

철근콘크리트 기둥과 철골 보 합성구조 접합부 시스템 개발

Development of Reinforced Concrete Column and Steel Beam Composite Joints

김도균* 정하선** 최완철***
Kim, Do Kyoon Jung, Ha Sun Choi, Oan Chul

ABSTRACT

Recent trends in the construction of long span or tall building frames feature the increase use of composite members that steel and concrete is functioning together in what terms of mixed structural systems. One of such systems, RCS(reinforced concrete column and steel beam) system is introduced and closely examined focusing on bearing strength of the composite joint in this paper. The main objective of this study was to develop detail to increase bearing capacity while bearing failure is one of the two primary modes of failure in RCS system.

The results show that specimens with the U-type bearing reinforcement detail developed in this study enhanced the bearing strength by 1.20-1.50. The U-type reinforcement is the effective details to increase joint bearing strength compared to others like vertical reinforcement welded to beam flanges.

1. 서론

현대 건축물의 구조 시스템은 크게 철근콘크리트 구조, 철골구조, 합성구조로 구분할 수 있으며, 그 중에서도 합성구조는 강재와 콘크리트 재료가 가지는 구조성과 경제성 등의 장점을 최대한 살리는 효율적 구조시스템으로 그 사용이 점차 확산되고 있다. 철근콘크리트 기둥과 철골보(RCS : Reinforced Concrete Column and Steel Beam)로 구성된 합성구조 시스템은 최근 십 수년간 미국과 일본을 중심으로 활발한 연구가 진행되어 왔으며, 콘크리트 기둥의 높은 강성 및 경제성과 철골구조의 장스팬 및 건식공법으로 인한 공간활용과 공기단축, 자중경감 등의 장점으로 인하여 시공이 증가되고 있는 추세이다.

-
- * 정회원, 현대건설 기술연구소 연구원
 - ** 정회원, 현대건설 기술연구소 연구위원
 - *** 정회원, 숭실대학교 건축과 교수

보 관통형 RCS 시스템의 접합부에서 예상되는 파괴형태는 크게 패널전단파괴와 지압파괴로 나누어 볼 수 있으며, 특히 지압파괴의 경우 콘크리트의 취성적 특성으로 인해 접합부의 중요한 파괴형태로 인식된다. 따라서 접합부의 지압강도 증가를 위한 접합부 상세 개발과, 그 성능을 검증하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 철근콘크리트 기둥과 철골보 접합부 시험체의 접합부 파괴유형을 분석하고, 지압강도 향상을 위한 접합부 상세 개발과 그 성능을 검증하여, 그 결과를 효율적 합성구조 접합부를 위한 기초자료로 응용하고자 한다.

2. RCS 시스템

2.1 RCS 시스템의 특징

콘크리트는 압축하중에 대하여 철골에 비해 큰 효율을 가지고 있어 압축재로서 높은 경제성을 가지고 있으며, 철골에 비하여 큰 부피의 부재로 사용되므로 강성이 크게된다. 그리고 고강도일수록 탄성계수가 증가하며, 내화성능이 우수하여 별도의 내화재료를 필요로 하지 않는다. 거주성능에 대해서도 철골조 건물에 비하여 밀도가 50% 이상 크게 되므로 건물의 주기가 길어지고, 바람 등으로 인한 진동에 대한 민감도가 낮아진다. 또한 진동에 대한 감쇠(damping)효과가 좋은 장점이 있다.

철골은 휨 및 전단력에 대한 저항성이 우수하며 경량이다. 시공속도면에서는 조립작업의 단순성으로 인하여 공기가 짧으며, 콘크리트에 비하여 단명을 효율적으로 이용할 수 있다. 그리고 높은 탄성계수로 인한 장스팬 구조가 가능하다.

이상과 같이 콘크리트와 철골은 각각의 독특한 특징으로 인하여 이들 재료를 효율적으로 혼용할 때 각각의 장점을 최대한 이용할 수 있는 구조시스템이 RCS 시스템이다.

