

외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술

Strengthening with Externally Prestressed CFRP Strips for RC Structures



유영찬*
Young-Chan You



최기선**
Ki-Sun Choi



조백순***
Baik-Soon Cho



김금환****
Keung-Hwan Kim

1. 서론

철근콘크리트 구조물을 구성하는 콘크리트는 경제성과 내구 성능이 우수한 건설 재료로서 현대도시 및 사회의 건설에 가장 널리 이용되어 온 재료의 하나이다. 그러나 철근콘크리트 구조물은 설계 및 시공상의 품질오차 뿐만 아니라 환경의 변화, 하중조건의 변화 등의 시간적 노후화 현상에 의해 구조물의 기능이 저하된다. 이와 같은 노후화 콘크리트 구조물의 안전성에 심각한 위협을 줄 수 있으므로, 구조물에 대한 주기적인 점검을 통하여 성능이 설계상의 허용치 이하로 저하되기 전에 원상태와 동등 이상으로 회복시키고자 하는 노력 및 기술이 필요하다.

콘크리트 구조물에 대한 보강공법은 1950년도에 개발된 강판보강공법을 위시로 하여 강연선에 의한 외부 프리스트레싱 공법으로 발전하고 있으며, 약 15년 전부터는 신소재인 FRP (fiber reinforced polymer)에 의한 보강공법이 본격적으로 개발되어 실용화되고 있다. FRP에 의한 보강공법은 재료 자체의 고강도, 높은 강도/중량비, 피로 및 부식에 대한 높은 저항성 등의 특징으로 인하여 최근에 새로운 보강 재료로서 각광을 받고 있다. 한편, 슈트형 FRP 보강공법은 통기·통수성 부족 및 현장에서의 품질관리 어려움으로 인하여 그 적용성이 저하되고 있는 추세이며, 공장 생산된 FRP strip(플레이트 또는 라미네이트)형 보강공법이 개발되었으나, 상대적으로 작은 폭/두께 비로 인하여 보강 재료가 설계강도에 이르기 전에 조기에 박리파괴되는 단점을 지니고 있는 것으로 보고되고 있다. 이에 따라 최근에 이러한 조기 부착파괴의 한계를 극복하고, 구조내력 뿐만 아니라 사용성에 대한 보강을 위해 탄소섬유판에 프리스트레스를 도입하여 보강하는 공법이 선진국에서 개발되어 상

용화되고 있다. 본 공법은 고정하중에 의해 과도한 균열이나 처짐이 발생된 부재의 사용성 회복이 가능할 뿐만 아니라, 내하력의 증진은 물론 재료강도(tensile strength)를 100% 활용할 수 있는 장점이 있다.

본 고에서는 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술에 대하여 외국에서 상용화되고 있는 공법을 중심으로 그 현황을 간략히 살펴보고, 한국건설기술연구원에서 최근에 개발된 보강공법의 역학적 성능 파악을 위하여 국내에서 수행된 재하실험 연구 내용을 소개함으로써 관련 공법의 국내 보급에 일조하고자 한다.

2. 철근콘크리트 구조물 보강공법의 분류

2.1 강판보강공법

강판보강공법은 콘크리트 부재의 인장측 외면에 강판을 접착·부착시켜 기존의 콘크리트와 일체화시킴으로써 철근을 배근한 것과 같은 보강 효과를 얻는 공법이다. 강판보강공법은 접착제인 에폭시의 시공 방법에 따라 크게 강판압착공법과 강판 주입공법으로 구분된다. 강판보강공법은 비중이 높은 강재를 이용하므로 중량이 증가되며 시공이 어려운 단점 이외에도 부식의 위험이 상존하고 있는 문제점이 지적되고 있다.

2.2 FRP 보강공법

FRP 보강공법은 경량·고강도·고내구성의 특징을 지니고 있는 신소재 FRP를 보강재로 사용하는 공법으로, 공법의 원리는 강판보강공법과 거의 동일하다. FRP 보강공법은 현장에 반입될 때의 형태와 현장에서의 시공 방법에 따라 습식 현장 시공 시스템(wet lay-up system), 프리프레그 시스템(pre-preg system) 및 사전 양생 시스템(pre-cured system)으로 구분이 가능하며, 세부적으로 사전 양생 시스템은 외부 부착형, 단

* 정희원, 한국건설기술연구원 건축구조·재료연구실 책임연구원
ycyou@kict.re.kr

** 정희원, 한국건설기술연구원 건축구조·재료연구실 연구원

*** 정희원, 인제대학교 토목공학과 교수

**** 정희원, 한국건설기술연구원 건축구조·재료연구실 연구위원

면 증설형 및 표면 매입형으로 구분이 가능하다. 각 공법의 특징은 <그림 1>과 같다.

