

변형률 썩기모델을 이용한 다층지반에서의 횡하중을 받는 말뚝의 적용성 평가

Application on Pile Under Lateral Load in Multi Layered Ground Using the Strain Wedge Model

김 홍 태¹⁾ · 이 중 재²⁾ · 정 종 민³⁾ · 윤 창 진[†]

Kim, Hongtaek · Lee, Jungjae · Chung, Jongmin · Yoon, Changjin

ABSTRACT : The Strain Wedge Model is useful method for horizontal bearing capacity calculation considering interaction of pile and ground deformation. However, application case of the Strain Wedge Model is rare and the strain wedge model of plenty of verification is needed on multi layered ground in Korea. In this present study, to conduct laboratory model test and numerical analysis for verification of Strain Wedge Model, adapt model that could describe the interaction of pile and ground deformation on multi layered ground. In model test, it was performed to estimate the behavior characteristics on pile under lateral load and to analyze the relationship between load and deformation. In addition, it was fulfilled to measure the skin friction on pile using strain gauge and to decide the ground passive resistance wedge using skin friction. Numerical analysis was performed to verify laboratory model test results.

Keywords : Strain Wedge Model, Multi Layered Ground, Lateral Load

요 지 : 변형률 썩기모델은 지반의 변형과 말뚝의 복합적인 상호작용을 반영하는 효과적인 횡방향 지지력 산정방법이며, 국내에서도 근래에 들어 실무에서 그 적용성이 점차 증가하고 있다. 특히 다층지반에서의 변형률 썩기모델은 아직까지 국내에서 검증된 바가 없어, 다층지반에서 횡방향 하중을 받는 말뚝의 거동을 변형률 썩기모델로 이해하기 위해서는 충분한 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 다층 지반에서도 변형률 썩기모델이 지반과 말뚝의 복합거동을 모사할 수 있는 유효한 모델인지 확인하기 위하여 모형실험과 수치해석기법으로 그 적용성을 확인해 보았다. 모형말뚝을 이용하여 직접 횡방향 하중을 재하시킴으로써 말뚝의 거동특성을 평가하고, 주변 마찰저항력의 크기로 지반의 변형률을 평가하여 지반의 수동썩기를 도출하면서 지층의 강성에 따른 수동썩기의 상태변화를 확인함으로써 다층지반에서의 적용성을 확인하였다. 아울러 수치해석 기법을 이용하여 모형실험을 검증함으로써 모형실험의 신뢰성을 검증하여 변형률 썩기모델의 적용성을 검증하였다.

주요어 : 변형률 썩기모델, 다층지반, 횡하중

1. 서 론

건설기술의 발달과 더불어 구조물의 규모는 더욱 거대해지고 있으며, 큰 규모의 구조물을 효과적으로 지지하기 위하여 기초공법 역시 그 중요성이 더욱 커지고 있다. 대형 장대교량 및 초고층 빌딩 등의 대형 구조물은 큰 설계하중을 효과적으로 지지하기 위하여 대구경의 말뚝기초를 이용하여 연직지지력 이외에도 수평방향의 지지력을 확보토록 하고 있다.

기존 말뚝의 횡방향 저항력은 Brinch Hansen, Broms, Chang 및 Reese & Matlock 등의 고전적인 방법이 사용되고 있으나, 최근에는 지반의 상호작용 고려할 수 있는 방법을 이용하는 사례가 증가하고 있다. 특히, 말뚝의 횡방향 저항력 산

정시에 지반의 수동 저항력을 효과적으로 고려할 수 있는 변형률 썩기모델(Strain Wedge Model)은 세부적인 연구가 진행중이며, 설계 등의 실무에서도 적용되는 사례가 급속히 증가하고 있다.

변형률 썩기모델은 말뚝에 대해 횡하중 작용시 지반의 수동저항력을 고려하여 말뚝의 수평저항력을 산정하는 효과적인 모델이나, 아직까지 국내에서는 단일 지층에 대한 적용성과 수치해석적인 접근만이 이루어지고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 변형률 썩기모델의 적용성을 실내 모형실험으로 확인하고자 하였으며, 단일 지층이 아닌 다층 지반으로 지반을 조성하여 다층 지반에서의 변형률 썩기모델의 적용성을 확보여부를 확인하고자 하였다.

1) 정희원, 홍익대학교 토목공학과 교수, 공학박사

2) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정

3) 비희원, 홍익대학교 토목공학과 박사과정

† 정희원, 한국농어촌공사 농어촌연구원 수석연구원, 공학박사(E-mail : cjyoon@ekr.or.kr)

2. 말뚝의 횡방향 지지력 산정방법

2.1 말뚝의 횡방향 지지력 산정방법

말뚝의 횡방향저항력 산정방법은 다양한 선행 연구결과들이 제시되어 있으며, 대표적인 방법은 Brinch Hansen(1961), Broms(1964), Chang(1937), Randolph(1981) 및 Reese 등(1977)이 제안한 방법으로 이를 요약, 정리하면 표 1과 같다.

