

콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부의 내진성능 (II. 강도 및 변형)

Seismic Response of Exterior RC Column-to-Steel Beam Connections (II. Strength and Deformation)

조 순 호¹⁾
Cho, Soon Ho

선 성 규²⁾
Sun, Sung Gyu

ABSTRACT

The panel shear and bearing strengths determining the seismic resistance of reinforced concrete column-to-steel beam connections are predicted by various methods for four previously tested exterior beam-column joints. The analytical approach to model the joint deformation is also examined. Several analyses incorporating the deformations of panel shear and bearing in the joint are demonstrated using a fairly simple connection model in the commercial packages such as Drain2dx and IDARC. The strength prediction results indicated that the ASCE method with the modification of the compression strut contribution is the most accurate. It is also considered that the analytical model presented including the joint deformation can be used for the overall analysis.

1. 서론

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 접합부 실험이 수행되었으며, 그 결과로 3차원적인 복잡한 거동을 나타내는 합성 접합부의 내부응력 전달 기구에 대한 이해가 어느 정도 가능하게 되었다^(1,2,3,4). 지난 연구결과에 의하면 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 파괴형태는 그림 1과 같이 i) 패널 전단파괴(Panel Shear Failure) 및 ii) 지압파괴(Bearing Failure) 등의 2가지로 구분되는데, 패널 전단파괴는 일반 콘크리트 혹은 철골 접합부의 파괴형상과 유사하여 강재 웨브의 항복 및 콘크리트 트러스 작용에 근거한 전단파괴를 포함한다. 반면에, 지압파괴는 지렛대 기구(Lever Mechanism)에 근거하여 강재 보가 강체운동을 수행할 시 강재 보 상하면의 콘크리트에 압괴가 발생하여 나타나는 파괴형태이다. 실제 파괴는 이들

1) 광주대학교, 건축학부, 교수, 정회원
2) 광주대학교, 건축학부, 석사과정

두 기구의 혼합형태로 나타나나, 이들을 각각 독립적으로 고려함으로써 접합부의 강도 및 변형 특성을 좀 더 자세하게 이해할 수 있으며 정량화 시킬 수 있다.

현재까지, 이들 파괴형태에 근거하여 다양한 상세를 갖는 접합부의 강도를 예측할 수 있는 일련의 관계식들이 제시되었으며, 또한 강도모델에 비해서는 아직 제한적이지만, 단조하중하의 패 널지역의 변형특성을 정의하는 몇몇 식들이 제시된바 있다⁽⁵⁾. 따라서, 본 연구에서는 이들 식을 사용하여 이미 수행된 4개의 국내실정에 적합한 상세를 갖는 접합부 실험결과⁽⁶⁾를 예측하여 관련 식의 타당성 및 문제점을 파악하고자 한다. 국내실정에 적합한 상세란 Steel Band, Covering Plate 등을 적용한 중량형의 상세(Heavy Detail)를 배제함을 의미한다.

2. 강도

콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 지압파괴는 크게 주근 항복 및 접촉면의 콘크리트 파괴로 나눌 수 있으며, 외부 패 널지역의 콘크리트 접촉면 파괴는 부착 및 전단파괴로 또 다시 분류할 수 있다. 그림 2는 지압파괴 발생시 예상되는 접합부의 자세한 응력상황을 나타낸다. Part I은 접합부에 근접한 기둥지역을 나타내며, Part II는 강재보를 포함하는 내부 접합부 패 널지역을, Part III는 외부 접합부 패 널지역을 각각 의미한다. 따라서, 이러한 응력조건으로부터 전술한 여러 파괴 형태를 구분하는 기본 방정식을 평형조건으로부터 유도해낼 수 있다. 한편, 패 널 전단파괴와 관련하여 내부 및 외부 접합부 지역에 발생하는 응력상황은 그림 3과 같다. 내부 접합부의 응력은 i) 강제 플랜지의 Frame 작용, ii) 강제 웨브 및 iii) 콘크리트의 압축 스트럿 작용 등의 전달기구에 의해 지지되며, 또한 외부 접합부의 응력은 플랜지 상하부의 전달기에 의하여 패 널지역에 발생하는 트러스 작용에 의거하여 지지된다. 마찬가지로, 평형조건으로부터 일련의 관련식을 유도해낼 수 있다.

