



TSC 합성구조의 개발

Development of TSC Composite System



김 성 배/정회원, (주)센구조연구소 연구개발팀장
Kim Sungbae/Assistant Manager, SEN Structural Engineers Co. Ltd



이 창 남/정회원, (주)센구조연구소 대표이사
Lee Changnam/President & CEO, SEN Structural Engineers Co. Ltd.



김 상 모/정회원, (주)센구조연구소 부장
Kim Sangmo/Manager, SEN Structural Engineers Co. Ltd.



김 상 섭/정회원, 한국기술교육대 부교수
Kim SangSeup/Associate Professor, Korea University of Technology and Education.

1. 서론

합성보 또는 합성구조는 상이한 두 가지 이상의 재료가 복합적으로 조합하여 성능을 향상시킨 구조재료, 부재 및 구조시스템을 총칭하는 명칭으로 CFT(Concrete Filled Tube), RCS(Reinforced Concrete Steel)와 영국의 강구조학회에서 개발한 Slimfloor 등도 합성구조의 일종이다. 국내에서도 iTech 등이 발표 되었으며, 본 고에서는 TSC 합성구조에 대해 소개하고자 한다.

최근 인건비 상승과 공기단축을 통한 공사비 절감을 위해 철골조가 많이 적용되고 있고, 사용공간의 자유도를 높이는 방법으로 강재를 활용한 골조-전단벽식 구조형식도 연구검토 되고 있다. 그러나 강구조 건축물은 원자재비 상승과 층고 증가에 따른 경제성 저하, 처짐 진동 등의 사용성에 민감한 부분이 노출되고 있다. 이러한 부분을 상호보완 시키는 방법으로 복합구조인 T형 합성보를 연구 중이다.

T형 합성보(이하 TSC라 칭함 ; T type Steel Composite beam)는 기둥이나 보의 외곽에 ㄱ형강이나 ㄷ형강을 배치하고, 철근 래티스로 조립한 후 외곽 면에 내화피복을 겸하는 영구거푸집을 설치하여 콘크리트를 부어 넣는 강콘크리트 구조에서 출발하였다(특

허 제 0343960호). 그러나 현장에 적용하는 단계에서 국내에 아직 내화재로 지정을 받은 영구거푸집 재료가 없고, 대형 구조물에는 철근 래티스만으로 시공하중에 대응하는데 문제가 있음을 발견하였다. 그로 인해 내화거푸집 대용으로 영구거푸집을 강판으로 제작하여 ㄱ형강이나 ㄷ형강을 필요에 따라 선별적으로 사용하고, 강판을 내구재로 이용하여 설계하는 방법을 적용하게 되었다(출원번호 10-2001-0004409).

보의 형상은 그림 1과 같다. TSC 보는 하부와 웹, 상부 플레이트로 구성되고, 각 플레이트는 일체화되어 적절한 설계내력을 갖는다. 또한 TSC는 합성보로 거동하기 위해 상부에 스테드, ㄷ형강, 또는 철근 등을 이용한 쉬어 코넥터가 배치되고 하부에는 쉬어키가 설치된다. 하부의 쉬어키는 상부와 같이 내력을 부담하는 것이 아니라 하부 콘크리트에 발생하는 균열이 급진전하여 파단 되는 것을 방지하기 위한 것이다. TSC 보의 상단에는 콘크리트 타설 시 웹의 벌어짐을 방지하고, 상부 슬래브 작업의 용이성 등을 위해 폭 고정용으로 관통볼트 또는 형강을 부착한다. 또한 하부와 웹, 상부 플레이트의 제작은 각 부재를 절단하여 용접하거나, 볼트접합 또는 벤딩기를 이용하여 절곡, 성형 등으로 TSC 보가 완성된다.

사진 1~6은 이러한 방법으로 설계 시공한 TSC 보 적용 예이다. 각각의 예는 TSC 보를 구조물 전체에 사용하였거나, 일부 구간만 설계된 곳도 있다. 또한 일부 현장은 공사가 완료되었고 현재 시공 중인 곳도 있다. 이하에 TSC 보 특성을 지금까지의 연구 성과를 중심으로 간략히 설명하고자 한다.

