

特輯

FRP의 토목구조재료에의 이용 동향

西崎 到*
(번역)이우일***

1. 머리말

최근 FRP의 건설용도에의 적용이 주목을 모으고 있다. 이것은 최근 몇 년간 기술개발 동향을 전달하는 소개기사가 많이 발표되고 있는 것으로부터도 이해할 수 있다. 필자는 지금까지 토목재료의 혁신을 꾀하여 토목구조물의 고도화, 유지관리의 효율화, 장수명화(長壽命化)에 의한 유지관리노력의 감소라는 관점에서 FRP의 토목구조물에의 적용에 대한 검토를 해왔다. 본문에서는 FRP 교량을 비롯한 토목구조물에의 적용에 관한 연구동향을 소개한다.

FRP의 토목구조재료로서의 적용법을 좀 정리하고자 한다. 현재 FRP의 토목에의 적용법에는 아래의 3가지가 있다.

(1) 케이블형, 봉형 또는 격자형의 FRP를 주로

콘크리트와 조합한 적용법

최근콘크리트의 철근 대신 FRP를 이용하는 것과, 프리스트레스트(pre-stressed) 콘크리트의 인장용 케이블 대신 사용하는 것이 주류이다. 둘 다 염분 등의 영향에 의한 철근의 부식대책으로서 사용된다. 또 그라운드 앵커로서 이용되는 것은, 건설대신(大田)의 심사증명에 의한 기술평가가 행해진 일도 있어, 급속하게 보급되었다. 장래에는 조교(彫橋)나 사장교(斜張橋)의 행거로프나 메인 케이블 등으로의 적용도 이 용도의 연장선상에 있다. 明石해협대교의 파이롯케이블에 FRP가 사용된 것은 유명하다.

(2) 시트형 프리프레그나 FRP를 구조물 표면에 붙여

콘크리트부재 등을 보강하는 적용법

통상, 현장에서 핸드레이업 작업에 의해 보강한다. 이러한 콘크리트 보강은 지금까지 철판을 접착하는 것으로 행해져왔다. 천에 수지를 침투시키면서 표면에 붙여가는, 용이한 작업으로 할 수 있기에 FRP의 경량성을 최대한 활용한 적용법이라 할 수 있다. 교량의 상판, 횡목, 교각 등 다양한 부위에 적용할 수 있어 급속도로 보급되었다. 또 콘

크리트 이외에도 구주나 북미의 커버드브리지(covered bridge)라 불리는 역사적 구조물로서 가치가 있는 목교(木橋)의 노후화 보강에 검토된 예가 있다. 또 강구조물 보강도, 북미에서 충전소의 강관 보강에 적용된 사례가 있는 등 적용이 확대되고 있다. 콘크리트 표면에 도장을 할 때, 유리 적물을 사용하는 공법은 덜어쓰운 콘크리트의 벗겨짐 방지를 목적으로 상당히 이전부터 사용되어 왔으나 탄소섬유적물이 등장하면서 상황이 일변했다.

상기의 2가지에 대해서는 꽤 많은 검토가 진행되어 토목분야에서도 이미 당연한 기술이라 해도 좋을 것이다. 예를 들면 99년 9월에 행해진 일본 토목학회 제54회 연차학술강연회에서는 상기의 (1) (2)분야 연구발표가 모두 합해 30을 넘었고 4가지 세션을 차지하고 있다. (1)에 대해서는 건설성의 종합기술개발 프로젝트 「건설사업의 신소재·신재료 이용기술 개발」(88년~1992년)에서도 거론된 외에, 토목학회 콘크리트위원회 연속섬유연구소위원회는 「연속섬유보강재를 이용한 콘크리트 구조물의 설계·시공지침(안)」(콘크리트 라이브러리 88호 1996년 9월)을 정리하는 등 설계를 위한 기술자료가 정리되고 있다. 시트보강에 대해서도 기술적인 조사가 진행되고 있고 각종 기술자료가 정비되고 있다.

