

철골-콘크리트 합성 연결보의 거동과 설계

Behavior and Design of Steel-Concrete Composite Coupling Beams

홍성걸*
Hong, Sung Gul

양지연**
Yang, Jee Youn

ABSTRACT

Structural steel/composite beams provide a viable alternative for coupling individual reinforced concrete wall piers. Well-established guidelines for shear links in eccentrically braced steel frames form the basis of current design guidelines. However, these provisions ignore the effects of nominally reinforced concrete encasement which typically surrounds the coupling beam, and are based on overly conservative assumed deformation demand. A coordinated analytical research program at here has focused on response of steel/composite coupling beams, their connections to reinforced concrete walls, and overall behavior of composite coupled wall systems. Using the results from this study, guidelines for proper design and detailing of steel/composite coupling beams and beam-wall connections have been developed. This paper summarizes the research program, and highlights the basic concepts, important findings, and recommendations.

1. 서론

일정한 패턴의 개구부가 있는 구조 벽체에서, 개구부와 개구부 사이의 벽들은 큰 측면 강성과 강도를 가진 시스템으로 서로 연결될 수 있다. 극한 상태나 그 가까이에서의 구조적 성능은 연결보의 적절한 상세에 의해 능률적으로 활용될 수 있다. 이러한 연결보는 over coupling(하나의 pierced wall처럼 거동하는 시스템)과 light coupling(거의 분리된 벽처럼 거동하는 시스템)을 피하도록 적절히 조화되어야 한다.

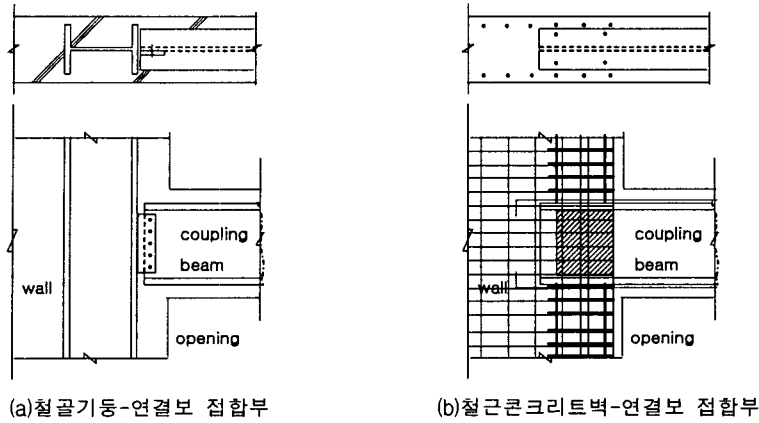
강성, 강도, 에너지 소산 요구를 만족하기 위해, 현재 설계 규정은 깊은 보에 대각 철근 배근을 하도록 되어있다. 대각 철근은 발전된 한계상태에서의 좌굴을 방지하기 위해 적절히 confine되어야 하는 비교적 큰 직경의 bars로 구성된다. 또한 벽체에 철근을 정착시키는데 어려움도 있다.

구조용 철골 또는 철골-콘크리트 합성보는 특히 층고의 제한이 있는 경우에 대해서 실용적인 대안을 제시한다. 전통적인 철근콘크리트 부재와 대조적으로, 철골/합성 연결보는 횡향복 또는 전단향복 부재로 구분하여 설계할 수 있다. 주요 설계 논점은 철골/합성 보의 상세 그리고 보-벽 연결부이다. 벽 영역의 요소가 철골 기둥으로 구성되었는지 철근콘크리트 부재로 구성되었는지에 따라 병렬보-벽체 접합부의 상세가 달라진다.[그림1] 벽이 철골 기둥으로 구성된 경우에서 연결부는 철골조의 보-기둥 접합부와 유사하다. 반면 철근콘크리트 부재로 구성된 벽에서의 연결부는 벽 안쪽에 합성보의 철골부가

* 정희원, 서울대학교 건축학과 부교수

** 정희원, 서울대학교 건축학과 석사과정

매립되어 이루어진다. 이때 벽에 매립된 보의 길이는 철골/합성 연결보의 성능에 지대한 영향을 주게 된다.



