



## 보강 철근 정착 홀을 갖는 합성 전단연결재를 적용한 콘크리트 충전 PHC말뚝의 전단성능 평가

김정희<sup>1)\*</sup> · 박영식<sup>1)</sup> · 민창식<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>아이에스동서(주) 기술연구소    <sup>2)</sup>동국대학교 건설환경공학과

### Shear Experiments on Concrete Filled PHC Pile with Composite Shear Connectors with Rebar Holes

Jeong-Hoi Kim,<sup>1)\*</sup> Young-Shik Park,<sup>1)</sup> and Chang-Shik Min<sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Technical Research Institute, IS Dongseo, Seoul 06071, Rep. of Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil and Environmental Engineering, Dongguk University, Seoul 10326, Rep. of Korea

**ABSTRACT** The purpose of this study was to contribute to the field application cost effectively and reasonably by developing the functional piles that reinforces shear force. CFP pile (Concrete Filled Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile with Ring type Composite shear connectors) developed in this study increases the shear stress by placing composite shear connector and filling the concrete into hollow part of the pile. By placing the reinforcement (H13-8ea) and the reinforcement (H19-8ea) into hollow section inside of PHC piles, it also improves the shear strength due to increasing steel ratio. It reinforces shear strength effectively by dowel force that is generated by putting reinforcement (H13-8) into the holes of composite shear connectors for the composite behavior of filled concrete and PHC pile. The study was reviewed and compared the calculated result of the shear strength by limit state design method highway bridge design standards (2012) and experiment result of the shear strength by KS F 4306. We can design the shear strength reasonably as the safety ratio of 2.20, 2.15, 2.05 is shown comparing to design shear strength, according to design shear strength on each cross sections and the experiment results of the CFP pile.

**Keywords** : PHC pile, CFP pile, shear strength, composite shear connector, filled concrete

### 1. 서 론

지반이 불안정한 경우 상부구조물의 하중을 지지층에 전달하기 위해 사용되는 말뚝은 사용 재료에 따라 강관말뚝과 콘크리트말뚝으로 구분하며, 콘크리트말뚝은 프리캐스트 제품인 PHC말뚝(Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles)과 현장타설말뚝으로 분류되고 있다. 강관말뚝과 콘크리트말뚝은 근대 말뚝으로 분류되고 이러한 근대 말뚝의 국내 적용은 1980년대 토목사업이 활발해지면서 강관말뚝의 적용이 크게 증가하였으며, 1990년대에는 PHC말뚝이 국내에 도입되어 많은 현장 실험을 통해 구조안정성 및 경제성, 등의 장점이 알려지면서 현장 사용량이 빠른 속도로 증가해 왔다. 말뚝의 적용 분야는 주요 하중이 축 하중인 구조물 중 건축구조물에는 PHC말뚝이 주로 사용되며, 상대적으로 큰

축하중을 받아 프리캐스트로 제작이 불가능한 대구경 말뚝이 필요한 구조물에는 현장타설말뚝이 그리고 수평력이 크게 작용하는 교량의 교대나 해양, 플랜트 구조물에 강관말뚝이 주로 사용되고 있다. 최근 PHC말뚝의 내력을 보강한 기능성말뚝(functional pile) 개발이 활발히 이루어짐에 따라 강관말뚝 사용에 따른 경제성 결여와 현장타설말뚝의 양생 기간에 따른 공기 지연 등이 각 말뚝의 단점으로 부각되고 있다.

PHC말뚝은 조인트, 슈, 등의 말뚝 단부에 사용되는 철물류에 따라 단분, 상부, 중부, 하부 말뚝으로 구분된다. 기능성 말뚝의 연구는 PHC말뚝 종류 중 수평력(horizontal force)이 작용하는 상부 말뚝과 지지층에 접하여 상부하중을 직접 전달하는 하부 말뚝에 대해 활발히 진행되고 있다. 선단 확대를 통한 선단지지력을 확보하는 선단확장형말뚝(Extended-end Pile)<sup>1)</sup>과 지반 관입성 향상을 통한 말뚝 성능을 증대시키는 하부 강관 합성말뚝,<sup>2)</sup> 등이 기능성 하부 말뚝으로 현장 적용이 활발히 이루어지고 있으며, 상부 수평력에 대한 내력 증대를 위해 강관말뚝을 PHC말뚝 상부에 결합하여 사용하는

\*Corresponding author E-mail : special9373@isdongseo.co.kr

Received December 6, 2016, Revised April 10, 2017,

Accepted April 24, 2017

©2017 by Korea Concrete Institute

복합말뚝<sup>3)</sup>이 상부 기능성말뚝으로 구분되며, 이외에도 PHC 말뚝의 단점을 보완하는 기능성말뚝의 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 PHC말뚝에 합성 전단연결재, 말뚝 보강철근, 내부 보강철근, 속채움 콘크리트로 보강된 링형 합성 전단연결재를 적용한 콘크리트 충전 PHC말뚝(Concrete Filled Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile with Ring type Composite shear connectors, 이하 CFP말뚝)의 전단강도 실험을 통한 전단내력 평가와 전단강도의 예측결과를 비교·분석하여 적용된 설계법의 타당성을 평가하였다.

## 2. CFP말뚝의 구성 및 전단강도 산출

### 2.1 CFP말뚝의 구성

CFP말뚝은 PHC말뚝에 속채움 콘크리트를 타설하고 PHC 말뚝과 속채움 콘크리트의 합성거동을 위해 중공단면 방향으로 28 mm 돌출되는 합성 전단연결재가 배치된 Fig. 1(c) 단면과 말뚝 살두께에 말뚝 보강철근을 배치한 (b)의 B-B 단면, 그리고 PHC말뚝 중공단면에 내부 보강철근을 배치한 (a)의 A-A 단면으로 구성된다.

