

국내 말뚝재하시험에 대한 지반-말뚝계의 수치해석

오 세 봉* · 안 태 경** · 최 용 규***
(98년 11월 2일 접수)

A Numerical Analysis of Soil-Pile Systems for Pile Load Tests at a Korean Site

Se-Boong Oh * · Tae-Kyong Ahn** · Yong-Kyu Choi***

Key Words : Load Transfer(하중전이), Pile Load Test(말뚝재하시험), Subgrade Reaction Method(지반반력법), Stress Analysis(응력해석)

Abstract

In order to evaluate the performance of axially or laterally loaded piles experimentally, pile load tests can be carried out at the site. Otherwise stress analyses or subgrade reaction analyses can solve the problem. In this study, stress analysis using FLAC code and subgrade reaction analyses using load transfer curves recommended by API(1993) were performed consistently on the basis of a result of site investigations, and the result of analyses was compared with the measured. As a result the behavior of pile heads was analyzed accurately for both axially and laterally loaded tests. Furthermore axially transferred loads were calculated appropriately for the measured and axial loads were transferred mainly by the frictional resistance rather than by the tip resistance. Consequently, it can be commented that both analysis methods of soil-pile systems are applicable at the objective site and that solutions may be more accurate if material properties from the site investigation are more explicit.

1. 서론

상부 구조물을 지지하는 말뚝기초의 안정성과 사용성을 평가하기 위해서는 말뚝과 지반간의 하중전이기구(load transfer mechanism)에 따라 저항력과 변위를 산정해야 한다. 이러한 말뚝의 거동

을 정량화할 수 있는 실험적인 방법으로는 현장에서 직접 수행하는 말뚝재하시험이 있다. 그리고 해석적인 방법으로는 말뚝과 지반간의 하중전이관계를 모델하여 유한차분적으로 해석하는 지반반력해석(subgrade reaction analysis) 기법¹⁾과 연속체역학에 근거한 응력해석기법이 있다

* 정희원, 영남대학교 토목공학과

** (주)대우엔지니어링

*** 경성대학교 건설환경공학부

축하중 재하시 지표하부의 말뚝과 지반으로 정의된 지반-말뚝계의 거동을 해석하기 위해서 말뚝을 일축부재로 모델하고 말뚝주면의 지반은 깊이에 따라 상이한 비선형 스프링으로 모델하면 유한차분적으로 해를 구할 수 있다. 또한 횡하중이 가해지는 지반-말뚝계도 이와 유사하게 말뚝을 보로 간주하고 지반을 스프링으로 모델하여 해를 구할 수 있는데 이를 통상적으로 지반반력법이라고 한다²⁾. 본 연구에서는 축하중 및 횡하중에 대한 거동해법들을 편의상 각각 축하중에 대한 지반반력해석과 횡하중에 대한 지반반력해석으로 구분하였으며, 양 기법들은 유사한 해법이지만 말뚝과 지반이 상이하게 모형화되어 지배방정식과 하중전이관계가 상이하게 나타난다.

지반반력해법은 지반-말뚝계의 문제에 국한하여 통상적인 지반조사 결과로부터 도출되는 지반의 물성을 이용하도록 개발되었기 때문에 필요한 계수의 추정이나 용이한 편이고, 지배식이 단순하고 수치적인 해법이 간편하여 해양 구조물의 하부를 구성하는 말뚝기초를 설계할 경우 널리 이용되고 있다. 이에 API 규준에서는 지반반력해석을 권고하고 있으며, 축하중 및 횡하중에 대한 지반-말뚝간의 하중전이곡선을 각각 지반종류에 따라 제시하였다³⁾.

한편 연속체 역학에 입각한 응력해석기법은 컴퓨터를 이용한 수치해석기법의 진보로 인하여 점점 관심이 높아지는 상태이며, 지배방정식이 전자의 해법에 비하여 엄밀할 뿐더러 지중의 응력과 같은 지반-말뚝계의 거동을 다양하게 구할 수 있는 장점이 있다. 또한 지반반력해법과 더불어 응력해석기법을 병행하여 수행하면 상호 결과간의 비교와 분석을 통하여 신뢰도를 높일 수 있다. 단지 지반반력해법에 비하여 현장 지반의 변형계수와 관련된 물성 입력치를 도출하기가 상대적으로 까다로운 실정이다^{4,5)}.

이에 본 연구에서는 국내현장에서의 말뚝재하시험 결과에 대하여 지반-말뚝계 해석기법들의 적용성을 검토하여 말뚝의 거동을 정량화할 수 있는 토대를 구축하고자 한다. 따라서 국내현장에서 수행한 개단 강관말뚝의 축하중 및 횡하중 재하시험에 대하여, 지반조사 자료를 토대로 FLAC 프로그램

(ITASCA 1993)⁶⁾을 이용한 응력해석과 API 규준에 의거한 지반반력해석을 일관되게 수행하였다. 그리고 말뚝두부의 하중-변위관계 및 지반-말뚝계의 하중전이 거동을 실험치와 해석치로 비교하여 대상말뚝의 거동에 대한 두 해석기법의 타당성을 검토하였다.

