

강판 또는 탄소섬유시트 보강된 수평 구조 부재의 안전성 평가시 고려사항

Considerations in the Safety Evaluation of the Lateral Structural Members Reinforced with Steel Plate or CFRP Sheet

강 석 원*
Kang, Sukwon

박 형 철**
Park, Hyung-Chul

오 보 환***
Oh, Bohwan

Abstract

Since regulation or specification for the reinforcing method are quite ambiguous, structural design for the reinforcement can be subjectively and arbitrarily conducted. Thus, reasonable limitation and guide for the quantity of the reinforcement are required for the safe use of the structure after repair.

In order to guarantee the safety of the structural member several items should be considered; reinforcing limit to avoid the brittle failure, least required strength of the existing member before reinforcement in order not to fail under the new serviceability load condition when reinforcing steel plates or CFRP sheets are harmed or subjected to fire.

Keywords: Reinforcement, brittle failure, required strength, steel plates, CFRP sheets

1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간이 경과함에 따라 재료적, 시공적, 또는 구조적 요인으로 구조성능이 저하되어 안전성을 다시 확보할 수 있도록 보수 및 보강이 필요하다. 또한, 구조성능의 저하가 없더라도 환경적, 사회적 요인에 의해 구조물 전체 또는 부분에 대한 리모델링이 실시될 수 있으며, 이 경우에도 해당 부재에 대해 안전성을 확보할 수 있도록 보강조치가 필요하다. 또한, 근래에 들어 리모델링에 대한 국가적인 관심도가 크게 증가하였으며, 자원의 절약, 환경파괴의 방지 등에 대한 고려로 보수 및 보강에 대한 효용성이 점차 증대되고 있다. 그러나 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 시트 또는 강판을 이용한 보강 방법의 사용 증가에 비해 이에 대한 명확한 규정이나 지침이 마련되어 있지 않기 때문에 설계자의 임의적이고 주관적인 판단에 의해 구조설계가 이루어지고 있다.

따라서, 본 연구에서는 기존에 진행된 보수·보강에 대한 연구결과와 현재 실시되고 있는 보강기술에 대한 검토, 그리고 기본적인 설계개념 등을 토대로 합리적인 보강시의 제한사항과 보강 이후의 안전성 검토 방안을 제시하였다. 또한 일본과 미국의 사례나 관련규준을 검토하여, 보강 성능 평가에 대한 지침의 개선 또는 발전방안에 대해 검토하였다. 이와 같은 연구는 현재의 시점에서 국내의 미비한 기준의 발전 및 새로운 기준의 제정에 큰 도움이 될 수 있다.

* 공학박사, 대우건설기술연구소, 선임연구원

** 구조기술사, 대우건설기술연구소, 책임연구원

*** 공학박사, 대우건설기술연구소, 책임연구원

2. 연구 배경 및 범위

강판 또는 탄소섬유(CFRP)시트 보강법의 적용 이후, 안전성과 관련하여 가장 문제시되고 있는 부분은 보강 부위와 기존 구체와의 일체성 여부이다. 보강 구조설계시 기존 구체와 보강재가 완전부착에 의해 일체화된 합성구조로 간주하여 설계하고 있다. 그러나 실제로는 시공시의 접착 불량, 접착제로 주로 사용되는 에폭시의 온도관련 특성, 시간의 경과에 따른 보강재와 기존구체 및 접착제의 물성특성 변화, 지진 등과 같은 갑작스러운 외부하중 증가, 화재에 의한 부재의 전체 또는 부분적인 손상 등에 의해 발생할 수 있는 보강재의 훼손 등과 같은 요인에 의해 합성구조의 일체성이 부분적 또는 전체적으로 손상될 수 있으며 이는 부재 전체의 붕괴를 가져올 수 있다. 따라서, 기존 구체와 보강재 사이의 파괴의 가능성이 상시 존재하고 있으며 이에 대한 대비책이 필요하다.

