

Ⅲ. 항타 강관말뚝의 주변마찰력 산정공식의 비교

연세대학교 토목공학과 정 상 섬 교수

1. 서 론

지반특성상 우리나라는 전형적으로 지표면에서부터 기반암까지의 깊이가 그리 깊지않아 현재까지 양질의 선단지지층까지 말뚝기초를 많이 사용하고 있다. 그러나 날로 발전일로에 있는 국내의 경제 및 사회구조나 높은 인구밀도로 말미암아 현존하는 국토의 이용률이 점점 포화상태에 이르러 점차로 열악한 지반상태를 갖는 지역내 대구경, 대심도 강관말뚝기초의 활용이 증대되고 있다.

일반적으로 말뚝기초를 설계함에 있어서 가장 중요한 문제는 구조물의 안전과 전체 공사비에 지대한 영향을 미치는 설계지지력의 결정이다. 따라서 현재 지지력의 확인이 거의 필연적인 과정으로 정착되어 가고 있으며 이에 따라 각종건설공사 현장에서 말뚝재하시험이 활성화되어 시험시공을 통해 말뚝의 지지력에 대한 이해도가 높은 수준으로 향상되기는 하였지만 말뚝이 대구경, 대심도화 되면서 기존에 사용하였던 마찰력 산정 방법의 적용가능성 파악이 필요하다.

현재 국내의 지반조사는 거의 대부분 표준관입시험(SPT, Standard Penetration Test) 결과만을 설계에서 활용할 수 있는 형편인 바, 표준관입시험 결과 N값으로부터 말뚝의 지지력을 도출하는 Meyerhof의 경험식을 대부분의 설계에서 채택되고 있다. 먼저 주변마찰력의 상한계값으로 국내에서 적용하는 일반적인 기준(구조물 기초설계기준이나 도로교 표준시방서)은 원래 Meyerhof(1959,1960)가 SPT와 N치와 $Q_{s(max)}$ 의 관계로부터 제안된 다음식을 사용하고 있다.

타입말뚝의 경우

- 큰 변위가 발생하는 말뚝에 대해서,

$$Q_s = 0.2\bar{N}A_s \leq 10 \text{ ton}/m^2 \quad (1.1)$$

- 작은 변위가 발생하는 말뚝에 대해서는 (예를들면, 강관 H말뚝),

$$Q_s = 0.1\bar{N}A_s \leq 5 \text{ ton/m}^2 \quad (1.2)$$

여기서, \bar{N} : 말뚝이 근입된 길이내의 평균 N

Meyerhof 의 연구결과에 따르면 깊이에 따라 증가되는 상대밀도를 가지는 사질토층에 말뚝을 타입하는 경우 주면마찰력 f_s 는 전체지지력의 1/2에 미치지 못하는 값을 나타내며 횡마찰력이 선형적으로 증가하는 15~20D의 깊이까지 위의 관계식을 만족하는 주면마찰력이 발생한다고 보고하고 있다. 그러나 Meyerhof의 공식은 균질한 사질토에 근입된 경우에 한하여 산정된 결과로 미루어 볼 때 일반적인 상한선 10 ton/m²을 상회하는 경우가 여러 연구결과에서 나타나고 있다.

이와같은 배경에서 본고에서는 현안문제와 관련하여 말뚝의 연직지지력 산정의 근간이 되는 주면마찰력을 향타 관입된 강관말뚝의 인발 시험을 통해 극한 주면마찰력을 산정하고, 기존 공식으로 계산한 지지력 값과 비교하여 지지력 공식의 적합성 여부를 알아보고자 한다.

2. 주면마찰력

기존 연구결과 최대 주면마찰력이 발현되기 위한 말뚝과 주변지반의 상대적인 변위(표 2.1 참조)는 대략 6~10 mm 값을 갖는 것으로 알려져 있으며 점토의 경우가 모래의 경우보다 변위량이 더 작은 것으로 보고되고 있다.

표 2.1 최대 주면마찰력의 발현을 위한 말뚝-흙의 상대 변위

제한자	상대 변위	
	mm	in
Van Weele(1964)	6	0.24
Broms, et al(1969)	20	0.80
Lambe, et al(1974)	6	0.24
Kishida 와 Takano(1976)	2	0.08
Harvat 와 Van der Veen(1977)	10	0.40

점성토에서 마찰력을 구하는 방법은 전응력법인 Tomlinson의 α 법, 유효 응력법인 Burland의 β 법, 혼합법인 Vijayvergiya 와 Focht의 λ 법이 많이 사용되며, 사질토에선 유효 응력법이 주로 사용된다. 그외 산정방법으로는 표준관입시험 값을 이용하는 Meyerhof 식과 해양 강관말뚝의 특성을 고려하여 점성토에서는 α 법을 쓰고, 사질토에서는 유효 응력법을 적용시키는 API RP2A의 방법이 있다. 이에 본장에서는 말뚝의 주면마찰력 산정방법에 대하여 기존에 제안된 방법들을 살펴보고자 한다.

2.1 주면 마찰력 산정방법

2.1.1 α 방법

α 법은 점성토에 시공된 말뚝의 주면마찰력을 산정하는 방법으로 Tomlinson(1971)에 의하여 제안되었는데 이 방법은 비배수강도(s_u)를 이용하여 다음과 같이 f_s 를 산정하였다.

$$f_s = \alpha s_u + q' K \tan \delta \quad (2.1)$$

여기서, α : 부착계수(그림 2.1, 표 2.2 참조)

s_u : 해당지반의 비배수강도

q' : ΔL 부분에 대한 유효 연직응력

K : 수평토압계수이며 K_o 에서부터 1.75까지 흙의 체적변화, 초기밀도 등에 따라 변한다. 장기거동시에는 흙의 크리이프 영향을 고려하여야 하므로 일반적으로 K_o 에 가까운 값을 사용.

δ : 말뚝 주변의 유효마찰각(ϕ' 또는 표 2.3으로부터의 값을 사용)

$$K_o = (1 - \sin \phi') \sqrt{OCR}$$

이 방법에 의해 보고된 상대오차는 약 $\pm 25\%$ 로 알려져 있다.

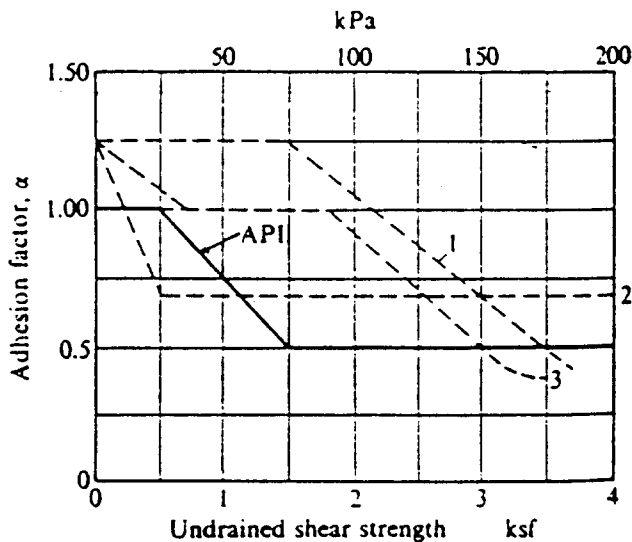


그림 2.1 흙과 부착력 인자와의 관계

표 2.2 점성토에 관입할 때 α 값

분류	지반 조건	관입비	α 값
1	단단한 또는 대단히 단단한 점성토 위에 놓인 모래 또는 자갈	< 20 > 20	1.25 그림 2.1 참조
2	단단한 또는 대단히 단단한 점성토 위에 놓인 연약점토 또는 실트	$8 < PR \leq 20$ > 20	0.40 그림 2.1 참조
3	하층과 무관하게 단단한 또는 대단히 단단한 점성토	$8 < PR \leq 20$ > 20	0.40 그림 2.1 참조

(주) 관입비 $PR = \frac{\text{점성토에 시공된 말뚝의 관입깊이}}{\text{말뚝직경}}$

표 2.3 여러 가지 구조용 재료 및 흙이나 암에 대한 마찰각 δ

재 료 접 촉 면	마찰각 δ
콘크리트에 대하여	
균질이고 단단한 암반	35
균질의 자갈, 자갈-모래의 혼합토, 거친 모래	29-31
균질이고 고운 중간 정도의 모래, 실트분을 함유하고 있는 모래	24-29
균질이고 고운 모래, 실트질이나 점토분이 있는 모래	19-24
고운 모래질의 실트, 비소성 실트	17-19
아주 견고하고 굳은 과압밀이나 선행압밀된 점토	22-26
보통 굳기의 점토나 굳은 점토와 실트분이 있는 점토	17-19
강널말뚝에 대하여	
균질의 자갈, 자갈-모래의 혼합토, 잘 부수어지는 암석파편	22
균질의 모래, 실트분 있는 모래와 자갈의 혼합토, 동일크기의 굳은 암	17
실트질의 모래, 실트나 점토와 혼합되어진 자갈이나 모래	14
고운 모래질의 실트, 비소성 실트	11
성형된 콘크리트나 콘크리트 널말뚝에 대하여	
균질의 자갈, 자갈-모래 혼합토, 잘 파쇄된 암석 파편 덩어리	22-26
균질의 모래, 실트질의 모래 자갈 혼합토, 동일크기의 굳은 암의 덩어리	17-22
실트질의 모래, 실트나 점토와 혼합된 자갈이나 모래	17
고운 모래질의 실트, 비소성 실트	14

