

터널 라이닝 구조체로서 활용을 위한 곡면 FRP-콘크리트 복합부재의 역학적 거동특성 분석 연구

이규필¹, 신휴성^{2*}, 김승한³

Study on mechanical behavioral characteristics of the curved FRP-concrete composite member for utilization as a tunnel lining structure

Gyu-Phil Lee, Hyu-Soung Shin, Seung-Han Kim

ABSTRACT Utilization of the fiber reinforced polymer (FRP) material has been increased as alternative in a bid to supplement the problems with general construction materials such as long-term problems corrosion, etc. However, there are still many problems in using a linear-shaped FRP material for a tunnel lining structure which has arch-shape in general. In this study, the loading tests for the FRP-concrete composite member was carried out to evaluate their applicability as a tunnel reinforcement material, which are based on the results from preliminary numerical studies for identifying the behavioral characteristics of FRP-concrete composite member. Moreover, numerical analysis under the same condition as applied in the loading tests was again conducted for analysis of mechanical behavior of the composite member. As a result of the load test and numerical analysis, it appears that the FRP-concrete composite member is greatly subject to shear movement caused by bending tension acting on the interface between two constituent members.

Keywords: Glass fiber, fiber reinforced polymer (FRP), circled panel, composit member, lining, coarse sand coating

요약 최근 장기 부식 등 일반적인 건설재료의 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 위한 수치해석적 사전검토 연구를 토대로, 터널 지보구조물로서 활용성 분석을 위한 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 하중재하 실험을 수행하였다. 또한 역학적 거동분석을 위하여 동일 조건에 대한 수치해석을 수행하였다. 하중재하 실험 및 수치해석결과, FRP와 콘크리트 합성부재는 두 부재 계면의 휨 인장에 의한 전단거동에 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

주요어: 유리섬유, 섬유강화 복합재료, 곡면부재, 합성부재, 라이닝, 규사코팅

접수일(2011.3.7), 수정일(2011.3.15), 게재확정일(2011.3.21)

¹정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 수석연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 지하구조물연구실 연구위원

³비회원, (주)이소 지반사업부 이사

*교신저자: 박경환 (E-mail: hyushin@kict.re.kr)

1. 서 론

항공우주분야의 첨단소재로 개발된 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer; 이하 FRP)는 고분자 수지에 유리섬유(glass fiber) 등을 섬유형태로 보강하여 제작된 복합재료로서, 1980년대 이후 구조물 보수보강을 위한 재료로 건설분야에 도입되기 시작했으며, 최근에는 구조물의 대형화, 장대화 추세와 함께 강재와 콘크리트 등과 같은 전통적인 건설재료가 가지고 있는 부식 및 중량의 문제를 보완할 수 있는 대체 건설재료로서 활용도가 증가하고 있다(Holloway, 2010).

터널구조물에 FRP 부재의 활용을 위해서는 아치형의 터널 내공 단면형상에 따라 일정한 곡률반경을 갖는 곡면부재가 요구된다. 따라서 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).

본 논문에서는 터널 지보구조물로서 곡면 FRP 부재의 활용성 검토를 위하여 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 하중재하 실험을 수행하였으며, 역학적 거동분석을 위하여 동일 조건에 대한 수치해석적 연구를 수행하였다. 또한 수치해석결과와 실험결과와의 비교분석을 통하여 곡면 FRP 부재의 현장 적용시 야기될 수 있는 역학적 거동상의 특이점을 분석하여 제시하였다.

2. 곡면 FRP 부재 제원 및 물리적 특성

본 연구에서는 곡면 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 실험 연구와 수치해석적 고찰을 위하여 터널 조건을 고려한 제원과 물리적 특성을 설정하였으며, 실험체 제작에 적용되었다. 설정된 곡면 FRP 부재 시제품의 제원은 그림 1에서 보이는 바와 같이 휨저항이 우수한 I 형 단면으로, 단면높이는 콘크리트 현장타설 등 시공성을 고려하여 150 mm로 결정하였으며, 폭은 생산설비의 규모 등을 고려하여 약 375 mm로 결정하였다. 또한 부재의 각 부분별 두께는 시공 중 작용한 현장 콘크리트 타설 압력 및 공용 중 작용하는 이완하중, 수압 등을 고려하여 결정하였으며, 그림 1에서 보이는 바와 같이 연속시공이 가능하도록 접합부의 두께를 조정하였다(한국건설기술연구원, 2010).

