콘크리트 충진 FRP 거더의 전단재하 실험에 관한 연구

A Study on Shear Strength Test for FRP Girder of Filled Concrete

곽 계 환† 장 화 섭* 김 우 종* 김 희 옥*
Kwak, Kae-Hwan Jang, Hwa-Sup Kim, Woo-Jong Kim, Hoi-Ok
(논문접수일 : 2008년 3월 17일 ; 심사종료일 : 2008년 5월 23일)

요 지

섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymer, FRP)는 경량성, 높은 설계기준강도, 비전기 비자성 및 내부식성의 특징 등으로 인하여 최근 건설분야에서 많은 연구가 진행되고 있다. 그 중 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)는 가격 경쟁성에서 우수하여 일반적으로 많이 사용되고 있다. 그러나 GFRP는 상대적으로 낮은 탄성계수를 가지고 있어 처짐이 과대하게 발생함으로 구조부재 단면으로서 활용되기 위해서는 단면이 커야하며, 설계시 사용하중에 의한 처짐 제한에 대한 검토를 실시해야 한다. 이에 본 연구에서는 언급된 기술적인 문제점을 해결하기 위하여 대형 단면의 적용이 가능하도록 모듈형식의 단면을 제안하였다. 그리고 FRP의 낮은 강성을 확보하기 위하여 콘크리트를 충진하는 새로운 FRP+콘크리트 합성 거더 형상을 개발하였다. 개발된 FRP+콘크리트 합성 거더의 전단지간비와 콘크리트 충진 여부에 따른 전단강도 및 처짐, 중립축 변화를 확인하고자 전단실험을 실시하였다.

핵심용어 : 합성, FRP, 거더, 전단 강도

Abstract

Fiber Reinforced Polymer, FRP has a light weight, a high tensile strength based on design, non-electronic, non-magnetic, and rust-resistant feature, etc and many researches are being conducted recently on FRP in the construction area. Among them, GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer) is excellent in price competitiveness and is widely being used. However, since GFRP has a relative low modulus of elasticity and causes excessive deflection, the section must be large to be used as a structural component and an investigative review must be carried out in design to set the limit for deflection by the use load. Therefore, in order to solve the mentioned technical problems, this study suggested a section of a module form such that application of a large-scale section is possible. Also, to secure the low rigidity of FRP, this study developed a new FRP+ concrete composite girder form that confined the concrete. To identify the structural movement of the developed FRP+ concrete composite girder, shear strength test was carried out.

Keywords *: composite, FRP, girder, shear strength*

1. 서 론

차세대 건설분야 중 구조물 건설에서 강재, 콘크리트의 재료 성능을 획기적으로 능가하는 신소재의 활용은 중요한 문제로 대두되고 있다. 미래의 건설분야에서 사용될 신소재로서 그 가능성이 가장 높고 활용성이 증대되고 있는 구조 재료는 섬유복합재료(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)이다. FRP재료들은 내 부식성이 강한 재료로서 열악한 환경에서도 내구성이 높은 장점이 있을 뿐만 아니라 가볍고, 강도가 크며, 전자기성을 띠지 않는 등 재료특성이 우수하여 현재 국내외적으로 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다.

그동안 FRP 재료는 많은 장점에도 불구하고 산업화가 되기에는 그 비용이 너무 고가였기 때문에 극히 제한적으로 활용되었다. 그러나 최근 들어 FRP 산업의 중요성이 증대되어 꾸준한 연구와 투자를 통해 획기적인 비용 절감이 가능할 뿐 아니라 FRP의 적용 사례가 증가하는 추세이다. 특히 토목구

† 책임저자, 정회원 · 원광대학교 토목환경도시공학부 교수
Tel: 063-850-6720 ; Fax: 0505-850-6867
E-mail: kkh6720@wonkwang.ac.kr
* 원광대학교 토목환경공학과 박사과정

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 10월 31일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 12월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

조 분야에서는 구조물의 보수와 보강 재료로서 각광을 받기 시작하였으며, FRP가 고강도이면서 부식하지 않는다는 재료의 장점에 콘크리트 구조물의 철근 및 긴장재 등을 대체할 수 있는 보강 재료로서 활용되기 시작하였다.

해외 선진국들은 FRP부재로만으로 고성능 교량을 시공한 사례가 조사되고 있다. 현재 국내에서도 FRP부재를 이용하여 바닥판과 압축부재를 개발하는 연구가 활발히 진행 중이거나 완료 상태이나, FRP거더 개발을 위한 연구는 현재 국내에서 전무한 상태이다. 거더의 특성상 교량의 모든 상부구조인 바닥판과 난간, 그리고 거더 자체적인 하중을 견뎌야 하는 역할을 수행하여야 하기 때문에 내구성의 신뢰도가 다소 낮고, 강재보다 낮은 탄성계수로 인한 큰 처짐량으로 하여금 FRP부재로의 거더 개발이 아직 이루어지지 않았다.

이에 본 연구에서는 FRP거더를 설계·제작하였으며, FRP의 처짐 및 강성을 확보하기 위하여 FRP 거더 상부에 콘크리트를 타설하는 FRP+콘크리트 합성 거더를 제안하였다. 본 실험은 FRP+콘크리트 합성 거더의 전단 강도의 특성을 확인하기 위하여 전단지간 깊이비와 콘크리트 합성 여부에 따른 극한하중 및 처짐, 중립축의 변화를 규명하였다.