2. 1차 실험

1) 실험 계획 및 측정방법

1차 실험은 TSC 보의 효율성을 평가하기 위해 쉬어 코넥터의 배치방식, 하부강판의 두께(PL-6, 12, 18mm), 쉬어키의 유·무, 측면 강판과 하부 강판의 용접방법 등을 변수로 10개의 실험체를

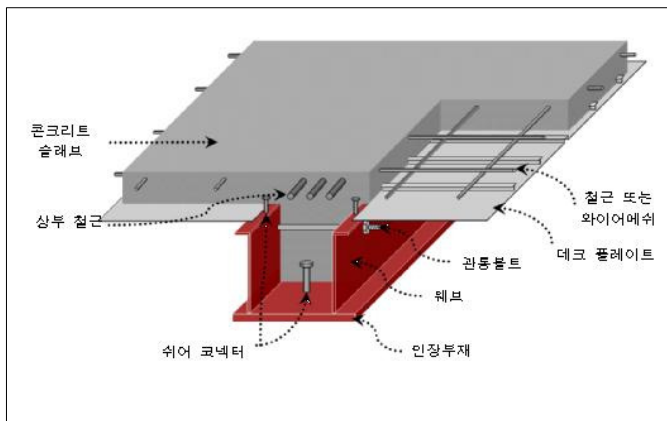


그림 1. TSC 보 개념도



사진 1. J 플라자

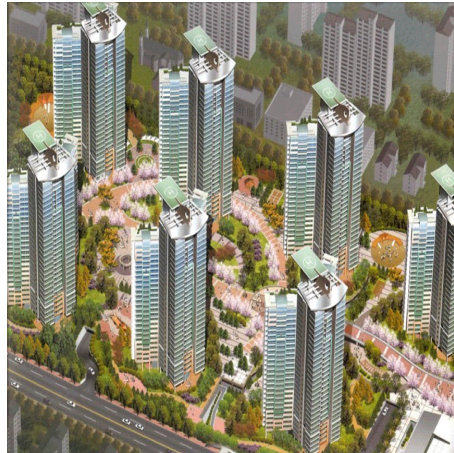


사진 2. 대치동 C 아파트

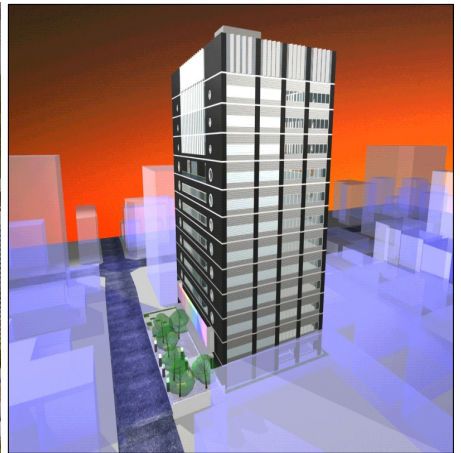


사진 3. 역삼동 L 빌딩



사진 4. S 고등학교 기념관



사진 5. S 전자 구미공장



사진 6. K 사 D 타워

제작하였다. 또한 비교 평가를 위해 TSC 보 기준형 실험체와 동일한 설계 내력을 갖는 H형강 합성보와 철근콘크리트 보를 제작하였고, 단면형상은 그림 2와 같다.

TSC 보 실험체는 3-D22(SD40)의 압축철근만 배근하였고, 합성 효과를 확인하기 위해 불완전합성으로 설계했다. 실험체의 가력은 200tf의 만능시험기(UTM)를 사용하여 그림 3과 같이 2점 가력 하였다.

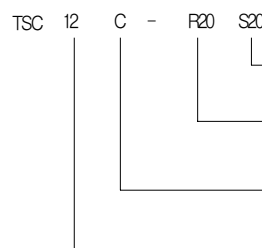
2) 실험 결과

실험 결과와 각 실험체의 기호는 표 1과 같고, 실험체의 파괴양상에는 사진 7과 같다.

실험결과 하부 플레이트의 두께가 두꺼울수록 내력 및 강성이 증가하나, 변형능력은 현저히 감소하는 현상을 보인다. 이것은 상부 쉬어 코넥터의 내력부족(부분 합성거동)과 일부 용접불량 등으로 충분한 내력 및 변형능력을 확보하지 못하고 초기에 수평 전단파괴가 일어나 내력이 저하되었기 때문이다. 이 때의 하중 변위곡선은 그림 4와 같다.

