

TSC 합성보와 다양한 기둥 구조시스템을 적용한 합성보 - 기둥 접합부의 내진성능

Seismic Resistance of TSC Composite Beam to Columns Connections

김 성 배 (Sung Bae KIM), (주)센구조연구소 소장, sbkim@senkuzo.com

박 흥 군 (Hong Gun PARK), 서울대학교 건축학과 교수

이 철 호 (Cheol Ho LEE), 서울대학교 건축학과 교수

김 상 섭 (Sang Seup KIM), 한국기술교육대학교 건축공학과 교수

이 창 남 (Chang-Nam LEE), (주)센구조연구소 대표이사

1. 서 론

최근 2~3년 사이 일본과 뉴질랜드, 칠레, 파키스탄, 아이티, 중국 등에서 큰 지진이 잇달아 발생하였다. 지진으로 인한 인명피해와 가옥, 각종 시설물 피해 등은 선진국, 후진국을 가리지 않으며 최근 일본 지진은 그 피해규모를 정확하게 산정할 수도 없는 상황이다.

이렇게 국제적으로 지진피해가 증가할수록 국내 건축구조물에 대한 내진안전성과 지진 피해방지에 대해서도 관심이 고조되고 있는 바, 본 기사에는 합성구조의 내진성능확인하고 함께 TSC 합성보와 각종 기둥 구조시스템을 적용한 연구결과를 중심으로 합성보의 내진성능평가를 정리하였다.

2. 건축구조기준 및 진행과정

TSC 합성보와 이를 이용한 기둥 보 접합부의 성능검증은 건축구조기준 및 해설(KBC 2009)에 기초한다. 개정된 건축구조기준에 의하면 특수모멘트골조와 중간모멘트골조의 접합부는 인증접합부를 사용하거나, 인증접합부와 상이한 경우 실험적 근거에 의한 인증을 요구하고 있다. 그러므로 2% (0.02rad)이상의 층간변위를 구조설계에 적용하기 위해서는 접합부성능인증 시험절차에 의해 얻어진 실험결과를 제시하여 성능을 입증하여야 한다. 성능입증의 근거는 최소 2개의 반복

가력실험을 통해 얻어진 결과로 제시하며, 연구논문 또는 신뢰할 만한 연구보고서의 실험결과를 이용할 수 있다. 이러한 기준에 의거, TSC 합성보를 다양한 구조시스템의 기둥과 조합 적용하기 위해 각 접합부상세에 대한 성능검증을 실시하였다.

TSC 합성보를 이용한 기둥보 접합부 연구는 2004년 한국기술교육대학교 김상섭 교수와 1차 공동연구를 수행하였고, 2009년 11월부터 서울대학교 공학연구소(박흥군 교수, 이철호 교수) 공동으로 진행되었으며, 2010년 중소기업청의 산학연공동기술개발사업의 지원 등을 받았다.

3 철근콘크리트 기둥(철근선조립 기둥)+TSC 합성보

3.1 기둥 형상

철근콘크리트 기둥과 TSC 합성보의 조합은 철근콘크리트 기둥과 철골보를 조합하여 적용한 구조시스템(RCS 구조)이다. RCS(Reinforced Concrete Columns and Steel Beams) 구조는 미국과 일본에서 활발하게 연구가 진행된 것으로 중저층 건축물의 내진성능 확보를 위한 상세로 개발되었으며, 이미 국내에서도 그림 1과 같은 접합부상세가 개발되어 건축물에 적용 중이다.

철근콘크리트 기둥에 철골보를 설치하기 위해서 기둥은 그림 2와 같이 공장제작 후 철골보 브라켓을 설치한 후 현장에서 보

를 이음 하거나, 기둥을 프리캐스트 콘크리트로 제작 후 현장 설치 한다. 그렇지 않은 경우 한 개 층의 기둥을 제작·설치 및 콘크리트 타설 후 보를 관통형으로 설치하는 방법 등이 적용된다. 국내에서 적용된 공법은 주로 세 번째 방법이다.

철골보 설치는 건식공법이긴 하지만 기둥 콘크리트를 슬래브와 함께 타설하지 않으면 공정이 지연될 수 있다. 또한 보 설치 후 슬래브 공사를 시행하는 과정에서 보와 기둥이 시공하중을 지지해야 하는데, 기둥이 양생되기 전에는 보 하부에 별도의 서포트를 설치하여야 한다. 그렇지 않으면 기둥을 선타설 하거나 프리캐스트 콘크리트 기둥을 사용해야 한다. 프리캐스트 콘크리트 기둥은 양중 및 운반이 용이하지 않다.

이에 본 연구에서는 철근콘크리트 기둥이 콘크리트 타설 전에도 시공하중을 분담할 수 있는 방안을 제시한다.

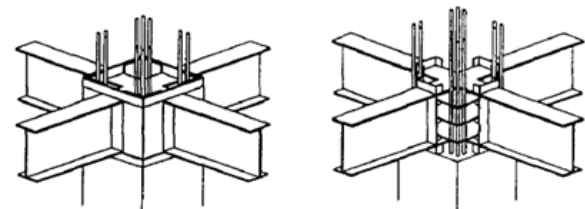
본 방안의 요점은 철근콘크리트 기둥의 주근이 시공하중을 지탱하도록 주근과 띠철근을 공장에서 미리 용접 조립한다는 데 있다. 국내에서는 철근용접이 일반화되지 않았으나 미국용접협회(AWS D 1.4)에는 철근용접에 대한 관리기준이 제시되어 있다. 본 연구에서는 상기 관리기준(탄소당량과 예열온도 관계)에 적합하도록 고강도의 용접용철근을 사용하였으며, 고강도 용접용철근(SD 500W)의 용접부 성능을 그림 3과 같이 사전 검토하였다. 그림 3에서 보면 철근에 용접을 하는 경우 항복강도와 인장강도로 대표되는 강도특성은 큰 영향을 받지 않는다. 반면 연신율은 용접용철근을 사용하지 않으면 관리규격이 미달하는 경우가 발생한다. 그림 4는 철근선조립기둥의 형상과 현장설치 적용 예이다.

