

콘크리트 말뚝의 缺陷發生事例

崔 在 眞

〈檀國大 土木工學科 講師〉

1. 序 論

콘크리트 말뚝은 대부분 遠心力을 이용하여 제조하며 遠心力 鐵筋콘크리트 말뚝(RC말뚝)과 프리텐션 또는 포스트텐션 방식의 遠心力 프리스트레스트 콘크리트 말뚝(PC말뚝)이 主種을 이루고 있다. 외국에서는 콘크리트의 壓縮強度가 800kg/cm² 이상되는 遠心力 高強度 프리스트레스트 콘크리트 말뚝(PHC말뚝)이 개발되어 그 生産實績이 급격히 증가하는 추세에 있다.

이들 말뚝은 建築基礎, 橋台基礎, 橋脚基礎, 탱크基礎, 建築柱材 등 많은 용도로 사용된다.

말뚝에 있어서 발생하는 缺陷의 종류는 養生課程中の 龜裂, 콘크리트 표면의 일부가 터져 나가는 Pop-out현상, 부적절한 프리스트레싱으로 인한 彎曲 등을 비롯하여 打擊中 말뚝의 머리부분이나 先端部가 파손되는 예가 있는가 하면 중간부위가 절단되거나 쪼개지는 등의 극단적인 경우도 있다.

이러한 缺陷의 예를 살펴 보는 것은 재발을 방지하고 缺陷發生時 그 원인을 밝히는 데 참고가 될 것으로 생각되기 때문에 문헌에 보고

된 내용을 정리하여 그 몇가지 事例를 기술하였다.

2. 콘크리트 말뚝의 製造工程概要

콘크리트 말뚝은 속이 빈 원통형의 柱體와 先端部 또는 이음부로 되어 있으며 先端部는 슈(shoe)를 붙인 것이 많다. 이러한 RC말뚝과 PC말뚝의 製造工程의 예를 나타낸 것이 그림-1과 그림-2이다.

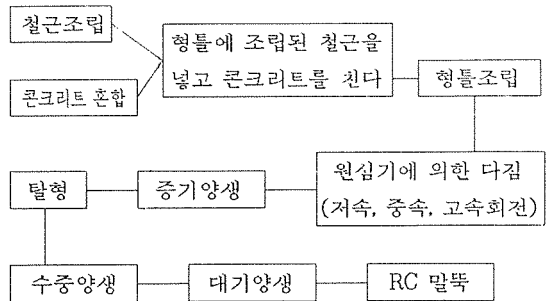


그림-1. RC 말뚝의 제조과정

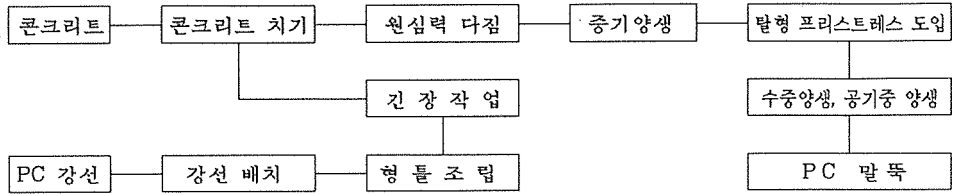


그림 2. PC 말뚝의 제조공정(프리텐션 방식)

成形方法으로는 콘크리트를 친 후 형틀 그대로 遠心機에 정지하여 회전시킴으로써 콘크리트는 다져진다. 이때의 遠心力 f 는 다음식으로 계산되어 重力加速度 g 의 배수로 표시된다.

$$f = m \frac{(2\pi rn)^2}{r} \cdot \frac{1}{mg} = \frac{4r\pi^2 n^2}{g}$$

- 여기서, r : 회전반지름(cm)
- n : 회전속도(rps)
- g : 980cm/sec²
- m : 질량

遠心力 成形은 보통 低, 中, 高速度의 3단계로 행한다. 저속에서는 콘크리트를 같은 두께로 균일하게 하고 中·高速에 의해 이것을 다진다.

