프리훼브 콘크리트충전 각형강관기둥 이음부의 휨거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Behavior of Column-to-Column Connections of Prefabricated Concrete Filled Tubes

김 재 훈[1] · 이 명 재[2]
Kim, Jae Hoon Lee, Myung Jae

요 약 : 콘크리트충전 강관은 콘크리트와 강관의 합성작용으로 인한 내력의 증가와 우수한 변형능력 등의 많은 장점이 있으나 현장에서 강관에 콘크리트를 타설할 때 충전된 콘크리트의 충전성에 대한 신뢰도가 떨어질 수 있다. 본 연구에서는 콘크리트의 공장타설에 의한 콘크리트충전 각형강관기둥의 프리훼브화로 콘크리트의 충전성을 확보하기 위한 목적으로 현장에서의 기둥 이음방식을 용접과 고강도 무수축 모르터를 사용한 접합방법을 사용하여 이에 대한 실험을 하였다. 본 연구는 이러한 시공법을 선택할 경우 콘크리트를 미리 타설한 기둥과 기둥을 접합할 때 그 이음부의 역학적 특성을 파악하여 실제 현장에서 실시하고 있는 방법인 현장 타설방법과 동등한 능력을 발휘할 수 있는 지를 확인하고 그 방법에 대한 영향인자를 파악하고 분석하는 기초적 연구이다.

ABSTRACT : Concrete filled tubular(CFT) members have many structural and constructional advantages. The prefabrication of CFT members can be thought an idea for the good quality control of concrete. The objective of this study is to suggest the construction method of prefab CFT beam-columns. Tests are performed to understand their structural behaviors. The opening space between prefab CFT members and the size of tubular members are the parameters of this study. The results of this study will be based on the suggestion of prefab CFT.

핵 심 용 어 : 콘크리트충전 각형강관, 기둥이음부, 가력실험
KEYWORDS : Concrete filllled tube(CFT), Column-to-column connection, Experimental test

1) 중앙대학교 대학원 석사과정 수료
2) 정회원, 중앙대학교 건축공학과 교수, 공학박사

본 논문에 대한 토의를 1999년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

콘크리트충전 강관은 콘크리트와 강관의 합성작용으로 인하여 내력 및 변형능력면에서 많은 장점이 있으나 현장에서 강관에 콘크리트를 타설할 때 콘크리트의 충전성에 대한 품질관리가 문제된다. 특히 보·기둥 접합부에서 관통 또는 내부 다이아프램형식을 사용할 때 충전성이 더욱 문제된다. 그러므로 이러한 문제점의 해결과 공기단축 등을 위해 콘크리트를 현장에서 타설하지 않고 각형강관으로 가공된 한 개의 구절에 미리 콘크리트를 타설하여 일정기간의 양생기간을 거친 후 현장으로 운반하여 조립하는 시공법을 생각할 수 있다. 이 방법에 의하면 콘크리트의 공장타설 공정에서 콘크리트의 균질성 및 강관기둥 내부의 콘크리트 충전성 등을 미리 확보할 수 있다.

본 연구에서는 콘크리트의 공장타설에 의한 콘크리트충전 각형강관기둥의 프리훼브화를 위한 목적으로 현장에서의 기둥 이음방식을 용접과 고강도 무수축 모르터를 사용한 접합방법을 사용하여 해결하고자 하였다. 본 연구는 이러한 시공법으로 콘크리트를 미리 타설한 기둥과 기둥을 접합할 때 그 이음부의 역학적 특성을 파악하여 실제 현장에서 실시하고 있는 방법인 현장 타설방법과 동등한 능력을 발휘할 수 있는 지를 확인하고 그 방법에 대한 영향인자를 파악하고 분석하는 것을 그 목적으로 하고 있다.

2. 콘크리트충전 각형강관의 단면성능

콘크리트충전 각형강관의 단면성능을 파악하기 위해 본 실험에서 사용할 각형강관단면을 중심으로 그 전소성모멘트와 축력-모멘트관계 등을 수치해석으로 알아보고자 하였다.

