

철골접합부 상세별 에너지 소산 Energy Dissipation of Steel Connection Details

김 장 훈*
Kim, Jang Hoon

ABSTRACT

The evolved energy concept has been demonstrated to fir the seismic evaluation of various steel connection details with the objective basis. For this, the strain energy stored in the structural system obtained from the experimental database has been normalized by that of a benchmark system. In this notion, the ideal elastic-perfectly plastic structural system has been assumed as a benchmark. In addition, the attempt shows that those previously performed experimental database can be recycled to have further significance.

1. 서 론

내진설계나 보강에 대한 개념은 일찍이 미국, 일본 및 뉴질랜드 등 지진발생이 빈번하고 심각한 지진피해를 경험한 나라들을 중심으로 두터운 사회적 공감대 속에서 발달하였으며, 설계규준의 강화를 통하여 구조물의 건립 및 보강에 적용되어 왔다. 지진발생빈도 및 지진피해사례가 앞서 언급한 국가들보다 적은 우리나라에서도 근간의 터키, 대만, 일본 등에서 발생한 지진피해의 정도가 알려짐에 따라 지진대비책에 대한 사회적 관심이 높아지고 있다.

이 같은 추세에 따라 국내에서도 과거 10여년간 지진에 의한 구조물의 거동에 대하여 적지 않은 연구가 수행되었고 그에 대한 성과도 있었지만, 당대의 연구결과와 후속 연구결과와의 지속성에 한계가 있었으며, 또한 서로 다른 연구자에 의하여 수행된 연구결과 간의 상관관계를 수립하는데 어려움이 있었다. 결과적으로 각각의 연구자에 의하여 수행된 연구가 독자적으로는 의미를 가질지는 모르나 구조 시스템간의 성능이나 비용 등의 비교를 통한 합리적인 그리고 객관적인 선택에 있어서는 구체적으로 큰 도움이 되지 못하는 것이 현실이다. 이는 특히 실험을 동반한 연구의 경우 실험결과의 효율적 재활용이라는 측면에서 심각하게 고려하여야 할 문제이다.

* 정회원 · 아주대학교 건축학부 부교수

이러한 문제는 강재와 다른 재료, 또는 같은 강재 구조물이라 하더라도 강도, 구조시스템 및 상세에 따른 실험결과의 객관적 비교가 가능하지 않은 데서 비롯된다고 하겠다. 이로 인하여 연구자들은 자신이 선호하는 또는 제안하는 시스템이 지진하중에 대하여 더 우월하리라는 막연한 확신이 있을 뿐 서로 다른 시스템간 비교를 위한 구체적인 지표를 제시하지 못하는 것이 현실이다. 이러한 문제의 해결은 강재 소비자들이 구조시스템을 선정할 때 가질 수도 있는 혼동을 줄일 수 있을 뿐만 아니라 궁극적으로는 건설자재로서 강재 소비를 촉진하는 하나의 방편이 되리라고 생각한다.

무차원화 한 에너지 흡수효율은 최근에 제안된 구조물의 내진성능 평가방법으로서 서로 다른 재료간, 상세간, 구조 방식간 및 서로 다른 크기의 구조체간 내진성능에 대한 객관적인 비교를 가능케 한다.(김장훈 2001, 2003) 본 연구는 문헌조사를 통하여 수집한 실험결과를 분류하여 에너지 곡선을 작성하면 여러 가지 강구조 시스템간 내진성능에 대한 객관적인 비교를 가능하게 하며, 실험결과의 재활용 및 궁극적으로는 구조시스템별 에너지 흡수효율 데이터베이스를 구축하여 설계에 적용할 수 있게 하기 위하여 계획되었다. 이 논문에서는 기존의 강구조 시스템 실험 연구결과를 이용하여 각 시스템이 보유하고 있는 에너지 흡수효율 데이터베이스로 활용 가능성을 보이고자 한다.

2. 실험데이터베이스

이 논문에서 고려된 강구조 보-기둥 접합부 시스템은 SAC Joint Venture(FEMA 1997) 데이터베이스로부터 입수한 것이다. SAC Joint Venture는 1994년 미국 캘리포니아 노스리지 지진에서 관찰된 철골 모멘트골조 보-기둥 접합부의 취성파괴 가능성을 연구하고 이를 보완하고자 SEAOC(Structural Engineers Association of California), ATC(Applied Technology Council) 및 CURE(California Universities for Research in Earthquake Engineering)가 연합하여 구성한 연구단위이다.

