

Global Report

하중저항계수설계법(LRFD) 최소 휨 철근 요구조건

1. 요약
2. 개요
3. 최소철근 요구조건에 대해 알고있는사항
4. 실험과 분석 조사
5. 설계기준 향상
6. 결론

하중저항계수법(LRFD) 최소 휨 철근 요구조건

-요약문-

하중저항계수 설계법(LRFD)에 대한 최소 휨 철근 요구조건의 주요 목적은 구조부재가 충분한 강도와 연성을 갖도록 하여 휨 균열 한계상태에 도달할 때 충분한 경고나 하중의 재분배 없이 취성방식으로 파괴되지 않도록 하는 것입니다. 설계기준에서 최소철근 요구조건은 단면수준에서 휨 공칭모멘트 역량과 휨 균열모멘트 사이의 비율에 대한 최솟값을 보장함으로써 해결됩니다. 부재의 연성은 모든 휨 부재에 요구되는 바와 같이, 철근에서 순 인장 변형에 대한 최솟값을 요구함으로써 최소 철근 요구조건을 초과하도록 하여 확보합니다.

불필요하게 많은 양의 최소철근을 사용하는 것은 비효율적이고 과다설계와 철근복잡을 초래할 수 있기 때문에 선호되지 않습니다. 또한 과도한 철근량은 압축응력부분에서 부재의 파괴를 야기할 수 있으며, 그로인해 최소 휨 철근 요구조건의 목적을 무력화시킵니다. 경우에 따라서, 불필요하게 많은 양의 최소 철근을 요구하게 되면, 특히 비부착 세그먼트 부재의 경우 수렴성이 없는 반복적인 설계과정으로 이어질 수 있으므로 설계 요구조건을 충족할 수 없습니다. 따라서 NCHRP 프로젝트 12-94는 AASHTO LRFD 교량 설계기준, 8판 (AASHTO 2017)에서 현재 최소 휨 철근 요구조건을 확인하고 효과를 향상시키기 위해 제안되었습니다. 이전의 NCHRP 프로젝트 12-80과 달리 이번 연구에서는 현재 최소철근 요구조건보다 적은 양으로 설계된 교량 거더에 대해 여러 대규모 시험이 포함되었습니다.

AASHTO LRFD 교량 설계 기준 (AASHTO 2017)의 최신판에서, 최소 휨 철근은 주로 파열계수 f_r 의 함수인 균열모멘트 M_{cr} 에 의해 주로 결정됩니다. 일반적으로 f_r 은 6인치 깊이의 파열 보의 시험자료를 기반으로 했으며 일반적인 교량 거더 높이의 영향을 반영하지는 않습니다. 파괴역학 이론과 대규모 콘크리트 빔에 대해 수행된 시험의 제한된 수내에서는 파열계수가 빔 높이의 함수임을 제시합니다. f_r 을 계산할 때 높이를 고려하면 M_{cr} 을 보다 실제적으로 평가하여 보다 더 최소 휨 철근 요구조건을 낮출 수 있습니다.

f_r 에 대해 부재 높이의 영향에 대한 연구에서 Shioya et al. (1989)는 f_r 이 $h^{-0.25}$ 에 비례한다고 보고했으며, 여기에서 h 는 부재의 높이입니다. Carpinteri와 Corrado (2011)는 f_r 이 $h^{-0.15}$ 에 비례한다고 제안했습니다. 몇몇 연구자들은 파괴역학 이론(예를 들어, Hillerborg et al. 1976; Bosco et al. 1990; Hawkins and Hjortset 1992; Bažant 1999; Ince et al. 2003)을 통해서 h 의 함수로 f_r 을 표현하여 이 현상을 입증했습니다. 현재 AASHTO LRFD 교량 설계기준에서 f_r 은 부재의 높이에 독립으로 $0.24 \sqrt{f_c}$ '(ksi)로서 정의됩니다. 전 세계의 다른 설계기준들 중에서 현재는 유로코드 채택으로 인해 사용되지 않지만 부재 높이 함수를 포함하는 노르웨이 표준 (Norwegian Standards Association 2003)을 제외하고는 최소 $\sqrt{f_c}$ '의 함수로 최소 휨 철근 요구조건 방정식을 갖는 것이 일반적 관행으로 확인되고 있습니다.

