



새로운 FRP-콘크리트 전단부착성능 평가법을 활용한 최적 FRP 규사코팅 조건에 관한 연구

이규필¹, 신휴성^{2*}, 김승한³

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

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

ABSTRACT This study proposes a new testing method for shear bearing capacity of FRP-concrete interface, which could well consider a loading condition corresponding to a tunnel lining undergoing axial compression and could be easily carried out with a simply specified specimen. A parametric study is carried out for capturing an optimized condition of coarse-sand coating of FRP, which governs shear bearing capacity of FRP-concrete interface, by using the proposed testing manner in this study. From the parametric study, it is shown that the proposed testing method is reasonably feasible in comparison with the existing testing methods. An optimum condition of coated sand size and sand density is given for the shearing capacity of FRP-concrete interface.

Keywords: Fiber reinforced polymer (FRP), coarse sand coating, push-push single-lap test, shear bearing capacity of FRP-concrete interface

요약 본 연구에서는 압축력을 받는 터널 라이닝 부재 특성에 보다 부합된 조건에서 FRP-콘크리트 접촉면의 전단 저항력을 평가할 수 있는 새로운 시험법을 제안하였으며, 제안 시험법은 기존 시험방법에 비해 시험체 제작과 시험방법이 매우 용이하다. 제안된 시험법을 기반으로 FRP와 콘크리트 복합소재의 전단저항성을 좌우하는 규사코팅의 최적조건을 도출하기 위한 매개변수 연구를 실시하였다. 다양한 시료에 대한 시험결과를 기준 연구결과와의 비교분석을 통하여 제안 시험법의 타당성을 보였으며, FRP부재와 콘크리트 접촉면의 전단저항을 극대화 시킬 수 있는 효과적인 규사입경 및 밀도에 대한 최적 조건을 제시하였다.

주요어: 섬유강화 복합재료, 규사코팅, 압축-압축 일면 전단저항 시험법, FRP-콘크리트 접촉면의 전단저항력

접수일(2011.5.2), 수정일(2011.5.13), 게재확정일(2011.5.25)

¹ 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석연구원

² 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 연구위원

³ 비회원, (주)이소 지반사업부 이사

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

1. 서 론

본 연구에서는 인발성형방법의 제약조건 등으로 인하여 rebar, 교량바닥판 등과 같은 직선형 부재에 국한하여 생산되어온 섬유강화 복합재료(Fiber Reinforced Polymer: 이하 FRP)를 터널구조물 라이닝에 활용하기 위하여 일정 곡률반경을 갖는 곡면 FRP 부재를 인발성형 할 수 있는 전용장비를 구축하고 시제품을 생산하였다(이규필과 신휴성, 2010).

철근과 콘크리트는 상호간 부착력이 우수하고, 열팽창율이 비슷하기 때문에 상호 재료의 일체화가 용이하고 철근콘크리트 구조물이 성립된다. 그러나 일반적으로 FRP와 콘크리트 사이의 부착력은 철근과 콘크리트의 부착력보다 떨어지기 때문에, 이를 보완하기 위하여 규사코팅(coarse-sand coating)과 같은 예폭시 접착방식, 스터드 부착 방식 등의 이질 재료간의 일체화 방안이 고려되며 이에 대한 다양한 연구가 수행되어 왔다(김성태 등, 2010).

곡면 FRP와 콘크리트 합성부재에 대한 하중재하 실험결과 재하하중에 의한 휨인장 발생부에서 FRP와 콘크리트 계면에서의 전단거동이 곡면 FRP와 콘크리트 합성부재의 역학적 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(이규필 등, 2011).

FRP-콘크리트 계면에서의 전단거동을 고려한 구조물의 설계 및 해석을 위한 부착모델 개발연구가 수행되었으며(조근희 등, 2004), FRP와 콘크리트 계면 부착평가를 위하여 기존 시험연구에서는 가로×세로×길이 220 mm×220 mm×400 mm 또는 150 mm×150 mm×600 mm 규모의 시험체를 이용하여, 일면전단이음시험(single lap test) 또는 이면전단이음시험(double lap test)이 수행되었다. 상기 시험을 위한 시험체 제작시 콘크리트 시험체 내부에 인발 앵커 등을 추가로 설치해야 하거나, FRP 부재 인장을 위한 별도의 지그 등이 요구된다. 또한 FRP와 콘크리트 계면 휨 부착거동 특성 분석을 위하여 320 mm×250 mm×1,700 mm(가로×세로×길이)의 대형 시험체가 제작되는 등, 기존 시험법에서 요구되는 시험체 제작 및 시험과정이 용이하지 않았다.

