

CFT기둥 철근콘크리트무량판 접합부 상세 및 설계법 개발을 위한 실험연구

An Experimental Study for Development of Details and Design Method of CFT Column-to-RC Flat Plate Connections

이철호* 김진원** 이진혁*** 박철수*** 오정근****
Lee, Cheol Ho Kim, Jin Won Lee, Jin Hyeok Park, Cheol Su Oh, Jeong Gun

ABSTRACT

This paper summarizes full-scale test results on CFT column to flat plate connections subjected to gravity loading. CFT construction has gained wide acceptance in a relatively short time in domestic building practice due to its various structural and construction advantages. Constructing the floor as flat plate is often regarded as being essential for both cost savings and rapid construction. However, efficient details for CFT column to flat plate connections have not been proposed yet, and their development is urgently needed. Based on some strategies that include maximizing economical field construction, several connecting schemes were proposed and tested in this study. Test results showed the proposed connection details can exhibit strength and stiffness comparable to or greater than those of R/C flat plate counterpart.

1. 서론

최근 들어서 국내에서도 CFT (Concrete Filled Steel Tube)구조에 의한 고층건물의 시공이 급격히 증가하는 추세에 있다. CFT 구조가 가지는 여러 가지 구조적/시공상의 장점은 이미 잘 알려져 있다. 주차장 용도로 주로 사용되는 지하층은 철근콘크리트 무량판으로 시공하여 경제성을 도모하는 것이 국내에서 일반적으로 요구되는 설계 및 시공 관행이다. 지하층의 공기가 전체공기에서 차지하는 비중이 크므로 드롭패널이 포함된 플랫 슬라브 (flat slab) 대신 플랫 플레이트 (flat plate)로 구축하는 것은 시공성 확보는 물론 층고 및 터파기 깊이 절감, 그리고 공기단축에 크게

* 정회원 · 서울대학교 건축학과, 부교수
** 서울대학교 건축학과, 박사과정
*** 서울대학교 건축학과, 석사과정
**** 삼성건설 기술연구소, 수석연구원

기여할 수 있으므로 건설 경쟁력 확보에 중요한 고려사항이다. 그러나 현재 CFT기둥과 RC 무량판 접합부 구축을 위한 안전하고 경제적인 상세 및 설계법은 국내는 물론 국외에서도 제시된 바가 거의 없다. CFT기둥과 RC (Reinforced Concrete)무량판 접합부의 설계법 정립의 필요성은 국내에서 먼저 제기되는 상황이 아닌가 한다. 따라서 이 부분은 CFT구조의 설계를 수행하는 국내의 구조설계자가 부딪치는 가장 어려운 문제의 하나로 부각되고 있다. 특히 국내 CFT구조의 경우 40 mm 이상의 후판재를 사용하는 경우가 대부분이므로 CFT기둥은 일반 RC기둥에 비해 기둥의 사이즈가 대폭 감소하게 된다. 그러나 이에 비례하여 기둥 외주면에서 형성되는 편칭전단의 주장 역시 대폭 감소하므로 편칭전단에 대한 취약성은 오히려 증대되는 부작용 (side effect)을 노출하고 있다. 본 연구에서는 실험적 연구를 통하여 일반 RC기둥-무량판 접합부의 내력과 동등하거나 또는 이를 상회하는 접합부내력을 갖는 동시에 뛰어난 시공성을 지닌 CFT기둥-RC 무량판 접합부의 상세 및 설계법을 제시하고자 하였다.

2. 실험프로그램개요

2.1 접합부 개발전략

(1) 접합부의 안전성 및 현장에서의 시공성 제고를 접합부 개발의 최우선 기준으로 연구를 진행하였다. 통상 주열대의 휨모멘트의 가운데 기둥쪽에 부과되는 휨모멘트의 전달을 위해 휨철근의 전강도이음을 위한 현장용접이 불가피하다. 그러나 본 연구에서는 휨철근을 현장용접하지 않고도 휨철근의 전강도를 발휘할 수 있는 효과적 정착방안을 모색하였다.

(2) 콘크리트의 일체타설 이후의 양생을 통하여 접합부의 구조적 연속성이 시공과정에서 자동으로 확보되는 일반 RC기둥-무량판 접합부와는 달리, CFT기둥-RC 무량판 접합부에는 바닥의 중력하중에서 기인하는 전단력을 전달할 구조요소가 완전히 결여되어 있다. 따라서 CFT기둥-RC 무량판 접합부에는 어떤 형식이든 "전단키(shear key)"의 역할을 할 수 있는 접합요소의 도입이 불가피하다. 이 전단키의 강도는 목표로 하는 편칭강도 이상이 되도록 확보되어야 할 것이다. 또한 이 전단키는 콘크리트 압축대의 보강재 역할도 겸하게 하여 내력증진에 미치는 유효성 여부를 실험으로 확인하고자 하였다.

