

포장 콘크리트 휨인장강도 시험체에 대한 크기효과 보정

Size-effect Correction for Pavement Concrete Flexural Strength Test

심재원* 권순민** 유태석*** 안태송**** 김낙영*

Shim, Jae Won Kwon, Soon Min Yoo, Tae Seok Ahn, Tae Song Kim, Nag Young

ABSTRACT

Size-effect correction factors of the flexural test specimens, which had controlled cement concrete pavement quality, were investigated and derived to be easily used in field. We couldn't find the size-effects in this size range (10, 12, 15cm) of specimens, which were made of 32mm crushed aggregates, and the theoretical verification was presented by Bazant's equations. Finally, non-dimensional chart for size-effect correction was proposed, covering the relationship between compressive strengths and w/c ratios.

요약

도로공사에서 포장 콘크리트의 품질관리에 사용되고 있는 휨인장강도 시험체의 크기를 줄여 용이한 취급과 양생조의 활용도를 높이기 위해 시험체별 크기효과를 확인하고 이에 대한 보정계수를 도출하였다. 32mm 조골재가 사용된 본 실험에서는 별다른 크기효과를 관찰할 수 없었고, Bazant 등이 제안한 예측식에 실험결과를 적용하여 이를 확인할 수 있었다. 또한, 보정계수의 적용을 위해 도출된 예측식을 무차원화하고 w/c와 압축강도의 관계를 도식화한 크기효과 보정 도표도 제안하였다.

1. 서론

국내 포장 콘크리트의 품질관리는 KS F2408을 따라 측정된 28일 휨 인장강도를 기준으로 이루어지고 있으며 도로공사에서 사용하고 있는 휨 인장강도 시험체는 상대적으로 중량과 체적이 큰 15×15×55cm 시험체를 사용하기 때문에 취급이 어렵고 양생실 활용도도 떨어지는 실정이다. 이 문제의 해결은 시방규정이 정하는 범위에서 시험체 크기를 축소시키는 것으로 개정된 KS F 2403²⁰⁰⁵에서도 이와 같은 시험의 생력화(省力化)와 고경도화 추세를 반영하여 다양한 크기를 인정하고 있다.¹⁾ 그러나 현재 사용되고 있는 15×15×55cm 시험체를 축소시키게 되면 시험체의 재료적 특성에 크기로 인해 시험결과 값은 영향을 받게 된다(Bazant 1984 외 다수). 따라서, 여기서는 휨 인장강도 시험체의 크기효과를 파악하기 위해 100, 120, 150mm 높이의 시험체를 대상으로 일련의 크기효과 실험을 실시하여 현행 포장 콘크리트 품질관리 실무에서 사용하고 있는 150mm 높이의 시험체 대신 더 작은 시험체를 사용할 수 있도록 확률적 접근을 통한 시험체간의 상관성을 검토하였다.

* 정회원, 도로교통연구원, 방재환경연구팀, 책임연구원

** 정회원, 도로교통연구원, 도로연구팀, 전임연구원

*** 정회원, 도로교통연구원, 도로연구팀, 책임연구원

**** 정회원, 도로교통연구원, 도로연구팀, 수석연구원

2. 실험 방법 및 사용재료

2.1 사용재료

골재는 32mm 쇄석골재와 조립율 2.7인 낙동강사가 사용되었으며 시멘트는 비중 3.14인 H사의 보통포틀랜드 시멘트가 선정되었다(표2). 강도는 28일 휨인장강도(f_{bk}) 4.5MPa를 목표로 표3과 같이 설계되었다.

표 2 사용재료 물성

구분	골재		구분	시멘트	비고
	조골재(32mm)	세골재(강사)			
밀도(표건)	2.759	2.601	비중	3.14g/cm ³	※ 시멘트 MgO 2.5% SO ₃ 2.3%
흡수율	0.711	0.908	분말도	3400	
안정성	3.09	4.14	안정도	0.1	
조립율	7.147	2.726	강열감량	1.1	
점토덩어리	0.07	0.12	응결 시간	초결 210	
0.08mm통과량	0.46	0.69		종결 5:50	
마모율	17.78	-	28일 압축강도	38.5 N/mm ²	

표 3 포장 배합비

f_{bk} (MPa)	G_{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Weight (kg)				혼화제 (C×wt%)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	비고
				W	C	S	G				
4.5	32	51.0	40	163	320	718	1142	0.3	2.5	5.0	

시험체는 높이×폭×길이(순지간)가 각각 10×10×40cm, 12×12×45cm, 15×15×55cm의 세 가지 형태와 Ø10×20cm 및 Ø15×30cm의 2가지 형태로 통계적 고려를 위해 변수별로 각 20개를 제작하였으며. 현장에 마련된 이동식 양생조에서 수중양생하였다. 또한, 휨 강도의 경우는 검증을 위해 변수별로 7개 공시체를 추가하였다.