본 연구에서는 소형 시험체(가로×세로×길이 100 mm×100 mm×400 mm)를 이용하여 FRP와 콘크리트 전단저항력 평가를 수행할 수 있는 새롭지만 매우 간단한 시험법을 제시하였으며, 기존 연구에서 제시된 시험 결과와의 비교분석을 통하여 본 연구에서 제안한 전단시험법의 합리성을 검토하였다. 또한 FRP 규사코팅에 사용된 골재의 입경 및 밀도의 최적 조건을 도출하기 위하여 다양한 골재 입경 및 밀도 모델을 설정하고 매개변수 연구를 진행하였으며, FRP부재와 콘크리트의 합성에 사용될 수 있는 효과적인 규사입경 및 밀도 조건을 제시하였다.

2. 이질 매질의 접촉면 전단저항시험법 제안

2.1 기존 시험법 특성 고찰

그림 1에서 보이는 바와 같이, FRP와 콘크리트 계면의 전단부착은 시험체의 형상 및 실험 방법에 따라 pull-push single-lap joint, pull-pull single-lap joint 및 pull-pull double-lap joint 등으로 구분 할 수 있다(한국건설기술연구원, 2006). 시험시 FRP 부재와 콘크리트에 작용하는 응력조건에 따라

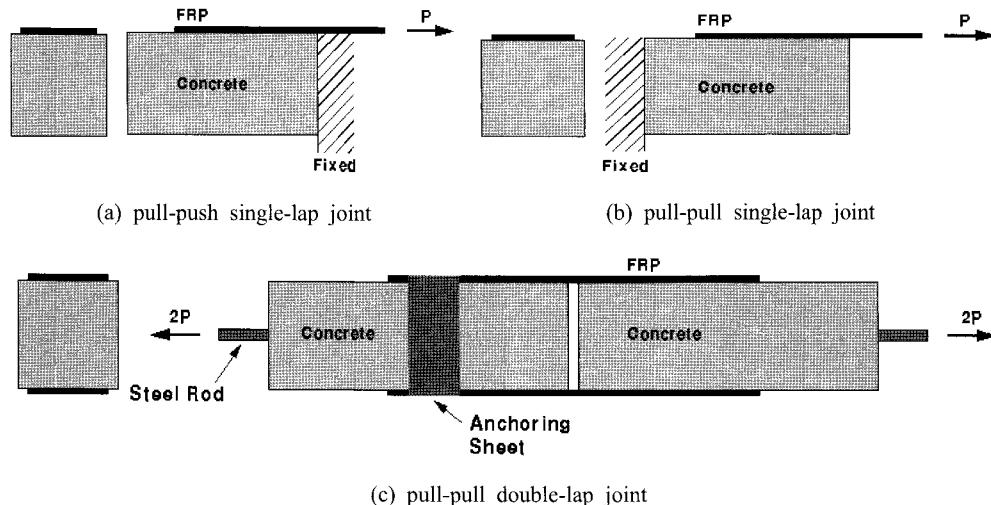


그림 1. 시험체의 형상 및 시험법 개념

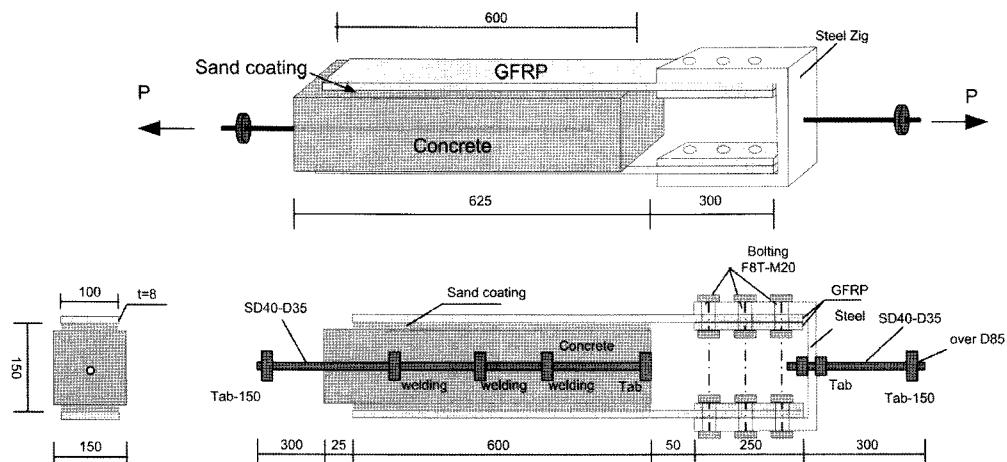


그림 2. Pull-pull double-lap joint 시험체(Cho et al., 2006)

