

다기능 복합 포장용 섬유보강 콘크리트 기층 재료의 역학적 특성평가

Mechanical Performance of Fiber Reinforced Lean Concrete for Subbase of Newly Developed Multi-Functional Composite Pavement System

장영재	Jang, Young-jae	강원대학교 대학원 토목건설공학과 석사과정
박철우	Park, Cheolwoo	정회원 · 강원대학교 공학대학 토목공학과 부교수 · 교신저자 (E-mail : tigerpark@kangwon.ac.kr)
박영환	Park, Younghwan	한국건설기술연구원 인프라구조연구실 선임연구위원 (E-mail : yhpark@kict.re.kr)
정우태	Jung, Wootai	한국건설기술연구원 인프라구조연구실 수석연구원 (E-mail : woody@kict.re.kr)
최성용	Choi, Sung-Yong	한국건설기술연구원 인프라구조연구실 연구원 (E-mail : pi081@kict.re.kr)
유평준	Yoo, Pyeong Jun	정회원 · 한국건설기술연구원 도로연구실 연구위원 (E-mail : pjyoo@kict.re.kr)

ABSTRACT

PURPOSES : This study is to investigate the mechanical performance of the fiber reinforced lean concrete with respect to different types of fibers.

METHODS : Increased vehicle weight and other causes from the exposed conditions have accelerated the deteriorations of road pavement. A new multi-functional composite pavement system is being developed recently in order to extend service life and upgrade the pavement. A variety of tests were conducted before and after hardening of the concrete.

RESULTS : From the test results, it was found that the use of different types of fibers did not affect the compressive strength development. This might be due to the inherent property of the lean concrete. When steel fibers were used relatively greater flexural strength and flexural fracture toughness were developed. Also addition of fly ash by replacing a part of Portland cement the fracture toughness was slightly increased.

CONCLUSIONS : It has been known that the addition of fibers and use of mineral admixture can be positively considered in the development of multi-functional composite pavement system as its required mechanical performance is obtained.

Keywords

fiber reinforced lean concrete, base course material, mechanical properties, fly ash

Corresponding Author : Park, Cheolwoo, Associate Professor
 Department of Civil Engineering, Kangwon National University,
 #1 Choongang-Ro, Samcheok-Si, Kangwon-Do, 245-711, Korea
 Tel : +82.33.570.6515 Fax : +82.33.570.6517
 email : tigerpark@kangwon.ac.kr

International Journal of Highway Engineering
<http://www.ksre.or.kr/>
 ISSN 1738-7159 (Print)
 ISSN 2287-3678 (Online)

1. 서론

1990년대 이후 교통량의 증가에 의한 반복교통하중과 주변 환경에 의한 환경적 영향 등의 복합적인 요소들로 인하여 현재 국내의 도로 포장은 설계수명 이전에 파

손이 발생하고 있으며 이로 인해 도로포장의 유지관리에 막대한 예산이 낭비되고 있는 실정이다(Yeo et al., 2010). 이와 같은 예산 낭비의 근본적인 원인을 해결하기 위해 도로 포장 기술의 개발이 다발적으로 진행되고

있으며 독창적이며 검증 가능한 세계적 기술 확보를 위해서는 국내 실정을 고려한 포장 재료에 대한 체계적인 연구가 필요하다(Park et al., 2009).

일반적으로 콘크리트에 사용되는 섬유는 초기재령에서의 건조수축에 의한 균열의 저감과 경화후 파괴인성의 증대를 목적으로 하고 있다. 본 연구에서는 아스팔트 표층을 구성하기 위한 기층재료로 활용하기 위하여 본 연구에서는 하부구조의 기능성 증대를 위하여 균열저항성과 피로 저항성을 향상시킨 기층 재료를 개발하기 위한 일환으로 빈배합 콘크리트에 섬유를 보강한 재료의 역학적 기초특성을 분석하고자 한다. 또한 개발하고자 하는 고성능 복합 포장의 하부기층재료로서 높은 강도 및 탄성계수가 요구되지 않는 특성에 따라 휨 또는 인장강도의 증대보다는 파괴인성의 증대를 목표로 하는 재료를 개발하고자 한다.

실험변수로는 골재의 최대치수를 다르게 하거나 혼화 재료를 치환하는 재료적인 측면을 개선시키는 방안을 기본적으로 고려하였으며 섬유 보강재를 추가하여 포장체를 보강하는 연구방안을 추가하였다. 또한 다양한 섬유의 종류를 변수로 하였으며 섬유를 하이브리드 또는 단일 섬유의 형태로 혼입하여 빈배합 콘크리트의 특성에 미치는 영향을 분석하였다(Choi et al., 2011).

따라서 콘크리트 기층에 섬유를 활용하여 롤러 다짐으로 강도를 증가시키는 빈배합 콘크리트의 물리 전압 기법을 접목시켜 파괴인성 증대 등의 역학적 특성을 만족하는 섬유보강 빈배합 콘크리트 기층 재료의 개발 연구 및 역학적 특성 분석 연구를 수행하고자 한다.

2. 사용 재료

2.1. 시멘트

본 연구에서는 국내 S사의 KS L 5201에 적합한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 각각 Table 1과 Table 2는 사용 시멘트의 물리적 및 화학적 특성을 나타내고 있다.

