

모형말뚝에 작용하는 부마찰력 거동 해석

Analysis of the Negative Skin Friction Acting on a Model Pile

이 송*1
Lee, Song

이 규 환*2
Lee, Kyu-Hwan

이 장 덕*3
Yi, Chang-Tok

Abstract

This paper investigated the negative skin friction acting on the model piles driven in the cylindrical chamber filled with remolded marine clay. In model tests, three load cells were installed on the model piles consisting of three parts to measure the negative skin friction forces independently. Pore pressures and ground movements were monitored throughout the period of investigation. Finite element analysis was used to simulate the behavior of a model pile. This paper describes the comparison of the behavior of negative skin friction on the single model pile with a numerical analysis by CRISP.

요 지

본 논문에서는 재 성형된 해성점토로 이루어진 모형지반에 타입된 모형말뚝에 작용하는 부마찰력에 대한 모형실험 및 수치해석을 하였다. 모형실험은 세 부분으로 분리된 모형말뚝을 이용하여 말뚝 각 단에 작용하는 부마찰력을 분리하여 측정하였으며, 시험 전과정 동안의 침하량과 간극수압을 측정하여 부마찰력 거동특성 파악에 활용하였다. 또한, 모형말뚝의 거동분석을 위해 유한요소해석을 하였다. 모형 말뚝에 작용하는 부마찰력 거동을 파악하기 위해 모형실험과 연약지반에 적용성이 큰 것으로 평가되고 있는 CRISP를 이용하여 비교·분석하였다.

Keywords : Pile foundation, Negative skin friction, Remolded marine clay, Model pile, CRISP, Numerical analysis

*1 정회원, 서울시립대학교 도시과학대학 토목공학과 교수

*2 정회원, 서울시립대학교 도시과학연구원 선임연구원

*3 정회원, B&G 엔지니어링 기술연구소 소장

1. 서 론

말뚝기초는 연약지반에서 구조물공사시 직면하는 설계 및 시공상의 문제점을 해결하기 위한 기초공법으로 오래 전부터 이용되어 왔다.

연약지반에 말뚝기초를 시공하는 경우, 지반 침하로 인하여 말뚝에 부마찰력이 작용되는데 이러한 부마찰력은 말뚝에 하중으로 작용을 하게 된다. 특히, 말뚝의 설계하중을 초과하는 부마찰력이 예상되는 지반에서 말뚝기초위에 구조물을 시공하는 경우 기초의 부등침하 뿐만 아니라 지지력 부족 등으로 인하여 구조물의 안정에 영향을 줄 수 있다.

말뚝에 작용하는 부마찰력은 지반조건에 따른 압밀특성 및 지반강도특성, 말뚝의 시공특성 등에 따라 매우 다양한 요소들을 지니고 있기 때문에 부마찰력 계산식이나 계수 산정시에도 이들에 대한 영향을 고려해야 한다. 그러나, 이러한 영향조건을 모두 고려하여 실제 현장에 시공된 말뚝들에 대한 부마찰력 크기를 산정하기는 불가능하다. 따라서, 경험식에 의한 추정치나 말뚝과 주변지반의 상대변위를 고려한 수치해석법이 대안으로 활용되고 있다.

Kuwabara와 Poulos(1980)는 유한요소법을 이용한 선단지지말뚝에 대한 해석결과 군 말뚝은 단 말뚝에 비해 부마찰력이 작게 작용하며 내측에 작용하는 부마찰력은 외측말뚝에 비해 작다고 하였다.

국내의 경우, 임종석(1987)은 부마찰력 거동을 규명하기 위해 모형말뚝에 대한 연구를 한 바 있으며, 정상섭(1993)은 수치해석을 통하여 군 말뚝 내부의 말뚝들은 단 말뚝보다 훨씬 작은 부마찰력이 작용한다는 연구 결과를 발표한 바 있다.

본 연구에서는 모형말뚝을 이용하여 침하 및 간극수압 소산에 따른 부마찰력 거동특성을 파악하였다. 또한, 모형지반에서 채취한 불교란 시료에 대해 삼축압축시험 및 압밀시험을 통해 구한 강도정수를 이용, 모형말뚝에 대한 유한요소해석을 하여 모형실험 결과와 비교하였다.

2. 말뚝모형실험

2.1 원형토조

모형말뚝에 대한 부마찰력 측정실험을 하기 위하여 그림 1과 같이 원형토조를 제작하였다. 원형토조는 직경 40cm, 높이 100cm, 두께 2cm의 투명한 아크릴 재료를 이용하였다. 아크릴은 강성이 큰 재질을 사용하여 하중재하시 지반의 침하가 일차원 압밀거동을 하도록 하였으며 벽면은 매끄럽기 때문에 벽면마찰각은 거의 무시하였다. 또한, 실험장치의 바닥면이나 측면은 강성이 크고 구속이 되어있어 압밀을 위한 하중재하시 전단변형이 발생하지 않는 것으로 고려 하였다.

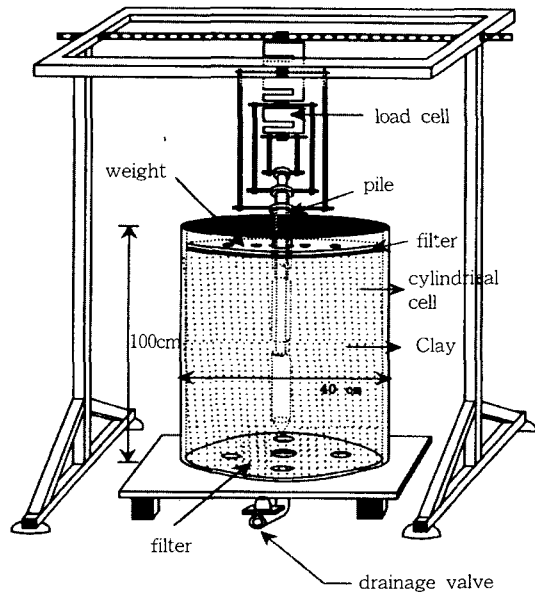


그림 1. A Schematic of Single Model Pile Testing Apparatus

그림 1은 모형말뚝 실험장치의 전면도로서 실험장치는 원형토조, 모형말뚝, 로드셀, 간극수압계 및 토압계로 구성되어 있다. 그림 1과 같

이 원형토조를 이용하여 시험지반을 조성한 후 3단으로 제작된 모형말뚝과 로드셀을 이용하여 부마찰력을 측정하였다. 원형토조 하부에는 다공판과 부직포를 설치하여 배수층의 역할을 하도록 하였으며, 원형토조 하부바닥 중앙부에는 배수밸브를 부착하여 하부 배수로의 역할을 할 수 있도록 하였다.