2.1.2 λ 방법

λ 방법은 Vijayvergiya와 Focht(1972)에 의해 제안된 점토지반에서의 말뚝의 주변마찰력 f_s 를 산정하는 방법으로 다음과 같다.

$$f_s = \lambda(q' + 2s_u) \quad (2.2)$$

여기서, λ : 경험상수(그림 2.2 참조)

q' : 유효연직응력

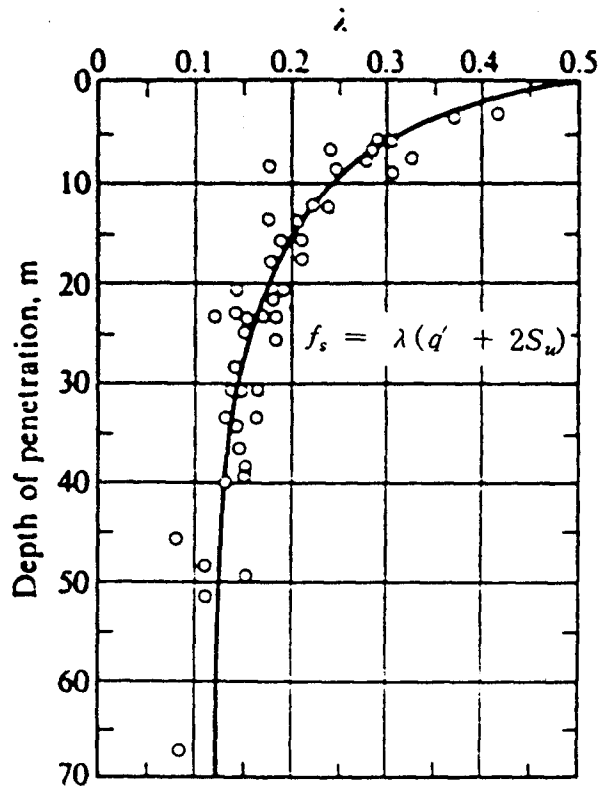


그림 2.2 말뚝 근입에 따른 λ 값

λ 계수는 여러 개의 말뚝재하시험 자료로부터 선형 회귀분석을 하여 산정한 값으로 말뚝의 근입깊이가 증가할 때나 지반의 강도가 감소할수록 λ값은 감소한다. 이 방법에 의해 보고된 상대오차는 약 ±10%정도로 알려져 있다.

2.1.3 β 방법

Burland(1973)는 기존의 주변마찰력 산정방법들의 상대오차를 최소화 하기 위하여 유효응력으로 표현되는 점성토와 사질토에 적용가능한 주변마찰력 공식을 다음과 같이 제안하였다.

$$f_s = Kq' \tan \delta = \beta q' \quad (2.3)$$

여기서, q' : 유효 연직응력으로 상재하중(q_s) 작용시 이를 포함한 응력

$$\beta = K \tan \delta$$

$\tan \delta$: 말뚝과 지반 사이의 유효마찰계수($\tan \delta \approx \tan \phi'$)

K : 수평토압계수이며 K_0 가 보통 사용

유효응력원리를 사용하는 이 방법은 말뚝항타시 주변지반의 교란으로 발생하는 과잉간극수압이 재하시험이나 설계하중이 작용할 시점에는 말뚝주변에서 거의 소산된다는 가정에 근거한 해석법이다. 일반적으로 K_0 값과 $\delta = \phi'$ 적용시 β 값은 0.25~0.40 범위에 있으나 보다 일반적인 추천값은 표 2.4에 나타나 있다.

표 2.4 추천 β 값

β	흙의 종류
0.02	piles coated with bitumen
0.05	piles with an annulus filled with bentonite
0.20	piles driven in fine grained very soft or organic soils use 0.15 for open ended piles
0.15	piles bored in fine grained soft or organic soils
0.10	piles bored, with casing left in place, in fine grained soft or organic soils
0.30	piles driven in fine grained stiff to very stiff soils
0.20	piles bored in fine grained stiff to very stiff soils
0.15	piles bored, with casing left in place, in fine grained stiff to very stiff soil
0.10	piles driven in fine grained sensitive soils
0.35	sand, gravel, not dense
0.45	sand, gravel, medium dense
0.5 ~ 1 and more	sand, gravel, very dense driven piles lead to higher values than bored piles

한편 기존 연구결과 β 방법을 사용한 주면마찰력 산정시 다음과 같은 문제점들이 있다고 보고되고 있다.

- ① q' 의 값은 장대 말뚝에서 상당히 커지기 때문에 f_s 의 한계값 설정에 문제가 있다. 이에 대한 해결책으로 기존 연구결과 주면마찰이 감소하는 한계상태를 L/D 가 15에서 20사이의 값으로 규정하여 식 (2.4)와 같이 근사적으로 f_s 를 수정하고 있다.

$$f_s = \beta q' \left(1 - \log \frac{L/D}{(L/D)_{cr}} \right) \quad (2.4)$$

여기서 $(L/D)_{cr} =$ 한계비로 15~20 적용

- ② 마찰각을 표시할 때 $\tan\phi'$ 과 $\tan\delta$ 중 어떤 값을 사용하느냐에 문제가 있다. 많은 연구에 의하면 지반과 말뚝재료 사이의 실제마찰각(δ)은 $0.5 \sim 0.75\phi'$ 범위를 갖는 것으로 알려지고 있다.
- ③ 수평토압계수 K 산정이 문제가 된다. Mansur과 Hunter(1970)는 방대한 시험자료에 의해 아래와 같이 말뚝재질 및 시험방법에 따라 K_0 값을 다르게 제시하고 있다.

표 2.5 제안된 K_0 값

말뚝 및 시험	K_0
H형 말뚝	1.4 - 1.9
강관 말뚝	1.2 - 1.3
기성콘크리트 말뚝(정사각형)	1.45 - 1.6
나무말뚝	1.25
인발시험	0.4 - 0.9

2.1.4 Meyerhof의 방법

1976년 Meyerhof는 사질토의 주면마찰력에 대해 식 (2.5)를 제안하면서 항타관입된 말뚝에 있어서 평균주면마찰력의 한계치를 10 t/m^2 으로 제안하였다. 그는 H 말뚝처럼 항타시 배토량이 작은 말뚝은 식 (2.5)의 절반을 사용하면 안전측일 것이라고 제안하였다.

1988년 Broms도 점성토에서 균열이나 일축압축 시험의 부정확성등 때문에 비배수전단강도를 구하는 것보다 표준관입 시험값을 사용하여 주면마찰력을 구하는 것이 좋다고 제안하면서 식 (2.5)를 잔류토와 풍화암에 대해서도 쓸수있다고 제안하였다.

$$f_s = 0.2\bar{N} \text{ ton}/m^2 \quad (2.5)$$

여기서, \bar{N} : 사질토층 N치의 평균치

2.1.5 API RP2A Code

API에서 추천하는 말뚝의 주면마찰력 산정은 점성토의 경우에는 점토의 비배수 전단강도(s_u)를 사질토의 경우에는 유효수직응력(σ'_v)을 이용한 방법을 권장하고 있다.

(1) 점성토 지반

$$f = \alpha s_u \quad (2.6)$$

여기서, α : 무차원계수(≤ 1.0)

$$\begin{cases} s_u/q' \leq 1.0 \text{의 경우, } \alpha = 0.5(s_u/q')^{-0.5} \\ s_u/q' > 1.0 \text{의 경우, } \alpha = 0.5(s_u/q')^{-0.25} \end{cases} \quad (2.7)$$

(2) 사질토 지반

$$f = K_s q' \tan \delta \quad (2.8)$$

여기서, f : 한계치로 표 2.6과 같이 규정

K_s : 횡방향토압계수(폐색되지 않은 말뚝의 경우 $K_s = 0.8$, 완전폐색되거나 폐단말뚝인 경우 $K_s = 1.0$)

δ : 말뚝의 벽면마찰각

표 2.6 일반 사질토 지반에 설치된 말뚝에 대한 설계계수

지반의 성질	δ (°)	f 의 극한치 (t/m ²)	N_d
매우 느슨한 사질토 느슨한 사질토-실트 보통 실트	15	4.88	8
느슨한 사질토 보통 사질토-실트 조밀한 실트	20	6.83	12
보통 사질토 조밀한 실트	25	8.30	20
조밀한 사질토 매우 조밀한 사질토-실트	30	9.76	40
조밀한 자갈 매우 조밀한 사질토	35	11.71	50

2.2 주면 마찰력에 영향을 주는 기타요인

2.2.1 잔류응력

압축하중을 받다가 말뚝두부의 하중이 제거되면 말뚝은 초기의 길이로 회복되려고 한다. 이때 말뚝의 상부는 주면의 흙에 대해 충분히 위로 움직여 부 마찰력을 발생시키는데, 말뚝 하부의 잔류주면 마찰에 의해 균형을 이루게 되며 또한 가해진 압축 하중이 충분히 크다면 말뚝의 잔류 선단 하중에 의해서도 균형을 이루게 된다.