2. 실험 개요

2.1 FRP거더 제작

본 연구에서 제작한 FRP거더는 현재 국내에서 생산 가능한 최적 단면으로 생산하였으며, 면내 전단에 취약부인 웹과 플랜지가 만나는 부분은 Fig. 1과 같은 헌치를 두어 보강하였고, 대형 모듈화를 위하여 그림과 같은 요철을 두어 조립 가능한 단면으로 설계·제작하였다.

FRP 제작 시 자주 사용되는 섬유는 탄소, 아라미드, 유리섬유로 이 중 탄소섬유가 가장 강도가 강하게 나타나나 고가인 관계로 본 실험에서는 유리섬유 즉, GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)로 제작하였다. Fig. 2는 인발성형공법을 이용한 거더의 생산과정이고 Fig. 3은 최종 개발된 FRP거더의 소형 모듈 형상이다. 아래 Table 1은 FRP거더에 사용된 재료의 물성치를 나타낸 것이다.

Table 1 Data for material used in pilot tests

구성	상품명	배합비(%)
Resin 1	크레이밸리 KCI-100	100.0
Filler	Omya #5	37.0
저수축제	Q-6016	15.0
이형제	KP-175	1.2
저온경화제	PERKADOX16	1.3
중온경화제	TRIGONOX	0.3
고온경화제	LUPEROX	0.3
합 계		155.1

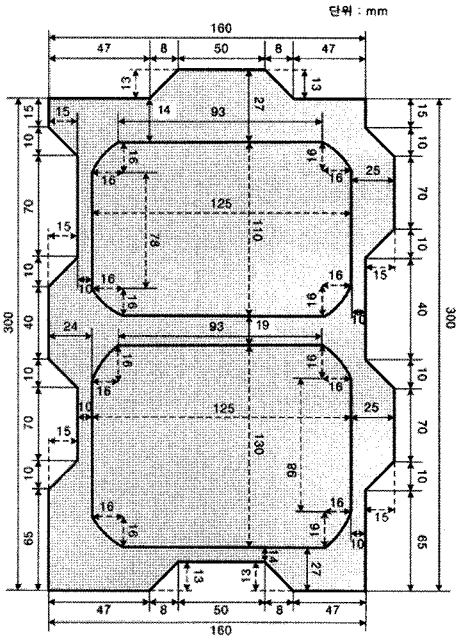

Fig. 1 A design drawing of FRP Girder's module

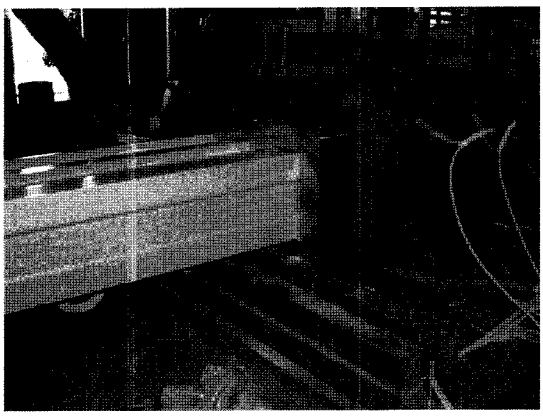
Fig. 2 A production process of FRP Girder(Pultrusion)

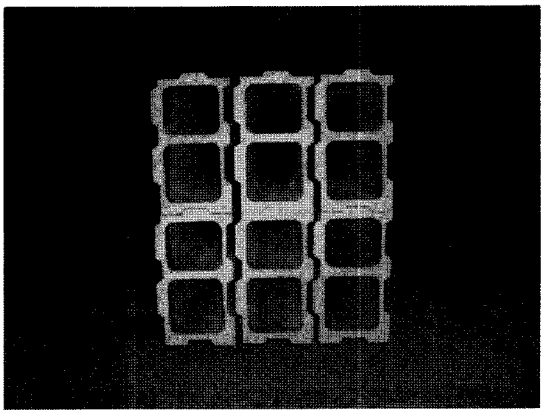
Fig. 3 The final shape of FRP Girder's module

Table 2 Mix proportion of confined concrete

Type	MaxSize (mm)	Slump (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	s/a (%)
28MPa	25	8	5	47	39.4
Unit Volume(kg/m^3)					
W	C	S	G	SP(g/m^3)	조강제(g/m^3)
153.55	272.34	711.94	1026.55	370	370

Table 3 Concrete test results

Type	파괴하중(kN)	압축강도(MPa)
fck=28 MPa-1	512.48	29.00
fck=28 MPa-2	477.12	27.00
fck=28 MPa-3	494.27	27.97
fck=28 MPa-4	404.84	22.91
fck=28 MPa-5	453.56	25.66
평 균	468.45	26.51

2.2 콘크리트 배합설계

본 연구에서 개발한 FRP거더의 경우 탄성계수가 작은 GFRP의 특징상 처짐에 대한 사용성 평가 기준 이상의 값을 내포하고 있다. 이러한 사용성 평가 기준에 적용되기 위해 FRP거더에 콘크리트를 충진 함으로써 강성을 좀 더 확보하고자 하였다. FRP거더에 충진 될 콘크리트의 배합설계는 Table 2와 같고 콘크리트 압축강도의 타당성을 증명하기 위하여 공시체를 제작하여 압축강도 실험을 실시하였다.

