

철골 보-기둥 접합부의 내진성능 개선을 위한 실험적 연구

An Experimental Study for the Improvement of Seismic Performance of Steel Beam-to-Column Connections

이 승 준* 김 원 기** 이 정 웅***
Lee, Seung Joon Kim, Won Ki Lee, Jeong Woong

국문요약

1994년 Northridge 지진과 1995년 Kobe 지진에서 많은 철골구조물의 보-기둥 접합부에 발생한 균열은 내진성능이 우수한 것으로 알려진 모멘트 저항 철골골조의 내진성능 개선에 대한 연구 필요성을 제시하였다. 일반적으로 모멘트 저항 골조가 강한 지진을 받을 때 보-기둥 접합부는 강도의 저하없이 소성 회전변형능력이 0.015이면 만족할 수 있다고 한다. 본 연구의 목적은 강한 지진하중에서도 철골구조의 보-기둥 접합부에서 용접부의 균열이 방지되고 연속적으로 충분한 에너지를 흡수하고 소산할 수 있는 접합부의 형태를 제안하고 그 거동을 조사하는 것이다. 본 연구에서 접합부의 형태를 제안하였으며 실험을 통하여 그 거동을 분석하였다. 제안된 접합부 시험체에 대한 실험결과는 용접부에 균열이 발생하지 않았으며 충분한 변형능력을 나타냈다.

주요어 : 철골 보-기둥 접합부, 모멘트저항골조, 내진성능, 연성, 모멘트-회전변형 이력곡선

ABSTRACT

Cracking was observed in beam-to-column connections of many steel building frames during the 1994 Northridge and 1995 Kobe earthquakes. Thus extensive experimental researches are currently being conducted to improve the seismic performance of steel frames. A value of 0.015 radian was considered as a reasonable estimate of beam plastic rotation demand in steel moment-resisting frames subjected to severe earthquakes. The objective of this research is to develop a type of connection detail which moves the plastic hinge region in the beam away from the face of the column and can prevent cracking at the welded flange of the beam-to-column connection under seismic loading. An experimental investigation was undertaken on five beam-to-column connection specimens to study the performance of the connections with proposed details. The experimental results showed that the flexural strength and rotational ductility of the beam connections were adequate for the seismic resistance steel frames to prevent possible cracks at the connections.

Key words : steel beam-to-column connection, moment resisting frame, seismic performance, ductility, moment-rotation hysteretic curve

1. 서 론

강한 지진에 대비한 철골 모멘트저항 골조의 보-기둥 접합부는 보의 소성모멘트에 도달할 수 있어야 하며 큰 비탄성 변형이 발생하면서 강도를 유지할 수 있어야 한다. 일반적으로

로 모멘트 저항 골조가 강한 지진을 받을 때 보-기둥 접합부의 소성 회전변형능력이 0.015이면 만족할 수 있다고 한다. 그런데 1994년 Northridge 지진과 1995년 Kobe 지진에서 철골구조물의 많은 보-기둥 용접 접합부에 균열 또는 파괴가 발생하였다. 균열이 플랜지의 용접부에서 시작하여 여러 방향으로 확대되는 현상과 용접을 위한 보 접합부의 스캐럽 끝부분에서 보의 플랜지에 생기는 균열로 분류할 수 있다.

* 정회원 · 아주대학교 교수, 공학박사

** 정회원 · 호서대학교 교수, 공학박사

*** 아주대학교 대학원 건축학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 2000년 3월 31일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

이러한 용접부의 균열은 뒷판(backing bar)에 의한 노치의 영향, 후판 플랜지의 용접시 예열부족, 접합부의 형태에서 발생하는 응력집중 현상등이 접합부의 균열등이 원인이 된다. 최근 접합부의 균열을 방지하고 연성을 증가시켜 에너지 소산능력을 증대할 수 있도록 접합부 상세에 대한 연구가 선진국에서 진행되고 있다.⁽¹⁾⁻⁽⁶⁾ 그러나 대부분의 제안된 접합부 형태는 신축 건축구조물에만 적용할 수 있는 단점이 있다. 최근 우리나라에서도 지진의 발생이 증가하고 있다. 따라서 기존의 철골구조물에 예상되는 문제점을 분석할 필요가 있으며 신축 철골구조물에 적용 가능하고 기존의 구조물을 보강할 수 있는 접합부의 형태에 대한 연구가 필요하다.

본 연구의 목적은 모멘트저항 철골구조의 보-기둥 접합부가 강한 지진하중에서도 용접부의 균열이 방지되고 연성적으로 충분한 에너지를 흡수하고 소산할 수 있는 접합부의 형태를 제안하고 연구를 하여 설계에 도움이 되는 자료를 제시하는 것이다. 본 연구에서는 보-기둥 접합부에서 파괴가 발생하지 않도록 기둥면에서 다소 거리가 있는 보 단면을 약하게 하여 그 곳에 소성힌지가 발생하는 개념을 도입하였다. 소성힌지가 발생하는 보 단면의 형태를 제안하고 실험을 통하여 접합부의 거동을 분석하였다.