2.2 실험 방법

휨 인장강도 측정은 그림1과 같이 28일 채령의 시험체에 대해 실시하였다. 지점에서 하중점까지의 거리는 시험체에 따라 각각 10cm, 12cm 및 15cm로 하여 동일거리에서 선 채하되도록 하였다. 하중재하는 KS F2408 규정에 따라 하중가력속도 0.06N/mm²/sec로 파괴시까지 선형으로 증가시켰다.

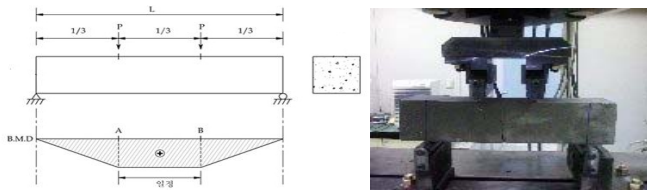


그림 1 일축 휨인장 시험체 구성

3. 결과 및 고찰

시험체의 크기가 감소하는 경우 그 강도에 크기효과가 발생함은 그간 Bazant 등에 의해 잘 알려진 바 있다. 본 연구에서 수행한 실험 자료를 분석하기 위해 다음과 같은 두 가지 크기효과 식을 사용하였다.³⁾

$$\sigma_N = f_{r,\infty} \left(1 + \frac{rD_b}{D} \right)^{1/r} \quad (1) \quad \sigma_N = f_{r,\infty} \left[\left(\frac{D_b}{D} \right)^{rn/m} + \left(\frac{rD_b}{D} \right) \right]^{1/r} \quad (2)$$

식 (1)은 확정론적인 휨인장강도의 크기효과이며, 식 (2)는 확률론적인 효과를 동시에 고려한 크기효과이다. 여기서 σ_N 은 공칭 휨인장강도, $f_{r,\infty}$ 는 크기가 무한히 작은 경우에 해당하는 점근적인 강도, D_b 는 특성크기, r 은 실험 파라미터이다. Bazant 등³⁾에 의하면 r 과 n/m 을 각각 1과 1/8으로 사용할 경우, 3차원에서 독립적으로 구해진 여러 실험 데이터를 최적으로 표현 가능하다고 보고하고 있다. $f_{r,\infty}$ 과 D_b 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$f_{r,\infty} = \sqrt{\frac{EG_f}{c_f g'(0)}} \text{ 과 } D_b = \left\langle -\frac{c_f g''(0)}{4g'(0)} \right\rangle \quad (3)$$

$$\text{여기서, } E \approx 3300 \sqrt{f'_c} + 7700, \quad g(\alpha) = k^2(\alpha); \quad k(\alpha) = \sqrt{\frac{2}{\pi\alpha} \tan\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)} \frac{0.923 + 0.199 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi}{2}\alpha\right)\right]^4}{\cos\frac{\pi}{2}\alpha}$$

여기서 E 는 탄성계수, G_f 는 파괴에너지, c_f 는 파괴영역의 크기, $g(\alpha) = k^2(\alpha)$ 는 무차원 에너지 해방계수이다.²⁾ 식 (3)에서 사용되는 값들은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$G_f = \alpha_0 \left(\frac{f'_c}{0.051}\right)^{0.46} \left(1 + \frac{d_a}{11.27}\right)^{0.22} (w/c)^{-0.30} \quad (4) \quad c_f = \exp\left[\gamma_0 \left(\frac{f'_c}{0.022}\right)^{-0.019} \left(1 + \frac{d_a}{15.05}\right)^{0.72} (w/c)^{0.2}\right] \quad (5)$$

식 (4)와 (5)은 Bazant 등이⁴⁾ 238개의 방대한 데이터를 이용해서 구한 관계이며 본 연구에서도 사용할 수 있을 것으로 판단하였다. 둥근 골재의 경우 $\alpha_0 = \gamma_0 = 1$, 쇄석의 경우 $\alpha_0 = 1.44$ 와 $\gamma_0 = 1.12$ 를 사용하였다.

표4. 수식계산 값

압축강도, f'_c (Mpa)	33.21
E (Mpa) = $3300 \sqrt{f'_c} + 7700$	26717.27899
α_0 for 쇄석골재	1.44
G_f (N/m)	46.6584918
c_f (mm)	6.926193668
$g'(0) = 1.259\pi$	3.954900726
$g''(0) = -1.786\pi^2$	-17.62932425
$f_{r,\infty}$ (Mpa)	6.746000238
D_b (mm)	7.718532174

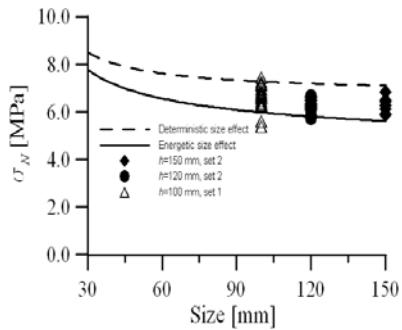


그림2. 크기효과 (실험데이터 fitting)