(3) 본 연구를 통하여 개발되는 접합부의 설계법은 현재 실무자들이 사용하는 RC 무량판 설계법 (가령 직접설계법, 등가골조설계법 또는 상용프로그램을 이용한 유한요소해석에 기반한 설계법)에 그대로 흡수될 수 있도록 제시하고자 하였다.

(4) 중력하중을 받는 내부 접합부를 대상으로 하되 실험결과의 신뢰도 확보를 위해, 실물대 실험으로 연구를 수행하였다.

2.2 시험체 상세

앞에서 언급한 접합부 개발전략을 바탕으로 다음과 같은 디테일방안을 연구하였다 (그림 1~5 참조). 접합부의 휨모멘트 전달을 위해, 1) 가이드 도관 (guide conduit)을 이용하여 휨철근을 CFT기둥에 완전관통시켜서 구조적 연속성을 확보하는 완전관통 (Full Penetration)상세, 2) 휨철근을 반관통시킨 후 겹치이음부를 구축하여 정착강도를 확보하는 반관통 (Half Penetration)상세, 3) 후크 (hook)를 사용하여 휨철근을 정착시키는 상세를 검토하였다. 접합부 편칭전단 전달을 위

한 전단키로 CT형강 (Cut Tee)과 유사한 전단티 (Shear Tee)를 사용하는 방법과 전단 스티드를 사용하는 방법, 그리고 전단머리 (Shear Head)를 사용하는 방안을 검토하였다. 완전관통상세의 경우 CFT기둥의 외곽치수가 커서 현장에서의 철근 관통이 어려울 경우에는 미리 철근을 관통시키는데 가이드역할을 할 수 있는 도관 크기만큼의 구멍을 뚫고 현장에서 철근 조립시 도관을 설치한 후 이 도관을 통해서 기둥 쪽에 부과되는 휨철근을 삽입한다. 반관통상세의 경우 휨철근을 기둥한쪽만 관통시킴으로써 완전관통상세 보다 시공성을 향상시킨 시스템이다. 반관통접합부 겹침부의 강도는 CFT기둥 내의 콘크리트 부착력과 CFT기둥 플랜지의 면의 휨강성이 제공하는 유리한 정착효과로 인하여 철근의 전강도가 발휘될 것을 기대하고 설계하였다. 휨철근을 표준 후크로서 공장 용접된 인장탭에 정착시키는 방안은 상대적으로 박판의 CFT기둥이 사용되는 경우 기둥의 면외 변형이 발생할 수 있다. 따라서 이 경우에는 CFT 기둥내부에 앵커스티드를 설치하여 CFT 기둥 플랜지 그리고 내부 콘크리트 정착부에 이르기까지 완전한 응력전달경로를 확보하도록 상세를 구축하였다.

2.3 시험체 설계 및 제작

시험체 설계에 사용된 적재하중은 대한건축학회의 건축물 하중 기준 및 해설에 따라 옥내주차 구역 승용차 전용에 해당하는 적재하중 (600 kgf/cm^2)을 사용하였다¹⁾. 슬래브의 스패ん 길이는 6m x 6m, 기둥 크기는 400mm x 400mm 로 가정하여 직접설계법에 의해 시험체를 설계하였다. CFT 기둥-RC 무량판 접합부의 전단키로는 9 mm 강판 (SS400)을 사용하여 제작된 전단티와, H-100x100x6x8 (SS400)의 전단머리, 직경 19 mm 전단 스티드 (SS400)를 사용하였다. 시험체 제작시 용접봉은 인장강도 $F_{EXX} = 5.0 \text{ tf/cm}^2$ 급을 사용하였다. 주열대의 휨모멘트에 대한 휨철근은 D16 (SD40)을 사용하였고 (휨철근비 0.64%), 슬래브와 CFT기둥 내에 강도 270 kgf/cm^2 급 콘크리트를 타설하였다. 반관통-전단머리(HP-SH) 시험체를 제외하고 CFT기둥-RC 무량판 접합부 시험체에는 콘크리트와 CFT기둥 계면의 이간지연에 도움이 되는 역할을 하도록 균열 제어용 스티드를 휨철근과 동일한 높이에 설치하였다. 전단티 및 전단스티드는 전단항복강도를 고려하여 설계하였고²⁾, 전단머리는 ACI 318-02의 전단머리 설계 규정에 따라 설계하였다^{3)~6)}. 총 6개의 시험체를 제작하였고, 실험에 사용된 시험체 일람은 표 1과 같다. 시험체 평면도 및 상세는 그림 1 ~ 그림 5와 같다.

