

PHC 파일에 부착한 밴드플레이트의 부착강도에 관한 연구

Study on the Bond Strength of PHC Pile with Band Plate

김성배* 김성진** 김상섭***
Kim, Sung-Bae Kim, Sung-Jin Kim, Sang-Seup

Abstract

The purpose of this study was to apply column with PHC pile. The operated load on PHC pile are transferred to the concrete core from a steel beam through a contacted face between an in-filled concrete and the interior surface of a steel band plate. And a push-out test was performed to investigate the load transfer mechanism and the bond strength of band plate. The main parameters considered for this study included thickness of steel band plate, a welding quantity, interval of shear key. Test results were summarized to confirmed load transfer behavior between a concrete and steel band plate for each experimental parameter, using the analytical approach to verify experimental results.

키워드 : PHC 파일, PHC 기둥, 부착응력, 밴드플레이트, 전단키
Keywords : PHC Pile, PHC Column, Bond Strength, Band Plate, Shear Key

1. 서 론

최근 사회문제로 대두된 숙련공 부족과 인건비 상승은 건축 현장에도 큰 변화를 불러 오고 있다. 이미 건설사 및 현장에서는 기존 공법을 그대로 적용하기 보다는 복합화, 공업화를 통한 공기 단축과 공사비 절감방안에 대해 연구·검토 및 적용을 하고 있다. 또한 급격히 증가하고 있는 건축 및 토목 구조물에 대한 선진화 요구는 설계기법의 개발과 현장관리의 효율성, 리스크 관리, 공기 단축형 공법개발 등을 촉발하고 있다. 이와 함께 2008년부터 공공택지에서 분양되는 아파트는 공정을 40%가 넘어서 분양하도록 하고 있어 각 건설사는 공기 단축형 공법개발에 매진해야 하는 상황이다⁽¹⁾⁽²⁾. 아파트는 지상과 지하부로 구분되는데, 지상의 주거동은 입주자들의 다양한 요구에 의해 다양한 평면 유형을 갖는다. 반면 지하는 주차장으로 계획되고 주차장은 모듈화 된 평면으로 구성되어 공업화 건축을 적용하기 용이하다.

지하 토공사 시 지정으로 사용되고 있는 PHC 파일(High Strength Pre-Stressed Concrete Pile)은 원심력 고강도 프리스트레스로 제작되며, 콘크리트 강도는 78.5MPa이고, 파일 내부에는 강봉(또는 강선)이 삽입된다. PHC 파일의 제조과정은 형틀에 콘크리트를 투입 후 강제 인장과 원심성형, 증기양생 및 강봉(또는 강선)에

응력 도입, 탈형, 고온·고압 양생으로 진행된다. 제작된 PHC 파일은 직경 350~800mm(콘크리트 두께 60~110mm), 길이 5~15m로 사용된다⁽³⁾. 지금까지 지정에만 한정하여 사용되어 온 PHC 파일은 건축 구조물의 기둥재로 적용 시 현장 콘크리트 타설이 생략되므로 공기단축과 대량생산에 의한 공사비 절감이 가능할 것으로 판단된다. PHC 파일로 제작된 기둥(이하 PHC 기둥)에 부착되는 보의 철골 보(또는 합성보)가 효과적이며, 슬래브도 데크플레이트 등과 같이 건식공법을 적용할 수 있어야 적합한 공법의 조합을 이룰 수 있다.

본 연구에서 검토한 기둥은 철골 보 접합을 위해 강제 밴드플레이트를 PHC 파일 제작 시 삽입 하여 기성제품을 기둥으로 사용하는 방안을 제안·검토하였다. 삽입된 밴드플레이트에는 보를 접합하기 위한 가셋 플레이트가 부착되며, 여기에 철골 보를 접합한다. 그러므로 보에 작용하는 전단력은 밴드플레이트와 PHC 파일의 부착력으로 저항하게 된다. 부착력에 대한 연구는 매입형 철골 주각부와 같은 합성기둥과 강관기둥에 콘크리트를 충전한 콘크리트충진 강관구조에서 검토되었다^{(4)~(7)}. 또한 강관과 콘크리트 사이에 전달되는 응력 전달 메카니즘은 화학적 접착과 미세결합력, 마찰, 휨변형 효과 등으로 구분된다.

이에 본 연구에서는 원심성형 제작된 PHC 파일의 밴드플레이트와 콘크리트의 부착강도를 확인하고, 보 전단력에 저항해야 하는 부착강도의 증진방안을 검토하여 PHC 파일을 지하주차장 및 중·저층 규모 등에 적용하기 위한 기초연구로 진행되었다.

* (주)센구조연구소 연구개발부, 공학박사
** (주)센구조연구소 연구개발부
*** 교신저자, 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사

2. 실험 계획 및 방법

2.1 실험 계획

본 실험에 적용한 PHC 파일은 외경 600mm, 콘크리트 두께 90mm의 속빈 원통형으로 제작된 A종이다. 콘크리트 단면적은 $144 \times 10^3 (\text{mm}^2)$ 이고, 콘크리트 압축강도 78.5MPa(800kgf/cm²), 파일 내부의 보강용 강봉은 직경 9.2mm 12개로 구성되어 있다. 그림 1은 원형 PHC 파일의 단면 형상이다.

실험체는 PHC 파일 외경과 밴드플레이트 외경이 동일하도록 제작하여 PHC 파일 제작 시 설치하였다. PHC 파일의 길이는 700mm, 밴드플레이트 높이 500mm이다. 밴드플레이트 주변에는 수직 스티프너를 모살 용접하여 푸시 아웃(Push out) 실험이 가능토록 하였다. 그림 2는 실험체의 형상 및 치수이다.

