

PC말뚝 이음시공용 강관이음부의 적정규격 결정에 관한 연구

임 중 석

대한주택공사 주택연구소 선임연구원

한 완 군, 박 찬 국

대한주택공사 주택연구소 연구원

윤 태 정

선경건설주식회사 토목설계부 사원

정 상 화

서울대학교 대학원 공과대학 토목공학과 공학석사

ABSTRACT

The jointing method of PC pile installation, which utilizes steel sleeve, is most popular for the deep bearing stratum(deeper than 15m) or the irregular bearing stratum depths. However, this method has some difficulties in safety because there is no optimum standards of steel sleeve.

This research attempts to determine the optimum standard of steel sleeve for $\phi 350\text{mm}$ PC pile, which is most widely used, through bending moment test designated by KS and numerical analysis using finite element method.

According to the results, the optimum length of steel sleeve is three times longer than diameter of pile, and the thickness of steel sleeve is more than 2.5mm.

1 . 서 론

현재 국내에서 행해지는 말뚝기초공사에서는 공장에서 생산된 철근콘크리트말뚝(프리텐션방식 원심력 프리스트레스트 콘크리트말뚝, 이하 ' PC말뚝 '이라 한다)을 항타기로 타입하는 방법을 많이 사용하고 있다. 이 방법은 비교적 확실하고 간단하면

서 많은 경험이 축적되어 있다는 장점이 있다.

그러나 현재 국내에서 생산되는 PC말뚝은 최대길이가 15m에 불과하므로 깊은 매립지나 기타 특수한 지반과 같이 지지층까지의 깊이가 15m를 초과하는 경우에는 사용이 곤란하다. 또한 지반조사결과가 부정확하거나 지지층까지의 깊이변화가 심한 경우 또는 말뚝제품의 수급이 용이하지 않은 경우에는 이미 반입된 말뚝이 지지층까지 도달하지 않는 경우가 종종 발생한다.

이 때에는 [그림 1]과 같은 강관이음부를 이용하여 2개 이상의 말뚝을 이어서 시공하고 있으나 아직 이에 관한 적정규격이 정립되어있지 않은 관계로 현장에 따라 제각기 다른 제원의 강관이음부를 사용하고있는 실정이다.

외국의 경우, 일본에서는 강관이음부와 함께 말뚝내부를 보강하여 사용하므로¹⁾ 강관이음부는 단지 상하말뚝의 균형을 유지해주는 역할만을 한다. 영국의 경우에는 길이가 말뚝지름의 4배, 두께가 10mm 정도인 강관이음부를 사용하도록 제시되어있으나²⁾ 이 경우의 말뚝은 속이 채워져있으므로 우리 실정에는 잘 맞지 않는다.

따라서 본 연구에서는 해석 및 실험을 통해 보통의 PC말뚝의 이음시공에 사용할 수 있는 강관이음부의 적정규격을 제시하고자 한다. 여기서는 현재 가장 널리 쓰이는 $\phi 350\text{mm}$ A형 PC말뚝을 대상으로 하였다.



(a) 측면

(b) 내부

[그림 1] 강관이음부

2 . 강관이음부의 조건

말뚝은 운반, 보관, 시공 및 거동시에 손상을 받지 않아야 한다. PC말뚝의 경우는 주로 타입공법으로 시공되며 시공시의 응력이 기타의 경우보다 월등히 크므로 이 때의 응력을 기준으로 제작된다. 말뚝의 이음부는 운반 및 보관시에는 관계없으나 시공 및 거동시에는 말뚝과 일체이므로 이 때에는 말뚝에 준하는 강도를 가져야 한다. 따라서 PC말뚝의 경우 이음부의 강도는 말뚝과 동등 이상이어야 하며 이것은 강관이음부를 포함한 말뚝이음부의 조건이 된다^{3), 4), 5)}.

이음부는 압축, 인장 및 휨강도 등이 말뚝본체와 동등하거나 그 이상의 강도를 가져야 한다. 이들 중에서 압축강도는 말뚝에 특별한 이상이 없이 시공되었다면 이음이 없이 시공된 말뚝과 다를 바가 없으므로 달리 고려할 필요가 없다. 또한 인장강도는 현재의 상태로는 확보할 방안이 없으므로 설계 및 시공시 고려할 수 있는 별도의 대책을 수립하여야 한다.