2. 지반-말뚝계의 해석기법

지반-말뚝계의 정적 거동 해법으로 널리 이용되고 있는 지반반력법은 지반의 비선형성 및 지층과 깊이에 따른 거동의 변화를 고려하여 간편하게 해를 구할 수 있는 장점이 있다²⁾. 해법이 간편한 반면에 지반의 연속성과 말뚝-지반간의 전단응력을 무시한다. 이러한 지반반력해석에서 핵심적인 역할을 하는 인자는 말뚝과 지반간의 하중전이 관계이다. 하중전이 관계는 지반을 말뚝의 요소에 위치한 스프링으로 모델할 때 필요한 자유도에 상응하는 하중-변위 관계로서, 임의의 말뚝요소에 하중이 가해질 때 말뚝과 지반의 접점으로부터 무한영역의 지반까지의 응답의 총합을 표현한다. 이러한 하중전이 관계는 많은 연구자들에 의하여 지반속성과 간편한 실내시험 및 현장시험등을 통하여 산정할 수 있도록 말뚝재하시험을 토대로 반경험적으로 도출하여 왔다^{2,3,7-10)}. 하지만 기존의 연구에 따른 하중전이 관계는 재하시험을 수행한 현장에 좌우되므로 다양한 지반조건과 말뚝의 특성, 환경인자들을 고려하기에 충분하지는 못하다. 그러므로 국내 지반을 대상으로 해석을 수행할 시에는 적용성을 체계적으로 검토하는 것이 필요하다.

최근에는 컴퓨터 및 수치해석기법의 진보로 인하여 복잡한 비선형 해법이 훨씬 용이하게 수행할 수 있게 되어 비선형 응력해석기법의 활용에 많은 관심이 모아지고 있다. 이러한 상황은 지반반력해법이 간편하다는 점이 큰 장점이 되지 못하고 있음을 의미한다. 또한 응력해석은 임의의 질점의 구성관계를 이용하여 해를 구하므로 해법이나 물성의 산정과정 등이 보편적이어서 지반물성을 합리적으로 획득할 수 있다면 상이한 지역일지라도 해석이 가능하다. 그런데 지반반력법은 지반-말뚝계에 한정

된 해법이므로 필요한 지반물성에 대하여 경험적인 지침을 제시하고 있지만 응력해석시에는 변형계수와 같은 지반물성을 산정하기가 아직은 어려운 실정이다.

두 해법의 장단점을 비교하여 볼 때 어느 것이 바람직한지를 절대적으로 평가하기는 곤란하지만 지반반력해석과 더불어 응력해석을 병행하여 수행하면 상호 결과간의 비교와 분석을 통하여 신뢰도를 높일 수 있다는 것은 확실하다. 그리고 현 시점에서는 지반-말뚝계의 해법에 있어서 응력해석기법을 시도하는 것이 필요하다고 판단된다. 이러한 관점에서 본 연구에서는 범용 유한차분해석 프로그램 FLAC을 이용하여 지반-말뚝계의 응력해석을 수행하였다.

축하중에 대한 지반반력 해석을 수행하기 위해서는 말뚝을 탄성 일축부재로 모델하고 주변 흙에 대해서는 깊이에 따라 강성이 변화하는 비선형 스프링으로 모델한다. 이때, 임의의 깊이에서 말뚝주위로 전이된 단위 마찰력과 이에 상응하는 연직변위간의 관계를 t - z 곡선으로 정의하고, 최하부 선단의 전이하중-변위 관계는 Q - z 관계로 정의한다.

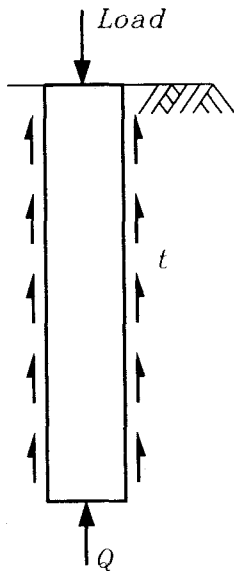


Fig. 1 Load transfer mechanism for axially loaded piles

Fig. 1에 나타난 축하중 재하 말뚝에 대한 미분방정식은 전이된 단위하중 t 와 이에 상응하는 말뚝 변위 z 를 이용하여 다음과 같은 방정식으로 구할 수 있다^{4,5)}.

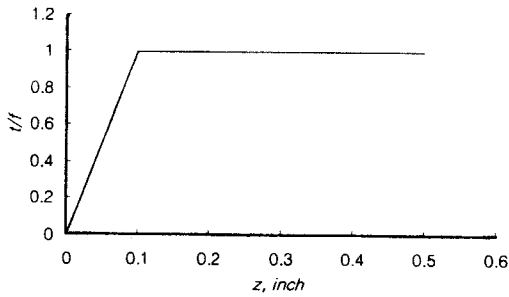
$$\frac{d^2z}{dx^2} - \eta k_s z = 0 \quad (1)$$

여기서 x 는 길이, z 는 말뚝의 연직변위이다. 또한 말뚝단면계수 η 는 C/EA 로 C 는 말뚝의 원주길이, E 는 탄성계수, A 는 단면적이다. 또한 k_s 는 깊이와 말뚝변위에 의존하는 t - z 관계의 할선 계수이다. 그리고 t - z 관계가 비선형적인 경우에는 유한차분법을 이용하여 해를 구해야 하므로 말뚝을 일정 두께 h 로 요소를 분할하여 식 (1)을 m 번째 요소에 대하여 유한차분식으로 나타내면 다음과 같다.

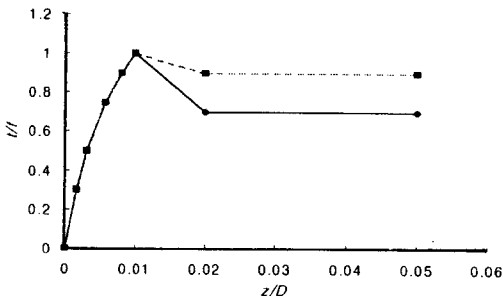
$$z_{m+1} - 2z_m + z_{m-1} = h^2 \eta k_s z_m \quad (2)$$

말뚝두부의 하중과 깊이에 따른 하중전이 곡선이 주어지면 식 (2) 및 경계조건을 이용하여 임의의 지점에서 일어나는 변위를 구할 수 있고 계산된 변위가 오차한계이내의 값이 되도록 반복적으로 해를 구한다. 이와 같이 각 하중단계별로 구한 해로부터 말뚝두부의 하중-변위 관계를 계산할 수 있다. 동시에 각 두부하중에 대하여 깊이에 따른 축하중의 분포를 구할 수 있다.

