

군말뚝효과를 고려한 수동말뚝의 해석기법

Analysis Method of Passive Piles considering group effect

정상섭¹⁾, Sang-Seom Jeong, 원진오²⁾, Jin-Oh Won, 김병철³⁾, Byung-Chul Kim

1) 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

2) 연세대학교 공과대학 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

3) 연세대학교 공과대학 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Yonsei Univ.

개요(SYNOPSIS) The lateral deformation of one row pile groups was investigated based on analytical study and a numerical analysis. The emphasis was on quantifying the load transfer of pile groups subjected to lateral soil movement. An analytical method to consider pile-soil interaction in weathered soil was developed using load-transfer curve methods. Through the comparative study, it is found that the prediction by present approach is in good agreement with the general trend observed by in-situ measurements.

주요어(Keyword) passive pile groups, load transfer, soil movement, weathered soil

1. 서론

최근 교대나 제방등의 편차성토나 또는 토류벽등의 굴착에 따른 편재하중으로 지반의 측방유동이 발생하여 이를 지지하는 말뚝기초에 손상을 가하는 경우가 빈번히 발생하고 있다. 또한 사면의 활동을 막기 위한 보강공법으로 억지말뚝이 설치되고 있다. 이러한 말뚝기초들은 모두 지반의 측방변형에 의해 말뚝이 힘을 받는 수동말뚝으로, 해석시 토체의 측방이동에 의한 측방토압과 말뚝-지반의 상호작용 문제가 해결되어야 한다. 수동말뚝의 해석기법은 측방토압에 기초한 방법과 측방변위에 기초한 방법등이 있다. 측방변위에 기초한 방법은 간편하면서도 지반변위에 따른 말뚝-지반의 상호작용을 보다 효과적으로 나타낼 수 있는 장점이 있으나 주로 단독말뚝에 국한한 연구가 주류를 이루고 있으며 군말뚝의 경우에는 그 거동체계에 대한 이해가 부족한 상태에 있다.

본 연구에서는 말뚝이 근입된 주변지반을 일련의 탄소성스프링으로 대체하고 측방변위를 고려한 말뚝의 변위, 휨모멘트, 전단력 및 지반반력을 계산하는 해석프로그램을 개발하였다. 군말뚝 효과를 해석 프로그램에 도입하기 위하여 1열로 시공된 출말뚝을 대상으로 두부조건을 고려하여 3차원 유한요소해석을 수행하였으며 대상지반은 국내 지반상태를 고려한 화강풍화토 지반으로 하였다. 유한요소 해석결과를 바탕으로 군말뚝상호작용계수를 산정하였으며 이를 해석기법에 적용하여 해석기법의 타당성을 검토하였다.

2. 수동말뚝의 해석기법 분석

수동말뚝의 완전한 해석을 위해서는 평형조건과 적합조건을 동시에 만족해야 한다. 하지만 이 두 조건을 동시에 만족시키는 해를 얻기가 어려우므로 한가지 조건만을 이용한 근사해석법이 제안되어 왔다. 해석 방법으로 평형조건에 기초한 방법은 말뚝에 작용하는 측방토압이 말뚝-지반의 상대변위와 관계없이 힘의 평형조건을 통해 산정되는 반면, 적합조건에 기초한 방법은 측방토압이 말뚝-지반의 상대변위를 통해 직접적으로 산정되게 된다. 이와같은 배경에서 기존의 해석방법들을 분류하면 다음과 같다.