NCHRP 12-80의 권장사항을 기반으로 AASHTO LRFD 교량 설계기준의 최소철근 결정은 $1.33 M_u$ (여기에서 M_u 는 하중 조합에서 얻은 극한모멘트 요구량) 또는 여러 계수(즉 휨 균열 변동계수 (γ_1), 프리스트레스 변동계수 (γ_2) 및 기준 최소 항복강도 대 극한 인장강도의 비율)를 고려한 함수인 M_{cr} 방정식 중 더 큰 값에 기반 합니다. 그러나 M_{cr} 방정식은 부재 높이의 영향에 기인하지 않습니다. 또한, 다른 설계기준들로 계산된 최소철근이 상당히 다양하다는 것을 발견했으며, 이는 최소철근을 계산하는 보다 신뢰할 수 있는 접근방식이 요구된다는 것을 제시합니다. 따라서 이 연구 프로젝트의 목표는 LRFD 설계철학에 따라 AASHTO LRFD 교량 설계기준에서 최소 휨 철근에 관한 현재 요구조건을 검토하는 것이었고 그 효과를 개선하는데 있습니다. 이 프로젝트에서 다음과 같은 성과가 완성되었습니다.:

1. 전 세계적으로 관련기준, 기술문헌 및 저자 / 산업경험에 대한 평론;
2. 선정된 철근보강, 프리텐션, 비 접합 포스트-텐션 세그먼트 및 접합 포스트-텐션 세그먼트 콘크리트 거더의 대규모 또는 전체 시험물 대부분이 현재 최소철근 요구 조건보다 적은 양의 철근으로 설계되었습니다.
3. 최소철근으로 거더의 거동을 보다 깊이 있게 평가할 수 있는 분석모델의 개발 및 검증;
4. AASHTO LRFD 교량 설계기준에 대해 제시된 개정에 대한 기준 및 해설용어의 권고사항 개발;
5. 제안된 개정사항의 잠재적인 경제적 영향의 정량화 및 일부 대표적인 설계사례로 제시된 개정안의 표출.

과소 철근콘크리트 보 (즉, 비교적 작은 보강)에 대한 과거의 시험은 균열모멘트에 도달한 후 충분한 강도가 있는 한(즉, 보 균열 후 하중 저항능력이 떨어지지 않음) 부재가 어느 정도 연성 능력을 가진다고 제시하고 있습니다. 이러한 시험은 일반적으로 변위제어체제하에서 수행되었습니다. 이 접근법은 수용 가능하지만 변위제어시험은 완전한 최소철근이 제공되지 않은 경우 갑작스런 파괴를 유발하지 않는다는 점을 알아야 합니다. 대신, 이 테스트는 음(-)의 균열 후 강성에 따라 빔이 서서히 파괴 하도록 합니다. 이 하중체계는 휨 균열의 발생으로 인한 동적 효과를 설명하지는 않습니다.

이 프로젝트의 일부로 9개의 대규모 거더 시험이 수행되었습니다. 모든 경우에서, 이들 중 일부는 현재 요구되는 최소철근보다 작게 설계되었지만, 시험결과는 콘크리트 거더가 균열한계상태를 넘어 충분한 강도와 연성역량을 가지고 있음을 확인해주었습니다. 이것은 또한 현재 요구되는 최소철근보다 적은 수준으로 적절한 수준의 안전이 보장될 수 있음을 보여주었습니다. 시험 거더의 거동은 일반적인 보 휨 이론을 따랐지만, 과소철근 비 접합 포스트텐션 세그먼트 콘크리트 거더에 대해 균열 발생 후 휨 메커니즘 대신 힌지 메커니즘에 의해 반응이 탁월하고 집중균열이 형성되는 것에 주목하는 것이 중요합니다. 이 힌지는 압축영역의 중심에 대략적으로 위치합니다. 분석모델의 검증은 실험결과와 잘 일치함을 보여주었습니다. 시험관찰 및 결과를 기반으로 AASHTO LRFD 교량설계기준에서 현재 최소 휨 철근 요구조건을 개정하기위한 권장사항이 설정되었습니다. 이러한 권장사항에는 M_{cr} 계산에서 부재의 높이를 고려하고 현재 강도감소계수(ϕ)를 결정하는데 사용되는 순 인장 변형률과 유사한 순 인장 변형률(ϵ_t)의 함수인 극한모멘트 증폭계수 α 를 도입하는 것이 포함됩니다. 상수 1.33은 더 이상 사용되지 않음을 의미하며, 따라서 압축통제체제의 부재는 이중부담을 받지 않음을 의미합니다. 검증된 분석모델은 콘크리트부재에 대해 제안된 최소철근을 제공함으로써 강도 및 연성역량측면에서 만족스러운 성능이 부재 높이에 따라 여전히 균일하게 달성될 수 있음을 나타내주었습니다.