2.3 외부 프리스트레스 보강공법

외부 프리스트레스 보강공법은 강연선을 이용하여 작용하중의 반대 방향으로 프리스트레스를 도입함으로써 적재하중은 물론 고정하중에 대해서도 보강이 가능한 공법으로, 구조물의 처짐 및 균열제어 등의 사용성 측면에서 유리할 뿐만 아니라 극한 설계내력을 증가시킬 수 있는 장점이 있다. 그러나 강판보강공법과 같이 강재의 부식 가능성, 자중의 증가 문제뿐만 아니라 정착부의 응력 집중에 대한 세심한 주의를 필요로 한다.

3. 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술

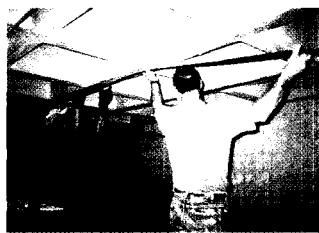
3.1 개념

외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술은 경량·고강도·비부식성의 특징을 지니고 있는 FRP 복합체를 콘크리트 면에 접착하여 보강하기 이전에 소정의 프리스트레스를 도입한 후 정착 장치를 이용하여 정착/부착시키는 것을 기본으로 하고 있다. 이에 따라 본 기술은 외부 프리스트레스에 의한 보강 기술이 지니는 장점을 그대로 지닐 뿐만 아니라 기존의 FRP 접착에 의한 보강공법이 지니는 대부분의 장점을 그대로 포함할 것으로 기대된다. 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술의 개념은 <그림 2>와 같다²⁾.

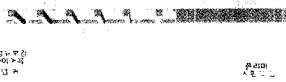


(a) 습식 현장 시공시스템(기계함침)

(b) 프리프레그 시스템



(c) 사전 양생 시스템 (외부부착형)



(d) FRP 단면 증설 시스템

그림 1. FRP 보강공법의 종류 및 특징

3.2 보강 기술의 장·단점

내력저하가 발생된 콘크리트 부재의 표면에 FRP 보강재에 프리스트레스를 도입하여 보강하면 많은 장점을 기대할 수 있다. 기존의 연구자에 의한 실험적 연구 및 해석적 연구에 의하면³⁾ 프리스트레스를 도입함으로써 FRP에 의한 보강의 장점을 극대화할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 이러한 장점을 반영한 실용적인 공법이 각국에서 개발되고 있으며, 일부에서는 실용화단계에 이르고 있다. FRP에 프리스트레스를 도입하여 정착·보강하는 공법의 장점을 기술하면 <표 1>과 같다.

3.3 탄소섬유판에 대한 프리스트레스의 도입 방법

현재 탄소섬유판에 대하여 프리스트레스를 도입하는 방법은 다음 3가지 방법이 제안되고 있으며, 이 중에서 각 제조회사의 상용화된 공법에서 채용하고 있는 방법은 보에 직접적으로 반력을 작용시키면서 탄소섬유판에 인장력을 도입함으로써 직접적으로 프리스트레스를 도입하는 방법이 주종을 이루고 있다.

3.3.1 캠버 유도 방법

탄소섬유판에 프리스트레스를 도입하는 방법으로서 최초로 검토된 방법은 보강될 부재의 하부에 솟음이 발생되도록 캠버를 유도하고, 탄소섬유판을 부착하여 에폭시가 충분히 경화된 다음에 캠버를 제거함으로써 간접적으로 프리스트레스를 도입하는 방법이다. 이 방법에서는 보강재에 직접적으로 인장력을 작용하지 않고 콘크리트의 인장면에 탄소섬유판을 부착하기 전에 보강될 부재를 상향으로 캠버를 줌으로써 탄소섬유판이 간



