

H형강보 · 각형강관기둥 접합부의 연성도를
고려한 골조의 거동에 관한 연구

A Study on the Behavior of Frame with Connections between
H-Beams and S · H · S Columns considering Joint Flexibility

강 석봉* 김 이두** 박 순규*** 김 재훈****
Kang, Suk-Bong* Kim, E-Doo** Park, Soon-Kyu*** Kim, Jae-Hun****

ABSTRACT

Analysis of structures are usually executed under the assumption that connections are either ideally pinned joint or fully rigid joint. But in general all structures is connected under the semi-rigid connections. Semi-rigid connections have demerits that is simplification work on connection's behavior, moment-rotation relationships of connections, apprehension of nonlinear analysis etc. On the other hand there is merits that is improvements of serviceability, economic efficiency, construction in predicting real behavior frames. This study is to make model of connections by based on experimental study and after analysis on frames considering characteristics of semi-rigid connections, semi-rigid connection's influence on the behavior of structures and fundamental data on application of structures that is connected between S H S column and H beam is exhibited.

1. 서 론

현재 국내의 건축물의 철골구조와 철골 철근 콘크리트구조는 두 가지 이상화된 접합 방법에 의해서 설계 및 시공되어 지고 있다. 접합부 거동의 단순화 작업과 접합부의 회전-변형관계, 비탄성 설계방법의 이해 등 많은 어려움으로 인하여 구조물의 모든 절점을 이상적인 활절점(Ideally Pinned Joint)이나 완전한 강절점(Fully Rigid Joint)으로 단순화시킨 것이다. 하지만 구조 부재의 강도 및 강성도의 효율성, 골조 내진성 확보, 현장 시공성 향상 등으로 반강접 접합부에 대한 연구가 현재 활발히 진행되고 있다. 이 밖에도 저층 철골 골조에 있어서는 반강접 특성을 가진 접합부를 사용함으로써 경제적인 골조 설계가 가능하게 되는 장점을 가지고 있다. 이러한 반강접

-
- * 울산 대학교 건축학과 조교수
 - ** 울산 대학교 건축학과 조교수
 - *** 울산 대학교 건축학과 부교수
 - **** 청구 기술 연구소 연구원

접합부의 우수성으로 인하여 본 연구에서는 기존의 해석 방법^[2,6,8,9] 및 실험 결과^[3,4,6]에서 제시된 자료들을 기초로 하여 보-기둥의 접합부의 반강접 특성을 고려한 골조 해석 알고리즘을 제시하고, 철골 철근 콘크리트 구조물에서 반강접 접합부가 구조물의 강도, 처짐 그리고 부재력의 분배에 미치는 영향을 비교 분석한다. 또한 반강접 접합부의 연성도에 따른 골조의 최상층 수평변위를 구하여 보-기둥 반강접 접합부를 가진 골조에 대한 사용성 한계상태를 검토함으로써 구조 설계 실무에서 적용 가능성을 살펴본다. 본 연구는 울산 대학교에서 수행된 철골 철근 콘크리트구조의 각형강관 기둥·H형강보 반강접 접합부에 대한 실험결과^[3,4,6]에 한하여 접합부 모멘트-회전관계에 대한 해석 모델을 제시하고, 일반 중·저층 구조 시스템에 대하여 반강접 특성을 고려한 구조 해석을 실행하여 반강접 접합이 골조의 거동에 미치는 영향을 실험에서 고려되어진 접합부 매개변수와 비교 분석하여 각형강관 기둥과 H형강보의 접합에 대한 건축구조물에서의 적용에 대한 기초 자료를 제시한다.

