

항타시공성을 고려한 강관말뚝의 설계하중 결정

Determination of allowable load of steel tubular piles taking
driveability into consideration

이명환*, 홍헌성*, 이원제*, 전영석*

Abstract

The allowable load of steel tubular piles is usually determined either by the static bearing capacity formulae or by the empirical pile bearing capacity correlations based on the SPT N values. Since these methods of pile bearing capacity determination do not take the pile driveability into consideration, the actual allowable load as determined from pile loading test indicates severe deviation from the design value. Analysing the pile driveability making use of WEAP prior to finalization of design load seems essential in the pile design.

요 지

설계시 강관말뚝의 지지력은 정역학적 지지력 공식 또는 표준관입시험 결과 N값을 이용한 경험식에 의한다. 그러나 이들 방법들은 말뚝의 항타시공 관입성을 고려하지 않기 때문에 말뚝재하시험에 의해 확인된 실제 지지력과는 심각한 차이를 나타내준다. 말뚝 설계 확정 이전의 WEAP해석에 의한 말뚝의 항타시공 관입성 분석은 말뚝 설계에 필수적인 과정으로 판단된다.

* 정회원, 고려기초연구소

1. 서 론

강관말뚝은 높은 재질강도, 취급 및 이음의 용이함, 말뚝재료 품질의 균질성 등의 장점을 갖고 있으며 높은 타격에너지에 저항할 수 있어 주요 구조물 기초에 폭넓게 사용되고 있다. 국내에서도 고속도로 교량, 고속철도 교량 및 항만구조물 등 공익성이 중요시되는 주요 토목구조물 기초에는 다른 기초형식보다도 가장 높은 신뢰성을 인정받아 채택되고 있다.

국내에서 설계, 시공되는 강관말뚝은 대부분 선단부가 개방된 형태이며 시공방법은 디젤해머에 의한 직항타 공법이 주류를 이루고 있다.

말뚝의 설계하중을 결정하는 방법은 정역학적 지지력 공식이 이용되는 경우도 있지만 국내에서 실시되는 지반조사 결과로부터 토질정수(ϕ , K)결정이 곤란하여 실무에서의 적용은 사실상 되지 못하고 있다. 국내의 지반조사는 거의 대부분 표준관입시험(SPT, Standard Penetration Test)결과만을 설계에서 활용할 수 있는 형편인 바, 표준관입시험 결과 N 값으로부터 말뚝의 지지력을 도출하는 경험식적 방법이 대부분의 설계에서 채택되고 있다.

그러나 표준관입시험 결과로부터 말뚝의 지지력을 산정하는 공식은 제안자에 따라 상이한 형편이며, 특히 지반조건변화 및 항타장비에 따른 말뚝의 시공관입성이 고려되지 못하고 선단부가 개방된 강관말뚝의 경우 선단부 폐색효과의 규명이 이루어 지지 못하는 등, 실제 지지력과는 상이한 경우가 많이 발생하고 있다.

본 논문에서는 표준관입시험 결과로부터 말뚝의 지지력을 계산하는 방법들을 알아보고, 시공사례를 중심으로 기존의 항타장비의 선정과정 및 설계하중결정 결과와 파동이론 해석, 정적재하시험 결과를 비교하여 보았다.

비교결과 항타시공 관입성을 감안하지 않는 기존의 설계는 비합리적인 지지력 산정으로 구조물 기초로서의 안전성에 심각한 문제를 제기하고 있는 것으로 나타나고 있다.

파동이론해석에 의한 말뚝의 항타시공성 분석은 많은 경우 합리적인 말뚝지지력 산정을 가능케 해 주고 있으나, 말뚝 항타장비의 효율, 토질정수 등 세부적인 입력자료에 대하여는 동적측정에 의한 보완이 필수적임을 알 수 있었다.

2. 표준관입시험 결과로 부터 말뚝의 지지력 계산방법

표준관입시험 결과로 부터 말뚝의 지지력을 계산하는 데에는 Meyerhof공식 또는 수정 식들이 사용되고 있으며 이러한 경험식들은 아래와 같이 표시할 수 있다. ⁽²⁾

$$Q_u = mN_b A_b + nNA_s \text{ (ton)} \quad (1)$$

여기서 Q_u : 말뚝의 극한지지력

m : 선단지지력 계수

n : 주면마찰력 계수

N_b : 말뚝선단 부근의 SPT타격수 N

N : 사질토층의 평균 N

A_b : 말뚝의 선단지지면적 (m^2)

A_s : 말뚝의 주면적 (m^2)

註) 국내의 경우 말뚝의 선단부는 풍화토 또는 풍화암층까지 시공되는 경우가 대부분이며, 이러한 경우 말뚝은 선단지지 개념으로 설계되는 바, 지지력 계산식은 사질토 조건으로 국한하였다.

Meyerhof의 공식에서는 식(1)의 m , n 값을 아래와 같이 제안하고 있다.

$$m = \frac{4L_b}{B} \leq 40 \quad (2)$$

$$n = 0.2 \quad (3)$$

여기서 B : 말뚝의 직경

L_b : 지지층 내의 근입깊이

식 (2)의 의미는 말뚝의 선단부가 최대 선단지지력을 확보하기 위해서는 지지층내에 말뚝직경의 10배 이상 근입되어야 하며, 10배 미만의 근입시에는 근입장에 비례하여 선단지지력을 감소시켜야 한다는 것이다.

위의 조건들과 병행하여 식(1)의 선단지지력 계산에는 선단부를 기준으로 하여 아랫쪽 3B구간과 윗쪽 8B구간의 평균 N 값으로 적용하도록 하고 있다.

실제로 Meyerhof공식은 지반조사가 표준관입시험만으로 이루어지는 경우, 거의 유일한 말뚝지지력 산정방법이 되며, 국내의 경우 거의 대부분의 실무 설계에서 채택되고 있다. 그러나 Meyerhof공식은 적용범위에 있어 제안자 또는 기준에 따라 세부적으로 상이한 실정이며 m , n 값을 수정한 수정식 또한 많이 제안되어 있다. 표 1에는 국내에서 적용되는 몇가지 공식들을 취합, 비교하였다.

