

현장타설 모형말뚝의 수평재하시험을 통한 하중전이 거동 분석 Analysis of Loading Translation Behavior for Drilled Shafts Modeling Pile through Lateral Loading Test

박준범¹⁾, Jun-Beom Park, 김홍락¹⁾, Hong-Lark Kim, 윤명준¹⁾, Myung-June Yoon,
허성준¹⁾, Seong-Jun Heo, 김홍택²⁾, Hong-Taek Kim

¹⁾ 홍익대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Eng, Hongik Univ.

²⁾ 홍익대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng, Hongik Univ.

SYNOPSIS : In this study, to performed laboratory model tests in order to verify on load transfer condition of drilled shaft under lateral loading. To conducted model test on polystyle drilled shaft under multi layer ground conditions. In model test, to measured the strain of drilled shaft and displacement under later loading. In order to verify on model test results, to conduct the numerical analysis.

Keywords : Drilled shaft, Lateral loading test, Loading translation, Numerical analysis

1. 서론

현장타설말뚝은 대규모의 구조물의 하중을 지지하는데 그 효과가 우수하여 초고층 건물 및 대규모 교량의 기초로 유용하게 활용되고 있으며, 이에 대한 많은 연구성과가 보고되고 있다. 초고층 빌딩이나 대형 교량과 같은 대규모 구조물은 풍력과 같은 수평하중에 대한 안정성이 요구되고 있으나 현장타설말뚝의 수평지지력은 고전적인 수평지지력 산정방법과 동일하게 산정되고 있는 실정이다. 대규모 구조물에 적용되는 현장타설말뚝은 대부분 직경이 1.5~2.0m에 이르는 비교적 큰 규모이기 때문에 수평하중이 작용하는 경우 말뚝내에서 압축과 인장이 동시에 발현되어, 강관말뚝 등과 같은 고전적인 말뚝의 수평지지력 산정방법이 현장타설말뚝까지에 확대 적용하는 점에서 그 신뢰성을 검증한 사례는 극히 드물다 할 수 있다.

이에 본 연구에서는 대구경 다주 현장타설 모형말뚝에 대하여 실제 말뚝의 수평거동을 분석하기 위하여 실물의 현장타설말뚝을 최대한 모사하여 상사율을 고려한 실내모형실험을 통한 다주 현장타설말뚝의 수평재하시험을 실시하여 말뚝기초의 변형 및 말뚝의 거동 특성을 평가하였으며, 실제 구조물기초에 적용시 말뚝거동을 예측하여 비교·분석하였다. 또한 유한요소 프로그램을 통한 수치해석 결과와 비교 검증하여 신뢰성 있는 말뚝기초의 하중전이거동을 분석하였다.

2. 말뚝의 수평재하시험

2.1 수평재하시험방법

말뚝의 재하시험은 수평하중에 대한 말뚝-지반계의 반응을 측정하고 연구와 개발, 설계를 위한 자료를 알아보기 위하여 수행하고 있으며, ASTM D3966-81에서 수평하중을 받는 말뚝에 대한 표준시험방법을 제시하고 있다. ASTM에서는 가장 일반적으로 사용되는 방법으로 말뚝이나 데드맨 또는 무게가

나가는 플랫폼 같은 반력기구를 이용하여 유압잭으로 수평하중을 가하는 방법을 제시하고 있어, 본 연구에서는 ASTM D3966-81에서 제시하는 방법으로 모형실험을 수행하고자 하였다.

2.2 수평지지력 및 변위 검토 방법

말뚝의 변위가 커지면 지반반력이 항복치에 도달하게 되므로 지반에서의 말뚝변위가 지반반력사이의 일반적인 관계는 비선형을 보이게 된다. 이에 수평력을 받는 말뚝 거동에 대한 해석방법으로는 대표적인 Brom's Method(1964), 탄성법(Poulos 1971), p-y해석법(Matlock 1970, Reese 1977, Murchison and O'Neill 1984), 등이 있다. 또한, 토사지반의 점착력과 내부마찰각을 고려한 p-y 곡선은 Evan & Duncan(1982)에 의해 제안하였다. 이와 같이 p-y 해석법이 그 해석절차가 간편하여 수평하중을 받는 말뚝해석이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 다음 표 1.에 수평지지력 변위검토 방법을 나타내었다.