遠心力은 회전속도의 제곱에 비례하므로 속도를 높이면 다지기의 효과는 증가한다. 그러나 너무 지나치게 高速으로 회전시키면 재료가 분리하게 된다. 일반적으로 遠心力 成形에서의 遠心力과 回轉時間은 표-1과 같다.

한편 말뚝 제조용 콘크리트에 대하여 한국 공업규격은 標準養生으로 材齡28日 壓縮強度가 RC말뚝의 경우 400kg/cm² 이상, PC말뚝의 경우 500kg/cm² 이상이며 프리스트레스를 도입할 때 콘크리트의 壓縮強度는 도입된 프리스트레스의 3배 이상, 250kg/cm² 이상으로 규정하고 있다. 참고로 PC말뚝의 콘크리트 配合例를 들면 표-2와 같다.

표-1. 遠心力 成形에서의 遠心力과 回轉時間

말뚝의 바깥지름 (mm)	원심력 다짐					
	저속		중속		고속	
	원심력 (g)	회전시간 (분)	원심력 (g)	회전시간 (분)	원심력 (g)	회전시간 (분)
소형 300~450	2~5	1~2	10~15	2~5	25~35	4~8
중형 500~800	2~5	2~4	10~15	5~10	25~35	5~10
대형 1000 이상	2~5	4 이상	10~15	10 이상	25~35	10 이상
평균	3		12		30	

표-2. PC 말뚝의 콘크리트 配合例

굵은 골재 최대치수(mm)	슬럼프 (cm)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위재료량 (kg/m ³)				
				물	시멘트	잔골재	굵은골재	혼화제
20	4~10	37~42	37~42	160~180	430~480	670~740	990~1100	감수제 사용 또는 사용 없음

3. 말뚝의 製造過程中 발견된 缺陷

3.1 Ring狀 龜裂

RC 말뚝 제조공장에서 常壓蒸氣養生을 한 후 탈형한 제품에 Ring狀 균열이 여러 곳에서 발견되었다. 균열은 그림-3에 보인 바와 같이 斷續적으로 거의 전체 둘레에 걸쳐 발생된 경우도 있다. 균열폭은 0.05~0.1mm 정도로 그 중에는 같은 위치의 내부에도 균열이 발생된 곳이 있다.

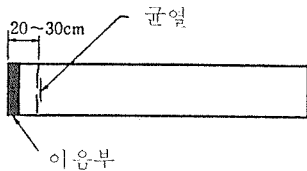


그림-3. 龜裂發生狀況

이 공장에는 養生室이 9개가 있었는데 그 중에서 한개 양생실의 제품에서만 문제가 발견되었기 때문에 蒸氣養生方法에 잘못이 있었던 것으로 보인다. 또한 조사결과 1시간마다 측정된 養生室의 온도는 蒸氣養生 개시후 1시간 이내에 이미 65°C가 되어 있었으며 前置時間이 지나치게 지연된 사실도 밝혀졌다. 결국 前置時間 24시간 이상된 콘크리트를 급속히 昇溫시켜 養生함으로써 熱傳導性이 좋은 鋼製형틀이 室溫에 따라 급격히 팽창되어 콘크리트에 균열이 발생된 것으로 판단된다. 이 문제가 발생한 것을 12월로서 기온이 낮고 養生을 개시할 시점의 형틀 온도도 매우 낮았으며 養生擔當者는 前置時間이 충분하기 때문에 급속히 온도를 상승시켜도 문제가 없다고 판단한 것이었다.

이것을 확인하기 위하여 시험한 결과가 표-3이다. 이 결과에서도 前置時間과 昇溫時間에 대한 규정을 잘 지키는 것이 龜裂防止를 위하여 매우 중요함을 보여 주고 있다.

