

고강도 콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부의 강도 및 변형

Strength and Deformation of Exterior HSC Column-Steel Beam Joints

조 순 호* 선 성 규**
Cho, Soon Ho Sun, Seong Gyu

국문요약

전편의 실험적 연구에 이어서, 기 수행된 4개의 외부 접합부 시험체에 현존하는 여러 강도 예측식을 사용하여 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 내진성능을 결정하는 패널전단 및 지압강도를 평가하였다. 또한, 접합부 패널지역의 변형특성을 묘사할 수 있는 일련의 스프링을 사용한 macro 형태의 해석모델이 논의되었으며, 이에 따라 Dram-2DX 및 IDARC 등의 상용프로그램을 사용하여 접합부의 패널전단 및 지압 파괴형태의 변형을 포함하는 단순해석이 수행되었다. 강도 예측결과에 의하면 본 연구에서 제시하는 수정된 내부 콘크리트 패널전단 강도식을 포함하고 있는 ASCE 방법이 실험결과에 가장 근접한 것으로 나타났으며, 본 연구에서 검토된 패널지역 변형을 고려한 단순해석모델은 향후 전체 건물해석에 사용할 수 있는 것으로 판단되었다.

주요어 : 보-기둥 접합부, 압축 스트럿, 접합부의 변형, 지압 파괴, 패널전단 파괴, 콘크리트 전단강도, 해석모델

ABSTRACT

Further to the companion paper that treats a experimental programme carried out as part of this research, the panel shear and bearing strengths determining the seismic resistance of reinforced high-strength concrete column-to-steel beam connections are evaluated by utilizing several existing methods for four tests of exterior beam-column joints described previously. The analytical approach to model the joint deformation based on a series of springs is also examined. Numerous analyses incorporating the deformation characteristics of panel shear and bearing in the joint region are demonstrated using fairly simple connection models with the commercial packages such as Drain-2DX and IDARC. The results of prediction in strength indicated that the ASCE method with the modified contribution of compression struts for inner panels proposed herein is the most accurate. It is further considered that the analytical model presented including the joint flexibility can be used for the future overall building analyses.

Key words : beam-column joint, compression strut, joint flexibility, bearing failure, panel shear failure, concrete shear contribution, analytical model

1. 서 론

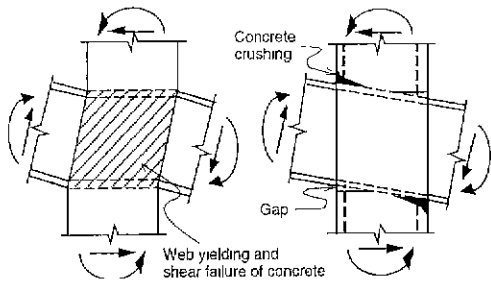
구조적 성능, 공사비 및 공간계획 측면에서 콘크리트 기둥-강재 보로 구성된 합성골조의 우수성이 점차로 인식되어 감에 따라, 지난 15년 동안 미국 및 일본에서는 이에 대한 수많은 접합

부 실험이 수행되었으며, 그 결과로 3차원적인 복잡한 거동을 나타내는 합성 접합부의 내부용력 전달 기구에 대한 이해가 어느 정도 가능하게 되었다.⁽¹⁾⁽⁴⁾ 그러나, 본 연구에서 취급하고자 하는 강재 보가 콘크리트 기둥을 직접 관통하는 형태(*beam through*)의 접합부에 관한 연구는 최근에 이르러서야 비로소 활발해지기 시작하였다. 제한된 연구결과에 의하면 강재 보가 콘크리트 기둥을 관통하는 접합부의 파괴형태는 그림 1과 같이 i) 패널 전단파괴(*panel shear*

* 경희원 · 평주대학교, 건축학부, 교수

** 평주대학교, 건축학부, 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 12월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다



(a) Joint panel shear failure (b) Joint bearing failure

그림 1 접합부의 파괴형태⁽⁷⁾

failure) 및 ii) 지압파괴(bearing failure) 등의 2 가지로 구분할 수 있는데, 패널 전단파괴는 일반 콘크리트 혹은 철골 접합부의 파괴형상과 유사하여 강재 웨브의 항복 및 콘크리트 스트럿 혹은 트러스 작용에 의한 전단파괴를 의미한다. 반면에, 지압파괴는 지렛대 기구(lever mechanism)에 근거하여 강재 보가 강제운동을 수행할 시 강재 보 상, 하면의 콘크리트에 압축력이 작용하여 나타나는 파괴(crushing) 형태이다. 하지만, 실제로는 패널 전단형 파괴가 주된 형태일지라도 이질 재료 및 단면형상이 연결되는 합성 접합부의 특성상 지압형태의 파괴도 어느 정도 동반하여 최종적으로는 이들 두 기구의 혼합형태를 취하게 되지만, 이들을 각각 독립적으로 고려함으로써 접합부의 강도 및 변형 특성을 좀 더 자세히 이해하고 정량화 시킬 수 있다.

