한국지반공학회논문집 제16권 제4호 2000년 8월 PP. 5 ~ 16

비균질 사질토 지반에서 단일말뚝의 수평거동 예측을 위한 비선형 해석기법

Nonlinear Analysis for the Prediction of Lateral Behavior of Single Piles in Non-homogeneous Sandy Soil

김 영 수[*1] Kim, Young-Su
김 병 탁[*2] Kim, Byung-Tak
허 노 영[*3] Heo, Young-No

Abstract

The purpose of this paper is to suggest the analytical method which can predict lateral nonlinear behavior in non-homogeneous soil using the coefficient of soil resistance and ultimate soil resistance. Those parameters are obtained through back analysis on the base of the results of a series of model tests.

Analytical method of Chang is more or less difficult to predict nonlinear behavior in non-homogeneous soil. So, in this study, for the prediction of nonlinear behavior the compositive analytical method which apply the p - y curve to Chang model is suggested. Also, the program is developed to predict nonlinear behavior using the compositive analytical method and it can be used to calculate the deflection, bending moment and soil reaction with FDM in non-homogeneous soil. To establish applicability of the suggested analytical method, the results of model tests and field tests and Pentagon^{2D} finite element program are compared with those of the compositive analytical method. In the analysis values of the coefficient of soil reaction and ultimate soil resistance are also applied to the case of non-homogeneous soil. Lateral deflection calculated using the compositive analytical method has been found to be in good agreement with values measured in field and model load tests.

요 지

본 연구에서는 지금까지 수행한 일련의 모형실험 결과들에 근거한 지반반력 계수와 극한 지반반력을 역해석적 방법으로 결정하고 이를 이용하여 비균질 지반에서의 비선형 수평거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하고자 함이 목적이다.

Chang이 제안한 해석기법은 비균질 지반의 비선형적인 거동을 예측하기에는 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 말뚝의 비선형 거동 예측을 위하여 Chang 모델에 p - y 곡선을 적용하는 복합적인 해석기법을 제안하고 해석 프로그램을 개발하였다. 그리고 본 해석기법의 적용성 검증을 위하여 모형실험 및 현장실험 결과와 상용 프로그램인 Pentagon^{2D}을 이용한 해석 결과와 비교 검토하였다. 해석상에 이용한 지반반력 계수와 극한 지반반력은 균질지반에서 결정된 값을 비균질 지반에 적용하였으며, 본 해석기법에 의한 거동 예측 결과는 모형실험 결과와 잘 일치하였다. 또한 현장실험과의 비교에서도 정도 높은 일치성을 보였다.

Keywords : Single pile, Non-homogeneous, FDM, Nonlinear analysis, FEM, Two layers

*1 정회원, 경북대학교 공과대학 토목공학과 교수
*2 정회원, 경북대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*3 정회원, 경북대학교 환경과학 연구소 공학박사

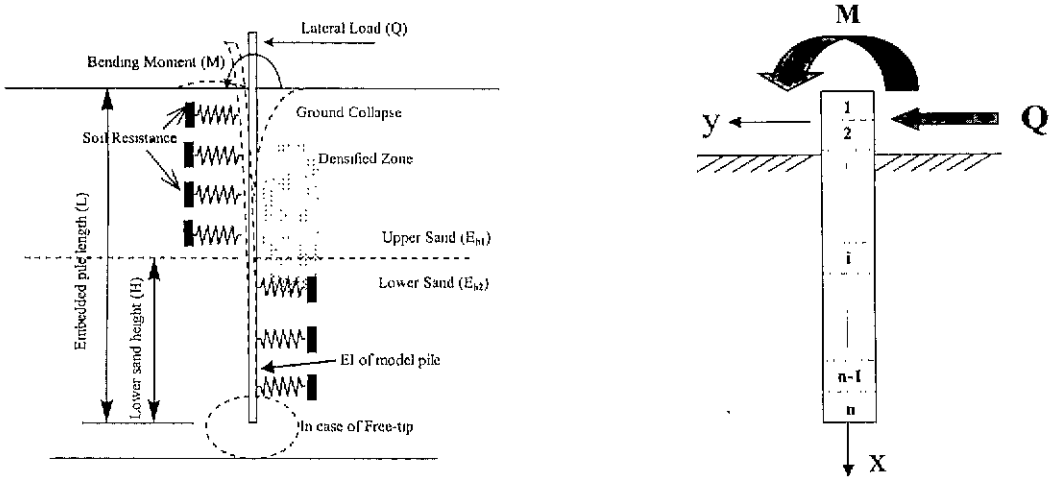
1. 서 론

말뚝은 예로부터 토목, 건축의 각종 구조물 기초에 널리 사용되어 오고 있다. 산업의 급속한 발달과 더불어 이러한 구조물이 점차 복잡하여지고 말뚝의 사용재료, 설치 방법 및 사용 목적도 다양화되고 있다. 구조물이 복잡하여짐에 따라 말뚝에 작용하는 하중상태도 복잡하여지고 있다. 이러한 하중조건은 자연적으로 말뚝의 거동을 복잡하게 하고 있다. 다양한 사용목적에 맞게 말뚝을 안전하고 경제적으로 설계하려면 무엇보다도 이런 복잡한 하중조건하에서의 말뚝의 거동 및 말뚝과 지반사이의 상호작용에 관한 연구가 이루어질 필요성이 있다.

말뚝은 상부구조물의 하중을 하부 지반에 안전하게 전달시키기 위하여 사용되고 있으며, 연직하중을 받는 말뚝에 대하여서는 일찍부터 연구되어 설계에 유용하게 활용되고 있다. 그러나, 말뚝에 의하여 지지되고 있는 구조물이 토압, 풍압, 파력, 토사유동에 의한 측방토압 등을 받게 되면 말뚝머리에는 연직력뿐만 아니라 수평력과 휨모멘트도 동시에 작용하게 된다. 기존의 말뚝의 설계에서는 이러한 수평력에 대하여서는 검토가 행하여지지 않았다. 그러나, 최근에는 구조물의 대형화로 인하여 수평력을 받는 말뚝에 주목하지 않을 수 없게 되어, 이에 관한 연구가 국내 · 외에서 최근에도 활발히 진행되고 있는 실정이다. 또한 이러한 실험결과들을 바탕으로 국외의 여러학자들은 말뚝의 수평거동을 예측할 수 있는 해석기법들을 많이 제안하고 있다.

현실적으로 수평하중을 받는 말뚝기초의 거동해석에는 흙에서의 비선형 지반반력상수와 말뚝의 보 해석을 이용하는 p - y 해석법과 탄성지반위의 보나 슬래브(slab)의 개념에 바탕을 둔 Winkler모델에 의한 해석법과 유한요소 해석법 그리고 경계요소법을 이용하고 있다. 그러나, 이들 해석법은 사용변수 결정과 복잡한 조건들 그리고 국내 지반에 대한 검증이 미흡하여 실무자들이 이용하기에는 어려움이 있다. 특히 최근까지도 말뚝과 지반의 상호관계를 고려하고 간단하면서 편리하게 사용할 수 있는 p - y 해석법을 많이 이용하고 있으나, 이 방법은 국내 지반에 대한 적합한 지반반력 계수와 극한 지반반력의 자료가 충분하지 못하여 국외자료에 의존하는 실정이다.

이에 본 연구에서는 비균질 지반에서 다양한 조건하에 시공된 말뚝의 수평거동 예측을 위한 비선형 해석기법을 제안하고자 한다. 이를 위하여 비균질 지반에서 다양한 조건하의 수평거동 특성을 모형실험으로 파악하였으며, 비균질 지반의 해석을 위하여 Chang의 모델을 이용하였다. 그러나, 말뚝 경계조건과 비균질 지반사이 경계부분의 연속조건을 만족하는 Chang의 모델에서는 말뚝과 지반의 상호작용에서 발생하는 초기 지반반력계수($E_{h(max)}$)만을 이용하기 때문에 비선형 거동을 예측하기에 어려움이 있다. 이에 본 저자는 말뚝과 지반의 상호작용 관계를 충분히 고려하고 있는 p - y 곡선함수를 적용하여 비선형 해석을 수행하였으며 수평거동 예측 프로그램을 개발하였다. 또한, 본 연구에서 제안한 해석기법의 적용성 검증을 위하여 비균질 지반의 모형실험과 현장실험에서 얻어진 결과들은 해석기법에 의한 예측결과와 비교하였으며 유한요소 수치 모델링 해석(Pentagon^{2D}, 1997)결과와도 비교하였다.



