, 공시체 전체의 파괴에 앞서 쪼개짐(spalling)이 발생했다. 공시체 III-7의 경우에는 극한하중에 도달하기 전에 공시체의 하단 단부에서 지압파괴가 발생했다. 따라서, 여기에 해당하는 자료는 결과분석에서 제외하였다.

실험 진행 중 크기가 큰 공시체일수록 더욱 취성적인 상태로 파괴되는 경향이 있었는데, 이는 콘크리트 재료의 취성의 성질과 실험장비에 누적되는 에너지해방률 및 장비의 강성과 관련이 있는 것으로 판단되었다.

3.2 공시체의 형상 및 파괴형태에 따른 크기효과의 비교

Bazant의 크기효과 법칙이 발표된 이후, 김진근 등⁽¹³⁻¹⁴⁾은 부재의 크기와 무관한 항인 $\sigma_o (=af_c')$ 을 고려함으로써 초기 균열이 없는 경우 혹은 비유사 균열을 가진 콘크리트 부재의 강도 예측을 위한 수정된 크기효과 법칙(modified size effect law, MSEL)을 제안하였다.

파괴시 C형 공시체의 휨압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 얻기 위해 수정된 크기효과 법칙으로 20개(Table 2)의 실험자료에 대한 회귀분석⁽¹⁵⁻¹⁶⁾을 수행하여 식(1)을 얻었으며, 그 결과는 Fig. 3에 나타나 있다.

$$\sigma_c = \frac{1.06f_c'}{\sqrt{1 + \frac{d}{0.65}}} + 0.52f_c' \quad (1)$$

여기서, σ_c 는 P_{ulti}/bc 를 나타내며 특성길이

인 d 는 부재의 중립축으로부터 압축연단까지의 거리인 c 를 의미하는데 단위는 cm이다.

또한 Bazant의 크기효과 법칙과 위의 실험자료를 이용한 회귀분석에 의하여 다음 식(2)를 얻었다.

$$\sigma_c = \frac{0.96f_c'}{\sqrt{1 + \frac{d}{22.27}}} \quad (2)$$

한편, 김진근 등⁽¹⁷⁻¹⁸⁾은 수정된 크기효과 법칙을 이용하여, 파괴진행영역에 미치는 최대골재 크기의 영향을 고려하고 특성길이의 개념을 새로이 도입하여 다양한 직경과 높이/직경의 비를 가지는 콘크리트 실린더의 압축강도를 얻기 위한 다음의 식(3)을 제안하였다.

$$\sigma_c = \frac{0.4f_c'}{\sqrt{1 + \frac{(h-d_c)}{5}}} + 0.8f_c' \quad (3)$$

여기서, σ_c 와 f_c' 은 임의의 공시체와 표준실린더 공시체($\phi 150 \times 300$ mm)에 대한 압축강도를 각각 나타내는데 단위는 kg/cm^2 이고 h 와 d_c 는 각각 실린더의 길이와 직경으로서 단위는 cm이다.