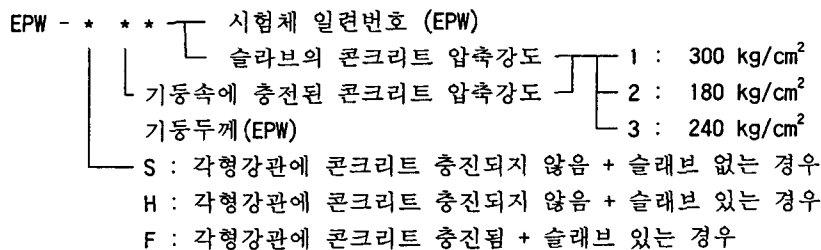
2. 접합부 모델링

2.1 개론

철골 및 철골 철근 콘크리트 구조물의 기둥 부재는 대부분 H형강이 주로 사용되었다. 그러나 H형강은 단면의 형태에 의해서 강축과 약축이 결정되어지므로 약축의 보강을 위한 대책이 필요하다는 단점을 가지고 있다. 그 반면에 각형강관을 기둥 부재로 사용하는 경우 단면성능의 우수성과 더불어 철골 철근 콘크리트 구조물의 경우 거푸집이 필요가 없으므로 경제적인 설계가 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 각형강관을 기둥으로 사용하는 경우에 보와의 연결부에서 강접성능의 확보가 우선시되기 때문에 시공측면에서의 어려움 등으로 사용하는 데에 많은 어려움을 가지고 있다.

2.2 접합부 모델링

본 연구에서는 각형강관 기둥 □-200×200×9, □-200×200×6 두 가지 형태와 H형강보 H-150×100×6×9 연결부인 반강접 접합부가 사용되었다. 접합형태는 용접에 의한 접합방법인 EPW(End Plate Welding Joint), SDW(Slender hollow section Direct Welding joint), TDW(Thick hollow section Direct Welding joint)와 용접과 볼트접합을 병용하는 접합방법인 SEB(Strong End plate Bolt joint), 볼트에 의한 접합방법인 SFB(Short Fin plate Bolt joint), SCB(Seating Cleat Bolt joint)가 있으며 반강접 접합부 모델명의 구성방식은 다음과 같다.



위의 실험 결과를 근거로 수학적 접근 방법인 Curve-Fitting Method^[8,9]을 이용하며 각각의 반강접 접합부에 대한 휨모멘트-변형관계를 모델링한다. 본 연구에서는 각형강관 기둥과 H형강보의 접합방법은 체계적으로 분석되지 않은 문제점으로 인하여 접합부 모형의 매개변수가 부정확할 수 있는 문제점으로 비록 타 방법에 비하여 정확성은 떨어지지만 다른 모형의 부정확한 매개변수를 배제할 수 있는 Colson power model을 사용한다. 표 1, 그림 1에서는 각각의 접합부에 대한

Colson power model에 의해서 Curve-Fitting된 접합부 모델을 제시하고 있다.

No	model	Colson power model	No	model	Colson power model
1	EPW-S11	$\theta_r = \frac{1M}{300} \frac{1}{[1 - \frac{M}{6.05}]^{4.72}}$	12	TDW-F11	$\theta_r = \frac{1M}{1182} \frac{1}{[1 - \frac{M}{13.71}]^{36.58}}$
2	EPW-S12	$\theta_r = \frac{1M}{160} \frac{1}{[1 - \frac{M}{2.3}]^{2.18}}$	13	SFB-F11	$\theta_r = \frac{1M}{524} \frac{1}{[1 - \frac{M}{14.62}]^{2.12}}$
3	EPW-S13	$\theta_r = \frac{1M}{240} \frac{1}{[1 - \frac{M}{5.5}]^{2.89}}$	14	SCB-F11	$\theta_r = \frac{1M}{782} \frac{1}{[1 - \frac{M}{16.81}]^{9.56}}$
4	EPW-S14	$\theta_r = \frac{1M}{350} \frac{1}{[1 - \frac{M}{6.9}]^{4.80}}$	15	SDW-F22	$\theta_r = \frac{1M}{1398} \frac{1}{[1 - \frac{M}{12.58}]^{9.22}}$
5	TDW-S11	$\theta_r = \frac{1M}{126} \frac{1}{[1 - \frac{M}{3.4}]^{2.41}}$	16	SEB-F22	$\theta_r = \frac{1M}{1134} \frac{1}{[1 - \frac{M}{13.49}]^{2.15}}$
6	EPW-S21	$\theta_r = \frac{1M}{280} \frac{1}{[1 - \frac{M}{5.4}]^{5.52}}$	17	SFB-F22	$\theta_r = \frac{1M}{498} \frac{1}{[1 - \frac{M}{12.34}]^{1.26}}$
7	EPW-S22	$\theta_r = \frac{1M}{225} \frac{1}{[1 - \frac{M}{3.8}]^{4.65}}$	18	SCB-F22	$\theta_r = \frac{1M}{1075} \frac{1}{[1 - \frac{M}{17.41}]^{2.74}}$
8	EPW-S23	$\theta_r = \frac{1M}{50} \frac{1}{[1 - \frac{M}{1.8}]^{100}}$	19	SDW-F32	$\theta_r = \frac{1M}{1581} \frac{1}{[1 - \frac{M}{15.02}]^{3.62}}$
9	EPW-S24	$\theta_r = \frac{1M}{180} \frac{1}{[1 - \frac{M}{3.4}]^{2.61}}$	20	SEB-H02	$\theta_r = \frac{1M}{522} \frac{1}{[1 - \frac{M}{6.53}]^{5.38}}$
10	SDW-S21	$\theta_r = \frac{1M}{29.4} \frac{1}{[1 - \frac{M}{1.3}]^{100}}$	21	SFB-H02	$\theta_r = \frac{1M}{384} \frac{1}{[1 - \frac{M}{5.12}]^{3.65}}$
11	SDW-F11	$\theta_r = \frac{1M}{1139} \frac{1}{[1 - \frac{M}{15.04}]^{9.35}}$	22	SCB-H02	$\theta_r = \frac{1M}{548} \frac{1}{[1 - \frac{M}{7.95}]^{7.29}}$