표 1. 수평지지력 및 변위검토 방법

검토방법		검토 내용	
설계시	지 지 력	극한지반 반력법 (Broms 방법)	말뚝 단면조건 및 지반조건을 고려한 말뚝길이 판정 하중조건(본당 최대 수평반력) 및 지반조건(단위중량, 수동토압계수) 산정 말뚝조건, 하중 및 지반조건이 고려된 Yield Factor, Load Factor 관계 그래프를 이용한 극한 수평저항력을 산정
		탄성해석법 (Chang 방법)	말뚝기초 두부에 수평외력이 작용할 경우 수평력에 발생하는 말뚝 반력은 주변지반 변위에 비례한다는 가정 하에 말뚝 허용 수평변위에 대응하는 허용 수평하중 산정
	변 위	비선형해석법	각 층의 응력-변형특성을 고려한 p-y 곡선을 작성하여 말뚝 두부에 작용하는 하중에 의한 탄소성변위 산정 말뚝의 횡방향 변위, 전단력, 모멘트, 지반반력 산정 하중-변위 관계를 이용한 수평변위 해석 프로그램 말뚝의 변위증가에 의한 지반반력과의 관계는 비선형성을 보인다는 사실에 근거한 프로그램
		탄성해석법 (Chang 방법)	기초저면으로부터 $1/\beta$ 심도까지의 평균 수평지반반력계수를 적용하여 말뚝두부에 작용하는 하중에 의한 탄성변위 산정
시공시	수평재하시험	설계 및 시공단계에서 실제규모의 수평재하시험을 수행하여 말뚝기초 수평지지력 평가	

3. 현장말뚝 모형실험

3.1 모형실험단면

본 연구에서는 다주 짧은 현장타설말뚝의 수평하중에 대한 거동을 알아보기 위하여 실제 단면 크기의 1/20 상사율을 적용하여 다음 그림 1.과 같이 모형말뚝을 제작하여 모형실험을 수행하였다. 또한 지반조성은 2개의 지층으로 구분하고자 상부 토사층은 산토를 이용하여 조성하였으며, 하부 지층은 자갈을 이용하여 상대적으로 강성이 큰 지반으로 조성하여, 말뚝을 하부지층 1.3D 정도까지 근입하는 조건으로 실내모형실험 단면을 조성하였다. 본 연구에서 적용된 실험단면은 그림 1에 나타내었다.

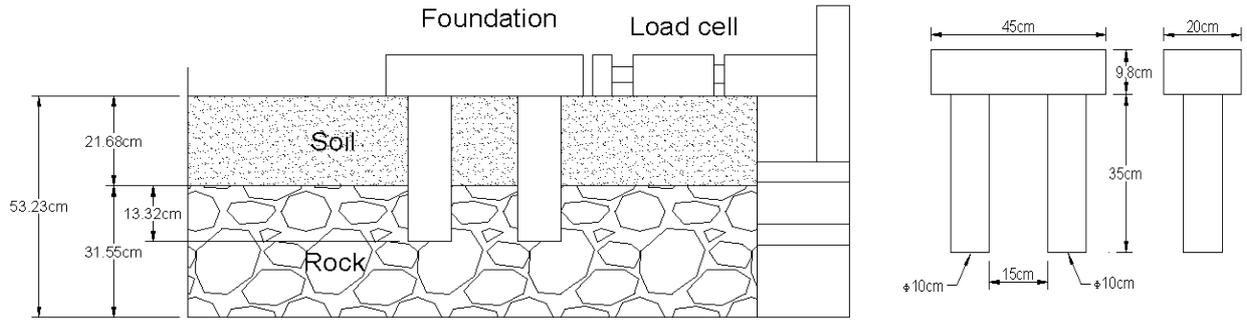


그림 1. 모형실험 대표단면도

3.2 모형실험 조건

다주 현장타설 말뚝에 대하여 다음 표 2.와 같이 실험 조건을 결정하여, 수평재하 모형실험을 수행하였다.

