

축하중 재하말뚝의 하중전이 거동에 대한 수치해석

A Numerical Analysis of Load Transfer Behavior of Axially Loaded Piles

오 세 봉*¹ 안 태 경*²
Oh, Se-Boong Ahn, Tae-Kyong
최 용 규*³ 권 오 균*⁴
Choi, Yong-Kyu Kwon, Oh-Kyun
우 문 정*⁵
Wu, Moon-Jung

ABSTRACT

The behavior of axially loaded pile was analyzed by two methodologies: one is the finite difference method using load transfer curves recommended by API(1993); and the other is the numerical analysis using the FLAC program. From both analyses, load-displacement curves and load distributions along the depth were evaluated appropriately for the measured. The analysis using the FLAC could capture the nonlinearity of load-displacement curve even for unloading and reloading cases, since the unloaded stress paths of fill layer elements occurred on the failure envelop. Futhermore, the measured load transfer curves were compared with the API recommendations and with the calculations obtained from the results of the FLAC analysis for the interpretation of the transfer behavior between the soil and the pile under axial loadings. It was concluded that the axial behavior of open ended piles at Pusan could be evaluated by both the finite difference analysis using API load transfer curves and the numerical analysis using FLAC.

요 지

축하중 재하시 실제 강관말뚝의 거동을 API 하중전이 곡선을 이용한 유한차분해석과 FLAC 프로그램을 이용한 수치해석으로 분석하였다. 실험적으로 계측한 말뚝두부의 하중-변위 관계와 깊이 에 따른 축하중 분포를 적합하게 예측할 수 있었다. 특히, FLAC 프로그램 해석결과에서는 하중 제거 시 매립층에서 응력 경로가 파괴 포락선 상에서 발생하여 비선형적인 하중-변위 관계를 매우 유

-
- *1 정희원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 조교수
 - *2 정희원, 영남대학교 대학원 토목공학과 석사과정
 - *3 정희원, 경성대학교 공과대학 건설환경공학부 부교수
 - *4 정희원, 계명대학교 공과대학 건설환경공학부 조교수
 - *5 정희원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 교수

사하게 예측할 수 있었다. 또한, FLAC 프로그램 해석결과 및 API 규준에 따른 하중전이 관계를 실험결과와 비교하여, 말뚝-지반간 전이거동을 분석하였다. 사례연구를 통하여 API 하중전이관계를 이용한 유한차분해석이나 FLAC 프로그램을 이용한 수치해석으로 축하중 재하 말뚝의 공학적인 거동을 합리적으로 평가할 수 있음을 알 수 있었다.

Keywords : Load transfer, Pile load test, Finite difference method, Stress analysis, Axial load-settlement relationship, API recommendation

1. 서 론

말뚝의 극한 지지력을 산정하여 안정성을 평가하는 경우에는 말뚝과 지반간의 하중전이가 주면과 선단에서 동시에 극한치를 유발한다고 가정하게 된다. 이로 인하여 설계 지지력내에서도 과도한 변위를 유발할 수 있다. 따라서 말뚝기초의 공용성(performance)을 평가하기 위해서는 현장재하시험 결과를 이용하거나 말뚝과 지반간의 하중전이 관계를 모델하여 수치적으로 해석한 결과를 이용할 수 있다(API 1993). 이러한 하중전이 해석을 수행할 때는 말뚝-지반간의 하중전이 관계가 핵심적인 역할을 하므로 기존의 모델들이 국내지반에 적용하기에 적합한지를 검토해야 한다.

축하중에 대한 말뚝의 거동은 하중전이 관계가 도출되면 말뚝과 지반을 세분하여 유한차분적으로 해석할 수 있다(Coyle and Reese, 1966). 이 때, 말뚝은 탄성 스프링으로 모델하고 깊이에 따른 주변 지반의 저항을 비선형 스프링으로 모델하여 말뚝 두부의 하중-변위 관계와 깊이에 따른 축하중 분포를 계산할 수 있다. 해양구조물 하부기초의 설계시에는 축하중 전이관계를 API 규준(1993)에서 제시한 곡선을 통상적으로 적용하고 있다.

본 논문에서는 국내 특정현장에서 실시한 개단강관말뚝에 대한 재하시험 결과(부산광역시 건설안전본부 1997)에 대하여 비선형 하중전이 해석을 수행하였다. 이로부터 말뚝 두부 하중-침하 관계를 구하고 실험치와 비교하였다. 그리고 말뚝재하시험으로부터 제측한 축하중 분포를 분석하여 깊이에 따른 축하중 전이

관계를 도출하였다. 이러한 국내지반을 대상으로 한 실험치를 API 규준에 따른 하중전이 관계와 비교 분석하여 그 적용성을 검토하였다.

한편 지반-말뚝계의 비선형 응력해석을 수행하면 실험적으로 구한 하중전이 관계를 분석하고 말뚝의 공용성을 평가할 수 있다. 특히 하중전이 관계를 이용한 유한차분해석 결과와 비교하여 말뚝과 지반간의 하중전이거동을 분석할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 FLAC 프로그램을 이용하여 지반의 탄·소성 수치해석을 수행하였다. 이를 통하여 말뚝 두부의 하중-침하관계 및 축하중 분포를 해석하고 지반-말뚝간의 거동을 분석할 수 있었다.

2. 축하중 재하 말뚝의 하중전이 해석

축하중 재하말뚝의 거동을 해석하기 위하여 말뚝을 탄성 스프링으로 모델하고 주변 흙에 대해서는 깊이에 따라 강성이 상이하도록 비선형 스프링으로 모델할 수 있다. 이 때, 말뚝에서 임의 깊이에서 주위로 전이된 단위 마찰력과 상응하는 연직변위간의 관계를 $t-z$ 곡선으로 나타낼 수 있다. 또한 선단의 전이하중-변위 관계를 $Q-z$ 관계로 표현할 수 있다.

그림 1(a)에 나타난 임의의 말뚝 요소에 대한 변형률을 고려하여 미분방정식을 구하면 다음과 같다.

$$Q = EA \frac{dz}{dx} \quad (1)$$

여기서, E 는 말뚝재료의 탄성계수, A 는 말뚝의 단면적, Q 는 깊이 x 에서의 하중, z 는 말뚝의 수직변위이다.

