

건설에 대한 첨단 복합재료의 사용현황

김덕현 , 한봉구*

The Status of Application of Advanced Composite Materials for Bridge Construction

Duk-Hyun Kim Bong-Koo Han*

ABSTRACT

About 175 vehicular bridges and 160 pedestrian bridges in service now ,worldwide, are made of composites, completely of partially. In this paper, the status of this application is briefly explained.

Key World : Bridges, Construction, Decks, Beams, Design, Monitoring, Repair

1. 서 론

1995년까지의 건설에 대한 복합재료의 사용현황 및 2000년 현재의 건설에서의 복합재료 등에 대해서는 참고문헌에서 자세히 설명하였으므로 본 발표문에서는 2004년 현재의 상황을 설명하기로 한다.

2. 2003년 말 현재 사용되고 있는 복합재료 교량

전 세계적으로 현재 사용되고 있는, 복합재료로 된 교량은 차량용이 175개 보행자용이 160개이다. 10년전에는 약 12개 정도 밖에 없었던 것을 고려하면 이것은 상당히 큰 숫자이다. 이러한 급속한 발전은 복합재료의 구조적 견고성(durability), 부식방지, 경량성등이 점차 넓게 인식되어 있고, 또 이러한 특성이 빠른 가설, 교량의 자중이 현저하게 적은데서 오는 더 좋은 하중 유지능력 그리고 더 중요한 것은 교량 수명 기간 중 실제로 보수가 필요 없다는 등의 사실이 넓게 알려지게 된데 원인이 있다.

최근의 미국 사회간접시설에 대한 미국 토목학회의 조사보고서에서 D급 판정을 받은 사실이 말해주듯 미국 사회간접시설이 심각

한 문제를 안고 있다는 사실은 토목공사에 대한 복합재료의 수요가 계속 팽창할 것임을 명백히 암시하고 있다.

그러나, 몇 백 개의 교량이 사용되고 있지만, 많은 토목기술자들은 확신을 못하고 있다. 대부분의 경우에 복합재료 상판들은 시범용이라고 믿고 있다.

이러한 이유로 대부분의 복합재료 교량시설은 공사중에 계측 시설이 부착되거나 정기적으로 시험하고 검사되어서 교량 상판의 성능이 평가될 수 있게 되었다.

검사 checklist에서 가장 중요한 항목은 도로포장 상부의 균열이다. 균열이 있으면 강철지지 보들과 복합재료 상판 재료와 콘크리트 웅벽과 아스팔트 사이에 상이한 열팽창과 변위가 있음을 나타내거나 상판의 과도한 이동을 의미하는데 이것은 연결문제가 있음을 의미한다.

2002년 10월에 미국의 National Composites Center(NCC)는 시공직후의 한 복합재료 교량의 활하중 시험으로 감독한 바 있다. 66.3미터 길이에 29.5미터 폭을 가진 이 3경간 교량은 34.5톤 무게의 트럭으로 시험되었는데 44개의 strain gage를 상판의 하부에 부착해서 교량의 거동을 평가하였다. 상판은 최대 허용변위 0.118inch(0.2832cm)의 40%인 0.047inch (0.1128cm)만의 변위를 일으켰다. 허용 최대 변위는 미국 도로 교협회(AASHTO) 시방서에서 규정한

* 서울산업대학교 구조공학과

$\delta < girder$ 간 거리 /800 이다.

3. 전 구조 복합재료 교량에 대한 거동 조사

1997년 7월 25일 개통된 Ohio주의 "Tech21" 교량은 미국의 세 번째 차량용 복합재료 교량으로 지지 보들과 상판등 모든 구조가 복합재료라는데 특별한 의미를 갖고 있다. 3개의 11미터 길이의 중공(hollow) 높이 60cm 폭 90cm인 사각형 box 보로 되어 있는데, 사용된 재료는 E-glass 유리섬유와 polyester 수지이다. 상판은 pultrude 된 사다리꼴 모양의 결합으로 조립된 core 아래위의 skin을 각각의 box beam 에 일체로 laminate 화 하는 방법으로 제작 되었다.

