

계면특성을 고려한 FRP와 콘크리트 복합부재의 역학적 거동특성 분석 연구

이규필¹, 박영택², 황재홍³, 김동규^{4*}

Study on mechanical behavioral characteristics of FRP-concrete composit member considering interface element between FRP and concrete

Gyu-Phil Lee, Young-Taek Park, Jae-Hong Hwang, Dong-Gyou Kim

ABSTRACT Utilization of fiber reinforced polymer(FRP) material has been increased to solve construction material problems such as corrosion, etc. However, there are still many problems in using a linear-shaped FRP material for a tunnel structure with curved section.

In this study, the loading tests were performed on the curved FRP-concrete composite material to evaluate its behavior as tunnel support. These tests were based on the result from preliminary numerical analysis on FRP-concrete composite material. Also, additional numerical analysis considering interface characteristics between FRP and cement-concrete was conducted to compare the result of loading test on FRP-concrete composite material. From the results of the loading test and numerical analysis, the analysis method suggested from this study is reasonable to evaluate the mechanical behavior of FRP-concrete composite material.

Keywords: FRP, interface element, shear strength of FRP-concrete interface, bond strength of FRP-concrete interface

요약 강재의 강제적인 사용으로 인한 부식 등과 같은 문제점을 보완할 수 있는 대체 재료로서, 섬유강화 복합재료의 활용이 증대되고 있다. 하지만 일반적으로 선형의 섬유강화 복합재료를 아치형인 터널구조물의 부재로서 활용하는 데는 많은 문제점이 대두된다.

본 연구에서는 FRP 복합부재의 거동특성 파악을 위해 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 하중재하 실험을 수행하였다. 또한 역학적 거동분석을 위하여 동일 조건에 대한 수치해석을 수행하였다. 하중재하 실험 및 수치해석결과, FRP와 콘크리트 계면특성을 고려하는 것이 보다 합리적인 해석방법인 것으로 나타났다.

주요어: FRP, 규사코팅, 계면요소, FRP-콘크리트 계면 전단강도, FRP-콘크리트 계면 부착강도

Received on October 16, 2012, Revised on October 25, 2012, Accepted on October 31, 2012.

¹정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 수석연구원

³정회원, 株式會社大林組 土木本部

⁴정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 수석연구원

*Corresponding author: Dong-Gyou Kim, dgkim2004@kict.re.kr

1. 서 론

터널구조물의 특성상 강지보재는 지속적으로 지하수와 접하게 되며, 이로 인한 부식 및 팽창 등의 단점이 있으며, 강재와 같은 전통적인 건설재료가 가지고 있는 부식과 중량의 문제를 큰 보완할 수 있는 대체 건설재료로서 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer; 이하 FRP)의 활용도가 증가하고 있다(Hollaway, 2010).

그러나 터널구조물에 FRP 부재의 활용을 위해서는 아치형의 터널 내공 단면형상에 따라 일정한 곡률반경을 갖는 곡면부재가 요구되나, 현재까지 FRP 곡면부재는 수작업(Hand-Lay-Up) 또는 필라멘트 와인딩(Filament winding) 작업에 의해서만 생산이 가능하였으며, 대량·연속생산에는 한계가 있다. 또한 이러한 재래식 방식으로 생산된 곡면 FRP 부재는 직선형 부재 대비 물리적 특성이 낮기 때문에, 터널구조물의 지보재료로 활용하는데 많은 제한이 있다.

한국건설기술연구원에서는 일정곡률 반경을 갖는 FRP 부재 인발성형법을 제안하고, 성형장비 개발 및 곡면 FRP 시제품을 생산하였다(한국건설기술연구원, 2010). 또한 곡면 FRP 재료 자체의 물리적 특성 실험결과 및 수치해석을 통하여 곡면 FRP 부재의 활용성을 검토한 바 있다(이규필과 신휴성, 2010).

일반적으로 FRP와 콘크리트 사이의 부착력은 철근과 콘크리트의 부착력보다 떨어지기 때문에, 이를 보완하기 위하여 철근과 콘크리트 계면의 전단특성 평가를 통하여 최적의 규사코팅(coarse-sand coating) 방안 및 이의 평가 방안 등 관련 연구를 수행하였다(이규필 등 2011).