(a) Overloaded bridge girder



(b) Applying the Sika CarboDur prestressing system



(c) Prestressed bridge girder

그림 2. 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강기술의 개념

표 1. 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술의 특징

구분	외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술
사용성	<ul style="list-style-type: none"> - 하중의 초기 단계에서 콘크리트의 대부분이 압축영역에 있으므로 강성이 증가되며, 이로 인하여 처짐이 감소된다. - 보강 전에 발생되었던 균열 폭을 줄이거나 닫히게 할 수 있다. - 적재하중에 의한 균열 형성이 지연되며, 균열이 발생되더라도 넓은 범위로 분산된다. 또한 균열 폭도 감소한다. - 균열발생의 지연 및 균열 폭의 감소로 인하여 사용성이 증가되며, 내구성의 증가를 기대할 수 있다.
장점	<ul style="list-style-type: none"> - 콘크리트 단면이 비균열상태로 존재하는 범위내에서 콘크리트 전단면이 전단에 유효하게 거동하므로 부재의 전단내력을 증가시킨다. - FRP 보강량이 동일할 경우, 부재의 저항모멘트를 증가시킬 수 있다. 반대로, 단순부착형 보강공법을 기준으로 동일한 보강 효과를 얻기 위한 FRP 단면적을 감소시킬 수 있다. - 적절한 정착장치를 사용하여 프리스트레스트를 도입하면 단순부착형 FRP 보강공법에서 관측되는 박리파괴를 방지할 수 있으므로 보강된 부재의 저항모멘트를 증가시킨다. - 프리스트레스트를 도입하여 보강하면 단면의 중립축을 낮은 레벨로 유지할 수 있어 구조체의 효율성을 제고할 수 있다. - FRP에 프리스트레스트를 도입하여 보강하면 부재의 항복모멘트를 증가시킬 수 있다.
단점	<ul style="list-style-type: none"> - 프리스트레스트의 도입 공정 및 장비에 따라 단순 부착형 FRP 보강공법에 비하여 시공 비용이 증가된다. - 프리스트레스트 도입 공정의 추가로 인하여 공사기간이 증가된다. - FRP에 프리스트레스트를 도입하면서 콘크리트 표면에 부착하기 위한 각종 Hardware적인 기술 및 장비의 개발이 요구된다.

접적으로 프리스트레스트를 받도록 유도한다. Ehsani와 Saadatmanesh⁴⁾ 등에 의해 시도된 프리스트레스트 예를 나타내면 <그림 3>과 같다.

3.3.2 간접 긴장 방법

주로 실험실에서 탄소섬유판에 프리스트레스트를 도입하는 방법으로 검토된 방법으로서, 반력 프레임에 이용하여 탄소섬유판에 프리스트레스트를 도입한 상태에서 보강될 부재에 정착하는 방법이다. 이 프리스트레스트 방법에서는 외부의 반력 프레임을 설치하고 잭킹에 의해 탄소섬유판에 직접적으로 인장력을 도입한 다음, 보강될 모재에 부착 및 정착함으로써 직접적으로 프리스트레스트를 도입한다. Deuring⁵⁾에 의해 시도된 간접 긴장방법의 예를 나타내면 <그림 4>와 같다.

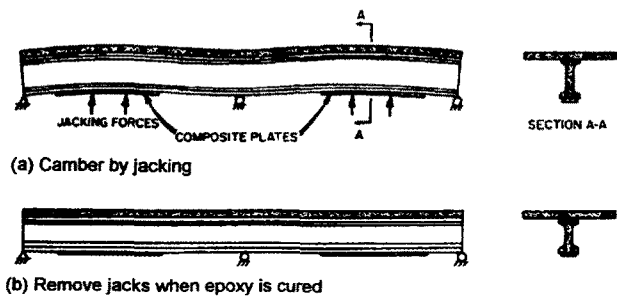


그림 3. Ehsani와 Saadatmanesh⁴⁾ 등에 의한 프리스트레싱 방법

3.3.3 직접 긴장 방법

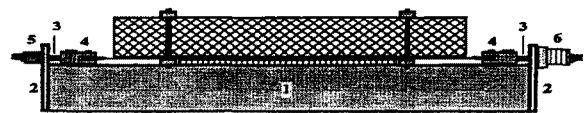
대부분의 상용화된 공법에서 프리스트레스트를 도입하는 방법으로 채택하고 있는 방법으로서, 보강될 구조물에 직접적으로 고정된 정착장치(dead anchor)를 설치하여 반력대를 구성하고, 탄소섬유판을 고정하고 있는 긴장장치(jacking anchor)에서 인장력을 도입함으로써 프리스트레스트를 도입하며, 탄소섬유판에 인장력이 작용하고 있는 상태에서 이동단 정착장치(live anchor)를 콘크리트에 고정·정착하는 방법이다. Wight⁶⁾ 등에 의해 시도된 직접 긴장 방법은 <그림 5>와 같으며, 상기의 기술을 실제 구조물에 최초로 적용한 S사의 LEOBA 시스템의 정착장치 원형(proto-type)을 소개하면 <그림 6>과 같다.