말뚝의 항타과정은 동역학적 충격력에 의해 말뚝 두부에 주기적으로 하중을 재하하고 제하하기 때문에 타입 말뚝에는 항상 상당량의 잔류응력이 존재하며 이 잔류응력은 말뚝의 하중-침하량에 영향을 미친다.

잔류응력의 크기와 방향은 지반의 성층 상태에 따라 다르며 흙의 creep과 하중 이력에 영향을 받는다. 지금까지 알려진 바로는 creep에 의한 잔류 응력의 감소량이 상세히 파악되지 않았으나 반복재하시 사질토에서 지지력 감소가 크게 나타난다는 점과 한두번의 인발시험으로 완전히 없어지지 않기 때문에 재하시험 결과에 영향을 미친다고 보고되고 있다.

2.2.2 간극수압의 소산

1986년 Azzouz는 점성토에 관입시킨 Piezo-Lateral Stress Cell의 거동연구결과를 토대로 시간경과에 따라 토압 계수는 K_0 의 두배까지 증가하였다고 보고하고 있다. 따라서 말뚝의 주면마찰력은 주면 둘레의 유효응력에 지배되기 때문에 시간이 경과함에 따라 주면 저항의 증가를 가져온다. 이는 말뚝을 타입 하는 과정에서 유발되는 과잉 간극 수압에 의해 간극수가 수평 방향으로 이동하는 것과 관련이 있다.

3. 재하 시험

3.1 사례 1

재하시험은 1991년부터 현대건설이 유조선 정박시설 2개와 LPG선의 정박시설 1기 및 길이 2100m 부두시설을 건설하는 곳으로 말레이시아의 말라카 해협에서 실시하였다. 공사에는 직경이 다른 6 종류(610, 716, 762, 810, 864, 914 mm)의 강관 말뚝을 2,237본을 향타하였으며, 사용된 햄머는 램 무게가 7.2 ton이고 낙하고가 2.5 m로 최대 전달에너지가 21.6ton-m인 Mitsubishi사에서 제작한 디젤 해머 MH72B를 사용하였다. 이중 직경이 610 mm인 말뚝 1개, 760 mm인 말뚝 3개, 864 mm인 말뚝 및 914 mm인 말뚝 각 1개에 대해 향타 시공이 완료된 25-43일 후에 인발재하시험을 실시하였다.

3.1.1 지반조건

본 사례 현장의 기초지반은 층서에 따라 상부로 부터 매우 연약한 해성 점토층, 느슨해서 중간 조밀 정도의 실트질 모래층, 조밀에서 매우 조밀한 실트질 모래층, 화강암층으로 구성되어 있다 (표 3.1 참조). 각 말뚝에 해당하는 주상도는 그림 3.1에 나타내었다.

표 3.1 지반 조건

말 뚝	층두께	흙	% FINE	N 치 평균	수 중 단위중량	점착력 (t/m ²)
TP-1	8.80	실트질 점토(연약)	90.00		0.55	2.5
	4.30	실트질 모래(느슨-중간 조밀)	20.00	20.00	0.90	
	6.19	실트질 모래(매우 조밀)	25.00	187.00	0.90	
TP-2	6.70	실트질 점토(연약)	90.00		0.53	1.5
	4.50	실트질 모래(느슨-중간 조밀)	22.00	20.00	1.00	
	7.20	실트질 모래(매우 조밀)	26.00	92.60	1.00	
TP-3	7.20	실트질 점토(연약)	100.00		0.55	2.0
	5.00	실트질 모래(느슨-중간 조밀)	26.00	20.00	0.90	
	7.50	실트질 모래(조밀)	45.00	32.00	1.00	
	7.34	실트질 모래(매우 조밀)	38.00	64.00	1.00	
TP-4	2.54	실트질 점토(연약)	100.00		0.55	2.0
	5.00	실트질 모래(느슨-중간 조밀)	26.00	20.00	0.90	
	7.50	실트질 모래(조밀)	45.00	32.00	1.00	
	11.30	실트질 모래(매우 조밀)	38.00	126.00	1.00	
TP-5	9.74	실트질 모래(조밀)	37.00	30.50	0.90	
	8.03	실트질 모래(매우 조밀)	21.00	217.00	1.20	
TP-6	2.29	실트질 점토(매우 연약)	100.00		0.40	0.5
	3.80	실트질 모래(느슨-중간 조밀)	26.00	20.00	1.00	
	5.56	실트질 모래(조밀)	45.00	40.00	1.10	

