

철근 콘크리트 기둥과 철골 보 접합부의 거동 평가를 위한 해석적 연구

The Analytical Study on the Structural Performance of Beam-Column Connections of RC Column and Steel Beam

홍성현* 한상환** 류천*** 이리형****
Hong, Seong-Heon Han, Sang-Whan Ryu, Cheon Lee, Li-Hyung

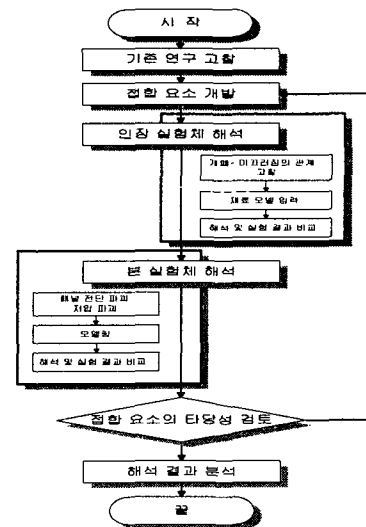
ABSTRACT

The three-dimensional nonlinear analysis on the partial tension experiment of Beam-Column connections in hybrid connections with RC columns and S beams is simulated. In this paper, mechanical characteristics between steel plates and concrete is investigated. Also the stress transfer mechanism prior to beam-column connection analysis was considered by using joint element.

1. 서 론

혼합 구조는 서로 다른 종류의 구조 부재를 혼합하여 구축된 형식으로서 철골을 매립한 철골 철근 콘크리트 구조, 콘크리트 충전 강관 구조, 철근 콘크리트 기둥과 철골 보의 혼합 구조 등의 연구가 진행되고 있다. 이 중 철근 콘크리트 기둥과 철골 보의 혼합 구조는 압축력에 강한 철근 콘크리트 부재와 휨과 전단력에 강한 철골 부재의 특성에 맞게 각각 기둥과 보로서 역할을 하게 된다. 이런 형식은 재래의 철골 구조에 비하여 접합부의 가공이 단순하고 용접 작업량이 적을 뿐만 아니라 고가인 철골의 양을 줄이는 이점을 가지고 있다. 또한 재래의 철근 콘크리트 구조에 비하여 보의 철근량, 거푸집 양을 절감할 수 있고, 작업의 다원화가 이루어져 공기가 단축되는 이점을 가지고 있다. 그러나 접합부에서의 응력 전달 기구가 충분히 설명되지 못하고 있다.

본 연구에서는 3차원 비선형 해석을 통하여 개발된 접합부에서의 부분 인장 실험에 대한 해석을 통하여 접합부에 대한 응력 전달과 콘



<그림 1> 연구의 흐름도

* 한양대학교 건축공학과 석사과정
** 한양대학교 건축공학과 전임강사
*** 동부건설기술연구소 과장
**** 한양대학교 건축공학과 교수

크리트와 강판 사이의 역학적 특성을 파악하고, 접합부 해석에 앞서 기초적인 해석을 제공하는데 목적이 있다. <그림 1>에 본 연구의 흐름도를 나타내었다.

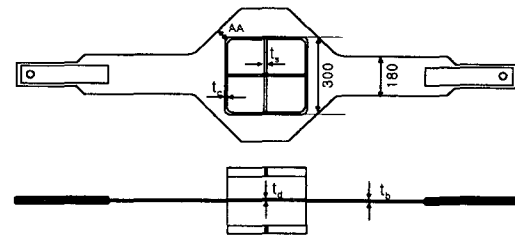
2. 해석 대상 실험체

<그림 2>에 해석에 사용된 실험체 형상을, [표 1]에 실험체 제원을 나타내었다. 부분인장 실험체중에서 기준실험체를 중심으로 십자형 중판 두께(A 그룹)와 다이아 프레임의 취약 단면 폭(B 그룹)을 갖는 두그룹으로 나누어 해석하였다. 본 해석에 사용된 실험체는 기둥이 보를 관통하는 “기둥 관통” 방식 접합부의 부분인장 실험체이다.

