

# 볼트 수직이음 PHC말뚝과 용접이음 PHC말뚝의 이음부 거동 비교

## Comparison of Splices between Bolts and Welding Spliced PHC Piles

김 명 학<sup>1</sup> Kim, Myunghak

최 용 규<sup>2</sup> Choi, Yongkyu

### Abstract

Behaviors of splices between bolts and welding spliced PHC piles using the tensile strength test were analyzed. The bolts spliced PHC piles, which were tightened over 200 N·m tightening torque, showed straight V shaped line at splices at the lowest 20 N load. Both sides of PHC piles stayed straight, so the full section of bolts spliced piles did not show the unifying behavior, which was the most important performance requirement as pile. Other bolts spliced PHC piles, tightened with 20 N·m loosening torque, also showed the same straight V shaped line at splices for each step of loading. The full section of bolts spliced piles did not return to the initial position after each step of unloading and did not show the elastic material behavior. The splices quality of bolts spliced piles is much lower than that of welding spliced piles with respect to displacement of splices during each step of loadings, residual displacements during each step of unloadings, and failure loads. Results showed that bolts spliced PHC piles, tightened with both over 200 N·m and as low as 20 N·m torque, fell short of performance requirements of spliced PHC pile.

### 요 지

볼트 수직이음 PHC말뚝 및 용접이음 PHC말뚝에 대한 휨강도시험을 실시하여 각 이음 PHC말뚝의 성능을 비교 분석하였다. 200N·m이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝에서는 가장 낮은 하중단계인 20kN에서도 볼트 수직이음구에서 좌우로 꺾인 변형 양상(직선 v형 라인)이 나타났으며 PHC말뚝 본체는 완전한 직선 형태를 유지하고 있었으므로 볼트 수직이음 PHC말뚝은 말뚝의 가장 중요한 성능인 일체화 거동을 하지 않았다. 체결토크가 풀린 즉, 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝은 각 하중 단계에서 이음부위에 대하여 양쪽으로 대칭된 직선 V형 상태의 변위 양상을 나타내고 있었다. 각 하중 단계에서 하중 제거 시 이음말뚝은 하중 재하 전의 상태로 돌아가지 않았으므로 탄성 재료 거동을 나타내지도 않았다. 재하단계에 따른 이음부 변위 및 재하 하중 제거 후의 잔류 변위, 이음 PHC말뚝의 파괴하중 및 3가지 기본 성능 등을 비교한 결과 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음 품질은 용접이음 PHC말뚝의 이음 품질에 크게 미달하였다. 따라서 200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝이나 체결토크가 풀린 볼트 수직이음 PHC말뚝은 이음말뚝의 기본 성능에 크게 미달하는 것으로 나타났다.

**Keywords :** Bolts spliced PHC piles, welding spliced PHC piles, straight V shape line, unifying behavior, elastic material behavior, splices quality

1 정회원, 인제대학교 토목도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Urban Engrg., Inje Univ.)

2 정회원, 경성대학교 공과대학 건설환경도시공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental and urban Engrg., KyungSung Univ., Tel: +82-51-663-4753, Fax: +82-51-624-0729, ykchoi@ks.ac.kr, corresponding author)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2019년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

현대 사회로 들어오면서 급격한 도시화로 인한 각종 건축 구조물, 도로 교량 시설물 등의 건설이 이루어지고 있다. 구조물 역시 과거에 비해 대규모화와 중량화로 인해 이미 개발된 도심지를 벗어나 해안 및 연약지반에서 공사도 활발해졌으며 더불어 구조물의 안전에 대한 인식이 이전보다 훨씬 커졌다. 연약지반의 경우 구조물의 기초로 말뚝기초가 많이 이용되고 있다.

말뚝기초는 국내에서 가장 많이 사용하는 기초형식 중 하나이며 구조물의 하중을 상대적으로 깊은 양호한 지지층까지 전달하거나 마찰 저항력을 이용하여 구조물을 안전하게 지지하기 위해 사용된다. 연약지반이나 해안지대의 경우 지반강도가 작고 지지층의 심도가 매우 깊어 말뚝의 길이를 길게 하여야 한다. 하지만 국내에서는 생산성과 운반성을 고려하여 현재 생산되는 말뚝은 1본의 길이를 최대 15m로 제한하고 있다. 따라서 말뚝의 길이가 15m 이상 요구되는 현장에서는 2본 이상의 말뚝을 이음하여 시공하여야 한다.

국내에서는 표준이음방식으로 용접이음 방식을 규정하고 있으나(KSA, 2002; KSA, 2003; KCSC, 2016a; KCSC, 2016b) 볼트 수직이음방식도 현장에서는 적용되고 있다. 용접이음방식은 국내에서 일반적으로 사용하는 공법으로 직경이 동일한 상부말뚝의 선단과 하부말뚝의 두부를 용접을 통해 길이를 연장하는 공법이다. 볼트 수직이음방식은 상부말뚝의 선단과 하부말뚝의 두부 사이에 볼트 수직이음구를 삽입하여 이음볼트로 수직방향으로 체결하는 방식이다. 여기서 볼트-너트 체결 기본 개념 미비, 구조적인 검증 미비, 시공 시 안전성 검증

미비, 작업 시간 및 비용 등으로 인한 안전성에 심각한 문제가 있다는 의견들이 제기되고 있다.

새로 개발한 볼트 이음방식으로 시공된 말뚝의 이음부에 대한 거동 특성을 파악하기 위해 축인장시험(휨강도시험)을 실시하였고(Paik et al., 2005), PHC말뚝의 중앙에 암나사 형식의 볼트를 위치시킨 이음말뚝의 휨 시험을 실시하여 이음부의 성능을 확인하기도 하였다(Kim et al., 2006).

이 연구에서는 볼트 수직이음 PHC말뚝에 대한 휨강도시험을 실시하여 이음 PHC말뚝의 성능을 분석하였다. 아울러 표준이음방식인 용접이음 PHC말뚝에 대한 시험도 실시하여 결과를 비교하였다.

## 2. PHC말뚝의 이음 표준 시방 및 이음 PHC말뚝의 기본 성능

### 2.1 이음 표준 시방 분석

말뚝의 지중 근입길이가 15m 이상으로 길어지면 PHC말뚝의 이음은 필수적으로 필요하게 된다. PHC말뚝의 이음관련 표준 규정을 Table 1에 요약하였다. PHC말뚝의 이음은 아크용접이음으로 실시하고 수동 또는 반자동용접을 실시하도록 규정하였다.