본 연구에서는 FRP-콘크리트 계면의 부착특성 평가를 위한 실험을 수행하였으며, 전단 및 부착특성을 고려한 FRP-콘크리트 합성부재의 정밀해석을 수행하였다. 정밀해석 및 기존 수치해석 연구결과를 비교분석하면 FRP-콘크리트 합성부재를 이용한 구조물 설계시에는 FRP와 콘크리트 계면특성을 고려한 설계방법이 합리적인 것으로 판단된다.

2. FRP-콘크리트 부착력 평가

2.1 실험체 제작

기존 연구결과 FRP 부재와 콘크리트의 합성을 위해서는 6.5~2.38 mm 잔골재를 높은 밀도로 포설하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다(이규필 등 2011). 따라서 본 연구에서는 FRP와 콘크리트의 부착력 평가를 위하여 입경 6.5 mm이하의 잔골재를 3 kg/m²의 밀도로 FRP 표면에 포설하였다. FRP부재 표면에 도포되어 있는 박리제 제거를 위한 면처리 후 폴리머 재료를

이용하여 하도, 중도, 규사포설 및 상도(final coating) 순서로 FRP부재 규사코팅을 수행하였다.

Fig. 1과 같이 규사코팅이 완료된 FRP 실험체를 사각형 몰드에 설치 후, 그 상부에 콘크리트를 타설 양생하였다. 콘크리트의 일축압축강도는 40 MPa이며, 실험체 균열 및 파손예방을 위하여 콘크리트 내부에 wire mesh를 설치하였다. 또한 FRP 부재가 콘크리트 내부에 매립되는 것을 방지하기 위하여 FRP 부재와 동일한 두께의 합성수지 패널을 설치하였다(Fig. 2 참조).

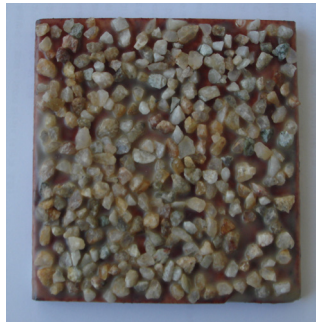


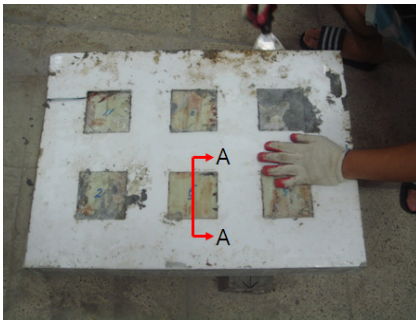
Fig. 1. FRP member with coarse sand coating.



(a) View of FRP member in mold



(b) View of specimen



(c) View of synthetic resin remove

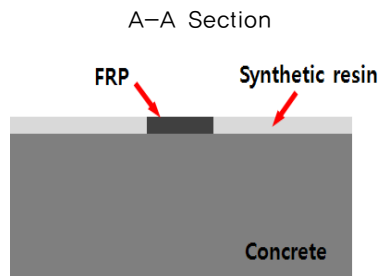


Fig. 2. Specimen of adhesion test.

2.2 부착력 실험

상기와 같이 준비된 실험체에 대하여 FRP와 콘크리트 계면의 부착력 평가는 KS F 4042에 의거 실험을 수행하였다(Fig. 3 참조). KS F 4042 기준에 의하면 부착력 평가를 위한 실험체의 규격은 가로 × 세로 각각 40 mm인 실험체를 기준으로 하나, 본 실험에서는 FRP 부재 표면에 일정한 입도분포를 갖는 규사를 일정 비율로 포설하므로, 실험체 규모가 작은 경우 각 실험체별 규사코팅의 밀도에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 가로 × 세로 각각 100 mm인 FRP 부재를 이용하여 실험체를 제작하였다.

FRP와 콘크리트의 부착력 실험결과 Table 1에서 보이는 바와 같이 평균 부착응력은 1.06 MPa인 것으로 나타났다.