Wright Patterson 공군기지를 비롯한 6개 조직의 기술자들이 인상적인, 사용 중 교량의 거동조사를 위한 계획을 마련했다. 축방향 및 수직방향 변형률 및 접촉선의 slip과 상판의 tilt 측정을 위한 50개의 진동 와이어 strain gage를 영구 매설 하였는데, 각 sensor는 온도도 측정한다. 전체 상부구조의 온도 형태를 기록하기 위해 두개의 thermistor를 상판에 매설 하였다. 변형률 측정을 위해 18개의 Bragg grating 광섬유 sensor를 설치하고, 접촉제 내에 설치된 4개의 sapphire 화학적 광섬유 sensor는 교량의 epoxy 접착부들의 상태를 파악했다. 교량이 준설된 직후인 1998년 7월 및 2000년 1월에 단기 활하중 시험을 위해 46개의 추가적인 임시 sensor를 설치하였다.

18개 Bragg grating 광섬유 sensor 중 9개는 laminate 아래의 보에, 각 보에 3개가 설치되었다. 나머지 9개는 교량이 가설된 다음 중공(hollow) 보들의 내부 표면에 놓여졌다.

Data 획득 system 은 변형률과 온도를 매분마다 수집한 다음 이 data들을 시간당 평균치로 만들었다. 접촉선의 sensor 들은 큰 단일하중이나 트럭하중에 대한 활하중 시험 중에 검사되었다.

Wright Patterson에 근무하는 한 책임 기술자에 의하면 6년이 지나서 이 교량은 정상적으로 사용되고 있고 아무런 열화의 "sign"도 없이 예상대로 기능을 발휘하고 있다고 했다. 그에 의하면 1997년과 2001년 사이에 수집된 교량 변형률 data와 출판

된 수학적 creep data와 정확히 일치하였다. Model 에 의하면 50년 기간에 2.5 mm 의 추가 변위가 예상되는데 교량의 data는 이 경향을 정확히 따랐다.

4. 복합재료 상판, 소재별 거동 평가

미국 연방 도로청(FHWA) 의 지원을 받은 Ohio 주 교통부는 복합재료 상판 소재별 거동을 평가하는 야심찬 연구 사업을 1999년에 실시하였다.

Dayton시의 49번 도로상에 있는 "SALEM AVE"에 있는 "Great Miami River"를 횡단하는데 207m의 이 교량은 5개 지간을 가진 두개의 평행으로 놓인 구조물로 되어 있다.

한 교량은 4개의 다른 제작자들이 만든 4가지 다른 복합재료 상판으로 이당시 세계에서 가장 큰 복합재료 상판이었다. 다음 교량은 한 가지 상판으로 이루어졌다.

첫 번째 상판은 pultrude 된 사다리꼴 들을 서로 접촉시켜 제작되었다. 다음은 진공 침투 방법으로 이론 core와 유리섬유 vinyl ester 등으로 제작되었다. 세 번째 것은 유리섬유 core 재료와 biaxial 및 uniaxial 로 배치된 유리 섬유 face skin으로 되어 있다. 네 번째 것은 인발된 유리섬유 "stay-in-place" 형틀과 고강도 콘크리트로 된 hybrid 구조이다.

4개 대학교와 미육군 공병단이 합동으로 교량의 거동을 파악 하는데 참여 하였다. 1단계 연구에서는 정적 및 피로 실험과 재료 시편 실험을 하고 하중을 만재 시킨 트럭으로 활하중 실험을 하고 충격 망치로 상판을 치고 진동수를 측정하는 등의 model 반응을 측정했다. 여러 가지 상판의 변위, 변형률 움직임 등을 측정하기 위한 여러 가지 계기가 동원되었다.

최근의 실험은 2003년 9월에 완료 되었는데, 폭 넓은 정보와 많은 교훈을 주었다. 결론적으로, 복합재료 상판은 훌륭한 특성을 발휘하는데, 한편으로 다른 열팽창 계수를 가진 경우에는 콘크리트와 강철보다 특별히 조심 할 것이 있었다.