표 1 Colson power model

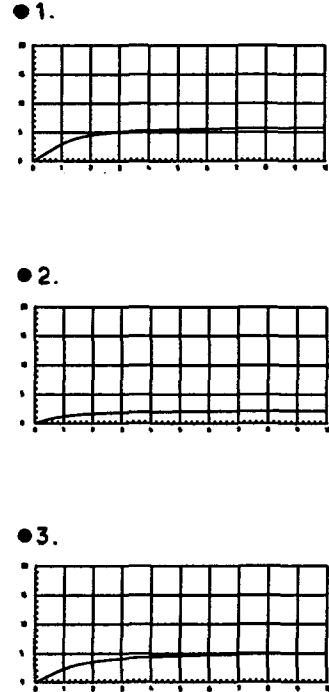
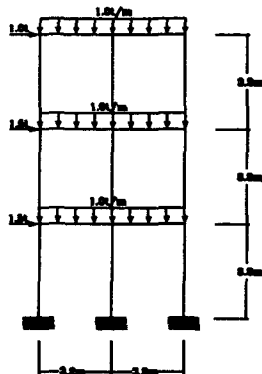


그림 1 접합부 모델

3. 반강접 접합부가 골조 거동에 미치는 영향

3.1 구조 시스템

본 연구에서는 철골 구조물의 특성을 살릴 수 있으며 접합부의 특성을 살릴 수 있도록 횡력이 적은 중저층 규모의 구조 시스템을 선정한다. 참고적으로 반강접 접합부의 실험에서 사용되어진 슬래브의 유효폭의 한계점으로 인하여 경간(Span)이 3.2m인 다음의 구조시스템을 제시한다.



· 보 단면

슬래브	단면적	단면 2차 모멘트
무	26.84cm ²	1020cm ⁴
유	90.84cm ²	6701cm ⁴

· 기둥 단면

기둥 두께	충진	단면적	단면 2차 모멘트
6t	무	23.64cm ²	1529.4cm ⁴
6t	유	48.73cm ²	2316.3cm ⁴
9t	무	35.19cm ²	2242.8cm ⁴
9t	유	59.51cm ²	2982.2cm ⁴

그림 2 구조 시스템

3.2 반강접 효과를 고려한 강성행렬

반강접 접합부를 가진 부재의 강성행렬을 구하는 방법^[8,9]으로 공액보법, 처짐각법 그리고 Hybrid Beam에 의한 방법이 제시되고 있다. 본 논문에서는 공액보법에 대한 기본적인 개념과 강

성행렬을 제시한다. 이 방법은 공액보 단부에서의 전단력은 실제 보 단부에서의 순간도 변화와 같다는 공액보 이론을 근거로 하여 반강접 접합부를 가진 보·기둥 요소의 강성행렬을 구한다. 이 방법에서는 접합부의 모멘트-회전변형관계를 정의하기 위해서 Monforton과 Wu의 고정계수(Fixity Factor)를 도입하고 있다. 그림 3에서 반강접 접합부를 가진 부재의 공액보를 제시하여 강성행렬을 공액보법에 의해 유도하였다.