KS F 4306(KSA, 2003)에서는 PHC말뚝의 생산과정과 관련하여 설명하고 있다. 8.6항에서 PHC말뚝의 이음부는 몸체와 동등 이상의 휨 파괴 강도를 가진 구조이어야 하고, PC 강재의 끝부는 이음부에서 이음 철물에 정착되어야 하고, 이음부의 끝면은 PHC말뚝의 축선에 대하여 직각이 되어야 한다고 규정하고 있다. 또한 같은

Table 1. Standard specifications of PHC pile splices

National standards	Special specifications
<ul style="list-style-type: none"> <li>① KS F 7001 Standard practice for construction of spun concrete piles (KSA, 2002)</li> <li>② KS F 4306 Pretensioned spun high strength concrete piles (KSA, 2003)</li> <li>③ KDS 24 14 50 Design standard of bridge substructure (General design method) (KCSC, 2016a)</li> <li>④ KCS 11 50 15 Precast pile (KCSC, 2016b)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>① EXCS 11 50 15 Precast pile (Korea Expressway Corporation, 2018)</li> <li>② LH Special specification 23021 Precast pile foundation (The Driven Pile) (Korea Land &amp; Housing Corp., 2017)</li> <li>③ Seoul guide spec. (Civil part), 5. Pile construction 5-2 Precast pile (Seoul Metropolitan City, 2018)</li> <li>④ Korea Rail guide spec (Road bed) 5. Structure construction 5-4 Precast pile foundation (Korea Rail Network Authority, 2013)</li> <li>⑤ Special specification 8. Foundation pile (Ministry of Oceans and Fisheries, 2016)</li> <li>⑥ KRCCS 67 56 15 Driven Pile foundation Construction (Korea Construction Standards Center, 2017)</li> </ul>
Welding (arc welding, manual or semi-automatic)	Welding (arc welding, manual or semi-automatic)

표준에서 품질측면에서도 설명하고 있다. 4.5항에서 이음부의 휨 강도는 4.2항에 규정한 몸체의 휨 강도 중 파괴 휨 모멘트와 같거나 그 이상이어야 한다고 규정하고 있다.

즉 PHC말뚝의 이음은 용접이음을 표준 방식으로 하는데 용접이음 PHC말뚝은 우선적으로 말뚝의 기본 성능을 만족시켜야 하며 그 다음 단계로 용접이음 부위의 휨 강도를 검토해야 한다는 것을 의미한다. 따라서 이 같은 규정은 용접이음 이외의 이음 방식의 경우에도 동일하게 적용되어야 하며 어떠한 이음방식도 표준 방식인 용접이음과 동등 이상의 품질이어야 한다는 것을 의미한다.

## 2.2 이음 PHC말뚝이 가져야 할 기본 성능

이음 PHC말뚝은 기본적으로 이음하지 않은 PHC말뚝과 동일한 거동을 나타내어야 한다. 즉 이음 PHC말뚝은 1개의 PHC말뚝과 같은 일체화 거동을 나타내어야 하며 콘크리트 제품이므로 탄성재료의 거동을 나타내어야 한다. 또한 아크용접이음을 표준 이음방식으로 정하고 있으므로 그 외의 이음 방식은 용접이음과 동등 이상의 성능을 가져야 한다.

이음 PHC말뚝은 다음 3가지 기본 성능을 만족하여야 한다.

- ① 일체화 거동 성능
- ② 탄성 재료 성능
- ③ 용접이음과 동등 이상의 품질 성능

## 3. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 시방 및 기본 개념 분석

### 3.1 볼트 수직이음 PHC말뚝의 시방 분석

볼트 수직이음 PHC말뚝과 관련된 시방은 2개 회사에서 자체 제작한 시방서를 참고할 수 있었다(OO Eng. corp., 2015; OOO Eng. Corp., 2016). 현재 사용되고 있는 5개 회사 제품 중 2개 제품에 대한 시방서는 찾을 수 있었으나 3개 제품에서는 시방서조차 찾을 수가 없었다. OO엔지니어링의 경우 이음볼트의 체결력을 80~120N·m로 제시하고 있었으며 말뚝 연결관, 이음볼트, 외부링, 시공순서, 시공상 특이사항, 토크값 기준 등이 제시되어 있었다. OOO엔지니어링의 경우 이음볼트의 체결력을 300~800N·m로 제시하고 있는데 이는 통상적인 인력으로는 체결할 수 없는 정도의 큰 토크치이며 따라서 이 정도의 토크치가 가해지면 볼트, 스프링와셔, PC너트 등에서 재료 파괴가 발생할 수 있을 것으로 생각되었다.

볼트 수직이음 방식과 용접이음 방식에 대하여 관련 기준, 시공방법, 품질시험방법 등에 관하여 Table 2에 요약하였다. 여기서 용접이음 이외의 이음 방식을 사용할 경우에는 품질 성능 중 재료 성능을 우선적으로 만족시켜야 하고 그 다음 단계로 휨 강도 성능의 만족 여부를 분석하여야 한다.

Table 2. Comparisons of 2 kinds of pile splice method

Methods		Welding spliced PHC pile	Bolts spliced PHC pile
Items			
Standards		- KS F 4306 - KS F 7001 - KDS 24 14 50 - KCS 11 50 15	- None
Installation method		- ARC welding - Manually or semi-automatically welding	- Joint by torque wrench
Quality assurance method		- UT, MT - 1 per 20 units	- Measuring torque before installing - 1 per 20 units
Construction method		- Driven piling - Final light-driven piling	- Driven piling - Final light-driven piling
Quality assurance method after construction		- None	- None - Required necessarily (∵ bolts are come loose)
Quality performance	Material	- Unification behavior - Elastic behavior	- Unification behavior - Elastic behavior
	Bending strength	- Failure moment	- Failure moment

### 3.2 볼트 수직이음 PHC말뚝의 기본 개념 분석

전문가의 서면 자문 의견에 따르면 볼트-너트 체결의 기본 개념을 다음과 같이 설명하였다(Kim, 2018a). 이와 같은 개념은 진동 하중을 주로 받는 자동차, 기계 등의 경우에 적용되지만 직항타 및 경타 시공 시 대상 장비들보다 더 큰 충격력이 작용되는 볼트 수직이음 PHC말뚝에서도 동일한 조건으로 적용될 수 있을 것으로 판단되었다.