2. 실험

2.1 시험체 계획, 제작 및 강재실험

반복하중을 받는 철골 보-기둥 접합부의 거동을 조사하기 위하여 접합부의 형상을 제안하고 실험을 계획하였다. 철골 보-기둥 접합부 시험체는 H형강 단면의 기둥과 캔틸레버보로 구성하였다. 그림 1은 시험체의 형상을 보여준다. 본 연구가 보의 접합부(connection)에 대한 조사이므로 기둥의 변형은 가급적 발생하지 않도록 하였다.

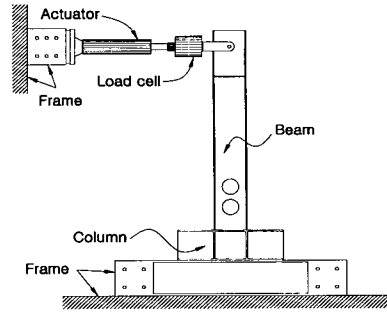


그림 1 시험체 설치상황

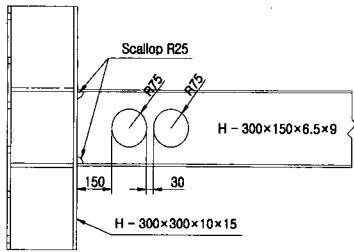
총 5개의 시험체를 계획하였으며 실험을 수행하였다. 그림 2는 시험체의 상세를 보여준다. 보의 단면은 H-300×150×6.5×9이고 기둥의 단면은 H-300×300×10×15이다. 강재는 SM490을 이용하였다. 기둥면에서 보의 하중점까지의 길이는 1800mm으로 하였다.

그림 2a에 보이는 바와 같이 시험체 SDC3는 2개의 원형 웨브 개구부가 있는 접합부이다. 여기서 S는 철골(steel)을 의미하고 DC는 2개의 원형(double circle)을 의미하며 3은 개구부사이의 거리가 30mm임을 의미한다. 원형 개구부 직경은 보춤의 1/2인 150mm로 계획하였다. 기둥 플랜지의 면에서 개구부까지의 거리는 보춤의 1/2에 해당하는 150mm로 계획하였다.

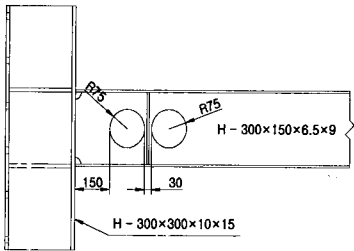
시험체 SDC3P(그림 2b)는 시험체 SDC3와 동일하다. 다만 2개의 원형 개구부 부분에서 플랜지의 국부좌굴을 지연시킬 목적으로 2개의 원형 개구부사이에 수직 스티프너를 설치하였다. 이 수직 스티프너와 보 플랜지사이에는 용접을 하지 않았다.

시험체 SDC5(그림 2c)는 시험체 SDC3와 동일하다. 다만 2개의 원형개구부 사이의 간격이 50mm이다. 2개의 개구부 사이에 있는 웨브가 반복 전단력에 의해 좌굴을 일으키고 균열을 일으키리라 예상되므로 이 시험체는 개구부사이의 웨브 부분을 강하게 한 것이다.

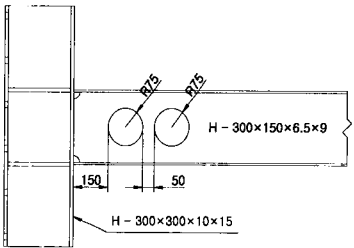
시험체 SEGW(그림 2d)와 SEGN(그림 2e)은 계란모양의 타원형 웨브 개구부가 있는 형태이다. 여기서 EG는 계란형(egg)를 의미하고



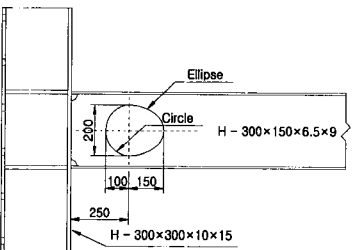
(a) 시험체 SDC3



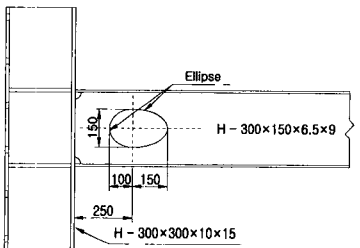
(b) 시험체 SDC3P



(c) 시험체 SDC5



(d) 시험체 SEGW



(e) 시험체 SEGN

그림 2 시험체의 상세

W와 N은 개구부의 춤이 크고(wide) 작은 것(narrow)을 구분하였다. 개구부 모서리부분에서 균열발생을 방지하기 위함이다.