FRP 재료는 생산에 사용된 섬유, 수지 등에 따라 물리적 특성이 변화하므로 각각에 대한 시험평가가 요구되며, 기본적으로 인장, 압축, 전단, 휨에 대한 시험으로 구분되어 평가된다. 본 연구의 하중재하 실험 및 수치해석결과 분석에 사용된 곡면 FRP 부재의 섬유방향 인장/압축 강도 및 탄성계수를 정리하면 표 1과 같다. 각 FRP부재의 물성값들은 사전 시험적 연구를 수행하였으며, 상세한

곡면 FRP 부재 요소별 물리적 특성은 기존 문헌에 수록하였다(이규필과 신휴성, 2010).

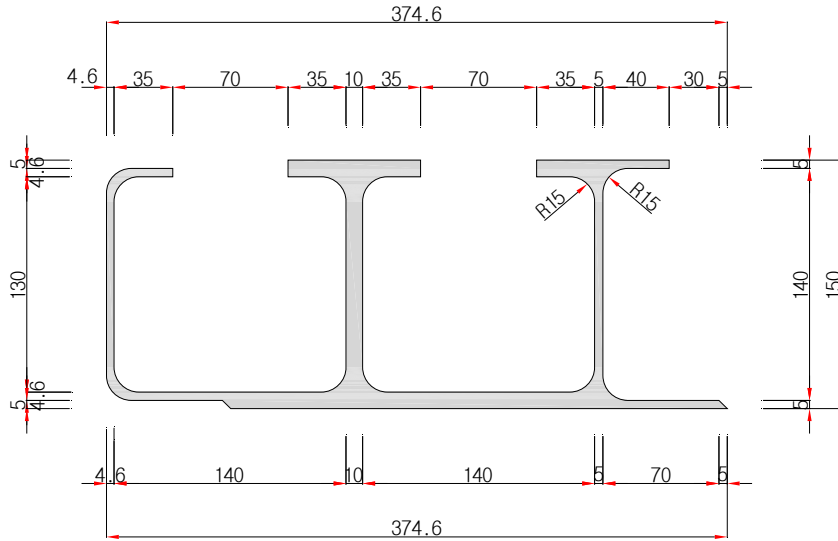


그림 1. 제작된 곡면 FRP 부재 제원

표 1. 곡면 FRP 부재 물리적 특성(이규필과 신휴성, 2010)

시험항목	단위	시료채취부위	시험결과치
인장강도(섬유방향)	MPa	상부플랜지	419
인장강도(섬유방향)	MPa	하부플랜지	426
인장강도(섬유방향)	MPa	복부판	413
인장강도(섬유방향)	MPa	옆1	614
인장강도(섬유방향)	MPa	옆2	539
인장탄성계수(섬유방향)	GPa	상부플랜지	33.6
인장탄성계수(섬유방향)	GPa	하부플랜지	37
인장탄성계수(섬유방향)	GPa	복부판	30
인장탄성계수(섬유방향)	GPa	옆1	31.4
인장탄성계수(섬유방향)	GPa	옆2	27.6
압축강도(섬유방향)	MPa	상부플랜지	561
압축강도(섬유방향)	MPa	하부플랜지	674
압축강도(섬유방향)	MPa	복부판	562
압축탄성계수(섬유방향)	GPa	상부플랜지	27.7
압축탄성계수(섬유방향)	GPa	하부플랜지	33.3
압축탄성계수(섬유방향)	GPa	복부판	28.8

3. 하중재하 실험 및 수치해석

3.1 하중재하 실험

3.1.1 시험체 제작 및 계측기 설치

철근콘크리트 구조물의 성립이유는 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 우수하고, 열팽창율이 비슷하기 때문이다. 그러나 일반적으로 FRP와 콘크리트 사이의 부착력은 철근과 콘크리트의 부착력보다 떨어지는 것으로 알려져 있으며, 이를 보완하기 위하여 규사코팅(coarse-sand coating)과 같은 에폭시 접착방식, 스티드 부착 방식 등과 같은 다양한 연구가 수행되었으나, 현장 적용성 및 부착 성능 등 다양한 요소에 대하여 검토한 결과 규사코팅이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다(한국건설기술연구원, 2006; 백동열 등, 2006). 따라서 본 연구에서는 실험체 제작시 그림 2에서 보이는 바와 같이 FRP와 콘크리트 부착면에 규사코팅을 수행하였다.

