

FRP 횡보강근을 이용한 RC 교각의 내진성능 평가 실험

Experimental Evaluation for Seismic Performance of RC Bridge Piers with FRP Confinement

정영수* 박진영** 박창규*** 서진원****
Chung, Young Soo Park, Jin Young Park, Chang Kyu Seo Jin Won

ABSTRACT

Recently, there are much concerns about new and innovative transverse materials which could be used instead of conventional transverse steel in reinforced concrete bridge piers. FRP materials could be substituted for conventional transverse steel because of their sufficient strength, light weight, easy fabrication, and useful applicability to any shapes of pier sections, such as rectangular or circular sections.

The objective of this research is to evaluate the seismic performance of reinforced concrete bridge pier specimens with FRP transverse reinforcement by means of the Quasi-Static test.

In the first task, test columns were made using FRP rope, but these specimens appeared to fail at low displacement ductility levels due to insufficient confinement of strand extension itself. Therefore, the second task was to evaluate the seismic performance of test specimens transversely confined with FRP band. Although FRP banded specimens showed lower seismic performance than the specimen with spiral reinforcing steel, it satisfied with the response modification factor, 3, required for the single column of Korea bridge roadway design code. It was concluded that FRP band could be efficiently substituted for conventional reinforcing steel.

1. 서론

철근 콘크리트 교량 교각의 경우, 종방향 철근과 심부 콘크리트에 대한 횡방향 구속을 위하여 띠철근과 나선철근을 사용하여 심부 콘크리트를 횡구속하여 왔다. 직경이 비교적 큰 원형 교각의 경우에는 철근을 나선으로 가공하여 시공하는 것이 거의 불가능하기 때문에 원형 띠철근을 사용

* 정 회 원 · 중앙대학교 토목공학과, 교수
** 학생회원 · 중앙대학교 토목환경공학과, 석사과정
*** 학생회원 · 중앙대학교 토목공학과, 박사과정
**** 정 회 원 · 한국도로공사 도로교통기술연구원 선임연구원

하여 배근한다. 이러한 띠철근이나 나선철근은 대구경 교각의 경우, 사용되는 철근의 직경이 커지므로 중량이 무겁고 가공 및 조립에 많은 시간과 노력이 소요되고 있으며, 그에 따라 작업효율이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 또한, 내진 설계 교각의 경우 띠철근 및 보강철근의 갈고리 규정으로 인해 철근 가공 및 조립 과정이 매우 복잡하여 그 대체방안이 꾸준히 제기되고 있는 실정이다. 따라서, 강제 재료를 사용하는 종래의 철근 콘크리트 구조물의 보강철근이 가지는 문제점을 해결하고 이들 철근보다 더 우수한 성능을 가질 수 있는 대체재료를 개발할 필요성이 대두되고 있다. 미국의 C-BAR에서는 대체재료로서 유리섬유 Bar를 사용하고자 하는 많은 노력을 경주하고 있으며 ACI 440R-96 등에 관련 state-of-the-art 들이 제시되고 있다. 따라서, 본 연구에서도 철근 콘크리트 교각의 띠철근 및 나선철근을 대체할 수 있는 충분한 강도를 가지고 있으면서도 경량이며 유연성을 가지고 있고 가공과 조립이 용이하여, 사각형이나 원형 등 어떠한 단면 형태의 구조물에 대해서도 나선형 배근이 가능함으로써 구조적인 안전성을 보장할 수 있는 새로운 보강근을 개발하고자 하였다.

실험연구의 1단계로 단면형태에 관계없이 현장에서 직접 시공이 가능하도록 로프형 FRP(GFRP 로프)를 제작하여 실험을 수행하였으나, GFRP 로프내에 배치된 섬유가 일체로 작용하지 못하고, 바깥쪽에 배치된 섬유부터 단계적으로 파단되면서 횡방향구속력을 급격하게 상실하는 것으로 나타났다. 이에 2단계 실험연구에서는 섬유를 일체화시키고, 좀 더 큰 변형에서도 견딜 수 있도록 열경화성 수지를 사용하여 밴드형태의 GFRP 횡보강근을 제작하였으며, 준정적 실험을 통해 철근을 사용한 실험체와 성능을 비교 분석하였다.