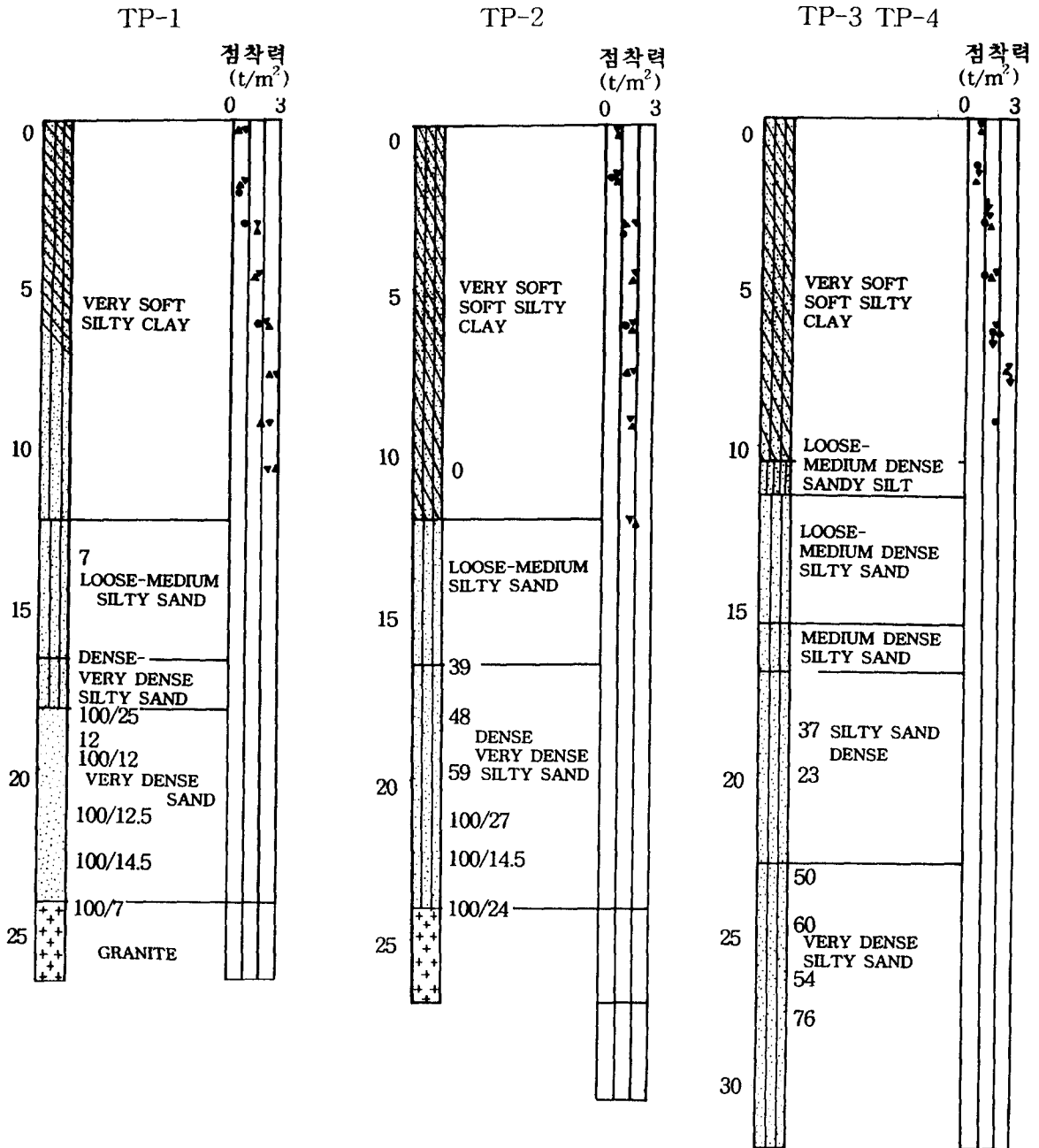


그림 3.1(a) 말뚝 TP-1, TP-2, TP-3, TP-4용 주상도

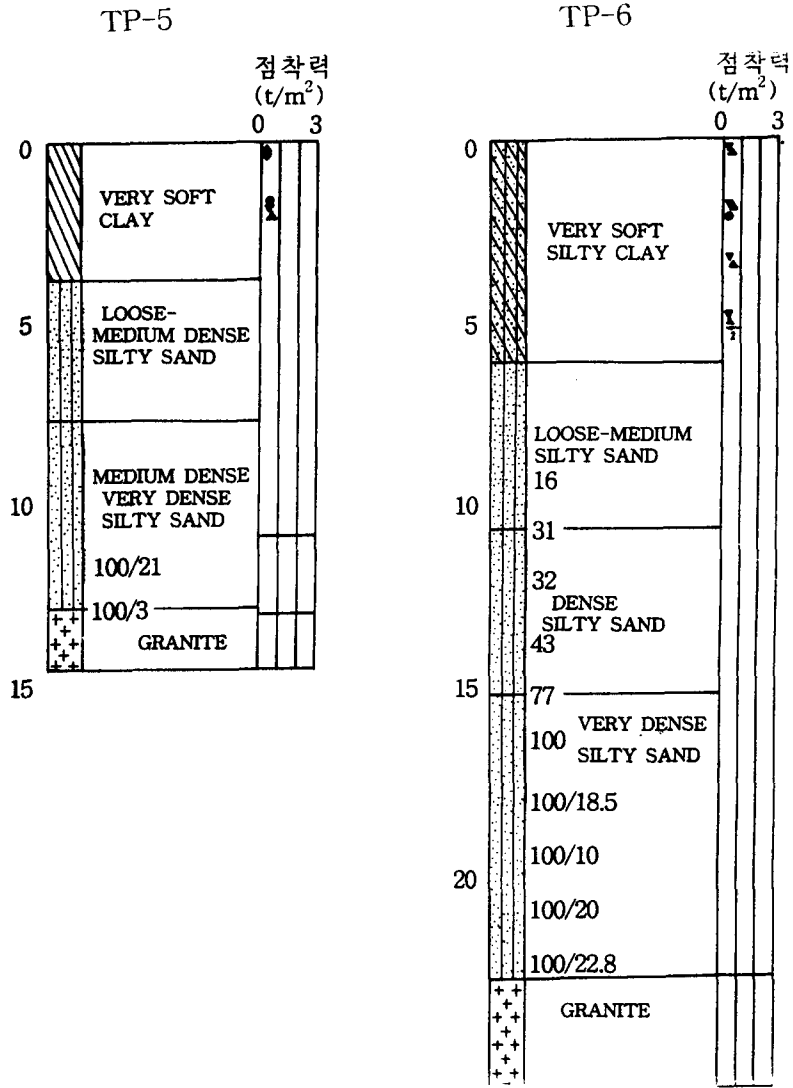


그림 3.1(b) 말뚝 TP-5, TP-6용 주상도

3.1.2 말뚝제원

사용된 말뚝은 탄성 계수가 $2.04 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$ 이고, 직경이 610-914 mm의 강관 말뚝으로 길이는 25-49 m이며 약 11-27 m까지 근입시켰다. 말뚝들은 해상에서 항타선을 이용하여 항타하였으며 해저면으로부터 평균 23.8 m(13.35~30.6 m)의 자유장을 가졌다. 강관의 두께는 16-19 mm이며 TP-5를 제외한 모든 말뚝은 선단 1 m를 두께 25 mm가 되도록 보강하였다. 이 보강은 강관 내부에만 되어 외부 직경에는 차이가 없으며, 풍화된 화강암에 근입되기 때문에 선단의 파손을 막기 위해 용접하여 보강하였다. 시험말뚝의 규격 및 제원은 표 3.2와 같다.

표 3.2 말뚝의 제원 및 규격

말뚝	TP-1	TP-2	TP-3	TP-4	TP-5	TP-6
총 길이	49.00	49.00	49.40	49.40	41.25	25.00
관입 길이	19.30	18.40	26.94	26.34	17.77	11.65
자유장(m)	29.7	30.6	22.46	23.06	23.48	13.35
직경(mm)	762.0	762.0	914.0	762.0	864.0	610.0
관두께(mm)	16.00	16.00	19.00	16.00	16.00	16.00
항타일	5.6	5.10	5.12	5.19	9.18	6.5
시험일(경과일수)	6.1(25)	6.10(30)	6.22(41)	6.29(43)	10.13(25)	6.29(24)
설계 하중(t)	80.00	121.00	257.00	60.00	90.00	76.00
시험 하중(t)	360	544	1028	420	652	315
시험하중/설계하중	450	450	400	700	724	414
해당 시추공	NB-5	NB-6	NB-7	NB-7	NB-11	NB-2

3.1.3 말뚝 재하시험

말뚝 재하 시험은 ASTM D3689에 있는 표준 재하 방법에 따라 인발 재하 시험을 하였다. 시험은 3번의 반복 재하 시험을 하였으며, 첫 반복 재하는 4단계로 나누어 설계 하중까지 재하(load)한 후 24시간 동안 그 설계 하중을 유지한 후 4단계로 나누어 1시간마다 재하(unload)하였다. 두번째 반복 재하는 8단계로 나누어 1시간마다 하중을 증가하여 설계 하중의 300%까지 올려서 24시간 유지한 후 8단계로 1시간마다 재하하였다. 세번째 반복 재하는 20분마다 단계하중을 가하여 말뚝에 따라 최소 400%에서 최대

724% 까지 올린후 20분 방치한후 20분마다 단계하중을 제하하였다. 인발 재하 시험은 항타후 약 25일-43일 후에 실시하였다.

3.1.4 재하시험 결과

그림 3.2에서 그림 3.7은 말뚝 TP-1, TP-2, TP-3, TP-4, TP-5, TP-6의 말뚝 재하 시험의 결과를 Davisson의 한계선과 함께 도시하였다.