(a) 말뚝의 모델링(말뚝 두부와 선단 자유조건의 경우)　　(b) 말뚝의 유한 차분 해석도

그림 1. 수평하중을 받는 말뚝의 거동

2. 말뚝 수평거동 해석이론

2.1 기본 미분방정식

수평하중을 받는 말뚝해석의 기본 미분방정식은 식 (1)과 같다. 기존 연구에서는 탄성 지반상의 보 이론과 기초지반을 탄성 스프링으로 간주한 Winkler 해석법을 적용하여 해석하였으나, 본 연구에서는 말뚝을 보요소로 지반을 탄소성 스프링으로 모델화 하였는데 말뚝길이 방향으로의 지반강성 변화를 고려한 지반반력 해석법을 적용하여 말뚝의 수평거동을 예측하였다. (그림 1)

$$EI\frac{d^4y}{dx^4} - p(x) = 0 \qquad (1)$$

2.2 비선형 해석기법

기존의 균질지반에 대한 말뚝의 수평거동 예측은 말뚝과 지반을 탄성체로 간주하고 모델링화 하여 해석을 수행하였으며, 이 후 지반을 비선형 스프링으로 모델링 하여 비선형 해석이 가능하게 되었다. 그러나, 현실적으로 대부분의 현장 지반은 다양한 층으로 구성되어 있어 기존의 해석 모델링으로는 해석상의 한계가 있다. 또한 실무에서 사용상 간단하며 정도 높은 해석을 할 수 있는 해석기법이 제안될 필요성이 있다. 따라서, 본 연구에서는 Chang의 해석 모델에 말뚝과 지반의 상호작용 관계를 잘 고려하고 있는 p -y 곡선 함수를 적용하여 말뚝의 비선형 수평거동을 예측할 수 있는 해석기법을 제안하였다.

2.2.1 Chang의 해석 모델

본 연구에서는 말뚝의 수평거동을 비선형 해석하기 위하여 Chang의 방법을 이용하였다. 단일 말뚝의 거동에 대한 기본 방정식은 식 (2)에서와 같이 지반반력을 포함하여 표현되는 4차 미분 방적식이다. 식 (2)의 일반적인 해는 Chang(1937)이 제안한 식 (3)으로 얻어지는데, 식 (2)와 식 (3)은 균질한 지반의 경우에 해당하는 말뚝기초의 미분방정식의 일반해라고 할 수 있다.

$$EId^4y/dx^4 + Dk_hy = 0 \qquad (2)$$

$$y(x) = e^{\beta x}(C_1\cos\beta x + C_2\sin\beta x) + e^{-\beta x}(C_3\cos\beta x + C_4\sin\beta x) \qquad (3)$$

여기서, β는 무차원 길이계수로서 $\sqrt[4]{(E_h/4EI)}$이고, C_1, C_2, C_3, C_4 들은 적분 상수들이다.

이들 적분상수들은 말뚝의 경계조건들로 부터 결정되어진다. 그러나, 지반이 다양한 지반강성으로 이루어진 비균질 지반에서는 각 층에서 말뚝의 수평거동 기본방정식을 만족하여야 함으로 식 (2)는 비균질 지반 각 층의 말뚝과 지반의 상호관계를 고려할 수 있는 식 (4)로 변형할 수 있으며, 식(4)에 대한 일반해는 식 (5)로 구하여진다. 따라서, 비균질 지반에서는 각 지반층에 대한 말뚝과 지반의 특성을 고려할 수 있는 식 (5)을 사용하여 거동 예측을 수행할 필요가 있다. 그리고, 다층지반의 말뚝과 지반의모델링은 그림 2-(a)와 같다.

$$(EI)_i d^4y_i/dx_i^4 + D_ik_{hi}y_i = 0 \qquad (4)$$

$$y(x_i) = e^{\beta(i)x(i)}(C_1\cos\beta_ix_i + C_2\sin\beta_ix_i) + e^{-\beta(i)x(i)}(C_3\cos\beta_ix_i + C_4\sin\beta_ix_i) \qquad (5)$$

비균질 지반에서 지반과 말뚝의 상호작용을 고려하기 위하여 말뚝의 수평변위는 각 지반층에 대한 미소요소를 갖는 연속 보로서 거동하는 것으로 가정함으로써 각 지반층 경계부분에서의 연속조건을 만족하여야 한다. 그리고 식 (5)에서의 각 지반층에 대한 적분상수들을 결정하기 위한 말뚝기초의 선단부와 두부부분의 경계조건과 미소요소를 갖는 연속보의 i층과 i+1 층의 연속조건에 대한 관계식은 다음 식들과 같다.

경계조건

(말뚝두부와 선단자유 조건) :

$$[(EI)_1 d^2y_i/dx_i^2]_{x1=0} = M_0 \qquad (6)$$

$$[(EI)_1 d^3y_i/dx_i^3]_{x1=0} = H_0 \qquad (7)$$

연속조건

$$[y_i]_{xi=h} = [y_{i+1}]_{x1+1=0} \qquad (8)$$

$$[dy_i/dx_i]_{xi=h} = [dy_{i+1}/dx_{i+1}]_{xi+1=0} \qquad (9)$$

$$[(EI)_i d^2 y_i / d x_i^2]_{x_i = h} = [(EI)_{i+1} d^2 y_{i+1} / d x_{i+1}^2]_{x_{i+1}=0} \quad (10)$$

$$[(EI)_i d^3 y_i / d x_i^3]_{x_i = h} = [(EI)_{i+1} d^3 y_{i+1} / d x_{i+1}^3]_{x_{i+1}=0} \quad (11)$$

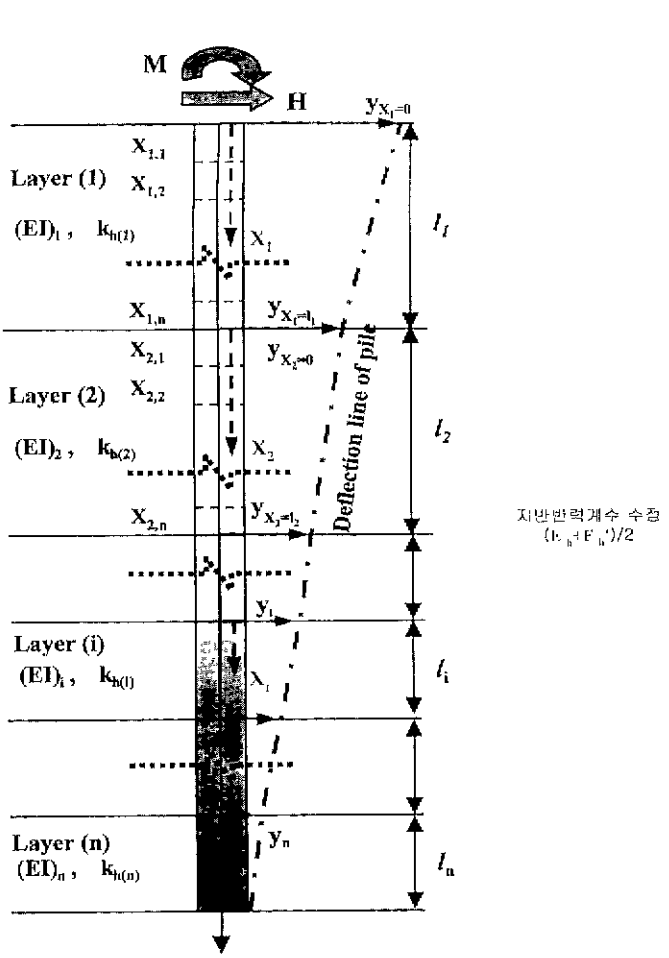
이와 같이, 식 (6)~(11)의 말뚝 경계조건과 각 층 사이의 연속조건을 만족하는 수식들로부터 적분상수들을 구하기 위하여 연립 방정식을 풀어야 하는데, 이때 매트릭스 방법을 이용하였다. 경계조건과 연속조건에 의한 매트릭스 식은 다음의 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{[A]\ [C] = [F]} \quad (12)$$