표-3 龜裂再現實驗結果

No	前置時間(hr)	昇溫時間(hr)	균열폭(mm)
1	2	25	없음
2	2	0.5	없음
3	24	25	0.001
4	24	0.5	0.01

3.2 Pop-out 現象

오오토클레이브 養生後의 말뚝 표면이 몇군데 터져나간 것이 발견되었는데 이 Pop-out 부분은 지름이 약 10cm, 깊이 1.5cm 정도로서 중심부는 흰색을 나타냈다. 떨어져 나간 콘크리트 조각을 보면 골재가 破斷된 상태이기 때문에 시멘트풀과 골재와의 부착은 양호하며 콘크리트의 품질에는 문제가 없는 것으로 판단되었다. 흰색을 띤 결부분은 粉末狀이었으나 다른 부분은 모두 단단한 상태였다. 이러한 상황을 종합해 볼 때 이 Pop-out 현상은 白色物質의 팽창에 의해 발생할 것으로 판단되어 이 물질을 X線回析에 의한 定性分析, 走査型電子顯微鏡에 의한 관찰 등에 의한 조사를 하였다.

X線回析에 의한 定性分析結果는 그림-4와 같다. 여기서 白色物質은 마그네시아(MgO) 및 수산화마그네슘으로 추정되었다. 또 走査型電子顯微鏡 등에 의해서도 이 사실이 확인되었다.

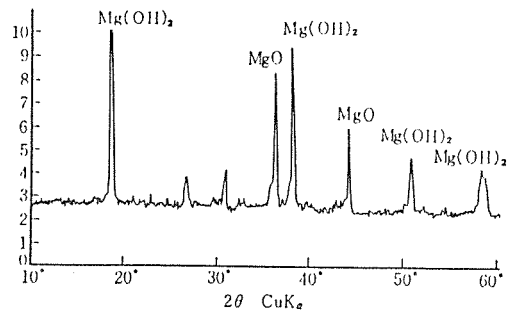


그림-4. X線回析分析結果

마그네시아는 시멘트 중에도 일부 포함되어 있으며 물과 반응하여 부피가 큰 수산화마그네

습으로 되기 때문에 포틀랜드시멘트의 경우 그 양이 5% 이하로 제한된다. 특히 오오트클레이브 養生에서는 현저하게 膨脹을 일으키는 것으로 알려져 있다.

한편 종종 사용되는 工業材料로서 마그네시아 클링커 및 도로마이트 클링커가 있다.

마그네시아 클링커는 마그네사이트($MgCO_3$) 및 블루사이트 ($Mg(OH)_2$)를 1600~1700°C의 높은 온도로 燒成하여 얻는 것으로 製鋼平爐 등의 耐火物 原材料로서 이용되고 있다.

도로마이트 클링커는 도로마이트($CaCO_3$, $MgCO_3$ 의 等量混合物)를 1550~1600°C로 燒成하여 얻는 것으로 역시 耐火物로서 이용되고 있다.

골재 공급자 측에서 조사한 결과 골재를 운반한 차량이 마그네시아 클링커를 운반하는데 사용된 사실이 있음이 밝혀져 本 Pop-out 현상은 粒狀의 마그네시아가 콘크리트 材料특히 골재 중에 혼입되어 발생한 것으로 추정하게 되었다. 이러한 일이 있은 후 운반차를 보다 엄격히 관리하였고 Pop-out 현상도 다시 발생하지 않았다.

4. 말뚝 打撃時의 破損

4.1 말뚝 머리부분의 破損

打撃에 의해 말뚝을 시공하는 방법은 가장 간단하고 工費나 工期 면에서 가장 유리하며 支持力의 확인이 용이한 등 여러가지 잇점이 있기 때문에 가장 많이 이용되고 있는 공법으로 이 打撃 工法에서는 말뚝 머리부분의 파괴가 생긴다.(사진 1) 한편 선진국에서는 최근 고강도 콘크리트 등의 발달 및 打撃技術의 향상으로 그 예가 상당히 감소하고 있기는 하나 아직 전체적으로 보면 많다고 할 수 있다.