강관의 항복응력도(σ_y)로서 STKR400과 STKR490의 설계기준강도(F_y) 2.4tf/cm^2, 3.3 tf/cm^{2}를 각각 적용하였다.

2.1 단면성능 산정방법

전소성모멘트는 우선 부재전단면이 σ_y까지 도달한 상태에서 단면의 인장력과 압축력이 같다는 조건으로 중립축을 구하고 이 중립축에 대해 각 단면적과 거리, 그리고 σ_y를 곱하여 계산하였다.

① 강재 단면적(A_s), 콘크리트 단면적(A_c)를 축에 평행하게 i 등분 한다.

② 콘크리트와 각형강관이 일체거동을 하는 것으로 보고 축력(N)이 작용할 때의 변형도를 식(1)과 같이 계산한다.

$$\varepsilon = \frac{N}{E_s \cdot A_s + E_c \cdot A_c} \tag{1}$$

③ 축력에 의한 변형도(ε)로부터 콘크리트와 각형강관에 생기는 응력 (σ_c, σ_s) 을 계산한다.

④ 임의의 중립축(X)을 설정한다.

⑤ 임의의 중립축에 대해 상하단면의 압축력(C)과 인장력(T)을 계산한다.

$$C = A_s(i) \times (\sigma_y - \sigma_s) + A_c(i) \times (f_c' - \sigma_c) \tag{2}$$

$$T = A_s(i) \times (\sigma_y - \sigma_s) + A_c(i) \times \sigma_c \tag{3}$$

④ 압축력(C)과 인장력(T)이 거의 같아질 때까지 중립축(X)을 이동시키면서 반복계산한다.

⑤ 중립축(X_p)을 계산한 다음 각 면적에 중립축에서의 중심거리와 σ_y를 곱하여 전소성모멘트를 구한다.

$$M_p = \sum (A(i) \times Z(i) \times \sigma_y + A(i) \times Z(i) \times f_c') \tag{4}$$

2.2 각형강관의 두께를 달리한 경우

각형강관의 춤이 일정한 경우 강관의 두께가 변화할 때 전소성모멘트의 변화를 강관의 춤 20, 25, 30cm 별로 그림 1에 나타낸다. 강재와 콘크리트의 강도는 동일하게 두었다. 강관두께의 증가에 따라 거의 비례하여 단면의 전소성모멘트가 증가함을 보이고 있으며 각형강관 춤에 관계없이 모두 직선변화를 보였다. 증가폭에 의한 기울기는

각각 다르게 나타나고 있으나 두께가 2 mm인 전소성모멘트(M_{po})로 무차원화 한 경우 증가비는 거의 같게 나타나는 것을 그림 2로부터 알 수 있다.

2.3 콘크리트의 강도를 달리한 경우

각형강관 내부에 충전되는 콘크리트의 강도를 증가시켜며 이에 따른 전소성모멘트의 변화를 그림 3에 비교하였다. 콘크리트 강도가 0인 것은 중공강관의 경우이다. 각형강관단면은 □-200×200×9, □-250×250×12, □-300×300×9로 하였으며, 강재의 설계기준강도를 σ_y=2.4 tf/cm^{2}로 하였다. 콘크리트 강도에 따라 전소성모멘트는 증가하지만 콘크리트 강도의 증가율에 비하여 상대적으로 적게 나타나고 있다. 그림 4는 σ_y=2.4 tf/cm^2 일 때 각각의 중공강관의 단면성능(M_{po})으로 무차원화 한 것이다. 무차원화 된 전소성모멘트의 증가비는 서로 비슷하게 나타났다. 그리고 콘크리트 강도의 차이보다는 충전의 유무에 따른 변화가 비교적 크고 동일한 콘크리트 강도에서는 강관크기가 큰 쪽이 그 증가비도 크게 나타남을 알 수 있다. 이상과 같은 결과는 σ_y=3.3 tf/ cm^{2}의 경우도 동일하게 확인되었다.