(3) FRP를 주된 토목구조재료로 하는 적용법

상기의 (1) (2)는 기본적으로 강철이나 콘크리트 보강재, 케이블재로서의 적용으로, 말하자면 강철이나 콘크리트를 FRP로 서포트하는 용도였다. 이에 비해 이들이 본격적인 적용 단계를 맞으면 강철이나 콘크리트를 이용하지 않고 FRP단독으로 토목구조물을 만들 수 있을지가 다음 초점이 되고 있다. 메리트는 경량일 것, 우수한 내식성을 얻을 수 있을 것 등을 들 수 있다. 한편 이것을 실현하려면 해결해야 할 여러 가지 과제가 존재한다. 본문에서는 이 세 번째의 적용법에 대해 그 연구동향과 전망을 기술하기로 한다.

* Itaru Nishizaki: 建設省土木研究所化學研究室主任研究員 (305-0804 茨城縣 つくば市旭1)

*** 서울시 관악구 신림동 서울대학교 기계항공공학부, 교신전자(E-mail:wilec@snu.ac.kr)

2. 토목용 구조재료에의 이용동향조사에 대하여

FRP의 토목용 구조재료에의 이용동향은 이미 많은 저자들이 발표했다. FRP의 일차토목구조재료로서의 적용사례에 관한 조사[1]의 내용을 기본적으로 소개하겠다. 우선 이 조사의 개요를 기술한다.

2.1 적용사례조사 방법

1993년~98년에 공표된 FRP의 일차구조재료에의 적용에 관련된 논문이나 기사를 문헌검색, 주요저널·회의개요집에서 수집했다. 얻어진 문헌의 적용사례를 종류마다 집계·분석하고 정리했다. 사례조사의 범위는 FRP를 1차구조부재로 사용하여 건설된 토목구조물에 한정했다. 건설분야에서의 적용사례에 대해서는 구조설계를 동반하는 사례에 대해서만 대상으로 했다.

2.2 사례조사결과의 개요

이들 적용사례문헌의 출전은 SPI, International Conference on Composites in Infrastructure(ICCI), FRP Composites in Construction Application 등의 세 자료에(ICCI는 수년마다 열리는 국제회의) 많이 게재되어 왔다. 교량이 압도적으로 많아 전체의 약 8할을 차지했고 그 수는 약 40개가 넘는다. 거의 반수인 약 20개의 교량은 도로교, 나머지는 보도교나 기계교이다. 교량 이외의 용도로서는 송전용이나 안테나용 등의 탑, 가드레일이나 난간·계단 등의 사례가 있었다. 나라별로 보면 그 대부분이 미국의 사례였다. 이 외에는 캐나다, 영국, 네덜란드, 일본, 노르웨이 등을 들 수 있다.

3. FRP의 토목구조재료로서의 적용 동향

3.1 FRP를 구조재료로서 적용한 교량의 특징

교량은 FRP 토목구조물 적용의 대부분을 차지하므로 FRP에 대한 연구동향을 자세히 서술할 필요가 있겠다. 보도교와 도로교의 비율이 거의 비슷하지만, 도로교는 산간 등 비교적 교통량이 적고 다리길이가 10m이하로 짧아 설계도 간단한 것에 한정되고 있다. 이것은 FRP교의 역사가 짧아 내구성이나 물성에 대한 신뢰성이 부족한 점, 탄성계수가 작기 때문에 잘 휘는 것이 주된 원인이 되고 있다.

FRP의 교량에의 적용은 교량 전체를 대상으로 하는 것과 상판을 중점적인 대상으로 한 것 두 가지가 있다.

(1) FRP의 교량 전체에의 적용

지금까지 검토된 FRP교 구조형식으로는 사장교(斜張

橋), 트러스교, 형교(桁橋)를 들 수 있다.

① 사장교

사장교는 횡목·상판을 케이블로 매단 형식으로 실질적인 주형(主桁)의 스패를 작게 할 수 있으므로 FRP 주형(主桁)의 굽힘모멘트를 감소시켜 굽힘강성의 부족을 보충할 수 있다. 때문에 비교적 장대한 교량을 FRP로 만들 때 특히 유리하다고 할 수 있다.