2.2 RCS 시스템의 개요 및 시공방법

철근콘크리트 기둥과 철골 보로 이루어진 RCS 시스템은 미국과 일본 등지에서 최근 많은 연구가 이루어지고 있으며, 국내에서도 이 분야에 대한 관심이 증대되고 있다. 본 연구에서는 구조물의 안전성, 기능성 및 경제성을 보다 합리적으로 확보하기 위하여 지압보강에 대한 접합부 상세를 개발하였다. 이는 국내에서 RCS 시스템이 적용될 경우 초고층구조물과 중층 정도의 장스팬 구조물에 효율적으로 적용될 수 있다. 그리고 일본의 시스템과는 다른 점이 일본은 강진지역을 대상으로 개발된 복합구조 시스템이기 때문에 보-기둥 접합부 부분이 필요 이상으로 과대 설계되

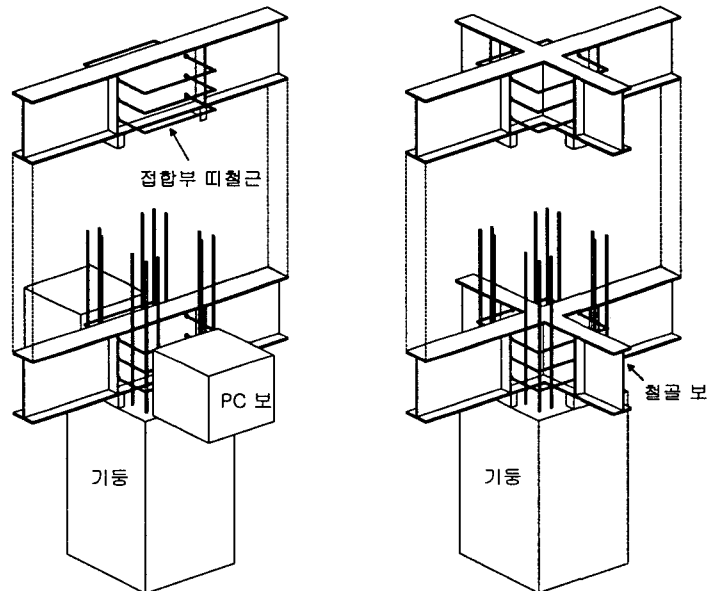


그림 1 RCS 시스템의 시공방법

어 경제성이 낮은 구조시스템이 될 수 있으며, 설계 및 시공과정이 복잡하여 품질관리가 불리한 측면이 있다. 이와 같은 이유로 국내에 효과적으로 적용시키기 위하여 시공이 간편하며 구조성능을 성능을 향상시키기 위한 접합부 상세로 U형 지압보강근을 개발하였다.

시공방법은 그림 1에 나타난 바와 같이 먼저 기둥에는 접합부 아래까지 콘크리트를 타설하여 양생시킨 후 1방향 철골 보인 경우는 단변 방향으로 PC보 또는 현장타설 보를 거치시키고 장변방향으로 철골 보를 관통시킨다. 양방향으로 전부 철골 보를 사용할 경우 미리 공장에서 제작된 철골 보 접합부를 철근콘크리트 기둥위에 고정시킨다. 그 후 철골 보를 완성하고 Deck 등을 이용하여 슬래브를 조립하고 콘크리트를 타설한다.

3. RCS 시스템의 고찰

3.1 파괴모드

RCS시스템 접합부의 파괴는 보 파괴, 기둥 파괴, 접합부 파괴 형태와 같이 크게 3가지로 구분할 수 있다. 이러한 파괴 양상은 골조의 내진성능 평가에 중요한 기준이 된다. 높은 지진 하중이 발생하는 지역에서 콘크리트 구조물의 경우 설계기준에서는 기둥이나 접합부 파괴 이전에 보가 항복되도록 설계할 것을 규정하고 있는 반면 철골 구조물의 경우는 이와 달리 보의 항복과 동시에 접합부의 항복을 허용하고 있다. 이것은 강재가 높은 연성도를 갖는 반면 콘크리트는 취성적 경향을 나타내기 때문이다. 합성구조에서는 이러한 두 재료의 특성으로 인한 파괴 형태, 즉 두 부재간의 상호 작용이 일어나는 접합부의 파괴 양상은 더욱 복잡하고 중요하다.