3.4 상용화 프리스트레스트 탄소섬유판 보강공법 현황

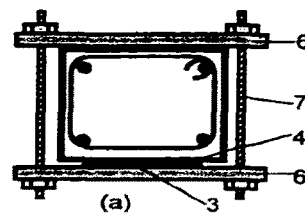
현재 국외에서 상용화되고 있는 프리스트레스트 탄소섬유판 보강공법은 S사의 LEOBA 공법 및 Stress-Head 공법, SP사의 공법 등의 3개 공법과 일본의 N사의 1개 공법으로 파악되고 있으며, 국내에서도 한국건설기술연구원, 충북대학교 등에서 연구 개발이 진행되고 있으나 아직까지 상용화 단계에까지는 이르지 못하고 있다.



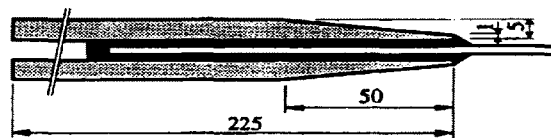
(a) FRP 긴장



(b) 보강 실험체 정착 및 양생



(c) 정착 장치



(d) 긴장 장치 단부

그림 4. Deuring⁵⁾ 등에 의한 프리스트레싱 방법

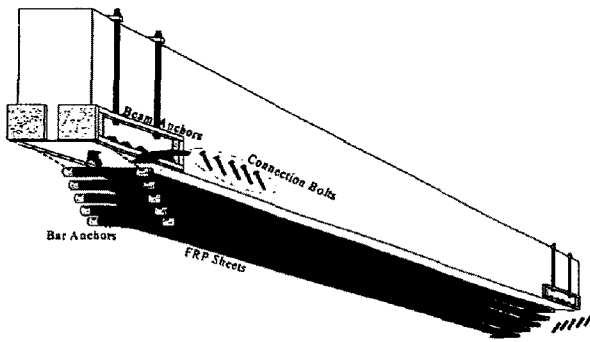


그림 5. Wight⁶⁾ 등에 의한 프리스트레싱 방법

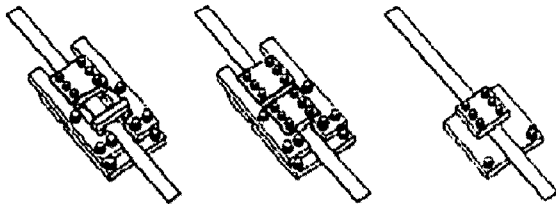


그림 6. Andra⁷⁾ 등에 의한 프리스트레싱 방법(Sika LEOBA 공법)

3.4.1 스위스 S사의 LEOBA 시스템

S LEOBA 시스템은 플레이트(plate) 형상으로 성형한 탄소섬유판을 단일 정착 장치로 정착하는 형상으로, <그림 7>에서 보는 바와 같이 금속제의 플레이트를 탄소섬유판의 상·하부에 설치하고, 볼트를 이용하여 긴결함으로써 마찰력에 의해 긴장재를 지지하는 특징을 지니고 있다. 탄소섬유판을 고정하는 정착 장치는 별도의 콘크리트 앵커에 의해 모재에 매립된다.

3.4.2 스위스 S사의 stress-head 시스템

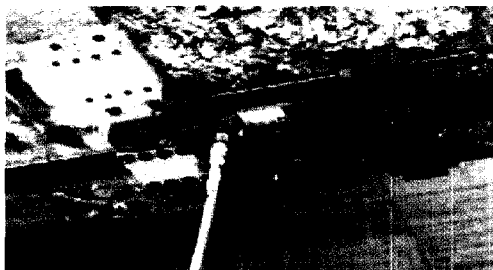
S사의 stress-head 시스템은 플레이트(plate) 형상으로 성형한 탄소섬유판의 단부에 <그림 8>에서 보는 바와 같이 탄소섬유를 와인딩하여 공장에서 특수제작된 FRP 블록(소위 stress-head)을 이용하여 마찰력에 의해 탄소섬유판을 고정하고, Stress-Head 블록을 강재의 프레임에 이용하여 모재에 고정하는 특징을 지니고 있다.

3.4.3 스위스 SP사

SP사의 프리스트레스 탄소섬유판 보강공법은 플레이트(plate) 형상으로 성형한 탄소섬유판을 단일 정착장치로 정착하는 형상으로, <그림 9>에서 보는 바와 같이 금속제의 플레이트를 탄소섬유판의 하부에만 설치하고, 접착제 및 콘크리트 앵커에 의한 압착에 의해 긴장재를 지지하는 특징을 지니고 있다. 이 시스템은 정



