

포장 콘크리트의 크기 효과에 따른 휨 강도 특성 분석에 관한 실험적 연구

이현기* · 오홍섭** · 심종성*** · 심재원****

Lee, Hyeonggi*, Oh, Hongseob**, Sim, Jongsung***, Sim, Jaewon****

An Experimental Study on Size-effect for Characteristic of Flexural Strength of Pavement Concrete

ABSTRACT

The quality for the domestic pavement is evaluated based on flexural strength at the age of 28 days in accordance with KS regulation. Most specimens of the flexural tensile strength used currently are relatively large ones with a dimension of 150×150×550mm. Accordingly, it is difficult to treat the specimens, and the utilization of a curing tank is low. In this paper, the study tried to resolve the problem by specimen size specified in the code. For this purpose, a flexural strength test was conducted according to the log scale within the specimen size specified by the KS. And, based on the results of this experiment, a comparative analysis was conducted using the prediction formula of Size Effect Law (SEL) proposed by Bazant to examine the correlation between specimen sizes, so as to use the result as basic data for the reduction of the specimen size in the quality evaluation of concrete pavement.

Key words : Concrete pavement, Flexural strength, Size effect law

초 록

국내 포장 콘크리트의 품질관리는 KS 규정에 따라 재령 28일 휨 인장강도를 기준으로 평가되고 있으며, 현재 대부분 사용되고 있는 휨 인장강도 시험체는 상대적으로 큰 150×150×550mm 시험체를 사용하고 있다. 이에 따라 시험체의 취급이 어렵고 양생조의 활용도가 떨어지고 있는 실정이다. 이에 따라 본 연구는 휨 인장강도 시험체를 줄여 이 같은 문제점을 해결하고자 하였다. 이를 위해 KS에서 규정되고 있는 시험체 크기의 내에서 로그 스케일에 따른 압축강도 및 휨 강도 시험을 실시하고, 시험체 크기를 변수로 설정하여 강도 및 표준편차를 분석하였다. 또한 이와 같은 실내 실험을 바탕으로 Bazant가 제안한 크기 효과 법칙(Size effect law, SEL)의 예측식을 사용하여 비교·분석함으로써 시험체 크기간의 상관성을 검토하여 콘크리트 포장의 품질 평가시 시험체 크기 축소를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

검색어 : 콘크리트포장, 휨인장강도, 크기효과법칙

1. 서론

일반적으로 콘크리트는 유사취성재료(Quasi - brittle material)로써, 균열이 진행됨에 따라 비선형 현상을 나타낸다. 이와 같은 비선형 거동은 선형이론에 기반한 콘크리트 구조해석에 상이한 결과를 야기하게 되고, 이러한 거동으로 인하여 콘크리트는 크기효과(Size-effect)를 보이게 된다(Bazant and Li, 1996; Kim et al., 1999; Park and Ha, 2012).

* 정회원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 박사과정 (Hanyang University · lhk0228@hanyang.ac.kr)

** 정회원 · 교신저자 · 경남과학기술대학교 토목공학과 교수

(Corresponding Author · Gyeongnam National University of Science and Technology · opera69@chol.com)

*** 정회원 · 한양대학교 건설환경공학과 교수 (Hanyang University · jssim@ihanyang.ac.kr)

**** 정회원 · 한국도로공사 도로교통연구원 건설환경연구실 책임연구원 (Highway and Transportation Technology Institute · this2pass@ex.co.kr)

Received October 21, 2014/ revised January 25, 2015/ accepted March 3, 2015

현재 국내 포장 콘크리트의 휨 강도 특성 및 품질관리는 KS F 2403:2014에 따라 시험체를 제작하고, KS F 2408:2010에 따라 측정한 28일 휨 인장강도를 기준으로 평가되고 있다. KS F 2403:2014의 휨 강도를 위한 공시체 제작 방법에 의하면 공시체의 표준단면 치수는 100×100mm 또는 150×150mm로 규정되고 있으나, 대부분의 국내 연구기관에서는 휨 인장강도 평가를 위한 시험체의 크기를 부피와 중량이 큰 150×150×550mm로 제한하고 있는 상태이다. 상대적으로 중량과 체적이 큰 시험체는 제작시 충격을 받을 위험이 높으며, 강도평가시 취급이 어렵고 수중 및 기건 양생시 양생실 활용도 또한 떨어지는 실정이다. 따라서 건설 현장에서는 KS F 2403:2014에서 허용하고 있는 범위내에서 시험체 단면을 축소시킴으로서 실험결과의 신뢰성과 함께 실험의 용이성을 확보할 수 있기를 바라고 있다. 또한 국내외적으로도 평가방법에 대한 생력화(省力化)와 고정도화(高精度化)의 추세를 반영하여 공시체의 다양한 크기를 인정하고 있다(Sim et al., 2008).

일반적으로 사용되고 있는 150×150×550mm의 시험체를 축소하게 되면 재료적 특성 외에 콘크리트의 비선형 거동 특성상 크기와 형상으로 인하여 시험결과 값은 영향을 받게 된다. 따라서, 품질관리용 시험체의 크기를 축소시키기 위해서는 크기효과(Size Effect) 실험 및 통계적 접근을 통한 시험체의 상관성 검토가 이루어져야 한다(Bazant and Oh, 1984; Bazant, 1984; Yoo et al., 2004).

