



철골모멘트 용접접합부의 내진성능에 미치는 합성슬래브의 영향

이철호^{1*} · 정종현² · 김정재³

¹교수, 서울대학교, 건축학과, ²교수, 경남대학교, 건축학부, ³박사과정, 서울대학교, 건축학과

Effects of Composite Floor Slab on Seismic Performance of Welded Steel Moment Connections

Lee, Cheol Ho^{1*}, Jung, Jong Hyun², Kim, Jeong Jae³

¹Professor, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²Professor, School of Architecture, Kyungnam University, Changwon, Gyeongnam, 631-701, Korea

³Graduate student, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

Abstract - Traditionally, domestic steel design and construction practice has provided extra shear studs to moment frame beams even when they are designed as non-composite beams. In the 1994 Northridge earthquake, connection damage initiated from the beam bottom flange side was prevalent. The upward moving of the neutral axis due to the composite action between steel beam and floor deck was speculated to be one of the critical causes. In this study, full-scale seismic testing was conducted to investigate the side effects of the composite action in steel seismic moment frames. The specimen PN700-C, designed following the domestic connection and floor deck details, exhibited significant upward shift of the neutral axis under sagging (or positive) moment, thus producing high strain demand on the bottom flange, and showed a poor seismic performance because of brittle fracture of the beam bottom flange at 3% story drift. The specimen DB700-C, designed by using RBS connection and with the details of minimized floor composite action, exhibited superior seismic performance, without experiencing any fracture or concrete crushing, almost identical to the bare steel counterpart (specimen DB700-NC). The results of this study clearly indicate that the beams and connections in seismic steel moment frames should be constructed to minimize the composite action of a floor deck if possible.

Keywords - Steel moment frames, Connections, Seismic performance, Composite floor slab, Brittle failure

1. 서론

1994년 미국 노스리지 및 1995년 일본 고베 지진 이전에는 “강재에는 탁월한 연성능력이 원천적으로 내재되어 있기 때문에 강재로 이루어진 구조물 역시 자동으로 뛰어난 연성 구조물이 될 것이다”라는 낙관적 통념이 실무자나 연구자들 사이에서 널리 퍼져 있었다. 그러나 구조재료 자체는 연성능

력이 매우 뛰어나다 하더라도, 구조재료에 내재된 연성능력이 잘 발휘되도록 접합상세가 구축되어 있지 않다면 그 구조물은 전체적으로 연성구조물이 될 수 없다는 점을 이 두 지진은 분명히 보여 주었다. 특히 1994년 노스리지 지진 당시의 예기치 못한 취성파괴의 원인으로 다음과 같이 설계, 시공 및 품질관리의 측면, 용접봉 및 모재 등의 재료적인 측면, 보-기둥 모멘트 접합부 특유의 상세에서 기인하는 역학적 측면 등이 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 보고된 바가 있다(Bruneau *et al.*, 1998)^[1].

- (1) 접합부 설계에 고전 휨이론 적용의 부적절성(가령 접합부 부근의 보 웨브는 전단력을 효과적으로 전달하지 못함).
- (2) 비용을 줄이기 위해 모멘트 접합개소를 줄이는 방향으로 설계하여 결과적으로 모멘트골조의 부정정도가

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on May 9, 2014; revised July 22, 2014; approved on July 25, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-878-9061

E-mail. ceholee@snu.ac.kr

감소, 보-기둥 사이즈의 점보화 및 이에 따른 용접량 및 열영향 증대, 결과적으로 기존의 실험적 성능검증 범위를 벗어남.

- (3) 강재의 실제 강도가 공칭강도보다 크게 상회하여 용접부의 언더매칭 가능성이 증대하고 항복비가 높아지게 되어 항복후의 재료적 강도여유가 줄어들음.
- (4) 용접 후에 남겨진 뒷담재, 용접탕 등이 형성하는 노치에 의한 균열 촉진.
- (5) 용접봉의 CVN 인성값이 내진용으로는 너무 낮음.
- (6) 슬래브와의 합성작용에 의한 중립축 위치상승에 따른 하부 플랜지 파단 가능성 증대.
- (7) 스킵(용접접근공) 형상의 부적절.
- (8) 시공 및 검사과정의 부실 등.

1994년 이후 위에 열거된 사항들을 해결하기 위한 다양한 연구가 장기간에 걸쳐서 각국에서 진행된 바가 있다(SAC, 1995)^[2]. 이들 연구결과는 국제적으로 강구조 내진기준을 대폭적으로 개정하는 계기가 되었고, 이 영향이 국내의 건축구조설계기준[KBC 2009(Architectural Institute of Korea, 2009)]^[3]의 강구조 내진기준에도 반영되어 있다.

본 연구의 주 관심사는 국내에서 그 문제점이 잘 인식되지 못하고 있고 현행 내진기준에서도 언급되지 않고 있는 위의 6)번 항목과 관련된 것이다. Fig. 1에서 보듯이 1994년 노스리지 지진 당시의 피해 조사에 의하면 대부분의 취성과괴가

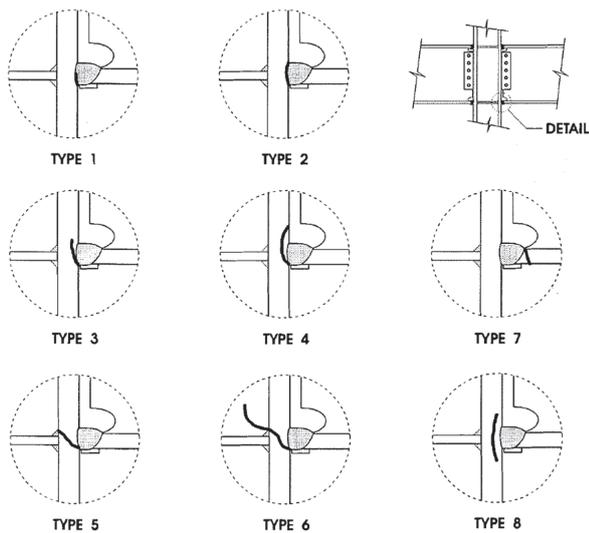


Fig. 1. Brittle failure of bottom flange of welded steel moment frame connections in the Northridge earthquake (Bruneau et. al., 1998)^[1]

보 하부 플랜지에서 발생하였다. 이 원인으로는 i)슬래브와 합성작용에 의한 중립축 상승, ii)상부 플랜지와 하부 플랜지의 현장 용접시공 및 비파괴 검사의 난이도 차이, iii)하부 플랜지 뒷담재가 형성하는 노치효과 등을 들 수 있다. 위 ii)항은 용접시공 및 검사의 품질관리 개선을 통해, iii)항은 뒷담재의 노치효과가 최소화되도록 뒷담재를 제거하고 가우징한 후 보강모살용접을 하는 방안에 의해 해소될 수 있다. 그러나 위의 i)슬래브와 합성작용에 의한 중립축 상승문제는 국가나 지역의 바닥구조 설계 및 시공 관행과 밀접한 관련이 있는 것으로 용접모멘트접합부의 조기 취성파단에 결정적인 요인이 될 수 있는 것이므로 좀 더 신중하고 실증적인 접근법을 필요로 한다. 이 문제는 다음 장에서 논의하고자 한다.

