

Global Report

AASHTO 교차 뼈대구조 해석 및 설계에 대한 수정제안

1. - 요약 -
2. 제1장 배경
3. 제2장 연구 접근
4. 제3장 조사 결과 및 응용
5. 제4장 결론과 연구제안
6. - 참고문헌

AASHTO 교차 뼈대구조 해석 및 설계에 대한 수정제안 요약

교차 뼈대구조는 강재 I- 거더 교량의 공용수명 동안 많은 기능을 제공하는 중요한 구조 구성요소입니다. 그것은 주로 건설 및 바닥판 시공 중에 교량 거더의 측면 비틀림 좌굴저항을 향상시키기 위한 안정 버팀대 역할을 합니다. 여러 기능 중에서도 최종 합성조건에서 교량 폭에 걸쳐 거더에 활하중을 분배합니다. 중량 트럭통행으로 인한 반복적인 하중 사이클에서 교차 뼈대구조와 그 연결이 적절하게 설계되지 않은 경우 하중유발 피로균열에 취약할 수 있습니다. 실질적인 활하중 효과를 고려할 때 비록 최근의 시방규정이 상당한 크기의 활하중을 지지하는 경우에 교차 뼈대구조를 피로균열 유발 가능성이 높은 구조상세로 지목하는 것으로 변경되긴 하였지만, 전국의 기존 강재 I- 거더 교량에서 하중유발 피로균열이 거의 관찰되지 않았습니다.

교차 뼈대구조는 역사적으로 일반적인 관행규정과 경험을 기반으로 세부화되고 제작되었습니다. 그러나 최근 몇 년 동안 교량 설계시방의 개발로 인해 교차 뼈대구조 설계 및 해석수행에 대한 최신화가 필요했습니다. 교차 뼈대구조는 이제 모든 건설 및 공용수명 단계에 대한 합리적 해석을 기반으로 설계되고 상세화 되었으며, 이는 정확하고 신뢰할 수 있는 해석기술 및 설계기준의 중요성을 더욱 강조하고 있습니다.

지난 수십 년간 상당한 연구를 통해 교차 뼈대구조 설계 및 해석이 개선 되었지만 교량 설계자는 일반적으로 적절한 (i) 피로하중 기준, (ii) 해석절차 및 (iii) 교차 뼈대구조 시스템에 대한 안정성 보강 요구사항에 대한 적절한 지침이 부족했습니다. 이를 염두에 두고 NCHRP 프로젝트 12-113, “AASHTO 교차 뼈대구조 해석 및 설계에 대한 수정제안”이 강재 I- 거더 교량에서 교차 뼈대구조의 신뢰성과 경제성을 개선하고 이러한 많은 지식격차를 해결하기 위해 착수되었습니다. NCHRP 프로젝트 12-113의 기본 목표는 다음 항목에 대한 정량기반 방법론 및 설계지침을 만들어 내는 것이었습니다.

- a. 정교한 해석방법을 사용하여 해석된 사각(skew) 강재 I- 거더 교량 (직선 또는 곡선)의 교차 뼈대구조에 대한 피로하중의 정의개선
- b. 교차 뼈대구조 강성 과 간격 (엇갈린 배치 포함), 거더 간격 영향조사 그리고 교차 뼈대구조 시스템에서 작용력 효과에 대한 바닥판 두께
- c. 정교한 해석모델에서 교차 뼈대구조 부재강성에 대한 단부 연결의 영향을 평가하는 방법에 대한 추가지침
- d. 상용 소프트웨어 프로그램의 평가 및 다양한 교량형상 및 교차 뼈대구조 구성에 대한 교차 뼈대구조 강도를 정확하게 예측하는 기능
- e. AASHTO 하중 및 하중 저항계수 설계법(LRFD) 교량 설계시방의 구현을 위한 안정성 보강강도 및 강성 요구사항의 평가.

이 목표는 일련의 현장실험, 변수 유한요소해석 및 고속충중기(WIM) 연구(전국 16개 현장의 고해상도 자료 고려)를 통해 체계적으로 해결되었습니다. 이 보고서는 이 프로젝트의 일환으로 수행된 연구노력의 결과를 요약합니다.

연구에서 중요한 단계는 먼저 대표 교량의 현장자료를 활용하여 계산모델을 검증하는 것이었습니다. 따라서 다양한 형상의 3개 강재 I- 거더 교량 (즉, 일반적인 지지형태의 직선교량, 사각(skew) 형상 위치로 지지된 사각(skew bridge) 및 원주형태로 지지된 곡선교량)이 두 가지 다른 방법으로 계속되고 실험적으로 시험되었습니다. 먼저 제어된 활하중 시험이 수행되었습니다. 차축구성과 무게가 알려진 덤프트럭을 교량 바닥판의 다른 위치에 정적으로 배치하고 중요한 교차 뼈대구조 부재와 거더 플랜지의 응력

반응을 측정했습니다. 둘째, 트럭 교통에서 발생하는 동일한 중요 교차 뼈대구조 구성부재에서 유도된 응력주기 수를 한 달 동안 모니터링 했습니다. 제어진 활하중 시험에서 수집된 자료는 주로 유한요소 모델링 접근방식을 검증하는데 사용되었습니다. 사용 중인 응력범위 자료는 프로젝트의 후반 단계에서 수행된 계산 분석 및 통행하중 연구를 위한 물리적 기준으로 사용되었습니다.

유한요소 접근법을 검증한 후, 현장연구에서 얻은 지식의 폭과 깊이를 확장하기 위해 일련의 광범위한 해석 매개변수연구가 수행되었습니다. 일반적으로 미국에서 발견되는 다양한 교량형상에 대해 기존 X 형 및 K 형 교차 뼈대구조의 하중유발 피로거동 및 안정성 브레이싱 특성을 조사했습니다. 이러한 해석은 정교한 3차원(3D) 접근방식에서 단순화된 2차원(2D) 접근방식에 이르기까지 다양한 수준의 계산과정으로 수행되었습니다. 실험 및 분석연구결과를 바탕으로 위에서 확인된 5가지 주요 목표와 관련된 몇 가지 주요결과는 다음과 같습니다.