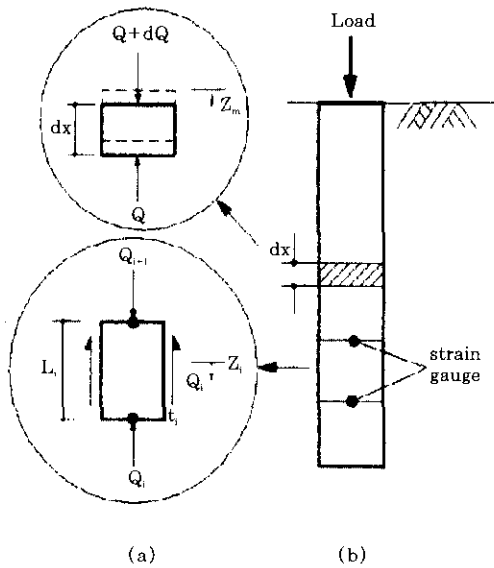


그림 1. 축방향 하중에 대한 하중전이기구

식 (1)을 x 에 대해 미분하면 다음 식을 구할 수 있다.

$$\frac{dQ}{dx} = EA \frac{d^2z}{dx^2} \quad (2)$$

한편, 깊이 x 지점에서 전이된 단위하중을 t 로 정의하면

$$dQ = tCdx \quad (3)$$

이며, C 는 말뚝의 원주길이이다. 그리고 하중 전이를 말뚝 변위 z 의 함수로 나타내면

$$t = ks \cdot z \quad (4)$$

이다. 여기서, ks 는 깊이와 말뚝변위에 의존하는 할선 비선형 스프링 계수이다.

따라서 식 (2), (3), (4)로부터 다음과 같은 방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d^2z}{dx^2} - \eta k_s z = 0 \quad (5)$$

이때, 계수 $\eta = C/EA$ 이며 η 와 k_s 가 일정하다

면 식 (5)는 해석적으로 풀 수 있다. 그러나 비선형 거동을 모델하는 경우에는 유한차분법을 이용하여 수치적으로 해를 구해야 한다. 따라서 깊이에 따라 일정 두께 h 로 요소를 분할하여 식 (5)에 대한 유한차분식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{(\frac{\Delta z}{\Delta x})_{m+1/2} - (\frac{\Delta z}{\Delta x})_{m-1/2}}{2h} = \eta \cdot k_s \cdot z \quad (6)$$

여기서 $(\Delta z/\Delta x)_{m+1/2} = (z_{m+1} - z_m)/h$ 이므로 식 (6)은 식 (7)과 같이 유도된다.

$$z_{m+1} - 2z_m + z_{m-1} = h^2 \eta k_s z_m \quad (7)$$

말뚝두부의 하중과 하중 전이 곡선이 주어지면 식 (7)을 이용하여 말뚝의 임의의 지점에서 일어나는 변위를 구할 수 있다. 그리고 계산된 z_m 이 상응하는 k_s 에 적합한 값이 되도록 해를 반복적으로 구한다. 이때 하중을 변화시키고 해를 반복적으로 구하여 말뚝두부의 하중-변위 관계를 계산할 수 있다. 동시에 깊이에 따른 말뚝하중의 분포를 각 두부하중에 대하여 구할 수 있다. 이러한 말뚝하중은 식 (7)에서 구한 변위를 식 (1)에 대입하여 구해진다. API 기준(1993)에서는 그림 2와 같은 $t-z$ 곡선 및 $Q-z$ 곡선을 제시하였다.

API에서 제시한 $t-z$ 곡선은 사질토와 점성토로 구분하여 적용한다. 사질토에서는 말뚝의 지름과 무관하게 수직변위 z 의 함수로 나타나고 점성토에서는 최대 하중전이에 대한 잔류 하중전이의 비 β 가 0.7~0.9의 값을 나타낸다. 선단에서 나타나는 $Q-z$ 곡선은 점성토와 사질토에 상관없이 동일하게 제시하였다.

그림 2에 나타나는 하중전이관계를 도출하기 위해서는 먼저 단위 마찰지지력 f 와 선단지지력 Q_p 를 산정하여야 하며, 이러한 극한지지력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$Q_u = Q_r + Q_p = fA_r + qA_p \quad (8)$$

여기서 Q_r 와 Q_p 는 주변 마찰지지력과 선단

표 1. API 규준에 따른 단위 마찰지지력과 단위 선단 지지력 산정법

구분	단위 마찰지지력	단위 선단지지력
점성토	$f = ac^a$	$q = 9c^b$
사질토	$f = Kp'_o \tan\delta'$	$q = p'_o N_q^d$

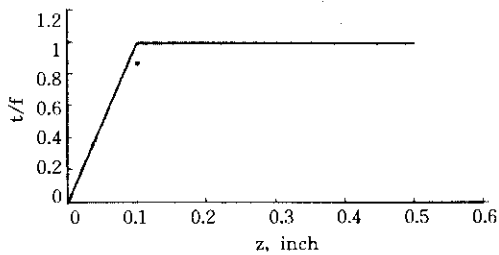
(주) $a = 0.5 \Psi^{-0.5}$, $\Psi \leq 1.0$

$a = 0.5 \Psi^{-0.25}$, $\Psi > 1.0$, 여기서 $\Psi = c/p'_o$, $a \leq 1$

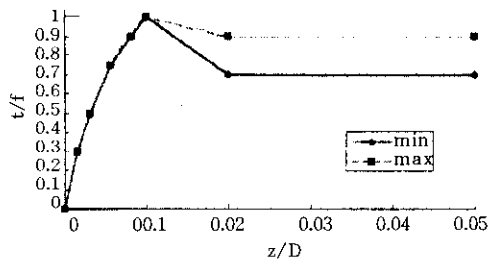
$b = c$ = 비배수 전단강도

K = 횡토압 계수, δ' = 지반-말뚝간의 마찰각

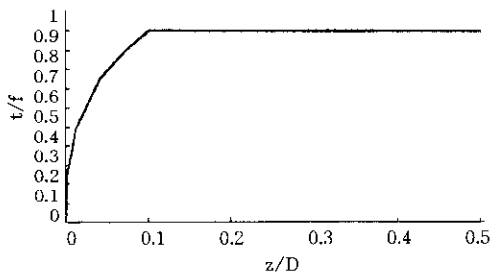
$d N_q$ = 지지력 계수



(a) 사질토의 t-z 곡선



(b) 점성토의 t-z 곡선



(c) 사질토와 점성토의 Q-z 곡선

그림 2. API 규준에 의한 축하중전이곡선

지지력이고 A_s 와 A_p 는 외주면과 선단의 면적이다. f 와 p 는 주면과 선단의 단위 지지력으로서 표 1과 같이 구한다.

