

굵은골재 종류 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬특성

Spalling Properties of High Performance Concrete Designed with the Various Types of Coarse Aggregate

허영선* 박용규* 김호림** 지석원*** 양성환**** 한천구*****
 Heo, Young-Sun Park, Yong-Kyu Jin, Hu-Lin Jee, Suk-Won Yang, Seong-Hwan Han, Cheon-Goo

Abstract

This study investigates spalling properties of high performance concrete, 60MPa class, made with the various types of coarse aggregate and adding ratio of polypropylene(PP) fiber. As experimental parameters, totally sixteen specimens of $\phi 100 \times 200$ mm in size are prepared: one specimen for control without fiber, ten specimens with different coarse aggregate types, along with 0.05, 0.1, 0.15 percent of PP fiber in each. 1 hour fire test is conducted and then spalling appearance, spalling degree and residual compressive strength are examined. In addition, six specimens made with two types of coarse aggregate size, along with same adding ratio of fiber are supplementally done, and only spalling properties is examined. Test results showed that control concrete and most specimens containing 0.05% of PP fiber exhibited 4 to 3 level of spalling degree, resulting severe explosive spalling, except for the specimen using basalt aggregate(Bc) showing 2 to 3 level of that. Especially, the Bc specimen containing 0.1% of the fiber exhibited that residual compressive strength value was 32%, which is 10% higher than other specimens using limestone or granite. Spalling resistance performance was also effective as aggregate size increase.

키워드 : 고성능 콘크리트, 골재 종류, 골재 사이즈, 폭렬방지, 폭렬등급

Keywords : High Performance Concrete, Aggregate types, Aggregate size, Spalling Resistance, Spalling degree

1. 서론

최근 도심지 건축구조물은 다양한 목적과 기능을 만족시키기 위해 초고층화를 꾀하면서, 콘크리트의 경우도 고성능화가 꾸준히 진행되어 왔다. 이러한 고성능 콘크리트는 우수한 강도 발휘 뿐만 아니라, 현장 시공성 및 구조물의 내구성을 향상시키고, 부재의 단면 축소에 따른 건축 구조물의 자중경감 및 내부 유효공간을 확보하는 등 여러 방면에서 뛰어난 성능을 발휘한다.

그러나 고강도 콘크리트는 일반 콘크리트와 달리 조적이 치밀하여 화재시 구조물의 부재 표면이 심한 폭음과 함께 박리 및 탈락하는 폭렬현상이 발생한다. 이러한 폭렬현상은 낮은 물결합재비와 높은 함수율, 급격한 고온에서 더욱 심하게 발생하는 것으로 알려져 있는데¹⁾, 이외에도 골재종류, 굵은골재 최대치수, 공기량, 부재사이즈, 성형방법, 시멘트 분말도, 혼화재 종류 및 유기섬유 혼입률 등에 따라라도 다양한 특성을 나타내는 것으로 보고 되고 있다^{2),3)}.

그러므로 본 연구를 포함한 일련의 연구에서는 60MPa급 고성능 콘크리트를 대상으로 다양한 영향요인 변수에 따라 내화

시험을 실시하였는데, 본고에서는 골재종류 변화를 PP섬유 혼입률과 연관하여 콘크리트의 공학적 특성을 분석하고, 1시간 비가력 내화시험을 실시한 후 폭렬특성을 검토하여, 폭렬발생의 영향인자에 대하여 분석하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다.

즉, 물결합재비(W/B)는 설계기준강도 60MPa급 고강도 범위를 고려하여 시멘트에 대한 질량비로 플라이애시 20%와 실리카폼 10%를 동시에 치환한 25% 1수준으로 계획하였고, 시험체는 $\phi 100 \times 200$ mm의 원주형 공시체 조건으로 화강암 굵은골재에 PP섬유를 혼입하지 않은 플레인 1수준과 굵은골재 종류변화에 따라 석회암(Lc), 현무암(Bc) 및 화강암(Gc) 등 3수준에 대하여 PP 섬유를 각각 0.05, 0.1 및 0.15vol% 혼입하여 총 10배치를 제작하였다. 또한, 추가실험에서는 굵은골재의 사이즈 변화에 따른 폭렬특성 분석을 목적으로 화강암 굵은골재를 사용한 굵지않은 콘크리트를 5mm와 10mm로 체가름 하는 2수준에 대하여 PP섬유를 기타 시험체와 동일수준으로 변화시켜 총 6배치를 추가 실시하는 것으로 실험계획 하였다.