시험체의 제작에 이용된 강재에 대해 인장 실험을 실시하였다. 인장실험결과 플랜지와 웨브의 항복강도는 각각 3.75ton/cm²와 3.91ton/cm², 인장강도는 각각 5.31ton/cm²과 5.33ton/cm²으로 나타났다. 항복강도는 기준항복강도보다 14%와 18% 크게 나타났다.

2.2 실험방법 및 측정

그림 3은 실험전경을 보여주고 있다. 시험체는 실험용 반력골조에 수평으로 위치하도록 계획하였으며 가이드를 설치하여 횡좌굴 발생을 방지하였다. 시험체에 대한 하중은 보 단부에 설치된 유압잭을 이용하여 반복적인 하중을 증가하면서 재하하여 실험을 실시하였다. 탄성범위에서는 보 단부에 재하되는 하중의 크기에 의해 실험을 제어하였고 비탄성범위에서는 보단부의 변위를 제어하여 실험을 실시하였다. 보의 변위를 1/3 δ_p , 2/3 δ_p , 1.0 δ_p , 2.0 δ_p , 3.0 δ_p , 4.0 δ_p ...으로 증가하면서 각 하중(또는 변위)의 단계에서 3사이클 반복하중을 재하하면서 실시하였다. 여기서 δ_p 는 실험을 실시하기 전에 보-기둥 접합부에서 보 단면의 소성모멘트 M_p 에 해당하는 하중에 대해 시험체의 탄

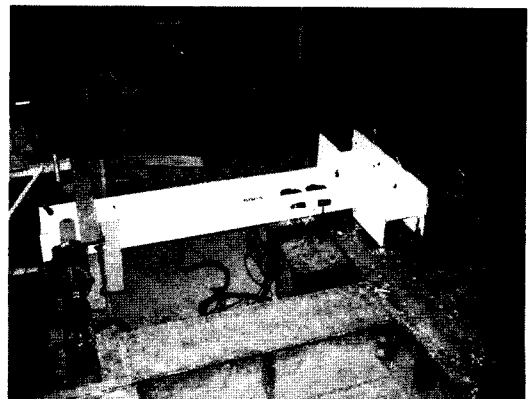


그림 3 실험전경

성해석으로 산정되는 보 단부의 변위이다. 실험은 시험체에 파괴가 발생하거나 강도의 급격한 저하가 발생하면 종료하였다.

하중은 로드셀을 이용하여 계측하고 하중점에서의 변위는 변위계측기를 이용하도록 하였다. 개구부 부분에 스트레인 게이지를 부착하여 얻은 값은 실험의 정확성을 확인하는데 이용하였다.

3. 실험결과

본 장에서는 5개의 보-기둥 접합부 시험체에 대한 실험으로부터 얻어진 실험데이터를 그림과 표로서 제시하고자 하였다. 또한 실험 동안에 관측된 시험체의 전체거동과 시험체중보부재의 거동에 대하여 기술하며 파괴상태에 대하여 기술한다.

표 1은 실험결과를 요약하고 있다. 표 1에서 하중 P_{pe} 와 P_{pc} 는 보 접합부와 개구부가 있는 위험단면에서의 전단력의 영향을 무시한 소성 모멘트에 해당하는 보단부의 하중을 의미한다. (전단력의 영향을 포함하는 유한요소 해석은 현재 진행중이며, 표 1에서 5개의 시험체에 대해 P_{pe} 가 P_{pc} 보다 작은 값을 나타내 휨모멘트만을 고려한 시험체의 소성하중은 P_{pe} 가 되지만 유한요소해석 결과는 개구부에서 전단력의 영향으로 소성화되는 현상을 보였다). Δ_p 는 실험으로부터 얻은 탄성강성을 이용하여 소성하

중 P_{pe} 에서 구한 변위값이다. P_u 와 Δ_{max} 은 실험중 도달한 최대하중과 최대하중시의 변위를 의미한다. θ_p 는 총 회전변형에서 탄성부분을 제외한 소성 회전변형을 의미한다. 회전변형(rotation)은 변위를 보의 길이(1800mm)로 나눈 값이다. 그림으로 제시된 실험결과는 보 단부에 재하된 하중의 크기와 보의 회전변형 이력곡선이다.

시험체의 실험동안에 관찰된 항복의 발생과 좌굴형상을 제시하였다. 시험체에 하중이 증가하면서 항복된 부분은 석회칠(whitewash)이 탈락하면서 시각적으로 비탄성변형의 범위와 정도를 볼 수 있다.

3.1 시험체 SDC3

그림 4는 시험체 SDC3의 보단부에 재하된 하중과 회전변형관계의 이력곡선을 보여주고 있다.

