

# 규사성분의 산업폐기물을 혼입한 콘크리트의 역학적 특성

## Mechanical Properties of Concrete Containing Silicic Wastes

박 제 선<sup>1)</sup> 김 태 경<sup>2)</sup> 이 주 형<sup>3)</sup> 백 민 경<sup>4)</sup>  
Park, Je-Seon Kim, Tae-Kyung Lee, Joo-Hyung Back, Min-Kyung

### ABSTRACT

An experimental study was performed to examine the feasibility of using silicic wastes as construction materials for civil structures, and investigate its utility as a replacement for the favored nature resource to prevent the economic loss. In order to achieve this objective, mechanical properties of concrete containing silicic wastes is tested by investigating the strength development through parameters of water-binder ratios replacement 10 percent ratios with respect to curing conditions. The effect of strength development is investigated for curing conditions when silicic wastes of 10 percent of cement-binder ratios is contained.

Comparision on compressive strength of normal concrete and concrete containing silicic wastes at 28 day is conducted. The concrete with silicic wastes have larger compressive strength than of normal concrete by about 20 percent, when cured at 80 degree. The wastes concrete using silica sand shows increased strength, fracture toughness, elastic modulus and strain than the normal concrete, although the silicic wastes concrete could be able to satisfy the generally required strength for conventional concrete structures.

## 1. 서 론

지난 수십 년간 우리 나라의 경제 정책은 지속적인 산업 발달과 성장 위주로만 이루어져 왔다. 따라서 사회의 많은 면에서 급진적인 발전을 이루어 왔으나, 상대적으로 환경은 뒷전이였다. 이러한 산업의 발달은 자연히 그로부터 산업 부산물 또는 폐기물을 발생시켜 왔다. 하지만 80년대 후반까지 이러한 부산물들은 적정 처리 방안 없이 방치, 매립 내지는 불법 투기되어 왔음에도 성장의 노력 속에 대수롭지 않은 것으로 여겨져 왔다. 하지만 근년에 환경문제에 대한 심각성이 크게 대두되면서 각종 산업 폐기물들을 처리하거나 재활용해야 하는 문제가 사회적인 관심을 불

러 일으키고 있다. 본 연구에서의 소재로 다루어지는 규석 광산의 부산물인 규사 폐기물은 무해하므로 그간 재활용 연구 대상서 제외되어 왔으나 발생 물량이 막대하고 여러해 동안의 누적 량이 매우 많아 이제는 방치 할 수 없는 단계에 이르렀다. 본 연구에서는 이를 비교적 사용 물량이 많은 콘크리트 제조시에 첨가하여 이를 재활용하기 위한 연구를 수행하고자 했다. 따라서, 본 연구의 목적은 규석 광산에서 발생하는 산업 폐기물을 건설 산업용 콘크리트 재료로 재활용하는 방안에 대한 연구를 수행하여 그 활용 가능성을 타진하는 것이다.

## 2. 실 험

### 1) 재료

#### (1) 골재

굵은골재는 춘천지역에서 생산되는 비중

- 1) 정희원, 강원대학교 토목공학과 교수, 공박
- 2) 정희원, 강원대학교 토목공학과 박사과정
- 3) 정희원, 강원대학교 토목공학과 공학석사
- 4) 정희원, 강원대학교 토목공학과 석사과정

2.61인 레미콘 제조용 쇄석으로 하였고, 잔골재는 강원도 홍천강에서 채취한 비중 2.60, 조립율 2.99인 강모래를 사용하였다.

(2) 시멘트 및 혼화제

시멘트 비중 3.12인 국내 S사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트로 하였고, 혼화제는 경기도 가평 및 포천 지역의 규석광산에서 배출되는 규사폐기물을 사용하였으며, 이에 대한 화학적 및 물리적 조성은 표 1과 같다.