표 1에 나타난 지지력 계수 N_q 는 API 규준에 대략적인 값들이 수록되어 있으며, 횡토압 계수 K 는 항타된 개단말뚝에서는 토압계수가 대략 0.8이며, 폐색 또는 폐단 말뚝에서는 1.0으로 가정한다. 그리고 장말뚝의 경우에는 한계깊이하에서는 API 규준에 수록된 한계 마찰저항을 이용한다.

또한 관내토의 영향에 대해서는 폐색(plugged) 및 개방(unplugged)조건으로 구분하여 고려한다. 즉 API 규준에서는 다음의 조건 중 작은 값을 극한지지력으로 산정하도록 제한하였다(그림 3 참조). 즉 완전히 폐색된 경우에는 선단지지력이 $Q_b + Q_{pb}$ 이고, 완전히 개방된 조건에서는 선단지지력이 Q_b 이며 마찰지지력이 $Q_s + Q_{sb}$ 로 나타난다.

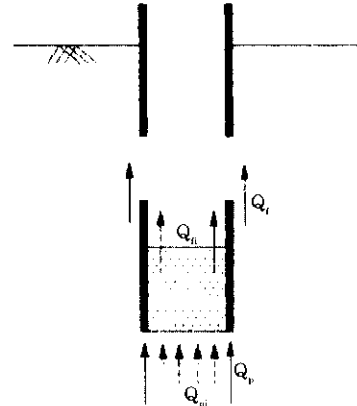


그림 3. API 규준에 의한 개단 강관말뚝의 지지력 성분

깊이에 따른 축하중 분포가 계측된 말뚝 재하시험으로부터 하중전이 관계를 구하기 위하여, 그림 1(b)와 같이 말뚝에 설치된 스트레인 게이지(strain gauge)를 경계로 말뚝 요소를 분할해야 한다. 각 말뚝 요소의 중심에서 평균적으로 구한 전이하중은 다음과 같이 나타난다 (Coyle and Reese, 1966)

$$t_i = \frac{Q_i - Q_{i+1}}{\pi D \cdot L_i} \quad (9)$$

그리고 이에 상응하는 말뚝변위 z_i 는 z_{i-1} 번째 요소의 변위에서 두 요소사이에서 발생하는 말뚝의 탄성변위를 제외하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$z_i = z_{i-1} - \frac{\bar{P}_i \bar{L}_i}{EA} \quad (10)$$

여기서 $\bar{P}_i = (Q_{i-1/2} + Q_{i+1/2})/2$ 이고 $Q_{i+1/2} = (Q_i + Q_{i+1})/2$ 이며 $\bar{L}_i = (L_{i-1} + L_i)/2$ 이다. 따라서 각 하중 단계에 대하여 스트레인 게이지로부터 측정된 말뚝하중분포로부터 깊이에 따른 $t-z$ 관계를 구할 수 있다.

3. API 규준을 이용한 유한차분해석

부산 남항대교 영도측 일부 교각설계를 위하여 시험 말뚝(개단 강관 말뚝, $\phi = 508\text{mm}$, $t = 12\text{mm}$, $l = 38.5\text{m}$)을 항타시공하여 재하시험을 수행하였다. 시험 말뚝에는 스트레인 게이지를 부착하여 깊이에 따른 축하중의 분포를 계측하였으며, 시험말뚝의 제작 및 재하시험과정은 참고문헌에 자세히 기술되어 있다(최용규 등, 1998). 대상 지역에 대한 지반조사는 표

표 2. 지반조사 결과

지층	깊이(m)	N	P_i/s_u (t/m^2)	q_u/s_u (t/m^2)	ϕ'	δ	s_u (t/m^2)	K	β	비고
매립층	0~8.5	45~50	-	-	45°	40°	-	1.0	-	SW-SM 지하수위 2m
상부 사질토층	8.5~19	30~35	-	-	35°	25°	-	0.8	-	-
점성토층	19~29	-	119/11 170/16 445/43	6.4/3.2 9.2/4.6 24.4/12.2	-	-	15	-	0.8	ML, CL 모래, 자갈 함유, 견고
하부 사질토층	29~	20~25	-	-	30°	20°	-	1.0	-	40m 부근은 호박돌이 산재

(주) $\phi' = \sqrt{12N+20}$, $\delta = \phi - 5^\circ$, $\phi' = \sqrt{12N+15}$, $\delta = \phi - 10^\circ$, $s_u = \frac{P_i - \sigma_{n0}}{10}$

준관입시험과 점토층에 대한 PMT, 일축압축 시험 등을 수행하였으며 그 결과는 그림 4와 표 2에 나타냈다.

그림 4에 나타난 바와 같이 표준관입시험 결과 각 지층을 대표하는 N치(굵은 선 표시)를 구하기가 어려울 정도로 분포가 산만하였다. 특히 상부 매립층의 경우에는 원인은 알 수 없지만 조사지점 및 조사업체에 따라 N치의 분포가 가장 산만하게 나타났다. 따라서 이 층에 상응하는 N치를 10인 경우와 45인 경우로 구분하여 역해석을 수행한 결과 45정도인 것으로 판단되었다. 점토층은 자갈과 모래를 함유한 매우 견고한 상태였으며, 표 2와 같이

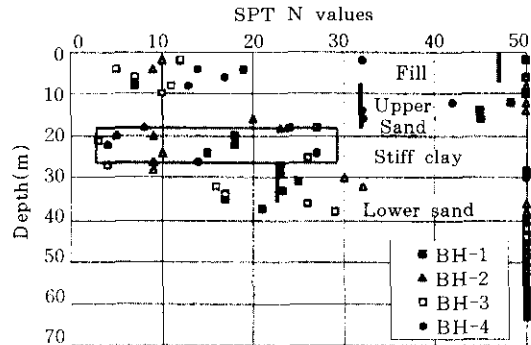


그림 4. 표준관입시험 결과 및 지층 개요

PMT와 일축압축시험 결과를 토대로 비배수 전단강도를 $15t/m^2$ 으로 결정하였다. 그 외 표 1에 나타난 단위지지력을 구하기 위하여 필요한 계수들이 표 2에 수록되어 있다.

그림 5에는 측정된 말뚝두부에서의 축하중-침하 관계와 유한차분해석 결과를 비교하였다. 해석결과는 실제의 거동에 비하여 침하량을 다소 과소평가(하중이 400t일 때 약 13% 과소평가)하였으나 대체로 실측치와 유사한 결과를 나타내고 있다. 특히 해석결과에 의하면, 450t 정도의 축하중에서 극한지지력 상태가 유발되어 하중-변위 관계가 극한 상태에 도달하는 것을 알 수 있다.

