

고속비상체의 충돌에 의한 고강도 콘크리트의 표면관입저항성 및 배면박리성상에 관한 연구

김홍섭 1) · 남정수 1) · 황헌규 2) · 전중규 3) · 김규용 1)*

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾현대엠코(주) ³⁾코오롱글로벌(주)

A Study on the Penetration Resistance and Spalling Properties of High Strength Concrete by Impact of High Velocity Projectile

Hong-Seop Kim, 1) Jeong-Soo Nam, 1) Heon-Kyu Hwang, 2) Joong-Kyu Jeon, 3) and Gyu-Yong Kim 1)*

¹⁾Dept. of Architecture Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-742, Korea ²⁾Division of Building Works, Hyundai Amco, Seoul 140-846, Korea ³⁾Infrastructure Research Lab., R&BD Center, Kolon Global Corp., Yongin 449-815, Korea

ABSTRACT Concrete materials subjected to impact by high velocity projectiles exhibit responses that differ from those when they are under static loading. Projectiles generate localized effects characterized by penetration of front, spalling of rear and perforation as well as more widespread crack propagation. The magnitude of damage depends on a variety of factors such as material properties of the projectile, impact velocity, the mass and geometry as well as the material properties of concrete specimen size and thickness, reinforcement materials type and method of the concrete target. In this study, penetration depth of front, spalling thickness of rear and effect of spalling suppression of concrete by fiber reinforcement was evaluated according to compressive strength of concrete. As a result, it was similar to results of the modified NDRC formula and US ACE formula that the more compressive strength is increased, the penetration depth of front is suppressed. On the other hand, the increase in compressive strength of concrete does not affect spalling of rear suppression. Spalling of rear is controlled by the increase of flexural, tensile strength and deformation capacity.

Keywords: penetration of front, spalling of rear, impact resistance performance, high strength concrete, the modified NDRC formula, US ACE formula

1. 서 론

탄환 및 포탄파편 등의 비상체 충돌 또는 차량 충돌 및 폭발사고에 의한 충격 및 폭발하중을 받는 콘크리트는 그 충격력에 의해 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 관통, 표면관입 및 배면박리뿐만 아니라 균열의 확산에 의해 나타나는 국부적인 파괴 등 정하중을 받을 때와 다른 파괴거동을 보인다. 이러한 콘크리트의 파괴거동은 비상체의 재료적 특성, 충돌속도, 질량 및 기하학적 구조뿐만 아니라 콘크리트의 재료적 특성, 시험체의 크기 및 두께, 보강재료 및 방법 등 다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 콘크리트의 충격파괴 특성에 관한 연구는 콘크리트 및 비상체 조건 등 다양한 요인을 고려하여 실시되고

*Corresponding author E-mail : gyuyongkim@cnu.ac.kr Received October 9, 2012, Revised December 14, 2012, Accepted January 2, 2013 ©2013 by Korea Concrete Institute 있으며, 이를 위한 실험장비 개발 및 평가방법 등을 제안 하는 연구가 보고되고 있다.¹⁻³⁾

콘크리트의 내충격 성능을 확보하기 위한 방법으로 기존에는 시험체 두께의 증가 및 콘크리트 외부를 흙으로 덮는 등 기초적인 방법이 주로 이루어지고 있었지만, 최근 콘크리트의 내충격 성능을 극대화시키는 방안으로 콘크리트의 압축강도, 휨·인장강도 및 파괴에너지 등 역학적 특성의 향상을 통하여 충격에 대한 저항성을 향상시키는 방안 등이 모색되고 있으며, 콘크리트의 역학적 특성과 내충격 성능과의 상관성 구명 및 내충격 성능의 예측에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.1-7)

이에 대한 기존 연구자들의 문헌에 따르면 콘크리트의 압축강도 증가는 고속 충격을 받은 콘크리트의 표면 관입깊이를 억제하고, 휨·인장강도 및 파괴에너지 등 인성의 향상은 배면박리를 억제하는 것으로 나타나고 있다.