- 거더 응답을 기반으로 보정된 AASHTO LRFD에서 구현된 현행 피로하중 모델은 미국 트럭 스펙트럼에 대한 교차 뼈대구조 피로응답을 정확하게 나타내지 않습니다. 현행 설계하중 및 인자는 측정된 현장 자료 또는 축중기 기록과 비교할 때 일반적으로 중요한 교차 뼈대구조 부재의 작용력 효과를 과대평가하며, 이는 주로 교량 바닥판의 하중위치에 대한 교차 뼈대구조의 민감도 때문입니다.
- 하중으로 인한 교차 뼈대구조 작용력은 매우 가변적이며 여러 매개변수에 따라 달라집니다. 그러나 이 연구의 결과는 주요 활하중에 기인하는 뼈대구조 작용력이 일반적으로 큰 사각 및 곡선반경과 관련이 있음을 나타냅니다.

불연속적이고 엇갈린 교차 뼈대구조 배치를 구현하는 것은 사각 정도가 큰 교량에 대한 과도한 하중유발 작용력을 완화하는 실용적인 방법을 나타냅니다. 대조적으로, 사각 정도가 거의 또는 전혀 없는 직선 교량의 교차 뼈대구조 피로 작용력 효과는 일반적으로 작습니다.

- 복합 시스템에서 교차 뼈대구조의 하중유발 변형응답 (사용 중인 교량에 적용)은 비 복합 시스템 (건설 중 교량에 적용가능)의 변형응답과 매우 다릅니다. 또한 상용 소프트웨어 프로그램에서 일반적으로 사용되는 교차 뼈대구조 (예 : 힌지가 있는 평면 트러스로 취급되는 교차 뼈대구조)의 기존 3D 모델링 접근방식은 교차 뼈대구조 패널 및 해당 연결의 실제 강성을 잘못 나타낼 수 있습니다. 따라서 교차 뼈대구조의 해석절차를 개선하기 위해 공용 중 강성 수정계수의 도입을 제안합니다.
- 교차 뼈대구조 패널을 동등한 보 요소로 나타내는 2차원 모델은 복합 조건을 평가할 때 잘못된 상단 스트럿 작용력과 대각선 부재 작용력의 상당한 오류를 나타내는 경향이 있습니다. 이는 주로 후 처리 절차(즉, 등가 보 작용력을 교차 뼈대구조 부재 작용력으로 변환)에 내재된 가정에 기인합니다. 이러한 불일치는 모든 형상의 교량에서 관찰되었지만 2D 분석방법은 심한 사각 및 / 또는 곡선교량 시스템에서 성능이 저하되는 경향이 있습니다.
- American Institute of Steel Construction (AISC) 시방에 게시된 이전에 확립된 브레이싱 강성 및 강도 요구사항을 AASHTO LRFD 시방에 구현하기 위해서 검토 및 수정을 했습니다. 또한 교차 뼈대구조의 안정성 관련 작용력 효과는 선형중첩을 통해 다른 건설 관련 하중경우와 결합될 수 있습니다. 이러한 절차를 설명하기 위해 설계 사례가 개발되었습니다.

NCHRP 프로젝트 12-113의 주요 결론에 따라 일부 AASHTO LRFD 문서의 시방 및 해설용어 변경이 제안됩니다. 이 연구의 주요 결과를 뒷받침하고 입증하기 위해 설계사례도 개발되었습니다. 이후 AASHTO 고속도로 교량 및 구조물 소위원회에서 검토할 선정항목이 준비되었습니다. 일반적으로 본 연구에서 개발된 지침은 강재 I 형 거더 교량의 교차 뼈대구조 설계의 신뢰성과 경제성을 향상시킬 것으

로 예상됩니다.

제1장 배경

1.1 문제 기술 및 현재 지식

교차 뼈대구조는 강재 I- 거더 교량의 건설 및 공용수명 전반에 걸쳐 많은 역할을 합니다. 교차 뼈대구조의 주요 기능은 교량 거더의 횡방향 비틀림 좌굴(LTB) 저항을 향상시키기 위해 안정성 버팀대 역할을 하는 것입니다. 적절하게 설계되고 상세히 이뤄지는 경우 교차 뼈대구조는 길이를 따라 개별 위치에서 거더 단면의 비틀림을 억제합니다. 따라서 비틀림 보강재라고 합니다. 안정성 관점에서 볼 때, 보강재가 위험한 시공단계는 콘크리트 바닥판을 시공할 때, 즉, 강재 거더가 모든 하중을 부담하는 시공단계에서 종종 발생합니다. 콘크리트가 경화되고 시스템이 합성되면 바닥판 상부 플랜지에 지속적인 횡방향 및 비틀림 구속을 제공하므로 안정성은 일반적으로 문제가 없습니다. 다중 경간 교량에서 LTB(횡방향 비틀림 좌굴)은 내부 지점부에서는 하부 플랜지가 압축응력 상태로 있지 때문에 특히 치명적인 것으로 여겨지는데, 하지만 이는 콘크리트 바닥판이 제공하는 횡방향 및 비틀림 저항을 무시하는 문제를 안고 있습니다.

안정성 보강재로서의 주요 역할 외에도 교차 뼈대구조는 교량의 수명 동안 다양한 횡방향 및 중력하중에 저항합니다. 교차 뼈대구조는 일반적으로 바닥판 내민 시공에 기인하여 판형 거더에 적용되는 회전력에 저항하고 구조 전체에 횡방향 하중을 분산합니다. (예 : 바람) 또한 비 복합 시스템 (예 : 외부 적용하중 및 고정 장착력)의 사하중 및 시공하중으로 인한 거더의 특이한 이동 (예 : 수직 편향 및 회전)과 복합 시스템 상태의 활하중을 억제합니다. 곡선교에서 교차 뼈대구조는 기본부재이며 교량 전폭에 걸쳐 거더를 하나의 구조시스템으로 거동하게 하고, 곡선형상으로 인해 발생하는 비틀림에 저항하게 합니다.