### 2.2 합성 전단연결재 설계

풍하중과 지진하중, 등의 하중은 다른 하중과는 달리 하중 방향에 대한 가변성을 갖고 있으며, 말뚝에 작용하는 이러한 하중은 수평력으로 작용한다. 이러한 가변 하중에 대한 말뚝 내력 보강을 위해서 말뚝 단면 형상과 같은 원형 혹은 등방성(isotropic)을 가질 수 있도록 보강해야 한다. PHC 말뚝과 속채움 콘크리트와의 합성 거동과 전단내력 향상을 위해 배치된 합성 전단연결재의 형상은 말뚝 단면과 같은 원형으로 Fig. 2와 같으며, 최대 수평전단 응력이 속채움 콘크리트 주면에 작용한다고 가정하고 아래와 같이 배치간격 및 두께를 검토하였다.<sup>4)</sup>

전단강도( $V_n$ )는 환산단면 1차 모멘트( $Q$ ), 2차 모멘트( $I_c$ ), 최대 전단응력( $\tau$ ), 말뚝의 두께( $t$ )로 산출되며 식 (1)과 같다.<sup>5)</sup>

$$V_n = \frac{2tI_c}{Q} \tau \quad (1)$$

여기서, 최대 전단응력( $\tau$ )은 식 (2)와 같이 유효 프리스트레스( $f_{ce}$ )와 콘크리트 휨인장강도( $f_{ct}$ )로 표현된다.

$$\tau = \frac{\sqrt{(f_{ce} + 2f_{ct})^2 - f_{ce}^2}}{2} \quad (2)$$

CFP말뚝에 대한 유효 프리스트레스( $f_{ce}$ )는 5.912 MPa으로 계산된다.<sup>5)</sup> 전단강도( $V_n$ )는 식 (1)을 이용하면 270.30 kN, 최대 수평전단응력( $\tau_{h, max}$ )은 1.32 MPa이며, 최대수평전단

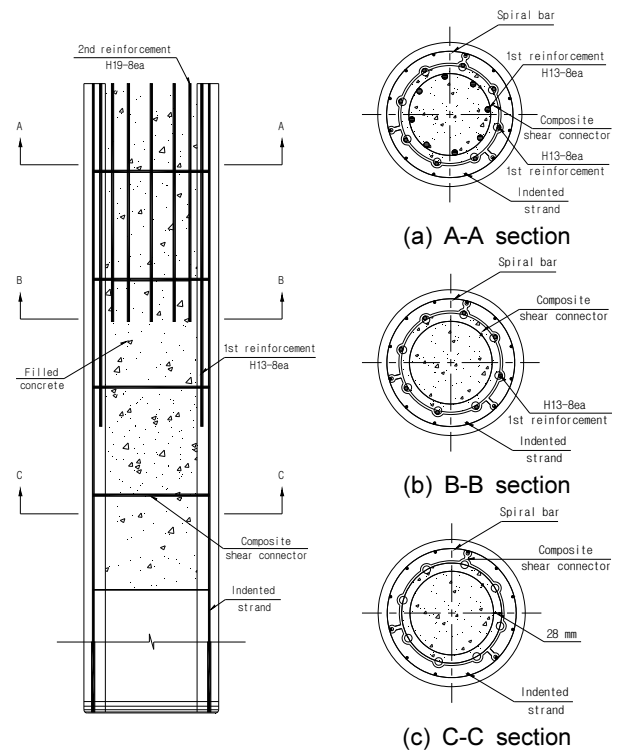


Fig. 1 CFP PILE concept

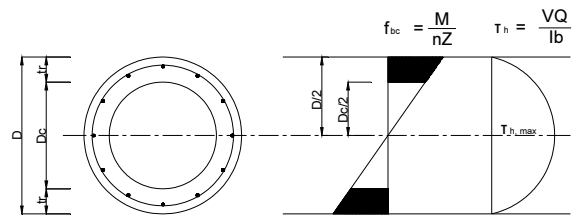


Fig. 2 Shear flow concept

응력이 속채움 콘크리트의 주면에 작용한다고 가정하여 식 (4)에 의해 1422.5 N/mm로 산출된다.

$$\tau_{h, max} = \frac{4 V_n}{3 A_{CFP}} \quad (3)$$

$$F_h = \pi d \tau_{h, max} \quad (4)$$

합성 전단연결재 설치 간격은 제작성 및 경제성을 고려하여 450 mm으로 결정하였고 식 (5), (6)에 의해 최소 두께( $t_{csc}$ )는 7.44 mm로 산출되었다.

$$V_f = s F_h \quad (5)$$

$$t_{csc} \geq \frac{V_f}{f_y \pi D c} \quad (6)$$

### 2.3 전단강도 산출

CFP말뚝의 전단강도는 전단보강 철근의 유무에 따라, 식

### 3. 실험

#### 3.1 시험체 제작

(7) 또는 식 (13)과 같이 산출할 수 있다. 전단철근이 배치된 부재의 설계전단강도는 극한한계상태에서 전단 철근이 항복한다는 전제에 바탕을 둔 변각트리스모델로 설계에 사용하는 경사각은 22°에서 45° 범위에서 설계자가 선택하여 식 (7), (8)에 의해 산출된다.<sup>6)</sup> 또한, 하중점과 지지점 부근에 배치된 복부 철근이 부재 파괴 시 항복하지 않는다는 실험 결과를 반영하여 하중점과 지지점 사이 거리의 75%에 걸쳐있는 복부철근만 유효하다고 간주하고 있어 전단철근 배치 시 최소 배치 간격을 산출할 수 있다.<sup>6)</sup>

$$V_d = \frac{\phi_s f_{vy} A_v z}{s} \cot\theta \quad (7)$$

$$V_{d,max} = \frac{\nu \phi_c f_{ck} b_w z}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (8)$$

여기서,  $\phi_s$ 는 철근과 강재의 재료계수이고,  $f_{vy}$ 는 전단보강철근의 기준항복강도,  $A_v$ 는 전단철근의 면적,  $s$ 는 전단철근의 간격,  $\theta$ 는 경사각, 그리고  $z$ 는 단면의 내부 모멘트 팔 길이이다.