본 연구는 국내에서 사용되고 있는 포장용 콘크리트의 휨 평가방법에서 규정하고 있는 표준 단면 치수 내에서 시험체 크기를 로그스케일로 나누어 시험을 수행하고, Bazant가 제안한 크기 효과 법칙(Size effect law, SEL)의 예측식을 사용하여 비교·분석하였다(Bazant and Oh, 1984; Bazant and Becq-Giraudon, 2002). 이와 같이 시험체 크기간의 상관성 검토를 통하여 콘크리트 포장의 품질 평가시 시험체 크기 축소를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용된 재료는 시멘트의 경우 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였으며, 비중은 3.15이다. 골재는 굵은 골재의 경우 최대 치수 25mm이고, 비중 2.69, 조립율 7.47의 쇄석을 사용하였으며, 잔골재는 비중 2.61, 조립율 2.76인 강사를 사용하였다. 사용재료의

Table 1. Chemical Composition of Cement

Item Type	Chemical composition (%)								
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	LOI
OPC	20.2	5.8	3.0	63.3	3.4	0.12	0.93	2.1	1.2

Table 2. Physical Properties of Aggregate

Item Type	G _{max}	Specific gravity	Absorption (%)	Percentage of abrasion (%)	Solid volume (%)
Coarse Aggregate	25	2.69	0.30	24.1	60.8
Fine Aggregate	-	2.61	1.11	-	63.7

물리 및 화학적 특성은 Tables 1 and 2에 나타내었다.

콘크리트 목표 설계 강도는 포장용 콘크리트에서 주로 사용되고 있는 휨 강도(f_{bk}) 4.5MPa를 기준으로 하였으며, 배합설계는 시멘트 콘크리트 포장 배합설계 지침(2011)에 따라 Table 3과 같이 계획하였고, 시험체 크기별로 동일한 배합을 사용하였다.

혼화제의 경우 국내에 소개되어 있는 감수제(혼화제)는 일반적으로 리그닌(Ligninsulfonate)계, 나프탈렌(Naphthalene sulfonate)계 그리고 최근에 많이 소개되고 있는 폴리카복실산(Polycarboxylate)계로 크게 나누어지고 있다. 본 실험에서 사용된 혼화제는 콘크리트 분산 능력뿐만 아니라 슬럼프 경시변화 억제 및 공기량 조절과 건조수축 저감에도 효과적이고, 현장에서도 사용되고 있는 폴리카복실산계(PC계) 고성능 AE감수제로 선정하였다.

또한 본 연구에서 설계 휨강도에 따라 물-시멘트비는 43%로 설정되었으며, 휨 인장강도를 평가하기 위하여 시험체의 높이×폭×길이(순지간)이 각각 100×100×400, 130×130×450, 150×150×550mm의 세 가지 형태(Bazant의 Size effect LEFM 곡선상의 log scale 등 간격 크기)로 제작하였다(Bazant, 1999).

2.2 실험방법

2.2.1 압축강도 시험

포장용 콘크리트의 압축강도 특성을 확인하기 위하여 KS F 2403과 KS F 2405에 따라 ϕ 100×200mm 공시체를 제작하여 재령 7, 28, 90일 수중양생 후 압축강도 측정을 실시하였다. 이에 따른 압축강도 결과를 바탕으로 크기효과에 대한 휨 강도 이론식에

Table 3. Mix Proportion of Pavement Concrete

	f_{bk} (MPa)	G _{max} (mm)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				Target Slump (mm)	Target Air (%)
					W	C	S	G		
OPC	4.5	25	43	39.7	147.5	343.1	706.7	1108.6	less than 40	6.0±1

적용하여 분석하였다.

2.2.2 휨 강도 시험

콘크리트 포장 시험체의 휨 강도 특성을 확인하기 위하여 시험체 제작은 KS F 2403:2014에 따라 제작하여 실험을 진행하였다. 포장콘크리트의 휨강도 특성을 충분히 대변할 수 있는 시험체 단면을 선정하기 위하여 시험체의 최소 단면 크기는 굵은 골재의 최대 치수의 4배 이상인 100mm로 결정하였고, 현재 사용되고 있는 규격 150mm를 최대치로 하여 로그 스케일에 따라 100, 130, 150mm를 시험체 변수로 선정하였다. 시험체 크기는 100×100×400, 130×130×450, 150×150×550mm의 세 가지로 스케일로 제작하여 실험 및 분석을 진행하였다. 따라서 굵은 골재 최대 치수 또한 일반 콘크리트 평가시 주로 사용되고 KS 규정에 따라 25mm를 사용하였다.