완성된 구조에서 대형트럭 통행의 통과는 종종 교차 뼈대구조에 반복적인 하중조건을 부과합니다. 반복되는 하중 하에서 교차 뼈대구조는 하중유발 피로균열에 취약할 수 있습니다. 그러나 교량소유자는 일반적으로 지난 수십 년 동안 광범위한 하중유발 피로균열을 목격하지 않았습니다.

역사적으로 교차 뼈대구조 설계는 주로 경험과 일반적인 규칙을 기반으로 했습니다. 1949년에 고속도로 교량에 대한 AASHTO 표준 시방에 25피트 최대 간격제한이 도입되었습니다. 현대 사례와 유사하게, 대부분의 주에서는 교차 뼈대구조는 표준도를 이용하여 부재크기와 상세를 설계하여, 구조계산을 수행하거나 설계되는 경우는 거의 없었습니다. 25피트 요구사항은 일반적으로 강재 교량상부구조의 만족스러운 성능을 가져 왔지만 때때로 지나치게 보수적이고 비경제적인 교차 뼈대구조 구성을 생성하는 대단히 임의적인 규정이었습니다. 1980년대에는 이러한 간격규정으로 너무 많은 수의 교차 뼈대구조가 도입되어 다음과 같은 이유로 바람직하지 않은 것으로 인식되었는데 (i) 교차 뼈대구조는 교량 제작 및 설치시 대단히 비용이 많은 부재이며 (ii) 교차 뼈대구조 패널 주변 영역이 비틀림에 기인하는 피로균열을 유발하는 것으로 밝혀졌기 때문에 바람직하지 않은 것으로 인식되었습니다.

다음 해에 구조해석도구와 교량설계관행이 발전함에 따라 교차 뼈대구조 해석 및 설계절차에 대한 업데이트가 점점 더 필요하게 되었습니다. 이 과정은 미국 주 고속도로 및 교통 공무원 협회 LRFD 교량설계시방(1994)의 제 1 보급판에서 시작되었습니다. 이 문서는 계속되는 업데이트와 함께 후속 AASHTO LRFD라고 합니다. 1994년 AASHTO LRFD에서는 합리적인 설계 접근방식을 위해 25피트 간격제한이 제거되었습니다. 따라서 규정적 또는 표준설계를 사용하는 대신 모든 건설단계와 교량의 최종 조건에서 교차 뼈대구조의 필요성을 평가해야 했습니다.

합리적인 설계 접근방법이 구현된 후 지난 20~30년 동안 강재교량 시스템의 교차 뼈대구조 거동과 관련된 지식을 개선하기 위해 상당한 연구가 수행되었습니다. 이러한 과거 연구결과의 대부분은 현재 AASHTO LRFD 시방(2020) 9판에 문서화되어 있습니다. 이 보고서에서 AASHTO LRFD 기사에 대한 특정 참고서는 달리 명시되지 않는 한 9판 시방을 의미합니다.

이러한 발전에도 불구하고, 특히 피로하중 및 교차 뼈대구조 해석분야에서 몇 가지 지식의 차이가 확인되었습니다. 절 1.2에서 NCHRP 프로젝트 12-113의 주요목표를 확인하기 전에 이러한 지난 연구발전과 AASHTO LRFD에 대한 해당 업데이트를 먼저 검토합니다.

1.2 연구목적

이전 절에서 설명했듯이 AASHTO LRFD의 교차 뼈대구조에 대한 합리적 해석 및 설계지침을 개선하기 위해 지난 20~30년 동안 공동으로 노력해 왔습니다. 이러한 연구는 거동에 대한 이해를 향상시켰지만, 교차 뼈대구조의 해석, 설계 및 세부사항에 대한 지식에는 여전히 상당한 차이가 있습니다. 이러한 지식격차는 주로 다음 세 가지 범주 (i) 피로부하기준, (ii) 해석기술 (iii) 안정성 보강 요건 중 하나로 분류됩니다.

이를 염두에 두고 NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) 프로젝트 12-113, “AASHTO 교차 뼈대구조 해석 및 설계에 대한 수정제안”은 신뢰성과 경제성을 개선하기 위해 이러한 많은 지식격차를 해결하기 위해 고안되었습니다. 강재 I- 거더 교량의 교차 뼈대구조. 프로젝트제안요청(RFP)에서 확인된 NCHRP 프로젝트 12-113의 기본목표는 다음 항목에 대한 정량기반 방법론 및 설계지침을 생성하는 것이었습니다.

- a. 정교한 분석방법을 사용하여 분석된 사각(skew) 강재 I- 거더 교량 (직선 또는 곡선)의 교차 뼈대구조에 대한 피로하중의 정의 개선
- b. 거더 간격, 교차 뼈대구조 강성 및 간격 (교체계획 포함), 바닥판 두께가 교차 뼈대구조 시스템의 작용력 효과에 미치는 영향조사
- c. 정교한 해석모델에서 교차 뼈대구조 부재강성에 대한 단부 연결의 영향을 평가하는 방법에 대한 추가 지침
- d. 상용 소프트웨어 프로그램의 평가 및 다양한 교량형상 그리고 교차 뼈대구조 구성에 대한 교차 뼈대구조 작용력을 정확하게 예측하는 기능
- e. AASHTO LRFD에서 구현을 위한 맥락에서 안정성 있는 브레이싱 강도 및 강성요구사항 개발 등.

