

유한차분법을 이용한 말뚝의 하중전이특성 및 해석기법*

한중근¹⁾ · 이재호²⁾

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수 · ²⁾ 박사과정

Analytical Technique and Load Transfer Features on Pile Using Finite Difference Method*

Han, Jung-Geun¹⁾ and Lee, Jae-Ho²⁾

¹⁾ Assit Prof. Chung-Ang University,

²⁾ Ph.D Canidate Chung-Ang University.

ABSTRACT

For analyze of the bearing capacity, skin friction and settlements of pile on axial compressive loading, both Load transfer tests of pile and pile loading test in field have application to commonly before pile installing. A bearing capacity of pile was affected by the characteristics of surrounding ground of pile. Especially, that is very different because of evaluation of settlement due to each soil conditions of ground depths. The ground characteristics using evaluation of bearing capacity of pile through load transfer analysis depends on N values of SPT, and then a bearing capacity of pile installed soft ground and refilled area may be difficult to rational evaluation. An evaluation of bearing capacity on pile applied axial compressive loading was effected by strength of ground installed pile, unconfined compressive strength at pile tip, pile diameter, rough of excavated surface, confining pressure and deformation modules of rock etc and these are commonly including the unreliability due to slime occurred excavation works.

Load transfer characteristics considered ground conditions take charge of load transfer of large diameter pile was investigated through case study applied load transfer tests. To these, matrix analytical technique of load transfer using finite differential equation developed and compared with the results of pile load test.

Key Words : *Finite difference element, Load transfer, Large diameter pile, Analytical technique.*

* 본 논문은 2004년도 중앙대학교 연구지원금에 의해 수행된 것임.

Corresponding author : Han, Jung-Geun, Dept. of Civil & Environmental Engineering Chung-Ang University,
Tel : +82-2-820-5255, E-mail : jghan@cau.ac.kr

Received : 16 July, 2006. **Accepted** : 27 August, 2006.

I. 서 론

토목, 건축물의 대형화에 따른 대규모 하중의 지지력확보를 위해 최근에는 대구경말뚝기초형식이 많이 적용되고 있다(최용규, 2000). 그러나, 국내의 경우 많은 시공사례에도 불구하고 대구경말뚝에 대한 지지력평가 등에 대한 연구는 아주 미비한 실정이다. 즉, 말뚝이 설치되는 지층의 분포가 대부분 다층지반으로 구성되어 있고, 말뚝의 설치깊이, 관입조건에 따라 거동특성이 다양하게 나타나므로 불확실한 지반의 지지력의 예측은 이론 및 경험적 평가에 의존하는 경향이 많을 뿐만 아니라 정량적으로 평가하기에는 어렵다. 따라서, 보다 현실적인 지지력예측을 위해서는 직접 말뚝재하시험을 실시하며 말뚝의 축방향 및 수평방향 허용지지력을 현장에서 시험을 통하여 직접 결정하게 된다(Das, 1998). 그러나, 이 경우에도 지지력 판정기준이 다양하여 각 기준에 의해 판정된 지지력들 사이는 상당한 오차가 있다(홍원표 등, 1989). 뿐만 아니라 국내에서 수행되고 있는 대부분의 말뚝재하시험의 경우 실험용 말뚝을 구조물하중을 직접 받는 말뚝으로 사용하고 있는 경우가 대부분이므로 말뚝의 극한지지력(또는 항복지지력)을 확인하지 못한 상태에서 시험을 종료하는 경우가 많다. 따라서, 말뚝의 소요 지지력을 제대로 파악하기도 어려울 뿐만 아니라 말뚝과 지반 사이의 하중전이에 대한 측정도 이루어지지 않고 있다(최용규, 2000). 또한, 말뚝 주변 지반과 말뚝사이에 발생하는 마찰력은 응력-변위-시간의 특성, 말뚝-흙의 상호관계 체계내에서의 요소에 대한 파괴특성 그리고 말뚝의 설치방법 등에 의해 영향을 받는다(Vesic, 1977).

말뚝의 지지거동을 평가하기 위한 하중전이 해석방법으로는 실험적 방법, 수치해석적 방법, 하중전이함수를 이용한 해석방법으로 크게 구분할 수 있다. 이중 정재하시험에 의한 실험적 방법은 가장 신뢰성이 높은 방법으로 알려져 있다(정창규 등, 2004). 특히 대구경 현장타설말뚝의 경

우는 시험말뚝을 대상으로 정재하시험을 수행하는 것은 비용과 공기 및 시험방법의 한계 등의 문제로 아직 보편화되지 못하고 있고 해석 및 예측을 위한 프로그램도 제한적으로 제시되고 있다. 또한, 국내 시험시공사례에 대한 조사 등이 미흡하여 아직 해석용 프로그램의 개발이나 적용 사례연구 실적도 미비한 실정이라 하겠다.

최근 국내에서 많이 수행되고 있는 대규모의 해상교량의 경우, 교량상부로부터 대규모의 수평하중과 수직하중을 동시에 받게 되므로 하부에 설치되는 대구경말뚝의 합리적인 지지력평가를 위해 하중전이시험이 수행되는 경우가 점차 늘어나고 있다. 그러나, 재하시험을 실시한 시험말뚝의 결과를 이용하여 주변 대구경말뚝에 대한 지지특성 및 거동을 파악하는 경우가 대부분이다.