프리스트레스를 포함하여 축방향 압축력이 작용하고 있는 부재의 최대설계전단강도는 축력이 전단강도에 미치는 영향을 반영하여 식 (9)와 같이 산출하며, CFP말뚝의 전단철근 배근 시 전단보강 단면의 전단강도 산출에 적용될 수 있다.

$$V_{d,max,com} = \alpha_{cw} V_{d,max} \quad (9)$$

여기서,  $V_{d,max}$ 는 식 (8)과 같이 구하고, 축력이 전단강도에 미치는 영향을 반영하는 계수( $\alpha_{cw}$ )는 식 (10)~(12)와 같이 구한다.

$$0 < f_n \leq 0.25 \phi_c f_{ck} : \alpha_{cw} = (1 + f_n / \phi_c f_{ck}) \quad (10)$$

$$0.25 \phi_c f_{ck} < f_n \leq 0.5 \phi_c f_{ck} : \alpha_{cw} = 1.25 \quad (11)$$

$$0.5 \phi_c f_{ck} < f_n \leq 1.0 \phi_c f_{ck} : \alpha_{cw} = 2.5(1 - f_n / \phi_c f_{ck}) \quad (12)$$

여기서,  $f_n$ 은 계수하중에 의해 단면에 유발된 평균 압축응력이다. 전단보강 철근이 없는 부재의 설계전단강도( $V_{d1}$ )는 식 (13)으로 산출되며, 이 값은 식 (14)의 최소설계전단강도( $V_{d1,min}$ )보다 작게 취할 필요가 없다.<sup>6)</sup>

$$V_{d1} = [0.85 \phi_c \kappa (\rho f_{ck})^{1/3} + 0.15 f_n] b_w d \quad (13)$$

$$V_{d1,min} = (0.4 \phi_c f_{ck} + 0.15 f_n) b_w d \quad (14)$$

여기서,  $\phi_c$ 는 콘크리트 재료계수,  $f_{ck}$ 는 콘크리트 기준압축강도,  $f_{ctk}$ 는 콘크리트 인장강도,  $f_n$ 은 종방향 직각응력으로  $N_u / A_c \leq 0.2 \phi_c f_{ck}$ 과 같이 산출되며,  $N_u$ 는 축력이고  $A_c$ 는 단면적( $\text{mm}^2$ )이다.  $\kappa$ 는 크기효과를 반영하는 계수로  $1 + \sqrt{(200/d)} \leq 2.0$ 이며, 철근비  $\rho$ 는  $A_s / (b_w d) \leq 0.02$ 으로  $A_s$ 는 주인장 철근량,  $b_w$ 는 단면의 복부폭이다.

CFP말뚝 시험체 제작은 ① 이형 강연선 망 제작 → ② 합성 전단연결재 망 내 결속 → ③ 말뚝 보강철근 배치 → ④ 철근 망 몰드 투입 → ⑤ 콘크리트 타설 → ⑥ 이형 강연선 긴장 → ⑦ 원심성형 → ⑧ 양생 → ⑨ 탈형 → ⑩ 내부 보강철근 배치 → ⑪ 속채움 콘크리트 타설의 단계를 거쳐 시험체가 제작된다. CFP말뚝 제작에 사용된 강재의 재료특성은 Table 1과 같고 시험체의 변수는 이형 강연선, 속채움 콘크리트, 합성 전단연결재, 말뚝 보강철근, 내부 보강철근으로 정하여 각 변수가 CFP말뚝 전단강도에 미치는 영향을 알아보기 위해 6종류의 시험체를 각각 2 EA씩 제작하였으며, Table 2와 같다.

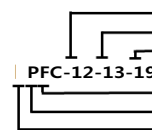
PHC말뚝은 Fig. 3(a)와 같이 D500-80 t A-type으로 제작하였고, PUN-12-N-N 시험체는 Fig. 3(b)와 같이 PHC말뚝에 Ø9.2-12 ea의 이형 강연선을 보강하여 제작하였다. Fig. 3(c), (d)는 속채움 콘크리트와 합성 전단연결재를 추가 배치한 시험체이며, (e), (f)는 말뚝 보강철근과 내부 보강철근을 배치한 PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시험체이다.

Table 1 Steel material property

	Tensile Strength (MPa)	Modulus of elasticity (MPa)	Diameter (mm)	thickness (mm)
Pile reinforcement	400	200,000	13	-
Hollow section Reinforcement	400		19	-
Composite shear connector	235		-	8
Indented strand	1,275		9.2	-

Table 2 Shear Specimens

Specimen	Filled concrete strength	Composite shear connector spacing	Reinforcement	
			D13	D19
PUN-9-N-N	-	-	-	-
PUN-12-N-N	-	-	-	-
PFN-12-N-N	24 MPa	-	-	-
PFC-12-N-N	24 MPa	450 mm	-	-
PFC-12-13-N	24 MPa	450 mm	8ea	-
PFC-12-13-19	24 MPa	450 mm	8ea	8ea



Intended strand diameter  
None or Pile rebar diameter  
None or filled section rebar diameter

N : None, C : Composite shear connector  
U : Unfilled, F : Filled concrete  
P : PHC pile