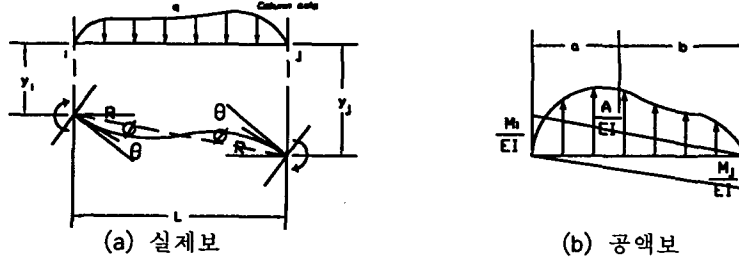


그림 3 반강접 접합부를 가진 부재의 공액보

$$V_i = \theta_i^* - \phi_i - R = \left[\frac{M_i^* L}{3EI_z} \right] - \left[\frac{M_j^* L}{6EI_z} \right] + \left[\frac{Ab}{EI_z L} \right] \quad \dots \dots (3-1)$$

$$V_j = \theta_j^* - \phi_j - R = \left[\frac{M_i^* L}{3EI_z} \right] - \left[\frac{M_j^* L}{6EI_z} \right] + \left[\frac{Aa}{EI_z L} \right] \quad \dots \dots (3-2)$$

$\phi = M \lambda$ 의 관계를 대입하고, Monforton과 Wu의 고정계수(Fixity Factor)를 도입하여 힘-변위 관계를 유도한다.

$$\gamma_i = \frac{L}{(L+3EI_z \lambda_i)} \quad , \quad \gamma_j = \frac{L}{(L+3EI_z \lambda_j)} \quad \dots \dots (3-3)$$

위의 유도과정에서 힘-변위관계를 간략화하기 위해서 Small displacement 가정이 사용되었다.

$$LR \cong y_j - y_i \quad , \quad R = \frac{y_j - y_i}{L} \quad \dots \dots (3-4)$$

프로그램에서 부재에 작용하는 하중은 등가 하중(Equivalent load)의 형태로 단부에 제하되므로 R에 관한 식은 생략된다. 참고적으로 일반적인 강접 골조에서의 등가 하중과는 달리 반강접 골조인 경우 접합부의 반강접 효과를 고려한 등가하중의 사용이 요구된다. 공액보법에 의해 유도된 반강접 접합부를 고려한 강성행렬은 다음과 같다.

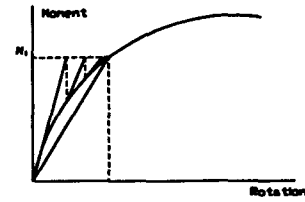
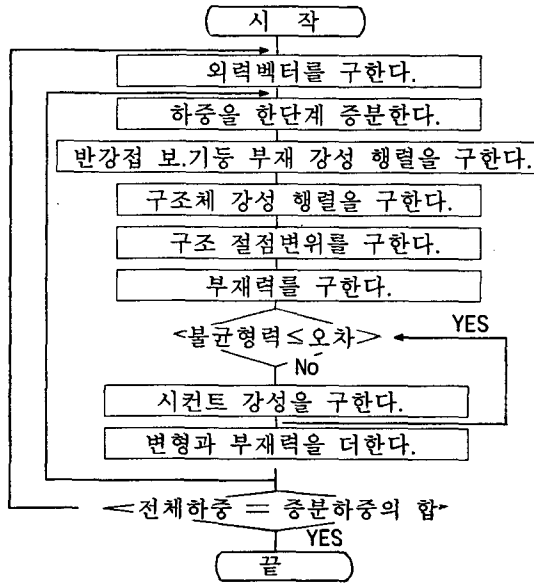
$$[k] = EI \begin{bmatrix} \frac{A}{H} & 0 & 0 & -\frac{A}{H} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12}{L^3} \left[\frac{A}{H} \right] & \frac{6}{L^2} \left[\frac{B}{H} \right] & 0 & -\frac{12}{L^3} \left[\frac{A}{H} \right] & \frac{6}{L^2} \left[\frac{G}{H} \right] \\ 0 & \frac{6}{L^2} \left[\frac{B}{H} \right] & \frac{4}{L} \left[\frac{C}{H} \right] & 0 & -\frac{6}{L^2} \left[\frac{B}{H} \right] & \frac{2}{L} \left[\frac{F}{H} \right] \\ -\frac{A}{H} & 0 & 0 & \frac{A}{H} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12}{L^3} \left[\frac{A}{H} \right] & -\frac{6}{L^2} \left[\frac{B}{H} \right] & 0 & \frac{12}{L^3} \left[\frac{A}{H} \right] & -\frac{6}{L^2} \left[\frac{G}{H} \right] \\ 0 & \frac{6}{L^2} \left[\frac{C}{H} \right] & \frac{4}{L} \left[\frac{F}{H} \right] & 0 & -\frac{6}{L^2} \left[\frac{C}{H} \right] & \frac{2}{L} \left[\frac{D}{H} \right] \end{bmatrix}$$

