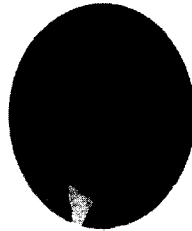

강섬유보강 패널구조의 보강효과 분석 및 인성평가 기법

Steel Fiber Reinforcing Effect Analysis of Slab Panel Structure
and Assessment Technics of Toughness



전찬기*

Jeon, Chan-Ki



박선규**

Park, Sun-Kyu

ABSTRACT

This paper is aimed to evaluate the effectiveness of flexural toughness of slab panel structures(60×60×10cm) reinforced by steel fiber instead of wire mesh. Steel fiber used in this study is double hooked Dramix type fiber.

And the fiber length is 60mm, diameter is 0.8mm. Various assessment methods of toughness index are used to estimate the proper effectiveness.

In this experimental study, we find that Johnston, JCI-SF4 and EFNARC method are more effective to assess the flexural toughness of slab panels than the others. And the steel fiber is very effective alternative material to reinforce slab panel structures instead of wire mesh.

Fiber volume fraction of 0.5~0.75% is more useful than the others in enhancing the post-peak energy absorption and toughness index by Johnston's $I_{5.5}$ assessment method. And the slab panels reinforcing with steel fiber are more resistant to crack propagation than wire mesh reinforcing slabs.

Keywords : steel fiber, slab panel reinforcing , toughness assessment , wire mesh shotcrete

* 정희원 · 시립인천전문대학 토목과 부교수

** 정희원 · 성균관대학교 토목공학과 조교수

· 본 논문에 대한 토의를 1999년 8월 30일까지 학회로 보내 주시면 1999년 10월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

섬유보강콘크리트(FRC, Fiber Reinforced Concrete)에 대한 연구는 20세기초부터 시작되었으나 미국의 Romualdi⁽¹⁾와 Beston 등이 실용화를 위한 연구를 발표한 이래, Shah, Nanni 등 많은 연구자들이 실험과 이론식을 발표하였으며⁽²⁾ 1970년대부터는 강섬유보강콘크리트가 실용화되어 각국의 현장에서 많이 사용되고 있다.

또한 그동안 터널의 샷크리트라이닝(shotcrete lining)이나 포장콘크리트의 보강용으로 용접철망(wire mesh)이 널리 사용되고 있는 실정이지만, 외국에서는 공정의 능률성 제고와 확실한 보강효과의 확보를 도모하기 위하여 용접철망을 강섬유로 대체하기 위한 시도를 하고 있다. 국내에서도 비행장 유도로 포장시공이나 공장의 기계기초에 강섬유가 사용된 바 있으며, 1993년에는 서울 지하철의 터널공사에서 강섬유를 샷크리트에 적용하였고, 그 뒤로도 고속도로 터널공사 및 비행장, 도로포장 등 각종 현장에서 강섬유를 사용한 시공이 이루어지고 있다.

그러나 강섬유에 의한 용접철망 대체 효과에 대한 연구 성과가 미흡하고 아직도 대체에 대한 신뢰성이 부족하여 강섬유의 활용이 부진한 상태이고, 또한 기존의 실험 및 연구 대상 구조물은 보 구조물이 주류를 이루고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 강섬유보강과 용접철망보강에 따른 거동파악을 위하여 슬래브패널 구조에 대한 휨거동 및 인성특성을 연구하여 두 재료의 상호보완 및 대체 가능성 등을 검토해 보고자 한다.

이 연구는 슬래브시험체로 직접 시험함으로써 슬래브구조의 안전성, 공기단축, 품질향상, 내구성향상 등을 파악할 수 있어 이 분야 연구에 도움이 되리라 생각된다.

2. 인성 평가 방법

최근까지 제안되고 있는 인성평가에서 평가 대상 구조물은 보의 경우와 슬래브의 경우로 나뉘어진다. 이 경우 EFNARC의 방법 이외에는 모두 보 시험체에 대한 인성평가방법을 제시하고 있다. 또한 평가방법은 정적 휨시험을 통한 하중-처짐($P-\delta$) 곡선하(曲線下)의 면적에 기초를 두고 있으며, 일정 처짐까지의 $P-\delta$ 곡선하의 면적을 절대평가하는 방법과 일정 처짐까지의

$P-\delta$ 곡선하의 면적을 초기 균열점까지의 $P-\delta$ 곡선하의 면적으로 나누어 상대평가하는 방법으로 나뉘어진다. 전자의 경우가 Johnston의(I)방법, EFNARC방법, JCI방법 등이며, 그 외의 방법은 모두 후자의 경우에 해당된다.

2.1 Johnston의 방법(I)⁽³⁾

이 방법은 1974년 Johnston이 Fig. 1(a)와 같이 하중-처짐 곡선하의 면적에서 최대하중까지의 면적을 사용하여 인성을 평가하였으나, 그 결과가 시험체의 크기와 형상에 따라 상당히 변하기 때문에 합리적인 인성평가 방법으로 활용되지 못하였다.

2.2 ACI 544 위원회의 방법⁽⁴⁾

ACI 544 위원회에서는 1978년에 Fig. 1(b)와 같이 Henager⁽⁵⁾의 연구에 기초를 둔 무차원 인성지수(toughness index, I)를 제안하여, 하중-처짐 곡선하의 면적비를 도입함으로써 Johnston의 비합리성을 해결하려고 하였다.

이 방법에 의한 인성지수는 $10 \times 10 \times 35 \text{ cm}$ (순수지간 30 cm) 휨시험체에 3등분점 재하를 실시하여, 지간 중앙부 처짐이 1.9 mm 되는 점까지의 하중-처짐 곡선하의 면적($S_0 + S_1$)을 초기 균열점까지의 면적(S_0)으로 나눈 값으로 정의하고 식(1)처럼 나타내었다. 이 때 중앙부의 처짐 기준을 고정변위 1.9 mm 로 정한 근거는 ACI 544에서는 언급하지 않았으나, Henager는 평균적인 초기 균열시의 처짐 0.125 mm 의 15배에 해당하는 값으로 설명하고 있다. 이 방법은 정해진 시험체에서 특정 처짐의 값을 지정함으로써 동일한 시험체 및 시험방법으로 실험을 수행할 때만 적용이 가능한 단점이 있다.