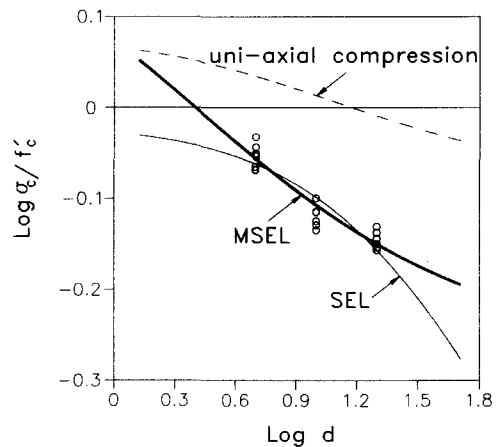


Fig. 3 Comparisons of experiments with various equations

Fig. 3에는 σ_c/f_c' 와 부재의 중립축으로부터 압축연단까지의 거리인 d 의 관계를 로그함수로 나타내고 있는데, d 가 매우 큰 경우에는 실험결과로부터의 강도 비가 일정한 값에 수렴하게 될 것을 알 수 있다. 이 그림에서 원은 C형 공시체에서 얻은 실험자료, 굵은 실선, 얇은 실선 및 파선은 각각 식(1), 식(2) 및 식(3)으로부터의 결과를 나타낸다. 이로부터 부재의 크기가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축강도가 감소하는 크기효과가 존재함을 알 수 있으며, C형 공시체의 휨압축강도가 실린더 공시체의 축압축 강도보다 크기효과가 현저히 나타남을 알 수 있다. 이는 실린더 공시체에 대한 축압축 강도의 경우, 단면의 위치에 따른 strain gradient가 없기 때문에 파괴진행영역이 C형 공시체보다 넓어 크기효과가 작게 나타나기 때문이다. 또한 식(1)과 식(2)의 비교에서 대부분의 보의 크기가 존재하는 영역에서는 그 차가 크지 않으나 이 범위를 벗어나면, 특히 부재의 크기가 매우 큰 경우에 식(1)이 크기효과를 예측하는데 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 사료된다.

이로부터 본 실험에서와 같이 초기균열이 없는 경우에는 수정된 이론식인 식(1)을 적용하는 것이 타당함을 알 수 있다. 그러나 부재가 초기 균열을 가지고 있다면 크기의 증가에 따라 계속적인 강도의 감소가 발생하므로 Bazant의 이론식을 사용해야 할 것으로 판단된다.

3.3 변형률에 대한 크기효과 및 하중-처짐 곡선의 비교

휨을 받는 콘크리트 보의 압축연단의 극한 변형률도 균열에 의해 영향을 받으므로 강도 예측에 대한 크기효과를 나타내는 형식의 크기효과 모델식을 적용할 수 있다. 따라서 파괴시 C형 공시체 압축연단의 변형률을 예측할 수 있는 모델식을 얻기 위해 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 식(4)를 얻었으며, Fig. 4에는 $\epsilon_{cu}/\epsilon_{co}$ 와 공시체 크기(d)의 관계가 나타나 있다.

$$\epsilon_{cu} = \frac{1.70 \epsilon_{co}}{\sqrt{1 + 17 \left(\frac{d}{20}\right)}} + 0.60 \epsilon_{co} \quad (4)$$

여기서, ϵ_{cu} 와 ϵ_{co} 는 파괴시 공시체의 변형률 및 $d = 20$ cm인 공시체 크기 I의 평균 변형률을 각각 나타낸다.

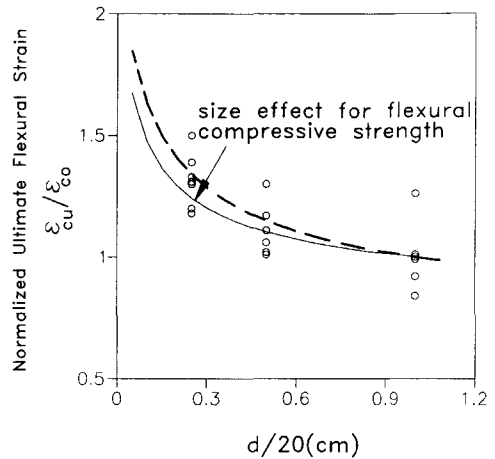


Fig. 4 Comparisons of strain at failure with depth

그림에서 원은 공시체에서 얻은 실험자료, 굵은파선과 실선은 각각 식(4) 및 식(1)로부터의 결과를 나타낸다. 이 그림으로부터 부재의 크기가 증가함에 따라 파괴시의 변형률은 작아지는데, 이는 휨압축강도에 대한 크기효과와 유사한 경향을 보이며, 수정된 크기효과 법칙을 이 경우에도 적용할 수 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 5에는 임의의 C형 공시체에 대한 각 하중단계에서의 변형률 분포가 나타나 있는데, 그림에서 원은 변형률 게이지가 설치된 곳에서 얻은 변형률을 의미한다.

이 그림으로부터 부재의 중립축에서 압축연단까지의 변형률 분포는 직선이며 파괴시까지 단면이 거의 평면을 유지함을 확인하였다. 그리고 공시체의 크기가 작아질수록 압축연단의 파괴시 변형률은 커지고 하중이 극한하중에 가까워지면 변형률의 분포가 약간의 비선형을 보이는 경우도 있음을 알 수 있다.

이는 철근콘크리트 구조물의 역학적 해석 시에 바탕이 되는 기본 가정중의 하나인 “하중을 받기

전에 평면은 하중을 받은 후에도 평면을 유지한다"는 가정이 파괴에 가까운 하중을 받을 때는 정확하지 않을 수도 있음을 의미한다. 그러나 그 차이는 일반적으로 작으며, 또 이 가정에 근거한 이론결과는 광범위한 실험결과와 잘 부합하므로 변형률의 분포가 직선이라는 이 가정이 합리적임을 알 수 있다.