pull은 인장, push는 압축을 의미하며, single-lap과 double-lap은 FRP 부재가 콘크리트와 일면(一面) 부착 또는 이면(二面)부착을 의미한다. 따라서 pull-push single-lap joint 시험법은 그림 1(a)에서 보이는 바와 같이 FRP와 콘크리트가 규사코팅으로 일체화된 시험체 대하여 계면 전단을 위한 FRP 부재에 인장력 재하시 FRP 부재에 인장력이 발생하게 되고, 콘크리트 부재는 하중재하방향으로 변위가 제어되어 있으므로 압축응력이 발생하며, FRP 부재가 일면부착된 시험체에 대한 시험을 의미한다.

문헌조사 결과 상기와 같은 시험은 220 mm×220 mm×400 mm와 150 mm×150 mm×600 mm 규모의 시험체를 이용하여 수행된 바 있으며, 시험체 제작시 그림 2에서 보이는 바와 같이 콘크리트 시험체 내부에 인발 앵커 등을 추가로 설치하거나, FRP 부재 인장을 위한 별도의 지그제작 등이 요구되었다. 또한 FRP와 콘크리트 계면 휨 부착거동 특성 분석을 위하여 320 mm×250 mm×1,700 mm(가로×세로×길이)의 대형 시험체가 요구되는 등 시험체 제작 및 시험수행이 용이하지 않았다.

2.2 압축력 재하 전단저항시험법

본 연구에서 제안한 시험법은 그림 3에서와 같이 FRP와 콘크리트 계면의 전단저항력 평가를 위하여 콘크리트 상부에 부착되어 있는 FRP에 전단방향으로 변위제어 방식에 따라 압축력을 재하하였다. 시험시 FRP 부재와 콘크리트에 모두 압축응력이 작용하게 되므로 압축력 재하 일면 전단 저항시험법(push-push single-lap joint 시험법)이라 명명할 수 있다.

FRP-콘크리트 계면의 전단저항력 평가를 위한 push-push single-lap joint 시험법에 따른 하중재 하시에는 콘크리트 계면에서 전단변형 저항효과가 발생하며, 이로 인하여 콘크리트와 부착되지 않은 방향으로 휘어지는 미세거동을 하게 되며, 동시에 FRP부재에는 압축력이 발생하게 된다. 터널구조물에 시공되는 아치형 콘크리트 라이닝에는 휨과 압축력이 동시에 작용하므로 push-push single-lap joint 시험은 이러한 터널 라이닝의 하중재하 조건을 기준 시험보다 비교적 잘 반영하고 있다.

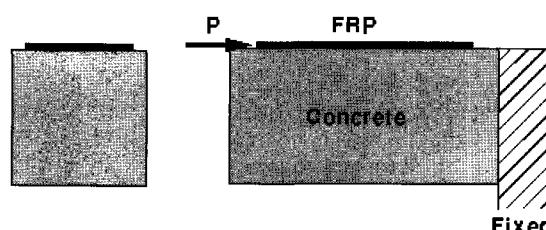


그림 3. 압축력 재하 직접전단 시험법

3. FRP 최적 규사코팅조건 도출 실험

3.1 시험 개요

본 연구에서 수행된 FRP부재와 콘크리트의 전단부착에 대한 실험 변수는 규사의 밀도와 입경으로 하였다. 규사의 밀도는 약 $1 \text{ kg/m}^2 \sim 7.2 \text{ kg/m}^2$ 로 변화시켰으며, 규사의 입경은 13 mm~9 mm, 9~6.5 mm, 6.5 mm~4.76 mm, 4.76~2.38 mm,의 규사를 사용하였다. 규사의 입경변화에 따른 전단부착 특성 분석을 위하여 표 1에서 보이는 바와 같이 13 mm~9 mm, 9~6.5 mm 굵은골재를 활용한 시험체, 6.5 mm~4.76 mm, 4.76~2.38 mm 잔골재를 활용한 시험체과 굵은골재와 잔골재를 혼합한 시험체로 총 3가지로 구분하여 제작하였다.