2. 철골모멘트골조와 바닥구조

건축물에서 철골모멘트골조의 대부분은 합성바닥구조를 갖게 된다. 즉 대부분의 경우 데크플레이트를 보 위에 깔고 전단스터드를 보 상부플랜지에 용접한 후 콘크리트를 타설하여 보와 바닥을 일체화시켜서 횡력배분을 위한 바닥 다이아프램을 형성하는 것이 통례이다. 양단힌지 조건의 작은보는 횡력을 지지하지 않고 중력하중만을 지지하는 단순보이므로 완전합성보로 설계하는 것이 경제적이다. 이 경우 전단스터드는 완전합성작용이 확보되도록 합성보 설계기준에 따라 충분히 배치되어야 한다.

문제는 바람이나 지진에 저항하는 모멘트골조에 속하는 보(moment frame beam)의 경우이다. 국내의 경우 순철골보로서 설계하고도 실제 시공시에는 보 상부 플랜지에 전단스터드를 과도하게 배치하는(가령 데크 골당 직경 16~19mm 전단스터드를 2개씩 배치) 오랜 관행이 존재하고 있다. Table 1은 1988년 이후 건축된 철골건물을 대상으로 수행된 조사에서 확인된 전형적인 바닥구조 전단스터드 배치의 일례이다.

이런 관행이 가져오는 구조비용의 증가 외에도 내진능성 측면의 부작용에 주목할 필요가 있다. 즉, 의도하지 않은 바닥구조의 합성작용으로 인해 하부플랜지가 인장을 받을 때(즉 정모멘트를 받을 때) 중립축이 상승하므로 하부플랜지의 변형도증가로 취성파단 가능성이 높아진다는 것이다. 특히 철골보의 춤이 작은 경우는 이 합성효과가 증대하므로 더 치명적일 수 있다. 국내의 경우 모든 철골구조의 모든 접합부

를 모멘트접합부로 설계하는 관행으로 보 춤이 그리 깊지가 않다. 미국의 경우는 바닥 다이아프램 작용에 필요한 최소한의 전단스터드(가령 300mm당 전단스터드 1개)를 배치하되 모멘트골조의 보와 바닥구조의 합성효과가 최소화도록하는 것이 일반적 관행이다.

바닥구조의 합성효과를 반영한 Kim *et al.* (2003)^[4]에 의하면 완전합성보(H-600급보에 200mm당 직경 22mm 전단스터드 2개)로 설계된 경우의 변형능력은 순철골보 접합부에 비해서 약 1/2 정도로서 합성효과에 의해 변형능력이 크게 저하됨을 보고한 바 있다. 즉, 합성작용에 의한 중립축 상승의 여파로 하부 플랜지의 용접접근공 부근에서 조기 취성파괴가 발생한 것으로 보고하였다. 반면에 미국에서 수행된 Jones and Fry(2000)^[5]의 실험에서는 합성보와 순철골보의 하부 플랜지의 변형도의 차이는 미미했는데, 이는 H-900급의 춤이 큰 보를 사용하여 합성도가 작았던 점 그리고 최소한의 전단스터드(305mm당 직경 19mm 전단스터드 1개)만을 배치하여 합성도를 낮추고 접합부에 RBS(Reduced Beam Section, 속칭 독본(dog bone))를 도입한 때문으로 분석되었다.

위 실험결과가 국내 기존 철골모멘트골조 건물의 내진보강이나 현재의 바람직하지 않은 바닥구조 설계 및 시공관행에 대해 시사하는 바는 매우 크다. 이하에서는 바닥의 합성효과가 높은 국내 기존 철골모멘트 접합부와 RBS를 도입한 후 합성효과를 최소화한 상세를 지닌 철골모멘트 접합부의 실험대 실험결과를 소개하고, 국내 철골모멘트골조의 내진보강 및 현행의 잘못된 국내 관행 개선방향에 대한 논의를 전개하고자 한다.

Table 1. A case of structural design sheet showing domestic typical arrangement of shear studs

FL.	NAME	H-SHAPE	STUD BOLTS
8F-7F	SG1, SG2, SG3, SG5, SG6	H-400X200X8X13	2-φ16@200
	SB1, SB3, SB4, SG5A	H-400X200X8X13	2-φ16@200
	SG1A	H-390X300X10X16	2-φ16@200
6F-2F	SG1, SB1	H-400X200X8X13	2-φ16@200
1F	SB1	H-400X200X8X13	2-φ16@200

3. 실험 개요

3.1 실험체 개요

본 연구에서는 Table 2와 같이 총 3개의 실험체를 제작하여 실험하였다. 우선 국내 기존 철골모멘트골조 건물 바닥구조 설계 및 시공관행을 벤치마크하여 합성슬래브를 포함시킨 실험체 PN700-C를 통해서 보-기둥 접합부에서 슬래브와의 합성작용으로 철골보의 중립축 상승과 이로 인한 보 하부 플랜지의 취성파단 발생을 확인하고자 하였다. 다음에는 철골보에 RBS를 도입하고 합성도를 최소화한 실험체인 DB700-C 및 순철골보 실험체인 DB700-NC의 내진성능 비교평가를 통해 합성슬래브의 영향을 최소화하는 상세를 확인하고자 하였다. 실험체 이름에서 PN은 기존 설계 및 시공관행에 따른 보-기둥 접합상세(Pre-Northridge상세와 흡사), DB는 철골보에 RBS를 도입한 것을 의미한다. 그리고 NC(non-composite)는 순철골보 실험체로서 바닥 슬래브와의 합성작용이 발생하지 않음을 의미하고 C(composite)는 바닥 슬래브와의 합성작용이 발생하는 것을 의미한다.

모든 실험체의 보 및 기둥 사이즈는 동일하다. 따라서 접합상세 등의 차이에 따른 내진성능의 공정한 비교가 가능하다. 특히 기존의 설계 및 시공 관행에 따른 건축물에 대한 문제점 제기과 보강 방안 연구의 일환으로 기존의 건축물에서 쓰이는 바와 같이 보는 SS400의 H-700x300x13x24, 기둥은 SM490의 H-428x407x20x35를 사용하였다. 이들 형강의 플랜지와 웨브는 강구조내진기준의 내진컴팩트 조건을 만족하였다. 실험체 모두 강기둥-약보 조건을 만족하였고, 패널존 보강판을 사용하여 강한 패널존으로 설계하였다. 결과적으로 내진성능실험에서의 비탄성 소성변형은 모두 보에서 발생하였다.