2.2 변형률 썩기모델

2.2.1 변형률 썩기모델 개요

변형률 썩기모델은 사질토지반 내에서 횡하중을 받는 단말뚝에 대한 해석과 관련된 이론으로 Norris와 Abdollaholiae(1985)에 의해 최초로 제시되었다. 이 모델은 말뚝전면에서 생기는 수동토압썩기(Passive Pressure Wedge)로 표현되는 지반변형률과 말뚝편향(deflection) 및 타입된 말뚝의 임의의 깊이에서 선하중(line load)과 수평응력변화와의 상호관

계를 반영하였다. 변형률 썩기모델의 개요도는 그림 1과 같이 나타내었다. 그림 1에 표현된 바와 같이, 수동썩기의 모양은 썩기 저부각($\beta_m = 45 + \phi_m/2$), 썩기깊이(h), 썩기의 부채각(ϕ_m), 그리고 말뚝측면을 따라 발생하는 측면전단저항으로 정의된다. 말뚝 상단부분의 주어진 편향기울기에 상응하여 썩기내의 지반에서 변형률(ϵ)이 발생되고 변형률은 지반내 말뚝의 임의의 깊이(x)에서 썩기 외부쪽에 걸쳐 발생하는 수평응력($\Delta\sigma_h$)에 상응하게 된다. 발생된 응력은 말뚝 측면에서 발생하는 전단력과 더불어 발생된 그 깊이에서 말뚝의 단위길이당 힘으로 정의되는 횡하중(p)을 측정하는데 사용된다.

변형률 썩기의 기울기와 지반변형률(ϵ) 관계가 하중(p)-수평응력($\Delta\sigma_h$)관계와 상호연관성이 있다면, BEF(Beam on Elastic Foundation) 해석이론의 지반반력계수($E_s = p/y$)와 응력-변형률 거동($E = \Delta\sigma_h/\epsilon$)의 관계식 사이에 상호연관성이 존재할 것이라고 제시하였다. 이 관계는 $E_s = NE$ 의 형태로 정의되는데 여기서 N 은 이론적으로 추정된 전환계

표 1. 말뚝의 횡방향 지지력 산정을 위한 기존 제안방법

구 분	횡방향 지지력 산정을 위한 기존 제안방법	제안자	기 호 설 명
Brinch Hansen	$p_{xu} = \sigma_{ux} K_q + cK_c$ $p_{xu} = \sigma_{ux} K_q$ (모래지반), $p_{xu} = cK_c$ (점성토지반)	Brinch Hansen	
Broms	$P = 3D\gamma z K_p$ (짧은말뚝) $P = \frac{M_{yield}}{e + 0.54 \sqrt{\frac{P}{\gamma D K_p}}}$ (두부자유 긴말뚝) $P = \frac{M_{yield}^{pos} + M_{yield}^{neg}}{e + 0.54 \sqrt{\frac{P}{\gamma D K_p}}} + \frac{2M_{yield}}{e + 0.54 \sqrt{\frac{P}{\gamma D K_p}}}$ (두부고정 긴말뚝)	Broms	σ_{ux} : 유효연직상재하중 c : 점착력 K_c and K_q : ϕ 와 x/B 의 함수인 수평반력계수 D : 말뚝직경 γ : 기초지반의 단위중량 z : 말뚝길이 K_p : 수동토압계수 E : 지반의 탄성계수 I : 말뚝의 단면이차모멘트
Chang	$y = \frac{(1 + \beta e^3) + 1/2}{(3EI\beta^3)} p$, $\beta = \sqrt[4]{\frac{E_s}{4EI}}$	Chang	