시험지반위에는 부직포를 깔고 재하판에는 직경 5mm의 구멍을 촘촘하게 내어 재하시에 상부로도 배수가 되도록 하였다. 또한, 토조측면에는 부직포를 부착하여 배수를 촉진시켜 압밀 시간을 단축하였다.

2.2 모형말뚝 및 계측장치

모형말뚝은 직경 4cm, 길이 60cm, 두께 0.3cm의 투명 아크릴을 모래입자를 이용한 샌딩을 하여 콘크리트 말뚝정도와 유사한 표면 거칠기를 갖도록 그림 2와 같이 제작하였다. 모형말뚝은 여러 번의 시행 착오를 거쳐 제작을 하였으며 접는 우산과 스프링 저울의 원리를 응용하여 분리된 말뚝이 서로간에 간섭을 받지 않고 부마찰력을 측정할 수 있도록 하였다. 모형말뚝은 3단으로 분리 제작 한 후에 조립하여 하나의 일체화된 말뚝이 되도록 하였다. 모형말뚝은 분리된 머리부분에 그림 1과 같이 모형말뚝머리에 부착된 강봉과 로드셀을 연결하여 말뚝 각 단에 작용하는 부마찰력을 분리하여 측정할 수 있도록 하였다. 모형 말뚝에 작용하는 부마찰력 측정용 로드셀은 최대용량 20kg이며, 허용 오차는 0.0002로 5g단위로 하중을 읽을 수 있다. 간극수압계는 최대 1.5kg/cm²까지 측정할 수 있는 V.W.P용을 사용하였다. 원형토조에 투기된 시료의 압밀 및 말뚝 타입 후 지반에 하중을 가하기 위하여 직경 37cm, 두께 17mm의 원형 강판으로 재하판을 제작하였다.

재하판은 중앙부에 직경 45mm의 원형구멍을 통하여 말뚝이 관입될 수 있도록 하였다. 또한, 직경 5mm의 작은 원을 여러 개 만들고 재하판 하부에 부직포를 부착하여 배수층 역할을 하도록 하였다.

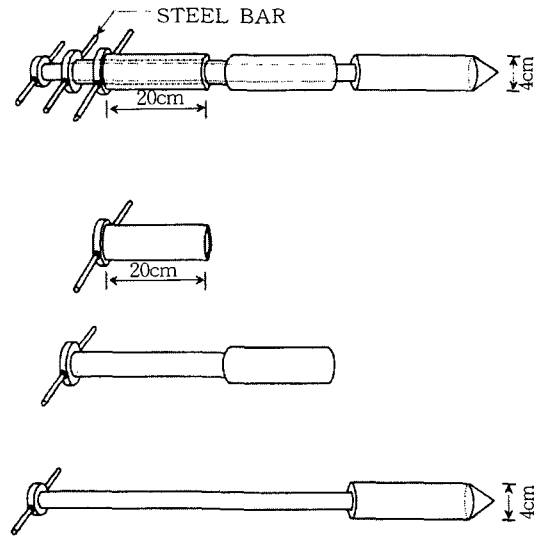


그림 2. Schematic View on Model Pile

2.3 지반성형 및 계측기 부착

본 연구에 사용된 점토시료는 부산 지역에서 항만조성공사를 위해 준설된 준설토를 채취하여 사용하였다. 채취된 준설토는 각종 유기물질과 조개껍질 등이 포함되어 있기 때문에 모형 실험을 위한 지반은 균질성을 확보하기 위해서 시료를 #40체를 이용하여 체가름 후에 원형토조에 투기를 하였다. 체분석과 비중계에 의한 입도분석 결과, 점토질 실트입자가 약 23%, 실트질 입자가 약 71%, 모래질 입자가 약 6%정도 함유되어 있었다. 표 1은 본 연구에 사용된 시료의 물성치이다.

소정의 높이까지 시료를 투입한 후에는 초기

표 1. Properties of Pusan Dredging Clay

Properties	Values
Liquid Limit(%)	44±2
Plastic Limit(%)	25±3
Plasticity Index(5)	19±3
Specific Gravity	2.71
Percent Fines(<#200 sieve)	94
Clay Fraction(<0.002 mm)	23
Activity (PI/CF)	0.83
USCS	CL

침강 및 자중 압밀에 의해서 지반이 어느 정도 안정된 후에 재하하중을 단계적으로 재하하여 시료를 압밀시켜 지반의 강도를 증가시켰다. 간극수압계는 말뚝 중앙지점에 위치한 원형토조의 벽면, 즉 말뚝의 표면에서 약 4D떨어진 벽면에 설치하여 시간과 침하량 변화에 따른 간극수압을 측정하였다. 압밀에 따른 지표지반 침하량은 원형토조 벽면에 부착된 눈금자와 재하판에 부착된 스탠드형 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다. 계측기 설치순서는 간극수압계와 토압계는 시료투기 이전에 미리 소정의 깊이에서 미리 설치를 하였으며 토조의 외부벽면에는 눈금자를 설치하고 시료 투기 후에 지반이 압밀되어 안정화된 후에 말뚝을 관입하고 부마찰력 측정용 로드셀과 침하 측정용 스탠드형 다이얼게이지를 부착하였다.

3. 유한요소해석

3.1 Cam Clay model

한계상태이론은 흙이 배수 및 비배수조건 하에서 전단 되는 동안 발생하는 유효응력과 그때의 단위체적 또는 간극비와의 관계를 설명하는 것으로서 흙의 전단과 압밀을 통합한 이론이다. 한계상태이론에 근거한 모델중 수정 Cam Clay 모델이 지반의 압밀변형 해석에 비교적 적합한 것으로 알려져 있으며 이 모델은 이상적인 점성토에 대해 Cam Clay라는 개념에 소산에너지의 관계를 도입하고 Drucker의 소성증분이론을 이용하였다. 이 모델은 흙이 탄·소성 상태가 되는 조건을 e, p, q 공간에서 정의되는 항복면으로 이 곡면의 경계를 한계상태선이라고 하고 이는 응력 경로에 의존하지 않고 결정된다고 하였다.

또한, 소성변형률 증분벡터는 이 항복면과 직교한다는 가정 아래 유도된 것으로 이 모델의 항복면을 수정하여 수정 Cam Clay모델이 제안되었다.