표 1 Meyerhof공식 및 수정식

기 준 자 료	m	n	비 고
건설부, 구조물기초설계기준	$\frac{4}{B} L_b \leq 40$	0.2 [$0.2N \leq 10 t/m^2$]	<ul style="list-style-type: none"> o. N_b : 말뚝선단부근의 N값 o. 현장측정 N값의 보정필요 o. 비소성 실패층 : $m \leq 30$
건설부, 도로교 표준시방서	$10 + \frac{4}{B} L_b \leq 30$ [개단말뚝의 경우 $\frac{6}{B} L_b \leq 30$]	0.2 [$0.2N \leq 10 t/m^2$]	<ul style="list-style-type: none"> o. $N_b \leq 30$
Canadian Foundation Engineering Manual	40	0.2	<ul style="list-style-type: none"> o. Meyerhof공식사용시 4.0의 안전율 적용
NAVFAC DM - 7.2	$\frac{4}{B} L_b \leq 40$	0.2 [$0.2N \leq 10 t/m^2$]	<ul style="list-style-type: none"> o. 계산시 N값은 상재하중효과 고려 수정 o. 비소성 실패층 : $m \leq 30$
日本 建築學會 建築基礎構造設計規準	30	0.2	<ul style="list-style-type: none"> o. N_b : 말뚝선단 아랫쪽 1B, 윗쪽 4B구간의 평균 N값
日本 道路橋 示方書	$10 + \frac{4}{B} L_b \leq 30$ [개단말뚝의 경우 $\frac{6}{B} L_b \leq 30$]	0.2 [$0.2N \leq 10 t/m^2$]	<ul style="list-style-type: none"> o. $N_b = \frac{N_1 + N_2}{2}$ · N_1 : 말뚝선단위치의 N값 · N_2 : 말뚝선단에서 윗쪽 4B구간의 평균 N값
日本 鐵道基礎標準	30 [$30N_b \leq 1000$: 사질토 $30N_b \leq 1500$: 모래자갈층]		<ul style="list-style-type: none"> o. N_b결정은 도로교시방서와 동일 o. 주변마찰력 계산은 토질역학 기준식 적용 $f_s = \sigma_v' \cdot K \cdot \tan \delta$
日本 港灣基準	40	0.2	<ul style="list-style-type: none"> o. $N_b = \frac{N_1 + N_2}{2}$ · N_1 : 말뚝선단위치의 N값 · N_2 : 말뚝선단에서 윗쪽 10B구간의 평균 N값

표 1에 나타난 바와 같이 N값으로 부터 말뚝의 선단지지력을 계산하는 방법은 세부계산 내역상 기준자료에 따라 상이한 점들이 있지만, 크게 나누어 볼 때 m값의 상한값을 30 또는 40으로 구분할 수 있다. 그러나 주면마찰력 계산을 위한 n값은 0.2를 공통적으로 적용하고 있다.

그러나 표 1에 열거한 계산식들은 외국의 시공사례로 부터 도출된 결과이며, 외국과는 지반조건, 시공기술수준, 말뚝재료 등이 상이한 국내에서의 지지력 공식 확인 실적은 극히 부진한 실정이다.

3. 항타시공 장비의 선정

강관말뚝을 항타시공 할 경우, 지반조건, 말뚝규격(직경, 두께, 길이) 및 항타용력을 고려한 말뚝의 시공관입성이 함께 고려되어야 한다. 그림 1에는 이와같은 과정을 개략적으로 도시하였다.

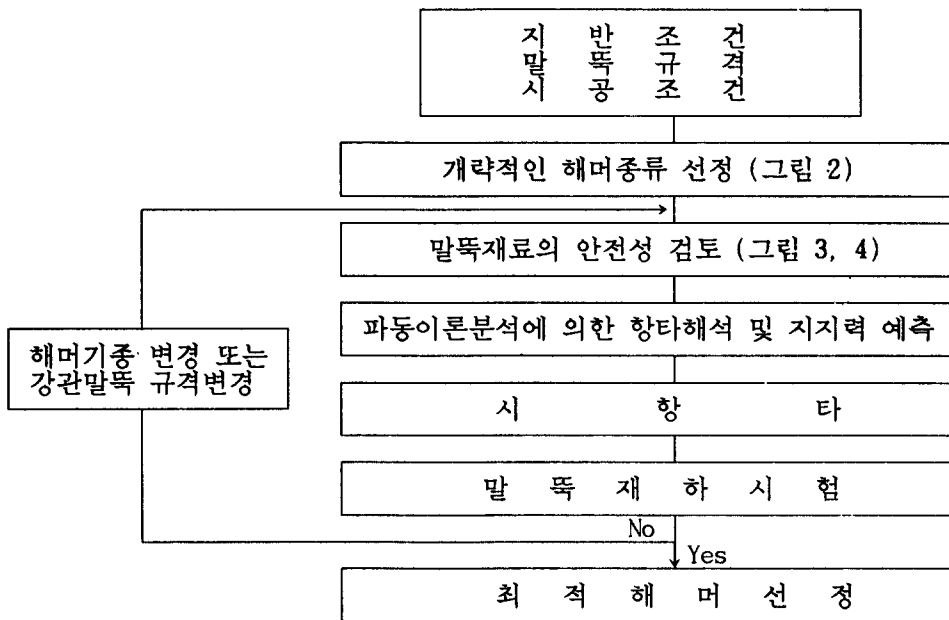
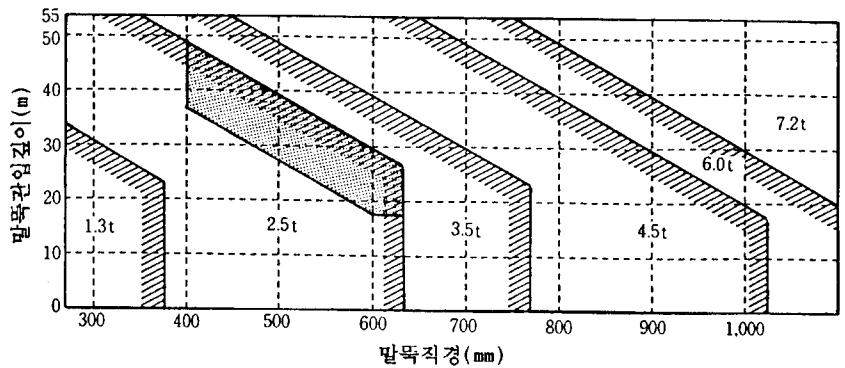


그림 1 디젤해머 선정과정

위의 과정을 좀더 상세히 설명하면 말뚝직경 및 말뚝관입깊이 만을 고려하여 그림 2와 같은 선정도표를 활용하여 개략적인 해머의 램중량을 결정한다.