따라서, 본 연구에서는 대규모 연직하중을 받는 대구경말뚝에 대한 재하시험 결과를 이용하여 다층지반에 대한 축하중 및 주면하중의 하중전이 특성을 형상화하였다. 또한, 이들의 합리적 설계 및 해석기법의 개발을 위해 유한차분하중전이 함수를 적용하여 상용프로그램(Xpile)을 개발하였으며, 상호간의 적용성 평가를 위해 국내에서 수행된 말뚝재하시험이 실시된 대구경말뚝의 시공 사례를 조사하여 대표적인 현장사례를 통해 해석치와 실험값을 비교 분석함으로써 지반조건에 따른 대구경말뚝의 지지특성 및 침하특성을 비교하여 보았다.

II. 유한차분해석에 의한 하중전이해석 프로그램의 개발

1. 하중전이함수

하중전이해석법은 일반적으로 하중전이함수법, 탄성고체법, 유한요소법등이 있으며 대부분 하중전이함수법이 적용되고 있다. 이때 하중전이함수는 그림 1과 같이 주면전이함수($q-z$ 곡선)와 선단전이함수($t-z$ 곡선)로 구분된다. 이 전이함수들은 임의 요소에서 변위와 전이된 하중 사이의 유일한 관계만을 나타내고 있으며, 이때 한 요소

내에서의 단위마찰응력 (f)는 그림 1과 같이 임의 요소에 대해 일정한 것으로 가정하고 길이 L ($L=L/n$)인 압축 단일 기둥에 대해 단위마찰응력 f 는 다음과 같이 된다.

$$f_i = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{P \cdot \Delta D} = \frac{\Delta Q_i}{P \cdot \Delta D} \quad (2.1)$$

Coyle and Reese(1966)는 축하중을 받는 말뚝의 하중전이 함수를 재하시험에 의한 말뚝의 근입심도 위치별 지반의 전단강도에 따라 제시하였으며 말뚝의 지지력 및 침하거동특성이 말뚝주면 및 선단에서의 극한저항력과 하중전이함수에 의해 규정하여 지반을 스프링 탄성을 이상화하였다. 이 방법은 주변지반의 요소간 영향이 무시되긴 하지만 비교적 간단하여 다층지반에 쉽게 광범위하게 적용될 수 있어 작용하중에 따른 발생 변위량의 유한차분식($Q(z)=AE \, dw/dz$)을 이용하도록 하였다.

말뚝의 단면적과 변형계수를 아는 경우, 요소 중심의 상대수직변위는 다음 식으로 계산된다.

$$\begin{aligned} \Delta w_i &= w_i - w_{i-1} = \frac{(Q_i - Q_{i-1}) \cdot \Delta D}{E_p \cdot A} \quad (2.2) \\ &= \frac{\Delta Q_i \cdot \Delta D}{E_p \cdot A} \end{aligned}$$

하중전이함수 방법에서 말뚝선단 변위만을 안다고 가정하고 각 요소의 변위 사이의 관계식 즉, 전이함수를 개발하여 미지수를 해결하는 방법이 가능하게 된다. 한편, 실험적 방법에서는 각 요소의 축하중과 말뚝머리 변위를 측정하여 미지수의 숫자를 n 개로 줄여서 문제를 해결하게 된다. 말뚝의 축하중 Q 는 전이함수 $f(w)$ 를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta Q_i = Q_i - Q_{i-1} = -f(w_i) \cdot \Delta A \quad (2.3)$$

한편, 하중전이함수 방법의 결점을 보완하기 위해 탄성-고체법을 고려하면, 주변 흙의 마찰력으로 분산된 축하중(ΔQ)의 영향을 고려하고, 말

뚝요소의 변위 (w_{pi})가 인접 흙의 변위(w_{si})와 다를 수도 있고, 균등, 탄성, 등방성고체인 지반(탄성계수(E_s)와 포아송비(ν_s))에 의해 축하중을 전달할 수 있다고 가정하는 경우, 지반과 말뚝의 변위에 대해 한 식은 각각 다음과 같다.

$$w_{si} = \frac{D}{E_s} \left(\sum_{j=1}^n I_{ij} f_j + I_{ip} q_p \right) \quad (2.4)$$

$$w_{pi} = \frac{D}{E_s} \left(\sum_{j=1}^n I_{pj} f_j + I_{pp} q_p \right) \quad (2.5)$$

여기서, f_s , q_p 는 각각 단위 마찰응력, 단위선단 지지력, D 는 말뚝의 직경 그리고 I_{ij} 는 하중 Q_j 에 의해 생긴 요소 i 의 침하에 대한 영향계수이다. 고체 내부에서 선단하중의 영향을 받는 반무한 고체내의 변위와 응력에 대한 Mindlin해를 사용하여 계산한다(after Vesic, 1977).

식 (2.4)과 (2.5)이외에 말뚝과 흙 사이에서 활동이 발생하지 않는다면, 즉, $w_{si} = w_{pi}$ 이면 다음과 같은 n 개의 식이 구하여진다.

$$w_{p(i+1)} - w_{p(i)} = \frac{Q_i \cdot \Delta L}{E_p \cdot A} \quad (2.6)$$

이때 활동이 발생하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta Q_i = f_s \cdot P \cdot \Delta L \quad (2.7)$$

여기서, f_s 는 임의 점에서 최대마찰응력을 나타낸다. 따라서, 탄성-고체법에서는 어떤 경우라도 변위에 대한 $(n+1)$ 개의 미지수와 하중에 대한 n 개의 미지수가 있고, 위에서 설명한 $(2n+1)$ 개의 방정식이 주어진다. 결국 하중전이특성을 그림 1에서 Q_p 와 Q_s 에 의해 결정되며, Q_s 는 $f(z)$ 의 분포에 따라 영향을 받게 된다.