이 시험체의 전체적인 이력곡선은 최대하중에 도달할 때까지 매우 안정적이었다. 시험체는 약 10ton을 넘으면서 비선형적인 거동을 보였으며 약간의 에너지를 소산하게 되었다. 하중을 증가하면서 개구부가 있는 보 단면의 플랜지에서 항복이 시작되었다. 이러한 플랜지의 항복은 비교적 넓은 부분에 걸쳐 발생함을 볼 수 있었다. 시험체는 보의 회전변형이 0.0297인 3번째 싸이클에 도달할 때까지는 매우 안정적이었으며 0.0456의 회전변형으로 증가시키면서 개구부 부분에서 압축응력을 받는 보 플

표 1 실험결과

시험체	P_{pe} (tf)	P_{pc} (tf)	P_u (tf)	Δ_p (mm)	Δ_{max} (mm)	θ_p	파괴 모드
SDC3	11.29	11.95	+12.65 -12.62	18.8	+45.4 -48.9	0.0147 0.0167	플랜지 국부좌굴과 웨브의 균열
SDC3P	11.29	11.95	+13.17 -13.08	19.3	+50.7 -48.0	0.0174 0.0159	
SDC5	11.29	11.95	+13.10 -12.85	19.8	+51.3 -45.9	0.0175 0.0145	
SEGW	11.29	11.46	+11.12 -11.21	20.3	+42.0 -41.8	0.0121 0.0119	플랜지 국부좌굴
SEGN	11.29	12.04	+12.99 -12.81	19.2	+49.0 -54.6	0.0166 0.0197	

플랜지에 국부좌굴이 시작됨을 관찰하였다. 이 단계에서 이미 개구부 주위의 보 웨브에 항복이 넓게 발생하였다.

그림 5는 2개의 원형 개구부 부분에 발생한 항복의 범위를 보여주고 있으며 플랜지는 반복된 응력에 의한 국부좌굴의 변형을 보이고 있다. 또한 2개의 원형 개구부사이에 있는 보의 웨브가 크게 변형된 형태도 볼 수 있다. 결국 이 부분의 웨브가 균열을 일으켜 파단되는 파괴 형태를 보였다. 플랜지에는 더욱 큰 국부좌굴이 발생하였다. 그러나 보-기둥 용접부에는 비탄성 변형이 적은 항복이 발생하였으며 보-기둥 용접부에는 어떠한 균열도 보이지 않았다.

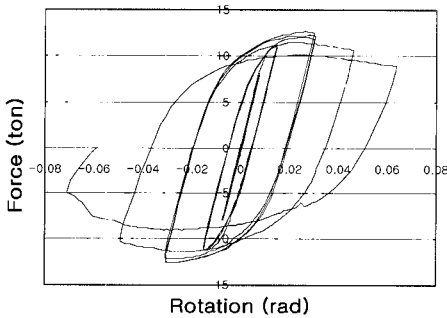


그림 4 시험체 SDC3의 이력곡선

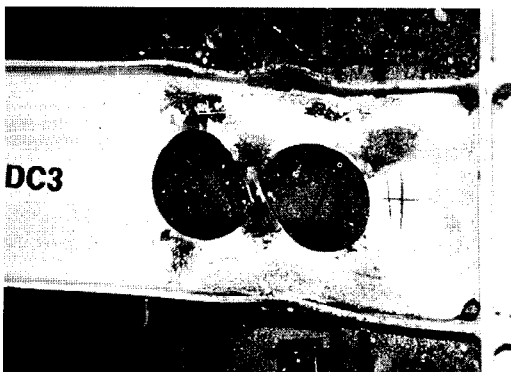


그림 5 시험체 SDC3의 좌굴형상

3.2 시험체 SDC3P

이 시험체는 시험체 SDC3와 동일하다. 다만 2개의 원형 개구부 사이에 수직 스틱프너를

웨브의 양쪽에 부착하였다. 그림 6은 보 부재의 단부에 재하된 하중과 회전변형관계의 이력곡선을 보여주고 있다.

이 시험체의 거동은 시험체 SDC3와 비교할 필요가 있다. 시험체 SDC3와 마찬가지로 전체적인 이력곡선은 최대하중에 도달할 때까지 매우 안정적이었다. 보의 회전변형이 0.0297에서 3번째 사이클의 반복하중을 받은 후 0.0456의 회전변형으로 증가하는 과정에서 국부좌굴이 발생하기 전까지는 시험체 SDC3와 거의 동일한 거동을 보였다. 이 시험체는 시험체 SDC3보다 국부좌굴이 발생한 후 강도의 감소는 적게 발생하였다. 보 플랜지의 국부좌굴은 스틱프너의 영향으로 국부적으로 발생하였다. 스틱프너를 설치하여 국부좌굴의 발생을 다소 지연시켰다. 그러나 전체적인 거동은 크게 개선되지 않았다. 그림 4와 그림 6을 비교하여 보면 스틱프너를 설치하여 다소 개선된 거동을 볼 수 있다.