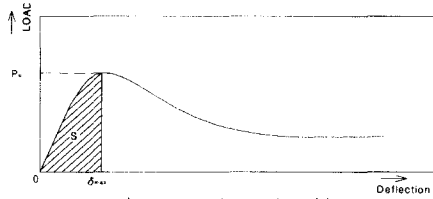
$$T. I. = \frac{S_0 + S_1}{S_0} \quad (1)$$

이렇게 정의된 인성지수는 표준시험체로부터 인성을 쉽게 구할 수 있고, 저인성 섬유보강 콘크리트를 쉽게 구분할 수 있는 장점이 있는 반면, LOP의 정확한 판정에 문제점을 안고 있으며 시험체의 크기 및 형상에 크게 좌우되는 단점을 가지고 있다. 한편 초기 균열점(δ_{LOP})은 일정한

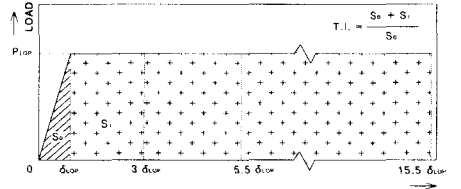
재하속도에 비하여 변형이 갑자기 증가하는 점을 말한다. 이는 하중-처짐곡선이 비선형이 되기 시작하는 점, 즉 복합체 매트릭스의 역할이 끝나는 점으로 통상 비례한도점(LOP, limit of proportional point)이라고 부르는 점이다.

2.3 Barr의 방법⁽⁶⁾

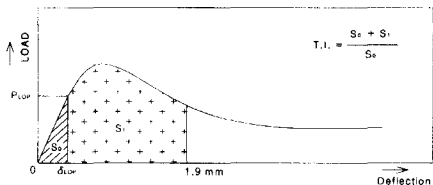
Barr 등은 1982년에 ACI 인성지수와 유사하지만 Fig. 1(f)와 같이 한계 처짐을 $2\delta_{LOP}$ 로 잡고, 한계 처짐까지의 면적($S_0 + S_1$)을 초기 균열점(δ_{LOP})까지의 면적(S_0)의 4배로 나눈 값을 인성지수로 하여 식(2)와 같이 나타내었다. 이 방법의 장점은 시험체의 형태와 규정된 처짐이 무관하다는 점이다.



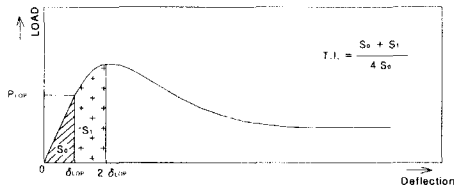
a) Johnston's method (I)



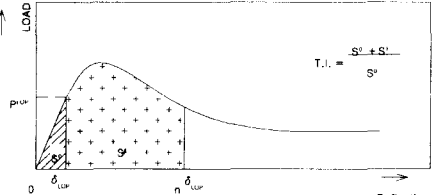
e) ASTM C1018 (by elastic plastic material)



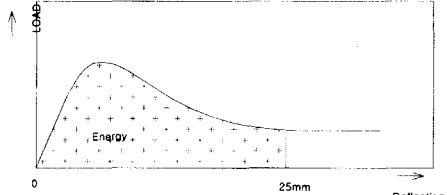
b) ACI 544 method



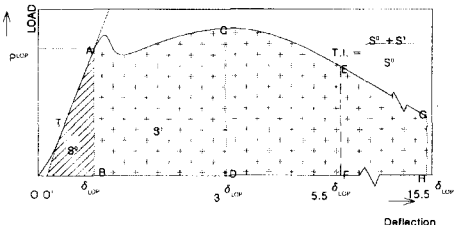
f) Barr's method



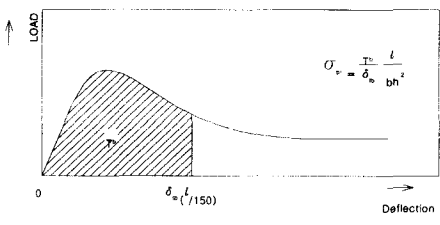
c) Johnston's method (II), n=3, 5.5, 15.5



g) EFNARC's method (for slab)



d) ASTM C1018



h) JCI-SF4, KSCE, Koo's method

Fig. 1 Definition of various toughness indices

$$T.I. = \frac{S_o + S_1}{4S_o} \quad (2)$$

2.4 Johnston의 방법(II)⁽⁷⁾

1980년에 Henager와 Zollo⁽⁸⁾, 1982년에 Johnston에 의해 ACI 인성지수 방법의 결점에 대한 논의가 있었으며, Johnston이 정해진 시험체에서 고정변위를 사용하는 방법 대신에 개선된 방법을 제시하였다. 즉 Fig. 1(c)와 같이 LOP처짐의 3배, 5.5배, 15.5배에 해당되는 점까지의 면적을 LOP까지의 면적(S_o)으로 나누어 사용하는 인성지수를 제안하였다. 이를 근거로 1988년에는 ACI 544 위원회에서 ASTM의 인성지수에 전체(total) 인성지수(I_t)를 포함한 개정된 기준을 마련하였다.

2.5 ASTM C 1018의 방법⁽⁹⁾

ASTM에서는 1986년에 Fig. 1(d)와 같이 ACI방법과 Johnston의 방법을 조합하여 채택하고, 초기의 하중-처짐 곡선의 선형을 직선화한 뒤 초기균열하중(A점)의 접선이 X축과 만나는 O'점을 처짐 원점으로 잡아 O'AB에 의한 삼각형 면적을 LOP면적으로 간주하였다. 이 때, O'B를 1δ 로 하여 3δ , 5.5δ , 15.5δ 인 D, F, H점을 잡아 인성평가의 지표로 하였다.

한편 Fig. 1(e)는 시험편이 LOP까지는 완전 탄성체이고 LOP 이후는 완전 소성체라고 가정했을 때의 인성지수를 말하며, I_5 , I_{10} , I_{30} 에서의 첨자는 이론적인 인성지수가 각각 5, 10, 30임을 의미한다. 따라서 시험편이 완전 탄소성체일 때 Johnston의 $I_{3.0}$, $I_{5.5}$, $I_{15.5}$, 등을 ASTM에서는 I_5 , I_{10} , I_{30} 으로 표시되고 있다.

2.6 JCI-SF4⁽¹⁰⁾, JSCE 강섬유보강 콘크리트 설계시공 지침⁽¹¹⁾

이 방법은 $100 \times 100 \times 350 \text{ mm}$ 또는 $150 \times 150 \times 550 \text{ mm}$ 인 보 공시체를 3등분점 하중제하 방법을 이용하여 휨 실험을 실시하고, Fig. 1(h)와 같이 휨인성을 지간의 1/150까지의 하중-처짐 곡선하의 면적을 유효숫자 3자리까지 구하여

사용하고 있다.

이 방법은 기존의 방법들이 한계 처짐을 너무 크게 취하여 한계 처짐까지 재하시킬 경우 변형이 크게 되는 단점을 개선한 것으로, 한계 처짐을 지간의 1/150로 한정하기 때문에 한계 처짐이 지간 길이에 따라 결정되므로 보다 합리적인 방법으로 알려져 있다.