본 연구에서는 접합부의 강도를 예측하기 위하여 패 널전단 파괴의 경우에는 i) ASCE 방법^(5,7), ii) AIJ-SRC 방법⁽⁸⁾, iii) 수정된 AIJ-SRC 방법⁽⁸⁾ 및 iv) Sakaguchi⁽⁹⁾ 방법을 사용하였으며 지압파괴의 경우에는 i) ASCE 방법^(5,7), ii) Mattock⁽¹⁰⁾ 방법 및 iii) Nishimura⁽¹¹⁾ 방법을 사용하였다. ASCE 방법은 패 널의 전단내력을 정의하기 위하여 전술한 각요소의 기여분을 표시하는 일련의 관계식을 제시하고 있는데 반하여, 다른 방법들은 보다 축약된 형태를 취하고 있다. 지압파괴를 정의하는데 있어서 Mattock의 방법은 지렛대 기구에 근거하고 있으며 Confinement 및 기둥에 작용하는 전단력의 영향을 고려하고 있지 않은 반면에, Nishimura의 방법은 축력의 영향을 고려하며 모멘트 및 축력의 상관관계를 설정하여 지압능력을 정의 하고 있다. 한편, ASCE 방법을 사용하여 압축 스트럿에 의한 콘크리트 내부요소의 전단력을 결정하는데 있어서 고강도 콘크리트 및 축력의 영향을 고려하기 위하여 Ehsani 등⁽¹²⁾이 제시하는 보정계수를 사용하였다. 이렇게 할 경우 전단응력은 $1.65\sqrt{f_c}$ 에서 $1.16\sqrt{f_c}$ 으로 감소된다. 표 1은 기 실험된 4개의 시험체에 대하여 ASCE 방법에 의하여 예측된 지압 및 패 널 전단파괴의 내, 외부 접합부 요소별 지지능력을 나타내고 있으며, 표 2는 다른 여러방법에 의한 예측값을 비교하고 있다. 패 널 전단 파괴강도 예측에 대해서는 $1.16\sqrt{f_c}$ 을 고려한 ASCE 방법이 가장 근접하게 실험결과를 예측하고 있으며, AIJ-SRC 방법도 간단한 형식을 취하고 있는데 비해서는 상당히 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 알 수 있

다. 반면에, 수정된 AIJ-SRC 및 Sakaguchi 방법은 상당히 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 또한, 지압파괴 강도예측에 있어서 Nishimura 방법은 다른 2방법에 비해 상당히 안전측을 결과를 나타내고 있다.

3. 변형

일반적인 구조물의 해석에는 접합부의 변형을 무시하는 것이 보통이지만, 때로는 접합부의 변형이 전체구조물의 거동에 큰 영향을 미치는 경우가 있다. 이러한 이유에서 지난 수십년 동안 콘크리트 및 특히, 철골구조에서는 접합부의 변형을 고려하기 위한 여러 접근방법이 제시되었다. 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 소산형태보다 에너지 흡수능력이 우수한 것으로 인식되고 있다. 이러한 전단 위주의 에너지 소산방식은 곧바로 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 패널지역에 전단형 소성힌지를 허용할 수 있는 것이다.

현재까지 콘크리트 기둥-강재 보 접합부의 변형특성에 관한 연구는 더러 수행되긴 하였으나 극히 제한적이며, 이들 대부분은 단조 하중상태를 묘사할 목적으로 Trilinear 혹은 Parabolic 형태를 취하고 있다. 하지만, 최근에 들어 Kanno⁽⁷⁾는 파괴형태에 따른 접합부의 변형특성을 일련의 Spring으로 묘사한 개념적 모델을 정의하고, 이에 따라 Super Beam 형태의 강성행렬을 유도하였다(그림 4). 하지만, 모델이 복잡하고 또한 이를 쉽사리 상용 프로그램에 삽입, 수정하기가 어려워 실제로 적용하거나 해석이 수행된 예는 없다.