실험체 제원은 5,500 mm × 1,175 mm × 672 mm(가로 × 세로 × 높이)이다. 제작된 시험체의 콘크리트 일축압축강도는 30 MPa이며, 곡면 FRP 상부플랜지 및 하부플랜지에 각각 스트레인게이지를 설치하였다(그림 3 참조). 시험체 제작과정은 그림 4와 같다.

3.1.2 하중재하 실험조건

재하하중은 천단부에 선하중으로 재하하였으며 하중재하용 actuator 용량은 500 kN으로 servo



그림 2. FRP 부재 규사코팅 후 전경

www.kci.go.kr

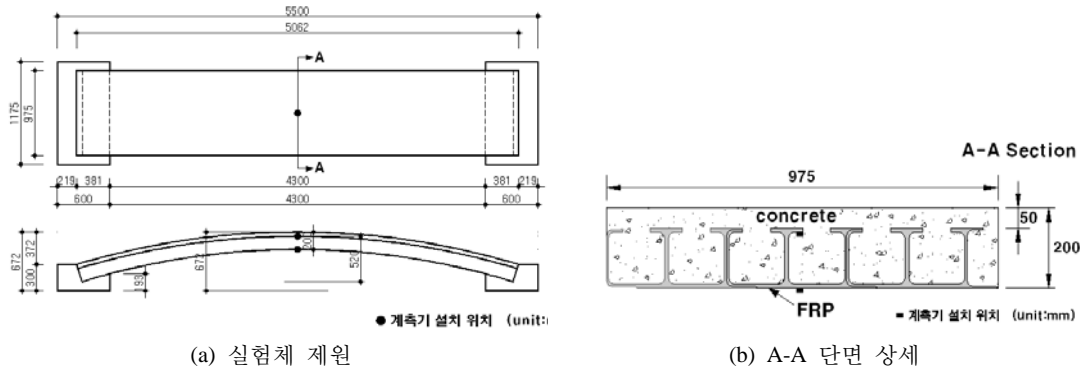


그림 3. 실험체 제원

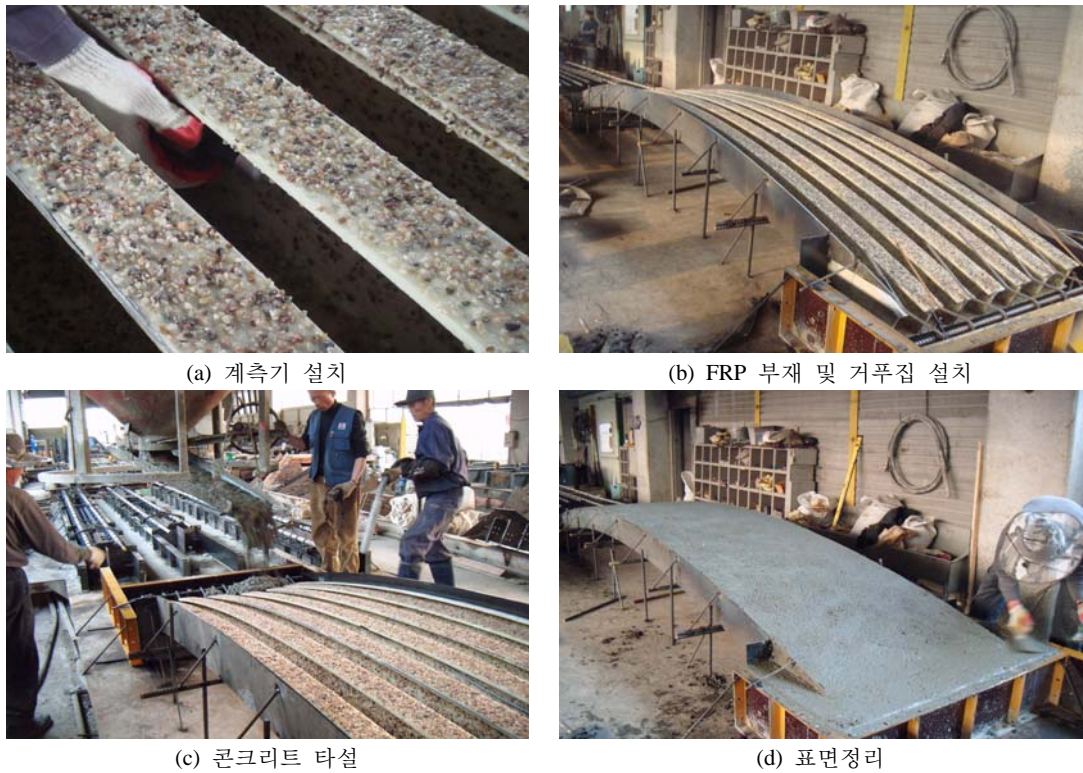


그림 4. 시험체 제작 전경

controller를 통한 하중제어 방식이다. 하중제하 속도는 19.62 kN/min으로 490 kN까지 하중제하 실험을 수행하였다(이규필 등, 2008). 또한 실험체 지점부는 그림 5에서 보이는 바와 같이 시험체 지지를 위한 강제슬래브로 연직방향 변위를 제어하도록 하였으며, 횡방향 변위 제어를 위한 지그를 강제슬래브에 고정하였다.



그림 5. 하중재하 실험 전경 및 지점부 변위제어 조건

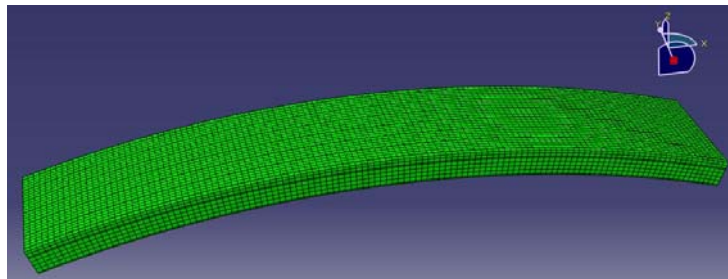


그림 6. 수치해석을 위한 유한요소망(합성부재 부분)

3.2 수치해석

3.2.1 수치해석 조건