능동적인 대책으로서 상시 유지관리 시스템을 가동하여 꾸준하고 지속적인 관찰과 문제 발생 초기의 적극적인 대응을 고려할 수 있다. 그러나 이는 현실적으로 거의 불가능하며, 화재 등과 같은 일정한 규모 이상의 손상이 발생하였을 경우에는 초기대응 여부에 상관없이 부재의 붕괴를 가져올 수 있다. 따라서, 건물 사용시 최소한의 안전성 확보 방안이 필요하며, 보강 이후의 하중상태 하에서 보강재의 내력이 완전히 손실되었을 경우에도 부재가 파괴되지 않기 위한 수동적인 대비책이 마련되어야 한다.

이를 위해 내력이 부족한 부재에 대한 보강 이후, 구조물 사용시의 안전성과 관련하여 다음과 같은 사항에 대해서 검토할 필요성이 있다.

- 1) 보강된 부재의 취성파괴를 방지하기 위한 최대 보강량
- 2) 보강 이후 강판이나 탄소섬유시트가 파손되었을 경우 사용하중에 의해 부재가 붕괴되지 않기 위한 부재의 보강 이전 최소 소요 강도
- 3) 화재가 발생하였을 경우 보강된 부재의 거동 특성과 붕괴위험으로부터의 안전성 검토

3. 최대보강량에 대한 검토

국내의 철근콘크리트 설계 기준 및 ACI 기준에서는 철근콘크리트 보의 설계시 콘크리트의 압축에 의한 취성파괴를 방지하고 철근의 인장에 의한 연성파괴를 유도하기 위하여 사용 철근의 양을 제한하고 있다. 따라서, 철근과 콘크리트가 동시에 파괴에 도달하는 시점에서의 철근비, 즉 평형철근비의 75% 이하가 되도록 제한하여 연성파괴가 발생할 수 있도록 규정하고 있다.

보강재로 사용되는 탄소섬유시트는 재료 자체의 특성상 소성능력이 전혀 없으며 파괴시점까지 선형 탄성거동을 하며 보강용 강판의 경우에도 철근과 거동특성이 거의 동일하기 때문에, 보강된 부재에 대해서도 반드시 취성파괴를 방지하기 위한 최대보강량에 대한 제한이 필요하다. 이 때, 최대보강량은 하중 작용시의 변형 적합성 및 단면에서의 하중 평형조건으로부터 계산할 수 있으며, 최대철근비 형태로 표현이 가능하다.

기존의 연구결과 또는 설계관행으로는 보강재를 포함한 등가 철근비가 기존 부재의 유효치수에 대해서 최대철근비를 넘지 않도록 규정하고 있다.^{1) 2)} 기존 구조물이 별다른 손상을 입지 않고 상부 슬래브가 존속될 경우에는 슬래브 유효폭에 의해 기존에 사용하던 최대철근비 제한 규정의 적용에 큰 문제점이 없다. 그러나 기존 부재에 손상이 발생하였거나, 리모델링 등에 의해 상부 슬래브가 제거되었을 경우, 단순 사각형 보에 대해서 그와 같은 규정을 적용할 경우, 최대보강량이 매우 제한적이게 되므로 이를 직접적으로 적용하기는 곤란하다. 따라서, 철근콘크리트 보의 기본적인 역학적 개념으로부터 보강부재의 최대철근비를 설정할 필요가 있다.

그림 1에서 보강재로 사용되는 강판이나 탄소섬유시트의 경우 모두 철근보다 탄성계수가 동등하거

나 또는 그 이상의 값을 가진다. 따라서, 항상 보강재가 먼저 항복점에 도달하게 되며 단면에서의 하중평형조건으로부터 다음과 같은 관계를 나타낼 수 있다.

$$0.85f_{ck} \cdot ab = A_s \varepsilon_s E_s + A_r f_r \quad (1)$$

여기서 f_{ck} , a , b , A_s , ε_s , E_s , A_r , f_r 은 각각 콘크리트 압축강도, 등가응력블록 깊이, 보의 폭, 철근의 단면적, 변형률 및 탄성계수, 보강재의 단면적 및 항복강도이다. 콘크리트의 압축과괴시 변형률을 0.003으로 가정할 때, 등가응력블록깊이 a 와 중립축거리 c 와의 관계를 고려하면 식(1)로부터 보강재에 대한 평형철근비는 다음과 같이 쓸 수 있다.

