

복합재료 교량 시스템의 정적거동 분석 및 파괴모드에 관한 연구

Study of Failure Mode and Static Behavior of Lightweight FRP Bridge Deck System

정우영* · 이형길** · 안병윤*** · 백상훈****

Jung, Woo-Young · Lee, Hyung-Kil · An, Byoung-Yun · Baek, Sang-Hoon

ABSTRACT

There is a concern with worldwide deterioration of highway bridges, particularly reinforced concrete. The advantages of fibre reinforced plastic(FRP) composites over conventional materials motivate their use in highway bridges for replacement of structures. Recently, an FRP deck has been installed on a state highway, located in New York State, as an experimental project. In this paper, a systematic approach for analysis of this FRP deck bridge is presented. Multi-step linear numerical analyses have been performed using the finite element method to study the structural behavior and the possible failure mechanism of the FRP deck-superstructure system. Deck's self-weight and ply orientations at the interface between steel girders and FRP deck are considered in this study. From this research, the results of the numerical analyses were corroborated with field test results. Analytical results reveal several potential failure mechanism for the FRP deck and truss bridge system. The results presented in this study may be used to propose engineering design guideline for new and replacement FRP bridge deck structure.

Keywords: FRP Bridge, Failure Mechanism, Buckling Analysis.

1. 서론

교량을 구성하는 부재중에서 바닥판은 반복적 차량하중을 직접적으로 받으며, 겨울철 도로 결빙 시 염화칼슘 살포로 인한 염분 침투에 따른 내구성 저하 등 열악한 사용 환경에 놓여 있어 교량을 구성하는 부재 중 손상에 가장 취약한 부재이다. 따라서 바닥판은 높은 하중 저항성능과 피로내구성을 필요로 한다. 그러나 현재 주로 사용되는 철근콘크리트 바닥판의 경우 자동차의 반복하중에 의한 손상과 염화칼슘 침투로 인한 철근 부식 등 유지관리에 많은 문제점이 있어 최근에 높은 하중 저항성능과 피로 내구성을 갖추며 합리적 시공성, 건설비 절감 등의 조건을 충족할 수 있는 새로운 교량바닥판 형식이 세계적으로 많은 토목공학자들 사이에서 연구되어 개발되고 있다. 이 중에서 Glass, Aramid 또는 Carbon 같은 Fiber들과 Polyester, Epoxy 또는 Vinylester 같은 Resin들의 매트릭스로 이루어진 복합재료 교량상판의 경우, 상판에 설치하는 단열 보

* 정회원 · 강릉대학교 토목공학과 교수 E-mail: woojung@kangnung.ac.kr

** 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: leeki137@hanmail.net

*** 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: sinji79@korea.com

**** 강릉대학교 토목공학과 석사과정 E-mail: hellowee@hanmail.net

합재료의 무게가 가볍고 시공시간이 짧기 때문에 교통 혼잡으로 인한 간접비용을 대폭 절감할 수 있으며 간단한 장비와 인력으로 설치할 수 있는 시공적 장점 인하여 중·소 교량 상부 구조물로서 전 세계적으로 각광 받고 있다. 그러나 국외의 활발한 복합재료 교량구조물의 연구에 비하여 국내의 연구는 학문적으로는 거의 미미한 상태이다. 현재 국내에서 복합재료의 관한 연구는 주로 탄소섬유 쉬트(sheet)를 이용한 열화 손상된 콘크리트 구조물의 보수 및 보강의 적용에 관한 연구가 집중되어져 왔으며 최근 들어 복합재료 교량 바닥판의 적용에 대한 연구가 시작 단계에 있는 실정이다.

본 연구는 복합재료 교량시스템의 기준 정립 및 실용화를 위한 초기단계 연구로서 실제 시공되어진 복합재료 교량의 정밀해석과 이를 통한 복합재료 교량의 파괴거동 및 설계기준 등을 조사하는데 그 목적이 있다. 본 연구의 효율적인 해석적 연구를 위하여 미국 New York주 내에 실제 섬유강화 복합재료(FRP)로 시공되어진 Bentley Creek 교량을 연구대상으로 고려하였으며 본 연구에서 제안된 정밀 유한요소해석 모델의 검증을 위하여 미국에서 수행되어진 본 교량의 실제 정적 재하 실험데이터를 이용, 산출된 해석적 결과와 비교하였다. 특히 보다 실질적이고 정확한 파괴모드의 조사 및 분석을 위하여 기존의 해석적 연구에서 복합재료의 가벼운 중량으로 인하여 무시되는 자중의 영향과 각 layer에 따른 ply orientation을 고려하여 정밀 해석하였다. 실제적으로 과거 복합재료 교량구조물의 해석적 연구의 경우, 복합재료의 가벼운 자중으로 인한 영향과 복합재료 구성에 따른 ply stacking sequence에 관한 재료 모델링의 경우, 일반적으로 근사화된 등방성 물성치를 이용, 해석하였다 (NYDOT Technical Report(2002), Mathee et al(2002)).