표 2. 모형실험 조건

구 분	실험방법	치수(cm)			크기 상사율
		모형토조	모형말뚝	상판	
다주 현장타설 말뚝	수평재하	60(B)×150(L)×60(H)	φ10×35(L)	20(B)×45(L)×9.8(H)	1 : 20

3.3 모형실험 방법

실내모형실험은 수평하중 작용시 모형말뚝의 변형과 말뚝 본체의 변형률을 알아보기 위하여 진행하였다. 실내모형실험 시에는 수평하중을 말뚝 상부의 기초에 직접 작용시켰으며, 하중재하는 전기식 하중재하장치를 이용하여 1mm/min의 속도로 재하하는 변형률 제어방식으로 진행하였다. 하중재하장치에는 load cell을 설치하여 하중이 재하하는 동안 말뚝에 가해지는 하중을 측정하였으며, 상부 기초에는 LVDT를 설치하여 하중이 재하하는 동안 말뚝 두부의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 또한 말뚝 본체에는 strain gauge를 말뚝길이의 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 및 5/5 위치에 설치하여 수평하중이 작용하는 동안 말뚝 본체에 발생하는 변형률을 측정하였다. 측정된 data는 자동측정장치(Date Logger)와 연결하여 수평재하시 말뚝의 하중-변위 값과 말뚝의 변형률을 5초 간격으로 측정하였다.

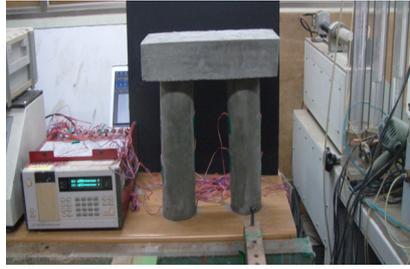
다음 그림 2.는 모형토조 및 재하장치를 나타내었으며, 그림 3.에 다주 현장타설 말뚝재하 시험과정을 나타내었다.



그림 2. 모형토조 및 하중재하장치



(a) 다주 말뚝



(b) Strain gauge 부착



(c) 암반지반 근입



(d) 원지반 조성



(e) 재하시험 세팅 완료



(f) 수평하중재하

그림 3. 다주 말뚝 모형실험 과정

3.3 모형실험 결과분석

본 연구에서는 수평재하 모형실험을 변형률 제어방식으로 수행하여 횡하중-변위 결과 및 말뚝본체의 심도에 따른 변형률의 관계를 도출하여 그림 4. 및 그림 5.에 나타내었다.

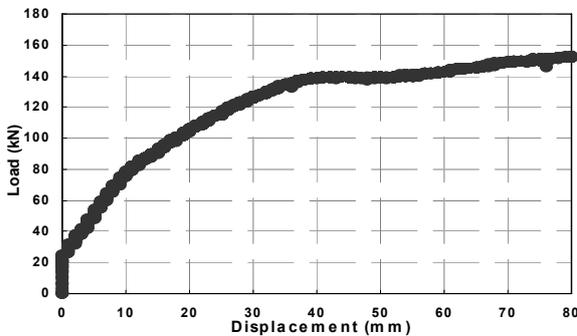


그림 4. 횡하중 - 변위결과

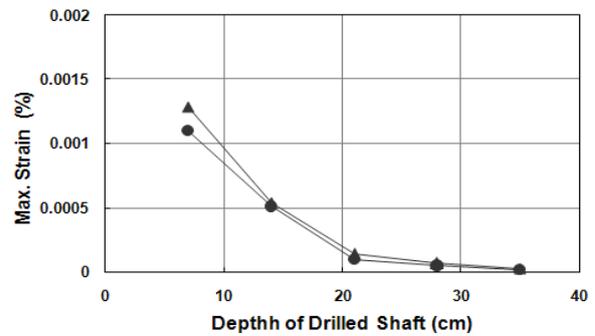


그림 5. 변형률-심도 결과

그림 4의 수평재하 모형실험 결과를 살펴보면, 횡방향 최대하중은 최대 약 150kN정도로 평가되었으며, 발생 변위는 80mm 정도로 나타났다. 그림 5에 나타낸 바와 같이, 심도에 따른 변형률은 말뚝 상부에서 좌측말뚝은 최대 0.0011%, 우측말뚝은 최대 0.0013%정도이며, 말뚝의 근입부에서는 미세한 변형률을 보이는 것으로 분석되었다.