2.7 유럽통합규격(EFNARC), 프랑스 철도청의 방법⁽¹²⁾

이 방법은 EFNARC과 프랑스 철도청(SNCF) 및 알프스 ESSAIS 연구소에 의해 제안된 것으로 $75 \times 125 \times 600 \text{ mm}$ 의 보 공시체와 $600 \times 600 \times 100 \text{ mm}$ 또는 $1000 \times 1000 \times 100 \text{ mm}$ 의 패널 공시체를 이용하여 휨인성평가를 시도하였다.

보 시험에서는 일정 처짐(0.5, 1, 2, 4 mm)까지의 에너지 흡수능력을 4등급으로 구분하여 인성을 평가하고 있으며, 패널 시험에서는 25 mm (1/20)까지의 에너지 흡수능력을 3등급으로 구분하여 평가하고 있다. 이 방법은 현재까지 제안된 다른 방법에 비해 패널시험체를 이용한 인성 평가를 제시함으로써 터널의 슛크리트나 슬래브구조에 적용할 수 있는 장점이 있다.

2.8 기타 제안식

이 외에도 Wang, Backer⁽¹³⁾와 RILEM50-FMC⁽¹⁴⁾의 방법이 있으며, 국내에서는 1991년에 구봉근 등⁽¹⁵⁾이 하중-처짐 곡선하의 전체 단면적에서 인위적으로 가한 초기 균열인 노치 부분의 면적을 뺀 나머지 면적을 고려하여 유효인성을 나타내는 방법을 제안한 바 있다. 또한 1998년에는 배주성 등⁽¹⁶⁾이 보 시험체의 처짐을 지간의 1/n로 다등분하여 초기의 시험편 거동을 파악함은 물론 초기 균열 이후의 전반적인 에너지 흡수능력까지 평가할 수 있는 TES(toughness evaluation strength)기법을 발표하였고, 1997년에는 박승범 등⁽¹⁷⁾이 슬래브시험체의 인성시험 결과를 발표한 바 있다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 실험 계획

본 연구에서는 EFNARC에서 채택된 Fig. 2와 같은 슬래브패널시험(slab panel test)을 기본 실험모델로 설정하였다. 이는 슬래브실험은 빔 (beam)실험보다 실제 터널의 라이닝과 상관관계가 더 있으며, 4면이 지지된 슬래브실험은 샷크리트라이닝의 연속성과 관련되어 있기 때문이다. 실제로 강섬유 보강 샷크리트(Steel Fiber Reinforcing Shotcrete, SFRS)는 망(mesh)보강 샷크리트와 쉽게 비교되고, 이에 따라 프랑스에서는 1992년초 샷크리트에 관한 지침서로 SFRS test를 채용하였다.

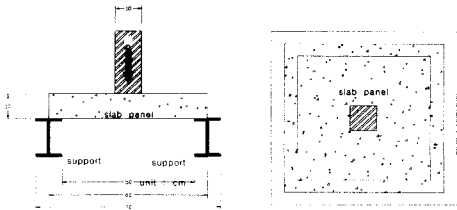


Fig. 2 Slab panel test specimen and loading system

따라서 본 연구에서의 인성평가 기법도 EFNARC의 평가방법을 이용하여 인성을 평가하는 것을 우선으로 하였다. 그러나 이 방법에서 제시한 25 mm 처짐까지의 측정은 실제 실험을 할 때 최대하중시의 처짐이 용접철망 보강의 경우 최대 12 mm 이고, 무보강의 경우는 최대 2~3 mm 정도로 매우 작고, 25 mm 처짐까지의 에너지 측정은 시험체의 파괴 형태에 따라 처짐값의 변화가 심해서 이미 신뢰성이 없는 자료가 될 수 있다고 생각된다.

따라서 본 연구에서의 인성평가법은 EFNARC의 평가 방법을 기본으로 실시함은 물론 통상 보의 인성을 파악하는 방법 중에서 그 동안 발표된 각국의 인성평가 방법들을 비교 검토하여 적절하다고 판단되는 Johnston(II)방법, ASTM C 1018방법, JCI-SF4방법 등으로 실험 결과를 비교 분석하였다.

3.2 사용 재료 및 실험 방법

3.2.1 사용 재료

1) 시멘트 및 골재

시멘트는 국내산으로 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 비중은 3.15이다. 또한 각 골재의 물리적 실험 결과는 Table 1과 같으며, 굵은 골재의 최대 치수는 16 mm 이다.

Table 1 Physical properties of aggregates

Classification	Specific gravity	Fineness modulus	Absorption
Fine aggr.	2.55	2.87	1.50
Coarse aggr.	2.60	4.67	1.18

2) 용접철망(wire mesh) 및 강섬유

용접철망은 직경 5 mm 에 눈금 순간격 10 cm 을 사용하였다. 또한 실험에 사용된 강섬유는 그동안 각종 연구에서 그 효용성이 인정된 Dramix ZC type이며, 국내 C사의 Hook Fiber 제품으로 양단이 구부러지고(both ends hooked), 수용성 아교를 사용하여 다발로 붙어있는(glued together into a bundle) 상태이다. 직경 g/cm^3 은 0.8 mm 이고 길이는 60 mm, 비중은 8.0, Aspect ratio(섬유형상비 : 섬유의 길이와 직경의 비율 l/d)는 75이다.

3.2.2 시험체의 설계 및 제작

기초적인 조사를 위한 압축강도와 인장강도 실험은 $\phi 10 \times 20$ cm 원주형 공시체를 사용하여 test name별로 3개씩 제작하여 실시하였다.

평판슬래브 부재의 시험체는 Fig. 2와 같이 가로, 세로 각각 60 cm 이고, 지지대를 제외한 순수 지간이 50 cm 이며, 두께가 10 cm 인 시험체를 test name별로 3개씩 제작하여 사용하였고, 실험의 편의상 실험실 제작하였다.

배합설계에 의한 시험체의 배합표는 샷크리트의 설계기준강도가 보통 $210 kg/cm^2$ 정도이지만 섬유 콘크리트가 고강도용으로 사용되고 있는 점과 본 실험 이전의 연구⁽¹⁸⁾⁻⁽²⁰⁾와의 연관성을 고려하여 설계기준강도를 $270 kg/cm^2$ 로 하여 Table 2와 같이 하였다. 혼화제는 급결제(H사의 Jumbo)와 감수제(K화학의 Power Con 100)를 사용하였으며, 각각 시멘트 중량의 4%, 2%를 투입하였다. 시험체의 종류는 Table 3과 같이 보강재 없이 감수제와 급결제를 사용한 것을 기

Table 2 Mix proportion of concrete

W / C (%)	S / a	Unit water (kg)	Mix proportion(kg/m ³)					
			Water	Cement	Fine aggr.	Coarse aggr.	Admixture(g/m ³)	
							Quick setting	Water reducing
35	4%	190	190	542	741.5	787	21.68	10.84

본으로 하고 용접철망을 보강한 것과 강섬유로 보강한 것으로 구분하였다. 용접철망을 보강한 것은 상부(상면에서 2 cm), 하부(하면에서 2 cm)

상하부(상하면에서 각각 2 cm)로 구분하였다. 강섬유 혼입량은 보통 전체 콘크리트 용적의 1% 미만으로 40~60 kg/cm² (0.57~0.85%)을 사용하고 있는 것을 고려하고, 강섬유 혼입률에 의한 보강 효과를 분명하게 파악하기 위하여 섬유 혼입량을 0.5~2% 범위에서 변화를 주었다.