2. Matrix해석에 의한 하중전이

전절과 같은 변형제어방식의 하중전이해석법은 임의 하중에 대한 하중전이곡선을 구하는데 어려움이 따른다. 그러므로 임의하중을 받는 말뚝의 거동 및 비선형문제를 쉽게 계산하기 위해

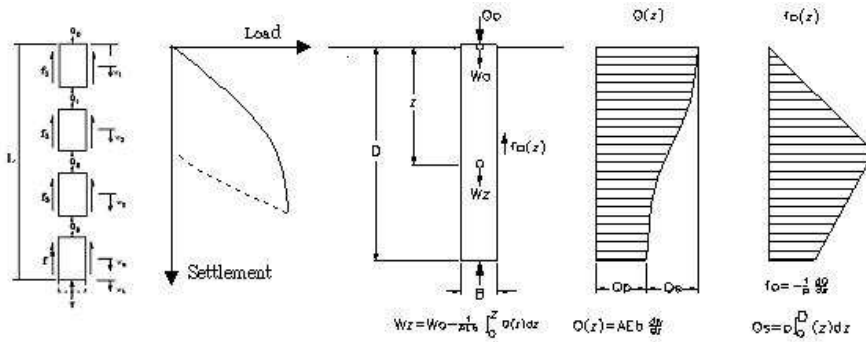


그림 1. 축하중을 받는 말뚝의 하중전이특성.

본 연구에서는 유한차분해를 구하기 위해 매트릭스를 이용하였다. 이때 비선형해는 할선법(직접 반복법) 또는 중분법을 이용하며, 말뚝선단의 변위를 안다고 가정한다.

말뚝의 면적(\$A\$)과 탄성계수(\$E\$)를 안다면 \$i\$번째에서 (\$i-1\$)번째 요소에서는 다음과 같은 식이 각각 성립된다.

$$\frac{w_i - w_{i-1}}{h} = \frac{Q_i - Q_{i-1}}{2AE} \quad (2.8)$$

$$\frac{w_{i+1} - w_i}{h} = \frac{Q_{i+1} - Q_i}{2AE} \quad (2.9)$$

상기 식(2.8)과 식(2.9)를 차분하고 적합경계조건을 갖는 Coyle & Reese(1966)의 하중전이법(그림 2.1)과 같이 요소중앙의 스프링탄성모델을 사용하여 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$Q_{i+1} - Q_i = \Delta Q = \tau Ph \quad (2.10)$$

따라서, 식(2.10)은 다음과 같이 된다.

$$Cw_{i+1} - 2Cw_i + Cw_{i-1} = f_{i+1} - f_i \left(EA \frac{d^2 w}{dz^2} = \tau \cdot P \right) \quad (2.11)$$

여기서, \$P\$는 말뚝의 주면장, \$C=2EA/h\$, \$f_i\$는 \$i\$요소의 단위주면저항 (\$f(t, \pi, d, h)=Q_f/Q_{f1}\$)이다. 요소의 \$f\$에 상응하는 \$i\$번째 요소사이의 평균변위 (\$w'=(w_{i-1}+w_i)/2\$)에 대한 단위주면과 변위의 관계는 식(2.12)와 같다.

$$f_i = k_s w' \cdot P \cdot h \quad (2.12)$$

여기서 \$k_s\$는 깊이와 변위에 의존하는 할선 스프링계수로서 \$t\$-\$z\$곡선 상의 할선계수로 정의되며 로 위의 식을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{EA}{h^2} (w_{i+1} - 2w_i + w_{i-1}) = k_s w_i P \quad (2.13)$$

상기 식은 요소중앙에 탄성스프링이 존재하는 Matrix 형태로 해석된 것이며, \$n\$개에 대한 \$n-2\$개의 방정식이 성립되므로 나머지 방정식은 다음과 같은 경계조건으로 풀 수 있다.

먼저, 말뚝머리에 작용하는 축력은 \$Q_0\$이므로 첫 번째 요소에서 다음과 같은 식(2.14)이 성립된다.

$$\frac{2EA}{h} (w_1 - w_0) = Q_1 + Q_0 \quad (2.14)$$

\$Q_0 = -f_i + Q_1\$이므로 다음식이 성립된다.

$$-\left(C - \frac{1}{2} k_{s1} Ph \right) w_0 + \left(C + \frac{1}{2} k_{s1} Ph \right) w_1 = -2Q_0 \quad (2.15)$$

한편, 말뚝선단에서의 경계조건을 고려한다. 하중(\$Q_n\$)은 \$q\$-\$z\$곡선상의 할선계수의 함수로 정의될 수 있으며 그 식은 다음과 같다.

$$Q_n = q_s w_n \quad (2.16)$$

여기서, $q_s = q/w$ 으로 정의되는 q-z 곡선상의 활선계수이다. 한편 $Q_n + Q_{n-q} = f_n$ 으로 나타낼 수 있으므로 이 식과 식(2.16)을 식(2.1)과 $Q(z) = AE \frac{dw}{dz}$ 를 사용하여 정리하면 다음과 같다.

$$-\left(C + 2q_s + \frac{1}{2} k_{s(n)} Ph\right) w_n + \left(C - \frac{1}{2} k_{s(n)} Ph\right) w_{n-1} = 0 \quad (2.17)$$

따라서, 위 식을 이용하면 요소의 상부, 중앙 그리고 하부에서의 변위와 하중을 연립방정식으로부터 구할 수가 있게 된다. 지반계수가 선형일 때는 위의 조건으로부터 연립한 식을 사용해 간단히 해결되며, 지반계수가 비선형일 때는 반복해서 해를 구할 수 있다.