Table 2. Test matrix

Specimens	beam-column connection	composite action
PN700-C	Pre-Northridge flange welding/web bolting backup bar remained	composite with slab (23%)
DB700-NC	RBS flange/ web welding minimized notch	steel beam
DB700-C	RBS flange/ web welding minimized notch	composite with slab (10%) 25mm gap b/w slab and column

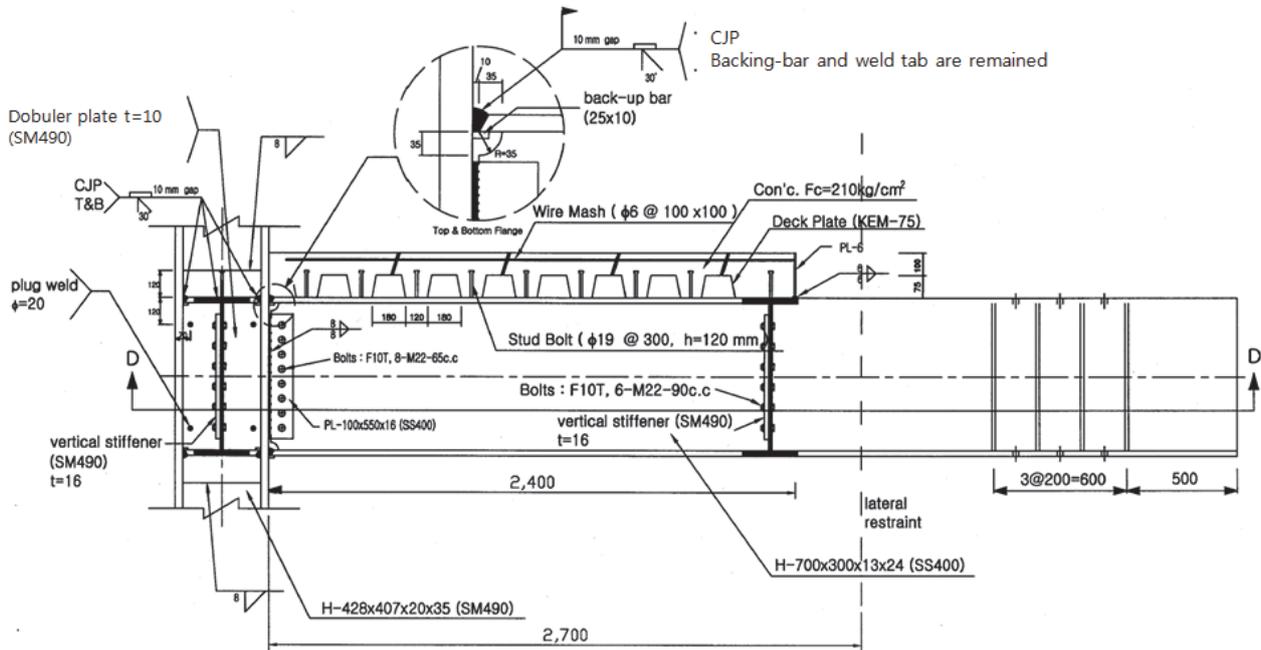


Fig. 2. Section view of specimen PN700-C

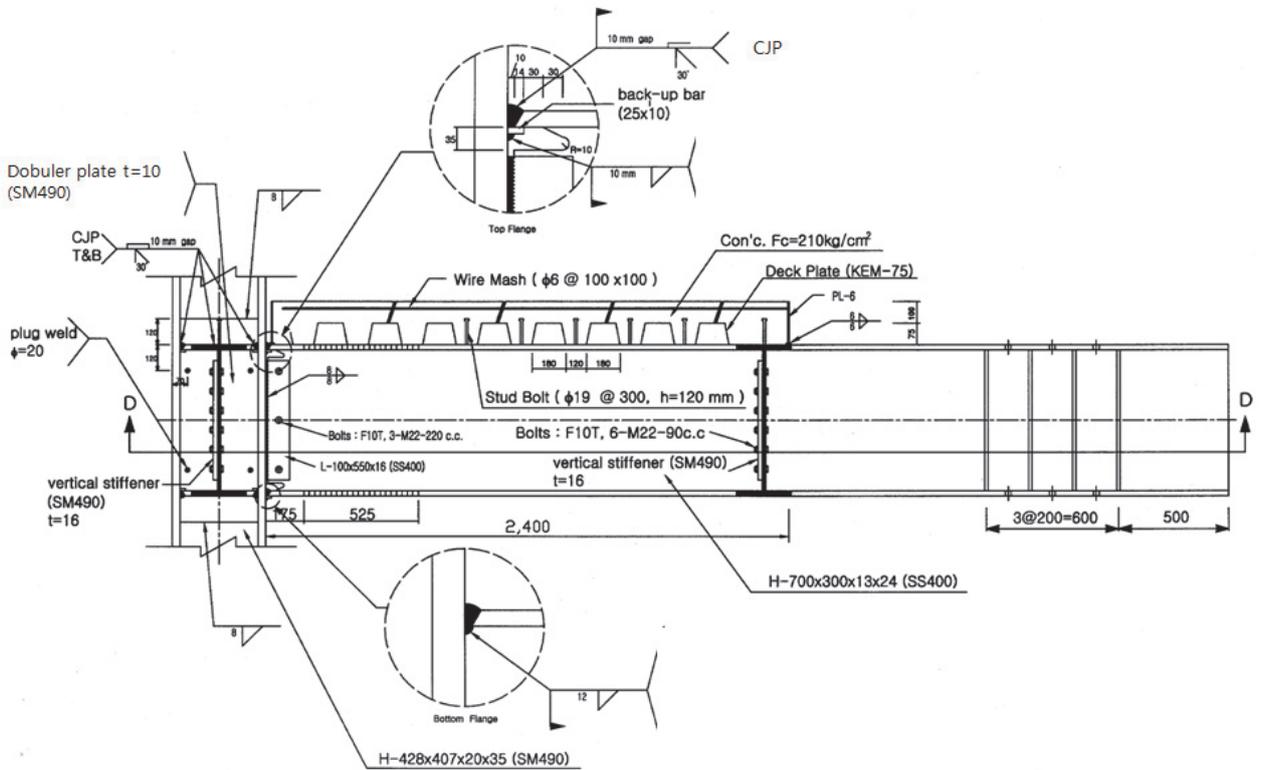


Fig. 3. Section view of specimen DB700-C

모든 실험체의 보-기둥 용접부는 임계용접부이므로 강구조내진기준에 따라 -30°C 에서 30J 이상의 CVN인성값을 갖는 인장강도 490MPa급 용접재를 사용하였다. 합성슬래브 실험체 PN700-C 및 DB700-C에는 공히 75mm 높이 골데크플레이트 위에 설계강도 $f_{ck} = 21\text{MPa}$ 콘크리트를 100mm 두께로 타설하였다. PN700-C의 경우 국내 관행과 흡사하게 200mm 간격으로 2열의 전단스터드를 설치하였다. 식 (1) 및 (2)(KBC 2009 0709.3.3.)^[3]에 의해 계산한 PN700-C합성도는 23%이다. 보-기둥 접합부의 접합은 플랜지는 그루브 용접, 웨브는 볼트로서 접합하였다. 보 웨브의 볼트는 F10T-M22볼트 8개 체결하고 전인장조임(fully tension)하였다. 볼트는 또한 뒷댐재를 제거하지 않고 그대로 두어 노치효과를 남겨 두었다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각 PN700-C와 DB700-C의 단면을 나타낸 것이다.

$$\text{합성도} = \frac{n_{stud} Q_n}{V'} \quad (1)$$

$$Q_n = 0.5 A_{sc} \sqrt{F_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (2)$$

