

## 연약지반상 기초말뚝의 거동 연구

김대규<sup>1\*</sup>

### Study on Behavior of Pile Foundation in Soft Soils

Dae-Kyu Kim<sup>1\*</sup>

**요약** 본 연구에서는 연약지반에 축조된 잔교구조물 강관말뚝기초의 변위 및 응력을 시공단계별로 계측하여 결과를 분석하였다. 말뚝의 응력상태는 초기 상태에서 사석투하 등에 의한 압축응력을 받으나, 배면매립이 진행됨에 따라 지반의 측방유동에 의하여 인장응력을 받는 상태로 되었다. 배면매립 및 선행하중 단계에서 급격한 응력의 변화를 보이며, 경사말뚝은 설치방향에 따라 차별화된 응력상태를 보였다. 말뚝수평변위는 매립이전까지는 해상방향으로 약간의 변위가 안정되게 유지되었으나, 매립단계에서 급격하게 변위가 증가하고, 이어 선행하중에 의한 변위가 중첩되어 추가적으로 증가하는 양상을 보였다.

**Abstract** In this paper, the displacement and stress of pile foundation constructed in the soft cohesive soils were measured and investigated at each construction phase. The piles belongs to compressive stress then extension due to lateral flow of soft soils. Battered piles showed different stress state according to construction direction. The lateral displacements of piles radically occurred at the embankment phase.

**Key Words** : 연약지반, 강관말뚝, 응력, 변위

### 1. 서론

연약지반상 시공에서는 배면매립 및 선행하중재하 등으로 인한 연약지반의 변형이 발생하게 되며, 이로 인하여 구조물의 시공 중 또는 완료 후 기초말뚝의 변형 가능성이 크다. 잔교구조물의 경우, 말뚝 및 지반의 변형은 콘크리트 구조물의 균열, 비틀림, 말뚝 및 보강 H-형강의 탈락 등뿐만 아니라 잔교구조물 전체의 안정성에 심각한 영향을 미치게 되며, 안정성은 물론, 공기지연과 더불어 막대한 경제적 손실을 초래하게 된다. 연약지반의 변형이 기초말뚝의 거동에 미치는 영향에 대한 연구는 Poulos 등(1972), Marche 등(1972), Kimura 등(1994), Stewart 등(1994), 장범수 등(2002), 홍원표와 송영석(2004)에 의하여 변형특성 및 발생사례를 중심으로 이루어졌으나, 연약지반의 변형에 영향을 미치는 요소가 매우 복합적으로 작용하기 때문에, 연약지반상 기초말뚝의 거동해석은 실측사례와 경험적 판단에 의존하고 있는 상황이다 [1][2][3][4][5][6].

따라서 각 지역별, 구조물별 계측 및 분석이 매우 강조

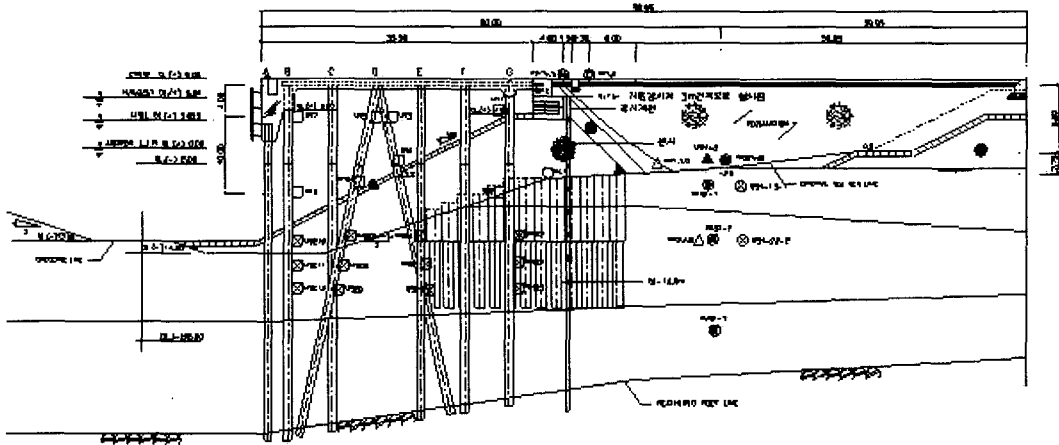
되고 있으나, 우리나라의 경우 잔교구조물의 계측/분석 사례는 극히 미미한 실정이다. 본 연구에서는 연약지반에 축조된 잔교구조물 기초말뚝의 변위 및 응력을 계측하였다. 계측결과 및 분석내용이 안정된 잔교구조물의 설계 시공을 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