3.1.1 Cam Clay Parameters

Cam Clay 이론은 기존 토질역학에서 사용했던 토질정수를 이용하여 한계상태면과 항복곡면을 설명할 수 있으며 비교적 간단한 식으로 점토의 특성을 명확히 기술할 수 있다. 특히, 지반의 압밀과 전단에 대한 여러 현상을 비교적 쉽게 이해될 수 있는 장점이 있다.

Cam Clay모델에 사용되는 토질정수는 정규압밀 점토의 기울기, 과압밀점토의 기울기, 초기 간극비, 마찰상수, 전단계수와 포아송비 등이 있으며 이들은 표준 압밀시험 및 삼축압축시험으로 구하였다.

3.1.2 변형률 계수

변형률 계수 λ k 값은 등방 또는 K_0 상태로 정규압밀된 시료를 이용한 압밀실험 또는 삼축 실험으로 얻어진다. 그림 3과 같이 λ 는 e -logP 곡선에서 정규압밀곡선의 기울기 C_c 를 $\ln 10$ 으로 나눈 값이며 식(1)을 이용하여 구한다.

$$\lambda = \frac{C_c}{2.303} \text{ 여기서, } C_c = \frac{\Delta e}{\Delta \log p} \quad (1)$$

κ 값은 e -logP 곡선에서 과압밀곡선의 기울기 C_r 를 $\ln 10$ 으로 나눈 값이며 식 (2)와 같다

$$\kappa = \frac{C_r}{2.303} \text{ 여기서, } C_r = \frac{\Delta e}{\Delta \log p} \quad (2)$$

Duncan과 Chang(1970)은 만약, 등방삼축압축시험 또는 압밀실험 자료를 이용할 수 없는 경우에는 κ 값을 λ 값으로부터 추정할 수 있다고 하였으며 여러 시료에 대한 시험결과 κ 값은 λ 의 초기곡선기울기의 약 10%정도의 값을 갖는다고 하였다.

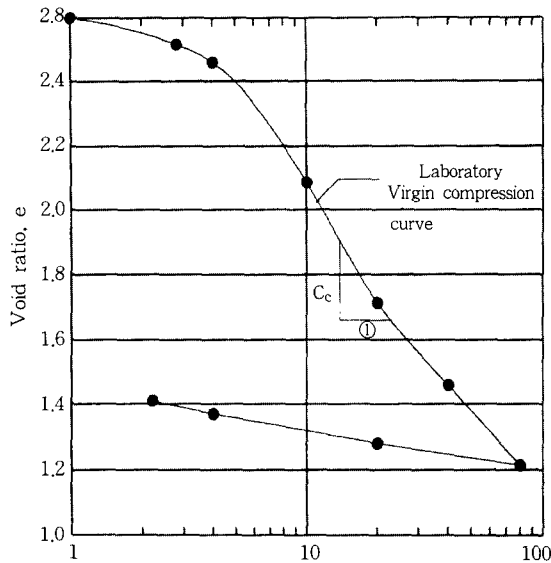


그림 3. λ, * Values in Consolidation Test

3.1.3 마찰상수

등방압밀 삼축실험에서 구한 유효마찰각(ϕ')을 이용하여 마찰상수(M)를 구한다. 배수마찰각은 각각 다른 축압으로 최소 3회 이상의 실험을 통해 구할 수 있다. 그리고, 시료가 파괴상태에 도달할 때까지 실험을 계속한 후 파괴상태에서의 유효주응력을 이용하여 그림 4와 같은 모어원을 그려 유효마찰각 ϕ' 를 구한다. 이 값으로부터 식 (3)을 이용하여 마찰상수 M을 구한다.

$$M = \frac{6 \cdot \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad (3)$$

여기서, M : 마찰상수, ϕ' : 유효 마찰각

3.1.4 전단계수와 포아송비

Cam clay모델과 압밀해석을 동시에 고려할 수 있는 CRISP에서는 포아송비가 0.5보다 크게 입력될 경우에는 전단계수 값으로 인식되고 0.5 이하인 경우에는 포아송비로 인식된다. 일반적으로, 실험을 통하여 전단계수를 구하기 어려운

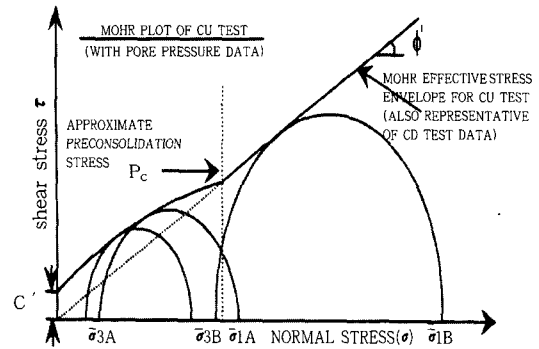


그림 4. Mohr Circle in CU Test

경우에는 포아송비를 사용한다.

Wroth(1975)는 K_o , K_{nc} 와 OCR사이에는 식 (4)와 같은 관계가 있음을 제시하였다. 식 (4)는 정규압밀 시료에 대한 제하상태의 탄성영역을 고려하여 구한 식으로 OCR이 약 5이내인 경우에 대해서는 적용성이 양호함을 입증한 바 있다. 포아송비는 식 (4)와 (5)를 이용하여 구할 수 있다.

$$K_o = OCR \cdot K_{nc} \cdot \frac{v'}{1 - v'} \quad (4)$$

식 (4)로부터

$$v' = \frac{K_o - OCR \cdot K_{nc}}{K_o - 1} \quad (5)$$

여기서 $K_{nc} = 1 - \sin \phi'$

일반적으로, 첫 번째 방법을 많이 사용하며 ν 는 대략 0.3을 적용한다. 탄성이론을 이용하여 전단계수는 일반적으로 식 (6)을 이용하여 구할 수 있다.

$$G = \frac{E}{2(1 - \nu)} \quad (6)$$

본 해석에서 전단계수 G는 흙과 말뚝간의 경계면을 나타내는 중요한 요소로 작용한다.

3.1.5 경계면 모델링

압축성지반에 타입된 콘크리트 말뚝과 같은 구조부재와 흙 요소에 대한 응력과 변위를 결정하는데 있어서 기존의 유한요소해석은 다음과 같은 문제를 내포하고 있다. 첫째, 흙과 구조물의 응력-변형 특성이 다르다는 것이다. 둘째, 흙과 구조물 경계면 사이에서 발생하는 응력은 해석하기가 어렵다. 왜냐하면, 지반에 압밀이 시작되는 시점에서 구조물에 발생하는 응력은 주변지반의 유효응력보다 크기 때문이다. 셋째, 구조물과 지반 사이의 하중전이과정을 이해하기 위해서는 경계면의 응력을 정확히 알아야 한다.