2.4 축력과 모멘트의 상관관계

단면에 작용하는 축력에 따른 전소성모멘트를 항복축력(N_y)과 전소성모멘트(M_p)로 무차원화하여 그림 5, 그림 6에 각각 나타낸다. 각형강관의 단면은 □-250×250×12, □-300×300×9로 하였으며, 중공의 경우와 충전된 경우에 대하여 나타내었다. 강재의 설계기준강도는 σ_y=2.4 tf/cm^{2}로 하였다. 콘크리트가 충전된 경우는 축력비의 증가에 따라 전소성모멘트를 상회하는 구간도 나타났으며 이는 축력에 의하여 중립축 이동에 따라 콘크리트의 압축측 단면적이 증가하여 생긴 것이다. 이러한 전소성모멘트를 초과하는 비는 단면에 따라 다르게 나타났다.

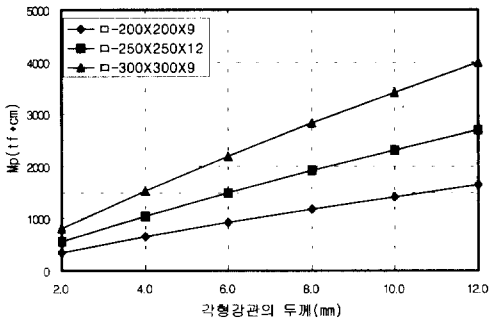

그림 1. 각형강관두께 변화에 따른 전소성모멘트

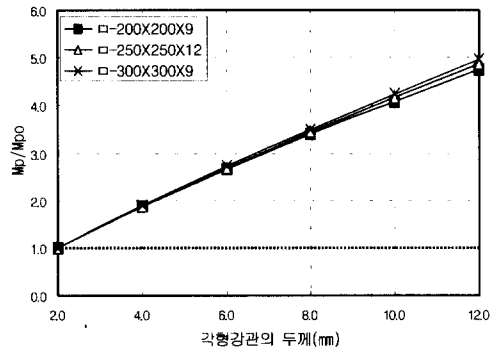

그림 2. 각형강관두께 변화에 따른 단면의 무차원화된 전소성모멘트

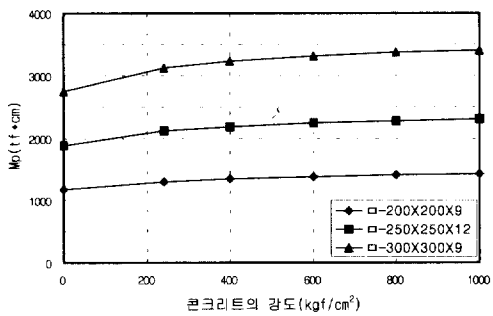

그림 3. 콘크리트 강도 변화에 따른 전소성모멘트 (σ_y=2.4tf/cm^2)

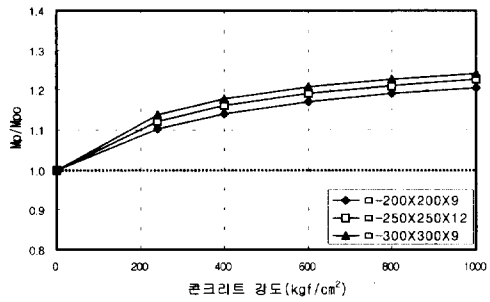

그림 4. 콘크리트 강도 변화에 따른 무차원화된 전소성모멘트 (σ_y=2.4tf/cm^2)

