

볼트 수직이음 PHC말뚝 시공법에 관한 기술적 고찰(I)

- 현장 시공안전성능 검증실험 결과를 중심으로 -



김명학
인제대학교
토목도시공학부 교수
(civmhk@inje.ac.kr)



최용규
경성대학교
건설환경도시공학부 교수
(ykchoi@ks.ac.kr)

1. 개요

말뚝의 연결방법은 크게 용접방식과 무용접 방식으로 구분될 수 있는데, 국내에서 용접방식을 표준으로 설정하고 있다. 3개 국가 기준(KS F 7001, KS F 4306, KCS 11 50 15) 및 6개 전문시방서(고속도로전문시방서 EXCS 11 50 15, LH 전문시방서 23021, 서울시전문시방서 토목편 5-2, 철도건설공사 전문시방서 노반편 5-4, 항만및어항공사 전문시방서 KRCCS 67 56 15)에 상세하게 규정되어 있다. 다만 용접방식은 기후조건 및 풍속 등에 영향을 받을 수 있으나 이러한 기후 상황에서는 말뚝 공사를 진행하는 것이 어려울 수 있다.

무용접 말뚝 이음 방식은 기계식 연결장치를 이용하여 상부말뚝과 하부말뚝을 조립식으로 연결하는 시공 방식이다. 이러한 조립방식은 상부말뚝과 하부말뚝에 설치되어 있는 PC너트(또는 마릴라슈의 탭경)에 말뚝 연결판을 일치시키고 상부와 하부를 이음볼트로 수직방향으로 고정시켜 상·하부 말뚝을 연결하는 시공방법이다.

일본에서는 볼트식 수평이음 PHC말뚝이 1997년 이후 일반화 되었고(97년 10월 일본건축센터의 품질인증 취득, 97년 12월 국토교통성 승인), JIS A 7201에 TP조인트(Triple Joint; 그림 1 참조)라는 명칭으로 등재되어 전체 말뚝이음의 95% 이상을 볼트식 수평이음으로 시공하고 있다. 이때 상·하부 말뚝 연결 시 단면이 동일한 말뚝을 연결하여 사용하는 것이 특징이다.



일본의 볼트수평이음 방법인 TP조인트를 준용하여 국내에 적용하고자 하는 시도가 있었으나, 용접방식에 비하여 전체 시공의 가격 경쟁력이 약하고, 철물 조인트와 볼트의 정밀가공이 요구되며, 조인트 구매에 따른 초기 비용 증가로 인해 그 효율성이 높지 않았다.

토목 및 건축구조물 기초로 사용하는 말뚝은 상부에 작용하는 수평력에 의해 큰 휨모멘트 및 인장력을 받게 되고, 이러한 휨모멘트 및 인장력은 말뚝하부로 내려갈수록 급격하게 감소하면서 말뚝하부에서는 축력이 지배적으로 작용하게 된다. 이러한 하중조건에 적절하게 대응할 수 있는 방안으로서 상부에는 강관말뚝을 사용하고, 하부에는 PHC말뚝을 사용하는 복합말뚝이 개발됨에 따라 이질재료의 말뚝을 이음해야 하는 상황이 발생하였으며 복합말뚝에 적용 가능한 볼트 수평이음방식이 개발되었으며 HCP, NCP, SCP공법이 특허로 등록되어 있다.

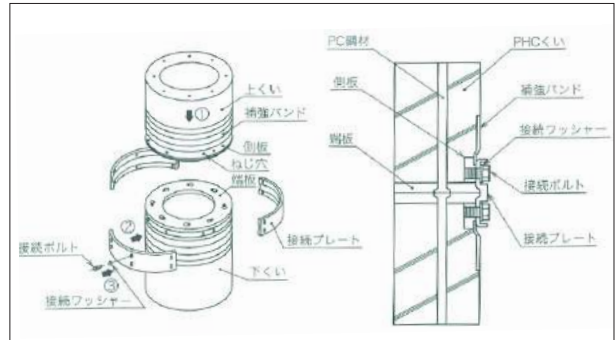


그림 1. TP Joint의 표준모식도(JIS A 7201)

한편 국내에서는 2013년 볼트식 수직이음방식이 건설신기술 제712호로 등록됨에 따라 현재 6개사에서 볼트식 수직이음방식의 이음자재를 생산하고 있으며 각 공법의 명칭은 Ez Pile Connector, SPJ, IB Joint, Dr. JOINT, S-JOINT, TK Joint이었다. 이중 2개 공법에서는 자체 시방을 제시하고 있었는데 자체 시방에서는 자체(조인트, 이음볼트)의 재질, 체결 토크치, 체결 방법 등을 포함하고 있었다. 그러나 가장 중요한 요소인 체결 토크치에서는 각각 80~120, 300~800N·m를 제시하고 있어 모순을 드러내고 있었다.

