PHC말뚝의 새로운 이음방법 개발
Development of New Joining Method for PHC Piles

백규호[1], Kyu-Ho Paik,   이중희[2], Jung-Hee-Lee,   박용부[3], Yong-Boo Park

[1] 관동대학교 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Kwandong Univ.
[2] 한국주강(주) 기술개발팀장, Manager, Technical Development Team, Hankook Steel Co. Ltd.
[3] 대한주택공사 주택연구소 연구원, Researcher, Housing Research Institute, Korea National Housing Co.

SYNOPSIS : In soft grounds with deep bearing stratum, the PHC piles are generally joined by welding or prefabricated method. However, the existing joining methods have some problems in a side view of workability, quality and cost etc. In this study, a new joining method of PHC piles, which removes the problems of the existing methods, is developed. Static and dynamic load tests in fields as well as laboratory tests such as tensile and bending tests are conducted to investigate the workability and structural safety of PHC piles joined by the new method. The test results show that tensile and bending resistances of the joint part are higher than those of PHC pile itself. PHC piles with 400mm diameter are joined by the new method within 4 minutes while 25 minutes for welding method. Bearing capacities of the PHC piles joined by the new method are nearly the same as those of jointed PHC piles by welding method.

Key words : PHC pile, Joining method, Tensile test, Bending test, Field pile load test

1. 서 론

일반적으로 구조물의 기초로 사용되는 말뚝의 길이는 지반조건에 의해 결정된다. 지반강도가 양호하고 지지층의 심도가 얕은 곳에서는 말뚝의 시공길이가 짧아지는 반면, 지반강도가 작고 지지층의 심도가 깊은 연약지반에서는 말뚝의 시공길이가 매우 길어진다. 그러나 현재 생산되고 있는 고강도 콘크리트(PHC) 말뚝은 말뚝의 생산성과 운반성을 고려하여 1본의 최대 길이를 15m로 제한하고 있다. 따라서 지지층까지의 심도가 15m 이상인 지반에서 PHC말뚝을 구조물의 기초로 사용하기 위해서는 직경이 동일한 PHC말뚝을 서로 연결해서 시공하는 것이 불가피하다.

현재 국내·외에서 사용하는 PHC말뚝의 이음방법은 용접방식과 조립방식이 있다. 용접방식은 PHC말뚝의 단부에 부착된 금속판을 서로 용접함으로써 직경이 동일한 2본의 말뚝을 연결하는 방법이며, 조립방식은 말뚝의 단부에 부착된 특수한 형상의 금속판을 별도의 이음장치로 연결함으로써 2본의 말뚝을 연결하는 방법이다. 국내에서는 용접방식만을 사용하고 있는 반면, 일본에서는 2가지 이음방법을 모두 사용하면서 대구경 말뚝에는 주로 시공성이 우수한 조립방식을 더 많이 적용하고 있다.

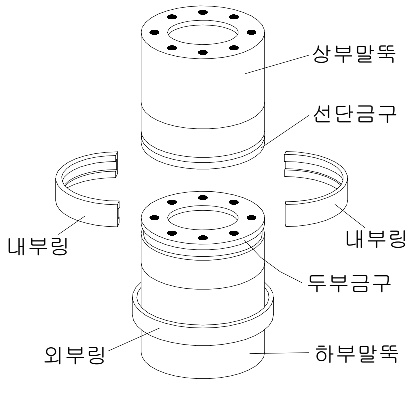
그러나 기존의 이음방법은 시공성과 품질, 경제성 등의 측면에서 많은 문제점들을 안고 있다. 용접방식의 경우에는 비나 눈이 내리거나 바람이 10 m/sec 이상의 속도로 불 때, 그리고 기온이 5℃ 이하일 때는 작업을 금지하고 있다(KS F 7001). 그리고 용접공의 숙련도에 따라 시공품질이 좌우되고 시공관

리가 어려우며, 품질검사를 위해서는 반드시 비파괴검사를 수행해야 하는 번거로움이 있다. 또한 용접에 소요되는 시간이 길어서 항타말뚝의 경우에는 공기를 장기화시키는 원인으로 작용하기도 한다. 특히 최근들어 말뚝의 이음과 관련한 시공단가가 저하되면서 현장에서 시공품질에 직접적으로 영향을 미치는 용접속도나 용접횟수 등의 작업규정들 조차도 잘 지켜지지 않음으로써 용접방식으로 연결된 말뚝의 이음부에 중대한 결함이 발생하는 경우가 적지 않게 발생하고 있다. 그리고 일본에서 사용되고 있는 조립식 이음방법인 PR(Pair Ring) Joint방식이나 TP(Triple Plate) Joint방식은 용접방식에 비해 시공시간이 짧고 시공품질이 균일하다는 장점이 있으나 시공비가 비싸고 시공이 그다지 손쉽지 않다는 문제점을 갖고 있다.