3.2 접합부상세 및 실험결과

그림 5는 철근콘크리트 기둥(철근선조립 기둥)과 TSC 보를 조합한 기둥 보 접합부상세이다. 기둥은 800×800(mm)이고, 보는 450×270×6(mm), 550×270×8(mm) 두 종류이다. 기둥 지점 간 높이는 2,500mm이고 보 전체길이는 6,760mm(기둥 포함), 슬래브 폭은 1,690mm의 내부기둥 십자형 실험체이다. 실험은 현대기술연구소에서 수행되었으며, 가력방법은 그림 6과 같다. 철근선조립 기둥(일명 PRC 기둥, Pre-Fabricated Reinforced Concrete Column)과 TSC 보 접합은 보 관통형 타입이며, 관통 보가 브라켓이 되고 브라켓에 TSC 보를 이음하였다. 기둥에 접합되는 보 하부는 대각방향으로 철근을 보강하여 콘크리트 지압파괴를 방지하였다.

그림 7은 보 치수 550mm인 경우의 하중 중간변위각 관계

이고, 그림 8은 동일 실험체의 실험 종료 후 파괴양상이다. 실험결과 철근콘크리트 기둥과 TSC 보를 적용한 기둥 보 접합부는 4%의 층간변위각과 4%의 층간변위각에서 보 소성모멘트의 80% 이상을 확보하였다.