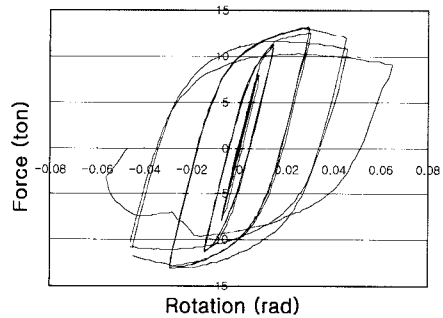


그림 6 시험체 SDC3P의 이력곡선

그림 7은 실험종료 후 시험체의 파괴 형상을 보여준다. 플랜지는 시험체 SDC3의 경우 보다 국부좌굴이 국부적으로 좁은 범위에서 발생하였고 2개의 원형 개구부사이에 있는 보의 웨브가 적게 변형된 형태를 볼 수 있다. 비탄성 변형이 기둥 플랜지와 스틱프너 사이의 보 단면에 집중되어 발생하게 됨을 볼 수 있다. 이러한 비탄성 변형의 집중현상 때문에 보의 회전변형이 0.05를 넘으면서 보 용접부의 스킵 부분에서 균열이 발생하였다. 이러한 균열의 발생은 내진성능에 바람직하지 않은 현상이다.



그림 7 시험체 SDC3P의 좌굴형상

3.3 시험체 SDC5

이 시험체도 시험체 SDC3와 동일하다. 다만 2개의 원형 개구부 사이의 간격을 50mm로 증가시켰다. 개구부 사이의 간격을 증가시킨 것은 시험체 SDC3의 경우 그 부분에서 큰 비탄성변형을 받기 때문에 결국 균열되고 파단되는 현상을 개선하기 위함이다. 그림 8은 보 부재의 단부에 재하된 하중과 회전변형관계의 이력곡선을 보여주고 있다.

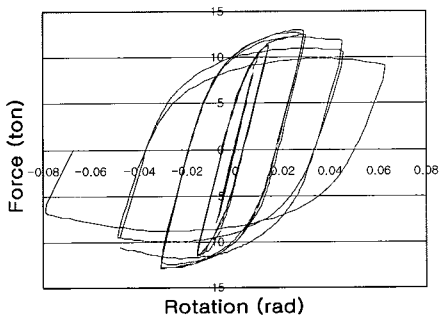


그림 8 시험체 SDC5의 이력곡선

이 시험체의 거동도 시험체 SDC3와 비교할 필요가 있다. 시험체 SDC3와 마찬가지로 전체적인 이력곡선은 최대하중에 도달할 때까지 매우 안정적이었다. 보의 회전변형이 0.0456으로 증가하는 과정에서 국부좌굴이 발생하기 전까지는 시험체 SDC3와 거의 동일한 거동을 보였다. 그러나 국부좌굴 후 시험체 SDC3보다 강도의 감소는 적게 발생하였다. 그림 4와 그림 8을

비교하여 보면 큰 차이점을 볼 수 없다. 다만 회전변형이 0.0456인 사이클과 0.0639인 사이클에서 시험체 SDC3와 비교할 때 에너지 소산능력이 증가하였음을 볼 수 있다. 그림 9는 실험이 종료된 후의 시험체를 보여주고 있다.

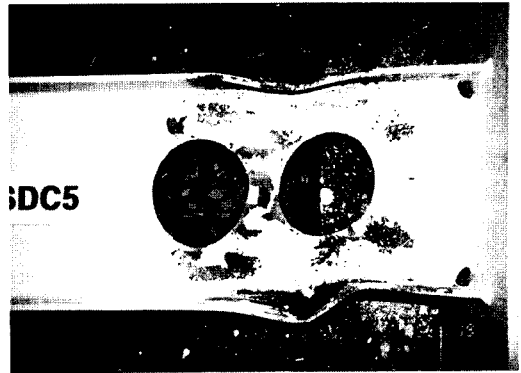


그림 9 시험체 SDC5의 좌굴형상

3.4 시험체 SEGW

이 시험체는 기둥 플랜지에서 조금 떨어진 보 단면에 계란형 개구부를 갖고 있다. 개구부의 좁은 200mm로서 보 좁은 2/3에 해당하고 다른 시험체의 개구부보다 크게 설계되었다. 그림 10은 보 부재의 단부에 재하된 하중과 회전변형관계의 이력곡선을 보여주고 있다.

이 시험체의 전체적인 이력곡선은 앞서 기술된 2개의 원형 개구부를 갖는 3개의 시험체보다 좋지 않은 거동을 보였다. 이력곡선은 최대하중에 도달한 후 안정적이지 못했으며 변형 능력과 에너지 소산능력이 감소하였다. 시험