2.1 경험적인 축방토압에 기초한 방법

이 방법은 현장 또는 실내시험 결과 산정된 설계도표에 근거하여 모멘트나 말뚝두부의 수평변위를 구하여 말뚝거동을 파악하는 것으로 해석방법은 비교적 간단하나 그 적용에 한계가 있다. 먼저 DeBeer와 Wallays(1972)는 성토하중에 의하여 하부지반에 축방유동이 발생할 때 사면 안전율을 기준으로 말뚝에 작용하는 휨모멘트를 계산하는 간단한 방법을 제안하였다. 사면의 안전율이 1.6보다 큰 경우는 축방토압을 상재하중과 무차원계수의 곱으로 가정하여 계산하였고 깊이에 따라 균일한 토압을 받는 것으로 가정하였다. 안전율이 1.6보다 작은 경우는 활동면을 기준으로 상부에는 수평토압이, 하부에는 저항토압이 작용하는 것으로 보고 말뚝의 모멘트를 산정하였다. Tschebotarioff(1973)는 수동말뚝 기초위에 옹벽을 설치한 후 뒤채움으로 인하여 연약지반이 축방유동을 할 경우 연약지반 속의 말뚝에 작용하는 축방유동압을 산정하였다. 축방유동압의 분포는 연약층의 중심부에서 최대값을 갖는 이등변삼각형으로 가정하였고 이를 통해 축방유동압 및 말뚝의 휨모멘트를 산정하였다. 그러나 이 방법은 말뚝의 설치간격에 따른 축방유동압의 크기와 말뚝 주변 지반의 저항력을 고려할 수 없으며 특히 말뚝이 특정 간격 이하일 경우 말뚝은 지반으로부터 수평반력을 받는데 이를 무시하므로 말뚝의 단면이 과다산정 될 우려가 있다. Ito-Matsui(1977), 홍원표(1996)는 소성변형되는 지반에 설치된 일렬 말뚝의 한계소성 평형상태를 고려하여 말뚝에 가해지는 횡방향 하중을 계산하는 이론식을 제안하였다. 축방토압이 지반의 $c-\phi$ 값에 따라 산정되므로 축방변위와 무관하며 분포형태는 깊이에 따라 직선적으로 증가하는 형태를 보인다.

2.2 축방변위에 기초한 방법

말뚝에 인접하여 성토하중이나 사면활동 등으로 발생하는 지반의 축방변위를 고려한 말뚝의 해석법으로 경사계에 의한 실측이나 변위해석을 통하여 축방변위의 형태 및 크기를 해석 프로그램에 직접 반영할 수 있다. 말뚝에 발생하는 수동토압의 분포 및 크기를 가정이 아닌 말뚝-지반간의 상대변위를 통해 나타내므로 말뚝-지반간의 상호작용을 간편하면서도 비교적 정확하게 예측할 수 있다. 이 방법은 지반의 축방유동으로 발생하는 말뚝의 저항을 깊이별로 하중-변위곡선을 통해 모사하고 경계조건을 사용하여 말뚝에 발생하는 휨모멘트와 전단력을 계산하는 지반반력법과 연속체 개념을 적용한 탄성해법이 주류를 이루고 있다.

지반반력법은 말뚝을 Winkler의 보요소로 그리고 주변지반은 일련의 탄성스프링이나 비선형 스프링으로 대체하여 말뚝두부와 선단의 구속조건을 고려한 해석법이다. 이 경우 하중-변위의 관계가 선형이면 해석적인 방법으로 간단히 해를 얻을 수 있지만, 하중-변위의 관계가 비선형이면 지반의 저항력이 말뚝의 변위에 따라 변하므로 해석적인 방법으로는 구할 수 없고, 컴퓨터 프로그램을 통한 반복적인 계산이 필요하다. 하중-변위곡선은 많은 현장재하실험과 반경험적인 방법에 의해 제안되고 있다. 이 해석법은 횡방향 변위의 산정이 어려운 점이 있으나 경사계를 통한 실측치가 있거나 유한요소 해석을 통한 예측치가 있으면 비교적 정확한 값을 예측할 수 있으며 또한 다양한 지반조건이나 하중조건을 고려할 수 있다는 것이 큰 장점 중의 하나이다.

탄성고체법은 말뚝을 탄성지반상의 탄성보로 가정하여 지반내의 응력과 축방변위 사이의 관계식 및 말뚝변위와 지반변위 사이의 적합조건을 이용한 해법이다. 이러한 탄성고체법은 대부분의 경우 축방변위와 지반응력 사이의 관계식으로 Mindlin의 해를 이용한다는 점에서 서로 유사하다. 그러나 이 방법은 다층지반상의 해석이 어렵고 말뚝 주변지반을 탄성체로 가정함에 따라 현장 지반상태를 적절히 반영할 수 없는 해석상 단점이 있으며 해석과정이 매우 복잡하고 까다로워 실무에는 자주 사용되지 않고 있다.