FRP에 의한 사장교의 대표적인 예로서는 1992년에 영국에서 가설된 Aberfeldy보도교[2](그림 1)를 들 수 있다. 길이 113m, 폭 2.2m의 교량 전체가 FRP로 만들어졌다. 덴마크에서 1997년에 건설된 Kolding Bridge[3]는 40m의 사장교이다. 철도를 건너는 보도교이지만, 5톤 제설차나 긴급차량 통행도 가능하다. 건설성 토목연구소가 1996년에 연구소 구내에 건설한 실험교[4](그림 2)는 길이 20m, 폭 2m이다. 이 다리는 이동설치가 가능한 사장교로, 1999년 9월에 토목학회 제54회 연차학술강연회 때, 히로시마 회의장에서 이동설치건설의 데모가 행해졌다. 미국의 Lincoln Composite 교[5]는 아직 계획중이지만 길이 274m, 폭 3.7m의 교량 전체가 FRP구조재료 건설될 계획이다. 횡목 등의 구성부재 단면형상은 사각형·I형이 많이 적용되고 있다. 사재(斜材)는 모든 적용례에서 아라미드섬유로프가 사용되고 있다. 또 미국 San Diego에서는 오래전부터 대학구내에 FRP에 의한 사장교 건설계획이 있는데 아직 건설되지 않았다.

이러한 FRP사장교는 FRP교로서 비교적 긴 다리인데 대부분이 보도교이다. FRP를 사용한 사장교 특유의 문제점으로서 바람에 의한 양력(揚力)발생이 있으므로 Aberfeldy 보도교에서는 상판에 고무매트를 깔아 自重을 늘림으로 이것을 방지하고 있다.

② 트러스교

트러스교는 상현재와 하현재 간의 거리를 실질적인 형고(桁高)로서 이용하기 위해 靱剛性을 확보할 수 있다. 이렇게 하여 부재단면을 작게 할 수 있고 코스트의 감소가 가능하다. E.T.Techtonics사(미국)는 이전부터 LONGSPAN PRESTEK라 불린다. FRP제 트러스교(그림 3)를 개발하여 열 개 이상의 도로교·보도교에 적용한 예[6]가 있다. 그 대부분은 포니트러스형식으로 구성부재의 단면형상은 I형·II형·채널형으로 표준화되어 있다. 적용례에는 휨강성부족을 보충하기 위해 외케이블을 병용한 것도 보인다.

트러스구조라는 점에서는 교량이 아니지만 지붕의 사례[7]가 있다. 이것은 필라멘트와인딩으로 성형된 등근 파이프형의 CFRP를 금속제의 조인트로 사각뿔 형태의 트러스를 짠 기본구조를 하고 있다. 식당이나 풀의 지붕구조에 적용되었으나 토목용도에의 가능성도 기대할 수 있다.

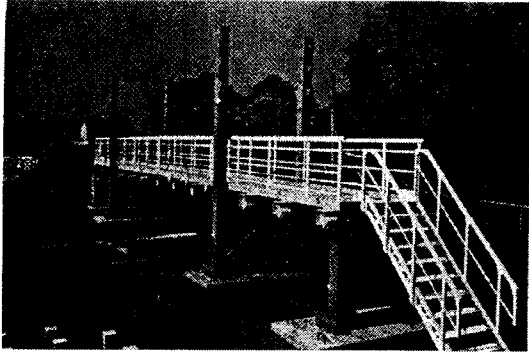


그림 1 Alberfeldy Footbridge의 외관.

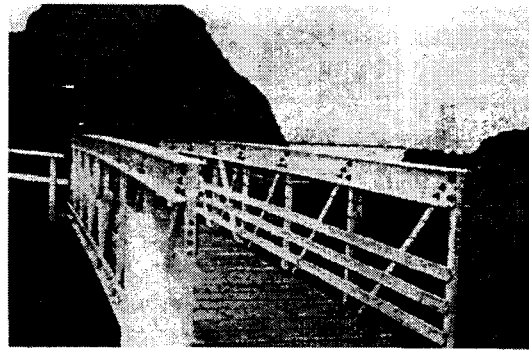


그림 3 스패인 35피트인 FRP트러스교.

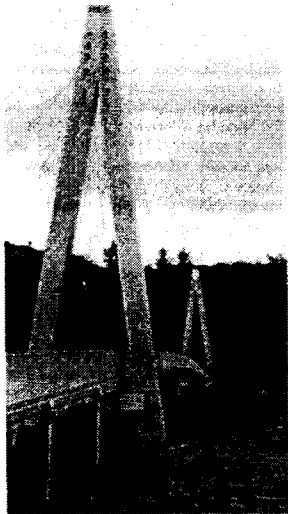


그림 2 건설성 토목연구소의 FRP사장교.