打撃중에 발생하는 打撃應力은 사용하는 抗打機의 槌머에 크게 관계가 있기 때문에 말뚝에 적합한 槌머를 사용할 필요가 있다. 다시 말해서 打撃時에 말뚝을 파손시키지 않기 위해서

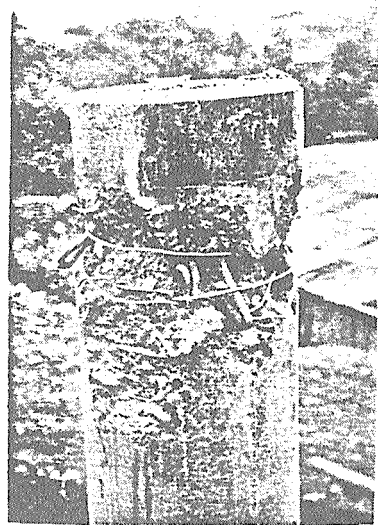


사진-1. 말뚝 머리부분의 파손

는 打撃應力이 어느 한도를 넘지 않도록 하는 것이 중요한 포인트이며 抗打機의 선정 방법은 말뚝에 생기는 打撃應力이 어느 일정 한계치 즉 許容打撃應力을 넘지 않는 打撃容量의 抗打機를 선정해야 한다.

抗打機 선정용의 打撃應力公式 즉 발생할 수 있는 최대의 平均打撃應力을 나타내는 식으로서 다음식이 참고가 되어 許容打撃應力은 말뚝材 壓縮強度의 0.5배로 하는 것이 적당하다고 한다.

드롭햄머 사용시

$$\sigma = 1.6 \frac{WH}{A_p(S+K)} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

디젤 햄머 사용시

12형 햄머에 대하여

$$\sigma = 110 + 0.29 \frac{WH}{A_p(S+K)} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

22형 햄머에 대하여

$$\sigma = 130 + 0.42 \frac{WH}{A_p(S+K)} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

32형 햄머에 대하여

$$\sigma = 115 + 0.45 \frac{WH}{A_p(S+K)} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

여기서, σ : 打撃應力

W : 추의 무게

H : 추의 낙하고

A_0 : 말뚝의 단면적

S : 貫入量

K : 리바운드량

말뚝 머리부분에 생기는 打撃應力은 말뚝 머리부분에 균등하게 작용하지 않으며 국부적으로 큰 부분과 작은 부분이 있다. 이 차이가 큰 경우에 偏心打撃된다고 한다. 결국 머리부분에 햄머가 평탄하게 접촉되지 않기 때문에 생기는 것이다. 이 偏心打撃에 의해 말뚝이 파괴되는 예는 대단히 많으며 일반적으로 이 偏心打撃을 될 수 있는 한 방지하는 하나의 수단으로서 緩衝材 즉, 쿠션材를 이용하고 있는데 이것은 햄머의 타격에너지를 말뚝 머리부분에 골고루 전달시키는 의미도 있고 過大應力을 방지하는 하나의 수단으로도 된다. 또 편심 타격은 말뚝의 축과 抗打機 햄머의 가이드축이 일치하지 않을 때 일어나며 지상에 남은 말뚝 부분이 길 때에는 打撃直後에 횡진동을 발생시켜 말뚝이 잘라지는 일이 있다.

4.2 말뚝 中間部 및 先端部の 破損

말뚝 打撃時 말뚝 중간부의 파괴를 식별하는 것은 곤란한 경우가 많은데 이음매 부분의 파손 또는 선단부가 휘어 관입됨으로써 몸통이 파손되는 경우가 있다. 이음매 부분의 파손은 상부 말뚝과 하부 말뚝을 연결할 때 말뚝 중심이 일치되지 않은 상태로 연결되어 打撃時 말뚝 중간부에 과대한 휨응력을 발생시키기 때문에 파괴되는 경우이다.

말뚝은 지반에 수직으로 타격하는 것이 원칙으로서 抗打機의 수직성, 햄머가 어느 정도 수직으로 낙하하는가가 큰 요인이다. 특히 드롭 햄머는 주의를 필요로 한다. 地層의 변화에 의해서도 말뚝 先端이 휘는 경우가 있다. 두터운 몸층의 아래에 支技層이 있었던 어느 현장에서 예정된 깊이까지 打撃하였으나 계속 침하하여 예정한 깊이보다 2~3m 정도 긴 말뚝을 사용한

결과 가까스로 침하가 중단된 경우가 있었다. 수일후 확인하여 보니 말뚝이 거의 그림-5와 같이 휘어 있는 것이 판명되었다.