제안된 권장사항을 구현하면 콘크리트부재를 보다 효율적인 휨 설계가 되게 유도할 수 있습니다. 특히, 더 두꺼운 부재의 경우 규정된 최소철근량은 보다 더 줄어듭니다. 이것은 최소철근으로 설계된 부재에 연계되는 비용을 더 절감되게 할 것입니다. 설계과정은 압축제어체제에서 부재는 과도한 철근을 요구하지 않기 때문에 더욱 합리적이 될 것입니다. 제안된 권장사항은 AASHTO LRFD 설계기준에 따라 설계된 모든 콘크리트 부재에 대해 보다 균일하고 항구적인 안전수준을 이끌어올 것입니다.

1. 개요

콘크리트 휨 부재의 최소 휨 철근 요구조건을 연구하기 위해 NCHRP (National Corporate Highway Research Program) 프로젝트 12-94에서 분석 및 실험프로그램이 사용되었습니다. 이 보고서는 해당 프로젝트의 범위, 목적 및 결과를 자료화한 것입니다. AASHTO LRFD 교량설계기준, 8판 (AASHTO 2017)에서 현재 최소 휨 철근 요구조건을 수정하기 위한 일련의 권장사항 및 몇몇 설계사례도 제공됩니

다.

2. 최소 철근 요구조건에 대해 알고 있는 사항

이 장에서는 철학적 및 역사적 배경, 최소철근 요구조건에 영향을 미치는 인자 및 최소철근으로 설계된 구조부재의 거동을 포함하여 최소철근 요구사항에 대한 현재의 지식상태를 보여줍니다.

3. 실험 및 분석조사

이 장에서는 이 프로젝트에 대해 완료된 실험 및 분석조사의 요약물을 제시합니다. 총 9개의 보가 시험되었는데, 2개의 철근콘크리트, 3개의 프리텐션콘크리트, 3개의 비 부착 포스트텐션 세그먼트콘크리트 및 1개의 부착포스트텐션 세그먼트콘크리트입니다. 이 장의 뒷부분에서 자세히 설명하듯이 철근콘크리트 및 프리텐션 빔은 충분한 크기의 구체였으며 포스트텐션 빔은 1/2 및 1/3 크기로 충분한 크기인 빔임을 나타냈습니다. 모든 빔 유형에 대해 분석모델의 실험결과가 유효한 것으로 전개되었습니다. 또한, 변수연구는 실험으로부터 결과물을 많이 확장하도록 완료되었습니다.

4. 설계기준 향상

여기에 기술된 연구의 실험 및 분석조사에 기초하여, AASHTO LRFD 교량 설계기준, 제 8 판 (AASHTO 2017)에 대한 수정, 최소 휨 철근기준의 수정이 제안되었습니다. 이 장에서는 현재 조항을 검토하고 변경 또는 업데이트를 제안하는데 사용되는 방법론에 대해 설명합니다. 광범위한 업데이트가 분석 및 실험적 조사를 기반으로 새로운 방법이론으로 기준을 완전히 교체하는 것부터 기존기준을 재교정하는 것에 이르기까지 검토되었습니다. 대체기준의 고려는 NCHRP 웹 전용문서 149 : 권장 LRFD 최소 휨 철근 요구조건 (Holombo and Tadros 2010)에서 고려되지 않은 방법이론으로 제한되었습니다.

5. 결론

5.1 소개

이 보고서는 NCHRP 프로젝트 12-94에서 완료된 연구를 요약했으며, 기존 최소 철근 요구조건을 검토하는데 중점을 두었습니다. 이 노력에는 미국 내외부의 실무 상태조사, 9가지 대규모 시험수행, 보완 분석 작업완료 및 현재 AASHTO 조항의 적절한 개정 등이 포함되었습니다. 이 연구를 바탕으로 다음 문단에 제시된 결론이 도출되었습니다.