3. Matrix 하중전이해에 의한 프로그램 개발

말뚝두부에 수평하중을 받는 말뚝기초의 거동은 지반반력과 수평변위의 관계를 나타내는 p-y 곡선을 구하여 그 하중전이 특성을 파악할 수 있고 연직하중을 받는 경우에는 주면마찰력과 수직변위의 관계를 나타내는 t-z 곡선과 선단지지력과 선단변위의 관계를 나타내는 q-z 곡선으로 하중전이 특성을 파악할 수 있다. 이러한 말뚝거동을 나타내는 곡선을 하중전이함수라고 한다. 프로그램의 일반적인 적용성을 위해 주면하중 및 선단하

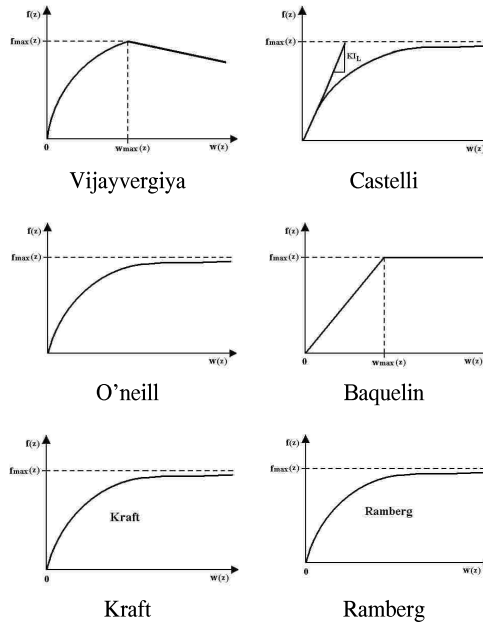


그림 3. 프로그램에서 지원하는 t-z 곡선의 종류.

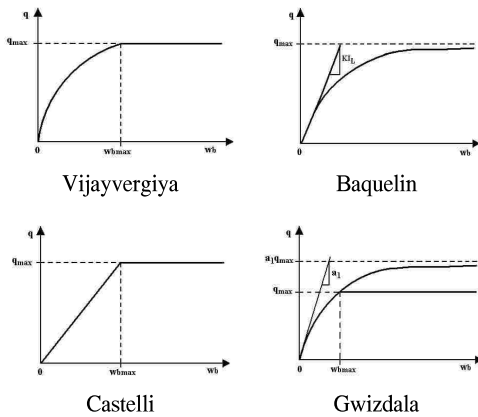


그림 2. 프로그램에서 지원하는 q-z 곡선의 종류.

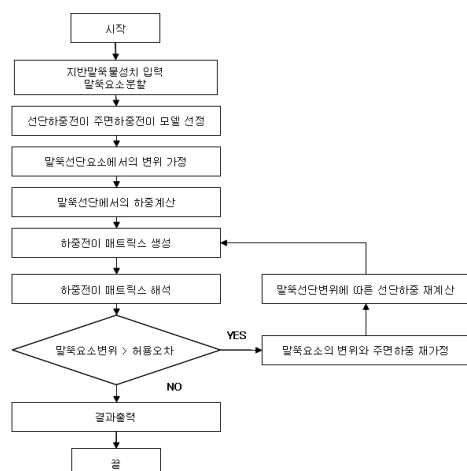


그림 4. Matrix를 이용한 말뚝의 거동해석 프로그램(XPILE)의 흐름도.

중의 전이함수를 각각 그림 2, 그림 3과 같이 다양하게 적용하였으며 Matrix를 이용한 말뚝의 거동특성을 고려할 수 있도록 하였고, 연직하중을 받는 말뚝의 하중전이특성을 고려한 거동해석 프로그램 해석 과정은 그림 4와 같다(XPILE, 2004).

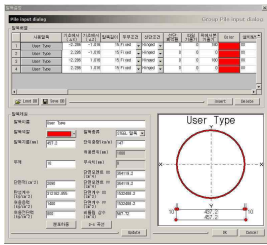


그림 5. 말뚝입력상자.

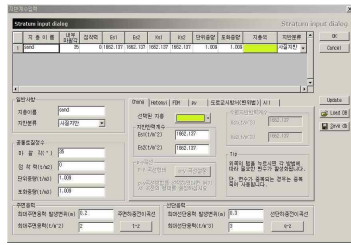


그림 6. 지반입력상자.

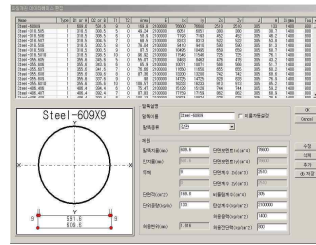


그림 7. 데이터베이스(말뚝).

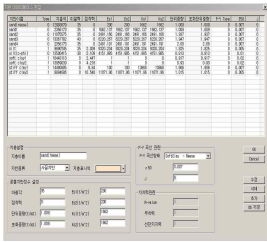


그림 8. 데이터베이스(지반).