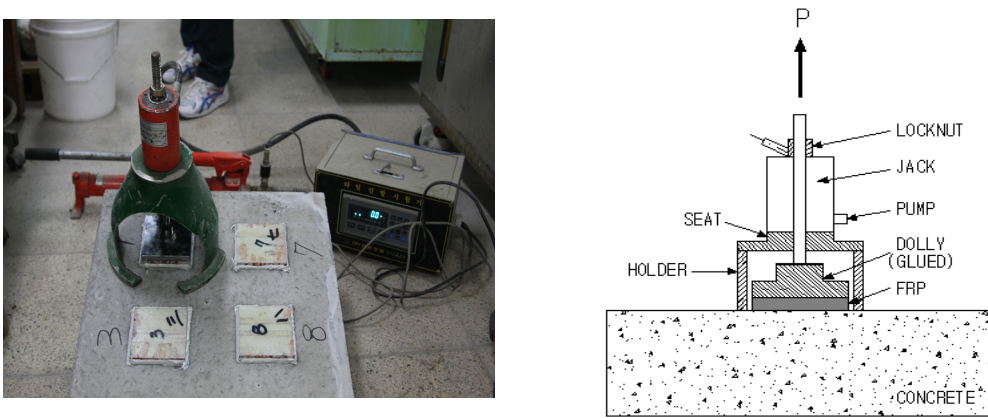


Fig. 3. Adhesion test of FRP-concrete interface.

2.3 결과분석

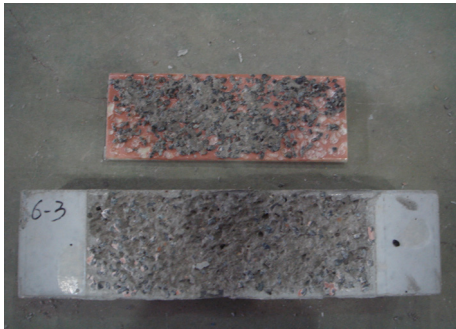
FRP와 콘크리트의 평균 부착응력은 1.06 MPa이나, 콘크리트 계면의 전단능력 평가 관련 선행 연구결과(이규필 등, 2011) 부착력 평가를 위한 실험체와 유사한 규사코팅 조건에 대한 전단력 실험 결과 평균 약 4.16 MPa의 전단응력이 발생하는 것으로 나타났다.

FRP와 콘크리트 계면의 전단파괴와 부착파괴는 Fig. 4에서 보이는 바와 같이 전단파괴의 경우 FRP 표면의 규사코팅과 콘크리트가 맞물려 콘크리트 파괴양상을 보인 반면, 부착파괴의 경우 규사와 FRP의 계면에서 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.

따라서 FRP와 콘크리트 합성부재의 전단저항은 콘크리트의 일축압축강도에 영향을 받는 것으로 판단되며, FRP와 콘크리트의 부착력은 규사코팅을 위한 수지에 영향을 받는 것으로 판단된다.

Table 1. Test result of FRP–Concrete adhesion and shear stress.

No.	adhesion stress (MPa)	shear stress (MPa)	remarks
1	0.97	4.60	
2	1.01	3.77	
3	1.22	4.12	
Ave.	1.06	4.16	



(a) Shear failure



(b) Adhesion failure

Fig. 4. Failure mode of FRP–concrete interface.

FRP와 콘크리트 계면에 대한 품질관리 기준은 제정되어 있지 않으나, KS F 2042:2012(콘크리트 구조물 보수용 폴리머 시멘트 모르타르) 기준에 따르면 구조물 보수를 위한 폴리머 시멘트 모르타르의 기준 부착응력은 1.0 MPa이다. 또한 유럽통합기준(EFNARC, 1996; 1999)에 따르면 숏크리트를 이용한 구조물 보수/보강시 타설된 숏크리트가 구조적 성능을 발휘하기 위한 부착응력은 최소 1.0 MPa로 제안하고 있다(이규필 등, 2005).

따라서, FRP와 콘크리트의 부착력 실험결과 상기 규사코팅에 의한 FRP와 콘크리트 합성방안은 FRP와 콘크리트 합성부재를 구조부재로 활용시 적합한 것으로 판단된다.