표 1. 규사 입경 및 밀도 조건

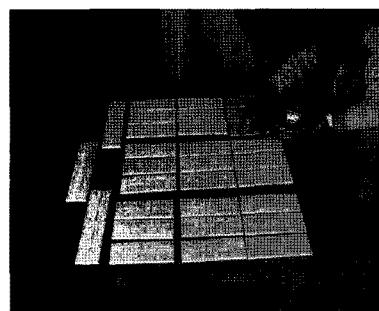
구분 \ 규사입경	13~9 mm (g)	9~6.5 mm (g)	6.5~4.76 mm (g)	4.76~2.38 mm (g)	합계 (g)
1-1	25.5	25.5			51
1-2	12	12			24
1-3	21	21			42
2-1	60	60			120
2-2	75.5a	75.5			151
2-3	57	57			114
3-1	90	90			180
3-2	90.5	90.5			181
3-3	94.5	94.5			189
4-1			28	28	56
4-2			30	30	60
4-3			32.5	32.5	65
5-1			41.5	41.5	83
5-2			34	34	68
5-3			43.5	43.5	87
6-1			60	60	120
6-2			55	55	110
6-3			61	61	122
7-1	10.7	10.7	10.9	10.7	43
7-2	6.7	6.7	6.7	6.9	27
7-3	7	7	7	7	28
8-1	13.3	13.1	13.3	13.3	53
8-2	16.8	16.8	16.8	16.8	67
8-3	19.1	19.3	19.3	19.3	77
9-1	36.5	36.5	36.5	36.5	146
9-2	37.3	37.1	37.3	37.3	149
9-3	44.8	44.8	44.8	44.6	179

3.2 시험체 제작

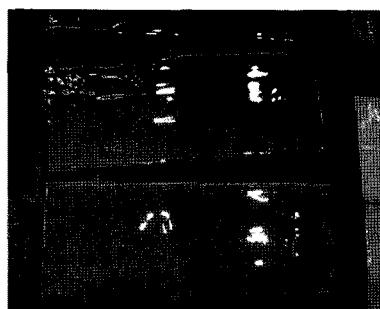
일반적으로 규사코팅의 경우 전단부착강도는 규사코팅면과 FRP 부재사이의 접착처리공정보다 규사코팅면과 콘크리트 사이의 처리 공정에 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있으나(한국건설기술연구원, 2006), 본 연구에서는 그림 4에서 보이는 바와 같이 FRP부재 표면에 도포되어 있는 박리제 제거를 위한 면처리 후 폴리머 재료를 이용하여 하도, 중도, 규사포설 및 상도(final coating) 순서로 FRP부재 규사코팅을 수행하였다.