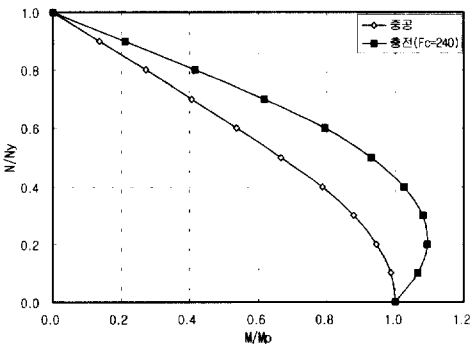

그림 5. 축력비 변화에 따른 무차원화된 모멘트내력 (□ - 300×300×9)

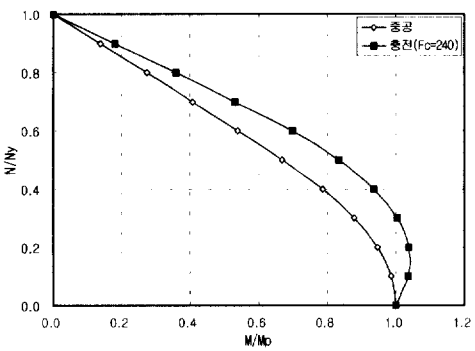

그림 6. 축력비 변화에 따른 무차원화된 모멘트내력 (□ - 250×250×12)

3. 실험계획 및 결과

3.1 시험체

기존의 기둥이음방식과 달리 콘크리트를 먼저 타설하고 기둥이음부의 접합을 한 경우에 대하여 최대내력과 휨성능을 알아보기 위해 총 6개의 시험체를 제작하였다. 강관과 강관의 접합은 맞댐용접으로 하였으며 용접부성능을 확보하기 위해 안쪽뒤판(backing-strip)을 사용하였다.

용접봉은 저수소계 고력용접봉(Chosun-Welding, LC-300)을 사용하였다. 한쪽에만 45° 로 베벨(bevel)형 개선을 하였고 안쪽에는 6mm 플레이트로 뒤판을 대었으며 강관의 내측면에 밀착되도록 미리 용접을 하였다. 부재의 이음부에서 절과 절 사이에 6mm 공간을 두었으며 이는 뒤판을 노출시켜 직접 용융될 수 있도록 한 것이다. 절과 절을 용접 접합한 후에는 이음부 콘크리트면 사이의 공극(d)에 무수축 고강도 모르터(물시멘트비 53%, 28일강도 790kg/cm^2)를 주입하여 충전하였다. 모르터 주입공극이 거의 없는(d=0.0mm) 시험체에도 상하 콘크리트의 면과 면 사이에 모르터를 주입하여 공극이 생기지 않도록 하였다. 가력점과 지지점은 12mm플레이트로 덧판을 대어 지압에 대하여 보강하였다. 또한 프리휘브화 이음부의 용접성능 평가를 위해 이음부가 없는 일체형 중공강관시험체와 이음부가 있는 중공강관시험체를 제작하여 휨가력실험을 동시에 실시하였다.

시험체의 사항은 다음과 같고 각 시험체의 형상을 그림 7에 나타낸다. 또한 시험체 일람을 표 1에 나타낸다

(가) 강관의 형상(□ - 300×300×9, □ - 250×250×12, □ - 200×200×9)

(나) 콘크리트의 타설유무(중공, 충전)

(다) 고강도 모르터의 주입공극 간격 d (d=0.0, 100 mm)

(라) 콘크리트의 설계강도 240 kgf/cm^2

(마) 기둥접합은 뒤판(backing-strip)을 대어 맞댐용접한다.