표 1. 1차 실험결과

실험체명	항복하중		최대하중		합성율 (%)
	P_y (tf)	δ_y (mm)	P_u (tf)	δ_u (mm)	
TSC12C-F20S20-1	46.7	16.2	57.6	39.8	49.3
TSC12C-F20S20-2	48.7	16.6	57.6	34.4	49.3
TSC06C-F20S20	34.2	18.7	42.7	59.6	68.2
TSC18C-F20S20	51.6	13.4	59.6	18.2	47.4
TSC12C-F00S20	29.4	10.9	32.6	12.8	0.0
TSC12C-F20S00	37.9	13.3	44.3	17.6	49.3
TSC12C-B40S20	38.3	13.8	46.7	29.4	-
TSC12P-F20S20	45.1	15.9	54.8	37.2	49.3
H형강 합성보	41.1	18.2	47.9	42.2	100.0
RC T형보	25.0	19.3	29.0	48.2	100.0



하부 쉬어 코넥터의 간격

상부 쉬어 코넥터 종류 및 간격

R : 스테드 B : 전산볼트

웹과 하부플레이트의 용접방법

C : 연속용접 P : 단속용접

하부플레이트의 두께(mm)

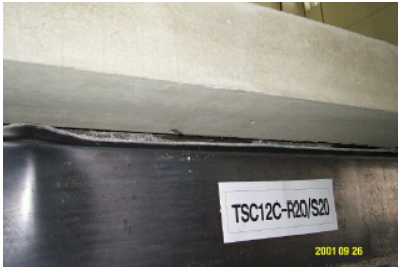


사진 7. 1차시험-기준 실험체 파괴양상

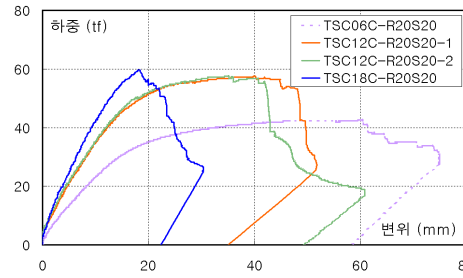


그림 4. 하부플레이트 두께의 영향

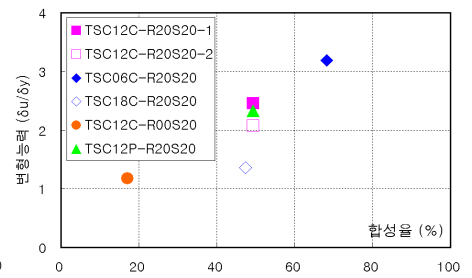


그림 5. 합성률과 변형능력

상부 쉬어 코넥터와 하부 쉬어키의 영향을 평가하기 위해 상부 쉬어 코넥터 대신 보의 웹 상단에 전산볼트(@400)를 사용하거나, 상부 또는 하부 쉬어 코넥터가 없는 시험체를 제작하였다. 상부 쉬어 코넥터가 없거나 전산볼트를 사용한 경우 내력 및 변형능력이 기준 실험체에 비해 크게 저감하였고, 하부에 쉬어키가 없는 시험체는 최대내력 이후 급격히 파단되어 연성적인 거동을 하지 못했다.

3) 고찰 및 소결

TSC 보의 변형능력은 하부 플레이트의 두께 변화에 따라 큰 차이가 있다. 이러한 변형능력의 차이는 그림 5와 같이 합성율과 밀접한 관계가 있으므로 상부 쉬어 코넥터를 완전합성으로 설계하면, TSC 보의 변형능력은 충분히 확보되리라 판단된다. 또한 하부 쉬어키는 초기강성에 큰 영향을 미치지 않으나 보 하부의 콘크리트 휨 균열을 분산시켜 조기 파단을 방지하고, 구조물의 변형능력을 확보하는데 필요한 것으로 확인되었다.

