

대구경 현장타설말뚝의 주면 마찰력 평가

Evaluation of Skin Friction on Large Drilled Shaft

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

여 규 권² Yea, Geu-Guwen

이 재 호³ Lee, Jae-Ho

Abstract

Both static pile load test with load transfer measuring system and the pile dynamic load test are performed to estimate the skin friction and behavior characteristics of a large drilled shaft. And the numerical modeling of large drilled shaft is performed by applying the FDM program. Since the magnitude of friction resistance depends on the relative displacement between soil and shaft, load and displacement at the arbitrary depth along the large drilled shaft are estimated to analyze the correlation. According to the measuring results of load transfer, unit skin friction along the large drilled shaft was fully mobilized at gravel layer in the middle of shaft and the frictional resistance transmitted to bedrock was relatively small. Also, even for the same drilled shaft, the results of PDA and static load test are different with each other and the difference is discussed.

요 지

대구경 현장타설말뚝에 대하여 하중전이 측정을 수반한 정재하시험, 동재하시험 및 유한차분해석을 수행하여 주면 마찰력 거동특성에 대한 연구를 실시한다. 주면 마찰력은 말뚝과 지반의 상대변위와 직접적으로 관계되므로 임의의 심도에서 측정된 말뚝의 하중전이량과 유한차분해석에 의한 주면지반의 변위와 응력을 이용하여 거동특성을 분석한다. 하중전이측정결과에 의하면 현장타설말뚝 주면을 따라 발휘되는 극한단위주면 마찰력은 중간 깊이인 모래자갈층과 자갈층 상부에서 먼저 나타난다. 또한 동일한 현장타설말뚝에 대하여 동재하시험과 정재하시험을 실시한 결과 주면 마찰력과 선단지지력의 거동특성이 상이하게 평가되었으며, 그 차이점에 대하여 논의한다.

Keywords : Drilled shaft, End bearing capacity, Load transfer, Numerical analysis, Pile, Pile dynamic load test, Skin friction, Static pile load test

1. 서 론

초고층건물과 장대교량 같은 대형구조물의 경우 구조물 하부기초에 작용하는 하중 또한 크다. 그러므로 상부구조물의 큰 하중을 안전하게 양질의 지지층까지

전달하기 위하여 깊은기초 형식인 대구경 현장타설말뚝의 활용도가 증가되고 있는 추세이다(Hong and Yea, 2002).

그러나, 우리나라 지층분포는 대부분 다층지반으로 구성되어 있고, 말뚝의 길이와 선단부 관입조건에 따

1 정희원, 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Chung-Ang Univ.)

2 정희원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사졸업 (Member, Ph.D. Dept. of Civil Engrg., Graduate School, Chung-Ang Univ.)

3 정희원, 중앙대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Graduate School, Chung-Ang Univ., jaeho71@hanmail.net)

라 그 거동특성이 다르게 나타난다. 이러한 관점에서 현장타설말뚝의 이론 및 경험식에 의한 정량적인 지지력 평가는 어렵다고 볼 수 있다. 결국 이러한 지지력예측 방법들의 불확실성 때문에 말뚝재하시험을 실시하며 말뚝의 축방향 및 수평방향 허용지지력을 현장에서 시험을 통하여 직접 결정하게 된다(Das, 1998). 재하시험 결과로 지지력을 판정하는 경우 또한 판정기준이 다양하여 각 기준에 의하여 판정된 지지력 사이에 오차가 크다(홍원표 등 1989). 그리고 국내에서 수행되는 대부분의 말뚝재하시험은 말뚝의 극한지지력(또는 항복지지력)을 확인하지 못하였을 뿐만 아니라 말뚝과 지반 사이의 하중전이에 대한 측정도 이루어지지 않고 있다(최용규, 2000). 특히 대구경 현장타설말뚝의 경우 시험말뚝을 대상으로 정재하시험을 수행하는 것은 비용과 공기 등의 문제로 아직 보편화되지 못하고 있다.

본 연구에서는 현장타설말뚝에 대하여 주변마찰저항력 거동특성을 평가하기 위하여 동재하시험을 실시함과 동시에 말뚝 내부 입의의 위치에 응력계를 설치하여 말뚝두부에 작용하는 하중으로부터 주변지반에 전이되는 축하중을 측정하는 하중전이시험을 수반한 연직재하시험을 수행하였다.

먼저 정재하시험의 하중전이 측정결과를 근거로 암반에 근입된 대구경 현장타설말뚝의 누적주면 마찰력 및 단위주면 마찰력 분포특성을 조사한다. 주변 마찰력은 말뚝과 지반 사이의 상대변위에 의해 발휘되기 때문에 재하시험중 나타나는 현장타설말뚝의 변형을 측정하여 주변 마찰력과 비교해 봄으로서 말뚝의 심도별 주변 마찰력의 특성에 대하여 논의한다. 마지막으로 동일 말뚝에 대하여 정재하시험과 동재하시험을 실시할 경우, 심도별 주변 마찰력과 선단지지력 특성이 어떻게 서로 다르게 평가되는지에 대해 논의하고자 한다.

2. 말뚝재하시험 및 수치해석

말뚝의 지지거동을 평가하기 위한 하중전이 해석방법으로는 실험적 방법, 수치해석적 방법, 하중전이함수를 이용한 해석방법으로 크게 구분할 수 있다. 이중 말뚝정재하시험은 실제 말뚝을 대상으로 실험하는 방법으로서 가장 신뢰성이 높은 방법으로 알려져 있다(정창규 등, 2004).

2.1 말뚝재하시험 개요

경북 구미시 교량건설 현장의 대구경 현장타설말뚝을 대상으로 지지특성, 침하특성 및 주변지반의 하중전이특성을 평가하기 위하여 하중전이시험을 수반한 정재하시험과 동재하시험을 수행하였다.

재하시험방법은 ASTM D1143-81(1986)의 완속재하방법(SM Test)으로 수행되었으며 재하하중은 어스 앵커반력을 이용하였다. 하중의 재하(loading)와 제하(unloading)는 단계별 재하방법인 다단계 재하방식을 채택하였다. 시험말뚝은 사용말뚝으로 최대재하하중은 1860ton으로 직경이 1.8m이고 말뚝길이가 19.7m이다. 그리고 연직방향의 축하중을 측정하기 위하여 G.L.-6.0m 부터 하부로 2.0m 간격마다 매설형 콘크리트 응력계를 설치하였다.

본 지역에서 실시한 시추조사결과에 의하면 상부로부터 모래층, 모래질자갈층, 자갈층, 풍화암층 및 연암층의 순으로 분포하고 있으며, 본 말뚝의 선단은 연암층에 2.7m 소켓관입되어 있다. 설계시 조사된 시추주상도와 말뚝시공현황은 그림 1과 같다.