2. 유한 요소 모델링

2.1 Bentley Creek FRP Bridge의 재원 및 특징



그림 1 Bentley Creek 복합재료 교량상판 구조물 (New York, USA)

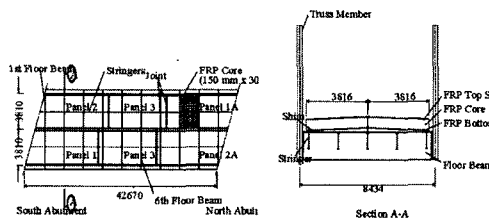


그림 2 Bentley Creek 복합재료 교량상판 구조물 (New York, USA)

본 연구에서 모델로 삼은 Bentley Creek 교량에 대하여 간단히 설명하면 그림 1에서 보이듯이 Bentley Creek 교량은 단순지지 된 하나의 스패를 가진 복합재료 상판-강재 트러스 교량 구조이다. 교량의 길이는 42.7m이고 폭은 7.3m, 27도의 Skew로 되어 있으며 하부 구조는 보의 횡축 중심간 간격이 4.72m이고 H 형강으로 구성되어 있고, 인도는 동쪽 트러스 밖으로 1.85m의 폭을 가지고 위치하고 있다. 교량 상판은 그림 2에서 보듯이 폭 3.8m, 길이가 12.8m에서 16.2m까지 변하는 총 6개의 복합재료 패널들로 구성되어 있으며 끝 패널은 27도 각도를 가진다. 복합재료 패널들의 중심구조는 E-Glass fiber로, 152mm×305mm×350mm의 일정한 블록 형태로 구성되어 있으며 진공상태를 위해 비닐 에스테르가 resin으로 주입되어 사용되었다. 복합재료 상판과 보의 플랜지와 접속부위는 22mm 직경의 높은 강도의 볼트로 부착되어 있으며 25mm의 볼트 구멍들은 무수축 그라우팅으로 가득 채워져 있어 복합재료 상판과 횡축 보의 상부 플랜지 사이는 약간의 복합적 거동

을 보이고 있다.

2.2 3차원 비선형 유한요소해석

본 연구에서는 보다 실무적인 해석적 연구를 위하여 이미 대중적으로 널리 활용되고 있는 상용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며, 유한요소해석의 전·후처리 해석프로그램으로는 MSC patran을 사용하였다. 그림 3에서 보여지 듯 본 연구의 유한요소해석에서는 총 44782개 Elements와 46548개 Nodes 들로 복합재료 상판을 3-D모델링 하였으며 적층구조인 복합재료의 보다 정밀한 해석을 위하여 그림 4와 같이 각 층의 fiber 배열 방향 및 두께를 고려한 교량 시스템을 모델화하였고 1999년 뉴욕 교통부 주관 하에 시행된 Bentley Creek 교량의 하중 실험 결과를 살펴보면 Truck 하중이 제하 되었을 때 교량이 Noncomposite 거동을 보였다. 따라서 복합재료 패널들과 Shim, Shim과 횡축 보 사이의 interface를 매우 낮은 종축 강성과 높은 횡축 강성의 직교 이방성 물성 값을 부과 하여 교량 시스템을 모델화 하였다.