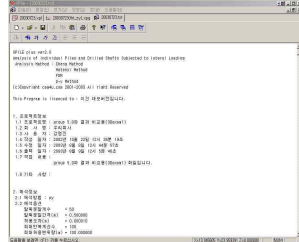


그림 9. 생성된 계산서.

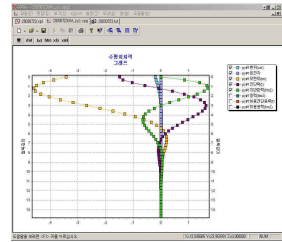


그림 10. 결과 그래프.

그림 5~그림 10은 말뚝에 수평하중 및 축하중이 작용하는 경우 무리말뚝(Group pile) 거동해석결과를 대표적으로 나타낸 것이다.

재하시험에 의한 하중전이시험 결과를 조사하였으며 그 결과는 표 1과 같다.

III. 대구경말뚝 재하시험에 의한 하중전이특성의 형상화

1. 다층지반내 대구경말뚝의 재하시험 사례조사
최근 구조물의 거대화로 대구경말뚝의 시공사례는 많으나 하중전이시험이 수행된 사례는 소수에 불과하였다. 국내에서 실시된 대구경말뚝의

2. 재하시험결과에 의한 하중전이형상

표 1의 시험말뚝 중 표시된 대상말뚝 8개에 대하여 정재하시험에 의한 말뚝의 축하중 및 단위주면마찰력의 계측결과를 정리하면 그림 11, 12와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 지층 상부는 연약층이 분포하며 하부로 갈수록 굳은 지층이 분포한다. 조사된 현장은 표토층이 얇은 곳과 깊은

표 1. 국내 하중전이시험이 실시된 대구경말뚝 시공사례

(최유규, 2000; 흥건표, 2004; 이상철, 2004; 흥원표 등, 2005)

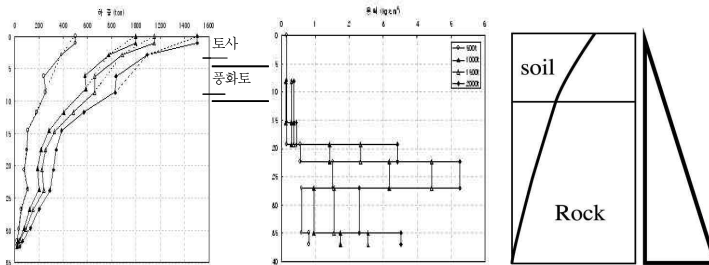
구분	공사명	시험말뚝종류	대상	시험종류	특성
①	경전철 실시설계(부산, 2003)	버켓말뚝	○	정재하 수평재하 동재하	모래자갈층지지, 직사각형, 1.5m×2.8m, L=49.4m, 최대연직하중 4,000톤
②		현장타설말뚝	○		모래자갈층지지, 원형, D=1500mm, L=49.4m, 최대연직하중 2,400톤,
③	고속도로 교량기초(문경, 1998)	강관말뚝	○	정재하 동재하	풍화토지지, 석회암층, D=508mm(t=12mm) L=13.2m, 최대연직하중 360톤
④		강관말뚝	○		연암지지, 석회암층, D=508mm(t=12mm) L=13.2m, 최대연직하중 420톤

표 1. 계속

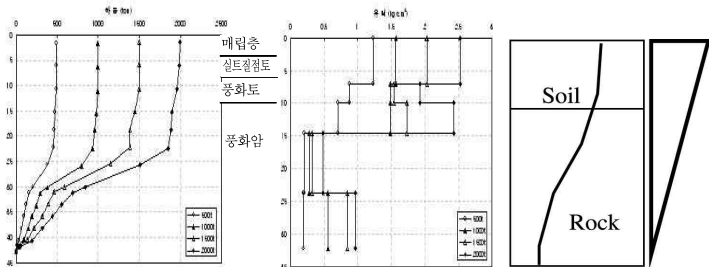
구분	공사명	시험말뚝종류	대상	시험종류	특성
⑤	광안대교 건설공사(1997)	현장타설말뚝 (RCD)	○	정재하	풍화대지, D=1000mm, L=32m, 최대연직하중 1500톤, 육상부
⑥		강관말뚝	○		풍화대소켓, D=1000mm, L=39.6m, 최대연직하중 2000톤, 해상부
⑦		강관말뚝	○		연암소켓, D=1000mm, L=40.8m, 최대연직하중 2000톤, 해상부
⑧	남항대교 실시설계(1997)	개단강관말뚝	-		풍화암상부 자갈층지, D=500mm (t=12mm), L=38~40m, 최대연직하중 500톤
⑨	고속도로 교량기초(구미)	현장타설말뚝	○	정재하 동재하	연암소켓, D=1800mm L=19.7m, 최대연직하중 1860톤

곳으로 구분되었다. 이들 조건에 따른 하중전이 특성을 파악하기 위해 지반조건에 따라 구분하여 단순형상화 시켰으며 Vesic(1977)이 제시한

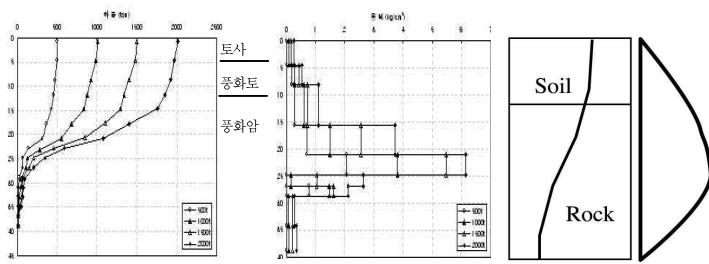
단일지반에서의 하중전이특성과 비교하였다. 그림 11에서와 같이 암반층이 표층부에 가까이 있는 경우는 암반의 주면마찰력이 크게 발휘