여기서, n_{stud} : 전단스터드의 개수

V' : 콘크리트의 압괴와 강재보 단면의 인장항복강도 중 작은 값

Q_n : 전단스터드의 1개의 공칭강도, N

A_{sc} : 전단스터드의 단면적, mm^2

F_{ck} : 콘크리트의 설계기준 압축강도, MPa

E_c : 콘크리트의 탄성계수, MPa

R_g, R_p : 데크플레이트 골방향과 전단스터드의 형상과 배치 등에 의한 강도저감계수

F_u : 전단스터드의 설계기준 인장강도, MPa

DB700-C 및 DB700-NC의 RBS는 다음과 같이 사이즈를 설계하였다(Fig. 4 참고). RBS의 보 플랜지 절삭폭은 RBS 부분이 변형경화 상태에 도달하였을 때(SS400의 변형경화계수로 1.3 가정) 기둥플랜지 외주면에 유입되는 휨모멘트의 크기가 보의 전단면 항복모멘트를 초과하지 않도록 산정하였다. a 는 보춤의 25%인 175mm, b 는 보춤의 75%인 525mm, c 는 보플랜지의 37%인 55mm이다. RBS부 최소폭 단면의 소성휨모멘트의 크기는 보의 전단면소성모멘트의 71%이다. RBS설계와 관련된 좀 더 상세한 내용은 Lee *et al.*

(2002)^[6]의 선행연구를 참조하기 바란다. 또한 DB700-C 및 DB700-NC 그루브 용접부의 뒷댐재를 제거하고 가우징하고 모살용접으로 보강하여 노치가 최소화되도록 배려하였다.

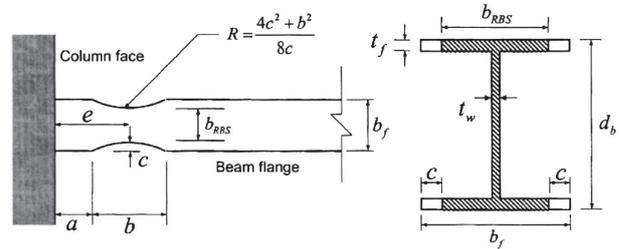
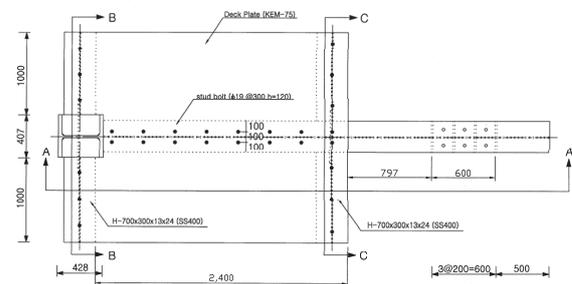
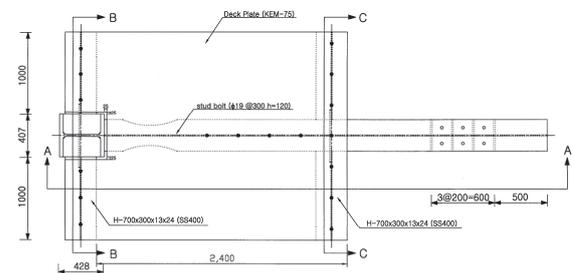


Fig. 4. Geometry of radius-cut RBS



(a) PN700-C



(b) DB700-C

Fig. 5. Arrangement of shear studs



Fig. 6. Top view of DB700-C before placing concrete

바닥슬래브가 포함된 DB700-C의 합성작용이 최소화되도록 Fig. 5(b)와 같이 전단스터드를 1열만 배열하였고, 기둥 외주면에서 RBS 내측 끝까지(강구조 내진기준의 보호영역에 해당) 전단스터드를 배치하지 않았다. 결과적으로 합성도를 10%로 낮출 수 있었다. 또한 기둥 플랜지 전면에 25mm의 틈새(gap)를 두어 전단스터드 슬립에 따른 슬래브와 기둥 플랜지 사이의 지압발생을 최소화하고자 하였다. 이러한 배려를 한 것은, RBS를 도입해도 합성작용을 충분히 감소시키지 않으면 중립축의 상승으로 인해 보 하부 플랜지의 조기 파괴 우려(Tremblay *et al.*, 1997)^[7]가 있기 때문이다. 즉 이 실험체는 합성작용의 최소화를 통해 순철골 실험체인 DB700-NC와 거의 유사한 거동이 얻어지기를 의도한 것이다.

실험에 사용한 강재의 인장시험결과는 Table 3과 같다. 모든 강재에서 항복강도와 인장강도가 기준값을 상회하였고 0.70 정도의 매우 낮은 항복비를 보여주고 있다.

3.2 실험체 셋업, 가력 및 계측 계획

Fig. 7은 실험체 DB700-NC의 셋업을 나타낸 것이다. 다른 실험체도 모두 동일하다. 기둥 단면의 중심에서 보 가력부 중심까지의 거리는 3,800mm이다. 기둥플랜지에서 2,500mm의 위치에 횡지지 가새를 설치하였다. Fig. 8은 이에 맞추어 설치한 실험체 DB700-C의 전경을 나타낸 것이다.

실험은 KBC 2009 철골내진접합부의 성능평가절차를 준수하여 수행하였다. 가력은 보의 끝단 가력부를 상하로 가력하였고, Fig. 9의 내진실험용 표준반복하중에 따라 층간변위비 0.75%까지는 6회, 1%는 4회, 이후부터는 2회 상하로 반복 가력하였다. 실험체에서 1% 층간변위비에 대응되는 보 단부 변위는 38mm이다. 본 연구에서는 실무와는 다르게 보 상부 플랜지에 인장력이, 하부 플랜지에 압축력이 작용하는 휨모멘트를 정모멘트로 한다.

Table 3. Property of material

Specimen		yield stress σ_y (MPa)	tensile stress σ_u (MPa)	yield ratio σ_y/σ_u (%)	Elongation (%)	Material
H-700X30 0X13X24	flange	304	454	66.9	30.6	SS400
	web	363	481	75.6	27.4	SS400
H-428X40 7X20X35	flange	357	524	68.0	28.1	SM490
	web	358	520	68.8	24.1	SM490

실험체에는 접합부의 총회전각 성분을 패널존, 기둥 및 보 성분으로 분리할 수 있도록 변위계를 설치하고, 상하부 플랜지의 변형도, 중립축의 위치를 파악할 수 있도록 스트레인게이지를 설치하였다.

