폴리프로필렌 섬유보강 화강토 콘크리트의 역학적 특성

Mechanical Properties of Granite Soil Concrete with Polypropylene Fiber

남기성* · 전형순**†

Nam, Ki Sung · Jun, Hyung Soon

ABSTRACT

This study will not only prove experimental dynamic properties which are classified to slump, compressive strength, tensile strength, flexure strength and toughness granite soil concrete with a fine aggregate of granite soil and blast-furnace cement and polypropylene fiber over 45 mm, but also establish a basic data in order to use environment-friendly pavement through prove useful pavement mixed with granite and polypropylene (PP) fiber which is a kind of material to prevent a dry shrinkage crack, a partial destruction and useful and light. The value of slump test was gradually increased by PP fiber volume 3 kgf/m^3 , but compressive strength took a sudden turn for the worse from 5 kgf/m^3 . The compressive strength indicated a range of 13.72~18.35 MPa. On the contrary to compressive strength, the tensile strength showed to decrease with rising PP fiber volume, and the tensile strength indicated a range of 1.43~1.64 MPa. The tensile strength was stronger about 2~15 % in case of mixing with PP fiber volume than normal concrete. The flexural strength indicated a range of 2.76~3.41 MPa. The flexural strength was stronger about 20 % in case of PP fiber volume 0 kg/m^3 than PP fiber volume 9 kg/m^3 . The toughness indicated a range of 0~25.46 N·mm and increased proportionally with PP fiber volume. The toughness was stronger about 8.3 times in case of PP fiber volume 9 kg/m^3 than PP fiber volume 1 kg/m^3 . The pavement with PP fiber volume over such a fixed quantity in the park roads and walkways can have a effect to prevent not only resistance against crack but also rip off failures.

Keywords: Slump; compressive strengths; tensile strength; flexure strength; polypropylene fiber; toughness

1. 서 론

급속한 사회, 경제, 문화의 발전으로 인구의 대도시화, 도시집중화, 국토의 무분별한 개발로 인하여 환경오염이 발생하여 환경보존 및 친환경적인 접근에 대한 관심이 점차 높아지고 있다. 친환경적인 재료로서 가장 대표적으로 흙과 목재를 이용한 많은 연구가 이루어지고 있는 실정이다. 특히, 흙은 재활용이라는 친환경기술조건을 충족시킬 수 있는 활용가치가 우수한 재료로 자연생태공원, 산책로, 자전거도로 및 농로 등에 포장재로 많이 사용되고 있다. 도로포장은 지중에 대한 물의 침투를 막고 노상의 지지력을 저하시키지 않는 것이 내구성을 높이는 최선의 방법으로 아스팔트포장 및 콘크리트포장을 사용하고 있다. 그러나 포장

체의 지중에는 미생물 등이 서식하지 못하고 토양이 사막화되는 등 여러 문제점을 안고 있다. 이러한 환경적인 문제점을 보완하기 위하여 친환경적인 도로포장에 흙의 일종인 화강토를 이용하는 것이다. 흙에 대한 연구 및 현장에서 적용한 예는 흙의 일종인 화강토를 포설하여 다짐 후 사용, 강도보강용으로 석회를 혼합하여 왔으며 화강토 또는 황토에 시멘트나 고화재를 혼입한 Soil-콘크리트는 1990년대부터 포장용으로 사용하기 시작했다. 그러나 흙은 취성재료로 휨강도, 전단강도 및 인장강도가 압축강도에 비해 현저히 약하고, 균열성장에 대한 저항성이 낮으며 취성파괴를 일으키며, 시공 후 시간이 지나면 균열 및 부분적인 파괴가 진행되는 단점을 지니고 있다. 이를 개선하기 위해서 농촌도로인 경작로의 자연친화적인 포장에 흙, 고화재, 천연골재, 폴리프로필렌 (Polypropylene, 이하 PP로 표기) 섬유 등을 혼입한 포장재 개발에 대한 연구가 있었고 (Seo et al., 2000; Sung et al., 2001), 흙의 결합력과 강도를 증진시키기 위하여 흙에 시멘트 또는 시멘트계 고화재 등을 혼입한 시멘트 혼합토를 자전거 전용도로, 주차장 및 광장 등의 포장뿐만 아니라 사면보호공 및 연약지반 개량 등 다양한 분야에 활용하기 위한 연구가 있었다 (Kim et al., 2003; Kim et al., 2004; Sabry and Baghdad,

* 충남대학교 대학원 지역환경토목학과 박사수로

** (주)삼안

† Corresponding author Tel.: +82-61-723-1065

Fax: +82-61-723-6263

E-mail: blackpvc@prumail.co.kr

2012년 10월 5일 투고

2012년 11월 23일 심사완료

2012년 11월 28일 게재확정

2001; Song et al., 2008; Venkataramaet al., 2007). 재료별 연구특성의 동향에 있어서는 CSG (Cemented Sand and Gravel) 재료에 PP 섬유를 혼입하여 형상 및 혼입율에 따른 CSG재료의 다짐 및 압축강도의 특성 연구가 있었다 (Kim et al., 2010).