3. 2차 실험

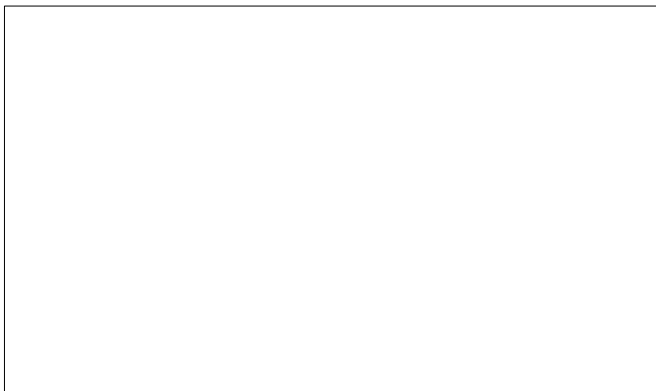


그림 2. 1차 실험 - 기준 실험체 형상



그림 3. 실험체 설치도

1) 실험 계획

TSC 2차 실험은 1차 실험에서 나타난 몇 가지 미확인된 사항들을 평가 확인하기 위해 시행하였다.

2차 실험은 설계 시 변경이 필요하다고 판단된 상부 쉬어 코넥터와 하부 쉬어키의 대체 공법 및 배치 간격, 향후 TSC 보 제작방법의 단순화 등에 대해서 검토하였다. 이러한 개념을 중심으로 TSC 보 제작은 1차 실험과 달리 2차 실험의 경우 한 장의 플레이트로 벤딩기를 이용하여 절곡하였고, 하부 플레이트를 보강하는 방법도 보강 판을 용접하는 방법에서 철근 등을 이용하는 방법이 적극적으로 검토되었다. 또한 상부 쉬어 코넥터도 스티드를 기본으로 철근을 절곡하여 용접하는 방법과 C형강을 이용하여 제작성을 개선하는 방법 등을 연구하였다.

2) Push-out 시험

스티드를 이용한 쉬어 코넥터의 설계는 이미 설계식이 있으나 철근과 C형강 등의 적용 시 내력평가가 필요하므로 Push-out 시험을 하였다.

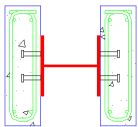
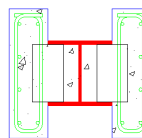
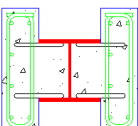
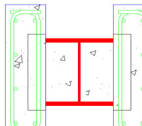
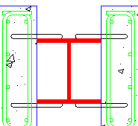
시험체 제작은 Lehigh 대학 Ollgaard 등에 의해 제안된 형상을 기본으로 철근과 C형강을 적용하는 방법에 대해 검토하였다. 철근은 HD16을 사용하였고, C형강은 150×75×6.5×10을 사용하였다.

철근을 이용하는 경우 TSC 보에 적용되는 쉬어 코넥터의 형상은 P-RI 시리즈 시험체와 동일한 형상을 갖는다. 또한 비교 대상으로 P-RO 시리즈 시험체도 제작하였다. C형강을 이용하는 경우 H형강의 보 내부에 용접하는 P-CI 시리즈 시험체와 C형강을 H형강 상부에 U 타입으로 놓혀 용접하는 P-CO 시리즈 시험체의 방법도 검토하였다. 이 형상은 TSC 보에 적용 시 용접이 단순하고 폭 고정 용과 현장에서 보위를 통행하는 발판으로도 사용이 가능한 잇점이 있다.

시험결과는 표 2와 같고, 가력상황은 사진 8과 같다.

시험결과 철근을 내부에 쉬어 코넥터로 이용하거나 C형강을 사용하는 경우 충분한 내력확보가 가능함을 확인하였다.