이음부에 작용하는 여러가지 외력 중에서 휨은 타입시 자중과 편심타격 등으로 인하여 발생하며 설치 후에도 주변지반의 굴착이나 성토, 풍하중 등에 의하여 발생한다. 따라서 본 연구에서 검토중인 강관이음부에서도 가장 취약할 것으로 예상되는 휨강도에 대해서 충분히 검토해야 할 필요가 있다. 기타 파일의 이음부가 갖추어야 할 여러가지 강도는 앞의 3가지가 확보된다면 저절로 이루어진다고 보아 본 연구에서는 별도로 고려하지 않기로 하였다.

강관이음부의 휨강도기준으로 삼을 수 있는 것은 말뚝의 파괴모멘트와 균열모멘트의 2종류가 있다. 본 연구에서는 그 중 균열모멘트를 기준으로 삼았다. 균열모멘트를 기준으로 삼은 이유는 두가지 정도로 요약할 수 있는데, 첫째는 파일에 작용하는 외력을 사용하중개념으로 설정하였기 때문이다. 즉, 파일이 균열 이후에 받는 외력은 파일의 사용에 있어서 별다른 의미가 없다. 따라서 임의의 두께의 강관이음부에 파일의 균열모멘트로 인한 응력이 발생했을 때 재료의 강도가 이를 견딜 수 있으면 그 이음부는 사용가능한 것으로 인정한다. 이것은 허용응력에 의한 방법을 채택한다는 의미이고 이 때의 하중으로는 균열모멘트가 적합하다. 둘째, 전산해석시 선형해석을 수행하기 위해서이다. 이것은 극한모멘트를 기준으로 전산해석을 수행할 경우에는 재료비선형해석을 해야만 하는데 이것은 모델링작업이 힘들고 수행시간이 상당히 걸리므로 선형해석으로 목적을 달성할 수 있으면 그 방법을 사용하는 것이 편리하기 때문이다.

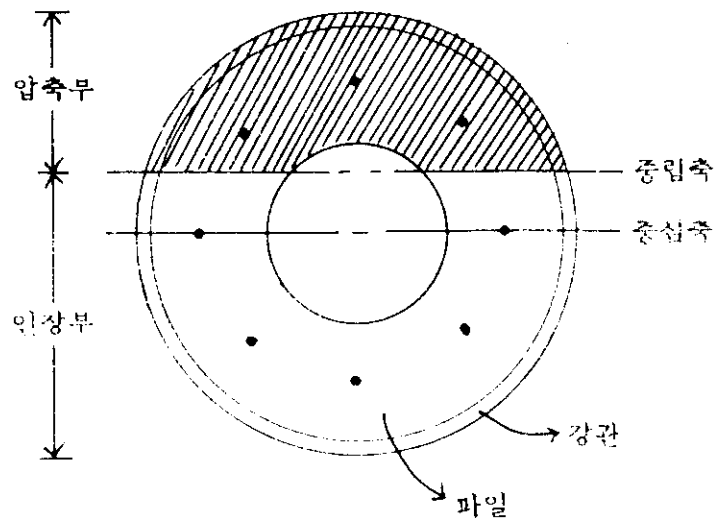
본 연구에서 대상으로 한 $\phi 350\text{mm}$ A형 PC말뚝의 균열모멘트는 $3.5\text{t}\cdot\text{m}$ 이며⁶⁾, 사용된 콘크리트의 허용휨압축응력 $\sigma_{ca} = 200\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고 일축인장강도 σ_{tui} 는 $44\text{kg}/\text{cm}^2$ 이다(설계기준강도 $\sigma_{ck} = 500\text{kg}/\text{cm}^2$)²⁷⁾. 강관이음부의 재료는 용접구조용압연강재 SWS41(허용응력 $\sigma_{sa} = 1,300\text{kg}/\text{cm}^2$)을 사용하기로 한다.

3 . 적정두께의 결정

본 절에서는 이상의 기준에 의거한 정역학적 해석을 수행하여 PC말뚝의 균열모멘트에 저항할 수 있는 강관이음부의 최소두께를 산정하고자 한다.