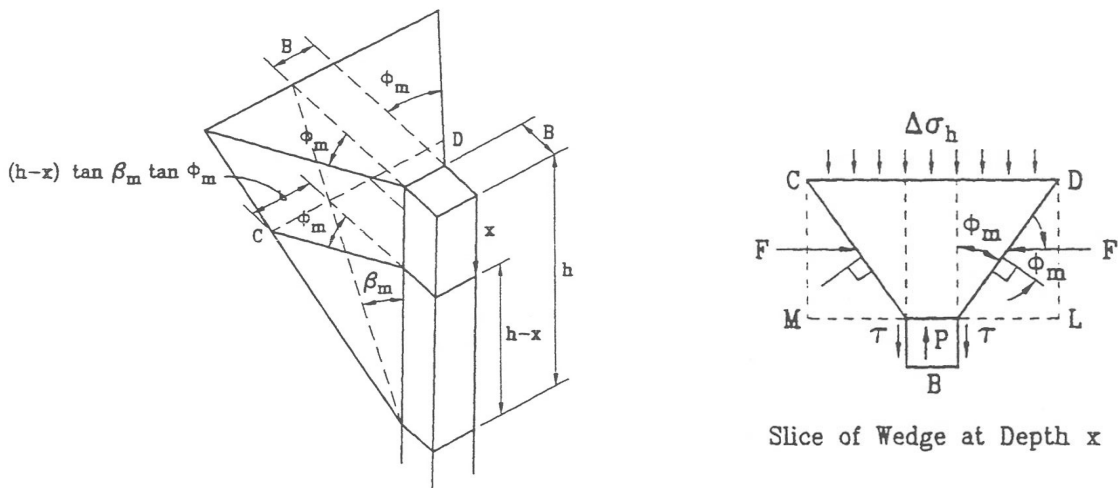


그림 1. 변형률 썩기모델의 개요도

수이다. 다시 말해, 변형률 썩기모델은 복잡한 3차원적 지반-말뚝 상호작용을 단순화시킨 후, 1차원적 BEF 해석이론에 적용시킨 것이라 할 수 있다.

수동썩기 중첩의 효과를 반영할 수 있는 이론적인 연구 기법은 주어진 편향수준에 있어서 수동썩기의 중첩에 기여하는 각각의 말뚝에, 흠에 의해 제공되는 지지력 감소효과를 고려한다. 이 효과를 반영하기 위해, 수동썩기 중첩지역에 있는 흠은 중첩을 유발하는 인접말뚝에 동등한 지지력을 제공한다고 가정할 수 있다. 이러한 수동썩기의 중첩효과는 주어진 편향수준에 있어서 말뚝내에 있는 대상 말뚝의 가용 지반지지력을 감소시킨다.

2.2.2 변형률 썩기모델의 연구

변형률 썩기모델은 사질토지반 내에서 횡하중을 받는 단말뚝 해석과 관련된 이론으로 Norris와 Abdollaholiae(1986)는 사질토지반 내에서 횡하중을 받는 단말뚝에 대한 기존의 현장실험 모델을 적용하여 변형률 썩기모델을 증명하였으며, 2층으로된 사질토지반에서의 적용성을 제시하였다. Gowda(1991)는 점토지반과 다층지반에 묻혀있는 횡하중을 받는 단말뚝의 해석방법을 제시하였으며, 말뚝의 상대유연성(relative flexibility)과 표면장력 변화를 설명하고, 지층경계에서의 지반성질변화를 형상화하기 위해 기존의 변형률 썩기모델을 발전시켰다. 또한, Ashour(1998)가 변형률 썩기모델 이론과 관련된 기존의 해석방법을 개선함으로써 Gowda에 의해 수행된 연구를 수정, 발전시켰다. 이와 같은 연구의 진전으로 Ashour는 사질토, 점토 또는 다층지반에 묻혀있는 단말뚝에 대하여 말뚝두부조건에 따라서 해석을 수행하였다. 여러 제안자들이 제시한 변형률 썩기모델의 제안식은 표 2에 나타내었다. 국내에서의 변형률 썩기모델에 대한 연구로써 김등(1999)이 쓰일네일의 보강재에 대한 거동을 평가한 바 있으며, 김 등(2006)은 옹벽에 보강된 마이크로 파일의 저항력 산정시 지반의 수동저항력을 산정하기 위해 변형률 썩기

모델을 적용한 바 있다.

3. 실내모형실험

3.1 개요

다층지반에서 횡하중을 받는 말뚝에 대한 변형률 썩기모델은 지반의 강성과 내부마찰각의 크기에 따라서 수동썩기의 크기가 달라져 말뚝의 횡방향 저항력은 달라지게 된다. 이러한 변형률 썩기모델의 메커니즘에 대한 규명은 국내에서 많은 연구성과로 발표되었으나, 다층지반에서의 적용성은 아직까지 연구성과가 미미한 실정이다. 본 연구에서는 다층지반에 대한 적용성을 알아보고자 실내모형실험을 수행하였다. 실내모형실험에서는 모형말뚝을 우선 제작하고 모형말뚝에 직접 횡방향 하중을 작용시킴으로써 말뚝의 하중-변형 거동을 살펴보았으며, 모형 말뚝에는 변형률계를 부착하여 하중단계에 말뚝의 하중전이를 확인하고자 하였다.