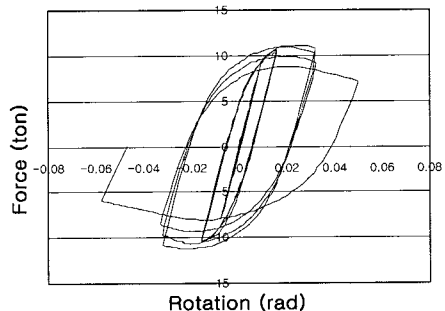


그림 10 시험체 SEGW의 이력곡선

체는 하중을 증가하면서 항복은 보 개구부 부분에서 집중적으로 발생하였으며 보의 접합부에는 항복이 발생하지 않았다. 시험체는 보 단부의 회전변형이 0.0297인 1번째 사이클에 도달할 때까지는 매우 안정적이었으나 2번째 사이클부터는 강도가 감소하는 이력곡선을 보였다. 3번째 사이클에서는 강도가 더욱 감소하며 에너지 소산능력도 감소하였다. 그림 11은 이미 개구부 주위에서 비렌달 트리스의 소성힌지 변형을 보이고 있다. 압축응력을 받는 플랜지는 심한 변형을 일으키고 웨브도 면외방향으로 국부좌굴을 일으켰다. 보-기둥 용접부에는 비탄성 변형이 발생하지 않았으며 보-기둥 용접부에는 어떠한 균열도 보이지 않았다.



그림 11 시험체 SEGW의 좌굴형상

3.5 시험체 SEGN

이 시험체는 시험체 SEGW와 동일하다. 다만 계란형 개구부의 춤이 150mm로서 SEGW에 비해 작다. 그림 12는 보 부재의 단부에 재하된 하중과 회전변형관계의 이력곡선을 보여주고 있다.

이 시험체의 거동은 시험체 SEGW의 거동과 비교할 필요가 있다. 그림 10과 그림 12를 비교하여 보면 시험체 SEGN이 시험체 SEGW보다 크게 개선된 거동을 보였음을 알 수 있다. 이력곡선은 최대하중에 도달한 후에도 안정적이었으며 변형능력과 에너지 소산능력도 감소되지 않았다. 하중을 증가하면서 항복은 보

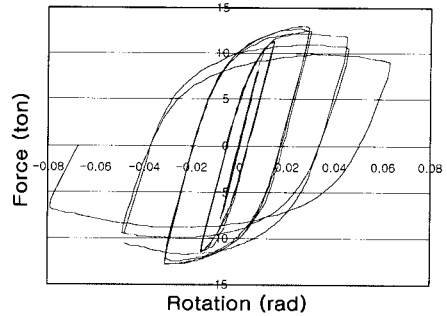


그림 12 시험체 SEGN의 이력곡선

개구부와 기둥사이의 보 플랜지와 웨브에 넓게 발생하였음을 볼 수 있었다. 시험체는 보의 회전변형이 0.0297인 3번째 사이클까지 매우 안정적이었다. 회전변형이 0.0456으로 증가하면서 보 플랜지에 국부좌굴이 시작되었고 강도가 다소 감소하는 거동을 보였다. 0.0456의 회전변형에서 재하된 2번째 사이클에서 강도는 더욱 감소하였고 보 플랜지의 국부좌굴은 더욱 크게 발생하였으며 웨브도 면외좌굴을 보였다. 그림 13에서 이러한 파괴모드를 볼 수 있다. 보-기둥 용접부에는 비탄성 변형이 발생하지 않았으며 보-기둥 용접부에는 어떠한 균열도 보이지 않았다.

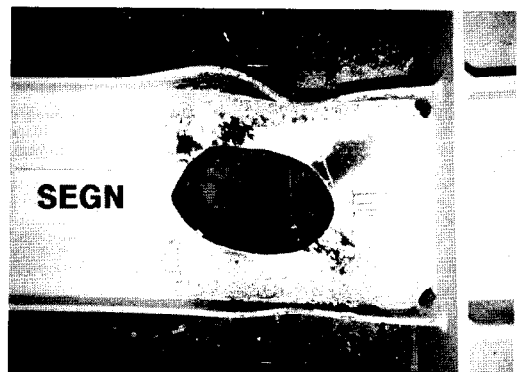


그림 13 시험체 SEGN의 좌굴형상

4. 실험결과와 분석

4.1 시험체의 최대강도

표 1에서 P_{pc} 와 P_{bc} 는 보-기둥 접합부와

개구부의 위험단면에서 보의 소성모멘트에 해당하는 보 단부의 하중이다. 이 값은 전단력의 영향을 무시하고 산정한 값이다. 시험체는 P_{pc} 가 P_{pe} 보다 크게 설계되었다. 즉 보 단부에서 하중을 증가할 때 하중이 P_{pe} 에 도달하면 기둥과의 접합부에서 보는 휨모멘트에 의해 소성화되어 하중의 증가는 발생하지 않고 개구부 위험단면은 극한상태에 아직 도달하지 않음을 의미한다. 그러나 시험체를 설계하기 전 유한요소해석을 통한 분석을 한 결과 기둥 접합부에서의 보 플랜지에 항복후 변형경화되므로 결국에는 개구부의 위험단면에서 소성힌지와 같은 극한상태에 도달하게 됨을 알 수 있었다. 이러한 복잡한 현상을 조사하고자 시험체는 P_{pc} 는 P_{pe} 보다 크게 설계되었다. 5개의 시험체에 대한 실험결과는 시험체 SEGW를 제외하고 모두 이러한 현상을 보였다. 실험중에 도달한 최대하중은 예상하중을 최대 10.2%, 최소 5.6% 초과하였으며 평균 7.8% 초과하는 것으로 나타났다. 시험체 SEGW는 최대하중이 예상하중의 97%에 도달하였는데 이것은 개구부에서 보의 플랜지가 국부좌굴을 조기에 일으킨 때문이다. 나머지 4개의 시험체도 보 플랜지에 국부좌굴이 발생하면서 강도가 감소하는 현상을 보였다. 보의 회전변형이 약 0.0278에 도달하였을 때 최대강도에 도달하였으며 보 플랜지는 국부좌굴을 일으키는 현상을 보였다. P_{pe} 의 값이 P_{pc} 의 값보다 작았지만 접합부에서의 보는 변형경화에 의한 강도의 증가 때문에 소성힌지는 개구부에서 발생하였다. 시험체 SEGW를 제외하고 시험체의 최대 하중은 P_{pe} 과 P_{pc} 보다 큰값을 보여 강도상의 조건을 충족하는 것으로 나타났다.