이 연구에서는 고속 비상체의 충돌을 받는 고강도 콘 크리트의 압축강도에 따른 표면관입저항성 및 배면박리

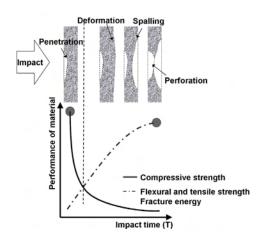


Fig. 1 Performance of material and failure pattern by impact time

성상에 대하여 평가하였으며, 기존의 제안식과 비교·검 토를 실시하였다. 또한 콘크리트의 내충격 성능을 향상 시키기 위한 방법으로 섬유보강 콘크리트 시험체를 제작 하여 배면박리억제효과에 대하여 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

Table 1은 이 연구의 실험계획을 나타낸 것으로 압축 강도에 의한 표면관입깊이를 평가하기 위하여 설계기준 강도 50, 70, 90, 110, 130 및 150 MPa 6수준의 고강도 콘크리트를 제작하였으며, 휨·인장강도 및 파괴에너지의 향상으로 인한 배면박리억제효과를 검토하기 위하여 설계기준강도 50 MPa 배합에 강섬유(SF) 및 폴리아미드(PA)를 0.5 및 1.0vol% 혼입한 콘크리트 시험체를 제작하였다.

내충격 성능평가를 위한 시험체의 크기는 100×100×20, 30, 35, 40, 50 및 70 mm(가로×세로×두께)로 하였으며, 충돌시험은 직경 10 mm, 질량 4.07 g의 강구를 사용하여 약 350 m/s의 속도로 발사시켜 충격에너지 245 J의 조건에서 고속충격시험을 실시하였다.

한편, 평가항목으로 역학적 특성은 압축강도, 휨·인장 강도 및 파괴에너지를 평가하였으며, 내충격 성능으로 충격시험 후의 시험체 외관형상 관찰을 통한 파괴등급산 정, 표면관입깊이, 배면박리두께 및 파괴면적손실률을 평 가하였다.

2.2 사용재료 및 콘크리트 배합

이 연구에서 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 2에 나타낸 바와 같이 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 혼화재는 플라이애쉬, 실리카퓸, 고로슬래그 및 무수석고를 사용하였다. 잔골재는 세척사를 사용하였고, 굵은 골재는 최대치수 20 mm의 부순자갈을 사용하였다. 또한 혼입섬유의 경우 강섬유는 길이 30 mm, 인장강도 1140 MPa 이고, 폴리아미드섬유는 길이 30 mm, 인장강도 594 MPa 이다.

이 연구에서 사용된 콘크리트 배합은 Table 3에 나타 낸 바와 같이 설계기준강도 50, 70, 90, 110, 130 및 150 MPa 에 대하여 각각 W/B 45, 35, 25, 18, 15 및 12%로 설정하 였다.

2.3 표면관입깊이 및 배면박리한계두께 산정식

이 연구의 범위에서 고속 비상체의 충돌 실험에 의하여 얻어진 표면관입깊이 및 배면박리한계두께 결과를 기존에 제안되고 있는 표면관입깊이 및 배면박리한계두께

Table 1 Experimental plan

Specimen condition			Impact condition					
Reinforcement	ID ⁽¹⁾	Size (mm)	Projectile		Velocity	Impact	Properties	
			Diameter (mm)	Mass (g)	(m/s)	energy (J)	Tropolues	
None	F _{ck} 50		10	4.07	350	245		
	F _{ck} 70	Width×Height (100×100) Thickness (20, 30, 35 40, 50, 70)					 Mechanical properties compressive strength (MPa) flexural strength (MPa) tensile strength (MPa) fracture energy (N·m/m²) Impact resistance performance penetration depth (mm) spalling thickness (mm) spalling area ratio (%) 	
	F _{ck} 90							
fiber	Fck110							
	Fck130							
	F _{ck} 150							
Fiber reinforcement	Fck50SF0.5							
	F _{ck} 50SF1.0							
	F _{ck} 50PA0.5						- comparison with estimate formula	
	F _{ck} 50PA1.0							