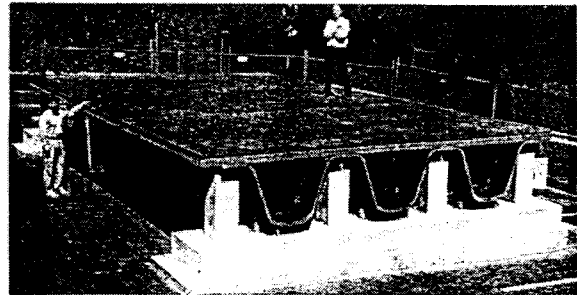


그림 4 길이 30ft, 폭 18ft의 데모용 도로형교(道路桁橋).

③형교(桁橋)⁽⁷¹⁾

형교의 경우, 휨강성을 확보하기 위해서는 형교를 크게 취할 필요가 있지만, 형교를 크게 하는 것은 외관상 좋지 않은데다 FRP재료의 사용량이 증가하기에 경제성으로 보더라도 비효율적이다. 그래서 형교형식에서는 대부분의 적용사례에 박스빔형식이 채용되고 있다. 박스빔의 단면형상으로는 더블I·사각형·반침형이 있다. 박스빔형식 이외에는 플레이트 거더 형식이나 하로형(下路桁) 형식도 있다.

형교에서는 미국의 록히드미턴사가 개발한 U자형단면의 다리(그림 4)가 있다. 이 회사는 INEEL, TECH21등이라

불리는 유사한 여러 종류의 형교를 개발하여 이미 여러개의 도로교 실적을 가지고 있다. 네덜란드의 Harlingen에서는 가동식의 보도기계교로서 15.6m의 FRP제 하로형교(下路桁橋)⁽⁷²⁾(그림5)가 1997년에 만들어졌다[9]. 이 다리는 다리 전체가 핸드레이업으로 일체성형되어 있다. 미국 Kentucky에서는 1999년에 CF/GF 하이브리드 FRP의 I 빔을 이용한 Clear Creek Bridge가 건설되었다[10]. CFRP는 프랜지 부분에 사용되었고, 강성을 128%향상시킬 수 있었다고 보고되고 있다.

④그 외의 형상

이외의 형식에 의한 FRP교의 사례는 상당히 적다. FRP교가 더 길어질 경우에는 조교(吊橋)의 검토가 필요하게 될 것이다. 이러한 검토사례는 몇가지 보고되어 있다[11-12]. 미국 Kentucky에서 1999년에 길이 128m, 폭 0.92m의 보도교인 조교가 건설될 예가 있다. 상부에는 CFRP 펄트루전성형체가 이용되었다.

(역자주1) 형교(桁橋): girder bridge. 구조가 단순함. 먼저 교각을 세우고, 그 위에 형(桁, 대들보, girder)를 얹고 상판을 얹어 다리를 완성함.

(역자주2) 하로교(下路橋): 차선이 main girder아래 있는 경우로서, 동호대교, 한강철교의 트러스 구간등이 여기에 속한다.

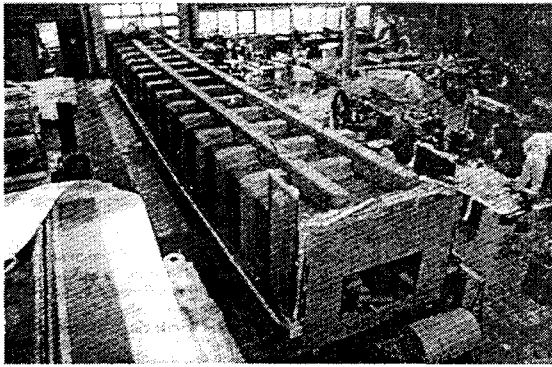


그림 5 제작중인 Harlingen FRP 하로형교(下路桁橋).

(2) FRP의 교량상판·교량부속물에서의 적용

기존의 교량에서 가장 손상을 일으키기 쉬운 것은 상판과 교량부속물(난간 등)이다. 북미에서는 도로에 동결방지제를 대량으로 뿌리기 때문에 콘크리트상판이 손상되는 일이 많아, FRP를 특히 상판에 사용하고자 하는 동기가 된다. FRP는 절단이나 충돌에 대해 비교적 약하기 때문에 절단강도 향상이나 보강 등이 필요하다.