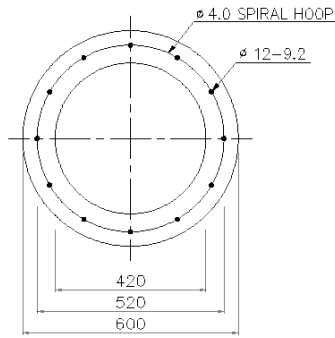


그림 1. PHC 파일 단면 형상

밴드플레이트 내부에는 13mm의 철선으로 전단키를 설치하였고, 전단키와 밴드플레이트의 접합은 모살용접하였다. PHC 기둥의 내부 전단키 용접량은 밴드플레이트 내부 직경의 1/3, 1/6이며, 모살 사이즈는 4mm이다. 내부 전단키 간격은 밴드플레이트에 2개의 전단키를 3등분한 등간격형과 양단부에서 50mm 이격시켜 설치한 단부형, 1개의 전단키를 중앙에 설치한 중앙형으로 구분된다. 밴드플레이트의 두께는 6, 9mm이다. 그림 3, 그림 4는 전단키의 위치와 용접상세이다.

그림 1~그림 4의 실험체 형상은 PHC 파일 외경과 동일한 직경의 밴드플레이트를 제작하여 밴드플레이트가 PHC 파일 내부에 설치되어 판 두께 만큼 지압이 작용한다. 그러므로 원심력으로 제작된 PHC 파일에 지압력이 작용하지 않도록 밴드플레이트를 PHC 파일 외측에 설치하여 부착강도를 확인하였다. 실험체 형상은 그림 5와 같이 직경 388.4mm, 높이 500mm, 판 두께 9mm이다. 실험체는 PHC 파일을 강관 상부로 30mm 돌출시켰고, 실험체 하부에 플레이트(12t)와 강관(9t)을 모살용접하였다.

가력은 9,800kN과 1,960kN의 만능시험기(UTM)를 사용하여 중심압축 가력하였다. 변위측정은 그림 2, 사진 1과 같이 실험체의 좌측과 우측에 변위계를 만능시험기의 베드와 가력지점 사이에 설치하여 측정하였고, 측정된 두 값을 평균하였다.

표 1은 실험 변수이다. 실험 변수는 밴드플레이트의 두께와 밴드플레이트 내부에 설치한 전단키의 수량 및 간격, 전단키의 용접방법 등이다.

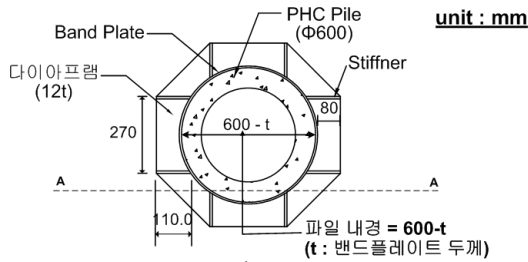


그림 2. 실험체 형상 및 치수

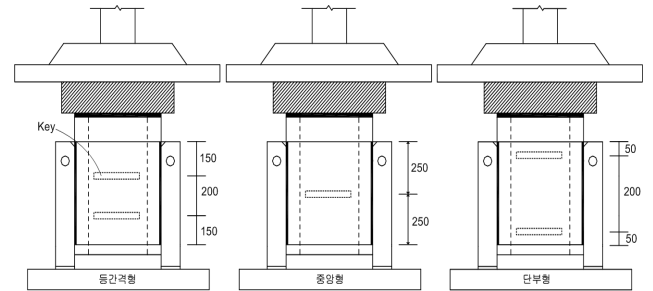


그림 3. 전단키의 위치

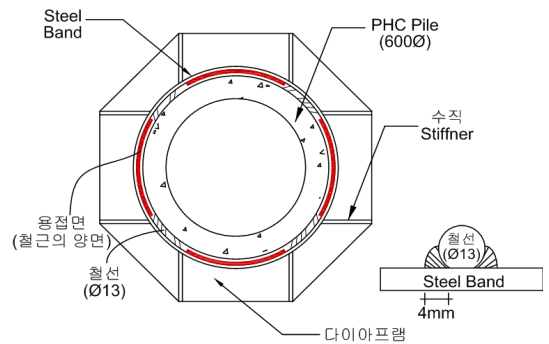
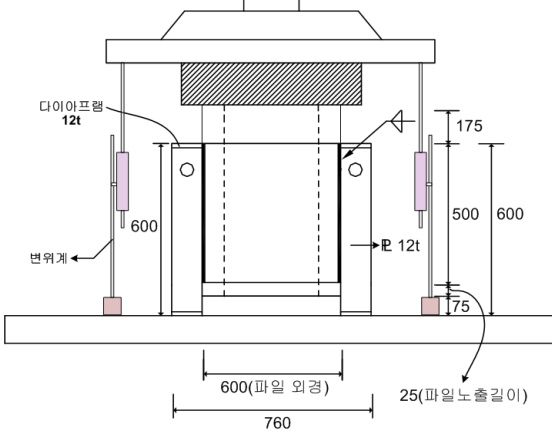