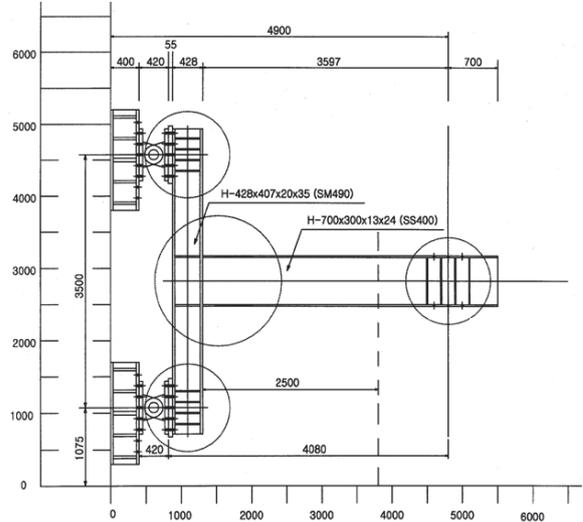


Fig. 7. Typical dimensions test set-up

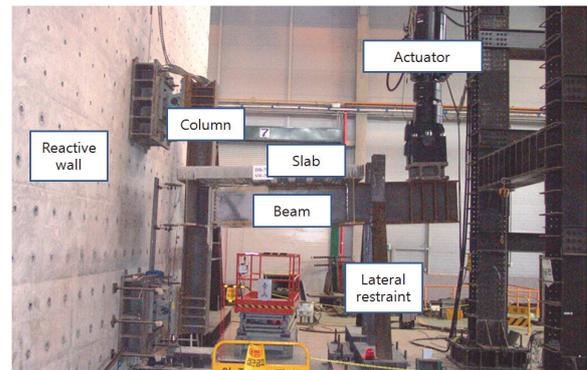


Fig. 8. Overall view of test set-up

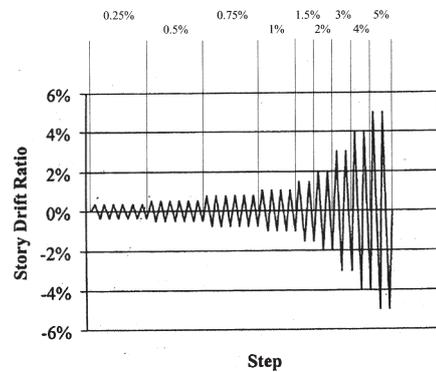


Fig. 9. Loading protocol(KBC 2009)^[3]

4. 실험결과 및 분석

4.1 전체적 거동과 소성회전능력

4.1.1 실험체 PN700-C

실험체 PN700-C는 바닥슬래브와의 합성효과에 의해 보 하부 플랜지의 변형도 증가를 예상한 실험체이며 층간변위비 3%에서 보 상부 플랜지에 압축력이 작용할 때, 즉 철골보와 바닥 슬래브의 합성작용이 일어날 때 보 하부 플랜지에 취성파단이 발생했다. Fig. 10은 용접접근공 근처 보 하부 플랜지에 취성파괴가 발생하면서 보 웨브의 볼트마저 전단파괴된 양상을 보여준다. Fig. 11은 압축측 바닥 슬래브의 지압파괴를 보여준다. 이 지압작용이 합성작용을 일으키는 주요인임을 시사한다. 참고로 이 실험체의 합성도는 23% 선으로 설계되었다. 만일 보축이 작아지거나 전단스터드의 배치가 늘어나서 합성도가 증가한다면 이러한 파단 가능성은 더욱 증가할 것이다.

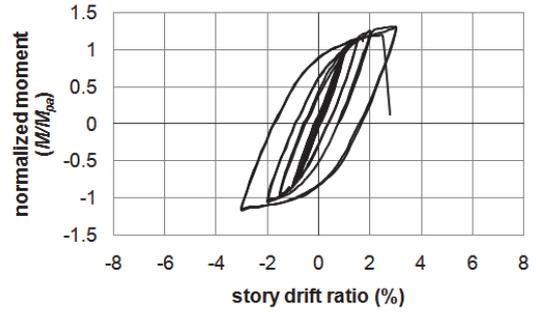
Fig. 12는 실험체 PN700-C의 층간변형능력 및 소성회전능력을 표현한 것이다. 접합부에 작용한 최대 모멘트는 실제 보 소성모멘트의 130%수준까지 증대되었고 소성회전각은 0.018 radian에 불과하다. 바닥 슬래브와의 합성효과에 따



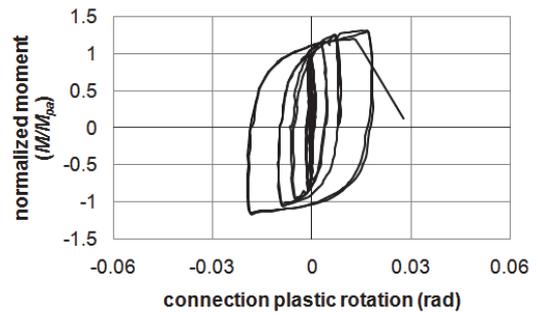
Fig. 10. Beam bottom flange fracture of PN700-C at 3% story drift



Fig. 11. Crushing of concrete slab of PN700-C at 3% story drift



(a)



(b)

Fig. 12. Cyclic story drift and plastic rotation capacity of PN700-C

라 용접 접합부에 가해지는 필요이상의 응력의 증대는 내진 성능의 측면에서 결코 바람직하지가 않다. 강재 자체의 우수한 에너지 소산능력이 활용도 되기 전에 용접부의 조기 취성 파괴가 야기될 수 있기 때문이다. 이 실험체의 보 사이즈는 H-700급으로 국내 설계관행에서는 큰 사이즈에 속한다. 보 사이즈가 작아지면 이러한 부작용은 더욱 심화될 것으로 예상된다.

4.1.2 실험체 DB700-NC

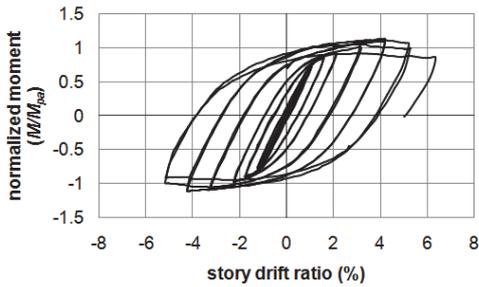
실험체 DB700-NC는 RBS를 도입한 순철골보이다. Fig. 14에서 보듯이 층간변위비가 5% 사이클을 2회 종료할 때까지 거의 강도저하 없이 뛰어난 연성능력을 발휘하였다. 소성회전각은 0.04 radian 이상 발휘되었다. Fig. 13은 층간변위비 6%에서 RBS를 도입한 부분에 생성된 소성흔지를 보여준다. 추가적인 하중지지 능력이 있으나 액츄에이터 스트로크의 한계로 가력을 종료하였다. 용접 접합부에 최대모멘트는 실제(계측강도기준) 보 전단면 소성모멘트의 112% 수준으로 PN700-C 접합부에 비해 20% 정도 낮아 용접부 파단 방지 측면에서 훨씬 유리하다. 이는 물론 RBS부의 “fuse”작용에 기인한 것이다.