Table 3 Type and amount of admixture and reinforcing material

Test name	Abstract test name	Admixture		Reinforcing material	
		Type	Amount (% of cement)	Type	Amount (% of 1m ³ concrete mix)
SL _c -N-RQ	N ₁	Water reducing, Quick setting	2 + 4	-	-
SL-N-R	N ₂	Water reducing	2	-	-
SL-N-Q	N ₃	Quick setting	4	-	-
SL-W _U	W ₁	R + Q	2 + 4	Wire mesh in upper	-
SL-W _L	W ₂	R + Q	2 + 4	Wire mesh in lower	-
SL-W _D	W ₃	R + Q	2 + 4	Wire mesh in double	-
SL-SF-0.5	F ₁	R + Q	2 + 4	Double hooked steel fiber	0.50
SL-SF-0.75	F ₂	R + Q	2 + 4	"	0.75
SL-SF-1.0	F ₃	R + Q	2 + 4	"	1.00
SL-SF-1.25	F ₄	R + Q	2 + 4	"	1.25
SL-SF-1.5	F ₅	R + Q	2 + 4	"	1.50
SL-SF-2.0	F ₆	R + Q	2 + 4	"	2.00

SL : slab, N : No reinforcing material, R : Water reducing agent, Q : Quick setting agent, W : Wire mesh, SF : Steel fiber, H : Hook type fiber

3.2.3 하중 재하 및 측정

하중은 슬래브패널의 경우 Fig. 2와 같이 슬래브 중앙에 10×10 cm의 재하판을 설치하여 재하하였으며, 하중재하 초기에는 하중(응력) 제어 방식으로 하였고, 예상 극한 하중의 1/2을 넘을 때 부터는 처짐량을 고려한 변위 제어방식으로 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 기초 실험 결과

배합 및 보강재료에 따른 압축강도와 활렬인장강도의 실험 결과는 Table 4와 같다. 이 결과에서 알 수 있듯이 압축강도는 혼입된 강섬유에 관계없이 거의 비슷하였으나, 활렬인장강도는 대부분의 강섬유 혼입 콘크리트의 특성처럼 Dramix fiber를 혼입한 시험체가 보통 콘크리트 시험체보다 높게 나타났다.

Table 4 Compression and tension strength test results (kg/cm²)

Test name	Curing method	Compression strength, σ_c			Tension strength, σ_t (28days)
		3days	7days	28days	
COM-Q	Wet curing	115	165	249	21
	Field curing	-	173	252	20
COM-R	Wet curing	115	159	223	20
	Field curing	155	-	202	18
COM-QR	Wet curing	186	247	293	26
	Field curing	-	249	260	26
COM-SF-0.5 (F ₁)	Wet curing	-	-	308	28
COM-SF-0.75 (F ₂)	Wet curing	-	-	310	30
COM-SF-1.0 (F ₃)	Wet curing	-	-	307	33
COM-SF-1.25 (F ₄)	Wet curing	-	280	307	35
COM-SF-1.5 (F ₅)	Wet curing	-	288	311	42
COM-SF-2.0 (F ₆)	Wet curing	-	290	308	46

4.2 휨강도 실험 결과 및 휨인성 효과 분석

4.2.1 휨 강도 및 처짐

각 시험체별 초기균열 및 극한상태에서의 휨강도와 처짐 측정 결과는 Table 5와 Fig. 3~4에 나타내었다. 이 결과에 의하면 용접철망보강 슬래브의 경우 상면(上面)보강, 하면(下面)보강, 상하면(上下面)보강의 순으로 휨강도가 크게 나타나고 있는 반면, 강섬유 보강 슬래브의 경우는 2%를 보강한 것보다 1.5%보강의 경우가 더 큰 휨강도를 나타내고 있는데, 이는 강섬유 보강 슬래브의 경우 섬유 투입량이 많을수록 배합시 섬유의 고른 분산이 어려워져 나타나는 현상이라고 판단된다. 또한 강섬유 혼입률이 1.5%이상이면 용접철망의 상, 하면 보강보다 효과가 큰 것으로 나타나서 강섬유 보강 구조의 효용성을 입증하고 있고, 초기균열이 발생하는 시점을 보면 용접철망 상, 하면 보강 슬래브와 대부분의 강섬유 보강 슬래브의 경우에 비교적 큰 것으로 나타나서 인성의 효과를 잘 보여주고 있다. 초기 균열시의 휨강도와 극한 휨강도의 비를 보면 용접철망 하면(下面)보강에서 가장 큰 증가를 나타내고 있어 용접철망의 인성 효과도 큼을 알 수 있다. 처짐의 거동을 보면 Fig. 4와 같이 W_2 의 경우에서 최대 처짐을 보이고 W_3 와 F_1, F_5, F_6 에서 큰 값을 나타내고 있어 휨인성 효과가 있음을 알 수 있다. 또한 초기 균열시의 처짐과 극한 하중에서의 처짐비를 보면 W_1, W_2 및 F_1 등이 월등히 큰 값을 보이고 있어 이들 시험체가 초기 균열후의 파괴 저항성이 큼을 알 수 있다.