여기에서

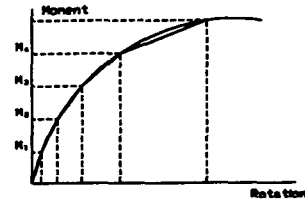
$$\begin{aligned} A &= \gamma_i + \gamma_j + \gamma_i \gamma_j & F &= 3 \gamma_i \gamma_j \\ B &= \gamma_i (2 + \gamma_j) & G &= \gamma_j (2 + \gamma_i) \\ C &= 3 \gamma_i & H &= 4 - \gamma_i \gamma_j \\ D &= 3 \gamma_j \end{aligned}$$

3.3 반강접 효과를 고려한 구조 해석

골조의 반강접 효과를 고려한 구조 해석은 기하 비선형을 고려한 해석과 병행하여 반강접 접합부의 비선형관계를 고려하여야 한다. 반강접 접합부의 거동을 접근하는 방법으로 시컨트 강성 방법(Secant Stiffness Method)이 접선 강성 방법(Tangent Stiffness Method)에 비하여 프로그램의 편리성이 높다는 이유로 시컨트 강성 방법을 사용하고 있다. 그림 4에서는 기존 연구논문^[2,8,9]에서 제시된 순서도와 단자유도(Single Degree of Freedom)인 구조물에 대하여 비선형 해석 매커니즘을 제시하고 있다.



(a) 단위 하중에 대한 반복법



(b) 전체 하중에 의한 반복법

그림 4 반강접 효과를 고려한 탄성해석 순서도

3.4 해석결과의 분석

접합부의 유연도에 따른 구조 최상층의 최대 수평변위와 최대 보 모멘트를 보면 기존의 연구^[2,7,8,9]에서 분석되었던 결과와 같이 접합부가 유연할수록 수평변위는 증가하고 보 모멘트는 감소하고 있음을 알 수 있다. 골조의 강성이 적은 경우일수록 접합부의 반강접 효과에 의한 골조의 거동에 미치는 영향이 크다는 것을 알 수 있다. 그림 5, 그림 6까지는 횡력이 작용하는 경우에 최대 수평변위와 층간 수평변위를 제시함으로써 접합부의 연성도와 골조의 수평거동간의 관계를 보여주고 있다. 그림에서는 전체 하중을 100등분하여 각각의 하중 단계마다 그에 상응하는 수평변위를 도시함으로써 횡력의 크기에 대한 전체 골조의 거동 양상을 알 수 있다.