(a) Cover plate 형 (b) 고리후프형

그림 1. RCS 구조 개발 접합부 예

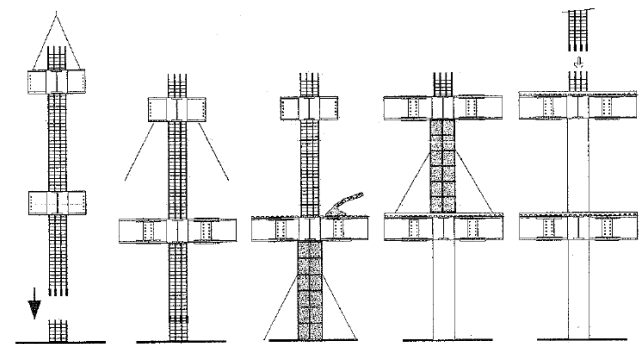


그림 2. 기둥 설치 방법의 예

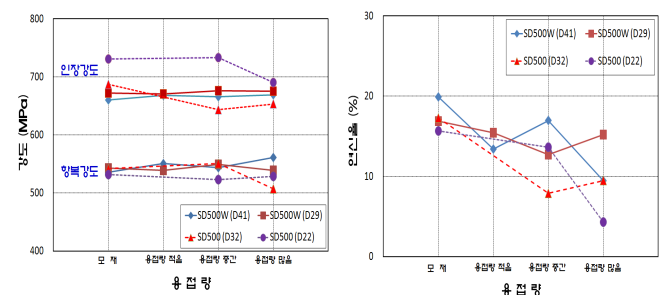


그림 3. 용접량과 강도(좌) 및 연신율(우) 관계

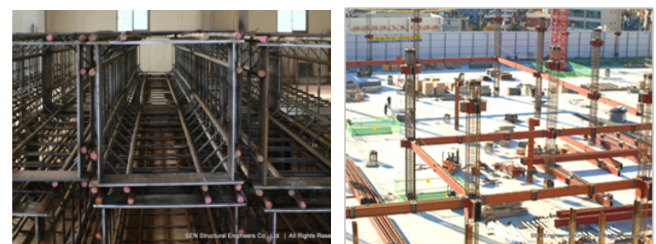


그림 4. 철근선조립 기둥 제작 및 설치전경

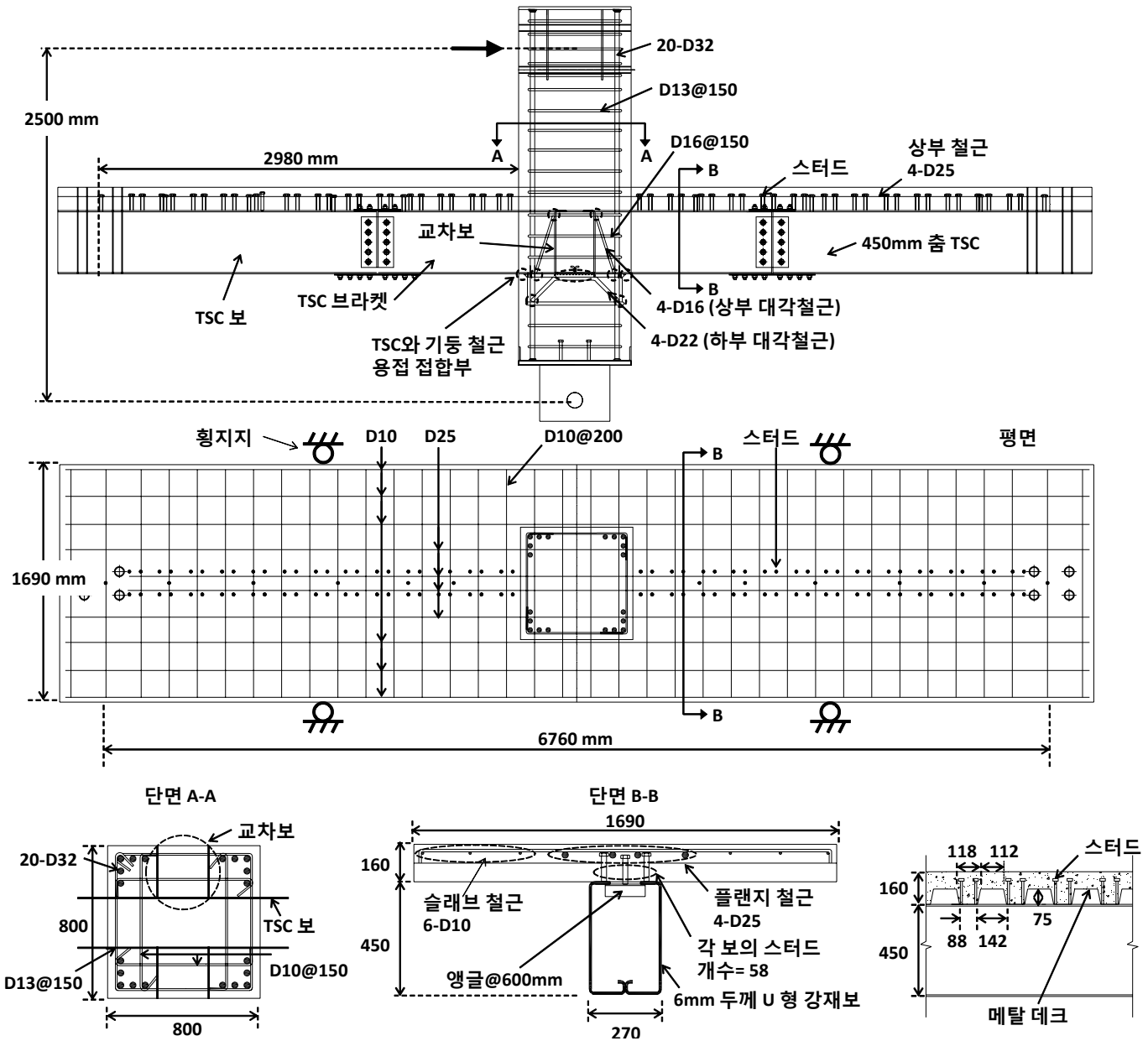


그림 5. 접합부 상세

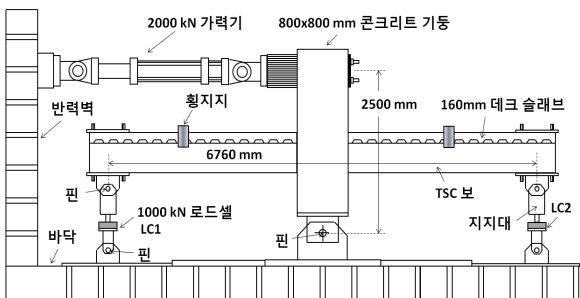


그림 6. 가력방법

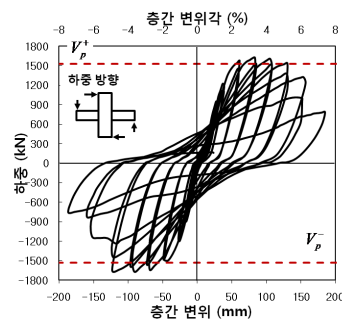


그림 7. 하중 - 층간변위각 관계

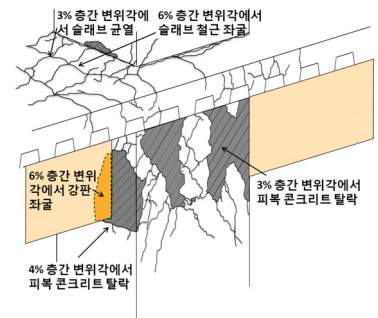


그림 8. 실험종료 후 파괴양상

4. 프리캐스트 콘크리트 기둥(중공 원심성형 기둥) +TSC 합성보

4.1 기둥 형상

철근콘크리트 기둥과 철골 보 접합은 RCS 구조시스템의 일종으로 전 장에서 설명하였다. 동일하게 철근콘크리트 기둥을 프리캐스트로 공장제작하여 여기에 브라켓 타입의 보를 설치 후 현장설치 하는 방법의 또 다른 예를 검토하였다. 프리캐스트 콘크리트 구조는 공장제작에 의한 품질확보와 생산성 증대 등의 장점이 있지만 매우 무겁기 때문에 운반·설치에 어려움이 있다. 이를 해결하기 위한 대안으로 PHC 파일(High Strength Pre-Stressed Concrete Pile) 제작과정을 활용한 원심성형 기둥을 개발하여 적용하였다. PHC 파일은 내부에 강선을 삽입하여 긴장 후 40G 이상의 높은 회전력으로 원심성형하고, 증기양생으로 고강도 콘크리트(80MPa 이상) 구현과 생산 출하 일정이 단축된다. 원심성형 기둥은 PHC 파일과 기본적으로 동일한 공정으로 제조하되 내부에 강선 대신 긴장작업을 생략한 고강도 대구경철근을 적용하여 큰 압축력과 휨모멘트에 저항하도록 하였다. 그림 9는 원심성형 기둥의 생산과정이다.

원심성형 기둥에 철골 보를 접합하기 위해서는 기둥 외부에 철골 보 설치를 위한 밴드플레이트 부착이 필수적이다. 이를 위해 밴드플레이트와 콘크리트의 부착강도 확인 및 부착력 증대방안에 대해 검토하였다. 그림 10은 밴드플레이트와 PHC 기둥의 부착강도실험을 위한 실험체 형상과 실험결과이다. PHC 파일 자체를 기둥으로 활용하기 위해 검토한 결과 PHC 파일에 부착한 밴드플레이트와 콘크리트의 부착강도는 밴드플레이트 두께에 따라 증가하였으며, 내부에 철근으로 전단기를 삽입하는 경우 부착강도는 허용부착응력에 비해 평균 약 10배 증대되었다. 그러므로 밴드플레이트 두께를 일정한 수준으로 확보한다면 보에 작용하는 전단력은 밴드플레이트의 부착강도로 충분히 저항하는 것으로 확인되었다.