5.2 미국 및 국제 실무상태 검토

명시된 최소철근의 미국 및 국제 실무상태를 검토한 결과 다음과 같은 결론이 도출되었습니다.:

- 1) 기준과 표준에 의해 요구되는 최소철근은 전 세계적으로 다양합니다. 이런 요구사항 중 일부에는 최소철근 요구기준을 결정하는데 있어 부재 높이를 변수로 포함하는 반면 다른 요구조건에는 이런 요구조건을 포함하지 않습니다.
- 2) 파괴역학 이론에 기초하여, 연구원들은 휨 균열강도 (f_r)는 독립적인 재료특성이 아니라, 단위면적당 파괴에너지, 콘크리트 탄성계수 및 파괴계수에 의존하는 특성길이의 함수라고 제안했습니다. 이는 휨 부재의 파괴계수는 부재 높이가 증가함에 따라 감소할 것임을 의미합니다. 문헌에 보고된 대규모 시험은 이 개념을 뒷받침하는 것으로 보입니다.
- 3) 휨 부재가 기준 및 표준에 의해 요구되는 것보다 적은 종 방향 철근으로 설계될 때, 이들은 여전히

균열한계 상태를 넘어가는 적절한 안전여유를 나타냅니다.

5.3 실험 조사

실험 작업에는 2개의 철근콘크리트 거더, 3개의 프리텐션 거더, 3개의 비 접착 포스트텐션 세그먼트 거더, 1 개의 접착 포스트 텐션 세그먼트 거더 시험이 포함되었습니다. 그것들은 현재 AASHTO 기준에 따라 필요한 최소철근보다 작게 설계되었습니다. 예비분석 작업에서 현재 AASHTO 요구조건이 과도하다고 제안했기 때문에 이 방법이 사용되었습니다. 그러나 제공되는 최소철근의 실제 양은 측정된 재료 특성과 관련하여 56%내지 130%로 다양 하였다. 결과의 시험관찰 및 분석에서 도출된 결론은 다음과 같습니다.:

- 1) 철근 콘크리트 부재는 최소강도 비 2.33 및 최대 순 인장변형을 10.5 mε로 적절한 연성을 나타냈습니다. 두 시험 거더 모두 압축으로 파괴했습니다. 이 파괴 모드는 실제 환경에서는 전개될 가능성이 없는 지간 중앙에 집중하중을 적용하여 조사되었습니다. 이 결과물은 실제적인 초과강도와 변위역량이 더 클 것이라는 것을 함축하고 있습니다. 더욱이, 임계단면 주위의 집중된 균열영역에서 종 방향 철근의 일부 부착력의 소실은 철근 보강에 대한 필요성을 줄이고 변위 역량의 증대가 필요한 것으로 생각되었습니다.
- 2) 3개의 프리텐션콘크리트 부재 모두가 충분한 연성 및 초과 강도모멘트 비를 생성했으며 시험 중 안전성에 대한 염려는 없었습니다. 측정된 강도초과모멘트 비는 1.8이상이고, 균열한계상태에 대한 변위 연성은 20을 초과했습니다. 측정된 최대변위는 임계단면 영역에서 단거리에 걸친 시험동안 진행된 강선들의 부착력 상실로 인해 생각보다 상당히 더 크게 나타났습니다.
- 3) 비 부착 포스트텐션 세그먼트부재 3개 빔 중 2개는 AASHTO에서 설정한 최소철근 요구조건보다 작게 설계되었지만 다른 하나는 현재 기준 요구조건보다 더 많이 설계되었습니다. 3개의 빔 모두가 휨 균열 형성 후 음(-)의 강성으로 반응을 나타내지 않고 만족스럽게 작용 하였습니다. UNB1 거더는 하중 제어 하에서 예비역량이 제한적이었으나, 정착부에서의 긴장 강선의 파괴에 의해 그 거더의 파괴가 좌우되었습니다. UNB1 거더를 포함하는 두개의 시험 체는 높이가 3피트였으며, 초과강도 모멘트 비는 약 1.1이었었습니다. 4.5피트 높이 빔의 해당 값은 1.6입니다. 모멘트 비의 증가에 대한 한 가지 이유는 파괴 계수가 낮아지고 부재가 더 빨리 균열가게 하는 부재 높이의 증가에 있었습니다. 따라서 설계 과정에서 이 현상을 인식하면 설계계산에서 보다 현실적인 모멘트 비를 달성하는데 도움이 됩니다. 또한, 세그먼트 빔은 초기에 휨 거동을 경험했으며, 힌지 메커니즘은 결국 휨 균열의 형성에 따른 응답을 지배했습니다. 힌지 메커니즘의 시작은 변위가 증가함으로써 벌어지는 하중저항의 감소와 관련이 있었습니다. 힌지 메커니즘의 형성을 입증하는 것은 비 부착 포스트 텐션 보의 응답을 예측하는데 필수적이라는 것이 밝혀졌습니다.
- 4) 하나의 부착 세그먼트 포스트 텐션 거더를 시험하였고, 그 거동은 비 부착 세그먼트 포스트텐션 거더 보다 프리텐션 보의 거동과 더 비슷하였습니다. 이는 세그먼트 보에서 관찰된 집중균열보다는 분산된 균열을 경험했기 때문입니다. 이 거더의 모멘트비와 연성은 프리텐션 보의 모멘트비와 연성과 비슷했습니다.
- 5) 시험은 횡단면이 너무 높을 수 있는 6-in × 6-in의 파괴 보의 표준계수에 기초하여 파괴계수 값이 확립되었음을 확인하였습니다. 시험 체의 깊이가 변할 때, 파괴계수는 전체 부재 깊이에 의존하는 것으로 보였으며, 이는 파괴계수에 대해 보다 정확한 평가가 평가 되고나서 반영되어야 할 것입니다.