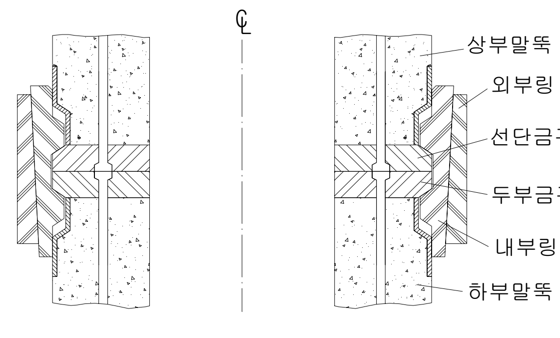
따라서 기존의 용접방식과 조립방식이 갖고 있는 문제점들을 제거함으로써 시공성과 경제성이 개선된 새로운 PHC말뚝 이음방법을 개발하였으며, 새로운 이음방법으로 연결된 말뚝의 이음부에 대하여 축인장시험과 휨강도시험을 수행함으로써 새로운 방법에 대한 구조적인 안정성을 조사하였다. 그리고 4본의 시험말뚝을 항타공법과 매입공법으로 2개 현장에서 말뚝의 이음방법별로 시공한 후 이들 시험말뚝에 대하여 말뚝재하시험을 수행함으로써 새로운 이음방법에 대한 현장시공성을 조사하고 말뚝의 이음방법에 따른 거동 특성을 비교하였다.

2. 기존의 조립식 말뚝 이음방법

용접을 사용하지 않고 조립식으로 PHC말뚝을 연결하는 방법 중 PR Joint방식은 그림 1에 보이는 바와 같이 2조각으로 구성된 내부링을 이용해서 하부말뚝의 두부금구와 상부말뚝의 선단금구에 부착된 사다리꼴 단면의 돌기를 연결시킨 후 유압시스템을 이용해서 외부링을 위로 밀어 올려서 내부링을 말뚝에 밀착시킴으로써 상부말뚝과 하부말뚝을 연결하는 것이다. 그러나 이 방법은 이음시공에 사용되는 내부링과 외부링의 제작비가 고가이고, 외부링의 조립을 위해서는 반드시 유압시스템이 필요하다는 단점을 안고 있다.