(주) 1. 말뚝길이가 15 m 이상이며 아래의 조건에 해당될 경우에는 해머의 램중량을 위의 그림에 나타난 것보다 1등급 높은 것을 사용한다.

단, 램중량이 2.5 ton인 경우에는 점으로 표시된 부분만을 사용한다.

- ① N값이 30 이상인 모래층 또는 자갈층을 3 m 이상 관입하는 경우
- ② N값이 15 이상인 점성토층을 3 m 이상 관입하는 경우

2. 항타보조장치를 사용할 경우에는 그 길이도 말뚝길이에 포함한다.

그림 2 대략적인 디젤해머 선정

그림 2에 의한 개략적인 디젤해머 선정에는 말뚝의 직경과 말뚝관입 길이만이 반영되어 말뚝두께 및 항타응력은 고려되지 못한다.

말뚝직경 및 말뚝두께에 의한 말뚝의 단면적과 개략적인 항타조건을 감안하여 램중량을 결정하는 데는 그림 3 및 그림 4를 활용할 수 있다.

그림 3은 단순히 말뚝단면적과 항타조건만을 고려한 경우이며 그림 4에는 말뚝직경, 두께와 항타조건까지를 고려한 해머선정을 가능케 해준다.

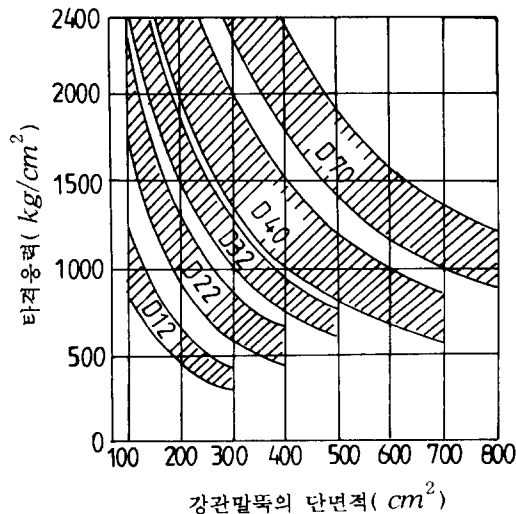


그림 3 항타응력을 고려한 디젤해머 선정 (I)

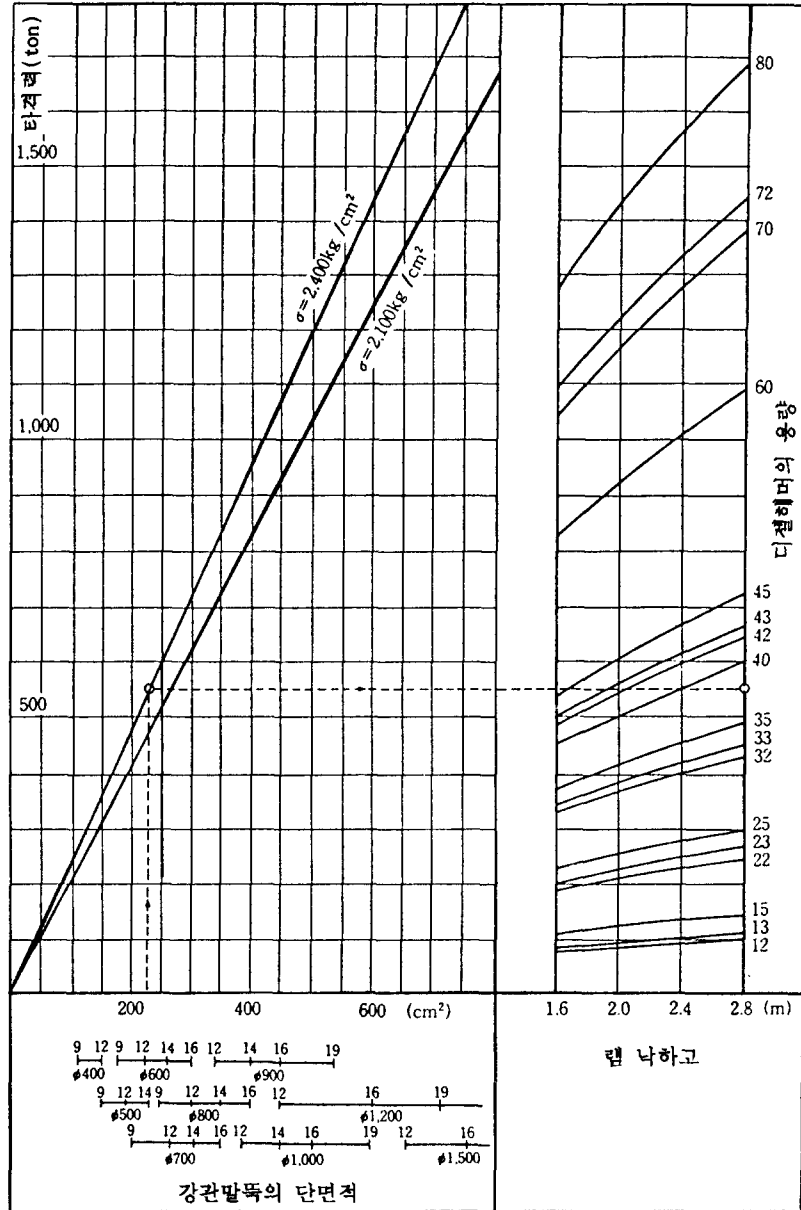


그림 4 항타응력을 고려한 디젤해머 선정(II)

그러나 그림 3 또는 그림 4와 같은 항타응력 고려는 극히 개략적일 수 밖에 없다. 이는 해머의 종류, 말뚝규격 및 지반조건 등 다양한 요소들에 관계되는 항타응력문제를 지나치게 단순화 하였기 때문이다.

이와같이 다양한 요소들을 종합한 항타응력 해석을 하기 위해서는 파동이론을 바탕으로 한 WEAP(Wave Equation Analysis for Pile)해석이 필수적이다.^{*1}

* 주 : WEAP해석의 상세한 내용은 참고문헌 (1) 내용 참조

WEAP해석에 의한 말뚝의 항타시공성 검토는 아래와 같은 점을 판단기준으로 하여 평가한다.

① 항타로 인한 타격응력

강관말뚝에 작용될 수 있는 허용항타응력에 대하여는 여러가지 견해가 있지만, 미국의 FHWA에서 공식적으로 추천한 값인 $0.9\sigma_y$ (σ_y =강관말뚝의 항복응력)를 사용하도록 한다.

