

T 형강을 사용한 합성골조 보-기둥 접합부의 하중전달 메카니즘

김상식¹⁾ · 최광호²⁾*

¹⁾인하대학교 ²⁾남서울대학교

(2001년 12월 31일 원고접수, 2002년 10월 13일 심사완료)

Load Transfer Mechanism of the Hybrid Beam-Column Connection System with Structural Tees

Sang-Sik Kim¹⁾ and Kwang-Ho Choi²⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Inha University, Incheon, 402-751, Korea

²⁾ Dept. of Architecture, Namseoul University, Cheonan, 138-130, Korea

(Received December 31, 2001, Accepted October 13, 2002)

ABSTRACT

The composite frame system with reinforced concrete column and steel beam has some advantages in the structural efficiency by complementing the shortcomings between the two systems. The system, however, has also a lot of problems in practical design and construction process due to the material dissimilarities. Considering these circumstances, this research is aimed at the development of the composite structural system which enables the steel beams to be connected to the R/C columns with higher structural safety and economy. Basically the proposed connection system is composed of four split tees, structural angles reinforced by stiffener, high strength steel rods, connecting plates and shear plates. The structural tests have been carried out to verify the moment transfer mechanism from beam flange to steel rods or connecting plates through the angle reinforced by stiffener. The four prototype specimens have been tested until the flange of beam reached the plastic states. From the tests, no distinct material dissimilarities between concrete and steel have been detected and the stress transfer through wide flange beam - structural angle - high strength steel rod or connecting plate is very favorable.

Keywords : composite frame system, moment transfer mechanism, reinforced concrete column - steel beam, connection

1. 서 론

철근콘크리트 기둥과 철골 보의 접합부는 각 부재의 연속성을 확보하고 응력의 흐름이 원활하도록 설계되어야 하며, 또한 시공성과 경제성도 더불어 고려되어야 한다. 따라서, 보다 단순하면서도 효율적이고, 현장 조립에 편리한 복합 구조 접합부의 개발 및 설계가 요구된다. 이 연구에서는 T 형강과 고강도 강봉 연결재를 사용한 새로운 형태의 철근콘크리트 기둥-철골 보 접합부의 형식을 제안하고, 구조시험을 통하여 제안된 접합부의 휨내력과 응력 전달경로를 구명함으로써 복합구조 시스템에 의한 건물 설계의 합리화를 도모하고 구조체의 안정성과 경제성을 높이는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 시험계획

2.1 시험체 구성요소

Fig. 1은 이 연구에서 제안한 T 형강을 사용한 합성골조 보-기둥 접합부의 상세이다. 접합부 구성요소 중 T 형강은 시스템 내부 및 외부의 모든 응력 전달 요소들을 연결하는 주요 요소로서, 접합부의 전체 형태를 유지하며 기둥 거푸집의 역할을 한다. 또한, 보 플랜지의 인장력을 연결판으로 전달하고, 지압에 의한 보의 전단력 지지역할도 분담한다. 스티프너 보강된 γ 형강을 사용하여 보 플랜지의 인장력을 강봉으로 전달하도록 설계하고, 보의 전단력을 지지하기 위해 전단접합판을 T 형강에 용접하여 보의 웨브와 접합 되도록 하였다. 접합부 내부에서는 보 플랜지의 인장력을 전달하는 부재로서 한 방향으로만 고강도 강봉을, 이와 직교하는 방향으로만 강재 연결판을 사용하여 두 요소의 간섭이 없도록 하였으며, 보의 전단력은 T형강과 강재 연결판의 지압에 의해 지지되도록 하였다. 그리고, 띠철근의 역할을 대신하고 접합부의 일체성을 위하여 T 형강의 각 모서리 상, 하에 γ 형강을 용접하였다. Table 1은 시험체의 구성요소 및 사용부재를 나타내고 있다.

