

RHS기둥-보 접합부의 모멘트전달효율 평가

Evaluation of Moment Transfer Efficiency of a Beam Web at RHS Column-to-Beam Connections

김영주¹⁾ · 오상훈²⁾

Kim, Young-Ju · Oh, Sang-Hoon

국문 요약 >> 본 논문에서는 철골 각형강관단면(RHS) 기둥-보 접합부에서 웨브의 모멘트 전달효율을 평가하였다. 먼저, 5개의 철골보 접합부에 대한 비선형 유한요소해석을 수행하였다. 이들은 접합부 상세가 다르게 설계되었고, 따라서 휨저항 성능이 각기 다르다. 해석결과 RHS 기둥을 가진 모델은 기둥 플랜지의 면외변형 때문에 WF(Wide Flange) 기둥을 가진 모델에 비해 모멘트 전달효율이 저하함을 보였다. 스캘럽(WAH)과 얇은 강관기둥 두께도 모멘트 전달효율의 저하를 가져오는 원인으로, 결과적으로 보-기둥 접합부의 파단을 초래할 가능성이 크다. 해석과 이전의 실험결과를 기초로 하면, 응력집중은 모멘트 전달효율과 반비례하고, 접합부의 변형능력은 모멘트 전달효율의 저하에 따라 감소하는 것을 알 수 있다. 더 나아가서 바닥슬래브가 있는 합성보 접합부에 대한 유한요소해석결과는 중립축이 상부플랜지 방향으로 상승함으로써 모멘트 전달효율이 저하했고, 이러한 영향은 접합부의 조기 취성파단을 초래하는 것을 보였다.

주요어 각형강관단면 기둥, 모멘트 전달효율, 변형도 집중, 변형능력

ABSTRACT >> In this paper the moment transfer efficiency of a web and the strain concentration at the RHS (Rectangular Hollow Section) column-to-steel beam connections was evaluated. Initially, non-linear finite element analysis of five bare steel beam models was conducted. The models were designed to have different detail at their beam-to-column connection, so that the flexural moment capacity was different respectively. Analysis results showed that the moment transfer efficiency of the analytical model with RHS-column was poor when comparing to model with WF(Wide Flange)-column due to out-of-plane deformation of the RHS-column flange. The presence of scallop and thin plate of RHS column was also a reason of the decrease of moment transfer efficiency, which would result in a potential fracture of the steel beam-to-column connections. Analytical results were compared with the previous experimental results. The analytical and the previous experimental results showed that the strain concentration was inversely proportional to the moment transfer efficiency of a beam web and the deformation capacity of connection was poor as their moment transfer efficiency degrades. Further finite element analyses of composite beam with a floor slab revealed that the neutral axis moved toward the top flange and the moment transfer efficiency of a beam web decreased, which led to premature failure of the connection.

Key words RHS-column, moment transfer efficiency, strain concentration, deformation capacity

1. 서론

일본의 철골모멘트 저항골조는 주로 기둥으로서 각형강관단면(Rectangular Hollow Section; 이하 RHS 사용)을 사용하고, 보로서 WF(Wide Flange; 이하 WF 사용)형 단

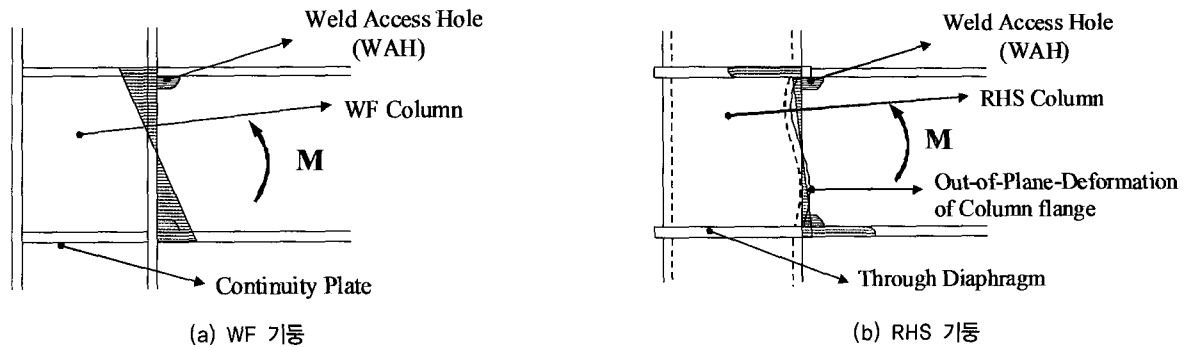
면을 사용한다. RHS 기둥은 양면에 두개의 웨브가 있고, WF 보의 웨브와 일치하는 중심에는 기둥웨브가 존재하지 않는다. 따라서 이러한 접합부는 중심에 웨브가 있는 WF 기둥을 주로 사용하는 미국의 접합부와는 달리 RHS 기둥플랜지의 변형이 증가하게 된다(그림 1). 기둥플랜지의 면외 변형과 접합부 근방의 스캘럽으로 인한 보웨브의 단면손실에 의해서, RHS 기둥의 플랜지는 보에서 유발하는 휨모멘트에 저항하는데 있어서 비효율적이다. 이러한 접합부의 응력전달 메카니즘은 기존의 접합부 설계에서 가정하던 보이론과는 매우 다르다는 것을 나타낸다. 秋山 宏 등⁽¹⁾과 岡田 健^(2,3) 등은 접합부의 변형능력을 파악함에 있어서 웨브의

¹⁾ DRB 동일, 책임연구원
(대표저자: kyj282@empal.com)

²⁾ 정회원·포항산업과학연구원(RIST) 책임연구원, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 2006년 10월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2006. 3. 28 / 심사종료일 : 2006. 6. 14)



〈그림 1〉 기둥-보 접합부에서 변형도 상태

모멘트 전달효율에 주목했다. 특히, RHS 기둥을 가진 접합부에서는 기둥의 플랜지판이 변형되고, 스캘럽 등의 단면손실에 의해서 웨브의 모멘트 전달효율이 저하한다고 보고했고, 웨브의 모멘트 전달효율의 저하는 보플랜지에 변형도 집중과 깊은 관계가 있다는 것을 밝혀냈다. 즉, 이러한 웨브의 모멘트 전달효율의 저하는 접합부의 최대내력을 저하시킬 뿐 아니라 접합부의 극히 일부뿐만 항복내력에 근접하게 함으로써, 소성화 영역이 충분히 확대되지 않고 변형이 접합부 일부에 집중하기 때문에 접합부 부근의 보플랜지가 충분한 연성능력을 발휘하지 못하고 파단할 수 있음을 밝혔다. 결과적으로 이러한 모멘트 전달효율의 저하는 변형능력과 어느 정도의 상관관계가 있고, 결과적으로 반비례함을 보였다. 그러나, 현재 웨브의 모멘트 전달효율과 접합부의 변형능력에 관한 영향이 완전히 파악되지 않은 실정이다. 이에 따라 웨브의 모멘트 전달효율에 따른 플랜지 변형도 집중의 관계를 정량적으로 평가할 필요가 있다.