Table 1 Chemical and Physical Properties of Silica sand

Type	SiO <sub>2</sub> (%)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)	CaO (%)	MgO (%)	K <sub>2</sub> O (%)	L.O.I (%)	Specific gravity
1	97.58	0.41	1.18	0.32	0.05	0.26	0.24	2.65
2	87.11	2.28	6.71	0.21	0.20	1.91	1.30	2.61

Type 1 : 포천지역 규사폐기물

Type 2 : 가평지역 규사폐기물

(3) AE 감수제 및 고성능 유동화제

w/c를 낮추고 작업성의 증진을 위하여 국내 K사 제품인 비중 1.18인 AE 감수제 및 비중 1.21인 나프탈렌 설포네이트 나트륨계 제품인 Ezcon를 사용하였다.

2. 배합설계 및 시험방법

(1) 콘크리트 배합

규사폐기물을 혼입한 콘크리트의 양생 조건에 따른 콘크리트의 역학적 특성을 밝히기 위하여 콘크리트의 배합은 Table 2와 같이 실시하였다. 표에서와 같이, 소정의 위어커빌리티를 확보하기 위하여 슬럼프값을 3±1cm로 미리 정하고, 고성능 유동화제의 첨가량을 달리 하여 실험을 실시하였다.

콘크리트의 비빔은 굵은골재와 잔골재를 투입하고 30초간 건비빔을 한 후 시멘트, 규사 폐기물(Silicic wastes), 감수제를 투입 후 1분간, 나머지 혼합수(물+유동화제)를 넣고 2분간 비빔을 실시하였다. 비빔후 굳지 않은 콘크리트의 위어커빌리티를 측정하기 위하여 슬럼프 시험을 실시하였고, 탁상식 바이브레이터로 2층 다짐을 실시하였다. 콘크리트 타설기간은 9월초에서 10월초순에 걸쳐 이루어졌으며, 타설시 온도는 15℃ 전후에서 이루어졌다.

Table 2. Mixing Design of Concrete

Variable Type	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )						
	W/B (%)	S/A (%)	C	W	G	S	B
1 (po-chun)	25	40	540	150	960	640	60
2 (ga-pyung)			540	150	960	640	60
Normal Concrete			600	150	960	640	-

(2) 시험방법

콘크리트의 압축강도, 인장강도, 탄성계수 등 역학적 특성을 구명하기 위하여 φ100×200mm 원통형 공시체를 각 조건별로 17개씩 306개[혼화제(2)×양생온도(3)×양생시간(3)×17개]를 제작하여 증기양생을 실시하였으며, 추가 실험용으로 각 조건별로 17개씩 34개[혼화제(2)×17개]를 제작하여 수중양생을 실시하였다.

과피 실험용 공시체는 최적 배합 조건에 따라 각 조건별로 3개씩 60개(증기양생: 첨가제(2)×양생온도(3)×양생시간(3)×3개, 수중양생: 혼화제(2)×3개)를 제작하였다.

제조된 공시체는 각 조건별 양생을 걸쳐 KS F 2405, KS F 2438에 규정된 방법에 의해 실험을 실시하였다. 과피 시험은 모든 시험체에 공히 3mm폭의 초기 균열비 0.3의 균열을 보의 중앙 하변에 만들었고 보높이대 지간(S/W)비는 4를 기준으로 하였다. 이때 보

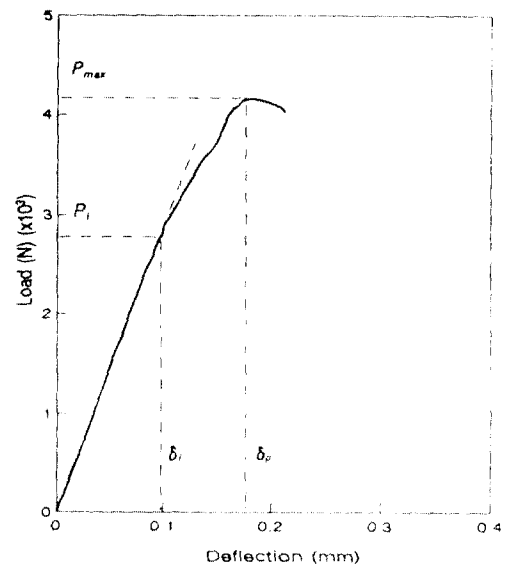


Fig.1 A Typical load-deflection plot for a notched concrete beam

중량의 처짐을 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 보하단 초기균열의 양쪽에 설치하였으며, 공시체 파괴후 초기균열의 길이를 재었다.