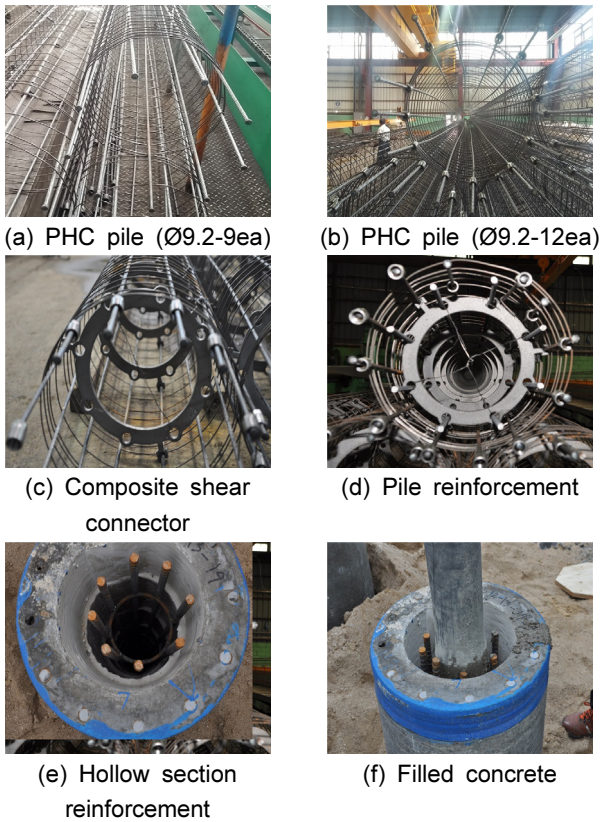


Fig. 3 CFP pile material configuration

### 3.2 실험 방법

말뚝 몸체의 전단 강도 실험은 Fig. 4와 같이 말뚝 길이의 2m를 지간으로 하여 지지하고 전단지간은 1D로 하였으며, 지간의 중앙에 연직 하중 P를 가하여 실험을 진행하였다. 말뚝 시험기의 용량은 1,500 kN이고 하중제어는 단조가력방식으로 하였으며, 시험체 처짐 측정을 위해 시험체 중앙부와 양지점과 하중 재하점 1/2지점에 각각 LVDT를 배치하였다.

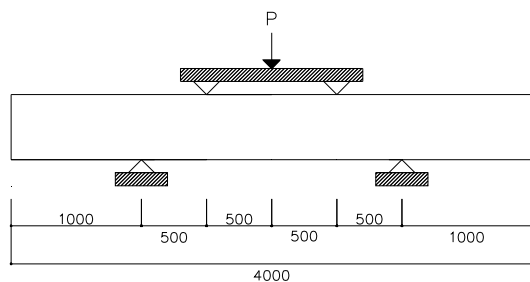


Fig. 4 Test specimen setup<sup>5)</sup> (unit: mm)

실험은 경사 균열 발생 하중을 측정하여 식 (15)에 의해 균열전단강도를 산정하고, 균열 발생 시 하중을 기록하면서 최고하중까지 측정하였으며, PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시리즈 시험체들은 시험기 용량의 한계로 약 1,000 kN에서 가력을 중단하였다.

$$Q_c = \frac{P_c}{2} \quad (15)$$

여기서,  $P_c$ 는 전단 지간 내에 경사 인장 균열이 발생했을 때의 하중을 말한다.

## 4. 실험 결과

### 4.1 균열 하중 및 양상

전단 지간의 유효깊이 비  $a/d$ 를 1.0으로 하여 CFP말뚝의 전단 실험을 실시한 결과, Fig. 5(a)-(l)에서와 같이 모든 시험체는 전단 지간에서 1~2개의 경사균열이 관찰되었으며, 6종류의 시험체 모두 초기 균열은 경간 중앙부의 휨 구간 내에서 관찰되었다. 또한 모든 시험체의 균열 패턴은 초기 균열 발생 후 하중 재하점 내에 추가 휨 균열이 확대되고 전단지간에서 경사균열이 발생하는 양상을 보였으며, 경사 균열 발생 후 휨 균열은 경사 균열 발생 전 보다 균열 진행 속도가 감소되는 양상을 보였다. 특히, 같은 시험체를 2개씩 시험한 결과 같은 시험체별 균열 양상은 유사하게 나타났다.

PUN-9-N-N 시험체는 초기균열이 시험체 지간중앙부에서 발생하여 하중이 증가함에 따라 휨 지간 내에 추가 균열이 관찰되고 580.8 kN, 563.5 kN에서 전단지간부에 경사균열이 발생하였다. 또한 경사균열이 하중재하 방향으로 점진적으로 진행되면서 중앙부 균열 폭의 확대와 함께 669.7 kN, 636.0 kN에서 최종 파괴되었다.

PUN-12-N-N 시험체는 초기 균열이 경간 중앙부에서 관찰되어 도심방향으로 확대되고 전단지간에서 경사균열이 하중 648.9 kN, 664.9 kN에서 발생하였으며, 경사균열 발생 후 휨 균열은 크게 진행되지 않고 689.7 kN, 670.4 kN의 하중에서 파괴되었다.

PFN-12-N-N은 말뚝 중공부에 콘크리트를 타설한 시험체로 초기균열이 재하 하중 511.5 kN, 530.7 kN에서 발생되었고, 경사균열은 770.7 kN, 853.2 kN에서 관찰되었으며, 916.8 kN, 875.2 kN에서 최종 파괴되어 콘크리트 속채움에 따른 최대하중 증가는 약 31.8%로 나타났다. 속채움 콘크리트 타설에 따른 자중의 증가로 변위가 11.1 mm로 나타나 Fig. 6(f)와 같이 시험체중 가장 큰 변형을 보였다.

PFC-12-N-N은 말뚝 중공부에 콘크리트를 타설하고 말뚝과 속채움 콘크리트의 합성거동을 위한 합성 전단연결재를 450 mm 간격으로 배치한 시험체로 경사 균열은 880.0 kN, 780.9 kN에서 발생하였고, 재하 하중 906.5 kN, 901.4 kN에서 최종 파괴되어 PFN-12-N-N 시험체에 비해 최고하중이