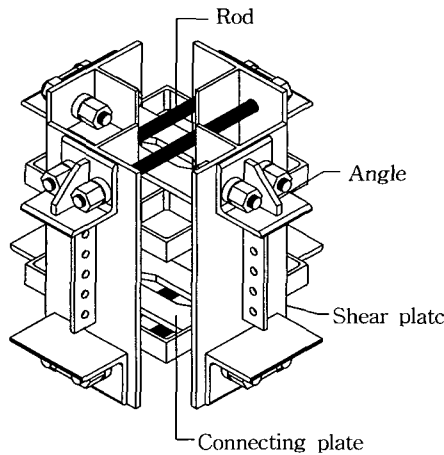
* Corresponding author

Tel : 041-580-2182 Fax : 041-580-2189

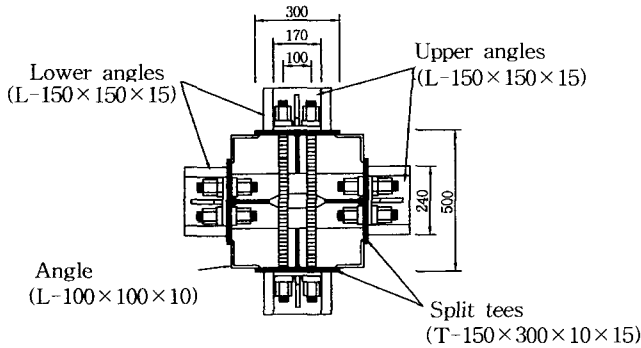
E-mail : choikh@nsu.ac.kr

2.2 시험체 제작

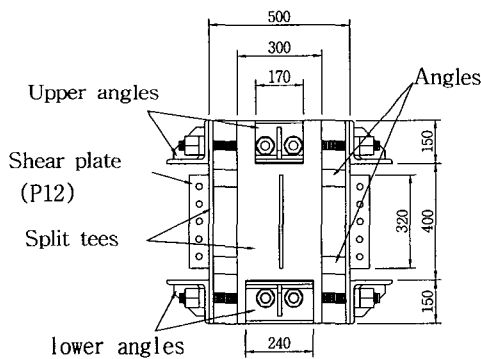
이 연구에서 제안한 합성골조 접합부에 보를 접합시켜 완성시킨 시험체는 Fig. 2와 같다. 보의 휨모멘트를 전달하는 접합부 구성요소는 한쪽 방향은 강봉이, 또 다른 방향으로는 연결판이 되는데, 이들 거동의 차이를 알아보기 위하여 보를 강봉 방향으로 접합시킨 MR-1 및 MR-2 시험체와, 보를 연결판 방향으로 접합시켜 연결판의 휨 전달 성능을 알아보기 위한 MP-1, MP-2 시험체 네 개를 제작하



(a) Perspective



(b) Plan



(c) Elevation

Fig. 1 Composite beam-column connection system with structural tees

였다.

2.3 내력산정

2.3.1 스티프너 보강된 ㄱ형강

보 플랜지의 휨인장력은 여기에 용접된 ㄱ형강을 통해 강봉으로 전달되며, 이 때 ㄱ형강에는 강봉과 보 플랜지와 의 편심에 의한 모멘트와 전단력이 발생한다. 이를 지지하기 위해 ㄱ형강을 두께 16 mm의 스티프너로 보강하였으며, 스티프너와 ㄱ형강에 의해 만들어지는 T 형 단면에 대해 식 (1), 식 (2)로 내력을 검토하였다.

$$T = \frac{M}{e} = \frac{Z_T \times f_t}{e} \quad (1)$$

$$T = V = (A_L + A_{st}) \times f_s \quad (2)$$

여기서, T 는 보 플랜지의 휨인장력이고, e 는 편심거리, Z_T 는 ㄱ형강과 스티프너가 이루는 T 형 단면의 단면계수이다. A_L 은 ㄱ형강의 단면적, A_{st} 는 스티프너의 단면적이고 f_t 와 f_s 는 각각 강재의 허용 인장응력과 전단응력이다.

2.3.2 강봉

보 플랜지의 휨인장력을 전달하는 고강도 강봉의 성능은 인장내력과 편심으로 인한 지레작용(prying action)을 고려하여 식 (3), 식 (4)로 검토하였다.

$$T = A_{rod} \times F_{rod} \quad (3)$$

$$(T)' = T \times (1 - 0.2\sqrt{e}) \quad (4)$$

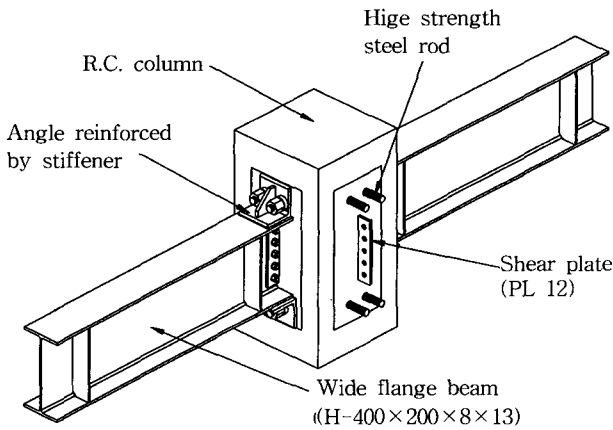
여기서, A_{rod} 는 강봉의 단면적이고, F_{rod} 는 인장내력, $(T)'$ 은 편심 인장력을 받는 강봉의 인장내력, e 는 편심거리이다.