본 연구에서는 해석결과에서 얻은 데이터를 활용하여 웨브에서의 모멘트 전달효율을 구하고, 이를 기존에 밝혀진 이론적인 내용과 비교함으로써 평가의 타당성을 검증한다. 또한, 모멘트 전달효율과 접합부의 응력집중과의 관계를 정량적으로 파악하고, 또한 이전에 수행된 실험결과들을 바탕으로, 응력집중과 변형능력과의 관계를 개략적으로 살펴보고자 한다. 본 연구는 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 바탕으로 정리하였다.

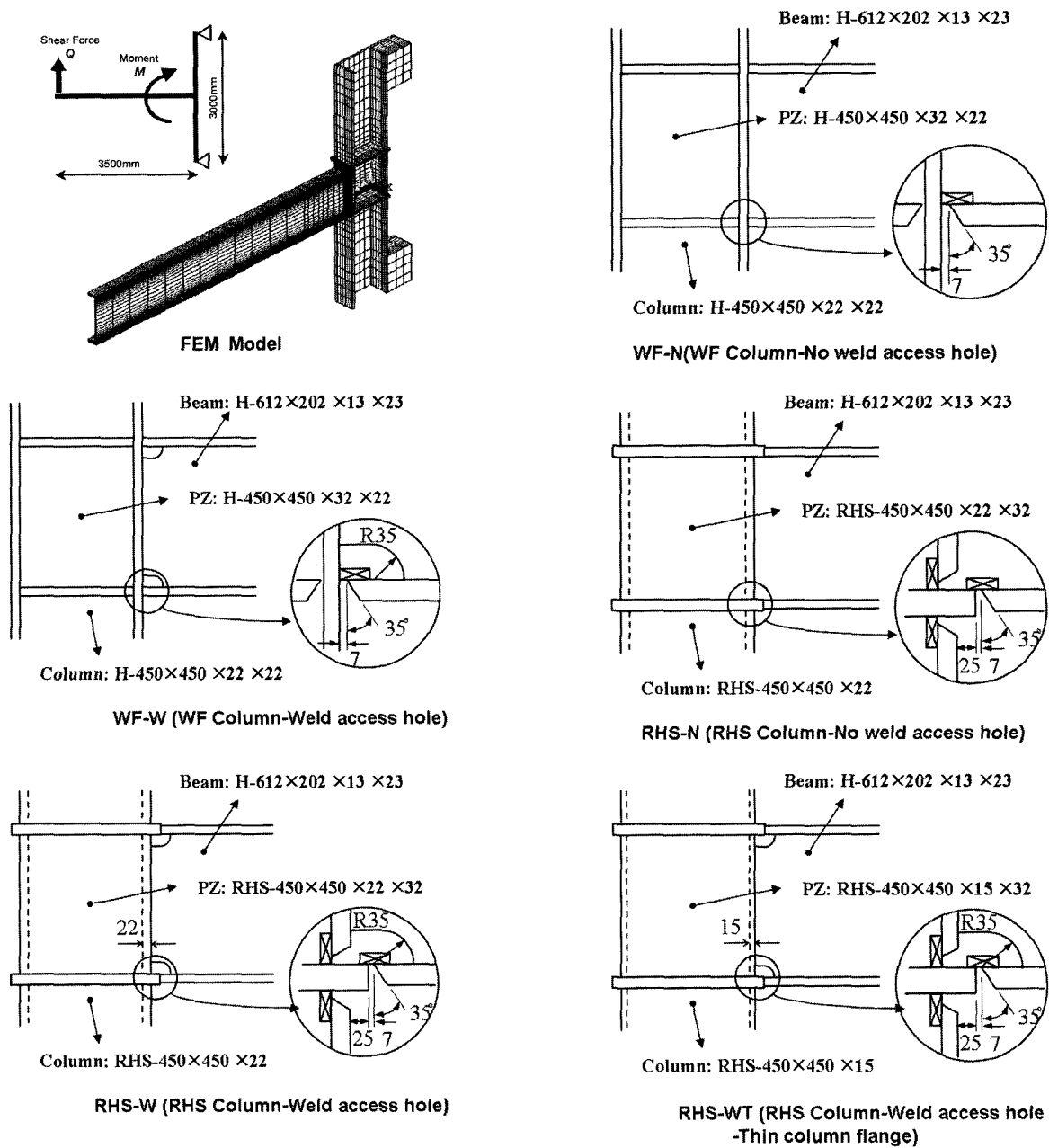
2. 이전연구 요약

김영주 등⁽⁴⁾은 4개의 순철골접합부 모델과 1개의 합성보 접합부 모델을 바탕으로 유한요소해석을 수행하였다. 해석에서 기둥의 종류 즉, RHS 기둥과 WF 기둥, 스캘럽(WAH; Weld Access Hole)의 유(이하 WHA)와 무(이하 NWAH; No WAH) 및 RHS 기둥플랜지의 두께 등을 변수로 사용하였다. 유한요소모델 및 대상모델들의 상세는 그림2에 나타

냈다. 본 연구는 접합부에서 보의 응력도 및 변형도에 주목하기 위해서, 모든 대상모델은 기둥과 패널존은 보에 비해서 강하게 설계하여 주요변형이 보에서만 발생하도록 유도하였다. 본 연구의 해석모델에서 강재는 3차원 솔리드 요소인 SOLID45 요소를 사용하였다. 또한, 재료비선형을 고려하기 위하여 실제 실험한 인장시편 데이터를 바탕으로 다중선형 등방성 경화(Multi-linear isotropic hardening) 모델을 사용하였다. 각 모델들은 기하학적인 대칭조건을 고려하여 전체모델 중 1/2만을 모델링하였으며, 기둥 상하부는 힌지로 처리하였다. 가력은 접합부가 정모멘트를 받도록, 즉 하부플랜지가 인장을 받도록 1방향 단조가력의 방법으로 하였다. 해석변수별 내용은 아래와 같다.

- WF-N : WF 기둥 + NWAH
- WF-W : WF기둥 + WAH
- RHS-N : RHS 기둥 + NWAH
- RHS-W : RHS 기둥 + WAH
- RHS-WT : RHS 기둥 + WAH + Thin column flange

그림 2에서 WF 기둥에 WAH이 있는 WF-W 접합부 모델은 이전연구⁽⁴⁾에는 없던 것으로서 본 연구에서 보다 자세한 비교를 위해서 추가한 것이다. 이전 연구를 통해 RHS 기둥플랜지의 면외변형성상을 관찰하였으며, 이와 같은 현상이 WF 기둥을 가진 접합부에 비해 모멘트 전달효율이 저하됨을 초래하였다는 사실을 밝혔다. 또한, 기존에 저자 등^(5,6)이 앞서 행했던 실험결과와 더불어 변형도 집중과 접합부의 변형능력에 대해서도 간략히 논하였고, 결론적으로 RHS 기둥의 경우에는 웨브에서의 모멘트 전달효율의 저하로 인해 변형능력이 열등함을 지적하였다. 그러나, 이 연구는 실험결과와 해석결과에서 얻은 단순한 결과만을 나타낸 것으로 모멘트 전달효율을 단지 정성적으로만 평가했기 때문에, 추후에 이 결과를 다른 범용적인 접합부 설계에 적용하기에는 부족하다는 판단을 할 수 있었다.



〈그림 2〉 해석모델 및 집합부모델 상세

따라서, 본 연구에서는 이전연구에 이어서 모멘트 전달효율의 평가를 더욱 명확히 하기위해서 기존에 제시된 이론식과 비교·검토하고 또한, 모멘트 전달효율과 보플랜지의 응력집중과의 관계 및 변형능력과의 관계를 보다 자세히 살펴보고자 한다.