따라서 국내에서 가장 일반적으로 많이 사용되는 SWS 41 강관말뚝의 항복응력은 2800 kg/cm^2 인바, 허용항타응력은 2520 kg/cm^2 를 기준으로 한다.

② 예상 타격당 관입량

WEAP해석에 의한면 말뚝이 1 m관입하는데 필요한 타격횟수(BPM, Blows Per Meter)를 예측할 수 있다. 이론적으로 계산하면 BPM이 무한대로 커질 수도 있지만, 실제 현장에서 강관말뚝을 항타할 경우 BPM=500(이를 역으로 환산하면 최종 타격당 관입량은 2 mm가 된다.)이상의 타격은 시공성이 극히 떨어지게 되므로 적절치 못한 것으로 판단된다.

WEAP해석에 의하여 ①과 ②를 기준으로 한 적절한 수준의 항타를 예상하면 여기에 상응하는 말뚝의 극한지지력을 얻을 수 있다.

그러나 국내의 경우, 이와같은 항타시공성 분석은 거의 이루어지지 않고 있으며, 단순한 경험값에 의한 장비선정이 되고 있는 실정이다.

4. 강관말뚝의 항타시공 사례

앞에서 설명한 바와같이 국내의 경우 말뚝시공성에 대한 고려없이 기초설계가 이루어지고 있다. 이와같은 설계는 대부분의 경우, 심각한 지지력 부족문제를 야기하고 있으며, 때로는 비경제적인 설계도 발생하고 있다. 본 장에서는 국내에서 실시된 강관말뚝의 설계 및 시공사례를 분석하여 봄으로써 문제점을 도출하고 해결방안을 모색해 보았다.

4.1 사 례 I

그림 5와 같은 지반조건에 $\phi 812.8\text{ mm}\times 12\text{ mm(t)}$ 의 강관말뚝이 207 ton의 허용지지력을 갖는 것으로 설계되었다. 말뚝의 예상관입깊이는 38 m정도이며 따라서 그림 2에 의하면 램중량이 4.5 ton인 디젤해머가 적합한 것으로 판단된다.

강관말뚝의 단면적은 301.9 cm^2 이며 이로부터 그림 3 및 그림 4에 의한 타격응력을 고려할때 과응력(overstress)이 걸리지 않기 위해서는 램중량 4.5 ton의 해머가 적합한것

으로 판단할 수 있다.

실제로 램중량 4.5 ton인 디젤해머로 시공을 하고 말뚝재하시험을 수행하였다. 말뚝재하시험 결과는 그림 6과 같으며 시험말뚝의 설계허용지지력은 표 2와 같이 요약할 수 있다.

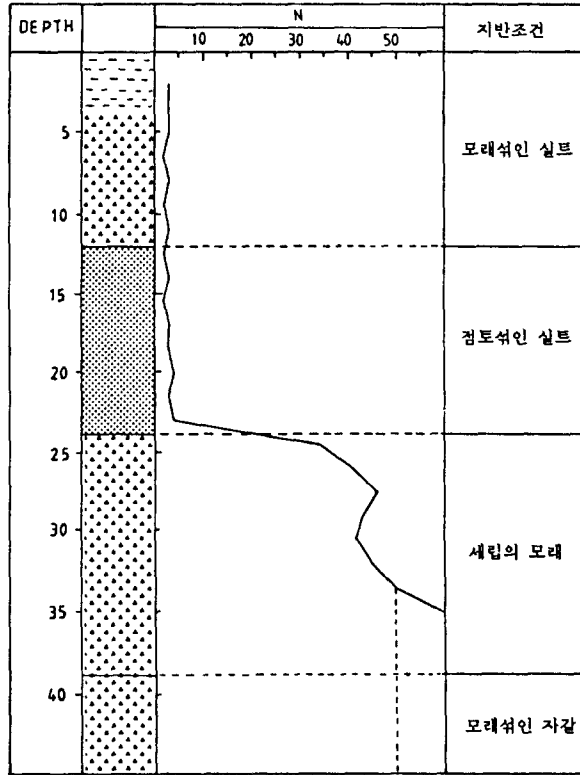


그림 5 지 반 조 건 (I)

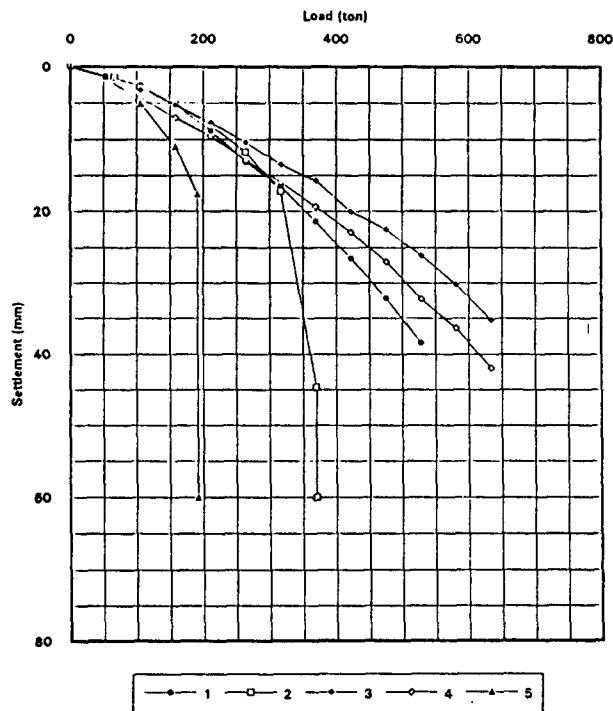


그림 6 말뚝재하시험결과(I)

표 2 말뚝재하시험 결과 요약(I)

시험번호		허 용 지 지 력 (ton)				
		1	2	3	4	5
판정기준						
극 한 하 중 기 준		(253)	136	-	-	64
항복하중기준	S-log t	(264 ↑)	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-
	log P-log S	(264 ↑)	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-
	dS/d(log t)-P	(264 ↑)	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-
순침하량기준	0.25 inch	275	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-
	말뚝직경×2.5%	335	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-
Davisson의 판정법		(320)	-	(317 ↑)	(317 ↑)	-

- 주 : 1. 관호안의 값은 추정한 값임(극한 또는 항복하중이 발생하지 않았기 때문)
 2. ↑표시는 시험결과로부터 추정한 값 이상이 되는 경우임
 3. 시험번호 4는 시험번호 2의 말뚝을 재항타하여 4.5 m의 추가관입이 된 말뚝을 시험한 결과임
 4. 시험번호 5는 인발재하시험 결과임

실제로 말뚝을 MH 45 디젤해머로 항타 시공한 결과 당초 예상과는 달리 약 45 m이상의 관입이 되었다. 그러나 말뚝재하시험 결과 최종 타격당 관입량을 2 mm정도로 관리하여 시공한 말뚝은 시험번호 2와 같이 408 ton정도의 극한지지력이 측정되었다.