말뚝지층인 연암은 주로 화강암질 편마암으로 구성되어 있고 풍화정도는 심한풍화에서 보통풍화 상태이며 세편 및 단주상의 코어를 회수하였다. 연암층 구간 중 심도 16.9~17.5m에서는 TCR이 21%, RQD가 0%이고 심도 17.5~19.0m에서는 TCR이 94%, RQD 0%로 절리 및 파쇄대가 매우 발달되어 있다. 절리와 파쇄가 심하여 압축시험을 위한 시료를 확보하지 못하였다. 현장타설말뚝은 모래질자갈층과 자갈층에 대한 공벽붕괴를 방지하기 위하여 케이싱을 설치하였으며, 상부토층 및 풍화암층은 해머그래브를 이용하여 굴착하고 나머지 연암구간은 RCD공법으로 시공하였다.

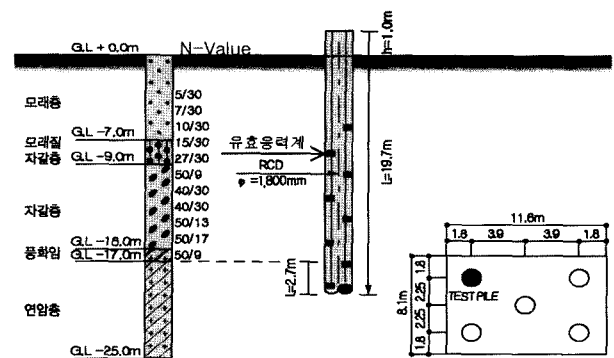


그림 1. 시추주상도 및 말뚝시공 현황

2.2 말뚝재하시험 결과

그림 2는 동재하시험 결과로 얻은 하중-침하관계를 도시한 것이다. 동재하시험에서는 심도별 주면 마찰력과 선단지지력의 분리측정이 가능하므로, CAPWAP에 의하여 말뚝 선단부에서 지지력을 분석한 결과 총 2422ton의 전체지지력중 주면 마찰력은 1186ton이고 선단지지력은 1236ton으로 나타났다.

그림 3은 동재하시험이 실시된 말뚝에 대하여 7일 경과후 정재하시험을 실시한 결과이다. 정재하시험 결과에 의하면 최대재하하중 1860ton에 대한 전침하량은 13.0mm가 발생하였다. 이 중 잔류침하량은 2.4mm이고 탄성침하량은 10.6mm이다. 그러나 항복하중 판정법, 극한하중 판정법, 전침하량기준(25.4mm)과 잔류침하량기준(6.3mm)에 의한 판정법으로는 항복지지력에 도달하지 않은 것으로 평가되었다.

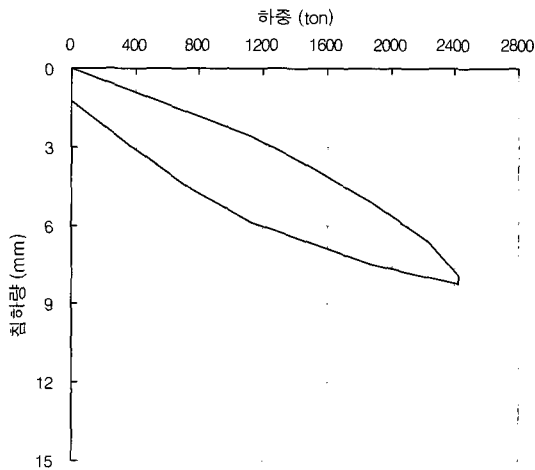


그림 2. 동재하시험 결과

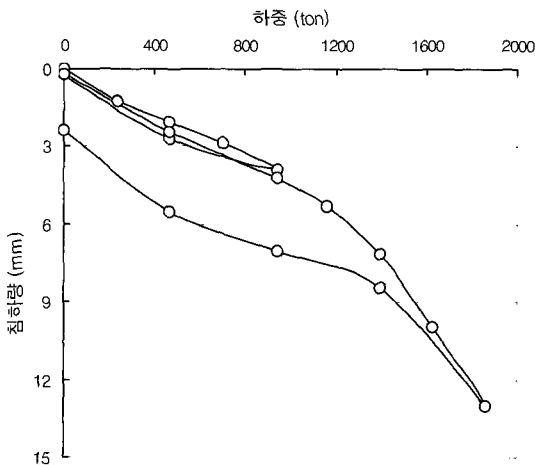


그림 3. 정재하시험 결과

2.3 하중전이 측정결과

현장타설말뚝의 하중전이거동을 규명하기 위하여 정재하시험시 콘크리트 응력계에 의하여 측정된 축하중 분포도를 도시하면 그림 4와 같다.

그림에서 각 재하하중의 크기가 작은 경우는 말뚝 심도에 따른 하중전이량은 미소하였으나, 재하하중이 증가할수록 측정되는 하중전이량이 상대적으로 증가되고 있다. 특히 하중전이 양상은 모래자갈층을 지나 자갈층에서 가장 급격한 증가를 나타내고 있다. 그러나 풍화암과 연암구간에서 측정된 하중전이량은 상부자갈층에 비하여 작은 것으로 나타났다. 또한 전 시험과정중 측정된 응력은 콘크리트 재료의 허용응력 범위내에 존재하고 있음을 확인할 수 있었다.

2.4 유한차분해석결과

말뚝 주변지반의 변위 및 응력특성을 규명하기 위하여 유한차분해석 프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 사용하였다. 해석시 말뚝 주변지반은 Mohr-Coulomb 탄소성모델을 적용하였으며, 말뚝과 주변지반과의 수평 및 수직방향의 역학적 거동특성은 점착력성분, 마찰력성분 및 스프링상수 등을 이용하여 고려하였다. 해석경계조건으로는 지반의 좌우측 경계면은 수평방향으로 변위를 구속하였으며, 하부경계면은 수평방향과 연직방향의 변위를 모두 구속하였다. 표 1은 수치해석에 적용된 말뚝과 지반의 물성치이다. 또한 그림 5는 1m를 단위로 하는 해석요소망을 나타내