표 1. 시험체 일람

No	시험체명	휨철근 접합	전단키 접합
1	BM-RC (Bench Mark 시험체)	-	-
2	FP-ST	완전관통 (Full Penetration)	Shear Tee 형강
3	HP-ST	반관통 (Half Penetration)	Shear Tee 형강
4	HP-SH	반관통 (Half Penetration)	전단머리 (Shear Head)
5	HP-SS	반관통 (Half Penetration)	전단스티드 (Shear Stud)
6	HK-ST	후크(Hook)	Shear Tee 형강

2.5 가력 및 계측계획

연속 슬래브 경간에서 스패ن 길이의 약 1/4 지점에 변곡점이 발생하므로 이 경계조건이 반영되도록 4변을 단순지지하고, 횡변위 방지 턱을 설치하여 슬립현상을 방지하였다. 시험체의 제작이 아무리 정확하다고 하더라도 하부면과의 밀착이 완전히 이루어지기는 어렵기 때문에 반력부와 시험체 슬래브 하부면 사이에 고무판을 설치하여 최대한 반력부와의 밀착이 이루어지도록 하였다. 편칭전단이 거동을 지배하도록 연직하방으로 하중을 가하는 형태로 실험을 진행하였다. 변위계(LVDT) 4개를 기둥 하부면에 설치하여 CFT기둥의 수직변위를 측정하였고, 휨철근에 1축 스트레인 게이지를 부착하여 변형도를 측정하였다. 기둥면과 전단티의 웨브, 전단머리의 웨브 부분에 3축 스트레인 게이지를 부착하여 전단변형도를 측정하였다. 변위 제어를 통하여 가력하면서 균열 진행 상황을 파악하였다.

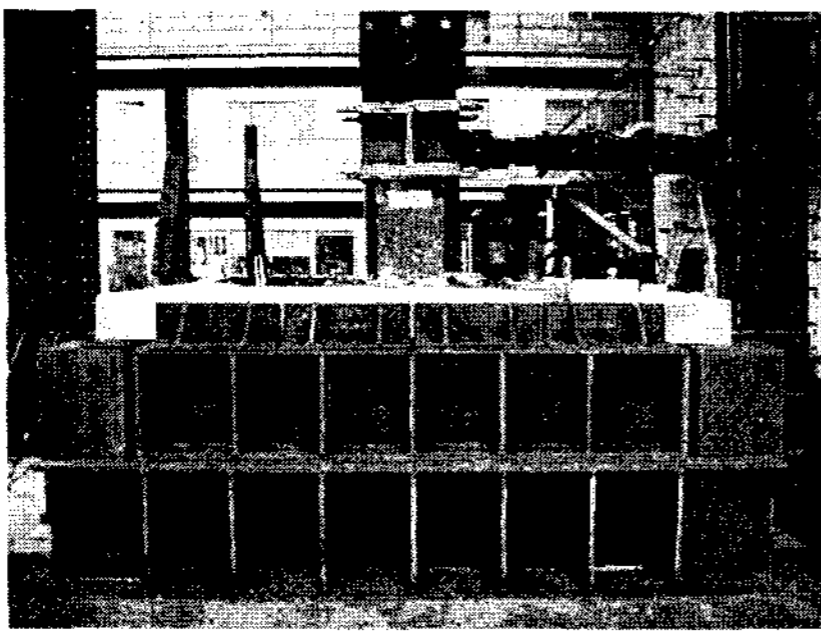


그림 6. 시험체 셋업 전경

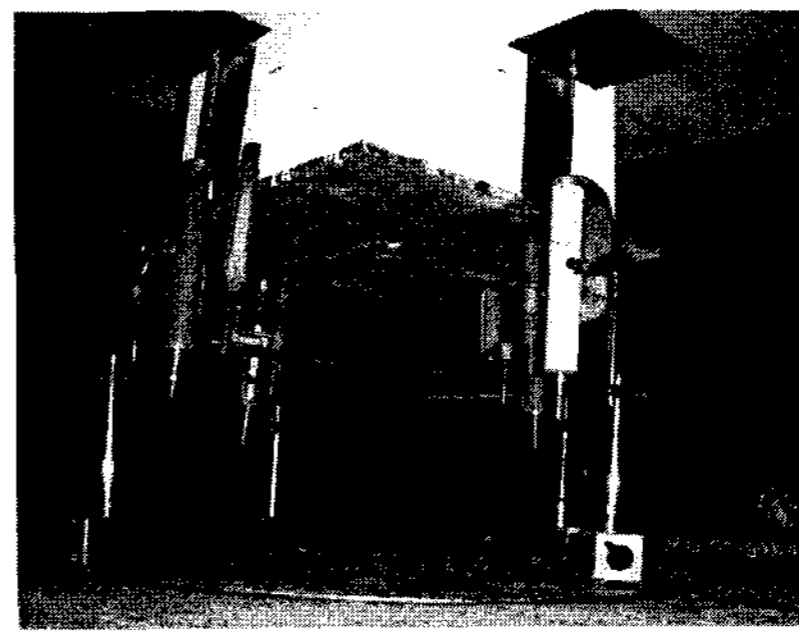


그림 7. 변위계 설치 사진

3. RC 무량판 편칭전단강도식 고찰^{3),6),7)}

ACI 318-02에서 제안하고 있는 편칭전단강도식은 콘크리트의 강도, 기둥 형상과 주장의 길이에 영향을 받는다. ACI 318-02는 위험단면을 기둥면으로부터 d (슬래브의 유효두께)만큼 떨어진 위치에서 형성된다고 정의하고 있다. 전단보강이 이루어지지 않은 RC 무량판의 전단강도는 아래 식 (1)에 의하여 구할 수 있다. f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, b_0 는 위험단면의 주장을 나타낸다