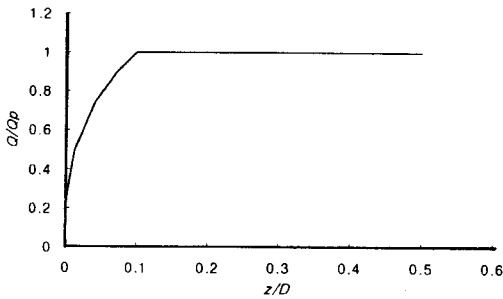
API 기준에서는 Fig. 2와 같이 지반을 사질토와 점성토로 구분하여 t - z 곡선 및 Q - z 곡선을 제시하였다. 사질토에서는 말뚝의 지름과 무관하게 연직변위 z 의 함수로 나타나고 점성토에서는 전이단위마찰지력에 대한 잔류 전이하중의 비가 0.7~0.9의 값을 나타낸다. 본 연구의 예제에서는 평균값인 0.8을 적용하였다. 선단에서 나타나는 Q - z 곡선은 점성토와 사질토에 상관없이 동일하게 제시하였다. 그리고 이러한 하중전이관계를 도출하기 위해서는 먼저 단위 마찰지력 f 와 선단지력 Q_p 를 산정하여야 한다. 이에 대한 상세한 기술은 여러 참고문헌^{1,3-5)}에 수록되어 있으며, 지면관계상 생략하였다.



(a) t-z curve for sands



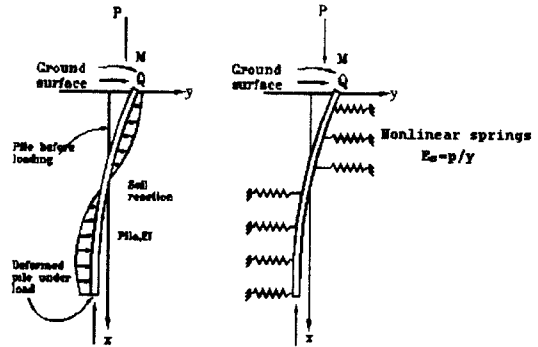
(b) t-z curve for clays



(c) Q-z curve for sands and clays

Fig. 2 Axial load transfer-displacement curves recommended by API

한편 횡하중이 가해지는 말뚝계는 말뚝을 보로 간주하고 지반을 선형 또는 비선형 스프링으로 모델하여 지반반력법으로 해를 구할 수 있다. 이때, 임의의 깊이에서의 말뚝 수평변위 y 와 지반의 저항 p 간의 관계가 필수적으로 요구된다. 지반반력 p 는 말뚝으로부터 무한영역까지의 응력분포의 총합으로 나타나는 말뚝 단위 길이당 횡방향 저항력이다. 이러한 p - y 곡선이 주어지면 유한차분적으로 해를 구하여 지반-말뚝계의 하중-변위 관계를 얻을 수 있다(Fig. 3).



(a) (b)

Fig. 3 Load transfer mechanism for laterally loaded piles

말뚝은 상부구조로부터 사하중과 횡력에 의한 지반반력이 작용하므로 식 (3)과 같은 지배방정식이 구해진다²⁾.

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + P_x \frac{d^2 y}{dx^2} - p = 0 \quad (3)$$

여기서 EI는 말뚝의 강성이고, P_x 는 사하중으로 인한 축하중이며, 지반반력 p 는 활선계수 E_s 를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$p = E_s \cdot y \quad (4)$$

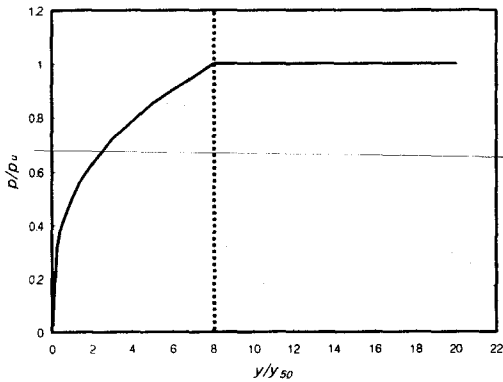
지반의 스프링계수 E_s 가 깊이와 변위에 따라 변화하는 경우, 횡하중에 대한 지반반력법의 지배방정식 (3)과 말뚝두부 및 선단에서의 경계조건을 유한차분식으로 변환하여 해를 반복적으로 구해야 한다. 이로부터 말뚝두부에서의 횡하중-횡변위 관계와 모멘트-각변위 관계를 구할 수 있으며 말뚝단면에 작용하는 모멘트와 전단력 분포를 계산할 수 있다^{4,5)}.

API 기준에서는 Fig. 4와 같이 p - y 곡선을 제시하였으며, 이러한 하중전이곡선은 지반 물성치 및 말뚝의 형태에 따라 극한 횡지반력 p_u 를 결정할 수 있다. 여기서 y_{50} 은 강도의 50% 응력에 상응하는 말뚝변위로서 말뚝의 폭이 B일 때 통상적으로 $0.025B$ 로 가정한다. 이러한 p - y 곡선에 대해서는 여러 문헌^{2,3)}에 상세히 기술되어 있다.