넷째, 흙과 구조물사이의 상대적인 변위를 미리 예측해야 하며 경계면 조건을 미리 결정해야 한다는 어려운 문제 요소들을 내포하기 때문에 해석에는 상당한 어려움이 따른다. 이와 같은 문제들 때문에 일반적인 유한요소 해석법은 한계가 있으나 경계면 요소를 이용하면 이와 같은 문제를 어느 정도는 해결할 수가 있다고 하였다.

Desai(1980)는 여러 가지 경계요소의 변형을 해석할 수 있는 얇은 층(slip layer)의 경계요소를 개발하였는데 이 경계면 요소를 이용하면 흙과 구조물사이의 다양한 거동을 해석할 수가 있다.

Desai(1980)는 완전 탄·소성 구성 모델을 이

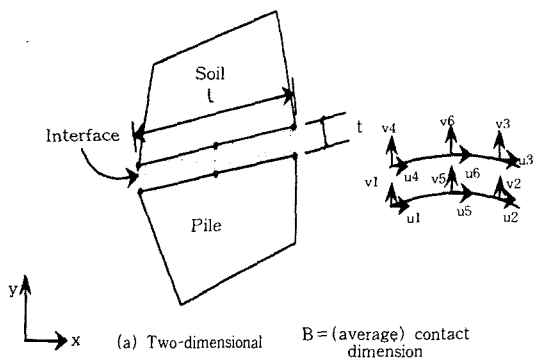


그림 5. Thin Layer Interface Element

용하여 이러한 얇은 층 요소를 해석하였는데 여기서 경계요소의 연직강성계수는 인접하는 흙 요소와 같다고 가정하였으며 경계면의 전단강성계수는 흙과 말뚝의 경계면 지반에 대한 압밀배수전단 실험을 하여 구하였다. 그림 5는 경계면 요소로서 흙과 구조물사이를 얇은 두께의 고체요소로서 취급한 것으로 흙과 구조물과는 다른 구성 특성을 가지고 있다.

경계면에서의 파괴는 말뚝과 지반의 상대변위로 인해 발생하는 전단응력이 지반의 전단강도보다 작은 경우에는 탄성거동을 하며 전단응력이 전단강도보다 크게 발휘되는 경우에는 소성거동을 하여 미끄러짐 파괴가 발생하는 것으로 모델링 하였다.

경계면 요소에 대한 구성방정식은 다음 식 (7)과 같다.

$$[C_e]_{ii} = \begin{bmatrix} C_1 & C_2 & C_3 & 0 & 0 & 0 \\ C_2 & C_1 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ C_3 & C_2 & C_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & G_e & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & G_e & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & G_e \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서,

$$C_1 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

$$C_2 = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)}$$

G_e : CK_0U 실험에 의한 접선탄성계수

경계요소는 비선형 탄·소성거동을 이용하여 모델링 하였으며 경계요소 i 의 전단탄성계수 G_i^e 는 말뚝요소의 상대변위와 연직유효응력과 말뚝벽체에 작용하는 전단응력의 함수로 나타난다. 그러므로, 전단계수 G_i^e 는

$$G_i^e = d \frac{[\bar{\sigma}_n, u_r]}{du_r} \cdot T \quad (8)$$

여기서,

G_i^c : 요소 i 에서의 전단계수

$\bar{\sigma}_n$: 하중중분에 대한 흙과 경계요소에서의
연직유효응력

u_r : 하중중분에 대한 흙과 경계요소에서의
상대변위

T : 하중중분에 대한 흙과 경계요소에서의
전단응력

경계면에서 미끄러짐 발생은 최대 주면마찰
력 f_s 와 경계요소에서의 전단응력 T를 비교하여
식 (9)와 같은 조건을 만족할 때 소성변형이 발
생하게 된다.

$$|T| < \bar{\sigma}_n \tan \phi + c \quad (9)$$

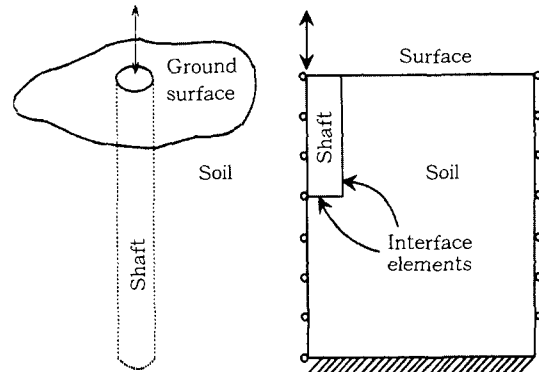
Desai(1980)는 경계면 요소에 대한 모델링시
요소(t/B)의 길이-두께비가 0.01~0.1범위 내에
있어야 가능함을 제시한바 있다.

3.2 모형말뚝의 부마찰력 해석

3.2.1 모델링 및 매개변수의 선정

축 하중을 받는 말뚝은 하중재하와 구조적
인 형태가 말뚝의 길이방향에 대하여 3차원적
으로 나타난다. 그러나 해석시에는 3차원적
으로 해석하기가 어려우므로 2차원적으로 해석하
기 위해 그림 6과 같이 지반에 타입된 말뚝에
대해 이상화시킨 축대칭 모델을 제시하였으며
해석시 적용한 FEM 메쉬 및 경계조건은 그림
7과 같다.

말뚝에 작용하는 부마찰력은 전형적인 흙과
구조물의 상호작용에 관한 문제로서 실제 지반
에서 관찰되는 흙과 말뚝 경계면에서의 변형을
나타내기 위해서는 유한요소해석시 말뚝과 흙
의 경계면에 대한 고려가 있어야 한다. 왜냐하
면, 유한요소해석시 가장 중요한 요소는 적합한
구성모델과 구성모델에 필요한 매개변수의 선
정이기 때문이다.



(a) Basic Problem (b) Axisymmetric Generalization

그림 6. Axisymmetric Idealization

3.2.2 유한 요소망과 경계조건

모형 실험에서는 말뚝의 관입 깊이별 부마찰
력을 측정하기 위해 모형말뚝을 3단으로 분리
제작하였다. 유한요소해석에서는 지표면에 고정
된 모형말뚝이 지반의 침하에 의해서 부마찰력
을 받도록 모델링 하였다. 원형토조내 단말뚝에
대한 유한요소망은 반단면 유한요소망을 작도
하여 축대칭 해석을 하였다. 따라서, 실제 3차원
방사상의 거동을 2차원 반단면 유한요소망으로
간편하게 재현할 수 있도록 하였다.