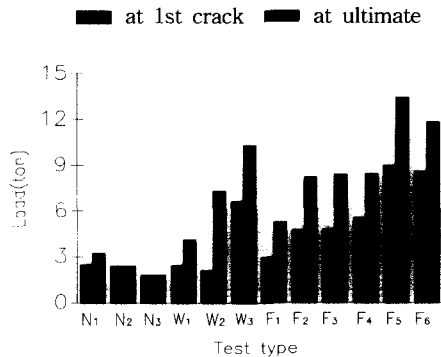


Fig. 3 Load according to test type at 1st crack and ultimate stage

Table 5 Load and deflection of concrete slabs

Test name	Load (ton)			Deflection at center point (mm)		
	at 1st crack	at ultimate	$\frac{\text{ultimate}}{\text{1st crack}}$	at 1st crack	at ultimate	$\frac{\text{def. at ultimate}}{\text{def. at 1st crack}}$
SL-N-RQ (N ₁)	2.51	3.25	129(%)	0.72	2.44	339(%)
SL-N-R (N ₂)	2.40	2.40	100(%)	1.14	1.14	100(%)
SL-N-Q (N ₃)	1.80	1.80	100(%)	0.71	0.71	100(%)
SL-W ₁ (W ₁)	2.44	4.14	167(%)	0.67	5.49	819(%)
SL-W ₁ (W ₂)	2.13	7.30	343(%)	1.24	11.96	964(%)
SL-W ₁ (W ₃)	6.58	10.31	156(%)	3.23	9.28	287(%)
SL-SF-0.5 (F ₁)	2.92	5.27	180(%)	0.86	7.61	885(%)
SL-SF-0.75 (F ₂)	4.75	8.20	171(%)	0.46	2.63	571(%)
SL-SF-1.0 (F ₃)	4.80	8.40	175(%)	0.71	2.28	321(%)
SL-SF-1.25 (F ₄)	5.54	8.44	152(%)	1.68	5.46	325(%)
SL-SF-1.5 (F ₅)	8.96	13.42	150(%)	2.08	6.41	308(%)
SL-SF-2.0 (F ₆)	8.57	11.81	138(%)	3.21	8.54	266(%)

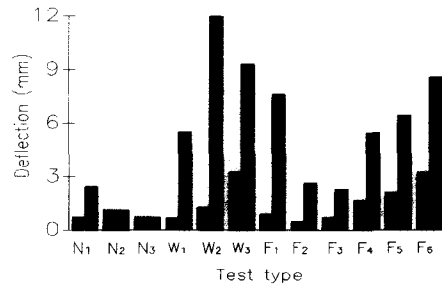


Fig. 4 Deflection according to test type at 1st crack and ultimate stage

4.2.2 휨인성 평가

각 시험체별로 실시한 휨실험에 의한 하중-처짐 곡선은 Fig. 5에 나타내었다. 또한 이 곡선에서 휨인성 평가법에 따라 계산된 인성평가 면적이 Table 6이며, 이를 토대로 각 인성평가 방법에 따라 인성지수를 나타낸 것이 Table 7이다.

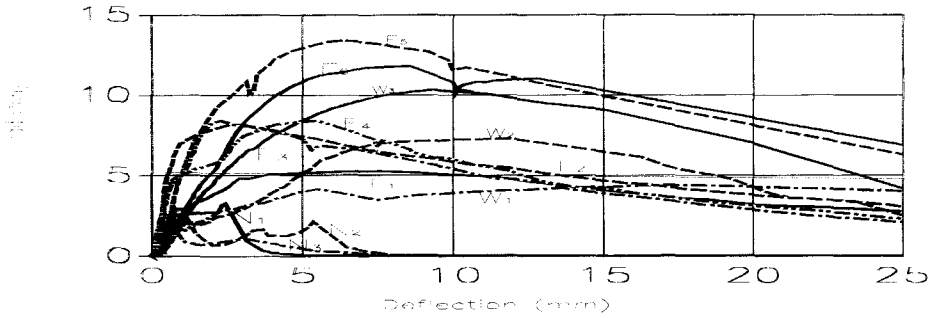


Fig. 5 Load - Deflection curves of concrete slabs

Table 6 Toughness area of concrete slabs

Test name	Load at first crack, (LOP), (ton)	Def. of LOP, δ_0 , (mm)	Area under P- δ curve up to δ_0 , S_0 (t · mm)	Area under P- δ curve up to $2\delta_0$, $S_0 + S_1$ (t · mm)	Area under P- δ curve up to δ_n , $S_0 + S_1, T_b$, Energy								
					Johnston's method (II), $S_0 + S_1$ (t · mm)				ASTM C 1018 method, (by elastic-plastic behavior) $S_0 + S_1$ (t · mm)			JCI SF4 method, T_b up to δ_{ib} (kg · cm)	EFNARC method, Energy up to 25mm, (t · mm)
					at I_{30}	at I_{55}	at I_{105}	at I_{155}	at I_5	at I_{10}	at I_{30}		
SL-N-RQ(N ₁)	2.51	0.72	0.94	2.79	4.71	7.37	7.57	7.80	4.52	9.04	27.11	709	7.80
SL-N-R(N ₂)	2.40	1.14	1.13	2.53	3.65	8.05	8.50	8.50	6.84	13.68	41.04	354	8.50
SL-N-Q(N ₃)	1.80	0.71	0.59	1.37	1.90	3.46	4.81	4.83	3.20	6.39	19.17	302	4.83
SL-W _U (W ₁)	2.44	0.67	0.67	1.89	3.33	8.27	21.18	33.66	4.09	8.17	24.52	732	95.15
SL-W _L (W ₂)	2.13	1.24	1.18	3.39	7.53	24.36	68.53	106.21	6.60	13.21	39.62	625	126.56
SL-W _D (W ₃)	6.59	3.23	11.77	38.18	70.48	145.95	190.29	190.29	53.21	106.43	319.29	1224	190.29
SL-SF-0.5 (F ₁)	2.92	0.86	1.03	3.68	7.01	17.59	40.01	60.97	6.28	12.56	37.67	1038	101.36
SL-SF-0.75 (F ₂)	4.75	0.46	0.91	3.67	6.98	15.99	34.10	50.36	5.46	10.93	32.78	2226	133.13
SL-SF-1.0 (F ₃)	4.80	0.71	1.66	5.55	11.09	25.54	50.28	70.57	8.52	17.04	51.12	2068	117.62
SL-SF-1.25 (F ₄)	5.54	1.68	6.93	17.94	31.64	62.75	102.39	123.95	23.27	46.54	139.61	1748	123.95
SL-SF-1.5 (F ₅)	8.96	2.08	9.90	32.00	59.04	124.32	221.41	243.13	46.59	93.18	279.55	2209	243.13
SL-SF-2.0 (F ₆)	8.57	3.21	13.80	47.43	84.97	166.77	228.43	228.43	68.77	137.55	412.65	1458	228.43