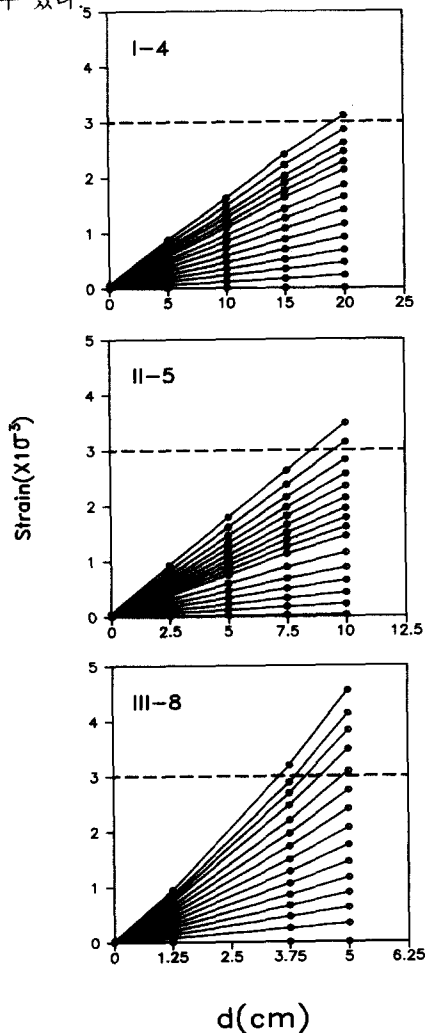
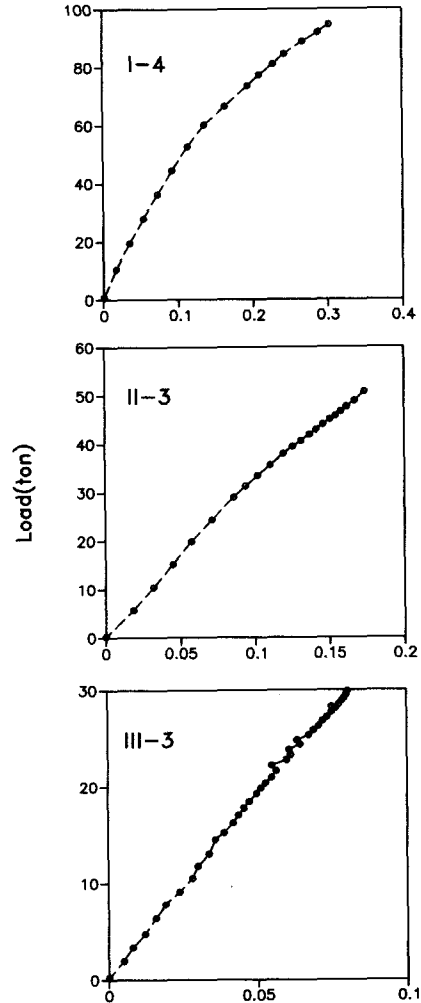


Fig. 5 Distributions of strains at each loading stage

Fig. 6에는 선택된 몇 개의 C형 공시체에 대한 하중 ($P_1 + P_2$)과 LVDT로부터 얻은 공시체 중앙부의 처짐과의 관계가 나타나 있다.

이 그림으로부터 공시체의 크기가 작아질수록 하중과 처짐과의 관계는 직선에 가까워짐을 알

수 있다. 즉, 공시체가 클 때는 하중-처짐 곡선의 최대 극한처짐과 초기 선형부분의 끝단에서의 처짐의 비가 큰 값(공시체 I-4의 경우에 약 2.40)을 가지나 공시체가 작아짐에 따라 이 비는 점점 작아져 공시체 III-3의 경우에는 그 값이 약 1.0이 됨을 알 수 있다.