토조내 점성토 지반에 관입된 말뚝의 부마찰
력 거동을 해석하기 위한 요소는 8절점 사각형
요소를 사용하였으며 이중 지반 및 경계 요소
는 압밀해석이 가능한 요소를 사용하였다. 말뚝
은 압밀을 허용하지 않는 요소를 사용하였으며
해석에 사용된 요소는 총 8개의 절점으로 이루
어져 있으며 각 절점에서 변위, 응력 및 간극수
압의 변화를 구할 수 있다. 해석에 사용된 지반
의 연속체 요소는 126개이며 경계면 요소, 16개,
말뚝요소는 6개를 이용하였다.

유한요소망은 깊이에 대해서는 균등한 간격
으로 배치하였으며 말뚝과 지반의 경계면에서
는 요소간격을 좁게 하여 해석시 정밀도를 높
이고자 하였다. 말뚝에 대한 해석에서는 압밀이

론에 근거한 경계조건을 적용하였다. 유한요소망의 바닥면은 한지로 연직 및 수평방향의 변위를 구속하였으며 양측면은 롤러로 가정하여 가로방향의 변위를 구속하였다.

모형실험에서 지반의 압밀축진을 위해 상·하부에 부직포를 깔고 배수를 하였다. 따라서, 유한요소 해석시 지하수위는 지표면에 있다고 가정하였으며 양면 배수조건으로 하였다.

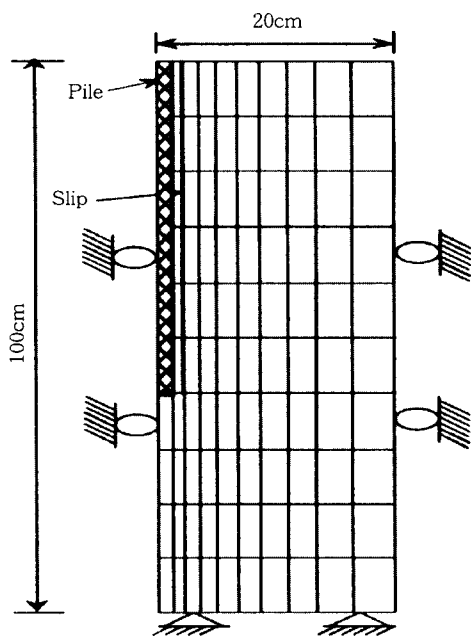


그림 7. FEM Mesh and Boundary Condition

3.2.3 모형말뚝 및 하중재하

부마찰력이 발휘되기 위해서는 지반과 말뚝에 상대변위가 발생하고 이때, 말뚝에 비해 지반의 침하가 클 때 말뚝에 부마찰력이 작용하게 된다. 본 해석에서는 말뚝은 구속시키고 지반만을 침하시켜 말뚝과 지반과의 상대변위에 의해 말뚝에 부마찰력이 작용하도록 모델링 하였다. 이를 위해 시험시 지반의 압밀 침하를 위한 원형의 재하판을 올려놓아 등분포 하중이 재하되도록 하였다. 따라서, 유한요소 해석시

말뚝 주변지반에 등분포 하중이 재하되는 것으로 모델링 하였다.

3.2.4 해석단계

유한요소 해석단계는 초기 응력설정단계, 지하수위 설정단계, 하중 재하단계, 말뚝관입 및 압밀단계로 이루어져 있다. 초기 응력설정단계에서는 시험지층에 대한 단위중량, 지하수위, 선행압밀압력과 연직 및 수평응력등의 데이터를 입력하여 초기지반조건을 설정하였다.

지하수위 설정단계에서는 상·하부의 배수조건을 재현하기 위해 지하수위 위치와 과잉간극수압을 설정하였으며 하중재하 단계에서는 등분포하중을 재하하였다. 점토지반에 말뚝을 관입하는 과정의 모델링은 지반의 초기응력을 계산한 후에 말뚝이 위치하는 지반의 물성치를 말뚝의 물성치로 변화시켰다. 이를 위해 CRISP의 Super Impose Material 기능을 이용하였으며 이는 해석과정에서 원 요소의 물성을 다른 물성으로 지반이 말뚝관입으로 인하여 말뚝으로 대체될 때 사용할 수 있는 기능이다.

초기응력, 지하수위 설정, 하중재하 및 말뚝 타입에는 전산해석시 시간요소가 필요치 않으나 해석결과를 나타낼 때 각 단계별로 구분을 쉽게 하기 위해 하루씩 기간을 설정하였다.

3.2.5 토질정수

해석에 사용된 초기조건은 기본적인 지반의 물성실험을 이용하여 구했으며 지하수위의 위치는 지표면에 있다고 가정하였다. 수평방향의 연직응력은 토압계에서 측정된 값과 삼축압축 실험에서 구한 값을 이용하여 결정하였다.

유한요소 해석시 연약지반에 말뚝을 관입하고 지반과 말뚝의 상대변위를 해석하는 과정에서 말뚝은 탄성모델을 지반은 수정 Cam Clay 모델을 사용하였으며 말뚝과 지반의 경계는 경계면 요소를 사용하였다. 지반의 단위중량, 함수비 측정 및 비중실험을 하였으며 탄성계수, 포아송비 및 투수계수는 실내 시험결과를 이용하였다.

또한, 지반 압밀해석을 위한 수정 Cam Clay 매개변수는 삼축압축실험(CK0U)과 표준압밀실

험을 이용하였다. 모형지반은 재 성형하여 조성을 하였기 때문에 전 지반이 균질하다고 가정하여 단일토층으로 고려하였으며 지반은 정규 압밀상태이고 지하수위는 지표면에 있는 것으로 가정하여 표 2와 같은 초기응력 상태를 얻었다. 또한, 해석에 사용된 토질정수는 CK0U 실험과 압밀실험을 이용하여 표 3과 같은 결과를 얻었다.