목표 (a) 및 (b)는 주로 합성체, 완성된 교량에서 교차 뼈대구조의 피로하중 특성을 조사합니다. 목표 (c) 및 (d)는 설계자와 상용 교량 소프트웨어 프로그램에 의해 일반적으로 사용되는 해석절차를 검토하고, 목표 (e)는 현재 AASHTO LRFD에 없는 교차 뼈대구조의 안정성 보강기능을 검토합니다. 이 다섯 가지 목표는 이 연구에서 수행된 다섯 가지 주요작업을 정의했습니다. 이 작업은 일련의 현장실험 및 해석연구를 통해 여기에서 다루어졌습니다. 이 보고서는 엔지니어 실습을 위한 이러한 연구의 주요결과를 요약합니다. 이 다섯 가지 과제의 결과를 바탕으로 연구팀은 AASHTO LRFD에 대해 제안된 변경사항에 대해 초안 시방 및 주석언어를 개발했으며, 이는 4장에 요약되고 부록 A에서 모두 제공됩니다. 독자를 돕기 위해, 목표 (a)부터 (e)까지의 참고서는 이후 보고서에서 주기적으로 작성됩니다.

참고로 부록 A에서 수정하도록 권장되고 이 보고서 전체에서 참고가 되는 특별한 AASHTO LRFD 논문 목록이 다음에 제공됩니다. 각 논문 또는 논문 모집단에 대해 위의 5가지 주요목표와 관련된 특정 질문

도 제시됩니다. 이러한 질문은 4장에 제공된 권장 해결방법과 함께 보고서 전체에서 체계적으로 해결됩니다.

1.3 연구범위

목표 (a)부터 (e)까지 및 앞의 하위 절에서 식별된 특정 의문은 교차 뼈대구조의 광범위한 거동 및 기능을 다룹니다. 연구목표는 본질적으로 포괄적일 뿐만 아니라 "교차 뼈대구조"라는 용어는 다양한 시스템과 조건도 포함합니다.

이전에 언급했듯이 교차 뼈대구조 시스템은 전체구조 및 공용수명에 걸쳐 많은 강재교량 응용분야 (예 : I- 거더 교량 대 개구제형 거더 교량, 중간 교차 뼈대구조 대 지지상태 교차 뼈대구조)에 사용됩니다. 따라서 비 복합 및 복합 시스템 모두에서 해당 거동을 평가해야 합니다. 개구제형 거더 교량의 맥락에서, 개구제형 거더 내부의 교차 뼈대구조는 주로 형태의 비틀림을 제어하고 일반적으로 피로문제가 없으며 이러한 보강재는 개구제형 거더의 안정성을 크게 향상시키지도 않습니다. 피로와 관련된 연구가 개구제형 거더 시스템에서 외부 교차 뼈대구조의 거동에 적용되지만 이러한 거더 시스템은 이 연구에서 고려되지 않았습니다.

또한 교차 뼈대구조 구성 및 세부사항은 다양한 모양과 크기로 제공됩니다. 특정 디자인 및 연결 세부 정보는 일반적으로 미국에서 주별로 추천됩니다. 각 주 교통부 (DOT) (또는 이에 상응하는 관리기관)는 표준 세부사항, 시방 및 설계지침을 통해 해당주의 교량설계를 규제하고 통합합니다. 예를 들어, 교차 뼈대구조부재는 일반적으로 단일 앵글부재 단면으로 구성되지만 WT 및 이중 앵글부재 단면도 때때로 사용됩니다. 마찬가지로 교차 뼈대구조는 일반적으로 X 또는 K 유형으로 구성되지만, 전국적으로 여러 변형이 사용됩니다. 국가 표준은 또한 교차 뼈대구조 부재가 거셋 및 연결 플레이트에 연결되는 방식 (예 : 용접 대 볼트연결)에서 다릅니다. 조사의 일환으로 업계 설문조사가 수행되었으며 절2.1에 이러한 고유한 모든 세부정보를 요약하고 정리하기 위해 설명되어 있습니다.

관리 가능한 범위를 유지하기 위해 연구팀은 강재 I- 거더 교량에서 발견되는 가장 일반적이고 실용적인 조건에 노력을 집중했습니다. 따라서 여기에서 수행되고 문서화된 연구는 강재 I- 거더 고속도로 교량의 단일 앵글단면으로 구성된 X 형 및 K 형 중간 교차 뼈대구조에만 전념합니다. 보고서 전반에 걸쳐 논의된 바와 같이, 교량형상과 관련된 매개변수 (예 : 거더 간격, 바닥판 두께 등)와 마찬가지로 교차 뼈대구조 성능에 대한 다양한 앵글 부재 크기 및 연결 세부사항의 영향을 조사합니다.

1.4 보고서의 구성

이 배경 절을 포함하여 이 보고서는 4개의 장과 6개의 부록으로 구성되어 있습니다. 2장은 NCHRP 프로젝트 12-113의 주요 목표를 해결하기 위해 채택된 연구접근방식을 설명합니다. 보다 구체적으로 현장실험, 모델검증 및 해석연구를 포함하는 작업흐름이 자세히 설명됩니다. 주요 모델링 가정 및 평가된 특정 매개변수를 포함하여 네 가지 해석연구가 설명됩니다. 이어서 3장은 실험 및 해석연구의 요약된 결과를 제시합니다. 각 주요 연구에 대해 주요 관찰 및 발견사항이 요약되어 있습니다. 그런 다음 4장은 절1.2에서 이전에 확인된 AASHTO LRFD 조항의 맥락에서 3장의 주요결과를 종합합니다. 추가 연구가 가치 있는 부분으로서 발견사항의 구현을 위한 구체적인 제안이 제공됩니다.

본 보고서의 2장과 3장은 본질적으로 종합적인 설명을 제시하지는 않습니다. 전체 실험 및 해석자료 모 집단으로 독자를 압도하는 대신 샘플결과를 선택적으로 제시하여 4장에 요약된 주요 결론에 대한 적절한 전후관계를 제공합니다. 실험 및 분석연구 및 결과에 대한 자세한 개요를 위해 몇 가지 부록이 준비되었습니다.