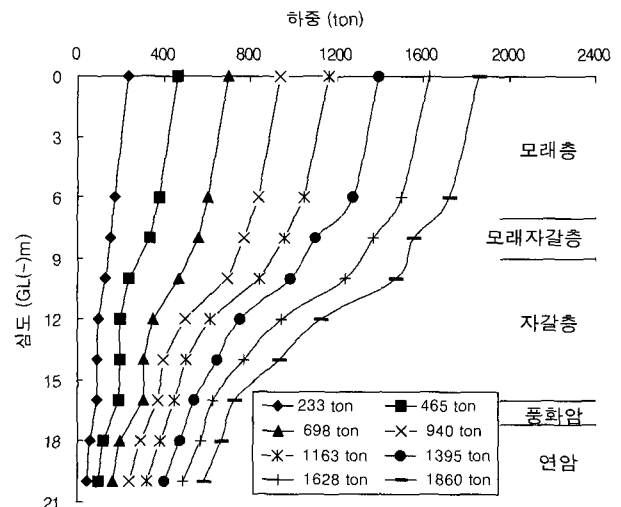


그림 4. 심도별 말뚝 축하중 분포도

표 1. 수치해석에 적용된 지반 및 말뚝 물성치

구 분	점착력(kN/m ²)	탄성계수(kN/m ²)	포아송비	단위중량(t/m ³)	내부마찰각(°)
말뚝 (L=19.7m)		2.5×10^7	0.15	2.4	
모래층 (G.L.(-)0m~7m)	0	5.0×10^4	0.35	1.8	31
모래질 자갈층 (G.L.(-)7m~9m)	0	2.0×10^5	0.3	1.9	34
자갈층 (G.L.(-)9m~16m)	0	4.0×10^5	0.3	2.0	35
풍화암 (G.L.(-)16m~17m)	50	1.0×10^6	0.25	2.1	40
연암 (G.L.(-)17m~)	500	5.0×10^6	0.2	2.5	45

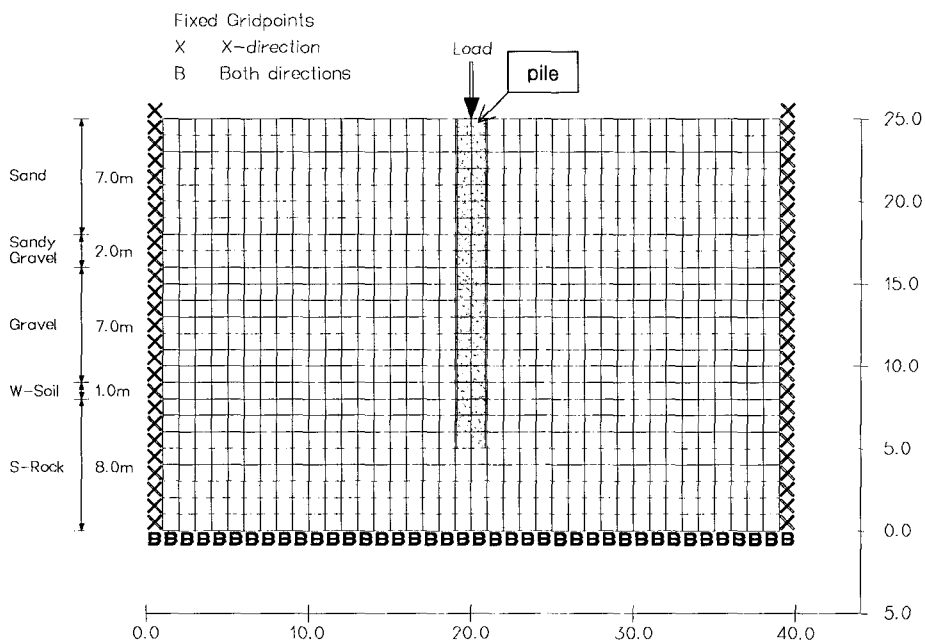


그림 5. 유한차분해석 요소망

고 있다.

암반에 근입된 대구경 현장타설말뚝에 대한 수치해석으로 말뚝두부에서의 하중-침하 관계곡선을 구하고 정재하시험결과와 함께 도시하면 그림 6과 같다. 최대 재하하중 1860ton의 경우 정재하시험결과와 말뚝두부 침하량은 12.98mm였으나, 수치해석 결과로는 13.9mm의 침하량이 발생되었다. 수치해석결과에 의한 침하량을 정재하시험결과와 비교하면 말뚝두부에서 최대하중재하시 0.92mm정도 크게 나타났다. 그러나 하중-침하관계 곡선에서 단계별 하중재하시 곡률의 변화양상이 정재하시험결과와 거의 유사하므로, 본 수치해석과정을 이용하여 단계별 재하하중에 따른 심도별 말뚝 주면지반의 변위 및 응력특성을 산정하였다.

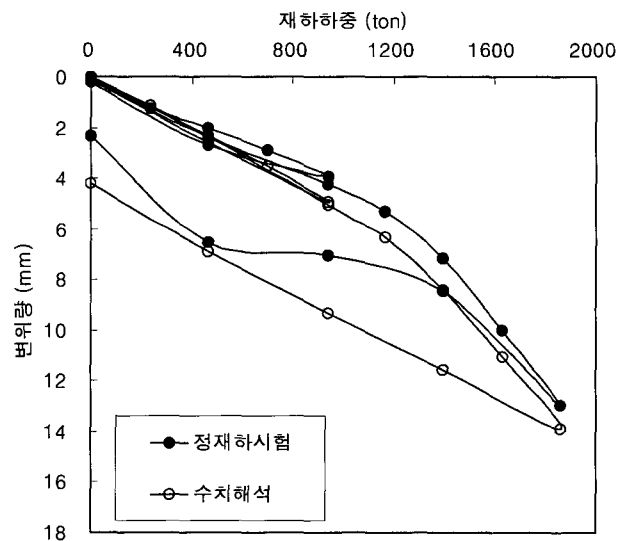


그림 6. 말뚝두부의 하중-침하량관계

3. 주면 마찰력 특성분석

3.1 말뚝의 변형특성

말뚝의 주면 마찰력은 지반과의 상대변위에 따라 발생하게 된다. 따라서 말뚝의 주면 마찰력 특성을 평가함에 있어 말뚝자체의 탄성압축량, 말뚝-지반의 상대변위량 그리고 말뚝의 선단침하량을 독립적으로 산정하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해서는 말뚝 깊이에 따라 신축계(telltale rod)를 설치하여 직접적으로 변위를 측정하는 것이 바람직하나 아직까지 국내에서 보편화되어 있지 않으며, 재하시험시 말뚝 두부에서의 침하량만을 측정하면 이들 영향을 분리하여 산정하기가 매우 어렵다.

본 장에서는 말뚝내 설치된 콘크리트 응력계의 계측 결과를 이용하여, 현장타설말뚝의 깊이별 변형특성을 분석하였다. 말뚝의 전체침하량 S 는 식 (1)과 같이 말뚝의 압축량 S_{pile} 과 선단지반 침하량 S_{soil} 의 합으로 나타낼 수 있다. 이중 말뚝의 압축량은 탄성거동이 예상되는 경우 식 (2)에 따라 구할 수 있다(Sharma and Joshi, 1988).

$$S = S_{pile} + S_{soil} \quad (1)$$

$$S_{pile} = \int_L^0 \left(\frac{Q_p + \xi Q_f}{A_p E_p} \right) dl \quad (2)$$

여기서, Q_p, Q_f 는 각각 말뚝에 작용하는 두부하중 및 주면 마찰력을 나타내는 값이다. 또한 A_p, E_p, L 은 각각 말뚝의 단면적, 탄성계수 및 설치깊이(GL(-)m)를 나타낸다. ξ 는 말뚝 깊이별 단위주면 마찰력 분포에 따라 결정되는 상수로서 직사각형이나 포물선 분포인 경우 0.5의 값을 가지며 삼각형 분포인 경우 0.67의 값을 갖는다(Vesic, 1977).