김명학 & 최용규(2018a;2018b)은 최근 발표한 학술논문에서 볼트식 수직이음 PHC말뚝은 이음말뚝의 성능에 크게 미달된다는 것을 밝혔다. 또한 최근(2018년 7~8월), 볼트식 수직이음 PHC말뚝에 대한 현장 시공 안전성능 검증실험에서 경타 시공 및 직항타 시공된 볼트식 수직이음 PHC말뚝을 뽑아내어 이음 상태를 측정 및 관찰한 결과 심각한 문제들이 확인되었다. 2018년 10월 국토교통부 국정감사의 종합감사 시 질의를 통하여 볼트식 수직이음 PHC말뚝의 안전성에 심각한 문제가 있음을 지적하였다.

따라서 국내에서 사용이 급증하고 있는 볼트식 수직이음 PHC말뚝에 대한 기술적 수준을 고찰하고자 한다. 또한 해당 말뚝의 시공 안전성 성능을 확인할 수 있는 올바른 검증 시험 방법론을 살펴보고자 한다.

2. 볼트-너트 체결시스템

(1) 기본 개념

볼트 전문가의 구두 및 서면 자문에 의하면 볼트 및 너트의 체결에서는 기본적으로 다음의 원칙이 준수되

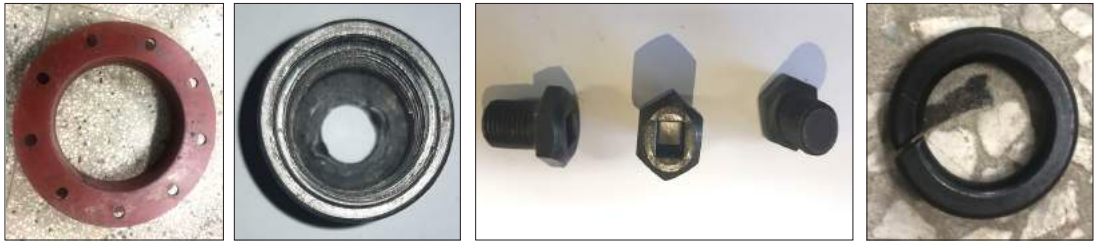
어야 한다. (i) 볼트 체결 시 볼트와 너트부의 재료는 원칙적으로 동일한 재료를 사용하여야 한다. (ii) 부득이하게 재료의 성질이 다를 경우 너트부의 재질이 약하여야 하며 이 때 볼트는 재사용할 수 있으나 너트부는 신규 제품으로 교체하여야 한다. (iii) 이음볼트와 너트부의 체결 길이가, 허용 면압 강도를 넘지 않고 나사산의 파괴가 일어나지 않고 이음볼트와 너트부의 체결은 풀리지 않을 정도로 충분한 체결 길이를 확보해야 하며 이것이 곤란할 경우에는 이음볼트가 풀어지지 않도록 볼트 풀림 방지 대책을 강구하여야 한다.

볼트전문가에 따르면 볼트식 수직이음 PHC말뚝에서 사용하는 이음볼트 체결에서는 다음과 같은 문제점이 있는 것으로 분석되었다. (i) 이음볼트와 이음볼트를 체결하는 너트부(PC너트, 마밀라슈 탭경)의 재질이 동일하지 않았다. (ii) PC너트 및 마밀라슈 탭경은 1차 사용 후 용도 폐기된 너트부이며 이를 재사용하는 것은 마치 폐기물을 아무런 재처리 과정 없이 그대로 활용하는 것과 같았다. (iii) 이음볼트와 너트부의 체결 길이는, 허용 면압 강도를 넘지 않고 나사산의 파괴가 일어나지 않고 이음볼트의 풀림을 방지할 수 있을 정도로는 충분하지 않았다. (iv) 매입 시공 시 경타 및 직항타 시공 시 타격에 대한 이음볼트 풀림 방지에 사용한 마찰형인 스프링와셔로는 이음볼트의 풀림을 억제할 수 없었다. (v) 이음볼트의 풀림 방지를 위한 이음볼트와 너트부의 체결에는 7.5절에 설명한 볼트 풀림 방지 대책을 강구하여야 하였다. 볼트식 수직이음 방식에서 나타난 원천적인 오류들을 그림 1에 나타내었다.