이음부에서는 강관과 말뚝이 일체로 거동한다. 따라서 휨모멘트 작용시 이음부 단면은 [그림 2]와 같은 응력상태에 있다. 이 때 인장측에 있는 파일단면은 분리된 상태이므로 인장에 전혀 저항하지 못하고 강관이음부만이 저항하며, 압축측에서는 파일과 강관이음부가 저항한다. 이와 같은 상태를 설정하고 강관이음부의 두께를 변화시키면서 강관이음부와 파일의 허용응력조건을 만족시키는 최소의 강관두께를 결정하였다.

계산결과, 균열모멘트를 가했을 때 견딜 수 있는 강관이음부의 두께는 약 2.5mm 정도였다.



[그림 2] 휨모멘트 작용시 이음부단면의 응력상태

4 . 적정길이의 결정

4 . 1 유한요소법에 의한 방법

강관이음부의 두께가 일정하고 말뚝의 재질이 균일하다면 강관이음부의 길이가 길어질수록 이음부에 발생하는 응력은 작아질 것으로 예상된다. 따라서 강관이음부의 길이를 변화시키면서 그 때 강관 및 말뚝에 작용하는 응력을 검토하고 그 값이 허용치 이내일 경우의 길이를 구한다.

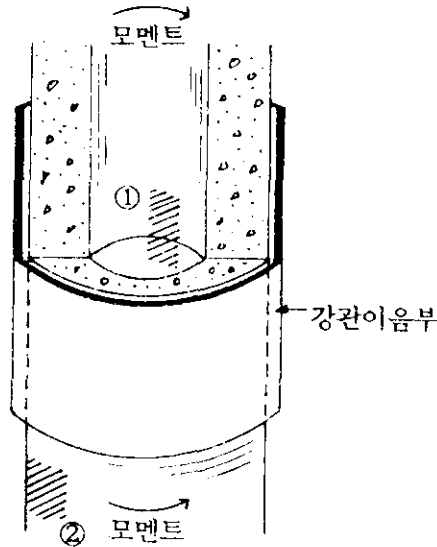
본 연구에서는 유한요소법의 적용을 위해 프로그램 ANSYS(engineering ANalysis SYStem)를 사용하였다. 그 이유는 본 연구와 같이 말뚝과 강관이 맞닿은 경우를 고려하는 경우에는 본 프로그램이 가장 적절하다고 판단하였기 때문이다.

콘크리트구조물을 정확하게 해석하기 위해서는 비선형모델을 선택하는 것이 일반적이나 본 연구의 경우는 단순히 강관이음부의 길이변화에 따른 취약부의 균열여부만을 인장강도를 기준으로 하여 판별하고자 하는 것이므로 해석상 편의를 위해 선형모델을 채택하였다.

콘크리트와 강관이음부 사이의 조건은 두가지 경우로 고려할 수 있다. 첫째는 콘크리트와 강관이음부가 완전히 밀착되어 일체로 거동한다고 고려하는 것으로서, 에폭시 모르타르나 팽창제 등으로 보강된 경우에 해당된다. 또 하나는 콘크리트와 강관 사이에 미세한 틈이 존재한다는 것으로서, 힘 등에 의해 변위가 발생하여 두부분이 접촉하게 되면 압축력을 전달할 수는 있으나 인장력은 전달하지 못한다고 생각하는 것이다. 이음부를 해석하는데 있어서 실제와 좀더 유사한 경우는 후자로 볼 수 있다. 이를 위해서 ANSYS는 ' interface '라는 요소를 제공한다. 따라서 본 유한요소해석에서는 콘크리트와 강관이음부 사이의 요소를 후자의 경우로 가정하였고, 이 경우 interface요소를 규정해 주기위한 real constant들은 대표적인 값들을 사용했다.

이와 같은 조건들 하에서 강관이음부의 길이를 말뚝지름 D의 2배, 3배, 4배로 각각 변화시켜가면서 말뚝과 강관의 응력이 인장강도 이하로 되는 경우를 확인하였다. 즉, 어떤 길이의 강관을 사용한 이음부에 균열모멘트를 재하했을때 말뚝과 강관의 응력이 허용치 이내이면 그 길이의 강관을 사용한 이음부는 사용가능한 것으로 인정한다. 여기서 강관의 두께를 4mm로 했는데, 강관의 응력은 강도에 훨씬 못 미치므로 별 영향이 없다.