환경 분야에서 포장관련 연구는 골프장 카트도로에서 콘크리트와 아스팔트포장재의 장단점 비교분석 (Kim et al., 2009)과 숲길은 콘크리트 포장에 아닌 흙길이 식물과 인간에게 좋은 영향 (Kim, 2009)을 주는 연구가 있었으나 포장 재료에 대한 역학적 특성을 고려치 않고 있는 실정이다.

또한 현장에서는 시공성 난이, 공사비 증가에도 불구하고 와이어 매쉬를 보강재로 사용하고 있어 비용절감을 위한 섬유보강재 사용은 거의 없는 실정이다 (Won et al., 2002). 경제성 검토는 전문가격조사지인 종합물가정보 (2012년 3월)에서 현장 도착도가격으로 와이어 매쉬 (100×100 #6) 4,240 m²/원, PP 섬유 1,600 kg/원이나 PP 섬유를 5 kg/m³ 혼입 할 경우 약 75 % 저렴하며 인건비에서 와이어 매쉬는 설치비가 필요하지만 PP 섬유는 설치비가 필요 없어 상당히 저렴하다. 콘크리트섬유보강재를 사용한 연구는 콘크리트에 PP 섬유의 길이가 45 mm 미만을 혼입한 경우가 대부분이며 다양한 연구 실정은 거의 없는 실정이다. 화강토를 이용한 포장재의 압축강도의 명확한 규정은 마련 되어 있지 않은 것으로 판단되며 생산하는 제품마다의 차이는 있으나 포장사용 용도에 따라 압축강도를 기준하여 15~21 MPa로 적용하여서 (www.soilcon.co.kr), 본 연구에서는 산책로 포장의 압축강도 설계목표를 18 MPa로 설정하였다.

따라서 본 연구는 잔골재를 화강토로, 시멘트를 고로시멘트로 사용한 화강토콘크리트에 PP 섬유 길이가 45 mm 이상을 혼입하여 각 배합별 슬럼프, 압축강도, 인장강도, 휨강도 및 인성지수 등의 역학적 특성을 실험적으로 구명하여 가볍고 이용하기 편하며, 건조수축균열 및 부분적인 파괴를 예방하는 품질이 우수한 포장재로 검증 및 친환경적인 포장을 사용하기 위한 기초자료를 수립하는데 그 목적이 있다.

II. 사용재료 및 실험방법

1. 사용재료

가. 화강토

화강풍화토는 순천시 해룡면 지방에서 채취한 화강토를 9.5 mm 체로 체가름 하여 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 1

과 같다. 조립률은 각 표준체의 가적 잔유율을 이용하여 계산하였는데, 조립률이 3.14이다. Fig. 1은 화강토의 입도분포도이다.

나. 굵은 골재

굵은 골재는 순천시 서면 지방에서 생산된 쇄석 자갈을 사용하였으며, 그 물리적 성질은 Table 2와 같다. 굵은 골재의 조립률은 각 표준체의 가적 잔유율을 이용하여 계산하였는데, 조립률이 6.88로써 조골재 조립률 6~8 사이에 있으므로 콘크리트 배합에 사용하는데 적합하였다. Fig. 2는 굵은 골재의 입도분포도이다.

다. 시멘트

본 연구에 사용된 시멘트는 국내 H사에서 생산된 고로슬래그

Fig. 1 Gradation curve of granite soil

Fig. 2 Gradation curve of coarse aggregate

Table 1 Physical properties of Granite soil

Specific gravity	Gravel maximum size (mm)	Sieve analysis ratio (%)							Fineness modulus
		10 mm	5 mm	2.5 mm	1.2 mm	0.6 mm	0.3 mm	0.15 mm	
2.93	10	100	99.9	81.8	55.0	34.0	12.0	3.6	3.14

Table 2 Physical properties of coarse aggregate

Specific gravity	Gravel maximum size (mm)	Sieve analysis ratio (%)							Fineness modulus
		40 mm	25 mm	20 mm	13 mm	10 mm	5 mm	2.5 mm	
2.65	40	100	98.2	86.3	55.5	25.1	0.7	0.2	6.88

Table 3 Chemical composition and physical properties of blast furnace cement (Unit : %)

CaO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	MgO (%)	SO ₃ (%)	Loss on ignition (%)	Specific gravity	Fineness (cm ² /g)
41.42	34.95	17.29	0.69	3.27	0.03	0.01	2.90	4,900

Table 4 Physical properties of polypropylene fiber

Density (kg/m ³)	Length (mm)	Modulus of elasticity (kN/mm ²)	Melt point (°C)	Tensile strength
0.91	45	5.83	160~165	330 N/mm ²

시멘트를 사용하였으며, 그 화학적 성분 및 물리적 성질은 Table 3과 같다.

