

강섬유보강 콘크리트 슬래브의 내력 및 변형특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Load Carrying Capacity and Deformation Properties of Steel Fiber Reinforced Concrete Slab

박 승 범^{*} 조 광 연^{**} 신 동 기^{***} 장 석 호^{****} 김 부 일^{*****}
Park, Seung-Bum Cho, Kwang-Yeon Sin, Dong-Ki Jang, Seok-Ho, Kim, Bu-Il

ABSTRACT

This Study is aimed to investigate the effect of load and deflection on steel fiber reinforced concrete slab . Slabs were made with Hooked and Straight types steel fiber and compared a change of steel fiber contents and fiber type. Test were carried out to evaluate the first crack load, maximum load and deflection of slab.

At this result, the first crack load, maximum load and energy absorption capacity were increased remarkably as steel fiber contents were increased. And we found that the deflection of slab at same load were decreased as steel fiber contents were increased, too. As the aspect ratio was increased, the first crack load, maximum load and energy absorption capacity were increased.

1. 서 론

콘크리트는 경제성과 작업성이 우수하고 높은 압축강도를 가지고 있어서 오래 전부터 건설재료로 널리 사용되고 있다. 그러나, 콘크리트는 낮은 인장강도 및 휨강도를 가지며 인장 및 동적하중 하에서 급작스런 파괴를 일으키는 취성적 성질을 띠고 균열의 생성 및 성장을 억제하기 힘든 단점을 가지고 있어 구조물이 거대화, 장대화, 고층화되는 최근의 건설추세에 있어 많은 문제점을 야기시키고 있다. 그러므로 콘크리트의 낮은 휨강도, 인장강도 및 취성적 성질을 개선하여 인성을 높이고, 내진성, 내충격성, 균열저항성 등의 능력을 개선하기 위하여 콘크리트 매트릭스에 강섬유를 랜덤 분산시킨 강섬유보강 콘크리트에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있으며, 외국에서는 도로포장, 공항 활주로, 수리항만 구조물, 터널, 충격하중과 반복하중을 받는 구조물에 널리 사용되고 있다.

- 1) * 정희원, 충남대학교 토목공학과 교수
- 2) ** 정희원, 충남대학교 토목공학과 박사과정
- 3) *** 정희원, 동부건설(주) 기술연구소 선임연구원
- 4) **** 정희원, 충남대학교 토목공학과 석사과정
- 5) ***** 정희원, 충남대학교 토목공학과 석사과정

이에 본 연구에서는 3차원 랜덤 분산된 보강섬유로 인한 우수한 균열저항성 및 높은 연성과 인성을 갖는 강섬유보강 콘크리트의 우수한 역학적 성질을 슬래브에 적용하기 위하여 실험요인으로 강섬유 혼입률과 강섬유종류를 변화시켜 제작한 슬래브 공시체에 대하여 그 역학적 특성을 평가·고찰하였다.

2. 사용재료 및 시험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용한 시멘트는 국내 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 금강상류에서 채취한 강모래, 굵은골재는 충남 금산 H사에서 생산되는 최대치수 20mm의 부순돌을 사용하였다. 그리고, 강섬유는 일본 T사 제품의 치수 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$ 의 박판전단법에 의한 이형(Indented) 전단섬유와 Belgium의 B사 제품의 ZC30/0.5, ZC50/0.6, ZC60/0.8(길이/지름) 양단Hook형 강섬유를 사용하였다. 혼화제로는 표준형 AE제로 AEA202를 사용하였고, 고성능감수제로는 일본 K사 제품의 나프탈렌 설폰산염 고축합물계인 Mighty 150을 사용하였다.