전산해석을 수행한 결과 힘에 대해 취약한 부분이 2군데 나타났다. 그것은 이어지는 두개의 파일이 맞닿는 부분의 내부([그림 3]의 ①부분)와 강관이음부의 양단에 접한 콘크리트부분([그림 3]의 ②부분)이다. 해석결과를 분석해보면 이상의 두부분에 속한 요소들의 인장 및 압축응력이 다른 부분의 인장 및 압축응력에 비해 월등히 크다는 것을 알 수 있다.



[그림 3] 이음파일의 취약부

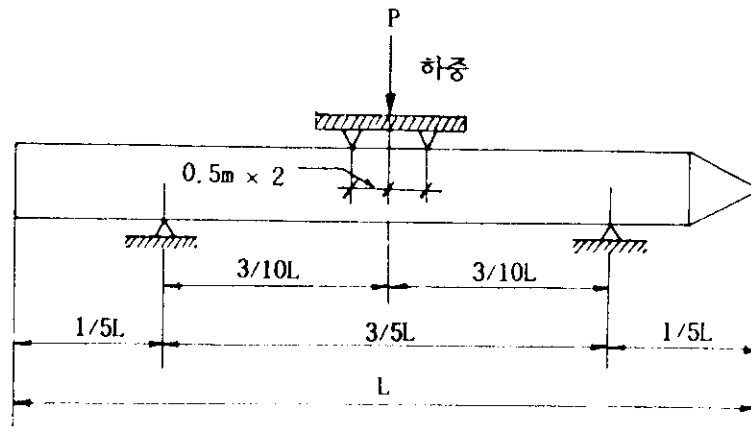
한편 강관이음부의 길이가 길어짐에 따라 두부분의 인장응력의 변화는 다르게 나타난다. 즉, 두부분 모두 강관이음부의 길이가 길어짐에 따라 휨응력이 줄어들기는 하지만 ①부분은 응력의 감소율이 작은 반면 ②부분은 급격히 감소한다. 따라서 강관이음부의 길이의 결정에 있어서는 ①부분의 응력상태가 관건이 될 것이다.

강관이음부의 길이가 2D(700mm)인 경우는 최대 48Kg/cm²의 응력이 발생하여 허용응력을 초과한다. 강관이음부의 길이가 3D(1,050mm)인 경우는 균열이 발생하지는 않으나 최대 43Kg/cm²의 응력을 보이므로 콘크리트의 인장강도에 근접한다는 것을 알 수 있다. 강관이음부의 길이가 4D(1,400mm)인 경우는 균열이 발생하지 않는 것으로 나타났다.

이상의 내용을 종합해보면 이음부의 길이가 증가할수록 말뚝본체에 발생하는 응력의 크기가 줄어들을 알 수 있다. 해석결과에 의하면 강관이음부의 길이가 3D 이상이면 KS에 규정된 균열모멘트를 작용시켜도 균열은 발생하지 않으나 강관이음부의 길이가 3D인 경우 이음부 중앙 내부의 인장응력이 균열응력에 접근되어 있다.

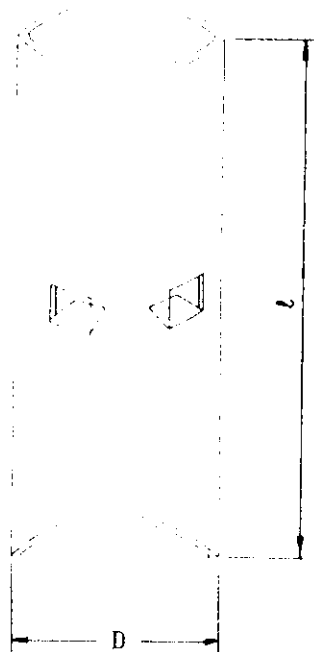
4. 2 휨강도시험에 의한 방법

강관이음부의 길이에 따른 이음말뚝의 휨강도를 측정하기위해서 KS F 4303에 의거하여 휨강도시험을 수행하였다([그림 4] 참조)⁶⁾. 이 때도 앞서 수행한 유한요