실험체 가력은 만능 시험기를 이용하여 단순인장 방법으로 하였다

[표 1] 부분 인장 실험체의 제원

실험체명		AA	t_c	t_d	t_b	t_s
A	D1-C1-B1	25.5	9	9	9	9
	D1-C1-B0	25.5	9	9	9	-
	D1-C1-B2	25.5	9	9	9	6
B	D0-C1-B1	-	9	-	9	9
	D2-C1-B3	43.5	9	9	9	9



<그림 2> 실험체의 형상

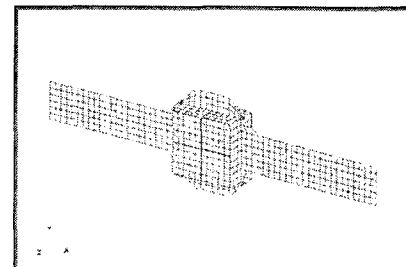
3. 재료모델 및 해석 방법

3.1 해석 방법

본 해석에서는 반복 가력 접합부 실험에 앞서 부분 인장 실험체에 대한 강판과 콘크리트 사이의 개폐와 미끄러짐의 영향을 평가하기 위해서 다음의 두 가지 경우를 고려하였다. 첫 번째는 강판과 콘크리트 사이가 완전 부착인 경우이고, 두 번째는 개폐와 미끄러짐을 고려한 경우로 나누어서 해석을 행하였다. 해석프로그램은 범용 유한 요소 해석 패키지인 ABAQUS Version 5.6을 사용하였다. <그림 3>에 실험체의 요소 분할도를 나타내었고, 가력점은 보 플랜지의 오른쪽 단부에 가하였다. 또한 우측 단부의 자유도 x,y,z를 구속하였고,

[표 2] 재료 인장 시험 결과

재료 구분	강 판		강 판	콘크리트
	6mm	9mm	9mm	
탄성계수 (t/mm^2)	18.65	19.85	18.1	2.35
항복응력 (t/mm^2)	0.0292	0.0271	0.0381	0.00227



<그림 3> 요소 분할도

[표 2]에 부분 인장 실험에 대한 재료 인장 시험 결과를 나타내었다. 재료 모델에 관한 특성은 재료 시험에 근거하며 다음과 같이 적용하였다.

3.2 콘크리트와 강판의 접촉면에 대한 역학적 특성

강판과 콘크리트 사이의 응력 전달 특성은 Yonezawa 등¹⁾의 연구를 바탕으로 강판과 콘크리트 사이의 개폐 및 접촉면에 작용하는 수직 방향의 응력에 영향을 주고 압축력의 영향을 받을 때에는 마찰 저항을 초과하지 않는 범위에서 접촉면에 대해 평행 방향에 전단력을 전달하는 것이 가능하다. 이 접촉면의 최대 전단 응력(τ)은 수직 응력(σ_n)의 함수로서 다음식으로 표현할 수 있다.

$$\tau = \mu \sigma_n \quad (1)$$

여기에서, μ 는 마찰 계수이다.

접촉면에 대한 수직 방향의 응력이 압축일 경우에는 그 접촉면에 수평 방향의 전단 응력이, 최대 부착력 및 (1)식에서 나타난 한도를 초과한 경우에는 그 한도까지 응력을 부담하고 나머지는 풀어주었다.

위에서 말한 것을 고려하여 콘크리트와 강판사이의 역학적 특성을 아래에 나타내었다.

① 강판에 대한 수직 방향의 개폐 거동($\sigma_n - S_n$)

강판에 대해 수직 방향의 개폐 거동은 압축을 받는 경우와 인장을 받는 경우로 분류하여 고려하였다. σ_n 이 인장력을 받는 경우에는 최대 부착력(약 $0.04F_c$)까지는 일정 강성으로 가정하고 그 한도를 초과하는 경우에는 0이라 가정하였다. 또한, σ_n 이 압축력을 받는 경우 무한대에 가까운 강성값을 갖는 다고 가정하였다.

② 강판에 대한 수평방향의 응력-미끄러짐 관계($\sigma_t - S_t$)

일정 강성을 갖고, σ_t 가 최대 부착력($0.04F_c$)에 도달할때까지 선형으로 가정하고 그 이후에는 강판에 대한 수직 방향의 응력(σ_n)이 압축력을 받는 경우 일정한 강성을 갖고 마찰 계수를 0.65로 해서 $\sigma_t > 0.65 \sigma_n$ 에 달하면, $\sigma_t = 0.65 \times \sigma_n$ 으로 가정해서 과잉 응력을 풀어주고 σ_n 이 인장응력을 받는 경우에는 σ_t 를 0으로 가정하였다.

여기에서 마찰계수 및 부착 강도는 기존 연구²⁾의 결과를 이용하였다.