라. Polypropylene fiber

콘크리트의 균열방지 및 휨강도 증진을 위해 국내 R회사 제품의 막대형 PP 섬유를 사용하였으며, 섬유의 물리적 특성은 Table 4와 같다.

2. 섬유보강 화강토 콘크리트 배합

폴리프로필렌섬유를 보강한 화강토 콘크리트의 배합은 다짐과 편의성을 위해 화강토와 굵은 골재는 표면건조 포화상태로 하여 사용하였으며, 적절한 강도, 내구성 및 경제성이 있도록 화강토, 굵은 골재 및 시멘트는 고정량으로 한 후 PP 섬유의 양을 변화시켜 배합설계를 하였으며, 화강토, 굵은 골재 및 시멘트 막대형 PP 섬유를 혼입 하였다. 그 다음 물을 고정량을 첨가하여 잘 혼합하였으며, 화강토를 혼입한 콘크리트의 역학적 특성을 알아보기 위한 배합설계는 Table 5와 같다.

Table 5 Mix design of granite soil concrete reinforced polypropylene fiber (Unit : kg/m³)

Mix type	Gravel maximum size (mm)	Water-Cement ratio W/C (%)	Sand percentage S/a (%)	Unit (kg/m ³)				
				Water W	Cement C	Granite GS	Gravel G	Fiber (%)
GP 1	40	50	41	175	350	771	1093	0.00
GP 2								0.09
GP 3								0.27
GP 4								0.45
GP 5								0.64
GP 6								0.82

* GP : Granite soil concrete mixed with polypropylene fiber

3. 시험방법

시험은 KS에 규정된 방법에 따라 실시하였으며, 3회 반복 시험한 것의 평균값을 실험 결과 치로 하였다.

가. 슬럼프시험은 KS F 2402에 준하여, 각 배합의 W/C비를 동일하게 한 후 윗면 ϕ 100 mm, 밑면 ϕ 200 mm, 높이 300 mm의 원뿔형 강재몰드를 이용하여 시험을 수행하였다. 다짐봉은 지름 16 mm, 길이 500 mm인 강봉을 사용하였다. 몰드 속에 용적으로 3회로 나누어 넣고 다짐봉으로 각각 25회씩 균일하게 다진 다음 몰드를 천천히 수직으로 들어올린다. 이 때 300 mm 높이의 콘크리트가 가라앉은 값을 구하였다.

나. 압축강도시험의 시험편제작에는 ϕ 10 cm×20 cm의 원형 강재몰드가 사용하였으며, 콘크리트의 품질을 알아보기 위해 재령28일 수중양생한 공시체를 시험하기 직전에 물에서 꺼내어 KS F 2405에 준해 U.T.M (100 ton)을 이용하여 시험을 수행하였다. 하중은 가압면의 중심과 공시체의 중심이 일치되도록 하여 응력의 증가분이 매 초 0.15~0.34 MPa 정도가 되게 일정한 속도로 공시체가 파괴점에 이를 때까지 하중을 가압하였다. 공시체의 단면적은 길이 쪽으로 3등분 하여 정밀도 0.25 mm까지 측정 한 지름을 평균하여 산출하였다.

다. 인장강도시험의 시험편 제작은 압축강도시험과 동일한 원형 강재몰드로 사용하였으며, 재령28일 수중양생 후 KS F 2423에 준해 U.T.M (100 ton)을 이용하여 시험을 수행하였다. 하중은 가압면의 중심과 공시체의 중심이 일치되도록 하여 편심이 생기지 않도록 응력의 증가분이 매 분 0.49~0.98 MPa 정도가 되게 일정한 속도로 공시체가 파괴점에 이를 때까지 하중을 가압하였다. 공시체의 지름은 양단부 근처와 중앙부 3곳의 지름을

정밀도 0.2 mm까지 측정하고, 공시체의 길이는 2개소 이상을 정밀도 2 mm까지 측정하여 평균하여 산출하였다.

라. 휨강도시험의 시험편 제작에는 15 cm×15 cm×55 cm의 강재 몰드가 사용되었다.

콘크리트의 휨강도 특성을 파악하기 위해 재령 28일 수중양생한 공시체를 실험 직전에 물에서 꺼내어 KS F 2408에 준하여 단순보 중앙집중하중법으로 수행하였다.