(a) 말뚝 이음방법

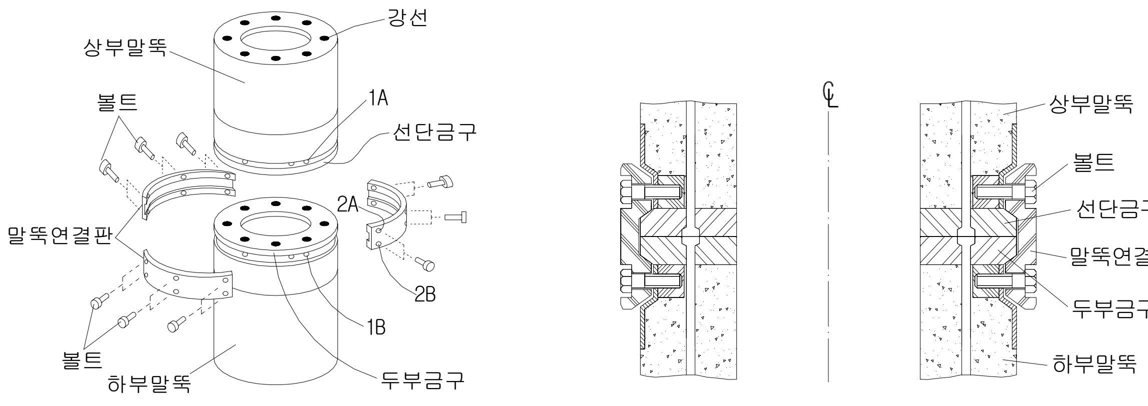


(b) 이음부 구조

그림 1. PR Joint방식에 의한 PHC말뚝의 이음

그리고 TP Joint방식은 그림 2와 같이 상부말뚝의 선단금구와 하부말뚝의 두부금구에 부착된 돌기들을 3조각으로 구성되는 말뚝연결판으로 연결시킨 후 말뚝연결판의 상·하부를 각각 선단금구와 두부금구에 볼트로 고정시킴으로써 상부 및 하부말뚝을 연결하는 방법이다. 이와 같은 시공을 위해서는 상부말뚝을 하부말뚝에 거치한 후 상부말뚝의 위치를 원주방향으로 미세하게 조정함으로써 선단금구와 두부금구에 설치된 볼트구멍(1A와 1B)을 말뚝연결판의 상부와 하부에 설치된 볼트구멍(2A와 2B)과 일치시켜야만 한다. 그러나 PHC말뚝의 중량이 매우 무겁기 때문에 말뚝연결판의 상·하부에 설치된 볼트구멍(2A와 2B)과 상부말뚝과 하부말뚝의 볼트구멍(1A와 1B)이 일치하도록 상부말뚝의 위치를 조정하는 작업이 쉽지 않다.

뿐만 아니라 이들 두 가지 이음방법에 사용되는 상부말뚝의 선단에는 상부 및 하부말뚝의 중심축을 일치시켜주기 위한 가이드링이 부착되어 있지 않다. 따라서 상부말뚝을 하부말뚝에 거치할 때 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축을 일치시키기 위해서 하부말뚝의 외벽에 별도의 가이드링을 설치해야 하며, 말뚝의 중심축이 일치된 후에는 가이드링을 다시 해체해야 하는 번거로움도 존재한다.