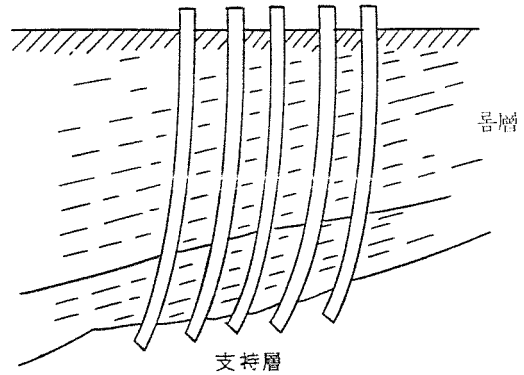


그림-5. 지반의 경사에 의해 말뚝이 휘는 경우

支技層 변화와 관련하여 사진-2는 工場新設을 위하여 基礎用 RC말뚝을 打撃했을 때 발생한 破損例이다. 이곳은 옛날 防空壕였던 곳으로 높이가 1.5~2.5 m 정도의 빈 공간이 그대로 있었으며 그 주위는 粘土地盤으로 말뚝이 이곳을 통과할 때 110 kg/cm² 정도의 引張應力이 작용한 것으로 추정된다.

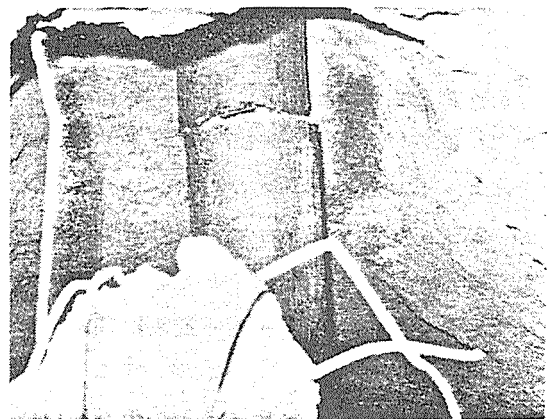


사진-2. 말뚝 중간부의 破損例

한편 말뚝 제조시의 문제로서 遠心力을 가할 때 材料分離가 일어나 모래 또는 微粒子가 내측으로 굽은 골재 및 비중이 큰 粒子가 외측으로 이동하는 경향이 있다. 材料分離가 심한 경우 打撃中 심한 손상을 입을 수 있는데 그 예로서 PC말뚝을 打撃中 당일 시공한 10개 중에서 3개의 말뚝이 파손된 경우가 있었다. 파손된 말뚝의 단면은 그림-6과 같이 말뚝의 안쪽이 시멘트풀이 아닌 모래층으로 이루어져 있었다. 이러한 材料分離는 진반죽일수록 현저하며 형틀이 넓어 偏心이 생기거나 遠心力 車輪의 높이가 고르지 않은 경우에도 이 현상이 가속화 될 수 있다.

시멘트 풀이 거의 없는 分離層

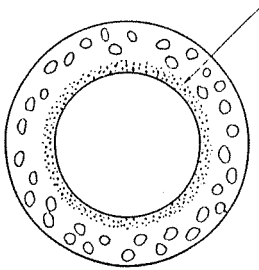


그림-6. 파손된 말뚝의 單面

蒸氣養生後 脫型時에도 제품에 심한 충격을 주지 않도록 주의해야 하며, PC 말뚝 脫型時에는 콘크리트 強度가 소정치에 도달되었나를 확인하며 균일하게 서서히 프리스트레스를 도입하며 운반중 큰 휨응력을 받지 않도록 주의할 필요가 있다.

말뚝 先端部의 파손은 실제적으로는 눈으로 확인할 수 없는 부분에서 발생되기 때문에 판단하기 어려운 면이 있다. 先端이 연필모양으로 된 말뚝의 경우 말뚝 先端의 슈-는 本體와 다른 공정에서 생산되기 때문에 콘크리트의 強度가 다르게 되는 결점이 있어서 先端슈-와 本體와의 연결부분에서 파괴되는 예가 있다. 그리고 壓力에 의한 파괴는 支技層에 필요 이상으로 관입시켰을 때 발생하는 경우가 많다.