[그림 4] 휨강도시험장치

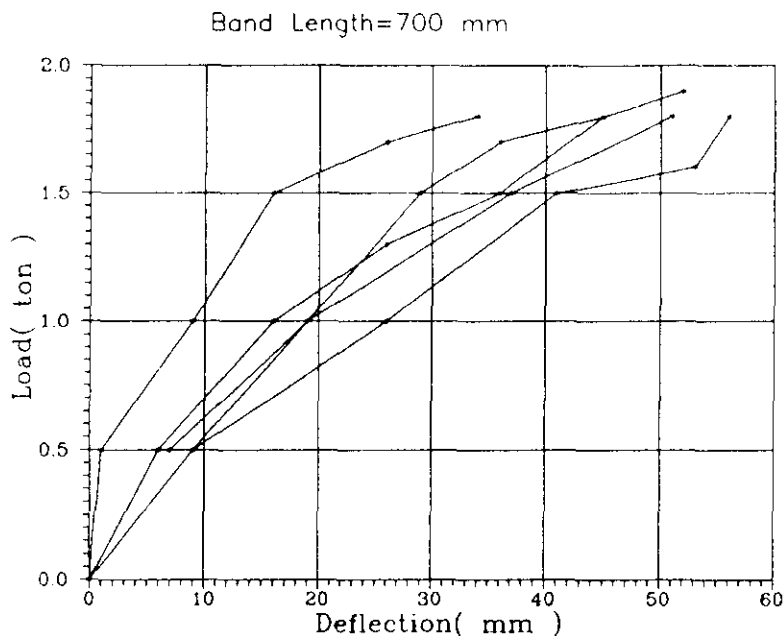
소해석과 마찬가지로 강관이음부의 길이는 각각 2D, 3D, 4D로 제작, 시험하였다. 본 시험에서는 이러한 이음파일에 대한 하중, 모멘트, 처짐량 등의 휨강도시험 결과들을 비교, 분석해서 KS의 휨강도규정을 만족시키는 적절한 강관이음부의 길이를 결정하고자 한다. 이음말쪽의 휨강도시험은 지간의 중앙에 이음부분을 일치시키고 보통의 휨강도시험과 동일하게 행한다.



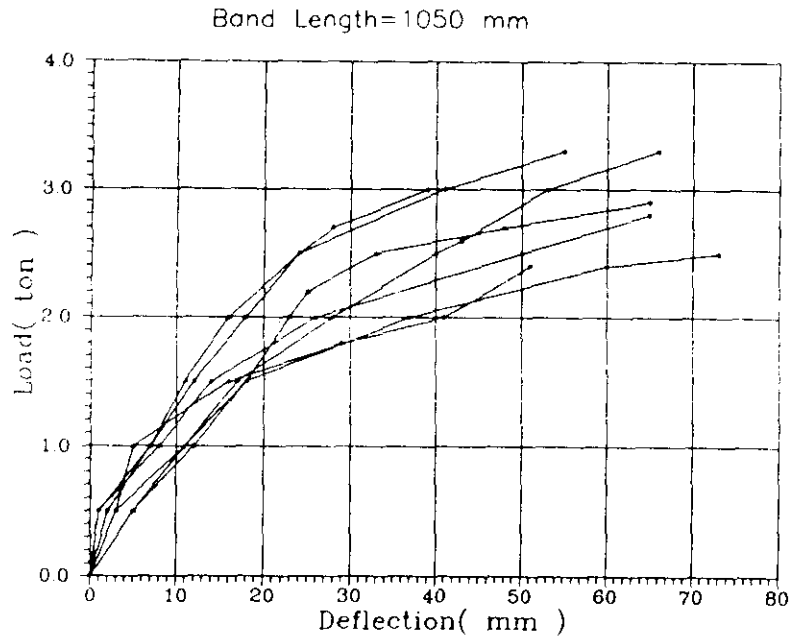
[그림 5] 강관이음부

강관이음부([그림 5] 참조)의 두께는 6mm로 하였다. 두께를 6mm로 한 특별한 이유는 없으며 단지 강관의 수급상 이렇게 된 것이다. 어차피 강관의 용력은 허용치에 훨씬 못 미치므로 이 두께로서도 시험의 목적을 달성하기에는 별 문제가 없다고 본다. 내경은 360mm로 하였다. 말뚝의 외경보다 10mm 크게 한 이유는 이음시 작업의 용이함을 위한 것이다. 시험시 강관이음부의 길이가 2D인 경우에는 재하장치가 직접 파일 본체를 누르게 되어 재하점에 국부파괴를 일으킬 우려가 있으므로 이러한 경우에는 재하점 간격을 360mm로 좁혀서 강관을 누르도록하였다.