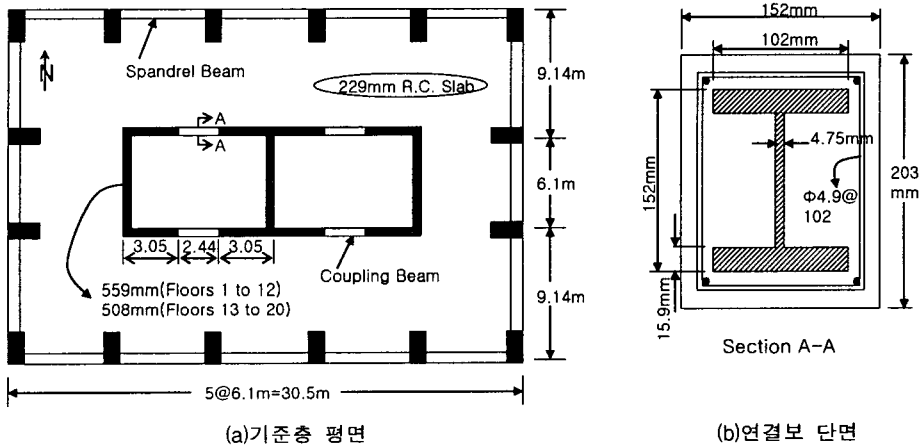
(a)철골기둥-연결보 접합부

(b)철근콘크리트벽-연결보 접합부

[그림1] 전단벽-연결보 접합부

2. 합성 연결보의 전단 보강

현재 합성 연결보는 여타의 일반적인 철골 구조물의 설계와 동일한 방식으로 이루어진다.[2] 이러한 합성 연결보는 종종 door lintels같이 공칭 철근콘크리트 요소 내부에 들어간다. 그러나 콘크리트 encasement의 효과에 대한 정보의 부족으로, 현재의 설계 규준은 연결보가 받게 되는 콘크리트 encasement의 효과를 고려하지 못하고 있다. 이로 인해 플랜지와 웹의 좌굴을 방지하는 상세는 철골 연결보에 대한 상세와 같은 규준을 사용하고, 철골의 매립 길이 역시 콘크리트의 효과를 무시한 채 철골보만의 보유능력을 이용하여 계산된다.



(a)기준층 평면

(b)연결보 단면

[그림2] 합성 연결보가 사용된 건물의 예

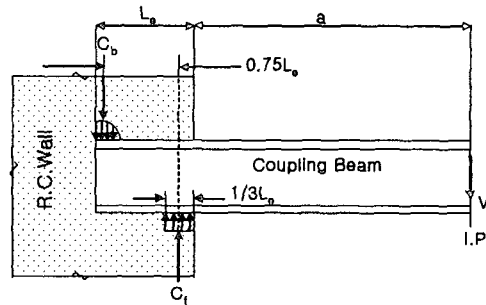
합성 연결보의 전단 보강에 대한 현재 설계 규준은 철골조에서 EBF(eccentrically braced frames)의 접합부 내진상세에 기초한다. 규준에 따르면, 연결보의 회전각이 0.08(rad)이상일 때 보의 길이가 $1.6M_p/V_p$ 보다 작으면 보 전체 길이에 걸쳐 웹의 한 면에 $(30t_w - d/5)$ 간격으로 웹스티프너가 설치되어야 하고, 0.02(rad)이하일 때는 $(52t_w - d/5)$ 간격으로 웹스티프너가 설치되어야 한다. 대부분의 연결보가 일반적으로 짧다는 것을 고려하여, 현재 설계는 웹스티프너의 간격을 좁게 하고 있다.