현재까지, 이들 파괴기구로부터 정의된 내, 외부 응력의 평형조건으로부터 다양한 상세를 갖는 접합부의 강도를 예측할 수 있는 일련의 관계식들이 제시된 적이 있으나, 이러한 강도 예측식에 있어서 아직까지도 많은 논란의 대상이 되고 있는 부분은 i) 패널전단형 파괴의 경우 내부 콘크리트 패널의 기여 강도 및 ii) 지압형 파괴의 경우 여러 조건에 따른 지압강도를 어떻게 정확히 결정하느냐 이다. 물론 전자의 경우는 종래의 콘크리트 보-기둥 접합부에도 아직 미 해결된 문제이기도 하다.

접합부의 변형에 관한 연구는 강도 모델에 비해서는 매우 제한적이지만, 단조하중하의 패

널지역의 변형특성을 정의하는 몇몇 관계식들이 제시된바 있다.⁽⁵⁾ 그러나, 실제적으로 이러한 모델을 사용하여 이력거동을 예측하거나 전체 건물해석을 수행한 적은 아직 없다. 따라서, 본 연구는 전술한 강도식을 사용하여 본 연구의 일환으로 이미 수행된 4개의 접합부 실험결과⁽⁶⁾를 예측하고 관련식의 타당성 및 문제점을 파악하고자 하며, 또한 단순한 접합부 모델링을 포함하여 보-기둥 시험체의 이력거동을 예측하고자 한다. 본 연구의 실험부분에서는 4개의 2/3 크기, 콘크리트 기둥-강재 보 T형 부분 구조체를 제작하여 유사정적 실험을 수행하였으며, 주요 실험변수는 패널지역에 후프근이 전혀 배치되지 않은 경우(CF1), 콘크리트만의 전단강도 발현을 유도한 접합부 상세(CF2), 2가닥이 배치된 경우(CF3), 강재 보 플랜지 상하부에 스테드 형태의 전단키를 사용한 상세(CF4) 등이다. 이에 관한 자세한 내용은 본 연구의 실험부분을 다루고 있는 전편 논문에서 기술하고 있다.⁽⁶⁾

2. 강도

2.1 지압강도

콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 지압파괴는 크게 주근 항복 및 강재 플랜지가 접촉하는 콘크리트 상, 하면의 파괴로 나눌 수 있으며, 외부 패널지역에 위치하는 콘크리트의 파괴는 부착 및 전단파괴로 또 다시 분류할 수 있다. 그림 2는 지압파괴 발생 시 예상되는 접합부의 자세한 응력상황을 표시하고 있다. Part I은 접합부에 근접한 기둥지역을 나타내며, Part II는 강재보를 포함하는 내부 접합부 패널지역을, Part III는 외부 접합부 패널지역을 각각 의미한다. 따라서, 이러한 응력조건으로부터 전술한 여러 파괴형태를 구분하는 기본 방정식을 평형조건으로부터 유도해낼 수 있다. 아래의 식들은 각각 ASCE^{(5),(7)}, Mattock⁽⁸⁾ 및 Nishimura⁽⁹⁾가 제안하는 보 단부에서의 전단내력을 표시하는 예측식들이다. 본래

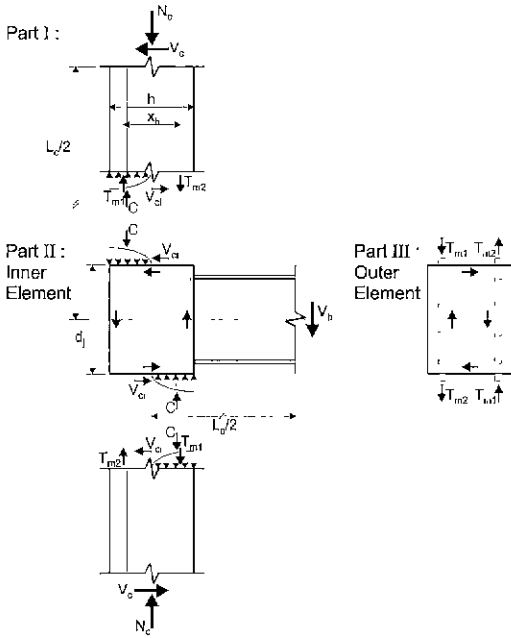


그림 2 지압파괴 응력상황

Mattock의 방법은 프리캐스트 콘크리트 벽체 및 기둥에 묻혀 있는 강제 브라켓을 설계하기 위하여 개발되었으나 ASCE 방법과 유사한 응력조건에 근거하고 있으며, 반면에 Nishimura의 방법은 다른 두 방법과는 달리 기둥의 주근 및 축력의 영향을 고려하고 있다. 각 방법은 접합부의 기하학적 조건을 정의하는 접합부의 유효폭 및 춤 등이 접합부 상재에 따라 약간씩 상이하나, 본 연구에서는 이들 방법의 직접적인 비교를 위하여 ASCE에서 제시하는 값을 일률적으로 적용하였다.