표 5 시험체 크기 및 재령별 휨강도 시험결과

	시험체 종류				비고
	φ15×30	10×10×40	12×12×45	15×15×55	
1차	32.40MPa	6.62MPa (0.35)	6.88MPa (0.31)	7.45MPa (0.35)	※ 각 값은 20개 평균 () 값은 표준편차
2차	34.02MPa	6.31 MPa (0.36)	6.19 MPa (0.31)	6.27 MPa (0.33)	

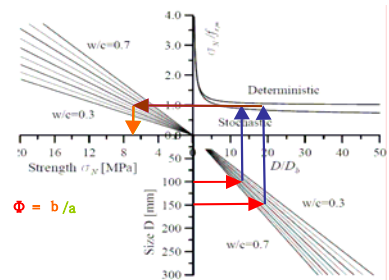


그림3. 크기효과 보정 chart⁵⁾

본 실험자료 중 분산을 고려한 데이터의 물성치인 압축강도 $f'_c = 33.6 \text{ MPa}$, 최대 골재크기 $d_a = 32 \text{ mm}$, $w/c = 0.32$ 를 위 식 (1)부터 (5)에 대입하여 표4와 그림2와 같은 크기효과를 얻었다. 실험 데이터는 확정적인 크기효과 예측식 (1)과 확실적인 효과가 동시에 고려된 식 (2)의 중간에 위치한다. 따라서, 식 (1)과 (2)는 도로공사에서 사용 중인 포장용 콘크리트에도 큰 문제없이 적용할 수 있을 것으로 판단하였다. 그림3은 크기효과 보정계수의 실무적용을 위해 식(1)과 (2)를 $f_{r,\infty}$ 과 D_b 로 각각의 항을 나누어 무차원 형태로 만들어 크기조건의 제약을 없애고, Abram의 w/c 와 압축강도 관계식을 사용하여 시험체 크기와 w/c 별로 보정계수를 도식화한 것이다. 현재 진행중인 도로공사 현장 압축 및 휨 인장 강도 데이터로 압축강도 관계식을 보완하여 크기효과보정 그래프를 완성할 예정이다.

4. 결론

본 연구에서는 도로공사의 포장콘크리트 품질관리에 사용되고 있는 휨 인장강도 시험체(15×15×55cm)의 크기를 축소시키기 위하여 실험에 영향을 주는 크기효과(size effect)에 대한 실험적 검증 및 데이터의 확률적 이론적용을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 휨 인장강도 시험체별 크기효과에 대한 실험결과, 32mm 굵은 골재를 사용한 시험체에 대한 2회에 걸친 81개의 실험에서 scatter에 의한 영향을 배제시키더라도 뚜렷한 크기효과를 확인할 수 없었다.
- 2) 1)에 대한 분석을 위해 Bazant 등의³⁾ 확정론 및 확률적으로 보완한 예측식을 적용한 결과, 실험 데이터가 이론 범위 내에 위치하여 Bazant 등이 제안한 물성 값 및 계수를 이용하여 크기효과 보정계수를 도출하는 것이 가능할 것으로 판단하였다.
- 3) 32mm 굵은 골재를 사용한 휨 인장강도 시험의 크기보정을 위해 무차원 크기효과 곡선과 w/c 및 압축강도 관계 도표를 제안하였다.
- 4) 2005년 개정된 KS F 2403의 개정에 따라 휨인장강도 기준에 부합하는 시험체는 사용이 가능하므로, 도로공사 및 기타 도로에서 타설되는 포장콘크리트 가운데 골재 최대치수(G_{max}) 32mm는 물론 25mm의 경우도 휨 강도 공시체의 크기를 줄일 수 있고(15×15×55cm→10×10×40cm), 이에 따라, 공시체의 중량 및 크기가 감소하여 공시체의 제조, 운반, 양생 및 시험과정에서 시험자의 애로가 크게 줄고, 현장 양생실의 활용도도 높아질 수 있다.

참고문헌

1. 콘크리트 표준시방서 해설, 한국콘크리트학회, 2007.
2. H. Tada and P. C. Paris and G. R. The stress analysis of cracks handbook, Irwin, Del Research Corp., 1985.
3. Z. P. Bazant and D. Novak. Energetic-statistical size effect in quasibrittle failure at crack initiation. *ACI Materials Journal* 97(3), 2000, 381-392.
4. Z. P. Bazant and E. Becq-Giraudon.. Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard. *Cement and Concrete Research* 32(4), 2002, 529-556.
5. Z. P. Bazant and J. Planas, Fracture and Size Effect in Concrete and Other Quasibrittle Materials, *CRC Press, Boca Raton, FL, 1998*.