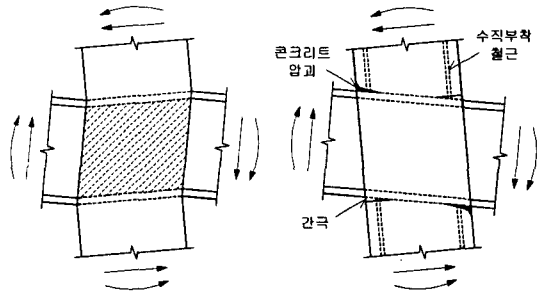


그림 2 접합부 파괴형태

기존 연구에 의하면 보 관통형 콘크리트기둥과 철골보 합성구조 접합부에서 예측되는 파괴형태는 그림 2와 같이 패널 전단파괴(panel shear failure)와 지압파괴(bearing failure)로 인지되며, 이들 파괴 형태 중의 하나가 접합부의 강도를 결정하는 것으로 알려졌다. 패널 전단파괴는 철골 웹패널의 항복과 접합부 콘크리트의 전단 또는 압축파괴에 의해 발생하며, 지압파괴는 철골보가 강체로서 회전함에 따라 철골보 상·하의 콘크리트가 지압 파쇄되며 발생하게 된다.

3.2 저항기구

패널 전단파괴를 발생시키는 힘의 메커니즘은 크게 1) 철골 웹패널 2) 콘크리트 압축 스트럿(concrete compression strut) 3) 콘크리트 압축장(concrete compression field) 등의 저항 요소로 이루어져 있으며, 접합부 전단강도는 이들 3 가지 저항요소의 중첩에 의해서 구할 수 있다. 특히, 철골보 바깥 콘크리트 압축 영역에 대한 전단강도는 일반적으로 콘크리트와 전단 보강근의 상호 작용에 의한 합으로 구할 수 있다. 내부요소와 외부요소가 접합부 강도에 영향을 미치는 콘크리트의 유효폭 결정이 필요하며, 기존 연구에 의하면 유효폭은 접합부 상세에 따라 달라지며 일반적으로 보폭과 기둥 사이에 위치한다.

지압파괴에 대한 저항요소는 1) 철골 플랜지에 의한 지압저항, 2) 횡방향 직교보에 의한 지압저항, 3) 지압보강 상세에 의한 지압저항 등의 3가지 요소로 구분할 수 있다. 보 플랜지의 지압에 대한 저항

력은 내부 콘크리트로 전달된다. 콘크리트에 대한 지압응력은 보 플랜지 윗면에 작용하는 응력블럭으로 나타낼 수 있고 파괴시 접합부 지압보강철물(수직철근 또는 U형 철근)이 항복한다고 가정한다. 따라서 접합부 지압강도는 3가지 저항 요소의 중첩에 의해서 구할 수 있다.

합성골조에서 접합부 상세와 파괴 양상에 따라 미국과 일본에서는 설계 지침이 제시되고 있으며, 미국의 경우 ASCE(Darwin, et. al, 1994) 설계 지침은 합성골조로 구성된 접합부의 모멘트 저항 구조 시스템을 위한 것으로 각각의 구조 재료의 성분에 대한 상호작용, 접합부 강도 및 접합부 상세에 따른 역학적 거동을 설명하고 있다. 이러한 설계 지침은 평면적 내부의 합성골조 보-기둥 접합부에 대한 연구(Sheikh. et. al, 1987 및 Deierlein. et. al, 1988)를 토대로 개발되었다.

3.3 접합부 보강 상세

(1) 지압판(Face Bearing Plate) : 지압판은 콘크리트 기둥 표면 위치에서 철골보 내부에 용접된 판으로 패널 존 내 콘크리트 압축대를 형성해 접합부 강도를 증가시키는 중요한 역할을 한다.

(2) 연장지압판(Extended FBP) : 연장지압판은 지압판 상하에 수평 전단력을 전달시키고자 지압판의 연장으로 보 플랜지에 용접된 판으로 기둥의 주근과 함께 콘크리트 압축대와 압축장을 형성함으로써 접합부 강도를 증가시킨다.