표 2. Parameters for In-situ Stresses

Depth(cm)	$\bar{\sigma}_v$ (t/m ²)	$\bar{\sigma}_h$ (t/m ²)	u (t/m ²)	P _c (t/m ²)
0	0	0	0	0
100	0.75	0.28	0.9	0.75

표 3. Soil Parameters for Cam Clay Model

k	λ	M	e _{cs}	ν	K/w (t/m ²)	γ (t/m ³)	Kx, Ky (cm/sec)
0.025	0.29	1.44	3.12	0.2	1.64E4	1.63	3.4E-7

3.2.6 경계요소 및 모형말뚝물성

유한요소 해석에서 점성토와 모형말뚝 사이의 경계요소에 대한 물성치는 표 4와 같으며 모형말뚝과 점토지반사이의 전단시험결과와 기존의 연구결과를 참조하여 물성치를 결정하였으며 말뚝과 지반의 상대변위가 발생되도록 경계요소는 가상 요소로서 아주 작은 전단강성계수를 설정하였다.

표 4. Interface Element Properties between Pile and Soil

Dep. (m)	C (t/m ²)	E (t/m ²)	C (t/m ²)	ϕ	G (t/m ²)	t (mm)	γ (t/m ³)
0~1	0.5	500	0.9	19	210	5	1.63

모형말뚝의 재질은 아크릴로 이에 대한 물성이 명확치 않고 변위가 발생하지 않아야 하므로 표 5와 같이 일반적인 콘크리트의 물성값을

적용하였다. 본 해석에서 경계면 요소는 완전 탄·소성 모델을 이용하였다.

표 5. Parameters for Pile Material

E (t/m ²)	ν	G (t/m ²)	K/w (t/m ²)	γ (t/m ³)
3.0E4	0.20	1.25E6	5.0E5	2.30

4. 모형실험 및 해석결과

4.1 모형실험시의 침하 및 간극수압

초기 함수비 85%인 준설점토를 슬러리 상태로 교반 후 높이를 100cm로 하여 시험지반을 조성하였다. 슬러리 상태의 시료를 재하판을 이용하여 약 20일간 압밀시킨 후에 말뚝을 관입하고 약 50일간 지표 침하량 및 간극수압과 이에 따른 부마찰력 변화를 측정하였다.

그림 8과 같이 말뚝 관입전 상재하중 재하로 인하여 약 11.0cm가 침하되었으며, 말뚝 관입후 부마찰력 측정 완료시까지의 약 2.7cm가 침하되었다.

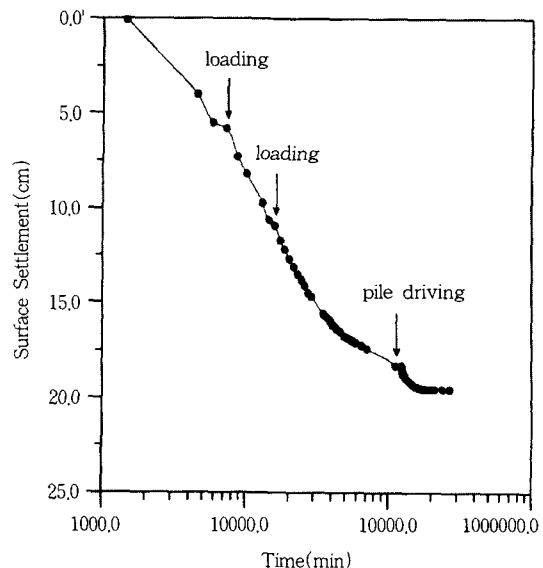


그림 8. Surface settlement with Time

하중재하 및 말뚝타입시에 발생하는 간극수압의 변화량을 측정된 결과, 그림 9와 같이 압밀이 진행되면서 간극수압은 감소하고 말뚝관입으로 인한 영향으로 과잉간극수압은 크게 증가하였다.

이때, 말뚝관입시 말뚝표면에서 4D 떨어진 지점에서의 과잉간극수압 증분량은 약 0.08kg/cm^2 로 나타났다. 시험결과 말뚝에 작용하는 부마찰력은 상재하중이나 과잉간극수압의 소산에 의한 지반침하와 밀접한 관계가 있었으며 이를 통해 말뚝 시공과정중에 발생된 간극수압 증분과 변화에 대한 계측을 통해서도 부마찰력 거동특성을 예측할 수 있었다.

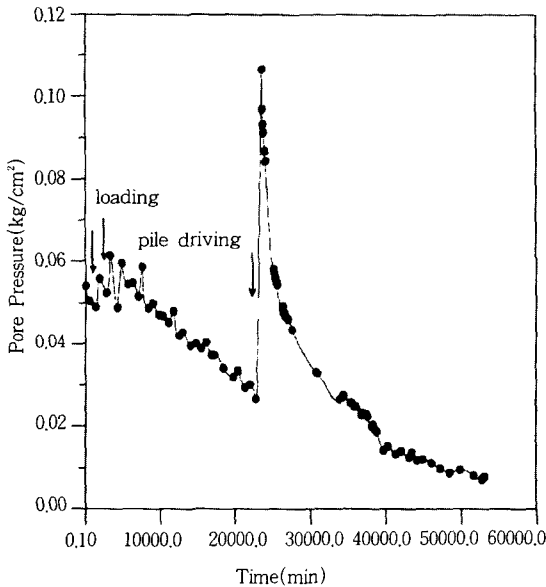


그림 9. Variation of pore pressure with time

4.2 지반 변형해석

그림 10은 모델 지반의 침하량과 경계요소의 변위를 나타낸 것으로 변형해석 결과 등분포재하하중에 의해 모델지반의 침하는 균등하게 발생하였으며 이때 경계면에서는 미끄러짐이 발생하여 말뚝에 부마찰력 요소로 작용하였다. 또한, 말뚝과 지반사이에 상대변위가 2cm 정도까지는 부마찰력이 증가하다가 이후에는 수렴하는 경향을 보였다. 이때 발생된 변위는 모형

실험에서 말뚝에 작용하는 부마찰력 증가값이 수렴하는 변위량과 거의 유사하게 나타났다.

그림 10과 같이 말뚝의 침하량은 거의 발생하지 않았으며 말뚝과 지반사이의 경계면에서 많은 변형이 발생함을 알 수 있었다.

