

# XP ILE Plus for Group

## 프로그램 소개

2003 . 09 . 01



Construction Engineering Group For You !

### 씨 이 지 [ C E G ]

주소 : 경기도 안양시 동안구 호계동 1048번지 동아테마타운 301호  
전자우편 : [kmson@ceg4u.com](mailto:kmson@ceg4u.com) 전화번호 : 031 - 383 - 6864  
홈페이지 : <http://www.ceg4u.com> 팩스번호 : 031 - 383 - 2566

# 축하중 및 수평하중을 받는 무리말뚝의 거동해석 S/W(XPILE plus)의 소개

## A Computer program (XPILE plus) for analyzing the behavior of piles in a group subjected to both axial and lateral loadings

### 1. 머리말

현재 토목설계에서 사용하고 있는 지반해석 프로그램을 보면 대부분이 외국에서 들여온 것으로 판매와 더불어 고객지원에 대한 능력은 기대 수준에 미치지 못하고 있다. 특히 지반의 기초에 사용되고 있는 말뚝에 대한 해석프로그램은 국내의 설계기준에 대한 배려가 없으므로 국내기준에 대한 해석을 위해서 별도의 방법으로 해석함으로써 인해 이중으로 투자와 노력을 하여야한다. 또한 단독말뚝과 무리말뚝의 경우에 해석을 하기 위해서 몇 가지 프로그램을 사용해야 하므로 기술자들에게는 2배 이상의 노력이 필요하다. 이에 하나의 프로그램에서 단독말뚝과 무리말뚝해석을 동시에 지원하고 각각의 해석에 있어서 다양한 방법을 제공하며, 국내 기준과 외국기준을 하나의 프로그램에 넣어 해석을 할 수 있는 프로그램인 XPILE plus(ver2.0)을 개발하였다.

### 2. 단독말뚝의 해석방법

#### 2.1 수평방향 하중을 받는 말뚝의 해석방법

단독말뚝과 무리말뚝의 해석에 대한 이론은 이미 오래 전부터 사용이 되어왔으며 컴퓨터의 발달과 함께 성장하여 왔다. 수평하중을 받는 주동말뚝의 대표적인 해석법으로는 지반반력법과 탄성해석법이 사용된다. 특히, 이러한 형태의 말뚝구조물 해석은 지반과 말뚝사이의 상호작용과 매우 깊은 관련이 있으며 지반과 말뚝의 상호작용을 어떻게 보느냐에 따라서 비선형해석과 선형해석으로 나뉘어 진다. 선형탄성해석법으로는 Chang이 제안한 방법이 있으며 대표적인 비선형해석법으로는 p-y해석법이 있다. p-y법의 특징은 지반과 말뚝의 관계에 따라서 지반반력과 수평변위의 관계를 나타내는 p-y곡선을 구하여 그 하중전이 특성을 파악할 수 있다. 말뚝에 그림과 같이 수평력과 모멘트 그리고 축하중이 동시에 작용하고 있는 경우에 말뚝의 기본방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다(Hetenyi, 1946).

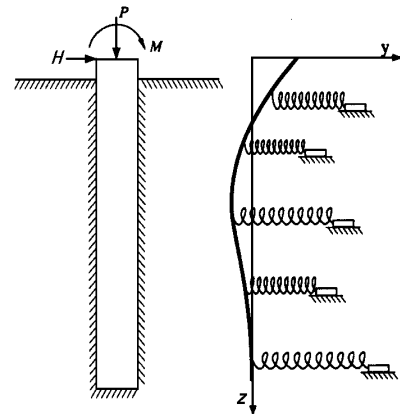


그림 1 수평하중을 받는 말뚝  
(Reese, 1997)

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + P \frac{d^2 y}{dz^2} + ky = w \quad \text{식(1)}$$

여기서,  $z$ 는 말뚝두부에서부터의 깊이,  $y$ 는 말뚝의 변위,  $k$ 는 지반계수,  $P$ 는 축하중,  $w$ 는 분포하중,  $E_p I_p$ 는 말뚝의 강성을 나타낸다. 위식을 유한차분의 형태로 표현한 후 말뚝의 두부와 선단조건을 적용하여 매트릭스 해석을 하면 수평하중과 말뚝의 수평거동을 해석할 수 있다.