Table 1. Physical Properties of Used Cement

S.G.	Blaine (cm ² /g)	stability (%)	Setting time (min)		Comp. Str. (MPa)		
			Initial	Final	3days	7days	28days
3.15	3,400	0.1	230	410	23	31	40

Table 2. Chemical Compositions of Used Cement

(weight %)						
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Al ₂ O ₃	Ig-loss
21.95	2.81	60.12	3.32	2.11	6.59	2.58

2.2. 골재

사용된 골재는 강원도 삼척인근의 골재원에서 채취한 것으로 Table 3은 잔골재와 굵은골재의 물리적 특성을 나타내고 있다.

Table 3. Physical Properties of Used Coarse and Fine Aggregate

Aggregate	G _{max}	S.G.	Absorption (%)	Fineness Modulus
Coarse	25mm	2.70	0.56	6.45
Fine		2.54	1.15	2.54

2.3. 플라이애시

시멘트 대체재인 플라이애시는 석탄을 연료로 사용하는 발전소에서 이를 연소할 때 굴뚝을 통해 대기 중으로 확산되는 재의 미립자를 집진장치로 채취한 것으로 B사의 플라이애시를 사용하였으며 물리적·화학적 특성은 Table 4와 같다.

Table 4. Chemical Compositions and Physical Properties of Used Fly Ash

Chemical Compositions (%)							Physical Pro.	
SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	S.G.	Blaine (cm ² /g)
52.50	8.07	26.30	4.82	1.30	0.80	3.88	2.20	3944

2.4. 보강섬유

실험에 사용한 섬유의 종류는 강섬유(ST), 나일론(NY) 섬유이며 매크로와 마이크로 섬유를 혼합한 하이브리드 섬유 형태로 조합하여 사용함으로써 구조적·역학적 특성을 분석하여 도로포장 관련 기술 향상에 기여하고자 한다. 또한 나일론매크로의 경우 섬유의 길이, 지름, 형상이 구조체에 미치는 영향에 대하여 분석하기 위하여 다양한 종류로 실험을 진행하였으며 Table 5는 섬유의 물리적 특성 및 제원을 나타내고 있다.

Table 5. Properties of Used Fibers in Experiments

Fiber	Density (g/cm ³)	E (GPa)	Tensile Str. (MPa)	Melting Pt. (°C)	Length (mm)	Dia. (mm)	Shape	
ST	7.86	200	1,200	-	35	0.54	Hooked	
NY macro	1.16	-	500	210	N1	30	0.52	Waved
					N2	40	0.52	Straight
					N3	40	0.43	Waved
					N4	40	0.52	Waved
NYmicro					1.2	25μm	-	

Table 6. Mix Proportions Used for Experiments

Specimen	W/C	S/a	Fiber volume fraction, Vf, (%)						Unit content (kg/m ³)				
			ST	NY					W	C	F.A.	C.A.	F/A
				micro	N1	N2	N3	N4					
Plain	0.795	40	-	-	-	-	-	-	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
SI			0.1	0.1	-	-	-	-	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
SIF10			0.1	0.1	-	-	-	-	119.3	135.0	829.1	1321.9	15
SIF30			0.1	0.1	-	-	-	-	119.3	105.0	824.9	1315.3	45
N1I			-	0.1	0.1	-	-	-	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
N2I			-	0.1	-	0.1	-	-	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
N3I			-	0.1	-	-	0.1	-	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
N4I			-	0.1	-	-	-	0.1	119.3	150.0	831.2	1325.3	-
N4IF10			-	0.1	-	-	-	0.1	119.3	135.0	829.1	1321.9	15
N4IF30			-	0.1	-	-	-	0.1	119.3	105.0	824.9	1315.3	45
N4IF40	-	0.1	-	-	-	0.1	119.3	90.0	822.9	1312.0	60		

3. 실험 계획

3.1. 실험 개요

본 연구에서는 섬유보강 빈배합 콘크리트의 기층 재료 개발 연구 및 역학적 특성 분석을 수행하고자 다양한 변수를 고려하여 적용성을 평가하였다. 우선 매크로 섬유의 종류를 기본적인 변수로 고려하였고 일부 배합의 경우 플라이애시를 0%, 10%, 30%, 40%로 다양하게 치환하였으며 Table 6은 실험에 사용된 배합표를 나타내고 있다(Jang et al., 2011).

3.2. 실험 방법

3.2.1. 시험체 제작 방법

현행 빈배합 콘크리트에 대한 시방규정에서는 압축강도 시험체에 대한 기준만을 제시하고 있으며 기본 물성 실험을 위한 시험체 제작 방법이나 규정을 따로 정하지 않고 있다(KOREA EXPRESSWAY CORPORATION, 2009). 따라서 본 연구에서는 시험체 제작과정에서 다짐

Table 7. Optimum Compactions for Specimen Fabrication

G _{max}	Specimen size	Compactions
25mm	Cylinder φ10×20cm	(Mashall compaction 15EA+Vibration table 30sec) /layer for 3 layers
	Flexural beam 10×10×40cm	(Steel rammer 40EA+Vibration table 30sec) /layer for 2 layers
40mm	Cylinder φ15×30cm	(Rubber hammer 15EA+vibration table 30sec) /layer for 3 layers
	Flexural beam 15×15×55cm	(Steel rammer 40EA+Vibration table 40sec) /layer for 2 layers

수준 변동에 의해 발생할 수 있는 오차를 최소화하고 실험 결과에 대한 객관성을 확보하기 위해 다짐수준을 변수로 하는 실험을 통하여 최적 다짐수준을 확보하였다(Sin et al., 2011). Table 7은 각 시험체의 제작을 위한 최적다짐수준을 나타내고 있으며 시험체 제작 후 강도 측정 재령까지 비닐덮개를 이용하여 습윤양생을 실시하였다.