파괴실험시 하중은 시간의 중앙에 작용하게 하고 재하면과는 수직으로 가압하였으며, 응력의 증가분이 매 분 0.06 ± 0.04 MPa/초를 초과하지 않고 충격과 편심이 생기지 않게 일정한 속도로 파괴될 때까지 하중을 가하였다. 또 보의 양쪽 끝단부 파괴를 방지하기 위하여 시간을 40 cm로 하였다.

마. 콘크리트 인성시험은 휨강도 시험용 몰드를 이용하여 만든 55 cm×15 cm×15 cm의 공시체를 이용하였다. 사용시험 기기는 U.T.M (100 ton)과 로드셀 및 LVDT를 이용하였으며 휨강도 시험과 같은 방법으로 공시체 중앙 점의 처짐을 구하고 이를 이용해 하중-변위를 작성하여 인성지수를 비교 평가해 보았다.

III. 결과 및 고찰

1. 슬럼프

PP 섬유 혼입이 화강토 콘크리트의 워커빌리티에 미치는 영향을 알아보기 위해 Table 6을 보는 것과 같이 섬유 혼입량에 따른 슬럼프는 0.5~2.9 cm의 범위로 나타났다. 섬유의 혼입량이 증가하면 슬럼프 값의 변화가 큰 것으로 확인 되었다. 이 결과는 섬유의 체적비가 증가할수록 콘크리트의 슬럼프는 감소한다 (Yang and O, 2008)는 연구 결과와 같았다. 화강토가 수분을 흡수하여 슬럼프가 저하된 이유도 있지만, PP섬유량이 증가할수록 공시체에 차지하는 PP섬유의 체적이 모르타르에 비해 현저히 증가됨으로서 슬럼프가 감소한 것으로 판단된다. 일반적으로 섬유보강 콘크리트의 슬럼프는 골재의 크기, 섬유모양 및 섬

유투입방법에 의해서도 영향을 받지만 섬유 형상비와 체적 비에 의해 중요한 영향을 받는다 (Hannant, 1978).

2. 압축강도

PP 섬유 혼입량과 압축강도와와의 관계를 분석해 보았는데, 과다한 PP 섬유의 혼입은 오히려 압축강도를 저해하는 것으로 판단되었다. 섬유의 혼입에 의한 보강 효과는 마찰각 증가 및 점착력 증가에 의한 보강토체 내의 수평응력 감소 또는 수평방향으로 랜덤 분포된 섬유에 작용하는 인장력이 전달됨으로서 구속응력의 증가에 기인하는 것으로 알려져 있다 (Park et al., 2008). 압축강도 결과는 Table 6과 Fig. 3을 보는 바와 같이 섬유 혼입량에 따른 압축강도는 13.72~18.35 MPa의 범위로 나타났다. PP섬유의 혼입량이 0~5 kg/m³까지는 (주)소일콘에서 포장별 적용하는 압축강도 15~21 MPa의 범위에 포함되는 것으로 나타났다. PP섬유의 혼입량이 0 kg/m³과 3 kg/m³는 설계목표 강도에 적합한 것으로 나타났다. 이는 포장의 두께에 따라 산책로, 보도용에서 소형차 교통로까지 적용되는 압축강도이다. PP섬유의 혼입량이 3 kg/m³까지는 압축강도가 감소하는 경향이 없으나, PP섬유의 혼입량이 5 kg/m³부터는 감소하는 것을 알 수 있었다. ACI 위원회에서는 섬유의 일정량의 혼입은 압축강도에 극히 적은 영향을 미칠 뿐이며 강도가 조금 증가하거나 오히려 감소한다 (ACI, 1988)는 기존의 발표와 본 연구 결과도 공통되는 부분이 있다. 이는 PP 섬유 혼입량 3 kg/m³까지는 PP섬유와 콘크리트 간의 접착성이 유지되어 파괴에 대한 저항이 있으나, PP섬유의 혼입량이 5 kg/m³부터는 섬유가 차지하는 체적의 증가로 인한 콘크리트와 섬유간의 접착력 결여로 인해 강도가 저하되는 것으로 판단된다. 섬유 혼입량의 증가에 따라 최대하중 도달 이후 시편의 일부가 분리되어 떨어지는 현상이 현저히 감소하였다. PP 섬유 혼입량 9 kg/m³일 경우 PP 섬유 혼입량 3 kg/m³ 보다 압축강도가 26 % 정도 감소하는 것을 알 수 있었다. Kim et al. (2010)은 단사형 섬유를 혼입한 CSG 재료