(3) 접합부 띠철근 : 접합부 띠철근은 접합부 내 띠철근과 상하부 띠철근으로 나누어 볼 수 있는데, 접합부 내 띠철근은 콘크리트를 구속함과 동시에 접합부 내측에서 발생한 응력을 외측으로 전달하는 중요한 역할을 한다. 또한 접합부 상하부에 위치한 띠철근은 콘크리트를 구속함으로써 수평전단력과 지압응력에 저항하는 중요한 상세가 된다.

(4) 수직철근(Vertical Joint Reinforcement) : 수직철근은 보 플랜지 상하부에 용접된 이형 강봉 스티드 또는 디비다 철근(Dywidag bar)으로 접합부의 지압강도를 직접적으로 증가시키는 역할을 한다.

(5) U형 철근(U-bar) : 수직철근과 같은 역할을 하며 보다 효과적으로 접합부 보 플랜지 상하에 조립하여 지압강도를 증가시키는 역할을 한다.

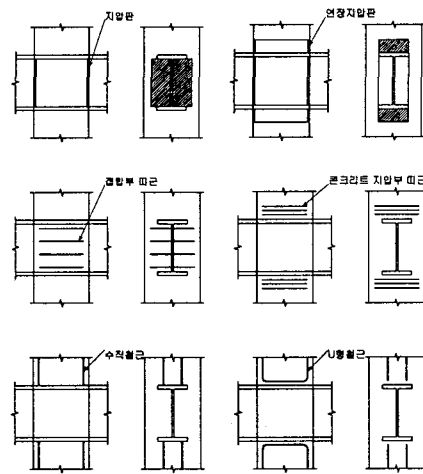


그림 3 접합부 보강 상세

4. 실험

4.1 개요

본 실험에서는 열간압연 철골보를 이용하여 1차로 접합부 상세를 달리하는 십자형 내부접합부 시험체를 제작하였으며, 2차로 내부 접합부 및 외부 접합부 시험체를 제작하였다. 접합부 내 지압판과 연장지압판, 직교보 등의 상세를 가지도록 했으며, 수직철근(VJR)과 U형 철근(U-bar)을 갖도록 하여 지압보강 상세의 효과를 살펴보고자 하였다. 또한 각기 다른 상세에 의한 파괴유형과 거동, 균열양상 등을 살펴보고자 하였다. 시험체의 내력은 ASCE 설계법에 따른 접합부 강도와 비교하였다.

4.2 시험체 변수 및 시험방법

접합부 시험체는 실재 크기와 유사한 3/4 축척으로 표 1과 같이 제작하였다. 재료는 콘크리트 강도 270kgf/cm², 슬럼프 15cm, 골재크기 25mm이며, 철근은 SD40, 강재는 SM490과 SS400을 사용하였다.

본 실험에서 시험체의 치수는 지점간 거리가 2,700mm, 보단부 가력점까지의 거리가 2,250mm이며, 기둥은 하중 재하시 기둥에 작용되는 모멘트와 전단력에 충분히 저항할 수 있도록 설계하였고, 주근은 12-D35를 사용하였다. 또한 각각의 지압과괴 양상을 고려하여 12mm 두께의 지압판과 연장지압판을 부착하였고, 콘크리트 내 지압보강 효과를 높일 수 있도록 D22철근을 디비닥(Dywidag)공법과 U자형으로 제작 배근하였다.

표 1 시험체 명 및 변수

	시험체명	형태	FBP	EFBP	직교보	VJR	U-bar	가력방식	비고
1차	F-EF-S	내부형	○	○	○			Cyclic Load	
	F-EF-V	내부형	○	○		4-D22		Cyclic Load	
	F-EF-VS	내부형	○	○	○	4-D22		Cyclic Load	
	F-EF-2US	내부형	○	○	○		2-D22	Cyclic Load	
	F-EF-4US	내부형	○	○	○		4-D22	Cyclic Load	
	F-EF-2US FDH	내부형	○	○	○		2-D22	Cyclic Load	띠철근 없음
2차	CX4US70-C	내부형	○	○	○		4-D22	Cyclic Load	
	CX4US70-G	내부형	○	○	○		4-D22	Static Load	
	CX4US150-C	내부형	○	○	○		4-D22	Cyclic Load	
	TN-C	외부형	○		○			Cyclic Load	
	TN2U-C	외부형	○		○		2-D22	Cyclic Load	
	TX-C	외부형	○	○	○			Cyclic Load	
	TX-G	외부형	○	○	○			Static Load	

