

계측 및 수치해석에 의한 연약지반의 측방유동 연구

김대규^{1*}

Study on Lateral Flow of Soft soils by Field Measurement and Numerical Analysis

Dae-Kyu Kim^{1*}

요 약 본 연구에서는 잔교구조물이 축조된 연약지반에 있어서, 연약지반의 측방유동을 계측하였다. 계측결과는 수치해석결과와 함께 비교, 분석되었다. 분석결과, 연약지반의 수평변위는 침하보다는 성토에 의한 측방유동에 큰 영향을 받는 것으로 나타났으며, 매립 및 선행하중재하 단계에서 급격히 발생하였다. 수치해석결과와 계측결과 모두 모래 다짐말뚝 치환부와 사석의 경계 이상에서 비교적 균등하게 최대수평변위가 발생하는 등 유사한 변위발생 양상을 보여 주었으며, 변위량은 수치해석결과가 계측치보다 큰 값을 보였다.

Abstract In this paper, the lateral displacement of soft soil was measured in pier structure. The result was compared and investigated with the result of numerical analysis. The lateral displacement of soft soil was affected by lateral flow of soft soil due to embankment rather than settlement, and rapidly occurred at the embankment and preloading phases. The measurement and the numerical analysis showed very similar trend of lateral displacement but the magnitude was larger in numerical analysis than in measurement.

Key Words : 연약지반, 강관말뚝, 측방유동, 계측

1. 서 론

측방유동은 배면매립 및 선행하중재하 등으로 인하여 연약지반에서 발생하며, 이로 인하여 구조물의 이동 중 또는 완료 후 구조물이 이동하거나 기초말뚝 등이 변형될 가능성이 크다. 말뚝 및 지반의 측방유동은 강성구조물의 균열, 비틀림 등을 유발하여 구조물 전체의 안정성에 심각한 영향을 미치게 된다.

연약지반의 측방변위에 대한 연구는 Peck(1969)의 공학적 정의 이후, 배면매립, 급격한 절성토 등 편재하중에 의한 측방유동이 구조물의 안정성에 미치는 영향 검토사례와 결부되어 이론적 또는 실험적으로 수행되어 왔다 (Marche and Lacroix, 1972; Poulos, 1972; Tschobotaroff, 1973; Ito and Matsui, 1975; De Beer, 1977; Kimura 등, 1994; Stewart 등, 1994)[5][6][7][8][9][10][11][12].

국내에서는 정삼성 등(2000), 장범수 등(2002), 오일록 등(2003), 홍원표와 송영석(2004)에 의하여 측방유동의

특성과 발생사례 연구가 이루어졌다[1][2][3][4].

이상과 같은 다양한 연구에도 불구하고 측방유동에 관한 명확한 해석기준은 결정되어 있지 않다. 이는 측방유동에 영향을 미치는 요소가 매우 다양하고 복합적으로 작용하기 때문에 연약지반의 측방유동 해석은 실측사례와 경험적 판단에 의존되고 있다. 따라서 각 지역별, 구조물별 계측 및 분석이 매우 강조되고 있으나, 우리나라의 경우 교대구조물에 관한 연구가 일부 이루어 졌을 뿐 잔교구조물의 계측 및 분석 사례는 극히 미미한 실정이다.

본 연구에서는 연약지반에 축조된 잔교구조물에 있어서 소파블럭 인접 배면에 자동경사계를 설치하여 측방유동 변위를 계측하였다. 또한 시공단계별 수치해석을 수행하여 해석결과를 계측결과와 비교, 분석하였다. 연구결과가 정밀한 측방유동 해석을 위한 기초자료로 활용되기를 기대한다.

2. 시공 상황

연약지반의 측방유동이 계측된 현장은 군장신항만 공

¹상명대학교 토목공학전공

*교신저자: 김대규(daekyu@smu.ac.kr)

사현장의 일부로, 지반은 실트질 모래(SM)인 표층부, 점토(CL)인 해성퇴적층, 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, N값 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. 우선 모래다짐말뚝으로 지반을 처리하였으며 항타선을 이용하여 강관말뚝을 항타하고 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 사향식 안벽으로 전면은 전면해상으로 40m까지, 배면은 안벽법선에서 배후 100m 까지를 매립하였다. 그림 1~4는 주요 시공 상황을 보여준다.