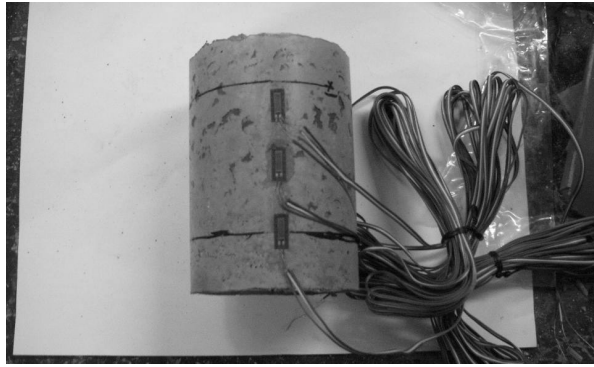
3.2 실내모형실험 지반 및 실험방법

모형실험을 위한 다층 지반조성은 600mm(W)×600mm(H)×1500mm(L)의 모형토조를 이용하여 조성하였으며, 하부와 상부 지층을 각각 구분함으로써 다층지반을 조성하였다. 하부지층은 비교적 강성이 큰 석고를 이용하여 조성하였고, 상부는 상대적으로 강성이 작은 표준사를 이용하여 지층을 조성하였다. 상부지층을 조성할 때에는 염색사와 일반사를 구분하여 지층을 구성함으로써 지반의 전반적인 거동을 확인하고자 하였다.

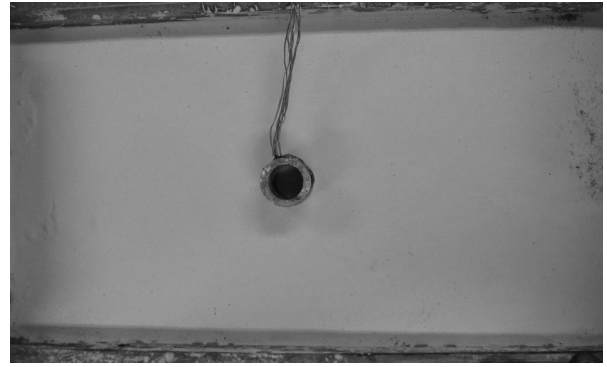
모형지반을 조성한 후에는 토조 상부에 전기식 하중재하장치를 설치하여 말뚝에 2mm/min의 속도로 하중을 재하함으로써 말뚝의 거동을 평가하였다. 아울러 하중재하장치에는 로드셀과 LVDT를 설치하여 말뚝의 거동을 확인하였다.

표 2. 변형률 썩기모델 제안식

구분	제안식	적용지반
Norris(1986)	$p = \Delta\sigma_h \overline{CD}S_1 + 2\tau BS_2$, $\overline{CD} = B + 2(h-x)\tan\beta_m \tan\phi_m$	사질토
Gowda(1991)	$p = \Delta\sigma_h [B + (h-x)G]S_1 + 2\tau BS_2$ $G = \tan\beta_m \tan\phi_m = \tan^2(45 + \phi_m/2) - 1$, $\tau = \tau_{ult} = \zeta\alpha S_u$	균일한 점토
	$p = \Delta\sigma_h \overline{CD}S_1 + 2\tau BS_2$	층상
Ashour(1998)	사질토 : $(P_{ult})_i = (\Delta\sigma_{hf})_i \overline{CD}_i S_1 + 2(\tau_f)_i BS_2$ 점토 : $(P_{ult})_i = 10(S_u)_i BS_1 + 2(S_u)_i BS_2$	사질토, 점토
기호	\overline{CD} : 변형률 썩기의 폭, τ : 말뚝의 측면을 따라 작용하는 전단응력, $\tau = \tau_{ult} = \zeta\alpha S_u$, S_1, S_2 : 말뚝의 형상계수, $\Delta\sigma_h$: 수평응력, $(P_{ult})_i$: 임의의 깊이에서 작용하는 지반의 수동저항력, $\Delta\sigma_{hf}$: 지반파괴시의 수평응력, τ_f : 전단저항응력, B : 말뚝의 직경, S_u : 지반의 비배수전단강도	



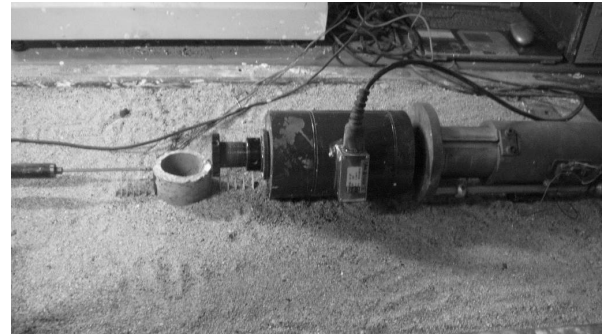
(a) 모형말뚝 조성 및 계측기설치



(b) 모형토조 전경 및 하부지반조성



(c) 하중재하장치 설치



(d) 모형지반조성 및 하중재하

그림 2. 실내모형실험 전경

표 3. 모형말뚝 제원

구 분	말뚝길이(mm)	내경(mm)	외경(mm)	비 고
우물통 기초	120	80	6.5	scale effect 고려

표 4. 실내모형지반 특성

구 분	단위중량(kN/m ³)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	통일분류	다짐 특성
모래	18	0	25	SW	진동 다짐기 90% 이상
석고	21	5	32	-	

본 연구에서 수행된 실내모형실험의 실험과정은 그림 2에 나타내었다. 또한, 모형말뚝의 제원과 모형지반의 특성은 표 3 및 4에 정리하였다.