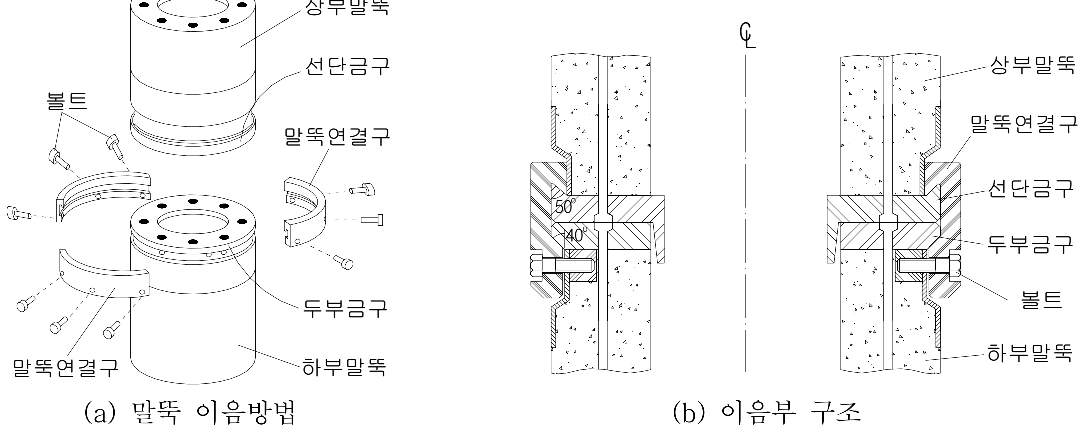
(a) 말뚝 이음방법 (b) 이음부 구조

그림 2. TP Joint방식에 의한 PHC말뚝의 이음

3. 새로운 이음방법

3.1 시공방법

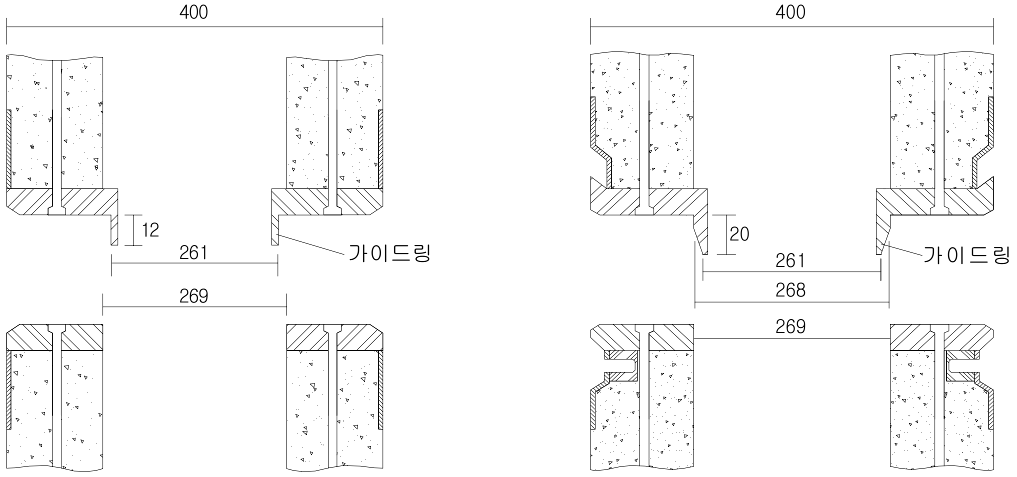
새로 개발된 이음방법은 그림 3에 보이는 바와 같이 상부말뚝의 선단금구와 하부말뚝의 두부금구에 성형된 폭 5mm의 돌기들을 3조각으로 구성되는 말뚝연결구의 상·하부에 부착된 돌기를 이용해서 연결한 후 말뚝연결구의 하부와 두부금구에 설치된 볼트구멍이 서로 일치하도록 말뚝연결구의 위치를 원주방향으로 조정한 상태에서 말뚝연결구의 하부를 하부말뚝의 두부금구에 볼트로 고정시키는 것이다. 이때 선단금구에 성형된 돌기의 윗면과 두부금구에 성형된 돌기의 밑면이 수평과 각각 40°와 50°를 이루도록 함으로써 상부말뚝이 하부말뚝에 거치되었을 때 선단금구와 두부금구에 성형된 돌기의 전체적인 형태가 테이퍼 형태(외곽부의 높이가 안쪽의 높이보다 2mm 작음)가 되도록 하였다. 그 결과 말뚝연결구의 하부에 체결되는 볼트를 강하게 조일수록 말뚝연결구가 말뚝의 표면에 밀착됨으로써 선단금구와 두부금구의 밀착도가 증대되도록 하였다.



(a) 말뚝 이음방법 (b) 이음부 구조

그림 3. 새로운 이음방법에 의한 PHC말뚝의 이음

그리고 말뚝을 구조적으로 안정하게 연결하기 위해서는 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축을 일치시켜야 하며, 이와 같은 중심축 일치작업을 간편하게 하기 위하여 일본과 달리 국내에서는 그림 4(a)에 보이는 바와 같이 상부말뚝의 선단에 직경이 일정한 가이드링을 부착하고 있다. 그러나 말뚝의 직경이 400mm인 경우 이 가이드링의 외경이 가이드링이 삽입될 하부말뚝 두부금구의 내경보다 8mm 작기 때문에 상부말뚝을 하부말뚝에 거치했을 때 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축이 최대 4mm까지 어긋날 수 있다. 따라서 별도의 작업을 통해서 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축을 일치시켜야만 한다. 그러나 새로운 방법에서는 말뚝의 중심축 일치 과정에서 발생하는 이와 같은 시공상의 번거로움을 제거하기 위하여 그림 4(b)에 보이는 바와 같이 시작부와 끝부분의 외경이 다른 경사진 형태의 가이드링을 말뚝의 선단에 부착하였다. 즉 직경이 400mm인 말뚝의 경우 상부말뚝의 선단에 시작부와 끝부분에서의 외경을 각각 261mm와 268mm인 가이드링을 부착하였다. 그 결과 상부말뚝에 부착된 가이드링의 시작부 외경(261mm)과 가이드링이 삽입될 하부말뚝 두부금구의 내경(269mm)간에 8mm의 공차를 확보함으로써 현행 용접방식에서와 같이 상부말뚝을 간편하게 하부말뚝에 거치할 수 있을 뿐만 아니라 상부말뚝의 거치가 완료되면 가이드링의 끝부분이 두부금구에 삽입되므로 별도의 작업이 없이도 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축이 0.5mm의 편차 내에서 일치하게 된다.



(a) 용접방식 (b) 새로운 방법

그림 4. 직경 400mm PHC말뚝의 이음방법별 가이드링의 형상 (단위: mm)

이상과 같은 특징을 갖는 새로운 이음방법으로 직경이 동일한 PHC말뚝을 연결하기 위해서는 먼저 하부말뚝의 두부금구 위에 상부말뚝을 거치해야만 한다. 이 과정에서 상부말뚝의 선단에 부착된 경사진 가이드링에 의해 상부말뚝과 하부말뚝의 중심축은 손쉽게 일치된다. 그리고 말뚝연결구의 상부돌기와 하부돌기를 각각 선단금구와 두부금구에 성형된 돌기와 결합시킴으로써 선단금구와 두부금구를 연결한 후 말뚝연결구 하부의 볼트 구멍이 두부금구에 설치된 볼트구멍과 일치하도록 말뚝연결구의 위치를 원주방향을 따라 조정해야 한다. 그런 후 마지막으로 말뚝연결구의 하부를 두부금구에 볼트로 체결함으로써 상부말뚝과 하부말뚝의 연결을 완료하게 된다.