- ① 볼트 체결 시 볼트와 너트부의 재료는 원칙적으로 동일한 재료를 사용하여야 한다.
- ② 다만 부득이 하게 재료의 성질이 다를 경우 너트부의 재질이 약하여야 하며 이 때 볼트는 재사용할 수 있으나 너트부는 신규 제품으로 교체하여야 한다.
- ③ 이음볼트와 너트부의 체결부위는, 허용면압강도를 넘지 않고 나사산의 파괴가 일어나지 않고 나사가 풀리지 않을 정도로 충분한 체결 길이를 확보해야 하며 이것이 곤란할 경우에는 이음볼트가 풀어지지 않도록 볼트 풀림 방지 대책을 강구하여야 한다.
- ④ 스프링와서는 마찰형와서이므로 말뚝 항타와 같은 대형 충격에는 풀어질 수밖에 없으므로 볼트 풀림대책이 될 수 없다.

전문가의 서면 자문 의견에 따르면 현재 사용되고 있는 볼트수직이음방식들에서는 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 분석되었다(Kim, 2018a). 이음볼트와 이음볼트를 체결하는 너트부(PC너트, 마밀라슈 탭경)의 재질이 동일하지 않았다. 이음볼트와 너트부의 체결 길이가, 허용 면압 강도를 넘지 않고 나사산의 파괴가 일어

나지 않으며 이음볼트의 풀림을 방지할 수 있을 정도로 충분하지 않았다. 매입 시공 시 경타 및 직항타 시공 시 타격에 대한 이음볼트 풀림 방지에 사용한 마찰형인 스프링와서로는 이음볼트의 풀림을 억제할 수 없었다. 이음볼트의 풀림 방지를 위한 이음볼트와 너트부의 체결에는 볼트 풀림 방지 대책을 적용했어야 했다.

## 4. 이음 말뚝 성능 검증시험 계획 및 절차

### 4.1 시험 계획

볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음말뚝 성능 검증시험의 구체적인 계획을 Table 3에 나타내었다. 여기서 표준 이음 방식인 용접이음 PHC말뚝의 성능 검증시험도 함께 실시하였다. 길이 7m의 직경 500mm인 A종 PHC말뚝 2개를 이음하여 시험말뚝으로 사용하였다.

여기서 볼트 수직이음 PHC말뚝을 직항타 또는 경타 시공 후에는 볼트가 풀려 체결력이 심각하게 저하하여 체결력은 80% 이상까지 감소하는 것으로 나타났다(Kim, 2018b). 체결력을 80~120N·m로 제시하고 있으므로 시공 전 최초 체결력을 100N·m로 하였을 때 직항타 또는 경타 시공 후 잔류 토크치는 20N·m 이하로 남아 있게 되었다. 따라서 잔류 토크치를 20N·m로 하여 체결한 후 시험을 실시하였으며 직항타 또는 경타 시공 후 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음말뚝의 3가지 성능을 분석하였다. 이는 공개 현장안전성능 검증시험에서 확인된 값의 평균치보다 다소 큰 값이었다.

### 4.2 시험 장치 및 실험 방법

시험은 국토교통연구인프라운영원 첨단재료시험센터

Table 3. Performance test plan for bolts spliced PHC pile

Type	No.	Loading method	Tightening torque (N.m)	Test item	
				Unification	Elastic material
Bolts spliced piles	P-BV-01	Continuous loading	200 ↑	0	
	P-BV-02	Step loading & unloading	20 <sup>1)</sup>	0	0
	P-BV-03	Step loading & unloading	20 <sup>1)</sup>	0	0
	P-BV-04	Repeated loading	20 <sup>1)</sup>	0	0
Welding spliced piles	P-W-01	Step loading & unloading	-	0	0
	P-W-02	Step loading & unloading	-	0	0
	P-W-03	Repeated loading	-	0	0

<sup>1)</sup> Average residual tightening torque value measured in field tests

에서 실시하였으며 시험장치의 제원을 Table 4에 수록하였다. KS F 4306에 규정된 휨강도시험 방법에 따라 시험을 진행하였으며 그 개요도를 Fig. 1에 나타내었다. 국토교통연구인프라운영원 첨단재료시험센터에서 진행한 시험 모습을 Fig. 2에 나타내었다.

Table 4. Testing machine specifications

Name	5 MN large-sized material testing machine
Capacity	5 MN
Actuator stroke	500 mm
Main size	8,200 mm (H : Max)
Force range	6 steps ( $\times 1, \times 2, \times 5, \times 10, \times 20, \times 50$ )
Bending span	23,000 mm
Frequency	3 Hz
Height	5,000 mm
Column to column	3,000 mm

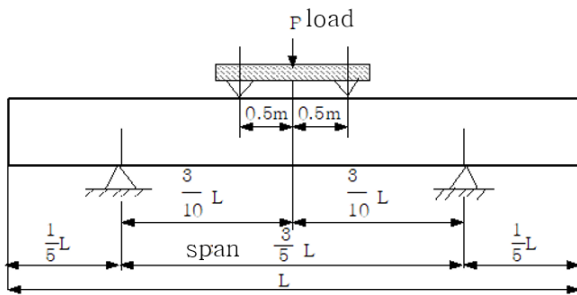


Fig. 1. Tensile strength test (KS F 4306) (KSA, 4306)



(a) Side view



(b) Front view

Fig. 2. Testing pictures

## 5. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음 말뚝 성능 검증시험 결과 및 분석

### 5.1 볼트 수직이음 PHC말뚝

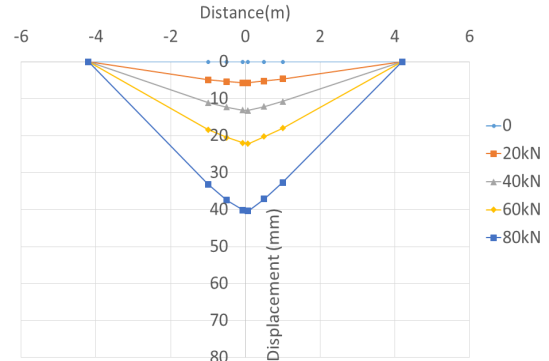
#### (1) 기준 체결 토크치 이상으로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝

시험말뚝 P-BV-01에서는 보통 작업원의 인력으로 체결할 수 있는 토크치로 이음볼트를 체결하였다. 토크렌치의 측정한계가  $200\text{N}\cdot\text{m}$ 이었으므로 정확한 토크치는 측정할 수 없었으나  $200\text{N}\cdot\text{m}$  이상으로 체결한 상태였다.