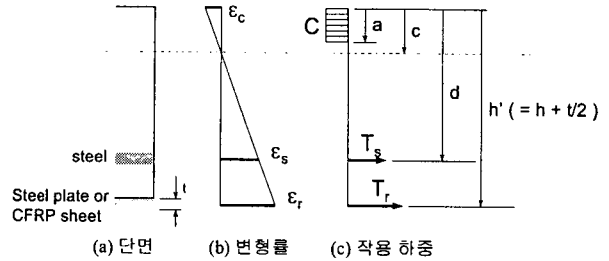


그림 1 합성단면에서의 변형률 및 작용하중

$$\rho_r = 0.85\beta_1 \cdot \frac{f_{ck}}{f_r} \cdot \left(\frac{0.003E_r}{0.003E_r + f_r} \right) - \rho_s \cdot \frac{d(d-c)}{h'(h'-c)} \cdot \frac{E_s}{E_r} \quad (2)$$

여기서 E_r , ρ_s , ρ_r 는 각각 보강재의 탄성계수, 기존 구체에 대한 철근비, 및 보강 이후 부재의 보강재의 비이다. 따라서, 부재 보강시의 최대보강량은 식 (2)에서 얻은 보강 후 평형철근비 ρ_r 의 75% 수준으로 결정할 수 있다.

4. 적정 보강 수준에 대한 검토

부재 설계시 작용 하중에 의해 발생하는 휨, 전단 등의 효과가 부재 자체의 내력보다 커질 경우 한계상태에 도달하여 파괴에 이르게 된다. 따라서 모든 부재는 여러 형태의 하중 효과에 의한 한계상태 이내에 존재하여야 한다.

보강된 부재의 경우, 시공품질의 불량, 반달리즘과 같은 일탈행위에 의한 보강부위의 손상 등과 같은 원인에 의해 보강성능이 충분히 발휘되지 못할 우려가 항상 존재한다. P. Kelly 등은 부재는 보강 이전 상태에서도 철근이 항복하지 않은 상태로 사용하중을 지지할 수 있어야 하며, 또한 보강 이전 상태로 하중계수(γ_i) 1.2를 사용한 계수하중 이상의 강도를 가질 것의 제안을 하였으며, ACI 440 규준에서는 활하중에 대해서 15%정도 경감($\gamma_u=0.85$)할 수 있다고 제시되어 있다.^{3) 4)}

$$(\phi R_n)_{existing} \geq (\gamma_{dl} S_{DL} + \gamma_{ll} S_{LL})_{new} \quad (3)$$

여기서 ϕ , (R_n) , S_{DL} , S_{LL} 는 각각 강도저감계수, 기존 부재의 하중지지성능, 리모델링 이후의 하중조건에 의한 고정하중 및 활하중 효과를 나타낸다. 휨부재의 강도저감계수를 0.9로 가정하고 하중계수에 대한 Kelly의 제안 및 ACI 규준에서의 제안 중 상대적으로 보수적인 Kelly의 제안을 따를 경우, 보강이전 부재의 성능은 보강이후 사용하중에 대해서 약 30%의 안전율이 고려되었음을 알 수 있다.