#### 2.2 축방향 하중을 받는 말뚝의 해석방법

수직하중을 받는 경우에는 수평방향 하중을 받는 말뚝에서 사용한 p-y곡선처럼 주면마찰력과 수직변위의 관계를 나타내는 t-z곡선과 선단지지력과 선단변위의 관계를 나타내는 q-z곡선으로 하중전이특성을 파악할 수 있다. 이러한 말뚝거동을 나타내는 곡선을 하중전이함수라고 한다. 말뚝이 축하중을 받고 있는 경우에 하중전이 말뚝의 기본방정식은 아래식과 같다.

$$\frac{d^2w}{dz^2} = \frac{f(z)C_p}{E_p A_p} \quad \text{식(2)}$$

이 식을 다시 유한차분화의 형태로 나타내면 다음식과 같다.

$$\frac{1}{\Delta L^2}(w_{i-1} - 2w_i + w_{i+1}) = \frac{C_p}{E_p A_p} f_i \quad \text{식(3)}$$

여기서,  $w(z)$ 와  $f(z)$ 는 각각 깊이  $z$ 에서의 말뚝의 변위량과 단위주면전이하중이며,  $E_p$ 와  $A_p$ 는 각각 말뚝의 탄성계수 및 단면적이다.  $w_i$ 와  $f_i$ 는 각각  $i$ 요소의 변위량과 단위주면전이하중이고,  $\Delta L$ 은 요소의 길이이다. 따라서 각 요소에서의 힘의 평형방정식, 위의 유한차분식 그리고 하중전이 함수식의 세가지 해석조건식을 이용하면 수평해석과 같은 방법으로 매트릭스해석을 하면 말뚝의 축하중과 침하거동의 관계를 구할 수 있다.

### 3. 무리말뚝의 해석방법

#### 3.1 기본가정

무리말뚝을 해석하기 위한 프로그램의 기본가정은 다음과 같다. 첫째 말뚝캡은 강성으로 변형이 생기지 않는다. 즉, 말뚝캡은 외부하중에 의해서 회전이나 변위가 생길 수는 있어도 말뚝캡 자체가 원래의 형태와 다르게 변형되지는 않는다. 만일 말뚝캡이 변형을 일으킨다면 기초의 변위로 인해서 발생하는 말뚝의 변위와 기초자체의 변형에 의해 발생하는 변위를 고려하여야 한다. 둘째로 말뚝과 말뚝은 서로 영향 범위 내에 있지 않아야 한다. 만일 그렇지 않을 경우는 말뚝과 지반과의 상호작용에 의한 그룹효과를 고려해서 해석을 하여야 한다. 셋째로 말뚝을 해석함에 있어서 횡방향 하중에 대한 해석과 축방향 하중에 의한 해석은 서로 독립적으로 생각을 한다. 다시 말하면 횡방향 하중에 대한 해석에 있어서 축방향 변위는 서로 무관하며 그 역의 관계도 성립한다.

#### 3.2 무리말뚝의 해석방법

말뚝기초는 대부분 여러 개의 단독말뚝이 캡에 연결되어 있는 무리말뚝의 형태로 시공된다. 기존의 무리말뚝 설계는 개개 말뚝의 거동은 고려하지 않고 무리말뚝 전체를 하나의 블록으로 가정하여 외부하중에 의한 무리말뚝전체의 침하량 및 지지력을 산정하는 것이 일반적인 방법이다. 이 방법은 계산이 간편한 장점이 있지만 말뚝의 배열과 두부의 접합조건에 따라 다른 거동형태를 보이는 실제 무리말뚝을 해석할 수 없다. 보다 효율적이고 안전한 무리말뚝 설계를 위해서는 무리말뚝 내에서 일어나는 복합적인 상호작용을 고려한 해석기법이 필요하다고 할 수 있다. 프로그램에서는 말뚝을 해석함에 있어서 수평하중을 받는 말뚝과 수직하중을 받는 말뚝으로 나누어 생각할 수 있다. 무리말뚝의 거동해석을 위해서는 무리말뚝전체의 강성행렬의 산정이 중요하다. 무리말뚝의 전체 강성행렬은 상부캡의 영향도 있지만 대부분 개개 말뚝두부에서의 강성행렬에 의해 결정된다. 단독말뚝의 강성행렬은 앞서 설명한 단독말뚝의 해석에 의해 구할 수 있다. 무리말뚝 전체의 강성행렬에 영향을 미치는 요인은 크게 두 가지로 나눌 수 있는데 첫 번째는 단독말뚝의 두부에서의 강성행렬이며 두 번째는 무리말뚝에 작용하는 하중위치, 말뚝개수 및 배열, 말뚝두부의 구속조건, 경사각등이다.