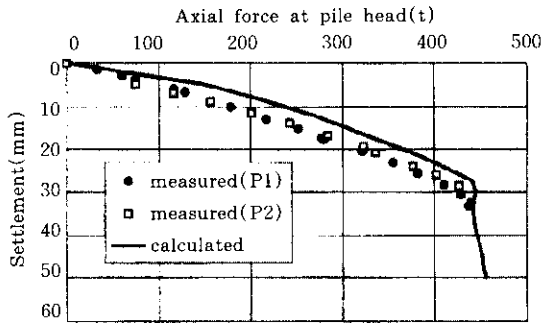


그림 5. 말뚝두부의 축하중-침하 관계

그림 6에는 재하단계별로 깊이에 따른 축하중 분포가 나타나 있다. 해석치는 실험치를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 특히 두부하중이 450t가량 재하되었을 때의 축하중분포를 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 하지만 말뚝두부에 가해진 하중이 작은 경우에는 매립층의 하중전이가 실제보다 과대 평가되었고, 20~30m 부근의 축하중 분포는 서로 상이하게 나타났다. 전반적으로 대상 말뚝은 선단지지력보다는 마찰에 의한 하중전이가 지지력을 유발시키는데 주도적인 역할을 하고 있다.

재하시험에서 구한 각 하중단계의 축하중으

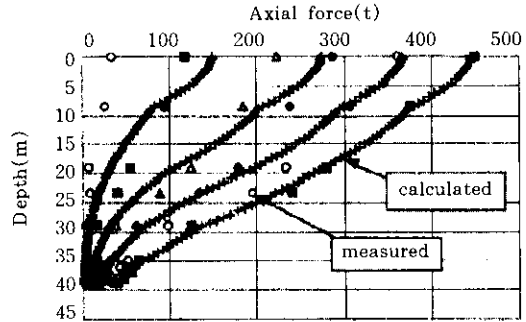


그림 6. API 규준에 의한 유한차분해석시 깊이에 따른 축하중분포

로부터 스트레인 게이지 사이의 중간 위치에서 평균적인 $t-z$ 관계를 계산하였다. 그리고 그림 7과 8에서는 각각 깊이 30m 상부와 30m 하부로 구분하여 깊이에 따라 측정된 $t-z$ 곡선과 API 규준의 $t-z$ 곡선을 비교하였다.

매립층(4.25m) 및 사질토층(13.75m)에서 구한 실험치는 API 규준에 비하여 강성이 작은 것을 알 수 있다. 따라서 그림 6에서 나타난 상부 매립층의 축하중 분포가 하중재하 초기에 과대 평가됨을 알 수 있다. 한편 점토층에 대응되는 21.25m, 26.25m에서 나타나는 주변 마찰저항은 API 규준이 실험치와 다소 상이하게 나타났다. 그림 8에서 보여지는 말뚝하부의 하중전이 관계는 실험치와 큰 차이가 나타나지 않았고, 실험치에서는 단위 지지력이 깊이에 따라 다소 상이하게 변화하였다.

4. FLAC 프로그램을 이용한 해석

대상지반은 깊이에 따라 다양한 토층으로 구성된 층상 구조를 이루고 있으며 지반의 비선형적인 거동이 주요한 인자로 작용할 것으로 판단된다. 이러한 특성을 적합하게 고려하기 위하여 FLAC 프로그램을 통한 응력 해석을 수행하였다. 이 때 말뚝에 대하여 탄성적인 응력-변형률 관계를 사용하였고, 주변 지반에

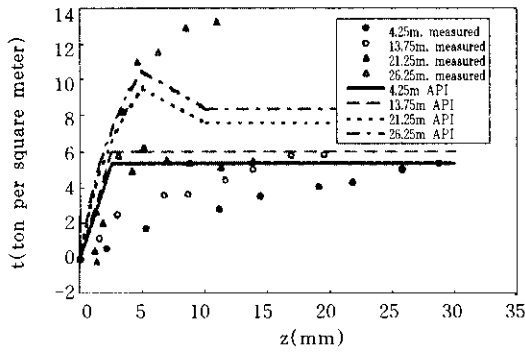


그림 7. 실험치와 API 규준에 의한 t-z 곡선 비교(깊이 30m 상부)

대해서는 Mohr - Coulomb 파괴 규준에 의거한 탄·소성 구성모델을 적용하였다. 그리고 말뚝의 연직방향 거동을 해석하기 위하여 축대칭 조건으로 해석을 수행하였다.

개단 강관 말뚝의 제원은 지름이 508mm이고 두께는 12mm, 길이는 40m로써 물성치는 표 3에 나타나 있다. 지층구분이나 지반정수들은 t-z곡선을 이용한 유한차분해석시와 유사하게 채택하였다. 포화 지반에 대한 유효응력 해석을 수행하기 위하여 지반재료의 자중은 유효단위중량으로 설정하였으며, 자료가 불충분한 관계로 표준관입시험 N치의 대표값을 이용하여 탄성계수를 추정하였다(표 3). 각각의 탄성계수 값은 매립층에서 12N(kg/cm²), 상부 사질토층에서 7N(kg/cm²), 하부 사질토층에서 12N(kg/cm²)의 관계를 이용하여 계산하였다(한국지반공학회, 1994). 점성토층은 PMT 결

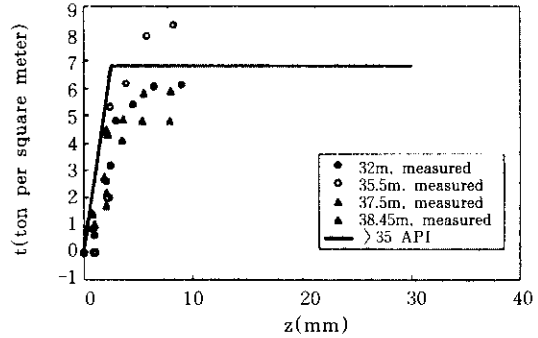


그림 8. 실험치와 API 규준에 의한 t-z 곡선 비교(깊이 30m 하부)

과로부터 탄성계수를 결정하였고 포아송비(ν)는 모두 0.3으로 가정하였다.