3.2.2. Vebe 시간 측정

단위시멘트량과 단위수량이 일반적인 콘크리트에 비하여 작은 빈배합 콘크리트는 KS F 2402 규정에 의거한 슬럼프 시험법으로는 대상 콘크리트의 변수별 특성을 규명하기 어려운 것으로 판단되었다. 따라서 KS F 2427 굳지 않은 콘크리트의 반죽질기 시험방법(Vebe 시험)에 의하여 반죽질기를 측정하였다.

3.2.3. 공기량

본 연구에서 개발하고자 하는 배합은 포장의 기층으로 활용하기 위한 것으로서 상부표층에 의하여 직접적으로 외부에 노출되지는 않는다. 따라서, 특별히 동결융해에 대한 저항성이 요구되지는 않아 공기연행제를 사용하지는 않는다. 하지만 여러 종류의 섬유보강 및 플라이애시 혼입에 따른 공기량특성의 변화를 검증하기 위하여 KS F 2421 압력법에 의한 굳지 않은 콘크리트의 공기량 시험방법에 따라서 공기량을 측정하였다.

3.2.4. 단위용적질량

단위용적질량시험은 KS F 2409 굳지 않은 콘크리트의 단위 용적 질량 및 공기량 시험 방법에 의거하여 측정하였지만 기존의 시험법에서의 다짐방법은 빈배합 콘크리트에 적용하기 적절하지 않으므로 실험자에 의한 객관적인 다짐 기준에 따라서 측정하였다.

3.2.5. 강도시험

압축강도 시험은 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험 방법에 의거하여 재령 7일, 28일에 압축강도를 측정하였다. 인장강도 시험은 KS F 2423 콘크리트의 인장강도 시험 방법에 의거하여 재령 7일, 28일에 인장강도를 측정하였다. 휨강도 시험은 KS F 2408 콘크리트의 휨강도 시험 방법에 의거하여 재령 7일, 28일에 휨강도를 측정하였다.

3.2.6. 휨인성

섬유혼입에 따른 파괴인성의 증대를 분석하기 위하여 ASTM C-1018(Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete(Using Beam With Third-Point Loading))에 의거 시험을 수행하였으며 하중-처짐 곡선의 아래면적을 계산하여 파괴 시 에너지 흡수량을 산정하였다(Choi et al., 2011). Fig. 1은 휨 파괴인성 시험장면을 나타내고 있다.



Fig. 1 Fracture Toughness Test Setup (ASTM C 1028)

3.2.7. 건조수축길이변화

각 실험변수별 건조수축길이변화를 측정하기 위하여 변수별로 2개의 10×10×40cm 시험체를 제작하였다. 제작 후 약 24시간 이후 거푸집을 탈형하였다. 제작된 시험체의 양생은 온도 24±1℃, 상대습도 50%

로 조정되는 실내양생실 내부에서 보관하였으며 시험체 길이변화의 값의 정확도를 높이기 위하여 최초 3일간은 매 6시간 마다, 이후 재령 14일까지는 매 12시간 마다, 그 이후에는 매 24시간 마다 길이변화를 측정하였다.

4. 실험 결과

4.1. Vebe 시간 측정

Fig. 2는 측정된 Vebe시간을 나타내고 있는데 이는 일반적인 콘크리트와는 달리 빈배합콘크리트와 같이 슬럼프를 측정하기가 매우 어려운 건배합콘크리트의 워커빌리티를 나타낸다. 전반적으로 약 60~90초 사이의 Vebe시간을 나타내었다. 본 연구의 배합은 단위시멘트량이 150kg/m³으로 시멘트 페이스트의 양이 매우 적은 수준이었으며 이에 따른 시험 종료 시점을 판단하는 기준에 다소 어려움이 있었다. 일반적인 콘크리트의 수준과 비교하였을 때 워커빌리티는 상당히 낮은 수준이지만 롤러에 의해 다짐을 하기 때문에 작업성에 크게 어려움을 겪지는 않을 것으로 판단된다.