2.3.3 연결판

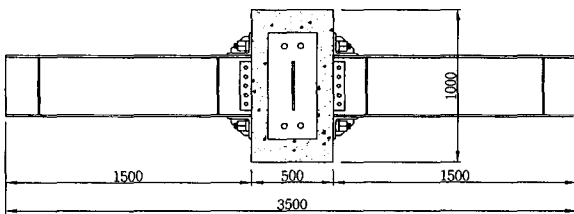
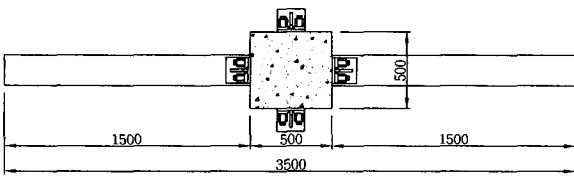
보 플랜지의 인장력을 전달하기 위해 사용한 강재 연결

Table 1 Components of composite joint

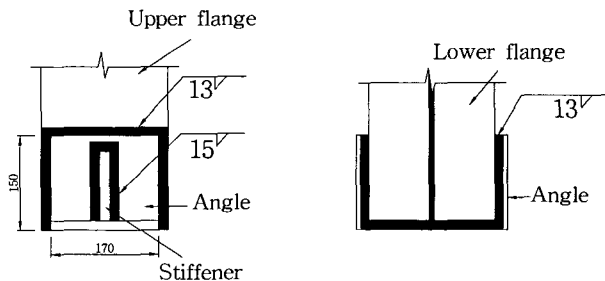
Components		Elements	
Inside of joint	Split tee		T- 150×300×10×15
	Connecting element	Rod	∅32 high tension rod
		Connecting plate	PL-19
	Structural angle		L-100×100×10
Outside of joint	Angle reinforced by stiffener	Angle	L-150×150×15
		Stiffener	PL-16
	Web connection	Shear plate	PL-12
		High tension bolt	F10T M20
Wide beam		H-400×200×8×13	



(a) Perspective



(b) Plan and elevation



(c) Welding detail between beam flange and angle

Fig. 2 Details of specimen

판에는 보 플랜지의 인장력 및 강봉과 연결판의 편심으로 인한 휨모멘트가 작용한다. 그러나, 연결판의 휨변형이 기둥 콘크리트내 타설되는 콘크리트의 구속력으로 충분히 억제되는 경우 연결판에는 인장력만 작용한다고 가정할 수 있다. 기둥 콘크리트가 연결판을 구속하기 위한 조건은 Fig. 3과 같이 이상화된 모델에서 연결판에 등분포하중이 작용한다고 가정하여 힘의 평형조건으로 구한다.

$$\frac{q_c l^2}{2} \geq T e \quad (5a)$$

$$Q_c = q_c l \geq \frac{2 T e}{l} \quad (5b)$$

여기서, 연결판의 변형을 억제하는 수직하중의 합 Q_c 는 기둥의 축력, 기둥 주철근의 인장력 등도 함께 고려할 수 있으나, 해석의 편의와 안전성을 고려하여 콘크리트의 인장력만으로 연결판을 구속한다고 가정하면 다음과 같다.

$$Q_c = f_r \times A_c \quad (6)$$

여기서, f_r 은 콘크리트의 휨인장강도 $2.0\sqrt{f_{ck}}$ 이고, A_c 는 접합부의 T 형강 부분을 뺀 기둥 콘크리트의 단면적이다. 따라서, 연결판의 휨변형을 구속하기 위한 조건은 강봉으로 전달되는 보 플랜지의 인장력을 T_f 라고 할 때,

$$T_f = \frac{f_r A_c}{2 l e} \quad (7)$$

으로 계산된다. 식 (7)의 조건이 만족되면, 연결판의 내력은 보 플랜지의 인장력에 대해서만 검토할 수 있다. 연결판의 단면적을 A_{con} 이라 하면 연결판 1 개의 허용인장내력 N 은 식 (8)로 산정된다.

$$N = T_f = A_{con} \times f_t \quad (8)$$

Table 2는 위의 과정을 통하여 얻은 시험체의 내력산정 결과이다. 여기서 각 요소들간의 내력 비교가 쉽도록 산정된 구성요소들의 내력을 접합부에 작용하는 모멘트와 구조시험기에서의 실제 가력 하중으로 치환하였으며, 가력 하중과 접합부 모멘트 및 보 플랜지 방향 인장력의 관계는 식 (9)에 나타나 있다.