4.3 말뚝의 縱方向 割裂

일반적으로 粘性土가 많은 地盤에 말뚝을 타격하면 리바운드량이 커서 좀처럼 관입되지 않으며 支持層 急傾斜나 地盤變化에 의해 말뚝이 휘는 경우를 종종 경험한다. 이러한 경우에 開放形 말뚝(先端開房슈-)를 사용함으로써 문제를 해결하는 예가 많다. 이와같이 地盤에 따라서는 開放形 말뚝이 아니면 시공할 수 없는 경우가 있으며 開放形 말뚝의 사용빈도가 많아짐에 따라 새로운 문제인 開放形 말뚝의 縱方向 割裂이 발생되고 있다. 이것은 속이 빈 말뚝 내부에 침입하여 PC말뚝의 약점의 하나인 円周方向의 引張力(hoop tension)에 의해 縱方向 割裂破壞를 일으키는 것이다. PC말뚝은 연직방향(길이방향)에 프리스트레스가 도입되고 말뚝머리, 先端部 등에는 補強鐵筋이 있어 상당히 耐力에 있어서 유리하지만 円周方向에 대해서는 外壓에는 강하나 內壓에는 상당히 약하다.

현재 속이 빈 말뚝 안쪽 침입토를 가능한 한 적게 하기 위하여 고려된 閉寒板(制御板)등도 사용되고 있다. 말뚝 빈 속의 지름은 地盤과의 관계도 있어서 보통 너무 크면 侵入土가 많아져 縱方向 割裂破壞를 일으키며 또 너무 작으면 開放形 말뚝으로서의 잇점이 감소된다.

5. 맺는말

콘크리트 제품은 使用材料의 특성, 製造工程 및 施工條件 등에 따라 여러가지 결함이 발생할 가능성을 항상 가지고 있다. 이러한 결함은 그 원인이 분명한 경우도 있지만 여러가지 복합요인에 의해 발생되거나 원인을 명확히 가리기 어려운 경우도 적지 않다. 또한 결함이 생겼을 때 비공개적으로 조사가 진행되고 그 事例가 자세히 보고되는 경우가 거의 없다. 그러나 많은 失敗例는 콘크리트 缺陷要因을 제거하고 品質을 향상시키기 위하여 좋은 교훈이 되기 때문에 많은 事例가 보고되고 토론하는 기회를 가지는 것이 매우 필요하다고 생각된다.

본문에서는 콘크리트 말뚝의 製造過程 및 施工中에 발생하는 缺陷發生事例에 대하여 관계 자료의 내용을 인용, 검토하였다. 아울러 우리나라에서는 高強度의 PHC 말뚝이 생산되고 있지 않으나 打撃中 파손을 막으며 또 큰 軸方向力에 저항할 수 있는 高品質, 高性能 말뚝으로서 PHC 말뚝의 생산이 적극 검토되어야 할 시점에 와 있다고 생각된다. *

(參考文獻)

1. ユンクリートの品質管理, ユンクリートの品質管理編集委員會, 日本規格協會, 1984.
2. ユンクリート공사之失敗例とその對策, 小林正 几外 11人, 日本ユンクリート工學協會, 1985.
3. PCくい基礎の最近の進歩 -PCくいのしい使い方-, プレストレストユンクリート技術協會, 1973.
4. PCくいの使用, 日本材料學會, 1968.
5. PCパイルハンドブック, PCパイルハンドブック編集委員會, ユンクリートポールパイル協會, 1970.
6. Recommendations for Design, Manufacture, and Installation of Concrete Piles, ACI Manual of Concrete Practice(Part 3), 1977.
7. KS F4301-80, 원심력 철근콘크리트 말뚝
8. KS F4303-80, 프리텐션 방식 원심력 PC말뚝
9. KS F4305-78, 포스트 텐션방식 원심력 PC 말뚝
10. KS F4306-83, 프리텐션방식 원심력 PHC 말뚝

질서지켜 민주시민 차례지켜 문화국민