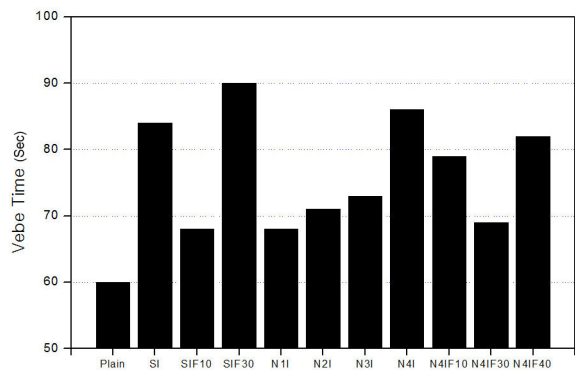


Fig. 2 Measured Vebe Time

4.2. 공기량

Fig. 3은 측정된 공기량을 나타내고 있다. 본 연구에서 고려하는 배합에서는 공기연행제를 기층재료의 개발목적에 부합하도록 사용하지 않았다. 실험결과 약 1.6~2.0% 수준으로 나타났다. 이러한 수준의 공기량은 공기연행제를 사용하지 않은 경우 일반적인 수준으로서 플라이애시를 사용하였을 경우에도 비슷한 수준을 나타내었다. Plain변수의 경우 섬유를 혼입한 변수보다 다소 공기량이 높은 것으로 나타났으며 플라이애시의 치환에 따른 공기량의 변화는 없는 것으로 나타났다.

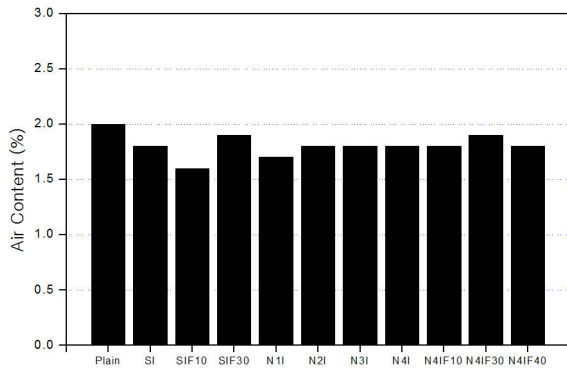


Fig. 3 Measured Air Content

4.3. 단위용적질량

측정된 단위용적질량 결과는 Fig. 4에 나타내고 있다. 실험결과 플라이애시가 치환될 경우 단위용적질량이 증가하는 것으로 나타났다. 강섬유를 혼입한 변수에서 플라이애시 치환량이 10% 및 30%인 경우 치환하지 않은 경우에 비하여 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 나일론매크로섬유를 혼입한 경우에 이러한 경향은 더욱 명확하게 나타났다. 하지만 플라이애시 치환율이 40%에서는 오히려 단위용적질량이 감소하여 플라이애시 치환에 따른 단위용적질량의 증가는 치환율이 약 30%일 때가 최적인 것으로 분석되었다. 이는 플라이애시 치환량이 과도하게 증가할 경우 동일한 단위수량의 배합에서 워커빌리티의 감소로 인한 다짐이 불충분해져서 단위용적질량이 감소하였을 것으로 판단된다.

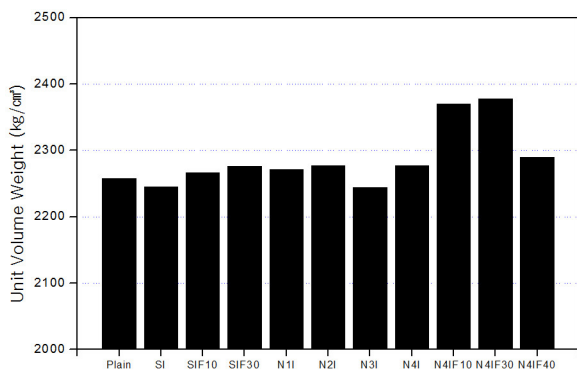


Fig. 4 Measured Unit Volume Weight

4.4. 압축강도

Fig. 5는 재령 7일과 28일의 압축강도 실험결과를 비교하고 있다. 재령 7일의 경우 플라이애시를 치환하였을 때 강도의 발현이 늦는 것을 알 수 있었으며 그 치환율이 증가할수록 강도는 낮은 것으로 나타났다. 또한 Plain변

수보다 섬유를 함유하였을 때 다소 초기강도가 작은 것으로 나타났으며 매크로 섬유 종류에 따른 초기강도는 강섬유를 혼입하였을 때 가장 높은 것으로 나타났다.

재령 28일에서는 전반적으로 섬유보강이 압축강도에 미치는 영향이 크지 않은 것으로 분석되었다. 다만 나일론매크로섬유의 길이가 짧아진 경우(30mm)와 지름이 작아진 경우(0.43mm)에 압축강도가 다소 감소하였으나, 그 차이는 크지 않았다. 또한 일자형의 나일론매크로섬유를 사용한 경우가 물결형 형태의 섬유를 사용한 경우보다 다소 높은 압축강도를 나타내었는데 마찬가지로 그 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 플라이애시를 치환한 경우 그 치환율이 10%일 때에는 섬유의 종류에 상관없이 치환하지 않은 경우와 비교하여 강도의 감소가 크지 않았다. 하지만 재령 28일에서 치환율이 30%인 경우에는 강도가 강섬유 사용 시 약 26.5%, 나일론매크로섬유 사용 시 약 25% 정도 감소하였다. 40%를 치환한 경우에는 더욱 높은 감소율을 나타내었다. 플라이애시를 사용한 경우 포졸란 반응에 의하여 재령이 길어질수록 강도 및 내구성이 증가하며 또한 일반적인 콘크리트에서 플라이애시의 치환율을 30% 정도로 제한하는 것을 고려할 때, 본 연구에서 개발하고자하는 기층재료에서도 플라이애시 치환율이 30%를 넘지는 말아야 할 것으로 판단된다. 그리고 본 연구에서 고려하는 배합의 단위시멘트량과 단위수량은 일반적인 경우에 비하여 낮으므로 시멘트의 1차적인 수화반응 생성물인 수산화칼슘과 반응하는 포졸란 반응의 반응성도 낮을 수 있다. 따라서 섬유보강 빈배합 콘크리트 기층재료의 플라이애시 함유량은 30% 보다도 낮은 값인 10~30% 수준으로 사용하는 것이 적절할 것으로 판단된다. 적절한 치환율에 관한 최종결정을 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