콘크리트 공시체의 양생기간이 실험 일정상 20일 정도로 설계기준 재령일 28일에 비해 다소 짧아 Table 3과 같이 콘크리트 압축강도는 설계 강도에 비해 다소 낮게 측정되었다.

2.3 FRP+콘크리트 합성 거더의 전단 시험체 제작

본 연구에서 제작한 FRP거더의 전단 시험체는 전단지간 깊이비와 콘크리트 충진 유무에 따른 변수를 두고 아래 Table 4와 같이 총 7개의 시험체를 제작하였다.

Table 4 Specimen of shear test

Specimen	시험변수	특징
GIRDER-a/d 1.5	a/d=1.5(깊은보)	콘크리트 타설 無
GIRDER-a/d 2.3	a/d=2.3(짧은보)	
GIRDER-C28-a/d 1.5-1	a/d=1.5(깊은보)	fck=28MPa Confined
GIRDER-C28-a/d 1.5-2	a/d=1.5(깊은보)	
GIRDER-C28-a/d 2.3-1	a/d=2.3(짧은보)	
GIRDER-C28-a/d 2.3-2	a/d=2.3(짧은보)	
GIRDER-C28-a/d 2.7-1	a/d=2.7(중간보)	

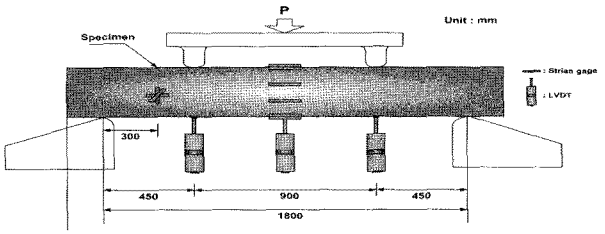

Fig. 4 Shear test method of shear span-depth 1.5 specimen

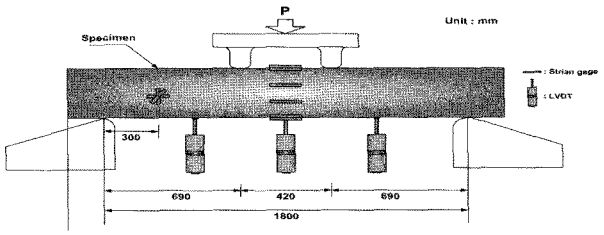

Fig. 5 Shear test method of shear span-depth 2.3 specimen

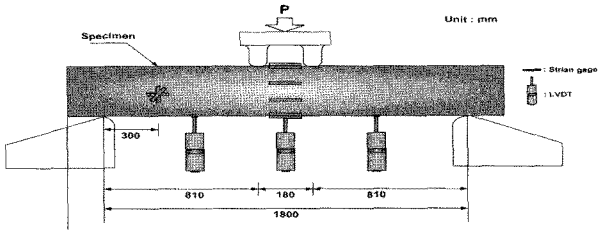

Fig. 6 Shear test method of shear span-depth 2.7 specimen

2.4 시험 방법

콘크리트 충진 FRP거더의 전단재하 시험은 다음 그림과 같이 전단지간 깊이비를 세 종류로 나누어 실시하였으며, 전단에 대한 위험단면에 변형률 센서를 부착하여 전단변형률을 측정하였다.

3. FRP거더의 전단시험 결과 및 분석

총 7개의 FRP 거더 시험체에 대한 전단시험 결과를 정리하면 아래 Table 5와 같다.

3.1 파괴양상

콘크리트 충진 FRP거더의 전단실험 광경은 Fig. 7에 나타내었으며, 파괴양상은 Fig. 8~Fig. 9에 나타내었다. 합성거더의 전단 시험 결과 시험체의 파괴양상은 콘크리트를 충진하지 않은 FRP거더의 경우 상부 플랜지의 국부좌굴에 따른 압축파괴가 발생되었으며, 콘크리트를 충진한 FRP 거더

Table 5 Test results

Specimen	초기균열시		극한상태시		강성 (kN/mm)	극한변형률 (Microstrain)	전단변형률 (Microstrain)
	하중(kN)	중앙변위(mm)	하중(kN)	중앙변위(mm)			
GIRDER-a/d 1.5	200.8	5.43	309.1	8.43	36.67	738	795
GIRDER-a/d 2.3	295.7	8.16	378.4	11.74	32.23	3297	592
GIRDER-C28-a/d 1.5-1	490.4	10.21	647.0	13.64	47.43	3275	1980
GIRDER-C28-a/d 1.5-2	500.2	10.99	603.0	13.57	44.44	3148	1368
GIRDER-C28-a/d 2.3-1	322.0	8.69	676.3	17.60	38.43	2112	731
GIRDER-C28-a/d 2.3-2	391.5	10.70	603.3	16.84	35.83	2894	1659
GIRDER-C28-a/d 2.7-1	384.0	9.84	621.9	18.00	34.55	5716	1607