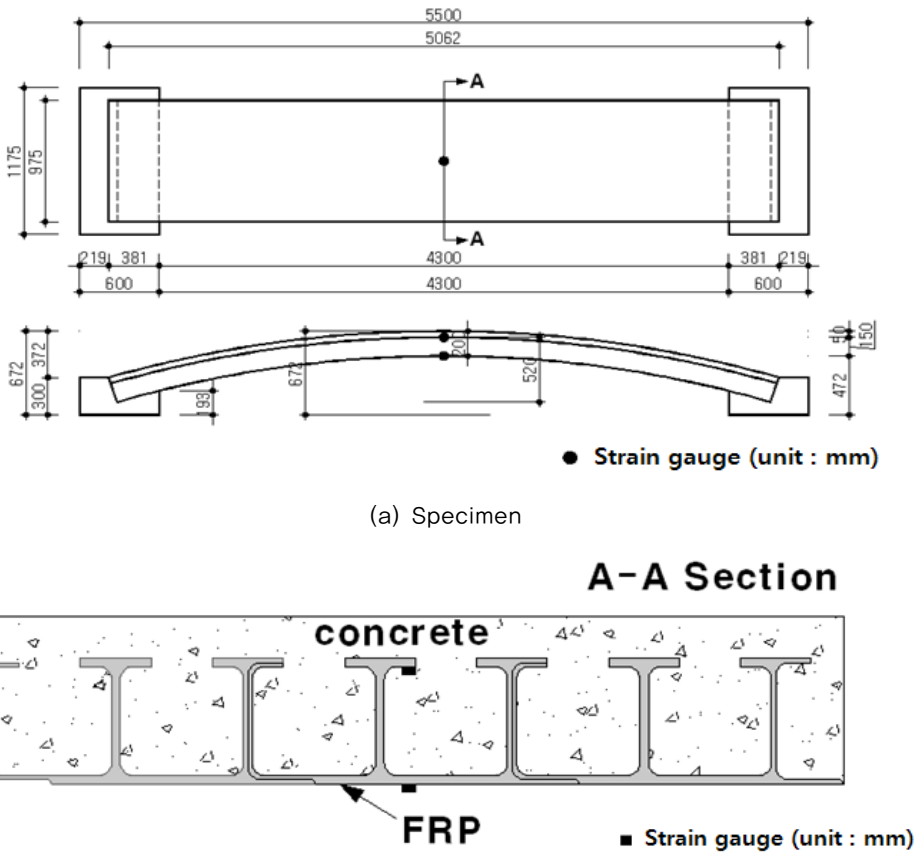
3. FRP-콘크리트 계면특성을 고려한 거동분석

본 연구에서는 FRP-콘크리트 합성부재에 대한 역학적 거동분석을 위한 하중재하 실험결과 및 하중재하 조건 등은 동일하나, FRP와 콘크리트의 계면 특성을 고려하지 않은 조건에 대한 수치해석 등 기존 연구결과(이규필 등, 2011)와 FRP와 콘크리트의 전단 및 부착 등과 같은 계면 특성을 고려한 수치해석 결과의 비교분석을 위하여 FRP-콘크리트 합성부재의 역학적 거동분석을 위한 정밀해석을 수행하였다.

3.1 하중재하 실험

FRP-콘크리트 합성부재에 대한 역학적 거동분석 위한 하중재하 실험(이규필 등, 2011)을 위한 실험체 제작은 규사코팅된 FRP에 콘크리트를 타설/양생하였으며, 실험체 제원은 5,500 mm × 1,175 mm × 672 mm(가로×세로×높이)이다(Fig. 5 참조).

재하하중은 천단부에 선하중으로 재하하였으며 하중재하용 actuator 용량은 500 kN으로 servo controller를 통한 하중제어 방식이다. 하중재하 속도는 19.62 kN/min으로 490 kN까지 하중재하 실험을 수행하였다. 또한 실험체 지점부는 Fig. 6에서 보이는 바와 같이 실험체 지지를 위한 강재 슬래브로 연직방향 변위를 제어하도록 하였으며, 횡방향 변위 제어를 위한 지그를 강재슬래브에 고정하였다.