Fig. 1과 같은 하중-처짐 곡선으로부터  $P_i$ ,  $P_{max}$ ,  $d_{pi}$ ,  $d_{pmax}$ 를 구하였으며 이 값들과 유효균열모델(Effective Crack Model)을 이용하여 파괴인성( $K_{Ic}$ )을 구하였다. 식(1)은 Karigaloo와 Nallathambi에 의해 제안된 방법으로 문헌 1, 2, 3에 보다 상세히 제시되었다.

$$K_{Ic} = 1.13782 \sigma_n \sqrt{a_e} F_1(\alpha_e) \quad (1)$$

여기서,  $\alpha_e = a_e/W$  로 보높이대 유효균열길이 이비,  $a_e$ 는 유효균열길이로 최대 하중시까지 진전된 균열길이이며,  $\sigma_n = 6M/(BW^2)$  이고 이때  $M = (P_{max} + wS/2)S/4$ 이다.

### (3) 콘크리트 양생

콘크리트 양생은 수중양생, 증기양생 후 수중양생을 실시하였는데, 이는 콘크리트의 양생조건 변화에 따른 콘크리트의 강도 특성을 검토하여, 콘크리트 증기양생의 최적양생조건을 구하기 위해 Table 3에 제시된 조건으로 실험을 수행 하였다.

Table 3 Testing conditions and factors

제어인자		단위	수준의 내용
증 기 양 생 법	전치시간	(hr)	4
	전치시간의 온도	( $^{\circ}C$ )	20
	온도상승 속도	( $^{\circ}C/hr$ )	25
	양생온도	( $^{\circ}C$ )	70, 75, 80
	양생시간	(hr)	4, 6, 8
	후 양생온도	( $^{\circ}C$ )	20
	후 양생방법	-	수중
수중양생		$^{\circ}C$	$20 \pm 2^{\circ}C$

## 3. 실험결과 및 고찰

### 1) 재령에 따른 압축강도

재령에 따른 강도증진 효과를 비교, 고찰하기 위하여 Fig. 2, 3(Type 1, 2)에 1, 3, 5, 7, 14, 28, 56일 재령에서 압축강도의 증가를 표시하였다. Type 1 시험체는  $70^{\circ}C$ 의 양생온도에서 양생시간의 변화에 따라 압축강도가 초기재령에서 비슷한 강도를 나타냈으나, 재령

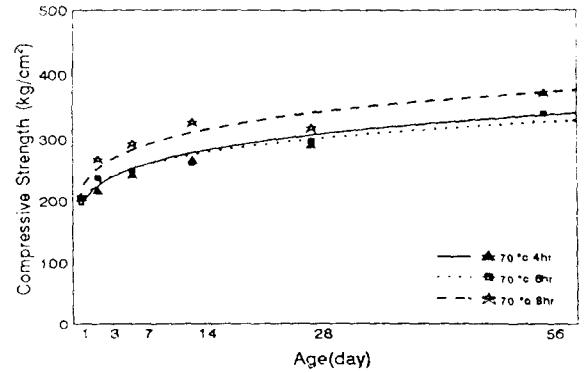


Fig. 2 Compressive strength for changes by Age(Type 1)