5. 진행중인 다른 교량설계

West Virginia University는 복합재료상판과 다른 구조물의 설계, 보수, 재활용 및 성능 검사들의 업무를 활발하게 수행해 왔

다. 이 학교 팀들은 10cm 두께의 복합재료 보작용하는 상판을 개발 했는데 무게는 겨우 10 lb/ft² (48.82428 kg/m²)이었다. 이 보는 인발된 E-glass(vinyl-ester)로 섬유 무게 비는 50% 이 되었다.

정적하중 시험에서 40,000 lb의 하중이 작용할 때 변위는 38mm 였다.

이 글에서 설명된 여러 상판들, University of California San Diego에서 조사한 여러 상판들, Glasgow, N. J.의 Route 896에 있는 복합재료 교량, Oregon의 여러 교량과 유럽의 여러 다리들, 그 이외의 여러 교량들이 중요한 토목구조물에 필요한 복합재료의 성능을 이해하는데 큰 도움이 되었다. 설계 후에도 기존 교량의 시험과 상황검토는 계속 되어야 할 아주 중요한 것들이다.

6. 복합재료와 재래구조재료와의 혼합사용

미국의 공로교 교량의 25%이상이 결합이 있어서 교통하중을 견디지 못하거나 기본 안전 수준에 맞지 않는 것으로 알려져 있다. 교량 파손이 가장 큰 요인은 부식이다. 콘크리트의 균열이 발생하면 물이 보강철근에 접촉하고 부식을 일으킨다. 부식이 진행되면 열화되는 강철은 팽창하고 주변의 콘크리트에 압력을 가하여 더 큰 균열을 일으키고 더 많은 물이 침투하고 부식을 증가하여 더 빠르게 파괴의 속도를 높여간다.

복합재료 교량은, 증명된 부식저항성, 경량과 가설의 속도등에 의하여, 노화한 사회간접시설의 부식 cycle을 단절하는 것으로 알려져 있다. 그러나 많은 복합재료 교량이 가설되고 좋은 기능을 발휘하고 있지만 가설속도는 상당히 늦었다. 기술자나 교통관계 공무원들은 100% 복합재료 설계에 대해 아직도 불안해하고 있는 것이다. 이에 더하여 많은 복합재료 상판의 재료 가격은 재래식 재료비 보다 항상 높을 것이다. 또 새로운 고성능 콘크리트 혼합재나 고강도 강철의 출현은 재래의 콘크리트에 의한 상판의 교체가 흥미를 끌게 될 것이다.

복합재료 보강 봉이나 격자가 여러해동안 강철대신 사용되어 왔지만, 더 희망적인 해결은 한 가지 또는 그 이상의 복합재료 구조 요소들을 콘크리트와 같이 합쳐 써서 교량상판을 각가지 소재의 가장 좋은 특성으로 이루어지게 하는 것이다. 복합재료는 경량성을 얻게하고 부식이 많 생기는 응용에

적절한 보강재로 사용될 수 있는데, 설계에서 콘크리트건설의 아주 낮은 가격과 재래기술의 활용을 가능케 할 수 있다. 여기에 더하여 복합재료 사용에서 오는 부재 다름의 엄청난 용이성 빠른 가설 등은 소요 노동량을 감소하여, 재래식의 상판에 비해서 혼합 상판의 소요 가격을 더 낮게 해준다.

100% 복합재료 교량이 첫 세대라면, 지금은 복합재료 산업은 건설 산업과 협조하여 서로 태어나고 기술자와 소유주가 원하는 것을 만족 시켜 줘야한다. 다음세대는 소재 혼합사용을 한 구조물이 된다고 할 수 있다.