$$\begin{aligned}
 V_{bmax}^{ASCE} = & \frac{L_c}{L_b(L_c - 1.25d)} \left[2 \cdot \left(1 - \frac{\beta_1}{2}\right) \frac{h}{2} \right. \\
 & \cdot 0.85f_y\beta_1 \frac{h}{2} b + 1.25d(1.05\sqrt{f'_c} \cdot 0.1b_c h \\
 & \left. + \frac{A_{sh}f_{ysh}0.9h}{s_h}) + 0.42A_{sh}f_{ysh}n_{sh} \cdot x_b \right] \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 \beta_1 = & 1 - \frac{0.4}{1.78 - 0.0047f'_c + 1.63p'_{bh}} \\
 f_y = & (1.31 - 0.005f'_c)f'_c
 \end{aligned}$$

$$+ 1.5 \frac{(b_c - b)}{b} \sqrt{f'_c} + 0.85p'_{bh}f'_c$$

$$p'_{bh} = \left(\frac{A'_{bh}}{0.425bh} \right) \frac{f_{ybh}}{f'_c}$$

또한, b_c, h 는 기둥의 폭 및 전체 춤, b, d 는 강제 보의 폭 및 춤, L_c, L_b 는 전체 기둥 및 보의 길이, A_{sh} 는 패널지역에 배치된 후프근량, A'_{bh} 는 보 플랜지로부터 0.7h 이내에 있는 후프근의 량을 각각 의미한다. s_{sh}, n_{sh} 는 접합부내 후프근의 간격 및 단면을 완전히 가로지르는 타이근의 수, f_{ysh}, f'_c 는 이들의 항복강도 및 콘크리트의 강도 (MPa 단위), x_b 는 기둥에 배치된 주근 사이의 거리를 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 V_{bmax}^{Mattock} = & \frac{1}{L_b} [0.85 \left(\frac{b_c}{b}\right)^{0.66} f'_c \\
 & \cdot b \cdot \beta_1 \cdot \frac{h^2}{4} (2 - \beta_1)] \quad (2)
 \end{aligned}$$

여기서

$$\beta_1 = 0.85 - 0.00725(f'_c - 27.6), \quad 0.65 \leq \beta_1 \leq 0.85$$

$$V_{bmax}^{Nishimura} = \frac{M_c}{L_b} \quad (3)$$

$$m_c = M_c / (b_c h^2 f'_c), \quad n_c = N_c / (b_c h f'_c),$$

$$\rho_{sm} = \frac{A_{sm} f_{ysm}}{b_c h f'_c}$$

$$-2\rho_{sm} \leq n_c \leq -2\rho_{sm} + 0.75b/b_c \quad \text{일때,}$$

$$m_c = \frac{(n_c + 2\rho_{sm})}{2} \left[1 - \frac{2(n_c + 2\rho_{sm})b_c}{3b} \right]$$

$$-2\rho_{sm} + 0.75b/b_c \leq n_c \leq 0.75b/b_c \quad \text{일때,}$$

$$m_c = \frac{3b}{16b_c}$$

$$0.75b/b_c \leq n_c \leq 1.5b/b_c \quad \text{일때,}$$

$$m_c = \frac{n_c}{2} \left[1 - \frac{2b_c n_c}{3b} \right]$$

여기서 M_c , N_c 는 기둥에 작용하는 모멘트 및 축력을 의미하며, A_{sm} , f_{ysm} 은 기둥에 배치된 주근의 전체 단면적 및 항복강도이다.

2.2 패널 전단강도

패널 전단파괴와 관련하여 접합부의 내부 및 외부 패널지역에 발생하는 응력상황은 그림 3과 같다. 내부 패널지역의 응력은 i) 강제 플랜지의 frame 작용, ii) 강제 웨브의 항복 및 iii) 콘크리트의 압축 스트럿 작용 등의 전달기구에 의하여 지지되며, 또한 여기에 상, 하부 보 플랜지에 배치된 전단키(shear key)의 유무에 따라 외부 콘크리트 패널지역에 발생하는 트러스 작용에 의한 전단력이 추가된다. 지압파괴의 경우와 마찬가지로, 주어진 응력상황에 대한 평형조건으로부터 각 요소의 파괴강도에 해당하는 일련의 식들을 보 단부에서 작용하는 전단력으로 표시할 수 있다. 아래 식들은 각각 ASCE⁽⁵⁾⁽⁷⁾, AIJ-SRC 및 수정된 AIJ-SRC⁽¹⁰⁾, Sakaguchi⁽¹¹⁾가 제안하는 보 단부에서의 전단내력 예측식들이다.