$$V_c = 0.33 \sqrt{f_{ck}} b_0 d \quad [\text{MN}] \quad (1)$$

EC2는 RC 무량판의 위험단면은 기둥면으로부터 $1.5d$ 만큼 떨어진 위치에서 형성된다고 정의하고 있다. 편칭전단강도는 아래식 (2)에 의해서 구할 수 있다. 여기서 k 는 크기영향계수 $[=1.6-d \text{ (mm)}]$, $f(p_i)$ 은 인장보강함수 $[=1.2+40 p_i]$, $p_i \leq 1.5\%$, p_i 는 철근비 (%)를 나타낸다.

$$V_c = 1.5 (0.035) f_{ck}^{0.67} k f(p_i) b_0 d \quad [\text{MN}] \quad (2)$$

Model Code 90 과 FIP-Recommendation 1996은 RC 무량판의 위험단면은 기둥면으로부터 $2d$ 만큼 떨어진 위치에서 형성된다고 정의하고 있다. 편칭전단강도는 아래식 (3)에 의해서 구할 수 있다. 여기서 k 는 크기영향계수 $[=1 + \sqrt{200/d} \leq 2.0]$, $f(p_i)$ 은 인장보강함수 $[= \sqrt{100 p_i}]$ 를 나타낸다.

$$V_c = 1.5(0.12)f_{ck}^{0.33} k f(\rho_l) b_0 d \quad [\text{MN}] \quad (3)$$

4. 실험결과 분석 및 고찰

그림 8은 각 시험체의 하중-변위 관계도를 나타낸 것이다. FP-ST 시험체의 경우 597 (KN)으로 가장 큰 편칭강도를 갖는 것을 알 수 있었다. 그림 9는 각 시험체의 편칭 전단강도를 BM-RC의 편칭전단강도로 무차원화하여 나타낸 것이고, 그림 10은 실험종료 후 인장측 균열 및 편칭전단면을 나타낸 것이다. 우려했던 가력 초반의 기둥과 슬라브 계면의 균열은 거의 발생하지 않았는데, CFT기둥 계면의 이간지연에 도움이 되도록 설치한 균열제어 스티드가 도움이 된 것으로 사료된다. 시험체 설계에서 의도한 CFT기둥-RC 무량판 접합부의 파괴모드는 다음과 같다: 1) 전단보강재의 강도는 휨강도를 충분히 상회하도록 설계하여 휨철근의 항복이 우선되도록 한다. 2) 하중의 증가에 따라 휨철근 항복이 증가되면서 압축대의 콘크리트 변형도가 증가하게 되고, 결국에는 콘크리트의 압괴에 이은 편칭 파괴가 최종 파괴모드로서 발생한다. 모든 시험체는 예상 파괴모드와 일치하는 결과를 보여주었다. 그림 9에 나타난 바와 같이 HP-SS 시험체를 제외한 나머지 시험체는 BM-RC의 편칭전단강도와 동등하거나 이를 상회하는 편칭전단강도를 갖는 것을 알 수 있다. FP-ST 시험체는 BM-RC 시험체에 비해 약 6.47% 증가된 편칭전단강도를 가졌다. 그림 10에서 보듯이 CFT기둥-RC 무량판 접합부는 RC 무량판 접합부에 비해 확대된 편칭전단면을 형성하는 것을 확인할 수 있었다.