5.4 분석 연구

분석모델은 시험 체의 반응을 평가하는데 사용되었고, 다음에 시험체의 측정된 응답을 사용하여 모델을 개선하는데 사용되었습니다. 개선된 모델은 제안된 AASHTO LRFD 최소철근 요구조건을 기반으로 변수 연구를 수행하는데 사용되었습니다. 이 연구로부터 도출된 결론은 다음과 같습니다.:

- 1) 사용된 소프트웨어의 한계 내에서, 분석모델은 측정된 특성이 사용될 때 시험 체의 관찰된 응답을 만족스럽게 계산해주었습니다.
- 2) 측정된 응답과 계산된 응답사이의 불일치는 (a) 철근보강의 저 부착 거동을 정확하게 모델링하지 않았기 때문이며, (b) 콘크리트의 비선형 거동으로 인해 발생하는 수렴문제 및 (c) 힌지 메커니즘의 형성을 고려하지 않고 비 점착 포스트 텐션을 갖는 세그먼트 빔의 전체 응답에 대한 휨 거동으로 가정하는데 기인하였습니다.

제안된 AASHTO 기준에 기초한 완성된 변수연구는 철근콘크리트와 프리텐션 거더가 적절한 모멘트 비인 각각 약 1.75와 1.64의 일정한 모멘트 비를 보여주었습니다. 1.06 내지 1.44 범위에서 큰 모멘트 비 변화가 비 부착 포스트텐션 거더에서 관찰되었습니다. 더 낮은 모멘트 비는 예상대로 더 작은 빔 높이 및 더 작은 스패 대 높이 비에서 얻어졌습니다. 분석에서는 강선과 편향기 사이의 마찰을 고려하지 않았으므로 실제 초과강도모멘트 비가 증가 할 것입니다.

5.5 AASHTO 기준에 대한 권장되는 변경사항

현재 AASHTO 기준은 완료된 작업을 기초로 평가되었습니다. 상세설계사례 뿐 아니라 다양한 설계단면을 포함하는 또 다른 변수연구가 기준에 관해 제안된 변경사항을 바탕으로 완료되었습니다. 이러한 노력의 결과로 다음과 같은 결론이 도출되었습니다.:

- 1) 파괴계수에 대한 깊이의 영향은 모멘트 비의 보다 현실적인 평가를 제공하고 비용절감을 가져 오기 때문에 설계방정식에 포함되어야 할 것입니다.
- 2) 압축제어부재의 경우, 최소철근 요구조건은 감소된 저항계수를 사용해야하는 것에 더하여 설계에도 불이익을 줌으로 수정해야합니다.
- 3) 이 보고서에 제시된 완성된 연구에 기초하여 AASHTO에 제안된 방법에서, 다른 보 유형들이 꾸준한 초과모멘트 비율을 생성하므로 경제적 이익을 얻기 위해 최소철근 수량감소를 요구하게 되었습니다.
- 4) 완성된 설계사례는 제안된 변경사항과 잠재적인 경제적 이익의 적합성을 확인해주었습니다.

<원문제목> LRFD Minimum Flexural Reinforcement Requirements

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