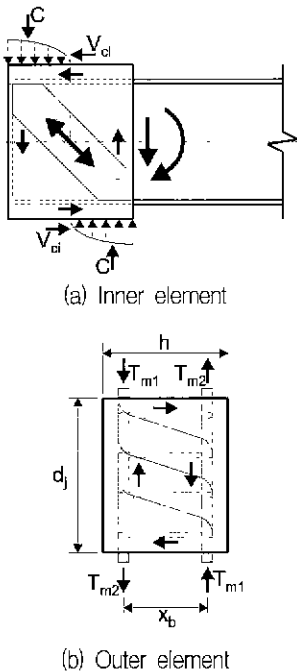


그림 3 패널 전단파괴 응력상황

본래 AIJ-SRC 식들은 강재 기둥이 콘크리트에 묻혀있는 합성기둥과 철골보의 접합부 설계를 위하여, 또한 Sakaguchi의 식들은 콘크리트 기둥을 감싸는 강제 covering plate를 갖는 중량형 상재를 갖는 접합부의 설계를 위하여 개발되었으므로, 본 연구에서 취급하는 접합부에 적용하기 위해서는 각각에 해당되는 계수 및 식을 조정할 필요가 있다.

$$ASCE V_{pmax} = \frac{0.9d}{(L_b - 0.5k)} \left[\frac{w f_{yw} \cdot 0.8h}{\sqrt{3}} + \frac{t^2 f_{yf} b}{d_f} + 1.65\sqrt{f'_c} b h + 1.05\sqrt{f'_c} \cdot 0.1 b_c h + \frac{A_{sm} f_{ysm} 0.9k}{s_h} \right] \quad (4)$$

여기서, w , t 는 웨브 및 플랜지의 두께, d_f 는 플랜지 중심간 거리, f_{yw} , f_{yf} 는 이들의 항복강도 (MPa 단위)이다.

$$AIJ-SRC V_{pmax} = \frac{1}{(L_b - 0.5x_b) - d_f \frac{L_b}{L_c}} \left[\frac{1.2}{\sqrt{3}} \cdot w d \alpha_b \cdot f_{yw} + 0.5 b_c d \alpha_b (1.76 + 0.036 f_c) + \frac{0.5 b_c d \alpha_b A_{sh} f_{ysm}}{b_c s_h} \right] \quad (5)$$

여기서, x_b 는 기둥에 배치된 주근 사이의 거리이다.

$$Modified AIJ-SRC V_{pmax} = \frac{1}{(L_b - 0.5x_b) - d_f \frac{L_b}{L_c}} \left[\frac{1.2}{\sqrt{3}} \cdot w d \alpha_b \cdot f_{yw} + b d \alpha_b (1.76 + 0.036 f_c) + \frac{(b_c - b) d \alpha_b \cdot 0.5 A_{sh} f_{ysm}}{b_c s_h} \right] \quad (6)$$

$$Sakaguchi V_{pmax} = \frac{1}{(L_b - 0.5x_b) - d_s \frac{L_b}{L_c}} \left[\frac{0.9}{\sqrt{3}} \cdot w d_s f_{yw} + 0.9 \left(\frac{1.45}{b_c/b} + 0.32(h/d) - 0.36 \right) \cdot 0.3 f_c \cdot b_c \cdot d_s \right] \quad (7)$$

여기서, d_s 는 탄성 인장 및 압축응력의 중심 거리이다.

2.3 실험결과와의 비교

본 연구의 일환으로 제작되고 실험이 수행된 4개의 외부 접합부 시험체⁽⁶⁾의 패널전단 강도를 예측하기 위하여 전술한 i) ASCE 방법^{(5),(7)}, ii) AIJ-SRC 방법⁽¹⁰⁾, iii) 수정된 AIJ-SRC 방법⁽¹⁰⁾ 및 iv) Sakaguchi⁽¹¹⁾ 방법이 사용되었으며, 또한 지압강도를 예측하기 위해서는 i) ASCE 방법^{(5),(7)}, ii) Mattock⁽⁸⁾ 방법 및 iii) Nishimura⁽⁹⁾ 방법 등이 사용되었다. ASCE 방법은 패널의 전단내력을 정의하기 위하여 식 (4)와 같이 각 요소의 기여분을 명확하게 표시하는 일련의 관계식을 제시하고 있는데 반하여, 다른 방법들은 보다 실험적으로 유도된 계수를 포함하는 축약된 형태를 취하고 있다. 본래, AIJ-SRC 방법은 erection 기둥을 갖는 합성골조를 대상으로 하고 있으며, Sakaguchi 방법은 기둥 주위에 covering plate를 갖는 접합부의 강도 예측을 위하여 개발되었으므로 식 (7)에서 보는 바와 같이 후프근의 기여는 고려하고 있지 않다. 지압파괴를 정의하는데 있어서 Mattock의 방법은 지렛대 기구에 근거하고 있으며 식 (2)에서 보는 바와 같이 후프근의 구속효과 및 기둥에 동시에 작용하고 있는 전단력의 영향을 무시하고 있다. 또한, Nishimura의 방법은 식 (3)과 같이 축력의 영향을 고려하고 있으며, 최종적으로는 모멘트 및 축력의 상관관계를 설정하여 지압내력을 결정하고 있다.