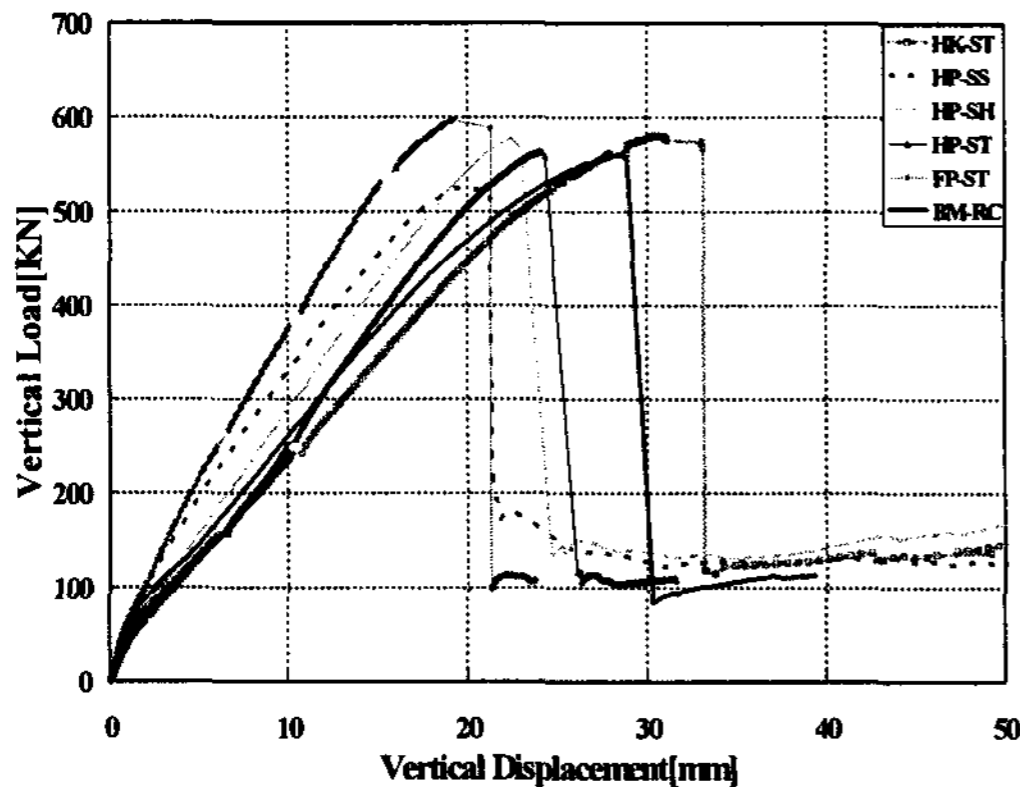


그림 8. 각 시험체의 하중-변위 관계도

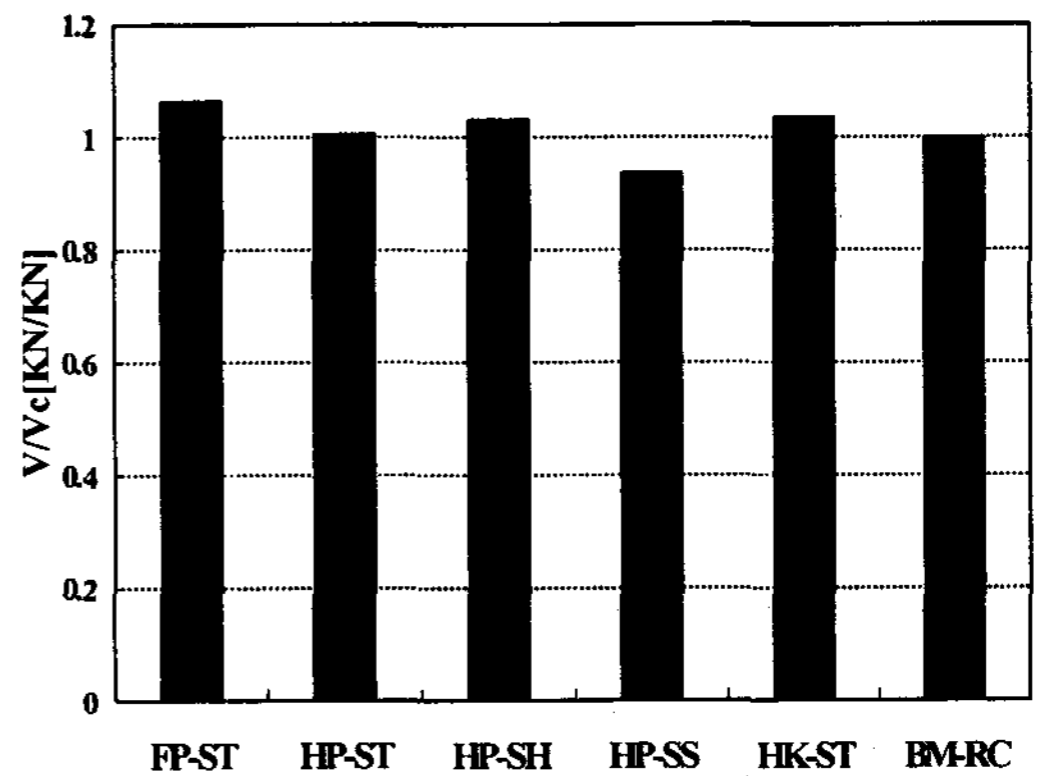
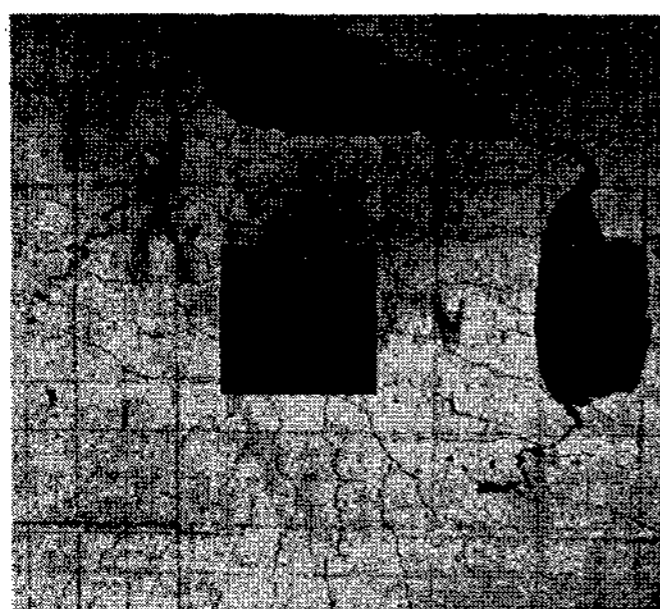
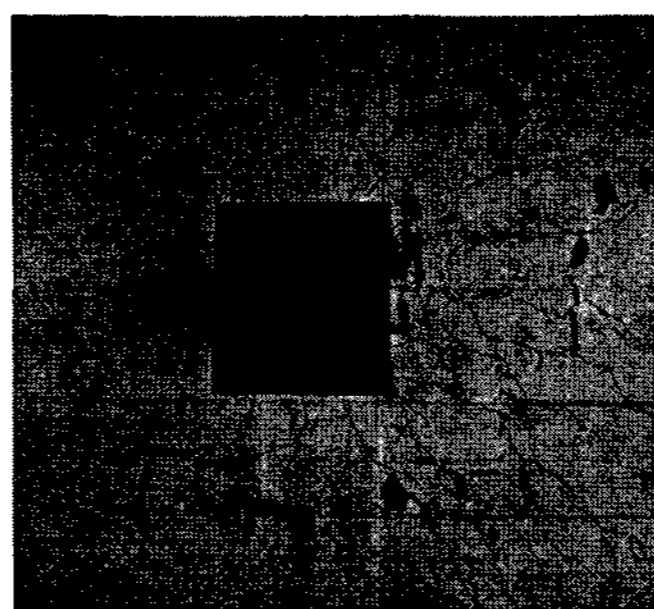