Table 6 Test results of polypropylene fiber reinforced granite soil concrete

Mix type	Slump (cm)	compressive strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Flexural strength (MPa)	Toughness index (N·mm)
GP 1	2.9	18.06	1.43	2.76	0
GP 2	2.8	16.62	1.46	2.90	3.07
GP 3	2.0	18.35	1.50	2.93	3.79
GP 4	1.0	15.18	1.56	2.98	10.09
GP 5	0.7	14.53	1.62	3.15	14.42
GP 6	0.5	13.72	1.64	3.41	25.46

Fig. 3 Comparison of compressive strength by type

는 재령에 관계없이 섬유 혼입율 0.6 % 이하에서는 섬유를 혼입하지 않은 배합에 비하여 압축강도가 증가하나 섬유 혼입율이 0.8 %에서는 섬유를 혼입하지 않은 배합의 압축강도와 거의 유사하거나 다소 감소한다고 발표하였다. 이러한 결과는 섬유 혼입량에 따른 부착강도의 감소와 미세공극의 증가로 인하여 강도가 감소한 것으로 판단되며, 섬유의 혼입이 압축강도 증가에 큰 영향을 미치지 못하였다는 기존의 연구와 유사한 결과로 생각된다 (Gopalaratnam et al., 1986). 또한 시멘트비가 2 %로 상대적으로 낮은 경우 섬유 보강에 의한 압축강도 증가 효과가 높게 나타났으며, 시멘트비가 8 %인 경우에는 구속 압이 0인 일축압축 상태에서 시멘트의 고결력이 상대적으로 강하기 때문에 섬유 보강에 의한 압축강도 효과가 감소한다는 연구 결과를 발표하였다 (Park et al., 2008).

3. 인장강도

PP 섬유 혼입량에 따른 인장강도에 미치는 영향은 Table 6과 Fig. 4를 보는 바와 같이 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도와는 반대로 증가하는 경향이 보였으며, 연구 결과에서 나타난 PP 섬유 혼입량에 따른 인장강도는 1.43~1.64 MPa의 범위로 나타났다.

섬유보강 콘크리트의 인장거동 특성은 섬유의 체적비, 형상비, 계면접착강도 및 분포도 등에 의해 영향을 받는다 (Beaudoin, 1990). 섬유의 혼입량에 따라 섬유를 혼입하지 않은 인장강도에 비하여 2~15 % 정도 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 섬유 혼입량이 과다한 경우에는 배합시 섬유의 뭉침 현상으로 분산성을 저하시키거나, 콘크리트의 강성저하와 같은 물리적 특성을 악화시킨다는 (Oh et al., 1996) 연구 결과와는 다르게 나타났다. 이는 PP섬유가 일정이상 콘크리트와 일체화되어 외력에 대한 저항성이 있어 PP섬유가 급격한 취성파괴를 감소시킨 것으로 판단된다. 또한 압축강도는 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 감소한 반면, 인장강도는 섬유의 혼입량이 증가할수록 증가하였

는데, 이러한 원인은 섬유가 콘크리트의 균열을 억제하여 인장강도가 증가하는 것이라 판단되며, 섬유의 혼입은 콘크리트의 압축강도 보다는 인장강도의 성능을 향상시켜 준다는 기존의 연구와 유사한 경향을 나타내었다 (Gopalaratnam et al., 1987).

4. 휨강도

PP 섬유 혼입이 휨 강도에 미치는 영향을 알아보았는데, Table 6과 Fig. 5에서 보는 바와 같이 휨강도의 시험결과는 2.76~3.41 MPa의 범위로 나타났다. 보도용 투수성 콘크리트 블록의 KS 휨강도 규정인 4.0 MPa에 못 미치나 숲 길, 공원 내 산책로 등 보도용으로 사용하여도 이용자가 만족할 것으로 판단된다. 섬유의 혼입율이 압축강도에 미치는 영향은 크나 휨강도에는 큰 영향을 미치지 않는다 (Lee and Song, 2006)는 연구 결과가 나왔으나, 본 연구에서 PP 섬유 혼입량 9 kg/m³는 PP 섬유 혼입량 0 kg/m³보다 휨강도가 약 20 % 정도 강한 것으로 나타났다. 섬유의 혼입량이 증가할수록 휨강도가 증가하였으며 균열이 발생하고 변위가 증가하여도 공시체가 파괴되지 않고 휨하중에 저항하고 있음을 알 수 있었다. 이는 압축강도 및 인장강도와 달리 휨하중의 변위 증가로 인한 균열 발생을 PP섬유가 억제하고 있어 휨강도가 증가한 것으로 판단되었다. Fig. 6의 사진은 공시체 파괴 후 파괴면에 따라 섬유가 분포된 것을 보여주는 것으로 휨하중에 따른 저항성을 보여주고 있다. Oh et al., (1996)은 섬유의 혼입과 동시에 파쇄가 방지되고 휨인성 지수가 증가한다. 그리고 섬유의 혼입량이 증가할수록, 섬유의 길이가 길수록 휨인성 지수가 증대되었는데 이는 섬유의 부착면적이 증가함에 따라 휨인성 측면에서 그 성능이 향상되었다고 하여 본 시험의 결과와 유사한 측면이 있다. 섬유를 혼입하지 않은 시험체의 경우, 최대하중에 도달한 후 급속한 파괴가 일어나는데 반하여, 섬유를 혼입한 시험체는 최대하중에 도달하고 균열이 상당히 생긴 후에도 섬유의 Bridging 작용으로 인해서 파괴가 급격히 일어나지 않고 서서히 파괴되는 경향을 나타내었다 (Mindness, 1987).