FLAC 해석과정에서는 각 하중 단계에 따른 불균형힘이나 변위가 완전히 수렴된 후에 다음 단계 하중을 증가시켰으며, 하중변화량은 현장 조건에 따라 하중을 제거시켰다. 해석시 사용한 격자망(grid)은 그림 9와 같이 외주면 지반과 말뚝 및 관내토로 구성되어 있다. 지반은 매립층, 상부 사질토층, 점성토층, 하부 사질토층으로 나누었으며 말뚝은 하부 사질토층까지 관입되어 있다. 그리고 말뚝 내부의 관내토는 지표면까지 채워서 격자망을 형성했다.

시험말뚝 P1과 P2로부터 측정된 말뚝두부 변위와, FLAC 해석을 통한 말뚝두부 변위를 그림 10, 11에 나타내었다. 시험말뚝 P1 해석에서는 280t까지 재하한 후에 하중을 제거하였으며, P2 해석에서는 430t까지 재하한 후에 하

표 3. FLAC 해석시 사용한 말뚝 및 지반 조건

지층(깊이, m)	물성치 N치	점착력 (t/m ²)	E (t/m ²)	ν	밀도 (t/m ³)	내부 마찰각(°)
말뚝(0~40)	-	-	2.06e7	0.3	7.86	-
매립층(0~8)	45	0	5510	0.3	1.1	45
상부사질토층(8~18)	30	0	2140	0.3	1.1	35
점성토층(18~28)	-	15	1210	0.3	1.0	0
하부사질토층(28~)	20	0	2450	0.3	1.1	30

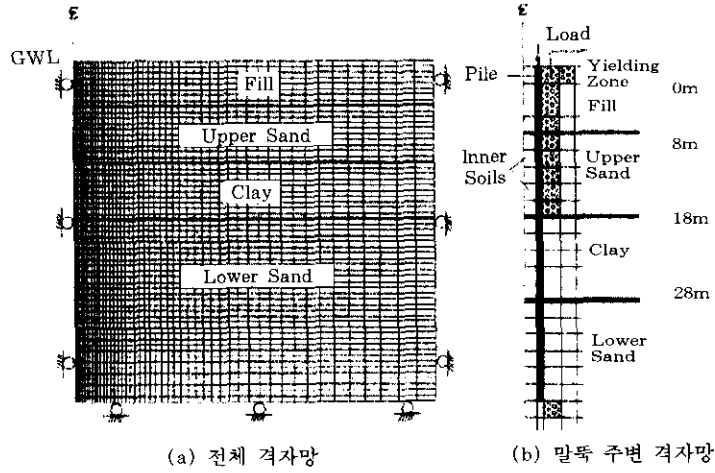


그림 9. FLAC 해석시 사용된 격자망

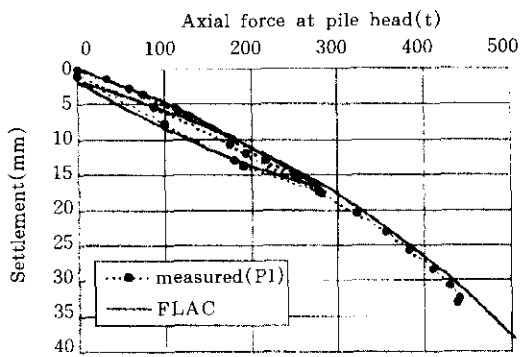


그림 10. FLAC 해석시 시험말뚝 P1의 축하중-침하 관계

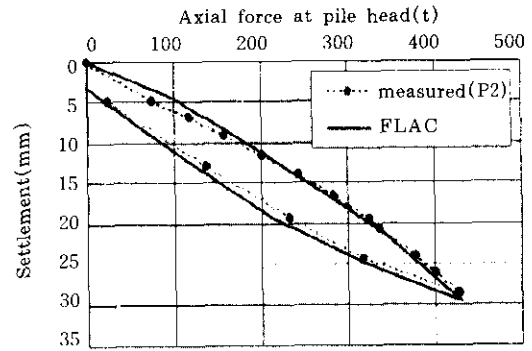


그림 11. FLAC 해석시 시험말뚝 P2의 축하중-침하 관계

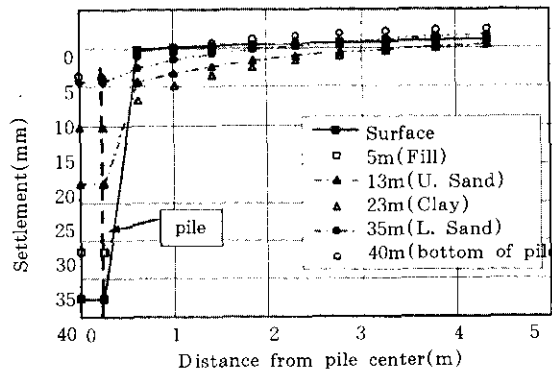


그림 12. FLAC 해석시 축하중 500t에 대한 깊이에 따른 변위 양상

중을 제거하였다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 실험치와 해석치가 매우 유사한 결과를 보였다. API 규준에 따른 유한차분해석 결과에서는 축하중이 450t 정도 되었을 때 하중-변위 관계가 극한 상태에 도달되었다 (그림 5). 그리고 최용규 등(1998)에 의하면 실험치 약 500t에서 극한 하중이 나타난다고 보고되었지만 본 논문의 FLAC 해석 결과에 따르면 뚜렷한 극한 상태는 발생하지 않았다.

그림 12에서는 하중이 500t 가해졌을 때 깊이 따른 침하 양상을 나타냈다. 이때 변위는 말뚝주변에서 대부분 유발되었으며, 관내토의 경우에는 말뚝과 거의 일체로 이동하였다. 말뚝 중심으로부터 50cm 이상 떨어진 영역에서의 변위는 하부층에 비하여 상부층에 존재하는 매립층(0~8m)에서의 변위가 오히려 작게 발생하였다. 이는 매립층의 변형계수가 다른 토층에 비하여 크고 변위가 말뚝주변에 집중되어 발생하는 결과이다. 한편 그림 9 (b)에서 보여 지듯이 축하중 500t이 가해질 때 매립층과 상부사질토층, 말뚝 선단에 위치하는 말뚝에 근접한 지반에서는 항복이 발생하는 것으로 해석되었다.