본 연구에서는 기 실험된 시험체에 대한 유연한 접합부 거동을 포함하는 합성골조의 이력거동을 예측하기 위하여 Drain2dx⁽¹³⁾ 및 IDARC⁽¹⁴⁾을 사용한 해석작업이 수행되었다. Kanno가 제시한 복잡한 모델 대신에 일반적인 Rotational Spring을 사용하여 패널지역의 변형특성을 고려하였으며, 단조하중 상태를 묘사하기 위하여 제시된 Trilinear 혹은 Parabolic 식을 확장, 적용하였다. 그림 5는 Kanno의 접합부 실험중 대표적인 전단 및 지압파괴를 나타내는 시험체 OJS1-1 및 OB1-0의 IDARC에 의한 예측결과를 나타낸다. 그림 6은 본 연구에서 수행된 CF1 시험체에 대한 IDARC⁽¹³⁾ 해석결과를 나타내며, 단부에 소성힌지 지역을 묘사할 수 있는 분표된 소성모델 및 Smoothed 이력모델이 사용되었다.

4. 결론

기 실험된 시험체의 패널 전단파괴 강도예측을 위하여 ASCE, AIJ-SRC, 수정된 AIJ-SRC 및 Sakaguchi 방법을, 지압파괴 강도예측을 위하여 ASCE 방법, Mattock 및 Nishimura의 방법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 유도해낼 수 있었다.

- 1) 접합부의 패널 전단 파괴강도 예측에 대해서는 $1.16\sqrt{f_c}$ 을 고려한 ASCE 방법이 가장 근접하게 실험결과를 예측하고 있으며(실험/예측=1.055), AIJ-SRC 방법도 간단한 식에 비해서는 상당

히 정확하게 실험결과를 예측하고 있음을 알 수 있었다. 반면에, 수정된 AIJ-SRC 및 Sakaguchi 방법은 상당히 과대평가하고 있음을 알 수 있다.

- 2) 지압파괴 강도예측에 있어서 Nishimura 방법은 다른 2방법에 비해 상당히 안전측을 결과를 나타내고 있었으며, 또한, Mattock의 방법도 Confinement 효과를 고려하고 있지 않으므로 Hoop근을 포함하는 시험체에 대해서는 안전측의 결과를 나타내고 있다.
- 3) 유연한 접합부 거동을 포함하는 합성골조의 이력거동을 예측하기 위하여 일련의 스프링으로 구성된 Macro 형태의 해석모델을 Drain2dx 및 IDARC을 사용하여 해석한 결과, 탄소성 Rotational 스프링 및 Gap 스프링을 적절히 조합하면 실험에서 관측된 핀칭 및 연성거동을 유사하게 묘사할 수있는 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 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 한현호 군께 감사드립니다.

참고문헌

1. Wakabayashi, M. (1985), "Recent Developments for Composite Buildings in Japan", Composite and Mixed Construction, C. Roeder, ed., ASCE, New York, N.Y., pp.241-253.
2. Sheikh, T.M. et al. (1989), "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part I", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(11), pp.2858-2876.
3. Deierlein, G.G. et al. (1989), "Beam-Column Moment Connections for Composite Frames: Part 2", Journal of Structural Engineering, ASCE, 115(11), pp.2877-2896.
4. Nishiyama, I. et al. (1990), "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.
5. ASCE Task Committee (1994), "Guidelines for Design of Joints Between Steel Beams and Reinforced Concrete Columns", Journal of Structural Engineering, ASCE, 120(8), pp.2330-2357.
6. 조순호, 선성규 (2000), "콘크리트 기둥-강재 보 외부 접합부의 내진성능(I. 실험)", 지진공학회, 춘계학술발표대회.
7. Kanno R. and Deierlein G. G. (1996), "Seismic Behavior of Composite(RCS) Beam-Column Joint Subassemblies", Composite Construction III, Germany.
8. Architectural Institute of Japan (1975, 1987), "Standard for Structural Calculation of Steel Reinforced Concrete Structures", AIJ.
9. Sakaguchi, N. (1992), "Strength and Ductility of Steel Beam-RC Column Joints", Proc. 9th World Conference on Earthquake Engineering, Vol. IV, Tokyo-Kyoto, pp.713-718.