#### 3.3 무리말뚝의 해석알고리즘

무리말뚝에 작용하는 외부하중은 개개 단독말뚝에 수직하중과 수평하중으로 분배가 되어진다. 하지만 이렇게 분배되는 하중은 말뚝의 위치가 서로 다르기 때문에 서로 동일한 힘으로 분배가 되지 않는다. 또한 말뚝과 지반의 상호작용을 비선형으로 고려한다면 하중에 따라서 변위가 변하게 되므로 개개 단독말뚝의 두부강성은 하중의 상태에 따라서 재산정이 되어야 한다. 따라서 무리말뚝의 해석에서는 무리말뚝에서 분배된 하중에 의해서 발생하는 변위와 무리말뚝자체의 변위가 수렴할 때까지 계산을 반복하게 된다. 프로그램의 해석순서는 다음과 같다.

1. 기초의 변위( $\delta$ )를 가정한다.

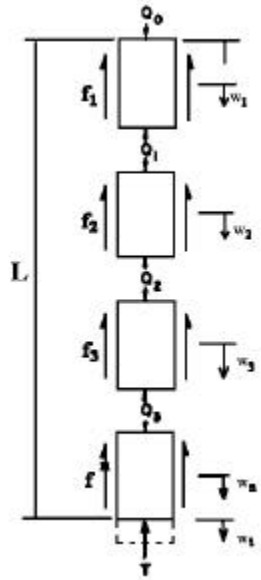


그림 2  
말뚝요소하중전이

- 기초의 변위로부터 말뚝좌표계에서의 개개 말뚝의 변위( $\varepsilon$ )를 결정한다.
- 각 말뚝의 변위를 경계조건으로 해서 단독말뚝의 두부에 작용하는 수평력과 모멘트를 구한다.
- 전 단계에서 구한 개개 단독말뚝의 수평력과 축력 모멘트의 합( $P'$ )을 구한다.
- 무리말뚝에 실제로 작용한 하중과 전단계에서 구한 힘과의 차이( $\Delta P$ )를 구한다.
- 강성매트릭스( $S$ )를 구한다.
- 강성매트릭스 역행렬( $S^{-1}$ )과  $\Delta P$ 를 곱해서  $\Delta \delta$ 를 구한다.
- $\delta = \delta + \Delta \delta$ 로 새로운 무리말뚝변위를 가정한다.
- $\Delta \delta$ 가 허용범위안에 들어 올 때까지 반복하여 계산한다.

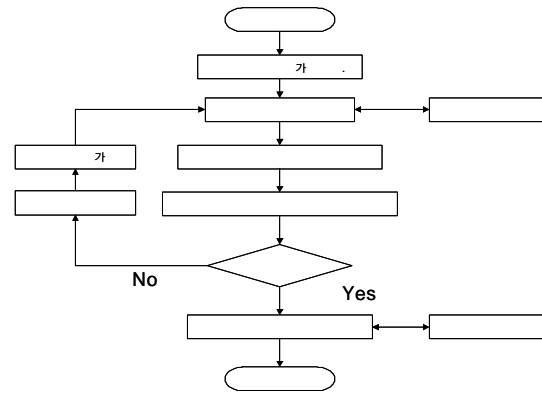


그림 3 무리말뚝 해석 흐름도

#### 4. 다양한 하중전이 함수

수평하중을 받는 말뚝기초의 거동을 분석하기 위해서 지반반력과 수평변위의 관계를 나타내는 p-y곡선을 구하여 그 하중전이 특성을 파악할 수 있다. 또한 수직하중을 받는 경우에는 주변마찰력과 수직변위의 관계를 나타내는 t-z곡선과 선단지지력과 선단변위의 관계를 나타내는 q-z곡선으로 하중전이특성을 파악할 수 있다. 이러한 말뚝거동을 나타내는 곡선을 하중전이함수라고 한다. 아래는 프로그램에서 제공하는 다양한 하중전이 함수를 나타낸 것이다.