3.3 강판

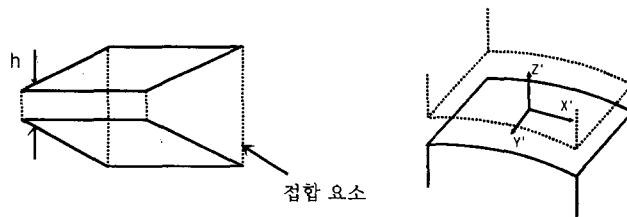
4절점 평판 쉘 요소를 사용하였으며, 탄성계수(E_s), 포아송비(ν), 항복강도(σ_y) 및 최대 인장 강도(σ_u)값을 실제 재료 실험에서 얻은 데이터 값을 입력하였고, 인장과 압축에서 동일한 거동을 하는 응력도-변형도 관계로 가정했다.

3.4 콘크리트

8절점 솔리드 요소가 사용되었으며, 부분 인장 실험에서는 콘크리트에 인장력이 작용하지 않고 미미한 압축력만이 존재하므로 압축력에 대해 탄성거동으로 가정하였다. 여기서 탄성계수(E_c)는 재료시험에 의해 얻어진 값을 이용하였고, 포아송비(ν)는 0.15 ~ 0.2의 범위인데 일반적으로 사용하는 0.167을 사용하였다.

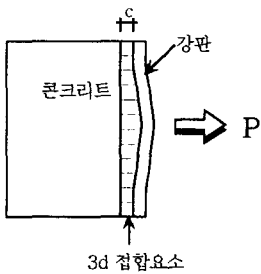
3.5 접합요소(Joint Element)

콘크리트와 강판사이의 응력전달 및 상호관계를 실제 상황과 가깝게 나타내기 위하여 3차원 해석기법을 이용하였다. 위에서 설명한 콘크리트와 강판의 접촉면에 대한 역학적 특성을 바탕으로 접합 요소는 강판과 콘크리트 절점 사이에 존재한다고 가정하였다.(그림 4) 일반적인 솔리드 요소에서 요소내 임의의 위치에 작용한 응력은, 면에 수직 방향의 응력 3성분($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$)과 면에 평행한 방향의 전단응력 3성분($\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$)의 6성분으로 구성된다. 이 6성분은 요소의 재료 특성을 표현하는 구성방정식을 나타낸다. 그러나 접합 요소에서는 두 경계면에 삽입된 요소의 두께가 얇기 때문에 경계면에 수직방향의 응력(σ_n)과 평행방향의 2성분의 전단응력($\sigma_{t,2}$)으로 구성된 3성분을 이용하여 강성과 응력을 계산하였다.

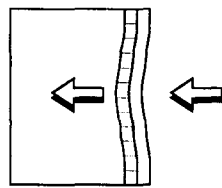


<그림 4> 접합 요소의 개념

이 접촉면의 거동을 모델링을 하기 위하여 3D 접합 요소를 사용하였으며 압축을 받을 때는 응력이 콘크리트로 전달되고, 강판이 일정 하중 이상의 인장시에는 단지 강판만이 인장 저항하도록 하였다. 거동을 모델링하기 위하여 <그림 5>와 같이 3D 접합요소(inter4)를 사용하였다. 이 접합요소는 <그림 6>과 같은 이격거리(clearance)와 압력(pressure)의 상관 관계로 강판과 콘크리트의 사이의 처음 이격 거리를 C라 두었을 때부터 하중을 받기 시작해서, 둘 사이의 거리가 0이 되었을 때, P_0 의 힘을 받는 메카니즘을 갖는다. 또한 마찰에 있어서는 마찰 계수 μ 와 최대 전단 응력을 고려하여 미끄러짐에 대해 거동을 한다.

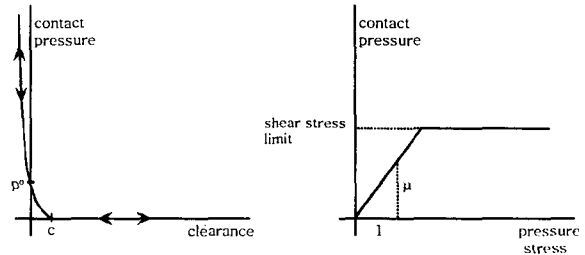


(a) 인장력을 받는 경우



(b) 압축력을 받는 경우

<그림 5> 3d 접합 요소의 거동



<그림 6> 3d 접합 요소의 메카니즘

또한 3d 접합 요소의 두께는 solid 요소의 어느 한 부분의 폭, 길이, 높이 중 최소 치수의 1/100을 넘을 수 없는 제한 조건과 Noguchi³⁾의 기초 해석을 통하여 두께가 0.1mm 이상일 경우에는 안정적이라는 제한에 따라 0.5mm로 가정하였다.