1994년 이전까지는 지진에 의한 철골 모멘트골조의 취성파괴 가능성은 심각하게 고려되지 않았었다. 그러나 모멘트골조의 접합부는 보와 기둥으로부터 발생한 엄청난 크기의 모멘트와 전단력을 부담하여야 하며, 특히 항복 후 연성거동을 하게 되면 엄청난 양의 에너지를 소산시켜야 하기 때문에 철근콘크리트 골조의 경우에는 보-기둥 접합부가 가급적 소성영역으로 넘어가지 않도록 강하게 설계하고 있다. 이는 일반적으로 보-기둥 접합부의 에너지 소산능력이 에너지 소산요구량에 비하여 크지 않은 것에 기인한다. 따라서 철골 모멘트골조 보-기둥 접합부는 지진에 의한 소성거동 시 많은 양의 에너지를 소산시켜야 하기 때문에 가급적이면 소성영역으로 넘어가지 않도록 설계하거나 보강하는 것이 바람직하다고 하겠다.

이 절에서는 여러 가지 상세의 46개 보-기둥 접합부를 고려하되 상세별 특징, 상세별 거동 및 상세별 파괴모드 등을 열거하고자 한다. 여기에는 1994년 노스리지 지진 이전의 철골상세와 이후 보완된 상세가 포함된다.

수집된 철골 모멘트골조 보-기둥 접합부를 실험한 연구기관으로는 Texas A&M University(3개), University of Texas at Austin(5개), University California at San Diego(8개), University of

California at Berkeley(9개), Lehigh University(11개), Virginia Polytechnic Institute(10개) 등으로 모두 6개 대학에서 46개 접합부를 시험한 것이 된다. SAC Joint Venture에서는 이들에 대한 실험 보고서로부터 실험결과를 발췌하여 시험체 및 설치에 대한 정보와 시험결과를 웹사이트에 올려놓았다.(SAC)

2.1 시험체 및 접합부 상세

수집된 보-기둥 접합부를 형태별로 분류하면, End Plate(Pre-Northridge), PreNR-NT, Flange Plate, Cover Plate, Rib, Reduced Beam Section (RBS), Free Flange 등으로 대별된다.

End Plate(Pre-North)는 보를 기둥에 접합시키기 위한 매개부재이며, 주로 다른 형태의 접합부와 함께 사용된다.

Notch Tough Weld(NT)는 인성이 높은 용접방식을 의미하며 PreNR-NT와 같이 다른 접합부 상세 형태와 함께 사용된다. 여기서 PreNR은 Pre-Northridge와 같은 의미로 노스리지 지진 이전에 건설된 용접을 위한 backing bar가 남아 있거나, 지진 후에 제거된 보-기둥 접합상세를 의미한다.

Cover Plate는 보의 Flange와 같은 방향으로 설치된다. 이 상세에서는 Cover Plate와 보의 Flange 둘 다 기둥에 접합되며, 이것이 Flange Plate와 Cover Plate를 구분하는 차이점이 된다.

Flange Plate는 보의 Flange와 같은 방향으로 놓이며, Cover Plate와는 달리 보의 Flange를 제외하고 Flange Plate만 기둥면에 접합된다.

Rib은 보의 Web과 같은 방향으로 설치하며, 보의 Flange에 부착되어 기둥에 접합된다. Rib은 마치 런치와 같이 보 단부의 강성을 증가시킬 목적으로 사용한다.

RBS(Reduced Beam Section)는 보의 Flange 바깥 가장자리 일부를 등그렇게 깎아낸 것으로 보의 휨 저항을 특정 위치에서 감소시켜 소성거동을 유도하여 손상을 집중시키고자 사용한다. 이때 드릴구멍이 뚫린 Flange도 RBS에 속하는 것으로 간주한다.

보 Web이 기둥에 접합되는 상태에 따라 볼트에 의하거나 용접, 또는 볼트와 용접 모두를 사용하는 경우로 구분할 수 있다. 용접의 경우 Web을 기둥에 직접 용접시키는 방법이 있고(Welded), 전단판을 덧붙여서 용접하는 방법이 있다.