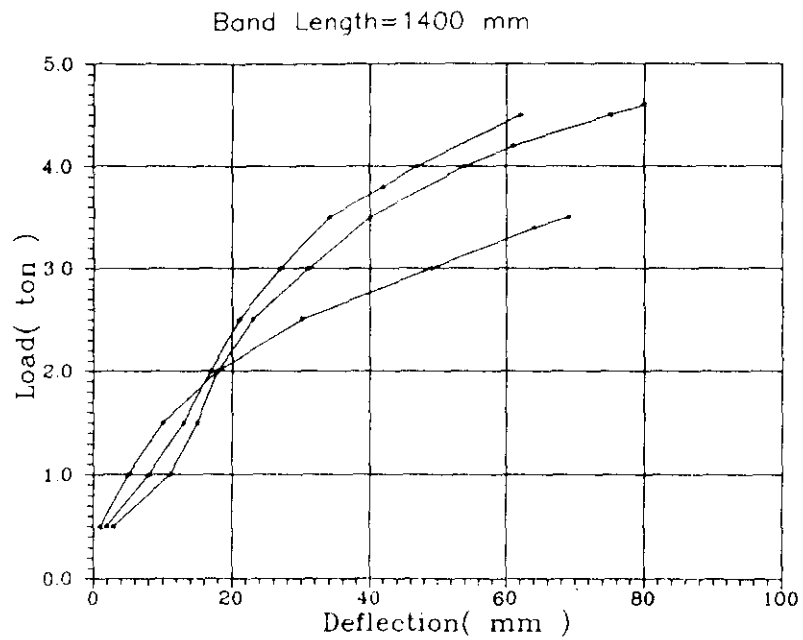
힘강도시험결과 강관이음부의 길이별 하중과 처짐량은 [그림 6]~[그림 8]과 같다. 전산해석의 결과를 참조해보면 균열은 이음부내 콘크리트의 내부에서 처음으로 발생하게 된다. 따라서 KS규정에서는 눈으로 균열을 확인하여 균열하중을 구하는 것으로 되어 있지만 본 연구에서는 하중-침하량 곡선에서 최대변곡점을 구하여 항복하중을 구하고 이 때의 모멘트를 구하여 이 값을 균열모멘트로 하였다.