본 연구에서는 수치해석을 통하여 관내토의 폐색효과를 규명하고자 관내토의 변형계수를 다양하게 변화시켜서 해석하였다. 그런데 관내토가 말뚝과 더불어 거의 강체운동을 하기 때문에 관내토의 폐색에 따른 차이가 거의 발생하지 않았다. 폐색효과를 고려한 엄밀해석을 수행하기 위해서는 관내토와 말뚝사이의 거동을 모델할 수 있는 경계요소(interface element)를 사용하는 등의 기법을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

그림 13에서는 FLAC 해석결과 나타난 말뚝 단면에서의 축하중 분포를 실험치와 비교하였다. FLAC 해석에서는 1m 단위로 해서 깊이에 따른 평균값을 계산하였고 실험치(P1)는 시험 말뚝에 부착되어 있는 스트레인 게이지를 통해서 계측한 것이다. 해석치는 대체로 실험치와 유사한 분포를 나타냈으나 23m 부근 점성토층

의 축하중을 다소 과소 평가하였다. 그리고 대부분의 하중이 선단저항보다는 주변마찰 저항에 의하여 지지되고 있다. 이러한 결과는 그림 6의 API 규준을 이용한 유한차분해석 결과와 유사한 경향을 보였다.

그림 13에 나타난 축하중 분포 곡선의 기울기로부터 대상 지층별로 전이된 하중을 식 (9)에 의하여 도출할 수 있었다. 그리고 FLAC 해석결과 나타난 t-z 곡선을 실험치와 비교하였다. 그림 14, 15에서는 매립층 및 상부 사질토층에서 하중이 증가함에 따라 t-z 관계가 극한값에 도달함을 보여주고 있다. 특히 매립

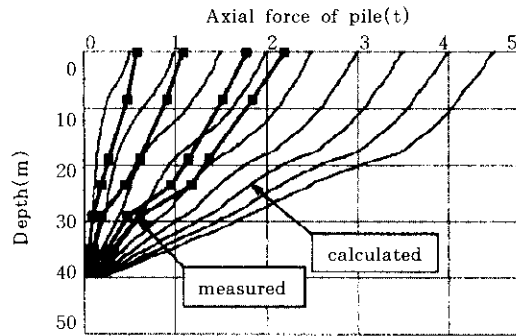


그림 13. FLAC 해석시 깊이에 따른 축하중분포

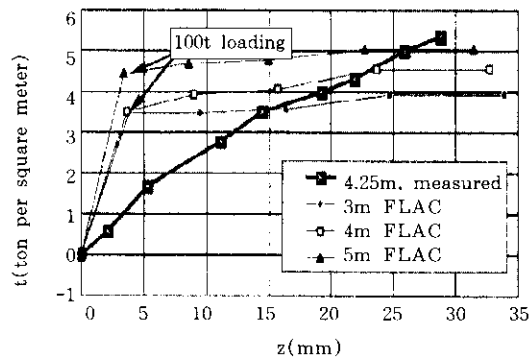


그림 14. 실험치와 FLAC 해석결과에 의한 매립토층의 t-z 곡선 비교

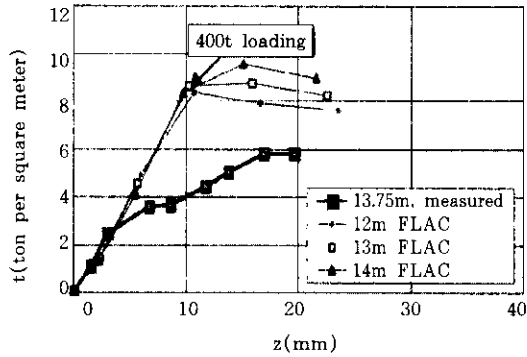


그림 15. 실험치와 FLAC 해석결과에 의한 상부사질토층의 t-z 곡선 비교

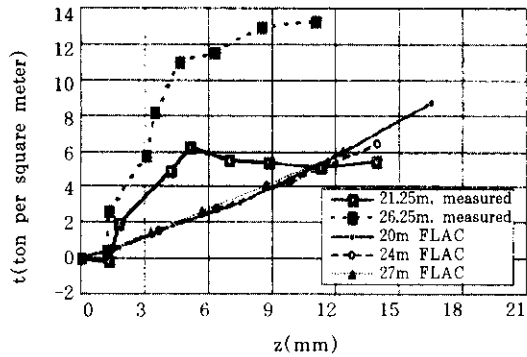


그림 16. 실험치와 FLAC 해석결과에 의한 점성토층의 t-z 곡선 비교

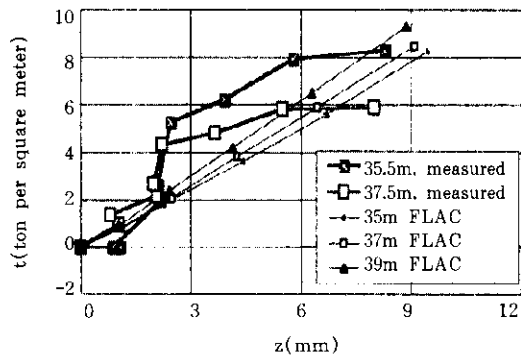


그림 17. 실험치와 FLAC 해석결과에 의한 하부 사질토층의 t-z 곡선 비교

층에서는 재하초기 100t이 가해지자 이미 극한 값에 도달하였고, 상부 사질토층에서는 말뚝 두부에 400t 이내의 하중이 가해졌을 때 극한 값에 도달하였다. 반면 그림 16, 17에서는 점토층 및 하부 사질토층에 대한 t-z 관계를 나타내고 있으며 하중이 900t까지 증가하여도 극한 값에 도달하지 않았다.

모래지반에 향타한 강관말뚝에 대한 하중전이 관계를 보면 변위가 말뚝 직경의 3% (15.24mm)에서 최대하중전이 발생한다고 보고되고 있으며 (Coyle과 Sulaiman 1967), API 규준에 의하면 사질토층에서는 흙과 말뚝 사이의 상대변위가 2.54mm에서 최대하중전이가 일어난다고 보고되고 있다. FLAC을 통한 t-z관계에서는 최대 하중전이가 약 3.5mm~15mm 정도의 변위에서 일어났다. 따라서 해석시 항복이 일어나는 변위가 대체로 합당함을 알 수 있다.

점성토에서는 상대 변위가 약 2mm정도에서 전이된 하중이 최대치에 이른다고 보고되고 있으며 (Coyle and Reese, 1966), API 규준에서 살펴보면 말뚝직경의 1%에 해당되는 변위 (5.08mm)에서 최대하중전이가 일어난다고 보고되고 있다. 그러나 그림 16에 나타난 FLAC 해석결과에서는 변위가 상당히 많이 유발되었는데도 최대하중전이가 일어나지 않고 있다. 깊은 점토층에서는 말뚝의 연직변위가 주로 상부지층에서의 강제운동에 의하여 발생하므로 변형률은 많이 유발되지 않았기 때문으로 판단된다.