휨 강도 평가는 KS F 2408 “콘크리트의 휨 강도 시험 방법”에 준하여 실험을 진행하였으며, 하중재하 및 지지점은 시험체 크기에

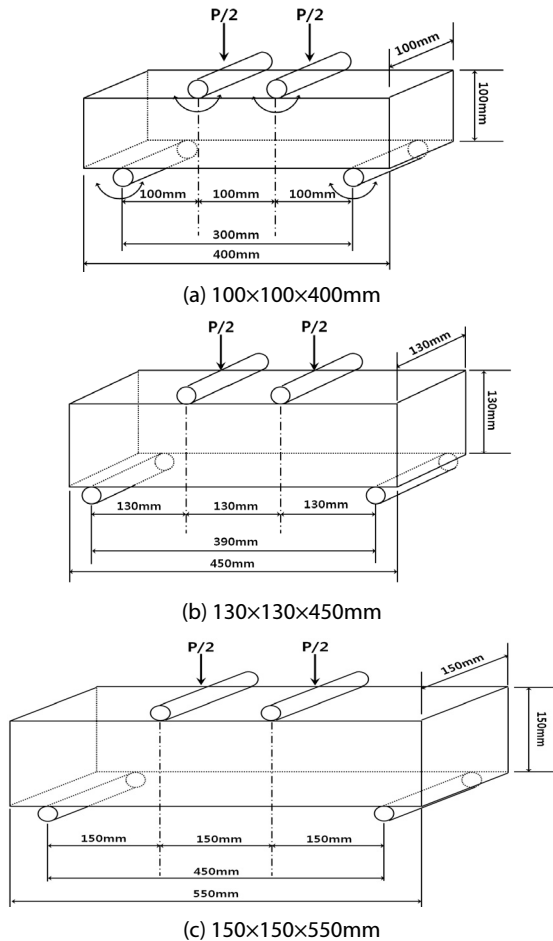
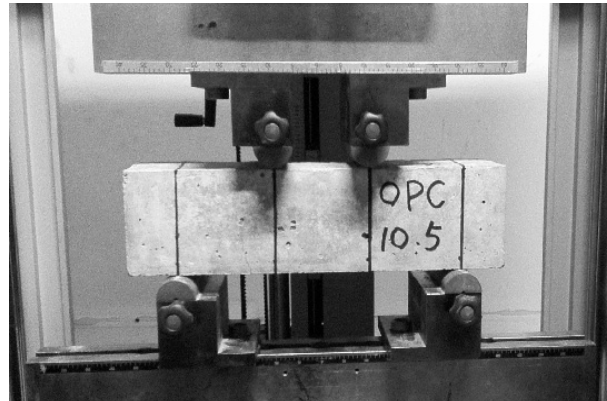
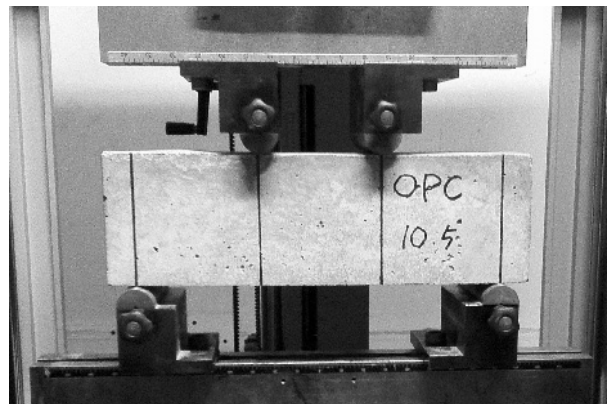


Fig. 1. Specimen Detailing for Flexural Strength Test of Pavement Concrete

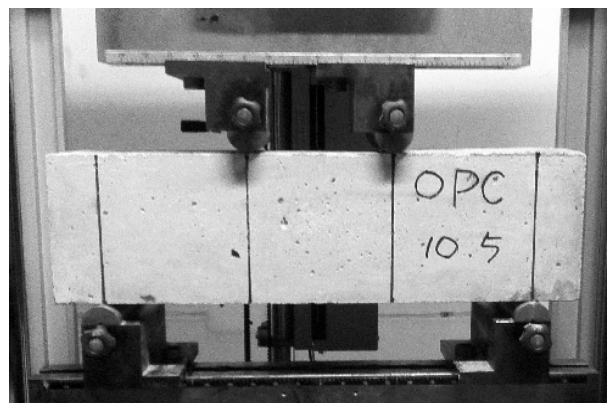
따라 각각 100, 130, 150mm로 하여 다축시험체와 동일한 거리에서 선재하되도록 하였고, 시험체 크기별 재하점 및 지지점의 거리는 Figs. 1 and 2(a)-(c)와 같이 표현하였다. 또한 재하하중의 크기가 크지 않기 때문에 하중속도는 KS 규정에 따라 0.06N/mm²/sec로 설정하여 파괴시까지 하중을 선형으로 증가시켜 실험을 실시하였다. 휨 강도 시험은 수중양생 후 재령 7, 28, 90일에 측정하였으며,



(a) 100×100×400mm



(b) 130×130×450mm



(c) 150×150×550mm

Fig. 2. Photographs of the Arrangement of the Flexural Strength Test Set-Up

시험체 크기 변수별 각각 5개씩 제작하여 측정하였으며, 파괴면이 재하위치 외부에 발생할 경우에는 분석에서 제외하였다(Yang, 1999).