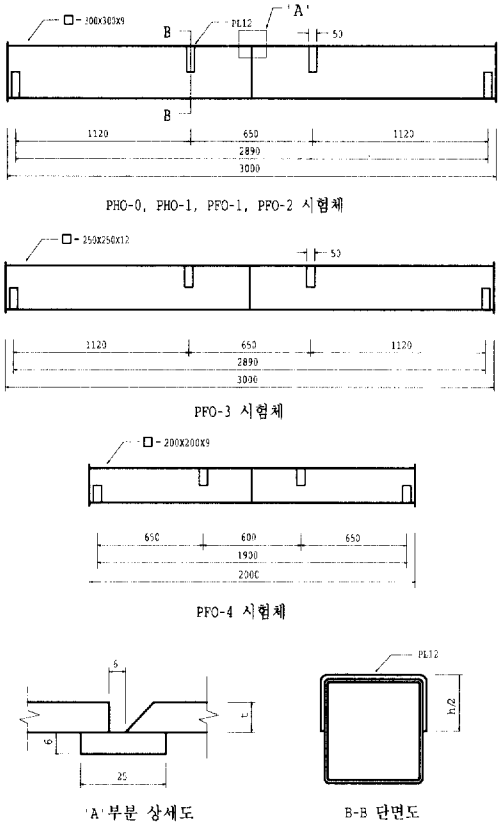

그림 7. 시험체의 형상 및 이음부 상세

표 1. 시험체 일람

시험체 번호	시험체 사항 (모르터 사춤공간)	콘크리트 강도 (kgf/cm^2)	단면형상	시험체 길이 (cm)
PHO-0	무철단 중공	-	□-300×300×9	L= 289.0 l = 65.0
PHO-1	중공	-	□-300×300×9	L= 289.0 l = 65.0
PFO-1	(d=0.0 mm)	240	□-300×300×9	L= 289.0 l = 65.0
PFO-2	(d=100 mm)	240	□-300×300×9	L= 289.0 l = 65.0
PFO-3	(d=100 mm)	240	□-250×250×12	L= 289.0 l = 65.0
PFO-4	(d=100 mm)	240	□-200×200×9	L= 190.0 l = 60.0

3.2 가력 및 측정방법

각 시험체는 양쪽에 단순지지하였다. 가력빔을 사용하여 시험체 중앙부에 그림 8과 같이 균등휨으로 가력하였다. 기둥의 가력점과 지지점은 지압에 대해서 영향이 없도록 12mm플레이트로 덧판을 대어 보강하였다. 기둥의 이음부가 있는 중앙부 상·하지점에 Wire Strain Gauge (W.S.G)를 부착하여 변형도를 측정하였으며, 또한 중앙점 하단, 가력점 하단, 지지점 상단에 Dial Gauge (D.G)를 설치하여 변위량 및 부재변형각을 측정하였다. 가력에는 100tf 용량의 만능시험기 (U.T.M.)를 사용하였다.

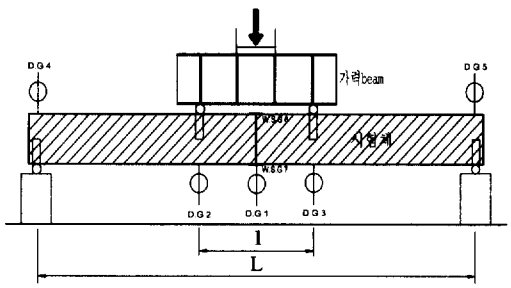

그림 8. 시험체의 가력상황

3.3 실험결과

각 시험체의 휨가력실험 결과를 표 2에 나타낸다. 각 시험체의 하중-변위관계를 그림 9에서부터 그림 12까지 나타내고, W.S.G.로부터 측정된 이음부의 응력도-변형도관계를 그림 13에 나타낸다. 그림에서 P_p와 P_y는 각각 단면의 전소성모멘트, 항복모멘트에 상당하는 하중을 나타낸 것이다. 충전시험체 모두 국부좌굴은 발생하지 않았으나 중공시험체는 가력부에 압괴가 발생하였다. 하중이 증가하지 않고 상당한 변형을 할 때까지 가력을 하였으나 기둥 이음부의 파괴현상은 발생

하지 않았다. 이는 이음부의 휨성능이 확보되었음을 의미한다. 가력종료시의 내력은 충전시험체 모두 계산상의 전소성모멘트를 초과하였으나 중공시험체는 전소성모멘트값에는 도달하지 못하였다. 이는 가력부의 국부압괴로 인한 것이다. 중공시험체의 경우 용접이음을 한 시험체가 약간 높은 강성 및 내력을 보였다. 충전시험체의 경우 가력도중 충전제의 파단에 의한 하중저감이 발생하기도 하였으나 PFO-3 시험체의 경우 다시 내력증가를 보인 것으로 보아 내력 및 변형능력은 유지된 것으로 판단된다.