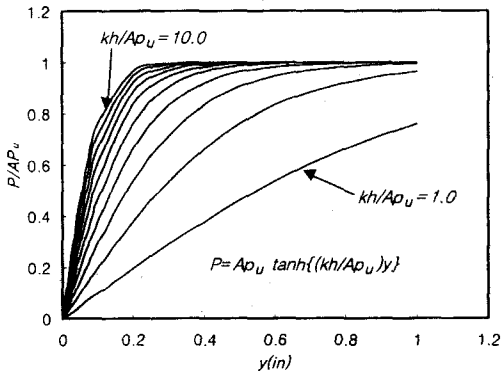
3. 축하중에 대한 응력해석 및 지반반력해석

부산 남항대교 영도측 교각설계를 위하여 시험 말뚝(개단 강관 말뚝, $\phi=508\text{mm}$, $t=12\text{mm}$, $l=38.5\text{m}$)을 항타 시공하여 재하시험을 수행하였다. 대상 지역에 대한 지반조사는 표준관입시험과 점토층에 대한 PMT, 일축압축시험 등을 수행하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 표준관입시험결과 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 상용하는 N치를 10인 경우와 45인 경우로 구분하여 해석을 수행하였으며, 각각의 해를 하한치(lower value)와 상한치(upper value)로 구분하였다. 점토층은 자갈과 모래를 함유한 매우 견고한 상태였으며, Table 1과 같이 pressuremeter 시험과 일축압축시험 결과를 토대로 비배수 전단강도를 15t/m^2 으로 결정하였다.

대상지반은 깊이에 따라 다양한 토층으로 구성된 층상 구조를 이루고 있으며 지반의 비선형적인 거동이 주요한 인자로 작용할 것으로 판단된다. 이러한 특성을 고려하여 축대칭 조건으로 FLAC 프로그램을 이용한 응력해석을 수행하였다. 이때 말뚝은 탄성 응력-변형을 관계를 사용하였고, 주변 지반에 대해서는 Mohr-Coulomb 파괴 기준에 의



(a) p-y curve for clays



(b) p-y curve for sands

Fig. 4 Lateral load transfer-displacement curves recommended by API

Table 1 Summary of site investigations

Layers	Depth (m)	Test Results			Strength		^a t-z curve parameters		^c p-y curve parameters
		N	p _l (s _u) (t/m ²)	q _u (s _u) (t/m ²)	s _u (t/m ²)	φ'	δ	K	k (t/m ²)
Fill	0~8.5	10~15	-	-	-	^b 26°	16°	1.0	3340
		45~50	-	-	-	^a 45°			40°
Upper sand	8.5~19	30~35	-	-	-	^b 35°	25°	0.8	2140
Clay	19~29	-	^c 119 (11)	6.4 (3.2)	15	-	-	-	-
		-	170 (16)	9.2 (4.6)		-	-	-	-
		-	445(43)	24.4 (12.2)		-	-	-	-
Lower sand	29~	20~25	-	-	-	^b 30°	20°	1.0	790

(주) ^a Friction angle $\phi' = \sqrt{12N+20}$, $\delta = \phi - 5^\circ$, ^b $\phi' = \sqrt{12N+15}$, $\delta = \phi - 10^\circ$

^c Undrained strength $s_u = \frac{p_l - \sigma_{ho}}{10}$, ^d K= coefficient of lateral earth pressure

δ =friction angle between the soil and pile wall ^d k= initial modulus of subgrade reaction

거한 탄·소성 구성모형을 적용하였다.

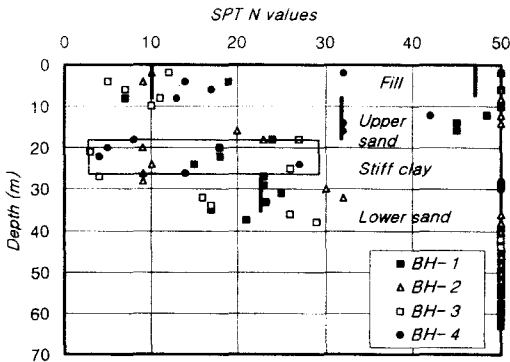


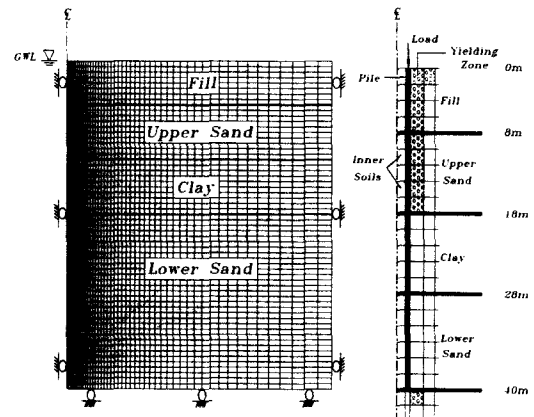
Fig. 5 Soil profiles

응력해석시 사용한 개단 강관 말뚝의 제원은 지름이 508mm이고 두께는 12mm, 길이는 40m로서 물성치는 Table 2에 나타나 있다. 포화 지반에 대한 유효응력해석을 수행하기 위하여 지반재료의 자중은 유효단위중량으로 설정하였으며, 자료가 불충분한 관계로 표준관입시험 N치의 대표값을 이용하여 탄성계수를 추정하였다(Table 2 참조). 특히 매립층에서는 하한치와 상한치 즉 N치가 10인 경우와 45인 두가지 경우로 구분하여 해석을 수행하였으며 각각의 탄성계수 값은 매립층에서 12N (kg/cm^2), 상부 사질토층에서 7N, 하부 사질토층에서 12N의 관계를 이용하여 계산하였다(한국지반공학회, 1994). 점성토층은 PMT 결과로부터 탄성계수를 결정하였고 포아송비(ν)는 모두 0.3으로 가정하였다.