(a) 표 1-⑤



(b) 표 1-⑥



(c) 표 1-⑦

그림 11. 다층지반내 대구경말뚝의 하중전이 특성(토사층이 얇은 경우)

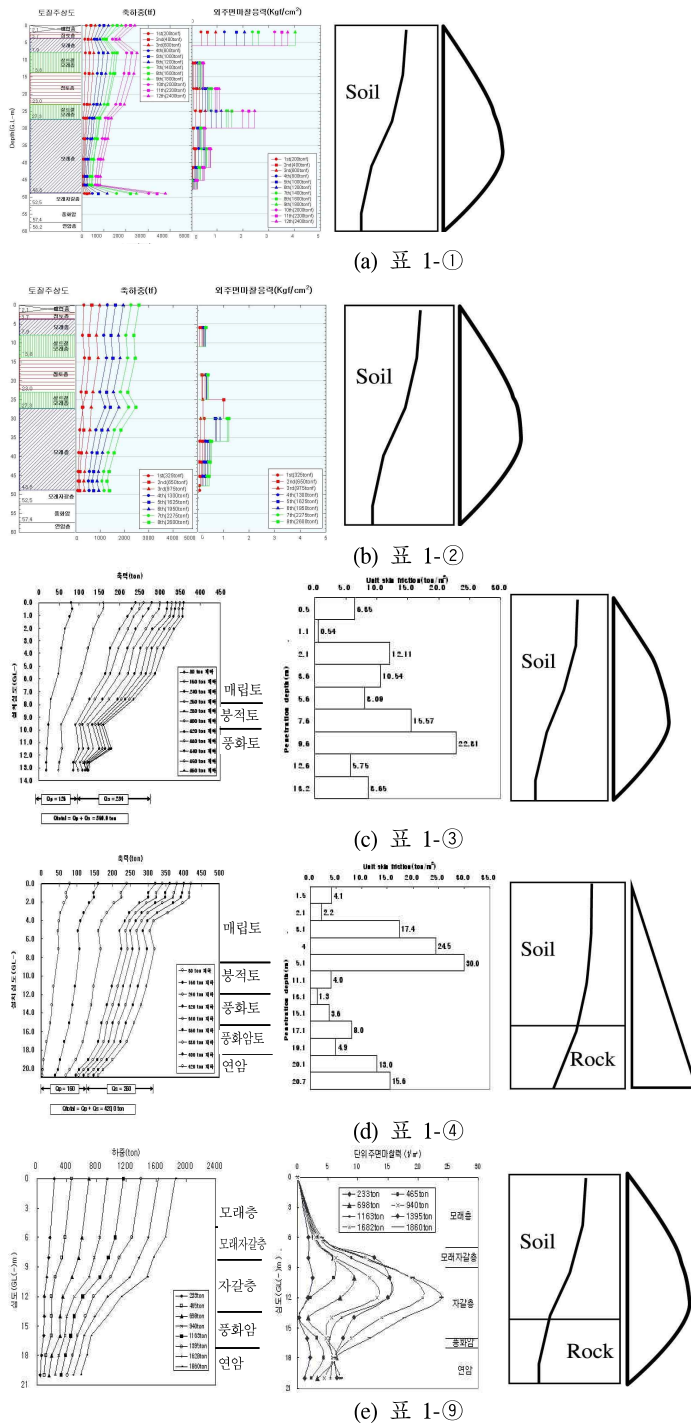


그림 12. 다층지반내 대구경말뚝의 하중전이특성(토사층이 두터운 경우).

되게 되어 동일한 지층에서도 주변하중전이 특성 으며, 그림 12와 같이 상부로부터 깊은층으로 굳 은 실험말뚝 위치마다 다른 다양한 패턴을 보였 은층 혹은 암반층이 단계적으로 나타나는 경우는

표 2. 표 1-①현장의 지층별 주면마찰계수.

지층명	매립층	점토층	모래층	실트질 모래층	점토층	실트질 모래층	모래층	모래 자갈층	풍화암	연암층
SPT	0	5	4	3	4	4	36	50	50	50
층두께	2.1	1.6	4.2	5.9	9.2	4.3	21.5	3.7	4.9	0.8
f_{max}	0	5	2	1.5	4	2	18	20	20	20

단일층의 하중전이특성(Vesic, 1977)과 거의 유사한 하중전이특성을 보였다.

따라서, 다양한 지층을 가진 일반적인 지반내 대구경말뚝이 설치되는 경우, 단일지층에서의 하중전이특성과 크게 다르지 않을 뿐만 아니라 축하중에 대한 하중전이 특성은 Coyle and Reese (1966)이 제시한 다층지반에서의 하중전이함수 해석이 편리하게 이용될 수 있음을 알았다.

IV. 재하시험 및 해석 결과의 비교

축하중 및 수평하중을 받는 말뚝의 전용해석용으로 개발된 XPILE과 표 1의 재하시험사례를 통해 대구경말뚝의 하중전이특성을 파악하고자 한다. 대구경말뚝의 경우 시험사례에 비해 시험 결과가 비교적 만족스럽지 못할 뿐만 아니라 알려져 있는 자료의 한계가 있고, 대부분의 현장에서 적용되는 말뚝들은 대부분 원형의 현장타설 말뚝이 대부분이므로 여기서는 이에 대해 비교·고찰하며 축하중에 대해서는 버렛말뚝과 비교하였다.