2. 실험내용

2.1 재료의 물성

콘크리트는 목표 압축강도 240 kgf/cm²의 레미콘을 사용하였으며, 재령 28일의 압축강도시험결과 288 kgf/cm²의 강도를 얻었다. 철근은 KS D 3504에 의한 SD30인 D16의 상용 철근을 주철근으로, D10을 띠철근으로 사용하였으며, KS B 0820에 따라 각각 3개의 시편에 대한 인장시험을 실시하여 각각 평균 항복강도 3,700 kgf/cm²와 4,300 kgf/cm²를 얻었다.

횡보강근으로 사용된 GFRP는 철근의 항복시 인장력인 2.14 tonf를 갖도록 설계하여 섬유량이 4,400TEX 7가닥을 기준으로 하였다. 그림 1은 로프형과 밴드형 GFRP의 인장시험결과이다.

그림 1에서 보면, 로프형 GFRP의 경우 목표했던 인장력에 미치지 못하고 있는 데, 이는 섬유가 일체로 작용하지 못하여 바깥쪽에 배치된 섬유부터 차례로 파단되어 제 강도를 발휘하지 못했기 때문으로 사료된다. 반면, 같은 섬유량의 밴드형 GFRP는 섬유가 비교적 일체로 작용하여 목표했

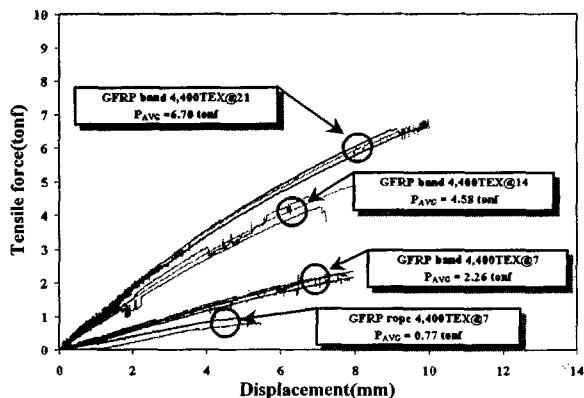


그림 1 GFRP의 인장시험결과

던 인장력 이상을 나타내고 있다. 또한 섬유량을 2배와 3배로 증가시킨 밴드형 GFRP는 인장력 역시 약 2배와 3배의 증진효과를 보였다.

2.2 실험체 개요

GFRP를 횡보강근으로 사용한 실험체와 비교대상인 철근 실험체는 현행 도로교설계기준(2000)의 내진설계편에서 제시하고 있는 소성힌지에서의 심부구속을 위한 원형기둥의 나선철근비 규정을 적용하여 5 cm로 하였다. 그림 2는 교각 실험체의 제원이다.

한편, 밴드형 GFRP는 그림 1과 같이 목표 인장력을 충분히 보유하고 있어 표 1과 같이 철근 실험체와 동일한 간격으로 배근한 실험체를 제작하였으며, 배근 간격에 따른 성능차이를 비교하기 위해 배근간격을 30% 감소시킨 실험체(s=3.5 cm)와 증가시킨 실험체(s=6.5 cm)를 제작하였다. 또한 섬유량 증가에 따른 거동특성변화를 파악하기 위해 기준 섬유량인 4,400TEX 7가닥을 1가닥 감소시킨 실험체와 증가시킨 실험체, 그리고 섬유량을 2배 및 3배 증가시킨 실험체를 추가하였다.