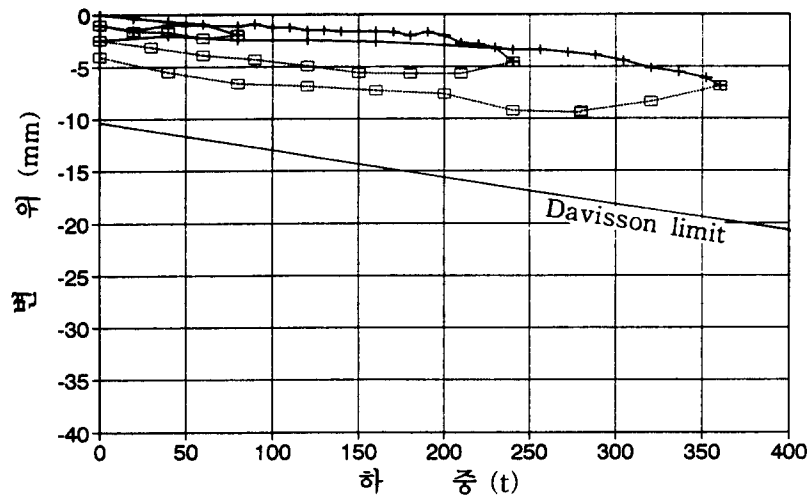


그림 3.2 TP-1 말뚝의 하중-침하 곡선

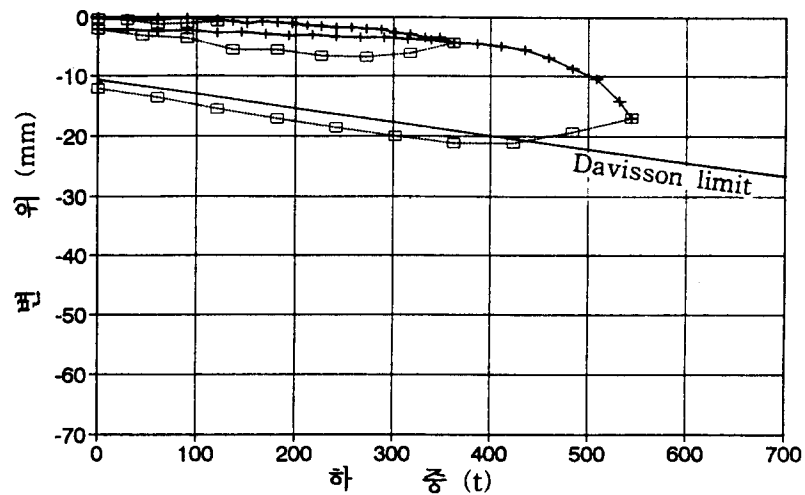


그림 3.3 TP-2 말뚝의 하중-침하 곡선

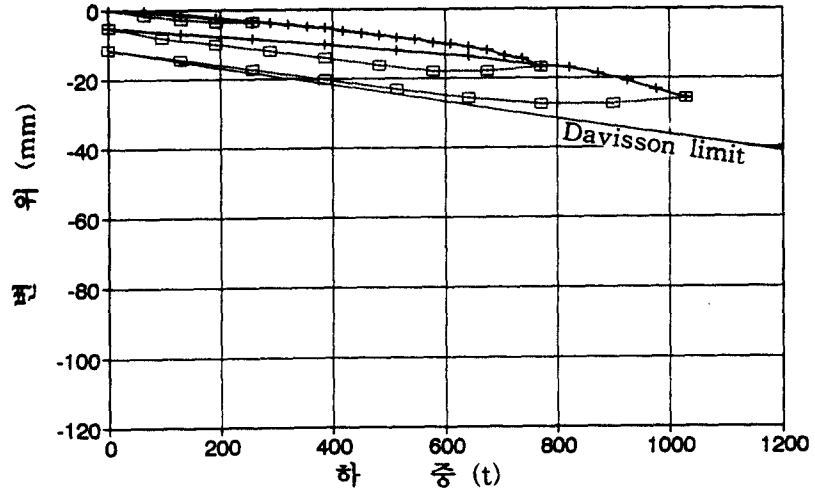


그림 3.4 TP-3 말뚝의 하중-침하 곡선

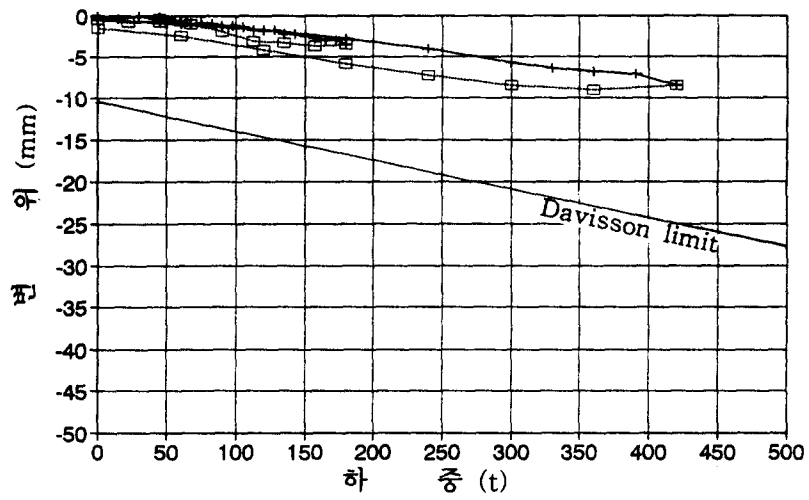


그림 3.5 TP-4 말뚝의 하중-침하 곡선

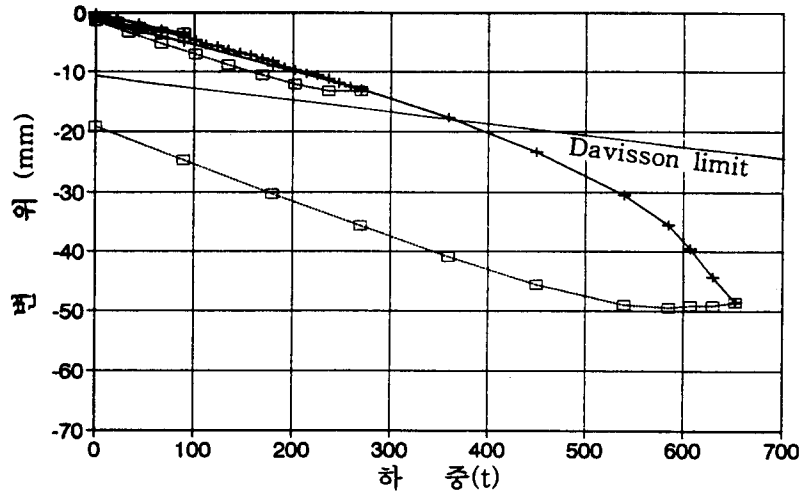


그림 3.6 TP-5 말뚝의 하중-침하 곡선

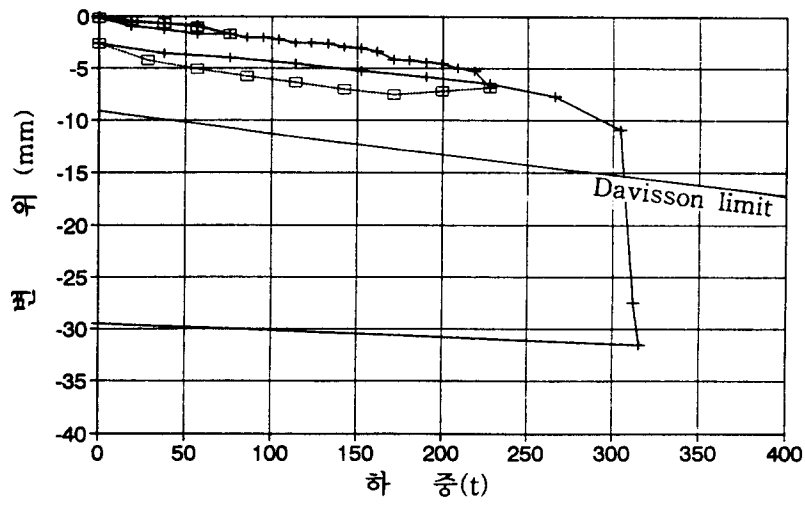


그림 3.7 TP-6 말뚝의 하중-침하 곡선

3.1.5 결과분석

말뚝 재하시험에 의해 분석된 단위마찰력을 기존공식과 비교하기 위하여 Meyerhof식과 API-RP2A법, λ법의 3가지를 적용하여 극한 주면마찰력을 산정하였다(표 3.4 참조). 이를 위하여 지층을 점성토층과 사질토층으로 구분하고 층마다 N치와 점착력 값의 평균 및 수중단위중량을 계산에 적용하였다. 재하 시험으로부터 구한 각 말뚝의 극한 주면마찰력과 단위 극한 주면마찰력은 표 3.3과 같다.

표 3.3 재하 시험에서 분석된 극한 주면마찰력과 단위 극한 주면마찰력

	설계하중 (t)	시 험 값		시 험 분 석 값	
		최대시험하중 (t)	최 대 재 하 율 (%)	극한주면마찰력 (t)	단위극한주면마찰력 (t/m ²)
TP-1	80	360	80.2	449	9.7
TP-2	121	544	90.8	599	13.6
TP-3	257	1028	66.7	1542	19.9
TP-4	60	420	62.7	670	10.6
TP-5	90	652	72.0	905	16.7
TP-6	76	315	98.4	320	14.3
평 균			78.5		14.13

표 3.4(a) Meyerhof 방법에 의한 계산

말뚝	층 두께	N 치 평균	수 증 단위중량	접착력 (t/m ²)	평균상재하중 (t/m ²)	주면 면적 (m ²)	β	0.2N (t/m ²)	극한 마찰력 (t)	계 (t)
TP-1	8.80		0.55	2.5	2.42	21.07	0.29	-	14.56	203.93
	4.30	20.00	0.90		6.78	10.29	-	4.0	41.17	
	6.19	187.00	0.90		11.50	14.82	-	10.0	148.2	
TP-2	6.70		0.53	1.5	1.78	16.04	0.29	-	8.22	223.71
	4.50	20.00	1.00		5.80	10.77	-	4.0	43.09	
	7.20	92.60	1.00		11.65	17.24	-	10.0	172.4	
TP-3	7.20		0.55	2.0	1.98	20.67	0.26	-	10.65	416.6
	5.00	20.00	0.90		6.21	14.36	-	4.0	57.43	
	7.50	32.00	1.00		12.21	21.54	-	6.4	137.83	
	7.34	64.00	1.00		19.63	21.08	-	10.0	210.8	
TP-4	2.54		0.55	2.0	0.70	6.08	0.26	-	1.11	434.4
	5.00	20.00	0.90		3.65	11.97	-	4.0	47.88	
	7.50	32.00	1.00		9.65	17.95	-	6.4	114.91	
	11.30	126.00	1.00		19.05	27.05	-	10.0	270.5	
TP-5	9.74	30.50	0.90		4.38	26.44	-	6.1	161.27	379.27
	8.03	217.00	1.20		13.58	21.80	-	10.0	218.0	
TP-6	2.29		0.40	0.5	0.46	4.39	0.31	-	0.63	114.99
	3.80	20.00	1.00		2.82	7.28	-	4.0	29.13	
	5.56	40.00	1.10		7.77	10.66	-	8.0	85.24	

표 3.4(b) API RP2A 방법에 의한 계산

말뚝	층 두께	N 치 평균	수중 단위 중량	점착력 (t/m ²)	평균상 재하중 (t/m ²)	주면 면적 (m ²)	α	k	δ (도)	극한 마찰력 (t)	계 (t)	
TP-1	8.80		0.55	2.5	2.42	21.07	0.49	0.8	25	25.91	147.3	
	4.30	20.00	0.90		6.78	10.29	-			35		26.02
	6.19	187.00	0.90		11.50	14.82	-			95.42		
TP-2	6.70		0.53	1.5	1.78	16.04	0.54	0.8	25	13.09	148.9	
	4.50	20.00	1.00		5.80	10.77	-			35		23.31
	7.20	92.60	1.00		11.65	17.24	-			112.49		
TP-3	7.20		0.55	2.0	1.98	20.67	0.5	0.8	25	20.57	407.0	
	5.00	20.00	0.90		6.21	14.36	-			30		33.26
	7.50	32.00	1.00		12.21	21.54	-			35		121.45
	7.34	64.00	1.00		19.63	21.08	-			231.75		
TP-4	2.54		0.55	2.0	0.70	6.08	0.3	0.8	25	3.59	388.5	
	5.00	20.00	0.90		3.65	11.97	-			30		16.28
	7.50	32.00	1.00		9.65	17.95	-			35		80.00
	11.30	126.00	1.00		19.05	27.05	-			288.59		
TP-5	9.74	30.50	0.90		4.38	26.44	-	0.8	30	53.52	219.4	
	8.03	217.00	1.20		13.58	21.80	-			35		165.85
TP-6	2.29		0.40	0.5	0.46	4.39	0.48	0.8	25	1.05	47.0	
	3.80	20.00	1.00		2.82	7.28	-			30		7.65
	5.56	40.00	1.10		7.77	10.66	-			38.26		