2.2 배합 및 비빔방법

슬래브 구조모델 공시체에 대한 배합은 물·시멘트비, 잔골재율과 단위시멘트량을 일정하게 한 상태에서 강섬유 혼입률과 강섬유 종류별로 강섬유보강 콘크리트 슬래브를 제작하여 보통콘크리트 슬래브와 그 역학적 특성을 비교하였다. 실험요인으로는 강섬유 혼입률별 특성을 파악하기 위하여 각각의 매트릭스 배합에 대하여 ZC60/0.8의 양단Hook형 강섬유를 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 vol.%를 혼입하여 배합하였고, 강섬유 종류별 역학적 특성을 평가하기 위하여 0.5 vol.%에 대하여 ZC30/0.5, ZC50/0.6의 양단Hook형 강섬유와 $0.5 \times 0.5 \times 30\text{mm}$ 의 이형Straight 강섬유를 각각 혼입하여 비교 검토하였다.

또한 강섬유보강 콘크리트의 혼합은 섬유가 콘크리트 내에서 균등분산되고, 강섬유가 뭉치는 현상(Fiber-ball)을 방지하기 위하여 일본 C사 제품인 용량 30ℓ의 섬유분산용 Omni-Mixer를 사용하였다. 재료의 투입은 먼저 잔골재와 굵은 골재를 혼합한 후 일정한 속도로 믹서에 섬유를 혼입한 다음 시멘트, 물과 혼화제를 혼입하여 믹싱하였다.

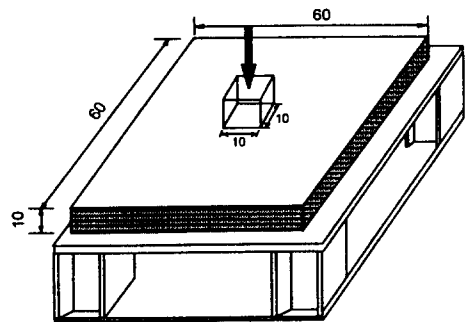
강섬유보강 콘크리트의 슬래브 구조모델에 대한 배합은 다음 표 1에 나타낸 바와 같다.

2.3 공시체 제작 및 시험방법

슬래브의 시험은 그림 1과 같이 크기 $60 \times 60 \times 10\text{cm}$ ($L \times B \times t$)의 강섬유보강 콘크리트 슬래브 공시체를 제작하여 프랑스 SNCF(철도국)와 Alpes Essais Laboratory of Grenoble가 공동개발한 방법에 따라서 실시하였다.

슬래브 모델의 제작시 표면에 섬유가 들출되지 않도록 표면을 마무리하였으며, 진동기에 의한 다짐을 실시하였다. 또한, 슬래브 모델은 재령 1일후 몰드에서 탈형하여 시험재령시까지 상온에서 젖은 형겅으로 덮은 후 습윤양생을 실시하였다.

시험시 슬래브는 내부단면적이 $50 \times 50\text{cm}$ 인



단위 : cm

그림1 슬래브시험

금속프레임 위에 장치하였고, 중앙에 10×10×5cm(B×L×t)크기의 금속재를 통하여 일정한 속도로 재하하였다. 시험은 하중이 500kg 단위로 재하될 때 슬래브의 중심에 설치한 LVDT(변위측정기)로부터 슬래브의 중앙변위를 측정하여 최대하중, 초기균열하중 및 하중-변위곡선을 얻고, 25mm 변위까지의 흡수된 에너지를 구하였다.

표1 강섬유보강 콘크리트의 슬래브 구조모델 배합

배합 번호	사용섬유		혼입률 (vol.%)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	단위중량 (kg/m ³)				
	섬유종류	섬유형상 (ℓ/d)					C	W	S	G	Fiber
Plain	-	-	0						782	977	0
H-75-0.25	강섬유 -양단Hook형	ZC60/0.8 (75)	0.25	45.3	45	4	375	170	779	974	19.6
H-75-0.5			0.5						776	970	39.3
H-75-0.75			0.75						773	966	58.9
H-75-1.0			1.0						770	963	78.5
H-83.3-0.5			ZC50/0.6 (83)						0.5	776	970
H-60-0.5		ZC30/0.5 (60)	0.5						776	970	39.3
S-532-0.5		강섬유-이형전단 Straight형	0.5×0.5×30 (60)						0.5	776	970