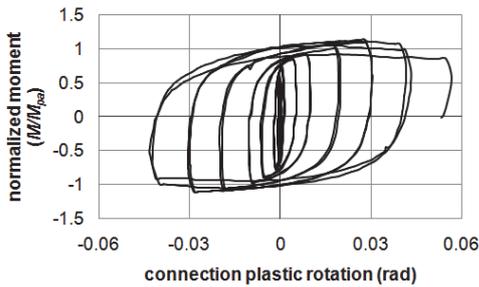
Fig. 13. Plastic hinge of DB700-NC at 6% story drift



Fig. 15. Plastic hinge of DB700-C at 6% story drift



(a)



(b)

Fig. 14. Cyclic story drift and plastic rotation capacity of DB700-NC

4.1.3 실험체 DB700-C

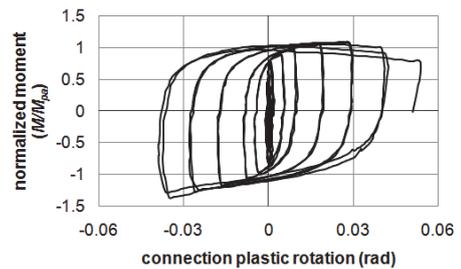
이미 언급한 바와 같이 실험체 DB700-C는 RBS를 도입하고 바닥슬래브를 설치하되 합성작용이 최소화되도록 전단스터드 및 틸새를 도입한 것이다. Fig. 16에 나타난 바와 같이 상부플랜지 압축시에 기둥 플랜지 전면의 25mm 틸새가 닫히지만 실험체 PN700-C에서 발생한 바닥슬래브의 지압파괴가 발생하지 않았다. Fig. 17에서 보듯이 DB700-NC와 흡사하게, 층간변위비가 5% 사이클을 2회 종료할 때까지 거의 강도저하 없이 뛰어난 연성능력을 발휘하였고 소성회전각은 0.04 radian 이상 발휘되었다. Fig. 15는 층간변위비 6%에서 RBS를 도입한 부분에 생성된 소성힌지를 보여준다.



Fig. 16. Opening and closing of gap of DB700-C



(a)



(b)

Fig. 17. Cyclic story drift and plastic rotation capacity of DB700-C

추가적인 하중지지 능력이 있으나 액츄에이터 스트로크의 한계로 가력을 종료하였다. 접합부에 가해진 최대휨모멘트는 실제 보 전단면 소성모멘트의 0.05 radian 사이클에서 최대 136%까지 작용하였으나 파단하지 않았다.

4.2 바닥슬래브 합성효과 분석

4.2.1 PN700-C와 DB700-C의 비교

Fig. 18은 바닥 슬래브가 포함된 2개의 실험체 PN700-C와 DB700-C의 이력거동을 중첩하여 비교한 것이다. PN700-C의 경우 합성작용의 결과로 3% 층간변위 수준에서 이미 접합부에 작용한 최대 모멘트는 실제 보 소성모멘트의 130%수준까지 증대되었고 이를 저항치 못하고 파단되었다. 반면 합성작용의 최소화를 시도한 DB700-C는 합성거

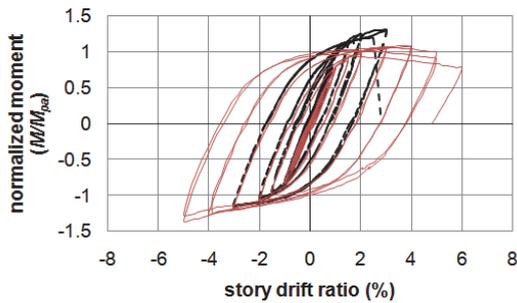
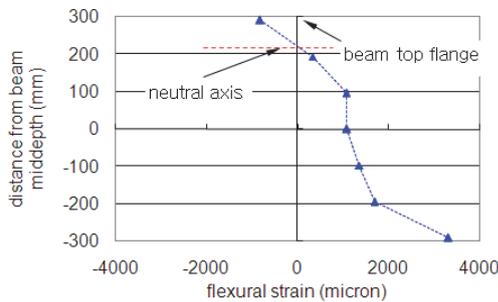
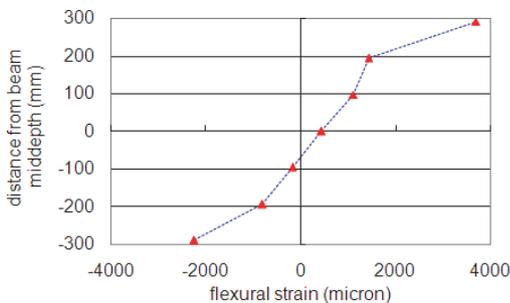


Fig. 18. Comparison of cyclic response of specimens with composite floor slab(..... PN700-C; — DB700-C)



(a) Location of neutral axis under sagging (positive) moment (2% story drift ratio)



(b) Location of neutral axis under hogging (negative) moment (2% story drift ratio)

Fig. 19. Neutral axis location of PN700-C

동이 지연되어 5% 층간변위 수준에 이르러 136% 수준까지 증대된다. 플랜지와 웨브를 전용접하고 노치형성을 최소화한 DB700-C는 이 수준의 모멘트를 취성파단없이 저항할 수 있었다.

Fig. 19는 실험체 PN700-C에서 측정한 보의 휨변형도 프로파일이다. 보의 상부 플랜지에 인장력이 작용하는 경우 Fig. 19(b)와 같이 중립축이 보의 중심의 중앙부 근처에 있지만, 보의 상부 플랜지에 압축력이 작용하는 경우는 Fig. 19(a)와 같이 중립축이 보 상부 플랜지 쪽으로 현격하게 상승하는 것을 볼 수 있다. 이미 언급한 바와 같이 의도하지 않은 합성작용에 의한 중립축의 상승은 보 하부 플랜지의 그루브 용접부의 변형도를 증대시켜 취성파단 가능성을 높이므로 바람직하지 않음이 자명하다.

4.2.2 DB700-C와 DB700-NC의 비교

Fig. 20은 RBS를 도입한 2개의 실험체 DB700-C와 DB700-NC의 이력거동을 중첩하여 비교한 것이다. 두 실험체 모두 RBS를 도입한 효과가 발휘되어 층간변위비 5%까지 취성파단 없이 뛰어난 소성변형능력을 보여주었다. 그리고 합성도 10%의 바닥 슬래브를 설치한 실험체 DB700-C는 의도한대로 순철골보 실험체 DB700-NC와 거의 흡사한 거동을 보여주었다. DB700-C의 경우 합성거동이 지연되어 5% 층간변위 수준의 대변형에 이르러서야(즉 특수모멘트골조에 요구되는 4% 층간변위 능력을 충분히 달성한 후에) 정모멘트 작용시 순철골 실험체보다 20% 큰 모멘트가(136/112=1.21) 용접 접합부에 가해지므로 조기 취성파단의 가능성을 최소화시켜 준다. 본 실험연구의 DB700-C에 사용된 합성작용 최소화를 위한 상세는 RBS접합부의 안정적 내진거동 확보를 위해 참고할 수 있을 것으로 판단된다.

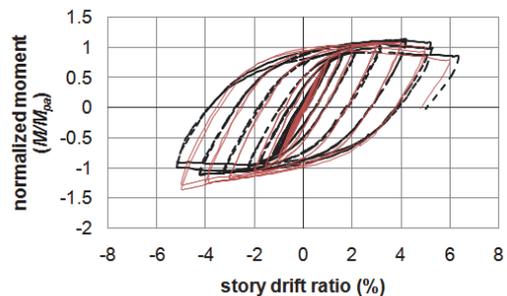


Fig. 20. Comparison of cyclic response of RBS connection specimens (..... DB700-NC; — DB700-C)

5. 내진보강 시사점

KBC 2009에 강구조내진기준이 본격적으로 도입된 이래 기존 구조물의 내진보강이 필요한 경우가 종종 발생하고 있으나 국내의 실정을 반영한 내진보강 지침은 아직 제대로 정립된 것이 없는 실정이다. 내진보강의 정도는 내진보강의 용도, 목적, 비용에 따라 다양한 차원으로 진행될 수 있을 것이다. 앞서 논의한 바와 같이 국내의 경우 콘크리트 슬래브와 철골보 사이에 전단스티드를 필요 이상으로 배치하는 관행에 따라 발생하는 합성효과로 인해 모멘트 접합부 하부플랜지의 취성과 단이 우려되는 상황이다. 다음과 같은 다양한 수준의 내진 보강방안을 생각할 수 있을 것이다.