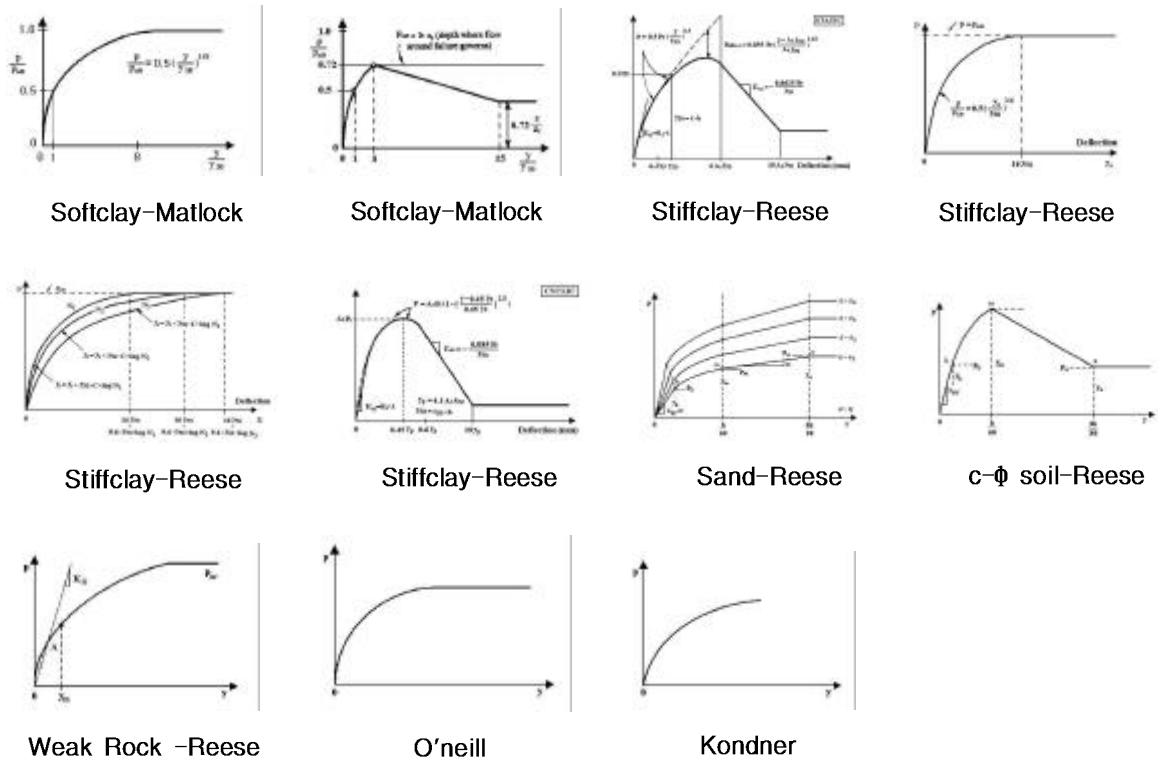


그림 4. 프로그램에서 지원하는 p-y 곡선의 종류

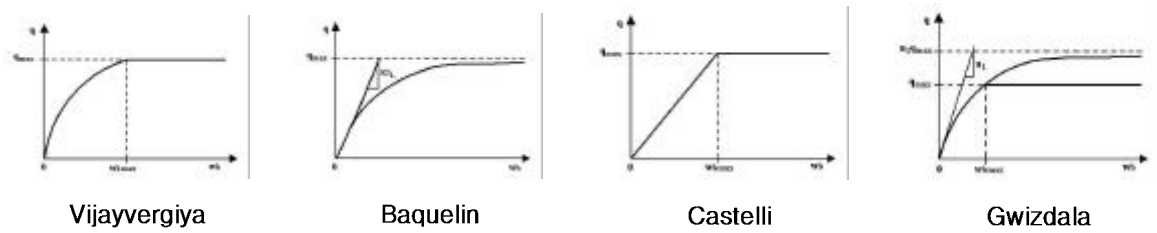


그림 5. 프로그램에서 지원하는 q-z 곡선의 종류

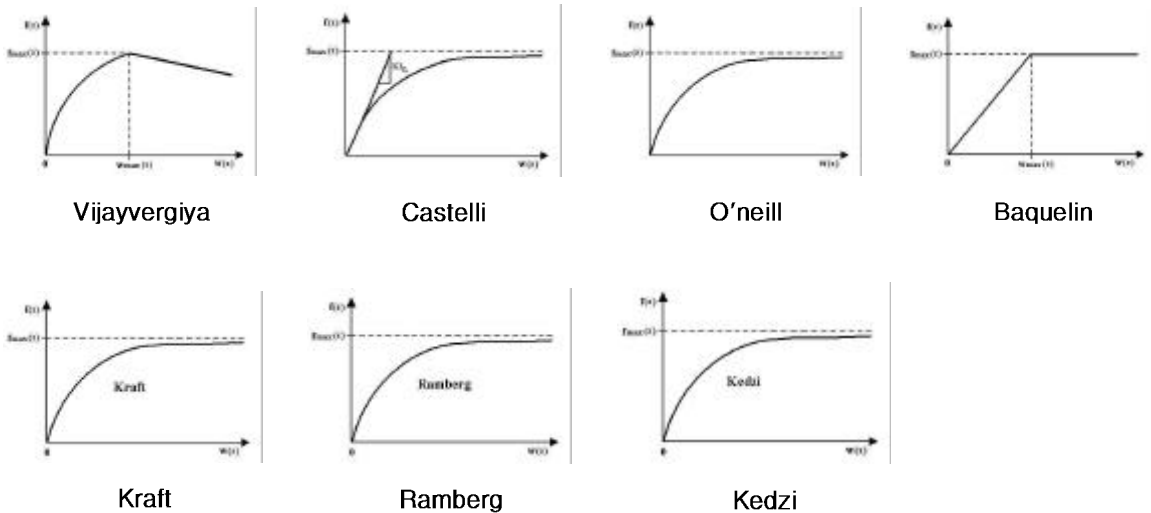


그림 6. 프로그램에서 지원하는 t-z 곡선의 종류

## 5. 프로그램 개발

### 5.1 제공되는 해석방법

표 2 해석법의 종류

해석법	Chang	Hetenyi	p-y	변위법(도로교)	비고
단독말뚝	○	○	○	-	다양한 p-y 곡선
무리말뚝	○	○	○	○	단독말뚝 거동에 따라

### 5.2 프로그램 특징

- **말뚝개수의 무제한** - 기존에 사용하고 있는 무리말뚝해석 프로그램은 말뚝의 개수가 제한이 있으나 본 프로그램은 메모리가 허용하는 한도 내에서 사용이 가능하다.
- **데이터베이스** - 말뚝을 사용함에 있어서 그 종류가 다양하고 기성제품은 각각 고유의 물성을 가지고 있으므로 이 값은 데이터베이스를 사용하여 보다 쉽게 값을 입력하고 적용할 수 있다.
- **선형, 비선형 해석법** - 말뚝에 횡하중이 작용하는 경우 해석법으로는 선형, 비선형 해석법이 있지만 기존에 사용하고 있는 프로그램은 각각 선형해석법 혹은 비선형해석법을 따로 적용하고 있지만 본 프로그램은 선형과 비선형 해석법을 동시에 제공한다.
- **하중전이** - 수평하중전이함수와 더불어 축하중과 관련해서 하중전이 해석에 필요한 여러 학자가 제안한 식을 제공한다. 특히, 주변하중과 변위(t-z), 선단하중과 변위(q-z)에 대한 하중전이 함수를 제공함으로 써 좀더 신뢰성있는 무리말뚝해석이 가능하다.