표 2 Push-out 시험결과

시험체명			최대 하중(tf)	파괴양상 및 특징	시험체 형상	시험체명	최대 하중(tf)	파괴양상 및 특징	시험체 형상
P-S-	1	96.9	스터드 용접불량으로 스터드가 전단파괴되며 실험종료		P-Q-	1	123.6	하부 콘크리트가 파괴되며 실험종료	
	2	88.4				2	117.6		
	3	88.2				3	103.6		
평 균		91.4			평 균		114.9		
P-RI-	1	195.0	쉬어 코넥터의 쉬어키 역할과 철골과 콘크리트의 부착으로 내력증가.		P-CO-	1	163.7	채널 내부에 충전된 콘크리트로 인해 내력 증가.	
	2	195.0				2	195.0		
	3	188.6				3	177.8		
평 균		192.9			평 균		178.8		
P-RO-	1	55.6	P-RI 시리즈와 비교 시험체, 하부 콘크리트가 압괴되며 파단.		P - RI - 1 P - RI - 1 시험체 번호: 번호 3: 1, 2, 3, I : In, O : Out IS : In Side, RS : Right Side, B : Bottom, C : Channel P : Push-out 시험 P : Push-out 시험				
	2	60.2							
	3	67.8							
평 균		61.2							

3) 보험 실험

2차 실험의 주요 변수는 판 두께와 하부 인장부의 보강방법, 쉬어 코넥터와 쉬어키의 종류, 간격 등에 대해 16개의 실험체를 제작하여 실험하였고, 가력방법은 1차 실험과 동일하다. 또한 2차 실험은 완전합성을 기본으로 설계하였다.

TSC 보 2차 실험결과와는 표 3과 같고, 실험체의 형상은 그림 6과 같다. 사진 9는 기준 실험체의 파괴양상이다.

하부 플레이트를 기존의 방법과 동일한 플레이트로 보강하는 경우와 철근 또는 포스트텐션에 의해 보강하는 경우 모두 내력 보강 효과가 크고 1차 실험과 달리 우수한 변형능력을 확보하였다. 그림 7은 하부 이장부 보강방법에 의한 하중 변위곡선이다.

하부 쉬어기를 철근과 스티드로 사용하여 배치한 경우 모두 유사한 하중과 변형능력을 보이고 있어 쉬어기의 종류와 배치간격에 의한 영향은 적은 것으로 판단된다. 그림 8은 쉬어기의 간격과 종류에

대한 하중 변위곡선이다.

이러한 실험결과로부터 하부 인장부 보강은 철근을 이용하여도 동일한 내력확보가 가능하고, 하부 쉬어키의 배치도 최대 600mm 까지 내력 및 변형능력의 변화가 없음을 확인하였다. 또한 쉬어 코넥터는 스티드와 철근, ㄷ형강 모두 적용이 가능하다. ㄷ형강을 사용하는 경우 폭 고정근을 겸하므로 작업성이 상당히 우수하게 된다.

4. 사용성 평가

1) 개요 및 측정대상

TSC 보는 기존의 철골보 합성구조에 비해 폐쇄 단면에 콘크리트를 채운 효과 등으로 사용성이 우수하다. 그러나 국내 철골조 건축물의 사용성에 부정적인 시각이 있으므로 현재 신축중인 건축물 중 TSC를 적용한 두 건물에 대해 사용성 평가를 하였다.



사진 8. Push-out 시험 가력 상황
 사진 9. 2차 실험 - 기준 실험체 파괴양상



표 3. 2차 실험결과

실험체명	실험 변수				최대 하중(tf)	실험체명	실험 변수				최대 하중(tf)
	판두께 (mm)	보강 방법	쉬어키	쉬어 코넥터			판두께 (mm)	보강 방법	쉬어키	쉬어 코넥터	
T4-N-K20R20-1	4.0	-	@200	@200	32.7	T4-3-NR20	4.0	3+HD22	-	@200	51.9
T4-N-K20R20-2	4.0	-	@200	@200	32.7	T6-N-K40R20	6.0	-	@400	@200	40.5
T3.2-N-K20R20	3.2	-	@200	@200	32.1	T6-N-K60R20	6.0	-	@600	@200	41.0
T6-N-K20R20	6.0	-	@200	@200	41.7	T6-N-S20R20	6.0	-	@200	@200	42.0
T4-P6-K20R20	4.0	Plate 6t	@200	@200	51.1	T6-N-S40R20	6.0	-	@400	@200	40.4
T4-3-K20R20	4.0	3+HD22	@200	@200	49.1	T4-N-K20C30	4.0	-	@200	@300	29.9
T4-6-K20R20	4.0	6+HD22	@200	@200	61.3	T4-N-K20C40	4.0	-	@200	@400	29.1
T4-4-K20R20	4.0	4-φ15.2	@200	@200	53.0	T4-N-K20U40	4.0	-	@200	@400	30.5