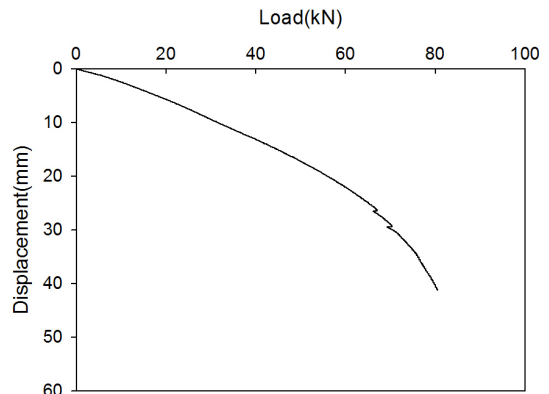
이 볼트 수직이음 PHC말뚝에 하중을 단계적으로 증가시켜 파괴상태까지 재하 하였으며 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 여기서, 각 재하단계에서 재하 후 하중을 제거하지 않았으므로 볼트 수직이음 PHC말뚝의 탄성 재료 성능은 파악하지 못하였다.

#### (2) 이음볼트가 풀린 볼트 수직이음 PHC말뚝

2개의 시험말뚝 P-BV-02 및 P-BV-03에서 하중단계별로 재하 후 볼트 수직이음 PHC말뚝의 변형 양상을

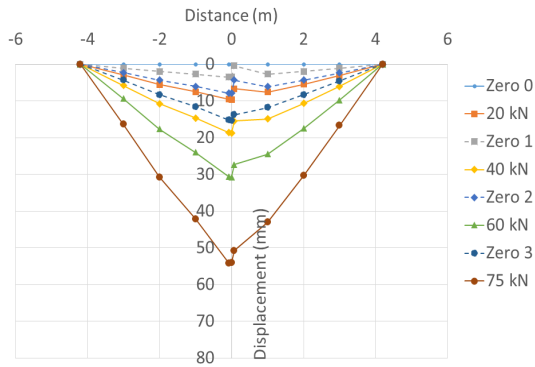


(a) Displacements of splices by step loadings

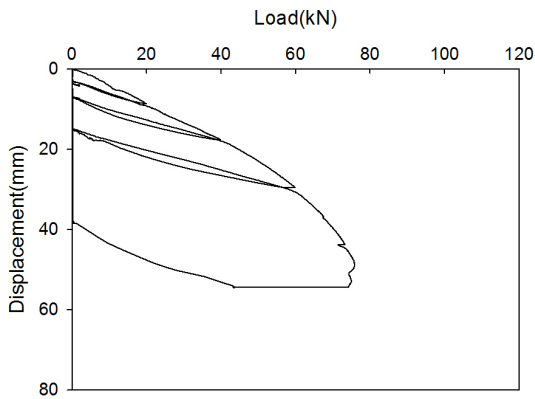


(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 3. Test results of P-BV-01

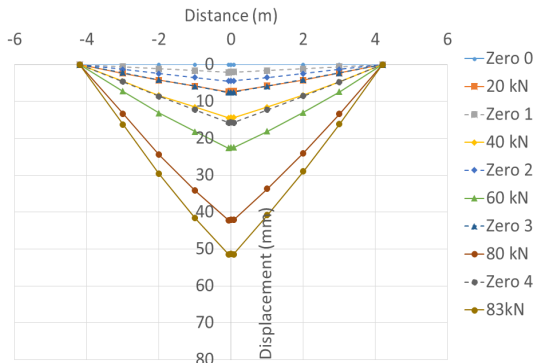


(a) Displacements of splices by step loadings

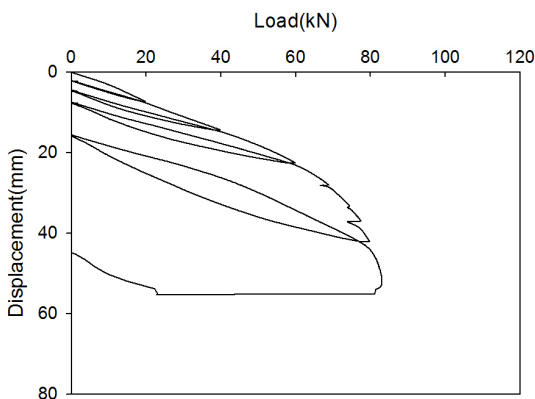


(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 4. Test results of P-BV-02



(a) Displacements of splices by step loadings



(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 5. Test results of P-BV-03

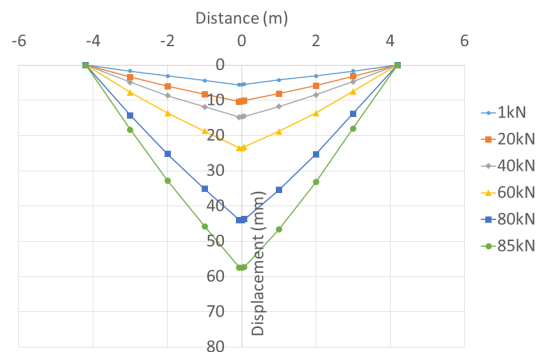
관찰하였으며 하중 제거 후 변형 양상도 관찰하였다. 그 결과를 각각 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 또한 2개의 시험말뚝에서는 75kN, 83kN의 파괴하중을 구하였다.

시험말뚝 P-BV-04에서는 2개의 시험말뚝에서 확인된 파괴하중의 약 1/2 수준인 40kN의 하중단계에서 10회, 20회, 30회의 반복재하를 실시하고 하중을 제거한 다음 파괴 시까지 힘시험을 실시하면서 각 하중 단계별로 볼트 수직이음 PHC말뚝의 위치별 변형 양상을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

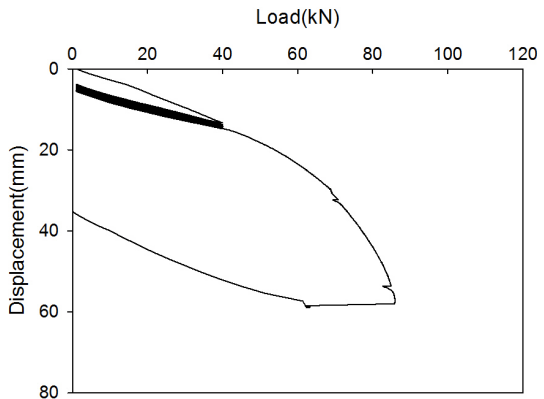
## 5.2 용접이음 PHC말뚝

2개의 시험말뚝 P-W-01 및 P-W-02에서 하중단계별로 재하 후 및 하중 제거 후의 용접이음 PHC말뚝의 변형 양상을 관찰하였으며 그 결과를 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 2개의 시험말뚝에서는 102kN, 97kN의 파괴하중을 구하였다.