### 2. 현장 및 계측 개요

계측은 그림 1과 같이 다양하게 진행되었다. 현장은 군장신항만 공사 중 남측안벽(2공구)의 서측 일반화물부두 잔교구조물에서 수행하였다. 우선 SCP로 지반을 처리하였으며 향타선을 이용하여 강관말뚝을 향타하고 상부에서 말뚝들을 프레임으로 고정시킨 후 상부 슬래브를 만들어 안벽을 시공하였다. 사석과 소파블럭 상치 콘크리트를 이용하여 제체를 만들고 배면매립으로 항만 부지를 시공하였다. 잔교구조물은 전면수심 DL(-) 13.0m, 안벽시설 30,000 DWT×3선석, 20,000DWT×1선석의 총길이 930m의 경사말뚝식 안벽으로 전면은 전면해상으로 40m까지, 배면은 안벽법선에서 배후 100m까지를 매립하였다. 지반은 실트질 모래(SM)인 표층부, 점토(CL)인 해성

<sup>1</sup>상명대학교 토목공학전공

\*교신저자: 김대규(daekyu@smu.ac.kr)



LEGEND

기호	계속기명	소형	기호	계속기명	소형
△	진폭수위계(WP)	8EA	⊙	지동경시계(WI)	2EA
▲	차분수위계(WW)	4EA	⊕	지동굴절변위계(WAS)	2EA
□	Tiltmeter(WT)	18EA	⊖	출발원위계(WS)	2EA
⊗	스프레드계이지기(WSG)	24EA	⊙	침하관(WDS)	8EA
○	유선원위계(WL)	2EA	⊕	L V D T(WLV)	4EA

그림 1. 계측기 설치 상황

퇴적층, 풍화잔류토층(SM), 풍화암층의 순서로 구성되어 있다. 실트질 모래층은 N값 4 이하로 약 3.7m 두께이고 함수비 22~38%이다. 상부 점토퇴적층은 두께 4m, N값 7~10, 함수비 30~40% 이며, 하부 점토퇴적층은 두께 10m, N 값 10~20, 함수비 25~42%, 풍화잔류토층은 두께 약 10m, N값 20~50, 함수비 40~55%이다. 풍화암층은 N값 50 이상으로 9.4m 이상의 두께로 분포한다.

3. 계측결과 분석

그림 2는 G열 말뚝(그림 1 참조)의 수평두부변위이고, 그림 3은 말뚝과 Head Frame의 이탈상황을 보여준다.

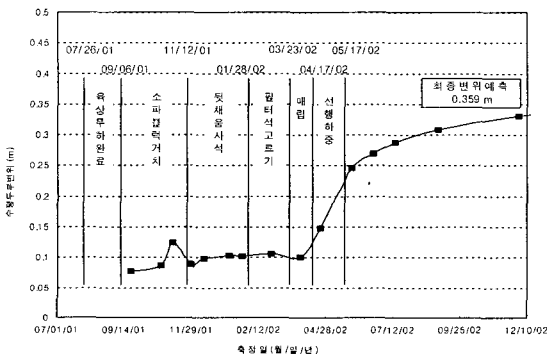


그림 2. 말뚝 수평두부변위 계측값

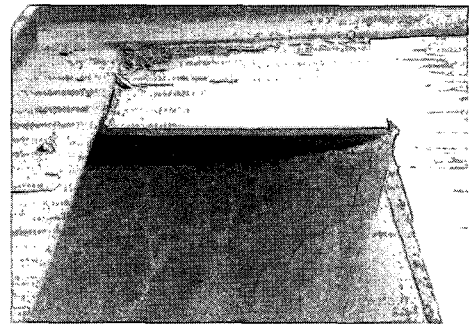


그림 3. 말뚝과 Head Frame의 이탈

그림 2에서 보는 바와 같이, 매립이전까지는 해상방향으로 10cm 내외의 수평변위가 안정되게 유지됨을 알 수 있으나, 매립단계에서 급격하게 변위가 증가하고, 이어 선형하중에 의한 변위가 중첩되어 추가적으로 증가하는 양상을 보이고 있다. 특히, 선형하중재하 이후에도 지속적으로 발산하는 형태로서 수렴이 되기까지는 얼마간의 시간이 소요될 것으로 판단된다. 초기 말뚝타입시의 시공 오차와 매립이전 단계의 시공과정에 의한 변위를 제외한다고 하더라도 매립과 선형하중에 의한 순수변위가 20cm 이상 발생하였다. 이는 배면 매립 및 선형하중이 하부 연약지반의 수평하중을 크게 증가시켜 안벽부에 집중적인 수평변위가 발생된 것으로, 그 절대값이 작지 않아 사면 활동 가능성을 무시할 수 없는 상황이라 하겠다. 선형하중 제거 등의 조치를 고려할 필요가 있다.