이에 지지력 미달을 보완하기 위하여 추가 항타 관입을 실시한 결과 시험번호 3와같이 317 ton이상의 허용지지력을 얻을 수 있었으나 시공속도가 일반적인 1일 4분에 비하여 1일 1분 정도로 극히 저조하여 적절한 설계로 판단할 수 없었다.

이와같은 상황을 WEAP분석한 결과는 그림 7에 표시하였다.

이 분석에서 알수 있는 사항은 아래와 같다.

- ① MH 45디젤해머 항타로 인하여는 BPM이 아무리 증가하더라도 과응력(overstress)은 발생하지 않는다.
- ② 따라서 항타시공성을 고려한 적절한 항타기준은 BPM이 530정도인 것으로 볼수 있으며, 이때의 극한지지력은 3920 KN(400 ton)으로 판단된다.
- ③ 그러나 항타시공성을 무시하고 항타를 계속 강행할 경우 극한지지력은 약 600 ton 까지 증가할 수 있다.

위와같은 분석결과는 말뚝재하시험 결과와 상당히 근사한 것으로 판단된다. 이상을 종합하여 이와같은 경우 적절한 말뚝의 설계하중은 약 130 ton정도인 것으로 볼 수 있겠다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)
1	981.0	149.113	25.082	36.8	1.50	53.40
2	1960.0	165.142	21.101	102.0	1.66	52.49
3	2940.0	177.799	26.207	221.3	1.80	56.21
4	3920.0	184.741	31.219	530.9	1.87	57.98
5	4900.0	188.873	38.197	1492.2	1.90	58.58
6	5880.0	191.746	46.802	9999.0	1.92	58.87

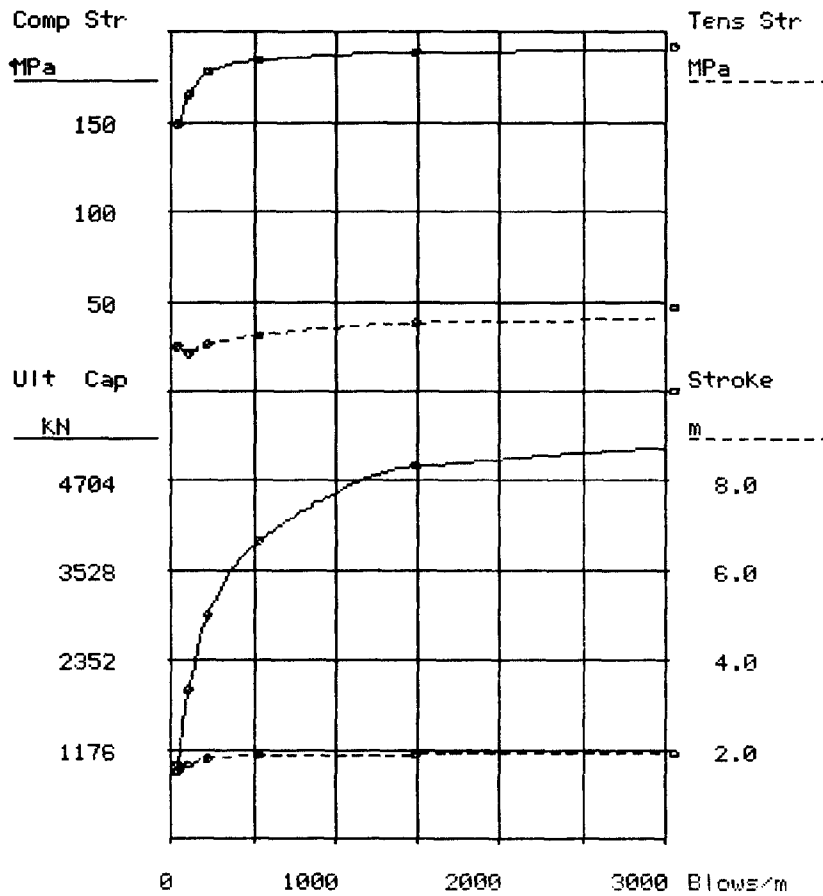


그림 7 WEAP분석결과(I)

4.2 사례 II

그림 8과 같은 지반조건에 $\phi 711.2 \text{ mm} \times 9 \text{ mm(t)}$ 강관을 항타시공하여 155 ton의 허용지 지력을 갖도록 설계하였다.

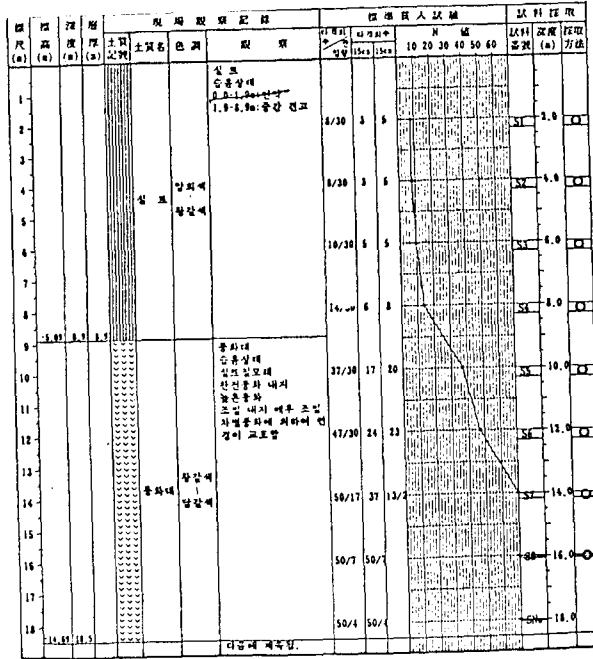


그림 8 지 반 조 건 (II)

말뚝의 단면적은 198.5 cm^2 이며, 그림 2, 3 및 4로 부터 K35 디젤해머가 시공장비로 선정되었다. 말뚝의 예상관입깊이는 16 m정도로 판단되었고 실제시공결과 16 m이상 관입되었다. 말뚝재하시험 결과는 그림 9 및 표 3에 요약하였다.