3. 실험결과 및 분석

3.1 압축 강도 시험 결과

실험변수에 대한 압축강도 특성은 KS F 2405에 따라 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 공시체에 대하여 휨강도 실험과 동일한 재령에서 시험을 실시하였다. 재령별 각각 시험에 대한 압축강도 및 표준편차와 변동계수는 Table 4에 나타내었으며, 재령 및 시험체 크기별 압축강도 특성은 Fig. 3과 같이 표현하였다. 재령 28일에서의 압축강도는 40.66MPa로 측정되었으며, 재령 7일에서 약 38.3%의 강도 증가율을 보였다. 또한 재령 90일에서는 약 7%의 증가율을 나타내었다. 그리고 표준편차는 재령 7, 28, 90일에서 각각 0.573, 0.791, 1.065를 나타내었으며, 압축강도 측정 재령이 증가할수록 다소 높아지는 경향을 보였다.

압축강도 특성을 측정된 휨 강도와 비교 분석한 결과, $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 에 대한 재령 7, 28, 90일 휨 강도는 압축강도의

Table 4. Test Results of Compressive Strength

Classification		Curing age			
		7days	28days	90days	
Compressive strength	1	25.00	41.76	44.61	
	2	26.05	40.2	42.88	
	3	24.26	41.23	42.68	
	4	24.94	40.11	45.14	
	5	25.12	39.99	43.82	
	Average	25.08	40.66	43.84	
Standard deviation (MPa)		0.57	0.71	0.95	
Coefficient of variation (%)		2.28	1.74	2.17	

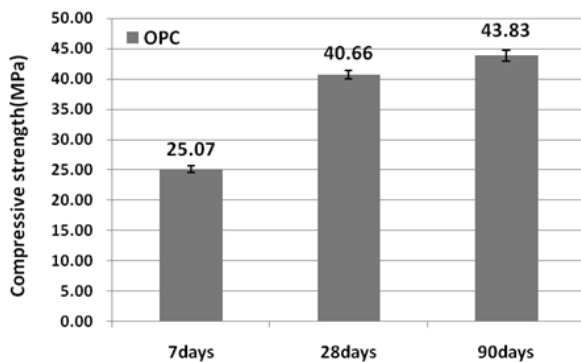


Fig. 3. Influence of Curing Time on the Compressive Strength of Pavement Concrete

각각 17.7, 17.0, 17.0%로 측정되었으며, $130 \times 130 \times 450\text{mm}$ 의 경우 각각 16.3, 15.7, 15.7%이며, $150 \times 150 \times 550\text{mm}$ 의 경우 압축강도와 비교하면 각각 16.3, 15.9, 15.6% 수준의 차이를 나타내었다. 이는 모든 변수의 휨 강도는 압축강도의 1/6 이내로 나타내었다. 또한 측정된 재령별 압축강도를 이용하여 Bazant의 연구자들에 의해 제안된 식으로 크기효과에 따른 휨 강도 특성을 분석하였다.

3.2 휨 강도 시험 결과

본 연구에서의 휨 강도 특성은 압축강도와 같이 재령 7, 28, 90일에 측정을 하였으며, 각 변수별 5개의 시험체를 제작하여 실시하고 실험결과에 따른 표준편차를 정리하였다. 각각의 휨강도 결과와 표준편차 및 변동계수 및 재령별 강도 변화는 각각 Table 5와 Fig. 4에 정리하였다. $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ 크기의 시험체가 다소 높은 강도를 나타내었으며, 이와 같은 시험 결과는 현재 보고된 size effect에 대한 연구결과와 유사한 결과이다(Bazant, et al., 1984). 실험에 사용된 굵은 골재의 크기가 기존 연구들에 적용된

Table 5. Test Results of Flexural Tensile Strength

Specimen Size		Curing age		
		7days	28days	90days
$100 \times 100 \times 400\text{mm}$ (MPa)	1	4.45	6.82	7.25
	2	4.66	6.43	7.12
	3	4.45	6.39	7.13
	4	4.32	6.85	7.24
	5	4.31	6.61	7.04
	Average	4.44	6.62	7.15
Standard deviation (MPa)		0.13	0.19	0.08
Coefficient of variation (%)		2.85	2.89	1.12
$130 \times 130 \times 450\text{mm}$ (MPa)	1	4.31	6.35	7.09
	2	4.06	6.49	6.78
	3	4.4	6.06	6.85
	4	4.16	6.75	7.0
	5	4.35	6.38	7.03
	Average	4.26	6.40	6.95
Standard deviation (MPa)		0.13	0.22	0.11
Coefficient of variation (%)		2.99	3.47	1.65
$150 \times 150 \times 550\text{mm}$ (MPa)	1	4.06	6.17	6.74
	2	4.34	6.69	6.97
	3	4.19	6.39	6.9
	4	4.49	6.07	6.95
	5	4.23	6.61	6.63
	Average	4.26	6.39	6.84
Standard deviation (MPa)		0.14	0.24	0.13
Coefficient of variation (%)		3.34	3.75	1.93

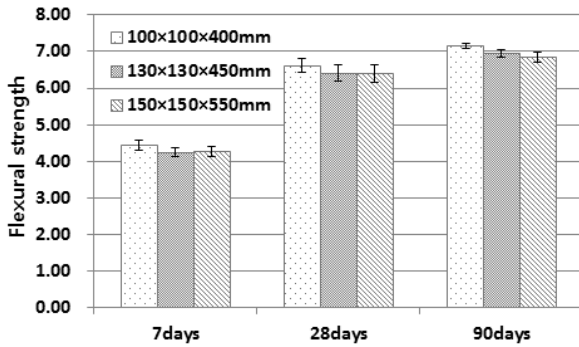


Fig. 4. Influence of Curing Time on the Flexural Tensile Strength of Pavement Concrete