수집된 보-기둥 접합부에 대한 실험에 사용된 재료로는 보와 기둥 공히 ASTM A572 Gr50 또는 A992를 사용하였다. A572 Gr50는 항복강도 $F_y = 345\text{MPa}(50\text{ksi})$, 최대강도 $F_u = 450\text{MPa}(65\text{ksi})$ 이다. A992는 1998년부터 채택된 새로운 구조재료로서 항복강도는 A572와 마찬가지로 이다.

수집된 보-기둥 접합부를 구성하는 단면은 보에는 W36x150, W30x99, W27x194, W24x68, W24x62 등이 사용되었으며, 기둥에는 W27x258, W27x194, W27x146, W14x398, W14x311, W14x283, W14x257, W14x193, W14x176, W14x120 등이 사용되었다. 이 중 가장 많이 사용된 단면은 보에는 W36x150과 W30x99, 기둥에는 W14x398과 W14x176이다.

보-기둥 접합부 시험체가 설치된 형태에 따른 경계조건은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 즉 일방향 보-기둥과 이방향 보-기둥이 그것이다. 일방향 보-기둥은 기둥의 한쪽 면에만 보를 접합시

킨 것으로서 보나 기둥의 끝에 하중을 가하는 형태이다. 이방향 보-기둥은 기둥의 양쪽 면에 보를 접합시킨 것으로서 기둥의 끝에 하중을 가하는 형태이다. 두 경우 모두 실험의 편의를 위하여 기둥에는 축방향력을 가하지 않았다. 수적으로 보면 일방향 보-기둥 접합부가 33개, 이방향 보-기둥 접합부가 13개이다.

보 상부 Flange에 대한 경계조건은 Slab이 있는 경우와 없는 경우로 나눌 수 있다. 보 상부 Flange에 Slab이 있는 경우는 보와 Slab이 복합구조(Composite Structure)로서 거동하게 되어 조의 안정에 더 유리하다고 할 수 있다. 수집한 보-기둥 접합부의 경우 Slab이 있는 접합부가 4개이고, Slab이 없는 접합부가 42개이다.

2.2 상세별 거동 및 파괴형태

이 절에서는 수집된 보-기둥 접합부 상세별 거동특성 및 파괴모드를 간략하게 정리하기로 한다. 파괴실험에서 구조시스템의 거동특성은 시험체의 힘-변위 이력곡선을 통하여 나타낼 수 있다. 철골 모멘트골조 보-기둥 접합부는 대개 연성거동을 함에 틀림없지만, 상세에 따라서는 상당히 취약한(Brittle) 특성을 보이는 경우도 있음에 주의하여야 한다. 이러한 취약한 상세를 갖는 접합부에 지진하중이 작용하였을 경우에는 막대한 지진에너지 요구량을 소성거동에 의하여 소산시킬 수 없으므로 구조시스템의 부분적 또는 전적인 파괴가 예상된다.

보-기둥 접합부 상세가 취약할 경우 이력곡선은 큰 변위까지 반복거동하지 못하고 작은 연성도에서 재료의 파단에 의하여 갑자기 강도를 잃게 된다. 하지만 인성(Toughness)이 큰 상세의 경우에는 접합부 이력곡선은 큰 변위까지 반복거동하며, 반복회수가 증가함에 따라 재료의 피로로 인하여 강도가 서서히 감소됨을 보여준다.

접합부 상세가 End Plate는 기둥면에 접하는 보의 끝단에 강판을 용접하고 강판과 기둥 Flange 면 사이를 볼트로 조임으로 접합시키는 상세로서 노스리지 지진 이전에 많이 사용되던 접합부 상세이다. 상세로부터 암시되듯 보-기둥 접합부 시스템이 큰 변형을 하게 되면 접합볼트가 인장력으로 인하여 늘어나게 되고 반복하중에 의하여 하중작용 방향의 바뀜이 반복되면 볼트는 저사이클 피로에 의하여 지배될 개연성이 상당히 크게 된다. 보고된 접합부 상세 End Plate의 대개의 파괴모드는 접합볼트의 파단 및 End Plate의 항복 후 파단 등이다. 경우에 따라서는 보의 Flange와 Web의 항복 후 국부좌굴에 의한 횡좌굴도 관찰된 사례도 보고 되어 있다.