그림 4. 전단키의 용접상세

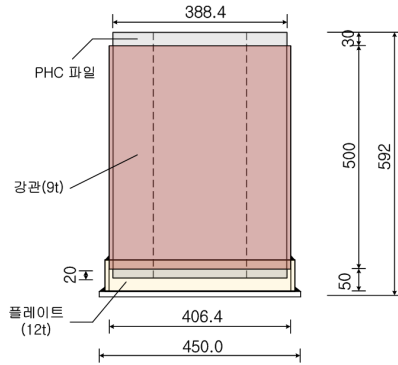


그림 5. PHC 파이프와 강관의 부착강도 실험체 형상

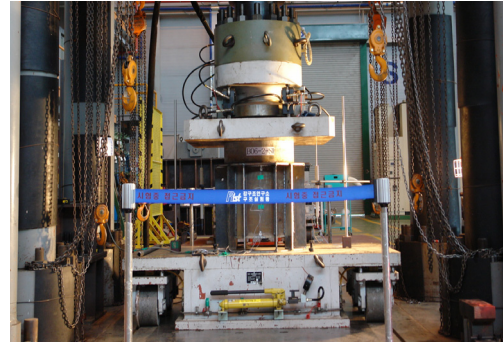


사진 1. 실험체 가력 전경

표 1. 실험체 일람표

실험체 명	밴드플레이트 두께	전단키 배치간격	전단키 개수	전단키 용접량
B06-0-N-1	6(mm)	-	-	-
B06-0-N-2		-	-	-
B06-1-C I		중앙형	1	밴드내부의 1/3
B09-2-S I -1	9(mm)	등간격형	2	밴드내부의 1/3
B09-2-S I -2				밴드내부의 1/3
B09-2-S II				밴드내부의 1/6
B09-2-E I -1		단부형	2	밴드내부의 1/3
B09-2-E I -2				밴드내부의 1/3
B09-2-E II				밴드내부의 1/6
B09-0-N-1	-	-	-	-
B09-0-N-2	-	-	-	-
B09-1-C I	중앙형	1	밴드내부의 1/3	-
B12-0-N-1	12(mm)	-	-	-
B12-0-N-2		-	-	-
B12-1-C I		중앙형	1	밴드내부의 1/3
B09-S-N-1	9(mm)	-	-	-
B09-S-N-2		-	-	-
B09-S-N-3		-	-	-

B06 - 0 - N - 1
 실험체 번호 ; 1, 2, 3
 내부 전단키의 용접간격 및 용접량
 용접간격 ; N-none, C-중앙형
 S-등간격형, E-단부형
 용접량 ; I-1/3 용접, II-1/6 용접
 전단키 수 ; 0, 1, 2
 S ; 강관 부착강도 기준 시험체
 밴드플레이트 두께 ; 6, 9, 12mm

2.2 소재시험

PHC 파이프의 압축강도 시험은 원심력으로 다져진 콘크리트의 압축강도 시험방법(KS F 2454)에 의해 시험체 제작과 동일한 조건으로 제작 후 양생하였다. 표 2는 콘크리트의 물성치와 시험결과이다. 시험은 PHC 파이프와 동일한 조건의 고온증기압 양생 후 시험하였으며, 시험결과 콘크리트의 압축강도는 84.9Mpa이다. PHC 파이프에 부착한 밴드플레이트는 SS400을 적용하였으며, 표 3은 밴드플레이트, 표 4는 PC 강봉의 검사증명서 값이다.

표 2. 콘크리트의 재료 물성치

슬럼프(mm)	물시멘트비(%)	압축 강도(MPa)
40	32.4	84.9

표 3. 밴드플레이트의 기계적성질

구분	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)
6mm	320	463	26
9mm	324	475	28
12mm	299	448	27

표 4. PC 강봉의 기계적성질

직경	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)	연신율(%)
9.25mm	1447	1489	9.58

3. 실험 결과

3.1 실험결과

PHC 기둥 실험체의 부착성능 평가를 위한 푸시아아웃(Push out) 실험결과는 표 6과 같고, 그림 6~그림 9는 각 변수별 하중 변위곡선이다. 표 6에는 실험값을 기준으로 최대부착응력과 최대부착응력 발생 시 콘크리트의 미끄럼변형량(slip deformation), 이론값 등을 정리하였다.

합성기둥의 경우 부착력은 C.W. Roeder 등에 의해 회귀분석을 기초로 산정하였으며, 최대평균부착응력(f_{br})은 식 1과 같다⁽⁷⁾.

$$f_{br} = 2.91 - 0.3(L/d) - 14.97\rho \quad (1)$$

L : 강제기둥의 물힘길이 d : 강제기둥의 축

ρ : 합성기둥의 철골비(A_s/A_t)

콘크리트충진 강관기둥의 경우 강재와 콘크리트의 부착성능은 식 2와 같다. 표 6의 실험결과는 식 2에 의해 평가하였고, 강관과 콘크리트의 허용부착응력도는 표 5와 같다(콘크리트충진 강관구조(2004), pp.25~26)^{(8)~(9)}.

실험결과 전단키의 유·무에 따라 최대부착응력은 식 2에서 구한 값의 최소 약 10~30배 이상 큰 차이를 보이고 있다. 이러한 양상은 발표자료에도 일부 확인된 것이며⁽⁵⁾, 내부에 철근으로 만든 전단키의 영향과 밴드플레이트에 의한 콘크리트의 지압응력 증대, 원심력을 활용한 제작방법에 의한 밴드플레이트의 부착강도 증대 등의 영향으로 허용부착응력도가 크게 상승하였다.

$$N_c \leq \phi \times l \times f_{sa} \quad (2)$$

ϕ : 밴드플레이트 내측의 원둘레(mm)

l : 밴드플레이트 높이(mm)

f_{sa} : 밴드플레이트와 콘크리트면의 허용부착응력도(N/mm²)

표 5. 강관과 콘크리트의 허용부착응력도(N/mm²)