(b) A-A section detail

Fig. 5. Specimen detail.

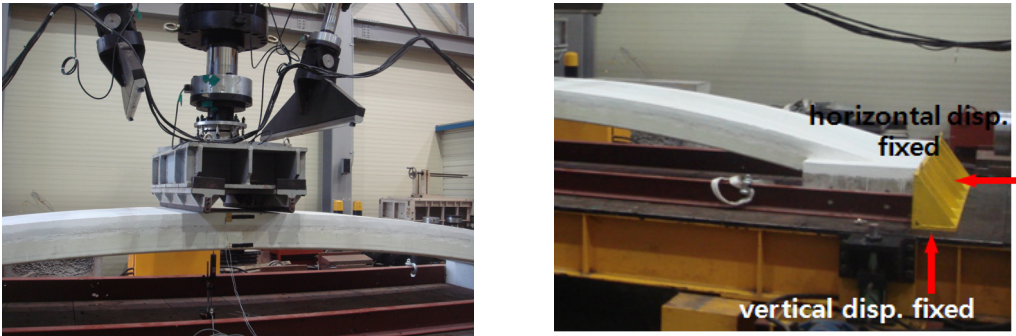


Fig. 6. Bending test and boundary condition.

3.2 수치해석

3.2.1 수치해석 조건

본 연구에서는 이규필 등(2011)이 수행한 기존 연구에서 활용한 동일한 유한요소법에 기반한 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석시 FRP 부재와 콘크리트 부재는 각각 Fig. 5(b) 단면과 동일조건에 대하여 강체요소(solid element)로 모사하였으며, 지점부 구속조건은 실험조건과 동일하게 횡방향 및 연직방향 변위를 제어하였다.

기존 연구에서는 FRP와 콘크리트는 완전 부착조건으로 가정하여 nodal point에서 강결조건으로 모델링하였으나, 본 연구에서는 FRP와 콘크리트 부착면을 가상의 계면요소로 모델링하였으며, 계면요소 물성은 전단 및 부착력 관련 상기 실험결과를 토대로 결정하였다.

3.2.1 콘크리트 및 FRP 입력물성치

콘크리트 모델링을 위한 입력물성은 일축압축강도(f_{ck}) 30 MPa, 단위중량 23.5 kN/m^3 , 탄성계수 $28,576 \text{ MPa}$ ($E_c = 8,500 \sqrt{f_{cu}}$, $f_{cu} = f_{ck} + 8$)이다.

기존 연구에서는 수치해석을 위한 곡면 FRP 부재 입력물성은 부재의 특성상 상부플랜지, 하부플랜지, 복부판 등 각각의 부재 부위마다 탄성계수가 다르므로, FRP 부재의 등가탄성계수 (E_f)를 다음 식 (1)과 같이 산정하였으나, 본 연구에서는 FRP-콘크리트 합성부재의 정밀해석을 위하여 각 부위별 탄성계수를 각각 입력하였다(Table 2 참조).

$$E_f = \left[\frac{(E_1 \times A_1) + (E_2 \times A_2) + (E_3 \times A_3)}{(A_1 + A_2 + A_3)} \right]$$

$$= \left[\frac{(33.6 \times 8.0) + (37.0 \times 15.0) + (30.0 \times 14.93)}{(8.0 + 14.93 + 15.0)} \right] = 33,527,551 \text{ kN/m}^2 \quad (1)$$

Table 2. Curved FRP member cross section and properties.

Cross section	Classification	Tensile elastic modulus (GPa)	Compressive elastic modulus (GPa)	Area (cm ²)
	① upper flange	33.6 (E_1)	27.7	8.00 (A_1)
	② bottom flange	37.0 (E_2)	33.3	15.0 (A_2)
	③ web	30.0 (E_3)	28.8	14.93 (A_3)
	Total area			25

3.2.1 계면요소 입력물성치

계면요소는 수치해석시 계면요소를 경계로 연결되어 있는 각 요소(elements)를 전단강성과 연직강성을 갖는 스프링으로 모델링하고, 흙의 강도정수(c, θ)에 감소계수(R)를 이용하여 경계요소를 모델링 하는 방법이 등이 일반적으로 적용되고 있다. 본 연구에서 활용한 범용 해석프로그램에서는 이와 유사한 방안으로 계면요소를 고려하기 위하여 계면에서의 전단탄성계수 및 연직탄성계수를 고려하였다.