4. 수치해석

4.1 개요

수치해석은 모형실험 결과의 신뢰성 검증을 위하여 모형실험과 동일한 조건으로 하중을 재하하여 변

위 검토를 수행하였으며, 수평하중 작용시 말뚝의 하중전이 거동을 중점적으로 분석하였다. 수치해석 프로그램은 MIDAS IT社의 지반해석 유한요소 프로그램 MIDAS/GTS V.220 사용하였으며, 모형토조의 크기를 고려하여 3차원으로 모사하여 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서 지반은 고체요소로 모델링하였으며, Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용하였다.

4.2 지반강도 정수

수치해석에 적용된 각 지층별 지반강도정수는 지반조성시에 수행한 토질시험 결과와 각종 문헌자료를 참고하여 결정하였으며, 해석에 적용된 지반강도 정수는 다음 표 4.에 나타내었다.

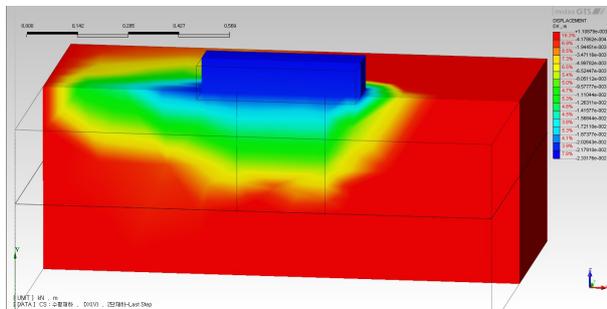
표 4. 수치해석에 적용한 지반강도 정수

구 분	단위중량(kN/m ³)	내부마찰각(°)	점착력(kPa)	탄성계수(MPa)	프아송비
토 사	18.5	30	19	2.45	0.33
하부지층(자갈)	20	35	20	25	0.31
콘크리트	24.5	38	100	2500	0.18

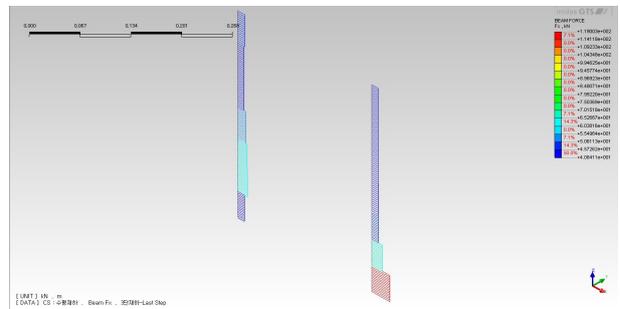
4.3 수치해석 결과

4.3.1 수평재하시 수치해석 결과 분석

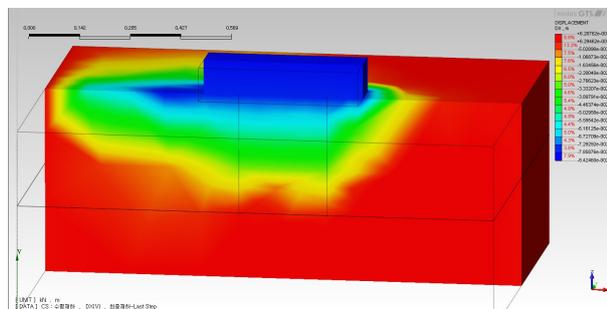
다주 현장타설말뚝의 수평재하시 재하단계별 수평변위와 말뚝의 축력도 결과를 다음 그림 6.과 같이 나타내었다. 또한 수평하중 작용시 말뚝의 하중전이 결과를 그림 7.에 나타내었다.