3. 해석결과

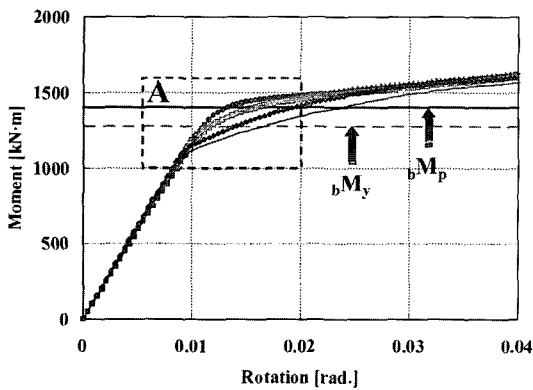
그림 3은 5개 모델을 해석한 후에 모멘트-회전각 관계를 나타낸 것이다. 종축의 모멘트는 보단부의 엑츄에이터로부터 얻은 전단력에 가력점에서 기둥면까지의 보길이를 곱하여 구하

였고, 횡축의 회전각은 보단의 수직변위를 보길이로 나누어서 구하였다. 그림 3(a)는 전체 모멘트-회전각 곡선을 나타낸 것이고, 그림 3(b)는 보다 자세한 관찰을 위해서 각 그래프의 항복점 부근으로 예상되는 A부분을 확대하여 나타낸 것이다. 또한, 각 집합부의 내력의 성능을 가늠하기 위해서 보의 항복모멘트($bM_y=1276kN\cdot m$)와 전소성모멘트 ($bM_p=1403kN\cdot m$)를 그림에 함께 나타냈다. 그림 3(b)를 보면, WF-N 집합부 모델을 제외한 나머지 집합부들은 보의 전소성모멘트에 도달하기 전에 보단면이 급격히 소성화하는 것을 알 수 있다. 더욱이 RHS-W 모델과 RHS-WT모델의 경우는 보의 항복모멘트에 도달하기 전에 이미 보가 소성화하고 있는 것을 나

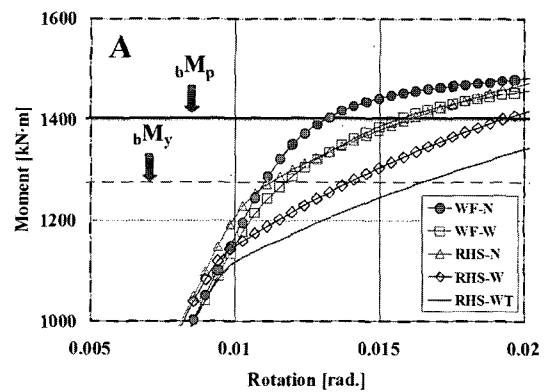
타낸다. 그리고, 접합부의 구성요소 및 형상이 같다 할지라도 WAH와 RHS 기둥의 존재는 접합부가 조기에 항복하게 하는 것을 그림을 통해 알 수 있다. 이러한 사실은 RHS 기둥플랜지의 면외변형과 WAH의 영향이 접합부의 성능을 저하시키는 요인으로 파악된다.

그림 4의 경우는 RHS 기둥의 영향을 더욱더 자세히 보여주고 있다. 그림 4는 각 접합부 모델의 Von Mises 응력 분포를 접합부 부근을 중심으로 나타낸 것이다. WF-N 모델

의 경우, 기둥과 접합된 보웨브 중심부근의 일부영역에서는 응력을 거의 전달하지 못하는 것으로 보이며, 이러한 현상은 RHS 기둥을 가진 접합부에게서 더욱 뚜렷이 관찰되고 있다. 특히 RHS-WT 접합부 모델의 경우는 응력을 전달하지 못하는 영역이 가장 넓게 분포하는 것으로 나타났는데, 이러한 사실은 모멘트-회전각 관계에서 모멘트 성능이 가장 저하한 사실과 같은 맥락으로 이해될 수 있다. 지금까지 일반적으로 철골모멘트 접합부는 보의 휨이론에 근거하여 설

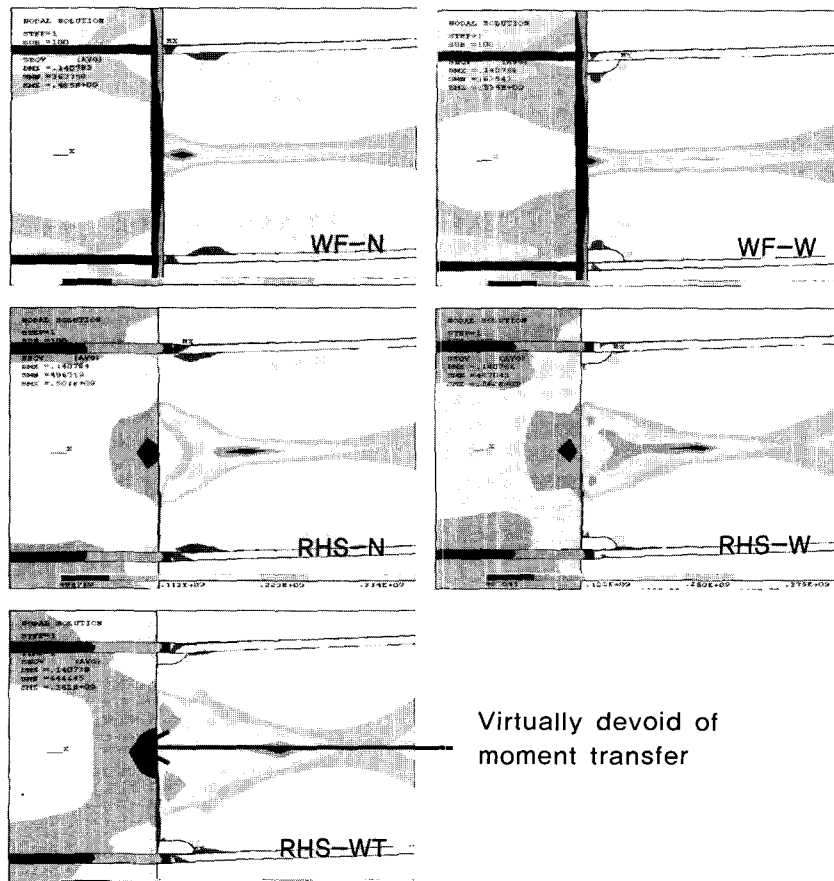


(a) 전체 곡선



(b) 보의 소성모멘트 부근을 확대한 곡선

〈그림 3〉 모멘트-회전각 관계곡선



〈그림 4〉 Von Mises 응력분포(0.04 rad.)

계되어 왔다. 그러나, 여러 연구들^(7,8)로 통해서 접합부를 설계하는데 있어서 단순히 힘이론을 적용하는 것이 부적절하다는 점이 지적되었다. 그 예로 이철호⁽⁸⁾ 등은 WF 기둥을 가진 접합부의 웨브를 볼트로 접합한 RBS 접합부의 경우, 보플랜지의 절삭으로 인해 “structural fuse”를 도입하더라도 보웨브 볼트의 성능저하에 의해서 조기 취성파단 할 가능성이 크다는 사실에 주목하였다. 이러한 사실은 RHS 기둥을 가진 접합부에서 보웨브를 기둥면에 용접을 할지라도 기둥플랜지의 면외변형이 결국 보웨브를 볼트로 접합한 경우와 비슷한 응력전달 메카니즘을 갖는 것을 뒷받침 해준다고 할 수 있다.