볼트전문가는 현재의 볼트식 수직이음 PHC말뚝에서 타격 시공으로 인하여 이음볼트의 체결력 감소율이 80% 이상으로 나타나는 이유를 (i) 항타 시 피할 수 없이 나타날 수밖에 없는 편심 타격, (ii) 큰 항타 충격하중으로 인한 말뚝체의 탄성 압축 및 인장 반발력, (iii) 충격 하중으로 인한 나사, 스프링와셔, 상·하부 강재판 상호간 금속재료 접촉면의 마찰계수 감소로 설명하였다.

(2) 볼트 수직이음 PHC말뚝의 제작 공정

볼트수직이음구는 대부분 PC너트에 체결되지만 2단 이상의 이음에서는 마밀라슈의 탭경에 체결해야 하는 상황이 발생하게 되었다. 이는 단본말뚝만을 이용하기 때문이었다. 여기서 볼트식 수직이음구의 주요 부위 및 재질을 아래에 설명하였다. 볼트 수직이음구(SS400; 그림 2(a) 참조), PC너트(SM25C와 동등 이상; 그림 2(b) 참조), 고장력 볼트(F10T; 그림 2(c) 참조), 스프링와셔(그림 2(d) 참조) 등이었다. PHC말뚝의 생산 과정에서 PC너트 및 마밀라슈 탭경은 1차 사용되었다. PC강봉에 긴장력을 도입할 때 강봉헤드를 고정하는 PC너트에는 마구리판을 인장볼트를 체결한 후 6~7톤의 긴장력을 도입시켰다(그림 3 참조). 따라서 PC너트 및 마밀라슈 탭경은 1차사용 후 용도 폐기된 너트부에 해당되었다. PC너트 및 마밀라슈 탭경에 고장력볼트 체결 시 볼트 풀림방지 목적으로 스프링와셔를 사용하였는데 이 스프링와셔는 마찰형 와셔이므로 볼트풀림방지용으로 사용하는 데에는 한계가 있는 방식인 것으로 알려져 있다. 참고로 직경 500mm말뚝에 1회 경타 시 발생하는 충격 하중의 크기를 승용차가 자유낙하 할 때 바퀴 한 개에서 발생하는 충격 하중과 단순하게 비교해 보았다. 즉 승용차가 6.2m의 높이에서 떨어질 때의 충격에너지와 동일한 크기이었다. 스프링와셔로는 항타에 의한 엄청난 충격을 감당할 수 없는 것으로 판단되었으며 최종 경타 시공 시 뿐만 아니라 직항타 시공



(a) 볼트수직이음구

(b) PC너트

(c) 고장력볼트

(d) 스프링와셔

그림 1. 볼트수직이음에 사용되는 구성 요소들

시에 이음볼트는 풀릴 수 밖에 없는 구조이었다. 이와 같은 볼트 풀림 현상은 현장성능실험 시 다양한 방법으로 확인하였다. 이 때 PC강봉을 고정하고 있는 PC너트에 고장력 볼트를 체결하여 PC너트에 영향을 주어 PC 강봉을 따라 수직균열을 유발시키기도 하였다. 또한 마 밀라슈의 탭경에 볼트수직이음구를 체결하는 경우에도 PC강봉에 맞닿아 있는 볼트수직이음구의 상부/하부판은 항타로 인한 반력을 PC강봉에 작용시키게 되는 데 이로 인하여 상부/하부판에 구속된 PC강봉에서는 팽창 변형이 발생하게 되고 동시에 PC강봉 주변 콘크리트에 인장 균열을 발생시키게 되어 PC강봉을 따라 수직균열을 유발시킬 수도 있었다.