4.2 접합부상세 및 실험결과

원심성형 콘크리트 기둥(일명 CRC 기둥, Centrifugal Reinforcement Concrete Column)과 TSC 보 접합부를 반영한 기둥 보 접합부실험을 수행하였다. 기둥 보 접합부상세는 그림 12와 같으며, 가력방법은 그림 6과 동일하다. 본 실험의 경우 기둥 직경은 800mm이고 기둥에 배근된 철근은 20-D32을 사용하였다. 기둥 보 접합부는 기둥 외부에 설치된 강관을

12mm이고, 외다이아프램은 6mm의 강판을 적용하였으며, 상부철근 연속을 위해 내부에 12mm의 강관을 추가하였다. 또한 당해실험의 경우 고강도 콘크리트 구현이 어려우므로 원형기둥 내부에도 콘크리트를 타설하였으며, 이러한 접합상세 적용은 특수모멘트골조의 보 기둥접합부 모멘트비를 반영하였기 때문이다.

실험결과는 그림 13과 같고, 그림 14는 접합부의 파괴양상이다. 실험결과 원심성형 기둥과 TSC 보 접합부는 4% 이상의 층간변위각을 확보하는 것으로 확인되었으며, 원심성형 기둥 외부에 설치된 강관과 외다이아프램 강관 등의 상호작용에 의해 보에 발생하는 모멘트를 충분히 전달하는 것으로 평가되었다.



(a) 철근망 제작



(b) 콘크리트 투입



(c) 원심성형



(d) 증기양생

그림 9. 원심성형 기둥 제작과정

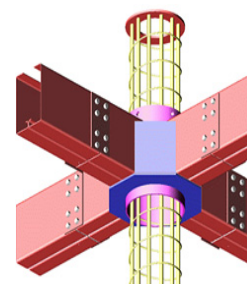
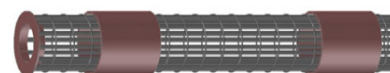


그림 10. 원심성형 기둥과 접합부 예

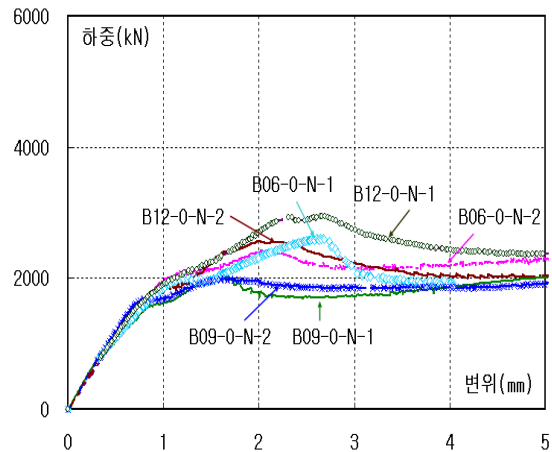
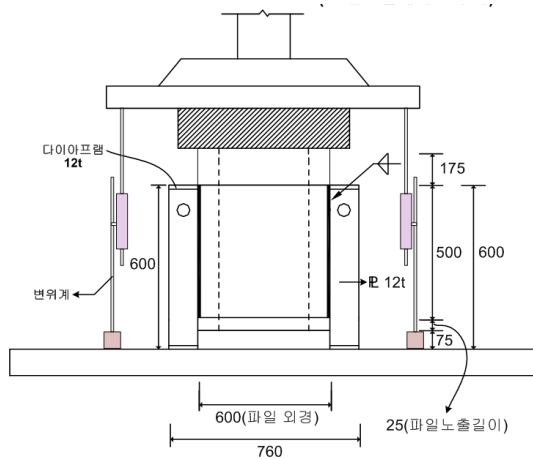


그림 11. 실험체 형상 및 실험결과(밴드플레이트 두께와 최대하중)