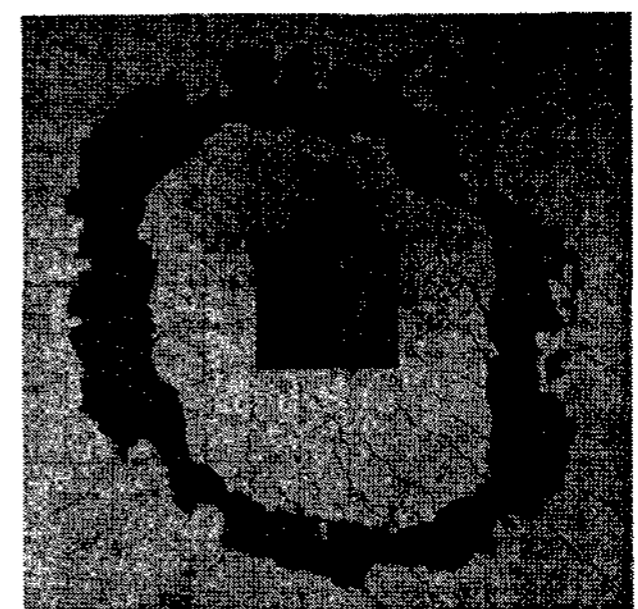
그림 9. 무차원 편칭전단강도 비교



(a) BM-RC



(b) FP-ST



(c) HP-SH

그림 10. 실험종료 후 인장측 균열도 및 편칭전단 패턴

그림 11은 실험에서 얻어진 편칭강도를 ACI 318-02 (식 1 참조), EC2 (식 2 참조) 및 Model Code 90 (식 3 참조)에서 규정하고 있는 RC 무량판의 편칭전단강도로 정규화시켜서 나타낸 것이다. ACI 318-02에서 규정하고 있는 편칭전단강도식으로 비교할 때 CFT기둥-RC 무량판 접합부 시험체는 일반 RC 무량판 접합부의 83% ~ 94% 정도의 편칭전단강도를 갖는 것으로 나타났다 (RC 무량판 접합부 시험체의 경우는 88% 정도의 편칭전단강도를 갖음). 반면 EC2 및 Model code 90 에서 규정하고 있는 편칭전단강도식으로 비교해 볼 때 CFT기둥-RC 무량판 접합부 시험체는 일반 RC 무량판 접합부의 편칭전단강도를 2% ~ 16%가량 상회하는 것으로 나타났다. EC2 와 Model code 90에 의한 편칭전단강도식은 큰 오차를 보여주고 있으며, 편칭전단강도를 저평가 하는 것으로 나타났다. 따라서 EC2와 Model code 90을 통하여 설계를 할 경우 상당히 보수적인 설계가 될 것이다. 본 연구의 실험결과와 ACI 318-02의 편칭전단강도식과 오차가 발생하는 이유는 다음과 같이 추정해 볼 수 있다. 첫째는 가력시 제어하기 힘든 편심하중 효과에 의한 영향을 거론할 수 있다 (기둥 부재의 수직도 및 4면 반력면에서의 밀착도의 불충분). 또한 본 연구에서는 휨철근의 정착 및 전단 보강 방법에 따른 편칭전단강도의 증진 여부를 파악하기 위하여 포스트 편칭 철근을 의도적으로 제외하였다. 포스트 편칭 철근이 존재할 경우 콘크리트 슬래브의 압축대 보강 효과에 의하여 편칭전단강도는 증가할 것이다. 이런 요인들을 고려한다면 ACI 318-02에서 규정하고 있는 편칭전단강도식을 사용하여 실용적으로 충분한 정확도로서 CFT기둥-RC 무량판 접합부의 강도를 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 그림 12는 각 시험체의 할선강성을 비교한 것이다. 접합부의 강성은 무량판 슬래브의 처짐에 영향을 미치는 요소이다. HK-ST 시험체를 제외한 모든 시험체가 BM-RC 시험체에 비해 19% ~ 58% 큰 강성을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구의 CFT기둥-RC 무량판 접합부로 구축된 무량판의 처짐은 RC 무량판에 비해 작아 지는 이점이 있을 것이다 (즉 기존의 RC 무량판 처짐 산정식을 사용해도 무방할 것이다).