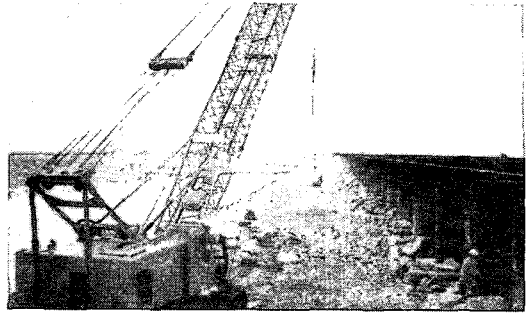


그림 3. 기초사석 투하 및 피복석 고르기



그림 4. 기초강관말뚝 및 소파블럭 설치

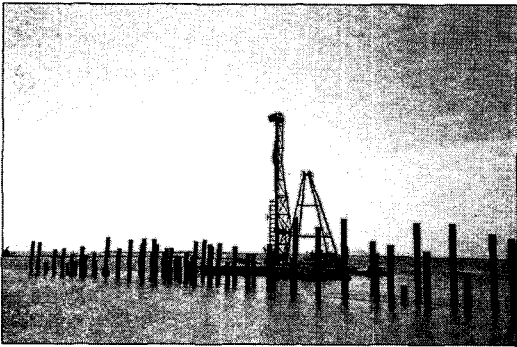


그림 1. 말뚝 항타

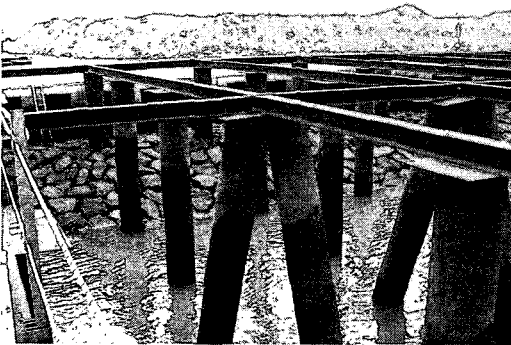


그림 2. Head Frame 격자 가설

3. 계측결과 분석

그림 5, 그림 6은 각각 소파블럭 배면에 설치된 자동 경사계에 의한 남북(육해)방향 및 동서(내외)방향 지반 수평변위 계측결과이다. 그림 5에서 (+)는 북측(해측) 변위, (-)는 남측(육측) 변위이며, 그림 6에서 (+)는 서측(외측), (-)는 동측(내측) 변위를 나타낸다. 선박의 접안방향을 고려할 때, 남북방향의 변위가 특히 중요하다 할 수 있다.

그림 5에서, 특정깊이에서 보다는 지표에서 DL-8 m까지 상당량의 변위가 북측(해측)으로 발생하였다. 이러한 변위 양상 및 변위량으로 판단할 때, 배면침하에 의해 유발되는 지중의 수평변위보다는 원지반 상부의 매립층에서 유발되는 성토에 의한 측방압이 전체적인 지중수평변위를 지배하는 것으로 판단된다. 그림 6에서와 같이 동서(내외)방향에서도 예상외의 큰 변위를 지표에서 보이고 있으나, 남북(육해)방향 보다는 작은 변위값을 나타내고 있다. 이는 매립 및 선행하중재하의 주방향인 남북방향이 기 때문이다. 예상외의 변위증가는 센서 설치 부분 상부에서의 공사차량 이동 등에 의한 생긴 일시적인 변위라 추정되나 변위증가량이 크므로 말뚝 보강작업이 필요할 것으로 예상된다.

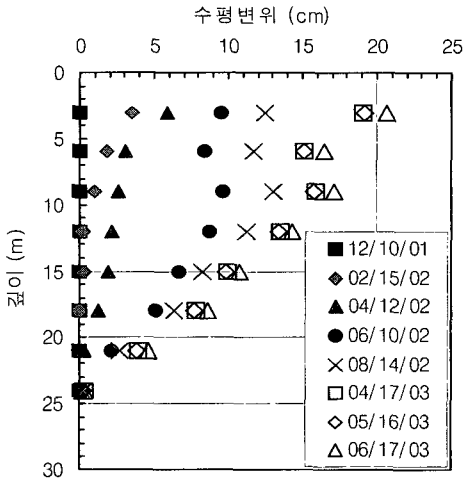


그림 5. 경사계 계측치(남북 방향)