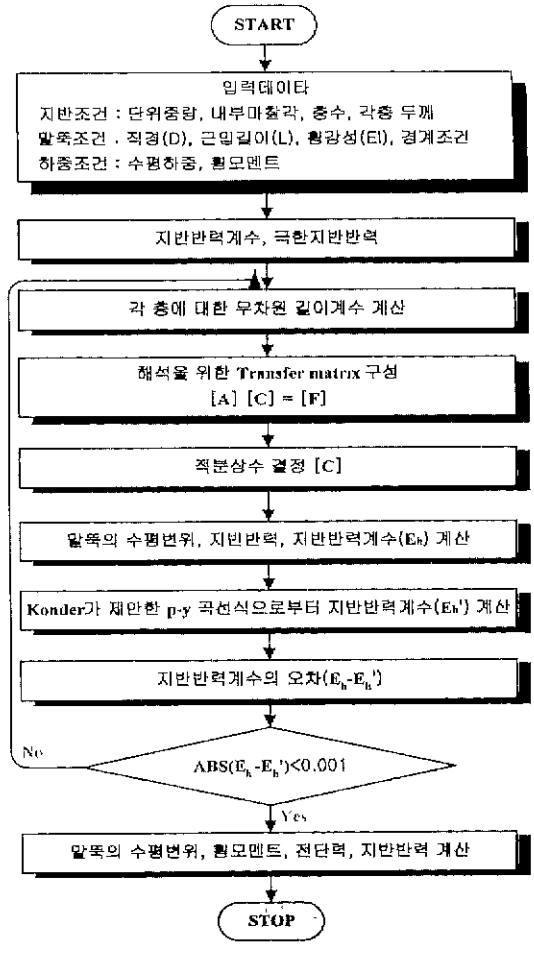
여기서, [A] = 요소 Matrix, [C] = 적분상수, 그리고 Matrix, [F] = 외력 Matrix 이다. 따라서, 식 (12)에서 적분상수들을 결정한 후 식 (5)에 대입하여 말뚝의 수평변위를 결정할 수 있다.

2.2.2 p - y 곡선

흙과 말뚝의 비선형 거동은 현장에서의 실험을 바탕으로 하여 여러학자들에 의해 간단한 형태로 제안된 p - y 곡선 함수로 자주 해석되고 있다. 이런 p - y 함수들은 Kondner, Murchison & O'Neill, Reese *et al*, Det Norske Veritas, Scott, 그리고 Norris에 의해 제안되었다. Murchison & O'Neill과 Reese *et al*는 Mus- tang섬에서 현장실험 결과를 이용하여 p - y 곡선 함수를 제안하였으며, Konder와 Det Norske Veritas는 hyperbolic 함수로 표현하였으나, Det Norske Veritas는 hyperbolic 함수가 직선과 연결되는 함수형태로 제안하였다. Scott는 원심모형실험 결과를 바탕으로 p - y 곡선을 두개의 직선 형태로 제안하였고, Norris는 쐐기이론에 근거한 SW(strain wedge)모델로



(a) 다층지반의 모델링



(b) 해석 흐름도

그림 2 다층지반의 모델링과 본 해석기법의 흐름도

서 $p-y$ 곡선 함수를 제안하였다(김영수외; 1996a, Kim et al.; 1998a, Kim et al.; 1999b).

이와 같이, 제안된 p - y 곡선식들이 많이 있지만, 본 연구에서는 Chang의 모델에 Kim et al.(1998a, 1999b)에서 제안한 것과 같이 균질지반에서 $p-y$ 해석법에 의한 비선형 수평거동 예측에서 그 적용성을 입증한 Kondner가 제안한 $p-y$ 곡선 ($p=y/(1/k_h+y/p_u)$)을 적용함으로써 지반과 말뚝의 상호작용에 의한 비선형적 거동 예측을 할 수 있었다. 본 연구에서 제안한 해석기법은 유한요소 수치해석 모델링과 같이 복잡하고 많은 변수들을 입력하지 않고도 현장에서 간편하게 말뚝의 수평거동을 예측할 수 있는 프로그램을 개발하였으며, 본 해석기법의 알고리즘은 그림 2-(b)와 같이 나타난다.

3. 비선형 해석기법의 적용성 검증

본 연구에서 제안한 비선형 해석기법의 적용성을 검증하기 위하여 일련의 다양한 조건하에서 수행한 비균질 지반의 모형실험 결과(김영수외, 1998c, 1999a, 1999c, 1999d, 1999e) 및 2개 지역에서 수행한 현장실험의 결과들과 비교하였다. 또한 현재 지반범용 프로그램으로 알려져 있는 Pentagon[2D] 상용 프로그램의 수치해석 결과와도 비교 검토하였다. 모형실험에서 사용한 낙동강 유역의 모래에 대한 물리적 특성치는 표 1과 같다. 그리고 모형말뚝의 제원은 표 2와 같다.

3.1 실내실험에 의한 응력-변형율 관계

본 연구에서 사용한 낙동강 유역의 사질토 지반에 대한 탄성계수 및 내부 마찰각을 결정하기 위하여 삼축 압축시험을 건조토에서 상대밀도 90%와 61.8%에 대하여 구속압 50kPa - 300kPa의 범위로 수행하였다(김병탁, 1993). 삼축 압축시험에서 얻어진 건조토의 응력 - 변형률 관계는 그림 3과 같다. 삼축 압축시험에서 얻어진 건조토 지반의 내부마찰각은 상대밀도 90%에서 36° 그리고 상대밀도 61.8%에서 30° 였다. 그러나, 실제 모형실험 상태에서 지반의 임의 깊이에서의 상재하중에 의한 지반의 내부 마찰각을 직접 파악하기 위하여 직접 전단시험을 수행하였으며, 시험에 의한 내부마찰각은 삼축 압축시험에서 얻어진 결과보다 작은 값으로 얻어졌다. 건조토 지반에 대한 응력 - 변형율 관계에서 구속압의 증가에 따른 탄성계수(E_{max})와 할선 탄성계수(E_{50})를 각 상대밀도에 대하여 나타내면 그림 4와 같다.

표 1. 낙동강 모래의 물성치

G_s	D_{50} (mm)	D_{10} (mm)	C_u	C_c	e_{max} *)	e_{min} *)
2.675	0.265	0.14	2.0	1 23	1 19	0.88

*) 최소간극비는 진동법으로 그리고 최대 간극비는 자유낙하법에 의하여 결정

표 2 모형말뚝의 제원

No. Pile	Material	Dia. (cm)	Thick. (mm)	Length (cm)	Young's Modulus (t/m^2)	Yield Moment (t×m)	Flexural Stiffness ($10^{-3}t\times m^2$)
PS-1	Stainless Steel	1 2	0 25	21	2.1×107	70 0	3.41
PS-2				36			
PS-3				51			

3.2 역해석에 의한 E_h와 P_u 산정

말뚝과 지반의 비선형 거동은 여러 학자들이 실험을 통하여 $p-y$ 해석법으로 제안하고 있다. $P-y$ 해석법에 있어 정확한 수평거동의 예측을 위하여 지반의 비선형 거동을 고려한 지반반력 계수($E_h=k_h\times D$)와 극한 지반반력(P_u)의 정확한 산정이 중요하다(Kim et al, 1998a, 1999b). 그리고, 지반반력 계수와 극한 지반반력을 여러 학자들이 제안하고 있으나, 이들 값은 국내 지반에 적용하기에는 적합하지 못할 뿐만아니라 현장실험시 이들 값을 말뚝내 휨모멘트로부터 추정하기 위한 실험장치의 제작에도 어려움이 따른다. 이에 본 연구에서는 건조토 지반에 대하여 수평거동의 예측을 위한 적합한 E_h와 P_u 값을 말뚝이 시공된 지반에 대한 직접 전단시험(DST)을 통하여 각각 결정하였다. 이를 위하여 건조토 지반에서는 직접 전단시험에서 얻어진 탄성계수(E_s)와 극한 전단강도(q_u)에 수정계수(α, β)를 역해석 방법으로 결정하여 고려하였으며, 이때 $p-y$ 곡선은 김영수외 3인(1996a, 1997a)에 의하여 실험결과와 해석결과가 잘 일치하는 쌍곡선 함수식을 이용하였다. 이 방