시험말뚝 P-W-03에서는 볼트 수직이음 PHC말뚝과 동일한 하중 단계의 거동을 파악하기 위하여 40kN의 하중단계에서 10회, 20회, 30회의 반복 재하 하였다. 그

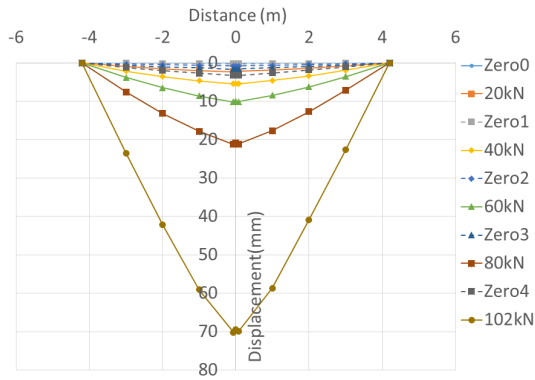


(a) Displacements of splices by step loadings

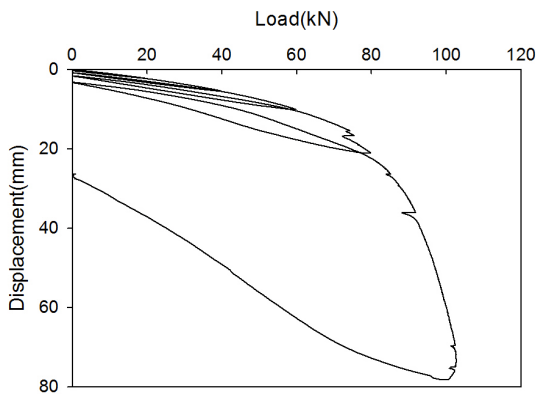


(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 6. Test results of P-BV-04

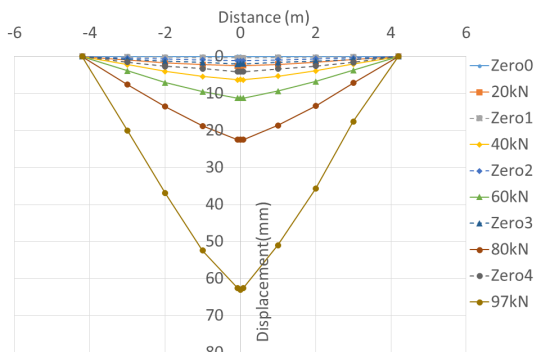


(a) Displacements of splices by step loadings

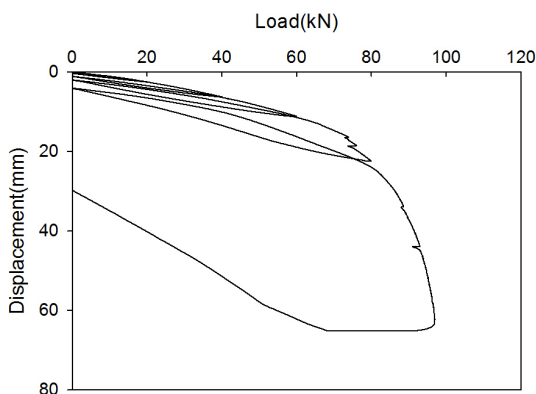


(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 7. Test results of P-W-01



(a) Displacements of splices by step loadings



(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 8. Test results of P-W-02

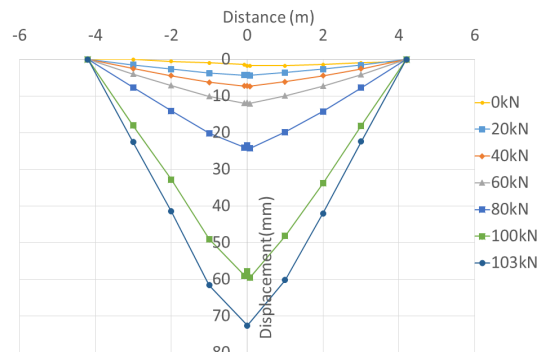
다음 하중을 제거한 후 파괴될 때까지 하중을 단계적으로 증가시켜 용접이음 PHC말뚝의 위치별 변위 양상을 관찰하였으며 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

### 5.3 시험 결과 분석

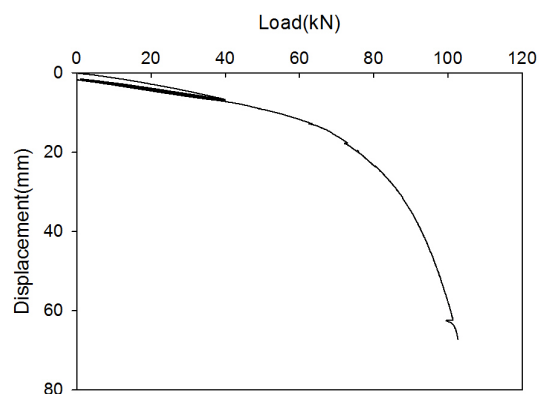
#### (1) 기준 토크치 이상으로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝

Fig. 3을 통하여 200N·m 이상으로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝에 대한 시험 결과를 분석하였다. 가장 낮은 하중단계인 20kN에서도 볼트 수직이음 PHC말뚝에서는 볼트 수직이음구에서 좌우로 꺾인 V형 변형 양상이 나타났으며 PHC말뚝 본체는 완전한 직선 형태를 유지하고 있었다. 즉 볼트 수직이음 PHC말뚝은 꺾어진 채 2개의 별개의 말뚝으로 거동하는 양상을 나타내었으므로 일체화 거동은 전혀 관찰되지 않았다. 그 이후의 하중단계인 40, 60, 80kN의 하중 단계에서는 하중 단계가 증가할수록 꺾어진 V형 변형 양상은 더욱 심화되었으며 별개의 직선화된 2개 말뚝 양상은 확연하게 관찰되었다.