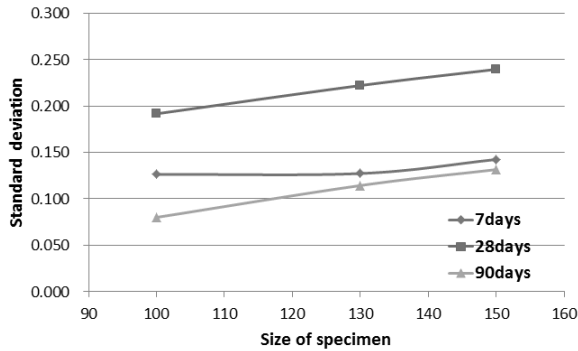


Fig. 5. Influence of Standard Deviation on the Specimen Size Parameter According to the Curing Time

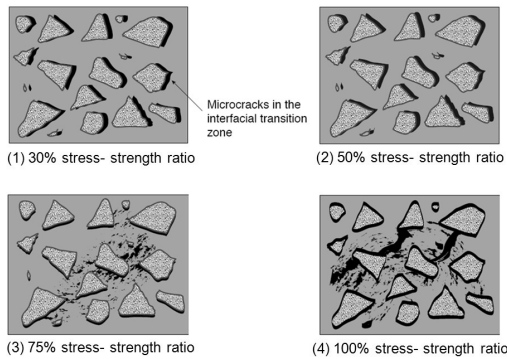


Fig. 6. Internal Micro-Cracking Development of Concrete Under Uniaxial Compressive Stress (Mehta, et al., 2006)

19mm 보다 다소 큰 25mm 골재가 사용되어 size effect의 영향이 상대적으로 적었지만 기존 발표된 이론과 큰 차이를 보이지 않는 것으로 확인되었다. 재령별 강도 증진율에서 재령 7일과 28일을 비교하면 크기 효과를 고려하여도 약 49~50% 수준의 증진율을 나타내었다. 또한 시험체가 로그 스케일로 감소됨에 따라 약 1.5~4.2%의 미소한 강도 증가가 나타났으며, 이는 Bazant 및 공동연구자들의 연구결과와 유사한 양상으로서 콘크리트 시험체의

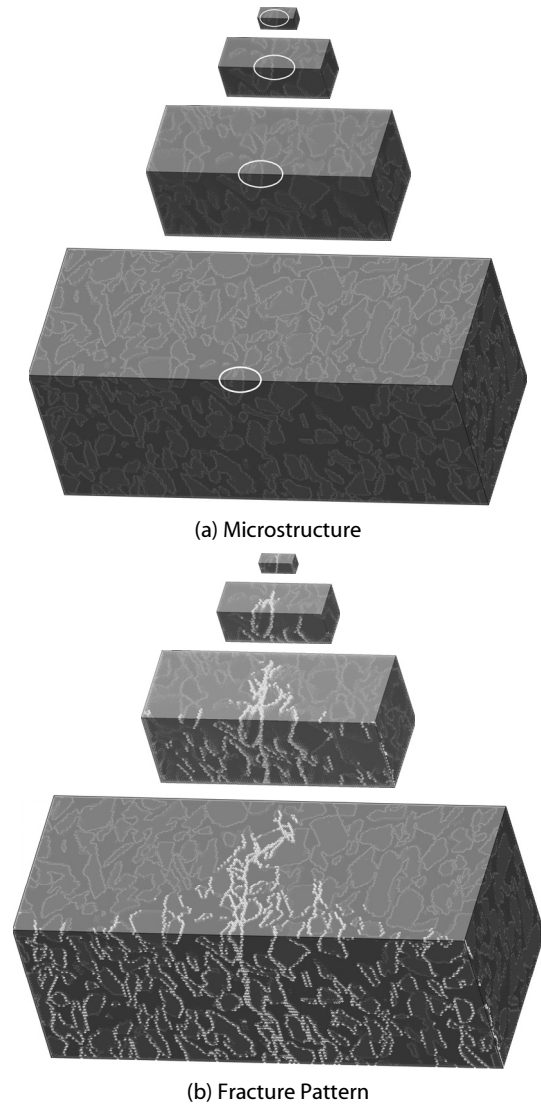


Fig. 7. Fracture Pattern in Each Different Size of Specimen (Red : Aggregates; Blue : Cement Matrix; Green : ITZ)(Van Mier, et al., 2009).

size effect에 의한 것으로 판단된다. 그러나 예측식으로 해석한 수치와는 다소 상이한 강도 결과를 나타내었으며, 확률론적 휨 인장강도 크기효과 및 확률론적 크기효과 강도 예측값의 중간 정도의 사이 값을 나타내는 것으로 확인되었다.