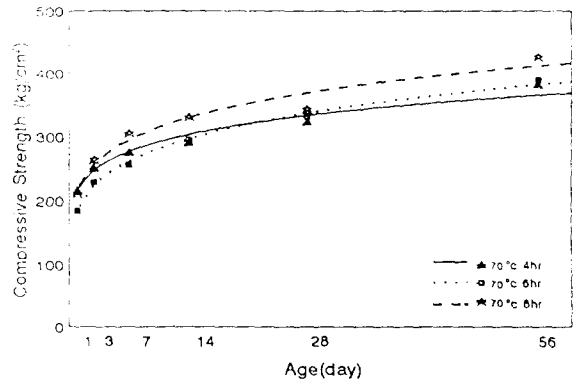


Fig. 3 Compressive strength for changes by Age(Type 2)

이 증가함에 따라 소폭의 강도 증가를 가져왔다. 1일 재령의 압축강도는 28일 압축강도의 60% 정도의 강도가 나타났으며, 재령 28일에 대한 56일의 압축강도는 14~28% 정도 강도증진 효과를 보였다. 즉, 재령이 증가함에 따라 압축강도의 변화가 증가함을 보여주고 있다. Type 2 시험체도 양생온도가  $70^{\circ}C$ 의 조건에서 재령 1일에서의 압축강도는 28일 압축강도의 60%진후로 비슷한 양상을 보이고 있으며, 재령이 증가함에 따라 소폭의 증가가 이루어졌다. 재령 56일에서의 압축강도는 재령 28일 압축강도의 17~24%의 강도 증진 효과를 보였다.

### 2) 양생조건에 따른 압축강도

규사폐기물을 혼입한 콘크리트의 양생조건에 따른 압축강도 시험결과를 비교·고찰하기 위하여 재령 1일의 강도를 각각 Fig. 4(Type 1)

과 Fig. 5(Type 2) 로 나타내었다. Type 1 시험체에 대하여, 28일 재령에서의 일반콘크리트의 압축강도에 비해 양생온도 70°C 인 경우 양생시간이 4, 6, 8 시간으로 증가함에 따라 72%, 69%, 72%의 분포를 보이고 있으며, 양생온도 75°C의 경우는 70%, 61%, 65%로, 80°C인 경우는 70%, 75%, 71%의 강도를 나타냈다. Type 2 시험체에 대하여, 재령28일의 일반콘크리트의 압축강도에 비해 양생온도 70°C인 경우 양생시간이 4hr, 6hr, 8hr로 변화함에 따라 76%, 65%, 74%의 수준으로 나타났으며, 75°C인 경우는 71%, 70%, 71%로 나타났다. 또한, 80°C인 경우는 62%, 67%, 62%의 분포로 양생온도 70°C, 75°C에 비해 다소 낮게 나타났다.

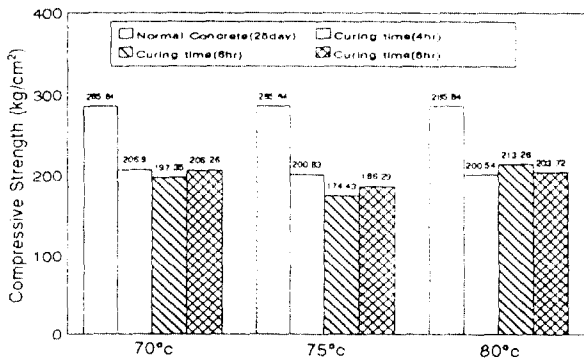


Fig. 4 Compressive Strength (Type 1, 1 day)

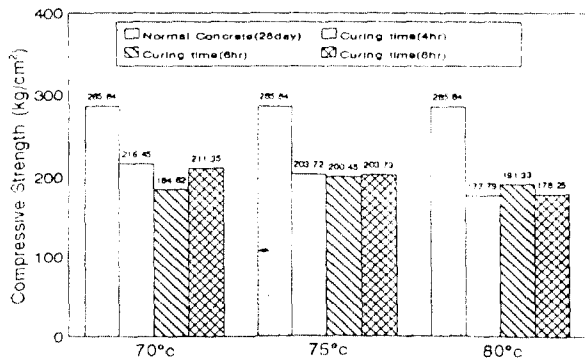


Fig. 5 Compressive Strength (Type 2, 1 day)