Table 7 Toughness indices of concrete slabs

Test name	Toughness indices of area under P- δ curve up to δ_n , I_n, σ_s , Joule										
	Johnston's method (I), Toughness area up to δ max	Barr's method, I	Johnston's method (II), I_n				ASTM C 1018 method, I_n (by elastic-plastic behavior)			JCI SF4 method, σ_s up to δ_{ib} (kg/cm ²)	EFNARC method, Energy up to 25mm (Joule, N · mm)
			I_{30}	I_{55}	I_{105}	I_{155}	I_5	I_{10}	I_{30}		
SL-N-RQ (N ₁)	5.55	0.74	5.01	7.84	8.05	8.30	4.81	9.62	28.86	21.48	78.0
SL-N-R (N ₂)	1.13	0.56	3.23	7.12	7.52	7.52	6.05	12.10	36.30	10.73	85.0
SL-N-Q (N ₃)	0.95	0.58	3.22	5.86	8.15	8.19	5.42	10.84	32.52	9.15	48.3
SL-W _U (W ₁)	15.11	0.40	4.79	12.34	31.61	50.24	5.99	11.98	35.94	22.18	951.15
SL-W _L (W ₂)	46.06	0.72	6.38	20.64	58.08	90.01	5.59	11.18	33.54	18.94	1265.6
SL-W _D (W ₃)	66.29	0.81	5.99	12.40	16.17	16.17	4.52	9.04	27.12	37.09	1902.9
SL-SF-0.5 (F ₁)	32.62	0.89	6.81	17.08	38.84	59.19	6.10	12.19	36.57	31.45	1013.6
SL-SF-0.75 (F ₂)	16.81	1.01	7.67	17.57	37.47	55.34	6.00	12.01	36.02	67.45	1331.3
SL-SF-1.0 (F ₃)	12.34	0.84	6.68	15.39	30.29	42.51	5.13	10.27	30.80	62.67	1176.2
SL-SF-1.25 (F ₄)	35.15	0.65	4.57	9.05	14.77	17.89	3.36	6.72	20.15	52.97	1239.5
SL-SF-1.5 (F ₅)	61.32	0.81	5.96	12.56	22.36	24.56	4.71	9.42	28.26	66.94	2431.3
SLSF-2.0 (F ₆)	72.24	0.86	6.16	12.08	16.55	16.55	4.98	9.96	29.88	44.18	2284.3

1) 초기 균열에 의한 인성 평가

S_0 계산의 결과를 시험체별로 나타낸 것이 Fig. 6이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 용접철망 보강의 경우는 W_3 가 단연 두드러지고, 강섬유 보강에서는 섬유 혼입률에 따라 S_0 값이 커짐을 알 수 있다. 특히, 섬유 혼입률이 1.5%인 F_5 의 경우는 W_3 와 거의 같고, 2%인 F_6 의 경우는 W_3 보다 큰 S_0 를 나타내고 있다.

이러한 결과를 분석해 보면 초기하중에서 인성을 확보하는 방법으로 강섬유 혼입률이 1.5% 이상이면 용접철망으로 상하면을 보강한 것보다 인성이 우수한 것을 알 수 있다. 물론 섬유보강의 경우가 용접철망으로 상면이나 하면 중 한 면(面)만 강한 경우보다는 월등히 우수함을 알 수 있다.

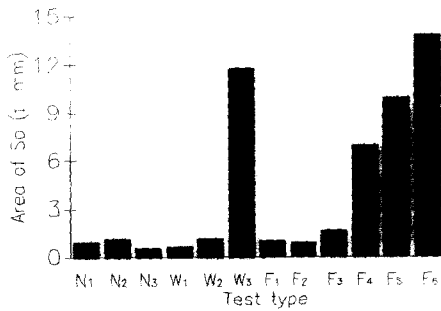


Fig. 6 Area of S_0 according to test type

2) Johnston의 방법(II)에 의한 인성 평가

Johnston의 인성평가 (II)방법 중에서 5.5 δ_{LOP} 는 일종의 한계 치짐이며, 이 한계 치짐을 너무 작게 취하면 섬유 혼입의 영향이 분명히 나타나지 않고, 또한 너무 크게 취하면 변형이 크게 되어 치짐량의 측정 정밀도가 떨어지게 된다. 따라서 인성을 합리적으로 나타내는 지수는 5.5가 제안되고 있다.

실제로 본 실험에서도 Fig. 7에 나타낸 것처럼 $I_{15.5}$ 에 의한 평가는 W_2 에서 90.01로 나타나서 다른 지수보다 월등히 많은 값을 나타내고 있어 인성지수가 치짐량의 측정 정밀도에 의해 크게 좌우됨을 알 수 있다. 또한 $I_{3.0}$ 에 의한 평가도 한계 치짐을 너무 작게 잡은 것이 되며, 이에 의한 인성을 보아도 시험체의 종류에 관계없이 거의

차이가 없어 이 결과로 인성을 평가하는 것은 무리임을 알 수 있다.

따라서 $I_{5.5}$ 에 의한 인성 평가가 가장 합리적이며, 이 방법에 의해 평가한 인성지수를 보면 W_2 와 F_1, F_2, F_3 의 인성이 비교적 높은 것을 알 수 있다. 이 결과는 기존의 연구 결과^(17~19)들과 유사하며, 이로써 Johnston의 방법이 보 시험체에 의한 것이고 재하방법도 다르지만, 슬래브 시험체의 P- δ 곡선하의 면적 결과에 Johnston의 평가법을 적용할 수 있음을 시사하고 있다. 또한 강섬유를 0.5~1%만 혼입해도 용접철망 보강과 유사하거나 더 좋은 효과를 나타내고 있어, 강섬유가 용접철망을 대체할 수 있음을 확인해 주고 있다.

한편 Johnston의 (I)방법에 의한 인성평가 결과를 보면 용접철망 보강의 경우는 W_2, W_3 가 크고, 강섬유 보강의 경우는 강섬유 혼입률이 커짐에 따라 같이 커지는 단순한 현상을 나타내고 있어 적절한 인성 평가 방법이 아님을 알 수 있다.

또한 Barr의 방법에 의한 인성평가를 보면, 강섬유보강을 한 경우의 인성지수가 용접보강의 경우보다 높게 나타날 뿐이고, 강섬유 혼입률에 따른 차이가 그다지 크지 않고 변화의 경향도 일정하지 않아서 인성평가의 지표로 하기에 문제가 있음을 알 수 있다.

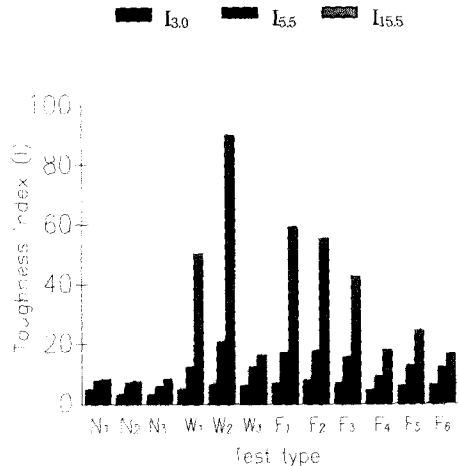


Fig. 7 Toughness indices according to test type by Johnston's method

3) ASTM C1018에 의한 인성 평가

ASTM C1018의 인성 평가 방법을 적용할 때 초기 곡선이 거의 직선이어서 처짐 계산의 원점이 본래의 원점과 크게 다르지 않게 나타난다. 따라서 Table 6~7에 나타낸 ASTM 인성평가는 완전 탄소성체로 간주하여 LOP값을 $\delta_{15.5}$ 까지 일정한 값을 유지시킨 상태의 면적을 인성으로 평가하는 방법을 사용하였다. 이 방법에 의한 인성지수 중에서 한계 처짐으로 인정된 I_{10} 의 경우를 보면 대부분 시험체에서 기준 지수인 10을 넘는다. 그러나 강섬유 혼입률이 높은 $F_4 \sim F_6$ 에서 오히려 작게 나타나는 것을 볼 때, 과도한 강섬유 혼입이 인성을 높이는데 큰 효과가 없음을 알 수 있다.