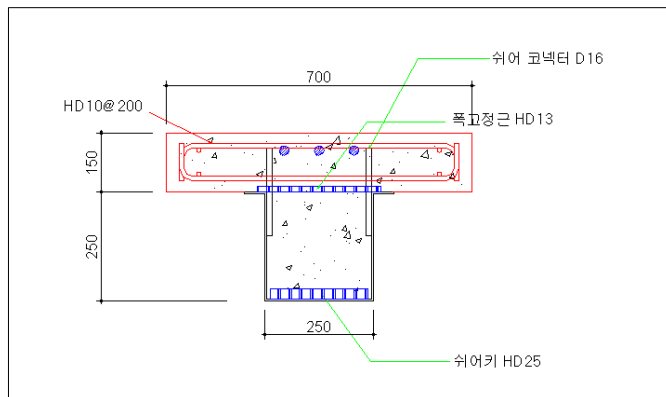
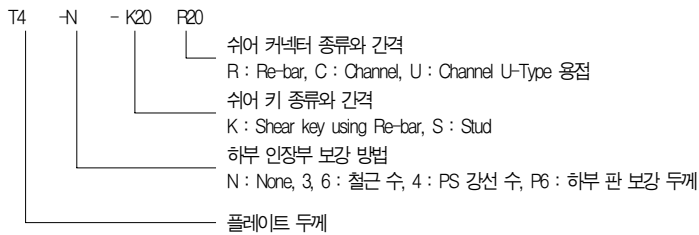


그림 6. 2차실험-기준실험체 형상

측정 건축물은 서울시 역삼동에 위치한 지하 3층, 지상 12층 규모의 L빌딩과 서울시 구로동에 위치한 지하 1층, 지상 15층의 D타워이다. 두 건물의 일반사항은 표 4와 같다.

표 4. 측정건물의 일반사항

	콘크리트 강도 (f_{ck} , kgf/cm ²)	비트판 크기 (m ²)	슬래브 위치	슬래브 두께 (mm)
L 빌딩	240	13.1 × 6.0	2층	120
D 타워	270	8.7 × 7.8	3층	150

표 5. 감쇠율, 고유진동수 및 최대가속도

	감쇠율(%)	고유진동수(Hz)	최대가속도(%g)
L 빌딩	1.88	9.76	0.25
D 타워	1.91	12.69	0.34

보행하중을 가진 하였고, 뒷꿈치 충격에 의한 실험은 뒷꿈치를 바닥에서 5cm 정도 띄운 다음 자유낙하 하여 바닥판에 하중을 가하였다.

2) 실험 및 계측방법

실험 장치는 동적 신호 분석기와 서브 가속도계 센서를 사용하여 측정하였다. 실험은 보행하중과 뒷꿈치 충격(Heel Drop Impact)에 대해 실시하였다. 보행하중 실험은 몸무게 70kg의 사람이 중앙부에 설치된 센서를 바라보며 대각선 방향으로 바닥판에

3) 실험 결과

최대가속도는 보행하중을 가진원으로 측정하였고, 이를 FFT(Fast Fourier Transfer)변환하여 바닥판의 고유진동수를 구하였다.

그림 9는 L빌딩의 보행하중에 의한 가속도응답이다.