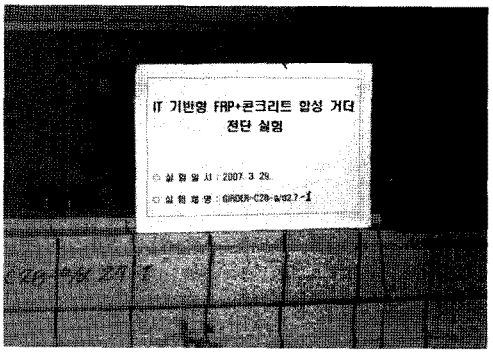

Fig. 7 The testing view of GIRDER-C28-a/d 2.7-1

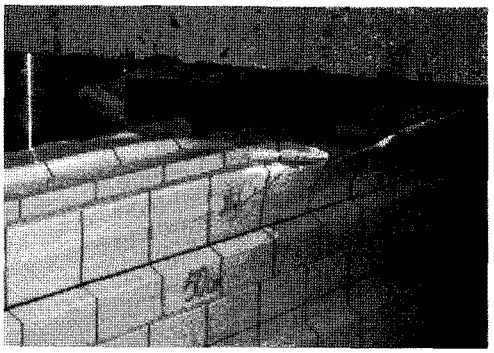

Fig. 8 Failure view of GIRDER-a/d 1.5

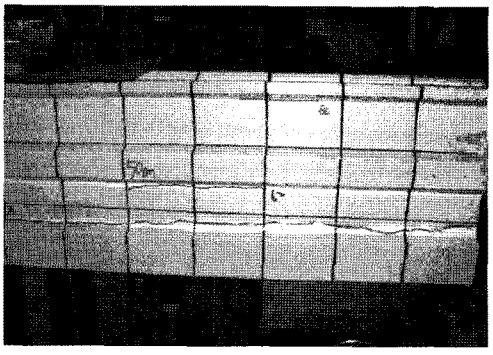

Fig. 9 Failure view of GIRDER-C28-a/d 1.5-1

의 경우 지점부 웹 압축부에서 취성파괴가 발생하였다. 전단파괴가 발생되지 않는 원인으로는 시험체의 경간에 비해 단면이 다소 커서 지점부 파괴가 발생된 것으로 사료된다.

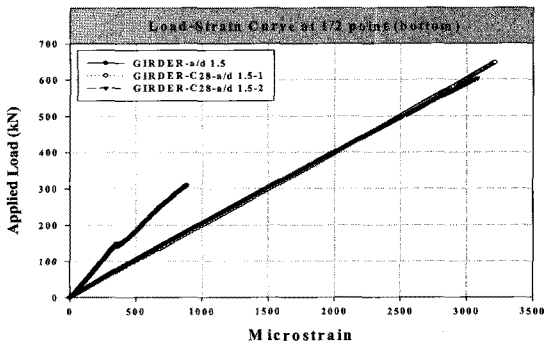

Fig. 10 load-strain curve(a/d=1.5, 1/2 point)

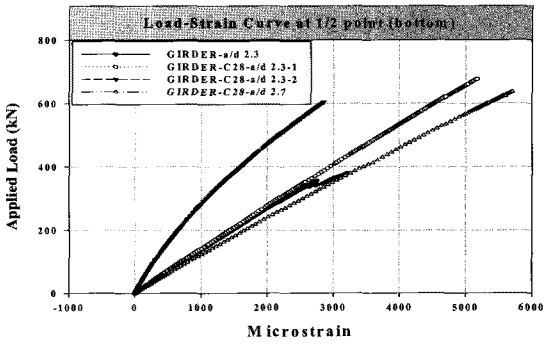

Fig. 11 load-strain curve(a/d=2.3, 1/2 point)

3.2 하중과 변형률 관계

전단 시험 결과 하중-변형률 관계를 Fig. 10~Fig. 11에 나타내었으며, 그 결과 값을 비교해 보면 콘크리트를 충진한 거더가 충진하지 않은 거더에 비해 약 2배정도 높은 극한 하중이 측정되었고, 극한 변형률은 GIRDER-a/d 1.5에서 가장 낮은 738.8 Microstrain이었으며, GIRDER-C28-a/d 2.7-1에서 가장 높은 5716.8 Microstrain으로 측정되었다. 하중-변형률 곡선은 모두 선형적으로 나타났다.

3.3 하중과 변위 관계

다음 Fig. 12~Fig. 15는 각 시험체의 하중-변위 관계를

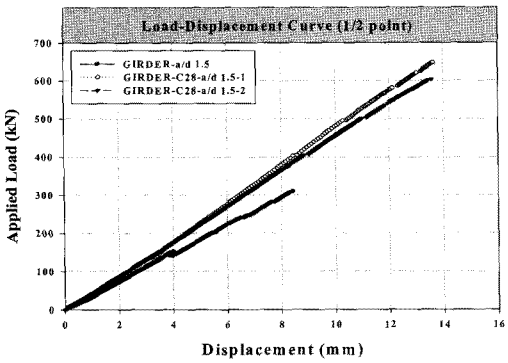

Fig. 12 Load-displacement curve of a/d 1.5 specimen (1/2 point)

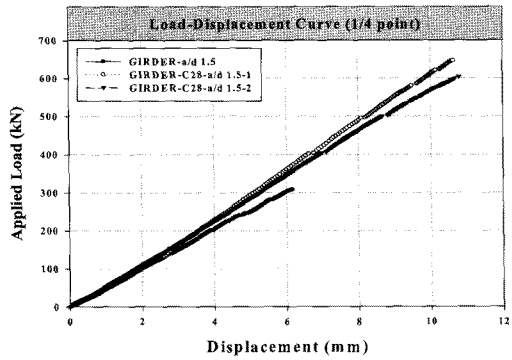

Fig. 13 Load-displacement curve of a/d 1.5 specimen (1/4 point)