본 연구에서는 FRP와 콘크리트 합성부재의 역학적 거동 특성 분석을 위하여 하중재하 실험과 동일한 조건에 대하여 유한요소법에 기반한 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 수치해석을 수행하였으며, 수치해석을 위한 합성부재 부분의 유한요소망은 그림 6과 같다. 수치해석시 FRP 부재와 콘크리트 부재는 각각 그림 3(b) 단면과 동일조건에 대하여 FRP 및 콘크리트는 각각 3차원 강체요소(solid element)로 모사하였으며, 선형탄성해석을 수행하였다. FRP와 콘크리트는 완전 부착조건으로 가정하여 nodal point에서 강결조건을 부여하였다. 지점부 구속조건은 실험조건과 동일하게 횡방향 및 연직방향 변위를 제어하였다.

3.2.2 입력물성치

수치해석을 위한 곡면 FRP 부재 입력물성은 부재의 특성상 상부플랜지, 하부플랜지, 복부판 등

표 2. 등가 탄성계수 산정을 위한 곡면 FRP 단면 및 특성

해 석 단 면	구 분	인장탄성율(섬유방향) (GPa)	단면적 (cm ²)
	① 상부플랜지	33.6 (E ₁)	8.00 (A ₁)
	② 하부플랜지	37.0 (E ₂)	15.0 (A ₂)
	③ 복 부 판	30.0 (E ₃)	14.93 (A ₃)
	총 단면적(A _{f0})	-	25

각각의 부재 부위마다 탄성계수가 다르므로, FRP 부재 부위별 실험결과 중 인장탄성율(섬유방향)에 대한 값을 토대로 등가탄성계수(E_f)를 다음 식 (1)과 같이 산정하였으며, 단위중량은 19 kN/m³을 사용하였다(표 2 참조)(이규필과 신휴성, 2010).