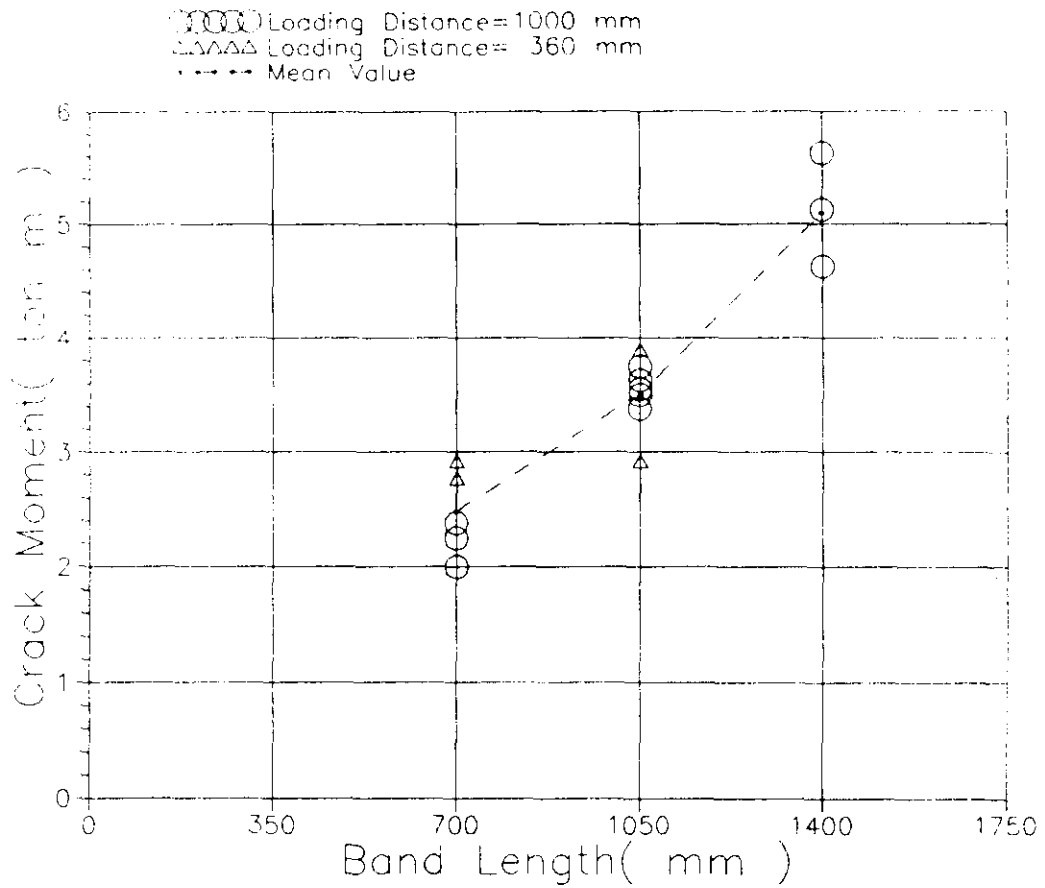
[그림 6] 하중-처짐량 곡선(강관이음부의 길이 : 700mm)



[그림 7] 하중-처짐량 곡선(강관이음부의 길이 : 1,050mm)



[그림 8] 하중-처짐량 곡선(강관이음부의 길이 : 1,400mm)



[그림 9] 이음부길이와 균열모멘트의 관계

강관이음부의 길이에 따른 균열모멘트를 총괄하여 [그림 9]에 나타내었다. 여기서 알 수 있는 바와 같이 이음파일의 균열모멘트는 이음부의 길이에 거의 비례하는 양상을 보인다. KS F 4303에서는 $\phi 350\text{mm}$ A형 PC말뚝의 균열모멘트를 $3.5\text{t}\cdot\text{m}$ 로 규정하고 있으므로 안전율을 고려하지 않을 경우 강관이음부의 길이가 $3D$ ($1,050\text{mm}$) 이상일 때 KS규정을 만족시킬 수 있다. 이 결과는 앞의 유한요소해석결과와 잘 일치하고 있다.

5 . 결 론

이상의 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1 . 강관이음부를 이용한 PC말뚝의 이음시공시 말뚝연결부위의 내부와 강관이음부 양단에 인접한 말뚝외부의 응력이 크게 나타난다.

2 . $\phi 350\text{mm}$ A형 PC말뚝의 이음시공시 강관이음부의 두께는 2.5mm 이상, 길이는 1,050mm(파일지름의 3배) 이상이 되어야 한다.

강관이음부를 이용하여 실제로 현장에서 PC말뚝을 이음시공하는 경우에 있어서는 이음으로 인한 감소율, 강관의 부식 영향, 이음부의 위치, 수직성의 유지 및 항타로 인한 연결부의 손상 등을 고려하여야 할 것이다.

* 참고 문헌

- 1 . 正林出版社 編輯部 譯(1983), 最新콘크리트工法 핸드북, 서울, pp.104~106.
- 2 . Tomlinson, M. J.(1987), *Pile Design and Construction Practice*, A Viewpoint Publication, London, pp.260~261.
- 3 . Canadian Geotechnical Society(1985), *Foundation Engineering Manual*, 2nd Ed., p.317.
- 4 . Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F. and Elson, W. K.(1985), *Piling Engineering*, Surrey University Press, London, pp.30~33.
- 5 . Henry, F. D. C.(1986), *The Design and Construction of Engineering Foundations*, 2nd Ed., Chapman and Hall, pp.662~664.
- 6 . 한국공업진흥청(1989), 프리텐손방식 원심력 PC말뚝(KS F 4303), 서울, pp.1~8.
- 7 . 건설부(1982), 콘크리트 표준시방서, pp.57~59.