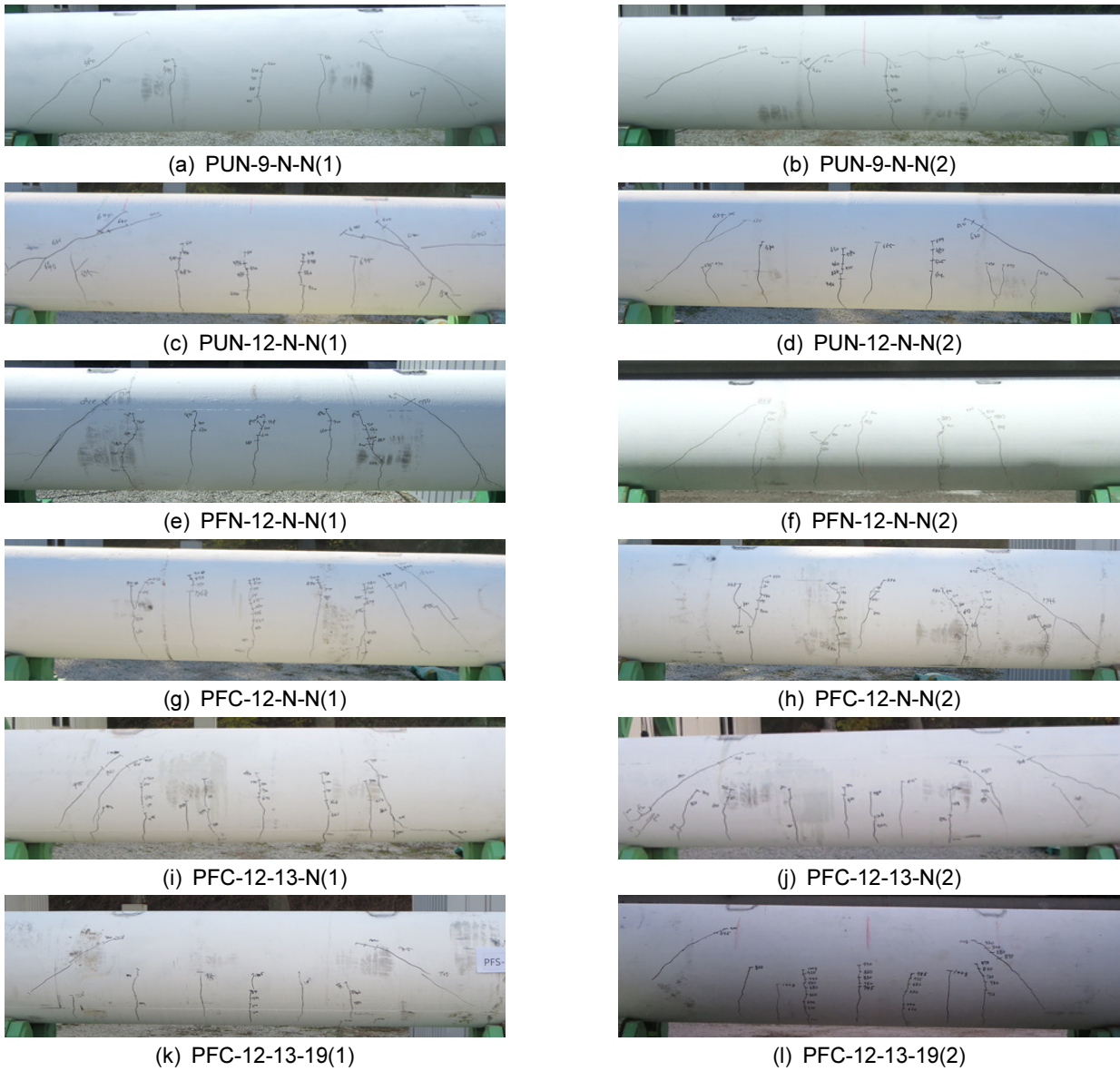


Fig. 5 Crack patterns of CFP pile according to the reinforced steps

약 0.9% 증가하는 것으로 나타났으며, 이는 하중점과 지지점 사이 거리가 75%내의 전단철근이 전단내력 향상에 기여한다는 기존 실험연구 결과와 달리 75%내의 합성전단연결재의 배치가 충분하지 못하기 때문에 본 시험체에서는 시험체의 전단내력 향상이 미비한 것으로 판단된다.<sup>6,7)</sup> 균열 발생 양상은 합성 전단연결재가 배치되지 않은 시험체와 달리 휨 균열이 시험체의 중립축 이상까지 상당히 진행된 후 경사 균열이 발생되어 합성 전단연결재의 배치에 따른 속채움 콘크리트와 PHC말뚝과의 합성 거동에 따른 것으로 생각된다.

PFC-12-13-N는 합성 전단연결재 내에 구성된 보강철근 홀에 말뚝 보강철근(D13-8ea)을 배치한 시험체로 975.2 kN, 826.2 kN에서 경사균열이 관찰되었고, PFC-12-N-N 시험체와 같이 휨 균열이 중립축을 향해 진행되다가 하중기의 용량 한계로 1,003.1 kN, 1,002.2 kN에서 실험을 중단하였다. 최종 파괴하중은 PFC-12-N-N 시험체 대비 약 10.9% 이상 향상되는 것으로 나타났으며, 이는 보강철근이 합성 전단연결재 보

강철근 홀에 배치하여 보강철근의 다월력(dowel force)이 철선으로 연결하는 일반 결속작업 보다 효과적으로 반영되었기 때문이라 생각된다.

PFC-12-13-19 시험체의 경사균열은 939.6 kN, 880.1 kN에서 발생되었고, PFC-12-13-N 시험체와 같이 시험기 용량의 한계로 각각 1,001.4 kN, 1,003.9 kN에서 실험을 중단하였다.

#### 4.2 하중-처짐 관계

Fig. 6은 시험체별 하중-처짐 관계로 같은 시험체인 (1), (2) 시험체의 초기균열, 최대하중 그리고 처짐이 유사하게 나타났다.

(a)는 PHC말뚝 이형 강연선의 철근비에 따른 하중-처짐 곡선으로 철근비가 약 33% 높은 PUN-12-N-N 시험체의 최고하중이 약 4.2% 높게 나타났다. (b)에서 보는바와 같이 말뚝 중공단면에 콘크리트를 타설함으로써 사하중 증가에 따