3.3 실내모형실험 결과분석

실내모형실험은 수평하중 재하에 따른 모형말뚝의 최대하중과 말뚝의 심도에 따른 하중전이를 평가하는 방식으로 주변마찰력을 평가함으로써 변형률 썩기의 크기를 평가하는 방법으로 진행되었으며, 모형말뚝의 횡방향 지지력은 하중-변위 곡선법으로 곡률이 최대인 점의 하중으로 결정하였다.

횡방향 하중 작용에 대한 말뚝의 하중-변위 곡선은 그림 3에 나타내었으며, 말뚝의 심도에 따른 변형률 변화 경향을 그림 4에 나타내었다. 그림 3 및 4에 나타낸 바와 같이, 말뚝에 작용하는 수평하중이 증가함에 따라 저항력은 증가하

는 것으로 나타났으며, 항복하중은 약 37kN이며 최대 수평 저항력은 약 52kN으로 평가되었다. 말뚝의 심도별 변형률은 하중증가에 따라 증가하는 것으로 나타났다. 말뚝의 길이를 6등분하여 각각의 위치에 변형률 게이지를 설치하여

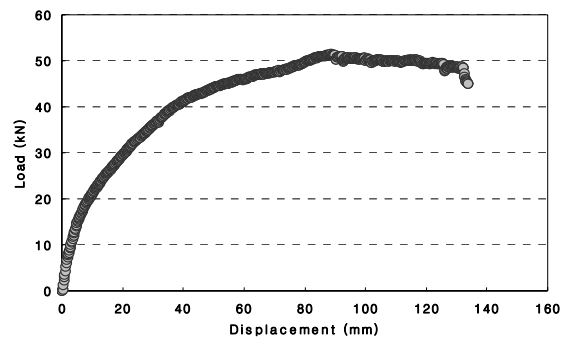


그림 3. 모형말뚝의 하중-변형 거동결과

측정한 결과 지반의 강성이 상대적으로 큰 하부지반에서 최대변형률 값을 보이며, 상대적으로 강성이 작은 모래 지반에서는 변형률이 작은 것으로 평가되었다.

그림 5에 나타난 바와 같이, 주면마찰력은 심도별 변형률의 크기와 비례하여 나타나는 것으로 평가되었다. 즉, 지반

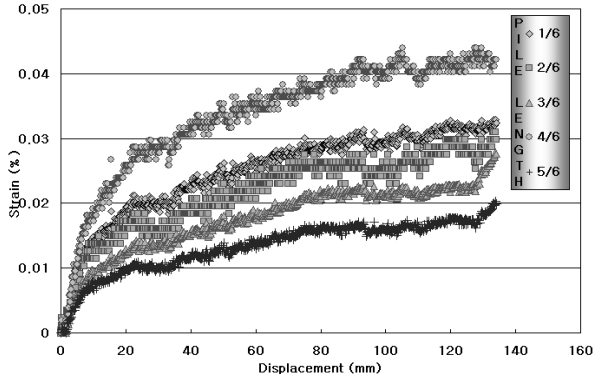


그림 4. 모형말뚝의 심도별 변형률

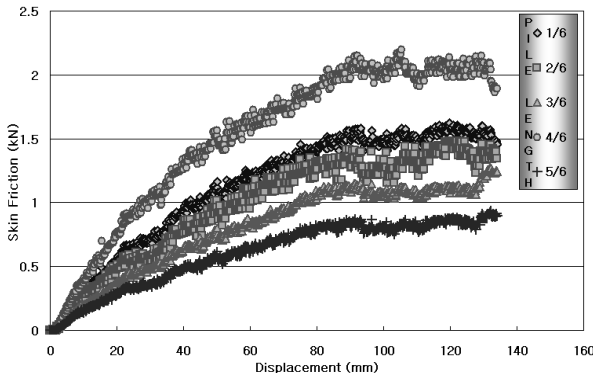


그림 5. 모형말뚝의 심도별 주면마찰력

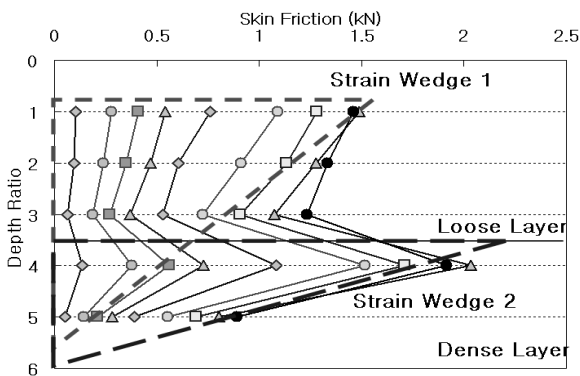


그림 6. 단계별 하중전이 결과

표 5. 수치해석에 적용한 특성값

구 분	단위중량(kN/m ³)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)	포아송비(ν)	탄성계수(kPa)
모래지반	18	0	25	0.30	7,000
풍화암	21	5	32	0.25	300,000
말뚝	25	5	32	0.32	100,000