단면 형상	장 기	단 기
원형 강관	0.15	0.22
각형 강관	0.10	0.15

표 6. 실험결과

실험체 명	이론값 (kN):식 2	실험 최대값 (kN)	최대 부착응력 (N/mm ²)	최대부착응력 시 콘크리트 미끄럼변형량 (mm)
B06-0-N-1	203.2	2,614.6	2.83	2.60
B06-0-N-2	203.2	2,422.6	2.62	2.11
B06-1-C I	203.2	4,180.7	4.53	2.87
B09-2-S I-1	201.1	5,359.6	5.86	3.81
B09-2-S I-2	201.1	5,521.3	6.04	3.46
B09-2-S II	201.1	4,536.4	4.96	2.87
B09-2-E I-1	201.1	5,611.5	6.14	5.00
B09-2-E I-2	201.1	5,913.3	6.47	4.32
B09-2-E II	201.1	4,461.9	4.88	3.35
B09-0-N-1	201.1	2,019.8	2.21	1.56
B09-0-N-2	201.1	1,990.4	2.18	1.64
B09-1-C I	201.1	4,299.3	4.70	2.64
B12-0-N-1	199.1	2,941.0	3.25	2.65
B12-0-N-2	199.1	2,554.9	2.82	2.00
B12-1-C I	199.1	4,400.2	4.86	3.02
B09-S-N-1	134.2	1,327.9	2.18	1.25
B09-S-N-2	134.2	1,356.3	2.22	0.90
B09-S-N-3	134.2	1,514.1	2.48	0.90

3.2 각 변수의 영향

3.2.1 밴드플레이트 두께의 영향

그림 6, 그림 7은 밴드플레이트의 두께에 의한 내부 전단키의 유·무를 구분하여 정리한 하중-변위 곡선이다.

전단키가 없는 실험체는 밴드플레이트의 두께가 6, 9, 12(mm)로 증가함에 따라 최대부착응력 또는 실험 최대값이 비례적으로 증가하지는 않았다. 반면 그림 5와 같이

내부 전단키가 중앙에 한 개 있는 경우 밴드플레이트의 두께에 따라 경미하나 증가하는 경향을 보인다.

밴드플레이트의 두께가 부착강도에 미치는 영향이 적은 것은 콘크리트 지압면적이 부착면적에 비해 상대적으로 적기 때문으로 판단된다.

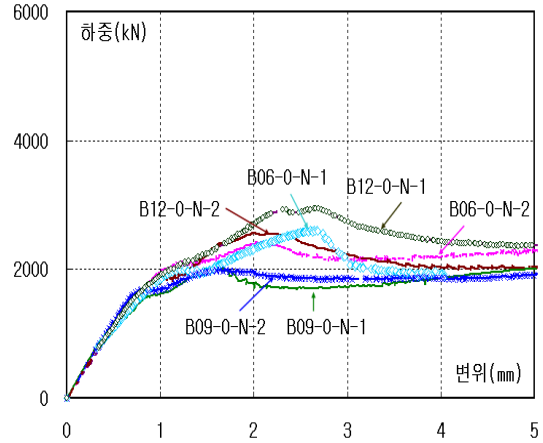


그림 6. 밴드플레이트 두께의 영향(전단키 무)

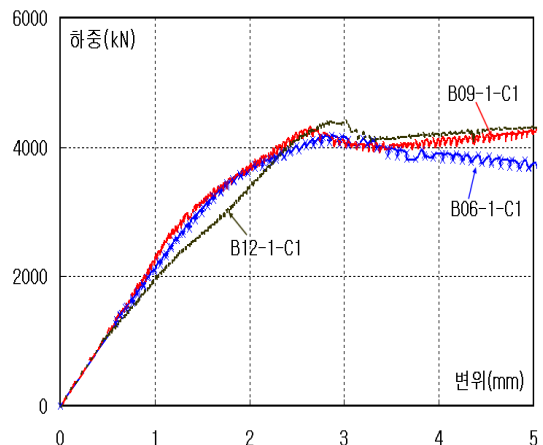


그림 7. 밴드플레이트 두께의 영향(전단키 유)

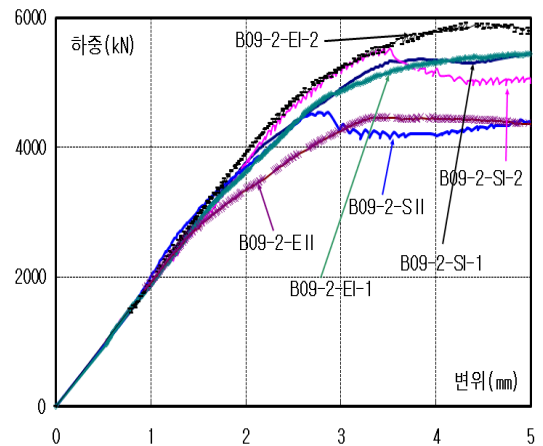


그림 8. 전단키 용접량의 영향

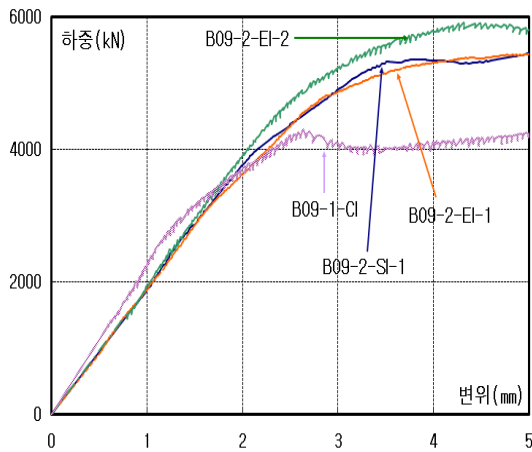


그림 9. 전단키 배치간격의 영향



사진 2. 실험체의 파괴 형상



사진 3. 실험종료 후 PHC 기둥의 밀림 양

3.2.2 전단키 용접량에 의한 영향

그림 8은 전단키의 용접량에 따른 하중-변위 관계이다. 전단키는 D13의 이형철근을 밴드플레이트 내부의 원주방향으로 양면 모살용접 하였다. 모살용접 길이는 시리즈 I의 경우 내부 직경의 1/3을 용접하였고, 시리즈II는 1/6을 모살용접 하였다. 모살용접 사이즈는 4mm이고, 용접에 의한 철선의 영향은 고려하지 않았다.