Fig. 4 Comparison of tensile strength by type

Fig. 5 Comparison of flexural strength by type

Fig. 6 Specimen failure in case of flexural strength test

섬유보강 콘크리트의 가장 큰 특징 중의 하나는 콘크리트의 취성적 성질을 개선시킨 것으로 균열 이후에도 거동에 영향을 주는 인성이 월등히 양호한 것으로 알려져 있다 (Mobasher et al., 1990).

5. 인성

인성은 섬유 보강 콘크리트에 초기 균열을 일으키는데 요구되는 에너지에 대하여 어느 일정 변형에 도달하기까지 요구되는 총 에너지의 비고 값으로 정의 된다. 인성은 재료의 에너지 흡수 능력에 관계되는 물리량으로 감각적으로는 하중·변위곡선의 적분 값으로 생각할 수 있으며, 인성의 증가는 피로, 충격하중에 대한 저항성의 증가를 의미한다. 또한 하중·변위곡선의 특징은 섬유의 혼입량이 증가함에 따라 최대 하중 도달시의 변형도가 커지며, 최대 하중 이후에도 일정한 하중 저항성을 띤다. 선행된 연구에서는 (Lawer and Zampini, 2000) 콘크리트가 휨하중을 받을 때 발생하는 균열과 응력-변형 상태와의 관계는 마이크로 균열이 발생하는 동안은 응력이 계속적으로 증가하다가 마이크로 균열이 형성되면서 응력은 감소하면서 변형이 증가하는 것을 보여 주었다. 섬유콘크리트를 사용하는 주된 이유는 콘크리트의 인장 저항성을 개선하고 균열저항성을 증가시키는 것이다. 연성 즉 인성을 확보한다는 것은 변형에너지를 크게 확보한다는 의미로 구조물의 취성적 파괴를 방지할 수 있음을 의미한다. 이때 인성이라는 것은 하중·변위 곡선의 면적으로 표현될 수 있고, 이 면적으로 인성이 정량화 될 수 있다 (ACI, 1986).

PP섬유 혼입량에 따른 콘크리트 인성을 분석한 결과는 Table 6과 Fig. 7과 같다. 인성은 GP 2가 파단시 나타난 변위 (8.1 mm)를 기준으로 하여 비교해 보았다. PP 섬유 혼입량에 따른 인성은 0~15.56 N·mm의 범위로 나타났으며 섬유 혼입량이 증가할수록 인성도 증가됨을 알 수 있다. PP 섬유 혼입량 7 kg/m³은 PP 섬유 혼입량 1 kg/m³보다 인성이 약 5배 정도 강한 것

Fig. 7 Comparison of toughness by type

Fig. 8 Toughness test apparatus

으로 나타났다. 이러한 결과는 Kim et al. (2007)의 섬유 보강토의 응력-변형 거동은 최대응력 도달까지 큰 변형을 나타내며, 최대응력 도달 후에는 변형의 진행에 따라 응력이 완만한 감소현상을 나타낸다는 연구와 비교할 때 응력에 따른 변형률이 유사한 경향을 알 수 있었다.

Fig. 7에서 보는 바와 같이 PP섬유가 혼입하지 않은 경우는 초기 하중-변위 곡선에서 완만한 형태를 나타낸 후 점차 선형 형태를 나타낸 반면에 섬유의 혼입량 5 kg/m³ 이내에서는 하중-변위 곡선의 초기부터 직선 형태의 급격한 기울기를 나타내는 것을 알 수 있다. 또한 PP섬유가 혼입하지 않은 경우 균열 발생과 동시에 시험편이 파괴되었고 하중 저항능력은 없는 것을 알 수 있었다. PP 섬유 혼입량 증가에 따른 하중 저항능력을 살펴보면 섬유 혼입량이 증가 할수록 하중 저항능력도 증가됨을 알 수 있었고, PP 섬유 혼입량이 없는 경우 균열과 동시에 파괴되는데 비해 섬유가 혼입된 콘크리트는 균열 발생 후에도 계속적으로 휨 하중에 저항한다는 것을 알 수 있었다. 섬유를 혼입하지