스트레인게이지는 모두 12개(그림 1 참조, G열 WSG 1~WSG 3; D2열 WSG 4~WSG 6; D1열 WSG 7~WSG 9; B열 WSG 10~WSG 12) 설치되었으며, 계측결과를 그림 4~7과 같다.

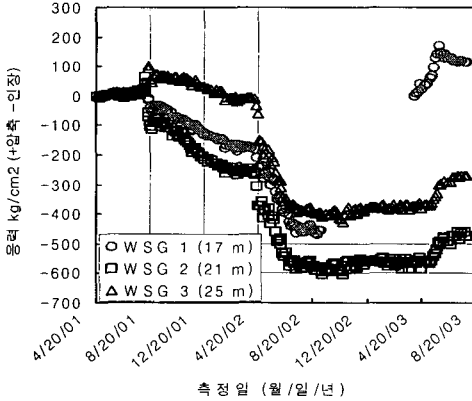


그림 4. 스트레인게이지 계측결과(G열)

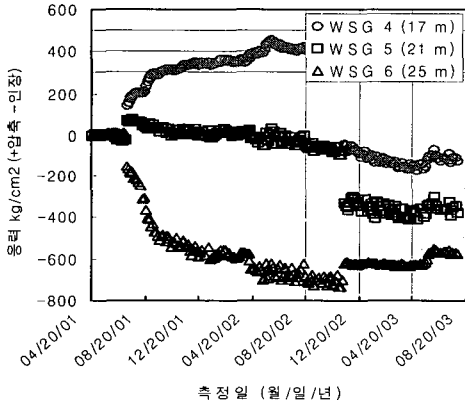


그림 5. 스트레인게이지 계측결과(D2열)

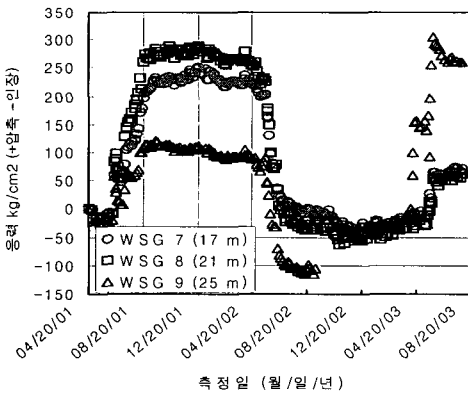


그림 6. 스트레인게이지 계측결과(D1열)

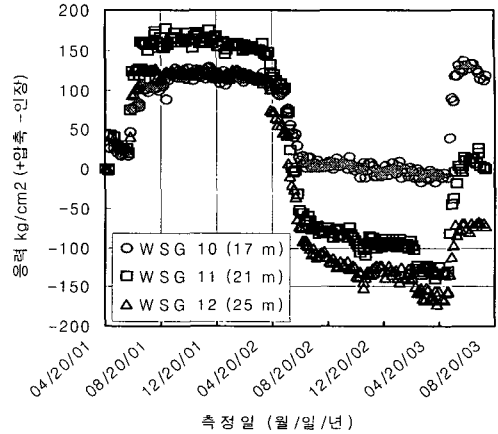


그림 7. 스트레인게이지 계측결과(B열)

그림 4~7에서 보는 바와 같이, 매립 및 선행하중 (04/15/02) 이전에 대부분 압축응력이 발생하였으나, 경사말뚝인 D1열(말뚝머리 육측, 말뚝선단 해측) 말뚝에서는 Head Frame 설치 시 인장응력이 발생하였다. 경사말뚝의 경우 사석투하 이전에 인장응력이 발생할 수 있으며 설치방향에 따라 응력상태 및 크기가 달라질 수 있다는 사실에 유의해야 한다. Head Frame 시공 시 상대적으로 작은 응력이 발생한 반면, 사석투하 시 사석자중이 연직하중으로 작용하여 말뚝에 큰 응력을 발생시키고 있다. 특히 배면에 가장 근접한 G열 말뚝에서 가장 작은 값을 보여 사석투하의 영향이 가장 적은 것을 알 수 있다.

매립 및 선행하중재하(04/15/02) 단계에서는 D1열 말뚝을 제외한 모든 말뚝에서 급격한 응력변화가 인장 측으로 발생하였다. 이는 배면에서의 성토하중으로 인한 연약지반의 측방유동이 상당거리 떨어진 위치까지 영향을 미친다는 것을 의미한다. D1열 말뚝의 경우 매립 및 선행하중재하라는 시공 상황의 변화를 감지할 수 있을 정도의 비교적 작은 응력 변화량이 압축으로 발생하였으며, 이는 말뚝의 설치방향(말뚝머리 육측, 말뚝선단 해측)이 주원인이다. 발생응력이 설계관리 기준치를 초과하지 않았으나 사석 및 피복석 투하속도와 매립속도를 완화시켜 급격한 하중발생을 피하고 사전 말뚝보강을 수행하는 것이 바람직하다. 매립단계에서 대부분의 응력변화가 발생하여 선행하중재하 시에는 상대적으로 작은 응력 변화량이 계측되었다.