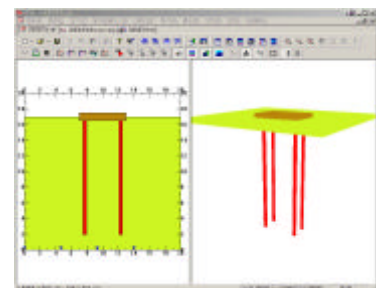


그림 7 프로그램 화면

- **데이터 유효성검사** - 수치해석을 위해서 입력하는 데이터의 검증을 입력과 동시에 체크할 수 있는 기능을 제공한다.
- **향상된 그래픽 성능** - 마우스를 이용하여 실시간으로 모델의 회전, 크기변환, 이동 기능을 사용할 수 있다. 단, 이 기능은 사용자의 VGA카드가 opengl을 지원하는 경우에 가능하다.
- **HTML/XML 데이터입력방식** - 프로그램에서 사용하는 데이터나 결과 출력데이터등이 모두 표준 HTML/XML 형식을 가지고 있다.
- **마법사의 사용** - 말뚝을 해석하기 위해서 매번 지반과 말뚝의 배열을 새롭게 구성하기 위한 노력을 절감하기 위해서 마법사기능을 채택하여 기본적인 데이터를 마우스의 클릭만으로 생성할 수 있는 기능을 제공한다.
- **그래픽적인 결과 출력** - 프로그램에서 해석된 결과를 데이터 위주의 텍스트파일과 동시에 차트데이터를 생성하여 주므로 설계자가 직관적으로 결과에 대한 판단을 내릴 수 있도록 도와준다.
- **다양한 비선형 해석법** - 기존 비선형 해석법의 하나인 p-y해석법에 사용되는 대표적인 p-y곡선외에 그동안 논문을 통해서 발표되고 검증 받은 여러 가지 곡선을 제공한다.
- **국내해석법 적용** - 선형해석법의 대표적인 방법인 도로교시방서의 표준해석법인 변위법에 의한 무리말뚝 해석법과 횡하중을 받는 단독말뚝해석법을 사용하였다.
- **보고서 출력** - 프로그램에 의해 해석된 결과를 일련의 보고서 파일로 출력하는 기능을 제공하여 준다.
- **다양한 해석법의 동시 해석** - 하나의 말뚝이나 무리말뚝에 대해서 프로그램에서 제공하는 여러 가지 다양한 해석법을 설계자가 선택한 후 단 한번에 해석을 한 후 결과를 동시에 볼 수 있다.

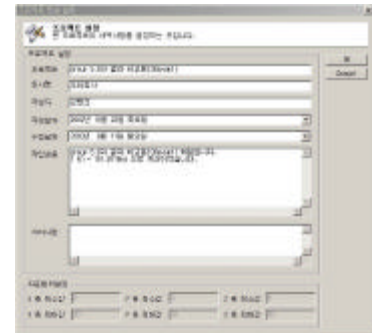


그림 8 입력상자

### 5.3 프로그램 구성

횡하중과 축하중을 받는 무리말뚝의 거동해석 프로그램인 XPiLE은 크게 입력부(그림 8~그림 10), D/B부(그림 11~그림 12), 결과부(그림 13~그림 14)로 구분한다.

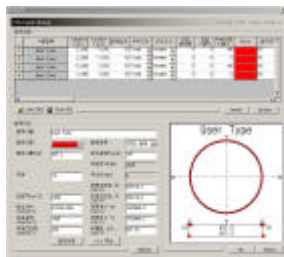


그림 9 말뚝입력상자

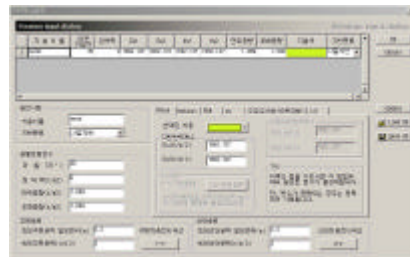


그림 10 지반입력상자

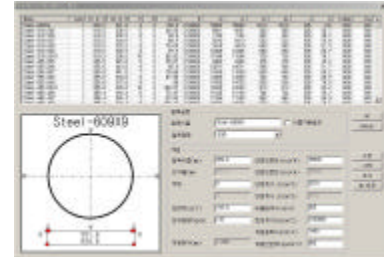


그림 11 데이터베이스(말뚝)