(a) 정착 장치

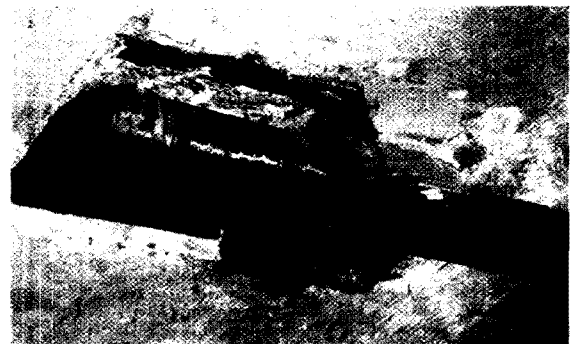


(b) 긴장 장치



(c) 시공 상황

그림 7. LEOBA 시스템



(a) 고정단 정착 장치



(b) 이동단 정착 장치 및 긴장 장치

그림 8. Stress-head 시스템



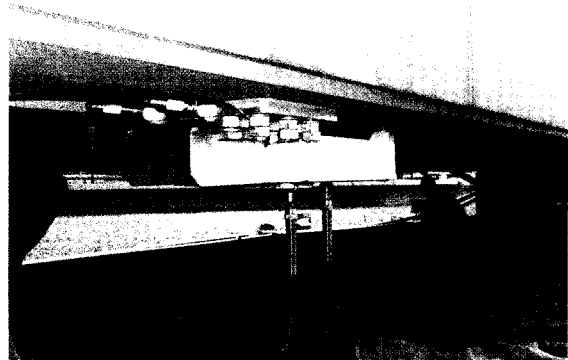
(a) 고정단 정착 장치



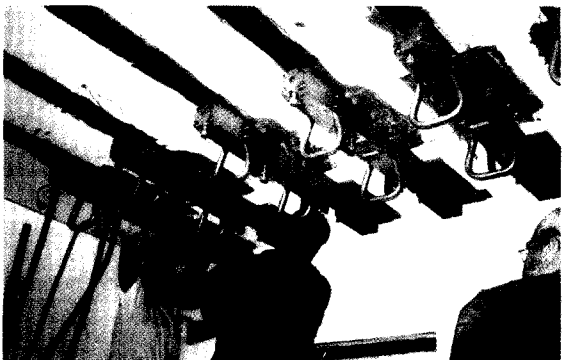
(a) 고정단 정착 장치



(b) 이동단 정착 장치 및 긴장 장치



(b) 이동단 정착 장치 및 긴장 장치



(c) 보강공사 현황

그림 9. SP사의 프리스트레싱 시스템의 적용 사례

착장치가 프리스트레싱의 긴장력만 부담하는 것을 원칙으로 하고 있어 S사의 공법과는 시스템의 기본 원리가 다르다.

3.4.4 일본 N사의 out-plate 공법

일본 N사의 out-plate 공법은 <그림 10>에서 보는 바와 같이 양단에 정착장치를 가지는 탄소섬유판을 긴장하고, 콘크리트 모체에 정착장치를 고정 및 접착하는 보강공법이다. 공법의 기본 원리는 S사의 두 보강공법(LEOBA 와 stress head 시스템)과 같이 정착장치에서 프리스트레싱의 긴장력 뿐만 아니라 탄소섬유판에 부담되는 추가인장력을 부담하는 것을 기본 원리로 하고 있다.

그림 10. N사의 out-plate 시스템

4. 외부 프리스트레스트 탄소섬유판으로 보강된 슬래브 교량의 재하 실험

4.1 실험 개요

본 장에서는 FRP 보강공법의 장점 및 외부 프리스트레싱 보강공법의 장점을 조합한 FRP 외부긴장 보강시스템의 개발 프로젝트의 일환으로 한국건설기술연구원 건축구조·재료연구실에서 개발된 보강공법의 특징을 소개하고, 본 공법의 시공성 및 현장보강성능을 확인하기 위해 슬래브 교량을 대상으로 실시한 현장 재하 시험의 내용 및 결과를 간단히 기술하고자 한다.

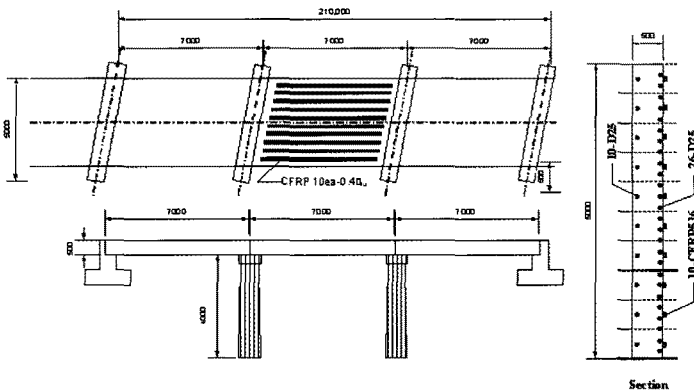
4.2. 재하 실험

4.2.1 대상 구조물의 선정

대상 교량 구조물은 본 연구의 목적에 부합하고 공법의 시공 및 재하 시험이 용이한 교량을 선정하였다. 본 연구의 특성상 공용중인 교량을 대상으로 재하 시험을 수행하기에는 여건상 여러 가지 어려운 점이 있어, 현재 사용이 중지된 교량 중 본 연구의 연구기관과 참여기업(공법 시공)의 활동성이 용이한 위치의 교량을 선정하였다. 대상 교량은 3경간 슬래브 교량으로