표 3.4(c) λ 방법에 의한 계산

말 뚝	층 두께	N 치 평균	수중 단위 중량	점착력 (t/m ²)	평균상 재하중 (t/m ²)	주면 면적 (m ²)	λ	P'+2C	극한 마찰력 (t)	계 (t)
TP-1	8.80		0.55	2.5	2.42	21.07	0.18	7.42	27.37	69.42
	4.30	20.00	0.90		6.78	10.29		6.78	12.21	
	6.19	187.00	0.90		11.50	14.82		11.5	29.83	
TP-2	6.70		0.53	1.5	1.78	16.04	0.18	4.78	13.69	60.73
	4.50	20.00	1.00		5.80	10.77		5.80	11.17	
	7.20	92.60	1.00		11.65	17.24		11.65	35.88	
TP-3	7.20		0.55	2.0	1.98	20.67	0.15	5.98	18.82	135.41
	5.00	20.00	0.90		6.21	14.36		6.21	13.57	
	7.50	32.00	1.00		12.21	21.54		12.21	40.03	
	7.34	64.00	1.00		19.63	21.08		19.63	62.98	
TP-4	2.54		0.55	2.0	0.70	6.08	0.15	4.7	4.39	116.9
	5.00	20.00	0.90		3.65	11.97		3.65	6.71	
	7.50	32.00	1.00		9.65	17.95		9.65	26.62	
	11.30	126.00	1.00		19.05	27.05		19.05	79.18	
TP-5	9.74	30.50	0.90		4.38	26.44	0.18	4.38	21.01	74.7
	8.03	217.00	1.20		13.58	21.80		13.58	53.68	
TP-6	2.29		0.40	0.5	0.46	4.39	0.22	1.46	1.39	23.8
	3.80	20.00	1.00		2.82	7.28		2.82	4.44	
	5.56	40.00	1.10		7.77	10.66		7.77	17.93	

3가지 방법을 적용한 말뚝의 지지력 계산 결과는 표 3.5와 같다.

표 3.5 재하시험에 의해 추정된 마찰력과 공식에 의해 계산된 마찰력

말뚝	관입 길이 (m)	직경 (mm)	관입 길이 / 직경	시험 분석값 극한 마찰력 (t)	계산 값			계산값/ 시험분석 값		
					Meyerhof (t)	API (t)	λ (t)	Meyerhof (%)	API (%)	λ (%)
TP-1	19.8	762	25.3	449	204	147	69	45	33	15
TP-2	18.4	762	24.2	599	224	149	61	37	25	10
TP-3	26.94	914	29.5	1542	417	407	135	27	26	9
TP-4	26.34	762	34.6	670	434	389	117	65	58	17
TP-5	17.77	864	20.6	805	379	219	75	47	27	9
TP-6	11.65	610	19.1	320	115	46	24	36	14	7
평균	20.15		25.55					42.8	30.5	11.2

따라서, 표 3.5에서 나타난 바와 같이 Meyerhof의 계산값이 실제 시험 자료 분석값의 42.8 %로 나타났으며 API 방법과 기본적으로 점토층에서 유효 응력을 고려하는 λ 방법은 30.5 %, 11.2 %의 추정치가 나와 실제 마찰력을 과소 평가하고 있다.

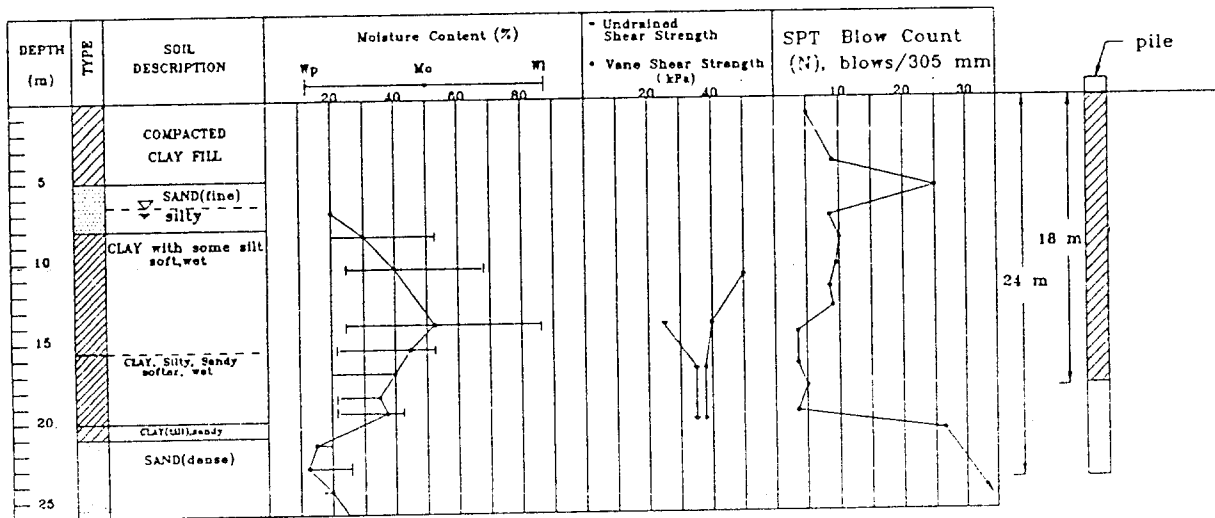
또한 시험 결과 말뚝에서 발현된 단위 주면 마찰 저항력은 표 3.3에서 나타난 바와 같이 9.7 t/m²에서 19.9 t/m²으로 일반적으로 알려진 한계치 10 t/m²을 상회하고 있다.

3.2 사례 2

1989년 10월부터 90년 2월에 걸쳐 캐나다 Edmonton시에서 12km 떨어진 고속도로 16X주변에서 4본의 강관말뚝(324mm 직경, 24m 길이)을 사용하여 인발재하시험을 수행하였다. 말뚝재하시험은 항타 시공이 완료된 45일 후에 실시하였다.

3.2.1 지반조건

본 사례 현장의 기초지반은 층서에 따라 상부로 부터 매립층, 실트질 점토층, 매우 조밀한 모래층으로 구성되어 있다 (그림 3.8 참조). 현장에서 각 말뚝이 위치는 그림 3.9와 같다.



Note: Undrained Shear Strength values are from unconfined compression tests

그림 3.8 지반조건

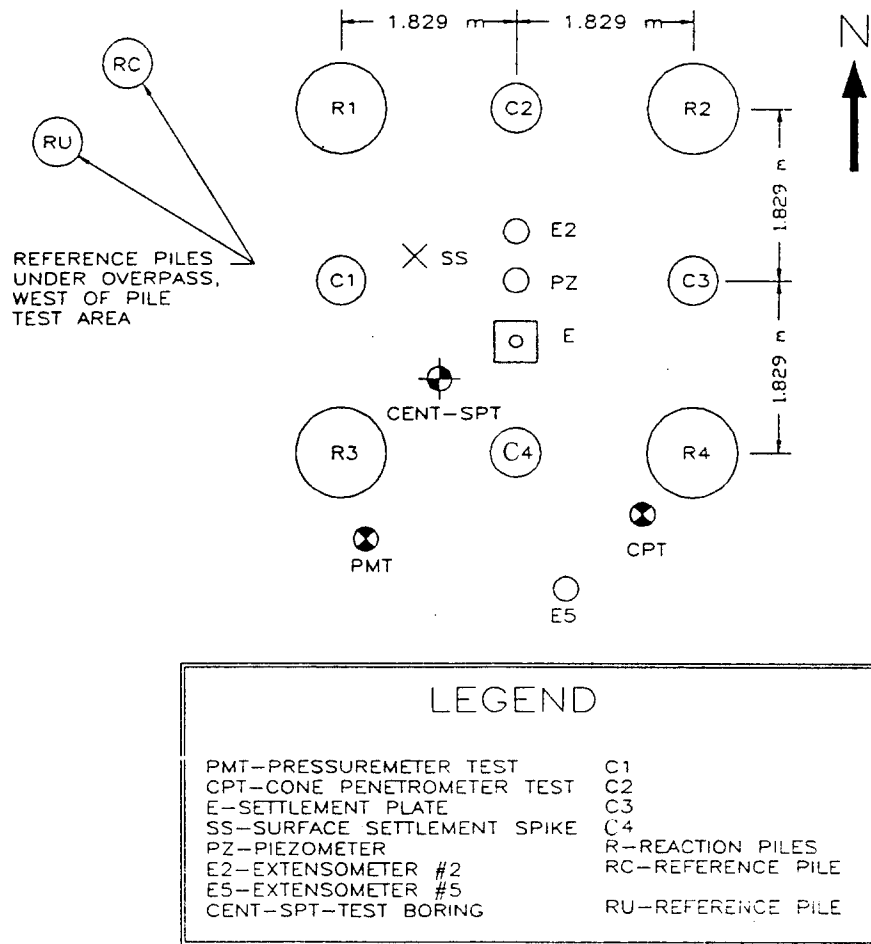


그림 3.9 말뚝 배치도

3.2.2 말뚝 재하시험

말뚝 재하 시험은 표준 재하 방법에 따라 극한하중상태까지 인발 재하 시험을 하였다. 시험은 15분단위로 10단계까지 하중을 재하하여 예상되는 극한하중까지 재하(loading)하였다. 재하시험결과는 그림 3.10-그림 3.13에 나타나 있다.