- (1) 최소 수준의 내진성능 향상 방안으로 용접 접합부에 존재하는 노치효과를 제거하거나 최소화하는 것이다. Fig. 21은 뒷댐재/용접탭이 만든 노치를 제거하고 백가우징한 후 표면을 연마한 사례를 보여준다. 뒷댐재의 제거 및 백가우징이 여의치 않은 경우는 돌출부만 절삭하고 연마한 후 뒷댐재와 기둥플랜지 사이를 보강 모살용접하는 방안도 대안이 될 수 있다. 이런 방식을 통한 노치제거는(특히 하부 플랜지) 균열발생 및 이의 전파 가능성을 줄여주므로 실제적으로 매우 유효한 내진보강 방안이 될 수 있다. 단 보강에 사용되



(a) Notch due to backup bar and weld tab

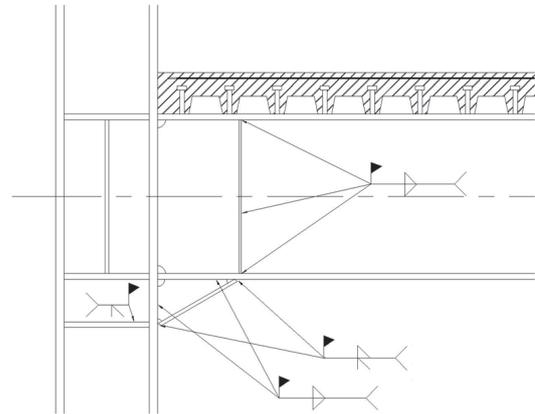


(b) Elimination of notch through flushing and grinding

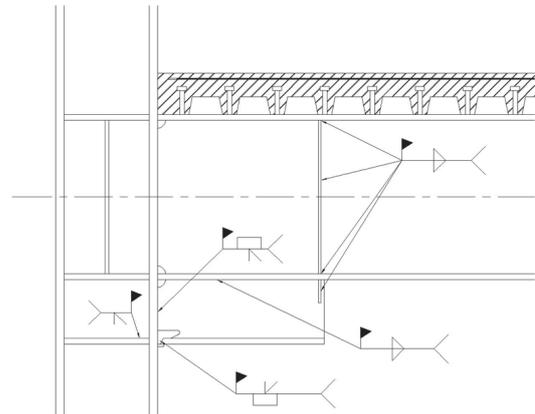
Fig. 21. Notch details and their elimination

는 용접재는 강구조내진기준에 따라 -30°C에서 30J 이상의 CVN인성값을 갖는 용접재를 사용한다.

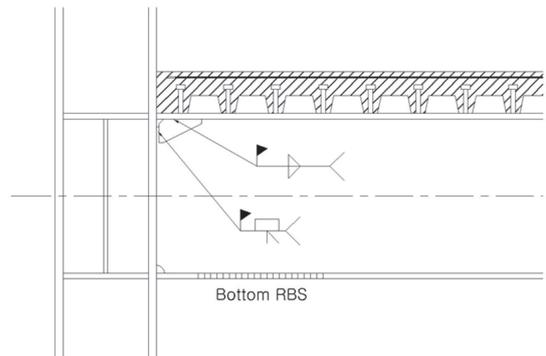
- (2) 기둥플랜지와 바닥슬래브 사이에 약 25mm의 틈새 (gap)를 도입하여 정모멘트 작용시 콘크리트 지압을 억제시켜 중립축의 상승을 최소화한다. 필요시 이 틈새에는 압축성 쿠션재를 삽입할 수도 있다.



(a) Bottom triangular haunch



(b) Bottom straight haunch



(c) Bottom flange RBS and light rib stiffening at top

Fig. 22. Possible retrofit alternatives

3) 접합부 하부 플랜지의 보강 또는 약화

기존 구조물의 경우 상부플랜지는 바닥슬래브의 존재로 인해 접근성이 떨어져 보강/수정이 곤란하다. 특히 의도하지 않은 합성효과로 인한 부작용은 하부플랜지와 관계되므로, i)하부플랜지를 현치(삼각 또는 수평현치)로 보강하거나 ii)하부플랜지만 절취하여(RBS를 도입) 합성작용으로 인해 과도한 인장력이 하부 플랜지에 작용할 때 RBS가 “fuse”역할을 하여 조기에 항복시키는 방안을 생각할 수 있다(Fig. 22 참고). 이러한 보강은 상대적으로 고비용이 소요되므로 특수모멘트 골조 접합부 수준의 내진보강이 요구되는 경우 적절한 방안으로 볼 수 있다.

보 하부에 삼각현치를 도입함으로써 보의 모멘트와 전단력 전달 메커니즘을 개선하여 내진성능 향상효과를 실험적으로 확인한 선례가 있으나(Uang *et al.*, 1998^[8]; Yu *et al.*, 2000^[9]) 아직 국내에서 검증된 사례는 없다. 수평현치는 삼각현치에 비해 보강작업이 용이하고 경제적으로 유리한 측면이 있다. Lee and Uang(2001)^[10]은 수평현치 접합부의 단순화된 응력전달모형을 제시하고 이를 통해 내진설계법을 제시한바 있다. 또한 수평현치 단부의 응력집중을 완화시킬 수 있는 상세도 제안하였다. 그러나 슬래브효과까지 포함된 실험사례는 아직 존재하지 않는다.

약화방안으로 하부 플랜지에 RBS를 도입하는 방법은 가장 경제적인 방법이 될 수 있지만, Uang *et al.*(1998)^[8]의 실험에서는 하부에 RBS만 도입하는 경우 보 상부 플랜지의 취성파괴가 발생하였다. 하부 플랜지 RBS 도입과 함께 기존 접합부의 용접을 제거하고 뒷담재와 용접뿔의 영향이 최소화되도록 재용접을 하는 경우에는 소성회전각이 0.27 radian에 도달하는 등 개선의 효과가 있었다. 보 하부에 RBS를 도입하더라도 추가로 기존 용접부의 노치제거 및 재용접 그리고 리브로서 상부플랜지 하단의 경미한 보강은 필요할 것으로 보인다.

이상에서 논의한 내진보강상세나 내진성능향상 방안은 국내의 상황을 반영하여 검증되어야 함은 물론이다. 필자들은 실무대 실험을 포함하는 관련 후속연구를 준비 중에 있다.