⁽¹⁾ F_{ck}NO.: compressive strength, SF: steel fiber, PA: polyamide fiber

Table 2 Properties of material

Material	Properties						
Cement	Portland cement, Density: 3.15 g/cm ³						
Cement	Fineness: 3630 cm ² /g						
Fly ash	Density: 2.20 g/cm ³ , Fineness: 3228 cm ² /g						
Silcafume	Density: 2.22 g/cm ³ , Fineness: 200000 cm ² /g						
BFS	Density: 2.90 g/cm ³ , Fineness: 6500 cm ² /g						
Anhydrite	Density: 2.90 g/cm ³ , Fineness: 3550 cm ² /g						
Sand	Density: 2.56 g/cm ³ , Absorptance: 0.97%						
Gravel	Crushed gravel, Maximum size: 20 mm						
Graver	Density: 2.65 g/cm ³ , Absorptance: 0.90%						
	Diameter: 0.5 m						
Steel fiber	Length: 30 mm						
	Tensile strength: 1140 MPa, Density 7.85 g/cm ³						
Polyamide	Diameter: 0.5 mm, Length: 30 mm						
fiber Tensile strength: 594 MPa, Density: 1.14 g/c							

Table 3 Mix properties of concrete

Е	W/B	S/a	Unit weight (kg/m³)							
F_{ck}	(%)	(%)	W	С	SF	BFS	FA	CaSO ₄	S	G
50	45	45		330	-	-	37	-	776	989
70	35		45	165	401	24	-	47	-	732
90	25			462	66	-	132	-	643	819
110	18	42		583	67	-	183	-	570	822
130	15	39	150	600	150	200	-	50	472	787
150	12	35		561	250	314	63	63	334	647

산정식인 수정 NDRC식 및 US ACE식과 비교하였다. 수정 NDRC식 및 US ACE식에서 표면관입깊이의 경우 강제의 비상체가 무한두께의 콘크리트에 충돌했을 때의 힘의 균형 조건을 기초 이론으로 근거하고 있으며, 배면박리한계두께는 표면관입깊이를 변수로한 실험회귀식이다. 각각의 산정식은 표면관입깊이 및 배면박리두께를 산정하는데 있어 비상체의 직경 및 질량, 충돌속도, 콘크리트의 압축강도를 주요요인으로 하고 있으며, 각 식은 식(1)-(3)에 나타내었다.³⁻⁵⁾

수정 NDRC식:

$$G(x/D) = 3.813 \times 10^{-5} \frac{NM}{D\sqrt{f_c}} \left(\frac{V_0}{D}\right)^{1.8}$$

$$G(x/D) = \left(\frac{x}{2D}\right)^2 : \frac{x}{D} \le 2$$

$$G(x/D) = \frac{x}{D} - 1 : \frac{x}{D} \ge 2$$
(1)

$$\frac{s}{D} = 7.91 \left(\frac{x}{D}\right) - 5.06 \left(\frac{x}{D}\right)^2 \qquad \frac{x}{D} \le 0.65$$

$$\frac{s}{D} = 2.12 + 1.36 \left(\frac{x}{D}\right) \qquad 0.65 \le \frac{x}{D} \le 11.75$$
(2)

US ACE 식:

$$\frac{x}{D} = \frac{3.5 \times 10^{-4} M V_0^{1.5}}{(f_x)^{0.5} D^{2.785}} + 0.5$$
 (3)

여기서, x : 표면관입깊이 (m)

s : 배면박리한계두께 (m)

D : 비상체 직경 (m)

M: 비상체 질량 (kg)

 V_0 : 충돌속도 (m/s)

 f_c : 압축강도 (Pa)

N: 선단형상계수

2.4 실험방법 및 시험체 제작

2.4.1 압축강도 시험

압축강도 시험은 Ø100×200 mm의 원주형 시험체를 제작하여 28일간 수중양생을 실시한 후 KS F 2405 『콘크리트의 압축강도 시험방법』에 준하여 UTM(만능재료시험기)를 사용하여 측정하였다.

2.4.2 휨강도 및 인장강도 시험

휨강도 시험은 □100×100×400 mm의 각형 시험체를 제작하여, KS F 2408 『콘크리트 휨강도 시험 방법』에 준하여 4점재하 시험을 실시하였고, 직접인장강도의 평가는 사각아령형 시험체를 제작하여 직접인장시험장치를 사용하여 평가하였다.