용접량이 2배인 시리즈 I 이 시리즈II에 비해 최대 실험값이 약 20%이상 증가하였다. 용접량이 부착강도에 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.2.3 전단키 설치 위치와 전단키 수의 영향

그림 9는 전단키의 위치에 따른 하중-변위 관계이다. 전단키 위치는 단부와 등간격, 중앙형으로 구분하여 설치하였다. 실험결과 등간격과 단부 배치를 비교 시 위치에 따라 약 5% 정도 차이를 보이고 있다. 그러므로 동일한 전단키를 내부에 설치할 경우 등간격 보다는 양 단부에 설치하는 것이 다소 효과적인 것으로 판단된다. 또한 전단키 수가 1개인 경우와 2개를 비교하면 전단키가 증가할수록 최대하중은 약 25%이상 증가하여 부착강도 증가에 전단키 수량이 가장 큰 영향을 미쳤다. 이러한 양상은 PHC 기둥의 하중전달과정이 밴드플레이트와 콘크리트의 분리 이후 전단키에 의해 저항하며, 부착성능에 크게 기여하기 때문으로 판단된다.

3.3 파괴 양상

실험체의 파괴양상은 최대부착내력에 도달하기 전 실험체 내부의 밴드플레이트와 콘크리트가 분리되는 소리가 발생되고, 밴드플레이트 상부와 콘크리트의 이음부위에서 콘크리트의 표피가 탈락되었다. 하중이 지속적으로 증가하면 상부 균열이 진전되어 콘크리트가 탈락되고, 최대내력에 도달한다.

최대내력에 도달 후 콘크리트와 밴드플레이트의 이음부에서 콘크리트 파쇄와 함께 밴드플레이트가 하중 작용방향으로 5~10mm 정도 탈락되었다. 또한 밴드플레이트의 미끄러짐 후 콘크리트 압괴가 추가되면서 내력이 재상승 한다. 이러한 내력의 추가 상승은 원형의 밴드플레이트와 PHC 파일이 갖는 시공 및 제작오차 등에 의한 영향으로 고려된다. 사진 2는 실험체의 파괴양상이고, 사진 3은 실험종료 후 PHC 기둥의 밀림 양이다.

4. 밴드플레이트의 부착응력 평가

4.1 실험결과 평가

실험결과에 영향을 미친 각 변수는 밴드플레이트의 부착과 밴드플레이트에 의한 콘크리트의 지압응력, 내부 철근의 전단키 효과 등으로 구분할 수 있다. 이 때 부착응력은 표 5의 단기하중의 허용응력을 기준으로 산정하므로 내력산정도 동일 기준으로 하였다.

콘크리트의 지압응력은 식 3와 같이 밴드플레이트 두께의 단면적에 재하면적을 곱하여 구할 수 있다. 또한 전단키로 사용된 철근은 식 4와 같이 철근의 내력과 용접내력, 철근 면적에 의한 지압응력으로 구분할 수 있으며, 이 값들이 철근의 영향으로 평가할 수 있다⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

표 7은 실험결과를 식 3~식 4로 정리하여 밴드플레이트의 두께와 철근의 영향으로 평가한 것이다.

$$f_c = 0.3f_{ck}A_c \times 1.5 \quad (3)$$

$$P_r \propto (P_c, P_w, P_y) \quad (4)$$

$$P_c = 0.3 f_{ck} A_r \times 1.5, \quad P_w = 2al_e F_y / \sqrt{3}$$

$$P_y = A_{st} f_y$$

P_r : 철근의 영향을 고려한 내력

P_c : 철근 지압응력(전단키 개수의 영향)

P_w : 철근 용접내력, P_y : 철근 내력

f_c : 밴드플레이트의 콘크리트 허용지압응력도

f_{ck} : 콘크리트 압축강도, t : 밴드플레이트 두께

A_c : 재하면적(= $\pi(D-t)t$, D : 파일 외경)

A_r : 철근 지압면적(= $\pi(D-2t)d$, d : 철근직경)

a : 용접 목두께, l_e : 유효 용접길이

F_y : 밴드플레이트 항복강도

A_{st} : 철근 단면적, f_y : 철근 항복강도

표 7. 실험결과 평가

실험체 명	실험결과 (kN)	밴드플레이트 지압 응력(f_c) (kN)	철근의 영향을 고려한 내력(P_r)(kN)		
			철근지압 응력	철근용접 내력	철근 내력
B06-0-N-1	2,614.6	395.5	0.0	0.0	0.0
B06-0-N-2	2,422.6	395.5	0.0	0.0	0.0
B06-1-C I	4,180.7	395.5	848.3	451.6	53.1
B09-2-S I -1	5,359.6	590.3	1,679.3	893.7	106.2
B09-2-S I -2	5,521.3	590.3	1,679.3	446.9	106.2
B09-2-S II	4,536.4	590.3	1,679.3	446.9	106.2
B09-2-E I -1	5,611.5	590.3	1,679.3	893.7	106.2
B09-2-E I -2	5,913.3	590.3	1,679.3	893.7	106.2
B09-2-E II	4,461.9	590.3	1,679.3	446.9	106.2
B09-0-N-1	2,019.8	590.3	0.0	0.0	0.0
B09-0-N-2	1,990.4	590.3	0.0	0.0	0.0
B09-1-C I	4,299.3	590.3	839.7	446.9	53.1
B12-0-N-1	2,941.0	783.1	0.0	0.0	0.0
B12-0-N-2	2,554.9	783.1	0.0	0.0	0.0
B12-1-C I	4,400.2	783.1	831.0	442.1	53.1
B09-S-N-1	1,327.9	-	-	-	-
B09-S-N-2	1,356.3	-	-	-	-
B09-S-N-3	1,514.1	-	-	-	-

4.2 실험변수의 영향

4.2.1 밴드플레이트 두께와 전단키 수

그림 10은 밴드플레이트 두께와 전단키의 영향을 비교한 것이다. 전단키는 철근을 이용하여 밴드플레이트 내부에 용접으로 설치하였으며, 없는 경우와 한 개, 두 개로 구분된다.