한편, Elshami⁽¹²⁾ 등은 고강도 콘크리트 보-기둥 접합부 패널지역의 전단강도를 산정하는데 있어서 현재의 ACI-ASCE⁽¹³⁾ 강도식을 사용할 경우 과대 평가하는 경향을 나타낸다고 보고하고 있으며, 아래와 같은 수정식의 사용을 제안하였다. 또한, 후프근량을 산정하는데 있어서도 콘크리트 강도에 따라 비례하는 기존의 식을 사용할 경우 매우 큰 량이 요구되므로 접합부에 작용하는 전단응력 및 기둥과 보의 휨 강도

비에 따라 식을 재조정할 것을 요구하고 있다.

$$V_{bc} = \frac{\gamma}{12} (\sqrt{41.3} + 0.43 \sqrt{f'_c - 41.3}) bh \quad (8)$$

($\gamma = 15$)

여기서 γ 는 접합부 종류 및 기하적 조건에 따른 전단계수이다.

상기 식과 관련하여, 합성골조에 대한 ASCE 혹은 Kanno⁽⁷⁾가 제시하고 있는 압축 스트럿에 의한 콘크리트 내부요소의 전단 강도식은 일부 고강도 콘크리트 접합부 실험을 포함하고 있음에도 불구하고 종래의 계수를 채택하고 있으므로 이의 타당성에 대한 검토가 요구된다. 따라서, 본 연구에서는 본래의 계수뿐 만 아니라 고강도 콘크리트의 영향을 고려하는 식 (8)에 의한 보정계수를 사용하여 콘크리트 내부요소의 전단내력을 평가하였다. 이렇게 할 경우 식 (4)의 콘크리트 내부패널의 전단응력식은 $1.65\sqrt{f'_c}$ 에서 $1.18\sqrt{f'_c}$ 으로 감소된다. Table 1은 기 실험된 4개의 시험체에 대하여 ASCE 방법에 의하여 예측된 지압 및 패널 전단파괴의 내, 외부 접합부 요소별 지지능력을 나타내며, Table 2는 전술한 여러 방법에 의하여 예측 값들을 서로 비교하고 있다. 패널 전단강도는 $1.18\sqrt{f'_c}$ 을 고려한 ASCE 방법이 실험결과에 가장 근접하고 있으며, AIJ-SRC 방법도 간편한 형태를 취하고 있는데 반하여 상당히 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 알 수 있다. 반면에, 수정된 AIJ-SRC 방법은 패널 전단강도를 상당히 과대 평가하고 있는데, 이는 실험적으로 결정된 식 (6)의 2번째 항이 과도하게 포함되어 있기 때문이다. 한편, 지압파괴 강도예측에 있어서 Nishimura 방법은 다른 2방법에 비해 상당히 안전측의 결과를 나타내고 있는데, 이는 후프근의 영향을 고려하지 않았을 뿐 더러 기본적으로 콘크리트의 지압강도를 적게 포함하고 있기 때문이다($1.5f'_c$).

3. 변 형

일반적인 구조물의 해석에는 접합부의 변형

을 무시하는 것이 보통이지만, 때때로 접합부의 변형이 구조물의 전체거동에 큰 영향을 미치는 경우가 있다. 이러한 이유에서 지난 수 십년 동안 콘크리트 및 특히, 철골구조에서는 접합부의 변형을 고려하기 위한 여러 접근방법이 제시되었다.⁽¹³⁾ 콘크리트 구조는 휨-모멘트 위주의 소성힌지(flexural plastic hinge)만을 유도하여 이를 통한 에너지 소산방식을 채택하고 있으나, 이와는 달리 철골구조는 휨 혹은 전단에 대하여 모두 우수한 에너지 흡수능력을 보유하고

있으므로 각각의 경우에 적합한 형태의 파괴모드를 경우에 따라 선택할 수 있다. 오히려, 철골 구조에 있어서는 전단위주의 에너지 소산형태(shear plastic hinge)가 휨 위주의 에너지 소산 형태보다 에너지 흡수능력이 우수한 것으로 인식되고 있다. 이러한 이유에서 전단 위주의 에너지 소산방식은 곧바로 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 패널지역에 전단형 소성힌지를 허용할 수 있는 것이다.