접합부의 성능평가를 위한 하중재하는 가변적 반복재하 방법과 규칙적 반복재하 방법이 있으나, 가변적 반복재하를 결정하기 위한 분명한 기준이 아직 없으므로 그림 4와 같이 실험의 단순성과 분석의 편리함과 같은 장점 때문에 규칙적 반복재하 방법을 사용하였다. 하중재하의 단계별 증가량은 항복변위를 기준으로한 변위 연성계수($n = \delta/\delta_y$)에 의해서 조절되었으며, 반복 재하의 수를 조절하기 위한 결정 기준은 일정한 변위 연성계수를 가지고 반복 하중을 가력시 같은 변위 연성 계수에서 부재가 초기 하중 저항능력보다 떨어져 실질적인 강도 감소를 나타낼 때까지를 같은 변위 연성계수로 가력하였다.

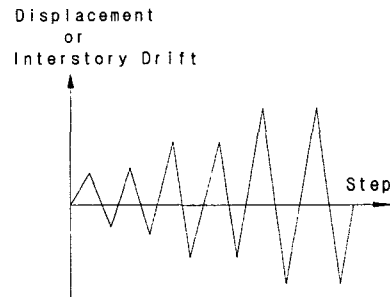


그림 4 하중재하방법

4.3 실험 결과

철근콘크리트 기둥과 철골보 접합부의 실험결과는 표 2와 같다. 상대적으로 VJR에 비해 U형 지압보강근의 지압강도 증대 효과가 기대 이상이었으며, 특히 외부형 접합부 시험체인 TN2U-C의 경우 그 효과가 매우 큰 것을 알 수 있다. 또한 직교보 역시 지압강도에 적지 않은 영향을 주고 있음을 알 수 있다.

표 2 예상강도 및 실험결과

시험체명	접합부 예상강도(ASCE,tonf)		접합부 최대강도	파괴양상	예상강도에 대한 비	비고
	지압강도	전단강도				
F-EF-S	27.17	39.58	29.23	지압파괴	1.08	
F-EF-V	33.81	39.58	29.15	지압파괴	0.86	직교보없음
F-EF-VS	33.81	39.58	31.36	지압파괴	0.93	
F-EF-2US	30.49	39.58	35.25	지압파괴	1.16	
F-EF-4US	33.81	39.58	35.10	지압파괴	1.04	
F-EF-2US F	30.49	27.55	28.03	패널전단	1.02	머근없음
CX4US70-C	33.81	38.56	35.06	지압파괴	1.04	
CX4US70-G	69.22	-	46.56	보휜파괴	1.34	단조가력
CX4US150-C	33.81	33.78	37.27	지압파괴	1.10	
TN-C	28.44	52.45	42.78	지압파괴	1.50	
TN2U-C	34.50	52.45	54.88	지압파괴	1.59	
TX-C	49.60	79.17	48.37	지압파괴	0.98	
TX-G	49.60	79.17	45.57	지압파괴	0.92	단조가력

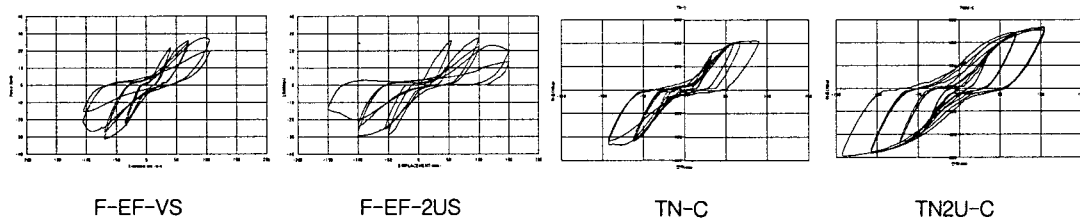


그림 5 각 시험체별 항중-변위 곡선

5. 결과 분석

5.1 균열양상

RCS 합성골조의 균열 양상은 크게 파괴양상에 따라 패널존 내 전단파괴로 발생하는 사인장 균열과 보 플랜지 상하부에 발생하는 지압균열로 나누어 살펴볼 수 있다. 실험결과 시험체가 최대강도에 도달하기까지 두 가지 균열양상이 모두 관찰되었으며, 이후 강도 저하와 함께 파괴모드에 따라 지배적인 균열이 결정되는 양상을 보였다. 대표적인 균열양상과 시험체 사진은 그림 6과 같다.