의 변형이 더 크게 나타나는 지점에서 더 큰 주면마찰저항을 나타내 변형률 썩기 이론에서 나타내는 바와 같이 지반의 변형이 더 큰 지점에서 최대의 저항력을 보이는 것으로 평가되었다. 그림 6에는 하중 단계별 하중전이 결과가 도시되어 있으며, 그 결과 강성이 상이한 2개의 지층을 경계로 하여 2개의 썩기 형태가 나타나는 것으로 평가되었다.

따라서 변형률 썩기모델은 지층이 상이한 경우와 같이 지층의 변화를 현실적으로 반영하여 말뚝의 수평저항력을 산정할 수 있는 합리적인 방법임을 확인하였다.

4. 수치해석

4.1 개요

본 연구에서의 수치해석은 변형률 썩기모델이 다층 지반에서도 적용성을 확보하고 있음을 검증하기 위한 차원에서 실내모형실험과 병행하여 수행하였으며, 3차원 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON 3D 프로그램을 이용하였다. 우선 말뚝의 횡방향 하중에 대한 지반의 거동을 평가하고자 하였으며, 모형말뚝에 하중을 작용시켜 단계별 하중에 대한 지반의 거동을 평가하여 실내모형실험과 동일한 방법으로 모사하였다. 유한요소해석 프로그램인 PENTAGON 3D는 편리한 사용자 인터페이스, 다양한 해석모델의 적용 및 시공단계를 고려한 모델링 등이 가능하여 복잡한 입력데이터를 손쉽게 입력할 수 있는 장점을 가지고 있다. 지반요소에 대한 소성모델로서는 Mohr-Coulomb, Druker-Prager, Hoek-Brown, Modified-Cam Clay, Duncan-Chang Model 등을 사용할 수 있으며, 탄성해석(Elastic Analysis)에서 완전소성해석(Fully Plastic Analysis)에 이르는 범위까지 해석이 가능하다.

4.2 해석모델링 및 경계조건

본 연구에서 적용한 수치해석 모델링은 두부자유 조건인 단말뚝으로 말뚝 상부에 횡하중을 x, y면에 작용시켰으며, 지반 및 콘크리트말뚝은 탄소성재료로 가정하였다. 수치해석에서 말뚝과 지반의 경계조건은 좌우경계면은 롤러를 두어 x방향의 변위를 구속하였으며, 하단면 역시 롤러를 두어 y방향의 변위를 구속하였다. 또한 하부경계와 좌우경계면이 접하는 곳은 힌지를 두어 x, y방향 변위를 모두 구속하였으

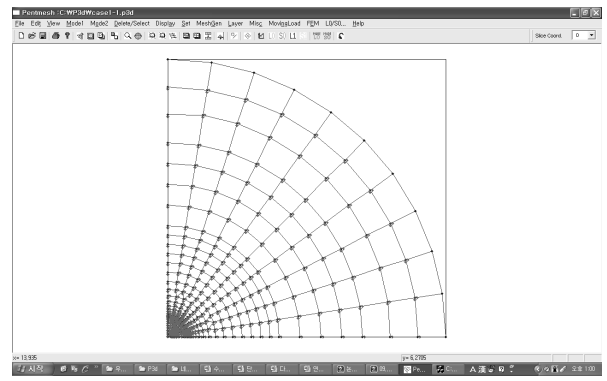
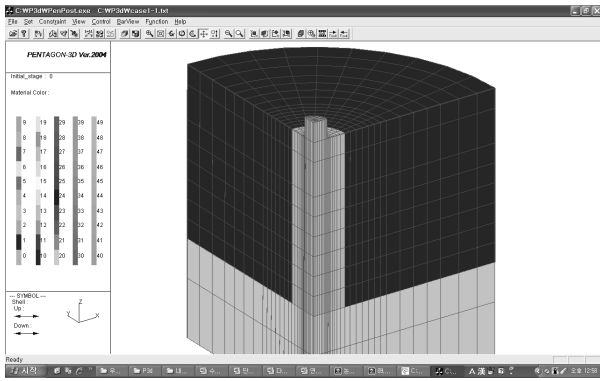


그림 7. 3차원 유한요소 모델링 및 경계조건

며, 3차원 경계조건인 z방향의 경계조건은 모델링 좌측면을 z방향으로 구속하였다. 그림 7에 해석모델링을 나타내었다. 또한, 표 5에 수치해석에 적용한 특성값을 나타내었다.