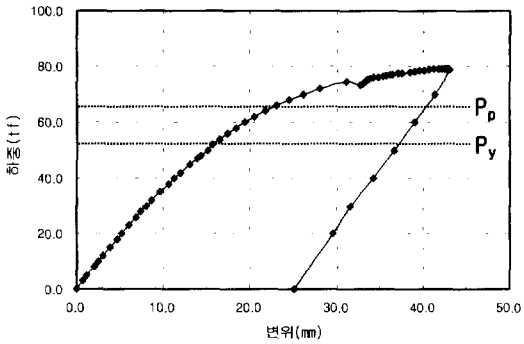

그림 11. PFO-3 시험체의 하중-변위 관계

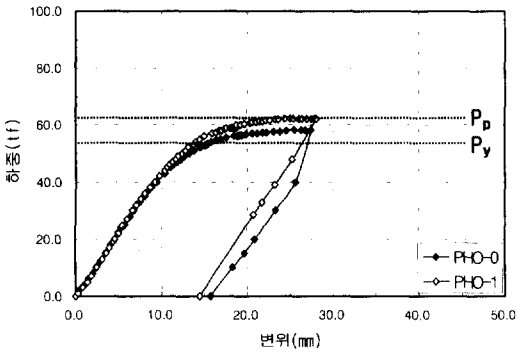

그림 9. PHO-0, PHO-1 시험체의 하중-변위관계

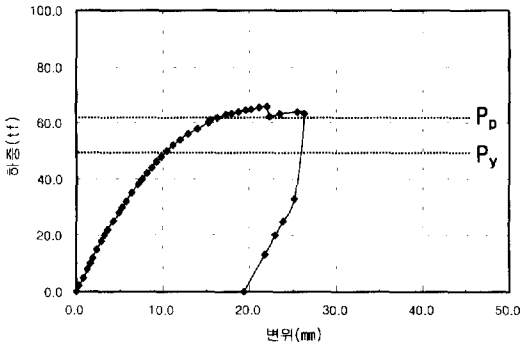

그림 12. PFO-4 시험체의 하중-변위 관계

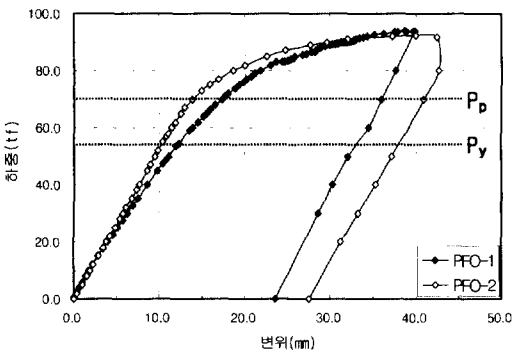

그림 10. PFO-1, PFO-2 시험체의 하중-변위관계

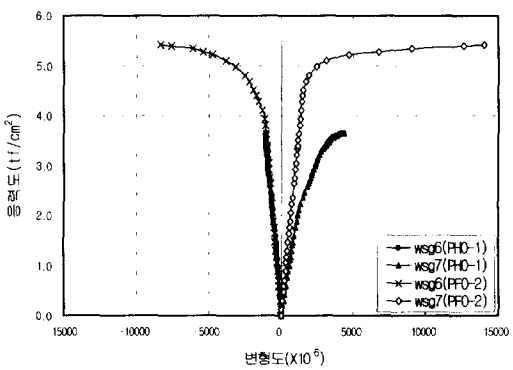

그림 13. 시험체의 응력-변형도 분포(이음부)