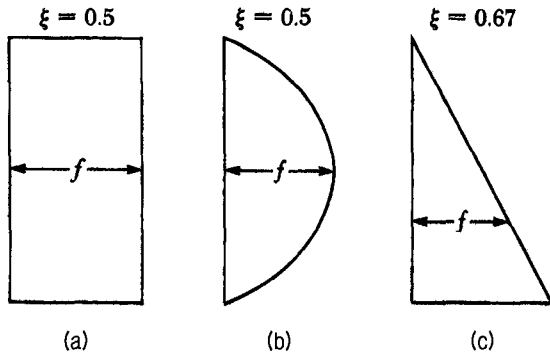


그림 7. 단위주면 마찰력 분포 형태에 따른 ξ 값의 적용(Vesic, 1977)

먼저 그림 8은 콘크리트 응력계 측정치를 탄성이론에 대입하여 말뚝의 심도별 압축변위량을 누적하여 도시한 것이다. 이때 ξ 값으로는 단위주면 마찰력의 분포(그림 11 참조)가 포물선 형태인 0.5로 적용하였다. 그림 8에서 말뚝의 탄성압축량은 말뚝두부에서부터 말뚝선단부까지 거의 선형적으로 감소하고 있으나 상부구간인 모래층에서 좀더 두드러지게 발생되고 있다.

그러나 하중단계가 가장 높은 1860ton에서도 최대누적압축량이 5mm 미만으로 나타나 비교적 작은 수치를

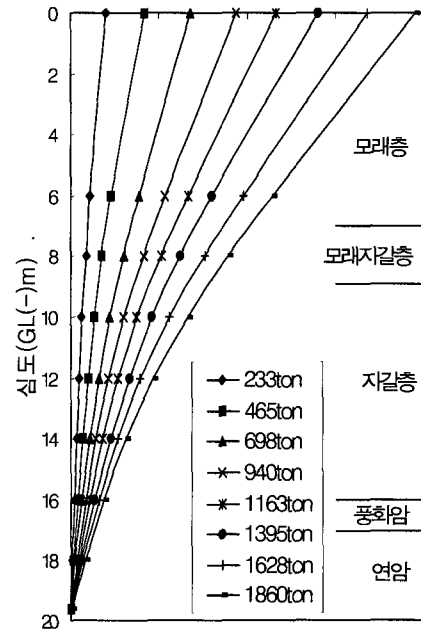


그림 8. 심도별 말뚝의 탄성압축변위

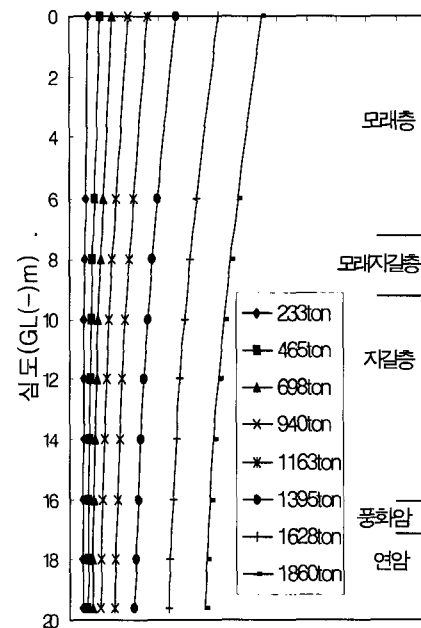


그림 9. 심도별 말뚝의 변위

보이고 있다. 정재하시험시 측정된 최대침하량이 13mm 인 것을 감안하면 말뚝의 탄성침하량보다는 말뚝선단에서의 지반침하가 더 큰 부분을 차지하는 것으로 판단된다.

말뚝의 탄성압축량은 깊이에 따라 누적되어 나타나지만, 말뚝의 선단침하량은 사실상 선단지반의 침하이므로 말뚝 깊이와는 무관한 것으로 생각할 수 있다. 즉, 하중단계별 말뚝두부에서 전체침하량은 재하시험을 통해 구한 기지의 값이며, 탄성압축량은 그림 8에서 구하였으므로, 식 (1)에 의거하여 두 값의 차이로 말뚝 선단에서의 지반침하량을 구할 수 있다. 그림 9는 말뚝의 심도별 전체침하량 즉, 말뚝의 변위를 재하단계에 따라 심도별로 도시한 것이다. 그림에서 전체적인 말뚝의 변위가 말뚝자체의 탄성변위 보다는 선단부에서의 침하량이 큰 부분을 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

3.2 주면 마찰력 분포

말뚝내부에서 측정된 축방향 하중으로부터 말뚝주면을 따라 발휘되는 주면 마찰력을 산정하면 그림 10과 같다. 그림에서 233ton의 낮은 하중단계에서는 심도별 주면 마찰력 분포가 선형을 나타내고 있으나, 재하중이 증가함에 따라 주면 마찰력이 경사진 S자 형태의 곡선 분포를 나타내고 있다.

즉, 모래층인 G.L.(-)6m 지점까지는 주면 마찰력이 그다지 크게 발생되지 않고 있다가, 모래자갈층부터 풍화암층까지 주면 마찰력이 급격하게 증가하였으며, 축하중의 대부분을 상부 양질의 지층에서 지지하므로 연암에 전이되는 축하중이 적어 주면 마찰력 증가가 완화된 경향을 보이고 있다.

또한, 주면 마찰력 값으로부터 단위주면 마찰력 $f(z)$ 를 식 (3)에 의거 산정하였다(한국지반공학회, 1997).

$$f(z) = \frac{\Delta R(z)}{D\Delta z} \quad (t/m^2) \quad (3)$$

여기서 $\Delta R(z)$ 는 대상구간에서 발휘된 주면 마찰력(ton)이며, D 는 말뚝단면둘레(m), Δz 는 대상구간 말뚝길이(m)를 나타낸다.

그림 11은 하중단계에 대한 심도별 단위주면 마찰력의 분포를 도시한 것이다. 말뚝의 단위주면 마찰력은 초기 하중단계에서는 불규칙성을 보이다가 재하중이 증가함에 따라 점차 포물선(선단에서 0이 아닌 parabolic)

의 형상을 보이고 있다. 말뚝의 최대 단위주면 마찰력은 자갈층 구간에서 나타나며 $24.0t/m^2$ 으로 산정되었다. 이는 Touma 등(1974)이 제시한 토사층의 최대주면 마찰력과 일치하는 값이다.