표 1 실험변수에 따른 실험체 개요

횡 방향 근	규 격	실험체명	배근간격 (mm)	주철근비 (%)	축력 (tonf)
나선철근	D10	S-SP50	50	1.50	67.8 $\frac{P}{A_g f_{ck}} = 0.1$
밴드형 GFRP	4,400TEX@4	G4-SP35-G	35		
	4,400TEX@6	G6-SP50-G	50		
	4,400TEX@7	G7-SP35-G	35		
		G7-SP50-G	50		
		G7-SP65-G	65		
	4,400TEX@8	G8-SP50-G	50		
	4,400TEX@14	G14-SP50-G			
4,400TEX@21	G21-SP50-G				

※註 : S (철근 실험체), G4,6,7,8,14,21 (GFRP 밴드), SP (나선근)

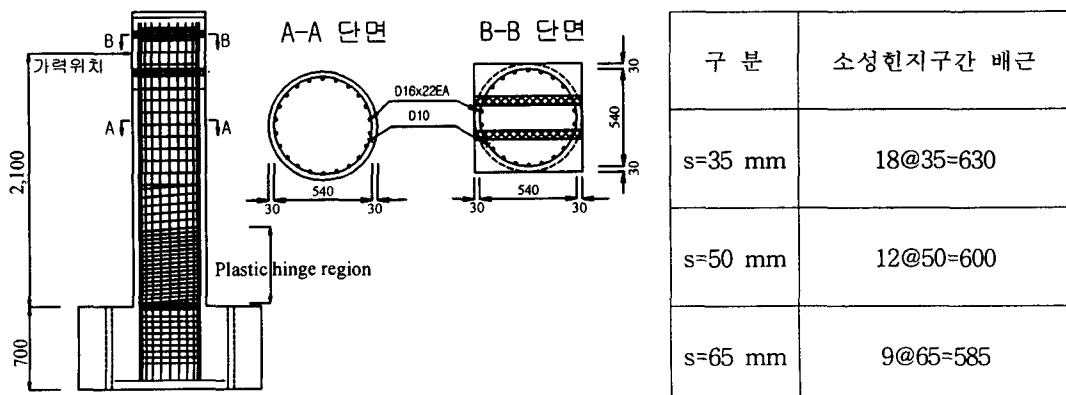


그림 2 교각 실험체 제원

2.2 실험 방법

본 연구에서는 FRP 횡방향근의 심부구속 능력을 평가하기 위해 준정적 실험을 수행하였으며, 축방향력은 100 tonf 용량의 오일잭을 이용하여 일정하게 유지하면서 1,000 kN MTS hydraulic actuator로 그림 3과 같은 형태의 변위제어 방식으로 횡방향 하중을 재하하였다.

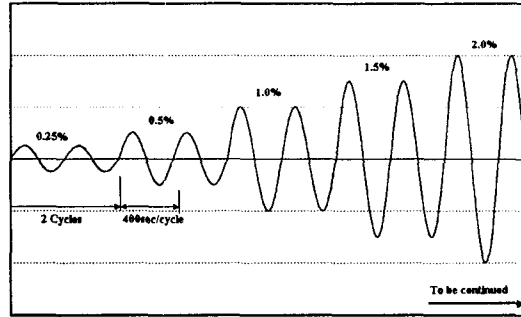


그림 3 횡방향 하중 재하형태

재하된 횡방향 변위는 교각 높이에 대한 비율(drift level)로서, 일반적으로 이론적인 철근 콘크리트 교각의 항복변위가 drift level 0.5%

~ 1.0%인 점을 감안하여 0.25%에서 실험을 시작하고, 0.5%부터는 초기의 급작스런 파괴를 방지하기 위하여 0.5%씩 증가 시켰으며, drift level 3.0% 이후부터는 교각 실험체가 파괴에 이를 때까지 1.0%씩 증가시켜가며 두 번씩 반복 재하 하였다.

3. 실험 결과

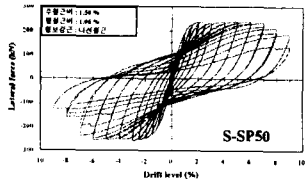
3.1 하중-변위 이력곡선

나선철근 실험체인 S-SP50은 그림 4의 (a)에서 보는 바와 같이 뛰어난 연성능력을 나타내고 있다. 이 실험체의 파괴양상을 보면, Drift level $\pm 0.25\%$ 일 때 교각 하단 200 mm 지점에서 길이 250 mm의 최초균열이 발생하였다. 그 후 계속 균열이 진전 또는 발생하다가 Drift level $\pm 2.0\%$ 에서 처음 수직균열이 발생하고 $\pm 5.0\%$ 에서 콘크리트 피복이 완전히 박리 되었다. 최대 횡방향 하중은 피복이 완전히 박리된 시점인 Drift level $\pm 5.0\%$ 에서 24.1 tonf를 나타냈으며, Drift level $\pm 7.0\%$ 에서 주철근이 파단 되기 시작하여 $\pm 9.0\%$ 까지 모두 9개의 주철근이 파단 되었다.