Table 2 Parameters for the FLAC analysis

Parameters Layers (Depth,m)	N	Density (t/m^3)	Cohesion (t/m^2)	Friction angle ($^\circ$)	E (t/m^2)	ν
Pile (0~40)	-	7.86	-	-	2.06e7	0.3
Fill (0~8)	10	1.1	0	26	1223	0.3
	45			45	5510	
Upper sand (8~18)	30	1.1	0	35	2140	0.3
Clay (18~28)	-	1.0	15	0	1210	0.3
Lower sand (28~)	20	1.1	0	30	2450	0.3

응력 해석과정에서는 각 하중 단계에 따른 불균형 힘이나 변위가 완전히 수렴된 후에 다음 단계 하중을 증가시켰으며, 하중변화량은 시험시 재하조건에 따라 하중을 제거시켰다. 해석시 사용한 격자망(grid)은 Fig. 6 (a)와 같이 전단면은 50m×60m로 지반과 말뚝 및 관내토로 구성되어 있다. 지반은 매립층, 상부 사질토층, 점성토층, 하부 사질토층으로 나누었으며 말뚝은 Fig. 6 (b)와 같이 하부 사질토층까지 40m 관입되어 있다. 그리고 말뚝 내부의 관내토는 지표면까지 채워서 격자망을 형성했다.

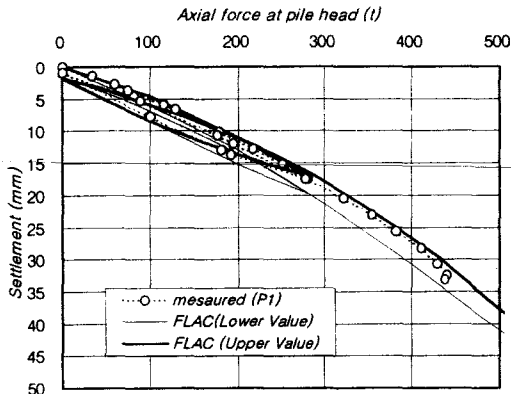


(a) Input grid (b) Grid around pile

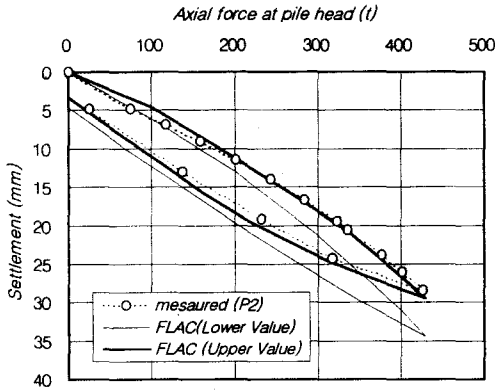
Fig. 6 FLAC grid for the axially loaded pile

Fig. 7에서는 시험말뚝 P1 및 P2와 응력해석 결과 나타난 말뚝두부 변위를 비교하고 있다. 시험말뚝 P1 해석에서는 280t까지 재하한 후에 하중을 제거하였으며, P2 해석에서는 430t까지 재하한 후에 하중을 제거하였다. 이 그림들에서 볼 수 있듯이 매립층에 대한 상한치 해석시에는 실험치와 매우 유사한 결과를 보였으며 하한치로 해석한 경우는 말뚝두부의 변위를 다소 과대평가(축하중이 400t일 때 약 11% 과대평가) 하였다.

결과적으로 응력해석시 상한치(Fig. 7 참조)의 경우 침하량을 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 또한 실제 거동을 대체로 유사하게 계산하는 것으로 보아 지반 물성치를 추정할 수 있는 자료가 충분하고 적합하다면 축하중 재하시 말뚝두부에서의 변위를 합리적으로 산정할 수 있다고 판단된다.



(a) Axial load-settlement curve for test pile P1



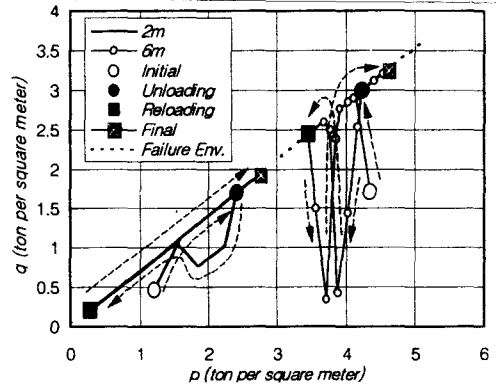
(b) Axial load-settlement curve for test pile P2

Fig. 7 Axial load-settlement curves at pile head for the stress analysis

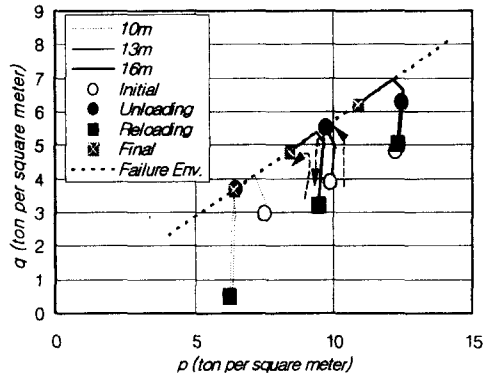
Fig. 7에서 보여지듯이 하중 제거시에도 실제의 비선형 거동을 매우 정확하게 예측할 수 있었다. 이러한 비선형성을 규명하기 위하여 각각의 토층에 따라 말뚝에 근접한 지반요소의 응력 경로를 상한치 해에 대하여 Fig. 8에 나타냈다. 이 때 Fig.에 나타난 p 와 q 는 각각 $(\sigma_1 + \sigma_3)/2$ 와 $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$ 로 정의된다. 그리고 각각의 경로에 대하여 초기응력상태(initial), 하중제거 시점(unloading), 역재하 시점(reloading)과 최종응력상태(final)를 표시하였다.