10. Mattock, A.H. and Gaafar, G.H. (1982), "Strength of Embedded Steel Sections as Brackets", ACI Journal, Mar.-Apr., pp.83-93.
11. Nishimura, Y. and Minami, K. (1990), "Stress Transfer from Steel Beams to Reinforced Concrete Columns", IABSE Brussels, pp.389-394.
12. Ehsani, M.R., Alameddine, F. (1991), "Design Recommendations for Type 2 High-Strength Reinforced Concrete Connections", ACI Structural Journal, 88(3), pp.277-291.
13. Kanna, A.E. and Powell, G.H. (1992), "DRAIN-2DX: Base Program Users Guide and Preliminary Element Users Guide Version 1.03", Dec., Univ. of California, Berkeley, California.
14. Valles R. E., Reinhorn A. M., Kunnath S. K., and Madan A. (1996), *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.

Table 1 Predicted Joint Strengths for Test Specimens

Specimen No.	Failure Mode	Maximum Strengths		Components of Shear Resistance at Joint							Test/Theory
		Positive Cycle V_{max} (kN)	Negative Cycle V_{max} (kN)	Joint Bearing Failure			Panel Failure				
				Outer Element	Inner Element	$V_{bearing}$	Outer Element	Inner Concrete	Inner Steel	$V_{panel\ shear}$	
CF1	Beam, Panel Shear, Bearing	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	162.6	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

* $1.16\sqrt{f'_c}$ used

Table2 Comparison of Various Methods in Strenth Preidctions at Joints

Specimen No.	Panel Shear Failure, V(kN)				Bearing Failure, V(kN)		
	ASCE or Kanno	AIJ-SRC	Modified AIJ-SRC	Sakagachi	ASCE or Kanno	Mattock	Nishimura
CF1	127	125	176	141	130	139	82
CF2	85	70	122	116	130	139	82
CF3	147	144	249	141	163	139	82
CF4	127	125	176	141	130	139	82