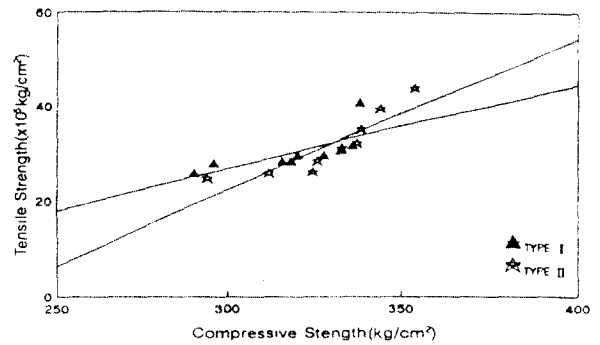


Fig. 6 Relation between splitting tensile strength and compressive strength

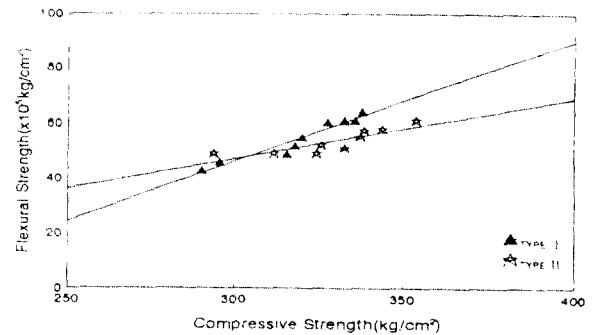


Fig. 7 Relation between flexural strength and compressive strength

### 3) 각 강도와와의 관계

Fig. 6 으로부터  $\sigma_t / \sigma_c$  비는 Type 1의 경우 1/10 ~ 1/11 ( $R^2=0.51$ ), Type 2는 1/8 - 1/12 ( $R^2=0.78$ )의 범위로 나타났으며, 이는 일반적으로 콘크리트의 경우  $\sigma_t / \sigma_c$  비가 1/8 - 1/12 범위와 일치함을 알 수 있었다.

Fig. 7은 압축강도와 휨강도와와의 관계로써  $\sigma_f / \sigma_c$  비는 Type 1의 경우 1/5 ~ 1/6 ( $R^2=0.93$ ), Type 2는 1/5 ~ 1/6 ( $R^2=0.73$ )의 범위로 나타났으며, 이는 일반콘크리트의 경우  $\sigma_f / \sigma_c$  비가 1/4 - 1/8 정도의 범위에 있으므로 비슷한 경향을 보이고 있다. 위 결과로부터 규사를 혼입한 콘크리트의 각 강도와와의 관계는 일반콘크리트의 경우와

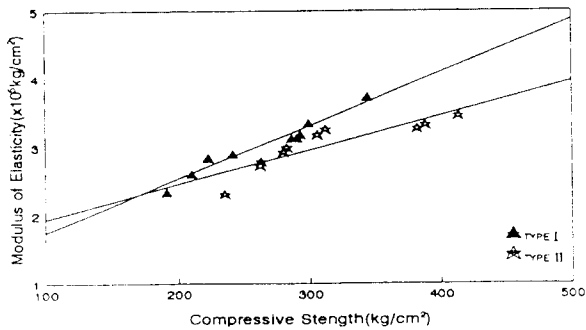


Fig. 8 Relation between modulus of elasticity and compressive strength

거의 비슷함을 알 수 있었다.

#### 4) 압축강도와 탄성계수와와의 관계

Fig. 8과 같이 Type 1과 Type 2 시험체의 콘크리트 압축강도는 290.31~338.17 kg/cm<sup>2</sup> 과 294.01~353.96 kg/cm<sup>2</sup>이며, 탄성계수는 2.328~3.72×10<sup>5</sup> kg/cm<sup>2</sup>, 2.298~3.442 kg/cm<sup>2</sup> 임을 알 수 있다.