4.2 시험체의 이력거동

5개의 시험체중 시험체 SEGW를 제외하고 4개의 시험체는 회전변형이 약 0.0297인 3번째 사이클까지 이력거동은 매우 안정적이었고 반

복적이었다. 이러한 반복성은 철골보의 전형적인 거동이다. 다만 0.0297의 회전변형에서 3사이클의 반복하중을 재하한 후 국부좌굴의 발생시점과 발생 후 국부좌굴의 거동에 따라 강도의 감소폭과 이력곡선이 다르게 나타났다. 시험체 SDC3P와 SDC5는 거의 유사한 최대강도 후 거동을 보였으며 시험체 SDC3보다 다소 변형능력이 증가하고 에너지 소산능력이 증가함을 보였다. 시험체 SDC3P에 하중(변위)을 증가하였을 때 보의 스캐럽에서 균열을 보였으므로 시험체 SDC5의 경우처럼 개구부사이의 간격을 최적화하면 거동이 개선되리라고 판단된다. 시험체 SEGN의 이력거동도 시험체 SDC3P와 SDC5의 거동과 유사하게 나타났다. 개구부에서 응력집중이 발생하지 않아서 조기 균열이 발생하지 않았으며 이력거동이 향상되는 거동을 나타냈다고 판단된다. 5개의 시험체중에서 시험체 SEGW가 가장 좋지않은 이력거동을 보였다. 개구부의 높이가 보 층의 2/3에 해당하여 비교적 큰 개구부를 갖기 때문이었다. 다른 시험체에 비해 실험결과는 낮은 최대강도를 보였으며 최대 회전변형도 작게 나타났다. 시험체 SEGN과 SEGW의 거동에 대한 분석을 통하여 계란형 개구부의 최적크기를 분석할 필요가 있다고 판단된다.

4.3 소성 회전변형

강한 지진에 대비하여 건설되는 철골구조물에서 보의 접합부가 보유하여야 하는 회전변형능력에 대한 평가는 어려운 과제이다. 구조물의 형태와 규모가 다르며 예상되는 지진의 크기와 진동의 형태도 다르기 때문이다. 현재 구조물의 회전변형 수요(demand)를 산정하는 방법은 과거의 지진기록을 이용하여 골조의 비탄성 동적해석을 하는 것이다.

철골보 접합부의 회전변형능력은 소성 회전변형능력으로 평가하는 것이 일반적이다. Tsai와 Popov⁽⁷⁾에 의해 수행된 해석의 분석에 의하면 강한 지진에 대비한 철골 모멘트 저항 골조에

서 보의 소성 회전변형 수요는 0.015의 값이 합리적인 것으로 제시되었다. 이러한 0.015의 보 단부 소성 회전변형 기준에 근거하면 시험체 SEGW를 제외한 시험체는 만족한 비탄성 변형능력을 보였다. 시험체 SDC3와 시험체 SDC5가 최대강도에 도달하였을 때 소성 회전 변형은 0.0147과 0.0145로서 수치상으로는 0.015에 미치지 못하지만 최대강도에 도달한 후의 변형능력을 그림 4와 그림 8로부터 실제 구조물에서 요구되는 소성회전변형 수요를 충분히 초과한다고 판단된다. 시험체 SEGW는 소성 회전변형이 0.0121-0.0119를 나타내고 최대강도에 도달한 후 강도가 감소되고 에너지 소산능력도 감소되는 거동을 보여 만족스럽지 못한 거동을 보였다고 판단된다.