각 토층에 대한 t-z 관계를 실험치와 FLAC 해석치를 비교해 보면 그림 14, 15에서 보여지듯이 매립토층 및 상부 사질토층에서는 실험치가 계산치에 비해 강성이 작았다. 이로 인하여 해석결과에서는 20m 상부 지반에서 흙으로 전이된 하중이 크게 나타났다. 그림 16, 17의 점성토층과 하부 사질토층은 탄성 영역 내에서 거동하고 있으며 하중전이에 대한 FLAC 해석치는 실제에 비하여 작게 발생하였다.

그림 10, 11에서 보여지듯이 FLAC 해석결과에서 하중제거시에도 실제의 비선형 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 이러한 비선형성을 규명하기 위하여 각각의 토층에 따라 Mohr-Coulomb 파괴 기준과 주응력항을 축으로한 응력 경로를 그림 18, 19, 20에 나타냈다. 이 때 그림에 나타난 p와 q는 각각 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 와 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 로 정의된다. 그리고 각각의 경로에 대하여 초기응력상태(initial), 하중제거시점(unloading), 하중 역재하시점(reloading), 최종응력상태(final)를 표시하였다.

그림 18, 19를 보면 매립층과 상부 사질토층 부분에서 하중제거(unloading)시에도 응력이 파괴포락선 상에서 거동함으로 소성 변형이 일

어났으며 말뚝두부의 변위가 비선형적으로 유발되었다. 주응력 경로의 불규칙한 양상은 하중 제거시 전단 응력의 영향으로 주응력축이 회전하여 나타난 것으로 판단된다. 그리고 그림 20에서 보여지듯이 점성토층과 하부 사질토층의 지반은 파괴포락선 내에서 탄성적으로 거동하였다.

한편 그림 21은 하중제거시 매립층의 t-z 관계를 나타낸 것으로 수직 변형이 소성적으로 발생하였다. 그림 18, 19에서 보여지듯이 하중제거시 응력경로가 파괴포락선 상에서 나타났으므로 이러한 소성변형이 유발되었다.

본 연구의 대상 현장시험시에 스트레인 게이지의 간격이 넓어서 실험적으로 구한 t-z

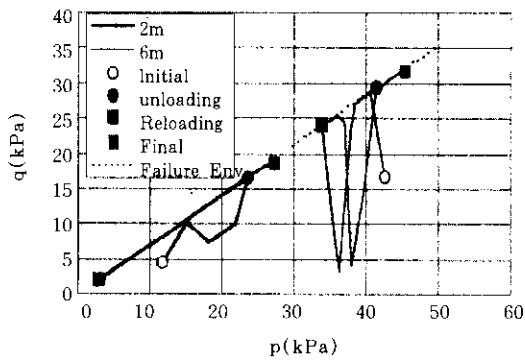


그림 18. FLAC 해석에 의한 매립층의 응력 경로

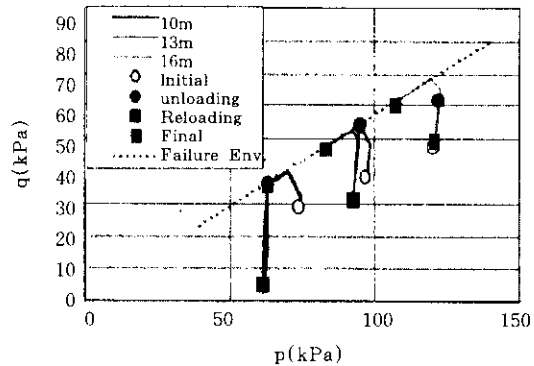


그림 19. FLAC 해석에 의한 상부 사질토층의 응력 경로

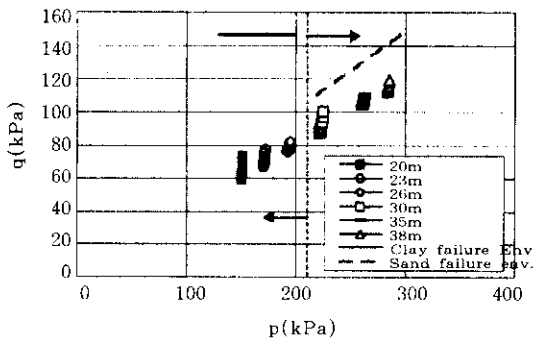


그림 20. FLAC 해석에 의한 점성토층 및 하부 사질토층의 응력 경로

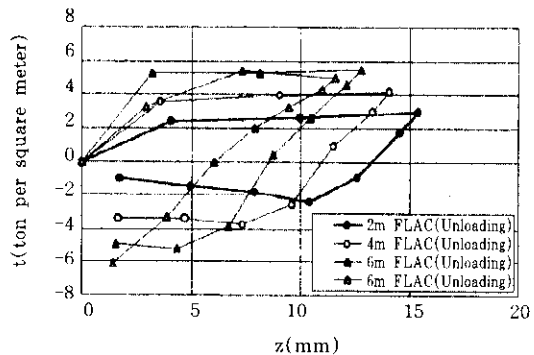


그림 21. FLAC 해석에 의한 매립층의 재하 및 하중제거시 t-z 관계

관계는 약 두께의 10m 지층을 대표하는 값이다. 그리고 FLAC을 통한 응력 해석으로부터 $t-z$ 관계를 도출하는 과정에서 말뚝과 주변지반간의 전단응력을 무시하는데 이러한 요인들이 오차를 유발시킨 것으로 판단된다. $t-z$ 관계의 실험치와 해석치의 차이에도 불구하고 말뚝두부의 하중-변위관계는 매우 정확하게 예측되고 있으며, 특히 하중제거 및 역재하시의 비선형성을 탄·소성 모델을 이용하여 해석할 수 있었다. 이는 하중전이의 최대값이 적절하게 산정되고 전반적인 $t-z$ 곡선의 양상이 실제 거동을 반영하면 지반-말뚝계의 하중-변위관계를 예측할 수 있음을 의미한다.