플레인 콘크리트의 목표 슬럼프플로우는 고유동 콘크리트

* 청주대학교 학위과정, 정회원
 ** (주)한성종합기술단건축사사무소 연구원, 정회원
 *** 두산산업개발(주) 기술연구소 팀장, 정회원
 **** 인천전문대학교 건축과 교수, 공학박사, 정회원
 ***** 청주대학교 건축공학부 교수, 공학박사, 정회원

범위인 700±100mm, 목표공기량은 3.0±0.5%를 만족하도록 배합설계 하였으며, 나머지 실험변수에 대하여는 여기서 결정된 배합인자를 동일하게 적용하였다. 이때, 굳지않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 실험사항은 표 1과 같고, 콘크리트의 배합사항은 표 2와 같다.

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/B(%)	1	25
	목표 플로우(mm)	1	700±100
	목표 공기량(%)	1	3.0±0.5
	혼화재 치환(%)	1	FA ¹⁾ 20% + SF ¹⁾ 10%
	골재종류 변화	3	석회암(Lc) 현무암(Bc) 화강암(Gc, 최대치수 20, 10, 5)
PP섬유 혼입률(%)	4	0 ¹⁾ , 0.05, 0.10, 0.15	
측정항목	굳지않은 콘크리트 ²⁾		<ul style="list-style-type: none"> 슬럼프플로우 공기량
	경화 콘크리트	<ul style="list-style-type: none"> 강도 내화 시험 	<ul style="list-style-type: none"> 압축강도 폭렬성상 폭렬등급 잔존압축강도, 잔존압축강도율

1) 플레인으로 화강암 골재에 대해서만 실시

표 2. 콘크리트의 배합표

W/B (%)	단위수량 (kg/m ³)	S/a (%)	AE제 (%)	SP제 (%)	질량배합 (kg/m ³)				
					C	FA	SF	S	G
25	160	45	0.04	1.3	448	128	64	660	810

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료는 실리카폼을 제외하고 모두 국내산이었다. 즉, 시멘트는 보통 포틀랜드시멘트(밀도: 3.15g/cm³, 분말도:3,302cm²/g)를 사용하였고, 골재로 잔골재는 5mm체를 100% 통과한 P사의 부순모래와 강모래를 적정 비율로 혼합한 조립를 2.81의 혼합사(밀도:2.60g/cm³)를 사용하였으며, 굵은골재는 석회암의 경우 A사의 부순굵은골재(밀도:2.67g/cm³, 조립률:7.06)를 사용하였고, 현무암은 북제주지역에서 산출되는 D사산(밀도:2.67g/cm³, 조립률:7.18)을 사용하였으며, 화강암은 P사산(밀도: 2.61g/cm³, 조립률:6.56)을 각각 이용하였다. 혼화재료로 플라이애시(밀도:2.21g/cm³, 분말도:4,061cm²/g)는 H사, 실리카폼(밀도:2.20g/cm³, 분말도:200,000cm²/g)은 국내 G사의 보급품을 사용하였고, 고성능감수제는 B사의 폴리칼본산제, AE제는 N사산을 이용하였으며, PP섬유(직경:0.04, 길이:19 mm)는 S사 제품을 사용하였다.

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합하였고, 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프플로우는 KS F 2594, 공기량은 KS F 2421의 규정에 의거 실시하였다.