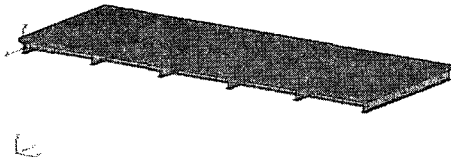


그림 3 FRP DECK의 3차원 유한요소 모델

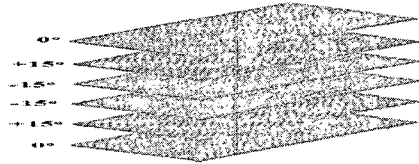


그림 4 ply orientation

본 연구에서는 실제 교량의 기동 및 파괴모드 분석에 앞서 본 연구에서 제안한 해석적 모델링의 검증을 위하여 3차원 유한요소해석에서 얻어지는 결과와 현장 시험 결과를 비교하였다. 본 연구의 유한요소해석에서 얻어진 각 측정 위치에서의 변형률은 Bentley Creek 교량의 하중시험에서 측정된 결과와의 비교에서 그림 5에서 보이듯이 비교적 잘 일치하는 것을 알 수 있다. 실제적으로 해석치와 실험치의 결과 비교에서 약간의 오차들이 발생하는데 이는 복합재료 교량상판과 강재 거더 사이의 interface에서 발생하는 friction의 영향과 이에 관한 정확한 데이터 부족, 복합재료 제작 시 고려되어진 적층 fiber의 배열 및 물성치의 변화, 실험 시 발생하는 실험적 오차 및 주변 상황에 의한 영향 등에 의한 영향으로 판단되며 이들 영향요소가 실제적으로 해석적 연구에서는 정확하게 고려할 수 없었다. 그림 6은 각 하중 case 별 자중의 고려 유무에 따른 처짐 값의 비교를 나타낸 것으로 자중의 고려로 처짐 값이 약간 증가함을 볼 수 있지만 대체적으로 그 영향이 극히 미소한 것을 알 수 있다. 이는 복합재료 바닥판의 사용으로 기존 설계교량의 역할에서 활하중의 증가를 가져올 수 있음을 의미하기도 한다.

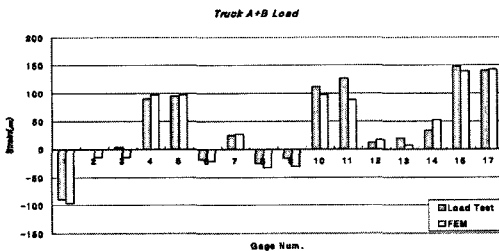


그림 5 유한요소 해석 결과와 현장 시험 결과 비교 (Load Case 1)

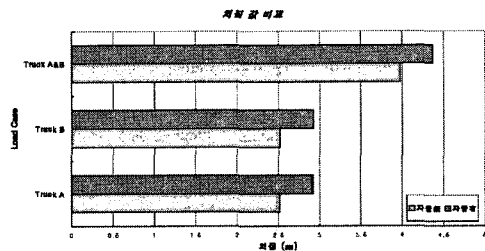


그림 6 자중고려로 인한 각 하중 case 별 처짐 값 비교

3. 복합재료(FRP) 교량시스템의 파괴 매카니즘

3.2 국내 설계하중에 의한 복합재료 상판의 파괴 예측

Bentley Creek 교량은 H-20 AASHTO 활하중에 충분한 강도를 지니도록 설계된 교량으로 국내 설계 기준으로 볼 때 DB-18하중에 준하는 2등급 교량으로 본 연구에서는 차량 재하 실험 결과와 비교하여 검증된 Bentley Creek 교량 모델에 국내 설계 하중인 DB-18하중을 재하 하여 복합재료 바닥판의 거동을 연구하였다. 본 연구에서는 복합재료 바닥판의 정확한 거동을 연구하기 위하여 “차륜 하중 지표”를 도입하여 차량 하중 증가에 따른 복합재료 바닥판의 파괴 예측을 연구하였다. 차륜 하중 지표는 초기 차륜 하중에 대한 적용된 차륜하중의 비로 정의된다. 예를 들어, 두 번째 하중 지표의 경우 초기 차륜 하중의 두 배의 하중이 증가하는 것을 의미한다. 즉, 트럭의 좌·후 축 하중이 약 141kN으로 증가하는 동안 트럭의 좌·전축 하중은 약 35kN으로 증가 될 것이다.

각각의 하중 증가에 따른 Tsai-Hill 파괴기준지표는 그림 7에서 보이고 있다. 그림 7에서 보듯이 여러 가지 차륜 하중 지표에서 복합재료 바닥판의 구성요소 중, Faceskin 요소에 비하여 Core 요소의 Tsai-Hill 파괴지표의 증가가 크며 약 6.8의 차륜 하중 지표에서 복합재료 상판의 횡 방향 Core 요소의 복합재료가 파괴에 이를 것으로 예측되고 있다. 즉, 복합재료 바닥판의 구성 요소 중 Faceskin 요소는 Core 요소가 파괴에 이르기 전 즉, 차륜 하중 지표 6.8에 준하는 활하중을 전달하는데 있어 충분한 여력을 가진다는 것을 의미한다.