4) JCI-SF4에 의한 인성 평가

JCI-SF4는 인성평가를 위해 등가휨강도(=휨인성계수, equivalent flexural strength)개념을 도입하였으며, 이는 평균 강도의 개념을 가진다. 이 때 등가 휨강도는 다음 식으로 나타내어지고, 그 결과는 Table 8 및 Fig. 8과 같다.

$$\sigma'_b = \frac{T_b}{\delta_{tb}} \frac{l}{bh^2} \quad (3)$$

여기서, σ'_b : 휨인성계수 (kg/cm^2)

T_b : 기준점 (δ_{tb})까지의 면적,

휨인성 ($kg \cdot cm$)

δ_{tb} : 스패의 1/150의 처짐 (cm)

l : 스패 길이 (cm)

b : 시편 파괴 면적의 평균 폭 (cm)

h : 시편 파괴 면적의 평균 높이(cm)

이 결과에 의하면 F_2, F_3, F_4, F_5 의 시험체가 휨인성이 가장 좋은 것으로 나타났고, F_1 과 F_6 도 W_2 보다 비교적 큰 휨인성을 나타내고 있어, 강섬유가 용접철망 보강의 대체 재료로 적합함을 보여주고 있다. 그러나 등가 휨강도 계산에서는 시험체가 슬래브여서 $b = l = 50 cm$ 로 간주했기 때문에 적용에 무리가 따를 것으로 평가된다.

Table 8 Toughness assesment by JCI-SF4

Test name	P_u (ton)	Flexural strength σ_b (kg/cm^2)	Equivalent flexural strength, σ'_b (kg/cm^2)
SL-N-RQ (N_1)	3.25	32.5	21.48
SL-N-R (N_2)	2.4	24.0	10.73
SL-N-Q (N_3)	1.8	18.0	9.15
SL-W _U (W_1)	4.14	41.4	22.18
SL-W _L (W_2)	7.3	73.0	19.94
SL-W _D (W_3)	10.31	103.1	37.09
SL-SF-0.5 (F_1)	5.27	52.7	31.45
SL-SF-0.75 (F_2)	8.20	82.0	67.45
SL-SF-1.0 (F_3)	8.40	84.0	62.67
SL-SF-1.25 (F_4)	8.44	84.4	52.97
SL-SF-1.5 (F_5)	13.42	134.2	66.94
SL-SF-2.0 (F_6)	11.81	118.1	44.18

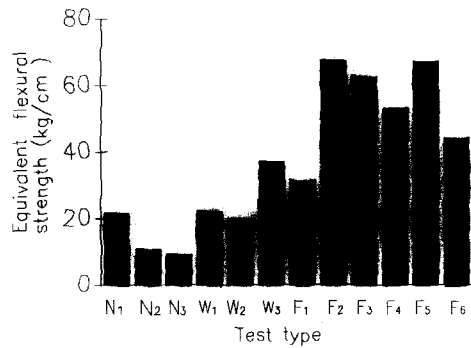


Fig. 8 Equivalent flexural strength according to test type by JCI-SF4 method

5) EFNARC의 방법에 의한 인성 평가

EFNARC에서 제안하는 슬래브시험체의 휨인성은 하중-처짐 곡선에 25 mm의 처짐까지의 면적을 Energy로 하여 Joule의 단위로 표현하고 있다. 이 결과를 나타낸 것이 Fig 9이며, 이에 의하면 W_3, F_5, F_6 에서 2000J 정도의 큰 energy를 나타내고 있다. 또한 $F_1 \sim F_4$ 도 W_2 와 더불어 1000J 이상의 비교적 큰 값을 나타내고 있다.

이를 EFNARC에서 제안하고 있는 기준 등급인 500J, 700J, 1000J을 각각 A, B, C 등급으로 구분하고 있는 것과 비교하면 W_1 을 제외한 모든

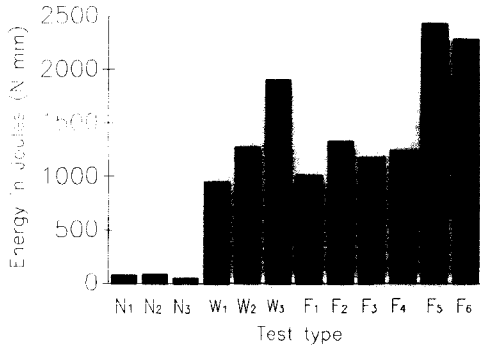


Fig. 9 Energy absorption according to test type by EFNARC method

보강 구조에서 모두 C등급에 해당되는 높은 수준인 것이고, W도 C등급에 가까운 B등급 수준을 보이고 있어 강섬유가 용접철망 대체 재료로 적절함을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

그러나 이 방법은 앞서도 언급했듯이 25 mm까지의 치짐까지 실시하게 되어 있어서 실제 시험시 시험체의 파괴 형태에 따라 치짐값의 변화가 심해지는 단점이 있고, 또 너무 큰 변형에 의한 치짐값을 구조체의 인성과 연관시키는 것도 무리라고 생각된다.

4.3 균열의 생성과 발달 분석

슬래브 시험체의 균열 생성과 발달 현상을 각 시험체별로 관찰해 본 결과 무보강의 경우는 평면에서 3~4방향으로 균열이 생성되어 파괴되었고, 용접철망 보강의 경우는 측면에서 시작하여 평면으로 진전되었고, 여러 방향의 거미줄 형태로 진전되었다. 또한 강섬유 보강의 경우는 상면에서는 거의 균열이 없고, 주로 하면과 측면에서만 균열이 발생하여 균열저항성이 큼을 알 수 있었다.

5. 결 론

강섬유 및 용접철망으로 보강된 콘크리트 슬래브패널에 대한 휨인성 평가를 실험적으로 규명하였던 바, 본 연구의 범위내에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 슬래브패널 구조에서 보강재료인 용접철망을 강섬유로 대체할 수 있을 정도로 강섬유의 휨

인성이 비교적 커서 보강 효과가 뛰어난 것으로 나타났으며, 강섬유를 쏫크리트에 적용할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

2) 강섬유로 보강된 슬래브패널 구조의 인성 평가 방법에 대한 기존의 연구들을 본 실험의 결과에 적용시켜 평가법의 적절성을 검토한 바, 슬래브패널 구조에서 $P-\delta$ 곡선하의 면적으로 인성을 절대평가하는 EFNARC의 방법이 적용 가능한 방법이지만, 25 mm 치짐까지의 인성으로 평가하는 것은 무리라고 판단된다.