Fig. 8의 (a) 및 (b)를 보면 매립층과 상부 사질토층 부분에서 하중제거(unloading)시에도 응력이 파괴포락선 상에서 거동함으로 소성 변형이 일어났으며 말뚝두부의 변위가 비선형적으로 유발되었다. 주응력 경로의 불규칙한 양상은 하중 제거시

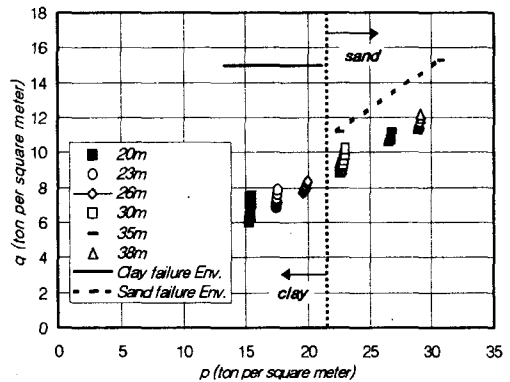
전단 응력의 영향으로 주응력축이 회전하여 나타난 것으로 판단된다. 그리고 Fig. 8의 (c)에서 보여지듯이 점성토층과 하부 사질토층의 지반은 파괴포락선 내에서 탄성적으로 거동하였다.



(a) Fill



(b) Upper sand

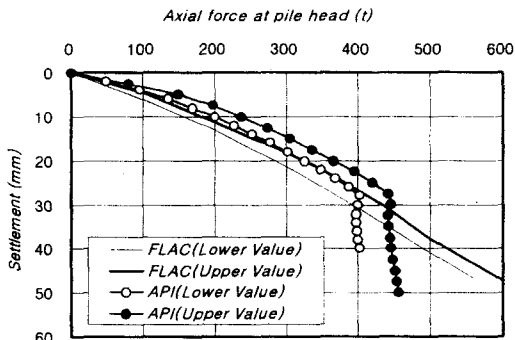


(c) Clay and Lower sand

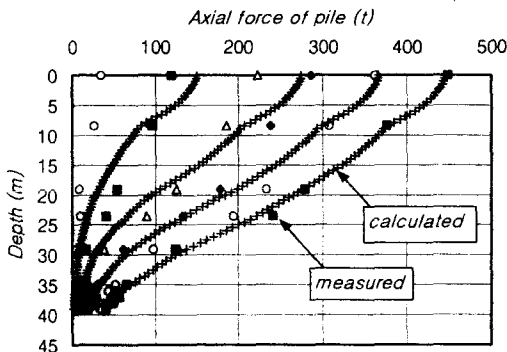
Fig. 8 Stress paths for the FLAC analysis

Fig. 9 (a)에서는 지반반력해석시 나타난 말뚝두부에서의 축하중-침하 관계를 응력해석 결과와 비교하였다. 이 때 필요한 계수들은 표 1의 물성치들을 이용하여 API 규준에 따라 산정하였다. 지반반력해석시 나타난 말뚝두부의 변위는 응력해석결과에 비해 다소 과소평가 되었고, 특히 지반반력해석결과에 의하면 하한치의 경우 축하중 400t에서 상한치는 450t 정도에서 극한 상태에 도달한 것으로 나타났다.

Fig. 9 (b)에서 지반반력해석시 각각의 하중에 상응하는 말뚝단면의 깊이에 따른 축하중 분포를 실험치와 비교하였다. 계산치는 실험치를 비교적 정확하게 예측하고 있음을 알 수 있다. 하지만 말뚝두부에 가해진 하중이 작은 경우에는 매립층의 하중전이가 실제보다 과대 평가되었고, 20~30m 부근의 축하중 분포는 서로 상이하게 나타났다. 전반적으로 대상 말뚝은 선단보다는 마찰지지 형식을 띠고 있으며, 마찰에 의한 하중전이가 지지력을 유발시키는데 주도적인 역할을 하고 있는 것으로 판단된다.



(a) Axial load-settlement curve at pile head



(b) Axial load distribution with depth

Fig. 9 The response of axially loaded piles for the subgrade reaction analysis

한편 Fig. 10에서는 상한치로 해석했을 때 지반 반력해석(API 규준)에 따른 단위 마찰지지력, 응력 해석시(FLAC) 축하중 430t에 대한 단위 마찰저항과 시험말뚝 P1에서 도출한 최대 주면 마찰저항을 비교하였다. 매립층에서는 응력해석과 지반반력해석에 따른 마찰 저항과 지지력은 실험치와 대체로 유사하게 나타났다. 따라서 응력해석 및 실험치의 마찰저항이 극한지지력에 도달한 것으로 판단된다. 그리고 상부 사질토에서는 실험치에 비하여 해석 결과들이 약간 크거나 유사한 경향을 나타내고 있다. 이로부터 실험치는 마찰저항이 극한 지지력에 도달하였거나 거의 도달한 상태였으며, 응력해석에 의한 마찰저항은 극한치에 도달하였다. 하부 사질토에서는 실험치가 응력해석결과와 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. 이러한 결과들로부터 대상말뚝은 선단에 의한 하중전이가 모두 유발되기 이전에 마찰에 의한 전이가 이루어진 상태로 아직은 극한 지지력 상태에는 도달하지 않은 것으로 판단된다.

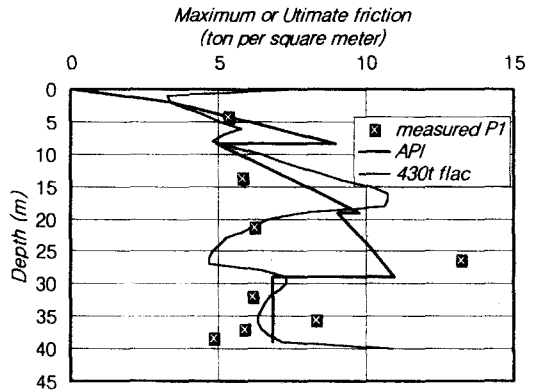


Fig. 10 Maximum and ultimate frictional resistance

또한 견고한 점토층 22m부근에서의 단위 마찰 저항은 실험치와 응력해석결과가 거의 일치하고 있으며 지반반력해석(API 규준)에 따른 지지력에는 도달하지 않고 있다. 하지만 27m 부근에서는 실험치가 응력해석결과와 지반반력해석에 비하여

상당히 크게 나타났다. 이러한 결과는 해석기법상에서 발생하는 오류라기보다는 말뚝의 축하중 계측 오차와 토질정수를 도출하는 과정 및 지지력을 산정하는 방법에서 나타나는 불확실성에 기인하는 것으로 판단된다.