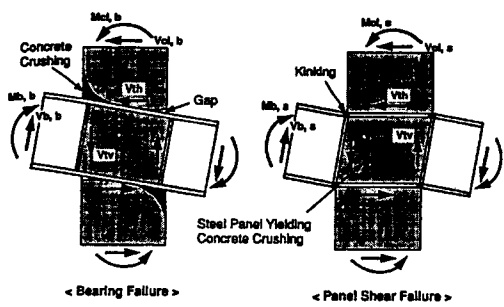


그림 1 접합부의 파괴형태⁽⁷⁾

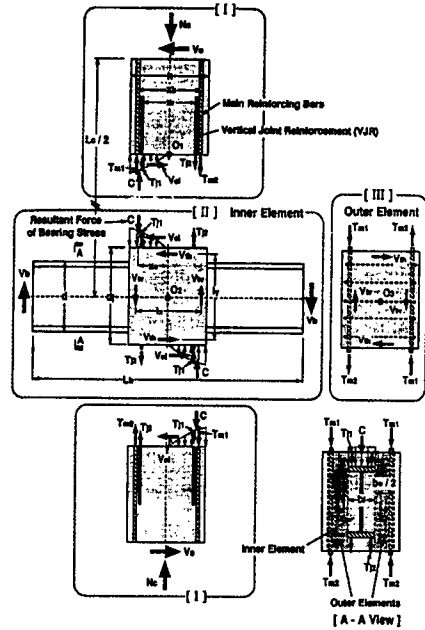


그림 2 지압파괴 응력상황⁽⁷⁾

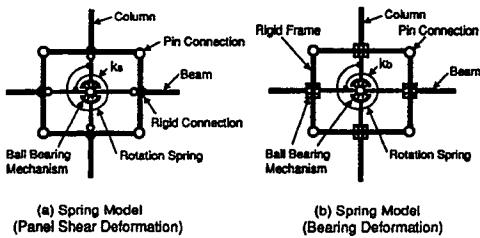
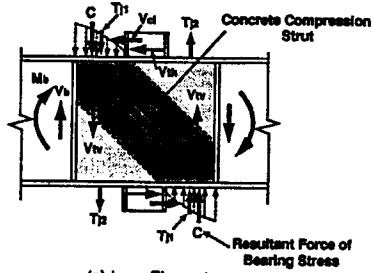
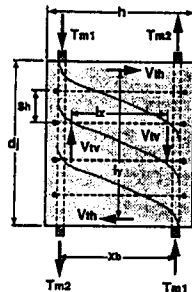


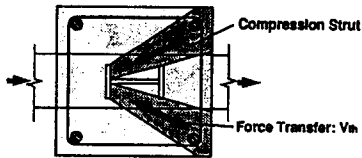
그림 4 접합부의 변형모델⁽⁷⁾



(a) Inner Element



(b) Outer Element



(c) Horizontal Stress Transfer

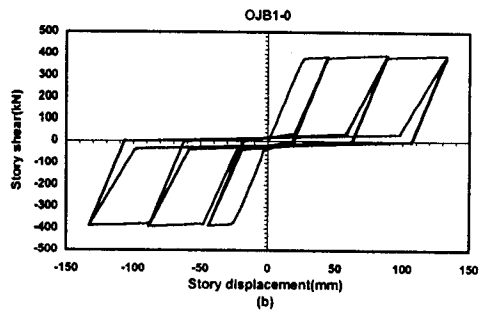
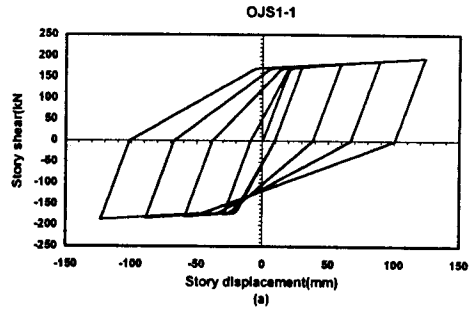


그림 5 예측된 이력응답

그림 3 패널 전단파괴 응력상황⁽⁷⁾

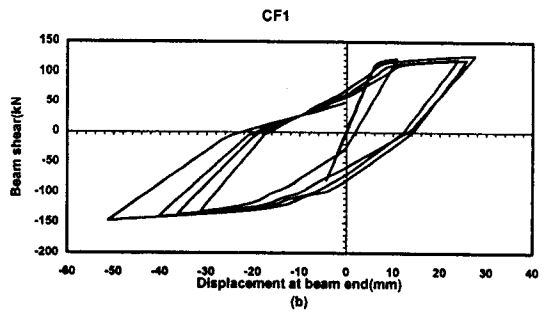
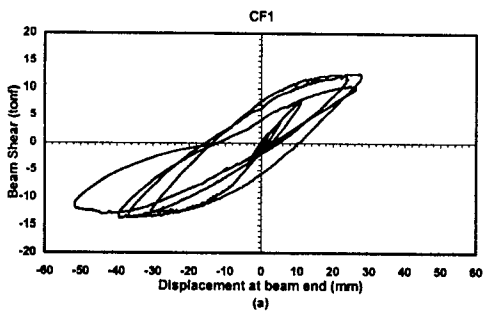


그림 6 이력응답 (a)실험, (b)예측