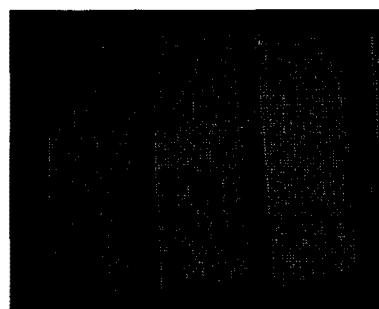
(a) FRP 부재 표면처리



(b) FRP 부재 하도처리



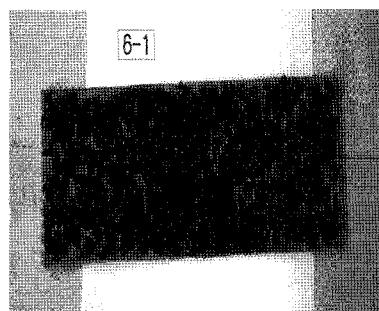
(c) FRP 부재 중도처리



(d) 규사포설



(e) FRP 부재 상도처리 전경



(f) 규사코팅 완료 후 전경

그림 4. FRP 부재 규사코팅 개요



그림 5. FRP-콘크리트 합성 시험체

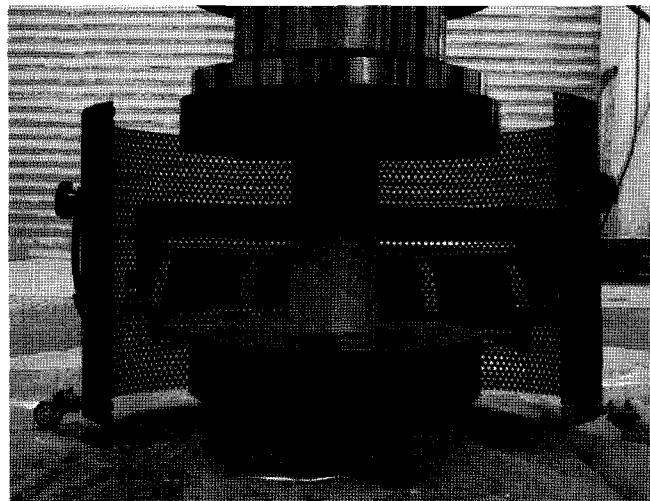


그림 6. 일축압축강도 시험 전경

규사코팅 완료 후 FRP 부재를 가로×세로×길이=100 mm×100 mm×400 mm 볼드에 설치 후 콘크리트 타설을 수행하였으며(그림 5 참조), 28일 양생 후 시험을 수행하였다. 콘크리트의 품질관리를 위하여 그림 6에서 보이는 바와 같이 일축압축강도 시험을 수행하였으며, 평균 일축압축강도는 39.1 MPa이다.

3.3 시험 방법

FRP와 콘크리트 계면의 전단거동 평가를 위한 push-push single-lap joint 시험은 그림 7에서 보이는 바와 같이 일반적인 일축압축강도 시험장비에 FRP 부재에만 제한적으로 하중재하가 가능하도록 지그를 설치 후, 일축압축강도 시험과 유사한 방법으로 하중재하를 수행하였다. FRP와 콘크리트 계면에서의 취성파괴가 예상되므로 실험조건은 1 mm/min의 변위제어 방식으로 수행하였다.

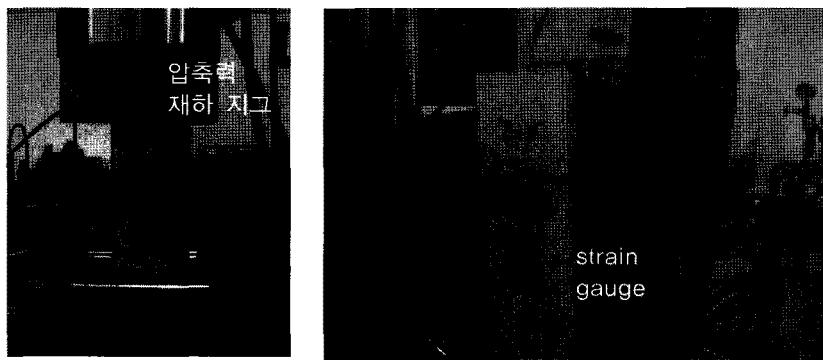


그림 7. Push-push single-lap joint 시험전경

4. 시험결과 분석

4.1 압축력 재하 직접전단 시험결과 분석

본 연구에서는 FRP부재와 콘크리트의 합성에 사용될 수 있는 효과적인 규사입경 및 밀도조건을 검토하기 위하여, 소형 시험체를 이용한 압축력 재하 전단저항시험법을 제안하였으며, 규사코팅에 사용된 골재의 입경 및 밀도를 매개변수로 한 실험적 연구를 수행하였다.

규사 입경별 규사 포설밀도 변화에 따른 FRP부재와 콘크리트 계면의 파괴 전단응력은 그림 8과 같다. 그림 8에서 보이는 바와 같이 동일한 규사입경 조건에서는 규사의 포설밀도가 높을수록 계면 파괴 전단응력도 선형적으로 증가하며, 규사 포설밀도는 계면의 파괴전단 응력과 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 실험결과의 회귀분석을 통해 산정된 상관계수값(R^2)은 0.86~0.95 이다.