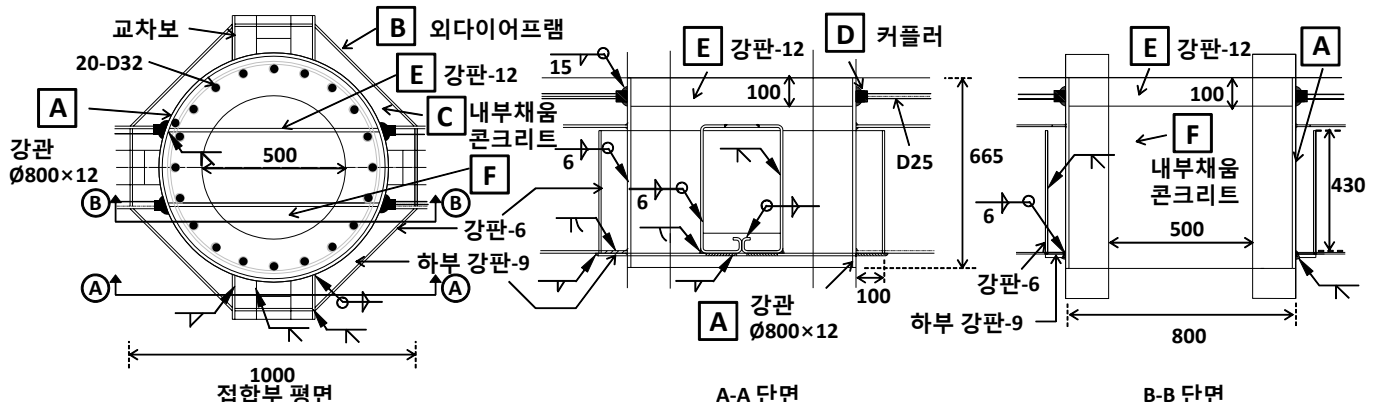


그림 12. 기둥 보 접합부 상세

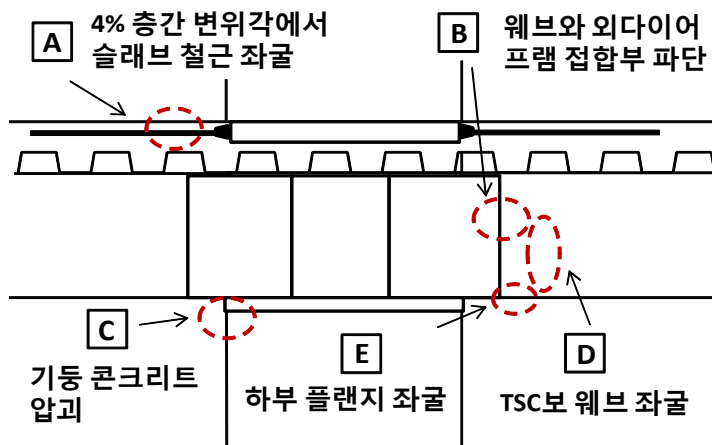
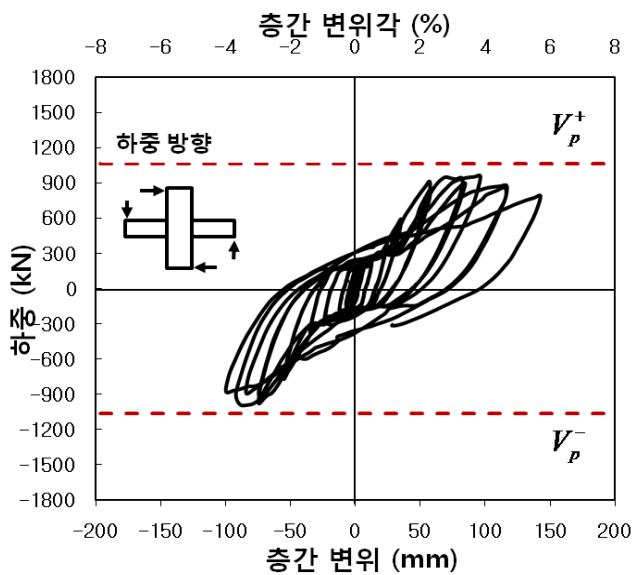


그림 13. 실험 결과 및 실험체 파괴 양상

5. 철골 기둥 + TSC 합성보

5.1 T자형 접합부실험

철골 기둥과 TSC 합성보의 내진성능 평가를 위해 기둥 보 접합부 실험을 수행하였다. 철근콘크리트 기둥을 이용한 RCS 구조시스템과 달리 철골 기둥과 TSC 보 접합부는 기둥-보 용접접합부의 용접상세에 크게 영향을 받는다. 그러므로 내부기둥을 형상화한 십자형 기둥 보 접합부 실험체를 제작하기 전에 용접접합부 상세의 영향을 평가하기 위해 별도의 T자형 접합부를 제작하여 먼저 용접부 성능평가를 하였다.

실험체는 그림 14와 같이 짧은 기둥에 보와 슬래브가 일체로 이루어진 형상이다. 기둥은 강성이 충분히 크도록 H-428×407×20×35로 제작하여 바닥슬래브에 고정하였으며, 보는 450×270×6(mm), 슬래브는 1,500×150(mm, 폭×두께)이다. 접합부상세는 그림 14에서 S1, S2, S3로 명기된 'A, B'와 'F, G'와 같이 TSC 보 상부와 하부에 보강판을 설치하였다. 각 상세는 보강판의 폭과 길이, 두께 등에 차이가 있다. 또한 S3실험체는 기둥면에서 200mm 떨어진 위치에 스티로폼을 삽입하여 접합부를 의도적으로 약화시키는 방안도 검토하였고, S2 실험체는 폭이 늘어난 보강판으로 보강하고 부분합성 상세를 적용하였다.