#### 5) 파괴인성

Fig. 9는 Type 1의 경우 양생조건별 파괴인성치를 일반 콘크리트와 비교한 것이다. 양생온도가 70°C 의 경우 양생시간이 4hr, 6hr, 8hr 로 증가함에 따라 파괴인성치는 일반 콘크리트의 재령 28일에 대한 파괴저항력에 비해 68%, 71%, 71% 로 파괴저항력이 다소 적게 나타났다. 또한 양생온도 75°C인 경우 79%, 85%, 92% 의 분포를 보이고 있으나 80°C의 경우 130%, 124%, 115% 로 일반 콘크리트에 비해 큰 파괴저항력을 보여주고 있다.

Fig. 10은 Type 2의 경우로 일반 콘크리트와 비교해볼 때, 양생온도 70°C 인 경우 양생시간이 증가함에 따라 일반 콘크리트의 파괴인성치에 비해 96%, 88%, 91% 수준으로 적게 나타났고, 75°C 인 경우 111%, 101%, 109% 로 일반 콘크리트에 비해 다소 큰 저항력을 보여주고 있다. 또한 80°C 인 경우 양생시간이 증가함에 따라 일반 콘크리트의 파괴

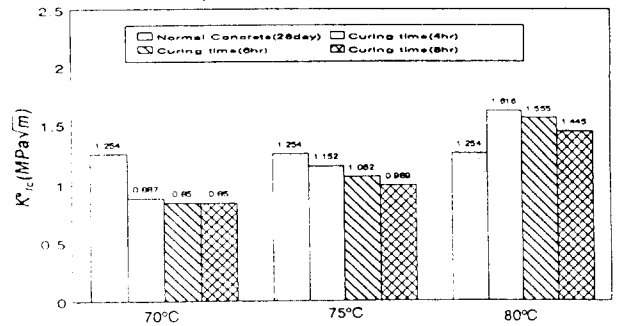


Fig. 9 Relation of fracture toughness and curing conditions (Type 1)

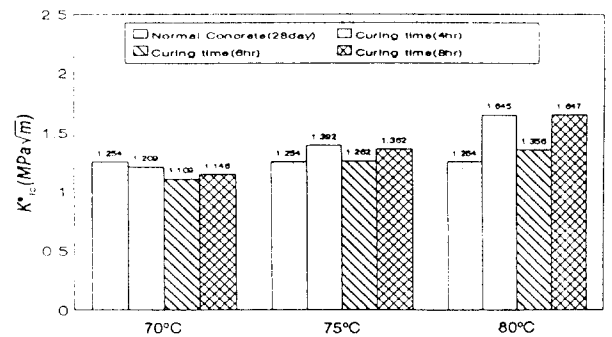


Fig. 10 Relation of fracture toughness and curing conditions (Type 2)

인성치에 비해 131%, 101%, 131% 의 수준으로 파괴 저항력이 급격히 증가함을 보여 주고 있다. 위의 결과로부터 두 종류의 혼화재가 양생온도 80°C 인 경우 일반 콘크리트에 비해 파괴저항력이 크게 나타남을 알 수 있었다.

## 4. 결 론

본 연구는 규석광산에서 부산물로 얻어지는 규사폐기물을 혼입한 콘크리트를 대상으로 양생 조건을 달리한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 재령에 따른 압축강도는 보통 콘크리트의 재령 28일에 대해 1일 재령에서 60% 정도의 강도가 이루어 졌으며, 56일 에서는 Type 1은

117%, Type 2는 122%의 강도 발현 효과를 나타냈다.

2) 최적 양생 조건은 Type 1의 경우 양생 온도 80℃, 양생지속시간 4시간, Type 2의 경우 양생온도 80℃, 양생지속시간 8시간의 경우에서 압축강도 및 파괴 인성치가 가장 크게 나타났다.

3) 압축강도에 대한 인장강도와 휨 강도비는 일반적으로 알려진 것과 유사한 경향을 보이고 있으며, 탄성계수는 일반 콘크리트에 비하여 다소 큰 값을 가짐을 알 수 있었다.