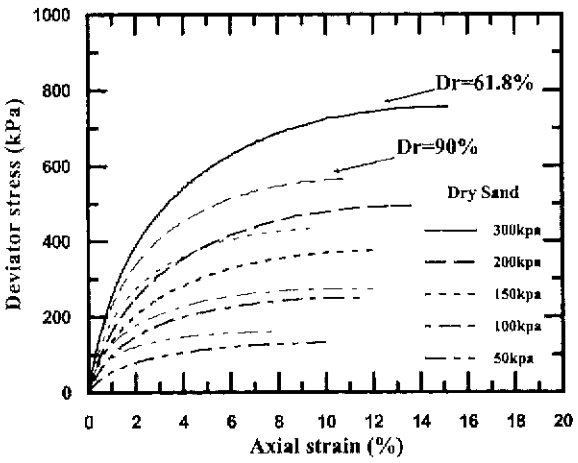


그림 3 건조토의 응력-변형율 관계

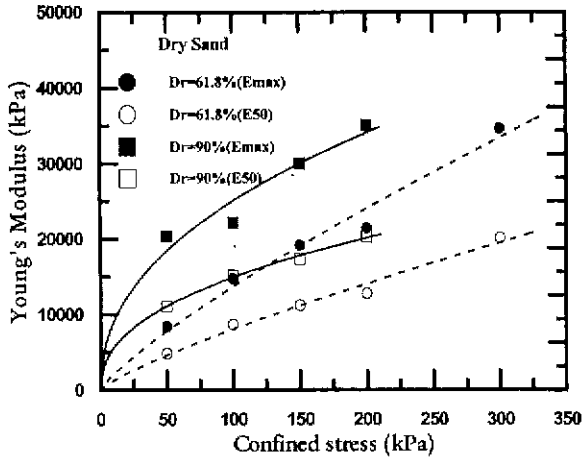


그림 4. 구속압에 따른 탄성계수와 할선 탄성계수

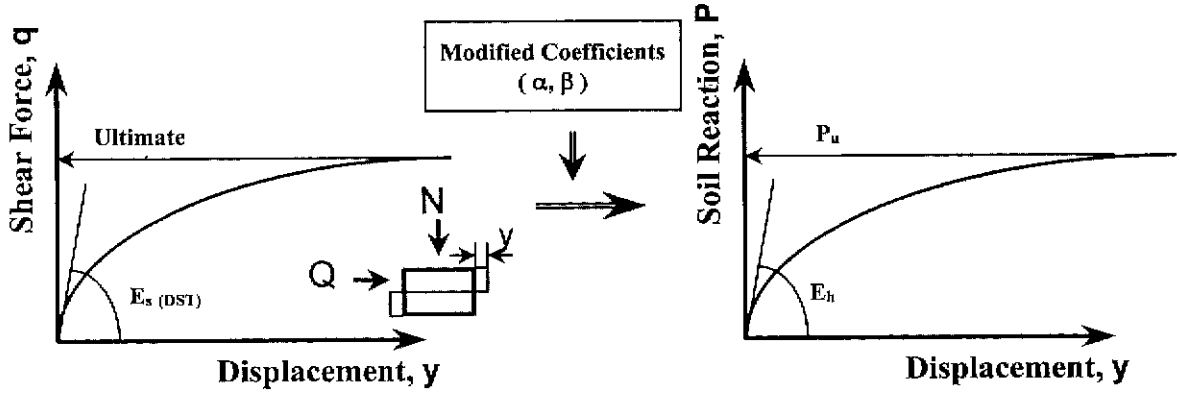


그림 5. DST의 q-y 관계와 말뚝기초에서의 p-y 상관관계

법에 대한 개념도는 그림 5와 같다. 그리고 본 연구에서 사용한 직접 전단시험의 응력 - 변형 관계를 말뚝기초의 변위 - 지반반력 관계로 적용한 경우는 Norris et al.(1998)가 삼축 압축시험의 응력 - 변형 관계를 적용한 경우와 유사하다고 할 수 있다.

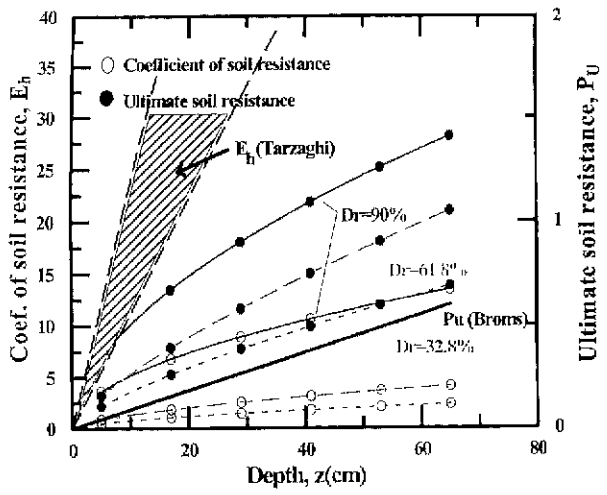


그림 6 역해석에 의한 심도별 지반반력 계수와 극한 지반반력의 변화

이와 같이, 균질 지반에 대하여 역해석 방법에 의하여 얻어진 깊이별 지반반력 계수와 극한 지반반력을 건조토 지반들에 대하여 나타내면 그림 6과 같다. 그림에서와 같이 빗금친 부분이 조밀한 상대밀도에 대하여 Terzaghi가 제안한 지반반력 계수의 범위로서 낙동강 사질토 지반에 대하여 역해석 방법으로 얻어진 상대밀도 90%의 지반반력 계수 곡선과는 말뚝직경의 8배 깊이까지는 일치하나 그 이상의 깊이에서는 Terzaghi 의 제안값이 아주 크게 나타나 설계시에 이들 추천값을 이용할 경우 말뚝의 수평변위는 과소평가될 우려가 있는 것으로 사료된다.

건조토 지반의 각 상대밀도에 대하여 역해석 방법으로 얻어진 지반반력 계수와 극한 지반반력에 대한 DST와 말뚝기초의 관계식은 다음 식들과 같다.

for D_r=90.0%:

표 3. Pentagon2D 유한요소 해석에 적용된 각 요소의 제원

지반 조건	Dr=90 %	γ=1.4 t/m^3, φ= 17.5 ~ 36°, c = 0 t/m^2 체적 탄성계수; K = 34.0 t/m^2 전단 탄성계수: G = 25 0 t/m^2, ν=0 3
	Dr=61. 8%	γ=1 34 t/m^3, φ=11.0 ~ 30°, c=0 t/m^2 체적 탄성계수, K= 8 15 t/m^2 전단 탄성계수; G= 6.11 t/m^2, ν=0.3
말뚝 기초	초기 탄성계수; E = 2.1×10^7 t/m^2 단면적; A = 9 23×10^{-6} m^2 길이; L = 21, 36, 51cm, ν=0 3 스테인레스 스틸 강관	

표 4. 유한요소 해석에 적용한 내부마찰각

L/D = 17.5, 30.0, 42.5		
Depth (cm)	Dr=90%경우	Dr=61 8%경우
0 ~ 12.75	17 5	11.0
12 75 ~ 25 5		
25.5 ~ 38.25		
38.25 이상	36.0	30.0

$$E_h = \alpha E_{h(DST)} = 0.05 \times 26.28\ (\sigma_V/\gamma)^{0\ 513} \quad (13)$$

$$P_u = \beta P_{u(DST)} = 0.4 \times 0.352\ (\sigma_V/\gamma)^{0.551} \quad (14)$$

for D_r=61.8% :

$$E_h = \alpha E_{h(DST)} = 0.017 \times 13.72\ (\sigma_V/\gamma)^{0\ 604} \quad (15)$$

$$P_u = \beta P_{u(DST)} = 0.315 \times 0.155\ (\sigma_V/\gamma)^{0.734} \quad (16)$$

여기서, α와 β는 역해석 방법에 의한 수정계수들이다.