4.3 해석결과

3차원 유한요소 수치해석에서 말뚝으로의 하중작용은 실내모형실험을 통해 얻어진 하중-변형 결과의 하중을 적용하였다. 단계별로 말뚝의 두부에 직접 수평하중을 작용시켰으며, 로드셀과 LVDT를 통해 측정된 하중-변위 관계는 그림 8과 같다. 아울러 하중이 작용한 최종단계에서 지반의 변형

및 소성도는 그림 9에 나타내었다.

수치해석결과 말뚝의 하중-변형은 실내모형실험 결과와 유사하게 평가되었으며, 전체적인 오차가 10% 미만으로 모형실험결과와 수치해석결과는 최소한의 신뢰성은 확보하고 있는 것으로 판단되었다. 지반의 소성도는 1 미만으로 지반의 파괴는 발생하지 않았지만, 말뚝에 작용하는 하중 쪽의 지반의 변형은 전형적인 썩기의 형태를 나타내는 것으로 평가되었다. 따라서 말뚝에 횡방향하중이 작용하는 다층지반에서도 전반적인 지반의 거동은 변형을 썩기모델에서 제시하는 바와 같이 지반의 강성에 상응하는 수동썩기가 형성됨을 개략적으로 확인하였다.

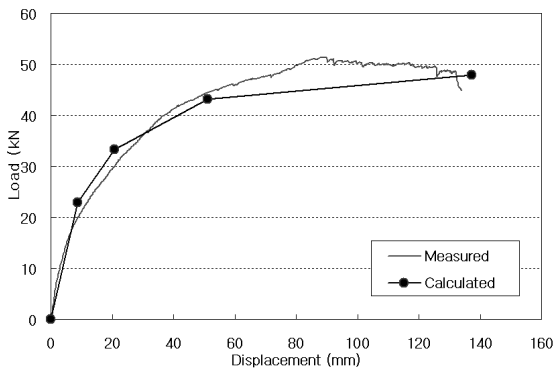


그림 8. 말뚝의 하중-변형 곡선

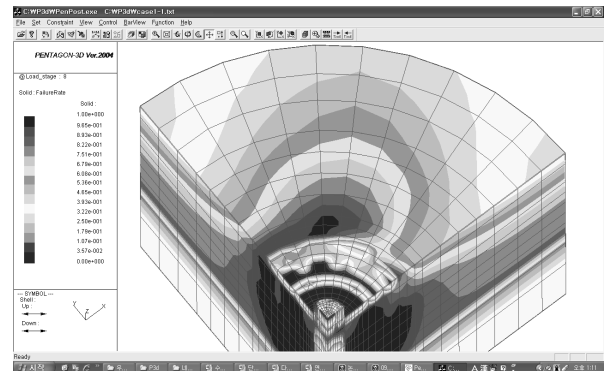


그림 9. 지반의 소성도

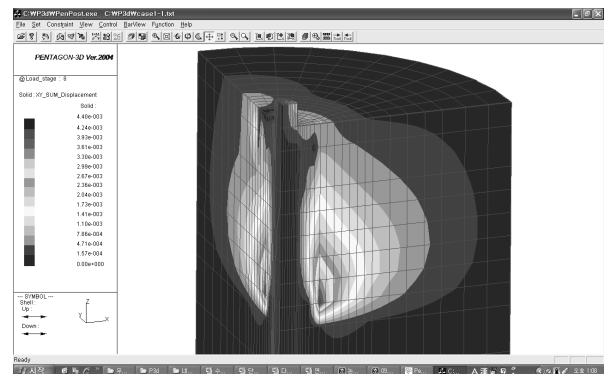
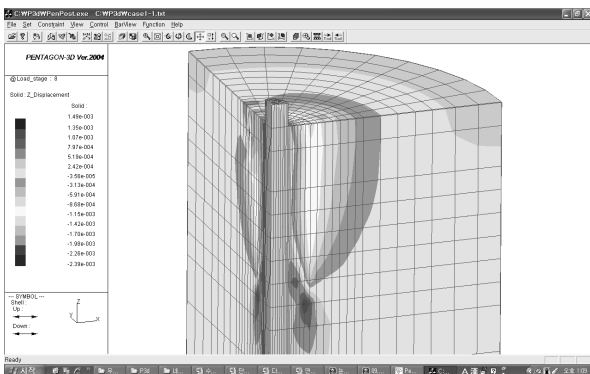


그림 10. 말뚝의 지반변형도

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 실무에서도 적용성이 증가하고 있는 변형률 썬기모델의 다층 지반에서의 적용성을 확인하고자 모형 실험을 수행하였으며, 수치해석을 통해 그 신뢰성을 확인하고자 하였다.

본 연구를 통해 얻어진 주요 내용을 요약, 정리하면 다음과 같다.