24 가력 및 측정 방법

200 톤 용량의 구조시험기로 Fig. 4(a)와 같이 시험체의 콘크리트 기둥 중앙부에 수직하중을 가하여, Fig. 4(b)와 같이 접합부에 $P/2$ 의 휨모멘트와 $P/2$ 의 전단력이 작용하게 하였다. 구조시험기의 가력하중 P 와 접합부에 작용하는 모멘트 M 및 철골 보 플랜지 방향의 인장력 T 의 관계는 식 (9)와 같다. 여기서 h 는 보의 총고이고 t_f 는 플랜지 두께이다.

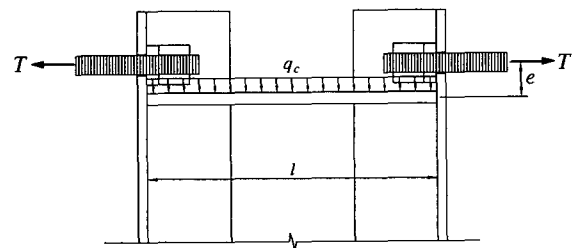


Fig. 3 Applied load on connecting plate

Table 2 Design and applied load for components of specimen

Components		Design load		Applied load	
		Allowable load	Yield load	P _a	P _y
Beam (H-400×200×8×13)	Moment (tf·m)	24.15	36.23	37.15	55.73
	Shear (tf)	20.54	30.80	31.61	47.41
Stiffened angle (L-150×150×15)	Moment (tf·m)	13.17	19.76	20.28	30.42
	Tension (tf)	56.03	84.04	86.21	129.3
Tension rod (Ø32, 2 ea.)	Moment for prying action (tf·m, e=5.45cm)	29.87	44.80	45.95	68.92
	Tension (tf)	24.71	37.06	38.01	57.02

$$M = \frac{Pl}{2} = T \times (h - t_f) \quad (9a)$$

$$P = \frac{2T(h - t_f)}{l} \quad (9b)$$

시험체의 하부에는 LVDT를 설치하여 처짐을 측정하였고, 접합부의 응력흐름을 파악하기 위하여 Fig. 5와 같이 보 플랜지와 ㄱ형강, 강봉 및 연결판 등에 변형률게이지를 부착하였다. 하중이력은 접합부의 최대내력을 고려한 하중 제어 방식으로 MR-1, 2 시험체는 30, 50, 70톤의 3회에 걸쳐 가력 및 제하를 반복하였고, MP-1, 2 시험체는 소성 거동 및 최종 파괴형태를 관찰하기 위하여 80톤 이상의 가력을 추가로 진행하였다.

3. 시험결과 및 고찰

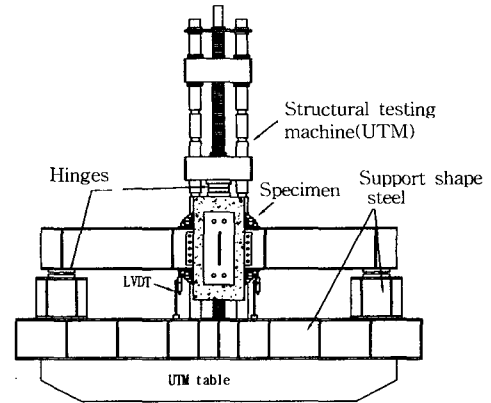
3.1 파괴상황

보 플랜지의 인장축이 소성상태에 들어갈 때까지 가력을 진행하였으나 접합부 내부의 구성요소가 완전히 파괴된 것은 없었으며, 보 플랜지에 용접된 ㄱ형강이 기등면 밖으로 벌어지는 변형이 관찰되었으며 전단파괴는 전혀 발생하지 않았다. 또한, 모든 시험체가 50톤을 넘어서는 5~10톤마다 변형률 연화 현상을 보였는데, 이는 단면의 휨응력 분포에 따른 접합부 고력볼트 부위의 슬립현상에 기인한 것으로 판단된다.