경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 Ø100×200mm 공시체를 제작하여, 계획된 계령에서 KS F 2405 규정에 의거 실시

하였고, 내화시험은 시험체를 보-바닥가열로의 바닥에 설치한 후 KS F 2257-1에서 규정한 표준가열곡선에 의거하여 1시간 비가력 조건으로 실시하였다. 또한, 내화시험 후 공시체의 폭렬여부는 육안으로 관찰하였고, 폭렬등급은 폭렬발생 정도에 따라 질량감소율을 기준으로 비폭렬-1/4 폭렬-1등급, 1/4-2/4 폭렬-2등급, 2/4-3/4 폭렬-3등급, 3/4-4/4 폭렬-4등급 등 총 4개의 등급으로 분류하여 조사하였으며, 잔존압축강도는 폭렬등급 2등급 이하인 시험체에 대하여 가열전의 시험체와 비교하여 평가하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지않은 콘크리트의 특성

그림 1은 골재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우를 나타낸 것이다.

먼저, 플레인 콘크리트는 목표한 슬럼프플로우를 만족하였고, 섬유 혼입률이 증가할수록 유동성은 감소하는 경향으로 나타났다. 골재 종류별로는 현무암 골재를 사용한 Bc 시험체의 경우 화강암(Gc)보다 양호하거나 유사한 경향으로 감소하였으나, 석회암 골재를 사용한 Lc 시험체는 섬유 혼입률이 증가함에도 불구하고 유동성 저하 경향은 크지 않은 것을 확인할 수 있었다.

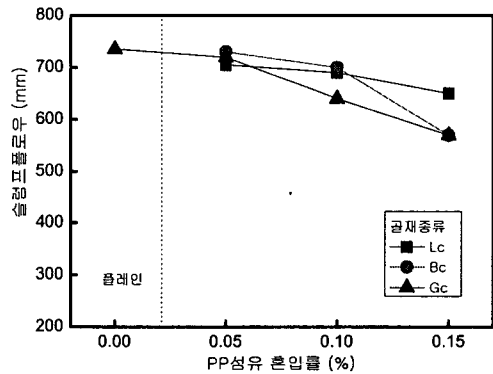


그림 1. PP섬유 혼입률 변화에 따른 슬럼프플로우

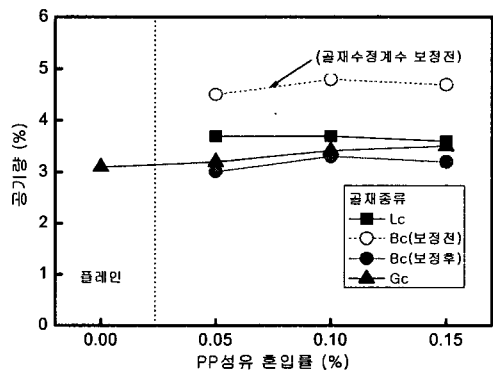


그림 2. PP섬유 혼입률 변화에 따른 공기량

그림 2는 골재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 공기량을 나타낸 것이다.

플레인은 목표 공기량을 만족하였고, 섬유 혼입률이 증가할수록 대부분 시험체의 공기량은 증가하는 경향을 나타내었는데, Lc의 경우는 다소 감소하는 것으로 나타났다. 이는 공기량이 적은 콘크리트의 유동특성과 관련이 깊은 것으로, 섬유 혼입률 증가에 따라 발생하는 급격한 유동성 저하는 일반적으로 콘크리트의 공기량을 증가시키는데, 콘크리트의 재료적 특성에 기인하여 섬유의 혼입률이 증가함에도 불구하고 유동성 저하가 크지 않은 경우에는 Lc 시험체에서 나타난 시험결과와 같이 섬유 자체의 영향에 기인하여 공기량이 오히려 줄어드는 것으로 분석된다. 또한, Bc의 경우는 골재 자체가 다공질로서 골재 수정계수를 보정하기 전에는 1.5% 정도 공기량이 많은 것으로 나타나나, 수정계수를 고려하면 유사한 값으로 압중별 차이는 크지 않은 것으로 분석된다.