4. 웨브의 모멘트 전달효율 평가

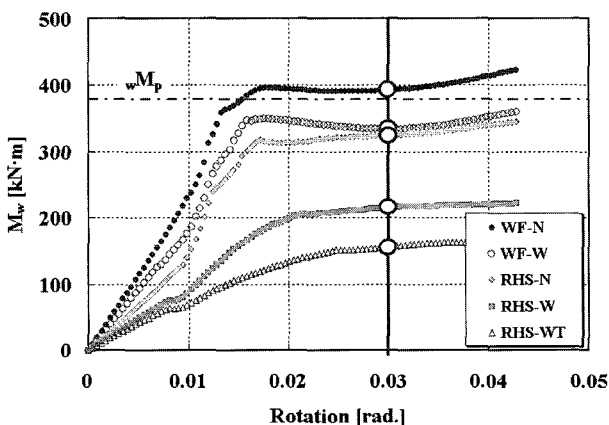
4.1 유한요소해석에 의한 평가

전술한 사실에 주목하면 RHS 기둥을 가진 접합부의 경우 기둥플랜지의 면외변형에 따른 접합부의 모멘트 전달 성능에 관한 특성을 파악할 필요가 있다. 보웨브의 모멘트 전달효율을 평가하기 위해서, 해석결과로부터 얻은 웨브의 응력분포를 바탕으로 웨브의 모멘트를 구할 수 있다. 대상단면은 기둥플랜지로부터 75mm 떨어진 WAH의 끝단부가 있는 곳으로서 접합부의 응력집중이 최대로 되는 부분이다. 웨브의 모멘트는 대상단면에서 얻은 응력분포를 사용하여 힘의 평형의 원리를 바탕으로 힘에 의한 인장합력과 압축합력의 우력을 구하고, 이 우력에 중심거리를 곱해서 구할 수 있다. 이렇게 구한 웨브의 모멘트(M_w)와 접합부 회전각과의 관계를 그림 5에 나타냈다. 그림 5에서 WF-N 모델의 모멘트 전달성능이 가장 크고, RHS-WT의 모멘트 전달성능이 가장 작게 나타난 것을 알 수 있다. 또한, WF 기둥을 가진 접합부에 비해서 RHS 기둥을 가진 접합부의 전달 모멘트가

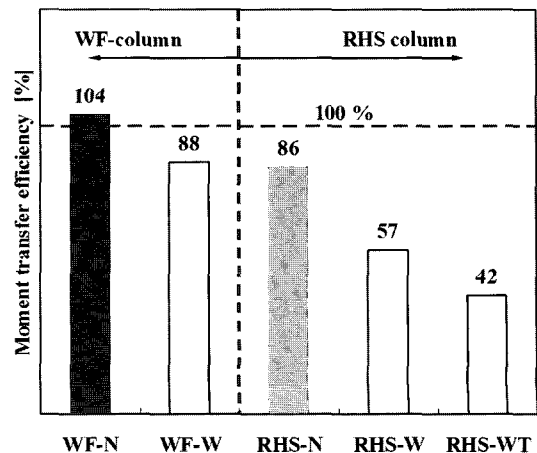
대체적으로 저하하는 것으로 나타났다. 보웨브의 모멘트 전달성능을 보다 자세히 평가하기 위해서 보웨브의 모멘트 전달효율(γ_w)을 식 (1)과 같이 정의하였다.

$$\gamma_w = \frac{M_w}{wM_p} \tag{1}$$

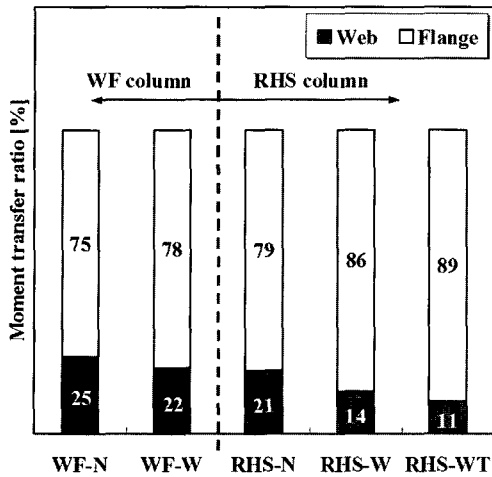
위의 식에서 wM_p 는 웨브의 전단면이 유효한 상태에서의 웨브의 전소성모멘트이고, M_w 는 0.03 rad. 일 때의 모멘트 값이다. 여기서 0.03 rad 일 때의 값을 사용한 것은 웨브가 항복한 후에 안정적으로 평활한 시점을 잡은 것이다. 그림 6은 각 모델의 웨브의 모멘트전달효율을 막대그래프로 나타낸 것이다. WF-N 모델의 경우 모멘트 전달효율이 전소성모멘트를 약간 상회하였고, WF-W 모델은 이보다 효율이 저하하였다. 이는 스캘럽에 의해서 웨브의 단면적이 줄어든 것이 주 원인이라고 판단된다. RHS 기둥을 가진 RHS-N의 경우는 WF-N 보다 28%정도 전달효율이 저하했는데, 이는 서론에서 기술한 것과 같이 기둥플랜지의 면외변형에 기인한 것이라고 생각된다. 특히, RHS 기둥을 가진 접합부 중에서도 기둥플랜지가 상대적으로 얇을 경우에는 면외변형량이 매우 크기 때문에 그 효율은 극도로 저하하게 된다. 이러한 사실은 RHS-W와 RHS-WT의 결과를 비교하면 쉽게 확인 가능하다. 그림 7은 접합부에서 보웨브와 보 플랜지의 모멘트 분담율을 나타낸 것이다. 그림 7은 외력이 작용할 경우에 보웨브의 모멘트 전달효율이 저하하면 할수록 보플랜지의 분담율이 증가하는 것을 보여준다. 같은 접합타입을 가진 경우, WF-N의 보플랜지의 응력분담율은 RHS-N에 비해서 4%, WF-W는 RHS-W에 비해 8% 정도 증가하는 것을 보여준다. 또한, 그림 7은 RHS 기둥과 얇은 플랜지판의 존재 및 WAH의 크기를 웨브의 모멘트 전달효율에 영향



〈그림 5〉 웨브 모멘트-접합부 회전각 관계



〈그림 6〉 웨브의 모멘트 전달효율



〈그림 7〉 보플랜지와 웨브의 모멘트 분담율

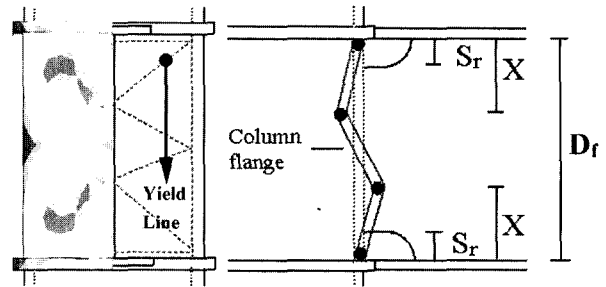
을 미치는 주요인자로 판단하는 근거를 보여준다. 이러한 인자들이 중복되면 중복되는 만큼 웨브의 모멘트 전달효율의 저하하는 만큼 플랜지의 모멘트 분담율이 증가하는 것을 확인할 수 있다. 접합부에서 기둥에 용접된 보플랜지는 용접에 의한 열영향, WAH에 의한 기하학적인 노치효과 및 응력의 구속효과 등에 의해서 파단의 가능성이 큰 것을 고려하면 이러한 보플랜지의 응력부담 증가는 접합부의 변형 능력저하의 주요한 원인이라고 할 수 있다. 즉, 인자의 중복이 많을수록 플랜지의 응력은 집중하게 되고, 결국에는 조기취성파단의 지배적인 원인이 되는 것으로 판단된다.