5. 화재시 안전성에 대한 검토

국내에서 건설되고 있는 건축물의 경우, 건설교통부 고시 제2000-93(내화구조의 인정 및 관리기준)에서 지정된 내화성능을 만족하도록 규정하고 있다. 강판이나 탄소섬유시트 등으로 보강된 부재에 대해서도 동일한 규정이 적용되어 필요한 경우, 보강 이후 내화피복을 실시하고 있다. 그러나 보강 이후

의 내화피복은 보강재인 강판이나 탄소섬유시트에 대한 내화보강이므로 보강재와 구체를 연결하는 접착제인 에폭시에 대해서는 보강 방안이 마련되어 있지 않다. 에폭시의 전이온도는 대략 60~90℃ 내외이며 전이온도에 도달하면 에폭시의 접착력은 기존의 성능을 발휘할 수 없을 것으로 추정된다. 따라서 보강부재가 내화피복이 되어있을 경우라도 실제 화재시에는 건설교통부 고시안에 의해 요구되는 내화성능을 만족하기가 거의 불가능하다.

ACI 440 규준에서는 이와 같은 문제점에 대해서 탄소섬유시트로 보강된 부재에 대해 에폭시와의 합성 구조물로 간주하여 어느 정도 내화성능을 가지고 있는 것으로 간주한다. 그러나 이 경우에도 내화성능에 대한 명확한 검증이 없기 때문에 실제 화재시의 안전성 검토에는 적용할 수 없다. 다만, ACI 440에서는 화재시 구조물의 파괴에 대해 다음과 같은 수준의 안전을 값을 제시하고 있다.

$$(R_{n\theta})_{existing} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (4)$$

여기서 $(R_{n\theta})_{existing}$ 는 일정시간 이상 규준화재에 노출된 부재의 강도로서 ACI 216R에서 제시된 방법을 통해 계산할 수 있다. 화재가 발생하게 되면 상부층의 거주자들은 수 분 이내에 피난을 하게 된다. 따라서 활하중의 감소효과를 기대할 수 있을 것으로 판단되며, 앞서 적정보강수준에 대한 검토 시 ACI 위원회의 권장사항으로 제시되었던 15% 활하중 감소를 고려하면 최소한 다음과 같은 정도의 수준이 되어야 한다고 여겨진다.

$$(R_{n\theta}) \geq 1.0 \cdot S_{DL} + 0.85 \cdot S_{LL} \quad (5)$$

여기서 $R_{n\theta}$ 는 보강 이전 상태에서 기존 구체의 내화성능이며, 보강재에 대한 내화피복 이후에 구조물을 사용하므로 피복에 의한 온도 감소 효과를 고려하여 계산할 수 있다.

6. 요약 및 제안

- 1) 보강시 최대보강량은 보강 이후의 평형철근비 ρ_r 의 75% 수준으로 결정할 수 있으며, ρ_r 은 보강 이후의 단면에서의 평형조건으로부터 계산할 수 있다.
- 2) 보강량의 정도는 보강 이전의 부재성능과 재설계 이후의 사용하중과의 관계에서 구할 수 있으며, 안전율을 고려할 경우 보강량은, 기존 성능의 최대 30% 정도로 제한할 필요가 있다.
- 3) 보강된 부재의 내화피복은 보강재에 대한 내화보강안이나 접착제로 주로 사용되는 에폭시에 대해서는 내화성능을 확보할 수 없으며, ACI 규준을 따를 경우 화재 발생시, 15% 정도의 활하중 감소 효과를 고려할 수 있다.
- 4) 탄소섬유시트 또는 강판으로 보강된 부재의 경우, 구체와의 계면에서 접착제로 주로 사용되는 에폭시의 전이온도가 100℃ 이내로 매우 취약하므로, 보강이후의 부재의 온도에 따른 거동 특성 연구가 필요하다.

참고문헌

1. 대한건축학회, "콘크리트 구조물의 보수 보강," 철근콘크리트분과위원회 기수보고서 ATR 97-1, 1997
2. 김지영, 황진석, 안재현, 박철림, "강판보강 철근콘크리트 보의 평형철근비에 관한 연구," 대한건축학회 논문집 구조계 14권 9호, 1998. 9
3. Paul L. Kelly, Michael L. Brainerd, and Milan Vatrovec, "Design Philosophy for Structural Strengthening with FRP," Concrete International, 2000. 2
4. ACI 440.2R-02, Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, ACI