따라서 강섬유와 나일론매크로섬유를 나일론마이크로섬유와 함께 사용할 경우 섬유의 종류 및 형상에 따른

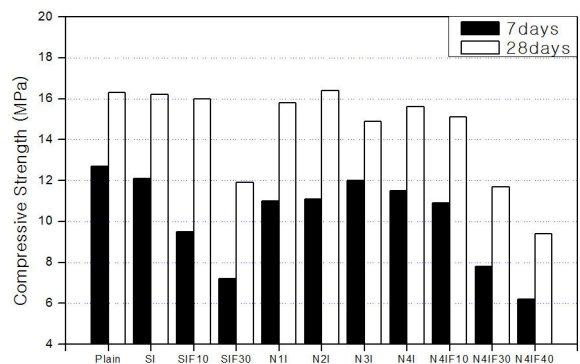


Fig. 5 Comparison of Measured Compressive Strength

압축강도의 변화는 미미한 것으로 나타났으며 플라이에 시를 치환할 경우 치환율이 10%를 초과할 때 강도를 고려하여 적정 수준의 치환율을 규정하는 것이 필요하다.

4.5. 인장강도

Fig. 6은 재령 7일과 28일의 인장강도 실험결과를 비교하고 있다. 재령 7일에서 인장강도는 약 1.2MPa 수준으로 플라이에시 치환율이 10%인 경우에는 플라이에 시를 사용하지 않은 경우와 동일한 수준을 나타냈지만 30%인 경우에는 약 25%정도 낮은 값을 나타내었다.

재령 28일의 결과에서는 섬유를 혼입하지 않은 Plain 변수가 가장 높은 값을 나타내었다. 강섬유를 사용한 경우가 나일론매크로섬유를 사용한 경우에 비하여 다소 높은 인장강도를 나타내었으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 한편 물결형이 아닌 일자형 나일론매크로섬유를 사용한 경우에는 인장강도가 플라이에시 치환 변수를 제외하고는 가장 낮은 값을 나타내었다. 따라서 섬유보강 빈배합 콘크리트의 기층재료로써 나일론매크로섬유의 형상이 일자형은 적절하지 않은 것으로 판단된다. 플라이에시를 치환한 경우 치환율이 10%에서는 혼입하지 않은 경우와 동일한 수준의 강도를 나타냈다. 하지만 30%인 경우에는 재령 28일에서도 약 12% 이상 낮은 인장강도를 나타냈으며 치환율이 40%인 경우에는 약 35% 이상 감소하였다.

따라서 인장강도 실험결과 섬유 종류에 따른 인장강도의 변화는 크지 않았으나 나일론매크로섬유의 경우 형상이 일자형인 섬유는 인장강도의 저하를 초래하는 것으로 분석되었으며 플라이에시를 혼입할 경우 치환율이 30%이상인 경우에는 인장강도가 고려할만한 수준으로 저하되었다. 따라서 플라이에시의 치환율이 10% 이상일 경우에는 최적 치환율 결정을 위한 추가적인 실험적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

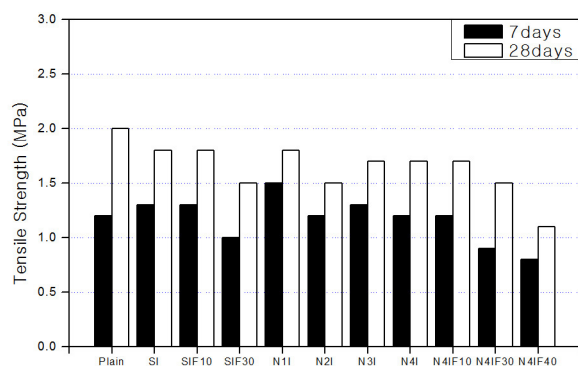


Fig. 6 Comparison of Measured Tensile Strength

4.6. 휨강도

Fig. 7은 재령 7일과 28일의 휨강도 실험결과를 비교하고 있다. 재령 7일에서는 섬유의 종류별 변수에 따른 차이가 크지는 않았다. 하지만 압축강도와 마찬가지로 나일론매크로섬유의 길이가 짧아지고(30mm) 지름이 작은 경우(0.43mm)가 다소 낮은 것으로 분석되었다. 또한 섬유가 일자형인 경우가 다소 낮았지만 그 차이는 미미하였다. 플라이에시를 치환한 경우에서도 그 치환율이 증가할수록 휨강도가 비례하여 감소하였다.