4.2 이론식에 의한 평가

RHS 기둥의 면외변형에 의한 모멘트 전달효율의 저하는 항복선 이론으로 설명이 가능하다. 그림 8은 항복선 이론을 바탕으로 한 RHS 기둥의 모멘트 전달 메카니즘을 나타낸 것이다. 그림에서 X부분이 보 웨브의 모멘트를 전달하는 구역이고 두 X의 사이는 모멘트 전달이 되지 않는(devoid of moment transfer) 구역이 있다. 이 구역은 기둥판이 얇아수록 증가하는 경향이 있다. 또한, X부분에서도 스캘립 크기 (S_r) 만큼은 단면손실로 인해 응력을 전달할 수 없다. 그림 8에서 유한요소해석의 Von Mises 응력분포는 제안된 항복선이론과 대체로 잘 대응되는 것을 보여준다. 森田耕次 등⁽⁹⁾은 기둥플랜지의 항복선 이론을 기본으로 한 웨브의 전달 모멘트를 식 (2)로 나타냈다.

$${}_wM_{tr} = (X - S_r) \times (h_w - X - S_r) N_{ow} \quad (2)$$

여기서, X 는 웨브의 응력전달면에서 유효영역(WAH 포함), S_r 은 WAH의 크기, D_r 는 보상하플랜지 중심간 거리, 그리고 N_{ow} 는 보웨브의 단위길이 당 항복축력



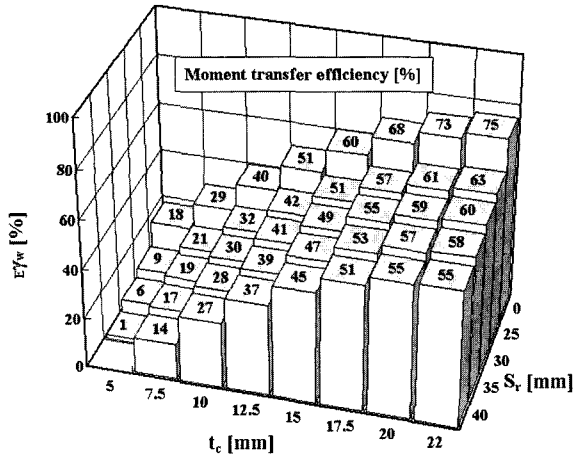
〈그림 8〉 RHS 기둥플랜지의 면외변형

($N_{ow} = \min [t_w \cdot F_{yw}, 2S_w \cdot F_{yj} / \sqrt{6}, 2t_c F_{yc} / \sqrt{3}]$) 을 나타낸다.

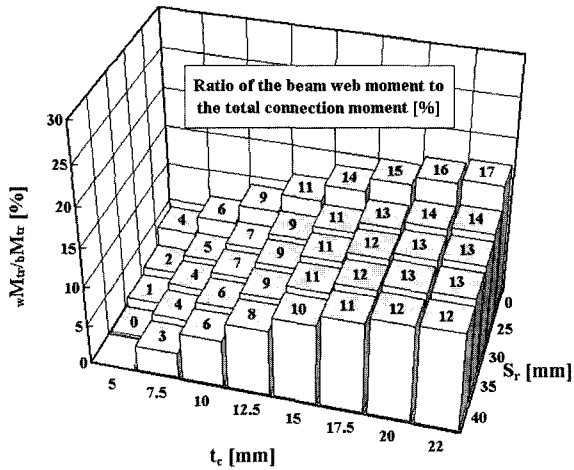
이론식의 대상모델은 기둥이 RHS-450x450x22 이고, 보가 H-612x202x12x23인 RHS-W이다. 식 (2)를 사용하여 이론적인 웨브의 모멘트 전달효율(E_{γ_w})과 WAH의 크기(S_r) 및 기둥플랜지 두께(t_s)를 주요변수로 하는 입체막대그래프를 나타내면 그림 9와 같다. 그림 9는 웨브의 모멘트 전달효율이 기둥플랜지 두께와 WAH의 크기에 대해서 큰 영향을 받는 것을 보여준다. 즉, 기둥플랜지의 두께가 증가하고 WAH의 크기가 감소할수록 웨브의 모멘트 전달효율이 증가하는 경향을 나타낸다. 또한, 그림 9는 웨브의 모멘트 전달효율이 WAH의 크기에 따른 영향도 있지만, 그 보다도 WAH 유무에 의한 영향이 더욱 크다는 것을 나타낸다. 따라서, 웨브의 단면결손이 없는 NWAH 디테일을 사용하면 모멘트 전달효율이 극대화되고, 접합부의 변형능력이 매우 증가되리라고 판단된다. 특이한 경우이지만, 그림 9에서 기둥플랜지두께가 5mm 이고 스캘립 크기가 40mm 일 경우에는 웨브가 전달하는 모멘트가 거의 없는 것을 보여준다. 그림 10은 보 전단면의 전달모멘트(${}_bM_{tr}$)에 대한 보웨브만의 전달모멘트(${}_wM_{tr}$)의 비율, ${}_wM_{tr}/{}_bM_{tr}$ 을 나타낸 것이다. 여기서, 보 전단면의 전달모멘트(${}_bM_{tr}$)는 보플랜지만의 전소성모멘트와 보웨브의 전달모멘트(${}_wM_{tr}$)의 합으로 구할 수 있다. 기둥플랜지의 두께가 22mm이고 NWAH의 디테일을 가지고 있는 경우, 비율, ${}_wM_{tr}/{}_bM_{tr}$ 이 17%로 나타났다. 즉, 보플랜지가 받아들일 모멘트 분담율은 약 83%가 되는 것이다. 그러나, 대상으로 한 보의 전단면에 대한 플랜지의 소성단면 계수비(Z_p/Z)는 약 71% 이다. 이러한 사실은 접합부 근방에서는 휨예측이 기존의 보이론과는 다르다는 것을 보여준다.