필자가 집필한 책 "Composite Structures for Civil and Architectural Engineering [1]" 의 표지 그림은 아마도 가장 고차원의 복합재료 / 콘크리트 혼합개념을 활용한 University of California, San Diego 에 있는 I-5/Gilman 첨단 기술 교량이다. 필자도 몇 차례 각종 회의에서 이야기한바 있는 이 개념은 처음 1993년에 나타났는데, 그 후 몇 차례 재 설계가 되고 USCD의 La Jolla 캠퍼스에서 I-5 고속도로를 지나면서 둘로 갈라져 있는 캠퍼스를 하나로 연결하게 된다. I-5/Gilman 교는 강철 사장교로, 교각 탑은 filament wound 된 탄소섬유/epoxy 튜브에 콘크리트를 채워 넣게 된다. 두개의 콘크리트 채워진 filament wound 된 중방향 탄소섬유/epoxy 튜브는 상판을 지지한다. 콘크리트는 압축력 이전을 시키고, 얇은 셸을 좌굴에서 보호 안정시키고 연결 부품들의 접속을 가능케 한다. 이 두개의 중방향 튜브는 횡방향 E-glass 와 탄소섬유 보강된 빈 상자 거더를 지지하고 이 거더들은 복합재료 판들을 지지한다. 이 판들은 polypropylene 섬유로 보강된 콘크리트 상판을 지지한다.

복합재료 산업이 교량건설에 참여하려면 기존 재료와의 혼합사용이 절대로 필요하며 이렇게 함으로써 복합재료의 가치를 높이고 시간 절약하는 공사를 가능케 한다.

참고문헌

1. Kim, D. H., Composite Structures for Civil and Architectural Engineering, E & FN SPON, Chapman & Hall, London, 1995.
2. 김덕현, "토목구조물을 위한 신소재의

- 응용”, 대한토목학회 제 36회 정기총회 특별강연, 서울, 1988. 4. 30.
3. 김덕현, “Design of Composite Material Structures”, 한국전산구조공학회, 1991년도 가을 학술 발표회 특별강연, 서울, 1991. 10, pp. 5~13.
 4. Kim, D. H., “Composite Materials for Repair and Rehabilitation of Buildings and Infrastructures”, Plenary Lecture at The Third International Symposium on TEXTILE Composites in Building Construction, Seoul, Korea, November 7-9, 1996.
 5. Kim, D. H., “Composite Structures in Civil and Architectural Engineering”, Invited Lecture, EHM/BCS/NSF Research Grantee Workshop, Phoenix, AZ., August 5-6, 1991.
 6. Kim, D. H., “Design of Composite Material Structures,” Invited Speech, China - Japan - USA Trilateral Symposium/Workshop on Earthquake Engineering, Harbin, China, 1991. 11.
 7. Kim, D. H., “Design of Composite Material Structures for Civil Construction,” Seminar Lecture, University of California, Davis, 1992. 2. 24.
 8. Kim, D. H., “A Simple Method of 'Exact' Analysis of Some Composite Laminated Structures for Civil Construction,” Seminar Lecture, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1992. 3. 3.
 9. Kim, D. H., “A simple method of analysis for the preliminary design of particular composite laminated primary structures for civil construction,” Journal of Materials Processing Technology Vol. 55, Elsevier, London, 1995, pp 242-248
 10. Kim, D. H., “The Importance of Concept Optimization,” Keynote Speech, 3rd Pacific Rim Forum on Advanced Composites, Honolulu, 1993.11. 2~4
 11. Chong, K. P. and Kim, D. H., “Size/Scale Effect in the Failure of Brittle Materials and Composite Structures.” Invited Lecture, International Union of Theoretical and Applied Materials and Structures, Torino, Italy, 1994. 10.
 12. Kim, D. H., “The Importance of Concept Optimization in Design and Scale/Size Effects in the Failure of Composite Structures,” Invited Speaker, The Wilson Forum on Existing & Potential Application of Composite Materials in the Infrastructure, Alexandria, Virginia, October 28-29, 1996.
 13. “토목건축공학을 위한 섬유복합재료”, 특집, 섬유기술과 산업, 제1권 제1호, 한국섬유공학회, 1997. 3.
 14. “건설분야에서의 복합재료 응용”, 테마 기획, 기계저널, Vol. 39, No. 2, 대한기계학회, 1999. 2.
 15. “21세기의 복합재료의 신전개방향”, 특집, 고분자 과학과 기술, Vol. 10, No. 1, 한국고분자학회, 1999. 2.
 16. “건설산업에서의 복합재료의 응용”, 한국복합재료학회 1998년도 정기총회 특별강연, 1998. 11. 13.