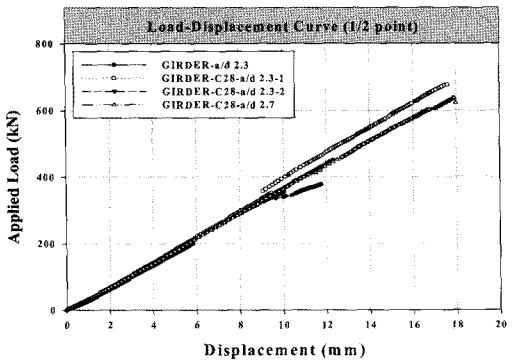

Fig. 14 Load-displacement curve of a/d 2.3 specimen (1/2 point)

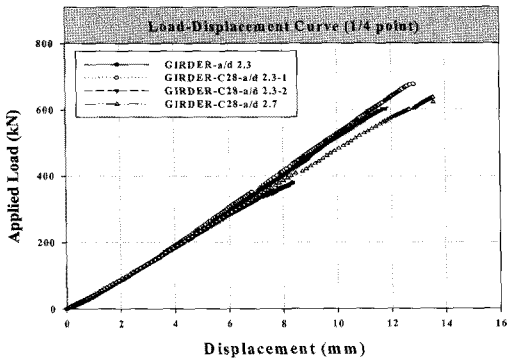

Fig. 15 Load-displacement curve of a/d 1.5 specimen (1/4 point)

나타내었다. 전단지간 깊이비의 변화의 영향 없이 모든 하중-변위 값이 선형적으로 나타났으며, 콘크리트 충진에 따른 강성 증진 효과가 하중이 증가함에 따라 크게 증가함을 확인할 수 있었다. 전단지간 깊이비 1.5와 2.3인 경우 콘크리트를 충진하지 않은 거더에 비해 콘크리트를 충진한 거더가 각각 1.25배, 1.15배 증가하였다.

3.4 중립축의 변화

Fig. 16~Fig. 22와 Table 6은 각 시험체의 중앙부에 부착한 변형률 센서를 이용한 중립축의 분석 결과를 나타내었다. FRP 거더의 전단 시험 중립축 분석 결과 콘크리트를 충진하지 않은 시험체의 경우 중립축이 하면에서부터 약 4% 정도의 증가율을 나타내며 위쪽으로 상승하였으며, 콘크리트를 충진한 시험체는 약 8~11%의 증가율을 나타내며 위쪽으로 상승하였다.