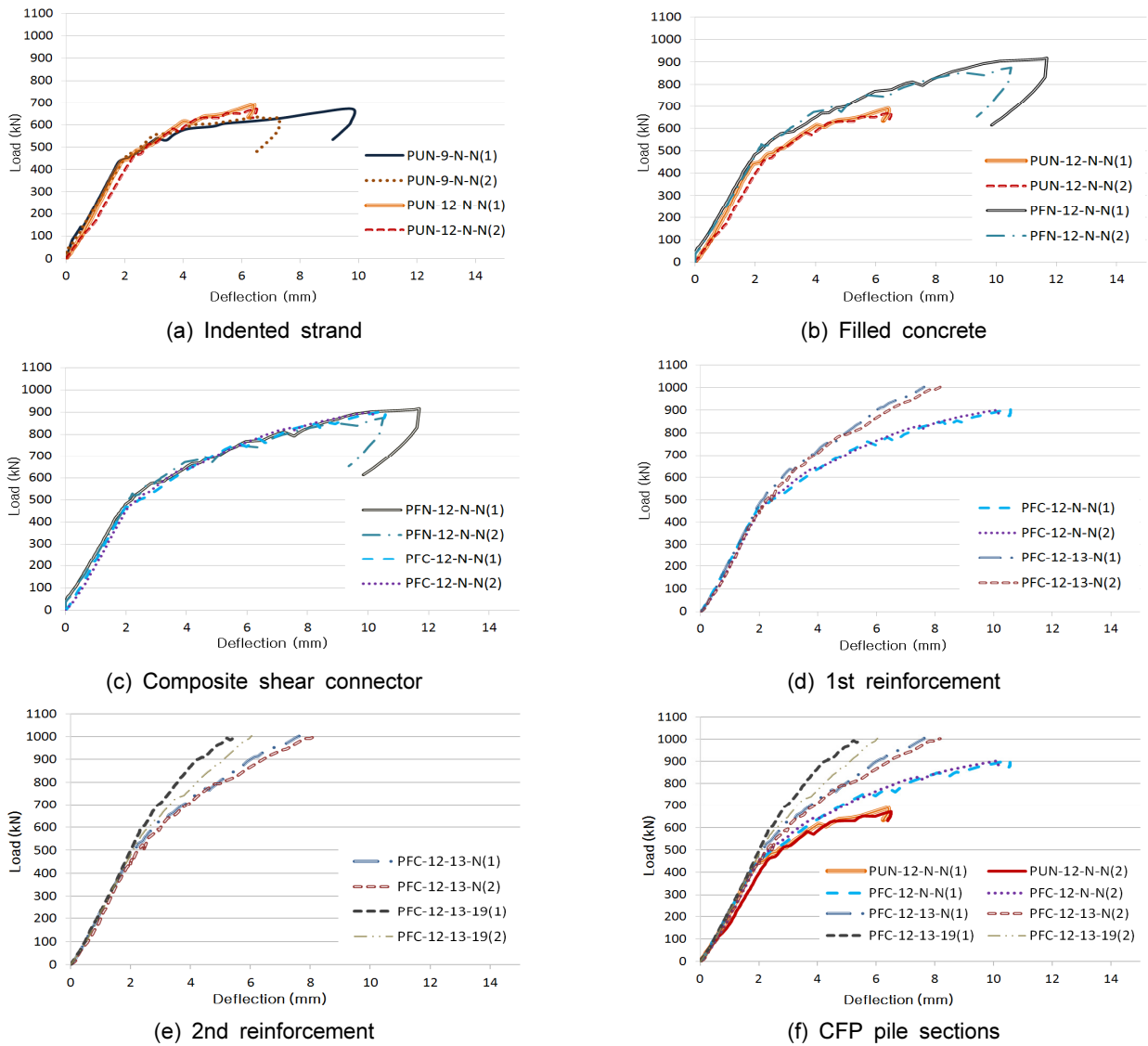


Fig. 6 Measured load-deflection relationship

른 1.72배의 처짐량 증가가 발생하였으나 최대하중이 약 31.8% 향상되는 것으로 나타나 증공단면의 콘크리트 타설이 전단강도 향상에 기여하는 것으로 나타났다. 그러나 (c)와 같이 합성 전단연결재의 배치로 속채움 콘크리트와 말뚝 본체의 합성효과의 최고하중 향상은 약 0.9%로 미비하게 나타났다으며, 이는 속채움 콘크리트의 실이-지름 비가 11.76 (L/D)으로 PHC말뚝에 의해 2축 구속된 속채움 콘크리트가 마치 3축으로 구속된 효과가 나타난 것으로 생각되며, 이로 인해 KS F 4306<sup>5)</sup>에서 제시하는 전단성능 평가방법으로 합성 전단연결재의 효과를 평가하기에는 다소 무리가 따르는 것으로 판단되며, 말뚝과 속채움 콘크리트의 압출시험(Push-out test)을 통해 그 성능을 평가해야 할 것으로 판단된다. (d)는 1차 보강철근인 말뚝 보강철근이 CFP말뚝의 전단강도에 미치는 효과를 나타낸 것으로 최고하중이 약 10.9% 이상 향상되는 것으로 나타났으며, 이는 앞서 서술한 합성 전단연결재와 보강 철근의 결속방법에 따른 다월효과(dowel effect)에서 기인된 것으로 생각된다. (e)는 2차 보강철근인 내부 보강철근의 전단강도에 미치는 영향을 나타낸 것으로 (d)와 같

이 최고하중 측정이 불가하여 정확한 내력 향상에 대한 평가가 어려우나 말뚝의 강성이 향상되는 것으로 나타났다. (f)는 CFP말뚝의 각 단면별 하중-처짐 관계로 각 단면이 갖는 균열전단강도와 보강 단면별 전단내력이 향상되는 양상을 볼 수 있으며, 이를 통해 말뚝 깊이에 따른 작용 전단력에 대응하는 단면을 설정·적용시킴으로서 말뚝의 최적 설계 및 시공이 가능할 것으로 생각된다.