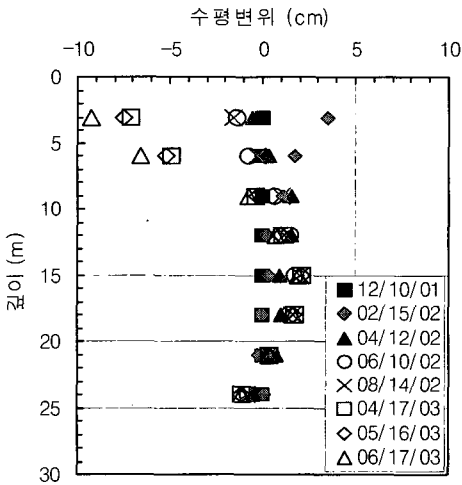


그림 6. 경사계 계측치(동서 방향)

그림 7은 최대변위가 발생한 지점(DL-1.5 m)의 계측치를 시간에 따라 도시한 것이다.

그림 7에서, 매립 및 선형하중재하 단계에서 급격한 변위가 발생했으며 변위가 수렴양상을 보이기는 하나, 지속적으로 발생하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 말뚝두부 변위양상과도 무관하지 않은 것으로 지속적 관찰이 요망된다. 계측결과에 대한 쌍곡선 분석결과, 최대수평변위 최종값은 15.43cm(해측)으로 예측되어, 변위의 절대치에서도 큰 값을 보이고 있다. 다른 구역 수평변위와 비교하여 과다한 수평변위발생은 지반조건 및 매립속도 등에 기인한다. 따라서 지반조건 완전한 파악 후, 말뚝두부 보강 및 매립속도 조절이 필요하다.

4. 수치해석결과 분석

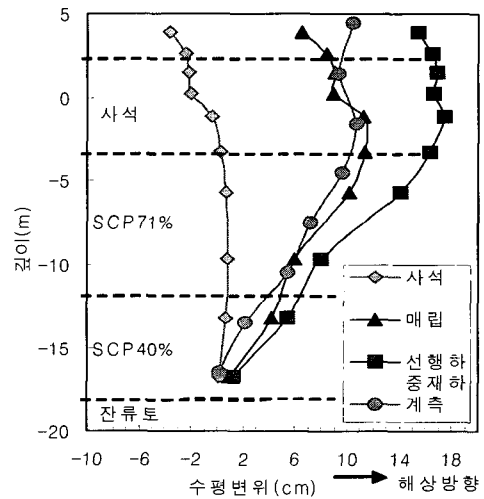


그림 8. 소파블록 배면 지중수평변위

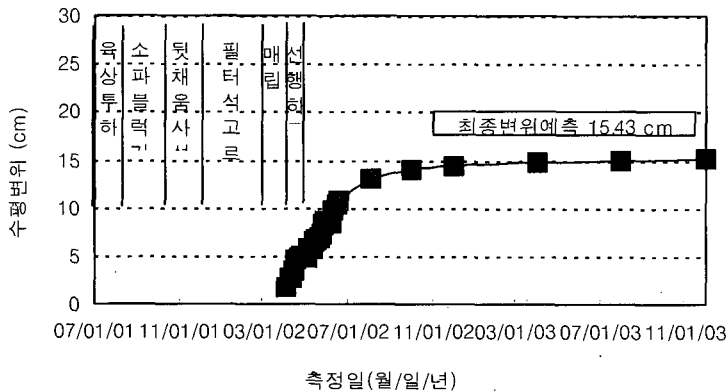


그림 7. 경사계 계측결과(최대변위 발생 깊이 DL-1.5 m)

그림 8은 소파블록 배면 자동경사계 계측결과(선행하중재하 단계) 및 시공단계 별 수치해석결과를 도시 한 것이다. 수치해석은 3차원 비선형해석이 가능한 PENTAGON을 활용하였다. 수평변위 경향은 계측결과와 같이 사석시공 및 매립에 따라 급격히 발생하였으며, 선행하중재하에 의하여 꾸준한 변위가 발생하였음을 알 수 있다.