않은 경우에 비하여 섬유 혼합토의 응력-변형률 곡선이 우측에 위치하게 되는데, 이는 섬유 혼합으로 강도는 물론 최대응력에서 변형률도 크게 되어 인장에 대한 저항력이 증가한다는 연구가 있었다 (Song and Lim, 2002). 이러한 결과를 분석해 볼 때 일정량 이상의 PP 섬유를 혼입할 경우 균열저항 뿐만 아니라 콘크리트의 박리박락을 방지하는데 많은 효과가 있을 것이라 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 PP 섬유의 혼입량을 변화하여 화강토 콘크리트에 혼입하였을 경우 나타나는 역학적 특성을 비교하여 평가해 보았는데, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 슬럼프는 0.5~2.9 cm의 범위로 나타났다. PP섬유의 혼입량이 3 kg/m³까지는 슬럼프 값의 변화가 완만하나 5 kg/m³부터는 저하되는 것을 알 수 있었다. 이는 PP섬유량이 증가할수록 공시체에 차지하는 PP섬유의 체적이 모르타르에 비해 증가됨으로서 슬럼프가 감소한 것으로 판단된다.

2. 압축강도는 섬유 혼입량에 따라 13.72~18.35 MPa의 범위로 나타났다. PP 섬유 혼입량 3 kg/m³까지는 PP섬유와 콘크리트 간의 접착성이 유지되어 파괴에 대한 저항이 있으나, PP섬유의 혼입량이 5 kg/m³부터는 섬유가 차지하는 체적의 증가로 강도가 저하되는 것으로 판단된다.

3. 인장강도는 섬유의 혼입량이 증가할수록 압축강도와는 반대로 증가하는 경향이 보였으며, 인장강도는 1.43~1.64 MPa의 범위로 나타났다. 섬유의 혼입량에 따라 섬유를 혼입하지 않은 인장강도에 비하여 2~15 % 정도 증가하는 경향을 나타내었다.

4. 휨강도의 시험결과는 2.76~3.41 MPa의 범위로 나타났고, PP 섬유 혼입량 9 kg/m³는 PP 섬유 혼입량 0 kg/m³보다 휨강도가 약 20 % 정도 강한 것으로 나타났다. 이는 휨하중의 변위 증가로 인한 균열 발생을 PP섬유가 억제하고 있어 휨강도가 증가한 것으로 판단된다.

5. 인성은 0~15.56 N·mm의 범위로 나타났으며 섬유 혼입량이 증가할수록 인성도 증가됨을 알 수 있다. PP 섬유 혼입량 7 kg/m³는 PP 섬유 혼입량 1 kg/m³보다 인성이 약 5배 정도 강한 것으로 나타났다.

이러한 결과들을 분석해 볼 때 일정량 이상의 PP 섬유를 혼입하여 보행자들이 많이 이용하는 공원 내 포장이나 산책로 및 농·어촌의 경작로 등에서 시공 한다면 균열저항 뿐만 아니라 콘크리트의 박리박락을 방지하는데 많은 효과가 있을 것이라 판단된다.

REFERENCES

1. ACI Committee 544. 1986. State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete, *American Concrete Institute*.
2. ACI Committee 544. 1988. Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete, *American Concrete Institute*, Detroit, Michigan: 111.
3. ASTM C 1018. 1977. Standard test method for flexural toughness and first-crack strength of fiber-reinforced concrete (using beam with third-point loading).
4. Beaudoin, J. J., 1990. Handbook of Fiber Reinforced Concrete : Principles, Properties, Developments and Applications, Noyes Publications.
5. Gopalaratnam, V. S., and S. P. Shah. 1986. Properties of steel fiber reinforced mortars. *Journal of the Structural Engineering* 113(5): 635-652.
6. Gopalaratnam, V. S., and S. P. Shah. 1987. Tensile failure of steel fiber reinforced concrete subjected to impact loading. *Journal of the ACI* 83(1): 117-126.
7. Hannant, D. J., 1978. Fibre Cements and Fibre Concrete, John Wiley & Sons, UK.
8. Kim, B. L., S. H. Wee., S. H. Lee, and Y. U. Kim. 2003. Strength Characteristics of Soil-Cement Mixed with Inorganic Solidification Liquid. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 23(3): 135-141(in Korean).
9. Kim, D. C., S. W. Kim, and J. D. Ha. 2009. Research on benefit and disadvantages of concrete and asphalt for golf. *Journal of the Korean Institute of Landscape Architecture* 37(5): 78-89 (in Korean).
10. Kim, J. R., H. B. Kang., H. Y. Kang, and D.H. Kim. 2004. Unconfined Compressive Strength Characteristics and Time Dependent Behaviour of Soil-Cement. *Journal of Korea Institute for Structural Maintenance Inspection* 8(4): 87-96 (in Korean).
11. Kim, K. W. 2009. A theoretical study on planning and design of forest therapeutic trails. *J. Korean Soc, People Plants Environ* 12(4): 57-66 (in Korean).
12. Kim, N. K., J. S. Park, and Y. S. Joo, 2007. Soils Reinforced with Fibrillated Polypropylene Fiber. *KSCE Journal of Civil Engineering* 27(1C): 29-36 (in Korean).
13. Kim, Y. I., K. S. Yeon, and Y. S. Kim. 2010. The compaction and compressive strength properties of