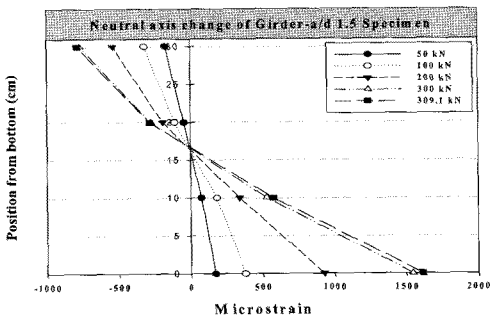

Fig. 16 Neutral axis change of girder-a/d 1.5

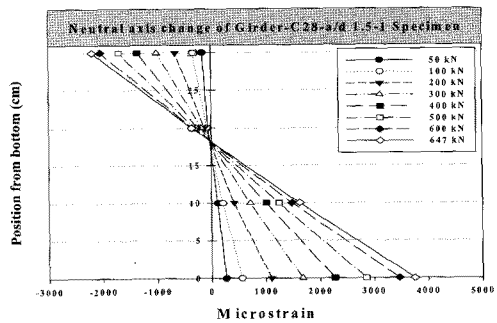

Fig. 17 Neutral axis change of girder-C28-a/d 1.5-1

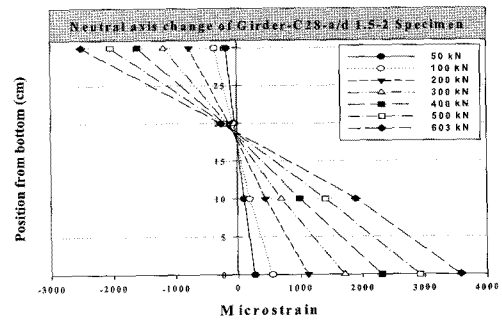

Fig. 18 Neutral axis change of girder-C28-a/d 1.5-2

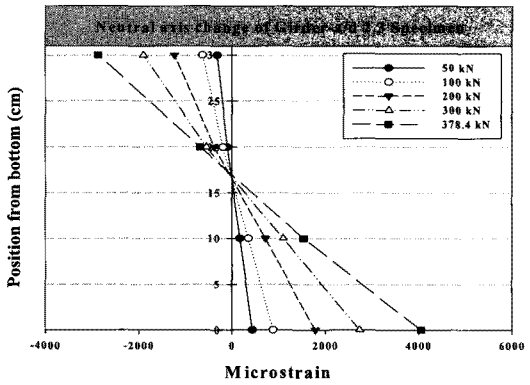

Fig. 19 Neutral axis change of girder-a/d 2.3

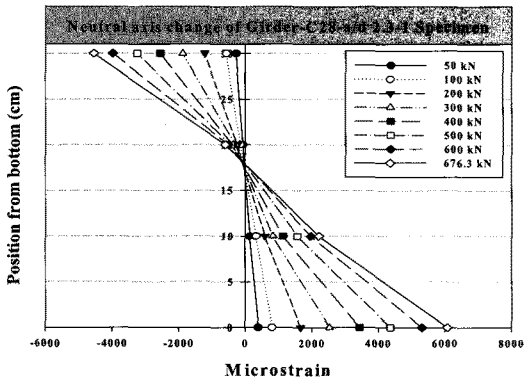

Fig. 20 Neutral axis change of girder-C28-a/d 2.3-1

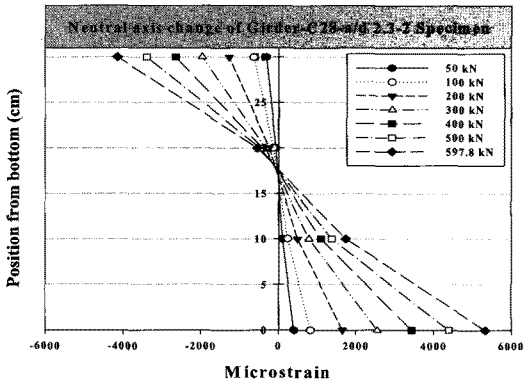

Fig. 21 Neutral axis change of girder-C28-a/d 2.3-2

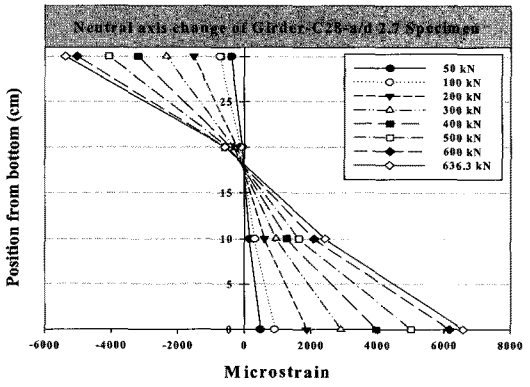

Fig. 22 Neutral axis change of girder-C28-a/d 2.7

Table 6 Neutral axis transformation

Specimen	Applied Load(kN)	Neutral axis position from bottom(cm)	Increase rate(%)
GIRDER-a/d 1.5	0	16.01	0.00
	50	16.09	0.50
	100	16.20	1.17
	200	16.35	2.08
	300	16.56	3.32
	309.1	16.67	3.96
GIRDER-C28-a/d 1.5-1	0	16.62	0.00
	50	16.68	0.36
	100	17.30	3.93
	200	17.74	6.31
	300	17.99	7.62
	400	18.02	7.77
	500	18.06	7.97
	600	18.13	8.33
	647	18.19	8.63
GIRDER-C28-a/d 1.5-2	0	16.62	0.00
	50	16.95	1.95
	100	17.22	3.48
	200	17.74	6.31
	300	18.12	8.28
	400	18.33	9.33
	500	18.64	10.84
	603	18.79	11.55
GIRDER-a/d 2.3	0	16.20	0.00
	50	16.43	1.40
	100	16.49	1.76
	200	16.55	2.11
	300	16.67	2.82
	378.4	16.92	4.26
GIRDER-C28-a/d 2.3-1	0	16.10	0.00
	50	16.24	0.86
	100	16.74	3.82
	200	16.99	5.24
	300	17.29	6.88
	400	17.42	7.58
	500	17.67	8.89
	600	17.80	9.55
	676.3	17.91	10.11
GIRDER-C28-a/d 2.3-2	0	16.10	0.00
	50	16.40	1.83
	100	16.62	3.13
	200	16.85	4.45
	300	17.08	5.74
	400	17.33	7.10
	500	17.45	7.74
	597.8	17.66	8.83
GIRDER-C28-a/d 2.7-1	0	16.20	0.00
	50	16.66	2.76
	100	17.09	5.21
	200	17.19	5.76
	300	17.39	6.84
	400	17.51	7.48
	500	17.64	8.16
	600	17.81	9.04
	636.3	18.00	10.00