매립 및 선행하중재하(04/15/02) 이후, 응력의 변화량은 크지 않으나 압축 및 인장에 관계없이 모든 위치의 말뚝에서 점진적인 응력변화를 볼 수 있으며, 1차 최종계측일(06/17/02) 당시에도 변화가 진행 중임을 확인할 수 있다. 따라서 상부 콘크리트 작업 등에 의하여 약간의 응력

증가가 발생하는 등 지반 및 구조물의 변위가 안정화된 상태라고 볼 수 없으며, 변위 및 응력에 대한 지속적 주의관찰이 필요하다. G열 2003년 4월 20일(D2열 2002년 11월)의 불연속적 계측값은 계측기 재설치 및 초기치 재설정 등에 의한 것으로, 결과분석에 포함하지 않았다.

전반적인 말뚝의 응력상태는 초기 상태에는 사석투하 등에 의한 압축응력을 받으나, 배면매립이 진행됨에 따라 지반의 측방유동에 의한 수평력이 전달되어 인장응력을 받는 상태로 되었다. 또한 경사말뚝의 경우, 설치방향에 따른 응력상태의 차이를 명백하게 알 수 있다. 즉 말뚝머리 육측, 말뚝선단 해측인 경사말뚝은 일반 직향과 같은 응력상태를 나타내지만, 반대 방향 경사말뚝은 매립 및 선행하중재하 등의 시공단계에도 큰 응력변화를 보이지 않는 등 차별된 상태를 보이는 것에 유의할 필요가 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 연약지반에 축조된 잔교구조물 강관말뚝기초의 변위 및 응력을 시공단계별로 계측하여 결과를 분석하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 말뚝의 응력상태는 초기 상태에서 사석투하 등에 의한 압축응력을 받으나, 배면매립이 진행됨에 따라 지반의 측방유동에 의한 수평력이 전달되어 인장응력을 받는 상태로 된다. 배면매립 및 선행하중 단계에서 급격한 응력의 변화를 보인다.
- (2) 경사말뚝은 설치방향에 따라 명백한 응력상태의 차이를 보였다. 말뚝머리 육지측, 말뚝선단 해상측인 경사말뚝은 일반 직향과 같은 응력상태를 나타내지만, 반대 방향의 경사말뚝은 매립 및 선행하중재하 등의 시공단계에도 큰 응력변화를 보이지 않았다.
- (3) 말뚝수평변위는 매립이전까지는 해상방향으로 10cm 내외의 수평변위가 안정되게 유지되었으나, 매립단계에서 급격하게 변위가 증가하고, 이어 선행하중에 의한 변위가 증첩되어 추가적으로 증가하는 양상을 보인다. 이는 배면매립 및 선행하중이 하루 연약지반의 수평하중을 크게 증가시켜 안벽부에 집중적인 수평변위가 발생된 것으로 그 절대값이 작지 않으므로 사면활동 안정을 검토하여야 한다.

#### 참고문헌

- [1] 장범수, 이진형, 서동희, 정삼성, “측방유동을 받는 교대말뚝기초의 해석,” 대한토목학회 논문집, 제 21권, 1-C호, pp.31-90, 2002.
- [2] 홍원표, 송영석, “측방변형지반속 출말뚝에 작용하는 토압의 산정법,” 지반공학회 논문집, 2004년 4월, 제 20권, 3호, pp.13-22, 2004.
- [3] Kimura, T., Wenz, K. P., Takemura, J., Watabe, Y., Suemasa, N., and Jiro-Oka, A, "Stability of piled bridge abutments on soft clay deposits," Proceedings of 13th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, New Dehli, pp.721-724, 1994.
- [4] Marche, R. and Lacroix, Y, "Stabilite des culees de ponts etablies sur des pieux traversant unecouche molle," Canadian Geotechnical Journal. Vol.9, No.1, pp.2-24, 1972.
- [5] Poulos, H. G., "Difficulties in prediction of horizontal deformations of foundations," Journal of the Soil Mechanics and Foundations Engineering, ASCE, Vol.98(SM8), pp.843-848, 1972.
- [6] Stewart, D. p., Jewell, R. J., and Randolph, M. F., "Design of piled bridge abutments on soft clay for loading from lateral soil movements," Geotechnique, 44(2), 277-296, 1994.

김 대 규(Dae-Kyu Kim)

[정회원]



- 1985년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학사)
- 1987년 2월 : 고려대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1999년 12월 : 루이지애나주립대학 토목환경공학과(공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 토목공학과 조교수

<관심분야>

토질 및 기초, 터널, 시공, 도로