(a) 교량 전경



(b) 교량 제원

그림 11. 대상 교량 형상 및 치수

〈그림 11〉과 같이 교폭 5 m, 경간장 7 m이며, 두 번째 경간에 대하여 보강 및 재하 실험을 실시하였다.

4.2.2 보강 계획

외부 프리스트레스트 탄소섬유판 보강공법에서는 〈그림 12〉에서 보는 바와 같이 탄소섬유판에 긴장력을 도입·고정시키기 위한 정착 장치를 설치한 후에, 정착 장치에 탄소섬유판을 고정시킨 후 긴장 장치로 프리스트레스를 도입하였다. 정착 장치의 설치시에는 사전에 철근탐사를 실시하여 철근의 간섭을 피할 수 있도록 정착판을 매설하였으며, 긴장 장치가 설치되는 이동단 정착 장치와 반대편의 고정단 정착 장치는 서로 교반하여 설치하였다. 보강될 탄소섬유판의 소요개수는 차량하중에 의한 작용 모멘트를 초기 긴장력에 의해 유도된 모멘트에 의해 상쇄시킬 수 있도록 계산하여 총 10개로 선정하였다. 한편, 본 슬래브 교량의 하부면을 조사한 결과 중앙부로 갈수록 솟음량이 커지는 역 캠버가 관측되어 부착 시스템을 적용하기에 부적합한 것으로 판단되었기 때문에 10개소 모두 비부착 시스템으로 시공되었다.



(a) 정착 장치 설치



(b) 긴장력 도입



(c) 보강 공사 완료

그림 12. 외부긴장 탄소섬유판 보강 공사 현황

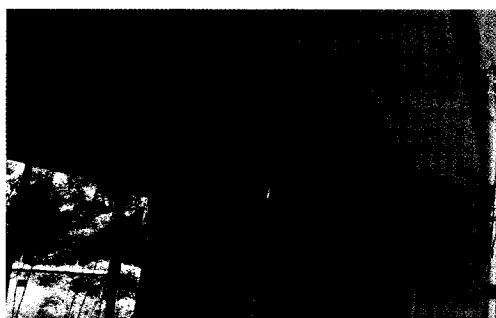
4.2.3 가력 및 측정 계획

슬래브 교량에 대한 재하 실험은 15 tonf 덤프트럭에 토사를 적재하여 총 중량 30 tonf에 대한 정적 재하 실험을 수행하였으며, 차량 중량에 대해서 전륜과 중륜 및 후륜에 작용하는 하중으로부터 최대 모멘트가 작용하는 위치를 산정하도록 차량을 배치하였다. 측정 장치는 최대 모멘트가 작용하는 부위에 설치하는 것을 원칙으로 하며, 처짐을 측정하기 위하여 중앙부에 100 mm LVDT 4개를 폭방향으로 1,000 mm 간격으로 설치하고 각 위치의 변위값을 비교하였다. 또한 인장철근, 콘크리트 및 탄소섬유판의 변형률을 측정하기 위하여 최대하중이 작용하는 중앙부에 각각 스트레인게이지를 부착하였다. 아울러 교량하부를 조사하여 기존에 발생된 교축 직각방향 균열 7개소를 선별하여 균열게이지를 부착하고 균열폭의 변화를 측정하였다. 이상과 같은 가력 및 측정 계획을 그림으로 나타내면 〈그림 13〉과 같다.