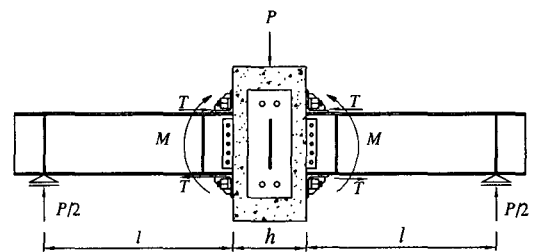
3.2 접합부 휨모멘트 전달요소의 구조성능

3.2.1 ㄱ형강

보 플랜지의 인장력을 강봉으로 전달하는 ㄱ형강에는 플랜지 인장력에 의한 전단력과 강봉 중심과의 편심으로

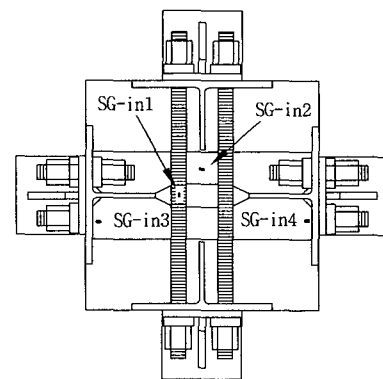


(a) Test setup

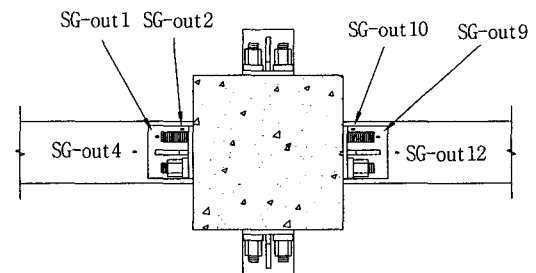


(b) Applied loads on specimens

Fig. 4 Test setup and applied loads on specimen



(a) Inside of joint



(b) Outside of joint

Fig. 5 Location of strain gauges

인한 모멘트가 작용한다. 시험결과, Γ 형강은 편심거리가 짧고 T형강에 밀착되어 있어 휨변형이 구속되었으며, 따라서 최대내력은 Fig. 6과 같이 전단력에 의해 결정되는 것으로 나타났다. Fig. 6에서 첨자 v 는 Γ 형강의 전단내력에 대해 산정한 가력하중이고, 첨자 m 은 휨내력에 대해 산정한 하중이다. 그리고, P_a 는 허용내력, P_y 는 항복내력이며, 표 2에 여기에 대한 값이 나타나 있다. 여기서, Γ 형강은 항복전단내력인 $P_{y,v} = 47.41$ 톤까지도 거의 선형 거동을 보여주어, 충분한 하중지시성능을 가지고 있는 것으로 조사되었다.

Γ 형강의 부위별 변형률 비교에서 Γ 형강 중앙부분 변형률 SG 2에 비해 Γ 형강의 꺾임 부분 변형률 SG 3가 약 2 배 이상 크고, 50톤을 넘어서는 SG 3의 비선형 거동이 두드러지게 나타나는 것은, Γ 형강의 꺾임부에 응력이 집중되었기 때문이었다. Fig. 6에서 MR-1의 SG 3값은 얻지 못하였으나 MR계열 시험체와 유사하게 나타났을 것으로 추측된다.

3.2.2 연결판

연결판에는 강봉과의 편심으로 인한 모멘트와 보 플랜지 인장력이 전달되었으나 주변 콘크리트의 구속력으로 인해 편심 모멘트는 억제되고 인장력만 작용하는 것으로 나타났다. Fig. 7은 MP-1, 2시험체의 연결판 중앙부 변형률을 이 연구 이전에 수행된 연결판의 직접 인장시험결과⁴⁾와 비교한 곡선으로, S19-1, 2는 MP 시험체와 같은 두께의 직접인장 시험체이다. 여기서 MP-1, 2시험체의 연결판은 항복 인장내력인 $P_y = 57.02$ 톤에 이를 때까지 선형 변형을 나타내나 콘크리트 구속이 없는 상태로 직접 인장을 받은 연결판은 구조성능이 크게 떨어지게 나타나 이로부터 콘크리트의 구속효과를 확인하였다.