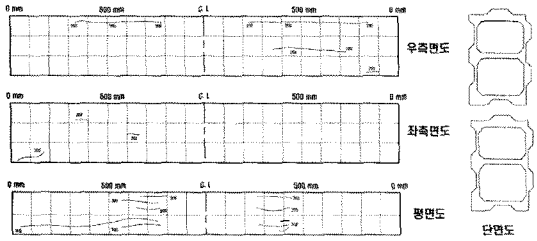

Fig. 23 Crack pattern of girder-a/d 1.5

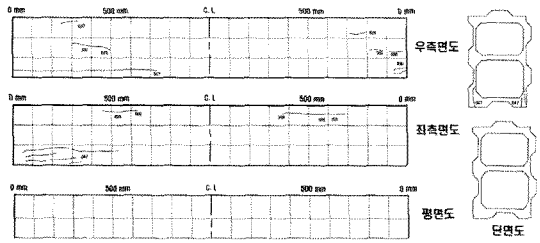

Fig. 24 Crack pattern of girder-C28-a/d 1.5-1

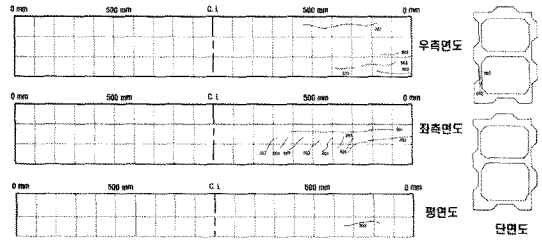

Fig. 25 Crack pattern of girder-C28-a/d 1.5-2

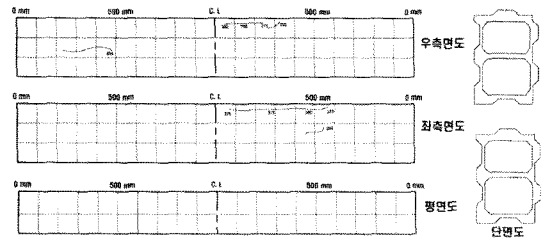

Fig. 26 Crack pattern of girder-a/d 2.3

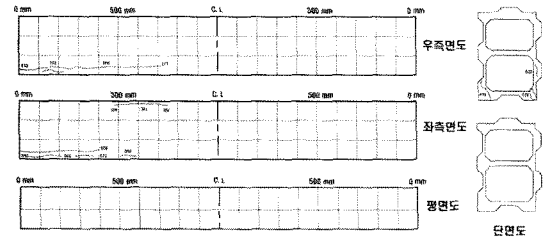

Fig. 27 Crack pattern of girder-C28-a/d 2.3-1

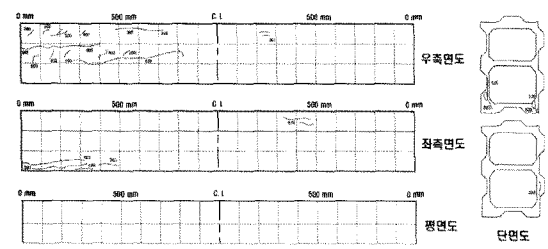

Fig. 28 Crack pattern of girder-C28-a/d 2.3-2

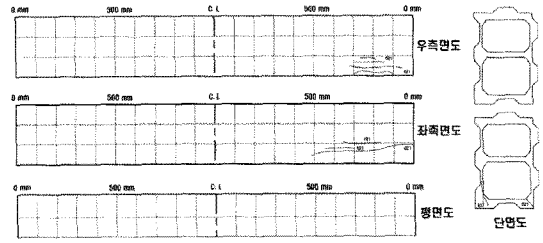

Fig. 29 Crack pattern of girder-C28-a/d 2.7

3.5 균열도

전단지간 깊이비 a/d=1.5, 2.3, 2.7 시험체의 균열도를 도식적으로 나타내면 Fig. 23~ Fig. 29와 같다.

4. 유한요소해석

본 장에서는 콘크리트 충진 FRP거더의 전단 시험 결과값을 비교, 검토하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS Ver 6.5.1을 이용하였다.

콘크리트 충진 FRP거더의 유한요소해석 모델은 지간 중앙에 대해 하중 및 경계조건이 대칭이므로 half모델을 채택하여 모델링하였다. FRP거더 단면의 형상 변화가 많기 때문에 FRP부분을 쉘(shell)요소로 모델링할 때 단면의 특성을 제대로 반영하기 어렵다고 판단되어 솔리드(solid)요소를 채택하였다. Solid요소는 ABAQUS에서 제공하는 20절점 솔리드 요소(C3D8R)를 사용하였다.

실제 실험을 모사하기 위해 재하판과 지지판은 강체요소(rigid body element)로 모델링하였고, 재하판 및 지지판과 FRP거더와는 강결(perfect tie)시켰다. 또한, FRP거더와 충전 콘크리트 사이의 경계는 완전 강결(perfect tie) 조건과 면접촉(surface to surface contact)조건을 이용하여 모델링 하였다. 면접촉 조건에서 접촉면에 수직한 방향에 대한 접촉응력-간격의 조건은 hard contact으로 하였으며, 따라서 접촉면 간의 간격이 일정한 값보다 작아지면 접촉된 것으로 판정하여 완전 부착과 같이 거동하게 되며, 접촉후의 응력상태 및 간격조건에 따라 다시 벌어지게 되면 접촉면이 분리되게 하였다. 접촉면과 평행한 방향으로 발생되는 전단 마찰력은 입력되는 마찰계수의 크기에 따라 달라지게 된다. 본 유한요소해석에서는 마찰계수를 변수로 하여 실험결과 비교하였다. Fig. 30에 콘크리트 충진 FRP 소형 거더의 해석 모델을 나타내었다.