본 연구에서는 경전철 실시설계를 위해 시험 시공된 현장타설말뚝 및 버렛말뚝의 사례(표 1-①)를 이용하여 검토하였다. 대상 현장의 지층별 토질정수는 SPT(표준관입시험) 결과인 N치만이 조사되었다. 따라서, 수치해석에 사용한 각 지층의 최대주면마찰력은 대상지반에서 원위치시험과 실내시험이 충분히 실시되지 않은 관계로 SPT 시험결과를 참조하여 산정하였다. 해석시 사용한 지반정수는 도로공사 설계기준에 맞도록

주면마찰계수를 표 2와 같이 산정하였고 이 값을 해석에 적용하였다.

해석시 주면하중전이함수는 Vijayvergiya의 주면하중전이 함수(한계변위 5mm)를 적용하였으며 축하중전이함수는 Gwisdala 함수를 적용하였다.

먼저, 현장타설말뚝의 설계하중을 적용하기 위한 시험재하시험 시험장비의 한계 등으로 그림 13과 같이 결과를 얻었으나 극한하중 및 항복하중을 추정기는 어려웠다. FDM값이 약간 큰 값을 보이지만 Reese의 방법과 유사한 거동특성을 보였으며 극한하중은 약 5300톤으로 추측할 수 있었다.

한편, 현장타설말뚝 및 버렛말뚝의 축하중과 주면마찰력의 하중전이특성을 그림 14에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 2가지 모두 시험 하중까지, 즉 재하하중이 적은 경우에는 실측치

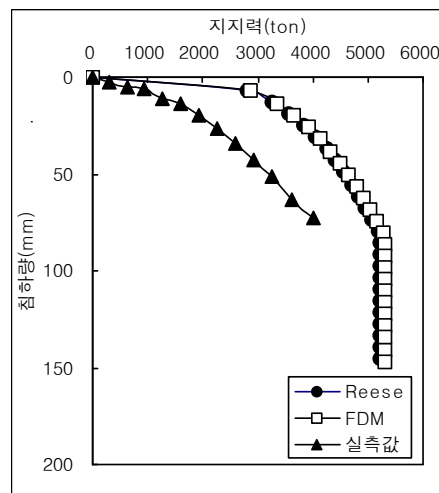
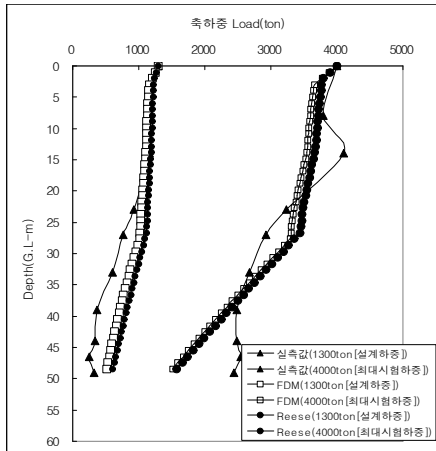


그림 13. 현장타설말뚝의 하중-침하곡선비교.



(a) 버렛말뚝

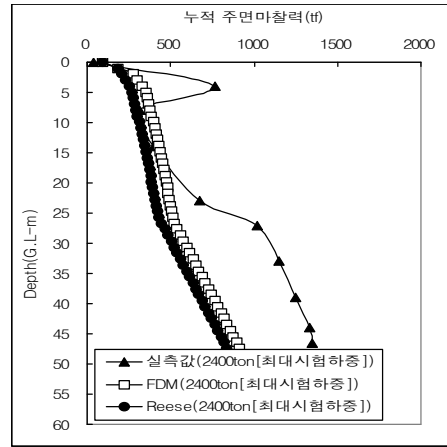
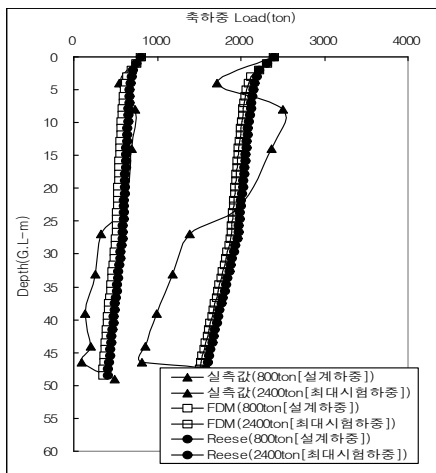


그림 15. 현장타설말뚝의 누적주면마찰전이특성.



(b) 현장타설말뚝

그림 14. 설계하중 및 최대시험하중재하시 축하중전이 특성.

와 예측치(FDM 및 Coyle & Reese)가 비교적 일치하는 경향을 보였고 깊이가 깊어지는 경우, 즉 지반강도가 커지면 실측치는 예측치보다 작게 관측되었다. 이는 하부지층이 암반층인 경우 축하중전이는 주변지반에 많이 영향을 받음을 나타내었다. 또한, 실제 최대시험하중을 작용하는 경우, 하중전이양상을 비슷하지만 버렛말뚝의 경우가 원형의 현장타설말뚝의 경우보다 예상치가 잘 일치하는 것을 볼 수 있다. 이는 실제 측정되는 하중전이 측정의 평면조건인 경우로 단위면적당 해

당하중의 증분을 제대로 평가하기 때문일 것이다. 현장타설 말뚝의 경우에는 버렛말뚝에 비해 축하중 전이형상이 지반의 조건에 따라 많이 영향을 받음을 알 수 있다.