①상판 (床版)

보도교에서는 FRP의 모재로 그대로 혹은 상판 위에 단단한 포장이나 고무매트를 죽 늘어가는 것만으로 이용되고 있는 것이 대부분이다. 차도교에서는 바퀴하중에 동반하는 절단력이 커지기 때문에 상판 윗면에 폴리에스테르렌진콘크리트를 설치하거나 목재 텍을 까는 등 응력집중에 따르는 절단력의 작용을 경감시키기 위한 보강이 취해지고 있다.

②교량부속물

차도교 난간에 대한 보고는 적어서 상세한 것은 불명확한 것이 많다. 보도교는 하로(下路)트리스나 하로형(下路桁)으로 하여 FRP구조재를 그대로 난간으로 이용하는 경우가 많다. 검사로(檢査路)의 난간에 이용된 케이스로는 FRP특유의 문제점으로서 정전기 발생을 들 수 있다.

3.2 FRP 교량 이외의 구조용도에서의 적용

(1) 트리스 구조의 교량 이외의 구조물에서의 적용

FRP교량 이외의 구조물로의 적용사례로서는 트리스 구조를 응용한 사례가 몇 가지 있다. 예를 들면 건축물 지붕에 적용한 사례와 안테나나 송전, 비상계단 등을 위한 탑을 들 수 있다.

(2) 펜스·방호책 등에서의 적용

관광용 전망대나 그 난간, 도로용 방호책, 눈사태방지책

등 펜스형 구조물에서의 적용사례가 몇 가지 있다.

3.3 토목구조용 FRP 종류

토목구조물 적용사례로 사용된 FRP의 성형법에 대해 살펴보면, 필트루전성형에 의한 부재가 가장 많이 사용되고 있다. 이어서 핸드레이업 성형부재, VARI(Vacuum Assisted Resin Injection) 성형부재, 필라멘트와인딩 성형부재로 되어 있다. 필트루전성형은 강도가 높은 제품이 얻을 수 있고, 치수정밀도의 양호, 제조길이의 자유도 등의 이유로 많이 채용된 것이라고 생각할 수 있다. 또 핸드레이업 성형은 높은 형상의 자유도에서 채용된 것이라 생각할 수 있다.

섬유강화재료에 대해서는 유리섬유를 사용한 GFRP 적용 사례가 8할 이상을 차지하며, 이어서 탄소섬유가 사용되고 있다. 매트릭스 수지는 불포화 폴리에스터 수지와 비닐에스터 수지가 주로 사용되고 있다. 불포화 폴리에스터 수지는 내열성, 내식성 등의 성능은 중간정도이지만 재료가격은 다른 수지에 비해 경제적이다. 또 비닐에스터 수지는 불포화 폴리에스터 수지와 에폭시 수지의 중간적인 성능을 나타내는 수지로 특히 내식성이 요구될 경우 이용되고 있다.

FRP부재의 단면형상은 원형파이프, 채널, I빔이 많이 이용되고 육각형과 받침형을 조합한 허니컴형상 등도 사용되고 있다. 적용에 있어서는 부재의 강성을 높이는 형상이나 부재에 사용되고 있는 섬유의 방향을 고려할 필요가 있을 것이다.

3.4 FRP 토목구조재료에서의 적용 메리트

(1) 경량화

FRP는 밀도가 1.6~1.9 정도로 콘크리트(2.4~2.5), 철근(7.8)에 비해 가볍다. 이러한 경량화의 잇점으로서

- 하부구조 중량 경감에 의한 기초구조의 축소
 - 상부구조 경량화에 의한 내진성 향상
 - 운반하중 경감에 의한 수송비용의 삭감
 - 가설에서의 시공 省力화, 공기단축
 - 설비 간편화
- 등을 피할 수 있다.

시공성에 관해서는 경량이기 때문에 필요한 작업자의 수도 삭감할 수 있다. 설비가 축소되어 원격지에서의 시공이 가능하다. 그 결과로서 공기단축이 가능하다.