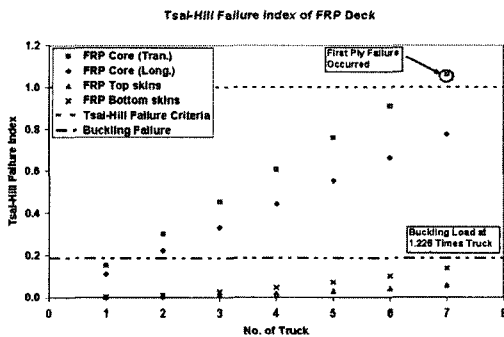


그림 7 FRP 상판의 Tsai-Hill 파괴 지표

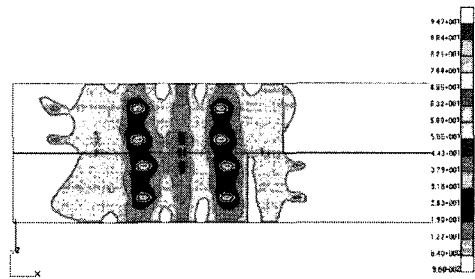


그림 8 Stress of Top Skin (Wheel Load Index = 7)

3.2 보의 파괴 예측

본 연구에서는 교량의 전체적인 파괴 예측을 위하여 복합재료 바닥판의 파괴 예측뿐만 아니라 강재 보의 파괴 예측 또한 연구하였다. 보에서 일어날 수 있는 파괴모드는 크게 두 가지 형태가 있는데 휨과 전단응력에 의한 국부 좌굴 파괴와 부재 강도 파괴가 그것이다.

부재 강도 파괴의 경우, 등방성 재료의 응력상태를 고려하는 Von Mises 파괴기준을 사용하여 파괴를 예측하였다. 차륜 하중 지표 4.0에서 횡 방향 보의 Von Mises 응력은 강재의 항복 강도 248MPa보다 약간 큰 255MPa 보여준다. 그러므로 복합재료 바닥판이 파괴에 이르기 전에 보의 항복응력을 초과하므로 파괴에 이른다고 볼 수 있다.

두 번째 파괴 모드인 국부 좌굴 파괴 모드는 ABAQUS의 “BUCKLE” 함수를 사용하여 좌굴 해석을 실행, 예측하였다. 차륜 하중 지표와 동일한 트럭 축 형상의 DB-18 하중을 복합재료 바닥판 위에 재하 하여 총 10

개의 파괴 모드 값을 계산, 초기 5개의 파괴 모드만을 좌굴모드로 표현하였다(표 1). 첫 번째 좌굴 모드는 복합재료 바닥판의 파괴 하중 지표인 6.8과 보강도 파괴 지표인 4.0에 비하여 매우 작은 1.226 차륜 하중 지표를 받을 때 발생할 것을 나타냈다. 차륜 하중 지표 1.226은 각 위치에 약 389kN(40tf)의 하중을 가지는 트럭이 재하 되었을 때를 의미하며 첫 번째 좌굴 모드 형상을 그림 9에서 보이고 있다. 표 1과 그림 9에서 표현되었듯이 좌굴 파괴가 이 교량의 전체 구조적 파괴를 지배할 것으로 예측되었다. 이는 복합재료 상판과 횡축보 사이의 Noncomposite 거동으로 인하여 보의 상부 플랜지가 높은 압축응력을 받게 되어 좌굴 현상을 발생시키기 때문이다. 그러나 이는 복합재료 패널들의 이음부의 접착제의 강도가 충분히 커 이음부 파괴가 일어나지 않았음을 가정으로 한다.

표 1 BUCKLING MODE

Mode	Eigenvalues	위치
1	1.2273	상부 플랜지 세 번째 보, 서쪽 끝
2	1.2535	상부 플랜지 세 번째 보, 동쪽 끝
3	1.4202	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙
4	1.4427	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙
5	1.6954	상부 플랜지 세 번째 보, 중앙