재령이 28일인 경우 가장 높은 휨강도는 섬유를 혼입하지 않은 Plain 변수에서 나타났으며 강섬유를 사용한 경우에는 나일론매크로섬유를 사용한 경우에 비하여 전반적으로 낮은 휨강도를 나타내었다. 나일론매크로섬유의 경우 길이가 30mm인 경우에 휨강도가 감소하였으며 섬유의 형태가 일자형인 경우에도 감소하였다.

하지만 섬유의 지름이 작아진 경우(0.43mm)에는 휨강도가 동등한 수준으로 나타났다. 이는 섬유의 지름이 감소함에 따라 섬유의 형상비(aspect ratio)가 76.9에서 93.0으로 증가한 것에 기인하는 것으로 판단된다. 이는 압축강도의 결과와는 다른 것으로 휨강도는 인장응력에 지배되는 특성에 따라 섬유의 형상비가 증가함에 따라 섬유자체의 지름은 작아졌지만 인장특성을 보완하는 것으로 사료된다.

휨강도는 강섬유를 사용한 경우 다소 감소한 경향이 있으며 나일론매크로섬유의 경우 섬유길이가 감소함에 따라 그 형태가 일자형인 경우 휨강도가 감소하였다. 하지만 섬유의 지름이 작아진 경우에는 형상비의 증가에 따라 강도는 대등한 수준을 유지하였다. 플라이에시를 치환하였을 때 그 치환율이 10%일 때는 재령 28일에서 휨강도의 차이가 거의 없었지만 30% 이상인 경우 크게 감소하는 것으로 나타났다.

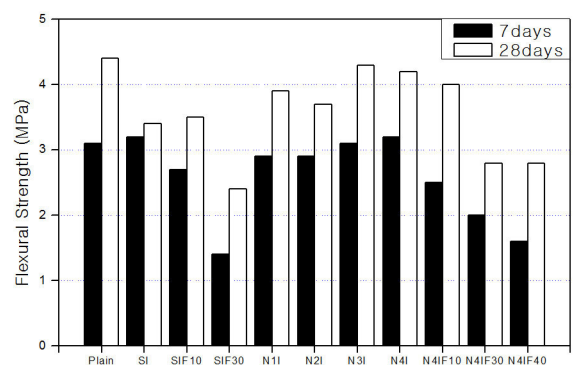


Fig. 7 Comparison of Measured Flexural Strength

4.7. 휨인성

다음의 Fig. 8은 LVDT를 활용하여 얻어진 하중-처짐 곡선을 활용하여 구한 휨파괴인성 지수를 각 변수별로 비교하고 있다. 휨인성지수는 최초균열이 발생할 때까지 흡수한 파괴에너지와의 상대비교이므로 이를 나타내는 지수만을 비교하고자 하였다. 휨파괴인성은 콘크리트 배합에 섬유를 혼입하여 증대시킬 수 있는 특성으로 섬유를 혼입하지 않은 시험체의 경우 휨인성 지수의 증가가 거의 없는 것으로 분석되었다. 휨파괴인성의 증가는 강섬유를 혼입할 때 가장 효과적인 것으로 분석되었으며 특히 플라이애시를 치환한 경우 증대효과가 더욱 뚜렷한 것으로 나타났다. 이는 플라이애시의 혼입으로 인하여 내부미세구조가 치밀해져 섬유와 콘크리트 매트릭스 간의 부착성능이 향상된 것으로 판단된다. 나일론매크로섬유의 형상이 일자형인 경우에는 휨파괴인성 증가가 없었으며, 섬유의 지름이 0.43mm로 작은 경우에도 증가가 없었다. 섬유의 형상이 일자형인 경우 균열이 발생하여 섬유의 뽑힘(Pull-out)에 대한 저항성이 물결형에 비하여 낮은 것으로 판단된다. 또한 휨강도와 인장강도 실험결과에서 섬유의 지름이 감소하여도 휨강도와 인장강도는 변화가 없었던 것에 비하여 다소 다른 결과로 분석된다. 섬유 지름의 감소로 인하여 형상비가 증가함에 따라 파괴단면의 인장축에 우선적으로 영향을 받는 휨강도와 인장강도의 변화는 거의 없었지만 최초 균열이 발생한 이후에는 브릿지효과에 의한 인성의 증가에는 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 따라서 기층재료의 휨파괴인성의 증대를 위해서는 물결형의 형상과 적절한 수준 이상의 지름을 가지는 섬유를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

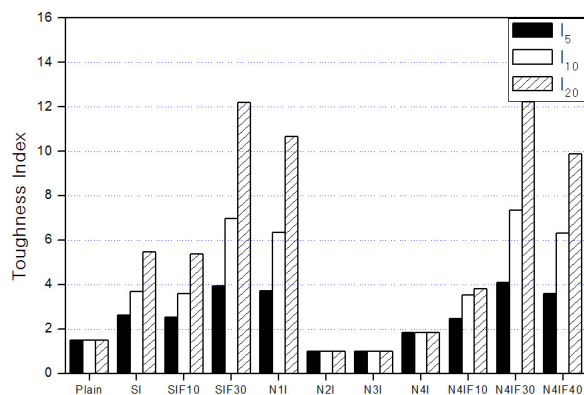


Fig. 8 Measured Flexural Fracture Toughness

한편 나일론매크로섬유의 지름이 동일한 경우 섬유의 길이가 30mm로 짧은 경우가 40mm인 경우에 비하여 우수한 휨파괴인성의 증대를 나타내었다. 휨강도와 인