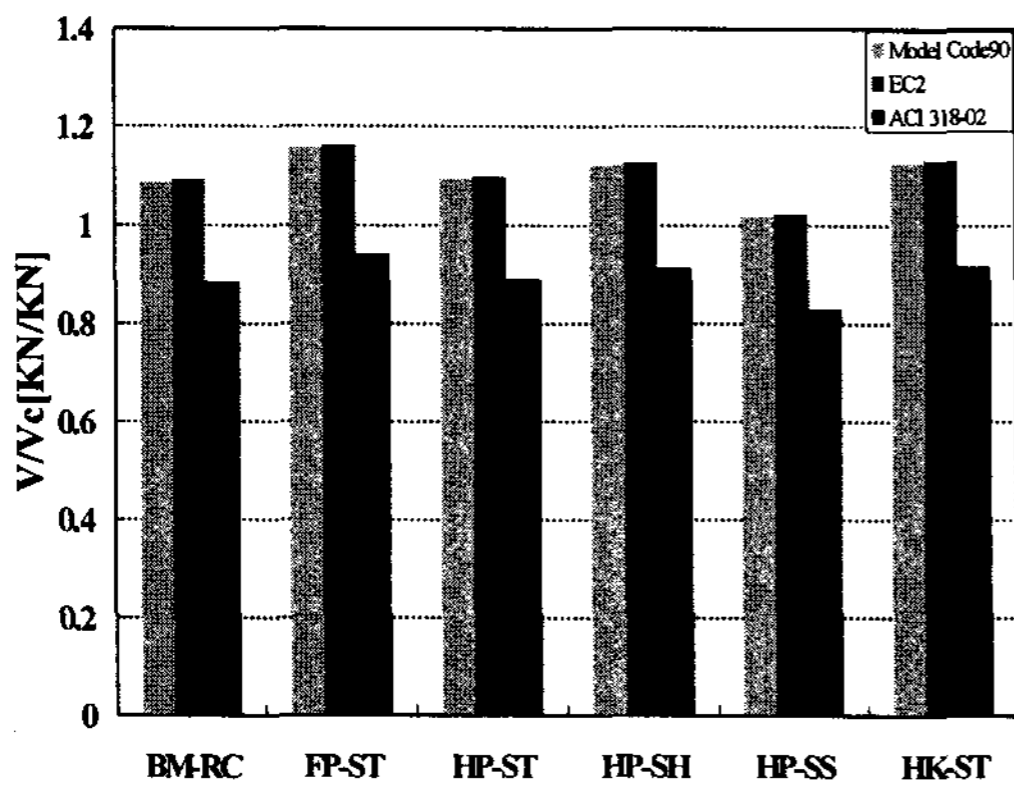


그림 11. 편칭전단강도 무차원화값의 비교

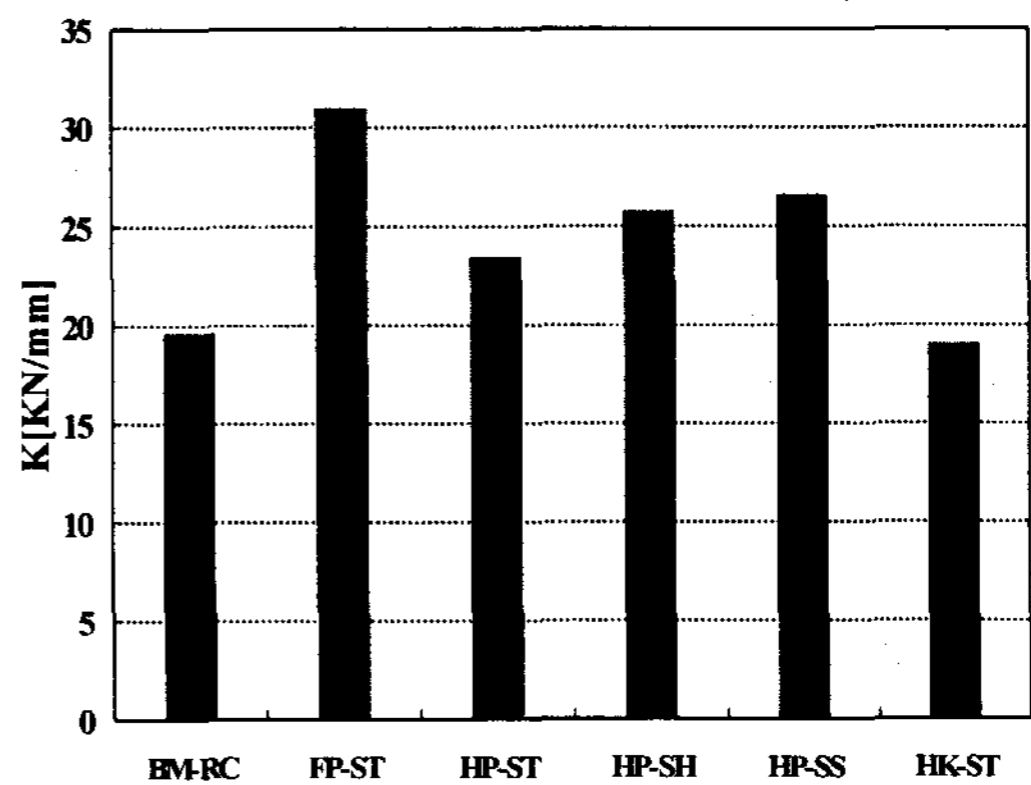


그림 12. 할선강성의 비교

5. 결론

CFT기둥-RC 무량판 접합부의 편칭전단강도 평가를 수행한 결과를 요약하면 다음과 같다..

- 1) 본 연구에서 제시한 다양한 형식의 CFT기둥-RC 무량판 접합부는 기존의 RC 무량판 접합부 강도와 동등하거나 그 이상의 강도를 발휘할 수 있음을 실험을 통하여 입증하였다. 전

단키로 전단 스티드를 사용한 HP-SS를 제외한 나머지 시험체에서 일반 RC 무량판 접합부의 강도와 동등한 또는 상회하는 편칭전단강도를 갖는 것으로 확인되었다.

- 2) EC2 와 Model code 90에 의한 편칭전단강도식은 편칭전단강도를 저평가하는 것으로 나타났다. 따라서 EC2와 Model code 90을 통하여 설계를 할 경우 상당히 보수적인 설계가 될 것이다. 반면 ACI 318-02의 산정식은 평균 9% 정도의 오차만 보여주고 있는바 CFT기둥-RC 무량판 접합부는 ACI 318-02에 따라 설계 및 검토할 것을 권장한다. 앞에서 언급한 여러 오차발생원인들을 고려한다면 ACI 318-02에서 규정하고 있는 편칭전단강도식을 사용하여 실용적으로 충분한 정확도로서 CFT기둥-RC 무량판 접합부의 강도를 예측할 수 있을 것이다.
- 3) 본 연구에서 제시한대로 전단키의 설계 및 휨철근의 정착이 적절히 이루어질 경우, 기둥 외주면 슬래브의 휨항복 및 이의 전파 그리고 압축대 콘크리트의 압괴에 이은 편칭파괴가 전형적인 파괴모드가 되는 거동을 확보할 수 있다.
- 4) HK-ST 시험체를 제외하고 BM-RC 시험체에 비해 19% ~ 58% 증가된 강성을 갖는 것으로 평가되었다. 따라서 본 연구의 CFT기둥-RC 무량판 접합부로 구축된 무량판의 처짐은 RC 무량판에 비해 작아지는 이점이 있을 것이다. 즉 기존의 RC 무량판 처짐 산정식을 사용하면 보수적인 설계가 될 것이다.