그림 11은 웨브의 모멘트전달효율에 관해서 문헌(9)를 바탕으로 한 이론적인 값(E_{γ_w})과 유한요소해석/실험결과(γ_w)와의 관계를 나타낸 것이다. 실험결과는 秋山 宏⁽¹⁾과 岡田 健⁽²⁾의 값을 사용하였다. 일부의 데이터가 해석 및 실험값이 이론값에 비해서 약간 상회하는 분포를 나타냈지만,

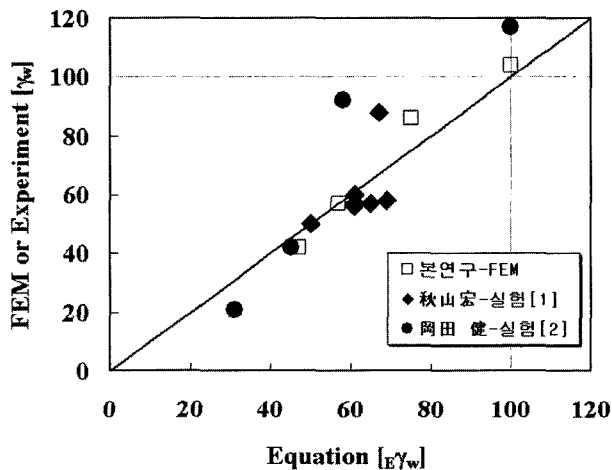
대체적으로 좋은 대응을 보인다고 할 수 있다. 이러한 결과를 주목하면 기둥플랜지의 항복선이론을 바탕으로 한 식 (2)를 사용해서 웨브의 모멘트 전달효율을 평가하는 것이 가능하다고 할 수 있다.



〈그림 9〉 기둥플랜지의 두께(t_c)와 스캘럽 크기(S_r)에 따른 모멘트 전달 효율($\epsilon\gamma_e$)



〈그림 10〉 보 전단면에 대한 웨브의 전달모멘트 비율



〈그림 11〉 모멘트 전달효율의 이론식 검토

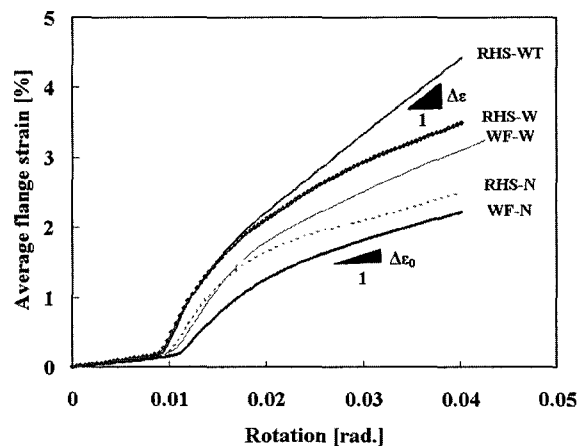
5. 접합부의 응력집중

5.1 변형도 집중지수

그림 12는 WAH의 끝단을 가로지르는 인장축 보플랜지의 평균 변형도와 접합부의 회전각 관계를 나타낸 것이다. 예를 들면, 그림 12에서 같은 회전각을 기준으로 하면 RHS-N의 변형도 값이 WF-N의 변형도 값에 비해서 큰 것을 알 수 있다. 변형도 값이 크면 클수록 응력도 값도 크므로 같은 회전각에서 변형도 값이 크다는 것은 그만큼 응력 집중의 가능성이 높다는 것을 나타낸다고 할 수 있다. 또한 그림은 단위 회전각 당 평균 변형도 증분, 즉 그림에서 보는 것 같이 그래프의 기울기가 크면 클수록 변형도 집중/응력 집중이 크다는 것을 보여준다. 따라서, 이러한 내용을 바탕으로 해서 변형도 집중을 평가할 수 있는 변형도 집중지수 (γ_e)를 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$\gamma_e = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta\epsilon_0} \quad (3)$$

여기서, $\Delta\epsilon$ 은 각 모델의 회전각에 대한 변형도 기울기를 나타내고, $\Delta\epsilon_0$ 는 WF-N 모델의 회전각에 대한 변형도 기울기를 나타낸다. $\Delta\epsilon_0$ 를 기준으로 사용한 것은 WF-N의 웨브 모멘트 전달효율이 100%에 도달했기 때문이다. 즉, WF-N의 변형도 집중지수를 1.0으로 나타낸 것이다. 그림 12는 WF기둥에 비해서 RHS 기둥이, WAH에 비해서 NWAH이, 또한 RHS 기둥의 경우 기둥플랜지 두께가 얇을수록 변형도 집중지수가 증가하는 것을 보여준다. RHS-N과 WF-W를 비교할 경우에 웨브의 모멘트 전달효율의 측면에서는 WF-W가 약간 상회하는 값을 나타낸 것은 사실이나 변형도 집중지수는 RHS-N이 약간 저하하는 결과를 나타냈다. 이 결과는



〈그림 12〉 평균플랜지 변형도-회전각 관계

WAH의 존재로 인한 늦치효과에 의해서 응력이 집중되는 것이 그 원인이라고 할 수 있다.

5.2 변형도 집중지수와 모멘트 전달효율의 상관관계

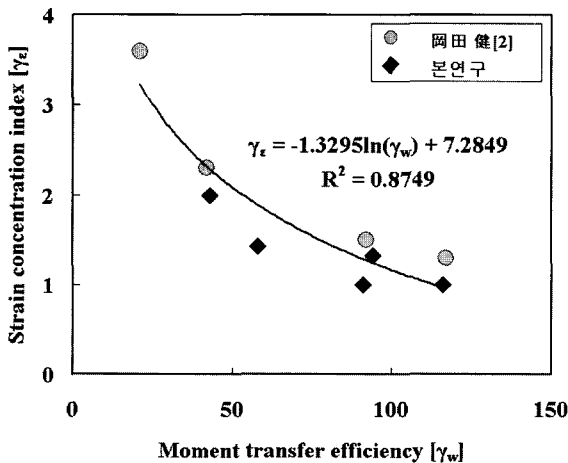
그림 13은 유한요소해석과 실험결과를 기초로 한 모멘트 전달효율과 응력집중지수와의 관계를 나타낸 것이다. 변형도 집중지수는 모멘트 전달효율이 증가할수록 급격히 감소하는 로그함수의 형태로 나타났다. 즉, 웨브의 모멘트 전달효율이 저하하는 만큼 플랜지의 응력분담율이 증가하게 되는 것을 보여준다. 식 (4)는 이 관계를 식으로 표현한 것이다.

$$\gamma_e = -c_1 \cdot \ln(\gamma_w) + c_2 \tag{4}$$

식에서 C₁과 C₂는 상수를 나타내며, 많은 데이터를 축적으로 이후에 적절한 값을 찾는 것이 필요하다. 사실 본 연구에서 사용한 보는 한가지의 단면을 대상으로 한 것이기 때문에 다양한 보를 사용한 것의 일반적인 결과를 얻을 필요가 있다. 다시말해서, 본 연구에서 사용한 보의 전단면에 대한 플랜지의 소성단면 계수비(Z_f/Z)는 0.71인데, 만약 이 계수비가 0.8인 경우가 되면 웨브의 모멘트 전달효율이 저하하더라도 계수비가 0.71인 것에 비해서 플랜지 부분의 응력 집중은 줄어들게 될 가능성이 크다. 따라서, 이 후의 연구에서 중요한 변수는 바로 이 소성단면 계수비(Z_f/Z)라고 판단된다. 이러한 연구를 통해서 위의 두 상수(C₁,C₂)가 찾아지게 되면 앞에서 나타낸 식 (2)를 통해서 이론적으로 구한 모멘트 전달효율을 식 (4)에 대입할 경우 변형도 집중지수를 얻을 수 있다.