4장에 요약된 주요 결과를 바탕으로 부록 A에는 AASHTO T-14 구조용 강재설계 기술위원회와 AASHTO 교량 및 구조위원회가 고려하기 위해 준비한 시방개정 초안이 포함되어 있습니다. 부록 B와 C는 각각 일반적인 지지형태의 직선교량과 원주형태로 지지된 곡선교량에 대한 교차 뼈대구조 설계 예를 제시합니다. 이 예는 2장과 3장에서 독립적으로 조사한 다양한 하중사례와 조건을 다양한 건설 및 공용단계에서 결합할 수 있는 방법을 설명합니다. 연구팀은 처음부터 대표적인 예제를 개발하는 대신 디자인 엔지니어가 일반적으로 참고하는 예전에 게시된 디자인 예제를 채택하고 수정하는 것으로 결정했습니다. 따라서 설계예제는 일반적으로 SBDH (Steel Bridge Design Handbook) 예제 2A (Barth 2015) 및 3(Rivera 및 Chavel 2015)을 따릅니다.

부록 D부터 F까지는 보고서 본문에 있는 것과 동일한 자료를 많이 다룹니다. 그러나 이러한 부록은 연구 방법론, 결과 및 중요한 발견에 대한 보다 철저한 검토를 제공합니다. 부록 D는 NCHRP 프로젝트 12-113의 1단계를 구체적으로 다루고, 부록 E와 F는 각각 2단계와 3단계를 다룹니다. 프로젝트의 여러 단계가 2장에 자세히 설명되어 있습니다.

제2장 연구 접근

NCHRP 프로젝트 12-113의 주요 목표를 해결하기 위해 연구팀은 네 가지 단계를 체계적으로 수행했습니다. 프로젝트 제안서(RFP)에서 확인된 네 단계는 다음과 같습니다. (I) 계획, (II) 해석 프로그램 및 현장실험의 부문 1, (III) 분석프로그램 및 제안된 AASHTO 시방의 부문 2 (IV) 최종 결과. 각 연속단계는 이전단계에서 얻은 결과와 교훈을 기반으로 합니다. 이것은 그림 2-1의 작업흐름 다이어그램을 통해 개략적으로 설명됩니다. 절1.4에서 언급했듯이 I, II 및 III 단계에 대한 포괄적인 요약은 해당 부록 D, E 및 F에 제공됩니다. 이 장에 제공된 정보는 연구접근방식 및 방법론에 대한 일반적인 개요를 제공하기 위한 것입니다.

1단계에서는 광범위한 문헌검토 및 산업조사가 수행되었으며 2단계는 현장실험을 위한 준비가 이루어졌습니다. 1단계는 아래에 간략하게 요약된 6가지 과업으로 구성되었습니다.

- 과업 1 : 문헌검토를 수행하고, 현재 설계사례를 문서화하고, 설계 소프트웨어가 이러한 설계사례를 어떻게 구체화하는지 조사합니다.
- 과업 2 : 문헌검토 결과를 종합하여 연구목표와 관련된 지식격차를 식별합니다.
- 과업 3 : 두 부분으로 실행될 해석 프로그램을 제안합니다. 부문 1 (Phase II에서 실행 됨)에는 실험 프로그램 개발을 지원하기위한 예비분석이 포함되어 있고 부문 2 (Phase III에서 실행 됨)에는 1장에 요약된 연구목표를 달성하기위한 포괄적인 매개변수 연구가 포함되어 있습니다.
- 과업 4 : 직선교량 1개, 사각 교량 1개, 곡선교량 1개를 포함하는 현장실험 (2단계에서 실행)을 제안합니다. 측정에는 (i) 활하중의 제어된 적용 하에서 교차 뼈대구조 부재 피로 작용력 범위 (ii) 동일한 교차 뼈대구조 부재에 대한 사용 중 유효 및 최대 응력범위가 포함됩니다.
- 과업 5 : 수정이 필요한 AASHTO LRFD의 기존항목을 식별합니다.
- 과업 6 : 중간보고서 1번을 준비합니다.

관련 연구 및 AASHTO LRFD 논문의 검토를 포함하여 이러한 작업 중 몇 가지가 이전 1장에 요약되어 있습니다. 절2.1은 실험 및 분석연구 계획을 용이하게 하고 연구범위 개발을 지원한 연구팀이 수행한

산업 설문조사에 대해 간략하게 설명합니다. 부록 D는 또한 이 자료를 보다 상세하게 설명합니다. 실험 및 분석프로그램은 다음 단락에서 논의되는 단계 II 및 III 작업에서 다룹니다.

2 단계에서는 현장 실험연구와 모델검증이 수행되어 3단계의 분석연구가 시작되었습니다. 전체적으로 2 단계는 아래에 간략하게 요약된 네 가지 작업으로 구성되었습니다.

- 과업 7 : 현장실험에서 평가된 특정 교량과 관련된 해석 프로그램의 부문 1을 실행합니다.
- 과업 8 : 작업 4에서 소개한 대로 현장실험을 실행합니다.
- 과업 9 : 현장실험의 결과를 기반으로 해석 모델링 접근방식을 검증합니다.
- 과업 10 : 중간보고서 2번을 준비합니다.

작업 7 ~ 9를 수행하는데 사용되는 방법은 절2.2에 간략하게 설명되어 있습니다.

부록 E에서는 이러한 2단계 작업에 대한 자세한 개요를 제공합니다.

3단계는 2단계에서 완료된 작업으로 확장됩니다. 일반적인 고속도로 I- 거더 교량 시스템에서 교차 뼈대구조의 거동과 설계기준을 적절하게 평가하기 위해서는 현장 연구에서 얻은 세 가지 고유한 교량형상 및 교통조건보다 훨씬 더 큰 대표샘플이 필요했습니다. 따라서 2단계에서 확립되고 검증된 모델링 접근 방식을 사용하여 궁극적으로 교차 뼈대구조 거동과 관련된 지식의 폭과 깊이를 향상시키는 광범위한 해석연구를 수행하였습니다. 3단계에는 다음과 같이 요약된 세 가지 주요작업이 포함되었습니다.

- 과업 11 : 분석 프로그램의 부문 2를 실행합니다. 활하중으로 인한 피로성능 및 교차 뼈대구조의 안정성 보강 특성과 관련된 변수연구를 수행합니다.
- 과업 12 : 해석 및 실험조사를 기반으로 AASHTO LRFD에 제안된 변경사항에 대한 시방 및 주석언어를 개발합니다.
- 과업 13 : 중간보고서 3번 작성을 준비합니다.