3.2.3 강봉

보의 휨모멘트가 접합부내 강봉으로 전달되는 과정이 Fig. 8에 나타나 있다. 그림에서, 강봉의 변형률은 보 플랜지 항복 인장력 59톤에 이를 때까지 보 플랜지보다 절반 정도의 값을 보여 주고 있는데, 강봉 두 개가 보 플랜지

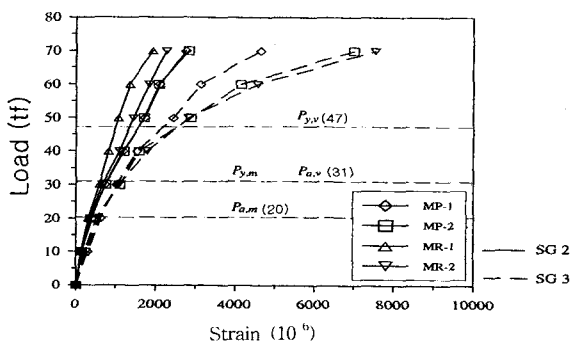


Fig. 6 Load versus strain curve for the angle

인장력을 지지하는 것을 감안하면 강봉과 보 플랜지 변형을 변화가 거의 같아, 응력 흐름이 원활함을 알 수 있었다. 그러나, 최종단계에서 강봉과 Γ 형강의 지레작용으로 인해 강봉의 휨변형이 발생하였다

3.3 시험체의 처짐 및 모멘트-회전각 곡선

Fig. 9는 각 시험체의 하중-처짐 곡선이고, 여기서 P_a , P_y , P_p 는 각각 사용된 철골 보에 단기하중에 대한 허용·항복·소성모멘트를 발생시키는 가력하중이다. 시험체의 처짐은 약 50톤까지 선형적인 거동을 보여주며, 이 값을 넘어서는 비선형 곡선으로 나타나고 있다. MP-1,2 시험체는 70 톤 가력·제하 후 추가의 가력을 진행하였는데, 70

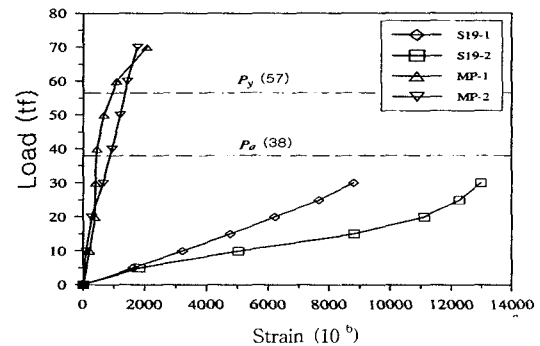


Fig. 7 Load versus strain curve for connecting plate

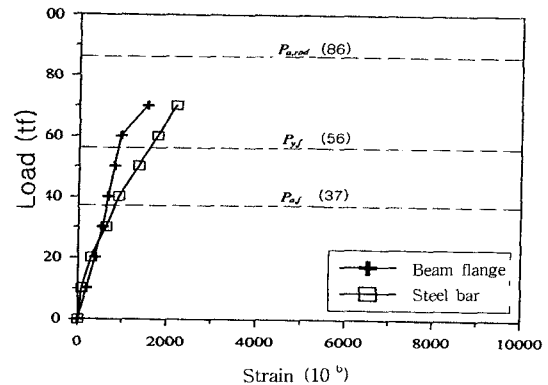


Fig. 8 Load versus strain curve for rod

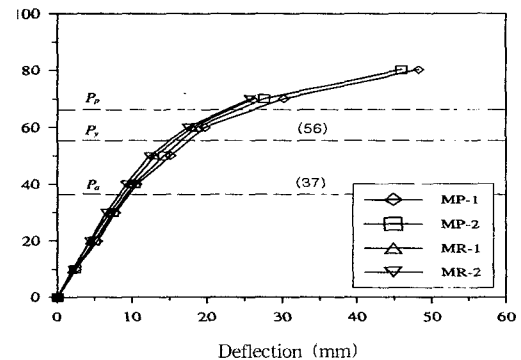


Fig. 9 Load versus deflection curve

톤 이상의 하중에서는 비선형 거동이 더욱 두드러져 거의 소성상태에 이르는 것으로 나타났다. 사용된 철골 보의 항복하중 P_y 가 약 55톤으로 계산되며 강봉을 제외한 구성 요소의 내력이 철골 보와 비슷한 값 또는 그 이하로 산정되는 것을 감안할 때, 이와 같은 접합부의 처짐 거동은 구조 효율과 경제적인 측면에서 매우 합리적인 것으로 판단되며, 이 합성골조 접합부의 사용한계상태는 약 50톤으로, 하중 지지능력은 약 70톤으로 보는 것이 적절할 것으로 여겨졌다. Fig. 10의 모멘트-회전각 곡선은 모든 시험체가 철골 보의 항복모멘트 $M_y = 38.34 \text{ tf} \cdot \text{m}$ 에 이를 때까지

초기 강성을 거의 유지하는 안정적인 거동을 보여주며, 철골 보의 항복모멘트를 넘어서면서 다소 강성이 떨어져 비선형 곡선을 나타내기 시작하였다. Fig. 10(a)와 (b)의 MP 시험체 곡선을 보면, 철골 보의 소성모멘트 $M_b = 46.01 \text{ t} \cdot \text{m}$ 이상의 하중에서는 비선형 거동이 두드러지면서 전형적인 소성거동과 함께 대변형이 관찰되고 있다. 이상과 같이 모멘트-회전각 곡선을 철골 보의 내력과 비교하여 고찰한 결과, 이 시스템은 설계하중 내에서 안정적인 형태를 보이고, 극한하중 상태에 이르러서는 대변형을 일으켜 구조 효율성이 높은 접합부 형식으로 나타났다.