또한 실험체 크기별 재령에 따른 휨인장강도 결과의 표준편차를 비교한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 전체적으로 재령이 증가함에 따라 표준편차가 감소하는 것으로 나타났으며, 시험체의 크기가 작은 경우에도 낮은 수준의 표준편차를 나타내었다. 이는 콘크리트의 경우 대부분 골재와 시멘트 페이스트의 계면 사이에 천이대 (Transition zone)가 존재하게 되는데 Fig. 6과 같이 보통 강도 콘크리트의 경우 천이대를 통과하여 파괴된다. 이에 따라 일반적으

로 짧은 골재의 최대치수가 동일한 경우 시험체의 크기가 증가함에 따라 Fig. 7과 같이 천이대의 영역도 증가하게 되므로, 시험체의 크기가 증가함에 따른 표준편차의 감소는 천이대 영향이 기인한 것으로 사료된다(Mehta and Monteiro, 2006; Man et al., 2002).

3.3 휨 강도 시험 결과 분석

콘크리트 시험체의 size effect에 대한 영향은 Bazant 및 공동연구자들에 의해 잘 알려져 있다(Bazant, 1999; Bazant and Novak, 2000; Bazant and Becq-Giraudon, 2002). 본 연구에서는 휨 강도 시험에 대한 결과를 분석하기 위해 Bazant 외 연구자들에 의해 연구된 확정론적인 휨 인장강도 크기효과 및 확률론적인 효과를 동시에 고려한 크기효과를 동시에 고려하여 분석하였다.

$$\sigma_N = f_{r,\infty} \left(1 + \frac{rD_b}{D} \right)^{\frac{1}{r}} \quad (1)$$

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

여기서, σ_N 은 공칭 휨 인장강도, $f_{r,\infty}$ 는 크기가 무한히 작은 경우에 해당하는 점근적인 강도, D_b 는 특성크기, r 은 실험 상수이다. Bazant와 Novak (2000)은 r 과 n/m 을 각각 1과 1/8으로 사용할 경우, 독립적으로 구해진 여러 실험 데이터를 최적으로 표현 가능하다고 제시하였다. $f_{r,\infty}$ 과 D_b 는 각각 다음과 같이 Eqs. (3) and (4)와 같이 정의된다.

$$f_{r,\infty} = \sqrt{\frac{EG_f}{c_f g'(0)}} \quad (3)$$

$$D_b = \left(-\frac{c_f g''(0)}{4g'(0)} \right) \quad (4)$$

여기서, E 는 탄성계수, G_f 는 파괴에너지, c_f 는 파괴영역의 크기, $g(\alpha) = k^2(\alpha)$ 는 무차원 에너지 해방계수로 다음 Eq. (5)와 같이 표현된다.

$$g(\alpha) = \frac{\sqrt{2} \tan\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) \left\{ 0.923 + 0.199 \left[1 - \sin\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right) \right]^4 \right\}}{\cos\left(\frac{\pi\alpha}{2}\right)} \quad (5)$$

또한 Eq. (3)에서 사용되는 E 와 G_f 값들은 다음과 같이 얻을 수 있으며, 여기서의 콘크리트 압축강도는 실험에서 측정된 결과를 사용하였다.

$$E \approx 3,300 \sqrt{f'_c} + 7,700 \quad (6)$$

$$G_f = \alpha_0 \left(\frac{f'_c}{0.051} \right)^{0.46} \left(1 + \frac{d_a}{11.27} \right)^{0.22} \left(\frac{w}{c} \right)^{-0.30} \quad (7)$$

파괴영역의 크기에 해당하는 c_f 값은 다음 Eq. (8)을 이용하여 구할 수 있다.

$$c_f = \exp \left[\gamma_0 \left(\frac{f'_c}{0.022} \right)^{-0.019} \left(1 + \frac{d_a}{15.05} \right)^{0.72} \left(\frac{w}{c} \right)^{0.2} \right] \quad (8)$$

콘크리트의 인장파괴 단면에서 균열면 변위를 제어하는 방법으로 1축 인장실험을 실시하면 균열면에서 인장응력이 인장강도에 도달한 후에도 균열면에서 응력이 전달되어 바로 응력이 0이 되지 않음을 알 수 있다. 즉, 콘크리트의 전달응력(transmitted stress)이 인장강도(f_t)에 도달한 후 균열개구변위(w)의 증가에 따른 균열면에서의 전달응력은 계속 감소된다. 이와 같이 균열 변위의 증가에 따른 균열의 전달응력이 감소되는 현상을 변형연화(strain softening)현상이라고 한다. 그리고 균열면의 전달응력과 탄성변형을 제외한 균열개구변위와의 관계를 나타내는 곡선을 변형연화곡선이라고 하며, 콘크리트의 파괴에 대한 특성을 나타낸다. 이때 콘크리트의 균열선단에서의 파괴진행영역은 변형연화 상태에 있으며 콘크리트의 파괴거동을 지배한다.