최근에는 합성 연결보의 전단 성능에 대한 스테럽 철근의 영향을 고려하고자 하는 실험적 연구가 Biginan등에 의해서 진행되었다.[3] Biginan의 실험결과에 따르면, 철골을 둘러싼 스테럽 철근의 보강은 콘크리트의 항복 이후에도 웹과 플랜지의 좌굴을 방지하기에 적절하다고 판단된다. 현재 NEHRP 규정[2]은 일반 철근콘크리트보에 배근된 스테럽 철근 간격(s)의 1.5배에 해당하는 웹스티프너를 요구하고 있지만, 전단 변형에 있어서 스테럽 철근으로 전단 보강을 한 합성 연결보는 약 $1.10 V_p$ 에 해당하는 전단으로 발전하여, 웹스티프너로 전단보강을 한 합성 연결보에 비해 23%정도 증가된 성능을 보인다. 또한 철골-콘크리트 합성 연결보는 콘크리트가 철골 주변을 둘러싸게 되므로, 상하부 플랜지 사이에 충전된 콘크리트가 웹의 좌굴을 방지하는 역할을 하게 된다. 따라서 철골 주변의 스테럽 철근과 콘크리트 encasement로 웹, 플랜지의 좌굴 방지와 전단 보강에 충분하기 때문에 단순 철골조에서와 같은 웹스티프너는 필요하지 않다.

3. 합성 연결보의 매립 길이와 공칭전단강도 산정

1.1 철골의 매립길이

요구되는 철골의 매립 길이를 산정하기 위해 제공된 특별한 기준은 없지만, Mattock과 Gaafar가 제시한 모델의 응용을 고찰한 기존의 연구에서 정보를 얻을 수 있다.[그림3]



[그림3] 매립길이 산정을 위한 Mattock과 Gaafar의 모델

적용된 전단(V_u)은 bearing forces C_b 와 C_t 사이의 내부모멘트에 의해 저항된다. C_b 는 포물선모양의 응력 분포로 가정되고, C_t 는 $0.85f'_c$ 와 같은 등분포 응력의 사용으로 계산된다. 이러한 가정과 단조 하중을 받는 철골 코벨에 대한 실험 데이터에 따라, 이 모델은 요구되는 매립 길이(L_e)를 (식1)로 계산한다.

$$V_u = 4.05 \sqrt{f'_c} \left(\frac{t_{wall}}{b_f} \right)^{0.66} \beta_1 b_p L_e \left[\frac{0.58 - 0.22\beta_t}{0.88 + \frac{a}{L_e}} \right] \quad (식1)$$

이 식에서 Inflection Point는 보의 중앙으로 가정된다. 그러므로 a값은 연결보 스패의 한쪽 반을 나타낸다. 그리고 V_u 값은 적절한 성과를 확보하기 위해 철골보의 소성전단능력(V_p)와 같은 값을 취한다. Mattock과 Gaafar에 의한 이 식은 철근콘크리트 기둥에 접합된 철골 브라켓의 설계를 위해 발전된 식이지만, 기존의 연구들은 cyclic shear를 받는 철골 연결보에 대해 적절한 결과를 가져온다는 것을 보여주었다.[7]

1.2 공칭전단강도

(식1)을 토대로 연결보에서 벽에 매립되는 철골의 길이를 산정하기 위해, 합성 연결보의 전단 강도를 구해야 한다. 현재 설계 기준[6]은 연결보의 회전각이 설계 지진하에서 예상된 비탄성 변형의 합리적인 해석에 의해 증명된 값이 아니면, 그것을 편의상 다소 과대한 값인 0.08(rad)로 가정한다. 이때의 철골/합성 연결보는 웹스티프너 깊이가 63.5cm보다 작을 경우, 전단에 의한 웹의 좌굴을 방지하기 위해, 전체 보 길이에 걸쳐 웹의 한 면에 $(30t_w - d/5)$ 간격의 웹스티프너를 요구한다. 그리고 합성 연결보의 전단 성능은 현재 설계 기준과 실제에 따라 철골 연결보의 전단 성능인 V_p 로 계산된다. 벽에 매립되는 철골의 매립 길이가 더 작은 전단성능을 가지고 계산 된다면, 합성 연결보가 완전히 성능을 발현시키기 전에 연결부에 소성힌지가 형성될 것이다. 이것은 바람직하지 않은 거동이다. 그러므로 철골의 매립 길이는 철골보의 성능이 아닌 합성보의 성능을 고려하여 설계되어야 한다. 이것은 전단성능에 대한 콘크리트 encasement의 기여가 포함되는 것을 의미한다. 철골보(V_{steel})와 콘크리트보($V_{concrete}$) 그리고 웹스티프너($V_{stiffener}$)의 전단성능을 결합하는 간단한 방법을 사용하여, (식2)와 같이 철골-콘크리트 합성보의 전단 능력(V_n)을 구할 수 있다.