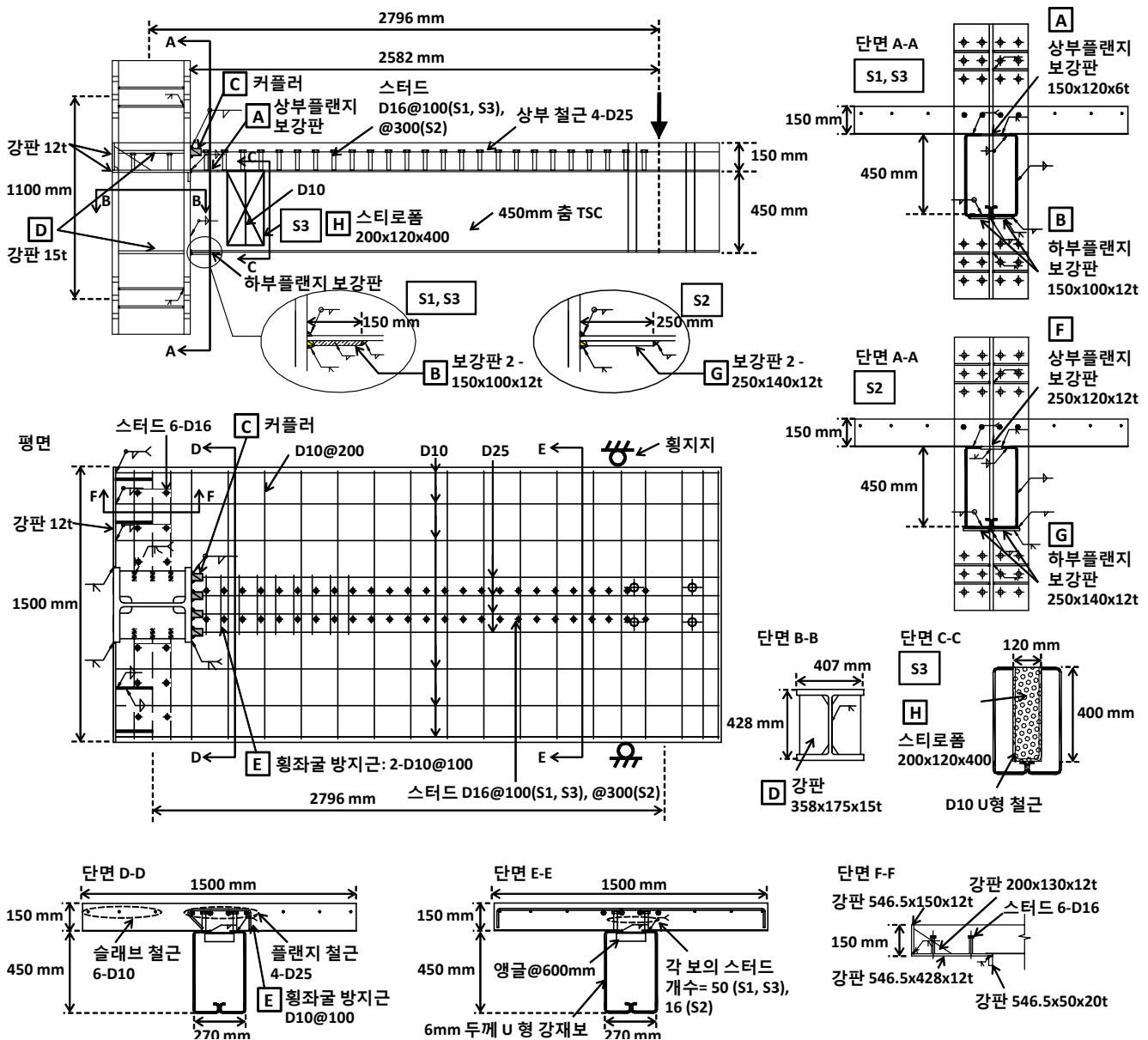


그림 14. 실험체 상세

그림 15는 가력방법 및 S1실험체의 모멘트 회전각 곡선이 다. 실험결과 모든 실험체는 강기동-약보, 강한 패널존 개념으로 설계되어 기동과 패널존은 탄성상태로 거동하였다. 보에서 소성힌지가 발생하였고, S1과 S3 실험체는 회전각 4% 이상의 변형능력을 나타내었다. 또한 세 가지 상세 중 실험체 S1의 상세가 가장 단순하면서도 우수한 변형능력을 발휘할 수 있음을 확인하였으며, 이 상세를 적용하는 경우 H형강 기동과 TSC 보 접합부의 내진성능은 KBC 2009 및 AISC 341의 요구조건을 만족하여 특수모멘트골조로서 사용될 수 있다고 판단된다.

5.2 십자형 접합부실험

5.1 절의 T자형 접합부 실험결과를 기초로 십자형 접합부 실험체를 제작하여 철골기동과 TSC 보 접합부의 성능을 검토하였다. 실험체 형상 및 접합부 상세는 그림 16과 같다. 실험

체의 접합부상세는 T자형 실험결과로부터 가장 성능이 우수한 것으로 확인된 접합부상세를 적용하였다. 실험체는 2개를 제작하였으며, TSC 보는 450×270×6(mm, 실험체 A), 550×270×8 (mm, 실험체 B) 두 종류이고, H형강 기동은 H-428×417×20×35, H-458×418×30×50 이며, 슬래브는 7,360×1,690×165(mm, 길이×폭×두께) 등이다. 가력방법 및 형상과 A실험체의 층간변위각 모멘트 곡선은 그림 17과 같다.

실험결과 실험체 A의 최대 층간변위각은 6%이며, 실험체 B의 경우 6.8%로 특수모멘트 골조에서 요구되는 4%이상의 층간변위각을 만족하였다. 또한 TSC 보와 같이 폐쇄형 단면을 갖는 경우 개방형단면의 H형강에 비해 충분한 횡강성을 지니므로 횡비틀림좌굴에 의한 내력저하가 발생하지 않는다는 것도 확인되었다. 또한 5장에서 서술한 철골기동과 TSC 보 접합부의 내진성능평가 결과를 기초로 미국 강구조학회(AISC)에 TSC 보 내진접합부 성능인증을 추진중이다.