그림 8에서 보는 바와 같이, 수치해석결과와 계측결과 모두 모래다짐말뚝 치환부와 사석의 경계 이상에서 비교적 균등하게 최대수평변위가 발생하는 등 수치해석에 의한 시공단계별 지반수평변위 경향은 계측결과와 유사하다. 그러나 변위량은 수치해석결과가 계측치보다 큰 값을 보이고 있으며, 선행하중재하 단계에서 최대 60%의 차이를 나타내고 있다. 또한, 변위양상과 변위량의 계측결과가 매립단계에서의 수치해석결과와 매우 유사한 경향을 나타내고 있는 것으로 보아, 아직 선행하중 분량의 간극수압이 소산되지 않은 단계로 판단된다. 이러한 경우 상당량의 변위가 추가적으로 발생할 가능성이 높음을 알 수 있으며, 지중변위 양상은 상부 사석층이 전반적으로 해상 쪽으로 밀리는 다소 불안정한 형태를 보이고 있으므로 유의하여야 한다.

5. 결론

본 연구에서는 잔교구조물이 축조된 연약지반의 측방 유동을 시공단계별로 계측하고 계측결과를 수치해석결과와 비교, 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 소파블록 배면에 설치된 자동경사계 계측결과, 특정 깊이에서 보다는 지표에서 DL-8 m까지 상당량의 변위가 북측(해측)으로 발생하였다. 이는 배면침하보다 매립층 성토에 의한 측방압이 전체적인 지중수평변위를 지배하는 것을 의미한다.
- (2) 동서(내외)방향에서도 예상외의 큰 변위를 지표에서 보이고 있다.
- (3) 매립 및 선행하중재하 단계 이외에서, 예상외의 변위 증가는 센서 설치 부분 상부에서의 공사차량 이동 등에 의한 일시적인 변위가 발생한다.
- (4) 매립 및 선행하중재하 단계에서 급격한 측방변위가 발생했으며 이후 지속적 발생을 보여주었다.
- (5) 수치해석결과와 계측결과 모두 모래다짐말뚝 치환부와 사석의 경계 이상에서 비교적 균등하게 최대수평 변위가 발생하는 등 유사한 변위발생 양상을 보여 주

었다. 변위량은 수치해석결과가 계측치 보다 큰 값을 보이고 있으며, 선행하중재하 단계에서 최대 60%의 차이를 나타내었다.

- (6) 지반수평변위 계측결과가 매립단계에서의 수치해석결과와 매우 유사한 경향을 나타냈다. 이는 아직 선행하중 분량의 하중이 소산되지 않은 단계로, 상당량 변위의 추가발생 가능성이 높다.

참고문헌

- [1] 오일록, 채영수, "연약지반에서의 말뚝기초 교대의 측방유동 대책공법 적용에 대한 연구," 지반공학회 2003 봄 학술발표회 논문집, pp.753-760, 2003.
- [2] 장범수, 이진형, 서동희, 정삼성, "측방유동을 받는 교대말뚝기초의 해석," 대한토목학회 논문집, 제 21권, 1-C호, pp.31-90, 2002.
- [3] 정삼성, 서정주, 장범수, "측방유동을 받는 교대말뚝기초에 대한 거동분석," 지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp.25-32, 2000.
- [4] 홍원표, 송영석, "측방변형지반속 줄말뚝에 작용하는 토압의 산정법," 지반공학회 논문집, 2004년 4월, 제 20권, 3호, pp.13-22, 2004.
- [5] De Beer, E. E., "Piles subjected to static lateral loads," Proceedings of 9th Int. Conf. on Soil Mechanics. and Foundation Engineering, Tokyo, State-of-the-art report, pp.1-14, 1977
- [6] Ito, T. and Matsui, T., "Methods to estimate lateral force acting on stabilizing piles." Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol.15, No.4, pp.43-59,1975
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] Peck, R. B., "Deep excavation and tunneling in soft ground," Proceedings of 7th Int. Conf. on Soil Mechanics. and Foundation Engineering, State-of-the art report, Mexico, pp.225-290, 1969.
- [10] 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.

- [11] 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.
- [12] Tschebotarioff, G. P., *Foundations, retaining and earth structures*, McGraw-Hill, New York, 2nd ed., pp.365-414, 1973.

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