2.3 유한요소법에 기초한 방법

수동말뚝에 적용한 유한요소 해석은 주로 말뚝과 주변지반간의 상호작용 문제를 다루고 있다. 지금까지

지 많은 연구를 통해 말뚝의 위치, 크기, 간격 및 말뚝강성을 고려할 수 있는 수치해석기법이 개발되어 왔다. 유한요소 해석은 지반공학 분야에서 흙-구조물의 상호작용을 해석할 수 있는 좋은 해법이나 적절한 지반모델이나 구성모델에 적합한 입력변수의 선정에 어려움이 있으며 해석에 많은 시간이 소요된다는 단점이 있다.

3. 측방변위를 고려한 수동말뚝의 해석기법

본 연구에서는 수동말뚝의 해석기법 중 비교적 간편하면서도 다양한 지반과 하중조건 및 말뚝-지반간의 상호작용을 적절히 나타낼 수 있는 측방변위에 기초한 해석기법을 개발하였다. 이 방법은 단독말뚝에만 적용이 가능하나 말뚝의 중심간격에 따른 지반반력계수의 변화를 통해 군말뚝에도 적용할 수 있도록 해석기법을 확장하였다.

3.1 측방변위를 받는 수동말뚝의 모델링

그림 1은 측방변위를 고려한 수동말뚝의 모델링과정을 나타내며 그 결과 말뚝의 지배방정식은 식 (1)과 같다.

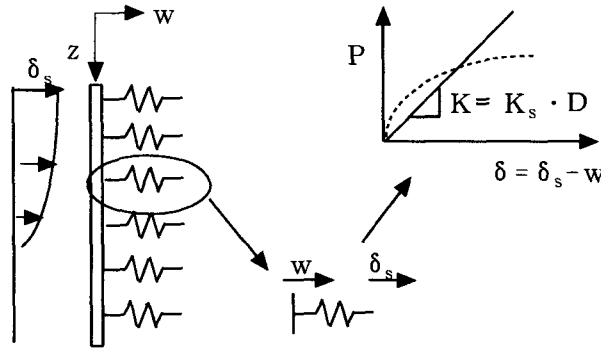


그림 1. 측방변위를 받는 수동말뚝의 모델링

$$EI \frac{d^4 w}{dz^4} = p = K_s B (\delta_s - w) \quad (1)$$

여기서 δ_s 는 말뚝이 없는 원지반의 변위이고 w 는 말뚝의 변위를 나타내며 EI 는 말뚝의 휨강성, B 는 말뚝의 직경, K_s 는 지반반력계수를 나타낸다. 말뚝에 작용하는 수동토압은 말뚝과 지반의 상대변위 ($\delta_s - w$)에 지반반력계수인 K_s 와 직경 B 의 곱으로 산정되게 된다.

3.2 유한차분해석

말뚝길이를 등가길이(n)로 나누면, i 절점에서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$EI \left(\frac{d^4 w}{dz^4} \right)_i = K_i (\delta_{si} - w_i) \quad (2)$$

말뚝변위에 대한 4차 미분항의 유한차분값은 식 (3)과 같으며, 지배방정식에 대입하면 식(4)와 같다.

$$\left(\frac{d^4 w}{dz^4} \right)_i = \frac{w_{i-2} - 4w_{i-1} + 6w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2}}{n^4} \quad (3)$$

$$w_{i-2} - 4w_{i-1} + (6 - aK)w_i - 4w_{i+1} + w_{i+2} = a K_i \delta_{si} \quad (4)$$

여기서 $a = \frac{n^4}{EI}$ 이다.

말뚝두부에서는 자유단과 회전구속, 힌지, 고정단으로 4가지 형태의 구속조건을 고려할 수 있으며, 각각의 경우 두부에서의 구속조건식을 나타내면 식(5)~(8)과 같다.

자유단인 경우 : $M = V = 0$ (5)

회전구속의 경우 : $\theta = V = 0$ (6)

힌지의 경우: $w = M = 0$ (7)

고정단의 경우: $w = \theta = 0$ (8)

말뚝선단에서 단단한 암반에 근입되어 있는 경우(고정단)와 선단이 움직일 수 있는 경우(자유단)를 고려할 수 있도록 하였다. 그 결과 경계조건을 고려하여 말뚝변위 (w_i)를 계산하고, 이를 통해 경사각과 휨모멘트, 전단력과 반력등을 산정할 수 있다. 그림 2에 측방변위에 기초한 수동말뚝의 해석기법의 흐름도를 도시하였다.