5.3 접합부의 변형능력과 변형도 집중지수와의 관계

그림 14는 실험결과를 기초로 한 접합부의 최대 회전각

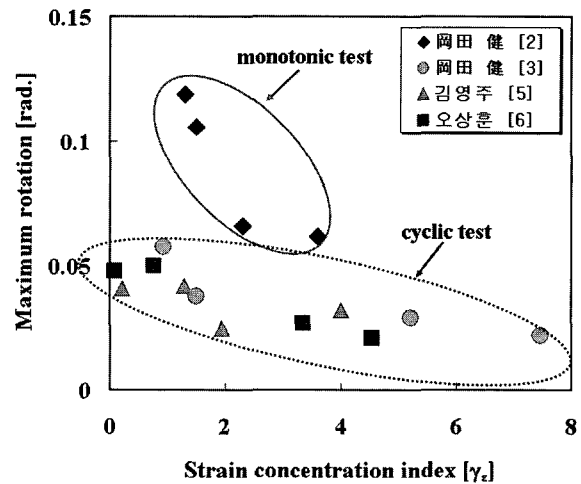


〈그림 13〉 변형도 집중지수-모멘트 전달효율 관계

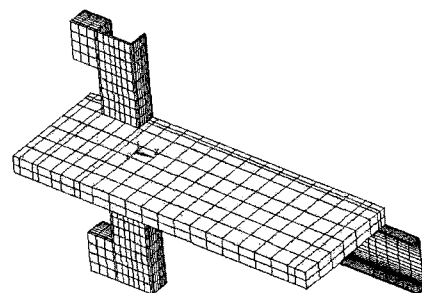
과 변형도 집중지수와의 관계를 나타낸 것이다. 실험은 단조가력과 반복가력으로부터 얻은 데이터이다. 본 연구에서 사용한 반복가력 실험은 모두 같은 이력루프로 실험을 실시한 것으로 직접적인 비교가 가능한 것들을 대상으로 했다. 그림 14는 가력유형에 상관없이 변형도 집중지수가 낮을수록 더 좋은 변형능력을 갖는 것으로 나타났다. 반복가력의 경우 가력의 방법에 따른 영향을 평가할 필요가 있기 때문에 더 많은 데이터의 수집이 요구된다. 다양한 실험결과와 데이터를 축적하면 변형능력과 변형도 집중지수의 상관관계의 파악도 가능하다고 생각된다.

5.4 슬래브 효과

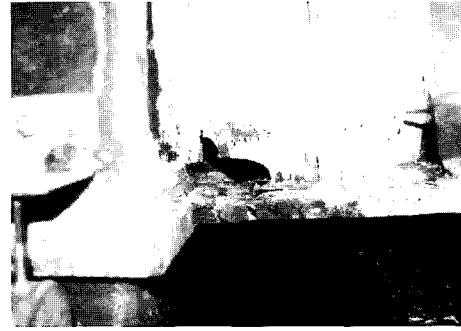
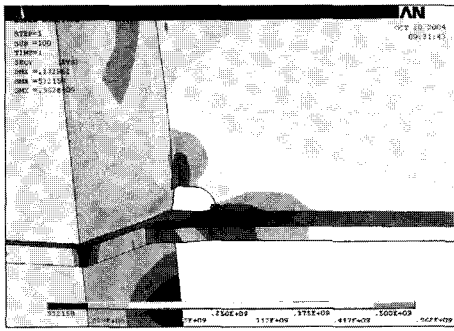
접합부에서 바닥슬래브가 있는 합성보의 영향을 고려하기 위해서 그림 15와 같이 합성보접합부, RHS-WC를 유한요소모델화 하였다. 다른 디테일은 순철골 모델과 같고, 콘크리트의 경우 3차원 솔리드 요소인 SOLID65로 모델링 하였다. 본 연구는 콘크리트의 인장에 대한 균열의 영향을 고려할 필요가 없이 슬래브가 압축을 받는 정모멘트에 관한 해석에 한정되므로 재료는 간단한 Drucker-Prager 모델을 적용하였다. 모델링은 철골보 모델과 마찬가지로 기하학적



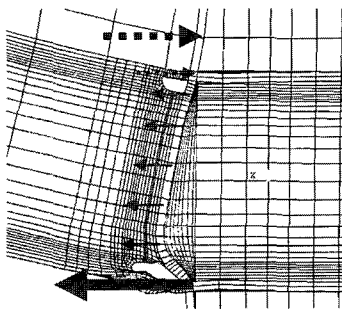
〈그림 14〉 최대회전각과 변형도 집중지수 관계



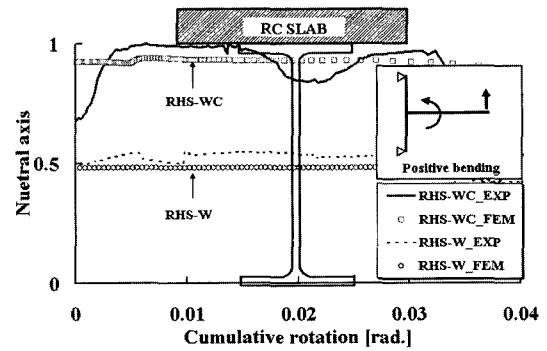
〈그림 15〉 합성보접합부의 유한요소모델



〈그림 16〉 해석과 실험결과 비교(접합부 파괴시점에서)



(a) 합성보접합부의 면외변형

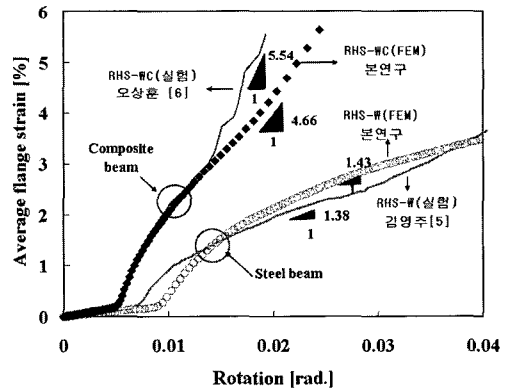


(b) 합성보와 순철골보의 중립축 비교

〈그림 17〉 중립축 비교

인 대칭조건을 고려하여 전체모델 중 1/2만을 모델링 하였으며, 바닥슬래브가 압축력을 받는 정모멘트 방향으로 단조 가력을 하였다.

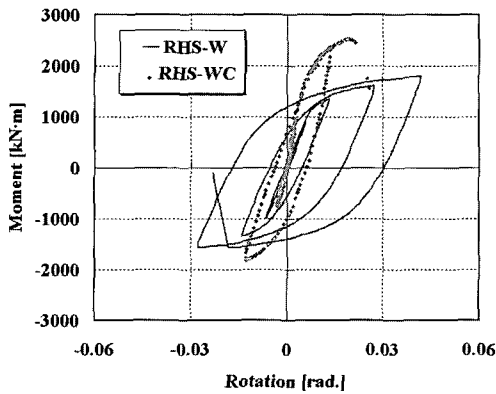
그림 16은 이전실험⁽⁶⁾에서 실험한 실험체(여기서는 RHS-WC로 명명함)의 파괴사진과 해석의 Von Mises 응력분포를 비교한 것이다. 실험결과 보의 하부플랜지가 파단되면서 보웨브의 일부분도 같이 파단하였고 또한 기둥플랜지의 면외변형 성상이 관찰되었다. 이는 해석결과를 통해서도 예측가능하다. 해석결과에서 응력집중이 되는 부분이 실험결과에서 파단된 부분이었고, 실험결과와 마찬가지로 기둥플랜지면이 면외변형한 것이 똑같이 관찰되었다. 그림 17(a)는 해석결과 나타난 접합부에서의 기둥플랜지의 면외변형 그림을 5배 확대해서 나타낸 것이다. 이 그림은 보웨브와 결합된 기둥플랜지는 전부분이 면외변형한 것을 나타내고 있는데, 이는 보웨브가 전달하는 모멘트가 매우 저하하는 것을 간접적으로 확인할 수 있다. 슬래브 효과에 의한 이러한 기둥플랜지의 면외변형은 합성보의 중립축이 상승하게 하는데 주요원인이라고 할 수 있다. 그림 17(b)는 실험 및 해석결과로부터 얻은 중립축을 나타낸 것이다. 그림 17(b)에서 순철골보의 경우는 보춤의 중간에 중립축이 위치하는 것으로 나타났으나 합성보의 경우 보상부플랜지 레벨에 중립축이 위치하고 있는 것이 관찰되었다. 岡田 健⁽³⁾의 연구에서는 같은 합성