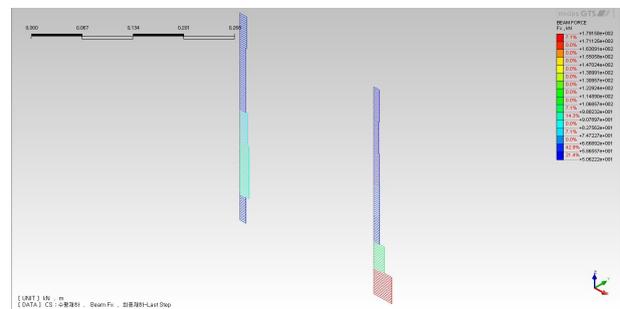
(c) 수평재하 2단계



(d) 2단계 말뚝 축력



(g) 수평재하 최종단계



(h) 최종단계 말뚝 축력

그림 6. 수평재하 단계별 해석 결과

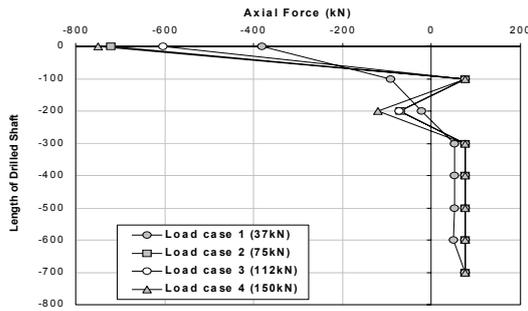


그림 7. 수평력 작용시 말뚝의 하중전이 결과

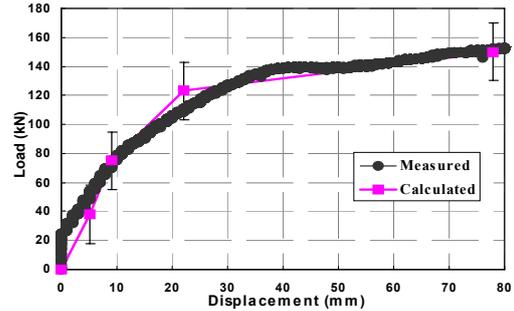


그림 8. 모형실험과 수치해석 비교분석 결과

그림 7의 하중전이 분석결과를 살펴보면, 다주 현장타설 말뚝은 말뚝머리에서 최대 축력이 발생하는 것으로 분석되었다. 하중이 증가할수록 말뚝 본체 내에서는 압축과 인장이 같이 발생하는 것으로 분석되었으며, 모형실험결과와는 다르게 말뚝 하부까지 하중이 전달되는 것으로 분석되었다.

4.4 모형실험과 수치해석 결과 비교분석

본 연구에서는 신뢰성을 검증하고자 수평재하시 횡하중-변형에 대하여 모형실험 및 수치해석 결과값을 비교하였으며, 분석결과 해석단계별로 모형실험과의 오차율은 5% 이내로 신뢰성이 높은 것으로 분석되었다 (그림 8 참조). 말뚝의 하중-변형 거동은 모형실험 결과와 수치해석 결과가 유사한 양상을 보이나, 말뚝본체 축력은 수치해석결과와 모형실험결과가 차이를 보이는 것으로 분석되었다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 대구경 다주 현장타설 모형말뚝에 대하여 실제 말뚝의 수평거동을 분석하기 위하여 실내모형실험을 수행하여 말뚝의 거동 특성을 평가하고자 하였으며, 본 연구를 통해 얻어진 주요 내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험결과, 수평재하시 횡방향 최대하중은 최대 약 150kN정도일 때 발생 변위는 80mm로 나타났다. 심도에 따른 변형률은 말뚝 상부에서 좌측말뚝은 최대 0.0011%, 우측말뚝은 최대 0.0013%정도로 평가되었다.
- (2) 모형실험결과에 대한 신뢰성을 검증하고자 수행한 수치해석과 모형실험으로 얻은 하중-변위 결과를 비교, 분석한 결과 오차범위가 5% 이내로 신뢰성이 높은 것을 평가되었다.
- (3) 반면 말뚝본체의 축력은 수치해석결과와 모형실험 결과가 다소 차이를 보이는 것으로 분석되어 이에 대한 자세한 연구가 필요함을 확인하였다. 향후, 수평하중 작용시 지반의 거동을 고려하여 말뚝-지반의 복합거동에 대한 연구와 이론식과 연계한 말뚝의 하중전이 거동 분석이 추가적으로 진행 되어야할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Broms, B. B. (1964), "Laterally Resistance of Piles in Cohesionless Soils", Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.90, No. SM 3, pp. 123~156.
2. Reese, L. C. and Welch, R. C. (1975), "Laterally Loading of Deep Foundations in Stiff Clay", Journal of the Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.101, No. GT.7, pp. 633~649.
3. Murchison, J. M. and O'Neill, M. W. (1984). "Evaluation of p-y Relationships in Cohesionless Soil", Analysis and design of pile foundations, ASCE, New York, pp. 174~191.