그림 2. PC너트와 마구리판이 인장 볼트로 체결되는 모습

3. 현장 시공 성능 검증 실험 결과 및 분석

직경 500mm말뚝을 볼트 수직이음하여 풍화암층에 2.0m 만큼 관입되도록 매입 시공 및 직항타 시공하였다. 이 때 매 타격마다 동재하시험을 실시하여 PHC말뚝에 발생하는 항타응력을 조절하면서 최종관입량 및 지지력의 만족여부를 확인하는 시공 관리를 실시하는 경우(시공법 1)와 현행 시공법대로 최종관입량을 만족할 때 동재하시험을 실시하여 지지력 만족여부를 확인하는 시공 관리를 실시하는 경우(시공법 2)로 구분하여 시공하는 것으로 계획하였다. 그러나 시공법 1에서도 볼트식 수직이음부의 안전성이 확보되지 않아 시공법 2는 실시하지 않았다.

볼트 수직이음 PHC말뚝을 시험 시공한 후 볼트 수직이음부위가 노출되어 관찰이 가능할 때까지 지중을 굴착하여 볼트 수직이음구의 상태를 관찰하였다. 볼트 수직이음의 상태는 4가지 방법으로 확인하였다. 이음볼트의 손풀림(볼트풀림사례.avi), 잔류 체결력(그림 4(a), (b) 참조), 수직변위(그림 4(c) 참조), 회전각(그림