〈그림 18〉 플랜지 변형도-회전각 관계

보라고 할지라도 WF 기둥과 RHS 기둥의 영향에 의해서 중립축의 위치가 변하는 것으로 보고하고 있다. 즉, RHS 기둥을 가진 합성보는 본 연구에서도 관찰된 바와 같이 기둥플랜지의 극심한 면외변형에 의한 영향 때문에 WF 기둥을 가진 합성보에 비해서 중립축 상승이 더욱 증가하게 된다는 것을 지적하였다.

그림 18은 RHS-W와 RHS-WC에 관한 접합부 근방에서의 보플랜지 변형도와 회전각 관계를 나타낸 것이다. 그림 18은 실험 및 해석결과를 동시에 나타낸 것인데, 합성보의 변형도가 훨씬 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 즉, 순철골보에 비해서 합성보 특히, RHS 기둥을 가진 합성보접합



〈그림 19〉 합성보와 순철골보의 변형능력 비교

부의 경우에, 중립축의 급격한 상승은 접합부에서 보의 하부 플랜지의 응력도/변형도 집중현상을 초래할 가능성이 크다고 할 수 있다. 이러한 변형도 집중은 변형능력의 저하로 이어질 가능성이 크다. 그림 19는 RHS-W와 RHS-WC의 실험결과를 나타낸 것이다. RHS-WC의 경우 RHS-W에 비해서 초기 강성 및 동일회전각에서 내력은 증가하였지만, 웨브모멘트 전달성능저하에 의한 중립축상승, 또한 이에 따른 하부플랜지의 응력도/변형도 집중에 의해서 변형능력이 저하되는 것을 보여주고 있다. 따라서, RHS 기둥을 가진 접합부의 경우 슬래브효과에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 후에 합성보 접합부에서 슬래브 효과에 의한 보웨브의 모멘트 전달효율을 정량적으로 파악할 필요가 있다고 판단된다.

6. 요약 및 결론

- (1) RHS 기둥을 사용한 접합부는 WF 기둥을 사용한 접합부에 비해서 기둥플랜지의 면외변형과 WAH에 의한 단면결손에 의해서 웨브의 모멘트 전달효율이 저하하였다.
- (2) 모멘트 전달효율을 유한요소해석과 항복선 이론에 의한 값을 비교한 결과 좋은 대응을 보였다. 따라서, 항복선 이론에 의한 식을 통해서 웨브의 모멘트 전달효율을 평가하는 것이 가능하다. 또한, 이러한 웨브의 모멘트 전달효율의 저하는 보플랜지의 모멘트 부담률을 증가시키기 때문에 상대적으로 취약한 접합부가 조기파단할 가능성이 있다고 판단된다. 보플랜지의 모멘트 부담율을 더욱 정량적으로 판단하기 위해서는 보의 전단면에 대한 보플랜지의 소성단면계수비 즉, Z_p/Z_e 에 대한 영향도 고려할 필요가 있다.
- (3) 접합부 근방에서 보웨브의 모멘트 전달효율은 변형도 집중지수와 반비례 관계로 나타났다. 또한, 기존 실험결과로부터 변형도 집중지수가 증가할수록 접합부의 변형능력이 대체로 저하하는 경향이 관찰되었다. 본 연구는 제한된 실험

결과 해석결과를 바탕으로 하였기 때문에, 웨브의 모멘트 전달효율, 변형도 집중지수 및 접합부의 변형능력의 상관관계를 파악하기 위해서는 추후의 연구가 필요하다.

- (4) RHS 기둥을 사용한 접합부에 슬래브가 있는 경우, 기둥플랜지의 면외변형은 순철골보에 비해서 더욱 증가하게 되므로 웨브의 모멘트 전달효율이 더욱 저하하는 것으로 나타났다. 이러한 영향은 중립축을 급격히 상승시키고 보하부플랜지에 변형도가 집중되어 조기 파단할 가능성이 있다. 따라서, 특히 RHS 기둥을 사용한 접합부의 경우 슬래브효과의 고려가 반드시 요구된다고 판단된다.

감사의 글

“건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2004년도 건설핵심기술연구개발사업(04산학연 A04-03)에 의한 것임”.

참고 문헌

1. 秋山 宏, 山田 哲, 松本由香, 松岡三郎, 小倉桂治, 北村春幸, “實大振動台實驗による柱梁接合部の破壊性狀に關する研究”, 日本建築學會構造係論文集, 第512号, 1998, pp. 165-172.
2. 岡田 健, 松本由香, 山田 哲, “H形鋼梁の變形能力に柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響の評價”, 日本建築學會構造係論文集, 第568号, 2003, pp. 131-138.
3. 岡田 健, 吳 相勳, 山田 哲, “合成梁の塑性變形能力に柱梁接合部における継手効率が及ぼす影響”, 日本建築學會構造係論文集, 第573号, 2003, pp. 185-192.
4. 김영주, 오상훈, 문태섭, “철골모멘트 접합부에서 웨브의 모멘트 전달효율과 변형도 집중과의 관계에 관한 해석적 연구”, 한국강구조학회논문집, 제16권 제5호, 2004, pp.695-704.
5. 김영주, 오상훈, 문태섭, “슬래브의 합성작용을 고려한 기존 철골 모멘트접합부의 내진보강”, 대한건축학회 논문집(구조계), 제 19권 9호, 2003, pp.3-10.
6. 오상훈, 김영주, 문태섭, “바닥슬래브에 의해 구속된 철골 모멘트접합부의 내진보강에 관한 실험적 연구”, 한국강구조학회 논문집, 제 16권 2호, 2004, pp.247-255.
7. Goel, S. C., Stojadinovic, B. and Lee, H. K., “Truss analogy for steel moment connections,” *Eng. Journal*, 34(2), 1997, pp. 43-53.
8. 이철호, 김재훈, “보 플랜지 정취형(독본) 내진 철골모멘트 접합부의 응력전달 메카니즘 재평가”, 한국지진공학회 추계학술대회 논문집, 2003, pp. 221-230.
9. 森田耕次, 江波戸和正, 船橋明之, 小南忠義 里見孝之, “箱形断面柱のかど溶接を部分溶込み溶接とした柱はり接合部の力學的舉動に關する研究”, 日本建築學會構造係論文集, 第397号, 1989, pp. 48-59.