현재까지, 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의

Table 1 Predicted joint strengths for test specimens

Specimen No.	Failure mode	Maximum strengths observed		Components of shear resistance at joint							test/theory
		Positive cycle V_{max}^* (kN)	Negative cycle V_{max}^* (kN)	Joint bearing failure			Panel shear failure				
				Outer element V_{bo} (kN)	Inner element V_{bi} (kN)	V_{dirmax}^* (kN)	Outer element V_{po} (kN)	Inner concrete V_{pc} (kN)	Inner steel V_{pis} (kN)	V_{pmax}^* (kN)	
CF1	Beam, panel shear	124.9	134.8	0	776	130	0	420 (295)**	257	156/127**	0.834 /1.023*
CF2	Beam, panel shear	104.6	108.3	0	776	130	0	420 (295)**	74.4	114/85**	0.934 /1.253*
CF3	Beam, panel shear	159.5	112.7	87.4	946	157.3	87.4	420 (295)**	257	176/147**	0.772 /0.926**
CF4	Beam, panel shear	124.7	134.0	0	776	130	0	420 (295)**	257	156/127**	0.829 /1.019*

* Shear force at beam end

** $1.18\sqrt{f_c}$ used

Table 2 Comparison of various methods in strength predictions at joints

Specimen No.	Average maximum strength observed (kN)	Panel shear failure, V_{max} (kN)				Bearing failure, V_{bmax} (kN)		
		ASCE or Kanno	AIJ-SRC	Modified AIJ-SRC	Sakaguchi	ASCE or Kanno	Mattock	Nishimura
CF1	130	127	113	160	128	130	139	82
CF2	107	85	63	110	105	130	139	82
CF3	136	147	131	177	128	157	139	82
CF4	129	127	113	160	128	130	139	82

변형특성에 관한 연구는 극히 제한적으로 수행되어 왔으며, 패널지역을 하나의 스프링으로 단순히 묘사하는 거동모델(behavioural model) 및 단조 하중상태를 묘사하는 trilinear 혹은 parabolic 형태의 모멘트-전단변형(distortion) 관계 등이 제시된 바 있다. 하지만, 최근에 들어 Kanno⁽⁷⁾는 파괴형태에 따른 접합부의 변형특성을 일련의 multi-spring으로 묘사한 개념적 모델을 정의하고, 5개의 변형성분을 갖는 패널지역의 강성행렬을 유도한 뒤 이를 다시 인접 보 및 기둥에 포함된 super beam 요소 형태의 강성행렬을 유도하였다(그림 4). 그러나, 이를 쉽사리 상용 프로그램에 삽입하고 수정하기가 어려워 실제 적용하여 해석을 수행한 예는 아직 없다.

따라서, 본 연구에서는 기 실험된 시험체⁽⁶⁾에 대한 유연한 접합부 거동을 포함하는 합성골조의 이력거동을 예측하기 위하여 scissor 혹은 box type의 모델을 수용할 수 있는 Drain-2DX⁽¹⁵⁾ 및 IDARC⁽¹⁶⁾ 등을 사용하여 해석작업을 수행하

였다. Kanno가 제시한 복잡한 모델 대신에 일반적인 scissor식 rotational spring을 사용하여 패널지역의 변형특성을 묘사하였으며, 단조하중 상태에 근거하여 제시된 아래의 trilinear 혹은 parabolic 모멘트-회전각 관계식을 확장, 적용하였다.

$$0 \leq \theta_s < \theta_d \text{ 일 때, } M_{ps} = \frac{4}{3} \cdot \frac{M_{psm}}{\theta_{d0}} \cdot \theta_s$$

$$\theta_d/2 \leq \theta_s < \theta_{d0} \text{ 일 때,}$$

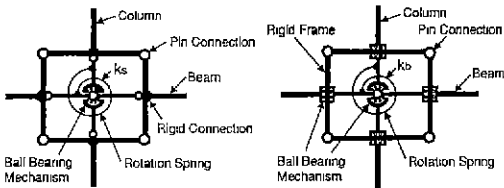
$$M_{ps} = \frac{3M_{psm}}{3} + \frac{2M_{psm}}{3\theta_{d0}} \cdot (\theta_s - \frac{\theta_{d0}}{2})$$

$$\theta_{d0} \leq \theta_s \text{ 일 때, } M_{ps} = M_{psm} \tag{9}$$

여기서, $\theta_{d0} = 0.01 - 0.0067\sqrt{\frac{P}{P_u}}$

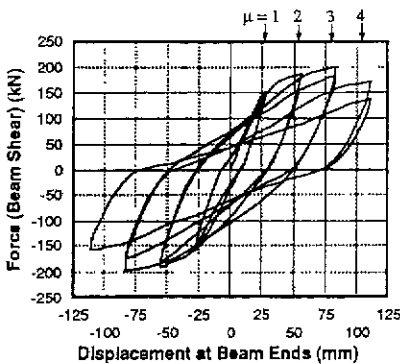
또한 θ_s 는 패널지역의 전단 회전각, M_{ps} , M_{psm} 은 패널지역에 작용하는 모멘트 및 식 (4) 등의 전단내력에 일치하는 최대 모멘트, P , P_u 은 기둥에 작용하는 압축력 및 이의 공칭내력을 각각 의미한다.