Horizontal deflection at center of C-shaped specimens(cm)

Fig. 6 Comparisons of load-deflection curve

4. 결론

이상에서 휨압축강도에 대한 크기효과를 검토하기 위하여 콘크리트의 압축강도가 528

kg/cm²이고 측정대상 부위가 무근인 C형 콘크리트 공시체에 대한 실험을 수행하였으며 그 결과로부터 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 공시체의 크기가 증가함에 따라 파괴시의 휨 압축강도가 감소하는 크기효과가 뚜렷이 나타나고 있다. 이를 예측할 수 있는 모델식을 제시하였으며, 새로 제안된 모델식에 의해 강도 감소 현상을 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다.
- 2) 실린더 공시체의 축압축 강도에 대한 크기효과보다 C형 공시체의 휨압축강도에 대한 크기효과가 더 현저함을 알 수 있다.
- 3) 파괴시의 변형률에서도 크기효과는 나타나며, 이 경우에도 수정된 크기효과 법칙을 사용하는 것이 타당함을 알 수 있다.
- 4) 각 하중단계에 따른 동일 단면내의 변형률은 거의 직선으로 나타나며, 부재의 크기가 클 경우에는 하중-처짐 곡선에서 비선형영역이 존재하나 크기가 작아질수록 이 곡선의 형태가 직선화됨을 알 수 있다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단(ERC-STRESS)의 연구비 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다

참고문헌

1. 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, also PCA Development Bulletin D6.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. Gonnerman, H.F., "Effect of Size and Shape of Test Specimen on Compressive Strength of Concrete", ASTM Proc., Vol.25, 1925, pp.237-250.
6. 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.
7. Bazant, Z.P. and Kim, J.K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Concrete Beams", ACI Journal, V.81, No.5, Sept.-Oct. 1984, pp.456-468.
8. Bazant, Z.P. and Cao, Z., "Size effect in Punching Shear Failure of Slabs", ACI Structural Journal, V.84, No.1, Jan.-Feb. 1987, pp.44-53.
9. Bazant, Z.P. and Sener, S., "Size Effect in Pullout Tests", ACI Materials Journal, V.85, No.5, Sept.-Oct. 1988, pp.347-351.
10. Bazant, Z.P. and Cao, Z., "Size Effect in Brittle Failure of Unreinforced Pipes", ACI Journal, V.83, No.3, May-June 1986, pp.369-373.
11. Marti, P., "Size Effect in Double-Punch Tests on Concrete Cylinders", ACI Materials Journal, V.86, No.6, Nov.-Dec. 1989, pp.597-601.
12. Bazant, Z.P. and Kwon, Y.W., "Failure of Slender and Stocky Reinforced Concrete Columns: Tests of Size Effect, Materials and Structures", Research and Testing (RILEM, Paris), V.27, No.166, Mar. 1994, pp.79-90.
13. 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.
14. 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.
15. IMSL, Library, Edition 8, IMSL, Inc., Sixth Floor, NBC Building, 7500 Bellaire Blvd., Houston, Texas 77036.
 16. Benjamin and Cornell, "Probability, Statistics, and Decision for Civil Engineers", McGraw-Hill, New York, 1970, Section 4.3.
 17. 김진근, 어석홍, 이성태, "비표준형 실린더 공시체에 대한 압축강도의 크기효과", 콘크리트학회지, 제9권1호, 1997, pp.105-113.
 18. Kim, J.K., Yi, S.T., Park, C.K. and Eo, S.H., "Size Effect on the Compressive Strength of Plain and Spirally-Reinforced Concrete Cylinders", ACI Structural Journal, V.96, No.1, Jan. Feb 1999, (in press).
 19. 김진근, 이성태, 양은익, 김민욱, 이상순, "휨·압축 하중을 받는 콘크리트 부재의 크기효과", 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 제10권, 제1호, 1998, pp.371-376.

요 약

콘크리트 휨부재의 극한강도를 예측할 때에는 부재의 크기효과는 고려하지 않는 것이 일반적이다. 그러나 콘크리트는 여러 형태의 하중에 대하여 부재의 크기가 증가함에 따라 강도가 감소하는 크기효과를 항상 나타낸다.

따라서 본 논문에서는 휨압축 부재에 대한 실험을 수행하여 크기효과를 검토하고자 한다. 이를 위하여 축압축력과 휨모멘트를 동시에 받는 일련의 C형 공시체에 대한 실험을 수행하였다. 공시체의 크기는 3가지였으며 콘크리트의 압축강도는 528 kg/cm^2 로 하였다.

실험결과로부터 부재의 크기가 증가함에 따라 파괴시의 휨압축 강도가 감소하는 크기효과가 존재하며, 실린더 공시체의 축압축 강도보다 강도감소 현상이 더욱 분명함을 알 수 있었다. 최종적으로 실험자료에 대한 회귀분석을 수행하여 이를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.

(접수일자 : 1998.10 28)