3.2 경화 콘크리트의 특성

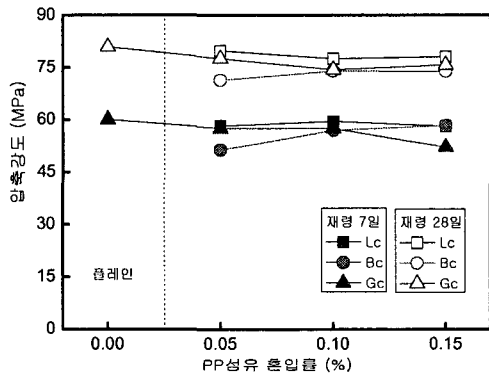


그림 3. 재령별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 압축강도

3.2.1 강도 특성

그림 2는 골재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 재령별

압축강도를 나타낸 것이다.

재령 28일의 화강암 골재를 사용한 플레인 콘크리트의 압축강도는 80MPa 이상의 고강도 범위를 나타내었으나, 섬유 혼입률이 증가할수록 감소하는 경향이나 큰 차이를 보이지 않았다. 골재 종류별로는 역시 큰 차이를 나타내지 않았으나, Bc 시험체가 다소 작은 강도범위를 나타냈는데, 이는 골재의 특성상 내부에 존재하는 공극의 영향으로 분석된다. 단, Lc 시험체는 섬유 혼입률변화에 따라 약 2~9MPa 정도 높은 것으로 나타났다.

3.2.2 폭렬 특성

사진 1은 1시간 비가력 내화시험 후 골재 종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 폭렬성상을 폭렬등급과 함께 나타낸 것이다.

먼저 플레인 콘크리트는 선행연구^{5)~7)}에서와 같이 심한 파괴폭렬이 발생하였고, PP섬유 혼입률이 증가할수록 모든 시험체에서 폭렬현상이 방지되었으며, 폭렬등급 또한 감소하는 것으로 나타났다. 사진 1-(a)의 골재 종류별로는 PP섬유 0.05% 혼입한 시험체의 경우 대부분 폭렬이 발생하였으나, Bc 시험체에서는 약간의 우수한 폭렬방지 성상을 확인할 수 있었고, 섬유 혼입률 0.1%이상에서는 골재 종류에 관계없이 모두 폭렬이 방지되는 것으로 나타났다. 또한, 사진1-(b)에서 골재의 사이즈 변화에 따라서는 뚜렷한 폭렬특성 차이를 확인할 수 있었는데, 먼저 5mm 이하의 골재만을 사용한 시험체는 섬유 혼입률과 관계없이 모두 폭렬등급 3~4등급으로 극심한 파괴폭렬이 발생하였고, 골재 사이즈가 10mm 및 20mm로 증가할수록 PP섬유 혼입률 증가와 함께 양호한 폭렬방지 특성을 나타내었다.

그림 4는 내화시험 후 골재종류별 PP섬유 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도 및 잔존압축강도율을 나타낸 것이다.

골재종류에 관계없이 PP섬유 0.05%를 혼입한 모든 시험체는 파괴폭렬에 기인하여 잔존압축강도의 측정이 불가능하였다. 그러나 PP섬유 0.1%를 혼입한 Gc 시험체는 잔존압축강도 16MPa, 잔존압축강도율 21%를 나타냈고, Lc의 경우는 14MPa,

Fiber Content (%)	(a) 골재종류			(b) 화강암 골재 사이즈 변화	
	석회암(20mm)	현무암(20mm)	화강암(20mm)	10mm	5mm
플레인					
PP 0.05					
PP 0.10					
PP 0.15					

사진 1. 골재 종류 및 골재 사이즈 변화에 따른 시험체의 폭렬성상 및 폭렬등급

20%를 나타냈으며, Bc는 20MPa, 32%를 기록하여 현무암 골재를 사용한 Bc 시험체가 가장 우수한 성능을 발휘하였다.