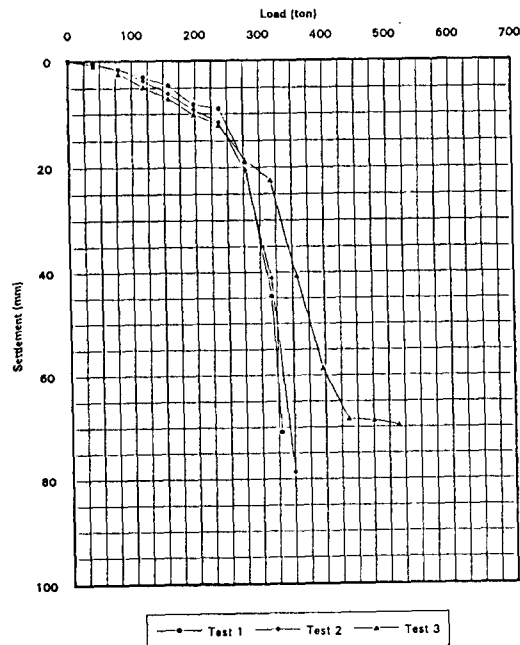


그림 9 말뚝재하시험결과(II)

표 3 말뚝재하시험 결과 요약(II)

시험번호		허 용 지 지 력 (ton)		
		1	2	3
판정기준				
극 한 하 중 기 준		110	117	145
항복하중기준	S-log t	-	-	-
	log P-log S	119	119	158
	dS/d(log t)-P	135	113	138
순침하량기준	0.25 inch	125	125	150
	말뚝직경×2.5%	140	145	170
Davisson의 판정법		140	140	160

- 주 : 1. 본 시험결과는 모두 극한하중이 판정된 바, 국내 설계기준에 의하면 극한하중 기준이 적용됨
2. 항복하중기준, 순침하량기준 및 Davisson의 판정법은 국내기준과의 비교 목적으로 계산하였음
3. 시험번호 3은 시험말뚝 1의 지지력 미달을 보완하기 위하여 재항타한 말뚝을 시험하였음
4. 시험번호 1은 말뚝관입깊이가 16.7 m인 경우이며 시험번호 3은 같은 말뚝을 재항타하여 18.4 m의 관입이 된 경우임
5. 시험번호 3의 경우, 재하하중이 436 ton이상 이 되자 하중-침하량 관계가 변화하였으나 이는 허용지지력 판정에 고려치 않았음

앞의 재하시험 결과에서도 나타나고 있듯이 정상적인 시공관리(최종 타격당 관입량이 2 mm정도)에 의한 말뚝의 허용지지력은 110 ton정도인 것으로 판단된다.

그림 10은 본 사례에 대한 WEAP분석결과이다. 정상적인 항타조건(BPM=620.5일 경우)에서의 기대할 수 있는 극한지지력은 3530 KN(360 ton)이 되며 따라서 설계하중은 120 ton이 된다.

그러나 말뚝의 지지력을 높여주기 위하여 항타를 계속할 경우(BPM=2608이 될때까지) 과응력이 발생하지 않고, 440 ton의 극한지지력도 기대할 수 있으나 이러한 시공은 현실적으로 거의 불가능하며 말뚝재료의 피로현상도 우려된다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)
1	588.4	121.906	0.000	22.6	1.44	46.32
2	1176.8	145.893	2.645	52.8	1.73	43.08
3	1765.2	156.052	6.300	92.9	1.87	41.95
4	2353.6	166.565	8.697	158.5	2.02	42.75
5	2942.0	176.867	12.859	292.2	2.17	44.21
6	3530.0	181.396	14.035	620.5	2.24	45.45
7	3922.0	184.207	14.982	1077.1	2.28	45.98
8	4314.0	184.914	16.070	2608.0	2.30	46.13
9	4707.0	189.414	16.836	9999.0	2.36	47.13

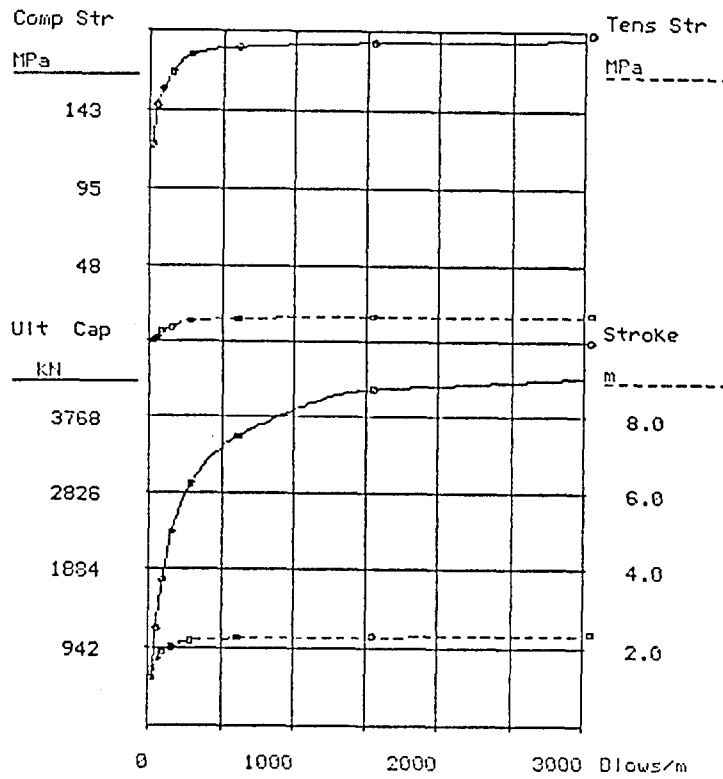


그림 10 WEAP분석결과(II)

4.3 사례 III

그림 11과 같은 지반조건에 $\phi 609.6 \text{ mm} \times 12 \text{ mm(t)}$ 강관말뚝을 시공하여 134 ton의 설계 하중을 갖는 것으로 설계하였다.