콘크리트 모델링을 위한 입력물성은 일축압축강도(f_{ck}) 30 MPa, 단위중량 23.5 kN/m³, 탄성계수 28,576 MPa ($E_c = 8500^3 \sqrt{f_{cu}}$, $f_{cu} = f_{ck} + 8$) 이다.

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

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

4. 실험 및 수치해석 결과 비교분석

재하실험 및 수치해석결과 최대 재하하중 조건에서 상부 플랜지 및 하부 플랜지에 발생하는 변형율은 표 3에서 보이는 바와 같다. 재하실험 계측결과로부터 인장 및 압축응력 계산은 곡면 FRP 부재의 부위별 시험결과(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 12.9 MPa가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 하부 플랜지에 발생하는 인장응력은 재하실험 결과 99.5 MPa, 수치해

표 3. 재하실험 및 수치해석 결과 비교

	재하하중 (kN)	변형율		발생응력	
		상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지	하부플랜지
재하실험 결과	490	-5.93 10 ⁻⁴	2.69 10 ⁻³	-16.4 MPa	99.5 MPa
수치해석 결과	490	-3.84 10 ⁻⁴	6.58 10 ⁻⁴	-12.9 MPa	22.1 MPa

※ (+) 인장, (-) 압축

표 4. 발생 인장 및 압축응력과 허용응력

	발생응력		허용응력	
	상부플랜지	하부플랜지	상부플랜지(압축)	하부플랜지(인장)
재하실험 결과	-16.4 MPa	99.5 MPa	-112.2 MPa	85.2 MPa
수치해석 결과	-12.9 MPa	22.1 MPa		

※ (+) 인장, (-) 압축

석 결과 22.1 MPa가 발생하는 것으로 나타났다.

상부플랜지에서 발생하는 변형율은 재하실험 결과 및 수치해석결과가 유사한 것으로 나타났으나, 하부플랜지에 발생하는 변형율은 재하실험결과가 수치해석결과보다 약 4배 정도 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이는 수치해석에서 가정된 곡면 FRP부재와 콘크리트 하부 플랜지부의 접촉면의 일체화가 실제 실험에서는 완전 일체화 거동을 보이지 않아 FRP부재에 하중부담이 수치해석적 이상조건에 비해 가중된데 기인한 현상으로 판단된다.

국외에서는 FRP 부재의 허용응력계산을 위한 안전계수로 3.0~5.0을 토목구조물에 적용하고 있다(한국건설기술연구원, 2006). 본 연구에서는 곡면 FRP 제작경험과 현장적용 사례가 전무한 실정을 감안하여, 안전계수 5.0를 기준으로 곡면 FRP 부재 상부플랜지 및 하부플랜지의 허용응력을 계산하였다(표 4 참조).

표 3에서 보이는 바와 같이 수치해석을 통해 계산된 상부 플랜지에 발생하는 압축응력과 하부플랜지에 발생하는 인장응력은 허용응력 범위 이내인 것으로 나타났으나, 재하실험을 통해 측정된 하부 플랜지의 인장응력은 허용 인장응력을 초과하는 것으로 나타났다.

하중재하 실험 및 수치해석결과 상부 플랜지 및 하부 플랜지에 발생하는 하중변형율 관계는 그림 7과 같다. 그림 7에서 보이는 바와 같이 재하실험결과, 최대 재하하중인 490 kN까지 하부 플랜지부의 하중변형율 곡선은 선형적으로 탄성거동을 보이고 있는 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트와 FRP 복합부재 허용응력 설계를 위하여, 본 연구에서 적용한 안전계수 5.0은 FRP 부재의 물리적 특성을 과소평가할 수 있는 것으로 판단된다.