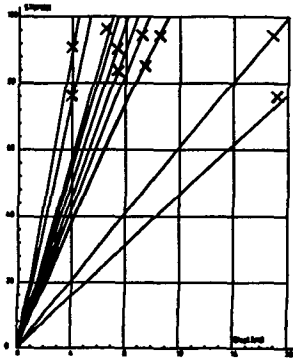


그림 5 최상층 수평변위

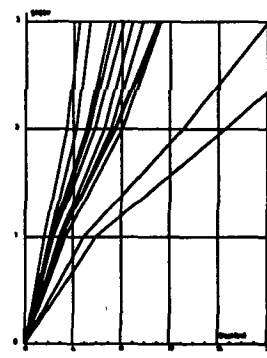


그림 6 층별 수평변위

반강접 접합부를 고려한 골조해석 결과 휨력에 대한 골조의 수평강성이 문제시 되며 이러한 문제점으로 인하여 전단벽·가새의 설치, 기둥강성의 증가, 강성이 강한 접합부의 사용 등 구조계획시 수평 강성을 확보하는 방법이 요구된다. 각각의 접합부에 대한 골조의 최대 수평변위 및 최대 부재 모멘트를 표 2에서 제시한다.

(단위/ 모멘트: t·m 수평변위 : cm)

접합부명	기둥 모멘트	보 모멘트	수평변위	접합부명	기둥 모멘트	보 모멘트	수평변위
EPW-S11	3.6703	2.0853	7.44	EPW-S21	3.4409	2.2718	8.89
EPW-S12	4.2438	1.4505	10.99	EPW-S22	3.5507	2.1221	9.75
EPW-S13	3.7916	1.9746	8.16	EPW-S23	4.6330	1.2827	20.07
EPW-S14	3.6051	2.1571	7.05	EPW-S24	3.7306	1.8794	11.21
TDW-S11	4.2579	1.5091	11.17	SDW-S21	5.2370	1.0284	26.57

표 2 최대 수평변위 및 부재 모멘트

4. 접합부 매개변수의 영향^[1,3]

4.1 각형강관의 두께

중저층 건물에 적합한 접합부의 개발에 있어서 기둥 강성의 증가는 필수적이다. 하지만 일정 두께 이상일 경우에는 각형강관의 두께 증가는 접합부 강성을 증가하기에는 부적절한 변수이다.

각형 강관의 두께는 휨력이 작용할 경우 콘크리트가 충전되지 않은 기둥의 경우에 두께의 증가로 기둥 강성은 46.6% 증가하는데 비하여 수평변위가 58% 감소라는 사용성 한계 상태를 만족할 수 있는 중요한 설계 변수이다.

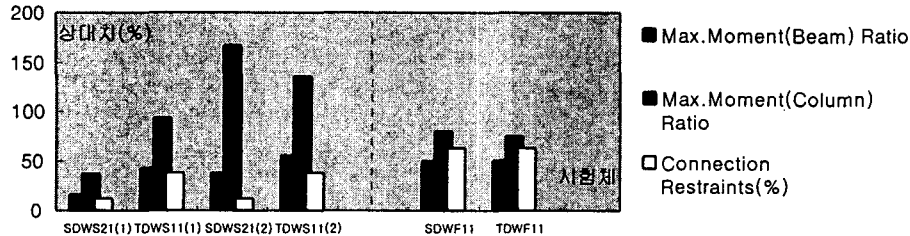


그림 7 각형강관 두께가 골조 거동에 미치는 영향

4.2 콘크리트 압축강도

반강접 접합부에서 발생하는 접합부 파괴는 대부분 각형강관 기둥의 압축 플랜지와 H형강보 상부 압축 부위의 좌굴 및 콘크리트 압축 파괴에 기인하고 있다. 접합부내에서 압축력은 콘크리트에 의해서 저항하므로 콘크리트의 압축 강도가 접합부의 휨강성을 결정하는데 중요한 변수로서 고려되어지고 있다. 압축강도가 일정한 콘크리트를 사용하는 경우에 시공성 및 경제적 측면에서 용접에 의한 접합부의 구속 효과와 병용접합의 경우 구속 효과는 근사하므로 용접 및 볼트 병용 접합 방법이 유리하다고 볼 수 있다.