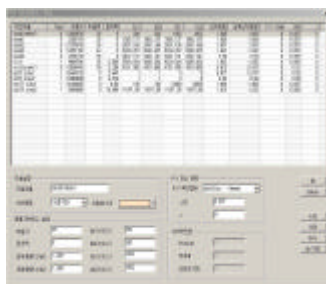


그림 12 데이터베이스(지반)



그림 13 생성된 계산서

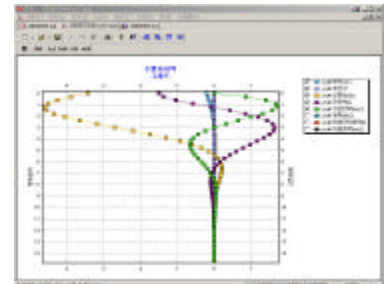


그림 14 결과 그래프

## 6. 타 프로그램 비교

본 프로그램이 현재 무리말뚝해석을 위해서 사용하고 있는 프로그램과 기술적으로 어떠한 차이점이 있는지 아래의 표2 에 정리를 하여 보았다.

표 3 무리말뚝 프로그램 비교

주) ○ : 지원, × : 지원하지 않음

종류	PGROUP/ PC-GROUP	Piglet/ PC-MPILE	DEFPIG	FB_Pier	GROUP	Repute	XPILE
최근버전	3.0(1981)	1.5(2000)	1.6(1990)	3.0(2002)	5.0(2000)	1.0(2002)	2.0(2003)
해석방법	BEM	-	BEM	Winkler Spring	Winkler Spring	BEM	Winkler Spring
최대말뚝수	200	300/100	36	2500	100	100	No Limit
다층여부	2 only	○	○	○	○	○	○
3D	×	○	×	○	○	○	○
비선형해석	×	×	×	p-y	p-y	hyperbolic	p-y
선형해석	○	○	○	×	×	×	○
대칭형말뚝배열	×	○	×	○	○	○	○
말뚝길이 변화	○	×	×	○	○	○	○
기초자체 변위	×	○	○	○	×	×	×
말뚝두부조건 (힌지/구속)	×/○	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○	○/○
지원운영체제	DOS	DOS	DOS	Windows	Windows	Windows 9x/NT4/2000/XP	Windows 9x/NT4/2000/XP
유저인터페이스	Command	Text	Command	GUI	GUI	Notebook	Notebook/ GUI
데이터유효검사	×	○	×	○	○	○	○
결과 표현	Text	Text	Text	Graph	Graph	Graph	Text/Graph
HTML/XML	×	×	×	×	×	○	○
하중전이 (t-z/q-z)	×/×	×/×	×/×	○/×	○/×	×/×	○/○

## 7. 문의처

프로그램에 대한 자세한 사항을 알고자 하시는 분은 홈페이지(<http://www.ceg4u.com>)를 이용하시기 바라며 프로그램관련 문의는 아래의 연락처로 연락바랍니다.

연락처

- 전화번호 : 031-383-6864
- 팩스번호 : 031-383-2566
- 담당자 : 강명진 팀장

### 참고문헌

1. Andrew Bond & Francesco Basile (2002), Repute User Manual, Geocentrix Ltd.
2. Bowles J. E.(1996), Foundation Analysis and Design, 5th Ed., McGraw-Hill, New York
3. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load transfer for axially loaded piles in clay", Journal of Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. vol. 92. No. SM2. pp. 1-26
4. FHWA, "Com624p Laterally loaded pile Analysis program for the Microcomputer", part II
5. Jeong, Sang-Seom, Chung, Sang-Hoon, Won, Jin-Oh (2001), "Analysis of Group Pile-Cap Interaction by Load Transfer Approach" Jour. of the KGS Vol. 17, No. 3., pp. 95~102
6. Reese, L. C. & William, F. Van Impe (2001), Single Piles and Pile Groups Under Lateral Loading
7. Reese, L. C.(1997), "Analysis of laterally loaded piles in weak rock", Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE., Vol.123, No.11, pp.1010~1017.
8. 정상섭 (1998), "하향력을 고려한 단독말뚝의 지지력 예측" 대한토목학회 논문집 제18권 제3-4호, pp. 553-566.
9. 도로교표준시방서(1996), 대한토목학회