그림 5 및 6은 Kanno⁽⁷⁾의 접합부 실험중 전단 및 지압파괴를 대표적으로 나타내는 시험체 OJS1-1 및 OB1-0의 이력거동을 Drain-2DX 혹은 IDARC에 의하여 예측한 결과를 나타낸다. 또한, 그림 7은 본 연구의 일환으로 국내실무에서 적용되고 있는 접합부 상재를 묘사하여 실

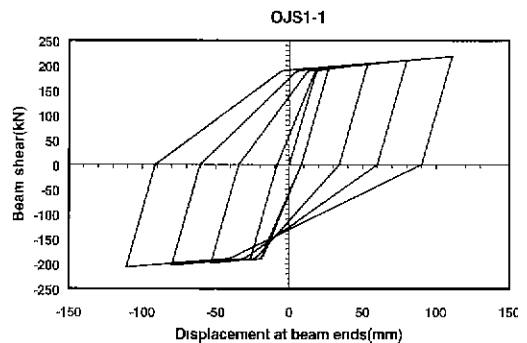


(a) Spring Model (Panel Shear Deformation) (b) Spring Model (Bearing Deformation)

그림 4 접합부의 변형모델⁽⁷⁾

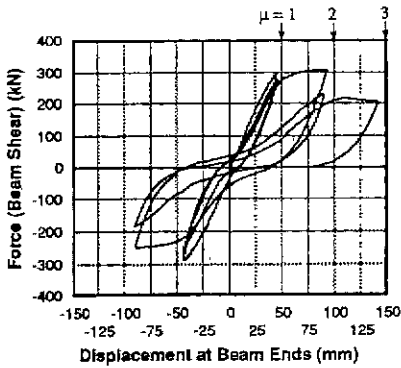


(a) Observed

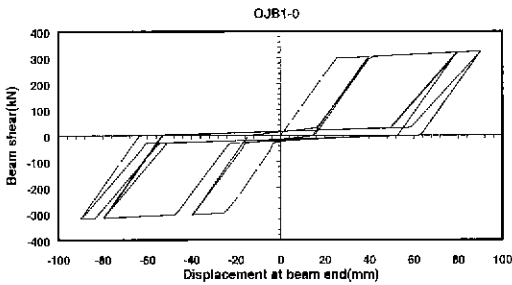


(b) Predicted

그림 5 Kanno의 OJS1-1에 대한 이력응답 예측(non-smoothed 모델 사용)

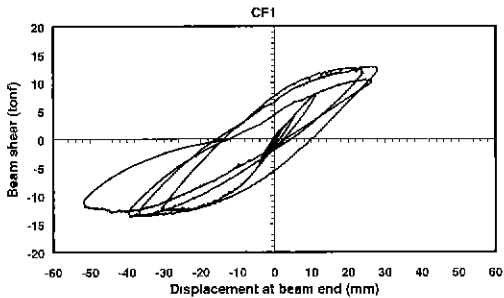


(a) Observed

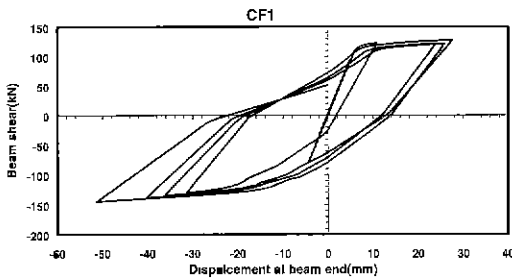


(b) Predicted

그림 6 Kanno의 OJB1-0에 대한 이력응답 예측 (non-smoothed 모델 사용)



(a) Observed



(b) Predicted

그림 7 CF1에 대한 이력응답 예측(smoothed 모델 사용, 10kN≈1tonf)

험한 시험체 CF1⁽⁶⁾에 대한 IDARC 해석결과를 보여주고 있다. 보 및 기둥은 단부에 분포된 소성힌지 지역을 묘사할 수 있는 보-기둥 요소가 사용되었으며, 기둥은 Kent⁽¹⁷⁾ 등이 제시한 콘크리트 응력-변형도 관계를 사용하여 후프근 배치에 따른 구속효과를 고려하였고, layer-by-layer 방법에 근거한 fiber 요소에 의하여 모멘트-곡률 관계를 산정하였다. 보, 기둥 및 패널 요소의 이력모델은 실험결과와 조율하는 과정을 거친 후 최종적으로 강성저하, 연성 및 에너지에 근거한 강도저하 및 슬립변형을 포함하는 다양한 모델을 non-smoothed 혹은 smoothed 형태로 채택하였다. 대체로 실험결과와 일치된 이력루프를 보여주고 있다.