주) * : H-75-0.25 (양단Hook형 - 아스펙트비 - 혼입률)

3 슬래브 성능시험 결과 및 고찰

3.1 최대하중과 초기균열하중

강섬유보강 콘크리트에 대한 슬래브 모델의 시험결과 시각적으로 확인한 슬래브에 균열이 발생하기 시작하였을 때의 초기균열하중, 최대하중 및 25mm 변위까지 흡수된 에너지를 표 2에 나타내었다.

재령 28일에서의 슬래브 공시체에 대한 강섬유혼입률과 강섬유종류에 따른 초기균열하중과 최대하중을 살펴보면, 강섬유혼입률이 증가함에 따라 초기균열하중과 최대하중이 현저히 증가하여 강섬유를 1.0 vol.% 혼입하였을 경우에는 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 초기균열하중과 최대하중은 각각 175%와 96.5% 증가하였다. 강섬유를 0.25 vol.% 혼입한 경우에는 강섬유를 혼입하지 않은 슬래브에 비하여 초기균열하중은 105% 증가하여 강섬유의 적은 혼입으로도 초기균열발생을 억제시키는데 상당히 효과적임을 알 수 있었으며, 최대하중은 17.5% 증가하는데 그쳤으나, 강섬유를 0.5 vol.% 혼입한 경우에는 68.4% 증가하여 0.5vol.%이상 혼입시에 내력이 급격히 증진되는 것으로 나타났다.

한편, 동일한 강섬유혼입률에서 강섬유종류에 따른 초기균열하중과 최대하중을 살펴보면, 아스펙트비가 증가함에 따라 초기균열하중과 최대하중이 증가하는 것으로 나타났고, 양단Hook형 강섬유를 혼입한 경우가 Straight형 강섬유를 혼입한 경우보다 높은 초기균열하중과 최대하중을 갖는 것으로 나타났다.

또한 25mm 변위까지 흡수된 에너지를 살펴보면, 강섬유 혼입률이 증가함에 따라 25mm 변위까지 흡수된 에너지가 현저히 증가하는 경향을 나타내었다. 강섬유 혼입률을 0.5, 0.75, 1.0 vol.%로 증가시킬 경우 강섬유를 0.25 vol.% 혼입한 경우에 비하여 에너지흡수량이 각각 75, 104.5, 135% 증가하는 것으로 나타나 강섬유혼입률을 증가시키에 의하여 슬래브의 에너지 흡수능력 증진에 상당히 효과적인 것으로 판단된다. 또한 아스펙트비에 의한 영향을 살펴보면 동일한 강섬유혼입률(0.5 vol.%)에서 아스펙트비가 증가할 수록 25mm 변위까지 흡수된 에너지량이 증가하는 것으로 나타났으며, 양단Hook형

강섬유를 혼입한 경우 Straight형 강섬유를 혼입한 경우보다 에너지 흡수능력이 우수한 것으로 나타났다.

다음 그림2와 3에 강섬유 혼입률과 최대하중의 관계와 아스펙트비(l/d)와 최대하중의 관계를 나타내었으며, 그림 3과 4에 강섬유 혼입률과 에너지 흡수량의 관계와 아스펙트비와 최대하중의 관계를 나타내었다.