FRP와 콘크리트의 계면특성을 고려한 수치해석시 계면에서의 전단탄성계수는 FRP-콘크리트 계면의 전단부착성능 실험결과 콘크리트에서 파괴가 발생하였으므로, 식 (2)와 같이 콘크리트의 전단탄성계수로 산정하였다.

$$G = \frac{E_{con'}c}{2(1+\nu)} = \frac{28,576}{2(1+0.175)} = 6,569 \text{ MPa} \quad (2)$$

여기서, $E_{con'}$: 콘크리트 탄성계수

ν : 콘크리트 포아슨 비(0.175)

FRP-콘크리트 계면의 부착성능 실험결과 규사와 FRP의 계면에서 파괴가 발생하였다. 따라서 FRP와 콘크리트의 계면특성을 고려한 수치해석시 계면에서의 인장탄성계수는 규사코팅에 사용된 접착제의 특성에 의해 결정될 것으로 판단된다. 규사코팅시 활용한 에폭시계 접착제는 양생 후 콘크리트와 같이 취성파괴 특성이 있으며, 인장탄성계수를 결정하는 실험법이 별도로 규정되어 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 FRP와 콘크리트의 계면특성을 고려한 수치해석시 입력변수인 연직탄성계수는 인장 및 압축 탄성구간내에서 하중-변형률 관계가 선형적으로 변화하는 것으로 가정하고 다음과 같이 산정하였다.

일반적으로 콘크리트의 인장강도는 일축압축강도의 약 1/10 정도이고, FRP-콘크리트 계면의 부착성능 실험체의 콘크리트의 일축압축강도는 30 MPa이므로, 인장강도는 약 3 MPa로 추정할 수 있다. 반면 FRP-콘크리트 계면의 부착성능 실험결과 평균 부착응력은 약 1 MPa로 콘크리트의 인장강도의 1/3수준이므로, 인장탄성계수는 콘크리트의 탄성계수의 1/30인 952 MPa로 결정하였다.

4. 실험 및 수치해석 결과 비교분석

재하실험 및 수치해석결과 최대 재하하중 조건에서 상부 플랜지 및 하부 플랜지에 발생하는 변형율은 Table 3에서 보이는 바와 같다. 재하실험 계측결과로부터 인장 및 압축응력 계산은 곡면 FRP 부재의 부위별 실험결과(인장 및 압축탄성계수)를 토대로 산정하였으며, 수치해석 결과로부터 인장 및 압축응력 계산은 수치해석시 적용한 FRP 부재의 등가탄성계수를 토대로 산정하였다.

상부 플랜지에 발생하는 압축응력은 재하실험 결과 16.4 MPa, 수치해석 결과 강결조건의 경우 12.9 MPa, 계면요소 고려시 4.9 MPa가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 하부 플랜지에 발생하는 인장응력은 재하실험 결과 99.5 MPa, 수치해석 결과 강결조건의 경우 22.1 MPa, 계면요소 고려시 100.1 MPa가 발생하는 것으로 나타났다(Table 3 참조).

상부플랜지에서 발생하는 변형율은 수치해석시 FRP와 콘크리트 계면을 강결조건으로 고려한 경우가 계면요소를 고려한 경우보다 재하실험 결과와 유사한 것으로 나타났다.

그러나, 재하실험결과 휨 인장응력이 발생하는 하부플랜지에 발생하는 변형율은 수치해석시 FRP와 콘크리트 계면을 강결조건으로 고려한 경우 약 4배 이상 크게 발생하는 것으로 나타났으나, FRP와 콘크리트 계면요소를 고려한 경우 재하실험결과와 매우 유사한 것으로 나타났다(Fig. 7 참조).