대상건물의 고유진동수, 최대가속도와 감쇠율은 표 5와 같고, 두

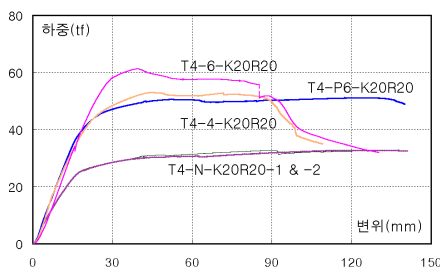


그림 7. 하부 인장부 보강방법의 영향

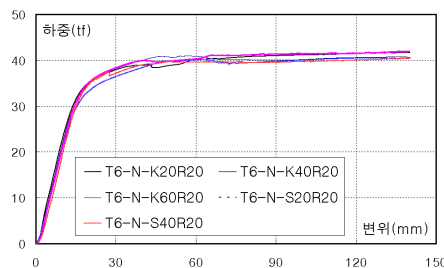


그림 8. 쉬어키 간격과 종류의 영향

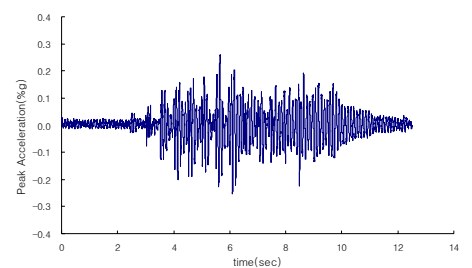


그림 9. L 빌딩 보행하중에 의한 가속도응답

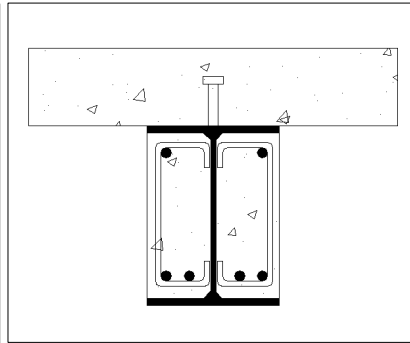
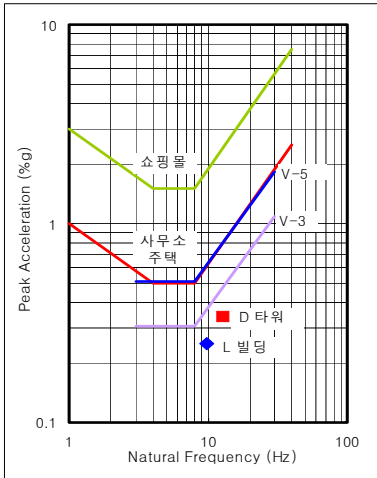


그림 11. Eurocode4(2001) 내화형 합성보

그림 10. 사용성 평가 결과

건축물의 감쇠비는 AISC 기준의 비구조재가 거의 없는 바닥판에 권장되는 2%와 거의 같다.

수직진동 평가는 그림 10과 같이 AISC의 제한치 0.5%g와 일본 건축학회 기준의 권장치 V-3를 모두 만족한다.

이상 TSC 보의 사용성 평가는 일반 철골조 건축물과의 상대비교가 없이 실시되어 정량적 평가는 다소 어려우나 AISC 제한치와 일본 건축학회 기준을 모두 만족한다. 또한 L빌딩의 슬래브 두께가 120mm로 진동에 다소 취약하다고 우려되었으나 측정결과는 상당히 우수한 것으로 평가된다.

과 접합방법 및 TSC 보 적용에 따른 경제성 분석은 언급하지 못했다. 이러한 부분은 차후에 기회가 되면 시공 예를 중심으로 소개할 예정이다.

이상의 내용은 일부 논문에 발표되었거나 현재 분석중인 내용 등을 일부 발췌한 것으로 앞으로도 지속적인 연구를 통해 더욱 발전된 합성구조가 되도록 할 계획이다[3]

5. 내화 성능

TSC 보는 철골 보 내부에 콘크리트를 충전한 합성보로 외부의 철골과 일부 내부에 철근 등을 배근하면 내화에 우수할 것으로 예상된다. 이러한 예가 그림 11 Eurocode4(2001)의 내화형 합성보이다. 특히 TSC는 웨브도 철판으로 보강되어 있어 전체가 하나의 내화구조로 거동할 수 있어 최소 1시간 정도의 내화성은 유지할 수 있다고 예측된다.

이러한 이유로 건설기술연구원의 건설품질센터와 협의하였으나, 국내에 대형 시험로가 없는 등 여러 가지 문제가 있어 내화시험을 통한 내화성능은 확인하지 못했다. 그러나 TSC 보는 기존 H형강 합성보에 비해 상·하 플랜지 내측면 만큼 내화피복 면적이 감소하므로 내화피복을 하는 비용이 절감된다.

6. 맺으며

지금까지 연구개발 및 실무적용 성과를 중심으로 합성구조인 TSC 보의 특성에 대해 설명하였다. 그러나 지면 관계로 설계방법