4.4 파괴모드

5개의 시험체가 보인 파괴모드는 대체로 동일하다고 판단된다. 최대강도에 도달한 후 보 플랜지의 비탄성 국부좌굴에 의해 강도가 감소하는 거동을 보였다. 시험체 SDC3와 시험체 SDC5는 유사한 파괴모드를 보이면서 실험이 종료되었다. 개구부 부분에서 비교적 넓은 부분의 플랜지가 소성화된 후, 보 플랜지의 비탄성 국부좌굴이 발생하였고 웨브도 면외로 변형을 일으켰으며 개구부사이의 웨브가 큰 비탄성 변형을 지지하여야 하는 형태로 발전되었다. 시험체 SDC3은 개구부사이의 웨브가 균열을 일으켜 결국 파단되었다. 그러나 시험체 SDC5는 개구부 사이의 웨브가 항복을 일으켰고 균열을 보이지는 않았다. 시험체 SDC3P는 SDC3에 비해 최대강도에 도달한 후 변형능력이 증가하는 거동을 보였다. 그러나 보 플랜지의 국부좌굴이 기둥면과 스티프너 사이에 집중되어서 보의 용접을 위한 스캐럽에 균열이 생기고 파단되는 모드를 보였다. 이러한 파괴모드는 재래식 보 플랜지 용접접합부에서 나타나는 형상이다.

계란형 개구부를 갖는 시험체 SEGW와 SEGN

도 앞서 기술한 3개의 시험체와 동일한 파괴모드를 보였다. 결국 보 플랜지의 비탄성 국부좌굴이 강도를 감소시키는 원인이 되었다. 비교적 큰 개구부를 갖는 시험체 SEGW의 경우 보 플랜지의 국부좌굴이 조기에 발생하였으며 따라서 강도도 감소하고 변형능력도 크게 저하하는 현상을 보였다. 상대적으로 작은 개구부를 갖는 시험체 SEGN의 경우 실험체 SDC5와 비슷한 거동을 보였다.

5. 연구결과의 요약 및 결론

보-기둥 접합부의 내진성능을 개선하기 위하여 5개의 시험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 접합부 시험체는 2개 형태를 택하였으며 변수를 주어 5개의 시험체에 대해 조사하였다. 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 강한 지진에 대비한 철골 모멘트 저항 골조의 소성 회전변형 수요가 0.015라는 기준과 비교할 때 5개의 시험체 중 시험체 SEGW를 제외하고 강도의 저하없이 소성회전변형이 0.015를 초과하여 만족할 만한 내진성능을 보였다. 시험체 SEGW는 개구부가 상대적으로 커서 보 플랜지의 국부좌굴이 조기에 발생하여 강도가 감소하는 거동을 보였다.
- 2) 2개의 원형 개구부를 갖는 시험체의 경우 강도는 예상된 소성강도를 초과하였고 이력곡선은 매우 안정적이었으며 변형능력도 충분한 것으로 나타났다. 시험체 SDC5의 거동이 가장 바람직하게 나타났으며 시험체 SDC3P는 비탄성 변형이 집중되어 발생하게 되어 보 스캐럽부분에 균열이 발생하고 파괴되었다.
- 3) 계란형 개구부를 갖는 시험체의 경우 개구부가 상대적으로 작은 시험체 SEGN은 바람직한 내진성능을 보였다. 강도와 변형능력 그리고 에너지 소산능력에서 충분한 능력을 보였다.
- 4) 시험체 SEGW를 제외하고 제안된 웨브 개

구부가 있는 접합부 시험체는 보 접합부와 개구부에서의 소성모멘트에 해당하는 하중보다 큰 강도를 갖는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 내진설계를 위한 강도요구조건을 만족한다고 판단된다. 실험중 도달한 최대하중은 개구부에서의 소성모멘트에 해당하는 하중 P_{pc} 보다 5.6~10.2% 크게 나타났다.

감사의 글

본 연구는 서울대학교 지진공학센타를 통한 한국과학재단 우수연구센타 지원금에 의해 수행되었다. 이에 감사를 드린다.

참 고 문 헌

1. Iwankiw, N., "Ultimate strength considerations for seismic design of the reduced beam section(internal plastic hinge)," *Engineering Journal*, AISC, Vol. 33, No. 1, 1997, pp. 3-10.
2. Chen, S. J., Yeh, C. H., and Chu, J. M., "Ductile steel beam-to-column connections for seismic resistance," *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 122, No. 11, 1996, pp. 1292-1299.
3. Tsai, K. C., Wu, S., and Popov, E. P., "Experimental performance of seismic steel beam-to-column moment joints," *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 121, No. 6, 1995, pp. 925-931.
4. Engelhardt, M. D. and Husain, A. S., "Cyclic-loading performance of welded flange-bolted web connections," *J. of Structural Engineering*, ASCE, Vol. 119, No. 12, 1993, pp. 3537-3550.
5. SSDA, *SSDA Beam Slot Connection Design Manual*, Seismic Structural Design Associates, Inc., Laguna Niguel, California, March, 1998.
6. Popov, E. P., Amin, N. R., and Louie, J. C., "Cyclic behavior of large beam-column assemblies," *Engineering Journal*, AISC, Vol. 22, No. 1, 1986, pp. 9-23.
7. Tsai, K. C. and Popov, E. P., "Steel beam-column joints in seismic moment resisting frames," Rep. No. UCB/EERC-88/19, EERC, University of California, Berkeley, 1988.