표2 슬래브 모델에 대한 시험결과

배합 번호	사용섬유		혼입률 (vol.%)	초기균열하중 (kg)	최대하중 (kg)	25mm까지의 에너지 (J)
	섬유종류	섬유형상 (l/d)				
Plain	-	-	0	2000(100)	5700(100)	-
H-75-0.25	강섬유 -양단Hook형	ZC60/0.8 (75)	0.25	4100(205)	6700(117.5)	797
H-75-0.5			0.5	4500(225)	9600(168.4)	1395
H-75-0.75			0.75	4700(235)	10200(178.9)	1630
H-75-1.0			1.0	5500(275)	11200(196.5)	1873
H-83.3-0.5			ZC50/0.6 (83)	0.5	5000(250)	11200(196.5)
H-60-0.5	ZC30/0.5 (60)	0.5	4300(215)	9200(161.4)	1132	
S-53.2-0.5	강섬유 -이형전단 Straight형	0.5×0.5×30 (53)	0.5	4100(205)	9000(157.9)	931

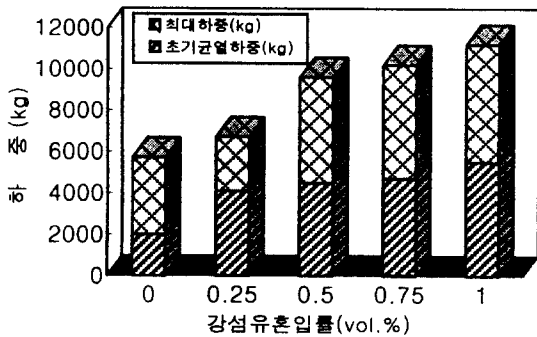


그림2 강섬유 혼입률과 최대하중의 관계(ZC60/0.8)

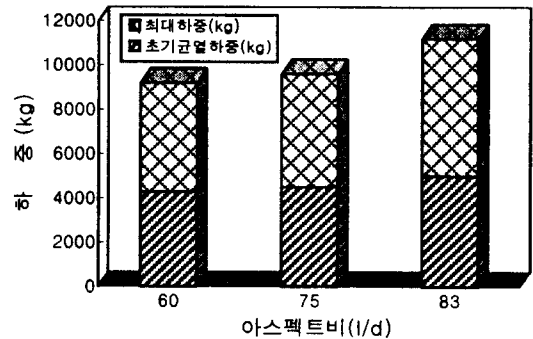


그림3 아스펙트비(l/d)와 최대하중의 관계(양단Hook형)

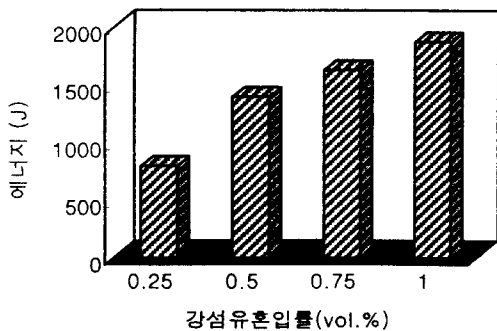


그림4 강섬유 혼입률과 에너지 흡수량의 관계(ZC60/0.8)

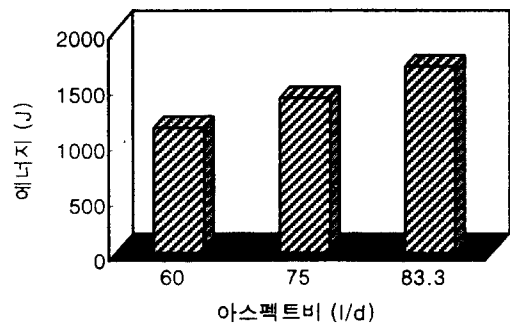


그림5 아스펙트비(l/d)와 에너지 흡수량의 관계(양단Hook형)

3.2 변위측정결과

강섬유보강 콘크리트의 슬래브 구조모델시험에서의 초기균열하중과 최대하중의 경향을 살펴보면, 슬래브에서의 강섬유보강효과는 보공시체에 대한 휨강도시험결과와 다른 양상을 보여주고 있다. 즉, 보공시체에 대한 휨강도시험에서는 최대하중이 초기균열하중을 크게 초과하지 않으나, 슬래브시험에서는 초기균열발생후 하중의 재분배로 인하여 최대하중까지 하중의 증가가 계속된다. 특히 보통콘크리트의 경우 최대하중에 도달하여 갑작스러운 슬래브의 파괴가 발생하는 것에 반하여, 강섬유를 혼입할 경우 최대하중 이후에도 지속적인 변위가 발생하는 것으로 나타나 강섬유의 혼입이 최대하중 이후의 내력 증가에 상당한 영향을 미치는 것으로 판단된다.