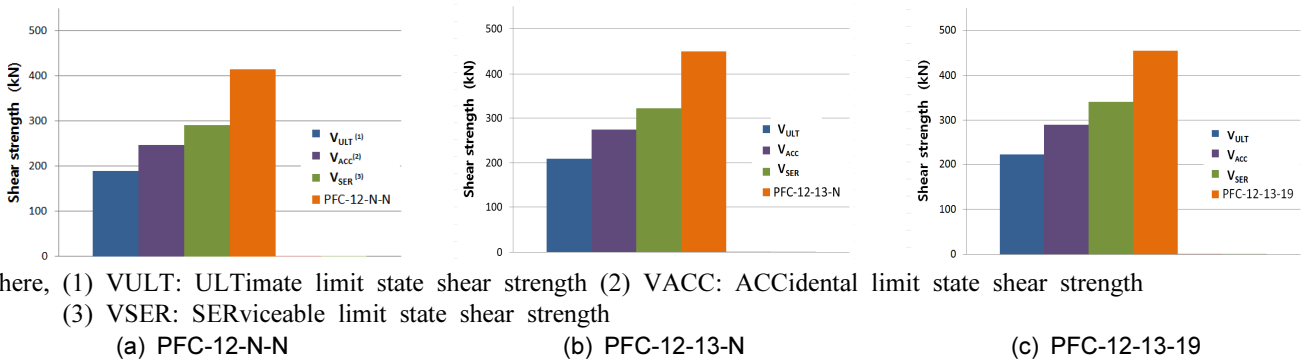
### 4.3 전단 실험결과와 설계값 비교

한계상태설계법에서의 전단보강철근이 없는 부재의 전단력 산정은 식 (13)과 같이 산출되고 여기서, 반영된 중방향 철근비가 증가할수록 전단강도는 증가하나 철근비 증가에 따른 전단강도의 증가율은 감소하여 철근비가 약 0.02일 때 최대 증가 효과가 나타나 이를 반영하여 전단철근이 배치되지 않는 시험체의 전단강도 산출도 중방향 철근비에 따라 Table 3과 같이 나타냈다.<sup>6)</sup>

PUN-9-N-N, PUN-12-N-N 시험체는 사용한계상태에서 최

**Table 3** Comparison between measured and predicted shear strength

Specimen	Initial crack load (kN)	Diagonal crack load (kN)		Shear strength (kN)				Experiment / design			Maximum load (kN)	
		Test	Average	$V_{EXP}$	$V_{ULT}$	$V_{ACC}$	$V_{SER}$	①	①	①	Test	Average
				①	②	③	④	②	③	④		
PUN-9-N-N(1)	460.0	580.8	572.2	290.4	65.0	84.9	99.9	4.47	3.42	2.91	669.7	652.9
PUN-9-N-N(2)	470.3	563.5		281.7				4.33	3.32	2.82		
PUN-12-N-N(1)	440.2	648.9	324.5	4.99				3.82	3.25	689.7	680.1	
PUN-12-N-N(2)	455.3	664.9	332.5	5.12	3.92	3.33	670.4					
PFN-12-N-N(1)	511.5	770.7	812.0	385.4	188.9	247.0	290.6	2.04	1.56	1.33	916.8	896.0
PFN-12-N-N(2)	530.7	853.2		426.6				2.26	1.73	1.47		
PFC-12-N-N(1)	467.9	880.0	830.5	440.0				2.33	1.78	1.51	906.5	904.0
PFC-12-N-N(2)	515.0	780.9		390.4	2.07	1.58	1.34	901.4				
PFC-12-13-N(1)	504.9	975.2	900.7	487.6	209.4	273.8	322.1	2.33	1.78	1.51	1003.1	More than 1002.7
PFC-12-13-N(2)	509.9	826.2		413.1				1.97	1.51	1.28	1002.2	
PFC-12-13-19(1)	608.2	939.6	909.9	469.8	221.6	289.7	340.9	2.12	1.62	1.38	1001.4	More than 1002.7
PFC-12-13-19(2)	605.7	880.1		440.1				1.99	1.52	1.29	1003.9	



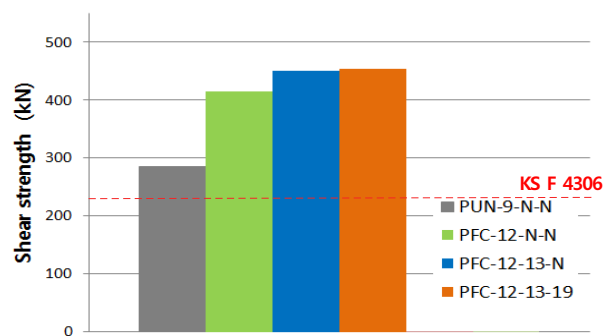
**Fig. 7** Comparison between measured and predicted shear strength

소설계전단강도( $V_{ot,min}$ )가 99.9 kN으로 산출되었으며, 실험 결과는 설계강도의 282%~333%에 해당되어 최소 2.8배 이상의 안전율을 확보한 것으로 나타났다.

PFN-12-N-N와 PFC-12-N-N 시험체의 설계전단강도는 290.6 kN으로 실험값이 설계값에 비해 133%~151% 높게 나타났고, PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시험체의 실험결과 설계값 대비 각각 128%~151%, 129%~138%에 해당되는 값으로 측정되었다.

Table 3과 같이 실험결과 시험체별 균열 전단강도는 극한 한계상태의 설계전단강도( $V_{ULT}$ )에 비해 1.97~5.12의 안전율을 갖는 것으로 나타났다. 또한, CFP말뚝의 각 단면별 균열 전단강도와 설계전단강도는 Fig. 7과 같이 각 단면이 갖는 안전율은 1.97~2.33으로 나타나 충분한 전단 안전성을 확보하고 있는 것으로 나타났으며, 제시된 설계법에 따른 CFP 말뚝의 전단강도 산출은 타당할 것으로 생각된다.

Fig. 8은 CFP말뚝과 PHC말뚝의 균열 전단강도 실험결과로 기성 PHC말뚝의 전단강도는 KS F 4306에 규정한 228.6 kN 보다 125.1% 높은 286.1 kN으로 관찰되었으며, CFP말뚝