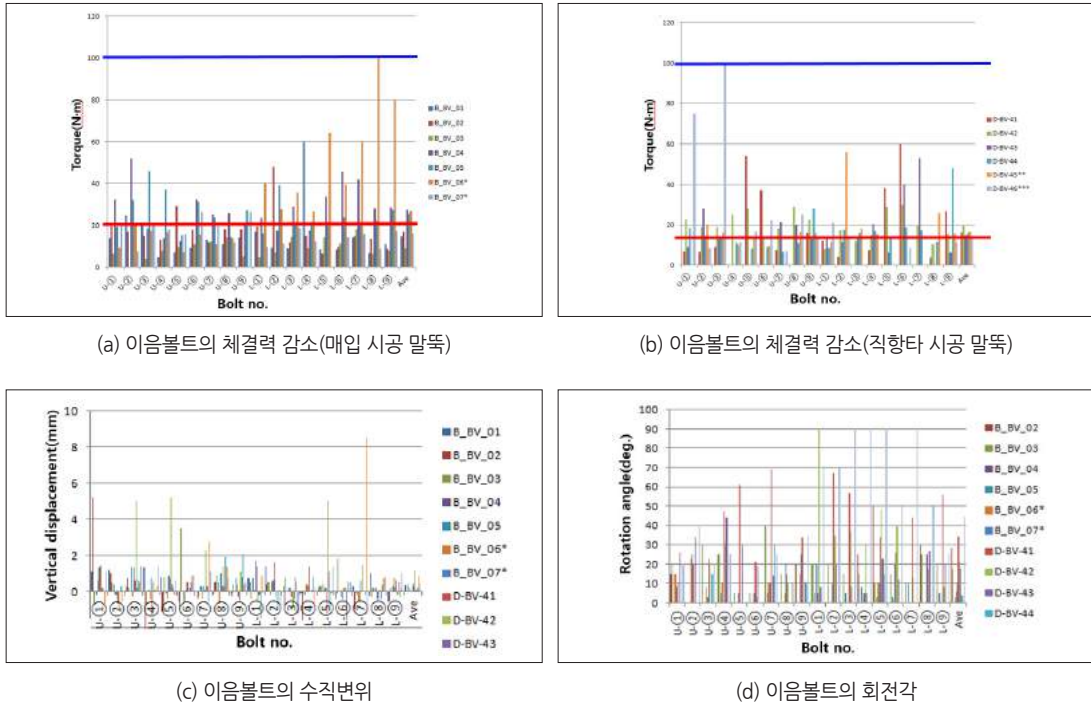


그림 4. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 현장 검증 실험 결과

표 1. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 현장 시공안전성능 검증실험 결과 요약

실험기호	구분	시공법	말뚝부재 응력	허용 지지력	체결력 감소율(%)	수직방향 변위 (mm)	회전각 (°)
매입 말뚝	B-BV-00	시공법 1	없음	만족	75~95	측정불가	미실시
	B-BV-01	시공법 1	없음	만족	75~95	-0.6~1.2	미실시
	B-BV-02	시공법 1	없음	만족	52~94	-1.6~5.2	0~50
	B-BV-03	시공법 1	없음	만족	82~100	-0.7~0.9	5~60
	B-BV-04	시공법 1	없음	만족	48~88	측정불가	측정불가
	B-BV-05	시공법 1	없음	만족	54~85	-0.6~0.7	0~10
	B-BV-06	시공법 1	없음	만족	0~93	-0.7~0.7	0~23
B-BV-07	시공법 1	없음	만족	74~92	-0.4~1.3	0~25	
직항타 말뚝	D-BV-41	시공법 1	없음	만족	62~100	-1.3~1.4	5~69
	D-BV-42	시공법 1	없음	만족	70~92	-1.0~5	0~90
	D-BV-43	시공법 1	없음	만족	47~100	-1.6~0.8	0~44
	D-BV-44	시공법 1	없음	만족	52~94	-1.5~2.1	0~30
	D-BV-45	시공법 1	없음	만족	75~100	-0.7~8.5	미실시
	D-BV-46	시공법 1	없음	만족	0~100	-1.2~1.4	0~90



4(d 참조)을 각각 관찰 또는 측정하였으며 표 1에 그 결과를 요약하였다. 모든 과정은 동영상으로 촬영하였다. 따라서 추후 동영상을 통하여 시공 후 이음볼트 및 스프링와셔가 볼트 수직이음구의 볼트체결 구멍 속으로 함몰되는 현상을 추가로 정밀하게 분석할 수 있었다. 상세한 내용은 김명학(2018a)를 참고할 수 있다.

4. 볼트 수직이음 공법과 용접이음공법의 비교

2018년 4월 30일 국토교통과학기술진흥원이 국회 국토교통위원회에 제출한 자료에서 건설신기술 712호와 관련한 분석 자료를 집필진들이 분석하여 의견을 제시하였다(표 2 참조). 여기서 집필진들의 현장실험 자료를 통한 실증적인 분석에 의하면 볼트식 수직이음의 경우 용접방식에 비하여 더 2배 정도의 더 많은 작업 소요시간이 소요되며 단가도 다소 고가인 것으로 나타났다.

표 2. 볼트식 수직이음 공법과 용접이음방식의 비교

구분	신청 기술(건설신기술 712호): 볼트 수직이음 공법		용접식 연결 공법	
	국토교통과학기술진흥원 의견(2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾	국토교통과학기술진흥원 의견(2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾
연결 원리	그림 생략		그림 생략	
파일 종류	기성 단본말뚝(일반 PHC말뚝)		철물(금구)이 부착된 특수파일제작	① 단본말뚝, 하부말뚝, 중부말뚝, 상부말뚝은 PHC말뚝의 기본적으로 동일 공경으로 생산됨
이음 구조	주배근 PC강선과 같은 방향으로 수직볼팅 전단면 내력 구현 가능	① PC너트에 볼트 체결할 경우 타격 시 PC강봉에 항타에너지가 집중되어 PC강봉을 따라 수직 균열 발생시킴 ② 마밀라슈 탭경에 체결 시 PC강봉의 선형이 어긋남	가장자리부 용접에 의한 단순 접합이음	① PC강봉에 항타에너지가 집중되지 않는 안전한 구조 ② 말뚝이음부 단면에 강재판을 두게 되어 콘크리트 단면 전체에 항타응력이 고르게 분포되므로 PC너트부 및 PC강봉에 응력이 집중되지 않음
환경에 따른 품질 확보	기후조건에 무관하여 시공성이 좋고 품질 확보가 용이함	① 기본적으로 우기 등에는 시공 공정이 진행되지 않음 ② 따라서 기후조건에 대한 적응성이 큰 장점이 될 수 없음	기후, 현장조건에 따라 시공성, 품질의 변동이 큼	① 기본적으로 우기 등에는 시공 공정이 진행되지 않음 ② 따라서 기후조건에 대한 적응성이 큰 장점이 될 수 없음
숙련도 및 시공성	단순볼트식으로 숙련공이 없어도 시공이 용이함	① 검·교정된 디지털 토크렌치 2개 구비해야 함 ② 숙련공이 없을 경우 자체 시방도 준수하기 어려움 ③ 2인의 인원이 약속한 동선으로 작업을 진행해야 하므로 철저한 사전 교육 및 숙련도가 없으면 소요 시간이 더 추가될 수 있음	용접공의 숙련도에 따라 시공성 및 품질이 좌우됨	① 말뚝 시공 팀에는 기본적으로 용접공이 팀의 구성원으로 포함되어 있음 ② 따라서 용접공을 별도로 마련해야 하는 상황은 아니므로 단점이 될 수 없음