- (1) 실내모형실험 결과 말뚝에 작용하는 수평하중이 증가함에 저항력은 증가하는 것으로 나타났으며, 항복하중은 약 37kN 정도이며, 최대 수평 저항력은 약 52kN 정도로 평가되었다.
- (2) 말뚝의 심도별 변형률은 시험이 진행됨에 증가하는 것으로 나타났으며, 말뚝의 길이를 6등분하여 각각의 위치에 변형률 게이지를 설치하여 측정한 결과 최대 변형률을 보이는 구간은 지반의 강성이 상대적으로 큰 하부 지반에서 나타났으며, 상대적으로 강성이 작은 모래 지반에서는 변형률이 작은 것으로 평가되었다.
- (3) 주변마찰저항은 지반의 변형이 더 크게 나타나는 지점에서 더 크게 나타내 변형률 썬기 이론에서 나타내는 바와 같이 지반의 변형이 더 큰 지점에서 최대의 저항력을 보이는 것으로 평가되었으며, 강성이 상이한 2개의 지층을 경계로 하여 2개의 썬기 형태가 나타나는 것으로 평가되었다. 따라서 변형률 썬기모델은 지층이 상이한 경우와 같이 지층의 변화를 현실적으로 반영하여 말뚝의 수평저항력을 산정할 수 있는 합리적인 방법임을 확인하였다.
- (4) 수치해석결과 지반의 소성도는 1 미만으로 지반의 파괴는 발생하지 않았지만, 말뚝에 작용하는 하중 쪽의 지반의 변형은 전형적인 썬기의 형태를 나타내는 것으로 평가되었다. 따라서 말뚝에 횡방향하중이 작용하는 다층 지반에서도 전반적인 지반의 거동은 변형률 썬기모델에서 제시하는 바와 같이 지반의 강성에 상응하는 수동썬기가 형성됨을 개략적으로 확인하였다.
- (5) 마찰력은 동일한 지층내에서 상부에 있는 지점에서 더 크게 평가되었으며, 이는 단계별 마찰력 전이과정에서도 동일하게 평가되었다. 말뚝에 작용하는 하중이 증가함에 따라서 마찰력도 증가하나, 상부지점에서의 마찰력이 더욱 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

본 연구에서의 변형률 썬기모델은 단일 지층 및 다층 지층 조건에서도 그 신뢰성 및 적용성이 높은 모델이지만 아직까지 다층지반에서의 적용성 평가 사례가 많지 않아 그 신뢰성은 충분히 검증될 필요가 있다고 판단된다. 또한 변형률 썬기모델은 수동썬기의 크기가 내부마찰각만으로 결정되는 단점이 있어 이에 대한 검토도 필요한 실정이며, 관련 후속연구 및 실험결과가 뒤따른다면 말뚝과 지반의 거동을 합리적으로 평가할 수 있는 좋은 방법이 될 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 김홍택, 강인규, 김진홍, 전찬우 (1999), Strain Wedge Model을 이용한 지반-네일의 상호작용에 대한 연구, *한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집*, pp. 153~158.
2. 김홍택, 박준용, 김승욱, 황정순, 유찬호 (2006), 변형률 썬기모델을 이용한 옹벽에 보강된 마이크로파일의 횡방향 지지력 평가, *한국지반환경공학회 학술발표회*, pp. 53~60.
3. Ashour, M., Norris, G., and Pilling, P. (1996), Lateral Loading of a Pile in Layered Soil using the Strain Model, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE, Vol. 124, pp. 303~315.
4. Brinch Hansen, J. (1961), The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces, *Geoteknisk Institut. Bull. No. 12*, Copenhagen.
5. 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.
6. Chang, Y. L. (1937), Discussion on Lateral Pile Loading Tests by Feagin, *Transaction*. ASCE, pp. 272~278.
7. Gowda, P. (1991), Laterally Loaded Piles Analysis for Layered Soil Based on the Strain Wedge Model, MS Thesis, University of Nevada, Reno, Nov., pp. 29~46.
8. Norris G., and P. Abdollahiaee (1985), *Laterally Loaded Pile Response: Studies with the Strain Wedge Model*, Civil Engineering Department, Report No. CCEER-85-1, University of Nevada, Reno, pp. 6~54.
9. Norris, G. (1986), Theoretically Based BEF Laterally Loaded Pile Analysis, *Numerical Methods in Offshore Piling, 3rd Int Conf.*, Navtes, pp. 361~386.
10. Randolph, M. F. (1981), The Response of Flexible Piles to Laterally Loading, *Geotechnique*, Vol. 31. No. 2, pp. 247~259.
11. Reese, L. C. (1977), Laterally Loaded Piles : Program Documentation, *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 103, No. GT.4, pp. 287~305.

(접수일: 2009. 10. 14 심사일: 2009. 11. 10 심사완료일: 2009. 11. 23)