전단키가 없고, 밴드플레이트 두께가 6, 9, 12mm인 실험체(B06-0-N 시리즈, B09-0-N 시리즈, B12-0-N 시리즈)는 B09-0-N 시리즈가 보강 플레이트의 국부좌굴이 발생하여 충분한 내력이 발생하지 않은 것을 고려하면 전체적인 양상은 밴드플레이트 두께 증가에 따라 최대하

중이 일부 증가하였다. 최대하중은 6, 9, 12mm로 밴드플레이트의 두께가 증가할수록 단계별로 115kN이 상승하는 것으로 평가할 수 있다.

전단키가 한 개이고, 밴드플레이트 두께가 6, 9, 12mm인 실험체(B06-1-C1, B09-1-C1, B12-1-C1)는 밴드플레이트 두께가 6mm에서 9mm, 9mm에서 12mm로 증가할수록 최대하중은 118.6kN, 100.9kN이 각각 증가하여, 밴드플레이트의 두께와 밴드플레이트에 의한 콘크리트 지압응력의 비례관계를 확인할 수 있다. 전단키가 두 개인 경우 전단키의 위치와 용접량 등이 복합적인 변수로 작용하여 밴드플레이트와 전단키의 평가에서는 제외하였다.

밴드플레이트 두께가 6mm에서 9mm, 9mm에서 12mm로 증가하면, 전단키가 없거나 한 개인 경우 최대하중은 100~120kN이 상승하며, 이는 최대하중의 3~5%에 해당된다. 반면 식 3과 표 7의 밴드플레이트에 의한 콘크리트 지압응력(f_c)은 실험결과 보다 훨씬 큰 값을 나타내므로 밴드플레이트 두께가 부착강도에 미치는 영향은 경미한 것으로 판단할 수 있다.

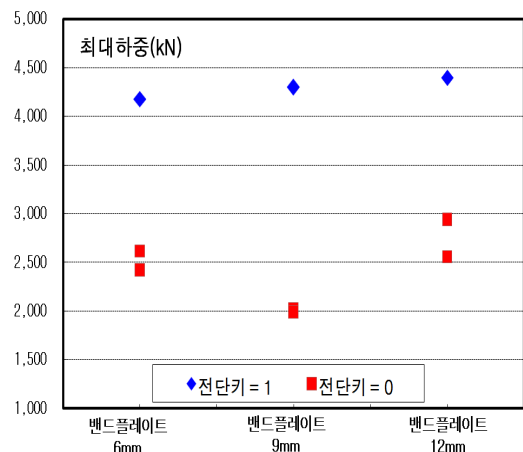


그림 10. 밴드플레이트 두께와 전단키 개수

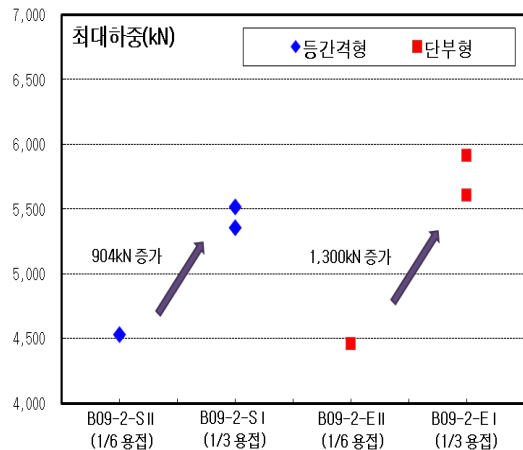


그림 11. 용접위치와 용접량

4.2.2 용접위치와 용접량

그림 11은 용접위치와 용접량의 영향을 나타낸 것이다. 용접위치는 그림 3과 같이 전단키의 설치위치를 등간격 형과 단부형으로 구분하였고, 용접량은 밴드플레이트 내경에 대해 1/6, 1/3 길이씩 용접하였다.

전단키 용접위치에 의한 영향은 등간격형의 경우 최대하중 평균은 5,139.1kN 이고, 단부형은 5,328.9kN 이다. 그러므로 전단키를 내부에 설치하는 경우 등간격 설치보다 단부 설치가 최대하중 증가에 효과적이거나, 그 차이는 4% 이내로 위치에 의한 영향은 크지 않다.

전단키 용접량에 의한 영향은 등간격형의 경우, 용접량이 1/3인 실험체(B09-2-S I)는 1/6인 실험체(B09-2-S II)에 비해 최대하중이 평균 904.1kN 증가하였다. 단부형의 경우, 용접량이 1/3인 실험체(B09-2-E I)는 1/6인 실험체(B09-2-E II)에 비해 최대하중이 평균 1,300.5kN 증가하였다. 식 4와 표 7에서 철근 용접에 의한 내력은 446.9, kN 893.7kN 이다. 그러므로 실험결과 용접량이 1/6에서 1/3로 두 배 증가할 때 최대하중은 평균 약 1,100kN 상승하였고, 이 값은 계산내력의 1.5~2.0배 정도가 된다. 이러한 실험결과와 계산내력의 차이는 콘크리트 구속으로 인한 내력상승과, 밴드플레이트의 항복강도 증가 등의 영향으로 판단된다.

4.2.3 전단키 개수

밴드플레이트의 두께에 따른 전단키 개수의 영향을 검토하였다.