2.3~2.6 절에서는 과업 11 및 해석연구를 수행하는데 사용되는 방법론을 설명합니다. 이 프로젝트는 4 단계에서 절정에 이르렀으며 제안된 시방 및 주석언어는 AASHTO의 가능한 결정투표에서 최종 결정되었습니다. 제안된 수정사항은 4 장에 요약되어 있으며 부록 A에 전체적으로 제공됩니다.

2.1 산업조사

연구팀은 다음과 같은 분야에서 DOT 및 컨설턴트로부터 정보를 수집하여 산업조사를 개발하고 배포하였습니다.

- (i) 일반적으로 사용되는 소프트웨어 패키지,
- (ii) 교차 뼈대구조의 피로설계,
- (iii) 기존교량에서 발견된 교차 뼈대구조 문제 및 하중으로 인한 피로
- (iv) 표준 교차 뼈대구조 세부사항.

다양한 주와 컨설턴트를 대표하는 확충된 설문조사에 총 57개의 응답이 있었습니다. 특히 DOT의 높은 응답률을 감안할 때 설문조사 결과는 프로젝트의 나머지 단계에서 연구노력을 집중하는데 있어 신뢰할 수 있는 도구로 사용되었습니다.

이 절은 절 1.1에 요약된 연구 동기를 더욱 강조하는 업계 설문조사에서 얻은 많은 주요 관찰내용을 요약합니다. 설문조사 및 응답에 대한 자세한 검토는 부록 D를 참고하십시오.

2.2 현장 실험 프로그램 및 모델 검증

프로젝트의 2단계에서는 변형게이지를 사용하여 3개의 다른 교량을 계측하고 (i) 제어된 활하중 시험 및 (ii) 유호 및 최대 응력범위의 공용 중 모니터링이라는 두 가지 방법을 실험적으로 시험했습니다. 이전에 언급했듯이 이 현장 연구의 일환으로 일반적인 지지형태의 직선교량, 사각(skew) 형상 위치로 지지된 사교(skew bridge) 및 원주형태로 지지된 곡선교량을 포함하여 세 가지 다른 교량형상이 조사되었습니다. 연구팀은 텍사스 전역의 다양한 기존 교량구조에 대한 장단점을 평가했지만 궁극적으로 더 큰 휴스턴 지역에서 3개를 연구하기로 결정했습니다.

이 절에서는 현장 실험프로그램과 FEA 모델링 접근방식을 검증하는데 사용되는 일반 절차에 대한 간략한 개요를 제공합니다. 절2.2.1은 각 계측교량의 주요 기하학적 매개변수 및 교통조건을 간결하게 설명합니다. 절2.2.2에서는 자료 처리방법에 대한 추가지침과 함께 수행된 두 가지 실험 자료에 대해 설명합니다. 여기에 제공된 설명은 현장시험의 모든 측면을 다루기 위한 것이 아닙니다. 자세한 요약은 부록 E를 참조하십시오.

2.3 피로 하중 연구

피로하중 연구는 교차 뼈대구조 시스템의 하중유발 피로설계와 관련된 두 가지 주요 질문을 조사하기 위한 것입니다. (i) 교량형상의 영향 (예 : 사각, 수평곡률) 및 교차 뼈대구조 피로 작용력 효과에 대한 교차 뼈대구조 세부사항 (예 : 교차 뼈대구조 구성) (ii) 직선, 사각(skewed), 곡선교량의 교차 뼈대구조 평가를 위한 적절한 피로응력 범위 등. 이러한 질문은 절1.2에 설정된 목표 (a) 및 (b)를 나타냅니다.

이러한 질문에 대한 예비답변은 2단계에서 수행된 현장실험에서 얻었습니다. 그러나 계측된 교량은 더 큰 휴스턴 지역의 현지 교통상황에 영향을 받는 3개의 고유한 뼈대형상을 나타냅니다. AASHTO 피로하중 기준을 적절하게 평가하기 위해서는 보다 광범위한 연구가 필요했습니다.

2단계의 모델링 검증 과정에서 얻은 교훈을 바탕으로 연구팀은 강력한 유한요소 변수연구를 개발하고 수행했습니다. 변수연구는 자료 집합단의 범위를 확장하여 지식의 깊이를 효과적으로 개선했습니다. 다양한 거더 및 횡단면 구성, 거더 횡단면 및 횡단면 세부사항을 포함하여 총 4,104개의 고유한 교량형상을 연구했습니다. 4,104- 모델 자료모집단은 현재 미국에서 공용 중인 다양한 강재 I- 거더 교량을 합리적으로 표현하기 위한 것입니다. 4,104- 모델 매트릭스에 대한 자세한 내용은 다음 절에서 간략하게 설명합니다.

위에서 설명한 피로하중 연구의 주요목표를 해결하기 위해 연구팀은 세 가지 주요작업에 집중했습니다. 첫째, 일관되고 반복 가능한 방식으로 다양한 교량구조(예 : 직선, 사각(skewed) 교량 및 곡선교량)를 분석하기 위해 통합된 모델링 접근방식이 개발되었습니다. 둘째, 연구팀은 전체 교량모집단에 대해 현재 피로설계기준을 구현했습니다. 대표 교량의 교차 뼈대구조는 AASHTO LRFD 9th Edition 피로조항으로 효과적으로 설계되었습니다. 마지막으로, 다른 미국 주에서 측정된 고해상도 WIM 자료가 연구에서 고려된 교량의 하위모집단에서 구현되었습니다.