표 2. 볼트식 수직이음 공법과 용접이음방식의 비교(계속)

구분	신청 기술(건설신기술 712호); 볼트 수직이음 공법		용접식 연결 공법	
	국토교통과학기술진흥원 의견 (2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾	국토교통과학기술진흥원 의견 (2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾
작업 시간	에어공구사용으로 볼트 체결 시간이 짧고 단순하여 품질관리 비용이 절감됨	① 에어공구 사용 시 포유 자체 시방에서 정하고 있는 볼트 체결 토크치 80~120 N·m로 체결할 수 없음 ② 감·교정된 디지털 토크렌치 2개를 사용하여 2인이 작업해야 함	이음부의 용접시간이 길고 비용 증가	① 손 용접 시간은 평균 7분 5초으로 오히려 작업 소요 시간이 짧음
이음 시간	5분 이내	① 매입 시공 시 23분 59초, 직향타 시공 시 22분 17초로 측정되었음(2인 작업 시) ② '5분 이내'에 대한 구체적인 내역 및 입증 자료가 제시되어 있지 않음	15~20분	① 11분 31초로 측정되었음(2인 작업 시) ② '15~20분'이라는 근거를 제시해야 함
품질 검사	볼트의 토크치로 관리. 비용/시간 절약	① 시공 후 볼트 체결 토크치 감소가 발생함 ② 향타 후 볼트수직이음구가 지중에 위치하게 되므로 볼트 체결 토크치 확인 불가능	전문시험기관의 비파괴시험 수행, 비용/시간 소요	① 용접에서는 기본적으로 정하고 있는 절차임 ② 특별하게 비용 및 시간이 소요되는 것은 아님
파일 향타 시 (반복타격 에너지)	향타 시 이음부 균열에 안전	① PC너트에 볼트 체결할 경우 타격 시 PC강봉에 향타에너지가 집중되어 PC강봉을 따라 수직 균열 발생시킴 ② 지중 관입부에서 발생한 균열은 확인 불가능함	반복타격으로 용접부의 균열발생우려. 향타 후에는 균열검사가 어려움	① 용접부에서 균열이 발생하는 사례는 거의 없음
심도 변화	대응 용이. 파일 Loss 최소화	① 선형 시추 조사를 실시하여 말뚝 길이를 사전에 결정함 ② 용접이음과 동일한 상황이므로 장점이 될 수 없음	대응 용이. 파일 Loss 불가피	① 선형 시추 조사를 실시하여 말뚝 길이를 사전에 결정함 ② 볼트수직이음과 동일한 상황이므로 단점이 될 수 없음
친환경/안전성	볼팅작업으로 친환경 안전성 확보	① 특별한 장점이 아님	감전 등 전기 안전 사고 발생 우려. 용접에 의한 불빛, 유해 가스 발생	① 통상적인 과업이며 문제점으로 보기에 타당하지 않음
쿠션재	슈 철판의 쿠션재 역할. 두부 파손 방지	① 마밀라 슈를 쿠션재로 사용하는 경우는 없음 ② 쿠션재는 사용해야 함	쿠션재 소요 폐기물 발생	① 말뚝 향타 시에는 쿠션재를 사용하는 것이 기본 절차임
시공 단가	-	① 206,154원/개 ② LH주택원가관리처 자료 (2017.11.13. 발행)를 참조하였음 ③ 5,157원 만큼 고비용임	-	① 200,997원/개 ② LH주택원가관리처 자료 (2017.11.13. 발행)를 참조하였음 ③ 5,157원만큼 저렴함
향타 시공 시 안전성	-	① 향타 시공 후 볼트 체결력 감소, 볼트 풀림 현상이 심각하게 발생함	-	① 없음