2.4.3 파괴에너지 시험

파괴에너지는 RILEM 50-FMC Draft Recommendation에서 제안한 규정에 준하여 Fig. 2에 나타낸 바와 같이□100×100×400 mm의 각형 시험체의 중앙에 노치를 제작하고, 3점 휨재하 시험을 실시하였으며, Fig. 3과 같이 하중-균열개구부변위(CMOD)곡선을 활용하여 식 (4)에 의하여 산정하였다.

$$G_F = (W_0 + mg\delta_0)/A_{liq} [N \cdot m/m^2]$$
(4)

여기서, G_F : 파괴에너지 $(N \cdot m/m^2)$

 W_0 : CMOD하중-변위 곡선의 면적 $(\mathbf{N} \cdot \mathbf{m})$

 $m : m_1 + 2m_2$ (kg)

 m_1 : 지지대 사이의 보의 무게 (kg)

m₂ : 시험체에 부착된 지그의 무게 (kg)

g : 중력 가속도 (9.81 m/s²)

 δ : 보의 최종 파괴시의 변형 (m)

 A_{liq} : 파괴 단면적 (\mathbf{m}^2)

2.4.4 내충격 성능평가

내충격 성능평가용 시험체는 □100×100×400 mm의 각

형시험체를 제작한 후 재령 28일에서 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 두께 20, 30, 35, 40, 50 및 70 mm로 컷팅하였다. Fig. 5는 고속 충격 시험장치의 모식도 및 시험체의 거치 상황을 나타낸 것으로 고정판에 시험체를 고정시켰다.

한편, 콘크리트 재료의 내충격 성능평가에 대한 연구는 사용장비, 시험체 및 충돌속도의 범위 등 실험조건이달라 표준화된 평가방법의 규정이 어렵기 때문에 이 연구에서는 기존 연구자들의 평가방법¹⁻⁴)을 참고하여 Table 4





Fig. 2 Loading apparatus

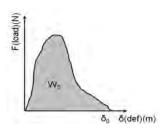


Fig. 3 Load-CMOD curve

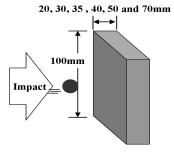


Fig. 4 Specimen for impact test

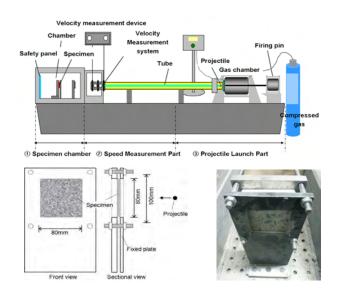


Fig. 5 High velocity impact test machine

에 나타낸 바와 같이 표면관입, 배면박리 및 관통파괴로 파괴등급을 구분하였다. 표면관입의 경우 비상체 충돌에 의하여 시험체의 표면에 탄흔이 발생하고, 배면에 미세균열이 발생하거나 배면의 상태가 양호한 경우로 하였으며, 배면박리의 경우 비상체의 충돌에 의한 배면의 콘크리트 일부가 떨어져나가거나, 배면에 큰 균열이 발생한경우로 산정하였다. 또한, 관통파괴의 경우 비상체가 시험체를 완전히 관통하거나, 표면관입깊이와 배면박리두께의 합이 시험체 두께와 같은 경우로 산정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 역학적 특성 평가 결과

이 연구 범위의 모든 시험체는 목표슬럼프 및 공기량을 만족하였으며, 28일 재령에서 역학적 특성에 대하여평가한 결과는 Table 5에 나타내었다. 압축강도는 28일재령에서 모든 시험체가 목표강도를 상회하는 결과로 나타났으며, 섬유무보강 시험체의 경우 휨·인장강도는 압

Table 4 Failure grade and depth

(i) Penetration	(ii) Spalling	(iii) Perforation
(a) $t_s / T < 1.0$	(b) $(t_s+t_r)/T < 1.0$	(c) $(t_s+t_r)/T = 1.0$

T: specimen thickness (mm)

t_s: penetration depth (mm)

t_t: spalling thickness (mm)