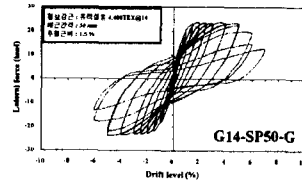
나선철근 실험체와 동일한 간격으로 횡보강근을 배근한 실험체는 유리섬유 4,400TEX 6가닥, 7가닥, 8가닥, 14가닥, 21가닥을 사용한 5기이며, 그림 4의 (b) ~ (i)를 보면, GFRP 4,400TEX 6가닥 ~ 8가닥을 사용한 실험체는 변형능력에서 큰 차이를 보이지 않았다. 한편, 섬유량을 2배 및 3배로 증가시킨 G14-SP50-G와 G21-SP50-G는 비록 띠철근에는 미치지 못하였으나, 상당한 소성 변형능력의 증진 효과가 있음을 알 수 있다.

그림 5는 실험변수에 따른 하중-변위 포락곡선을 나타낸다. 그림 5의 (a)를 보면 배근간격이 50 mm일 경우 섬유량을 증가시킬수록 우수한 소성변형능력을 나타내고 있으며, 동일한 섬유량(GRP 4,400TEX@7)에서 배근간격에 따른 성능차이를 비교해 보면, 그림 5의 (b)와 같이 배근간격이 작을수록 우수한 소성변형 능력을 나타냈다.

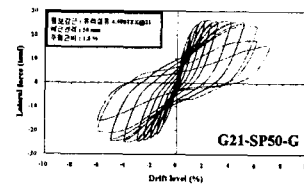
한편, GFRP 밴드를 횡보강근으로 사용한 실험체의 파괴 양상을 보면, 모든 실험체가 Drift level 0.5%에서 최초 휨균열이 발생되고, 계속 휨균열이 진전되다가, 35 mm로 배근한 G4-SP35-G와 G7-SP35-G 실험체는 Drift level 4.0%에서, 나머지 실험체는 Drift level 3.0%에서 피복이 완전히 박리되었다. 띠철근 실험체는 피복이 박리된 후에도 상당한 소성변형을 일으키다가 반복좌굴로 인해 주철근이 파단 되지만, GFRP 실험체는 피복이 박리되는 시점에서 횡방향근이 파단되면서 휨구속력을 상실하기 때문에 주철근의 파단은 발생되지 않았다.



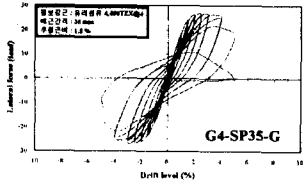
(a) 나선철근



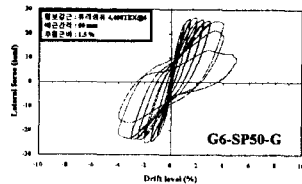
(b) 4,400TEX@14(50 mm)



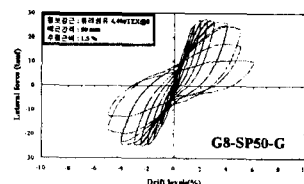
(c) 4,400TEX@21(50mm)



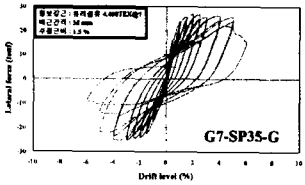
(d) 4,400TEX@4(35 mm)



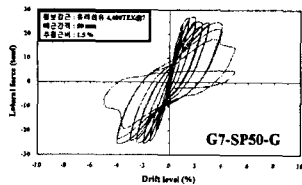
(e) 4,400TEX@6(50 mm)