3.3 유한요소 수치해석 모델링

본 연구에서 사용한 Pentagon^{2D}(1997) 유한요소 해석에서는 평면 변형상태(plane strain state)로 사질도 지반은 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 만족하는 탄소성 해석 모델을 사용하였으며, 지반요소는 8절점 사각형 요소로 그리고 말뚝기초는 선형탄성의 2절점 평면 프레임(frame) 요소로 가정하여 모델링 하였다. 말뚝의 수평거동 해석 모델링을 위한 유한요소 해석단면 개요 및 경계조건은 그림 7과 같다.

본 해석에 적용된 관련재료의 제원은 표 3에 정리되어 있으며, 이들 중에서 각 상대밀도 지반의 체적 탄성계수와 전단 탄성계수는 수평하중을 받은 말뚝의 경우 지반과 말뚝의 상호작용 관계를 고려하는 탄성계수를 이용하여 결정하여야 한다. 이에 본 연구에서는 실제 모형실험 지반에 가해지는 상부응력상태 조건하에서 수행한 직접 전단시험으로부터 얻어진 탄성계수가 지반과 말뚝의 상호작용 관계를 고려하기 위하여 식 13과 15와 같이 수정되었으며, 수정된 탄성계수의 값을 유한 요소 해석시에 적용하였다. 또한, 모형실험에서의 지반 응력상태는 현장보다 작은 응력상태로 이루어져 있다. 삼축 압축시험에서 결정된 내부마찰각은 현장의 응력상태에 적합하다고 할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 모형실험 응력상태에 적합한 유한요소 해석결과의 도출을 위하여 그림 8에서와 같이 실제 실험 응력 상태하에서의 직접 전단시험을 수행하여 깊이에 따른 내부마찰각을 결정하였다. 이 실험결과에 근거하여 유한요소 해석을 수행할 때 모형지반내의 내부마찰각은 평

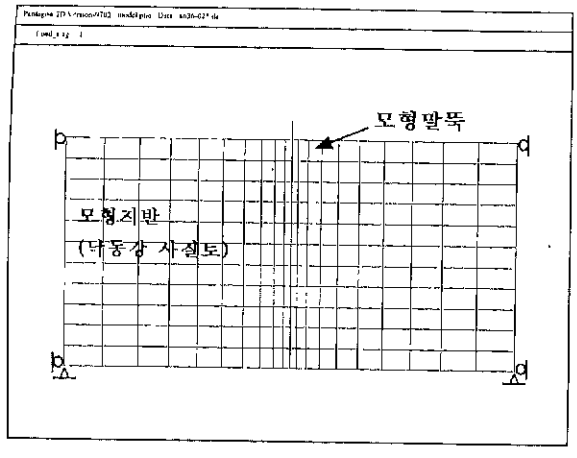


그림 7. Pentagon^{2D} 프로그램 해석 격자망

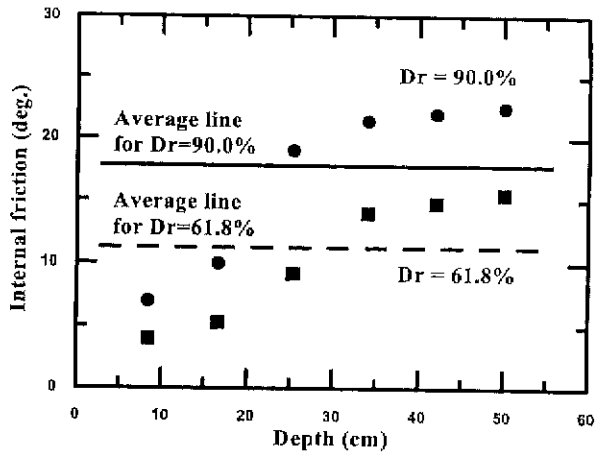
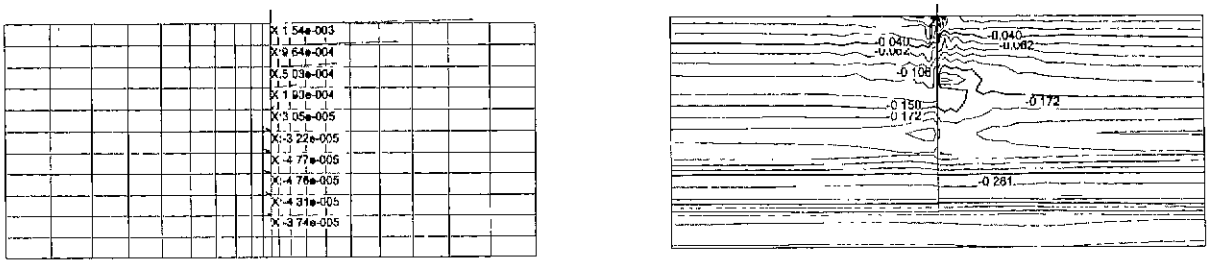


그림 8. 모형실험 지반상의 내부마찰각



(a) 수평변위 분포 **(b) 지반응력 분포**

그림 9. 유한요소 해석에 의한 수평변위 분포 및 지반응력 분포

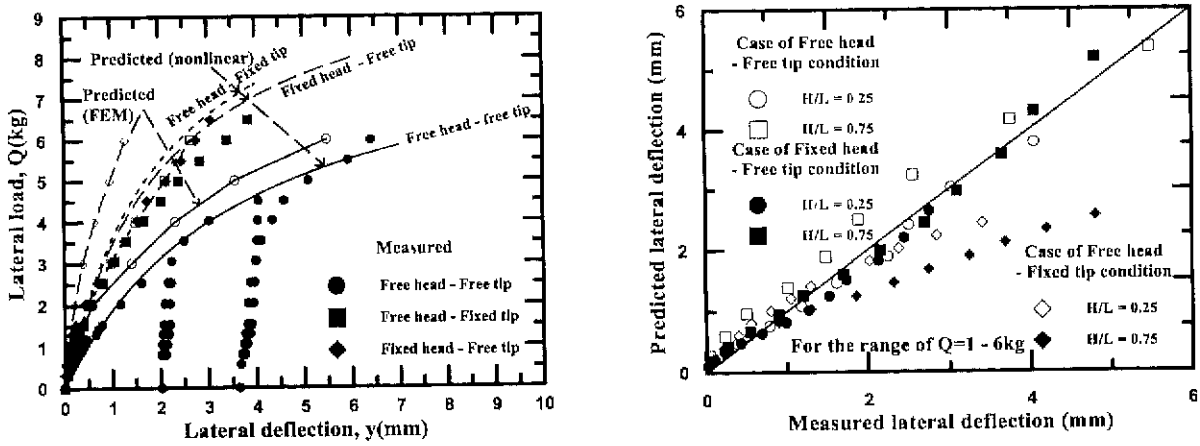


그림 10. 비선형 해석기법 및 Pentagon^{2D}에 의한 예측결과와 실험결과의 비교 (E_{h1}/E_{h2}=5 56. L/D=17.5)