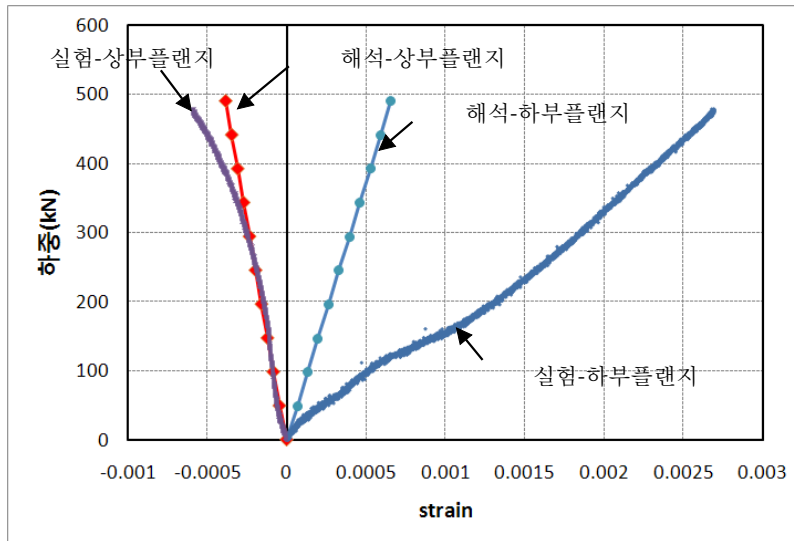


그림 7. 하중-변형을 관계 곡선

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. 하중재하 실험결과 상부플랜지에 발생하는 압축응력은 허용응력 범위 이내인 것으로 나타났으나, 재하실험 결과 하부 플랜지에 발생하는 인장응력은 허용 인장응력을 초과하는 것으로 나타났다. 이는 하중재하시 FRP-콘크리트 복합부재의 휨거동에 의한 계면의 전단변형 또는 전단파괴로 인하여 FRP 부재의 하중분담율 증가에 의한 것으로 판단된다.
2. 하중재하 실험결과 휨 압축응력이 발생하는 상부플랜지에 발생하는 변형율은 수치해석결과와 유사한 것으로 나타났으나, 휨 인장응력이 발생하는 하부플랜지에 발생하는 변형율은 수치해석 결과보다 약 4배 이상 크게 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 FRP와 콘크리트 계면에서의 전단 거동은 휨 인장에 의해 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.
3. 재하실험결과 최대 재하하중까지 하중-변형을 곡선은 선형적 관계로 탄성거동을 하는 것으로 나타났으며, 따라서 콘크리트와 FRP 복합부재 허용응력 설계를 위한 안전계수 5.0은 FRP 부재의 물리적 특성을 과소평가할 수 있는 것으로 판단된다.

-
4. FRP-콘크리트 복합부재의 설계 및 시공을 위해서는 두 부재의 일체화가 매우 중요한 요소로 나타났으며, 향후 객관적이고 정량적인 두 부재간의 부착평가에 대한 연구 및 현장검증을 통하여 곡면 FRP 부재의 단면형상에 의하여 야기될 수 있는 콘크리트 타설시 문제점 등을 검토할 계획이다.

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.

참 고 문 헌

1. 이규필, 신휴성 (2010), “터널 라이닝 구조체로서 곡면 섬유강화 복합재료의 적용성 검토를 위한 수치해석적 연구”, 한국터널공학회는논문집(터널기술), Vol. 12, No. 6, pp. 451~461.
2. 이규필, 이성원, 신휴성, 황재홍 (2008), “리브 보강 프리캐스트 터널 Liner의 역학적 거동 특성”, 한국터널 공학회논문집(터널기술), Vol. 10, No. 3, pp. 1~8.
3. 백동열, 조정래, 김성태, 박성용 (2006), “규사코팅된 콘크리트-GFRP 부착이음의 이면전단실험”, 2006 대한토목학회 정기학술발표회, pp. 142~145.
4. 한국건설기술연구원 (2010), “프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발”, 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 1차년도 연차보고서, pp. 116~119.
5. 한국건설기술연구원 (2006), “장수명 합리화 바닥판 개발-무강재 바닥판”, 건기연 2006-067 한국건설기술연구원 기본사업 최종보고서, 부록 A pp. 17~18.
6. Hollaway L.C. (2010), “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, Vol. 24, pp 2419~2445.