- CSG material reinforced polypropylene fiber, *Journal of The Korean Society Agricultural Engineers* 52(4): 73-81 (in Korean).
14. Korean standards association. 2007. KS F 2402, Method of test for slump of concrete: 1-9.
15. Korean standards association. 2010. KS F 2405, Standard test method for compressive strength of concrete: 1-16.
16. Korean standards association. 2010. KS F 2408, Standard test method for flexural strength of concrete: 1-9.
17. Korean standards association. 2011. KS F 2423, Standard test method for splitting tensile strength of concrete: 1-12.
18. Lawer, J. S., Zampini D., and Shah S. P, 2000. Permeability of cracked hybrid fiber-reinforced under load, *ACI Materials Journal* 99(4): 379-385.
19. Lee, H. K., and S. Y. Song. 2006. Effect of Volume Fraction of Fibers on Mechanical Properties of a Lightweight Aggregate Concrete Reinforced with Polypropylene Fibers, *Journal of The Korea Concrete Institute* 18(6): 743-748 (in Korean).
20. Mindness, S. 1987. Properties of concrete reinforcement with fibrillated polypropylene fiber under impact loading, *Cement and Concrete Research* (18): 100-114.
21. Mobasher, B., H. Stsng, and S. P. Shah. 1990. Microcrack in fiber reinforced concrete. *Cement and Concrete Research* (20): 665-676.
22. Oh, B. H., M. G. Lee, S. W. Yoo, and S. H. Baik, 1996. A Study on the Strength and Drying Shrinkage Crack Control Characteristics of Polypropylene Fiber Reinforced Concrete, *Journal of The Korea Concrete Institute* 8(6): 151-161 (in Korean).
23. Park, S. S., Y. S. Kim, S. G. Choi, and S. E. Shin, 2008. Unconfined Compressive Strength of Cemented Sand Reinforced with Short Fibers. *The KSCE Journal of Civil Engineering* 28(4C): 213-220 (in Korean).
24. Sabry, A. S., and Z. A. Baghdad. 2001. Long-term Strength and Durability of Soil Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 13(3): 161-166
25. Seo, D. S, Y. I. Kim, H. J. Jeong, K. S. Nam, J. S. Lee and C. Y. Sung, 2000, Experimental study on the strength and permeable properties of soil-concrete, *Journal of The Korean Society Agricultural Engineers*, 278-283 (in Korean).
26. Song, C. S., and S. Y. Lim, 2002. Mechanical Characteristics of Reinforced Soil. *Journal of Env. Res. & Reveg. Tech* 5(6): 37-42 (in Korean).
27. Song, J. H., J. C. Lim, and S. W. Hong. 2008. Analysis of Compressive Strength of Lightweight Air-Soil According to the Properties of Soil. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 24(11): 157-166 (in Korean).
28. Sung, C. Y., S. H. Lee and C. S. Song, 2001, Physical and mechanical properties of Eco-concrete with polypropylene fiber, *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 43(1): 116-121 (in Korean).
29. Total Price Information, 2012, *Korea Price Information Corp* 496 : 111, 134-135, 937[II].
30. Venkatarama R. B., V. L. Richardson, and K. S. Nanjunda. 2007. Optimum Soil Grading for the Soil-Cement. *Journal of Materials in Civil Engineering* 19(2): 139-148.
31. Won, J. P., C. G. Park, I. S. Jeong, and W. J. Jeon. 2002. Effect of Polypropylene Fiber on Reduction of Shrinkage Crack and Improvement of Durability of Rural Road Concrete Pavement, *Journal of The Korean Society Agricultural Engineers* 44(1): 134-141 (in Korean).
32. www.soilcon.co.kr
33. Yang. K. H., and S. J. O, 2008. Effect of Volume Fraction and Length of Fiber on the Mechanical Properties of Fiber Reinforced Concrete, *Journal of The Korea Institute of Building Construction* 8(1): 43-48 (in Korean).