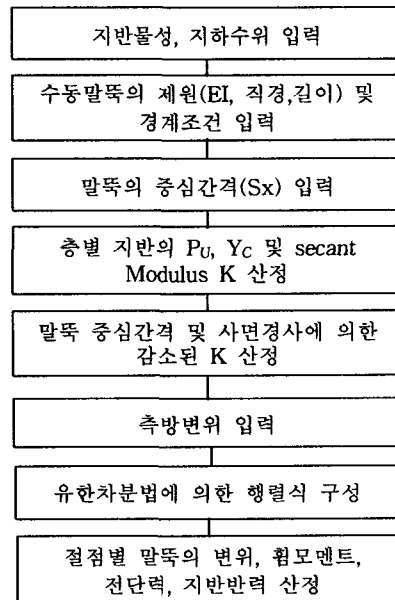


그림 2. 수동말뚝 해석기법의 흐름도

3.3 군말뚝효과

수동말뚝의 경우 상대변위에 따라 말뚝에 발생하는 지반반력은 일반적으로 그림 3와 같이 말뚝과 지반의 상대변위에 따라 Hyperbolic 형태의 곡선을 나타내며 이 경우 극한지반반력 (P_u)의 산정이 중요하다. 극한저항력은 사질토의 경우 식 9와 같이 계산된다(Chen, 1994).

$$P_u = 4.6 \cdot P_p \quad (9)$$

여기서 P_p 는 Rankine의 수동토압을 의미하며 여기에 일정한 계수를 곱하여 수동말뚝의 한계반력

(P_u)을 계산한다. 이 계수는 주동말뚝의 경우는 3정도를 나타내나 수동말뚝의 경우 4에서 6사이를 나타내며 Chen의 경우는 실내실험과 유한요소 해석을 통해 4.6을 제안하였다.

측방유동이 발생하는 방향에 수직으로 설치된 줄말뚝일 경우 말뚝의 중심 간격이 좁아짐에 따라 한계반력은 감소되며 감소된 한계반력은 그림 3와 같이 단독말뚝의 한계반력(P_{us})에 균말뚝 계수(μ)를 곱하여 산정할 수 있으며 이를 통해 수동말뚝의 해석기법에 균말뚝 효과를 고려하였다.

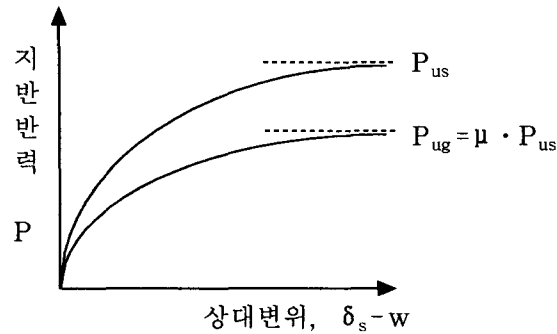


그림 3. 균말뚝효과를 고려한 수동말뚝의 하중-전이 곡선

4. 3차원 유한요소해석을 통한 균말뚝계수 산정

말뚝두부에 하중을 받는 주동말뚝일 경우 많은 현장시험이 실시되었으며 이를 통해 균말뚝상호작용계수들이 제안되었다. 하지만 수동말뚝의 경우는 현장시험이 어려우므로 균말뚝계수를 산정하기 위해서 3차원 유한요소 해석방법이 고려되었다. 본 연구에서는 말뚝 중심간격을 달리하며 3차원 유한요소 해석을 수행하였으며 이를 통해 말뚝 중심간격에 따른 수동말뚝의 균말뚝계수를 산정하였다.

4.1 해석조건

본 연구에서는 Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.의 ABAQUS를 사용하여 3차원 유한요소해석을 수행하였다. 3차원 Mesh는 그림 3과 같고, 8 Node Brick 요소를 사용하였으며 이때 적용한 요소로는 말뚝은 탄성체로, 주변지반은 Drucker-Prager의 탄소성 매질로 고려하였다. 또한 측방변위 발생시 활동면에서의 slip과 말뚝-지반간의 slip을 고려하기 위해 Interface요소를 삽입하였다. 말뚝의 길이는 20m이며 옆의 경계범위로 변위가 미치는 앞쪽은 3m를 두어 지반의 변형을 충분히 고려할 수 있도록 하였으며 뒤쪽은 $r_m = 2.5L(1-\nu)$ 식에 근거해 30m까지 확장하여 경계면의 영향이 없도록 하였다(Randolph and Wroth, 1978). 지반의 측방변위량은 깊이 10m까지 균일하게 3cm의 변위를 작용하였으며, 해석의 편의상 말뚝중심간격의 1/2 거리까지의 반단면 해석을 수행하였다.