운반에 대해서는 경량임을 활용하여 사람에 의한 운반도 가능하다. 좁은 장소에서의 취급도 유리하다. 포장공사에서는 노후화된 상판의 교체를 단시간에 할 수 있는 예가 있고 통상의 재가설에는 3주간이 걸리는 것이 FRP재를 사용하여 16시간에 완료한 사례가 있다. 그 점에서 재해시의 가설교·응급교 등 비교적 소규모이고 시공의 간편화가 요

구되는 경우 등에 가장 적절하다고 할 수 있다. 또 연약지반에서의 설치가 가능하고 직접기초가 가능하다. 경량이기 때문에 지지점의 침하 방식에도 유효하다.

(2) 내식성 향상

FRP사용의 장점으로선 염소에 대한 내식성이 뛰어난 점을 들 수 있다. 현재의 토목구조물은, 해안에 설치할 경우 강철구조물이든 콘크리트구조물이든 부식이 큰 문제이다. 그 때문에 염소나 해수에 의한 부식이 없는 FRP는 토목구조물의 유지관리 비용의 경감을 위해 매력적인 토목재료이다. 유지보수에 걸리는 러닝코스트의 감소는 대부분의 적용사례보고에서 내구성이 높은 것을 채용이유의 하나로 들 수 있다. 특히 해안이나 계선(係船)시설 등의 부식환경하에서도 재도색이 필요없는 것은 관리 비용의 감소에 유효하다고 기술되고 있다.

(3) 그 외

그 외의 특징으로서는 아래의 세 가지를 들 수 있다.

①경관성 향상

FRP의 착색이나 형상이 비교적 자유롭다는 특징은, 수많은 보고에서 장점의 하나로 거론되고 있다.

②에너지 흡수성

FRP는 충돌에 대한 변형이 크고 충격에 약하다. 이 특성은 일반 구조물에서는 단점이 되지만 가드레일이나 비행장의 안테나탑 등(항공기 충돌에 의해 쉽게 파손)에 활용한 예도 보고되고 있다.

③비전도성

GFRP는 비전도성이므로 전파에 대한 간섭을 억제할 수 있다. 이 특성이 비행장 안테나탑에 활용되고 있다.

3.5 토목구조재료에의 적용의 문제점

(1) 문헌이 지적하는 문제점

사례조사한 문헌에서 일차구조재료에의 적용상 문제점으로 가장 빈도가 높은 것은 「코스트가 비싸다」는 것이다. 코스트는 비싸지만 가치의 메리트(경량과 내식성 등)를 유효하게 활용하는 것이 대부분의 경우라고 말할 수 있다. 다음으로 빈도가 높은 것은 강성의 문제로, 토목용도에서는 비교적 낮은 가격에 사용하기 용이한 GFRP의 경우, 引張彈性係數가 철강의 약1/10이므로 구조부재를 구축하는 데는 문제가 되는 일이 많다. 세 번째로 많은 것은 「내구성 데이터가 부족하다」는 것으로, 내식성에 뛰어나다는 것이 일반적인 평가이지만 실제로는 충분한 데이터가 없는 것이 현실이라 할 수 있다. 이상의 세 가지가 특히 빈도가 높으므로 FRP 토목구조재료로서 적용함에 있어 주된 문제점이라 할 수 있다. 그 외로서는 크리프변형, 온도의 영향에 대한 재료물성 변화, 부재접합, 부재설계, 기준의 미정비 등

을 들 수 있다.

(2) 문제점 정리

①접합

접합은 FRP 토목구조물의 포인트가 되는 기술이라고 생각된다. 그러나 FRP를 주구조재로 한 교량의 문헌에 보이는 이음새에 관한 정보를 보면, 전체적인 인상으로서 이음새가 반드시 큰 과제였다는 것은 찾아볼 수 없었다. FRP를 교량 등의 토목구조물에 적용할 때의 문제로서 강성이 주로 주목되는데, 재료의 강도에 여유가 있었기 때문으로 보인다. 그러나 접합부의 거동에는 불명확한 점이 많으므로 더 많은 연구가 필요하다고 여겨진다.

②안전성, 허용응력

토목용도를 상정한 경우의 안전성에 관한 자료가 부족하다. 재료의 효율적인 이용을 도모하기 위해서는 필요하므로 적절한 안전율의 설정이 필요하다.