또한 슬래브 중앙점의 처짐변형성능을 살펴보면 5,500kg 재하시 강섬유혼입률이 증가할수록 변위는 17.6~58.8% 감소하는 것으로 나타났으며, 다른 하중에 대하여서도 유사한 경향을 나타내어 강섬유 혼입률이 증가할수록 동일하중에서의 변형이 감소하는 것으로 판단된다. 다음 그림 6과 7에 슬래브의 하중-중앙변위곡선을 섬유혼입률과 강섬유종류별(아스펙트비별)로 나타내었으며, 그림 8과 9에 강섬유혼입률에 따른 하중별 슬래브 중심에서의 변위를 나타내었다.

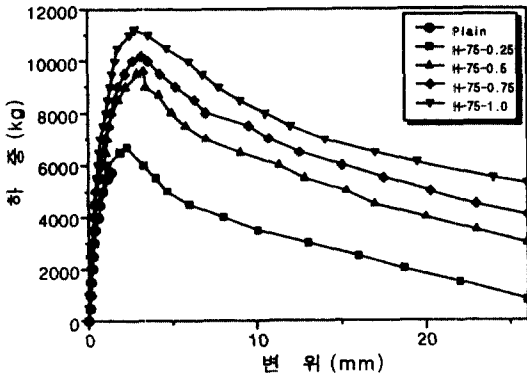


그림6 슬래브의 중심부에서의 하중-중앙변위(섬유혼입률별)

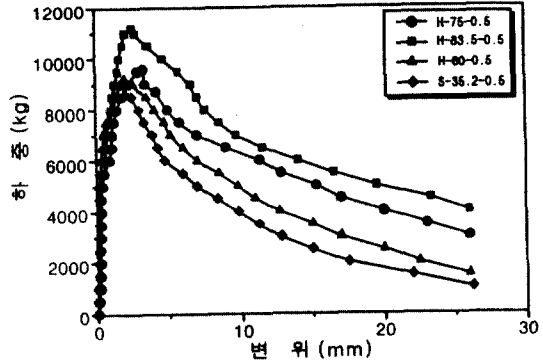


그림7 슬래브의 중심부에서의 하중-중앙변위(강섬유종류별)

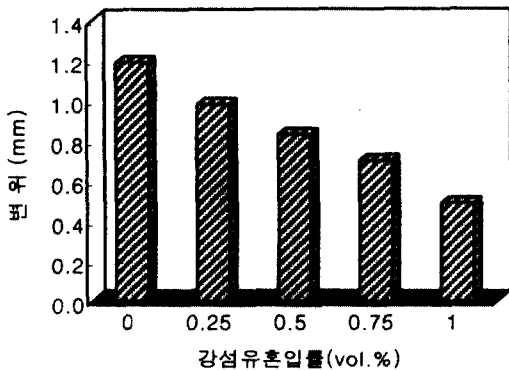


그림8 강섬유혼입률과 변위의 관계 (5,500kg 재하시)

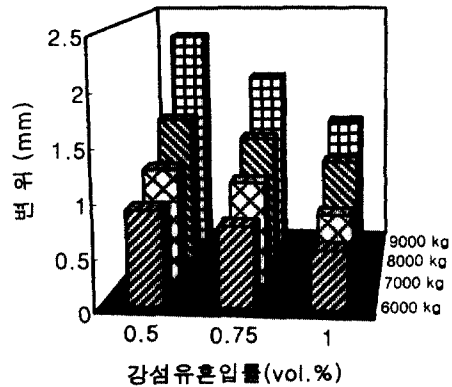


그림9 강섬유혼입률과 변위의 관계 (하중별)