3.2 특 징

새로운 이음방법은 PHC말뚝의 연결을 위해 용접을 사용하지 않기 때문에 기후조건과 무관하게 항상 일정한 품질로 시공하는 것이 가능하며, 말뚝연결구의 하부에 체결되는 볼트의 토크(torque) 확인을 통해서도 품질관리가 가능하므로 비파괴검사의 수행에 따른 추가비용의 발생을 막을 수 있다. 그리고 용접방식에 비해 시공이 빠르고 시공비가 저렴하며, 항타말뚝의 경우에는 말뚝의 연결에 소요되는 시간을 단축시킴으로써 항타장비의 시공효율을 향상시킴과 동시에 공기의 단축이 가능하다. 또한 말뚝의 직경이 커짐에 따라 이음시공에 소요되는 시간과 비용이 급격히 증가하는 용접방식과 달리 말뚝 직경이 증

가하더라도 이음에 소요되는 시공비와 시공시간이 크게 증가하지 않는다는 장점을 갖고 있다.

한편 기존의 조립방식인 PR Joint방식에 비해서는 말뚝연결장치의 제작비가 저렴하고, 이음시공 시 유압시스템을 사용하지 않기 때문에 시공이 간편하다는 장점을 갖고 있다. 그리고 말뚝연결판과 말뚝간의 조립을 위해 반드시 상부말뚝의 위치를 조정해야 하는 TP Joint방식과는 달리 말뚝연결구와 하부말뚝간에만 볼트를 체결함으로써 상부말뚝이 아닌 말뚝연결구의 위치조정을 통해서도 말뚝연결구와 말뚝간의 조립이 가능하다. 또한 TP Joint방식에 비해 말뚝연결장치의 구조가 간단해서 이음시공에 사용되는 볼트의 개수를 반으로 줄일 수 있고 말뚝연결장치의 제작비도 기존보다 저렴하게 할 수 있다.

4. 말뚝 이음부의 구조적 안정성 평가

새로운 이음방법으로 연결된 말뚝 이음부의 축인장내력과 휨내력을 측정하고, PHC말뚝 본체의 허용인장력과 휨모멘트에 해당하는 하중이 말뚝의 이음부에 작용했을 때 말뚝 이음부의 파괴 유무를 확인하기 위하여 직경이 400mm인 PHC말뚝을 이용하여 축인장시험과 휨강도시험을 수행하였다. 그리고 말뚝의 이음방법별 말뚝 이음부의 내력을 비교하기 위하여 용접방식과 TP Joint방식으로 연결한 말뚝 이음부에 대해서도 시험을 실시하였다.

먼저 축인장시험은 직경이 400mm인 상부 및 하부말뚝 시험체를 강재로 제작하고, 이들을 새로운 방법과 TP Joint방식으로 연결한 후 200ton 용량의 만능시험기를 이용해서 상부 및 하부말뚝 시험체에 인장력을 가하면서 하중단계별로 상부와 하부말뚝 시험체간의 변위를 측정하였다. 시험결과 그림 5에 보이는 바와 같이 축인장력이 120ton일 때 새로운 방법으로 연결된 상·하부말뚝 시험체간의 이격거리는 1.17mm로 매우 작았으며, 축인장시험이 완료된 후에도 상부 및 하부말뚝 시험체의 돌기부와 말뚝연결구, 그리고 말뚝연결구에 체결되는 볼트에는 어떠한 변형이나 파괴도 발생하지 않은 것으로 나타났다. 그리고 이러한 시험결과는 TP Joint방식으로 연결된 말뚝 이음부의 축인장력에 대한 거동과 비슷하였다. 따라서 직경이 400mm인 PHC말뚝의 경우 새로운 방법으로 연결된 말뚝 이음부의 축인장내력이 PHC말뚝 본체의 허용축인장내력(55.9ton)보다 크게 측정됨으로써 새로운 이음방법으로 연결된 말뚝에 인발하중이 작용하면 말뚝의 이음부보다 말뚝 본체가 먼저 파괴되는 것으로 나타났다.