장강도 실험결과에서 섬유의 길이가 짧아지는 경우 각각 휨강도와 인장강도가 미미한 수준으로 감소한 바 있지만 휨파괴인성의 증대에는 더욱 효율적인 것으로 분석되었다. 이는 섬유의 길이가 짧아짐에 따라 배합에 포함되는 섬유의 개수가 증가하는 것에 기인하는 것으로 사료된다. 매크로 섬유의 혼입률(volume fraction)이 0.1%이므로 단위용적(1m³)당 포함되는 섬유의 개수는 길이가 30mm인 경우 약 15.7만개이며, 40mm인 경우 약 11.8만개로서 약 4만개 정도의 차이가 난다. 따라서 실험에 사용한 10×10×10cm 시험체에는 길이가 30mm인 경우가 약 160개 정도의 섬유가 더 들어간다. 이와 같이 추가적인 섬유 개수의 증가가 휨인성 지수의 증대에 유리하게 작용한 것으로 판단된다. 하지만 섬유와 콘크리트 매트릭스 사이에는 부착력에 관여하는 유효부착길이(effective bond length)가 존재하므로 섬유의 개수 증대를 위하여 길이가 과도하게 감소할 경우 부착응력이 오히려 감소하여 휨인성 지수의 증대에 불리하게 작용할 수도 있다.

실험결과 섬유보강 빈배합 콘크리트 기층재료의 소요 성능을 만족하기 위하여 섬유의 혼입으로 인한 휨파괴인성을 증대하기 위해서는 강섬유의 혼입이 다소 유리한 것으로 판단하며 나일론매크로섬유를 사용할 경우 형상이 물결형이고 적절한 수준의 지름을 가지는 섬유를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다. 또한 섬유의 길이를 짧게하여 섬유 개수의 증대도 휨강도나 인장강도에는 영향을 거의 미치지 못하지만 휨파괴인성의 증대에는 유리한 것으로 분석되었다. 섬유의 종류에는 상관없이 플라이애시의 혼입은 휨인성의 증대에 효율적이었으며 그 치환량이 30%일 때 더욱 효과적이었다. 하지만 강도발현 등의 문제를 고려하여 플라이애시의 치환량은 더욱 세밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

4.8. 건조수축 길이변화

Fig. 9와 Fig. 10은 건조수축 길이변화 측정결과를 나타내고 있다. 전반적으로 강섬유를 혼입한 변수의 경우에 건조수축이 섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 다소 적은 것으로 판단되며 나일론매크로섬유의 경우 강섬유보다 다소 적으나 그 차이는 크지 않은 것으로 분석되었다. 또한 플라이애시의 혼입으로 인한 건조수축의 차이는 특정 경향을 파악하기에는 어려움이 있는 것으로 판단된다. 건조수축 길이변화 측정과정의 특성상 위와 같은 오류가 발생할 가능성이 크므로 추후 추가적인 실험이 가능하다면 이러한 오류를 피하기 위하여 각 시험체에 변형률게이지를 부착하여 길이변화를 측정하

는 방법을 활용하도록 강구해야 할 것으로 판단된다.

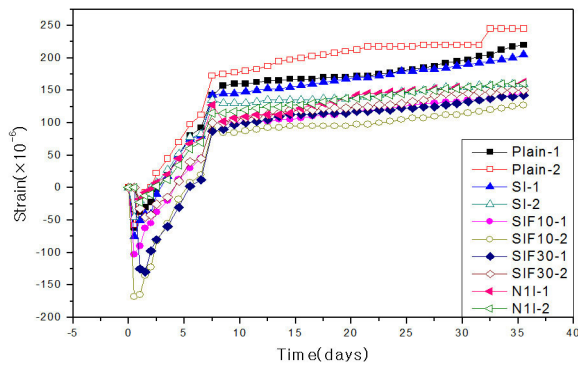


Fig. 9 Measured Drying Shrinkage Results-1

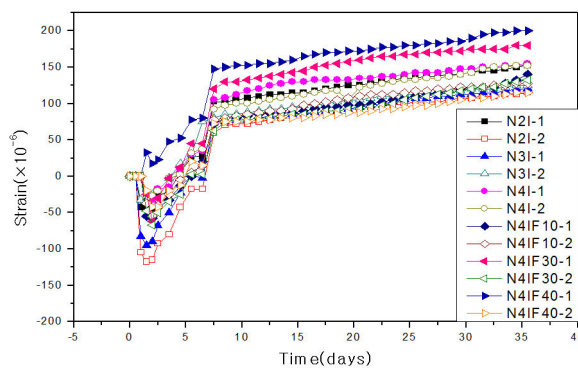


Fig. 10 Measured Drying Shrinkage Results-2

5. 결론

본 연구에서는 섬유보강 빈배합 콘크리트 기층재료의 최적배합을 도출하기 위하여 경화전과 경화후의 특성에 대하여 실험적 연구를 통한 분석 결과는 다음과 같다.