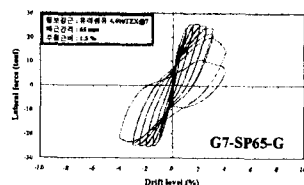
(f) 4,400TEX@8(50mm)



(g) 4,400TEX@7(35 mm)

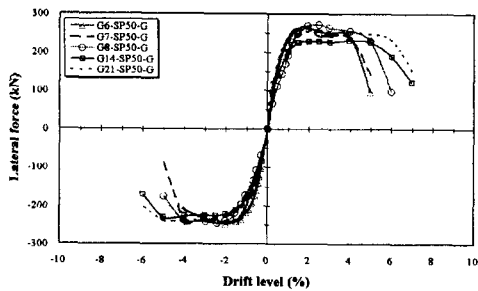


(h) 4,400TEX@7(50 mm)

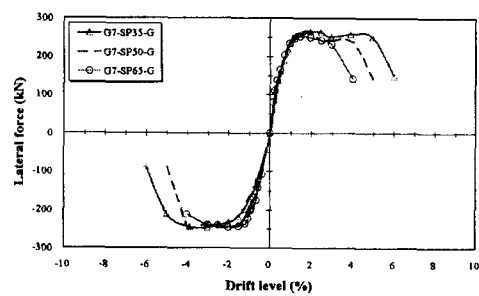


(i) 4,400TEX@7(65 mm)

그림 4 각 실험체별 하중-변위 이력곡선



(a) 섬유량에 따른 변화



(b) 배근간격에 따른 변화

그림 5 실험변수에 따른 하중-변위 포락곡선

3.2 변위 연성도

변위연성도는 극한변위와 항복변위의 비로 나타내는 데 본 연구에서 항복변위는 하중-변위 포락곡선상에서 공칭모멘트강도(M_n)에 해당하는 횡력(V_i)을 지나는 수평선과 원점에서 공칭모멘트강도의 75%에 해당하는 횡력($0.75V_i$)을 지나는 직선과의 교점으로 정의하였고, 극한변위는 최대횡방향하중이 20% 감소했을 때의 변위로 각각 정의하였다.

표 2는 각 실험체별 항복변위 및 극한변위, 그리고 변위연성도를 나타낸다. 국내 도로교설계기준에서는 단주일 경우 응답수정계수 3을 요구하고 있는 데, 이를 식 (1)에 대입하면 요구연성도가 5 이상임을 알 수 있다.

$$R = \sqrt{2\mu - 1} \quad (1)$$

표 2 각 실험체별 변위 연성도

실험체명	횡방향 하중 (tonf)		횡방향 변위 (mm)		변위연성도
	항복하중	극한하중	항복변위	극한변위	
S-SP50	20.29	20.98	15.41	182.76	11.86
로프형 G7	20.68	22.65	18.44	84.02	4.56
G4-SP35-G	20.76	20.99	23.98	96.58	4.03
G6-SP50-G	20.36	24.07	14.67	89.71	6.12
G7-SP35-G	20.38	20.09	15.41	114.14	7.41
G7-SP50-G	20.55	22.85	15.19	91.78	6.02
G7-SP65-G	20.36	22.63	14.47	70.43	4.87
G8-SP50-G	21.38	23.37	23.41	107.54	4.59
G14-SP50-G	20.00	19.10	17.04	127.50	7.48
G21-SP50-G	20.11	21.25	16.15	132.63	8.21

나선철근 실험체인 S-SP50은 11.86의 뛰어난 연성능력을 보여주고 있는 반면, GFRP 실험체들은 다소 나선철근의 연성능력에는 미치지 못하고 있다. 그러나, 섬유량을 2배 및 3배로 증가시킨 G14-SP50-G와 G21-SP50-G 실험체는 연성능력이 상당히 향상되었음을 알 수 있다.