4. 횡하중에 대한 지반반력해석 및 응력해석

시험말뚝 P1과 P2에 대하여 수행한 횡방향 말뚝 재하시험에 대하여 응력해석과 지반반력해석을 수행하였다. 이 때 지반조사 결과를 토대로 Table 1과 Table 2와 같이 필요한 계수를 산정 하였다. 응력해석시 말뚝은 탄성 구성모형을 사용하였으며 주변지반은 Mohr - Coulomb 파괴규준에 의거한 탄 · 소성 구성모형을 적용하였다. 그리고 횡방향 거동을 분석하기 위해서 Fig. 11과 같이 평면 변형을 상태(plane strain condition)로 해석하였으며 말뚝의 등가탄성계수와 등가직경을 식 (5)과 식 (6)을 이용해서 환산하였다.

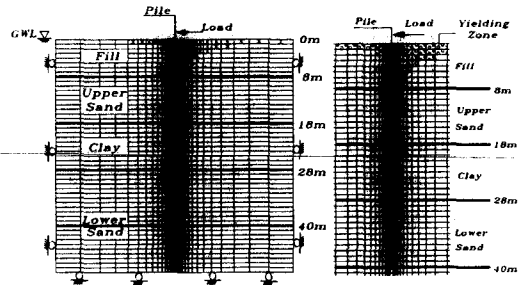
$$EA = E^* A^* = E^* B^* \quad (5)$$

$$EI = E^* I^* = \frac{E^* B^{*3}}{12} \quad (6)$$

여기서, EA 및 EI는 실제 말뚝단면에 대한 강성이고, * 표시가 된 것은 평면변형을 조건에서 사용한 등가 말뚝계수이며, B는 폭을 의미한다. 식 (5)과 (6)에 의해서 말뚝의 등가 폭(B*)은 0.61m이고 등가 탄성계수(E*)는 $6.34 \times 10^4 \text{ t/m}^2$, 밀도는 말뚝 총중량을 고려하여 0.24 t/m^3 으로 계산되었다. 또한 지반에 사용한 물성치는 축하중 해석시 사용한 지반조건과 동일하게 설정하였다 (Table 2 참조).

Fig. 11에서는 상한치의 경우 횡하중 20t이 작용할 때 항복상태를 표현한 것으로 하중이 가해진 방향으로의 지반은 압축이 일어나고 반대편에는 변위의 발생으로 수평응력이 감소하여 항복이 일어난 것으로 판단된다.

시험말뚝 P1과 P2에서 말뚝두부의 거동을 매립층을 상한치와 하한치로 구분하여 해석하였다. 이러한 API 규준에 의한 FLAC 프로그램을 통한 응력해석 및 지반반력해석 결과를 Fig. 12에 비교하



(a) Input grid (b) Grid around pile
Fig. 11 FLAC grid for the laterally loaded pile

였다. 지반반력 해석시에는 통상적으로 말뚝두부로부터 1.5m까지는 scour 효과에 의해 지반반력이 작용하지 않는다고 해석하였다.

Fig. 12에서 보듯이 응력해석 결과는 지반반력해석 결과와 대체로 유사하였으며 지반반력해석 결과의 변위가 다소 크게 계산되었다. 이러한 결과로부터 상한치의 경우에는 말뚝의 횡변위를 실제와 근사하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 하한치의 경우에는 모두 변위를 매우 과대하게 평가한 것으로 보아 지반 물성치를 적합하게 산정하는 것이 필요함을 알 수 있다. 즉 축하중에 대한 지반반력해석결과에서 하한치 해가 정확할지라도 상한치 해가 축하중 및 횡하중에 대한 거동을 일관되게 해석하는 것으로 보아 매립층의 물성이 상한치와 근사함을 알 수 있다.

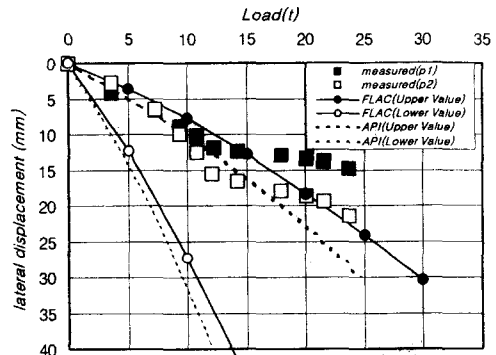


Fig. 12 Lateral load-displacement curves at pile head

결과적으로 대상지역에 대한 말뚝의 공용성을

평가하기 위해서 널리 이용되고 있는 지반반력 해석과 더불어 응력해석을 수행하는 것이 가능하다고 판단된다. 특히 매립층을 상한치로 해석하였을 때 말뚝두부의 횡하중-변위 관계를 대체로 유사하게 예측하였다.

Fig. 13에서는 지반반력 해석시 횡하중 20t이 작용할 때 깊이에 따른 모멘트 분포를 상한치 및 하한치로 구분하였다. 매립층을 상한치로 한 경우 깊이 2.5m에서 모멘트가 42.3t·m가 발생했으며, 하한치로 했을 때 깊이 3.75m에서 모멘트가 58.0t·m가 발생하였다. 즉 매립층을 상한치로 해석한 경우 하한치보다 지반반력이 크고 변위가 적게 유발되었으며 모멘트가 약 37%정도 작게 나타났다.