Table 5 Results of mechanical properties

_			l	
	Compressive	Flexural	Tensile	Fracture
ID	strength	strength	strength	energy
	(MPa)	(MPa)	(MPa)	$(N \cdot m/m^2)$
F _{ck} 50	56.6	6.51	3.98	307.44
F _{ck} 70	73.57	10.86	5.62	331.58
F _{ck} 90	94.18	12.72	5.88	371.36
F _{ck} 110	121.6	11.25	5.50	459.81
F _{ck} 130	138.3	11.55	4.91	479.61
F _{ck} 150	153.7	10.86	5.69	497.96
F _{ck} 50SF0.5	51.50	8.45	4.98	7886.97
F _{ck} 50SF1.0	52.30	11.52	5.15	14641.56
F _{ck} 50PA0.5	55.40	6.18	3.95	3854.38
F _{ck} 50PA1.0	50.40	8.35	4.97	6907.52

Slump: 180±20 mm (Fck50)

Slump-flow: $600\pm50 \text{ mm } (F_{ck}70\sim F_{ck}150)$

Air content: $4\pm1.5\%$ ($F_{ck}50\sim F_{ck}90$), $2\pm1\%$ ($F_{ck}110\sim F_{ck}150$)

축강도의 1/8 및 1/16 범위로 측정되었다. 또한, 파괴에너지의 경우 섬유보강 콘크리트의 경우 균열개구부 변위가작아 $300\sim500~N\cdot m/m^2$ 의 범위로 측정되었으며, 압축강도의 증가에 따라 파괴에너지는 향상되었으나, 향상효과는크지 않았다.

반면 섬유보강 콘크리트의 경우, 휨·인장강도는 섬유 무보강 콘크리트의 1.2~2배 정도로 향상되었으며, 이는 섬유보강으로 인한 균열발생의 억제 및 응력의 재분배를 통해 휨·인장성능을 향상시킨 것으로 판단된다. 또한, 파 괴에너지의 경우 섬유보강으로 인하여 균열개구부의 변위가 크게 증가하여 $3000{\sim}15000~N\cdot m/m^2$ 의 범위로 크게 향상됨을 알 수 있었다.

3.2 내충격 성능 평가 결과

3.2.1 고속 충격에 의한 파괴등급 산정

Table 6은 고속충격시험 후 압축강도 및 섬유보강유무에 따른 파괴등급을 나타낸 것으로 섬유무보강 콘크리트

Table 6 Failure grade

	allure grade				
Thickness (mm)	20	30	35	40	50
F _{ck} 50	X		*		
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 70					
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 90		*			
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 110	XX	**	• >		
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 130	* *				0
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 150					Or .
	Perforation	Spalling	Crack of rear	Penetration	Penetration
F _{ck} 50 SF0.5	*				
	Spalling	Spalling	Penetration	Penetration	Penetration
F _{ck} 50 SF1.0					
	Spalling	Spalling	Penetration	Penetration	Penetration
F _{ck} 50 PA0.5		1			
	Spalling	Spalling	Penetration	Penetration	Penetration
F _{ck} 50 PA1.0					
	Spalling	Penetration	Penetration	Penetration	Penetration

는 압축강도에 관계없이 시험체 두께 40 mm이상의 경우 배면박리가 발생하지 않은 표면관입등급으로, 두께 30 및 35 mm은 배면박리 및 큰 균열이 발생하여 배면박리 등급으로 평가되었다. 한편, 두께 20 mm의 경우 비상체가 관통되거나, 표면관입깊이와 배면박리두께의 합의 시험체 두께와 같아 관통파괴등급으로 평가되었다.

반면 섬유보강 콘크리트에서는 시험체 두께 35 mm이상의 경우와 두께 30 mm의 F_{ck} 50PA1.0 시험체는 표면관입등급으로, 이를 제외한 두께 30 mm의 이하의 모든 시험체는 배면박리등급으로 평가되어, 섬유보강으로 인하여 배면박리가 억제되는 것을 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트 내부 섬유의 가교작용으로 인하여 균열발생의 억제 및 충격파의 완화작용에 의한 것으로 판단된다.