표 1에는 해석에 사용한 지반 및 말뚝의 물성을 나타내었다. 지반은 내부마찰각이 30° 이고 점착력이 1.0 t/m^2 인 우리나라의 전형적인 화강풍화토를 대상으로 하였으며 Drucker-Prager 파괴기준에 맞게 아래 표와 같이 환산하여 사용하였다. 말뚝은 직경이 40cm이고 두께가 9mm인 소규경 강관말뚝을 선택하였다. Interface는 흙과 흙 사이의 경우 지반의 내부마찰각인 30° 를 그대로 사용하였고 말뚝과 지반간의 Interface는 API 규정(1993)에 따라 느슨한 사질토에서의 말뚝-지반마찰각인 20° 를 택하였다.

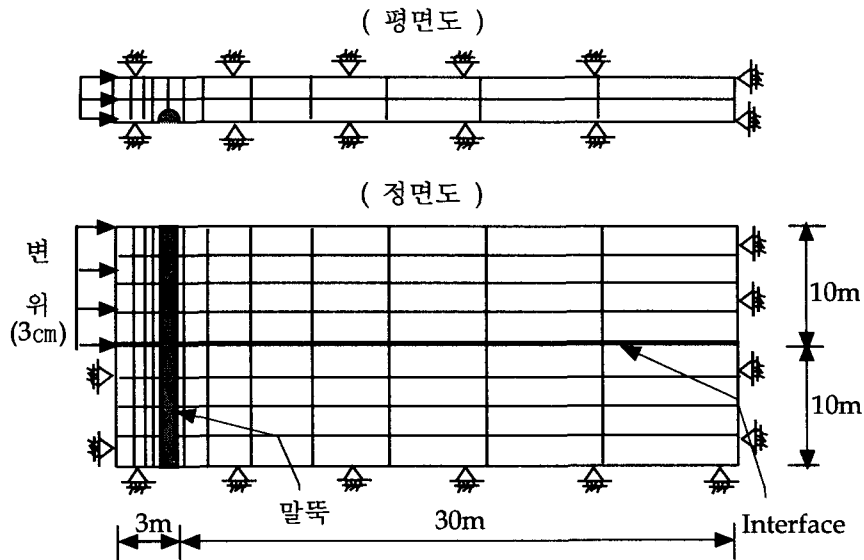


그림 4. 3차원 유한요소 mesh

표 1. 지반 및 말뚝 물성

지반	밀도 (kg/m^3)		1800	
	소성	Drucker-Prager	β	
		Drucker-Prager Hardening	Dilation Angle	
	탄성	항복응력 (Pa)		33983
		소성 변형률		0
		탄성계수 (Pa)		1.0×10^7
포와송 비		0.3		
말뚝	밀도 (kg/m^3)		7850	
	탄성	탄성계수 (Pa)		2.1×10^{11}
		포와송 비		0.25
	길이 (m)		20	
	직경 (m)		0.4	
	두께 (mm)		9	
	두부조건		자유단, 회전구속	
선단조건		자유단		
Interface	활동면		$\tan 30^\circ$	
	말뚝주면		$\tan 20^\circ$	

4.2 해석결과 및 균말뚝 상호작용계수 산정

두부조건이 자유단인 경우의 해석결과 변형된 mesh를 그림 5에 나타내었으며 상부 10m에 가한 측방 변위를 실제로는 3cm를 나타낸다. 계산된 말뚝의 변위를 2차미분하여 휨모멘트를 산정하였으며 최대 휨모멘트를 이용하여 식 10과 같이 균말뚝 상호작용계수를 산정하였다.

$$\mu = \frac{M_{\text{GMAX}}}{M_{\text{SMAX}}} \quad (10)$$

여기서 μ 는 균말뚝계수이며 M_{GMAX} 은 균말뚝내 개개말뚝 중 최대 휨모멘트이며 M_{SMAX} 는 단독말뚝의 최대 휨모멘트를 나타낸다.