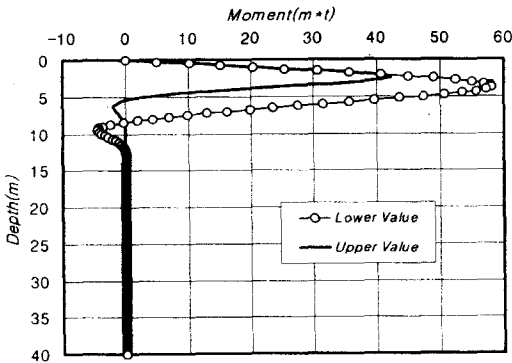


Fig. 13 Moment distribution with depth

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 국내현장에서 수행한 실대형 말뚝재하시험의 축하중 및 횡하중 재하시 거동에 대하여 지반조사 자료를 토대로 FLAC 프로그램을 이용한 응력해석 및 API 기준을 이용한 지반반력 해석을 일관적으로 수행하였다. 이때 지표부근에 위치한 매립층에 지반조사 결과가 명료하지 않아 재료계수를 상한치와 하한치로 구분하여 해석하였다.

1) 축하중 재하시 말뚝두부의 하중-변위 관계는 응력해석시 하한치로 해석할 경우 축하중이 400t 일 때 약 11% 과대평가 하였으며 상한치로 해석할 경우 축하중-침하 관계를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 특히 하중 제거(unloading)시

매립층과 상부 사질토층에서의 응력경로가 파괴 포락선 상에서 예측되므로 소성변형이 일어나 하중 제거시 비선형적인 하중-침하 관계를 매우 근사하게 예측할 수 있었다. 지반반력해석시 하한치의 경우 초기에 실측치와 매우 유사하게 나타났다으며 상한치의 경우 실측치에 비해 침하량이 다소 과소평가하였다.

2) 축하중 재하시 시험말뚝의 주면에서 나타난 최대 마찰저항은 FLAC의 응력해석 결과와 대체로 일치하는 경향을 나타냈다. 상부지반은 API 기준에 의한 극한 마찰저항에 도달하였고 하부지반의 경우에는 마찰저항 및 선단저항이 극한값에 도달하지 않았다. 이로부터 대상 말뚝이 선단보다는 주면마찰에 의하여 하중이 전이되는 현상을 해석결과들에서 확인할 수 있었다.

3) 횡하중 재하시 말뚝두부의 거동에 대하여 응력 해석결과와 지반반력 해석결과는 대체로 유사하였다. 이로부터 대상지역에 대하여 지반반력 해석과 더불어 응력해석을 수행하는 것이 가능하다고 판단된다. 특히 횡하중이 작용하는 지반-말뚝계 해석은 축하중 재하시 경우와 동일한 지반조사 자료를 토대로 일관되게 수행하여 상한치 해의 경우에는 두 해석기법 모두 말뚝의 거동을 실제와 유사하게 예측할 수 있었다.

본 연구의 지반 물성치는 국내에서 통상적으로 행해지는 표준관입시험과 일축압축시험 성과로부터 대부분 도출하였다. 하지만 사질토에 대해서는 콘관입시험을 수행하고 점성토에서는 현장베인시험이나 UU, CU 등의 삼축시험을 수행하는 것이 바람직하다(한국지반공학회 1994). 따라서 적합한 기법으로 지반조사가 충분히 이루어지면 지반재료 계수를 합리적으로 산정하여 지반-말뚝계의 거동해법을 더욱 정확하게 수행할 수 있으리라고 판단된다.

축하중 작용시 관내토의 폐색효과를 고려한 수치해석을 엄밀하게 수행하기 위해서는 관내토와 말뚝 사이의 거동을 모델할 수 있는 경계면 요소를 사용하여야 할 것이며, 말뚝에 횡하중이 작용하는 경우에 대한 응력해석시에는 3차원적으로 해석함이 바람직하다고 판단된다. 본 연구자들은 이와 같이 엄밀한 지반-말뚝계 해석에 대한 연구를 진행하고 있다.

참고문헌

- 1) Prakash, S. and Sharma, H. D., "Pile Foundations in Engineering Practice", *John Wiley and Sons*, 1990
- 2) Reese, L. C. "Behavior of Piles and Pile Groups Under Lateral Load" *U. S. Department of Transportation Federal Highway Administration Office of Research Washington, D. C.* 1983
- 3) 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
- 4) 오세봉, 안태경, 최용규, 권오균, 우문정(1998a) "축하중 재하말뚝의 하중전이 거동에 대한 수치해석" *한국지반공학회지 제 14권 제2호* 93-105
- 5) 오세봉, 이진학, 김동수, 정태영 "부유구조물의 계류를 위한 지반-돌핀구조계의 동적해석(I)," *한국해양공학회 춘계학술발표회 논문집*, 한국해양공학회, 57-61, 1998
- 6) ITASCA CONSULTING GROUP, INC., *FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua) Ver. 3.3 ; User's Manual*, 1993
- 7) Coyle, H. M. and Reese, L. C. "Load Transfer for Axially Loaded Piles in Clay," *J. of Soil Mech. & Found. Eng.*, ASCE, Vol. 92, 1-26, 1996
- 8) Coyle, H. M. and Sulaiman, J. H., "Skin Friction for Steel Pile in Sand," *J. of Soil Mech. & Found. Eng.*, ASCE, Vol. 93, 261-277, 1967
- 9) Matlock, H., "Correlations for Design of Laterally Loaded Piles in Soft Clay," *Paper No. OTC1204, Proceedings, Second Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Vol.1, pp.577-594, 1970
- 10) Reese, L. C., Cox, W. R., and Koop, F. D., "Analysis of Laterally Loaded Piles in Sand," *Paper No.OTC2080, Proceedings, Fifth Annual Offshore Technology Conference*, Houston, Texas, Vol.2, pp.473-485. 1974