**Fig. 8** Experiments result of PHC pile and CFP pile

의 C-C 단면은 181.6%, B-B 단면은 197.0%, A-A 단면은 199.0% 높은 것으로 나타났으며, PHC말뚝 대비 CFP말뚝의 균열 전단강도는 각각 145.1%, 157.4%, 159.0% 높은 것으로 나타나 CFP말뚝의 전단강도는 전단보강이 없어도 PHC말뚝 대비 45.1%~59.0%의 전단강도가 증진되는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 PHC말뚝과 CFP말뚝이 갖는 보강 단계별 전단 성능 평가를 수행하고, 한계상태설계법에서 제시하고 있는 전단강도 산출방법 적용의 타당성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 같은 종류의 시험체 하중 및 균열 발생 양상은 시험체 별로 유사하게 나타났으며, 모든 시험체의 초기균열 발생은 지간 중앙부에 나타나 중립축 부근까지 확대되면서 전단지간 내 경사균열이 발생하였다.
- 2) 실험기의 하중가력 용량 초과로 PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시험체의 최종 파괴양상은 확인이 불가하였으며, PUN-9-N-N, PUN-12-N-N, PFN-12-N-N, PFC-12-N-N 시험체는 경사균열 후 최종 휨 파괴가 관찰되었다.
- 3) 각 보강 말뚝 단면이 갖는 최대 하중은 PUN-9-N-N, PUN-12-N-N, PFN-12-N-N, PFC-12-N-N 시험체는 각각 평균 최대하중 652.9 kN, 680.1 kN, 896.0 kN, 904.0 kN으로 나타나 각 시험체별 4.2%, 31.8%, 0.9%의 평균 최대하중 증가를 나타내었고, PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시험체는 실험기의 하중가력 가능값인 약 1,000 kN에서 실험을 중단하여 최대하중을 확인할 수 없었다.
- 4) 각 시험체별 균열 전단강도는 PHC말뚝 대비 평균 114.8%, 141.9%, 145.1%, 157.4%, 159.0%으로 속채움 콘크리트가 균열 전단강도 증진(27.1%)에 가장 크게 기여하였다.
- 5) 합성 전단연결재가 배치된 PFC-12-N-N 시험체의 균열 전단강도는 PFN-12-N-N 시험체에 비해 약 3.2%증가하는 것으로 나타나 직접적인 균열 전단강도 증진에 미치는 영향은 미비하게 나타났으나, PFC-12-13-N, PFC-12-13-19 시험체의 균열 전단강도 증진이 1.6%인 것에 비해 PFC-12-N-N, PFC-12-13-N 시험체의 균열 전단강도 증진은 12.3%로 크게 나타나 보강 철근 홀을 갖는 합성 전단연결재에 구속된 보강철근의 다월효과에 따른 것으로 생각된다.
- 6) 시험체의 보강 단계별 균열 전단강도는 단계별로 증가하는 경향을 보였으며, 실험결과와 한계상태설계법을 기반으로 한 CFP말뚝의 단면별 설계전단강도와 비교

한 결과 각 시험체가 설계전단강도 대비 평균 2.20, 2.15, 2.05의 안전율을 확보하는 것으로 나타나 효과적인 전단강도 예측이 가능할 것으로 판단된다.

- 7) 전단보강이 없는 CFP말뚝의 균열 전단강도는 KS 기준 대비 각 단면별 181.6%~199.0% 높게 관찰되었으며, PHC말뚝 대비 단면별 45.1%~59.0%의 균열 전단강도 증진 효과가 있는 것으로 나타났다.
- 8) CFP말뚝의 추가적인 전단보강으로 전단철근(D13@150) 배근에 따른 설계전단강도 예측값은 PFC-12-13-19 시험체 설계값인 221.6 kN에 비해 215% 높은 476.6 kN으로 나타나 추가 전단강도 증진 방법으로 적용이 가능할 것으로 생각된다.

## Reference

1. Lee, J. S. and Song, K. Y., "Material Properties and Bearing Capacities of Extended PHC Pile with Enlarged Pile Thickness", *Conference of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 30, No. 1, 2010, pp. 207-208
2. Paik, K. H. and Yang, H. J., "Development of Steel Pipe Attached PHC Piles for Increasing Base Load Capacity of Bored Pre-cast Piles", *Journal of the Korean Geotechnical Society Institute*, Vol. 29, No. 8, 2013, pp. 53-63.
3. Sin, Y. S., Kim, M. M., Ko, J. Y., Jeong, S. S., "Proposed design chart of mechanical joints on steel-PHC composite piles", *Materials and Structures*, Vol. 47, No. 7, 2014, pp. 1221-1238.
4. Kookmin University, *Development Study of High Durable New Material Marin Piles*, Ministry of Maritime Affairs and Fisheries, Seoul, Korea, 2002.
5. KS F 4306, *Pretensioned Spun High Strength Concrete Piles*, Korean Agency for Technology and Standards, Seoul, Korea, 2004, pp. 1-55.
6. Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs, *Highway Bridge Design Specifications*, Gunsulbook, Seoul, Korea, 2012, pp. 5-49 ~ 5-52.
7. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code and Commentary*, Kimoondang, Seoul, Korea, 2012, pp 160-175.

**요 약** 본 연구는 PHC말뚝의 단점인 전단력을 보강한 기능성말뚝을 개발하여 보다 경제적이고 합리적인 말뚝의 현장 적용에 기여하고자 하였다. 본 연구를 통해 개발된 CFP말뚝은 링형 합성 전단연결재를 배치하고 PHC말뚝 중공부에 콘크리트를 속채움 함으로써 말뚝의 전단성능을 증대시키고, PHC말뚝 내 보강철근(H13-8ea)과 말뚝 중공부의 보강철근(H19-8ea)을 배치하여 횡보강 철근비 증대에 따른 전단강도를 향상시켰다. 또한, 속채움 콘크리트와 PHC말뚝의 합성거동을 위해 말뚝 보강철근의 정착 홀이 형성된 합성 전단연결재를 배치하여 보강철근의 다월력을 말뚝의 전단강도 증진에 효과적으로 반영시켰다. CFP말뚝의 전단설계와 성능을 검증하고자 도로교설계기준의 한계상태설계법(2012)을 적용한 전단강도를 산출하였고, 말뚝 시험규정인 KS F 4306에서 제시한 실험방법을 통해 결과값을 비교 검토하였다. CFP말뚝의 단면별 설계전단강도와 실험결과 각 시험체는 설계전단강도 대비 평균 2.20, 2.15, 2.05의 안전율을 확보하는 것으로 나타나 효과적인 전단강도 예측이 가능할 것으로 생각된다.

**핵심용어** : PHC말뚝, CFP말뚝, 전단강도, 합성 전단연결재, 속채움 콘크리트