$$V_n = V_{steel} + V_{concrete} + V_{stiffener} \quad (식2)$$

$$\text{여기서, } V_{steel} = 0.6F_y(d - 2t_f)t_w$$

$$V_{concrete} = 0.166\sqrt{f_c}bd$$

$$V_{stiffener} = \frac{A_w f_y T}{30t_w - d/5}$$

위와 같은 간단한 제안식(식2)에 의한 합성 연결보의 전단 성능과 좀 더 상세한 해석으로부터 얻은 값과 비교하여 보정계수를 구해야 할 필요가 있다.

그리고 앞에서 소개했듯이, 합성 연결보에 웹스티프너 대신 철골을 둘러싼 스테럽 철근으로 전단보강을 한 경우에 보의 성능이 더 좋아지므로, 이러한 배근의 합성 연결보에 대한 전단 강도의 산정에도 좀 더 정확한 식이 필요하다. 이 때의 스테럽 철근의 간격은 일반 철근콘크리트보의 전단에 대해 배근된 스테럽의 간격($s = \frac{A_w f_y d}{V_u/\phi - V_c}$)과 같다. (식2)를 제안한 방법과 유사하게 철골보(V_{steel})와 콘크리트보($V_{concrete}$) 그리고 스테럽 철근($V_{stirrup}$)의 전단성능을 결합하는 것에 기초한 간단한 방법으로 합성보의 전단 능력(V_n)을 구할 수 있다.(식3)

$$V_n = V_{steel} + V_{concrete} + V_{stirrup} \quad (식3)$$

$$\text{여기서, } V_{steel} = 0.6F_y(d - 2t_f)t_w$$

$$V_{concrete} = 0.166\sqrt{f_c}bd$$

$$V_{stirrup} = \frac{A_w f_y d}{s}$$

이 제안식에 의한 성능 역시 좀 더 상세한 해석으로부터 얻은 값과 비교하여 보정계수를 구해야 할 필요가 있다. Biginan Gong과 Bahram M. Shahrooz는 modified compression field theory에 기초한 fiber 단면으로 구한 성능과 철골보와 철근콘크리트보 각각의 전단능력의 합으로 구한 성능을 비교하여 1.6의 보정계수를 제안하였다. 따라서 보정계수 1.6을 채택한 합성 연결보의 전단성능은 $V_n = 1.6(V_{steel} + V_{concrete} + V_{stirrup})$ 로 나타낼 수 있다.

위에서 제안한 (식2)와 (식3)을 토대로, 경제적인 보의 설계를 위해, 현재 설계 기준[2]에서 요구하는 전단 보강 웹스티프너의 양과 같은 양의 스테럽 철근 요구량을 단위 길이에 대해 다음과 같이 구할

수 있다.(식4)

$$A_v = \frac{A_{us}T}{d(30t_w - d/5)} \quad (\text{식4})$$

여기서 웹스티프너(F_y)와 스티럽 철근(f_y)의 항복강도는 같다고 가정하여 식을 단순화하였다.