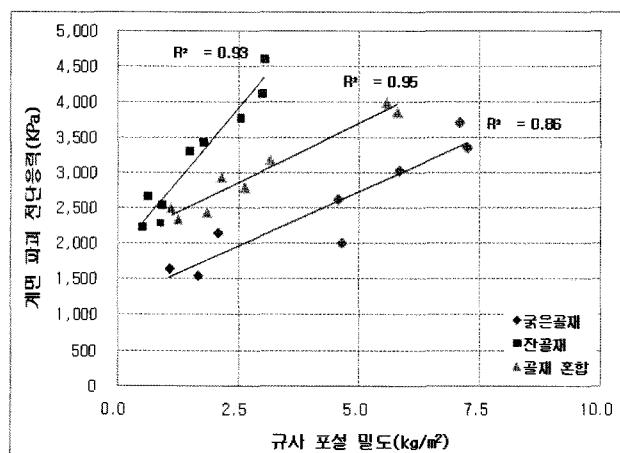
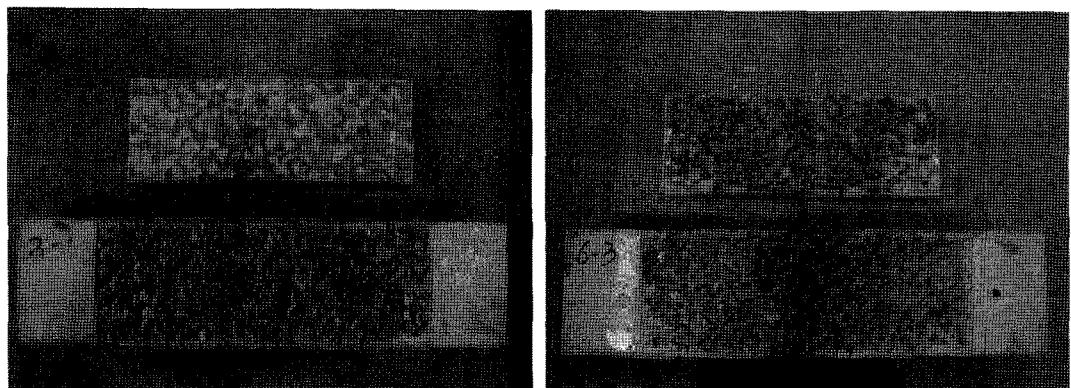


그림 8. 규사코팅과 계면파괴 전단응력 상관관계

잔골재, 굵은골재, 잔골재와 굵은골재 혼합 3가지 조건에 대한 시험결과, 동일 규사 포설밀도의 경우 잔골재 포설조건이 가장 큰 계면파괴 전단응력을 발휘하는 것으로 나타났다. 또한 규사입경이 작은 경우 동일 규사 포설밀도 증가시 계면파괴 전단응력이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

골재 입경변화에 따른 FRP부재와 콘크리트 계면의 파괴형태는 그림 9에서 보이는 바와 같이, 굵은골재만을 포설한 시험체의 경우(그림 9(a) 참조) 주로 FRP부재와 규사코팅 골재 부착계면에서 파괴면이 발생하였으며, 잔골재만을 포설한 시험체의 경우 규사코팅 골재와 콘크리트 부착계면과 콘크리트가 파괴되는 것으로 나타났다(그림 9(b) 참조).

본 연구에서는 하중재하에 따른 FRP 부재의 변형율을 측정하기 위하여 그림 10에서 보이는 바와 같이 FRP 부재 중앙부에 strain gauge를 설치하였다.