6. 요약 및 결론

철골보와 바닥슬래브의 합성작용이 용접모멘트 접합부의 내진성능에 미치는 영향을 실험적으로 고찰한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지진에 저항하는 모멘트골조에 속하는 보(moment frame beam)를 순철골보로서 설계하고도 실제 시공시에는 보 상부 플랜지에 전단스터드를 필요 이상으로 과도하게 배치하는 국내의 오랜 관행은 하부플랜지의 취성파단 가능성을 증대시켜서 내진성능 확보차원에서 바람직하지 않음을 실험적으로 입증하였다.
- (2) 국내 관행에 따른 접합상세와 합성바닥구조를 갖는 실험체(PN700-C)는 합성도가 23% 정도임에도 불구하고, 상부플랜지 압축응력 작용시에 중립축이 현저히 상승하였고 결국 3% 층간변위에서 콘크리트 압괴를 수반하면서 하부플랜지 취성파단이 발생하였다. 합성작용의 결과로 3% 층간변위 수준에서 접합부에 작용한 최대 모멘트는 실제 보 소성모멘트의 130%수준까지 의도하지 않게 과도하게 증대되었고 용접부는 이를 저항치 못하고 취성적으로 파단하였다.
- (3) 반면 합성작용의 최소화(합성도 10% 수준, 기둥플랜지와 콘크리트 슬래브 사이에 25mm 틈새 도입)를 시도한 DB700-C는 합성거동이 지연되어 5% 층간변위 수준에 이르러서야 접합부 작용모멘트가 실제 보 소성모멘트의 136% 수준에 도달하였다. 플랜지와 웹를 전용접하고 노치형성을 최소화한 DB700-C 용접부는 이 수준의 모멘트를 취성파단 없이 저항할 수 있었다. 결과적으로 DB700-C는 순철골 실험체 DB700-NC와 유사한 이력 거동을 보이면서 어떤 취성파괴도 없이 5% 수준의 뛰어난 층간변형 능력을 발휘하였다.
- (4) 강구조접합부의 내진보강이나 건물신축 모두에 있어 모멘트골조에 속한 철골보는 바닥구조와의 합성작용이 최소화되도록 설계 및 시공되어야 함을 본 연구결과는 시사한다. 외국의 사례와 경험을 참고한다면 내진모멘트 골조 보와 합성바닥의 접합은 300mm 당 직경 16~19mm 전단스터드 1개 정도를 배치하는 것으로 충분할 것으로 판단된다.
- (5) 기존 용접모멘트 접합부의 내진성능 향상방안으로 용접부 부근의 노치 제거, 기존 용접부 보강 또는 재용접, 지압거동 생성 억제를 위한 틈새 도입 그리고 위의 방안과 더불어 좀 더 적극적으로는 하부플랜지를 현치로 보강하거나 하부플랜지에 RBS 도입하는 방안을 논의하였다. 이러한 내진보강상세나 내진성능향상 방안은 국내의 조건과 상황을 반영한 실무대실험을 토대로 검증된 후 적용되어야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Bruneau, M., Uang, C.-M., and Whittaker, A. (1998) *Ductile Design of Steel Structures*, McGraw Hill, USA.
- [2] SAC Joint Venture (1995) *Interim Guidelines: Evaluation, Repair, Modification and Design of Welded Steel Moment Frame Structures (FEMA 267)*, Report No. SAC-95-02, SAC Joint Venture, USA.
- [3] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 (KBC 2009) 및 해설, 기문당.
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code (KBC 2009) and Commentary*, Kimoonang, Korea (in Korean).
- [4] 김영주, 오상훈, 문태섭(2003) 슬래브의 합성작용을 고려한 기존 철골 모멘트접합부의 내진보강. 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제19권, 제9호, pp.3-10.
Kim, Y.-J., Oh, S.-H., and Moon, T.-S. (2003) Seismic Retrofit of Existing Steel Moment Connections Considering Composite Action of Slab, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.19, No.9, pp.3-10 (in Korean).
- [5] Jones, S.L., and Fry, G.T. (2000) Tests of Reduced Beam Section Connections with Composite floor Diaphragms, *Composite and Hybrid Structures: Proceedings of the 6th International Conference on Advances in Steel-Concrete Composite Structures (Volume 2)*, Association for International Cooperation and Research in Steel-Concrete Composite Structures, USA, pp.713-719.
- [6] 이철호, 전상우, 김진호(2002) RBS 철골모멘트접합부의 내진거동평가를 위한 반복재하 실험대(實物大) 실험. 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제4호, pp.557-566.
- Lee, C.H., Jeon, S.W., and Kim, J.H. (2002) Cyclic Seismic Testing of Full-Scale RBS (Reduced Beam Section) Steel Moment Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.1, pp.556-677 (in Korean).
- [7] Tremblay, R., Tchebotarev, N., and Filiatrault, A. (1997) Seismic Performance of RBS Connections for Steel Moment Resisting Frames: Influence of Loading Rate and Floor Slab, *Proceedings of STESSA 1997 (Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas)*, European Convention for Constructional Steelwork, Japan, pp.664-671.
- [8] Uang, C.-M., Bondad, D., and Lee, C.-H. (1998) Cyclic Performance of Haunch Repaired Steel Moment Connections: Experimental Testing and Analytical Modeling, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.20, pp.552-561.
- [9] Yu, Q.-S., Uang, C.-M., and Gross, J. (2000) Seismic Rehabilitation Design of Steel Moment Connection with Welded Haunch, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.126, No.1, pp.69-78.
- [10] Lee, C.-H., and Uang, C.-M. (2001) Analytical Modeling and Seismic Design of Steel Moment Connections with Welded Straight Haunch, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.127, No.9, pp.1028-1035.

요약 : 1994년 미국 노스리지 지진 당시 상당 부분의 피해가 보 하부 플랜지에서 발생하였는데, 이의 원인으로 여러 가지가 거론되었지만 바닥슬래브와 합성작용에 의한 중립축 상승이 주요한 역학적 원인으로 인정되고 있다. 국내의 경우 지진에 저항하는 모멘트골조에 속하는 보(moment frame beam)의 경우에 순철골보로서 설계하고도 실제 시공시에는 보 상부 플랜지에 전단스터드를 필요 이상으로 과도하게 배치하는 오랜 관행이 존재하고 있어 내진성능 확보 차원에서 문제를 유발할 소지가 있다. 본 논문에서는 의도하지 않은 또는 과도한 합성작용이 내진성능에 미치는 부작용을 실험대 실험을 통해 재현하고 이의 개선방향을 모색하고자 하였다. 국내 관행에 따른 접합상세와 합성바닥구조를 갖는 실험체(PN700-C)의 경우, 합성도가 23% 정도임에도 불구하고, 상부플랜지 압축응력에 대해 중립축이 현저히 상승하였고 결국 3% 층간변위에서 콘크리트 압괴를 수반하면서 하부플랜지 취성파단이 발생하였다. 반면 합성바닥이 포함되어 있으나 합성작용이 최소화되도록 설계된 RBS접합부실험체(DB700-C)는 순철골(비합성) RBS접합부실험체(DB700-NC)와 유사한 이력거동을 보이면서 어떤 취성파괴도 없이 5% 수준의 뛰어난 층간변형 능력을 발휘하였다. 본 연구결과는 강구조접합부의 내진보강이나 신축에 있어 모멘트골조에 속한 철골보 및 접합부는 바닥구조와의 합성작용이 최소화되도록 설계 및 시공되어야 함을 시사한다.

핵심용어 : 철골모멘트골조; 접합부; 내진성능; 합성바닥슬래브; 취성파괴