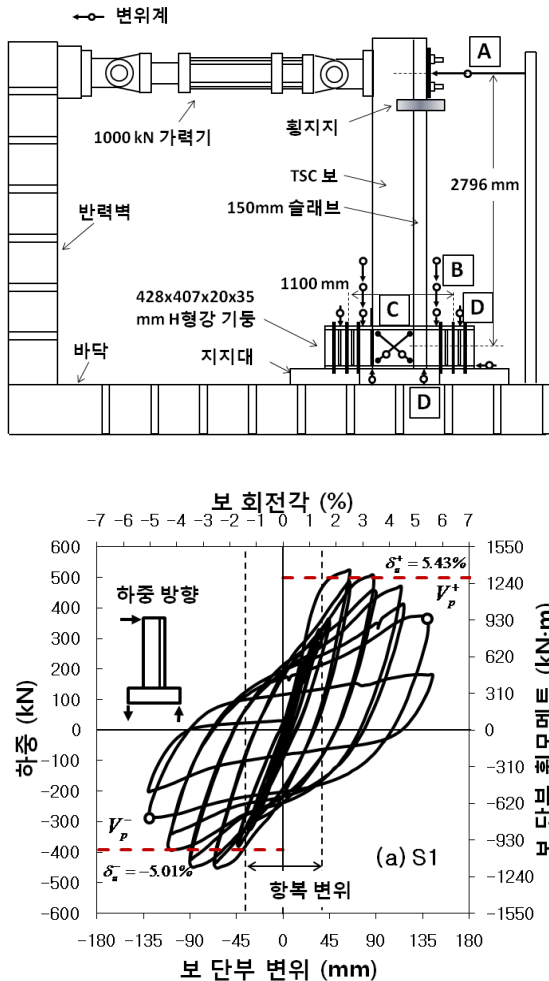


그림 15. 가력 방법 및 실험결과

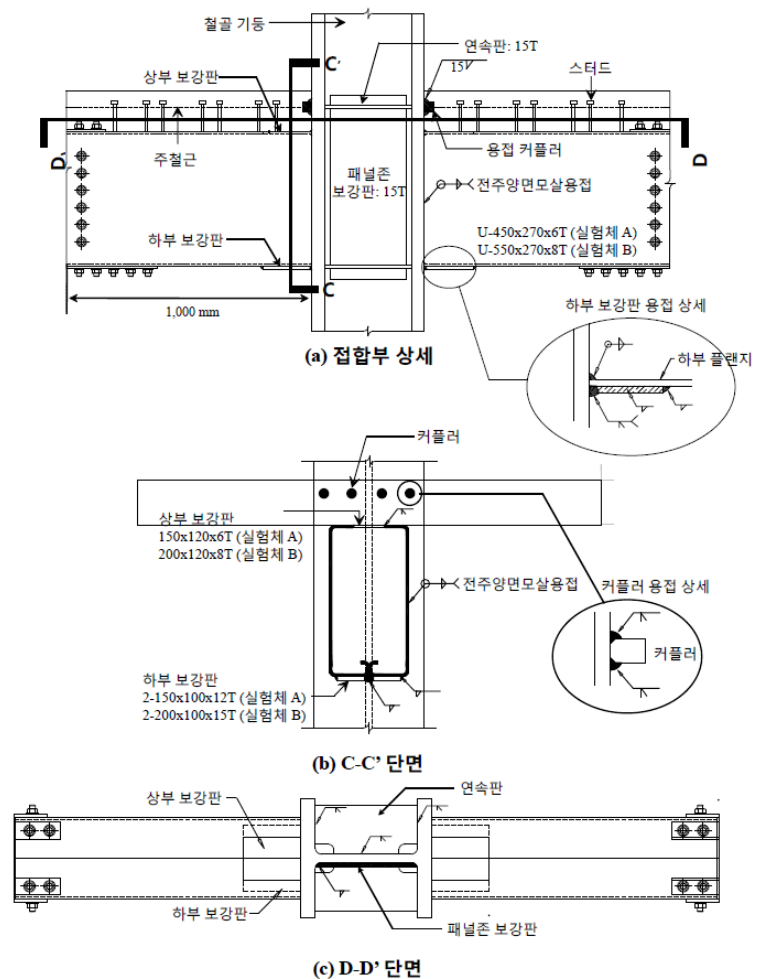


그림 16. 실험체 형상 및 접합부 상세

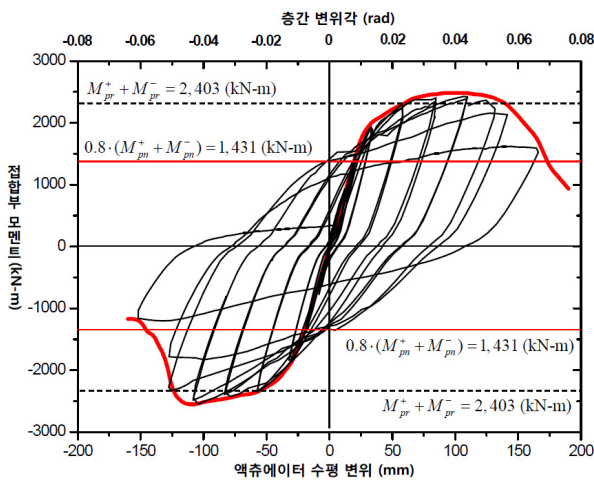
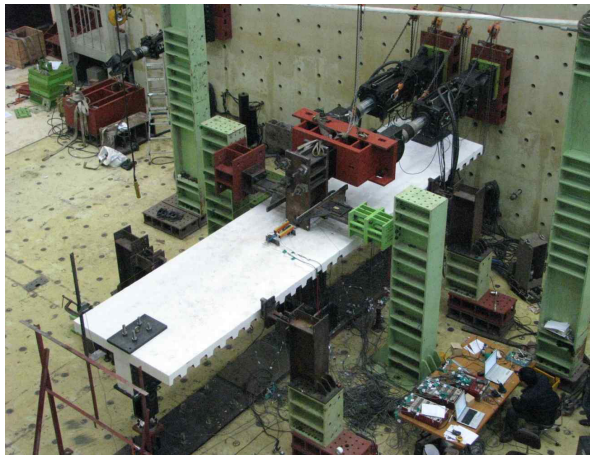


그림 17. 가력 형상 및 실험결과(실험체 A)

6. 합성기둥 + TSC 합성보

6.1 철골 철근콘크리트 기둥과 TSC 보

합성기둥과 TSC 보에 대한 내진성능평가를 수행하였다. 합성기둥은 그림 18과 같이 철골 철근콘크리트 기둥 또는 콘크리트 충전강관기둥이 대표적이다. TSC 합성보는 지금까지 철골 철근콘크리트 기둥에 접합하는 형태로 가장 많이 적용되어 왔는데 이는 상당부분 TSC 보가 적재하중이 크거나 스팬이 긴 평면에 적용된 사례가 많기 때문이다. 그림 19는 철골 철근콘크리트 기둥과 TSC 보를 조합한 내진접합부 실험체 설치 전경이다. 기둥은 800×800(mm)이고 내부에는 BH-310×310×25×25 (SS400) 철골과 16-HD22 철근이 배근되어 있다. 보는 450×270×6 (mm)를 적용하였고, 부모멘트의 철근 배근을 변수로 3개의 실험체를 제작하여 실험하였다. 그림 20은 슬래브와 보에 4-HD22+12-HD13철근을 배근한 실험체로 실험결과 5%의 회전각을 확보한 것으로 확인되었다.

6.2 앵글을 이용한 합성기둥과 TSC 보

조립 압축기둥은 그림 21과 같이 다양한 종류가 연구되어 왔으나 제작에 인력이 많이 투입되어야 하는 특성상 원자재 가격이 안정적인 시기에는 가격경쟁력을 갖기 어려워 그동안 원활히 적용되지 못하였다. 그러나 최근 원자재 가격의 중장기적 상승 추세로 인하여 건축구조에서도 강재사용량을 가능한 한 줄이려는 여러 가지 방안들이 제안되고 있다.