4.3 보강 전·후 실험 결과 비교·분석

4.3.1 교량 처짐 분석

슬래브교의 보강 전 재하, 프리스트레스 도입 및 보강 후 재하시의 시간에 따른 처짐 변화를 나타내면 <그림 14>와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 무보강 슬래브교에 DB18 하중을 재하했을 때의 평균 처짐값은 1.122 mm로 나타났으며, 하중을 제거한 상태에서 프리스트레스를 도입한 직후 측정된 처짐값은 -2.260 mm(초기처짐 값보다 감소)로 프리스트레스 도입에 따른 부재의 솟음이 관측되었다. 보강이 완료된 후 재하 실험에 의한 평균처짐은 -0.965 mm로, 보강 전 재하시의 처짐값과 비교하면 1.85배의 처짐 감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, DB18하중에 대해서 처짐의 완전회복과 함께 솟음을 유지하고



(a) 계측 장비 설치 상황



(b) 차량 재하

그림 13. 가력 및 측정 계획

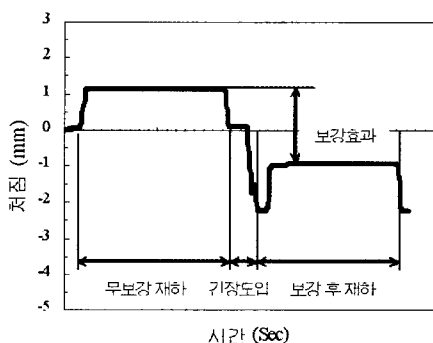


그림 14. 보강 전·후 평균 처짐 변화

있는 것으로 나타났다. 따라서 프리스트레스 탄소섬유판 보강공법은 슬래브 교량의 내하성능을 향상시킴과 동시에 처짐을 회복시킬 수 있는 유용한 보강공법으로 판단된다.

4.3.2 철근 및 콘크리트 변형률 분석

슬래브교의 보강 전 재하, 프리스트레스 도입 및 보강 후 재하시의 시간에 따른 철근 및 콘크리트 변형률을 분석하여 <표 2>과 같다. 보강 전 재하 상태에서 측정된 주철근의 인장변형률은 대략 80.4 μ 이며, 인접위치의 하부 콘크리트는 122.6 μ 로 나타났다. 이에 대하여 하중을 제거하고 프리스트레스의 도입을 완료한 후에 측정된 각각의 철근 및 콘크리트 변형률은 -85.4 μ 과 -52.3 μ 로 DB18하중의 재하와 거의 동등한 복원력을 갖는 것으로 나타났다. 보강이 완료된 후 재하 상태에서 측정된 주철근 및 콘크리트의 변형률은 16.4 μ 과 47.9 μ 로 인장력이 발생하지만, 보강 전에 비하여 변형률이 크게 줄어든 것을 알 수 있다. 따라서 본 공법은 사용하중에 대한 철근 및 콘크리트의 응력을 감소시킴으로써 균열발생을 억제하고 구조물의 사용연한을 연장시킬 수 있을 것으로 판단된다.

4.3.3 균열폭 분석

대상 교량은 이미 상당수의 균열이 발생한 상태로 재하 하중에 의해 구조적으로 문제가 발생할 수 있는 균열에 대하여 균열폭을 측정하였다. 슬래브교의 보강 전 재하, 프리스트레스 도입 및 보강 후 재하시의 시간에 따른 처짐변화를 나타내면 <그

표 2. 재하 실험 측정 결과

구분	평균 처짐 (mm)	평균 철근 변형률 ($\times 10^{-6}$)	평균 콘크리트 변형률 ($\times 10^{-6}$)	평균 균열폭 (mm)
무보강 재하상태 (a)	1.122	80.4	122.6	0.039
긴장력 도입 후 (b)	-2.260	-85.4	-52.3	-0.083
보강 후 재하상태(c)	-0.965	16.4	47.9	-0.034
보강효과 ((c-a)/a)	1.85	0.80	0.63	1.94