표 2. 볼트식 수직이음 공법과 용접이음방식의 비교

구분	신청 기술(건설신기술 712호); 볼트 수직이음 공법		용접식 연결 공법	
	국토교통과학기술진흥원 의견(2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾	국토교통과학기술진흥원 의견(2018.4.10.) ¹⁾	집필진의 분석 의견 ²⁾
이음 말뚝의 말뚝 성능 준수 여부	-	① 일체화 성능 만족하지 못함 ② 탄성 재료 성능 만족하지 못함 ③ 용접이음과 동등 이상의 성능 만족 못함	-	① 일체화 성능 만족 ② 탄성 재료 성능 만족
인발 성능	-	① 증거 자료 제시하여야 함	-	① 표준 시방으로 인정하므로 입증할 필요가 없음
수평지지력 성능	-	① 증거 자료 제시하여야 함	-	① 표준 시방으로 인정하므로 입증할 필요가 없음
내진성능	-	① 증거 자료 제시하여야 함	-	① 표준 시방으로 인정하므로 입증할 필요가 없음

비고 1) 2018년 4월 30일에 한국국토교통과학기술진흥원에서 조정식국회의원(당시 국토교통위원회 위원장이었음)실에 제출한 자료이며 '건설신기술 제712호 뉴스 보도 관련 내용 검토' (2018.4.10., 국토교통과학기술진흥원) 자료 중 5페이지에 있는 내용임
2) 집필진이 현장검증실험 결과 등을 분석하여 자체적으로 작성하였음

5. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 올바른 성능 검증 실험 방법론

볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 검증해야 할 사항은 2가지로 판단되었다. 첫째, 김명학의 연구(2018a; 2018b)에 따르면 직향타 또는 매입 시공 후에는 이음볼트를 손으로 풀어낼 수 있었고 이음볼트의 체결력이 80% 이상 저감되었고 이음볼트 또는 스프링와셔가 크게 회전되었고 이음볼트가 수직방향으로 변위하였고 이음볼트와 스프링와셔가 볼트수직이음구의 볼트구멍 속으로 함몰되었다는 점과 둘째, 집필진의 연구(김명학 & 최용규, 2018b; 김명학, 2018a; 2018b)에 따르면 볼트 수직이음 PHC말뚝의 이음말뚝의 3가지 기본 성능(일체화 거동, 탄성재료 거동, 용접이음과 동등 이상의 품질)에 크게 미달되었으므로 이음말뚝의 역할을 할 수 없었다는 점이었다.

이에 볼트 수직이음 PHC말뚝 개발자는 휨강도시험(그림 5 참조)만을 실시하여 휨파괴모멘트가 KS F 4306에서 제시하고 있는 기준값을 상회하고 있으므로 아무런 문제가 없다고 주장하고 있는 실정이었다. 휨강도시험은 볼트 수직이음 PHC말뚝이 이음말뚝의 성능을 준수할 때 실시할 수 있는 시험항

6. 시험방법					
(1) KS F 4306-2003					
7. 시험결과					
1) Ez Pile Connector D600					
시험항목	단위	기준치	시험방법	시험결과	비고
이음부의 휨 강도(균열)	kN·m	166.8 kN·m	(1)	172.9에서 균열발생	-
이음부의 휨 강도(파괴)	kN·m	250.2 kN·m	(1)	354.7에서 파괴발생	-

그림 5. 개발자가 제시하는 볼트식 수직이음 PHC말뚝의 유일한 검증 방법론

목 중의 하나일 뿐이며 이음말뚝의 성능에 미달될 때에는 실시하지도 않아야 하며 실시하더라도 아무런 의미를 가질 수 없는 실험 항목이었다.

볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 현장에서 현행 직항타 및 경타 시공법으로 시공한 후 이음부위가 드러날 때까지 굴착하여 측정 및 관찰해 보면 볼트 수직이음의 안전 여부를 명확하게 확인할 수 있으며 볼트 수직이음 PHC말뚝에 대하여 재하 단계별로 재하 및 제하 하는 휨 실험을 실시하면 이음말뚝의 성능을 만족하는지 여부를 명확하게 확인할 수 있다. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 올바른 시공 안전 성능 검증 방법론을 표 3에 요약하였다(김명학 & 최용규, 2018b).