FRP-콘크리트 복합부재에 하중재하시 재하점 부분에서 최대 처짐이 발생하고, FRP 하부 플랜지와 콘크리트의 계면을 중심으로 두 매질간의 횡방향 상대변위에 차이가 발생하는 전단변형이 발생하게 된다. 수치해석시 FRP와 콘크리트 계면을 강결조건으로 고려하는 경우, 상기와 같은 FRP 하부 플랜지와 콘크리트의 계면 전단변형을 고려할 수 없기 때문인 것으로 판단된다.

FRP와 콘크리트 합성부재를 이용한 구조물 설계 및 시공시에는 구조물에 작용하는 압축응력이 각 재료의 허용압축응력 범위를 초과하지 않는다면, 일반적으로 인장응력에 대한 구조안정성 검토를 수행한다. 따라서 FRP와 콘크리트 접합부에 대해서 계면요소를 고려한 해석방법이 합리적인 것으로 판단된다.

Table 3. Comparison between bending test result and numerical analysis result.

		load (kN)	strain		stress	
			upper flange	bottom flange	upper flange	bottom flange
bending test		490	-5.93 E-4	2.69 E-3	-16.4 MPa	99.5 MPa
numerical analysis	without interface	490	-3.84 E-4	6.58 E-4	-12.9 MPa	22.1 MPa
	with interface	490	-1.75 E-4	3.03 E-3	-4.9 MPa	100.1 MPa

※ (+) tensile, (-) compressive

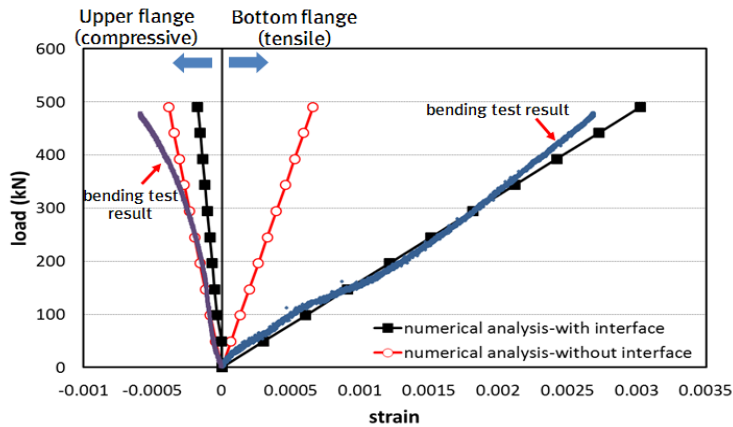


Fig. 7. Load-strain curve.

국외에서는 FRP 부재의 허용응력계산을 위한 안전계수로 3.0~5.0을 토목구조물에 적용하고 있다(한국건설기술연구원, 2006). 최근 관련 연구를 통하여 곡면 FRP 제작 경험이 축적되고, 구조물 보수/보강 현장에 시공되는 등 관련 기술이 향상된 것으로 판단되므로, 안전계수 3.0을 기준으로 곡면 FRP 부재 상부플랜지 및 하부플랜지의 허용응력을 계산하였다(Table 4 참조).

Table 4에서 보이는 바와 같이 재하실험 및 수치해석 결과 상부플랜지와 하부플랜지에 발생하는 압축응력과 인장응력은 허용응력 범위 이내인 것으로 나타났다.

Table 4. Comparison between stress acting on FRP member and allowable stress.

		stress		allowable stress	
		upper flange	bottom flange	upper flange	bottom flange
bending test		-16.4 MPa	99.5 MPa	-187 MPa	142 MPa
numerical analysis	without interface	-12.9 MPa	22.1 MPa		
	with interface	-4.9 MPa	100.1 MPa		

※ (+) tensile, (-) compressive

5. 결론

본 연구에서는 터널 지보구조물로서 곡면 FRP 부재의 활용성 분석 및 역학적 거동분석을 위하여 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 하중재하 실험 및 수치해석을 수행하였으며, 상기 내용을 정리하면 다음과 같다.