이러한 변형연화상태에 있는 파괴진행영역은 미세균열의 발생과 성장에 지배적인 미세균열영역과 골재 경계면의 상호작용(마찰 및 맞물림 작용 등)에 의하여 거시적으로 균열면에서 전달응력이 이루어지는 미세균열의 연결영역(bridging zone)으로 이루어지며,

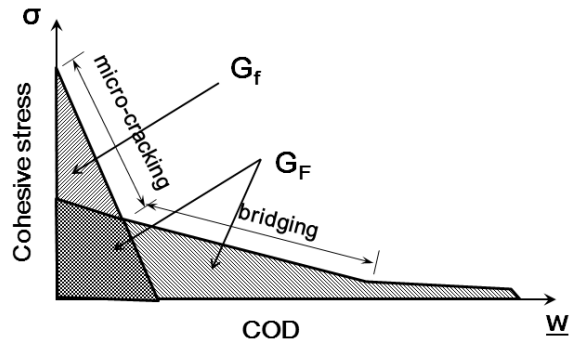


Fig. 8. Softening Stress-Separation Curve of Cohesive Crack Model

Table 6. Theoretical Value for the Evaluation of Flexural Strength Based on the Deterministic and Statistical-Deterministic Size Effect

Classification	Data value
Compressive strength, f'_c (MPa)	40.66
Elasticity modulus, E (MPa)	28742.5
Fracture energy, G_f (N/m)	51.8482
Fracture zone size, c_f (mm)	5.25495
$g'(0)$	3.955265
$g''(0)$	-17.6271
$f_{r,\infty}$ (MPa)	7.15638
Db (mm)	5.85483

Table 7. Numerical and Experimental Flexural Strength

Specimen Size	Experimental data (Standard deviation) (MPa)	Estimate data	
		Statistical Deterministic value (MPa)	Deterministic value (MPa)
100mm	6.62 (0.192)	5.44	7.58
130mm	6.40 (0.222)	5.18	7.48
150mm	6.39 (0.240)	5.05	7.44

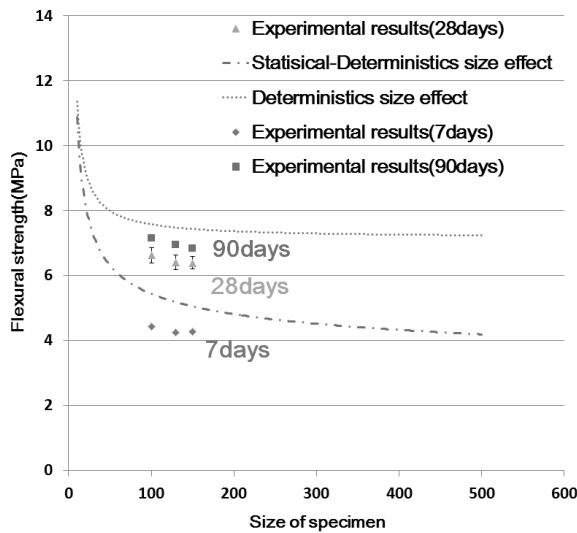


Fig. 9. Numerical and Experimental Results

Fig. 8과 같이 정의된다.

따라서 기존 연구결과로부터 G_f 는 구조물의 최대하중 예측에 적합하고 G_p 는 구조물 파괴 총 에너지 발생과 softening 곡선은 postpeak의 꼬리부분 계산에 적합하기 때문에(Planas와 Elices는 $G_p/G_f = 2.0 \sim 2.5$ 로 추정) Eqs. (7) and (8)은 Bazant and Becq-Giraudon (2002)이 방대한 데이터를 이용하여 구한 관계식이며, 본 연구에서도 적용이 가능하다고 판단된다.

이와 같은 이론을 바탕으로 본 실험자료 중 분산을 고려한 데이터 물성치인 압축강도 $f'_c = 40.66 \text{ MPa}$, 최대골재치수 $G_{\max} = d_b = 25 \text{ mm}$, 물/시멘트비 $w/c = 0.43$ 을 사용하였다. 또한 등근 골재의 경우 $\alpha_0 = \gamma_0 = 1$, 쇄석의 경우 $\alpha_0 = 1.44$ 와 $\gamma_0 = 1.12$ 이며 본 실험에서 사용된 골재는 쇄석으로 $\alpha_0 = 1.44$ 와 $\gamma_0 = 1.12$ 값을 사용하였다. 따라서 위 Eqs. (1)-(8)을 이용하여 확정 및 확률론적인 크기효과 예측에 관한 데이터를 확인할 수 있었으며, 이를 본 실험에서

사용된 재료 및 데이터를 바탕으로 결과를 비교·분석하였다. 사용된 값 및 계산된 값은 Table 6에 나타내었다.