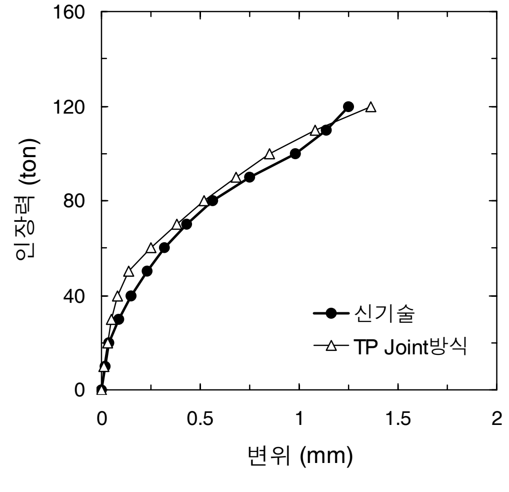


그림 5. 말뚝 이음부에 대한 축인장시험 결과

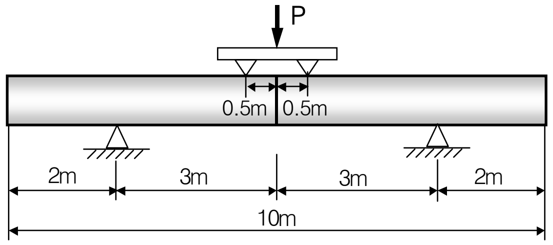


그림 6. 말뚝 이음부에 대한 2점재하방식의 휨시험

또한 새로운 이음방법으로 연결된 PHC말뚝 이음부의 휨모멘트에 대한 구조적인 안정성을 조사하고 말뚝의 이음방법별 말뚝 이음부의 휨거동을 비교하기 위하여 직경이 400 mm이고 길이가 5 m인 PHC 말뚝 2본을 새로운 방법과 용접방식 그리고 TP Joint방식으로 연결한 시험말뚝에 대하여 한국산업규격 KS F4306에서 규정하는 '2점 재하방식'으로 휨시험을 수행하였다(그림 6). 휨시험이 진행되는 동안 시험말뚝의 중심부에 가해지는 하중, P와 각 하중단계에서 시험말뚝 중심부의 침하량을 측정하였다.

그림 7은 다양한 이음방법으로 연결된 시험말뚝에 대한 휨시험의 결과를 나타낸 것이다. 시험결과 말뚝의 이음방법과 무관하게 시험말뚝에 6ton의 하중이 가해졌을 때 말뚝 본체에 균열이 발생하였고, 하중이 KS F4306에서 규정하는 균열 휨모멘트에 해당하는 크기인 6.28ton에 도달하였을 때 말뚝 본체에 발생한 균열의 폭이 급격히 커지는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 하중 단계에서도 이음방법에 따라 시험말뚝 중심부에서의 침하량이 약간의 차이를 보였을 뿐 전반적으로 시험말뚝의 휨거동은 비슷하였으며, 시험말뚝의 이음부에서는 구조적으로 어떠한 문제도 발생하지 않았다. 따라서 새로운 방법으로 연결된 PHC말뚝의 이음부는 용접방식으로 연결된 말뚝의 이음부와 거의 동일한 휨내력을 갖으며, 말뚝의 이음부에 휨모멘트가 작용할 경우 말뚝의 이음부보다 말뚝 본체가 먼저 파괴되는 것으로 나타났다.

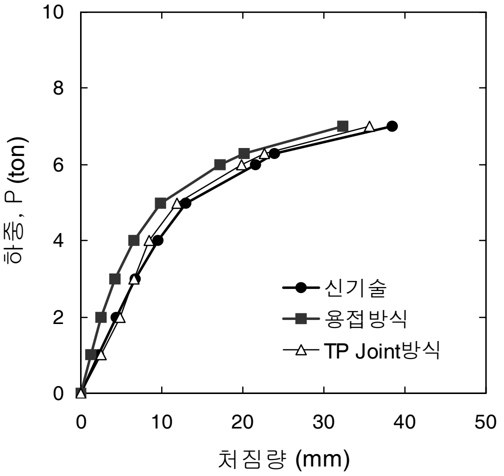


그림 7. 말뚝 이음부에 대한 휨시험 결과

5. 새로운 이음방법의 현장시공성과 이음말뚝의 지지력 특성

새로 개발된 이음방법에 대한 현장시공성을 조사하고 새로운 방법과 용접방식으로 연결된 말뚝의 지지력 특성을 비교하기 위하여 PHC말뚝을 항타공법과 매입공법으로 시공하는 2개 현장에서 시험시공을 수행하였으며, 시공이 완료된 시험말뚝에 대하여 동재하시험과 정재하시험을 실시하였다.