4) 이상의 결과로 부터, 규사폐기물을 혼입한 콘크리트는 압축강도를 일반 콘크리트의 소요 수준만큼 향상시킬 수 있음을 확인 할 수 있었다. 따라서 이를 압축 부재의 사용도 가능할 것으로 추정되나 실용화를 위해서는 첨가량의 증가와 이를 잔골재로 대체 가능성에 대한 연구와 철근의 부착강도, 피로강도, 수밀성 시험등 에 대한 연구가 필요하다고 판단된다.

## 5. 참고문헌

1. Karihaloo, B. L. and Nallathanbi, P., "Effective Crack Model for the Determination of Fracture Toughness( $K_{Ic}^c$ ) of Concrete", J. Engrg. Fracture Mech, Vol. 35, 1990, PP. 637-645.
2. S.P.Shah and A.Carpinteri, "Fracture Mechanics Test Methods for Concrete", Chapman and Hall, London
3. "Fracture mechanics test methods for concrete", Report of technical committee 89-FMT, RILEM, Ed. by S. P. Shah and A.Carpinteri, 1991, pp.22-35
4. 이주형, 박제선, 김태경, 백민경, "실리카흙을 혼입한 고강도 콘크리트의 파괴특성" 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1995, pp.333-336
5. 박제선, 권승준, 김태경, 이재호, "고강도 콘크리트의 역학적 성질에 관한 연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1994, pp.401-401
6. A. C. I. Committee 517, "Recommended practice for atmospheric pressure steam curing of concrete", Journal A. C. I, Vol. 66, Aug. 1969, pp.629-72

Table 4-2. Results of 3PB Test on Concrete Beams

Type	Temperature	Hour	Beam dimensions (mm)			$a_0/W$	$a_e$ (mm)	$P_i$ (N)	$P_{max}$ (N)	$\delta_i$ (mm)	$\delta_{max}$ (mm)	$\sigma_n$ (MPa)	$K_{Ic}^c$ (MPa $\sqrt{m}$ )
			S	B	W								
Normal Concrete	-	-	400	100	100	0.300	45.10	3185	3773	0.067	0.126	2.290	1.254
1	under water	-				0.298	33.60	2940	4165	0.048	0.075	2.528	1.010
	70℃	4hr				0.289	38.70	2205	3185	0.045	0.085	1.940	0.887
	70℃	6hr				0.288	31.70	2695	3675	0.097	0.142	2.234	0.850
	70℃	8hr				0.288	32.90	3920	4900	0.090	0.125	2.969	1.165
	75℃	4hr				0.301	36.49	3430	4410	0.080	0.123	2.675	1.152
	75℃	6hr				0.278	37.80	2940	3920	0.040	0.070	2.381	1.062
	75℃	8hr				0.290	37.50	3185	3675	0.065	0.095	2.234	0.989
	80℃	4hr				0.300	44.90	4410	4900	0.065	0.115	2.969	1.616
	80℃	6hr				0.280	35.50	4900	6125	0.078	0.120	3.704	1.555
80℃	8hr	0.300				41.00	4165	4900	0.080	0.130	2.969	1.445	
2	under water	-				0.278	37.80	2940	3920	0.080	0.105	2.381	1.062
	70℃	4hr				0.290	56.30	2450	3430	0.060	0.083	2.087	1.645
	70℃	6hr				0.290	44.40	3185	4165	0.023	0.068	2.528	1.356
	70℃	8hr				0.290	36.20	5390	6370	0.033	0.115	3.851	1.647
	75℃	4hr				0.278	45.30	3430	4165	0.080	0.103	2.528	1.392
	75℃	6hr				0.290	44.00	2940	3920	0.050	0.125	2.381	1.262
	75℃	8hr				0.290	40.70	3675	4655	0.060	0.115	2.822	1.362
	80℃	4hr				0.290	38.30	3430	4410	0.065	0.120	2.675	1.209
	80℃	6hr	0.300	39.40	3185	3920	0.072	0.093	2.381	1.109			
80℃	8hr	0.300	38.40	3185	4165	0.055	0.075	2.528	1.146				