일반적으로 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면 마찰력은 토사층보다 암층에 근입된 구간에서 대부분 발휘되는 것으로 설계를 하고 있다. 그러나 본 연구결과에서는 현장타설말뚝이 연암층에 근입되어 있지만, 최대주면 마찰력이 중간깊이인 모래자갈층 및 자갈층에서 대부분 발휘되고 있으므로 상대적으로 하부 기반암층

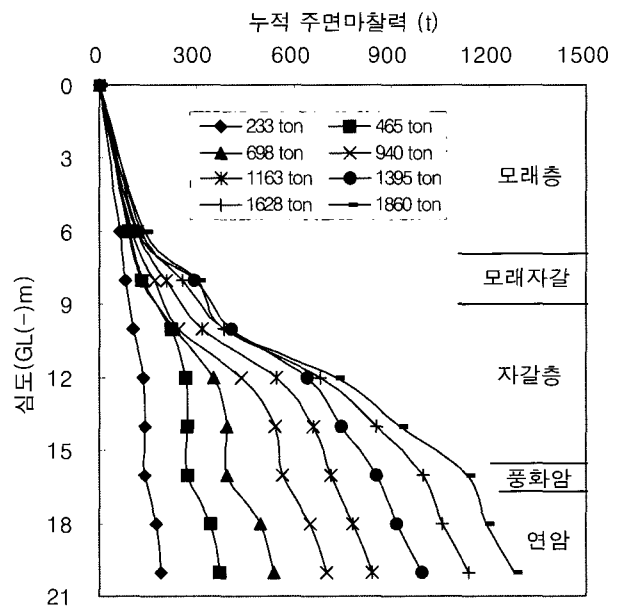


그림 10. 재하중별 주면 마찰력 분포도

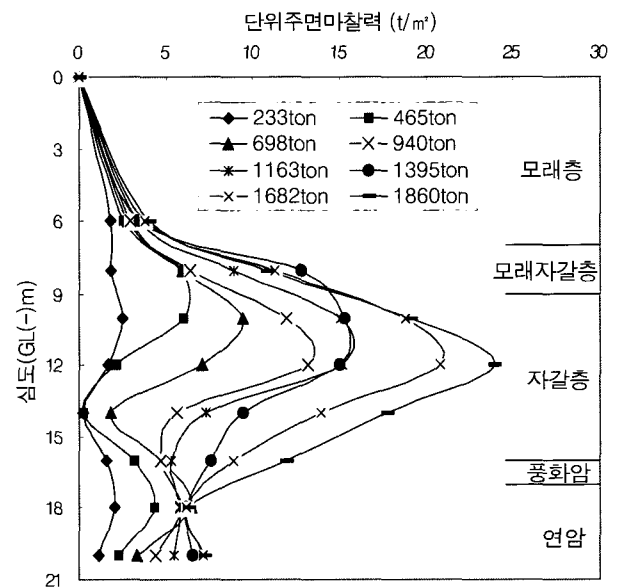


그림 11. 심도별 단위 주면마찰력 분포도

에서 분담해야 하는 하중이 작게 됨을 알 수 있다.

따라서 연암층 심도가 깊은 경우, 연암층에 근입시키기 위하여 무리하게 장대말뚝이 되도록 설계하는 경우가 많으나 상부에 모래자갈층이나 자갈층과 같은 양질의 지층이 존재할 경우는 각 지층에 대한 마찰저항 특성을 적극적으로 고려하는 설계접근이 필요할 것으로 판단된다.

3.3 하중전이 측정에 의한 말뚝변위와 주면 마찰력

(1) 말뚝변위에 대한 누적 주면 마찰력

말뚝의 변위에 따른 주면마찰 특성을 평가하기 위하여 그림 12에 이들 관계를 도시하였다. 전반적으로 말뚝변위가 증가함에 따라 주면 마찰력도 커지는 경향을 나타내고 있다. 그러나 강성이 낮은 지반에서는 일정 변위가 발생된 이후로는 주면 마찰력이 증가하지 않는 반면, 강성이 높은 자갈층 및 암반에서는 변위에 따라 주면 마찰력이 계속해서 증가하는 경향을 보인다.

즉, 상대적으로 강성이 낮은 모래층의 경우 변위량 4mm를 전후하여 주면 마찰력의 증가가 수렴된 상태이며, 모래자갈층 및 자갈층 상부에서는 각각 5.5mm, 5.2mm의 변위에서 주면 마찰력이 최대로 발휘된 후, 감소하거나 미소하게 증가하는 경향을 나타내고 있다.

풍화암, 연암 구간의 경우 초기 상대변위량이 2mm 미만일 경우 주면 마찰력이 급격히 증가되며, 이후 변위부터는 주면 마찰력 증가가 둔화되고는 있지만 계속 증

가하는 추세이며, 수렴확인은 되지 않고 있다. 또한 자갈층에 해당하는 말뚝구간에서는 모래자갈층과 암층의 중간거동을 보이며, 하부 자갈층 구간에서는 암반의 거동과 유사하게, 그리고 상부 자갈층 구간에서는 모래자갈층의 거동과 유사한 양상을 보이고 있다.

(2) 말뚝변위에 대한 단위 주면 마찰력

그림 13(a)~(c)는 말뚝의 변위에 따른 단위주면마찰력(t/m^2)의 관계를 도시한 그림이다. 그림 11에서 언급하였듯이 G.L(-)12m의 자갈층구간에서 가장 큰 단위주면 마찰력이 나타났으며, 최상부층인 모래층 구간에서는 단위주면 마찰력이 $4t/m^2$ 으로 가장 작게 나타났다. 그림 15에서 말뚝변위에 따라 단위주면 마찰력이 전반적으로 증가하는 추세를 보이고 있으나 모래층, 모래자갈층, 상부자갈층(G.L(-)10.0m)에서는 임의의 변위가 발생된 이후로는 단위주면 마찰력이 일정하거나 감소하는 경향을 나타내고 있다.

특히, 그림 13(a)에서 G.L(-)6m~(-)10m까지의 모래층, 모래자갈층 및 상부자갈층 구간의 말뚝변위와 단위주면 마찰력의 관계를 살펴보면, 극한 단위주면 마찰력이 발생하는 메커니즘을 확인할 수 있다. 그림 13(a)에 의하면 모래층에서는 1163t 재하시 말뚝변위가 4.2mm 발생된 이후부터 단위주면 마찰력이 거의 일정하고, 모래자갈층은 1395t 재하시 말뚝변위가 5.5mm 발생된 이후부터 단위주면 마찰력은 감소하였다.