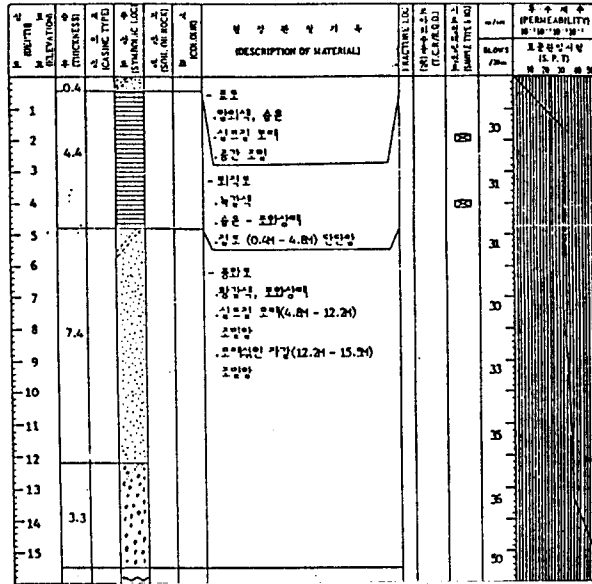


그림 11 지반 조건 (III)

말뚝의 단면적은 225.3 cm^2 이며, 말뚝관입깊이는 15 m 정도로 예상된다. 이에 항타장비는 그림 2에 의하면 K 25가 선정되지만 그림 3에 의하면 D 22, D 32 및 D 40이 모두 해당된다. 그림 7에 의하면 항타우력이 낮으면 K 35가, 항타우력이 높으면 K 35이상의 항타장비가 적합한 것으로 나타난다.

본 공사에서는 K 35디젤해머가 사용되었으나 지지력 미달이 발생하여 K 45를 사용하기도 하였다. 말뚝재하시험 결과는 그림 12 및 표 4에 요약하였다.

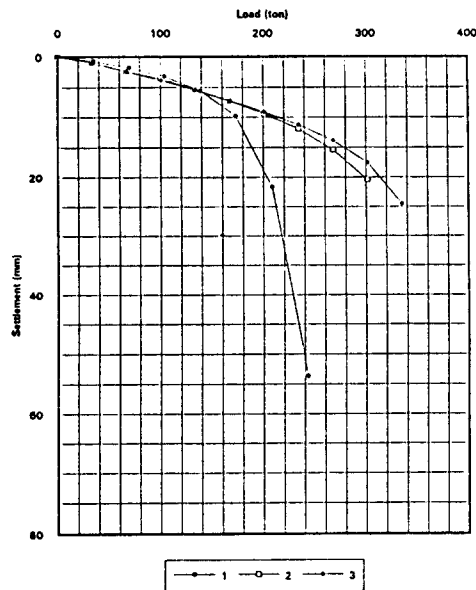


그림 12 말뚝재하시험결과(III)

표 4 말뚝재하시험 결과 요약(III)

시험번호		허 용 지 지 력 (ton)		
		1	2	3
판정기준				
극 한 하 중 기 준		86	-	-
항복하중기준	S-log t	-	134	168
	log P-log S	82	125	151
	dS/d(log t)-P	88	125	145
순침하량기준	0.25 inch	80	134	156
	말뚝직경×2.5%	102	151 ↑	168 ↑
Davisson의 판정법		84	133	154

- 주 : 1. ↑표시는 시험결과로 부터 추정된 값 이상이 되는 경우임
 2. 시험번호 1 및 2는 K 35 디젤해머 향타
 3. 시험번호 3은 K 45 디젤해머 향타

본 공사에서 실시한 시험번호 1의 말뚝지지력은 설계된 134 ton에 크게 미달되는 것으로 나타났다. 시험번호 1의 말뚝은 K 35디젤해머를 사용하여 정상적인, 최종 타격당 관입량이 2 mm정도인 상태로 향타되었다.

시험번호 2의 말뚝은 K 35디젤해머를 사용하였지만 무리한 정도로 격심한 향타를 실시하였으며 말뚝재하시험 결과는 설계하중과 거의 일치하는 허용지지력을 얻을 수 있었다. 그러나, 이 경우 이와같은 시공은 실무적으로 거의 불가능한 정도이며, 따라서 K 45디젤해머를 사용하여 시험번호 3의 말뚝을 시공하였다.

K 45디젤해머로 향타된 말뚝은 그림 12 및 표 3에 나타나고 있는 것처럼 양호한 지지력을 얻을 수 있었다.

본 공사에서 K 35디젤해머를 사용했을 경우의 WEAP해석은 그림 13과 같다. 정상적인 향타(BPM=394.2)일 경우 예상극한지지력은 3433.5 KN(350 ton)정도가 되며 따라서 적정 설계하중은 117 ton정도가 되어 재하시험결과와 거의 일치하고 있다.

그러나 134 ton의 설계하중을 K 35디젤해머로 만족시키기 위해서는 BPM이 702.2이상이 되어야 함을 알 수 있다. 이때 향타로 인한 과응력 문제는 발생하지 않는다.

같은말뚝을 K 45디젤해머로 향타했을 경우는 그림 14와 같은 WEAP해석이 가능하다. 이 경우에도 과응력은 발생하지 않지만 BPM=392.1(최종타격당 관입량=2.6 mm)에서 요구되는 극한지지력을 얻을 수 있고 따라서 시공상 큰 문제없이 공사를 진행시킬 수 있다.

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)
1	981.0	135.957	4.058	44.2	1.67	43.19
2	1471.5	146.517	3.645	75.7	1.81	40.56
3	1962.0	157.648	3.868	110.0	1.97	41.20
4	2452.5	164.113	8.028	165.0	2.06	40.91
5	2943.0	174.996	9.268	237.3	2.23	43.46
6	3433.5	180.084	13.536	394.2	2.31	44.35
7	3920.0	190.812	14.926	702.2	2.43	46.19
8	4410.0	198.169	15.781	1380.8	2.49	46.71
9	4900.0	204.569	17.352	4219.2	2.52	46.82
10	5390.0	209.656	18.113	9999.0	2.53	46.69