3) 보의 휨인성 평가법 중에서는 Johnston의 평가법이 슬래브에도 적용이 가능한 것으로 분석되었고, 이 중 $I_{5.5}$ 방법이 가장 합리적인 것으로 판단되었다. 한편 JCI-SF4 방법은 한계치 짐으로 설정된 1/150의 값이 너무 낮은 값이어서 슬래브 구조에의 적용에는 무리라고 판단된다.

4) Johnston의 $I_{5.5}$ 방법과 ASTM I_{10} 을 이용한 인성평가에서 인성효과가 큰 강섬유의 혼입률은 콘크리트 용적의 0.5~0.75%가 가장 효과적이었고, 1%도 비교적 효과적이었다. 또한 JCI-SF4에 의한 방법에서도 강섬유 혼입률이 0.75~1.0%에서 좋은 인성을 나타내었다. 따라서 시험법의 적절성과 현장의 시공성을 감안한다면 슬래브패널에서 적절한 강섬유의 혼입률을 0.75% 내외로 하는 것이 타당한 것으로 판단된다.

5) 슬래브패널의 재하시 균열 형상을 보면 용접철망 보강의 경우는 방사형으로 나타났으며, 강섬유 보강의 경우는 슬래브 상면에는 거의 균열이 없었고, 극한하중 부근에서 측면과 하면에 균열이 발생하여 균열 저항성이 크게 나타남을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Romualdi, J. P. and Batson, G. B. (1963), "Behavior of Reinforced Concrete Beams with Closely Spaced Reinforcement," ACI Journal, Proceedings, Vol. 60, No. 6, pp. 775~789.
2. "Fiber Reinforced Concrete" (1984), SP-81, ACI, Detroit.

3. Johnston, C. D. (1974), "Steel Fiber Reinforced Mortar and Concrete a Review of Mechanical Properties," in *Fiber Reinforced Concrete*, ACI, SP-44, pp. 127~142.
4. ACI 544.2R-89 (1978, 1989, 1994), "Measurement of Properties of Fibre Reinforced Concrete", ACI Committe 544, *ACI Manual of Concrete Practice*, Part 5.
5. Henager, C. H. (1978), "A Toughness Index of Fiber Concrete", In *Testing and Test Methods of Fibre Cement Composites*, RILEM Symposium, Lanaster, The Construction Press, pp. 79~86.
6. Barr, B. I., Liu, K., and Dowers, R. C. (1982), "A Toughness Index to Measure the Energy Absorption of Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 4, No. 4, November, pp. 221~227.
7. Johnston, C. D. (1982), "Definition and Measurement of Flexural Toughness Parameters for Fiber Reinforced Concrete," *Cement, Concrete, and Aggregates*, Vol. 4, No. 2, Winter, pp. 53~60.
8. Zollo, R. F. (1980), "Fibrous Concrete Flexural Testing Developing Standardized Techniques," *ACI Journal, Proceedings*, Vol. 77, No. 5, September-October, pp. 363~368.
9. ASTM Standard C 1018 (1986), "Test Method for Flexural Toughness of Fibre Reinforced Concrete (Using Beam with Third-Point Loading)," *ASTM, Philadelphia*, pp. 650~657.
10. JCI-SF4 (1984), "Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete", *JCI*, Vol. 2, pp. 45~51.
11. JSCE, Steel Fiber Reinforced Concrete Research Subcommittee (1984), "Recommendation for Design and Construction of Sreel Fiber Reinforced Concrete", *Concrete Library of JSCE No. 3, JSCE*.
12. EFNARC (1996), "European Specification for Sprayed Concrete", EFNARC.
13. Wang, Y. and Backer, S. (1989), "Toughness Determination for Fibre Reinforced Concrete", *International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 11, No.1, February, pp. 11~19.
14. RILEM 50-FMC (1985), "Determination of the Fracture Energy of Mortar and Concrete by means of Three Point Bend Tests on Notched Beams", *Materials and Structures*, Vol. 18, No.107, RILEM, pp. 33~39.
15. 구봉근, 정경섭, 김태봉 (1992), "강섬유 보강 콘크리트의 유효인성평가", *한국콘크리트학회 논문집*, 제4권 2호, pp. 103~110.
16. 배주성, 임정환, 김경수 (1998), "섬유보강 콘크리트의 인성에 대한 기존 평가방법과 TES기법에 관한 연구", *한국콘크리트학회 학술발표회 논문집*, 제10권 2호, pp. 797~802.
17. 박승범, 조광연, 신동기, 장석호, 김부일(1997), "강섬유보강 콘크리트 슬래브의 내력 및 변형특성에 관한 실험적 연구", *한국콘크리트학회 학술발표회 논문집*, pp. 327~331.
18. 전찬기 (1992), "강섬유의 형태에 따른 SFRC 보의 휨거동에 관한 연구", *대한토목학회 논문집*, pp. 95~106.
19. 전찬기 (1995), "강섬유 및 용접철망 보강 콘크리트의 거동에 관한 연구", *시립인천전문대학 논문집*, Vol. 22, pp. 181~203.
20. 전찬기, 박선규, 양성환, 한상을 (1998), "강섬유보강 Slab panel구조의 보강 효과", *한국구조물 진단학회 학술발표회 논문집*, 제2권, 2호, pp.179~184.

요 약

터널의 숏크리트 라이닝이나 포장 콘크리트 보강용으로 용접철망(wire mesh)을 대신해서 강섬유가 사용되고 있다. 본 연구에서는 강섬유 보강으로 인한 인성평가 대상 구조물을 slab panel 구조(60×60×10 cm)로 하고, 강섬유 혼입률은 콘크리트 용적의 0.5%~2%로 다양화하였다. 이 때 사용한 강섬유는 Dramix ZC type으로 직경은 0.8mm, 길이는 60mm이다. 강섬유 효과의 상대평가를 위한 용접철망(wire mesh)보강은 상면, 하면, 상하면 보강으로 하였다.

이들 실험 결과를 각국의 인성 평가 방법으로 비교 검토한 결과 슬래브(slab) 시험체 적용을 위한 EFNARC의 방법은 25mm의 처짐까지 측정하는 것이 너무 큰 것으로 평가되었고, 보의 휨인성 평가법을 적용하여 검토한 결과에서는 Johnston(II)방법에 의한 $I_{5.5}$ 가 가장 적절하였으며, JCI-SF4방법에서 지간의 1/150까지 측정하는 것은 너무 작았다.

또한 강섬유로 용접철망(wire mesh)을 효과적으로 대체할 수 있음을 알 수 있었고, 인성효과에 유용한 강섬유 혼입량은 0.5%~1%범위에 있는 것으로 나타났다.

(접수일자 : 1998.12.10)