접합부 상세가 PreNR-NT인 경우 파괴모드는 보 Flange에 발생한 연성의 파단 및 국부좌굴 후의 파단 등이었다. 경우에 따라서는 계획된 대로 실험이 끝날 때까지 파단이 발생하지 않은 공시체도 있었다.

접합부 상세가 Cover Plate인 경우 대개의 파괴모드는 보의 Flange와 Web의 항복 후 국부좌굴(Local Buckling)로 인한 파단, 횡좌굴(Lateral Torsional Buckling)에 의한 불안정에 기인하였다. 이로 말미암은 강도감소는 궁극적으로 접합부의 소성회전능력의 감소로 이어져 실험이 중단되었다. SAC 보고서에서는 강도가 최대 저항력의 80% 미만으로 떨어지면 횡하중 저항능력을 상실한 것으로 간주하였다.

접합부 상세가 Flange Plate인 경우 파괴모드는 전단판 끝의 홈용접으로 시작된 기둥 Flange를 따라 발생한 취성의 파단이었다. Slab과 함께 복합구조를 이루는 경우에는 보 하부 Flange에 파단

이 발생하였다.

접합부 상세 Rib은 기둥에 면하는 보의 끝단에 End Plate가 용접되어 설치되고 보의 Flange와 End Plate에 용접된 Rib이 헌치 형태로 설치된다. 보와 기둥의 접합은 End Plate와 기둥 Flange 간을 볼트로 조인다. 접합부 상세 Rib의 파괴모드는 보 Flange의 항복 후 심한 국부좌굴, End Plate의 항복, 볼트의 파단, 기둥 Web 스틱프너의 항복 및 기둥 Flange의 항복 등이었다.

접합부 상세가 RBS인 경우 파괴모드는 보의 횡좌굴로 인한 불안정, 시험용 횡가새 시스템의 뿔힘, 보의 Flange 면적이 감소된 부분에서의 연성의 파단, 항복 후 국부좌굴, 보 Web의 국부좌굴, 보의 횡좌굴에 의한 불안정, 비틀림에 의한 기둥 Flange의 면외(Out-of-Plane) 변형 및 기둥 Flange의 균열 등이었다.

3. 에너지곡선 및 에너지 흡수효율

에너지곡선 및 흡수효율이론은 다른 논문(김장훈 2001, 2203)에서 소개된 바 있으므로 이 논문에서는 지면 관계 상 자세한 소개는 피하기로 한다. 에너지곡선 및 에너지 흡수효율은 완전 탄성·소성(EPP) 시스템을 기준으로 하여 구조시스템의 힘-변위 관계곡선으로 둘러싸인 면적, 즉 에너지 보유능력을 누적소성변위에 대하여 시각화 한 것이다. 이 때 EPP 시스템의 무차원화 한 에너지곡선은 누적소성변위 자체이므로 누적소성변위에 대하여 기울기 1인 직선이 된다. 고려하는 구조 시스템의 무차원화 한 에너지곡선은 실험결과 얻은 힘-변위 관계곡선으로부터 구할 수 있다. 에너지 흡수효율은 결국 EPP 시스템의 에너지곡선 값에 대한 구조시스템의 에너지곡선 값의 비를 의미하며, 이를 달리 표현하면 평형사변형 면적에 대한 빗금 친 부분의 면적의 비가 된다. 이 때 에너지 흡수효율을 평가하기 위한 두 가지 EPP 시스템을 생각할 수 있다: 즉 (1) 정적(Static) EPP 시스템과 (2) 동적(Kinematic) EPP 시스템이다.

정적 EPP 시스템은 고정된 값(공칭강도)을 기준으로 에너지 흡수효율을 구하는 것이며, EPP 시스템의 변위나 가력 횟수에 관계없이 일정한 값을 유지하는 것으로 간주하며, 일정한 기준 값에 대한 에너지 양의 상대적인 변화를 보여준다.