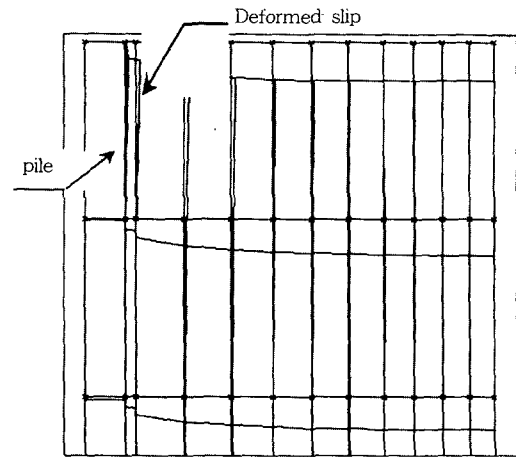


그림 10. Figure of Deformed Mesh

4.3 침하량과 간극수압

하중재하에 의한 시험지반의 지표 침하량과 유한요소해석에서 구한 침하량은 그림 11과 같다. 이를 통해 수정 Cam Clay 모델과 Biot(1955)의 압밀이론이 등분포 하중을 받는 점토지반의

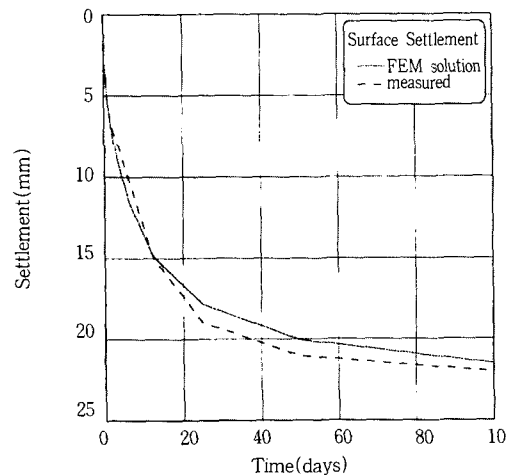


그림 11. Comparison between Measured and Predicted Ground Settlement

침하거동을 비교적 잘 나타낼 수 있음을 알았다.

또한, 유한요소해석결과와 실측 침하량을 비교한 결과 초기 10일간의 침하량은 해석에 의한 침하량이 실제측 침하량보다 크게 나타났으며 이후에는 실측치가 해석치 보다 약간 크게 나타났으나 그 차이가 1~2mm 이내로 거의 유사한 거동을 보였다. 실측치와 해석치간의 최종 침하량 차이도 약 2mm 정도로 비교적 작게 나타났다.

그림 12에는 유한요소 해석결과 나타난 깊이 에 따른 침하량 변화와 모형실험시 실측한 층별 침하량을 비교한 것으로 해석결과 모델지반 은 연약지층의 두께가 작고 양면 배수조건이기 때문에 전 지층에 걸쳐서 침하가 발생한 것으로 나타났다.

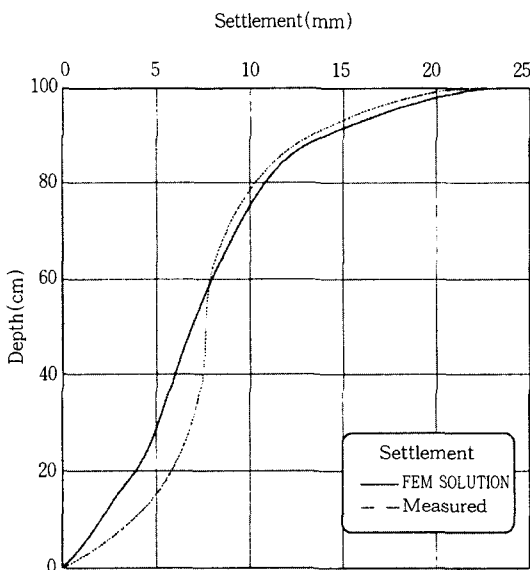


그림 12. Comparison between Measured and Predicted Ground Settlement along the Pile

따라서, 지반의 침하가 모형말뚝의 전 길이에 걸쳐 부마찰력을 일으키는 요소로 작용하였음을 알 수 있다. 또한, 실측치와 해석치를 비교한 결과 깊이에 따른 전침하량이 얕은 심도에서는 거의 유사하게 나타났으나 깊이가 증가함에 따라 해석치가 약간 과소평가 되는 것으로 나타

났는데 이는 양면배수 조건으로 하였기 때문으로 판단된다.

그림 13은 유한요소 해석과 실측치에 의한 간극수압의 변화를 비교한 그림이다. 유한요소 해석결과 최대 과잉간극수압은 하중재하 직후 지표에서 55cm 깊이의 중간층에서 약 $1.5t/m^2$ 로 나타났다. 그리고, 표층부와 하층부는 배수경계면이 가깝기 때문에 하중 재하즉시 비교적 작은 약 $0.5t/m^2$ 로 과잉간극수압이 빠르게 소산되는 것으로 나타났다.

원형토조의 벽면에 부착하여 간극수압 측정 결과, 과잉간극수압은 해석에 의한 예측치 보다는 작게 나타났으며 말뚝 관입시의 과잉간극수압은 $0.6t/m^2$ 로 나타났다. 이로부터 해석치에 의한 유효응력이 크게 산정되었으며 따라서, 부마찰력도 실측치보다는 크게 산정되는 것으로 사료된다. 또한, 해석결과에 비해 실제측치의 간극수압이 늦게 소산되는 것으로 나타났는데 이는 시험지반이 투수계수가 작고 간극수압계 계측시 발생하는 시간 지연효과(time lag)등의 원인으로 판단된다. 말뚝관입 후의 과잉간극수압 소산은 수치해석시 압밀과정에서 나타난 간극

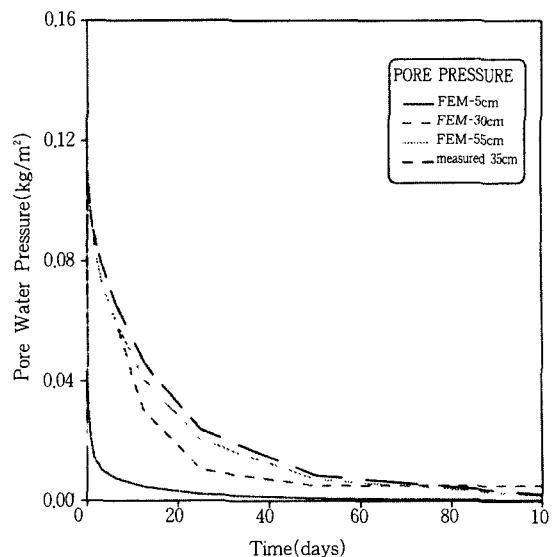


그림 13. Comparison between Measured and Predicted Pore Water Pressure

수압 소산거동과 거의 유사하였으며 침하도 해석치와 실측치가 서로 유사한 값을 나타냈다.