200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC



(a) Displacements of splices by step loadings



(b) Loads vs. displacements of splices

Fig. 9. Test results of P-W-03

말뚝에서도 꺾인 말뚝 변형 양상이 관찰되었고 별개의 직선화된 2개 말뚝 양상은 확연하게 관찰되었으므로 1개의 말뚝은 아닌 것으로 판단되었다. 즉 볼트 수직이음 PHC말뚝은 일체화 거동을 나타내지 않았고 1개의 말뚝이 아닌 것으로 나타났으므로 이음 말뚝으로 거동하지 않았다. 이음부위에서 V형으로 꺾어진 말뚝이었다.

각 재하단계에서 재하 후 하중을 제거하지 않았다. 따라서 이음말뚝의 탄성 재료 성능은 파악하지 못하였다.

### (2) 이음볼트가 풀린 볼트 수직이음 PHC말뚝

Fig. 4~Fig. 6의 시험 결과로부터 이음볼트가 풀린 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음 말뚝 성능을 분석하였다. 각 하중 단계에서 볼트 수직이음 PHC말뚝은 이음부위에 대하여 양쪽으로 대칭된 직선 상태의 변위 양상을 나타내고 있었다. 즉 이음부를 기준으로 V형으로 꺾어진 채 2개의 별도의 말뚝으로 거동하는 것을 알 수 있었다. 각 하중 단계에서 하중 제거 시 이음말뚝은 하중 재하 전의 상태로 돌아가지 않는 것을 알 수 있었다. 즉 이음볼트가 풀린 볼트 수직이음 PHC말뚝은 탄성체로 거동하지 않는 것을 알 수 있었다.

요약하면 이음볼트가 기준 체결력 이상으로 체결되었거나 또는 이음볼트가 풀어진 볼트 수직이음 PHC말뚝은 1개의 말뚝이 아니었으며 탄성 재료도 아닌 것으로 나타났다. 따라서 이음 부위에서 V형으로 꺾어진 말뚝일 뿐이었다.

### (3) 용접이음 PHC말뚝

Fig. 7~Fig. 9의 시험 결과로부터 용접이음 PHC말뚝의 말뚝성능을 분석하였다. 각 하중 단계에서 용접이음 PHC말뚝은 이음부위에 대하여 양쪽으로 대칭된 곡선 상태의 변위 양상을 나타내고 있었다. 즉 PHC말뚝과 용접이음부가 일체화 되어 1개의 말뚝으로 거동하는 것을

알 수 있었다. 각 하중 단계에서 하중 제거 시 이음말뚝은 하중 재하 전의 상태로 돌아가는 것을 알 수 있었다. 즉 용접이음 PHC말뚝은 탄성체로 거동하는 것을 알 수 있었다.

요약하면 용접이음 PHC말뚝은 1개의 말뚝이었으며 탄성 재료인 것으로 나타났다. 따라서 용접이음 부위에서 일체화된 1개의 말뚝이었다.

## (4) 2가지 이음방법에 대한 구체적인 성능의 비교 분석

### ① 재하 단계에 따른 이음부 변위

2가지 이음 PHC말뚝에 대하여 파괴 발생 전까지의 재하 하중에 대하여 20kN 단계마다 변위를 나타낸 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8로부터 2가지 이음 PHC말뚝에 대하여 재하 단계에 따른 볼트 수직이음부와 용접이음부 중앙의 변위를 측정하여 Table 5 및 Fig. 10에 나타내었다. 200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 80kN까지, 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 60~80kN까지, 용접이음 PHC말뚝의 경우 100kN 단계까지 이음부 변

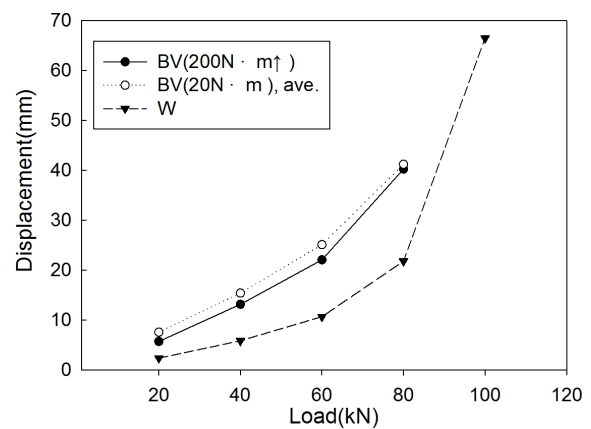


Fig. 10. Plot of displacements of splices by step unloadings

Table 5. Displacements of splices by step loadings

Type Tightening Torque No Loads(kN)	Bolts spliced piles (mm)				Welding spliced piles (mm)		
	200N·m ↑	20N·m					
	P-BV-01	P-BV-02	P-BV-03	Average	P-W-01	P-W-02	Average
0	0	0	0	0	0	0	0
20	5.70	9.62	7.38	7.57	2.25	2.48	2.37
40	13.15	18.75	14.34	15.41	5.4	6.25	5.83
60	22.06	30.74	22.51	25.10	10.14	11.15	10.65
80	40.24	-	42.17	41.21	21.18	22.39	21.79
100	-	-	-	-	69.41	62.99	66.2



위를 측정할 수 있었다.

200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC 말뚝과 20N·m의 토크치로 볼트 수직이음 PHC말뚝의 변위는 비슷한 수준이었다. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 파괴하중인 재하 하중 80kN까지는 용접이음 PHC말뚝의 변위는 볼트 수직이음 PHC말뚝의 1/3(40kN이하의 하중 단계)~1/2(60kN이상의 하중 단계) 수준이었으며 그 이후 하중 단계에서는 변위는 크게 증가하여 소성변형단계에 도달하였다.

**② 재하 단계에 따른 하중 제거 후 이음부의 잔류 변위**

2가지 이음 PHC말뚝에 대하여 파괴 발생 전까지의 재하 하중에 대하여 20kN 단계마다 하중을 재하한 후 재하 하중을 제거하여 측정한 잔류변위를 나타낸 Fig.