동적 EPP 시스템은 매번의 가력 사이클마다 최대하중을 기준으로 하여 구한다. 그러므로 매 가력 사이클의 최대하중은 반복횟수가 더하여짐에 따라 피로로 인하여 감소하며, 이를 감안하여 에너지 흡수효율을 구하면 다음과 같다. 이렇게 구한 에너지 흡수효율은 ATC-40(1996)에서 정의된 감쇠 수정계수(α -factor)로 간주될 수 있다.(김장훈 2002)

4. 접합부 상세별 에너지 특성

상세별 에너지곡선의 특성을 파악하기 위하여는 먼저 에너지곡선이 의미하는 바를 알아야 한다. 그림 1에서 Y-축을 무차원화 한 에너지(Normalized Energy)로 갖는 그래프들을 보면, 누적에너지

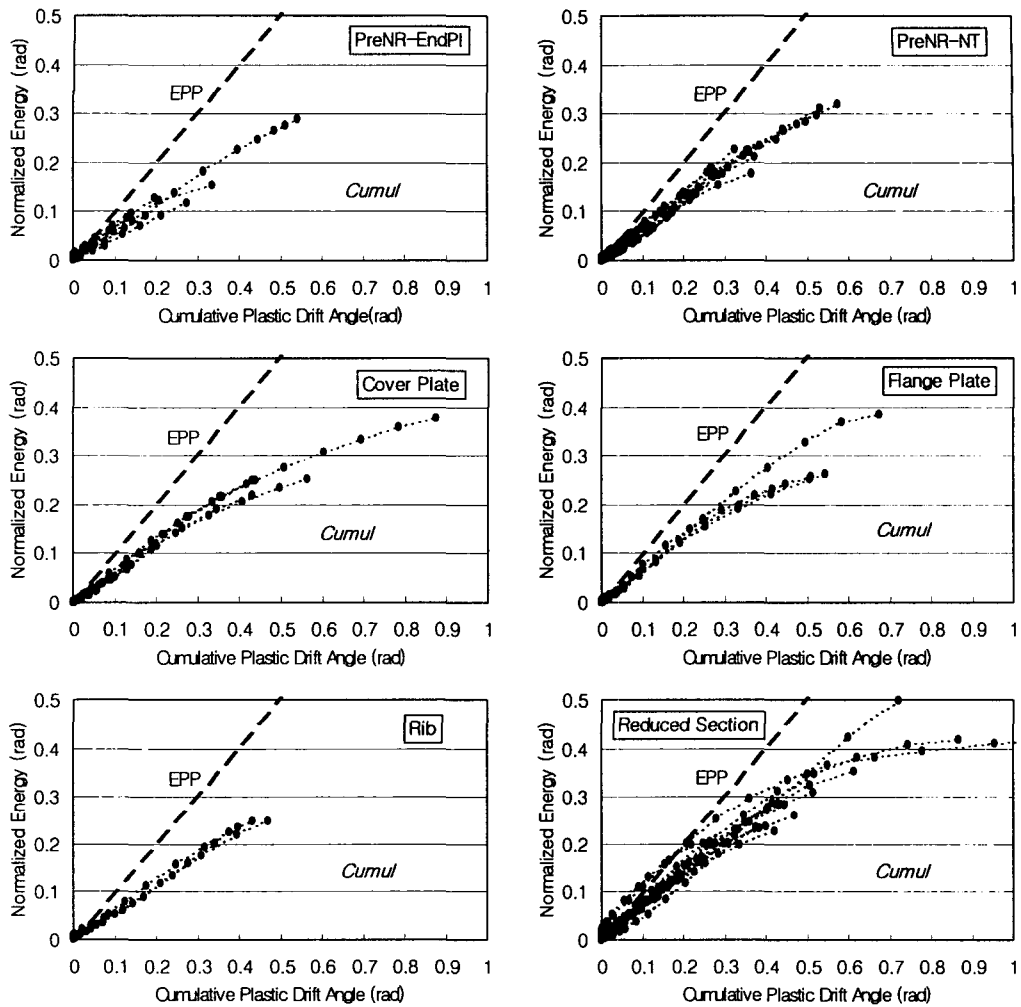


그림 1 무차원화 한 상세별 누적에너지

가 어떤 것은 거의 직선으로 보이는 경우도 있고, 또 다른 것은 곡선으로 보이는 경우도 있다. 직선으로 보이는 것들은 그 구간에 있어서 에너지 흡수량이 거의 일정하게 유지됨을 의미하고 있다. 곡선으로 보이는 에너지곡선의 경우는 기울기가 점점 작아지고 있는데 이는 이력거동에 의한 에너지 소산량이 급격하게 감소하고 있음을 의미한다.