3.2.2 콘크리트 압축강도에 의한 표면 및 배면파괴 성상

Table 7은 고속 비상체의 충돌을 받은 콘크리트의 표면관입깊이 및 단면파괴성상을 나타낸 것으로 표면관입 깊이는 3개의 시험편에 충격시험을 실시하여 얻어진 결과값의 평균치로 하였으며, 콘크리트의 압축강도 증가함에 따라 표면관입깊이는 저감되었다. 이는 압축강도 증가로 인하여 콘크리트 내부조직이 치밀해짐에 따라 강성이 증가하여 고속 비상체의 충격에 의한 표면관입저항능력이 향상된 것으로 판단된다.

한편, Fig. 6은 고속충격에 의한 표면관입깊이 산정식 인 수정 NDRC식 및 US ACE식과 이 연구의 실험 결과

Table 7 Penetration depth by compressive strength (Thickness=50 mm)

Fck50	Fck70	Fck90	Fck110	Fck130	F _{ck} 150
		V			, h
10.59	9.08	8.88	7.74	6.61	6.22

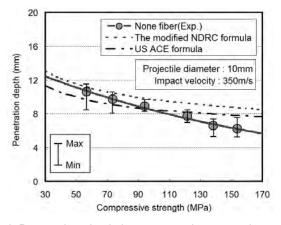


Fig. 6 Penetration depth by compressive strength

를 비교한 것으로, 압축강도 50~110 MPa의 범위에서는 표면관입 깊이 산정식과 유사한 경향으로 압축강도 증가에 의해 표면관입깊이는 완만하게 감소되었다. 반면, 압축강도 110 MPa 이상의 범위에서 기존 산정식에 의한 관입깊이는 압축강도가 증가하여도 일정수준에서 수렴되었으나, 이 연구에서는 110 MPa이상에서도 압축강도 증가에 의해 관입깊이가 감소되는 것으로 평가되었다. 수정 NDRC식 및 US ACE 식은 1980년대 초반에 제안된 실험회귀식으로 110 MPa급 이상의 초고강도콘크리트영역에 대해서는 충분히 고려되지 않은 것으로 판단되며, 향후압축강도 150 MPa이상의 영역에서의 실험데이터를 축적하여 초고강도콘크리트에 대한 적용이 필요할 것으로 사료된다.

Fig. 7은 충돌 시험 후의 시험체 두께에 따른 콘크리트의 표면관입깊이를 나타낸 것으로 동일 압축강도에서 시험체 두께가 표면관입깊이에 미치는 영향은 확인 할 수없었으며, 시험체 두께가 증가할수록 배면박리가 억제되었다.

Fig. 8은 시험체 두께 30 mm 조건에서의 압축강도에 따른 배면박리두께 및 면적손실률을 나타낸 것으로 압축 강도의 크기와 관계없이 배면박리두께 20 mm, 배면박리

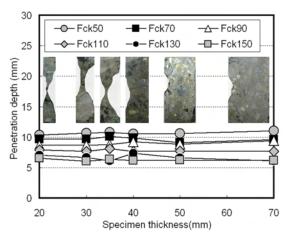


Fig. 7 Penetration depth by specimen thickness

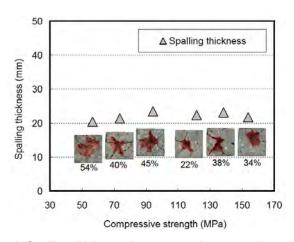


Fig. 8 Spalling thickness by compressive strength

면적손실률 20~50%의 배면박리가 발생하여 압축강도에 의한 배면박리억제효과는 확인할 수 없었다. 또한, Fig. 9는 압축강도에 따른 배면박리한계두께 평가 결과를 나타낸 것으로 충격에너지 245J의 범위에서 압축강도에 관계없이 시험체 두께 40 mm 이상의 범위에서 배면박리가 발생하지 않아, 시험체 두께 35~40 mm의 범위에서 배면박리한계두께가 존재할 것으로 사료되며, 이는 수정 NDRC식에 의해 산정된 결과와 유사한 것으로 나타났다.