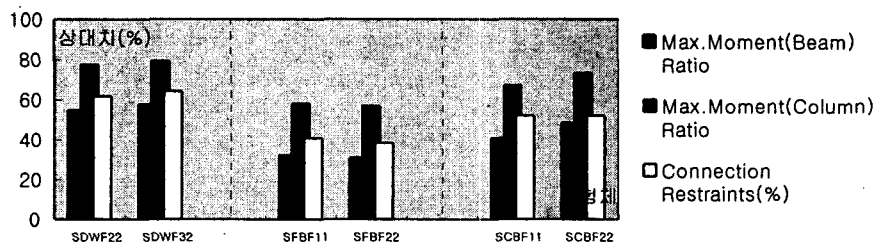


그림 8 콘크리트 강도가 골조 거동에 미치는 영향

4.3 각형강관내 콘크리트 충전 유무

접합부에서 휨모멘트에 의해 발생하는 인장력과 압축력은 H형강보 플랜지면을 따라 각형강관에 전달되고 H형강보 하부 플랜지 압축력은 각형강관의 플랜지와 각형강관내 콘크리트가 분담되도록 설계되어져 있다. 즉 콘크리트의 충전 유무는 접합부의 휨강성을 결정하는데 중요한 변수로서 고려되어지고 있다. 또한 콘크리트 충전으로 인하여 축방향 강성 및 휨강성 증대뿐만 아니라 내화 성능의 향상, 중량 증가로 인한 내진 성능 향상을 가져올 수 있다.

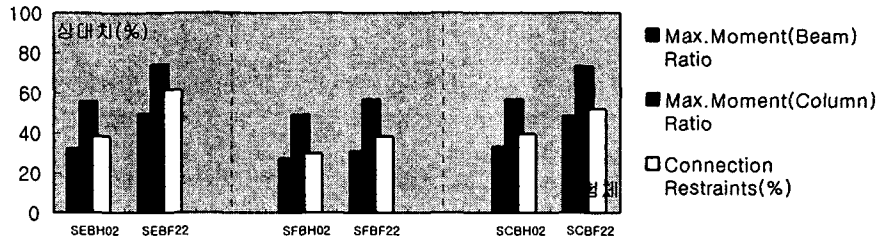


그림 9 각형강관내 콘크리트가 골조 거동에 미치는 영향

4.4 단부평판 크기

각형강관 기둥의 두께가 6mm인 경우에 14.9%의 접합부 강성 증가로 인하여 32%의 수평변위가 감소하는 반면에 기둥의 두께가 9mm인 경우에는 3.7%강성의 증가로 인하여 51%의 수평변위가 감소하고 있음을 알 수 있다. 단부평판의 폭이 접합부 및 골조의 거동에 미치는 영향은 접합부에서 발생하는 모멘트를 기둥에 전달할 수 있는 일정 폭 이상일 경우에는 거의 없음을 알 수 있다. 결론적으로 골조의 거동에 적합한 접합부를 선정하기 위해서는 강성이 큰 기둥에서 단부평판의 길이와 폭의 비가 중요함을 알 수 있다.

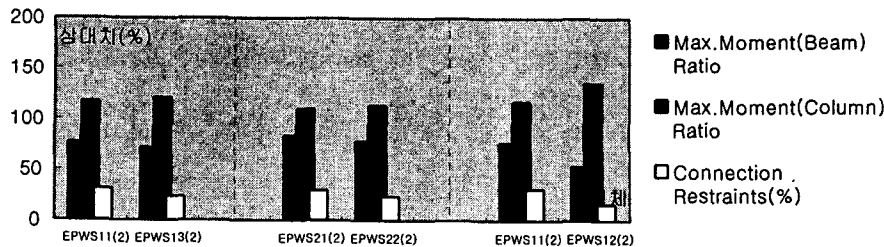


그림 10 단부평판 크기 변화가 골조 거동에 미치는 영향

4.5 접합 방법

용접에 의한 접합방법과 병용 접합방법은 접합부의 강성 및 골조의 거동 측면에서 2%미만의 미소한 차이가 있다. 병용 접합방법에 의하면 용접에 의한 접합부 강접 성능을 확보하면서 시공성 향상을 기대할 수 있다. 하지만 단순전단 접합의 경우에 있어서는 충분한 검토에 의한 접합부의 선정이 필요하리라 본다.