표 3. 볼트 수직이음 PHC말뚝의 올바른 시공 안전 성능 검증 방법론(김명학 & 최용규, 2018b)

단계	문제점	검증 방안
시공 중	㉗ 이음볼트의 손풀림 상태 관찰 ㉘ 잔류 체결력 감소량 측정 ㉙ 수직변위 측정 ㉚ 회전각 측정 ㉛ 볼트 장력 감소량 측정 ㉜ 시공 전 또는 시공 후 볼트 및 스프링와셔가 볼트 수직이음구의 볼트체결 구멍 속으로 함몰되는 현상	<ul style="list-style-type: none"> • 10개 정도의 볼트 수직이음 PHC말뚝을 시공 • 시공 후 이음구 부위를 관찰할 정도까지 굴착하여 관찰 및 측정 실시
이음말뚝 자체	<ul style="list-style-type: none"> ① 이음말뚝의 기본 성능(일체화 거동, 탄성재료 거동, 용접이음과 동등이상의 품질 성능)에 미달된다. ② 따라서 볼트 수직이음된 말뚝은 말뚝이 될 수 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 하중을 단계적으로 재하 및 제하 하여 실험 결과를 분석(실험실에서 실시할 수 있으므로 추후 실시 가능)

6. 결론 및 제언

- (1) 우리나라에서는 용접이음을 표준으로 정하고 있으며 3개 국가 기준(KS F 7001, KS F 4306, KCS 11 50 15) 및 6개 전문시방서(고속도로전문시방서 EXCS 11 50 15, LH 전문시방서 23021, 서울시전문시방서 토목편 5-2, 철도건설공사 전문시방서 노반편 5-4, 항만및어항공사 전문시방서 KRCCS 67 56 15)에 상세하게 규정되어 있다.
- (2) 볼트식 이음의 경우 일본에서는 볼트식 수평이음인 JIS A 7201에 TP조인트(Triple Joint; 그림 1 참조)라는 명칭으로 등재되어 전체 말뚝이음의 95%이상을 볼트식 수평이음으로 시공하고 있다. 국내에서는 복합말뚝에 적용 가능한 볼트 수평이음방식이 개발되었으며 HCP, NCP, SCP공법이 특히로 등록되어 있다.
- (3) 현장 시공안전성능 검증시험에서는 시공 후 볼트 수직이음의 상태는 4가지 방법으로 확인하였다. 이음볼트의 손풀림(볼트풀림사례.avi) 발생, 이음볼트 체결력의 80% 이상 감소, 이음볼트의 수직변위 발생, 이음볼트의 회전각 발생을 관찰 또는 측정하였다. 추후 동영상상을 통하여 시공 후 이음볼트 및 스프링와셔가 볼트 수직이음구의 볼트체결 구멍 속으로 함몰되는 현상을 추가로 정밀하게 분석할 수 있었다.



(4) 볼트 수직이음 PHC말뚝의 경우 현장에서 현행 직항타 및 경타 시공법으로 시공한 후 이음부위가 드러날 때까지 굴착하여 측정 및 관찰해보면 볼트 수직이음의 안전 여부를 명확하게 확인할 수 있으며 볼트 수직이음 PHC말뚝에 대하여 재하 단계별로 재하 및 제하 하는 휨 실험을 실시하면 이음말뚝의 성능을 만족하는지 여부를 명확하게 확인할 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 김명학 (2018a), 확장판선단부착PHC말뚝 및 볼트수직이음PHC말뚝의 안전한 시공법 개발 프로젝트 최종보고서, 인제대학교 산학협력단, 2018. 9., pp. 1-341.
2. 김명학 (2018b), 확장판선단부착PHC말뚝 및 볼트수직이음PHC말뚝의 안전한 시공법 개발 프로젝트 최종보고서 부록, 인제대학교 산학협력단, 2018. 9., pp. A-1-1-A-13-48.
3. 김명학 & 최용규 (2018a), 볼트 수직이음 PHC말뚝과 용접이음 PHC말뚝의 이음부 거동 비교, 한국지반공학회 논문집, 제34권 제12호, 2018년 12월, pp. 107-119, ISSN 1229-2427.
4. 김명학 & 최용규 (2018b), 확장판 선단부착 PHC말뚝 및 볼트 수직이음을 사용한 PHC말뚝의 시공 중 건전성 확인을 위한 동재하시험의 적용성 및 변형시공법 PHC말뚝들의 올바른 검증시험에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제34권 제11호, 2018년 12월, pp. 115-131, ISSN 1229-2427.

[본 기사는 저자 개인의 의견이며 학회의 공식 입장과는 관련이 없습니다]