그림 12는 밴드플레이트의 두께가 6, 12mm에 대해 전단키가 없는 경우(B06-0-N, B12-0-N)와 한 개인 실험체(B06-1-C1, B12-1-C1)를 비교한 것이다. 전단키가 없는 두 개 실험체의 평균치와 전단키가 한 개인 실험체의 차를 비교한 결과 1,650~1,660kN 최대하중이 증가하였으며, 증가량도 거의 동일하다.

그림 13은 밴드플레이트 두께가 9mm에 대해 전단키가 없는 경우(B09-0-N)와 한 개(B09-1-C I), 두 개를 비교하였다. 단 전단키가 있는 경우, 용접량의 영향을 제외하기 위해 용접량이 모두 밴드플레이트 내경의 1/3만큼 용접한 실험체(B09-1-C I, B09-2-S I, B09-2-E I)를 대상으로 하였다. 전단키가 없는 실험체의 경우(B09-0-N) 보강 플레이트의 국부좌굴이 발생하여, 전단키가 한 개인 경우와 비교 시 2,294kN의 차이를 보이며 최대하중이 크게 증가하였다. 그러나 4.2.1절과 그림 10을 참고로 밴드플레이트의 두께 증가에 따른 최대하중의 상승을 반영하면, 최대하중의 증가는 그림 13의 괄호부분과 같이 1,666kN이 증가하여 그림 12와 동일한 증가량이 된다. 반면 전단키가 한 개에서 두 개가 되는 경우, 최대하중은 1,300kN 상승하였다. 그러므로 전단키가 0개에서 한 개로 증가하는 경우가 한 개에서 두 개로 증가하는 경우에 비해 상대적으로 효율이 우수한 것으로 나타났다.

전단키 개수와 최대하중은 전단키가 없는 경우를 기준으로 한 개의 경우 1,650kN이 증가하고, 두 개가 되면 2,950kN이 상승하는 것으로 볼 수 있다. 이 값은 식 4와 표 7의 철근 지압응력(전단키 개수의 영향)에 의한 내력과 비교하면 전단키가 한 개인 경우 약 2.0배, 두 개인 경우 약 1.5배 정도 증가한 것으로 볼 수 있다.

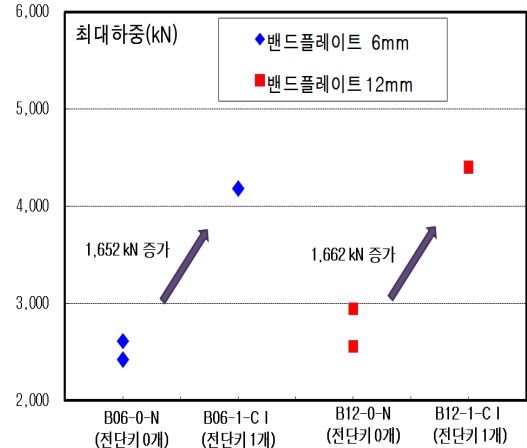


그림 12. 전단키 개수의 영향(밴드플레이트 6, 12mm)

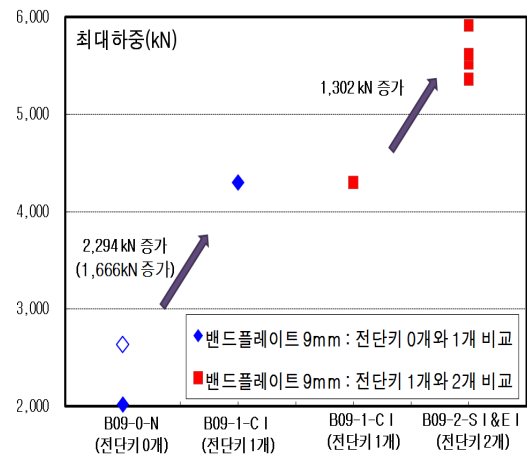


그림 13. 전단키 개수의 영향(밴드플레이트 9mm)

4.3 부착강도의 평가

실험변수 중 최대하중에 영향을 미치는 인자는 전단키의 개수가 가장 크며, 그 다음이 전단키의 용접량으로 확인되었다. 반면 밴드플레이트의 두께와 전단키의 설치위치 등은 최대하중 또는 내력에 큰 영향을 미치지 못하였다. 그러므로 밴드플레이트를 이용한 부착강도는 식 3, 식 4에서 철근 지압응력(P_c)과 철근 용접내력(P_w)을 반영하여 밴드플레이트에 의한 부착강도(B_c)를 평가할 수 있으며, 이를 밴드플레이트의 내부면적으로 나누면 밴드플레이트의 허용부착응력(f_{sa})이 된다. 이를 정리하면 식 5, 와 표 8이 된다.

$$B_c = A f_{sa} + \alpha P_c + \beta P_w \quad (5)$$

α : 전단키 개수 인자

전단키 1개 : $\alpha = 2.0$, 전단키 2개 : $\alpha = 1.5$

β : 전단키 용접량 인자

내부 직경의 1/6 : $\beta = 1.5$, 내부 직경의 1/3 : $\beta = 1.0$

B_c : 밴드플레이트 부착강도

A : 밴드플레이트 내부면적(= $\pi(D-2t)h$)

h : 밴드플레이트 높이

f_{sa} : 허용부착응력도(표 5), P_w : 철근 용접내력

P_c : 철근 지압응력(전단키 개수의 영향)