그리고 상부자갈층은 1628t 재하시 말뚝변위가 8.0mm

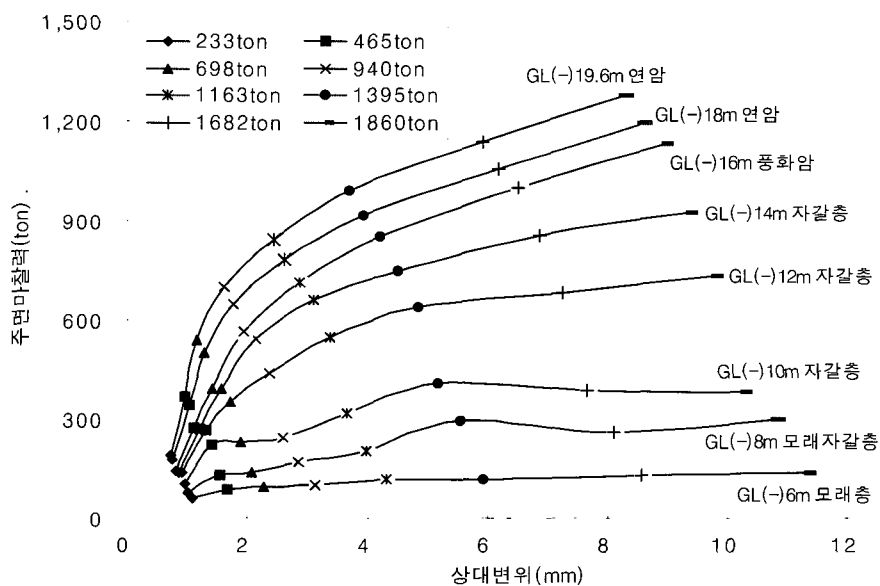


그림 12. 말뚝변위와 주면 마찰력과 관계

발생된 이후부터 단위주면 마찰력은 증가하지 않고 일정한 값을 보이고 있으며 이러한 결과는 재하하중의 증가에 의하여 모래층, 모래자갈층 및 상부자갈층에서 말뚝주면에서 발휘되는 주면 마찰력이 극한상태에 도달된 것을 의미한다.

그러나 그림 13(b)에서 G.L(-)12m, G.L(-)14m인 자갈층과 G.L(-)16m인 풍화암층에서는 최종하중인 1860t까지 단위주면 마찰력이 계속 증가하고 있으므로 최종재하하중

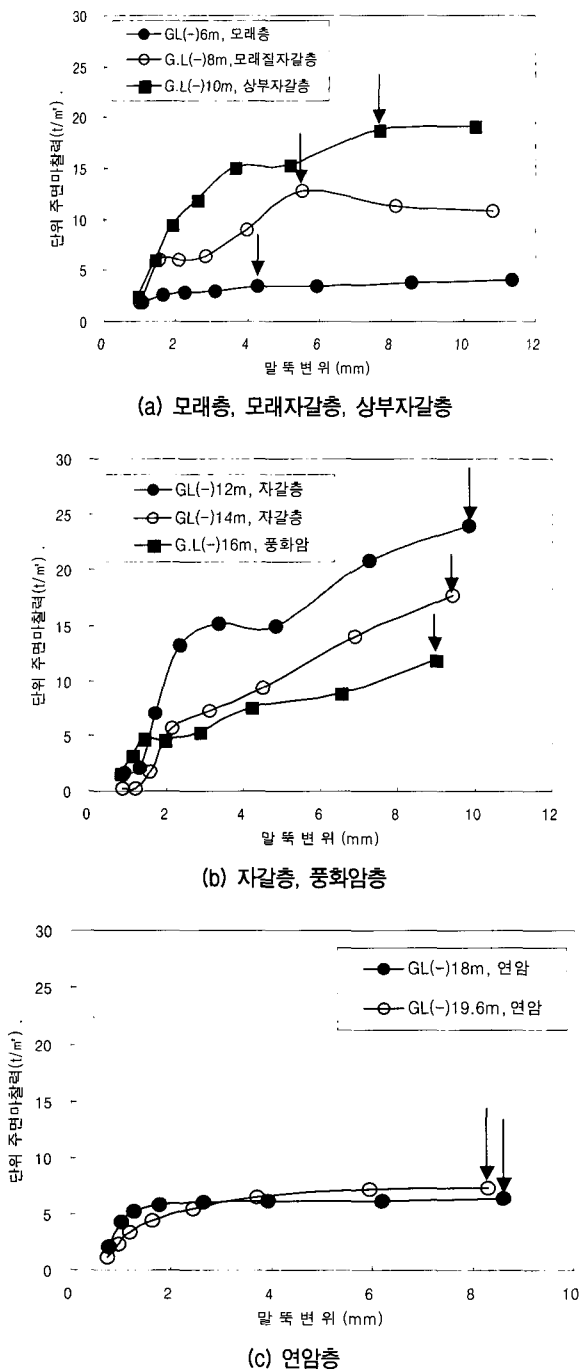


그림 13. 말뚝변위와 단위면적당 주면 마찰력 관계

단계에서도 말뚝주면에 발휘되는 주면 마찰력은 아직 극한상태에 도달하지 않은 것으로 판단된다. 그림 13(c)는 G.L(-)18m와 G.L(-)20m지점의 연암층에서 발휘된 말뚝 변위 증가에 대한 주면 마찰력 변화를 나타내었다. 그림 4에서 나타난 심도별 말뚝 축하중분포도에 의하면 연암에 전달되는 축하중의 크기가 작고 또한, 재하하중의 증가에 따른 축하중의 변화도 작은 것으로 나타났다. 따라서 말뚝 상부의 양호한 토층에서 말뚝재하하중의 대부분을 지지하므로 상대적으로 연암구간에서 분담해야 될 축하중의 크기가 작아서 주면 마찰력의 증가가 확인되지 않고 있다.

그리고 극한단위주면 마찰력이 발생할 때의 말뚝의 변위량의 크기는 지표면 부근의 모래층에서는 4.2mm, 그 하부층인 모래자갈층에서는 5.5mm, 상부자갈층의 경우 8mm이다. 이러한 결과는 Sharma and Joshi(1988)가 모래지반에 설치된 말뚝의 재하시험을 통해서 전체 침하량이 약 7mm 발생할 경우 극한주면 마찰력이 발휘된다고 보고된 내용과 Das(1998)가 말뚝의 직경과 길이에 관계없이 지반과 말뚝사이의 상대변위가 5~10mm 발생할 경우 극한주면 마찰력이 발생된다고 제시한 결과와 일치하고 있다.