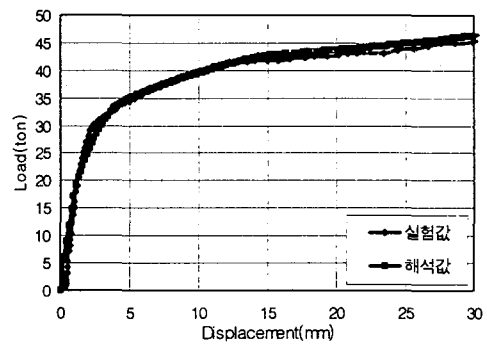
4. 비선형 해석 결과

4.1 해석 결과

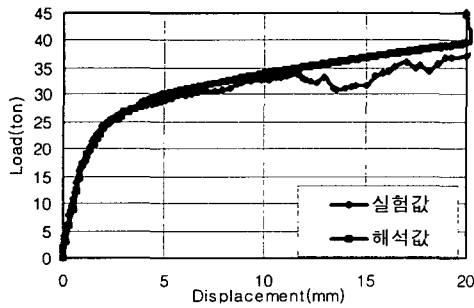
전 단계에서 채택한 접합 요소를 가지고 부분 인장 실험체에 대한 비선형 해석을 행하였다. <그림 7>에 실험값과 해석값의 하중-변위 곡선을, [표 3]에 실험과 해석에서 나타난 항복 하중값을 비교하여 나타내었다. 기준 실험체인 D1-C1-B1의 결과를 보면, 강성과 항복하중이 거의 일치한 것을 알 수 있다. D2-C1-B3 실험체는 강성은 잘 일치하고 있으나, 항복 하중에서 오차를 나타내고 있다.

[표 3] 부분 인장 실험체의 해석값과 실험값 비교

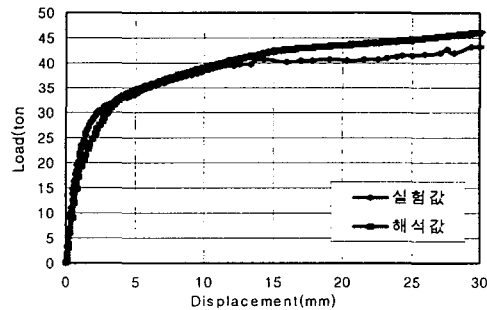
실험체명	해석값(P _A) ton	실험값(P _E) ton	비교 (P _A /P _E)	
D1-C1-B1	32.43	32.93	0.98	
A	D1-C1-B0	27.26	26.95	1.02
	D1-C1-B2	32.06	31.55	1.02
B	D0-C1-B1	17.82	16.63	1.07
	D2-C1-B3	36.94	38.92	0.95