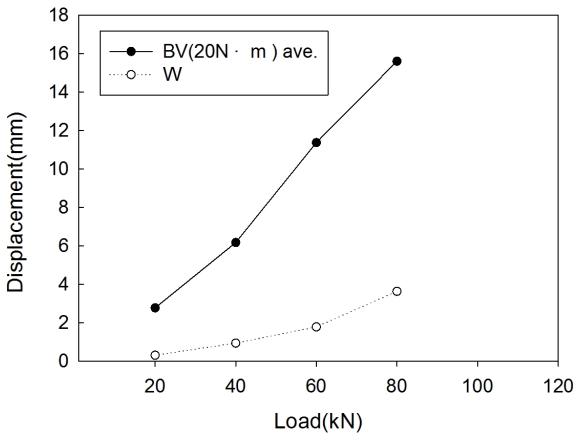


Fig. 11. Plot of residual displacements of splices by step unloadings

Table 6. Residual displacements of splices by step unloadings

Loads (kN)	Type	Bolts spliced piles (mm) (Tightening torque; 20N·m)			Welding spliced piles (mm)		
		P-BV-02	P-BV-03	Average	P-W-01	P-W-02	Average
0		0	0	0	0	0	
20		3.5	2.06	2.78	0.27	0.36	0.32
40		7.86	4.49	6.18	0.79	1.11	0.95
60		15.27	7.49	11.38	1.59	1.99	1.79
80		-	15.61	15.61	3.22	4.05	3.64
100		-	-	-	-	-	-

Table 7. Failure loads of spliced PHC piles

Type	Bolts spliced piles (mm)				Welding spliced piles (mm)			
	Tightening torque	200N·m ↑		20N·m				
	No	P-BV-01	P-BV-02	P-BV-03	Average	P-W-01	P-W-02	Average
Failure load (kN)		80	75	83	79	102	97	99
Failure displacement (mm)		41.01	54.09	51.33	48.81	69.41	62.99	66.2

4, Fig. 5, Fig. 7, Fig. 8로부터 2가지 이음말뚝에 대하여 재하 단계에 따른 하중 제거 후의 볼트 수직이음부와 용접이음부 중앙의 잔류 변위를 측정하여 Table 6 및 Fig. 11에 나타내었다. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 60~80kN, 용접이음 PHC말뚝의 경우 80kN 단계까지 측정할 수 있었다.

20N·m의 토크치로 체결된 볼트 수직이음 PHC말뚝의 잔류 변위는 허용할 수 없는 한계상태 이상의 수준으로 나타났으며 하중이 증가함에 따라 15.6mm까지도 나타났다. 용접이음 PHC말뚝의 잔류 변위는 60kN의 하중단계까지는 거의 발생하지 않았으며 그 이후 파괴하중에 접근하는 경우에는 3.6mm정도까지는 발생하였으나 미미한 수준이었다.

20N·m의 토크치로 체결된 볼트 수직이음 PHC말뚝의 잔류 변위는 용접이음 PHC말뚝의 잔류 변위보다 4.3~6.0배만큼 크게 나타났다. 이는 이음품질 성능 측면에서 볼트 수직이음 PHC말뚝이 용접이음 PHC말뚝에 크게 미달되는 것을 의미하였다.

**③ 이음 PHC말뚝의 파괴하중**

재하 단계에 따른 볼트 수직이음 PHC말뚝과 용접이음 PHC말뚝의 파괴 하중과 파괴 시 변위를 측정하여 Table 7에 나타내었다. 여기서 200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝과 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝의 파괴하중은 비슷한 수준이었으며 용접이음 PHC말뚝의 파괴하중은 볼

트 수직이음 PHC말뚝의 1.5배 수준이었다.

200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC 말뚝과 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC 말뚝의 파괴 시 변위는 40~50mm 수준이었으며 용접이음 PHC말뚝의 파괴 시 변위는 70mm 수준으로 큰 변위에도 잘 저항하고 있는 것을 알 수 있었다.

#### ④ 이음 PHC말뚝의 3가지 기본 성능 비교 및 분석 가. 일체화 성능

볼트 수직이음 PHC말뚝은 이음부에서 V형으로 꺾어진 채로 일체화 거동을 보이지 않았으므로 1개의 말뚝으로 거동하지 않았다. 용접이음 PHC말뚝은 이음부에서 일체화 거동을 나타내었으므로 1개의 말뚝으로 거동하였다.

#### 나. 탄성 재료 성능

볼트 수직이음 PHC말뚝은 이음부에서 V형으로 꺾어진 채 하중 제거 후 변위가 원상태로 복귀되지 않았으므로 탄성 재료가 아니었다. 용접이음 PHC말뚝은 이음부와 말뚝이 곡선 형상의 변위 양상을 나타내었으므로 탄성 재료였다.

#### 다. 이음 품질 성능

용접이음 PHC말뚝의 휨파괴하중은 99kN로 나타났으며 볼트 수직이음PHC말뚝의 휨파괴하중은 79kN으로 나타났다. 동일한 하중 단계에서 용접이음 PHC말뚝의 변위는 볼트 수직이음 PHC말뚝의 변위에 비하여 1/3(40kN이하의 하중단계)~1/2(60kN이상의 하중 단계) 만큼 발생하였다. 각 하중 단계에서 하중 제거 후 용접이음 PHC말뚝은 원상태로 복귀되었으나 볼트 수직이

음 PHC말뚝은 원상태로 복귀되지 않고 큰 잔류변위를 가졌다. 따라서 볼트 수직이음 PHC말뚝은 용접이음 PHC 말뚝의 품질에 크게 미달되었다.

#### ⑤ 이음말뚝들의 휨 강도 품질 분석

볼트 수직이음 PHC말뚝과 용접이음 PHC말뚝의 휨 강도 품질 성능을 분석하여 참고로 수록하였다. 휨 강도 시험에서 측정된 실험 시 파괴하중 값을 이용하여 파괴 모멘트를 계산하였으며 그 결과를 Table 8에 나타내었다. 휨 모멘트 식은  $M = \frac{WL}{40} + \frac{P}{4}(\frac{3}{5}L - 1)$ 이며 여기서, M : 휨 모멘트(kN·m), W : PHC말뚝의 질량, L : PHC말뚝의 길이, P : 하중이다. 시험말뚝(φ 500mm, 7m 말뚝 2ea (총길이 14m))이었으며 시험말뚝질량은 1개당 18.83kN으로 2개이므로 총 질량은 37.66kN이었다. Table 8에서 알 수 있듯이 볼트 수직이음 PHC말뚝은 이음말뚝의 성능을 만족시키지도 못하였으며 휨 강도 품질 측면에서도 일부 시험체에서는 기준값에 미달되는 것으로 나타났다.