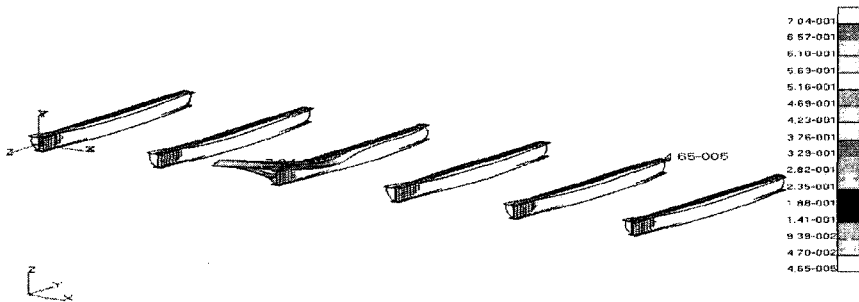


그림 9 첫 번째 모드 좌굴 하중에서의 Von-Mises 응력 분포도

5. 결론

본 연구에서는 실제 미국 뉴욕 주에 설계, 시공되어진 여러 가지 복합재료 상판교량구조물 중 비교적 실험결과가 잘 정리된 Bentley Creek 교량 구조물을 대상으로 유한 요소모델을 개발 그 결과를 비교, 검증하여 비교적 잘 일치함을 보였다. 또한 여러 가지 실제 환경 중 선형 정적 하중 아래에서의 복합재료 바닥판 및 보의 파괴 매카니즘과 국내 설계 하중 아래에서의 복합재료 바닥판의 거동을 연구하였다. 그 결과 복합재료 패널들의 이음부가 견고하여 충분한 하중 전달 능력을 가진다는 가정 아래 복합재료 바닥 패널들과 보의 Noncomposite 거동으로 인하여 복합재료 바닥판의 파괴가 아닌 횡축보에서의 국부 좌굴 파괴가 교량의 파괴를 지배할 것으로 예측되었다. 교량의 파괴를 지배하는 첫 번째 좌굴 모드는 복합재료 바닥판의 파괴 하중 지표인 6.8에 비하여 매우 작은 1.226 차륜 하중 지표를 받을 때 발생할 것을 나타냈으며 이는 각 위치에 약 389kN(40tf)의 하중을 가지는 트럭이 재하 되었을 때를 의미한다.

본 연구에서는 실제 건설되어진 복합재료 교량의 해석적 연구를 위한 유한요소모델을 개발하여 국내 설계 기준을 적용, 복합재료를 이용한 구조물의 시방규준 제작을 위하여 수행되어야 할 많은 학문적인 연구 중

그 초기 작업을 수행하고자 하였다. 향후 토목 분야에 적용된 복합재료교량과 관련하여 복합재료 교량의 열에 의한 거동과 복합재료의 경량성에 따른 진동에 의한 거동 또한 연구되어야하며 경제적 설계를 위한 Fiber의 최적방향 설계 및 두께, 단면 변환 및 국제적 추세에 맞는 Hybrid System의 적용 등이 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2005년 건설교통부 건설기반기술 혁신 사업의 지원으로 이루어진 것으로, 본 연구를 가능하게 한 건설교통부에 감사드립니다.

참고문헌

- Amjad J. Aref and Methae Chiewanichakorn**(2001) *"The Analytical Study of Fiber Reinforced Polymer Deck on an Old Truss Bridge"*, NYDOTS, New York
- Agarwal,B.D.and L.J.Broutman**(1990), *"Analysis and Performance of Fiber Composites"*, John Wiley & Sons, Inc., p449.
- Aref,A.J.andHeY.** (2001), "Finite Element Analysis of A Fiber Reinforced Polymer Bridge Superstructure", Report submitted to New York State Department of Transportation, Transportation Research Development Bureau, and Transportation Infrastructure Research Consortium, p151.
- Alampalli,S.andJ.Kunin** (2001), *"Load Testing of an FRP Bridge Deck on a Truss Bridge"*, Special Report 137, Transportation Research and Development Bureau, NYSDOT, Albany, New York
- Hibbitt,KarlssonandSorensen** (2000), *"ABAQUS/Standard User's Manual - Version 6.5"*, Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.
- Hill,R.** (1950), *"The Mathematical Theory of Plasticity"*, Oxford University Press, London, p318.
- Hyer,M.W.**(1997), *"Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials"*, McGraw-Hill, p627.
- Jones,R.M.**(1990), *"Mechanics of Composite Materials"*, 2nd Edition, Taylor & Francis, p519.
- Harik,I.E.,P.J.Szak,B.N.Robson,T.H.Hopwood,D.WitcherandB.Brailsford** (1996), *"Hybrid Composite I-Girder Pedestrian Bridge"*, Int. SAMPE Tech. Conference, SAMPE Symp. Exhibit, Evolving Technologies for the Competitive Edge, Book 1, 42, pp. 99-108.
- Hill,R.** *"The Mathematical Theory of Plasticity"*, Oxford University Press, London, p.318
- Klaiber,F.W.,K.F.Dunker,T.J.WipfandW.W.Snader** (1987), *"Methods of Strengthening Existing Highway Bridges"*, NCHRP Rep 293, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C.
- RobertM.Jones** (1998), *"MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS"*, TAYLOR & FRANCIS, USA, p519
- "MSC/Patran2003-User'sGuide"*, MSC. Software Corporation.