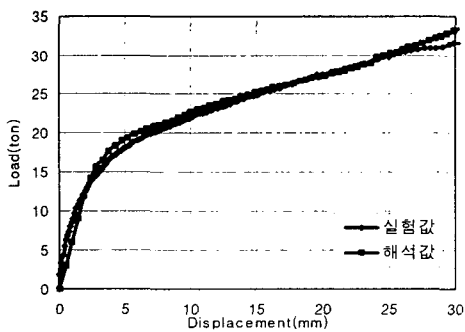
(a) D1-C1-B1 실험체



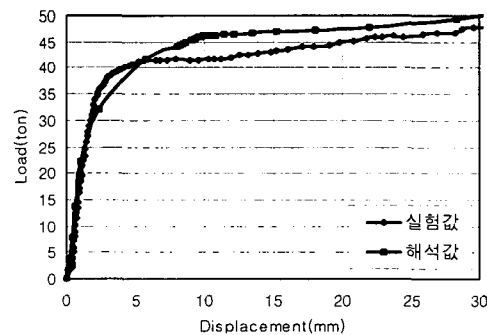
(b) D1-C1-B0 실험체



(c) D1-C1-B2 실험체



(d) D0-C1-B1 실험체

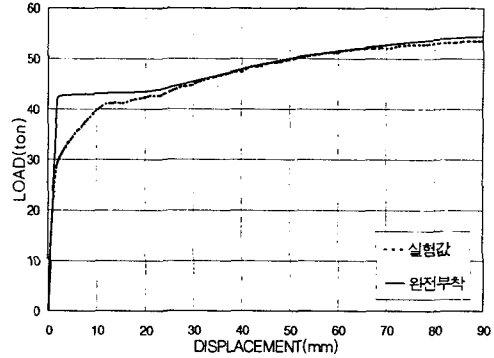


(e) D2-C1-B3 실험체

<그림 7> 해석결과와 실험결과 비교

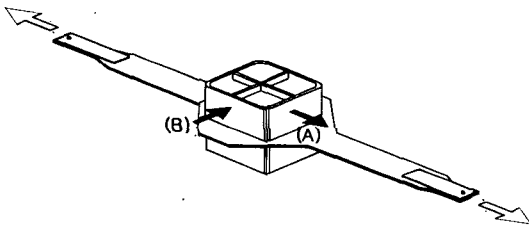
4.2 완전 부착과 접합 요소의 비교

<그림 8>에 기준 실험체(D1-C1-B1)를 완전 부착상태로 한 해석 결과와 실험 결과를 나타내었다. 그림에서 보면 강성과 최대 내력은 거의 일치해 보이고 있으나, 항복 내력은 완전 부착상태로 해석한 값이 높게 나왔다. 이것은 콘크리트와 각형 강관의 절점을 공유하여 강관과 콘크리트가 일체가 되어 각형 강관의 변형이 콘크리트에 구속되어 항복내력이 상승한 것으로 생각된다.

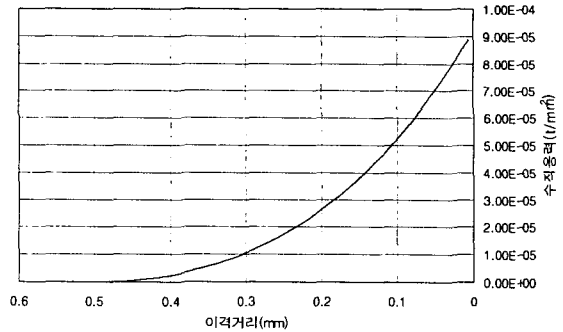


4.3 접합 요소의 응력 분포

<그림 9b>는 기준 실험체에서의 각형 강관과 콘크리트의 접합 요소중 압축력을 받는 부분(B)의 응력 분포를 보여준다. <그림 9a>에서 (A)부분은 인장력을 받는 곳이므로 앞에서 가정한 대로 접합 요소의 이격거리(clearance)만 늘어나고 경계면에 수직인 방향의 응력이나, 평행한 방향의 응력은 모두 0이다. 하지만 (B) 부분은 (A)부분이 늘어남에 따라 (B)부분에 압축력이 작용하므로 <그림 9b>와 같이 이격거리가 좁아질수록 더 큰 응력을 받게된다.



(a)



(b) B 부분의 수직 응력

<그림 9> 접합 요소의 응력

5. 결론

- (1) 본 해석에 사용된 접합 요소는 강관과 콘크리트 사이의 응력 전달 관계를 잘 나타내고 있으므로 축소 모델의 해석시에도 이 접합 요소를 적용할 수 있다고 사료된다.
- (2) 완전 부착으로 해석한 경우 강성이 일치하나 접합 요소를 사용하였을 경우에는 강성에서의 약간의 오차를 보이고 있다. 따라서 접합 요소의 강성에 대한 더 많은 고려가 있어야 될 것으로 생각된다.

(3) 부분 인장 실험체에 충전된 콘크리트는 접합 요소를 사용한 해석결과로 볼 때 압축력에 의한 미미한 영향이 있음을 알 수 있다.

6. 참고 문헌

- 1) 米澤健次, 吉川秀章, 大矢俊樹, 野口 博, “有限要素法を用いたプレートコンクリート構造の十字型柱のせん断耐力に関する研究” 日本建築學會論文集 1994年 6月
- 2) 日本コンクリート工學協會, “混合構造委員會報告書”
- 3) K. Yonezawa and H. Noguchi, “Analytical Study on the Shear Performance of Beam-Column Connections in Hybrid Structures” JAPAN CONCRETE INSTITUTE VOL 16, 1994
- 4) 유영찬, “콘크리트 충전 각형강관 구조의 거동에 관한 연구”, 한양대학교 박사 학위 논문 1997년 6월

감사의 글

본 연구를 지원한 한양대학교 초대형 구조 시스템 연구 센터와 (주)동부 건설 기술 연구소에 감사를 표한다.