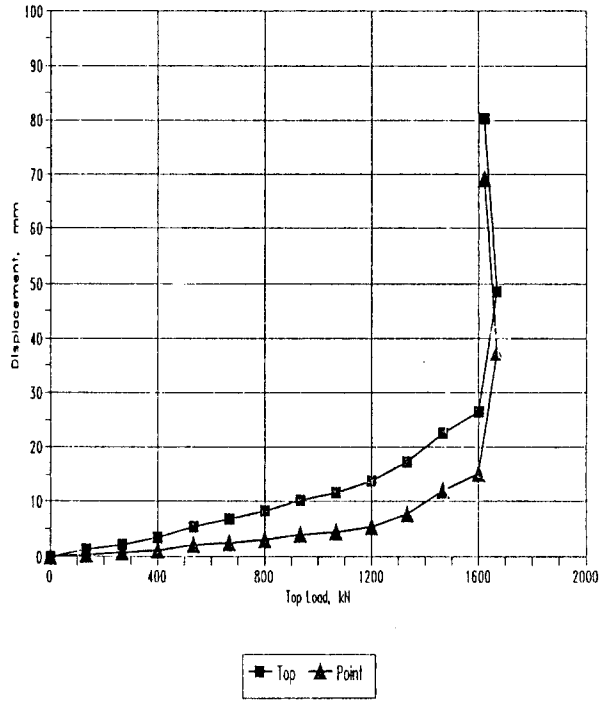


그림 3.10 하중-변위 곡선(C1 말뚝인발시험)

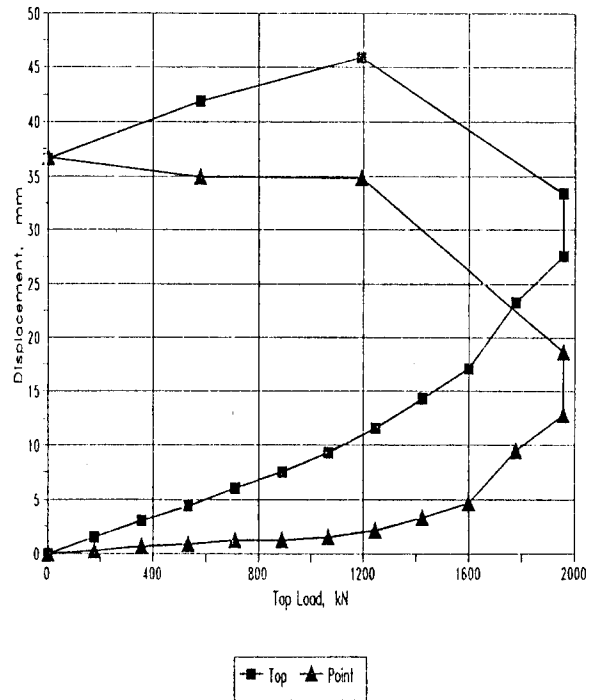


그림 3.11 하중-변위 곡선(C2 말뚝인발시험)

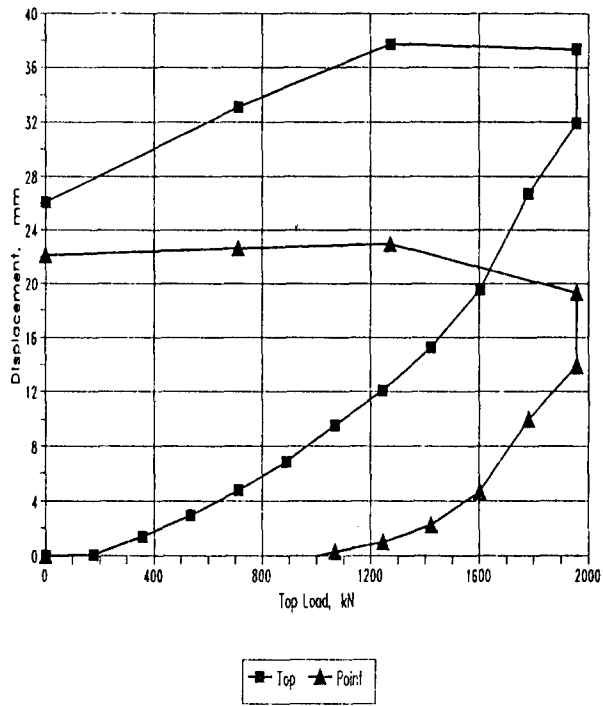


그림 3.12 하중-변위 곡선(C3 말뚝인발시험)

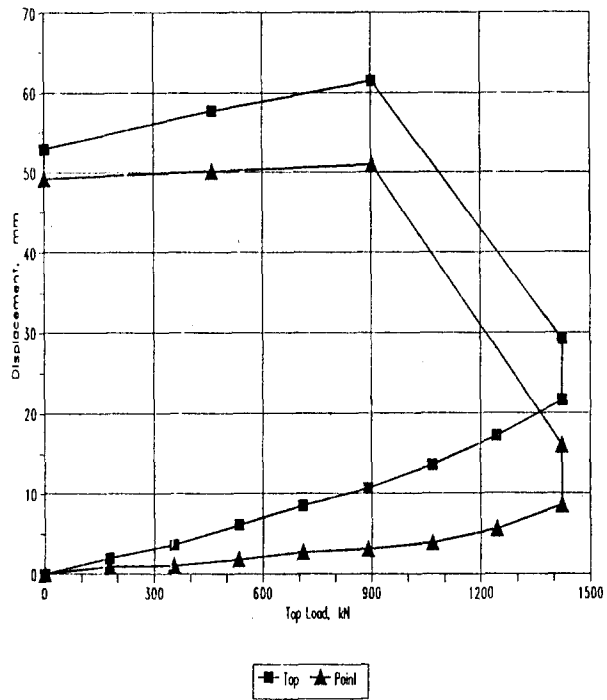


그림 3.13 하중-변위 곡선(C4 말뚝인발시험)

3.2.3 결과분석

표 3.6은 재하시험 결과 산정된 주면마찰력의 크기를 나타낸다. 분석결과 말뚝의 단위 주면 마찰 저항력은 일반적으로 알려진 한계치 10 t/m^2 을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

표 3.6 인장 재하시험결과

Pile	Ultimate Load, kN	Fill		Clay		Sand	
	Load Cell	F_f , kN	f_f , kN/m^2	F_c , kN	f_c , kN/m^2	F_s , kN	f_s , kN/m^2
C1	+1670	+370	-67.4	+350	-21.3	+950	-216.3
C2	+1950	+120	-21.9	+695	-42.2	+1135	-258.4
C3	+1950	+70	-12.8	+580	-35.2	+1300	-296.0
U4	+1425	+75	-13.7	+475	-28.8	+875	-199.2

주 : - : 압축, + : 인장

3.3 사례 3

1990년 6월부터 90년 11월에 걸쳐 미국 New Orleans시의 고속도로 47과 90번이 교차되는 주변에서 말뚝재질별 영향정도를 파악하고자 강관말뚝 1본(324mm직경, 10mm두께, 21m 길이) 과 PC 말뚝 1본(365mm×365mm 사각말뚝) 그리고 나무말뚝 1본(두부직경 432mm, 선단직경 229mm 인 tapered 말뚝)을 사용하여 인발재하시험을 수행하였다.

3.3.1 지반조건

본 사례 현장의 기초지반은 층서에 따라 상부로 부터 매립층이 2m 두께로 있으며, 그 아래는 대부분 점성토로 구성되었으며 얇은 실트나 모래층이 점토층사이에 끼어있다. (그림 3.14 참조). 현장에서 각 말뚝이 위치는 그림 3.15와 같다.