먼저 PHC말뚝을 항타공법으로 시공하는 '인천 삼산지구 ○○아파트 건설현장'은 지반이 자갈질 모래과 실트질 점토로 구성되어 있으며, N치가 50 이상인 풍화암은 10.9m 이하의 깊이에 존재하였다. 따라서 직경이 400mm이고 길이가 8m인 PHC말뚝 2본을 그림 8에 보이는 바와 같이 새로운 이음방법과 용

(a) 용접방식

(b) 새로운 방법

그림 8. 시험말뚝의 이음시공

접방식으로 연결한 후 램중량이 7ton인 햄머를 이용해서 각각 14m와 14.3m의 깊이까지 타입하였다. 그리고 타입된 시험말뚝에 대하여 곧바로 동재하시험을 실시하였으며, 그로부터 1주일 후에 인발재하시험을 수행하였다. 이때 재하(loading)과정에서 하중은 10ton씩 증가시켰으며, 각 하중단계별 말뚝의 변위는 말뚝에 대칭으로 설치된 2개의 LVDT에 의해 측정되었다.

그리고 말뚝을 암반용 굴착 비트인 T4를 이용해서 매입공법으로 시공한 '용인 신갈 △△아파트 건설현장'은 지반이 실트질 모래와 모래질 자갈로 이루어져 있으며, 풍화암은 5.5m 이후의 깊이에서 발견되었다. 본 현장에서도 '인천 삼산지구 현장'과 마찬가지로 직경이 400mm이고 길이가 8m인 PHC말뚝 2본을 새로운 방법과 용접방식으로 연결한 시험말뚝을 설계심도인 14.4m의 깊이까지 관입시켰다. 말뚝이 시공된 지 10일 후에 중량이 3ton인 햄머를 이용해서 동재하시험을 실시하였으며, 바로 이어서 수평재하시험을 실시하였다. 이때 재하과정에서 하중 증분은 1ton으로 하였으며, 가력방향으로 17cm와 37cm의 높이에 LVDT를 설치함으로써 각 하중단계별 수평변위와 경사변위를 측정하였다.

시험시공 결과 직경이 400mm인 PHC말뚝 2본을 연결하는데 있어서 용접방식은 KS F 7001의 규정을 준수하며 시공할 경우 이음시공에 25~30분이 소요된 반면, 새로운 이음방법은 약 3~4분만에 이음시공이 완료되었다. 따라서 새로운 방법으로 PHC말뚝을 연결하면 용접방식으로 말뚝을 연결할 때보다 작업성과 시공품질이 우수할 뿐만 아니라 이음에 소요되는 시간도 약 1/7 이하로 줄어들게 된다. 또한 항타공법으로 말뚝을 시공할 때 약 3cm 두께의 합판을 쿠션재로 사용한 결과 항타로 인한 하부말뚝 두부금구의 변형은 전혀 발생하지 않았으며, 새로운 방법에 의한 상부말뚝과 하부말뚝의 연결에 전혀 지장이 없는 것으로 나타났다. 그리고 표 1에 보이는 시험말뚝에 대한 동재하시험의 결과에서 보이듯이 새로운 방법과 용접방식으로 연결된 PHC말뚝의 지지력은 큰 차이를 보이지 않았다. 따라서 새로운 이음방법으로 연결된 PHC말뚝의 경우에도 말뚝이 용접방식으로 연결된 경우와 마찬가지로 동재하시험을 통해서 말뚝의 지지력을 예측하는 것이 가능한 것으로 나타났다.

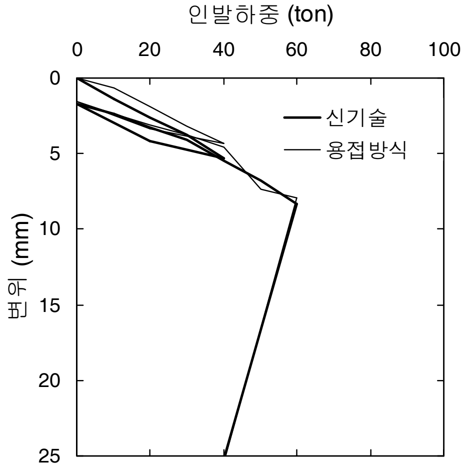
표 1. 이음방법별 PHC말뚝의 동재하시험 결과 (단위 : ton)

지지력	항타말뚝		매입말뚝	
	새로운 방법	용접방식	새로운 방법	용접방식
선단지지력	101.9	140.7	148.6	147.5
주면마찰력	189.0	89.5	91.4	119.5
전체지지력	290.9	230.2	240.0	267.0