표 8. 부착강도 평가

실험체 명	실험결과 (kN)	전단키개수(kN) αP_c	철근용접 (kN) βP_w	B/P* 부착강도 (kN) B_c (Eq.5)	B/P부착 응력 (N/mm ²) B_c/A	허용부착 응력비 (B_c/A)/ f_{sa}
B06-0-N-1	2,614.6	-	-	2,614.6	2.83	12.87
B06-0-N-2	2,422.6	-	-	2,422.6	2.62	11.92
B06-1-C I	4,180.7	1,696.6	451.6	2,032.4	2.20	10.00
B09-2-S I -1	5,359.6	2,519.0	893.7	1,946.9	2.13	9.68
B09-2-S I -2	5,521.3	2,519.0	446.9	2,555.5	2.80	12.71
B09-2-S II	4,536.4	2,519.0	670.3	1,347.1	1.47	6.70
B09-2-E I -1	5,611.5	2,519.0	893.7	2,198.8	2.41	10.93
B09-2-E I -2	5,913.3	2,519.0	893.7	2,500.6	2.74	12.43
B09-2-E II	4,461.9	2,519.0	670.3	1,272.6	1.39	6.33
B09-0-N-1	2,019.8	-	-	2,019.8	2.21	10.04
B09-0-N-2	1,990.4	-	-	1,990.4	2.18	9.90
B09-1-C I	4,299.3	1,679.0	446.9	2,173.1	2.38	10.80
B12-0-N-1	2,941.0	-	-	2,941.0	3.25	14.78
B12-0-N-2	2,554.9	-	-	2,554.9	2.82	12.84
B12-1-C I	4,400.2	1,662.0	442.1	2,296.1	2.49	11.30
B09-S-N-1	1,327.9	-	-	-	2.18	9.91
B09-S-N-2	1,356.3	-	-	-	2.22	10.09
B09-S-N-3	1,514.1	-	-	-	2.48	11.27

※ B/P : 밴드플레이트의 약어 표기

전체 실험체에 대한 부착응력 평균치는 2.39(N/mm²)이고, 그림 5와 같이 PHC 파일에 강관을 부착한 밴드플레이트(B09-S-N 시리즈)실험체의 부착응력 평균치는 2.29이다. 그러므로 식 5를 적용한 밴드플레이트의 부착응력 평가는 적절한 것으로 판단된다.

표 8에서 밴드플레이트의 허용부착응력비는 표 5 원형 강관의 단기 허용부착응력의 평균 10.8배이며, 약 6배~15배의 범위가 된다. 일부 실험체(B09-0-N 시리즈)가 외부 수직 보강 플레이트에 국부 좌굴이 발생되어 내력이 저감된 것을 제외하면 실험변수에 따라 허용부착응력은 기존의 허용응력에 대해 10배 이상 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 허용부착응력의 상승은 PHC 파일의 제조 과정에서 발생한 고속 원심성형의 영향으로 판단된다.

5. 결론

PHC 파일을 기둥재로 사용하기 위해 실시한 밴드플레이트의 부착강도에 대한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 모든 실험체의 최대내력은 국내에서 실험을 통하여 정한 허용부착응력 보다 6배~15배 이상 증가한 값을 보였다. 이러한 양상은 고속 원심력을 활용한 제작방법의 특성상 밴드플레이트와 콘크리트의 원주방향 점착성이 증대하였기 때문으로 판단된다.

2) 밴드플레이트의 두께나 전단키 간격은 부착강도 또는 최대하중에 미치는 영향이 적으나, 전단키 개수와 전단키의 용접량은 부착강도 증가에 크게 영향을 미친다. 그러므로 밴드플레이트를 사용한 PHC 기둥의 밴드플레이트 부착내력의 평가는 식 5를 이용하여 평가하면 실험 결과와 잘 대응되는 것으로 나타났다.

3) 실험체의 파괴양상은 최대내력에 도달하기 전 실험체 내부의 밴드플레이트와 콘크리트가 분리되고 최대내력 도달 후 내력이 저감하나, 이후 콘크리트가 압괴 되면서 내력이 재상승하는 양상을 보인다. 이러한 내력의 추가 상승은 밴드플레이트와 PHC 파일이 갖는 시공 및 제작오차의 영향 등으로 판단된다.

4) PHC 파일에 밴드플레이트를 적용하여 철골 보를 접합하기 위해서는 밴드플레이트의 두께는 9mm, 내부 전단키는 1개 이상, 용접량은 내부 직경의 1/6 이상이 되도록 하는 것이 필요한 것으로 판단된다.

참고문헌

- (사)한국복합화건축기술협회(2006), “바닥판 슬래브 복합화 공법”
- (사)한국복합화건축기술협회(2007), “2007년도 정기총회 및 1차 기술세미나, 후분양제도에 대응하기 위한 공기단축 복합화 공법”
- (사)한국지반공학회(2006), “PHC말뚝의 설계 및 시공요령”
- 김상섭, 정희용, 김영호, 김규석(2001), “Top-Down 공법에 의한 매입형 철골주각부의 하중전달과 내력”, 대한건축학회구조계 논문집, 17권, 4호, pp.19~26
- 우해성, 김진호, 최성모(2002), “단순가력실험을 통한 콘크리트 충전 강관기둥의 부착응력에 관한 연구”, 한국강구조학회 논문집, 14권 4호, pp.481~487
- 박성무, 김성수, 김원호, 이형석(2002), “스티프너로 보강한 콘크리트 충전 원형 강관기둥의 부착응력에 관한 실험적 연구”, 공간구조학회지, 2권 2호, pp.51~58
- Charles W. Roeder, Robert Chmielowski, Colin B. Brown, “Shesr Connector Requirements for Embedded Steel Section”, Journal of Structural Engineering, February 1999
- 대한건축학회(2004), “콘크리트충전 강관구조”, 기문당
- 日本建築學會(1997), “コンクリート充填鋼管構造設計施工指針”
- 대한건축학회(2005), “건축구조설계기준”, 기문당
- 한국콘크리트학회(2007), “2007년도 개정 콘크리트설계기준 및 해설”, 기문당

(接受: 2008. 7. 21)