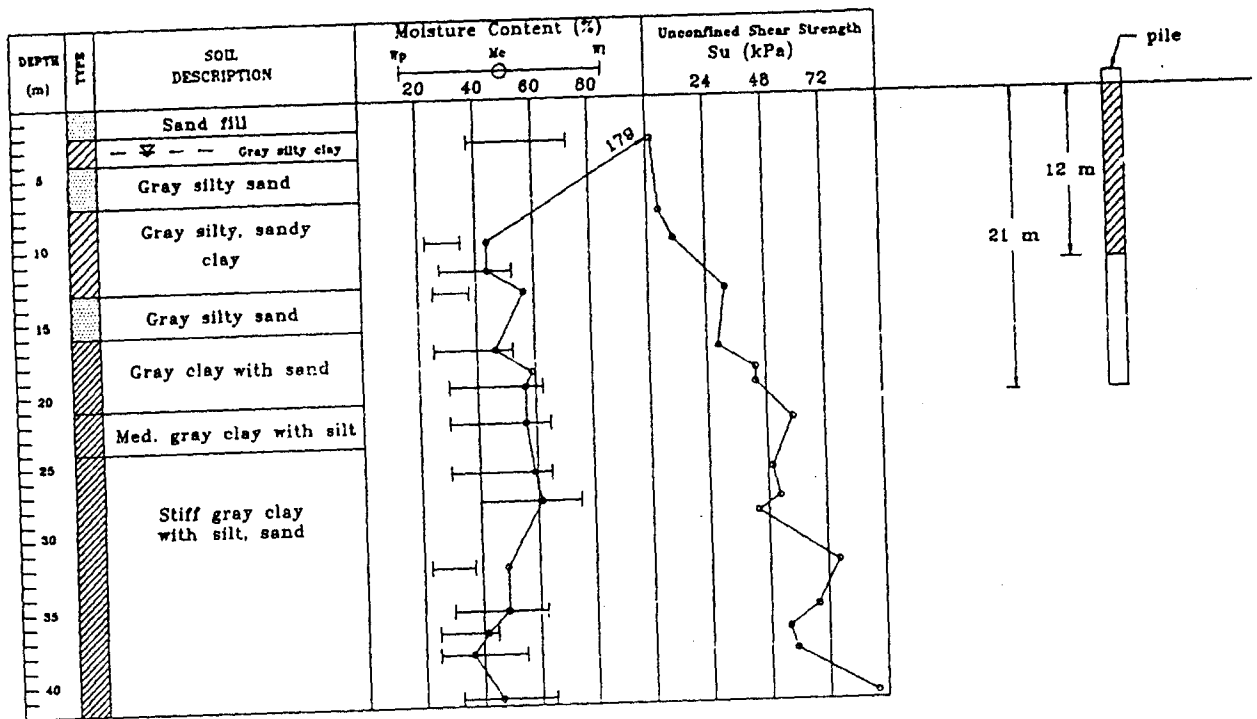


그림 3.14 지반조건

3.3.2 말뚝 재하시험

말뚝 재하 시험은 표준 재하 방법에 따라 극한하중상태까지 인발 재하 시험을 하였다. 시험은 15분단위로 10단계까지 하중을 재하하여 예상되는 극한하중까지 재하(loading)하였다. 재하시험결과는 그림 3.16-그림 3.18에 나타나 있다.

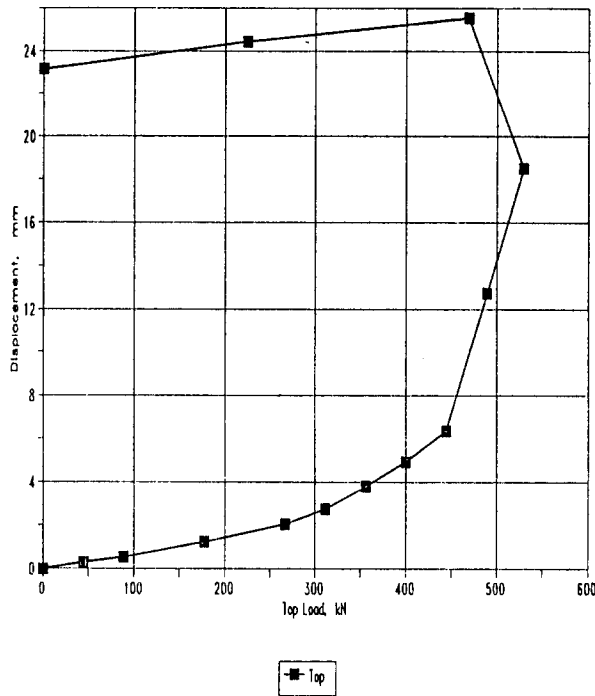


그림 3.16 하중-변위 곡선(CPU 말뚝인발시험)

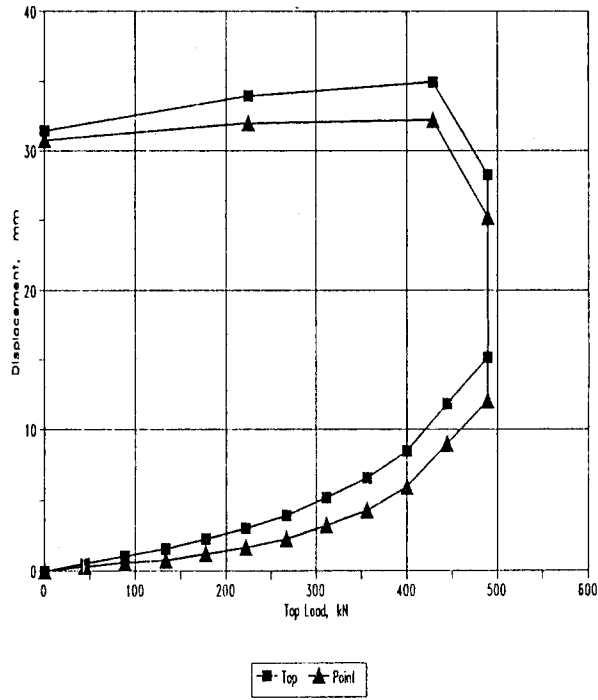


그림 3.17 하중-변위 곡선(SPU 말뚝인발시험)

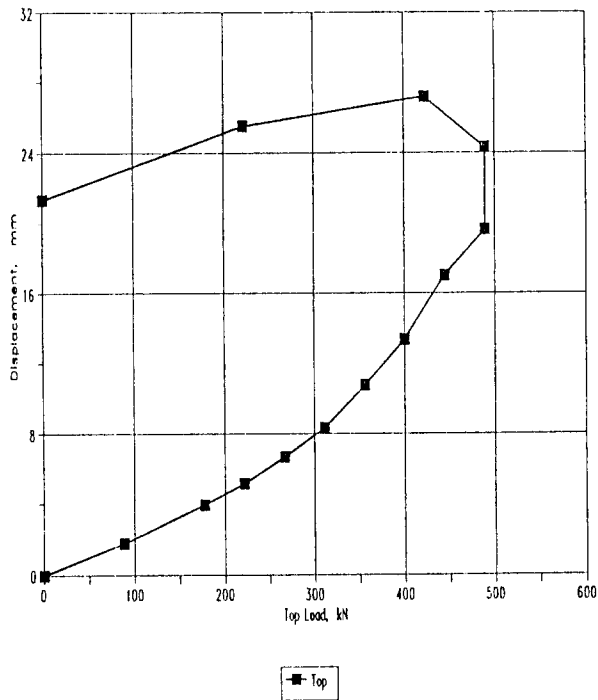


그림 3.18 하중-변위 곡선(TPU 말뚝인발시험)

3.3.3 결과분석

표 3.7은 재하시험 결과 산정된 주면마찰력의 크기를 나타낸다. 분석결과 말뚝의 단위 주면 마찰 저항력은 일반적으로 알려진 한계치 10 t/m^2 을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

표 3.7 인장재하시험 결과

Pile	Ultimate Load, kN	Fill		Soft Clay		Medium Clay	
	Load Cell	F_t , kN	f_t , kN/m ²	F_c , kN	f_c , kN/m ²	F_s , kN	f_s , kN/m ²
CPU	+160	+20	-7.0	+320	-17.3	-35	+4.9
SPU	+490	+15	-7.0	+250	-19.0	+215	-42.2
TPU	+490	+160	-61.0	+270	-19.0	+60	-14.7

주 : - : 압축, + : 인장

4. 결 언

본고에서는 말뚝의 연직지지력 산정의 근간이 되는 주면마찰력을 향타 관입된 강관말뚝의 인발 시험을 통해 극한 주면마찰력을 산정하고, 기존 공식으로 계산한 지지력 값과 비교분석 하였다.

본 연구결과 기존의 표준관입시험으로부터 말뚝의 지지력을 산정하는 공식은 특히 말뚝의 대구경, 대심도에 따른 주면마찰력의 변화를 고려하지 못하고 있다. 따라서 말뚝 지지력 예측의 신뢰도를 높이기 위해서는 지지력 공식에 의한 산정은 물론 말뚝재하시험을 병행하여 실제 지지력을 확인할 필요가 있다고 본다. 그 이유는 지지력 공식에 의한 방법들은 말뚝재질, 지반조건, 말뚝길이, 말뚝직경에 따라 제안자마다 서로 상이한 결과가 나올 수 있기 때문이다. 따라서 외국과는 지반조건, 시공기술수준, 말뚝재료 등이 상이한 국내현장에서도 말뚝재하시험 등을 이용한 지지력 값에 대한 확인이 필요한 실정이다.

참 고 문 헌

1. Meyerhof, G. G., "Penetration Tests and Bearing Capacity Cohesionless Soils." *J. Geotech. Engrg.*, Div., ASCE, 102(GT3), 1976, pp.195-228.
2. Meyerhof, G. G., "Bearing Capacity and Settlement of Pile Foundations." *Journal of Geotechnical Engineering Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 102, No. GT3, ARCH, 1976. pp.197-228.
3. American Petroleum Institute. (1993). "Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms." *API RP2A*, 20th Ed., American Petroleum Institute.
4. Vijayvergia, V. N., and Focht, J. A., "A New Way to Predict Capacity of Piles in Clay." *OTC Paper*, 1718, 4th Offshore Technology Conference, Houston, TX.
5. Tomlinson, M. J., "Some Effects of Pile Driving on Skin Friction." *Proc. of the Conference on Behavior of piles*, ICE, London, 1971, pp107-114.
6. Burland, J. B. (1973). "Shaft Friction of Piles in Clay-A Sample Fundamental Approach." *Ground Engrg.*, 6(3), 30-42.
7. Chin, F. K., "Estimation of the Ultimate Load of Piles not Carried to Failure", *Proc. 2nd Southeast Asian Conf. on Soil Engrg.*, 1970, pp.81-90.
8. Davission, M. T., "High Capacity Piles." *Proceeding, Lecture Series, Innovations in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, 1972, 52 pp.