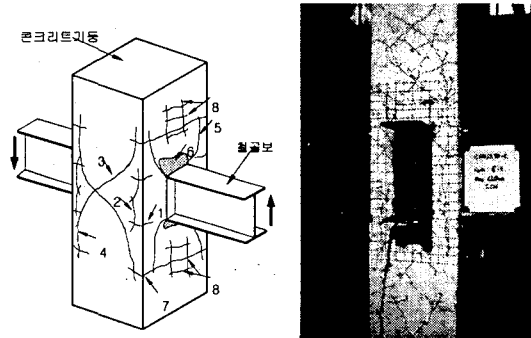


그림 6 시험체 균열양상

5.2 지압보강근의 내력 평가

수직부착철근(VJR)은 접합부 지압강도 보강상세로서 약 10% 정도의 강도 증가 효과가 있음을 실험 결과로부터 알 수 있다. 하지만 시공이 어렵고 F-EF-V 시험체와 F-EF-VS 시험체에서 보는 바와 같이 다소 기대에 미치지 못하는 결과를 보여주고 있다.

반면 U형 지압보강근(U-bar)의 경우 F-EF-2US 시험체와 TN2U-C 시험체에서 보는 바와 같이 각

각 예상강도 대비 16%와 59%의 지압강도 증대 효과를 보여주었으며, 지압보강근이 없는 시험체와 비교해서 20 - 28%의 강도 증가 효과를 보이고 있어 매우 효과적인 지압보강 상세임을 알 수 있다. 또한 VJR에 비해 시공이 간편한 장점 등을 가지고 있다.

5.3 손상지수

에너지 소산력은 구조물의 변형능력을 예측 비교하기 위한 지수로 그림 7에서 보는 바와 같이 U형 지압보강근(Chair-bar)을 변수로 한 시험체의 에너지 소산능력이 비교적 우수한 것을 알 수 있다.

또한 반복하중을 받는 구조물의 손상정도를 나타내는 손상지수 중 Darwin과 Nmai 등에 의해 연구된 누적 에너지 소산 손상지수와 연성비에 따라 접합부의 변형능력을 평가해 보면, 그림 8과 같이 U형 지압보강근을 가진 시험체가 그렇지 않은 시험체에 비해 약 22% 정도 높은 연성비를 나타내고 있어 U형 지압보강근을 가진 시험체가 지진 등의 수평하중에 대해 그 에너지를 잘 분산시킬 수 있는 접합부 상세임을 알 수 있다.