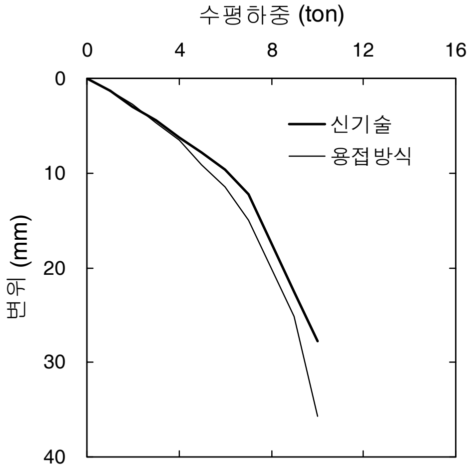
또한 시험말뚝에 대한 인발재하시험과 수평재하시험의 결과를 나타낸 그림 9에서 보는 바와 같이 이음방법에 따른 PHC말뚝의 인발지지력과 수평지지력의 차이는 거의 존재하지 않는 것으로 나타났다. 그러나 인발재하시험을 진행하는 과정에서 인발력을 60ton에서 70ton으로 증가시킬 때 새로운 방법과 용접방식으로 연결한 시험말뚝 모두 말뚝의 이음부가 아닌 본체에서 파괴가 발생하였다. 이것은 말뚝에 가해진 하중이 직경이 400mm인 PHC말뚝의 허용축인장력인 55.9ton을 넘어섰기 때문으로 판단된다. 또한 수평재하시험중에도 수평력을 10ton에서 11ton으로 증가시키는 과정에서 서로 다른 방법으로 연결된 시험말뚝 2본 모두 본체가 파괴되는 현상이 발견되었다. 따라서 새로 개발된 이음방법으로 연결된 PHC말뚝의 지지력은 용접방식으로 연결된 말뚝의 지지력과 유사하며, 이러한 말뚝의 이음부는 말뚝 본체보다 인발력과 휨모멘트에 대하여 구조적으로 더 안정한 것으로 나타났다.

6. 결 론

PHC말뚝의 연결을 위해 현재 국내에서 사용하고 있는 용접방식은 시공성과 품질, 경제성 등의 측면에서 많은 문제점을 안고 있으며, 이러한 문제점들을 해결할 수 있는 새로운 이음방법이 본 연구를 통해서 개발되었다. 그리고 새로운 이음방법에 대한 구조적인 안정성과 현장시공성, 이음시공된 말뚝의 지지력 특성 등을 규명하기 위하여 축인장시험과 휨시험, 그리고 각종 말뚝재하시험을 수행하였다.



(a) 인발재하시험



(b) 수평재하시험

그림 9. 시험말뚝에 대한 정재하시험의 결과

각종 실내시험 결과 새로운 이음방법으로 연결된 말뚝 이음부의 거동은 용접방식으로 연결된 말뚝 이음부의 거동과 큰 차이를 보이지 않았으며, 축인장력과 휨모멘트에 대한 말뚝 이음부의 내력은 말뚝 본체의 허용강도보다 큰 것으로 나타났다. 따라서 새로운 방법으로 연결된 PHC말뚝은 어떠한 하중조건 하에서도 말뚝의 이음부보다 말뚝의 본체가 먼저 파괴되는 것으로 나타났다. 그리고 직경이 400mm인 PHC말뚝을 새로운 방법으로 연결하며 용접방식으로 연결하는 경우에 비해 시공시간을 약 1/7로 줄일 수 있는 것으로 측정되었다. 또한 새로운 이음방법과 용접방식으로 연결된 항타말뚝과 매입말뚝에 대하여 동재하시험과 인발 및 수평 정재하시험을 수행한 결과 새로운 방법으로 연결된 말뚝에 대해서도 동재하시험을 통해 지지력을 예측하는 것이 가능하였으며, 말뚝의 이음방법에 따른 지지력의 차이는 존재하지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한국산업규격, **프리텐션방식 원심력 고강도 콘크리트 말뚝**, KS F4306
2. 한국산업규격, **원심력 콘크리트 말뚝의 시공 표준**, KS F7001
3. 한국주강, 대림콩크리트공업, 백규호(2004), **고리형 연결구와 경사진 가이드링을 이용한 고강도 콘크리트말뚝의 볼트식 연결방법**, 신기술 제425호 등록서, p. 123.
4. 大同コンクリート工業株式會社, **無容接継手杭** Pair Ring Joint, 카타로그, p. 10
5. 日本コンクリート工業株式會社, T·P Joint, 카타로그, p. 6