한편 그림 22에서는 API 규준에 따른 단위 마찰지지력, FLAC 해석시 축하중 430t에 대한 단위 마찰저항과 시험말뚝 P1에서 도출한 최대 주변 마찰저항을 비교하였다. 매립층에서는 FLAC 해석과 API 규준에 따른 마찰 저항과 지지력은 실험치와 유사하게 나타났다. 따라서 FLAC 해석 및 실험치의 마찰저항이 극한지지력에 도달한 것으로 판단된다. 그리고 상부 사질토에서는 실험치에 비하여 해석결과들이 약간 크거나 유사한 경향을 나타내고 있다. 이로부터 실험치는 마찰저항이 극한 지지력에 도달하였거나 거의 도달한 상태였으며, FLAC 해석에 의한 마찰저항은 극한치에 도달하였다. 하부 사질토에서는 실험치가 FLAC 해석결과와 유사한 경향을 나타냈으며 두 값들이 대체로 마찰지지력 내에 있었다. 이는 상부의 지반에 마찰저항에 따른 하중전이가 상당히 이루어져서 하부지반은 극한치에 도달하지 않고 선단지지력이 완전하게 유발되지 않고 있음을 보여준다. 이 결과들로부터 실험치를 적절하게 모델하도록 해석이 수행되었음을 알 수 있다.

견고한 점토층에서는 22m부근에서 실험치가 FLAC 해석결과와 거의 일치하고 API 규준에 따른 지지력에는 도달하지 않고 있다. 하지만 27m 부근에서는 실험치가 FLAC 해석결과와 API 규준에 비하여 상당히 크게 나타났다. 이

로 인하여 축하중 분포의 해석시 다소 오차가 발생하였다. 이러한 결과는 해석기법상에서 발생하는 오류라기 보다는 토질정수를 도출하는 과정이나 지지력을 산정하는 방법에서 나타나는 불확실성에 기인하는 것으로 판단된다.

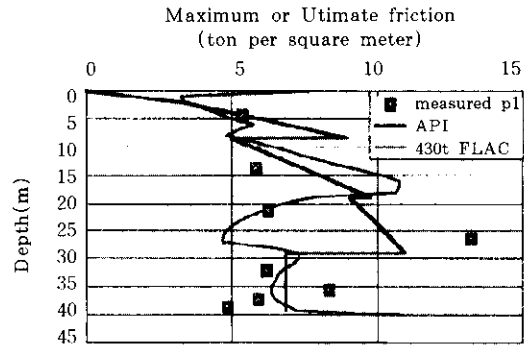


그림 22. 최대 마찰저항 및 극한 마찰지지력

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 국내현장에서 수행한 실대형 말뚝재하시험 결과에 대하여 지반조사 자료를 토대로 API 규준을 이용한 유한차분해석 및 FLAC 프로그램을 이용한 해석을 일관적으로 수행하였다.

1. 두 가지 해석기법에 대하여 말뚝 두부에서의 하중-침하 관계를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. API 규준을 이용한 해석시에는 하중이 400t일 때 침하량이 약 13% 과소평가되었고 FLAC 해석결과에서는 실험치와 거의 일치할 정도로 정확히 침하량을 예측하였다. 특히, FLAC 프로그램을 이용한 해석에서는 하중 제거(unloading)시 매립층과 상부 사질토층에서의 응력경로가 파괴 포락선 상에서 거동함으로 소성변형이 일어났다. 따라서 하중 제거시 비선형적인 하중-침하 관계

를 예측할 수 있었다.

2. API 규준을 이용한 유한차분해석에서는 말뚝의 깊이에 따른 축하중 분포를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 다만 하중 수준이 낮은 경우에는 다소 오차가 발생하였다. FLAC 해석결과에 의한 축하중 분포는 실험치와 유사하게 예측하였으나 23m 부근 점성토층의 축하중을 다소 과소 평가하였다. 이로부터 지반정수들이 합리적으로 산정된다면 지반-말뚝계의 비선형적인 축하중-변위 관계와 말뚝의 축하중 분포를 수치적으로 예측하는 것이 가능하다고 판단된다.
3. 실험치로부터 구한 하중전이 관계와 API 규준에 의한 $t-z$ 관계 및 FLAC 프로그램 해석결과로부터 구한 $t-z$ 관계를 비교하였다. 실험치에 의한 하중전이 거동은 API 규준에 비하여 대체로 강성이 작게 나타났다. 또한 FLAC 해석결과에 의한 하중전이 관계에서도 실험치의 강성을 대체로 과대평가하였으며 특히 점성토에서는 변위가 상당히 유발되었는데도 최대 하중전이가 일어나지 않았다. 그러나 $t-z$ 곡선의 양상이 전반적으로 실제 거동을 반영하면 지반-말뚝계의 하중-변위관계는 적합하게 예측할 수 있었다.
4. 시험말뚝의 주면에서 나타난 최대 마찰저항은 FLAC 결과와 대체로 일치하는 경향을 나타냈다. 상부지반은 API규준에 의한 극한 마찰지력에 도달하였고 하부지반의 경우에는 마찰저항 및 선단저항이 극한값에 도달하지 않았다. 그러나 일부 견고한 점성토층에서는 실험치로부터 구한 최대 마찰저항이 API규준에 의하여 산정한 극한치보다 크게 나타났다.

관내토의 폐색효과를 고려한 수치해석을 엄밀하게 수행하기 위해서는 관내토와 말뚝사이의 거동을 모델할 수 있는 경계면요소를 사용하여야 할 것으로 판단되며, 이러한 연구는 추후 계속 수행될 계획이다.

참 고 문 헌

1. 부산광역시 건설안전 관리본부, 제2부산대학교 건설공사 실시설계 용역 설계 목적의 말뚝재하시험 결과 보고서, 1997
2. 최용규, 오세봉, 권오균, 김동수, 안태경 (1997) "실대형 말뚝재하시험의 축하중 하중 전이해석," 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, 365 - 372
3. 최용규, 정성기, 권오균 (1998) "개단 강관 말뚝의 하중전이 실험에 관한 연구" 대한토목학회 논문집, 게재 예정.
4. 한국지반공학회, *지반조사결과의 해석 및 이용*, 지반공학 시리즈 1, 1994
5. American Petroleum Institute, *Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design*, API Recommended Practice 2A - WSD (RP2A - WSD), 12th Ed., 1993
6. Coyle, H. M., and Sulaiman, J. H. (1967), "Skin Friction for Steel Pile in Sand," *J. of Soil Mech. & Found. Eng.*, ASCE, Vol. 93, 261 - 277
7. Coyle, H. M. and Reese, L. C. (1966), "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay," *J. of Soil Mech. & Found. Eng.*, ASCE, Vol. 92, 1 - 26
8. ITASCA CONSULTING GROUP, INC., *FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)* Ver. 3.3 : User's Manual, 1993
(접수일자 1998. 3. 18)