3.4 수치해석에 의한 지반거동 특성

(1) 말뚝 주면지반 변위특성

그림 14는 단계별 하중재하시 수치해석으로 얻어진 지

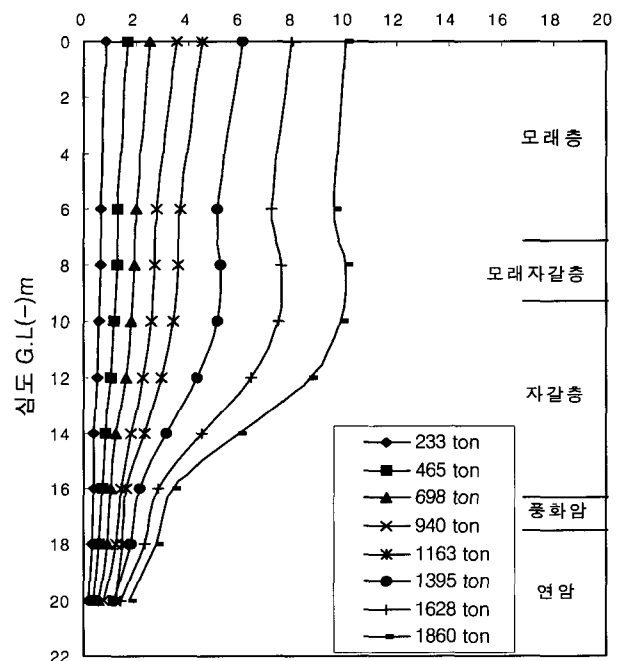


그림 14. 수치해석에 의한 심도별 지반변위

반변위를 심도에 따라 나타낸 것이다. 여기서 말뚝두부 재하하중에 따른 심도별 지반변위량은 1163ton까지 심도가 증가할수록 지반의 변위량도 감소하나 재하하중이 1395ton 이상으로 증가할 경우에는 모래자갈층과 자갈층 상부 G.L(-)10m에서 변위가 증가되고 다시 G.L(-)12.0m 지점부터는 주면지반변위가 감소하는 것으로 해석된다. 이는 말뚝 두부에 작용하는 하중에 의해서 상부지반의 변위가 하부지반보다 크게 나타나며, 또한 재하하중이 증가함에 따라 모래자갈층 및 자갈층 상부에서 주면 마찰력이 크게 작용함에 따라 이 구간에서의 지반변위량이 크게 나타난 것으로 판단된다.

(2) 말뚝 주면지반 응력특성

그림 15는 수치해석결과 말뚝두부에 재하된 하중에 의하여 주면지반으로 전달되는 응력상태를 각각 토사층과 암반층으로 구분하여 p-q도로 나타낸 것이다. 전반적으로 주면지반에 작용하는 평균주응력($p=(\sigma_1 + \sigma_3)/2$)과 주응력차($q=(\sigma_1 - \sigma_3)/2$)의 관계가 선형적으로 증가하고 있으나 그림 15(a)의 G.L-8.0m 지점과 G.L-10.0m 지점에서는 응력상태가 반전되는 경향을 보이고 있다. 즉, p축은 감소하고 q축은 다소 증가하는 경향을 보이고 있는데 이는 주면지반으로 작용하는 수평방향응력(σ_3)의 감소로 인한 것이다. 주면지반의 수평응력 감소는 말뚝의 단위주면 마찰력 감소와 관련지어 생각할 수 있다. 즉, 그림 13의 말뚝변위와 단위주면 마찰력 관계를 보면, 모래자갈층 및 상부자갈층에서 단위주면 마찰력이 변위가 증가함에 따라 최대치에 도달한 후 다소 감소하는 경향을 보이고 있는데 이 같은 현상이 주면지반의 수평방향 응력감소와 관련된 것으로 판단된다.

3.5 재하시험법에 따른 지지특성 분석

본 절에서는 동일한 현장타설말뚝에 대하여 동재하시험과 정재하시험을 수행하였을 때 심도별 주면 마찰력과 선단지지력의 변화가 어떻게 나타나는지를 평가하였다. 그림 16은 동재하시험 결과와 정재하시험중 하중단계가 가장 큰 1860ton에서의 시험결과를 나타낸 것이다.

동재하시험의 경우 CAPWAP 분석을 실시한 결과, 2422ton의 전체지지력을 얻었으나, 말뚝의 극한하중까지 도달하지는 않은 것으로 나타났다. 정재하시험에서는 하중을 재하한 범위내에서만 거동이 측정되므로 동재하시험과 지지력에서 차이를 보이고 있다.

그러나 두 시험 모두 심도가 깊어짐에 따라 말뚝 선단저항력이 분담하는 크기는 감소하고, 주면마찰저항력의 분담하는 하중이 증가하는 것으로 조사되었다. 특히 말뚝두부에서 모래자갈층인 G.L-9.0m까지의 주면마찰저항력의 증가는 미소하였으나, 자갈층 하부에서부터는 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 동재하시험에서는 주면 마찰력은 지층의 종류에 상관없이 거의 일정하게 증가하는 것으로 예측하고 있는 반면 실제 하중전이 시험에서는 그 증가경향이 일정하지 않았으며 특히, 자갈층 지점부터 주면 마찰력이 크게 발휘되는 것으로 나타났다. 또한 동재하시험은 연암구간에서 주면 마찰력의 급격한 증가를 예측하고 있으나 실제 하중전이 측정을 통해서 연암구간에서 주면 마찰력의 증가가 미소한 것으로 나타났다.