### 6. 결론 및 제언

볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음말뚝 성능을 분석하기 위하여 휨강도시험을 실시하였으며 용접이음 PHC 말뚝에 대한 시험도 부가적으로 실시하였다. 이 연구에서 다음의 결론을 구할 수 있었다.

- (1) 200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC 말뚝에서는 가장 낮은 하중단계인 20kN·m에서도 볼트 수직이음구에서 V형으로 꺾인 변형 양상이 나타났으며 PHC말뚝 각각의 본체는 완전한 직선 형태

Table 8. Quality performance analysis of bending strength of tested specimens

Specimens no.	Items	Material		Bending strength (kN·m)			Final decision*
		Unificatin behavior	Elastic behavior	Failure moment			
				Test value	Standard value	Decision*	
Bolts spliced PHC pile	P-BV-1	X	X	162.1	155.0	O	X
	P-BV-2	X	X	153.6	155.0	X	X
	P-BV-3	X	X	166.9	155.0	O	X
	P-BV-4	X	X	172.1	155.0	O	X
Welding spliced PHC pile	P-W-1	O	O	203.3	155.0	O	O
	P-W-2	O	O	192.6	155.0	O	O
	P-W-3	O	O	204.8	155.0	O	O

Remark; \* O : Satisfaction, X : Non-satisfaction

를 유지하고 있었다. 그 이후의 하중단계인 40, 60, 80kN의 하중 단계에서는 하중 단계가 증가할수록 V형으로 꺾어진 변형 양상은 더욱 심화되었으며 별개의 직선화된 2개 말뚝 양상은 확연하게 관찰되었다. 따라서 200N·m 이상의 토크치로 체결한 볼트 수직 이음 PHC말뚝은 일체화 거동을 나타내지 않았으므로 말뚝 또는 이음말뚝의 기본 성능에 미달되었다.

- (2) 이음볼트가 풀린 즉, 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직이음 PHC말뚝은 각 하중 단계에서 이음부 위에서 V형으로 꺾어진 변형 양상을 나타내었으며 PHC말뚝 본체는 각각 직선 상태의 변위 양상을 나타내고 있었다. 각 하중 단계에서 하중 제거 시 이음말뚝은 하중 재하 전의 상태로 돌아가지 않는 것을 알 수 있었다. 20N·m의 토크치로 체결한 볼트 수직 이음 PHC말뚝은 일체화 거동을 나타내지 않았으며 탄성 재료도 아닌 것으로 나타났으므로 볼트이음 부위에서 V형으로 꺾어진 말뚝일 뿐이었다. 즉 말뚝 또는 이음말뚝의 기본 성능에 미달되었다.
- (3) 재하단계에 따른 이음부 변위 및 재하 하중 제거 후의 잔류 변위, 이음 PHC말뚝의 파괴하중 및 3가지 기본 성능 등을 비교한 결과 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음 품질은 용접이음 PHC말뚝의 이음 품질에 크게 미달되었다.
- (4) 용접이음 PHC말뚝은 일체화 거동을 나타내었으며 탄성 재료의 성능도 유지하였으며 품질 측면 분석에서도 휨 강도 값은 몸체의 파괴 휨 모멘트 이상으로 나타났다. 따라서 용접이음 PHC말뚝은 이음말뚝의 모든 성능을 만족시키는 것으로 나타났다.
- (5) KS F 4306에서 PHC말뚝의 이음은 용접이음을 표준 방식으로 하는데 용접이음 PHC말뚝은 우선적으로 말뚝의 기본 성능을 만족시켜야 하며 그 다음 단계로 용접이음 부위의 휨 강도를 검토해야 한다. 따라서 이 같은 규정은 용접이음 이외의 이음 방식 경우에도 동일하게 적용되어야 하며 어떠한 이음방식도 표준 방식인 용접이음과 동등 이상의 품질이어야 한다는 것을 의미한다.

## 참고문헌 (References)

1. For-u Engineering Corp. (2015), *Specification "Ez Pile Connector"*, pp.1-11. (In Korean)
2. Kim, M. H. (2018a), *Safe installation method development project for extension plate attached PHC piles and bolt spliced PHC piles(Final report)*, Inje University industry academic cooperation foundation, pp.1-341. (In Korean)
3. Kim, M. H. (2018b), *Safe installation method development project for extension plate attached PHC piles and bolt spliced PHC piles (Final report) - supplement*, Inje University industry academic cooperation foundation, pp.A-1-1~A-13-48. (In Korean)
4. Kim, B. C., Song, C. Y., Kwon, H. S., and Lim, H. S. (2006), *A Bolting Method for Connecting PHC Piles*, KSCE 2006 Convention Conference & Civil expo, pp.4410-4413. (In Korean)
5. Korea Construction Standards Center (2016a), *KDS 24 14 50 Design standard of bridge substruction (General design method) 4.6.5*, pp. 1-47. (In Korean)
6. Korea Construction Standards Center (2016b), *KCS 11 50 15 Precast pile*, pp.1-13. (In Korean)
7. Korea Construction Standards Center (2017), *KRCCS 67 56 15 Driven Pile foundation Construction*, pp.1-14. (In Korean)
8. Korea Expressway Corporation (2018), *EXCS 11 50 15 Precast pile*, pp.1-15. (In Korean)
9. Korea Land & Housing Corp. (2017), *LH Special specification 23021 Precast pile foundation (The Driven Pile)*, pp.1-13. (In Korean)
10. Korea rail network authority (2013), *Korea Rail guide spec (Road bed)*, pp.5-6~5-19. (In Korean)
11. Korea Standards Association (2002), *KS F 7001 Standard practice for construction of spun concrete piles*, pp.1-45. (In Korean)
12. Korea Standards Association (2003), *KS F 4306 Pretensioned spun high strength concrete piles*, pp.1-51. (In Korean)
13. Ministry of oceans and fisheries (2016), *Special specification 8. Foundation pile*, pp.8-399~8-471. (In Korean)
14. Paik, K. H., Lee, J. H., and Park, Y. B. (2005), *Development of New Joining Method for PHC Piles, KGS Spring Conference*, Vol. 2005, pp.81-88. (In Korean)
15. Seoul Metropolitan City (2018), *Seoul guide spec. (Civil part)*, pp. 5-9~5-25. (In Korean)
16. Smartec Engineering Corp. (2016), *Specification "PHC pile bolt vertical joint"*, pp.1-3. (In Korean)

Received : November 15<sup>th</sup>, 2018

Revised : December 7<sup>th</sup>, 2018

Accepted : December 9<sup>th</sup>, 2018