주면마찰전이는 그림 15와 같이 누적주면마찰력으로 최대시험하중에 대해 자료획득문제가 있어 현장타설말뚝만을 대상으로 나타내었다. 그림과 같이 누적주면하중 전이형상은 예측치와 유사하며, 축하중전이특성과 마찬가지로 얇은지층에서는 예측치와 실측값이 비슷하지만 굳은 지층에서는 큰 차이를 보이고 있다.

축하중에서는 Coyle & Reese의 방법이 크게 예측되며 주면마찰력에서는 FDM법이 크게 예측되었다.

수치해석에 의한 값이 실측치보다 작게 산출이 되었는데 이는 주면하중전이함수에서 최대주면마찰력이 N값에 의존하여 산정되다보니 깊이에 따른 유효응력의 효과를 제대로 반영하지 못하였기 때문으로 생각된다. 또한, 본 연구 현장은 얇은 지층의 경우 상대밀도의 변화가 거의 없는 지반으로 구성되어 있어 하중재하시 말뚝에 전이되는 주면마찰전이 증분이 거의 없으나 깊은 지층 즉 굳은 지층으로 전환되는 지층에서부터는 하중전이가 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 기존의 많은 함수에서 제시된 주면마찰력 산정식들의

공통함수인 지반강도 변화에 따른 하중전이 효과가 예상되어진다.

V. 결 론

최근 급증하는 대구경말뚝들은 대부분 수평 및 연직하중을 받는 기초형식으로 말뚝의 하중전이특성에 따라 합리적 설계 및 시공이 가능해진다. 더욱이 다층지반상에 지반의 굳기 즉, 전단강도양상에 따라 예측되는 정도가 실제의 거동과는 차이가 있게 되고, 따라서, 시험말뚝을 실제 지지말뚝으로 사용하거나, 주위말뚝에 대해 지반특성을 예측한 상태로 서로 상관지어 결정짓게 되는 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 실험말뚝의 하중전이특성과 새로 개발된 기존해석법 및 FDM해석 프로그램에 의한 예측결과와 비교하여 보았다.

먼저, 국내에서 시공되는 대구경말뚝의 시공 사례는 급증하는데 비해 실험결과를 이용하거나 자료가 축적된 사례는 소수였으며 바다등과 열악한 지반상에 설치되므로 그 결과 값이 불규칙한 특성을 보였다. 시공사례를 통해 축하중 전이함수는 평면의 경우 하중전이양상이 실험치과 예측치가 비교적 잘 일치하였고, 굳은 지반으로 갈수록 축하중 전이 보다는 누적주면 마찰력의 전이가 크게 일어남을 알 수 있었다. 즉 지반강도가 커지는 경우 실측치는 예측치보다 작게 나타났으며 하부지층이 암반층인 경우 축하중전이는 주변지반에 많이 영향을 받으며 하중전이함수에서 제시된 바와 같이 주면마찰력 지반강도 변화에 따른 하중전이 효과가 좋아짐을 알았다.

또한, 유한차분해석을 위한 Matrix를 이용한 하중전이해석을 위한 프로그램 XPILE의 적용성도 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 중앙대학교 연구지원금에 의해 이루어진 것으로 이에 감사드리는 바이다.

인 용 문 헌

- 이상철. 2004. 하중전이해석을 이용한 말뚝의 지지력평가에 대한 연구. 중앙대학교 석사논문 : 3-72
- 정상섭 · 조성한 · 김수일. 2000. 한국지반공학회 2000년 말뚝기초학술발표회 논문집 : 87-106.
- 정창규 · 장성민 · 최용규. 2004. 양방향 선단재하시험을 이용한 대구경 강관말뚝의 극한주면 마찰력 측정사례연구. 2004년 지반공학회 기초기술학술발표회논문집 : 151-160.
- 최용규. 2000. 대구경 말뚝정재하시험 및 하중전이 측정사례. 한국지반공학회 2000년 말뚝기초학술발표회 논문집 : 109-141.
- 한국지반공학회. 1997. 지반공학시리즈4 깊은기초. 구미서관 : 125-130.
- 홍건표. 2004. 석회암 공동부지역의 삼중관고압 분사주입공법에 의한 지반개량 사례연구. 중앙대학교 석사논문 : 37-78.
- 홍원표 · 여규권 · 이재호. 2005. 대구경 현장타설말뚝의 주면마찰력 평가. 한국지반공학회 논문집 21(1) : 93-103.
- 홍원표 · 양기석 · 이장오 · 성안제 · 남정만. 1989. 간입말뚝에 대한 연직재하시험시 항복하중의 판정법. 대한토질공학회지 5(1) : 7-18.
- Coyle, H. M., and L. C. Reese. 1966. Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay. Jour. of the Soil Mechanics and Foundations Division. ASCE. 92(SM2) : 1-26.
- Das, B. M. 1998. Principles of foundation engineer-

- ing. 4th Edition : Brooks/Cole publishing Company. 578-581.
- Reese, L. C., F. T. Touma., and M. W. O'Neil. 1976. Behavior of drilled piers under axial loading. ASCE Journal of Geotechnical Engineering Division. 102(GT5) : 493-510.
- Vesic, A.S 1977. Design of pile Foundation. NCHRSynthesis 42. Transportation Research Board : 22-33.
- XPILE Manual. 2004. www.ceg4u.com