인건비와 원자재 가격이 동시에 상승하는 가운데 강재 사용량을 줄이면서도 제작이 용이한 합성기둥을 개발하였다. 합성기둥은 그림 22와 같이 모서리부분에 고강도, 고성능의 앵글을 사용하여 강성을 높인 형상이며, TSC 보와 합성기둥 접합부의 개발을 마치고 실험준비 중에 있다.

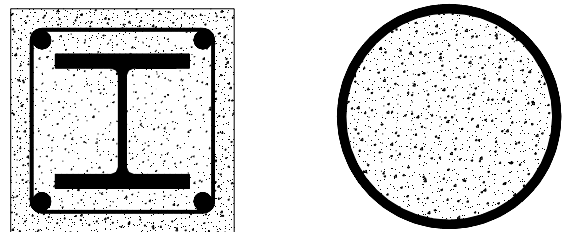


그림 18. 합성기둥의 종류



그림 19. 실험체 설치 전경

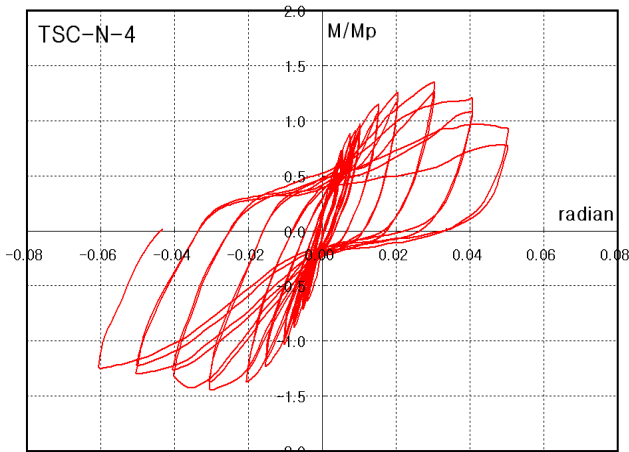


그림 20. TSC-N-4 실험체의 모멘트 회전각

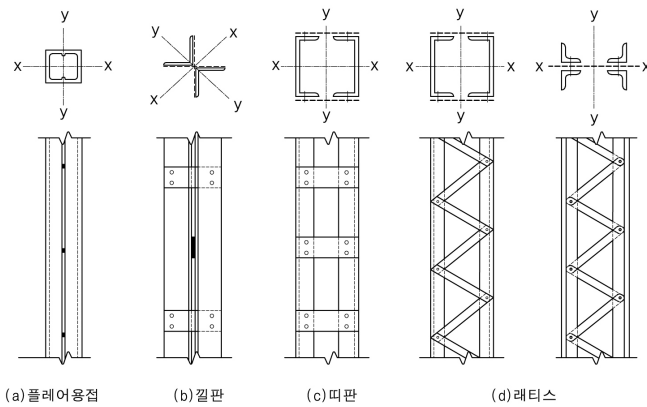


그림 21. 조립 압축기둥의 종류

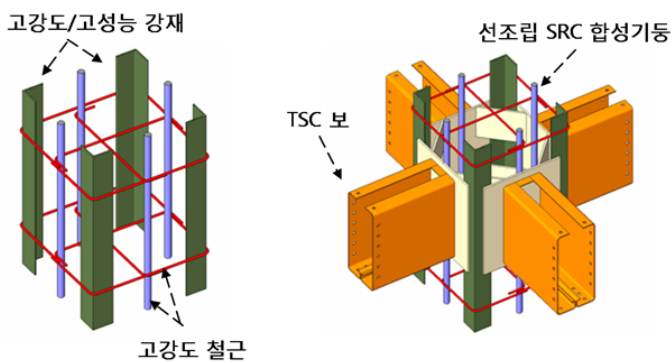


그림 22. 고강도 앵글을 이용한 합성기둥과 TSC 보 접합부

7. 결 론

이상으로 TSC 합성보와 다양한 구조시스템의 기둥을 적용한 접합부상에 따른 내진접합부성능실험결과를 정리하였다. TSC 보를 대상으로 다양한 방식과 형상의 여러 가지 기둥을

적용하여 접합부 성능실험을 수행한 결과 TSC 보를 이용한 기둥 보 접합부 내진성능은 특수모멘트골조에서 요구되는 4% 층간변위각을 증가하는 것으로 확인되었다. 그러므로 TSC 보 접합부는 기둥 형상 및 구조시스템에 따른 다양한 적용이 가능하며, H형강 보를 적용한 경우와 동일하게 자유로운 설계방법과 구조시스템 적용이 가능하다.▲

참고문헌

1. 대한건축학회, 건축구조기준 및 해설, 2009
2. 김성배, 함정태, 이창남, 김상섭 : SRC 기둥-TSC 보 접합부의 거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제22권 6호 pp55~62, 2006. 06.
3. 김성배, 김성진, 김상섭 : PHC 파일에 부착한 밴드플레이트의 부착강도에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제25권 2호, pp29~36, 2009. 02
4. 김성배, 이창남, 양재근, 김상섭 : 인장시험에 의한 고강도철근 (500MPa)의 용접특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 구조계, 제27권 1호, pp59~67, 2011. 01.
5. 황현종, 박흥근, 이철호, 박창희, 이창남, 김형섭, 김성배 : 콘크리트채움 U형 강재보-콘크리트 기둥 접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 제23권 1호, pp83~97, 2011. 02
6. 박흥근, 이철호, 박창희, 황현종, 이창남, 김형섭, 김성배 : 콘크리트채움 U형 강재보-강재기둥 합성 내진접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 논문투고
7. 박창희, 이철호, 박흥근, 황현종, 이창남, 김형섭, 김성배 : 콘크리트채움 U형 합성보-H형강기둥 십자형 합성접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 논문투고