각 연속작업의 관찰 및 결과는 절1.2에 요약된 목표 (a) 및 (b)를 해결하는데 사용되었습니다. 다양한 교량유형에서 교차 뼈대구조의 하중유발 작용력 응답을 비교하여 교량형상 및 교차 뼈대구조 세부사항의 영향을 평가할 수 있습니다. 그런 다음 실제 교통패턴으로 인한 작용력 효과와 피로설계 작용력을 비교하여(즉, WIM 기록을 통해) 실제 피로응력범위의 실제 근사치를 평가할 수 있습니다. 임계하중 위치 및 피로 I 및 II 하중계수와 같은 현재 AASHTO LRFD 피로설계 기준의 적합성(SHRP 2 R19B (Modjeski and Masters 2015)에 문서화된 연구노력을 통해서만 세로 거더에 대해 보정 됨)도 교차 뼈

대구조 시스템과 관련하여 평가할 수 있습니다.

이 소개에 이어 피로하중 연구에서 채택된 모델링 접근방식이 설명 됩니다 (절2.3.1). 현재 피로설계 하중에 대한 교량을 평가하는데 사용되는 절차 (절2.3.2)와 WIM 연구와 관련된 절차 (절2.3.3)가 제시됩니다. 연구와 관련된 주요 결과물 및 결과는 3.3절에 요약되어 있습니다.

2.4 R-Factor 연구 (3D 해석)

앞서 언급 한 바와 같이 R-Factor 연구는 이 프로젝트 (절1.2)의 목표 (c)를 다룹니다. 교차 뼈대구조 부재 강성에 대한 단부 연결의 영향에 대한 정량적 기반지침을 제공합니다. 이를 염두에 두고 이 연구의 주요 초점은 상용 디자인 소프트웨어 프로그램에서 일반적으로 사용되는 3D모델링 기술입니다. "3D 모델"이라는 용어는 종종 뼈대 시스템의 매우 정확한 표현으로 동의어이지만 교차 뼈대구조 모델링의 세부수준은 평가된 보강재 작용력의 정확도에 극적인 영향을 미칠 수 있습니다. 상업용 3D프로그램은 일반적으로 교차 뼈대구조 부재와 이들의 연결을 한지 단부 트러스 요소로 단순화하여 패널의 강성을 잘못 표현하고 잠재적으로 신뢰할 수 없는 설계 작용력 평가치를 생성합니다.

절1.1.3에서 언급했듯이, 지난 10년 동안 비대칭 교차 뼈대구조 부재를 통한 편심하중경로의 연화효과를 근사화하기 위해 상당한 연구가 수행되었습니다. (Wang 2013; Battistini et al. 2016) 이전 작업에서 강성감소를 평가하기 위한 방정식을 개발했지만 설계조항에 포함된 권장사항은 0.65의 고정강성 수정계수로 구성됩니다. (AASHTO LRFD Article C4.6.3.3.4) 그러나 이러한 지난 연구는 주로 건설 중 비 복합 시스템에서 교차 뼈대구조의 응답으로 제한되었습니다. 따라서 복합체로 사용 중인 교량에서 교차 뼈대구조의 강성응답이 제대로 조사되지 않았습니다. 이 절에서는 교차 뼈대구조에 대한 기존 트러스 요소 모델링 접근방식의 한계, 복합조건에 대한 적절한 강성수정, 정교한 3D 해석에서 교차 뼈대구조 모델링에 대한 제안된 대체 접근방식의 한계를 평가하기 위해 수행된 계산연구에 대해 개요를 제공합니다. (예 : 편심 빔 모델)

절2.4.1은 여기에 제시된 해석절차 및 결과에 대한 전후관계를 제공하기 위해 복합 시스템에서 교차 뼈대구조의 일반적인 하중에 기인하는 거동을 설명합니다. 절2.4.2는 강성수정 접근법의 주요측면을 강조하고 절2.4.3은 제안된 편심 보 모델링 접근법을 개략적으로 설명합니다. 마지막으로 절2.4.4에는 이러한 각 방법론을 평가하기 위해 수행된 매개변수 연구가 요약되어 있습니다.

2.5 상용 설계 소프트웨어 연구 (2D 분석)

이 보고서 전체에서 광범위하게 논의된 바와 같이, 해석개선은 일반적으로 정확도를 향상시키지만 모델링 복잡성과 계산노력이 증가합니다. 따라서 많은 설계자와 상용 설계 소프트웨어 프로그램은 단순화된 방법을 사용하고 정교한 분석을 수행하여 설계 능력을 얻습니다. 이러한 단순화된 방법은 2.4 절에서 소개한 고 충실도 3D FEA 솔루션에서 1D 선 거더 해석에 이르기까지 다양합니다. 1차원 선-거더 해석은 보 해석 및 단순한 구조설계에 유용한 도구가 될 수 있지만 일반적으로 교차 뼈대구조거동과 관련된 정보는 제공하지 않습니다.

이를 염두에 두고 교량설계 업계에서 널리 사용되는 2D 해석방법의 방법론을 요약하는 것이 이 절의 주요 주제입니다 [즉, NCHRP 프로젝트 12-113의 목표 (d)]. 2 차원 해석방법은 거더 작용력에 대해 상대적으로 정확한 결과를 생성하는 것으로 나타났지만 (White et al. 2012), 특히 복합교량 시스템에서 교차 뼈대구조 작용력에 대한 성능은 덜 이해되고 정량화되었습니다. 일반적으로 상업용 설계 소프트웨어 연구는 일련의 해석연구를 통해 복합교량 시스템의 교차 뼈대구조 작용력 효과와 관련하여 이러한 일반적인 2D방법의 한계를 검토했습니다.

2.6 안정성 연구

안정성 연구는 1.2절에 소개된 목표 (e)와 관련된 두 가지 주요 설계문제를 조사하는데 중점을 두었습니다. (i) 음의 모멘트 영역을 포함하도록 사용 가능한 솔루션을 확장하는 강재 I 거더에 대한 안정성 보강 요구사항 개발 및 (ii) 건설 중 및 교량의 공용수명 동안 발생하는 작용력 효과를 고려한 안전성 보강 강도 요구사항. 주요 안정성 작용력 효과는 바닥판 성형 중 중력재하에서 비롯될 수 있지만 바람 및 내밀기 시공하중과 같은 다른 원인에서 유발되는 작용력의 영향을 고려해야 합니다. 이 절에서는 항목 (i)와 관련된 방법론과 배경을 설명하는 반면, 항목 (ii)는 주로 절3.5.4 및 설계 예 (부록 B 및 C)에서 설명합니다.