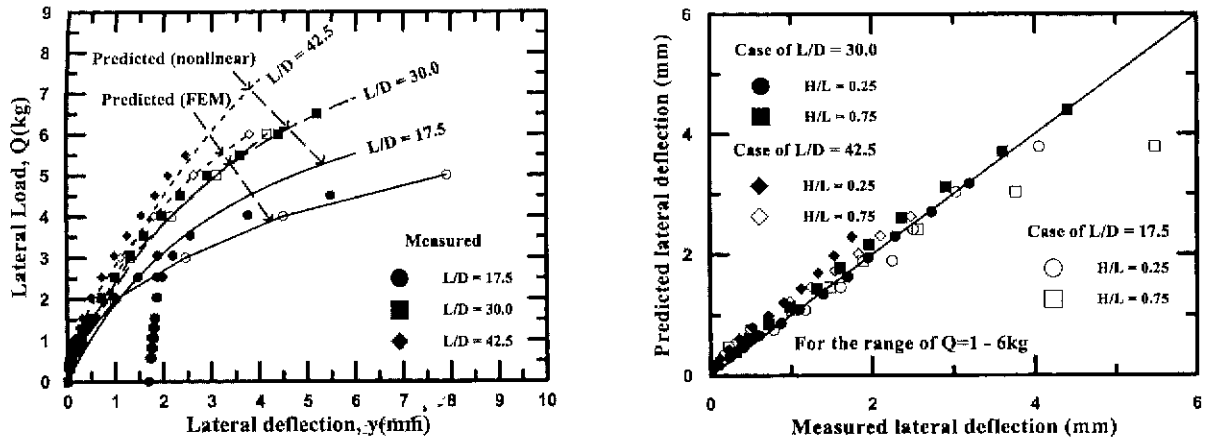
균값을 적용하였으며, 내부마찰각을 요약하면 표 4와 같다. 그리고, 말뚝의 수직 및 수평거동에 영향을 미칠 수 있는 말뚝과 지반의 마찰각(δ)은 본 모형실험에서 사용한 스테인레스 스틸 강관의 표면이 상당히 매끄러움에 따라 무시하는 조건으로 가정하였다.

3.4 비선형 해석기법과 Pentagon^{2D}에 의한 거동예측

본 연구에서 제안한 해석기법에 의한 수평거동 예측 결과는 비균질 지반에 매입또는 항타 설치한 단일말뚝에 대하여 일련의 모형실험을 수행한 결과들과 비교 되었다. 그리고 본 해석기법의 적용성을 검토하기 위하여 Pentagon^{2D} 유한요소 해석 프로그램을 이용한 거동 예측결과와도 비교 분석하였다. 다양한 실험조건에서 수행한 모형실험 결과들 중에서 본 연구에서 해석기법의 적용성 검증에 이용한 실험조건은 말뚝 두부 및 선단 구속조건, 말뚝 근입길이 조건, 비균질 지반에서의 지반반력 계수비 조건 그리고 시공방법 조건이다. 유한요소 해석을 수행한 결과를 말뚝의 수평변위 분포와 지반 응력분포를 나타내면 그림 9와 같다. 이때 말뚝의 경계조건은 말뚝 두부 자유 - 선단 자유 조건, 말뚝 근입길이 비(L/D)는 30.0, 지반반력 계수비(E_{h1}/E_{h2})는 5.56 이며 매입말뚝에 대한 해석결과이다.

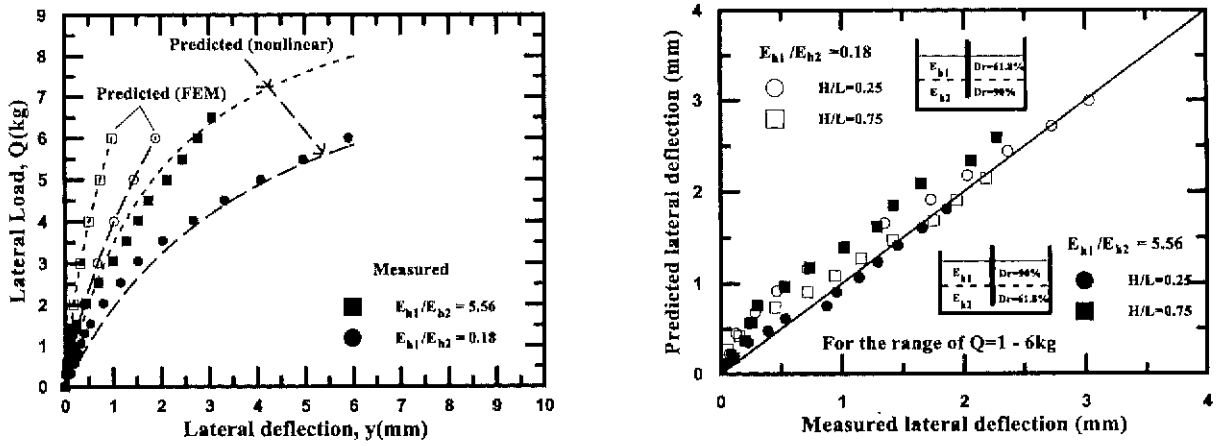
3.4.1 말뚝 두부 및 선단 구속조건

말뚝 두부의 경계조건에 따른 본 해석기법 및 유한요소 해석에 의한 예측결과와 실험결과의 비교를 E_{h1}/E_{h2}=5.56인 비균질 지반에서의 말뚝 근입길이 비가 17.5인 매입말뚝에 대하여 수행하였으며 그 결과는 그림 10과 같다. 예측결과와 실험결과의 비교에서 수평하중(Q) - 변위(y) 관계를 H/L=0.25에 대하여 나타내면 그림 10-(a)와 같으며, 수평변위에 대한 예측치와 실험치의 관계를 H/L=0.25와 0.75에 대하여 나타내면 그림 10-(b)와 같다. 결과에서와 같이 말뚝 선단이 자유인 조건에서 실험결과와 본 해석기법의 결과가 잘 일치하는 것으로 나타났다. 그러나, 말뚝 선단이 고정이고 두부가 자유인 조건에서의 수치 해석결과는 과소평가 되어 나타났다. 이는 모형실험에서의 말뚝 선단부가 충분한 고정역할을 만족하지 못하였거나 또는 강성말뚝의 경우에 선단부에서 수평하중에 대하여 저항하는 지반반력의 작용범위가 말뚝두부 고정의 경우보다



(a) Q - y 관계 (H/L = 0.75)　　(b) 수평변위에 대한 실측치와 예측치의 비교

그림 11. 비선형 해석기법 및 Pentagon^{2D}에 의한 예측결과와 실험결과의 비교 (E_{h1}/E_{h2}=5.56, Free-Free)



(a) Q - y 관계 (H/L = 0.25)　　(b) 수평변위에 대한 실측치와 예측치의 비교

그림 12. 비선형 해석기법 및 Pentagon^{2D}에 의한 예측결과와 실험결과의 비교 (Fixed-Free, L/D=30.0)

선단 고정으로 인하여 크게 감소되어 나타나고 있으나 해석시에는 말뚝 근입길이 전체에 대한 지반반력이 말뚝의 수평거동에 영향을 미치고 있기 때문으로 사료된다.

본 해석기법의 검증을 위하여 유한요소 해석을 수행한 결과, 유한요소 해석 결과는 모형실험 결과에 대하여 말뚝 두부 및 선단 구속조건에서는 과소평가 되었다. 특히, 말뚝 선단이 고정인 경우가 말뚝 두부가 고정인 경우보다 수평변위가 크게 발생하는 경향은 모형실험 결과와 비슷하나, 수평변위 감소정도는 유한요소 해석 결과가 크게 나타났다.