3.2.3 섬유보강에 의한 표면 및 배면파괴 성상

Fig. 10은 압축강도 50 MPa급 섬유보강콘크리트의 휨·인장강도와 표면관입깊이의 관계를 나타낸 것으로 섬유보강으로 인한 휨·인장강도의 증가에 의한 표면관입깊이의 억제효과는 확인할 수 없었다.

Fig. 11은 시험체 두께 30 mm 조건에서 섬유보강에 의한 휨·인장강도에 의한 배면박리두께를 나타낸 것으로 강섬유 및 폴리아미드 섬유의 보강으로 인한 휨·인장강도의 향상으로 인해 배면박리두께 및 배면박리면적손실률이 감소하는 것을 알 수 있었다. 또한, Fig. 12는 파괴에너지에 따른 배면박리두께 및 면적손실률을 나타낸 것

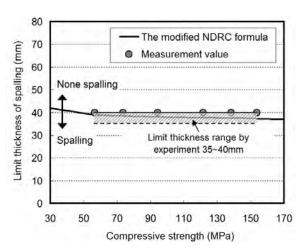


Fig. 9 Limit spalling thickness by compressive strength

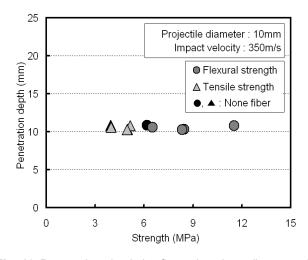
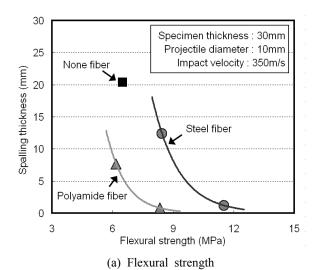


Fig. 10 Penetration depth by flexural and tensile strength

으로 휨·인장강도와 같은 경향으로 파괴에너지가 증가함에 따라 배면박리두께 및 면적손실률이 감소하는 것으로 나타났다.

한편, 폴리아미드섬유를 보강한 경우 휨·인장강도 및 파괴에너지는 강섬유 보강에 비하여 낮았지만, 동일 혼



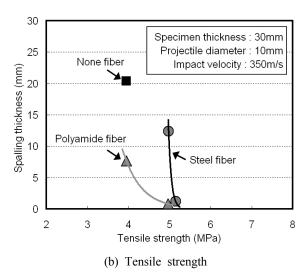


Fig. 11 Spalling thickness by flexural and tensile strength

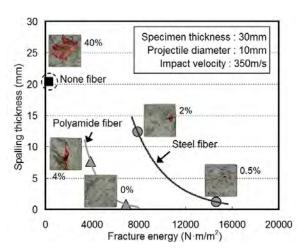


Fig. 12 Spalling thickness and area ratio by fracture energy

입률에서 강섬유에 비해 혼입개체수가 많아 콘크리트 매 트릭스와 섬유의 부착비표면적의 증가로 충격에 의한 배 면박리저감효과가 높은 것으로 사료된다.^{6,7)}

배면박리는 충격하중이 배면으로 전달되면서 생기는 전단균열에 의해서 발생하는 것으로 나타나고 있는데, 섬유무보강 콘크리트의 경우 일정 두께 이하에서 전단균 열이 배면까지 전달되면서 배면박리가 발생하는 파괴패 턴을 나타내고 있으며, 시험체 두께의 증가를 통하여 배 면박리를 억제할 수 있었다. 반면, 섬유보강 콘크리트의 경우 섬유무보강 콘크리트에 비하여 얇은 두께에서도 섬 유보강으로 인하여 전단균열발생 및 진전의 억제를 통하 여 배면박리를 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