(a) 굵은골재 코팅 시험체 파괴면

(b) 잔골재 코팅 시험체 파괴면

그림 9. 시험 후 파괴면 전경

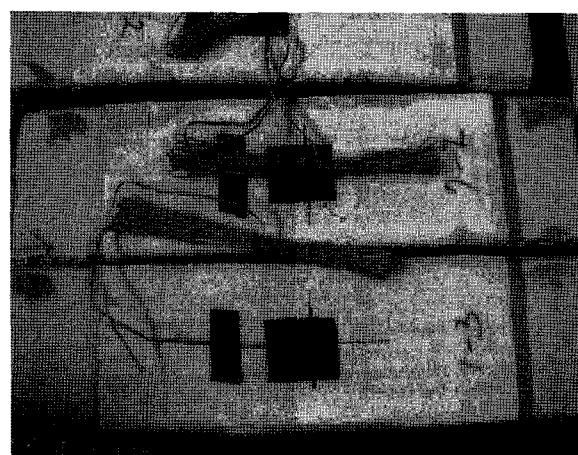


그림 10. Strain gauge 설치 전경

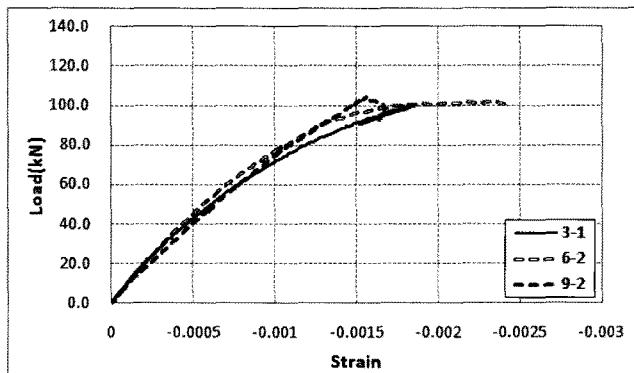


그림 11. 하중-변형률 곡선

유사한 파괴하중 조건(case 3-1, 6-2, 9-2)에 대한 비교분석결과, 그림 11에서 보이는 바와 같이, FRP 부재의 변형률은 재하하중이 증가함에 따라 거의 선형적으로 증가하며 재하하중 약 100 kN에서 FRP와 콘크리트 계면에서 취성파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 잔골재만 포설한 case 6-2의 경우 변형률값 약 0.0018 이후부터 FRP와 콘크리트 계면에서 응력이완(yielding)이 발생한 이후 완전소성(perfect plasticity) 경향을 보이는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서 수행한 시험조건 가운데 FRP 부재와 콘크리트의 합성을 위해서는 6.5 mm~2.38 mm 잔골재를 높은 밀도로 포설하는 것이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

4.2 압축력 재하 전단저항시험과 기존 연구결과 비교분석

본 연구에서 제안한 FRP-콘크리트 계면의 전단저항력 평가 시험법의 타당성을 검토하기 위하여, 제안 시험법을 통해 도출된 시험결과와 국내외에 발표된 FRP-콘크리트 계면의 전단저항력 평가 실험결과를 상호 비교/분석하였다.

표 2. 전단저항력 평가 시험법간 시험결과 비교

시험법	규사입경 (mm)	밀도 (kg/m ³)	계면파괴 전단응력 (kPa)	평균 (kPa)
Pull-pull double-lap joint	1.67~4.5	4	2,096.7~2,299.0	2,193.5
	4~7	2	1,334.0~1,481.3	1,418.0
	4~7	3	1,832.3~2,174.3	1,960.3
	4~7	4	1,996.3~2,176.3	2,091.8
	6.75~9	4	1,848.0~2,221.5	2,004.5
압축력 재하 전단저항시험 (Push-push single-lap joint)	13~6.5	1.1~7.2	1,542.7~3,710.4	2,620.2
	4.76~2.38	0.5~3	2,227.2~4,598.7	4,160.3
	13~2.38	1.1~5.8	2,347.9~3,983.6	3,108.7

기존 연구에서 수행한 시험결과는 pull-pull double-lap joint 시험에 의한 것이며, 9~1.67 mm 입도의 규사를 약 2 kg/m^2 ~ 4 kg/m^2 밀도로 포설한 결과이다(백동열 등, 2006). 또한 본 연구에 사용된 시험체는 규사코팅 입도분포 및 밀도, 규사코팅에 사용된 폴리머 등의 차이로 인하여 문헌상의 결과와 정량적으로 비교분석될 수 없으나, 본 연구에서 제안한 시험법 적합성 검토를 위한 정성적 평가는 가능할 것으로 판단되었다.

표 2에서 보이는 바와 같이 pull-pull double-lap joint 시험에 의한 기존 연구결과에서 FRP와 콘크리트 계면의 파괴 전단응력은 1,334.0 kPa~2,299.0 kPa이다. 계면 파괴 평균전단응력으로 분석하면 규사 밀도증가에 따라 FRP와 콘크리트의 전단부착 효과가 증가하는 것으로 나타났으나, 규사 입경 변화에 의한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

본 연구에서 제안한 시험법으로 부터의 결과에서 FRP와 콘크리트 계면의 파괴 전단응력은 1,542.7 kPa~4,598.7 kPa이며, 규사 밀도증가에 따라 FRP와 콘크리트의 전단부착 효과가 증가할 뿐만 아니라(그림 8 참조), 계면 파괴 평균전단응력으로 분석하면 규사입경이 작을수록 FRP와 콘크리트의 전단부착 효과가 증가하는 것으로 나타났다.