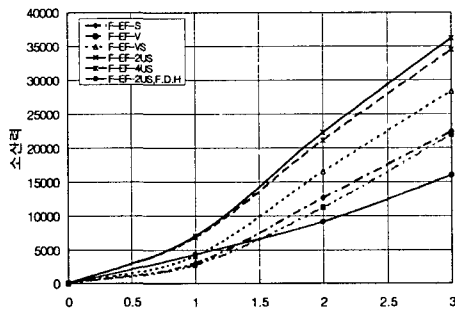


그림 7 에너지 소산력

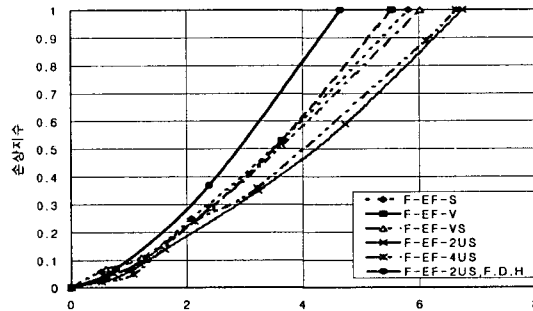


그림 8 연성비에 따른 손상지수

5.4 시공성

합성골조 접합부의 성능은 그 상세에 따른 내력과 변형능력 못지 않게 시공성이 중요한 변수가 된다. 특히 보 관통형 RCS 합성골조의 경우 접합부의 복잡한 상세는 보 플랜지 하단에 콘크리트가 밀실하게 타설되지 못하는 원인이 될 수 있다. 따라서 콘크리트의 시공연도와 골재의 크기는 중요한 변수가 되는데, 본 실험에서는 슬럼프 18cm, 최대골재크기 25mm를 사용하였다. 그러나 기존의 연구에서 13mm 골재와 슬럼프 15 - 20cm를 사용한 것과 비교할 때, 13mm 정도의 작은 골재와 15cm 이상의 슬럼프를 가진 콘크리트를 사용하는 것이 시공성 향상에 유리할 것으로 판단된다.

또한 기둥의 크기와 보 플랜지의 크기가 콘크리트 타설 면적에 영향을 주므로 30% 이상의 공간면적 확보가 필요할 것으로 사료된다. 표 3은 기존 연구와 본 연구간의 시공성을 비교해 본 것이다.

표 3 시공성 비교 (mm, %)

구분	최대 골재 허용치수 규정		골재크기	슬럼프 (cm)	철근량		플랜지 면적	타설시 공간면적
	거푸집간격의 1/5	철근간격의 3/4			주근	띠철근		
Dierelein	30.5	38.1	10	18	3.8	9.8	40.0	46.4
Kanno	27.9	18.8	13	20	4.7	10.6	31.3	53.4
조필규	22.5	15.0	13	10	5.0	11.8	35.7	47.5
본 실험	29.9	27.4	25	15	4.6	8.9	64.2	22.3

6. 결론

RCS 합성골조의 파괴양상은 크게 패널전단파괴와 지압파괴로 나타났으며, 특히 지압파괴에 취약한 특징을 나타내고 있다. 하중 증가에 따른 균열양상은 초기 인장균열에서 점차 사인장 균열과 지압균열로 발전돼 나갔으며, 최대하중 이후 파괴형태에 따라 지배적인 균열이 크게 나타나는 양상을 보였다.

기존의 접합부 상세는 강도와 변형능력 등 접합부 성능을 향상시켜 주며, 대체로 ASCE의 예상강도와 유사하게 나타났다. 특히 지압강도 보강을 위한 상세인 VJR은 10%정도의 강도 증가 효과가 있는 것으로 나타났다. 또한, 본 연구에서 개발한 상세인 U형 지압보강근(U-bar)은 VJR과 동등한 성능을 보이면서 시공성이 우수해 매우 효과적인 지압보강 상세임을 알 수 있다.

이러한 상세와 더불어 보 관통형 RCS 접합부의 성능에 있어 중요한 시공성 확보를 위해선 13mm 골재와 15cm 이상의 슬럼프를 가진 콘크리트를 사용하는 것이 유리할 것으로 판단되며, 콘크리트 타설면적 또한 30%이상이 확보되어야 할 것으로 생각된다. 더불어 ASCE의 내력평가식을 실제 구조물에 적용하는 데에는 다소 제한이 있어 이에 대한 보완이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- 1) 日本建築學會 構造委員會 (1994), “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”, 日本建築學會 混合構造小委員會
- 2) ASCE Structural Division Task Committee on Design Criteria for Composite Structures in Steel and Concrete (ASCE Guidelines) (1993), “Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns,” J. Struc. Engrg., ASCE (to be published)
- 3) 日本建築學會 (1989), 鐵骨鐵筋コンクリート 構造計算規準 同解説
- 4) ACI-ASCE Committee 352 (1985), “Recommendations for Design of Beam Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures”, Report ACI 352R-85.
- 5) Darwin, D. et. al. (1994), “Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Column”, Journal of Struct Div., ASCE, 120(8), pp.2330-2357.
- 6) Kanno, R. (1993), “Strength, Deformation and Seismic Resistance of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns”, Ph.D. thesis, Cornell Univ.
- 7) Deierlein, G.G. (1988), “Design of Moment Connections for Composite Framed Structures”, Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, The Univ. of Texas at Austin.