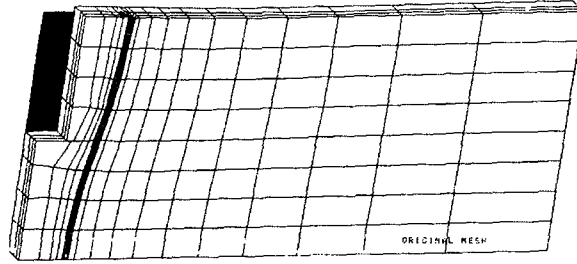


그림 5. 해석 결과 변형된 mesh

두부조건을 고려하여 말뚝간격에 따른 균말뚝의 상호작용계수를 표 2에 나타내었다. 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 말뚝에 발생하는 최대휨모멘트는 감소하였으며 이에 따라 상호작용계수도 감소하였다. 두부조건이 자유단인 경우가 회전구속조건에 비하여 말뚝의 간격이 좁아짐에 따라 휨모멘트가 더 큰 폭으로 감소함을 알 수 있었다.

표 2. 균말뚝의 상호작용 계수

말뚝간격	자유단(두부조건)	회전구속(두부조건)
2.5D	0.59	0.83
5.0D	0.73	0.94
7.0D	0.78	0.97
단독	1	1

5. 균말뚝 효과들 고려한 해석기법의 검증

5.1 사례1(단독말뚝)

Esu와 D'Elia (1974)는 활동 사면에 시공된 콘크리트말뚝의 측방유동에 대한 실측을 수행하였으며 측방유동량은 지표면에서 활동파괴가 일어나는 깊이 7.5m까지 균등하게 0.11m의 측방유동이 있었음을 실측하였다. 사용한 말뚝의 길이는 30m, 지름은 0.79m, 휨강성(EI)은 $360\text{MN} \cdot \text{m}^2$ 이고 말뚝두부는 자유단이었다. 지반의 비배수강도는 지표면(0 kN/m^2)에서 말뚝선단부(32 kN/m^2)까지 선형적으로 증가하였으며 지반의 유효단위중량은 10kN/m^3 이었다.

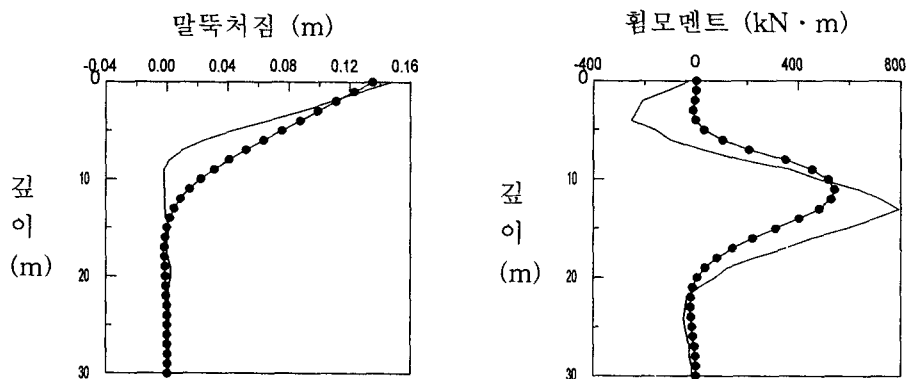


그림 6. 말뚝처짐과 모멘트에 대한 예측치와 실측치 비교

변위해석결과 말뚝에 발생하는 처짐과 모멘트 대해 해석된 결과를 실측치와 함께 도시하여 그림 6에

나타내었다. 약 11m깊이에서 최대 휨 모멘트가 발생되고 11m지점을 중심으로 상부부분은 전체적인 이동이 생기고 그 아래부분은 말뚝의 이동이 없는 것을 알 수 있다. 예측에 의한 말뚝의 거동은 실측치와 같은 소성 힌지 부분(11m)은 정확히 파악할 수는 없었으나 약 14m깊이 부분부터 점진적인 변화가 발생함을 알 수 있다. 그러나 말뚝두부에서의 최대 변위량은 거의 비슷하게 나타났다. 모멘트의 경우 예측치가 실측치보다 작게 산정되었으나 예측치나 실측치 모두 최대 휨 모멘트가 지표면에서 약 11m깊이 지점에서 발생함을 알 수 있었다

5.2 사례2(군말뚝)