실험 물성치를 기존의 연구자들에 의해 제안된 확률론적인 휨인장 강도의 크기효과와 확률론적인 크기효과에 대한 이론식을 바탕으로 그래프로 도식화하여 Fig. 9에 실험데이터와 비교·분석하였다(Bazant, 1999; Bazant and Novak, 2000; Bazant and Becq-Giraudon, 2002). 표준편차를 포함한 실험 데이터는 기존의 연구들에서 제안한 확률론적인 크기효과와 확률론적인 데이터 크기효과 사이에 위치하는 것으로 추정되었다. 따라서 Eqs. (1) and (2)는 현재 국내 콘크리트 포장에서 적용되고 있는 포장용 콘크리트의 휨강도 해석에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 바탕으로 국내 포장용 콘크리트 시험체에 대한 휨 시험결과 시험체 크기와 관계없이 확률론적인 해석결과와 확률론적인 해석결과 사이 값으로 추정되었으며, 표준 편차를 고려하여도 해석 값의 범위를 벗어나지 않았다. 이와 같은 결과는 KS F 2403:2014에서 규정되고 있는 공시체의 표준 단면 치수(100×100~150×150mm) 내에서 휨인장강도 평가를 위하여 시험체 크기를 결정하는 것이 파괴역학적으로 문제가 없음을 나타내는 것이다. 그러나 본 결과를 근거로 모든 콘크리트 구조물의 휨강도 실험체 단면을 100×100mm으로 축소하기 위해서는 시험체 크기에 대한 굵은 골재 최대치수 및 물-시멘트에 대한 광범위한 변수에 대한 실험적 평가가 추가로 분석되어야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 현재 국내 적용되고 있는 콘크리트 포장 시험체에 대한 크기 효과를 고려하여 시험체 크기를 축소시키기 위한 연구의 일환으로 실제 휨 시험과 해석결과를 비교 분석함으로써 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 압축강도 시험결과, 포장용 콘크리트의 경우 휨 강도와 비교하여 약 6배의 압축강도 특성을 나타내었으며, 재령이 증가함에 따라 다소 높은 표준편차를 나타내었는데, 이는 강도의 측정값이 증가됨에 따른 분포 폭의 증가에 의한 것으로 판단된다.
- (2) 휨 강도 시험 결과, 시험체의 로그 스케일로 감소됨에 따라 약 1.5~4.2% 강도가 증가하는 양상을 나타내었으며, 이는 콘크리트의 시험체 크기에 대한 국내외의 연구결과와 유사한 양상을 나타내는 것으로 확인되었다.
- (3) 휨 강도 시험 결과를 바탕으로 size effect에 대한 영향을 분석한 결과, 굵은 골재 최대 치수 및 물-시멘트비 등에 대한 영향을 고려하면 해석값과 다소 차이를 나타내었으나, 실험값이 크기효과를 고려한 확률론적인 해석 값과 확률론적인 해석 값 사이에 위치하는 것으로 분석되었다.
- (4) 본 연구결과에 의하여 국내 휨 평가 기준에서 규정하고 있는 단면치수 내에서 시험체 단면을 100×100mm로 축소하여도 충분히 신뢰성 있는 휨인장강도 결과를 도출할 수 있는 것으로 분석되었다.

감사의 글

본 연구는 도로교통연구원 2013년 연구지원과 2014년 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

References

- Bazánt, Z. P. and Novak, D. (2000). "Probabilistic nonlocal theory for quasi-brittle fracture initiation and size effect I Theory, and II Application." *Journal of Engineering Mechanics*, ASCE, Vol. 126, No. 2, pp. 166-185.
- Bazánt, Z. P. (1984). "Size effect in blunt fracture: Concrete, Rock, Metal." *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 518-535.
- Bazánt, Z. P. (1999). "Size effect on structural strength." *Archive of Applied Mechanics*, Vol. 69, pp. 703-725.
- Bazánt, Z. P. and Becq-Giraudon, E. (2002). "Statistical prediction of fracture parameters of concrete and implications for choice of testing standard." *Cement and Concrete Research*, Vol. 32, pp. 529-556.
- Bazánt, Z. P. and Oh, B. H. (1984). "Crack band theory for fracture of concrete." *Materiaux et Constructions*, pp. 155-177.
- Bazánt, Z. P. and Li, Z. (1996). "Zero-brittleness size-effect method for one-size fracture test of concrete." *Journal of Engineering Mechanics*, pp. 458-468.
- Kim, J. K., Yi, S. T. and Tang, E. I. (1999). "Size effect for flexural compressive strength of concrete." *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 11, No. 2, pp. 157-165.
- Korean Standards (2000). KS F 2408 Standard test method for flexural strength of concrete.
- Korean Standards (2010). KS F 2405 Standard test method for compressive strength of concrete.
- Korean Standards (2014). KS F 2403 Standard test method for making and curing concrete specimens.
- Mehta, P. K. and Monteiro, P. J. M. (2006). *Concrete-microstructure, properties and materials*, McGraw-Hill, Third Edition.
- Park, K. S. and Ha, K. S. (2012). "Prediction of concrete fracture behavior and size effect by using finite element analysis." *Proceeding of the Korea Concrete Institute Conference*, Vol. 24, No. 1, pp. 555-556.
- Shim, J. W., Kwon, S. M., Yoo, T. S. Ahn, T. S. and Kim, N. Y. (2008). "Size-effect correction for pavement concrete flexural strength test." *Proceeding of the Korea Concrete Institute Conference*, Vol. 20, No. 2, pp. 625-628.
- Van Mier, J. G. M. and Man, H. K. (2009). "Some notes on microcracking, softening, localization, and size effects." *International Journal of Damage Mechanics*, Vol. 18, No. 3, pp. 283-309.
- Yang, H. S. (2009). *A study on size effect correction for concrete pavement flexural strength test*, Master's Thesis, Hanyang University.
- Yoo, T. S., Han, S. H. and Yeom, S. K. (2004). *Development of structural evaluation guidelines for portland cement concrete pavement*, PA-04-09, Korea Expressway Corporation.