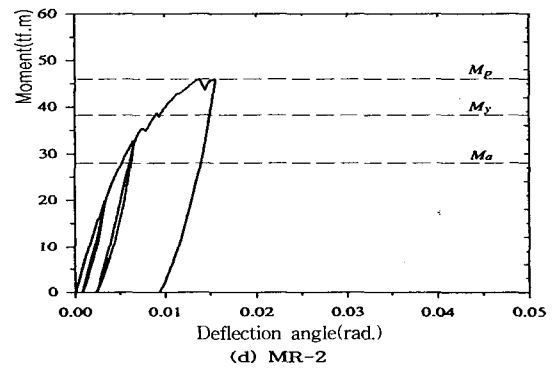
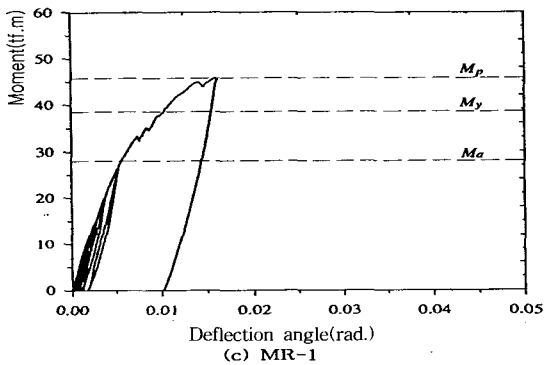
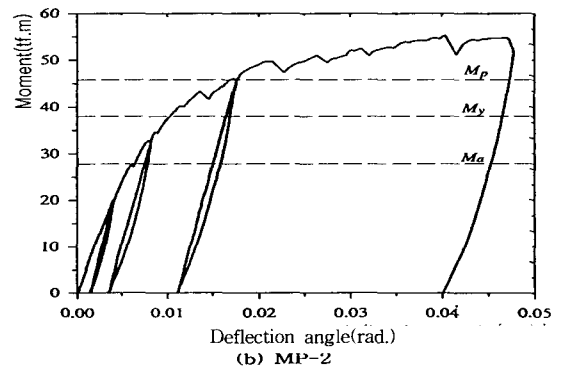
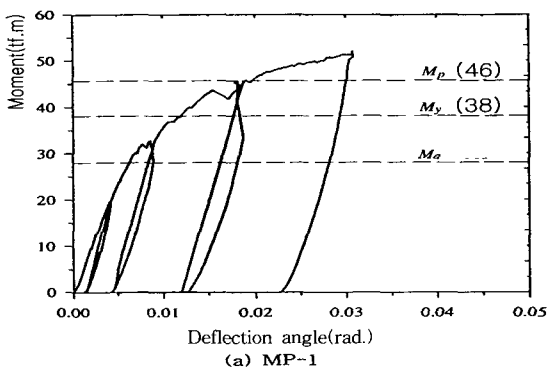


Fig. 10 Load versus strain curve for rod

4. 결 론

이 연구는 철근콘크리트 기둥-철골 보 접합부에서 보의 하중을 원활히 전달하기 위한 합성골조 접합부 형식의 개발을 목적으로, T 형강을 사용한 새로운 형식의 합성골조 기둥-보 접합부를 제안하고 보의 부재력 중 휨모멘트 전달성능 시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 제안된 접합부의 휨모멘트 전달경로 및 내력을 알아보기 위한 구조시험 결과, 우선 보 플랜지 인장력을 강봉으로 전달하는 T형강은 항복 전단내력인 47.41톤까지도 선형 거동을 보여주어, 플랜지와 강봉사이 편심 모멘트 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

2) 강봉이나 연결판은 접합부내 휨모멘트 지지부재로서,

강봉의 경우 보 플랜지가 항복 인장력 59톤에 이를 때까지 보 플랜지 변형률과 거의 같은 변형률을 보여, 응력흐름이 원활한 것을 확인할 수 있었다. 연결판은 강봉과의 편심으로 모멘트와 보 플랜지 인장력이 함께 전달되었으나 보 플랜지 항복 인장내력인 57톤에 이를 때까지 선형 변형을 하고있어, 연결판 주위의 콘크리트가 모멘트의 변형을 억제시킨 것이 확인되었다.