3.4.2 말뚝 근입길이비 조건

말뚝 근입길이 비 조건에 따른 본 해석기법 및 유한요소 해석에 의한 예측결과와 실험결과의 비교를 E_{h1}/E_{h2}=5.56인 비균질 지반에서의 말뚝두부 자유 - 선단 자유(free head - free tip)조건인 매입말뚝에 대하여 수행하였으며 그 결과는 그림 11과 같다. 예측결과와 실험결과의 비교에서 수평하중(Q) - 변위(y) 관계를 H/L=0.25에 대하여 나타내면 그림 11-(a)와 같으며, 수평변위에 대한 예측치와 실험치의 관계를 H/L=0.25와 0.75에 대하여 나타내면 그림 11-(b)와 같다. 본 해석기법에 의한 해석결과는 L/D가 30.0인 경우에는 아주 잘 일치하고 있으며 L/D가 42.5인 경우에도 약간의 과대평가가 나타나고는 있지만 전반적으로 잘 일치하였다. 그러나, L/D가 17.5인 경우에서 수평하중이 3.5kg 이상에서는 수평변위가 과소평가 되어 나타났다. 이는 수평하중에 대한 지반의 수평변위가 L/D=17.5에서 지반의 강성보다 말뚝의 강성에 더 의존하여 이로 인한 말뚝이 근입된 지반 상부의 체적변화가 많이 일어나 초기에 해석상 입력한 단위 중량 및 내부 마찰각의 변화가 유발되기 때문으로 사료된다. 유한요소 해석 결과와 모형실험 결과를 비교하면, 모형실험에서는 말뚝 근입길이가 증가할수록 수

표 5. 현장실험에서의 말뚝조건과 지반조건

현장실험 지역	말 뚝 조 건 (Free head – Free tip 조건)						지반조건	
	말뚝 종류	근입길이(m)	직 경 (m)	두 께 (cm)	탄성계수 (t/m2)	휨강성 (t×m2)	토층종류	지하수 유무
서 울	PHC	18 5	0 4	13.68	3.5×106	3,573 5	실트질 모래층	무
포 항	강 관	19 12	0.508	0.95	2.1×107	9,702	모래층	유(지표면)

평변위의 감소가 잘 나타나고 있으나, 유한요소 해석결과에서는 L/D가 30.0과 42.5의 경우에서 큰 차이를 보이지 않고 있다. 말뚝 근입길이 비가 큰 경우(L/D=42.5)에서는 유한요소 해석결과가 약 30%정도 과대평가 되는 것으로 나타났다.

3.4.3 지반반력 계수비 조건

지반반력 계수비 조건에 따른 본 해석기법 및 유한요소 해석에 의한 예측결과와 실험결과의 비교를 말뚝 근입길이 비가 30이고 말뚝 두부 고정 - 선단 자유 조건(fixed head - fre tip)인 매입말뚝에 대하여 수행하였으며 그 결과는 그림 12와 같다. 예측결과와 실험결과의 비교에서 수평하중(Q) - 변위(y) 관계를 H/L=0.25에 대하여 나타내면 그림 12-(a)와 같으며, 수평변위에 대한 예측치와 실험치의 관계를 H/L=0.25와 0.75에 대하여 나타내면 그림 12-(b)와 같다. 지반반력 계수조건에서의 해석 결과와 실험 결과의 일치성은 강성이 큰 지반이 상부에 존재하는 E_{h1}/E_{h2}=5.56인 비균질 지반에서 E_{h1}/E_{h2}=0.18인 비균질 지반의 경우 보다 크게 나타났다. 또한 지반 강성이 큰 층의 두께가 증가할수록 본 해석기법에 의한 결과가 실험결과와 잘 일치하였다. 즉, E_{h1}/E_{h2}=5.56인 비균질 지반의 경우 H/L=0.25에서 그리고 E_{h1}/E_{h2}=0.18인 비균질 지반의 경우 H/L=0.75에서 실험결과와 잘 일치하였다. 이는 지반의 수평변위 발생에 영향을 줄 수 있는 지반깊이가 지표면 부근에 존재하고 있어 지반 강성이 작은 E_{h1}/E_{h2}=0.18의 비균질 지반에서는 변위 발생에 따른 체적변화가 더 크게 발생하기 때문으로 사료된다. 그리고, 유한요소 해석에 의한 결과는 말뚝 두부가 고정인 조건에서는 실험결과보다 상당히 감소하여 나타났다.

3.5 현장 실험결과와 본 해석결과의 비교

본 해석기법에 대한 적용 타당성 검증을 위하여 모형실험 결과와 비교하였지만, 보다 명확한 타당성 검증을 위하여 현장에서 실험한 서울과 포항지역의 수평 재하시험 결과와 본 연구에서 제안한 해석기법에 의한 예측결과를 비교하였다. 현장실험 지반에 대한 지질 주상도는 그림 13, 15와 같다. 해석시 필요한 지반반력 계수(E_h)은 식 (17)과 같이 일본 도로교 시방서에서 현장 표준관입시험의 N값을 이용하여 제시한 산정식을 이용하였으며, 극한 지반반력은 Terzaghi & Peck 이 제안하는 식에서 N값으로부터 추정한 내부 마찰각을 이용하는 Reese et al.의 식을 이용하였다.

$$E_h = \frac{1}{30}\alpha E_o\left(\frac{D}{30}\right)^{-\frac{3}{4}} = \frac{1}{30}\alpha(28N)\left(\frac{D}{30}\right)^{-\frac{3}{4}} \quad (17)$$

여기서, α는 지반반력 계수의 추정에 이용하는 계수로서 본 연구에서 표준관입시험한 N 값을 이용함으로 4.0을 적용하였다.

해석전 주상도 상에서 평균 N 값을 결정할 수 있는 깊이 범위를 나누어 비균질 지반 층의 수를 결정하였다. 2개소의 현장실험에서 사용한 말뚝제원과 지반조건을 요약하면 표 5와 같다.

본 연구에서 제안한 해석법에 의한 수평거동 예측시, 서울지역 실험지반의 내부 마찰각은 N 값으로 추정한 내부 마찰각을 수정하지 않고 사용하였으나, 포항지역 실험지반의 내부 마찰각은 현장이 지표면까지 지하수가 존재하는 포화 지반의 모형실험에 대한 역해석에서 얻어진 수정계수를 적용하여 해석을 수행하였다(김영수외, 1999f). 현장실험의 결과와 해석결과의 오차를 동일 수평하중에서의 수평변위에 대하여 검토하면 표 6과 같으며 수평하중 - 변위 관계에 대한 결과들의 비교는 그림 14, 16과 같다.

표 6에서와 같이 본 해석기법에 의한 예측결과는 작은 수평하중에서는 실험결과와 일치하고 있으나 수평하중의 증가에 따라 실험결과와의 차이가 증가하여 포항지역의 현장실험에서 22ton의 수평하중에서는 약 12%의 과대평가를 보이는 결과를 얻었다. 이는 현장실험시 지반의 물성치 결정을 위한 실내시험 자료의 부족으로 내부마찰각

표 6. 현장실험 결과에 대한 해석결과의 오차

현장실험 지 역	수평하중 (7ton)			수평하중 (22ton)		
	실측치 (mm)	해석치 (mm)	오 차 (%)	실측치 (mm)	해석치 (mm)	오 차 (%)
서 울	4 89	5 40	10.0	–	–	–
포 항	9.52	9.44	1 0(–)	82.03	91 51	11 6

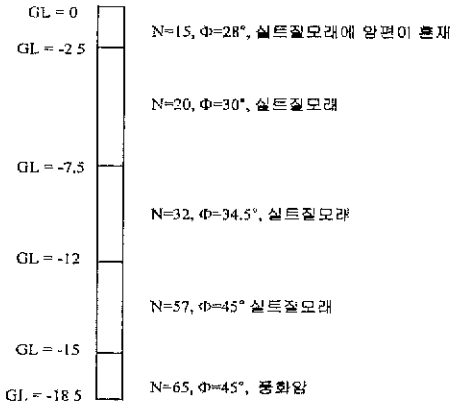


그림 13. 현장실험 지반의 지질 주상도(서울)

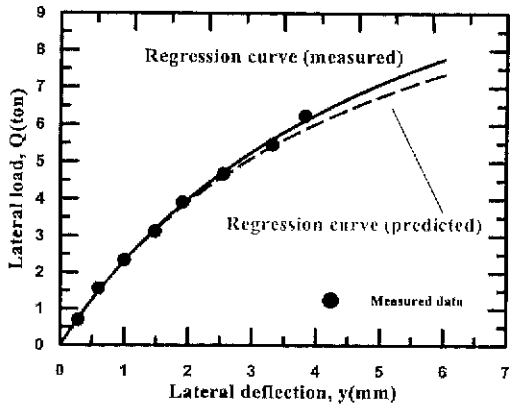


그림 14. 현장실험결과와 본 해석기법에 의한 예측결과 비교 (서울)