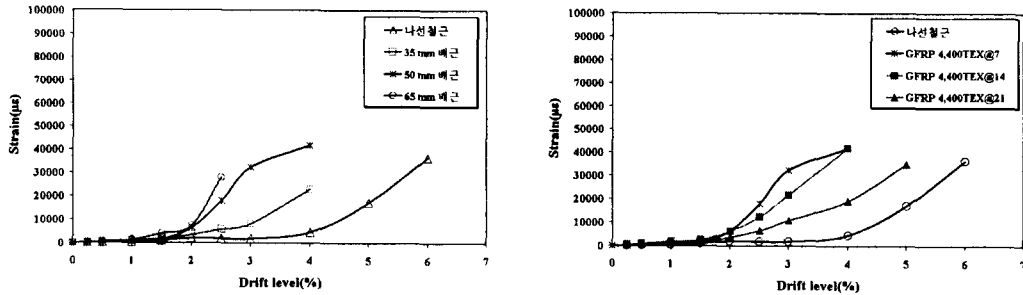
GFRP 로프와 동일한 섬유량을 갖도록 제작한 G7계열의 실험체는 50 mm와 35 mm로 배근한 경우 GFRP 로프 실험체(변위연성도 4.56) 보다 약 30% ~ 60%의 연성능력 향상을 나타냈다. 이는 GFRP band 내부의 섬유가 일체로 작용하여 횡구속능력이 증진되었기 때문으로 사료된다.

한편, 섬유량을 2배 ~ 3배로 증가시킨 G14-SP50-G 실험체와 G21-SP50-G 실험체는 이보다 더욱 향상된 64% ~ 80%의 연성능력이 증진되었다. GFRP를 횡보강근으로 사용할 경우 로프형 보다는 열경화성 수지를 사용하여 밴드형으로 제작한 것이 횡방향 구속효과가 더욱 뛰어난 것으로 보이며, 배근 간격을 30% 감소시킬 경우 약 23%의 연성능력이 향상되는 것으로 나타났다. 반면, 배근간격을 30% 증가시킬 경우 연성능력이 약 23% 감소하는 경향을 보였다. 또한, 섬유량을 200%와 300% 증가시킨 실험체는 각각 연성능력이 24%와 36% 향상되어 GFRP 밴드 역시 철근과 같이 배근간격과 섬유량의 변화가 횡방향 구속효과에 영향을 주는 것으로 판단된다.

3.3 횡방향근의 변형률

그림 6 (a)는 나선철근과 GFRP 4,400TEX@7을 횡방향근으로 사용한 실험체의 변형률 변화를 나타낸 것이다. 나선철근의 변형률은 Drift level 4.0%까지 매우 안정적인 모습을 보여주고 있으나, GFRP 실험체의 경우에는 배근 간격이 클수록 초기에 급격한 변형률 증가를 나타내는 데, 이

는 배근 간격이 클수록 횡방향근의 체적비가 작아져 상대적으로 큰 응력이 집중되었기 때문이다.



(a) 배근간격 변화에 따른 변형률

(b) 섬유량 증가에 따른 변형률

그림 6 횡방향근의 변형률

그림 6의 (b)와 같이 섬유량 변화에 따른 횡방향근의 변형률을 보면, 섬유량이 가장 많은 GFRP 4,400TEX@21이 나선철근의 안정적인 변형률 변화에 근접하고 있으며, GFRP 4,400TEX@14는 섬유량이 50%에 불과한 GFRP 4,400TEX@7과 Drift level 4.0%에서 유사한 변형률을 나타냈으나, Drift level 2.0% 이후의 변형률 증가율이 상당히 둔화되었음을 알 수 있다.

나선철근과 같은 뛰어난 소성변형능력을 확보하기 위해서는 섬유량을 좀더 증가시키거나 배근 간격을 조밀하게 해야할 것으로 사료되며, 실물 교각의 경우 대부분 대구경임을 감안하면 GFRP의 단면을 좀더 크게 하고, 배근간격을 작게 하더라도 충분히 시공성을 확보할 수 있으며 나선철근의 소성변형능력에도 도달될 수 있을 것으로 판단된다.