제3장 조사 결과 및 응용

1장과 2장에서 언급했듯이 NCHRP 프로젝트 12-113의 5 가지 주요목표는 실험 및 해석연구 모두에서 다루어집니다. 실험부분에는 3개의 교량에 대한 계측 및 모니터링이 포함되었으며 해석연구에는 4개의 독립적인 연구 (피로하중 연구, R-Factor 연구, 상용 설계 소프트웨어 연구 및 안정성 연구)가 포함되었습니다. 2장에서는 각 연구에 대한 일반적인 수단과 방법을 설명했지만, 이 장에서는 해당 연구의 주요 결과물과 결과를 요약합니다.

이전 장과 유사하게 여기에 제시된 자료는 실험 및 해석결과에 대한 종합적인 개요를 제공하기 위한 것이 아닙니다. 오히려 4장에 제시된 AASHTO LRFD에 대한 결론 및 제안된 수정사항을 문맥화 하기 위한 주요 관찰사항을 강조하는 샘플결과가 제공됩니다. 결과에 대한 자세한 개요는 부록 E 및 F를 참조하십시오.

이 장은 2장의 구성과 유사한 5개의 주요 절로 나뉩니다. 3.1절에서는 현장실험 프로그램의 주요 결과를 설명합니다. 제어된 활하중 재하시험 및 모델 유효성 검사연구가 요약된 다음, 계산결과를 보완하는 공용 중 응력자료가 이어집니다. 절3.2는 AASHTO 피로하중 기준 및 WIM(고속충중기) 기록에 특히 중점을 둔 피로하중 연구의 주요결과를 제공합니다. 3.3절은 교차 뼈대구조와 제안된 R-계수에 대한 편심 연결에 대한 조사를 요약합니다. 보다 구체적으로, 교차 뼈대구조의 3D 모델링을 위한 강성수정 접근법의 신뢰성과 제안된 편심 보 접근법이 탐구됩니다. 3.4절에서는 다양한 2D모델링 방법의 한계를 조사하는 상용 설계 소프트웨어 연구와 관련된 자료를 검토합니다. 마지막으로 3.5절에서는 안정성 연구와 관련된 주요결과를 요약합니다. 업계 설문조사의 결과는 이전에 절2.1에서 논의되었으므로 이 장에서는 추가 설명이 제공되지 않습니다.

제4장 결론과 연구제안

1990 년대까지 시방에는 교차 뼈대구조의 디자인을 효과적으로 표준화하는 간격제한이 포함되었습니다. AASHTO LRFD 사양은 이후 직선교량에 대한 간격제한을 제거하고 대신 합리적인 해석을 기반으로 하는 설계를 요구합니다. 많은 교량소유자가 여전히 교차 뼈대구조에 대한 일반적인 세부정보를 활용하고 있지만, 소프트웨어 도구를 통해 설계자는 교차 뼈대구조 거동 및 설계 작용력에 대한 개선된 예측을 개발할 수 있습니다. 그러나 이러한 소프트웨어 도구를 적절하게 사용하려면 교차 뼈대구조에 대한 설계지침을 현대화해야 할 필요성이 점점 더 커지고 있습니다.

지난 수십 년 동안 상당한 연구가 안정성 보강, 하중유발 피로저항, 시공 시설 및 비 복합 시공조건에

대한 해석분야에서 교차 뼈대구조 설계를 개선했지만, 설계 산업은 일반적으로 피로하중 기준, 해석기술 및 안정성 보강재와 관련된 기타 주제 등 몇 가지에 대한 정량적 지침이 부족했습니다. 이에 대한 응답으로 NCHRP 프로젝트 12-113은 다음과 같은 일반화된 개념을 포함하여 지식의 몇 가지 격차를 구별했습니다. ((i) 피로 하중, (ii) 분석 (iii) 강재 I- 거더 교량에서 교차 뼈대구조 시스템의 안정성 보강 요구사항) 이러한 지식격차는 이전에 1장에서 목표 (a)부터 (e)까지 구별된 이 프로젝트의 주요 목표가 되었습니다. 연구의 의도를 더욱 명확히하기 위해 이 다섯 가지 목표는 보고서 전체에 걸쳐 체계적으로 해결된 일련의 질문으로 꾸며졌습니다.

이 장에서는 이러한 질문과 관련하여 수행된 실험 및 해석연구의 주요결과를 요약합니다. 절4.1은 NCHRP 프로젝트 12-113의 주요결론을 설명합니다. 절4.2는 연구의 주요결과와 부록 A에 제공되고 제안된 시방 및 주석언어 사이의 연결역할을 합니다. 즉, 4.1절에 요약된 결론은 AASHTO LRFD의 문맥에서 종합되며, 4.2절은 부록에 제시된 제안된 언어에 대한 정당성과 근거를 설명합니다. 마지막으로 이 프로젝트는 교차 뼈대구조해석 및 설계관행을 크게 발전시켰지만, 추가조사가 필요한 관련 연구가 많이 있습니다. 절4.3은 NCHRP 프로젝트 12-113의 범위를 벗어난 연구주제를 구별하여 강재 I- 거더 시스템의 교차 뼈대구조거동에 대한 이해를 더욱 향상시킬 수 있습니다.

- 리포트 내용에 포함된 그림과 표는 원문을 참조하시기 바랍니다.

pi: 본 보고서의 내용은 교량 및 강구조분야로 관련 기존의 많은 발행 보고서와 연구결과가 관련되어 있으므로 전문적인 지식습득을 위해서는 별도로 내용에 포함된 보고서 및 연구 자료를 참고하셔야 하겠으며, 일반적으로 토목공학 관련자 이면 의미를 받아들일 수 있는 정도를 고려하여 작성하는 것으로 기준 하였습니다.

<원문제목> Proposed Modification to AASHTO Cross-Frame Analysis and Design

<원문출처> National Academy of Sciences(TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)