4.4 말뚝에 작용하는 부마찰력

본 해석에서는 삼축압축시험에서 구한 강도정수를 이용하여 모형말뚝에 작용하는 부마찰력을 해석한 결과, 부마찰력이 지반의 강도정수에 큰 영향을 받음을 알 수 있었다. 유한요소해석시 말뚝과 주변지반과의 모델링, 해석을 위한 경계조건, 지반의 강도정수등의 요소들을 변형하여 비교해 본 결과 이들 요소에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 말뚝과 지반과의 슬립(slip)요소의 두께가 부마찰력의 크기에 큰 영향을 미침을 알 수가 있었다. 경계면 요소 설정시 경계면의 물성치에 따라 부마찰력이나 말뚝과 지반의 상대변위가 크게 영향을 받는 것으로 나타나 해석시에 이에 대한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

그림 14는 모형말뚝 실험에서 구한 말뚝 각단에 작용하는 부마찰력 누적값과 유한요소해석에 의해서 구한 값을 나타낸 것으로 비교 시

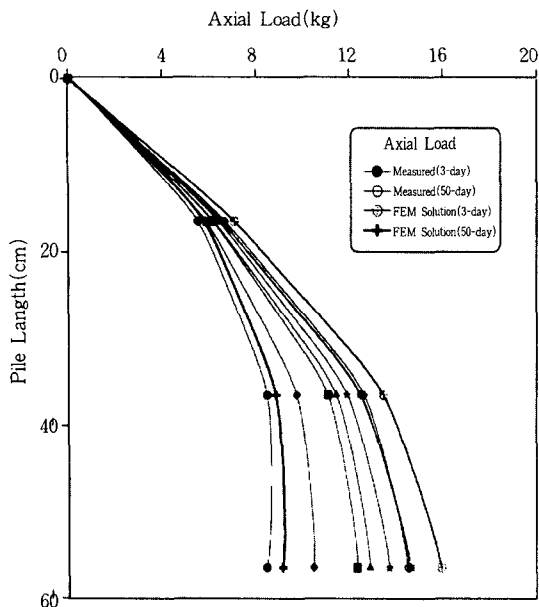


그림 14. Comparison between Measured and Predicted Load Distribution

점은 모형실험에서 부마찰력이 수렴하는 약 2cm의 침하량을 기준으로 하였다. 그 결과, 측정된 최종 부마찰력은 상단에서 6.7kg, 중간단, 5.9kg, 하단, 1.9kg으로 하단부로 갈수록 부마찰력은 감소하였다. 수치해석 결과 깊이에 따른 부마찰력은 상단, 7.1kg, 중간, 6.4kg, 하단, 2.5kg으로 깊이에 따라 실측치와 마찬가지로 부마찰력은 감소하였다.

말뚝의 관입 깊이에 따른 최종 유한요소 해석결과와 실측결과 사이에 나타난 부마찰력의 증가경향이 서로 유사한 것으로 보아 해석을 통해서도 어느 정도 신뢰성 있는 결과를 얻을 수 있었다. 그러나, 최종 부마찰력의 크기는 유한요소해석에 의한 예측치가 실험치보다 약간 과대 평가되었다. 이는 유한요소해석에서는 중립점을 고려하지 못하고 전 지반에 걸쳐 침하가 일어나는 것으로 해석되기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 연약지반에 관입된 모형말뚝에 대한 모형실험과 유한요소 해석프로그램인 CRISP를 이용한 모델링 해석을 통하여 모형단말뚝에 작용하는 부마찰력 거동특성과 그 크기를 구했다.

유한요소 해석에서 사용된 구성방정식은 수정 Cam Clay 모델을 이용하였으며 압밀해석은 Biot의 압밀방정식을 이용하였다. 말뚝과 지반의 상대변위에 의한 부마찰력 해석시 경계면 요소에 대한 해석은 미끄럼 요소를 이용하여 모델링 하였다.

수치해석결과, 침하량이나 과잉 간극수압의 소산, 부마찰력의 거동특성을 실측치와 비교한 결과, 해석을 통해서도 비교적 정확하게 부마찰력 거동특성이나 크기를 예측할 수 있었다. 그러나, 유한요소 해석방법을 이용한 부마찰력 해석시 말뚝과 주변지반과의 모델링 해석을 위한 경계조건, 지반의 강도정수등의 요소들에 의해 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 또한, 경계면 요소 설정시 슬립의 두께나 물성치에 따라

부마찰력의 크기나 말뚝과 지반의 상대변위가 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 유한요소 해석시 이들 요소에 대한 정확한 설정이 필요함을 알 수 있었다. 압밀해석에 있어서 등방압밀 삼축실험에서 구한 $\lambda \cdot \sigma$ 값을 이용한 침하량은 실측치에 비해 과소평가 되었다. 그러나, 표준압밀실험에서 구한 압밀지수와 팽창지수를 이용한 결과, 실측침하량에 근접한 침하량을 구할 수 있었다.

부마찰력 크기는 실측치에 비해 해석치가 약간 과대 평가되었으나 그 크기나 거동양상은 유사하게 나타났다. 아직도, 수치해석을 이용한 부마찰력 산정 법이 크게 활용되지 못하고 있다.

향후, 지속적인 연구를 통해 현장조건을 잘 나타낼 수 있는 모델을 개발하고 해석에 필요한 강도정수와 경계조건들에 대한 명확한 근거를 제시한다면 유한요소 해석법을 이용하여 부마찰력에 대한 거동특성을 파악하고 그 크기를 구하여 예비설계 자료로서 활용 할 수 있으리라 판단된다.

참 고 문 헌

1. 임중석(1987), "말뚝의 부주면마찰력에 관한 모형 실험 연구", 박사학위논문, 서울대학교, pp.1~81.
2. 정상섭(1993), "단말뚝과 군말뚝의 Downdrag", 대한토목학회논문집, 제13권 제4호, pp.249~258.
3. Biot, M.(1955), "Theory of Elasticity and Consolidation for a Porous Solid", *Jour. of Applied Physics*, Vol.26, pp.182~185.
4. Desai, C.S.(1980), *Numerical Methods in Geotechnical Engineering*, McGraw-Hill Press, pp.105~154.
5. Duncan, J.M. and Chang, C.Y.(1970), "Non-linear Analysis of Stress and Strain in Soils", *Proc. ASCE, J. SM & F Dn, Vol. 96, SM5*.
6. Kuwabara, F. and Poulos, H.G.(1989), "Downdrag Forces in Group of Piles", *ASCE, Vol 115, No.6*, pp.806~814.
7. Wroth, C.P.(1975), "In-Situ Measurement of Initial Stresses and Deformation Characteristics", *Proc. of the Speciality Conf. in In-situ Measurement of Soil Properties, ASCE, Raleigh, North Carolina, June*, pp.181~230.

(접수일자 1998. 9. 10)