4. 결 론

고속 비상체의 충돌에 의한 고강도 콘크리트의 표면관 입저항성 및 배면박리성상에 대하여 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 콘크리트의 고강도화에 의하여 고속 충격에 대한 표면 관입저항성은 향상되었으나, 압축강도 증가량 에 비하여 관입깊이의 저감효율은 크지 않았다.
- 2) 콘크리트의 압축강도가 50 MPa에서 150 MPa로 증가하여도 배면박리한계두께의 저감효과는 없는 것으로 나타났으며, 섬유무보강 콘크리트는 시험체두께의 증가를 통하여 배면박리를 억제할 수 있는 것으로 나타났다.
- 3) 섬유보강에 의해 배면박리한계두께가 감소하였으며, 콘크리트 내부의 섬유의 가교작용에 의한 균열 발생의 억제 및 응력의 재분에 의한 휨·인장성능및 파괴에너지의 향상이 영향을 미친 것으로 판단된다.
- 4) 섬유보강 콘크리트의 경우 섬유보강 콘크리트에 비하여 시험체 두께가 얇은 경우에서도 섬유보강으로 인하여 전단균열 발생의 억제 및 충격파의 완화에 의하여 배면박리를 억제할 수 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 한국에너지기술평가원 원전기술혁신사 업(2010161010004K)에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이 에 관계자 여러분께 감사드립니다. 또한 논문에 참여한 연구 자(의 일부)는 2단계 BK21 사업의 지원비를 받았으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 1. Zhang, M. H., Shim, V. P. W., Lu, G., and Chew., C. W., "Resistance of High-strength Concrete to Projectile Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 31 No. 7, 2005, pp. 825-841.
- Dancygier, A. N. and Yankelevsky., D. Z., "High Strength Concrete Response to Hard Projectile Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 18 No. 6, 1996, pp. 583-599.
- 3. Vossoughi, F., Ostertag, C. P., Monteiro, P. J. M., and Johnson, G. C., "Resistance of Concrete Protected by Fabric to Projectile Impact," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, Issue 1, 2007, pp. 96-106. (doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.09.003)
- 4. Beppu M., Miwa, K., Ohno, T., and Shiomi, M., "An Experimental Study on the Local Damage of Concrete Plate due to High Velocity Impact of Steel Projectile," *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 63 No. 1, 2007, pp. 178-191.
- Miwa, K., Beppu, M., Ohno, T., Itoh, M., and Katayama, M., "An Estimation Method of Local Damage in Concrete Plates by the Modified Theoretical Model," Japan Society of Civil Engineers, Vol. 65 No. 4, 2009, pp. 844-858.
- Kim, G. Y., Nam, J. S., and Miyauchi Hiroyuki, "Evaluation of Impact Resistance Performance of Fiber Reinforced Mortar under High-Velocity Impact of Projectile," *Architecture Institute of Korea*, Vol. 27, No. 9, 2011, pp. 101-108.
- Kim, G. Y., Hwang, H. K., Nam, J. S. Kim, H. S., Park, J. H., and Kim, J. J., "Evaluation of Impact Resistance of Steel Fiber and Organic Fiber Reinfoced Concrete and Mortar," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 12, No. 4, 2012, pp. 377-385. (doi: http://dx.doi.org/10.5345/JKIBC.2012.12.4.377)

핵심용어 : 표면관입, 배면박리, 내충격 성능, 고강도 콘크리트, 수정 NDRC식, US ACE식

요 약 고속 비상체에 의한 충격을 받는 콘크리트는 그 충격력에 의해 관통, 표면관입 및 배면박리뿐만 아니라 균열의 확산에 의해 나타나는 국부적인 파괴 등 정하중을 받을 때와 다른 파괴거동을 보인다. 이러한 콘크리트의 파괴거동은 비상체의 재료적 특성, 충돌속도, 질량 및 기하학적 구조뿐만 아니라 콘크리트의 재료적 특성, 시험체의 크기 및 두께, 보강재료 및 방법 등다양한 요인에 의해 영향을 받는다. 이 연구에서는 콘크리트 재료의 압축강도에 따른 표면관입깊이 및 배면박리성상에 대하여평가하고, 섬유보강에 의한 배면박리억제효과에 대하여 검토하고자 하였다. 그 결과 압축강도의 증가로 인하여 표면관입깊이는 감소하였으며, 이 연구 범위의 결과는 수정 NDRC식 및 US ACE식과 유사한 경향을 나타냈다. 반면, 배면박리억제에 있어 압축강도 증가에 의한 영향은 확인할 수 없었으며, 섬유보강에 의한 인성의 향상을 통하여 배면박리를 억제할 수 있었다.