PreNR-EndPI과 PreNR-NT 상세는 노스리지 지진 이전의 상세를 갖는 보-기둥 접합부라서 에너지곡선이 유지되는 누적소성변위 구간이 다른 상세의 보-기둥에 비하여 작음을 알 수 있다. 또한 사이클 당 에너지 소산량도 시험체별로 편차가 상당히 크며 사이클 당 에너지 소산능력의 상

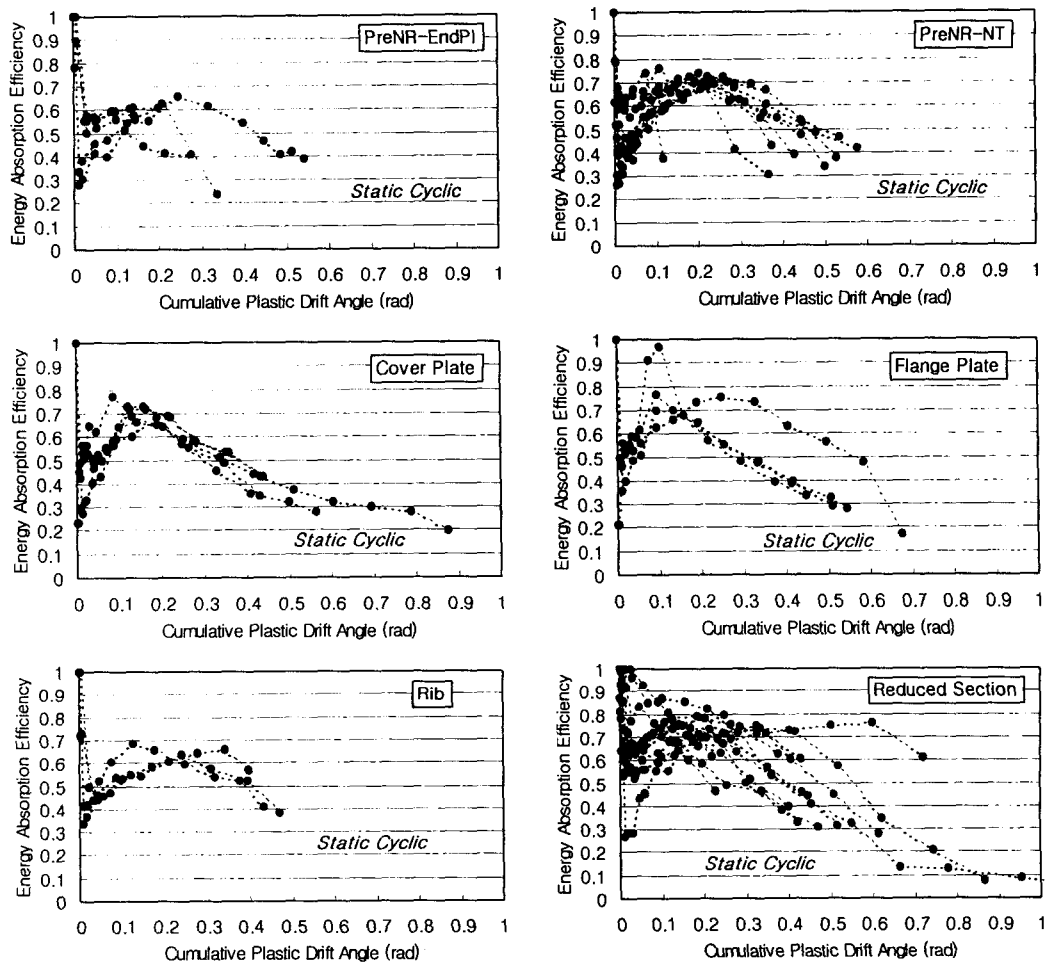


그림 2 상세별 에너지 흡수효율

실시점이 일관성이 없음을 알 수 있다. PreNR-EndPI의 경우 누적소성변위가 약 0.15 radian까지는 안정되게 에너지를 흡수하고 있음을 알 수 있으며, PreNr-NT의 경우에는 약 0.2radian까지 안정영역을 알 수 있다. 그림 2의 에너지 흡수효율곡선에서도 사이클 당 에너지 흡수효율곡선의 효율성 상실시점을 보면 앞서 언급한 경향이 나타남을 알 수 있다. 유효누적소성변위 구간에서 사이클 당 에너지 흡수효율은 PreNr-EndPI이 0.4~0.6 정도이고, PreNr-NT가 0.5~0.7 정도이다.