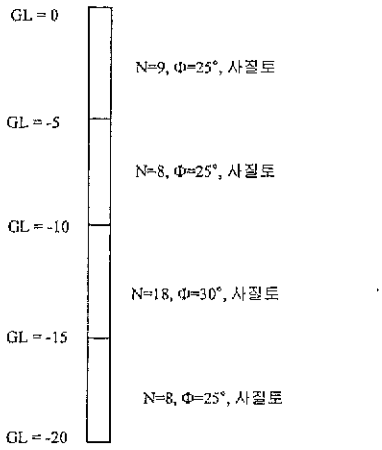


그림 15. 현장실험 지반의 지질 주상도(포항)

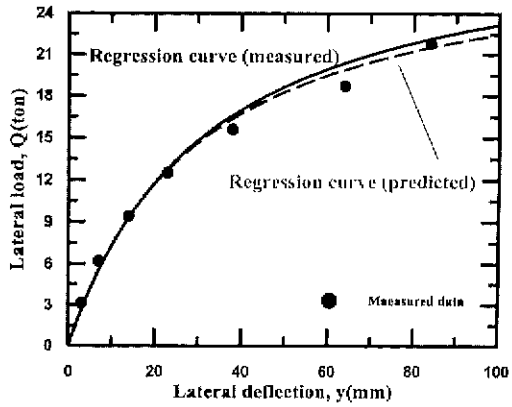


그림 16. 현장실험결과와 본 해석기법에 의한 예측결과 비교 (포항)

과 단위중량을 N값으로부터 추정함으로 인하여 오차요인을 포함하고 있었기 때문으로 판단된다. 그러나, 본 연구에서 비균질 지반에서의 수평거동 예측을 위하여 현장 지반의 물성치를 추정함에도 불구하고 실험결과와 근접한 결과를 보이고 있어 수평거동 예측에 대한 본 해석기법의 적용 가능성을 입증하였다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 비균질 지반에서 말뚝의 비선형 수평거동의 예측을 위한 Chang 모델에 p - y 곡선을 적용하는 복합적인 해석기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 해석기법의 적용성은 일련의 연속된 모형실험과 현장 실험 그리고 Pentagon[2D]의 결과들과 비교하여 검증하였다. 비균질 지반에 대한 본 해석기법의 적용성을 검증한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서는 비균질 지반의 비선형 수평거동 예측을 위하여 Chang 모델을 근거로 수정한 해석기법을 제안하였다. 이 방법은 지반과 흙의 비선형 거동을 고려하

는 $p-y$ 방법을 적용함으로써 가능하였으며, 본 해석법에서 보다 정확한 예측을 위하여 필요한 지반반력계수와 극한 지반반력은 균질지반에 대하여 수행한 모형실험 결과에 근거하여 역해석 기법으로 얻어졌다. 동일 수평하중에서의 수평변위에 대한 모형실험 결과와의 비교에서는 전반적으로 해석결과와 실험 결과가 잘 일치하고 있으나, 말뚝 선단이 고정조건인 경우에서는 수평하중이 클수록 해석결과가 과소평가 되어 나타났다.

(2) 유한요소법을 이용하는 상용 프로그램의 해석시 삼축압축 시험에 의하여 결정한 지반 물성치를 이용하지 않고 모형지반의 응력상태하에서 얻어진 내부마찰각과 지반 탄성계수를 이용한 해석결과가 모형실험 결과와 잘 일치하여 나타났다. 따라서, 현장에서의 말뚝 수평거동 해석시 정확한 입력자료만 주어진다면 정도 높은 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

(3) 수평거동에 대한 본 해석기법의 현장 적용성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 현장자료의 부족으로 서울지역 1개소와 포항지역 1개소에서 수행한 현장 실험결과만으로 예측결과를 비교하였다. 본 해석에 필요한 지반 물성치(Φ, E_h)는 지질 주상도상의 N값으로 추정하였으며, 지표면 부근까지 지하수가 존재하는 포항지역에서의 내부 마찰각은 모형실험에서 제안한 0.4의 수정계수를 적용하여 이용하였다. 예측결과와 실험결과를 비교한 결과에 의하면, 현장 지반의 물성치를 추정하였음에도 불구하고 본 해석의 결과가 현장 실험결과와 아주 근접하여 나타났으며 큰 수평하중에 대하여는 약 12%의 과대평가 되어 나타났다.

(4) 본 연구에서 제안한 해석기법의 적용성을 검증한 결과, 모형실험 및 현장실험 결과들과의 비교에서 만족할 만한 일치성을 보이고 있음으로서 본 해석기법에 의한 비균질 지반의 비선형 거동 예측이 가능할 것으로 판단되며, 현장에서 복잡한 유한요소 해석 프로그램을 이용하는 것보다 간편하고 정도 높은 결과를 보여주는 해석기법을 이용하는 것이 실무자들에게 유리할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 김병탁 (1993), "낙동강 유역 모래의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구", 경북대학교 석사학위 논문
2. 김병탁, 김영수, 서인식 (1996a), "원심모형실험에 의한 강관말뚝의 수평거동연구", 한국지반공학회지, 제12권, 제6호, pp 5-20.
3. 김영수외 3인 (1997a), "수정 Vlasov 모델에 의한 휨성 강관말뚝의 수평거동 연구", 대한토목학회 논문집, 제17권, 제III-3호, pp 249-260.
4. 김영수 외2명 (1998a), "이질 모래층에서의 강관말뚝의 두부조건에 따른 수평거동연구", 대한토목학회 학술발표 논문집, pp.377-380.
5. 김영수 외1명 (1998c), "균질지반과 비균질 지반에서 강관 모형말뚝의 수평거동 특성에 관한 모형실험", 한국지반공학회지, 제14권, 제6호, pp 153-166
6. 김영수 외2명 (1999a), "2개층 지반에서의 강성 강관말뚝의 수평거동에 대한 말뚝두부 구속효과", 한국지반공학회, '99 봄 정기 학술발표 논문집, pp 217-224.
7. 김영수, 김병탁, 서인식 (1999d), "사질토 지반에서 단일 강성말뚝의 수평거동에 대한 시공방법의 영향", 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp.29-44
8. 김영수, 김병탁 (1999e), "비균질 지반에서 항타 관입한 단일 강성말뚝의 수평거동 연구", 한국지반공학회지, 제15권, 제6호, pp 167-185.
9. 김영수, 김병탁 (1999f), "사질토 지반에서 말뚝의 수평거동", '99 봄 정기 학술발표 논문집, 초청강연, pp.3 - 44
10. 鹿島建設 土木設計本部 (1993), 基礎構造物과 地中構造物, 鹿島出版會, 日本.
11. 藤田외 3인 (1995), "設置方法を考慮した杭の水平抵抗に關する基礎的研究,-砂地盤-", 土木學會第49回年次學術講演會, III-511, pp.1012-1013
12. Kim, Y.S., Seo, I.S., Kim, B.T., and Heo, N.Y. (1998a), "Behavior and Analysis of Laterally Loaded Model Pile in Nak-dong River Fine Sand", J. of KGS, Vol.14, No.3, pp 25-46.
13. Kim, Y.S. and Kim, B.T. (1999b), "Back Analysis for Prediction and Behavior of Lateral Loaded Single Piles in Sand", KCSE, J. of Civil Eng., Vol.3, No 3, pp.273 - 288
14. Murchison, J.M. and ONeill, M.W.(1984), "Evaluation of p-y relationships in cohesionless soils, In Analysis and Design of Pile Foundations", ASCE, New York. pp.174-191
15. Norris et al. (1998), "Lateral Loading of a Pile in Layered Soil Using the Strain Wedge Model", ASCE, Vol 124, No.4, pp.303-315.
16. Reese, L.C., Cox, W.R., and Koop, F.D. (1974), "Analysis of laterally loaded piles in sand". Proc. 6th Offshore Technol. Conf., Dallas, Tex., pp. 473-483.
17. Pentagon2D (1997), 에메랄드 소프트사

(접수일자 1999. 2. 3)