1. 단위용적질량은 플라이애시 치환량이 30%까지 증가할수록 증대하였다. 하지만 치환율이 40%의 경우는 오히려 불리하며, 이는 동일한 단위수량에서 워커빌리티의 감소에 따른 것으로 판단된다.
2. 강섬유와 나일론매크로섬유를 나일론마이크로섬유와 함께 사용할 경우 섬유의 재질, 형상 등에 따른 압축강도의 차이는 크지 않았다.
3. 휨강도는 강섬유를 사용한 경우 다소 감소한 경향이 있으며, 나일론매크로섬유의 경우 섬유 길이가 감소함에 따라 그리고 형상이 일자형인 경우 휨강도가 감소하지만 섬유의 지름이 작아진 경우에는 형상비의 증가에 따라 강도는 대등한 수준을 유지하였다.
4. 인장강도에서도 휨강도 결과와 같이 섬유를 혼입하지 않은 변수가 가장 높은 값을 나타내었다. 강섬유를 사용한 경우가 나일론매크로섬유를 사용한 경우에 비하여 다소 높은 인장강도를 나타내었으나 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 물결형이 아닌 일자형 나일론매크로섬유를 사용한 경우에는 인장강도가 플라이애시 치환변수를 제외하고는 가장 낮은 값을 나타내었다.
5. 플라이애시를 치환할 경우 10%까지는 재령 28일 압축, 인장, 휨강도가 동등한 수준이나 30% 이상인 경우 감소폭이 고려할 만한 수준으로 나타나 치환율에 대한 추가적인 고찰이 필요할 것으로 판단된다.
6. 휨파괴인성의 증가는 강섬유를 혼입할 때 가장 효과적인 것으로 분석되었으며, 특히 플라이애시를 혼입할 경우 증대효과가 더욱 뚜렷한 것으로 나타났다.
7. 나일론매크로섬유의 형상이 일자형인 경우와 섬유의 지름이 0.43mm로 작은 경우 휨파괴인성의 증가가 없었다. 이는 섬유 지름의 감소로 인한 형상비의 증가는 최초 균열이 발생한 이후 브릿지효과에 의한 인성의 증가에 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다.
8. 나일론매크로섬유의 지름이 동일한 경우 섬유의 길이가 30mm로 짧은 경우가 40mm인 경우에 비하여 우수한 휨파괴인성의 증대를 나타내었다. 이는 섬유의 길이가 짧아짐에 따라 배합에 포함되는 섬유의 개수가 증가하는 것에 기인하는 것으로 사료된다.
9. 섬유와 콘크리트 매트릭스 사이에는 부착력에 관여하는 유효부착길이(Effective bond length)가 존재하므로 섬유의 개수 증대를 위하여 길이가 과도하게 감소할 경우 부착응력이 오히려 감소하여 휨인성지수의 증대에 불리하게 작용할 수 있을 것으로 판단된다.
10. 섬유의 종류에는 상관없이 플라이애시의 혼입은 휨인성의 증대에 효율적이었으며, 그 치환량이 30%일 때 더욱 효과적이었다. 하지만 강도발현등의 문제를 고려하여 플라이애시의 치환량은 더욱 세밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

본 연구는 다기능 복합포장의 기층재료로 활용하기 위한 섬유보강빈배합콘크리트의 기초특성을 분석하기 위한 연구로서 본 연구의 실험결과와 함께 추가적인 실험적 연구를 통하여 사용한 섬유의 종류 및 광물질혼화재 등의 특성을 고려하여 목적에 부합하는 최적의 배합을 도출할 필요가 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 기관 고유사업(2011-0095-1-1)의 지원에 의해 수행되었습니다.

References

Park, Jongsub, 2009. *Development of Fiber Reinforced Concrete for Pavements*, Research Report 2009-096, KOREA INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY.

Sin, Nare, Park, Cheolwoo, Kim, Giheon, 2011. Strength Development of Roller Compacted Concrete with Respect to Compaction Levels, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.13, No.2, pp.61~62.

Yeo, Hyun Dong. Jeong, Sung Won. Kim, Gwang Duk. Kwon, Soo Ahn. Jeong, Jin Hoon.(2010) "Evaluation of Early Stage Performance of Geogrid-reinforced Asphalt Overlay Pavements", *Proc. of Korean Society of Road Engineers*, pp.395~400.

Jang, Youngjae, Park, Cheolwoo, Park, Younghwan, Jung, Wootai, Choi, Sungyong, Sin, Nare, 2011, Fracture Toughness Comparison of Fiber Reinforced Lean Concrete Incorporating Fly Ash or Rejected Ash, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.2, pp.145~146.

Choi, Woohyun, Park, Cheolwoo, Park, Jongsub, Jung, Wootai, Jang, Youngjae, 2011, Strength Development of Fiber Reinforced Lean Concrete for road base with respect to fiber types, *Proc. of Korea Concrete Institute*, Vol.23, No.1, pp.385~386.

Choi, Woohyun, Park, Cheolwoo, Park, Jongsub, Jung, Wootai, Jang, Youngjae, 2011, Strength Development of Fiber Reinforced Lean Concrete for Subbase Material, *Proc. of Korean Society of Road Engineers*, pp.153~158.

KOREA EXPRESSWAY CORPORATION, 2009, *Highway construction provisions*.

(접수일 : 2012. 3. 20 / 심사일 : 2012. 3. 22 / 심사완료일 : 2012. 6. 20)