- 5) 이상의 실험결과를 종합해 볼 때 본 연구에서 제시된 다양한 형식의 CFT기둥-RC 무량판 접합상세 가운데, 완전관통 상세와 전단키로 전단티 및 전단머리를 사용하는 상세를 채택할 경우 가장 바람직한 CFT기둥-RC 무량판 접합부가 구축될 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 삼성물산(주) 건설부분의 연구비지원에 의한 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 대한건축학회, "건축물 하중기준 및 해설", 태림문화사, 2000.
2. AISC, Manual of Steel Construction: Load and Resistance Factor Design, Third Edition, 2001.
3. ACI Committe 318, "Building Code Requirements fo Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02)", American Concrete Institute (ACI), Detroit, Mich., 2002.
4. N. M. Hawkins (1974), "Shear strength of slabs with shear reinforcement", Shear in reinforced concrete, Vol. 2 (SP-42). Detroit: ACI, pp.785-816.
5. W. G. Corley and N. M. Hawkins (1968), "Shearhead reinforcement for slabs", ACI Journal, Proceedings, 65, October, pp. 811-824.
6. C. K. Wang and C. G. Salmon (1979), Reinforced concrete design, Harper & Row Publishers
7. Technical report (2001), Punching of structural concrete slabs, CEB/fib Task Group (Utilisation of concrete tension in design), bulletin 12, fe'de'ration internationale du be'ton