③GFRP의 낮은 강성

GFRP부재는 강철재에 비해 탄성계수가 작기 때문에 잘 휘고, 설계에 있어서는 긴 스패의 부재의 경우 휘는 양에서 구조검토가 필요하다. 부재의 형태나 타재료 병용으로 강성 및 파괴강도의 향상을 꾀하는 예도 있다. 재료 자체의 강성향상도 검토되고 있다. 앞에서 서술한 Clear Creek Bridge에서는 그 때문에 1범의 플랜지부분에만 탄소섬유를 이용하고 있다.

④장기적인 거동 특성

내식성은 FRP 토목구조물에서의 적용의 최대 이점 중 하나이지만, 한편으로는 실제의 토목구조물 조건에서의 장기적인 강도나 탄성율의 변화에 대해서는, 데이터가 부족한 것이 현실이다. 토목구조물에는 충분한 신뢰성이 요구되므로 구조재료로서 이용하기 위해서는 이러한 자료는 불가결하다. 토목구조물용으로 설계된 FRP에 대한 토목구조물이 처해진 응력조건이나 환경조건에서의 장기적인 거동에 대해 충분한 연구자료의 축적이 필요하다.

⑤비용

FRP를 일반구조재료로서 적용해가기 위해서는, 구조물의 비용이 현재의 토목구조물과 비슷해질 필요가 있다. 그래야 유지관리비용을 삭감할 수 있다는 부가가치가 고려될 것이다.

이러한 상황에서 FRP를 토목구조물에 이용할 경우, 효율적인 설계가 중요한 요소가 된다. 시험적인 단계에서는 그렇다 치더라도, 효율적인 설계가 불가능하면 시험단계에서 머무를 수 밖에 없을 것이다.

4. FRP 토목구조재료로서의 전망

FRP에는 본문 중에 기술한대로 장점이 있고 이것을 토

목구조물에 적용하는 것은 토목구조물이 현재 안고 있는 문제의 몇 가지를 해결하는데 도움이 되는 것을 기대할 수 있다. 강철이나 콘크리트에 의해 만들어진 토목구조물은, 특히 연안 등의 엄청난 부식환경에 처해진 지역을 중심으로 부식·방식대책이나 유지관리대책에 고심하고 있다. 또 앞으로는 사회자본정비가 충실하여, 건설된 토목구조물의 양이 많아짐과 동시에 유지관리에 드는 비용도 계속 증가하므로 사실상 유지관리가 불필요한 토목구조물이 요구된다. FRP는 이러한 토목구조물의 요구를 해결할 수 있는 가능성을 가진 재료라 여겨지므로, 이 분야에서의 심층적인 연구의 진전을 기대해본다.

참고문헌

- 1) 明嵐政司ほか:纖維強化プラスチックの土木構造材料への適用に關する共同研究報告書(I), 共同研究報告書第210号, 建設省土木研究所, 強化プラスチック協會, 石川島播磨重工業, 左藤工業, ショーボンド建設, 東急建設, 富士ピーエス 1998.
- 2) W.J. Harvey : *Recent Structures*, 4, 1993, pp. 229-232.
- 3) *New Civil Engineer*, August 1997, pp. 36-37.
- 4) I. Sasaki, I. Nishizaki, et al. : ICCI '98, Vol. 1, 1998, pp. 657-666.
- 5) M.A. Khalifa, O.A. Hodhod & M.A. Zaki : *Composites*, PartB, 27B, 1996, pp. 307-317.
- 6) G.E. Johansen, R.W. Wilson, F. Roll, N. Olson, M.H. Millman, M. Silvey : *SPI51st Annual Conference*, 1996, Session 7-D, pp. 1-9.
- 7) 日経アーキテクチャー, 1997年 7月 28日 号, p.196.
- 8) D. Richards, C. Dumlao, M. Henderson & D. Foster : *International Composites EXPO '98*, 1998, Session 4-E.
- 9) R. Noordzij (Dutch Ministry of Transport, Zoetermeer, Netherlands) : *ICCI '98*, Vol. 1, 1998, pp. 443-455.
- 10) P.J. Szak, B.N. Robson, I.E. Harik & B. Brailsford : *J. Composites Construction*, 3, 2, 1999, pp. 101-104.
- 11) B.N. Robson, et al. : *SPI 50th Annual Conference*, 1995, Session 11-A.
- 12) 明嵐政司, 西崎 到, 木嶋 建 : 土木學會第54回 年次學術講演會講演概要集, I-A, 1999, pp. 18-19.