Cover Plate의 경우에는 5개의 시험체별 에너지곡선의 편차가 상당히 작음을 알 수 있다. 물론 종국적인 에너지 소산량이 월등하게 큰 상세를 갖는 보-기둥 시스템이 하나 있지만 누적에너지곡선의 기울기가 그 앞의 부분에 비하여 월등히 작아지기 때문에 시스템의 안정을 유지하며 에너지

를 소산시키는 것이라고 보기는 어렵다. 그러므로 이 시험체를 제외하면 Cover Plate의 에너지 소산의 안정영역을 약 0.4radian이라고 볼 수 있다. Cover Plate와 그 상세가 비슷한 Flange Plate의 경우 에너지곡선의 특성은 Cover Plate의 것과 비슷하지만 안정적인 누적소성변위 영역은 약 0.5radian이상에 있음을 알 수 있다. Cover Plate의 경우 사이클 당 에너지 흡수효율은 유효 누적소성변위 구간에서 0.4~0.7 정도 분포되고, Flange Plate의 경우 0.3~0.8 정도이다. 이 두 상세에서는 사이클 당 에너지 흡수효율이 누적소성변위의 증가와 함께 감소되고 있다.

보-기둥 접합부 상세가 4개인 Rib의 경우에는 조기에 파단된 하나의 공시체를 제외하면 누적소성변위각 0.4radian 이상까지 매우 안정적인 에너지 소산을 보여주고 있다. 이 소성변위 구간에 걸쳐 시험체간 에너지 소산능력 편차가 상당히 적은 것으로 나타났다. 에너지 흡수효율에 있어서도 상당히 안정적임을 알 수 있다. 사이클 당 에너지 흡수효율은 0.5~0.6 정도로 일정하게 유지되고 있다.

Free Flange의 경우, 단 두 개의 시험체에 대한 결과가 있지만 그 중에 하나는 누적소성변위 0.17radian에서 파단되었고, 다른 하나는 0.5radian까지 지속적인 에너지소산능력을 보이고 있다. 두 시험체의 에너지곡선이 너무 상이하여 Free Flange 접합부는 에너지곡선 특성 파악이 어렵다.

Reduced Beam Section의 경우 14개의 공시체에 대한 시험결과를 정리하였는데 시험체별 에너지 소산능력의 분포가 매 사이클에 대하여는 상당히 편차가 크게 나타난 것과는 달리 누적에너지 소산능력은 상당히 일관성이 유지되었다. 대부분의 시험체가 누적소성변위 0.4radian까지 안정된 에너지 소산경향과 함께 EPP 시스템에 상당히 가까운 에너지 소산능력을 보여주고 있다. 사이클 당 에너지 흡수효율은 하나의 시험체를 제외하고는 누적소성변위 0.2radian까지는 0.5 이상을 유지하고 있음을 알 수 있다. 사이클 당 에너지 흡수효율은 0.5~0.9 정도 분포되었지만 누적소성변위의 증가와 함께 상당히 급하게 감소하고 있다.

4. 결론

이 논문에서는 에너지 개념을 46개의 강구조 접합부 실험결과에 적용하여 그 특성을 살펴보았다. 에너지 흡수효율은 기하학적 및 재료적 측면에서 서로 다른 구조 시스템간의 지진에너지 흡수능력을 상대적이고 객관적으로 비교할 수 있음을 보여 주었다. 또한 기 실험·보고된 데이터베이스를 재활용하여 개발된 이론을 적용하였다.

감사의 글

이 연구는 POSCO의 2002년 사외 위탁과제 사업 지원 하에 수행된 것임을 밝히며, 이에 감사드린다.

※ 참고문헌은 지면이 부족하여 의도적으로 생략하였음.