4. 결 론

전편 논문에서 언급한 4개의 콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부 시험체의 패널 전단파괴 강도를 예측하기 위하여 ASCE, AIJ-SRC, 수정된 AIJ-SRC 및 Sakaguchi 방법을, 지압파괴 강도를 예측하기 위하여 ASCE 방법, Mattock 및 Nishimura의 방법을 적용하였으며, 상용프로그램을 사용하여 접합부의 유연성을 포함하는 이력거동을 예측한 결과 아래와 같은 결론을 유도해낼 수 있었다

- 1) 접합부의 패널 전단파괴 강도는 내부 콘크리트 패널의 강도를 정의하는 관계식에 $1.18\sqrt{f'_c}$ 을 고려한 ASCE 방법이 가장 정확하게 실험결과를 예측하였다(실험/예측=1.055). 한편, 실험적으로 유도된 계수를 포함하고 있기 때문에 상대적으로 간편한 형식을 취하고 있는 AIJ-SRC 방법도 상당히 근접하게 실험결과를 예측하고 있었으나, 수정된 AIJ-SRC 방법은 접합부 강도를 과대 평가하였다. 이는 식 (6)에서 콘크리트의 패널의 기여분을 나타내는 2번째 항이 과도하게 고려되어 있기 때문이다.
- 2) 지압파괴에 대하여 Nishimura 방법은 다른

두 방법에 비하여 가장 적은 콘크리트 지압 강도를 사용하고 있기 때문에 가장 적은 지압강도를 예측하고 있다. 또한 Mattock의 방법도 후프근의 구속효과를 고려하고 있지 않으므로 접합부 지역에 2대의 후프근을 포함하는 시험체 CF3에 대하여 ASCE 방법보다 적은 강도를 예측하고 있다.

- 3) 유연한 접합부 거동을 포함하는 합성골조의 이력거동을 예측하기 위하여 일련의 스프링으로 구성된 macro 형태의 해석모델을 Drain-2DX 및 IDARC을 사용하여 해석한 결과, 탄소성 rotational 스프링 및 gap 스프링 요소를 적절히 조합하면 실험에서 관측된 편칭 및 연성거동을 유사하게 묘사할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술재단 특정기초 연구과제(과제번호 : 97060201013)의 일환으로 수행되었으므로 이에 감사를 드리며, 한양대학교 초대형 구조시스템 연구센터(STRESS)의 지원에도 감사를 드립니다. 또한, 자료정리 및 그림작업에 도움을 준 한현호군께 감사드립니다.

참고 문헌

1. Wakabayashi, M., "Recent developments for composite buildings in Japan," *Composite and Mixed Construction*, ASCE, New York, 1985, pp. 241-253.
2. Sheikh, T. M., Deierlein, G. G., Yura, J. A., and Jirsa, J. A., "Beam-column moment connections for composite frames: Part I," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 11, 1989, pp. 2858-2876.
3. Deierlein, G. G., Sheikh, T. M., Yura, J. A., and Jirsa, J. A., "Beam-column moment connections for composite frames: Part 2," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 11, 1989, pp. 2877-2896.
4. Nishiyama, I., Hasegawa, T., and Yamano, H., "Strength and deformation capacity of reinforced concrete column to steel beam joint panels," *Kenchiku Kenkyo Shiro No. 71*, Building Res. Inst., Ministry of Construction, Japan, 1990
5. ASCE Task Committee, "Guidelines for design of joints between steel beams and reinforced concrete columns," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 8, 1994, pp. 2330-2357.
6. 조순호, 전성규, "고강도 콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부의 이력거동", 지진공학회 논문집, 제4권, 제3호, 2000, pp. 23-34.
7. Kanno, R. and Deierlein, G., G., "Seismic behavior of composite(RCS) beam-column joint subassemblies," *Composite Construction III*, Germany, 1996.
8. Mattock, A. H. and Gaafar, G. H., "Strength of embedded steel sections as brackets," *ACI Journal*, 1982, pp. 83-93.
9. Nishimura, Y. and Minami, K., "Stress transfer from steel beams to reinforced concrete columns," *IABSE Brussels*, 1990, pp. 389-394.
10. Architectural Institute of Japan, *Standard for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures*, AIJ, 1975, 1987.
11. Sakaguchi, N., "Strength and ductility of steel beam-RC column joints", *Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol. IV, Tokyo-Kyoto, 1992, pp. 713-718.
12. Ehsani, M. R. and Alameddine, F., "Design recommendations for type 2 high-strength reinforced concrete connections," *ACI Structural Journal*, Vol. 88, No. 3, 1991, pp. 277-291.
13. ACI-ASCE Committee 352, *Recommendation for*

- Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures (ACI 352R-95)*, American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 1995.
14. Krawinkler, H., Bertero, B. B., and Popov, E. P., "Shear behavior of steel frame joints," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 101, No. 11, 1975, pp. 2317-2336.
 15. Kannan, A. E. and Powell, G. H., *DRAIN-2DX: Base Program Users Guide and Preliminary Element Users Guide Version 1.03*, Univ. of California, Berkeley, California, 1992. 12.
 16. Valles, R. E., Reinhorn, A. M., Kunnath, S. K., and Madan, A., "IDARC 2D version 4.0: a program for the inelastic damage analysis of buildings," *Technical Report NCEER-96-0010*, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, 1996.
 17. Kent, D. C. and Park, R., "Flexural members with confined concrete", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 97, No. 7, 1971, pp. 1969-1990.