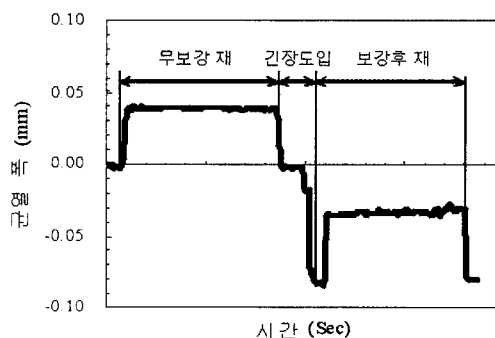


그림 15. 보강 전·후 평균 균열 폭 변화

림 15)와 같다. 그림에서 보는 바와 보강 전 재하 상태에서의 측정된 평균 균열폭은 0.039 mm가 추가로 확장된 것으로 나타났다. 하중을 제거하고 탄소섬유판에 프리스트레스의 도입을 완료한 후에 측정된 균열폭은 평균 -0.083 mm(초기 균열폭 값보다 감소)이며, 최대 -0.11 mm까지 균열폭이 감소된 것으로 나타났다. 이에 대하여 보강이 완료된 후 재하 상태에서 측정된 균열폭의 평균은 -0.034 mm로 보강되지 않은 상태에서 발생하는 균열폭을 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 따라서 본 공법을 적용한 결과, 0.041 mm ~ 0.107 mm의 균열 폭 감소 효과가 있는 것으로 나타났으며, 이를 보강 전 재하시의 균열 폭과 비교하면 1.94배의 균열 폭 감소 효과가 있는 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 고에서는 부착형 FRP 보강공법의 조기 부착파괴의 한계를 극복하고, 구조내력 뿐만 아니라 사용성에 대한 보강을 위해 탄소섬유판에 프리스트레스를 도입하여 보강하는 기술의 특징 및 현황을 선진국에서 개발되어 상용화되고 있는 공법을 중심으로 알아보고, 한국건설기술연구원에서 개발된 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법의 현장 시공성을 검증 및 보강성능을 정량적으로 파악하기 위하여 슬래브 교량을 대상으로 재하실험을 실시하였다. 본 고찰을 통하여 얻은 결론을 간단히 정리하면 다음과 같다.

5.1 보강 기술의 특성 및 현황

1) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강 기술은 기존의 FRP 접착에 의한 보강공법이 지니는 대부분의 장점을 지님과 동시에 프리스트레스 효과에 의한 장점을 지니는 매우 우수한 공법인 것으로 판단된다.

2) 선진 외국에서는 상기 보강공법에 대한 많은 연구 개발을 통하여 부가가치가 높은 보강공법을 상용화하고 있다. 따라서 국내에서도 이러한 공법의 실용화를 위한 노력이 필요할 것으로 판단된다.

5.2 교량 재하 실험

1) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판 보강공법은 탄소섬유판에 대한 긴장력 도입에 의해 구조물의 처짐, 균열 폭 등을 감소시키며, 교량의 내하력이 증진되는 것으로 파악되었다.

2) 외부 프리스트레스트 탄소섬유판 보강공법을 규정된 시방 및 시공지침에 따라 실제 구조물에 적용한다면 구조물의 내하

력 증진은 물론 사용성 측면에서도 매우 우수한 보강 효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다. □

참고문헌

1. 유영찬 외, 외부프리스트레스트 탄소섬유판에 의한 구조물 보강공법 개발, 한국건설기술연구원, 2006.
2. Sika, "Technology and Concepts for Sika CarboDur Structural Strengthening Systems", 2004.
3. Triantafillou, T.C. Deskovic, N., and Deuring, M., "Strengthening of Concrete Structures with Prestressed Fiber Reinforced Plastic Sheets", *ACI Structural Journal*, Vol.89, No.3. 1992, pp.235~244.
4. Ehsani, M.R. and Saadatmanesh, H., "Behavior of Externally Prestressed Concrete Girder", *Proceeding of the Session Related to Design, Analysis and Testing Structures Congress 89*, Structural Design and Analysis and Testing, ASCE, San Francisco, California, May 1989, pp.219~222.
5. Deuring, M., "Verstrken Von Stahlbeton mit gespannten Faserverbundwerkstoffen", *Post-Strengthening of Concrete Structures with Pretentioned Advanced Composites*, Published by the EMPA in German as EMPA Research Report No.224, EMPA Duebendorf, CH-8600 Duebendorf/Switzerland, 1993.
6. Wight, R.G., Green, M.F., and Erki, M.A., "Post-Strengthening Prestressed Concrete Beams with Prestressed FRP Sheets", *Proceedings of the 2th Conference in Advanced Composite Materials on Bridges and Structures*, ACMBS II, El-Badry, M.M.(Editor), Montreal, Quebec, Canada, 11-14 Aug. 1996, pp.449~456.
7. Andra, H.P. and Maier, M., "Post Strengthening of Reinforced Concrete Structures by Prestressed Externally Bonded Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Strips, Structural Faults + Repair 99", *Proceedings of the 8th International Conference on Extending the Life of Bridge, Civil + Building Structures*, Jul. 1999, London, England.
8. Raafat Mohamad Adel EL-HACHA, *Prestressed CFRP Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures*, Ph.D. Thesis, Queen's University, Dec. 2000.
9. El-Hacha, R., Wight, R. G., and Green, M. F., "Prestressed Carbon Fiber Reinforced Polymer Sheets for Strengthening Concrete Beams at Room and Low Temperatures", *J. Composite. for Construction*, ASCE, Vol.8, No.1, 2004, pp.3~13.
10. Seim, W., Horman, M., Karbhari, V., and Seible, F., "External FRP Post-Strengthening of Scaled Concrete Slabs", *J. Compos. for Constr.*, ASCE, Vol.5, No.2, 2001, pp.67~75.