각 시험에서 나타난 선단지지력과 축하중의 비율을 살펴보면 정재하시험의 경우 최대재하하중 1,860ton 중

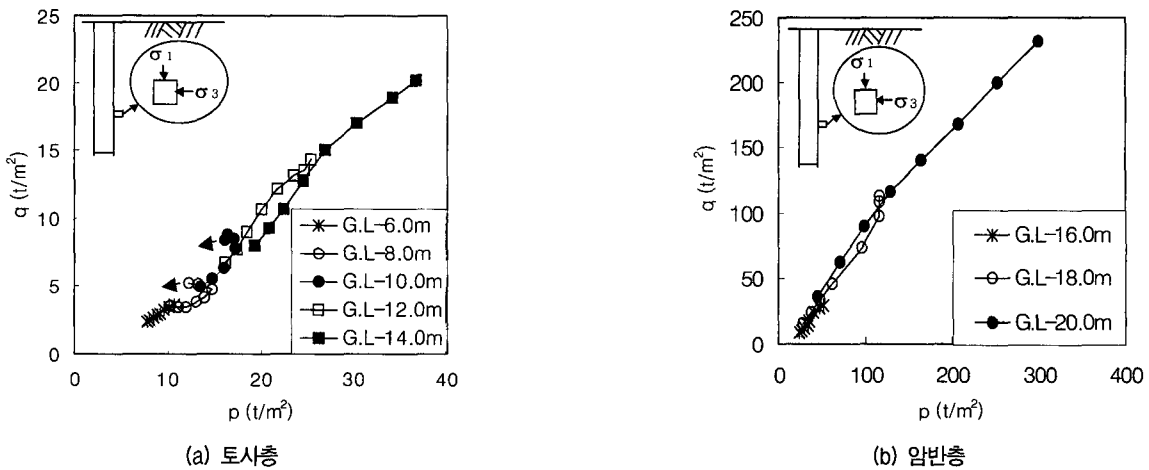


그림 15. 수치해석 결과 말뚝주면지반에 작용하는 응력상태

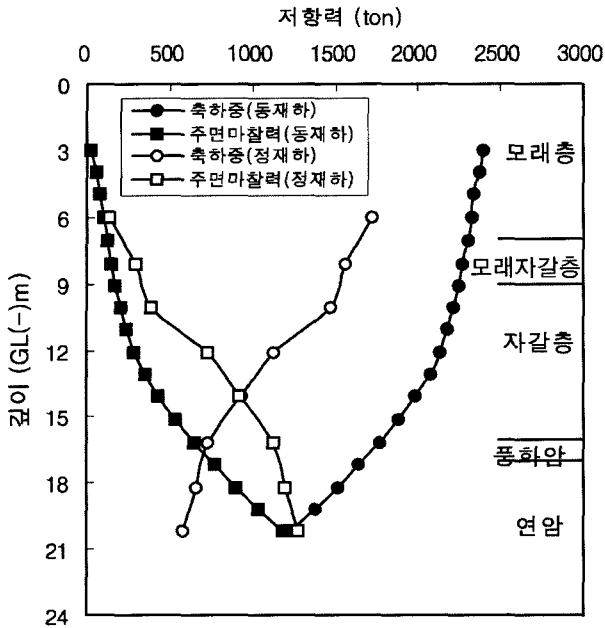


그림 16. 재하시험에 따른 말뚝 축하중과 주면 마찰력 비교

에서 주면마찰저항력이 69%를 차지하며 선단저항력이 31%가 되는 것으로 나타났다. 또한 동재하시험의 경우는 극한지지력 2,422ton에 대하여 주면마찰저항력이 49%, 선단저항력이 51%인 것으로 나타났다.

하중재하 방식에 따라 지지거동 특성이 다르게 나타날 수 있다. 특히, 동재하시험에서는 CAPWAP 분석시 입력되는 Damping값이나 Quake 상수 등이 실제 지반과 얼마나 일치하느냐에 따라 정확도가 결정된다. 따라서 동재하시험과 정재하시험에서 주면마찰저항력의 분포 특성 차이는 동재하시험에서 적용되는 입력상수 값의 차이에 의하여 발생할 수 있으며, 실제로는 변위를 발생시켜 하중전이를 측정할 정재하시험 결과가 실제 거동과 부합될 것으로 판단된다. 따라서 동재하시험 결과로 대구경 현장타설말뚝의 주면마찰저항 거동특성을 논의하기 위해서는 좀더 많은 자료수집과 연구과정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

연암에 근입된 대구경 현장타설말뚝에 대하여 정재하시험, 동재하시험과 수치해석을 실시하여 주면 마찰력에 대한 거동특성을 분석하였다. 특히 정재하시험에서는 일정 간격으로 콘크리트 응력계를 설치하여 하중단계별 말뚝의 하중전이를 분석을 실시하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 하중전이 측정을 수반한 정재하시험은 말뚝자체의 탄성침하량과 선단지반침하량의 분리평가를 가능케 하며, 말뚝의 탄성압축보다는 선단지반의 침하가 더 큰 부분을 차지하고 있다.
- (2) 현장타설말뚝의 주면 마찰력은 말뚝을 둘러싼 지반의 특성과 밀접한 관계가 있으며, 발휘되는 단위주면 마찰력은 초기 하중단계에서는 불규칙성을 보이다가 재하중이 증가함에 따라 점차 포물선(선단에서 0이 아닌 parabolic)의 형태로 나타나게 된다.
- (3) 말뚝과 지반의 상대변위는 말뚝의 상부지반에서 크게 나타나고 하부지반에서는 작게 나타난다. 또한 주면 마찰력이 말뚝전체에서 동시에 극한상태에 도달하지는 않으며, 먼저 말뚝의 상부지층에서 극한치에 도달된 이후 일정하거나 감소한다. 즉, 극한단위주면 마찰력은 상대적으로 연약하고 상대변위가 큰 상부 지층구간에서만 발생한다. 그리고 말뚝의 극한주면 마찰력은 재하하중의 크기와 심도에 따라 순차적으로 하부지층으로 전파발생한다.
- (4) 일반적으로 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면 마찰력은 암반 구간에서 대부분 발휘되는 것으로 설계를 하고 있으나 상부에 양질의 지층 존재여부에 따라 하부 기반암층에서 분담해야 할 하중의 크기가 상대적으로 변한다. 따라서 연암층 심도가 깊은 경우, 연암층에 근입시키기 위하여 무리하게 장대 말뚝으로 설계되는 경우가 많으나 상부에 모래자갈층이나 자갈층같은 양질의 지지층이 존재할 경우는 각 지층에 대한 마찰저항 특성을 적극적으로 고려하는 설계접근도 필요하다.
- (5) 동재하시험과 정재하시험은 전체 지지력에서 차이를 보인다. 지층별 주면 마찰력 거동특성 또한 상이하나, 변위를 발생시켜 하중전이를 측정할 정재하시험 결과가 실제 거동과 부합될 것으로 판단된다. 따라서 동재하시험 결과로 대구경 현장타설말뚝의 주면마찰저항 거동특성을 논의하기 위해서는 좀더 많은 자료수집과 연구과정이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 정창규, 장성민, 최용규 (2004), "양방향 선단재하시험을 이용한 대구경 강관말뚝의 극한주면 마찰력 측정 사례연구", 2004년 지반공학회 기초기술 학술발표회논문집, pp.151-160.
2. 최용규 (2000), "대구경 말뚝정재하시험 및 하중전이 측정사례", 한국지반공학회, 2000년 말뚝기초 학술발표회 논문집, pp.109-141.

3. 한국지반공학회 (1997), “지반공학시리즈4 깊은기초”, 구미서관, pp.125-130.
4. 홍원표, 양기석, 이장오, 성안제, 남정만 (1989), “관입말뚝에 대한 연직재하시험시 항복하중의 판정법”, 대한토질공학회, 제5권 제1호, pp.7-18.
5. ASTM D1143-81 (1986), “Method of testing piles under static axial compressive loads. In Annual book of ASTM standards”, 04.08, Soil and rock, building stones. Philadelphia, PA, pp.239-254.
6. Das, B.M. (1998), “Principles of foundation engineering”, 4th Edition, Brooks/Cole Publishing Company, pp.578-581.
7. Hong W.P. and Yea G.G. (2002), “A study on prediction of bearing capacity of cast-in-place pile”, *Proceeding of the 6th International Symposium, Environmental Geotechnolgy and Global Sustainable Development*, Seoul, Korea, pp.601-606.
8. Reese, L.C., Touma, F.T. and O'Neill, M.W. (1976), “Behavior of drilled piers under axial loading”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.102, No.GT 5, pp.493-510.
9. Sharma H.D. and Joshi R.B. (1988), “Drilled pile behavior in granular deposit”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.2, pp.222-232.
10. Touma, F.T. and Reese, L.C. (1974), “Behavior of bored piles in sand”, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division*, Vol.100, No.GT7, pp.749-761.
11. Vesic, A.S. (1977), “Design of pile foundations”, NCHRP Synthesis 42, Transportation Research Board, Washington, pp.8-22.

(접수일자 2004. 9. 20, 심사완료일 2005. 1. 19)