4. 전체 구조물에 대한 콘크리트 encasement 효과의 추정

제안된 성능 설계 방법에 기초하여, 매립 길이에 대한 연결보의 성능을 평가하는 과정에서 강도와 에너지 소산 특성을 비교하면, 매립 길이가 길어질 때 더 큰 연성도를 가지며 최대하중을 지난 범위에서의 강도저하 정도가 감소되는 것으로 뛰어난 향상을 나타낼 것이다. 따라서 더 긴 매립 길이를 가진 합성 연결보는 연결부의 기여를 감소시키는 것에 의해 에너지 소산 특성이 강화되어, 합성 연결보가 더 높은 성능으로 발전될 때까지 연결부의 파괴를 지연시키고, 하중 수행 능력에 있어서 향상된 거동을 할 것이다. 그리고 벽과 연결보의 요구사항은 연결보의 강성 변화에 의해 영향을 받는다. 콘크리트 encasement는 각각의 벽체 사이의 연결 작용을 증가시키는 연결보의 강성을 커지게 할 것이다. 예를 들어, 콘크리트 encasement의 영향이 있을 때 예제 구조물[그림2]의 1층 벽의 축하중은 40%가까이 증가한다.[3] 이러한 큰 증가는 콘크리트 encasement를 무시하고 계산된 힘에 대해 벽체가 설계된다면 안정성에 있어서 문제가 될 것이다. 또한 기초 역시 벽의 증가된 요구에 대해 설계되어야 한다. 연결보에서 설계 능력의 증가는 콘크리트나 철근의 encasement로 인한 추가적인 성능에 의해 파생된다. 그러므로 벽과 기초의 설계에 대해 철골 연결보를 둘러싼 콘크리트와 철근의 영향을 구체화 하는 것이 필요하다. 더불어 철골 연결보를 둘러싼 콘크리트의 균열은 합성 연결보의 강성을 저하시키므로 증가된 연결 작용은 단순 탄성 해석으로부터 예상한 것보다 작을 것이다. 그러나 잠재된 설계 영향력에 대한 관점에서, 기술자들은 합성 연결보의 증가된 강성을 설계 모델의 변수로 고려해야 할 것이다.

5. 결론

- (1) 합성 연결보에서 철골을 둘러싼 스티럽 철근은 웹 좌굴을 방지하는데 효과적인 방법이다. 그러므로 웹스티프너는 불필요하다. 현재의 설계 규준은 성능에 대해 효율이 떨어지므로, 합성 연결보의 전단 보강에 대한 스티럽 철근의 영향에 대해 재정비 될 필요가 있다.
- (2) 현재 설계 과정은 encase된 철골 연결보의 보수적인 설계와 상세를 가져옴에도 불구하고, 주변의 콘크리트 encasement로 인해 증가된 강도와 강성이 설계 요소의 일부부분으로 고려되지 않는다면, 전체적인 성능에 불리한 영향을 줄 수도 있다.
- (3) 철골의 매립 길이는 보의 합성단면에서 예상된 전단 능력을 발전시켜 계산되어야 한다. 이 전단 능력은 철골보과 철근콘크리트보 또는 철골보와 웹스티프너, 콘크리트보의 전단 능력의 합으로 나타낼 수 있다. 합성 연결보의 에너지 소산 특성, 연성도, 하중수행능력은 제안된 방법으로 구한 길어진 철골 매립 길이를 적용하는 것에 의해 향상될 것이다.

기호

M_p =plastic moment capacity	V_p =plastic shear capacity, $0.6F_y(d - 2t_f)t_w$
F_y =steel yield strength	f_y =reinforcement yield strength
f'_c =concrete compressive strength in MPa	d =beam depth
t_f =flange thickness	t_w =web thickness

t_{wall} =thickness of wall pier

b =width of the concrete encasement

s =spacing of the transverse reinforcement

T =depth of web stiffener

β_1 =ratio of the average concrete compressive strength to the maximum stress

b_f =beam flange width

A_{ws} =total area of web stiffener

A_v =total area of transverse reinforcement

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-02)", American Concrete Institute, 2002.
2. Building Seismic Safety Council (BSSC). NEHRP "Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures(FEMA 302) and Commentary(FEMA 303)", 1997 edition. Washington, DC, 1998.
3. Biginan Gong, Bahram M. Shahrooz, "Steel-concrete composite coupling beams-behavior and design", *Engineering Structures* 23, 2001. 1480-1490.
4. Lucino Galano and Andrea Vignoli, "Seismic Behavior of Short Coupling Beams with Different Reinforcement Layouts", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 2000, 876-885.
5. Theodosios P. Tassios, Marina Moretti, and Antonios Bezas, "On the Behavior and Ductility of Reinforced Concrete Coupling Beams of Shear Walls", *ACI Structural Journal*, American Concrete Institute, 1996, 711-720.
6. AISC Committee on Specification, "Seismic Provisions for Structural Steel Buildings", American Institute of Steel Construction, 1997.
7. Shahrooz BM, Remmetter MA, Qin F. "Seismic design and performance of composite coupled walls". *ASCE J Struct Div* 1993;119(11), 291-309.