상기와 같이 두 시험법의 시험결과를 토대로 본 연구에서 제안한 시험법은 FRP와 콘크리트의 전단저항력을 평가하는 시험법으로 충분히 활용할 수 있을 것으로 판단되며, pull-pull double-lap joint 시험법 대비 규사입경 변화의 영향까지 고려할 수 있는 시험법이라 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 FRP와 콘크리트 전단저항력 평가를 위한 시험법을 제안하고, 제안한 시험법의 합리성을 검토하였다. 또한 규사코팅에 사용된 골재의 입경 및 밀도를 매개변수로 한 실험적 매개 변수 연구를 통하여, FRP부재와 콘크리트의 합성에 사용될 수 있는 효과적인 규사입경 및 밀도에 대하여 분석하고 최적안을 제시하였다. 이와 관련된 연구내용을 정리하면 다음과 같다.

1. Pull-pull double-lap joint 시험을 통한 기존 FRP와 콘크리트 전단저항력 관련 연구결과와 본 연구에서 제안한 압축력 재하 전단저항시험 결과의 정성적 비교를 통하여, 본 연구에서 제안한 시험법은 FRP와 콘크리트의 전단 저항력 시험에 효과적으로 활용할 수 있으며, pull-pull double-lap joint 시험법에 대비해 규사입경 변화의 영향까지 고려할 수 있는 시험법인 것으로 검토되었다.
2. 규사코팅에 사용된 골재의 밀도 및 입경을 매개변수로 시험을 수행한 결과 밀도증가에 따라 FRP와 콘크리트의 부착효과가 선형적으로 증가하는 것으로 나타났으며, 잔골재를 사용하는 것

이 FRP와 콘크리트 부착에 보다 효과적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 수행한 시험조건 가운데 FRP 부재와 콘크리트의 효과적인 일체화 합성을 위해서는 6.5 mm~2.38 mm 잔골재를 높은 밀도로 포설하는 것이 가장 효과적인 것으로 나타났다.

3. 골재 입경변화에 따른 FRP부재와 콘크리트 계면의 파괴형태는 굵은골재만을 포설한 경우 FRP 부재와 규사코팅 골재 부착계면에서 파괴면이 형성되며, 잔골재만을 포설한 시험체의 경우 규사 코팅 골재와 콘크리트 부착계면과 콘크리트가 파괴가 발생하는 것으로 나타났다. 이로 인하여 유사한 파괴하중 조건에서 잔골재만 포설한 경우 FRP와 콘크리트 계면에서 응력이완(yielding)이 발생된 이후에는 완전소성(perfect plasticity) 경향을 보인다.

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. 김성태, 박성용, 조정래, 김병석, 조근희(2010), “기계적 합성이 적용된 FRP-콘크리트 합성 바닥판의 거동 분석”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 22, No. 5, pp. 609-616.
2. 백동열, 조정래, 김성태, 박성용(2006), “규사코팅된 콘크리트-GFRP 부착이음의 이면전단실험”, 대한토목학회 정기학술발표회, pp. 142-145.
3. 이규필, 신흐성(2010), “터널 라이닝 구조체로서 곡면 섬유강화 복합재료의 적용성 검토를 위한 수치해석적 연구”, 한국터널공학회논문집, Vol. 12, No. 6, pp. 451-461.
4. 이규필, 신흐성, 김승한(2011), “터널 라이닝 구조체로서 활용을 위한 곡면 FRP-콘크리트 복합부재의 역학적 거동특성 분석 연구”, 한국터널지하공간학회논문집, Vol. 13, No. 2, pp. 149-158.
5. 조근희, 조정래, 이영호, 김병석(2004), “FRP-콘크리트 계면의 파괴 역학적 부착 모델”, 대한토목학회논문집, Vol. 24, No. 4A, pp. 653-661.
6. 한국건설기술연구원(2006), “장수명 합리화 바닥판 개발-무강재 바닥판”, 건기연 2006-067 한국건설기술 연구원 기본사업 최종보고서.
7. 한국건설기술연구원(2010), “프리캐스트 복합소재 곡면패널 개발 및 수로터널 활용기술 개발”, 한국건설교통기술평가원 건설기술혁신사업 1차년도 연차보고서.

8. Cho, K., Cho, J.R., Chin, W.J., Kim, B.S. (2006), "Bond-slip model for coarse sand coated interface between FRP and concrete from optimization technique", *Computers & Structures*, Vol. 84, pp. 439-449.