활동 사면에 시공된 강관말뚝의 사례로 측방유동량은 지표면에서 활동파괴가 일어나는 깊이 6m까지 3.5mm부터 0mm까지 일정하게 감소하는 형태로 유동되었다. 사용한 말뚝의 길이는 12m, 지름은 1.04m, 휨강성(EI)은 $1540MN \cdot m^2$ 이고 말뚝두부는 자유단이다. 지반의 탄성계수는 유동층에서 $15MN/m^2$, 지지층에서 $70MN/m^2$ 이다. 말뚝의 간격은 2.5D, 5.0D, 단독말뚝으로 하여 앞서 구한 군말뚝계수를 적용하여 해석을 수행하였으며 변위해석 결과 말뚝에 발생하는 변위와 휨모멘트를 그림 7에 도시하였다. 유한요소 해석결과와 같이 말뚝의 간격이 좁아질수록 휨모멘트가 감소하는 형태를 보였다.

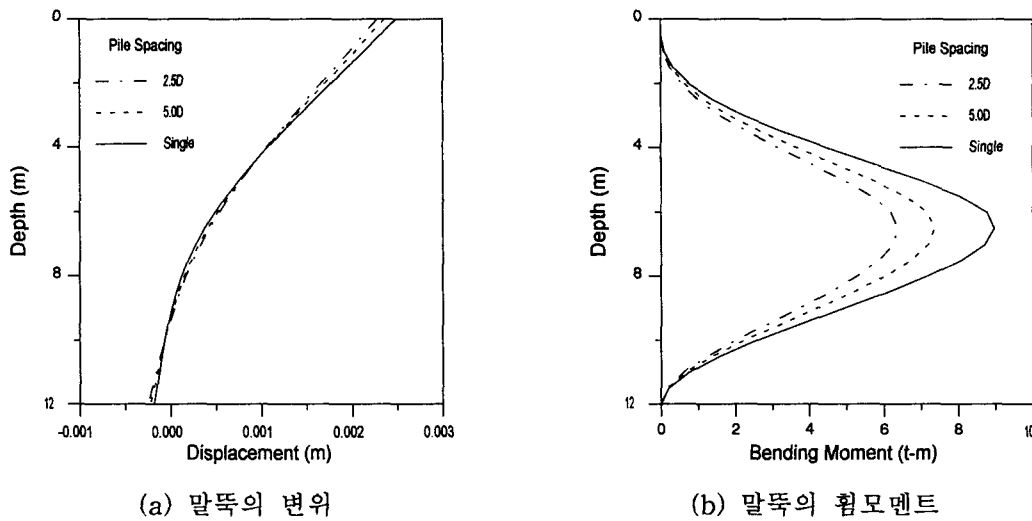


그림 7. 말뚝간격에 따른 말뚝의 변위 및 휨모멘트

6. 결론

본 연구에서는 측방유동을 받는 수동 군말뚝의 거동해석기법을 개발하였다. 또한 현장 실측사례와 수치해석과의 비교 검증을 일부 수행하였으며 앞으로 좀 더 체계적인 분석을 통하여 측방유동을 받는 교대기초말뚝이나 억지말뚝의 최적설계가 가능하리라 판단된다.

7. 참고문헌

1. 원진오(1999), "군말뚝 효과를 고려한 억지말뚝의 사면보강해석", 연세대학교 석사학위논문
2. 장서용, 원진오, 정상섭(1999), "측방변형을 받는 수동군말뚝의 거동분석"-모형토조실험-, 한국지반공학 회지, 제 15권, 제 6호, pp.239~249
3. 홍원표(1996), 수동말뚝, 중앙대학교, pp. 134-211.
4. Chen, L. T. and Poulos, H. G.(1997), "Piles Subjected to Lateral Soil Movements", J. of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering., ASCE, Vol. 123, No. 9, Septembr, pp.802-811.
5. Chen, L. T.(1994), "The Effect of Lateral Soil Movements on Pile Foundations", Ph.D thesis. Univ. of Sydney.
6. Matlock, H., "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles on Soft Clay", Proc. 2nd Offshore Tech. Conf., Houston, Vol. 1, 1970, pp.577-594.
7. Randolph, M.F. & Wroth, C.P.(1978), "Analysis of Deformation of Vertically loaded Piles." Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 104, No. 12, 1465-1488