표 2. 가력종료시의 실험결과

시험체	하중 (tf)	모멘트 (tf · cm)	변위 (mm)	부재각 (rad)	변형도 ($\times 10^{-6}$)	모멘트 / 전소성모멘트(Mp)
PHO-0	58.46	3274	27.42	0.0219	3417	0.91
PHO-1	62.40	3494	28.09	0.0227	4360	0.97
PFO-1	93.95	5261	39.91	0.0318	22327	1.32
PFO-2	92.55	5183	42.73	0.0367	18586	1.30
PFO-3	79.00	4424	43.00	0.0349	13881	1.19
PFO-4	65.75	2137	26.35	0.0332	20454	1.05

3.4 결과 및 고찰

(1) 휨성능

시험체의 휨성능을 비교하기 위해 각 시험체의 실험결과에서 나온 최대모멘트값의 항복모멘트와의 비(M/M_y)와 전소성모멘트와의 비(M/M_p)를 그림 14에 나타낸다. 가력종료시의 최대모멘트와 단면내력과의 비를 보면 시험체 모두 항복모멘트 값을 초과하였으나 중공시험체는 모두 전소성모멘트 값에는 도달하지 못하였다. 충전된 시험체인 PFO시험체들은 모두 전소성모멘트 값을 초과하였으나 PFO-4시험체의 경우 그 비율이 다소 낮은 것을 알 수 있다.

(2) 휨강성

시험체에 따른 휨강성을 파악하기 위하여 시험체의 하중-처짐 관계를 계산상의 단면의 항복모멘트와 그때의 처짐으로 무차원화시켜 그림 15, 그림 16에 각각 나타낸다. 충전된 시험체들은 초기강성이 항복모멘트에 이르기까지 거의 유지하고 있다. 중공시험체의 경우는 초기부터 강성이 조금씩 변화되고 있으나 충전시험체의 경우는 콘크리트충전효과에 의하여 단면의 형상이 변화되지 않아서 초기강성이 유지되는 것으로 판단된다. 충전된 경우 단면형상 및 모르터 사춤공극에 따른 초기강성의 차이는 거의 없는 것으로 판단된다.