3) 시험체의 모멘트-회전각 곡선은 철골 보의 항복 모멘트 38.34 $\text{tf} \cdot \text{m}$ 까지 초기 강성을 유지하고 소성모멘트 46.01 $\text{tf} \cdot \text{m}$ 정도에서 비선형 거동이 관찰되었고 소성 회전각이 항복 시의 두 배 정도로 나타났다.

4) 이 연구의 시험체 제작 시 조립·거푸집 설치 및 콘크리트 타설에서는 현장 공사에 준하는 문제점이 검토되었으며, 이 과정에서 제안된 T 형강 합성골조 접합부는

현장 적용이 가능한 가공성과 운반성 및 시공성을 가지는 것으로 확인되었고, 구조시험 결과 철골 보-접합용 Γ 형강-연결용 강봉이나 연결판으로의 하중전달이 순조로운 것으로 판단된다.

참고문헌

1. ASCE Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete, "Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns," *J. Struct. Engrg.*, ASCE, 1994, pp.2330~2357.
2. Deierlein, G. G., Sheikh, T. M., Yura, J. A., and Jirsa, J. O., "Beam - Column Moment Connections for Composite Frames : Part 2," *J. Struct. Engrg. ASCE*, Vol. 115, No. 11, 1989, pp.2877~2896.
3. Sheikh, T. M., Deierlein, G. G., Yura, J. A., and Jirsa, J. O., "Beam - Column Moment Connections for Composite Frames : Part q," *J. Struct. Engrg. ASCE*, Vol. 115, No. 11, 1989, pp.2858~2876.
4. 김광연, "柱RC·梁S 混合構造 接合部の 剪斷耐力に 關する 研究," 千葉大 人學院, 1997.3.
5. 日本建築學會, "柱RC·梁Sとする 混合構造の 柱梁接合部の 力學的舉動に 關する シンポジウム," 1994.12.
6. 김상식, "T형강을 사용한 합성골조 보-기둥 접합부의 거동에 관한 연구," 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터 보고서, STRESS-98-12, 1999. 2.

요 약

철근콘크리트 기둥-철골 보 합성골조는 철근콘크리트와 철골부재의 재료적인 장점을 살린 합리적인 구조물이나, 이질 재료간의 접합으로 인해 보-기둥 접합부의 설계와 해석에서는 많은 구조적인 문제점들이 생기게 된다. 이 연구에서는 철골 보의 하중이 콘크리트 기둥으로 원활히 전달되면서 현장 시공성이 우수한 새로운 형태의 합성골조 접합부의 형식을 제안하고자 한다. 이 연구에서 고안된 접합부는 H 형강을 반분한 T 형강을 시스템 내부 및 외부의 모든 응력 전달 요소를 연결하는 주요 요소로 하고, 보 플랜지의 인장력 전달을 위해 한 방향은 고강도 강봉을, 이와 직교하는 방향은 강재 연결판을 사용하였다. 스티프너 보강된 Γ 형강을 사용하여 보 플랜지의 인장력을 기둥면에 전달하도록 하였으며, T 형강에 용접된 전단 접합판을 보의 웨브와 고력볼트로 접합하여 전단력을 지지하도록 설계하였다.

이 연구에서는 보의 플랜지로부터 스티프너 보강된 Γ 형강을 통해 강봉이나 연결판으로 전달되는 휨모멘트 전달성능을 확인하고자 구조성능 시험을 수행하였다. 시험체는 실제 보-기둥 접합부를 모델로 하여, 실물크기로 4개가 제작되었으며, 구조시험은 철골 보의 양 단부를 단순지지한 상태에서 기둥 중앙에 집중하중을 가해 보-기둥 접합부에 휨모멘트와 전단력을 작용시키는 방식으로 진행되었다.

실험결과, 이 연구에서 제안된 접합부는 현장 적용이 가능한 가공성과 운반성 및 시공성을 가지며, 철골 보-접합용 Γ 형강-연결용 강봉 및 연결판에 의한 응력전달이 매우 순조로운 것으로 나타났다.

핵심용어 : 철근콘크리트 기둥-철골 보 합성골조, 스티프너 보강된 Γ 형강, 연결용 강봉 및 연결판