4. 결 론

강섬유 혼입률별, 강섬유 종류별로 제작한 강섬유보강 콘크리트 슬래브 모델에 대한 내력 및 변형성능 시험 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강섬유혼입률에 따른 초기균열하중, 최대하중 및 에너지 흡수능력을 살펴보면, 강섬유혼입률을 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 vol.%로 증가시켰을 때 강섬유를 혼입하지 않은 경우에 비하여 초기균열하중의 경우 각각 105, 125, 235, 275% 증가하는 것으로 나타났고, 최대하중은 각각 17.5, 68.4, 78.9, 96.5% 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 슬래브 중앙에서의 25mm 변위까지 흡수된 에너지의 경우 강섬유혼입률을 0.25 vol.%에서 0.5, 0.75, 1.0 vol.%로 증가시켰을 때 각각 75, 104, 135% 증가하는 것으로 나타나 강섬유혼입률의 증가로써 집중하중을 받는 슬래브의 균열저항능력, 내력 및 에너지 흡수능력을 현저히 증가시킬 수 있는 것으로 판단된다.
- (2) 아스펙트비(l/d)에 따른 초기균열하중, 최대하중 및 에너지 흡수능력을 살펴보면, 동일한 강섬유 혼입률에서 아스펙트비 60의 강섬유를 혼입한 경우에 대하여 아스펙트비를 75, 83.3으로 증가시킬 수록 초기균열하중 및 최대하중이 증가하는 것으로 나타났는데, 특히 25mm 변위까지 흡수된 에너지의 경우 각각 23.2, 48.1% 증가하는 것으로 나타나 아스펙트비가 큰 강섬유의 혼입이 슬래브의 균열저항능력 및 내력 향상에 효과가 있는 것으로 판단된다.
- (3) 동일한 강섬유혼입률에서 이형Straight 강섬유보다는 양단Hook형 강섬유를 사용할 때 더욱 큰 내력 증진효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 슬래브의 처짐변형성능을 살펴보면 5,500kg 재하시 강섬유혼입률이 증가할수록 변위는 17.6~58.8% 감소하는 것으로 나타났으며, 다른 하중에 대하여서도 유사한 경향을 나타내어 강섬유 혼입률이 증가할수록 동일하중에서의 변형이 감소하는 것으로 판단된다.
- (5) 슬래브 구조물에 강섬유보강 콘크리트를 적용함으로써 슬래브의 균열발생 억제작용으로 철근의 부식으로 인한 구조물의 파괴발생의 위험성도 줄어들게 될 것으로 판단되며, 보통의 콘크리트 슬래브에서 보강철근에 대한 피복두께를 줄일 수 있기 때문에 슬래브의 자중을 상당히 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 충남대학교와 동부건설(주) 기술연구소 공동으로 수행된 건교부 '97 건설기술연구개발사업의 연구내용중 일부임을 밝히며, 본 연구를 위하여 협조하여 주신 관계당국과 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 「Fiber Reinforced Concrete」, sp-81, American Concrete Institute, Detroit, 1984, pp.452
2. 小林一輔, 「纖維補強コンクリート特性と應用」, オーム社, pp.33-35, 1982.
3. Swamy R. N., Ali S. A. R., 「Punching Shear Behavior of Reinforced Slab-Column Connection made with Steel Fiber Concrete」, J. of ACI, Vol. 79, No.5, pp.392~406, 1982
4. 河野 清·外, 「纖維材料の小型平板への有効利用に関する検討」, セメント技術年保, pp.363~366, 1979
5. Matthew J. K., Clements B. E., 「Measuring the Performance of Steel Fibre Reinforced Shotcrete」, Australian Tunneling Conference, pp. 261-268, 1996