3.4 등가이력감쇠비

모든 철근콘크리트 구조물은 지진활동 등에 의해 비선형 거동을 보이는 데, 이 과정에서 반복하중에 따른 비선형 거동에 의한 이력감쇠가 발생한다. 등가이력감쇠비(ξ_{eq})는 그림 7과 같이 실험시 1 Cycle의 하중-변위 이력거동에서 나타나는 에너지 소산능력에 관계되며 식 (2)로 표현할 수 있다.

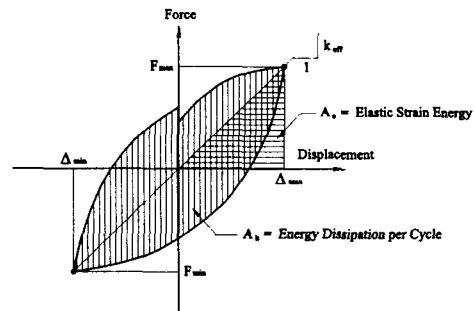


그림 7 이력거동에 의한 에너지 소산

$$\xi_{eq} = \frac{A_h}{4\pi A_e} = \frac{A_h}{2\pi V_m \Delta_m} \quad (2)$$

그림 8은 각 실험체별 등가이력감쇠비와 잔류변형을 나타낸다. 50 mm의 배근간격을 갖는 실험체는 횡방향근으로 사용된 재료에 관계없이 초기 탄성구간에서의 이력감쇠비가 5%정도를 보이고

있어 일반적인 철근콘크리트 교각의 유효감쇠비 5%와 비교적 잘 부합되며, GFRP가 파단되기 이전인 Drift level 4.0% 까지 약 18% ~ 20%의 유사한 이력감쇠를 나타내고 있다.

이는 GFRP 재료가 횡방향 철근 대응으로 콘크리트 교각에 사용되더라도 철근콘크리트 교각과 유사한 이력거동을 보일 수 있다는 가능성을 제시하는 것이다.

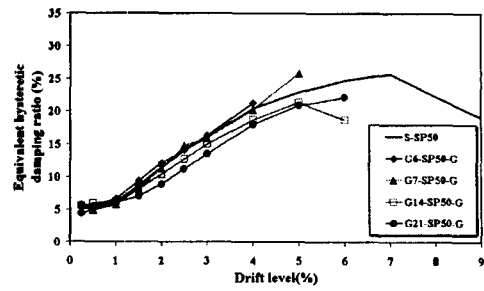


그림 8 섬유량에 따른 등가이력감쇠비

4. 결 론

1. 나선철근 실험체는 뛰어난 소성변형능력을 나타냈으며, GFRP 밴드를 횡보강근으로 사용한 실험체는 전체적으로 로프형 GFRP보다 우수한 소성변형능력을 보유한 것으로 보인다. 이것은 GFRP 밴드내에 있는 섬유가 일체로 거동하여 효과적으로 심부구속력을 증진시킨 것으로 판단된다.
2. 동일한 섬유량을 갖는 GFRP 밴드 실험체에서는 배근 간격이 작을수록 우수한 연성능력을 보였으며, 동일한 배근 간격에서는 섬유량이 많을수록 연성능력이 향상되었다.
3. 실물 교각은 일반적으로 대구경임을 감안하면 섬유량을 더 증가시키더라도 시공성을 확보할 수 있으므로 GFRP 밴드의 철근 대체재료로서 가능성은 충분한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국도로공사 “교각의 심부구속방법에 관한 실험 연구”의 일환으로 수행되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. ACI Committe 440, "State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures", ACI Manual of Concrete Practice, Part 5, American Concrete Institute, 2002
2. Faza, S., "Behavior of Concrete Members Reinforced with Fiber Reinforced Plastic Rebars", PhD dissertation, West Virginia University, 1991, pp.148~154
3. M. J. N. Priestley, F. Seible, G. M. Calvi, "Seismic Design and Retrofit of Bridges", John Wiley & Sons Inc., 1996
4. 건설교통부, “도로교설계기준”, 한국도로교통협회, 2000
5. 이대형, “원형 콘크리트 교각의 내진성능 평가에 관한 이론 및 실험적 연구”, 중앙대학교 박사 학위 논문, 1999