1. 수치해석시 FRP와 콘크리트 접합면을 강결조건으로 모델링한 경우, 두 매질의 계면특성을 고려하기 위한 계면요소를 모델링한 조건보다, 압축응력이 발생하는 상부플랜지의 거동을 실험 결과에 보다 유사하게 모델링하는 것으로 나타났다. 그러나 인장응력이 발생하는 하부플랜지의 거동특성은 계면요소를 고려한 경우 실험결과와 매우 유사한 결과를 예측할 수 있으나, 강결조건으로 모델링한 경우 실험결과 대비 약 25% 수준의 응력이 발생하는 것으로 나타났다.
2. FRP와 콘크리트 계면을 강결조건으로 모델링하는 경우 FRP와 콘크리트 계면의 전단변형을 고려할 수 없으며, 이로 인하여 합성부재에 발생하는 인장응력을 과소평가할 수 있어, 구조물의 안정성 검토에 대한 신뢰성을 얻기 어렵다. 따라서 FRP-콘크리트 합성부재를 이용한 구조물 설계시에는 FRP와 콘크리트 계면특성을 고려한 해석방법이 FRP-콘크리트 합성부재의 거동을 합리적으로 예측할 수 있는 것으로 판단된다.
3. 재하실험결과 최대 재하하중까지 하중-변형을 곡선은 선형적 관계로 탄성거동을 하는 것으로 나타났으며, 안전계수 3.0 적용시 FRP 부재에 발생하는 응력은 부재의 허용응력 범위 이내인 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트와 FRP 복합부재 허용응력 설계를 위한 안전계수 3.0은 FRP-콘크리트 합성부재 설계시 합리적인 범위로 판단된다.
4. FRP와 콘크리트 계면의 전단파괴의 경우 FRP 표면의 규사코팅과 콘크리트가 맞물려 콘크리트 파괴양상을 보인 반면, 부착파괴의 경우 규사와 FRP의 계면에서 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 FRP와 콘크리트 합성부재의 전단저항은 콘크리트의 일축압축강도와 영향을 받는 것으로 판단되며, FRP와 콘크리트의 부착력은 규사코팅을 위한 수지의 영향을 받는 것으로 판단된다.
5. 본 연구에서 수행한 규사코팅을 통한 FRP와 콘크리트 합성시 평균부착응력은 1 MPa 이상이며, FRP와 콘크리트 계면에 대한 품질관리 기준은 제정되어 있지 않으나, KS F 2042기준과 유럽통합 기준에 의하면 보강재가 구조적 성능을 발휘하기 위한 최소 부착응력은 1 MPa이다. 따라서 규사코팅을 통한 FRP와 콘크리트 합성부재는 구조부재로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2009년도 건설기술 혁신사업(과제번호09기술혁신C01, 과제명 : 프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용 기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

REFERENCES

1. EFNARC (1996), European Specification for Sprayed Concrete.
2. Korea Institute of Construction Technology (2006), Development of Long-Life Deck System for Bridges-Steel Free Deck, KICT Report No. 2006-67, pp. 49-209.
3. Korea Standards Association (2012), KS F 4042:2012 Polymer modified cement mortar for maintenance in concrete structure.
4. L. C. Hollaway. A review of the present and future utilization of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties. *Construction and Building Materials* 2010; 24: 2419-2445.
5. Lee, G.P., Kim, D.G., Bae, G.J. Chang, S.H. (2005), "Test methods of adhesion strength of shotcrete for quality control", *Journal of Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 25, No. 2C, pp. 125-131.
6. Lee, G.P., Shin, H.S. (2010), "A numerical study on feasibility of the circled fiber reinforced polymer(FRP) panel for a tunnel lining structure", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 6, pp. 451-461.
7. Lee, G.P., Shin, H.S., Kim, S.H. (2011), "A study on the optimum condition of FRP coarse-sand coating by using a new testing method for shear bearing capacity of FRP-concrete interface". *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 3, pp. 277-289.
8. Lee, G.P., Shin, H.S., Kim, S.H. (2011), "Study on mechanical behavioral characteristics of the curved FRP-concrete composite member for utilization as a tunnel lining structure", *Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 13, No. 2, pp. 149-158.