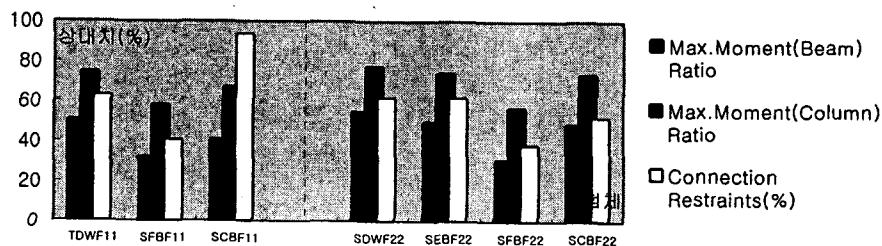


그림 11 접합 방법 변화가 골조 거동에 미치는 영향

5. 결론

1) 횡력이 작용하는 구조물을 해석한 결과 접합부의 연성도가 커짐에 따라 최상층의 수평변위가 증가함을 알 수 있다. 각형강관의 두께가 9mm인 경우 수평변위는 157.2%에서 249.89%까지 증가하였으며 각형강관의 두께가 6mm인 경우에는 165.55%에서 494.79%까지 증가한다 따라서 사용성 한계 상태의 측면에서 골조의 수평 강성을 확보하기 위한 기둥강성의 증대 및 접합부 강성이 비교적 큰 접합부 사용 등의 골조 설계 계획이 필요하다.

2) 접합부 연성도가 클수록 골조의 보에서 발생하는 단부 모멘트는 감소한다. 즉 보의 단부 모멘트는 접합부가 강접에 가까울수록 그 크기가 크다. 하지만 단부에서의 모멘트 감소로 인하여 중앙부에서는 모멘트가 증가하며 보의 경제성 문제에 대한 검토가 필요하다.

3) 각형강관 두께는 접합부의 강접성능을 증가시키기에는 부적절하지만 각형강관내 콘크리트 충전 여부 매개변수와 마찬가지로 골조의 수평 강성의 확보라는 측면에서 중요한 설계 변수이다. 강관내 콘크리트는 타설시 내화 성능의 향상 등과 같은 구조적 이점 이외에도 접합부의 강접성능을 확보할 수 있는 중요한 변수이다. 압축강도가 일정 이상일 경우에는 볼트에 의한 접합만으로도 용접에 의한 접합부의 강접성능을 확보할 수 있다. 압축강도가 일정한 경우에는 병용 접합 방법에 의해서도 용접접합에 의한 접합부 강접성능을 확보할 수 있다. 단부 평판의 접합에 있어서 접합부의 강성은 단부 평판의 두께, 폭, 길이 변수에 의해서 결정되지만 단부 평판의 폭과 길이의 비도 중요한 매개변수이다.

참고문헌

- 1 김재훈 " H형강보·각형강관 기둥 접합부의 연성도를 고려한 골조의 거동 관한 연구 " 울산대학교 건축학과 석사학위 논문
- 2 김옥선 " 반강접 접합부를 가진 철골 구조물의 거동에 관한 연구 " 연세대학교 건축학과 석사학위 논문
- 3 신상훈 " H형강보 - 각형강관 기둥의 단부 평판 접합부의 거동에 관한 연구 " 울산대학교 건축학과 석사학위 논문
- 4 이장춘 " 각형강관 기둥과 H형강보 접합부의 휨거동에 관한 연구 " 울산대학교 토목공학과 석사학위논문
- 5 변우정 " 충전콘크리트 각형강관과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부의 유한요소 모델링에 관한 연구 " 울산대학교 토목공학과 석사학위논문
- 6 이광훈 " 콘크리트 충전된 각형강관 기둥과 콘크리트 합성된 H형강보 접합부의 구조적 성능에 관한 실험적 연구 " 울산대학교 토목공학과 석사학위논문
- 7 B.S.Dhillon, S.Abdel-Majid " Interactive Analysis And Design Of Flexibly Connected Frames " Computer & Structures Vol 36, No.2
- 8 W.F.Chen " Joint Flexibility In Steel Frames " J. Constructional Steel Resarch Vol.8
- 9 W.F.Chen, E.M.Lui " Stability Design Of Steel Frames " CRC Press , Inc. 1991.