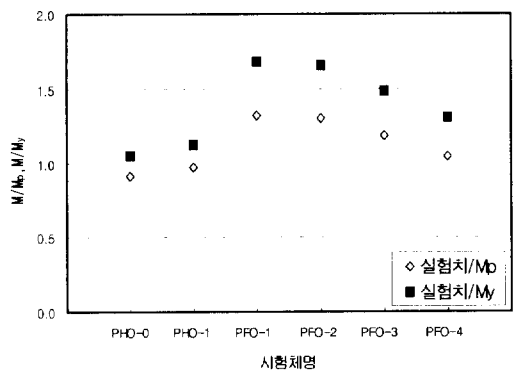

그림 14. 가력종료시 모멘트와 전소성모멘트, 항복모멘트와의 비

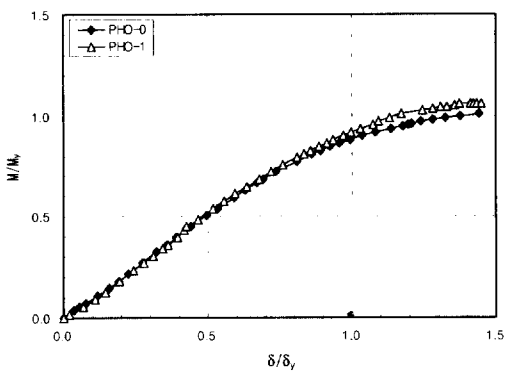

그림 15. PHO 시험체의 $M/M_y - \delta/\delta_y$ 관계

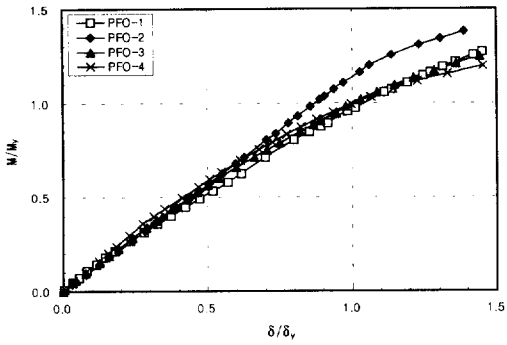

그림 16. PFO 시험체의 $M/M_y-\delta/\delta_y$ 관계

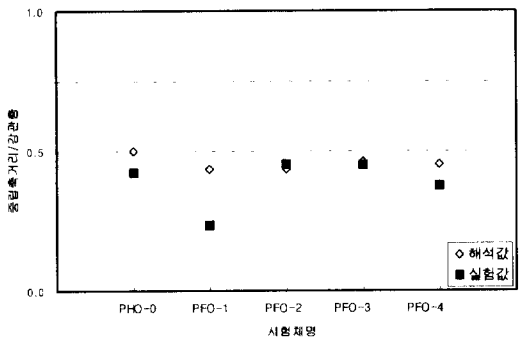

그림 17. 시험체의 중립축 위치

(3) 중립축의 위치

실험으로부터 얻어진 시험체별 중립축위치와 계산상의 중립축 위치를 그림 17에 나타낸다. 그림에서는 중립축 위치가 상단에서의 거리를 강관춤으로 나눈 값으로 나타나고 있다. PFO-1시험체를 제외하면 실험결과는 계산상의 중립축위치와 비교적 잘 일치하고 있다고 볼 수 있다. 충전된 시험체 모두 중립축의 위치가 단면의 중앙에서 상측으로 올라가 있으며 이는 충전에 의해 콘크리트의 압축측에 기여한 영향으로 판단된다.

4. 결 론

콘크리트충전 각형강관기둥을 프리휘브화 시키고자 그 기초적 단계로 기둥이음부의 휨거동을 실험적으로 조사한 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 일체형 중공각형강관과 이음부가 있는 시험체 모두 완전히 항복할 때까지 접합부의 파단은 일어나지 않았다.

2) 모르터 충전공간(d)은 PFO-1, PFO-2 시험체의 실험결과로부터 프리휘브 콘크리트충전 각형강관 이음부의 거동에 영향인자로 작용하지 않고 있음이 확인되었다.

3) 일체형 중공각형강관(PHO-0)과 용접 접합한 중공각형강관(PHO-1)의 경우 내력과 초기강성이 거의 같게 나타났다.

4) 콘크리트충전 각형강관기둥을 프리휘브화 할 경우 본 연구에서 제시한 상세로 실시하면 기둥이음부의 휨성능이 확보될 수 있음을 확인하였다.

감사의 말

본 연구는 1998년도 초대형 구조시스템 연구센터(ERC, 한양대)의 지원으로 수행되었다. 이에 감사드린다.

참 고 문 헌

(1) 김재훈, 프리휘브 콘크리트충전 각형강관기둥 이음부의 휨실험, 대한건축학회 추계학술발표대회논문집, 1998
(2) 김재훈, 프리휘브 콘크리트충전 각형강관기둥 이음부의 휨성능, 중앙대대학원 석사학위논문, 1998
(3) 鐵骨構造接合部標準化委員會, 鐵骨構造標準接合部 SCSS(II), 技報堂出版, 1986
(4) 日鐵建材工業株式會社,角形鋼管・Uコラム設 計便覽, 1981
(5) CFT構造審査委員會, CFT構造技術指針・同解說, 1997
(6) ASCCS, Concrete Filled Steel Tubes A Comparison of International Codes and Prac- tices, 1997
(7) 日本建築學會, 鋼管コンクリト構造計算規準・同解說, 日本建築學會, 1990
(8) CIDECT, Design Guide for Concrete Filled Hollow Section Columns under Static and Seismic Loading, 1995

(접수일자 : 1999년 4월 15일)