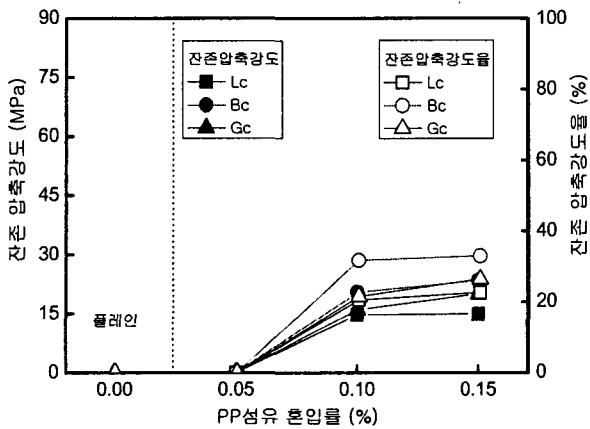


그림 4. PP섬유 혼입률 변화에 따른 잔존압축강도 및 찰과율

4. 결 론

본 연구에서는 60MPa급 고강도 콘크리트의 폭렬발생 영향 요인 중 굵은골재 종류변화를 PP섬유 혼입률과 연관하여 콘크리트의 공학적 특성과 폭렬성상에 대하여 검토하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 굳지않은 콘크리트의 특성으로, 섬유 혼입률이 증가할수록 유동성은 감소하였고, 공기량은 증가하는 경향을 나타내었는데, 단 Lc 시험체의 경우는 섬유 혼입률에 따른 플로우 감소율이 가장 작았고, 공기량 또한 역으로 약간 감소하는 경향이였다.
- 2) 경화 콘크리트의 특성으로, 채령 28일 플레인의 압축강도는 80MPa 정도의 고강도로 나타났고, 골재 종류별로는 Lc 시험체가 가장 우수한 강도특성을 발휘하였는데, 여타 시험체와 비교하여 섬유 혼입률 변화에 따라 2~9MPa 정도 높은 것으로 나타났다.
- 3) 내화시험 후 폭렬특성으로 플레인 및 PP섬유 0.05%를 혼입한 모든 시험체는 파괴폭렬이 발생하였는데, 골재 종류별로는 현무암을 사용한 Bc 시험체의 폭렬성상이 비교적 양호한 것을 확인할 수 있었다. 단, PP섬유를 0.1%혼입한 경우는 모두 폭렬이 방지되었는데, Bc 시험체의 잔존압축강도율은 32%로 기타 화강암(21%) 및 석회암(20%)을 사용한 시험체보다 우수한 특성을 나타내었다. 한편, 추가 실시한 골재사이즈 변화에 따라서는 사이즈가 작아질수록 더욱 극심한 파괴폭렬이 발생하였는데, 골재의 사이즈가 클수록 폭렬방지 성능이 우수한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 '콘크리트 코리아 연구단'에서 주관하여 시행한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업 「05-CCT-D11, 고성능·다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술」 지원으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

1. 한천구; 비폭열성 콘크리트, 콘크리트 학회지, 제 10권 6호, pp.5~10, 1998. 12
2. 이병열; 화재시 고성능 콘크리트의 폭렬방지에 관한 연구, 청주대학교 석사학위논문, 2001. 12
3. 황인성; 화재시 고성능 콘크리트의 폭렬에 미치는 재료 및 배합요인의 영향, 청주대학교 석사학위논문, 1999. 12
4. 한천구, 양성환, 이병열, 황인성; 골재종류 및 폴리프로필렌 섬유 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 폭렬 특성에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집, 제 11권 5호, pp.69~78, 1999. 10
5. 한천구, 채민수, 이병열, 양성환; 폴리프로필렌 섬유의 혼입률 변화에 따른 고성능 시멘트 모르타르의 폭렬방지에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 15권 12호, pp.89~96, 1999. 12
6. Cheon-Goo Han, Yin-Seong Hwang, Seong-Hwan Yang, N. Gowripalan; Performance of spalling resistance of high performance concrete with polypropylene fiber contents and lateral confinement, Cement and Concrete Research 35, pp.1747~1753, 2005
7. Pierre Kalifa, Gregoire Chene, Christophe Galle; High- temperature behaviour of HPC with polypropylene fibres from spalling to microstructure, Cement and Concrete Research 31, pp. 1487-1499, 2001