또한, 콘크리트의 비선형성을 고려하기 위해 ABQUS에서 제시하는 Damaged Plasticity모델을 이용하여 비선형 해석

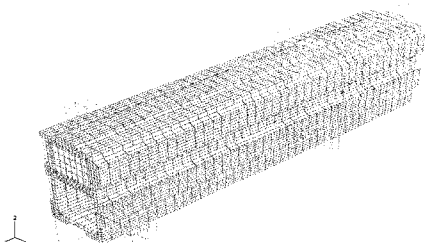

Fig. 30 The model of filled Concrete FRP girder

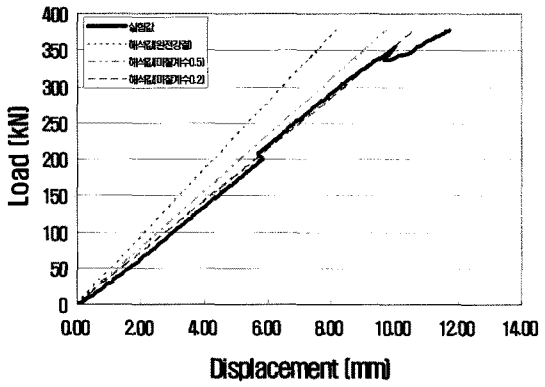

Fig. 31 The analysis result of a/d=2.3 FRP girder

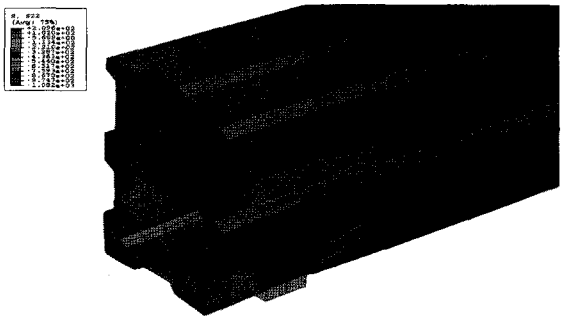

Fig. 32 The stress pattern of filled concrete FRP girder

을 수행하였다.

FRP와 콘크리트 사이를 부분 부착으로 모델하기 위해 FRP와 콘크리트 사이의 마찰계수를 0.5, 0.2로 가정하고 해석한 경우는 완전 강결조건에 비해 시험결과에 보다 근접한 거동을 보이고 있다. 따라서, 합리적인 해석결과를 도출하기 위해서는 마찰계수를 0.5이하로 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 FRP+콘크리트 합성 거더의 전단 실험으로써, 전단지간 깊이비와 거더 상부의 콘크리트 충진 여부를 변수로 두어 실험을 실시하였다.

본 연구에서 얻어진 결론을 살펴보면 전단지간 깊이비 1.5인 시험체의 시험 결과 콘크리트를 충진하지 않은 시험체의 경우 초기균열 하중이 200.8kN에 발생되었으며, 극한하중은 309.1kN이며, 이때의 최대 변위는 8.43mm이고, 파괴는 플랜지 압축부에서 발생되었다. 동일 전단지간깊이비에 콘크리트를 채운 시험체의 경우에는 극한하중이 약 600kN 정도이며, 이때의 최대 변위는 13.6mm로 지점부에서 파괴가 발생되었다.

또한, 전단지간 깊이비 2.3인 시험체의 시험 결과 콘크리트를 충진하지 않은 시험체의 경우 초기균열 하중이 295.7 kN에 발생되었으며, 극한하중은 378.4kN이며, 이때의 최대 변위는 11.74mm이고, 파괴는 플랜지 압축부에서 발생되었다. 동일 전단지간 깊이비에 콘크리트를 채운 시험체의 경우에는 극한하중이 약 650kN정도이며, 이때의 최대 변위는 17mm로 지점부에서 파괴가 발생되었다.

전단지간 깊이비 2.7인 FRP+콘크리트 합성 거더의 경우 극한하중은 621.9kN이고, 최대 변위는 18.0mm로 역시 지점부에서 취성파괴가 발생되었다. 전단 실험에서의 파괴모드가 콘크리트를 충진하지 않을 경우 재하위치에서 상부 플랜지 국부 파괴이었고, 콘크리트를 채웠을 때 지점부 압축파괴임을 고려할 때의 예상과 같이 전단실험의 파괴모드에 있어서 원하는 전단파괴는 발생하지 않았다. 이와 같은 실험결과를 토대로 향후 거더의 경간 길이를 확보하여 보완 실험 시에는 원하는 파괴모드를 얻을 수 있는 실험을 수행할 예정이다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 원광대학교 교비 지원에 의해 연구되었습니다.

참 고 문 헌

지효선, 조영환, 박계남 (2002) 복합신소재(FRP) 교량의 설계 및 현장적용, 대한토목학회학회지, 50(7), pp.27~31.

한복규, 홍건호, 김기수 (2006) 섬유복합재료(FRP)의 건설적용 사례 연구(교량편). 한국복합재료학회지, 복합재료학회, 19(2), pp.35~41.

이성우, 이선구, 김정현 (2001) 경량 고내구성 복합소재 교량바닥판의 개발, 학술발표회 논문집, 대한토목학회, pp.1~4.

박설아, 신동구, 조근희, 김병석 (2005) 구조공학: FRP-콘크리트 합성 바닥판의 단기 구조거동 분석, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 25(5), pp.729~739.

황윤국 등 (2004) 장수명 합리화 바닥판 개발 (II) : BRIDGE

200. 연구보고서, 한국건설기술연구원.

Arvid Hejll. Bjorn Taljsten, Masoud Motavalli (2005) Large scale hybrid FRP composite girders for use in bridge structures-theory, test and field application. Composites Part B : Engineering, 36 (8), pp.573~585.