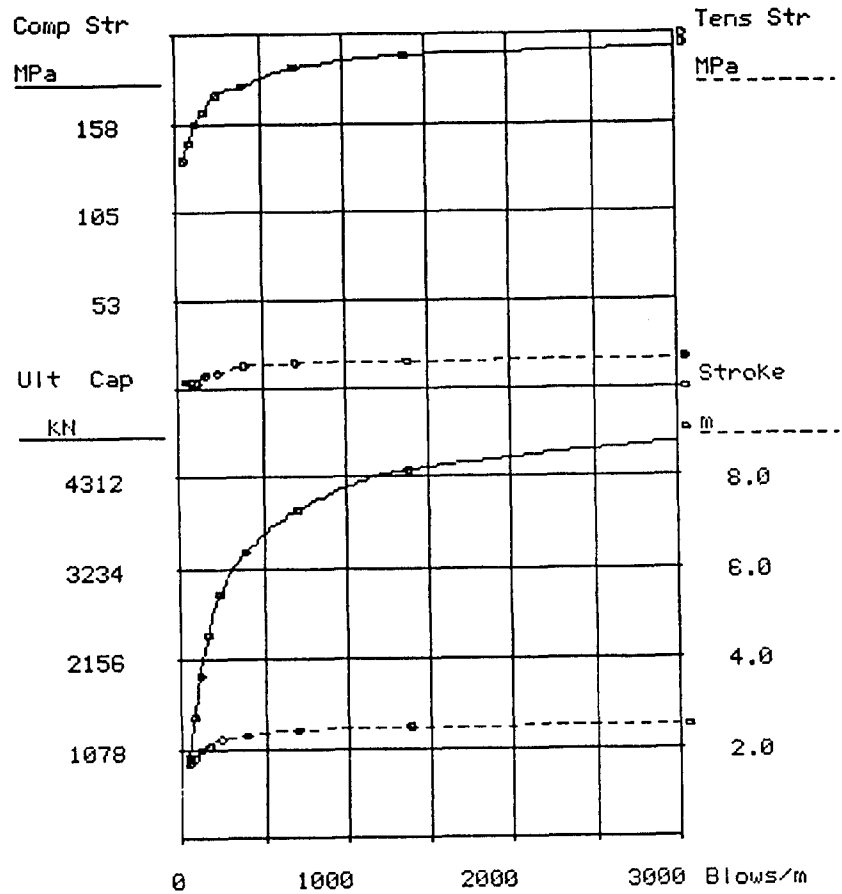


그림 13 WEAP분석결과(III) - K 35 디젤해머

No	Ultimate Capacity (KN)	Max C. Stress (MPa)	Max T. Stress (MPa)	Blow Count (BPM)	Stroke (m)	Energy (KN-m)
1	981.0	144.355	2.658	33.6	1.60	55.09
2	1471.5	159.705	3.329	58.3	1.76	50.58
3	1962.0	175.404	2.651	85.0	1.94	50.62
4	2452.5	184.112	3.324	121.6	2.04	50.11
5	2943.0	194.556	4.290	167.2	2.18	52.27
6	3433.5	200.392	7.644	257.0	2.25	52.48
7	3920.0	214.137	9.388	392.1	2.40	55.02
8	4018.0	216.348	9.541	437.6	2.42	55.30
9	4116.0	218.037	9.662	496.7	2.43	55.39
10	4214.0	219.242	9.803	576.4	2.43	55.23

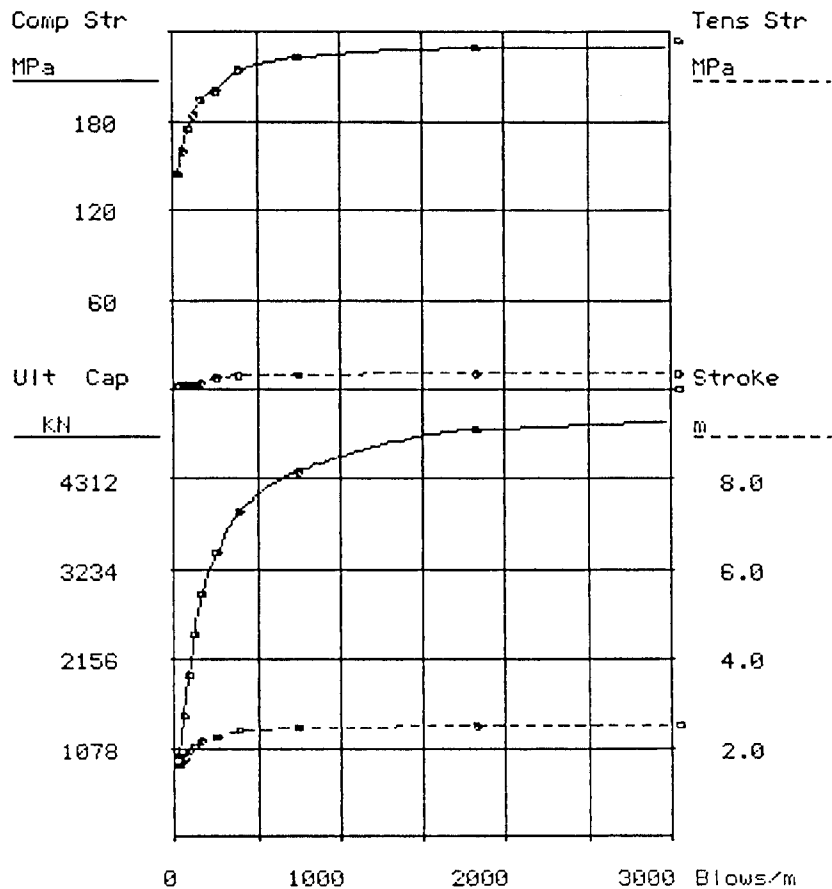


그림 14 WEAP분석결과(III) - K 45 디젤해머

5. 결론 및 제언

이상에서 알아본 바와같이 강관말뚝을 항타 시공할 경우, 항타시공 관입성이 검토되지 않을 경우 심각한 지지력 미달현상이 발생할 수 있다.

본 논문에서 설명한 사례들은 현재 국내에서 발생하고 있는 문제점들의 극히 일부분에 불과하다. 또 본 논문에서 설명한 사례들은 WEAP해석이 실제와 부합되는 경우만을 선정 하였으므로 WEAP해석이 만능이라고 주장할 수는 없다. 실제로 WEAP해석이 말뚝의 시공성 및 지지력과 전혀 일치하지 않는 경우도 있었다. 이와같은 경우 PDA를 사용하여 실제 발생하는 에너지와 해머의 효율 그리고 하중분포 상황 등이 함께 검토되어야 합리적 해석이 될 수 있을 것으로 기대한다.

그러나 현재 국내에서 발생되고 있는 문제점의 상당부분은 WEAP해석과 재하시험에 의한 확인을 통하여 해소될 수 있을 것으로 기대한다.

마지막으로 항타시공성을 고려하지 않은 극단적인 예를 소개하기로 한다. 그림 15는 동일현장에서 실시한 2개의 말뚝재하시험 결과이다.

시험번호 1은 ϕ 609.6 mm \times 12 mm(t)말뚝을 K 35디젤해머로 항타한 결과이며 시험번호 2는 ϕ 508.0 mm \times 12 mm(t)말뚝을 K 35디젤해머로 항타한 결과이다.

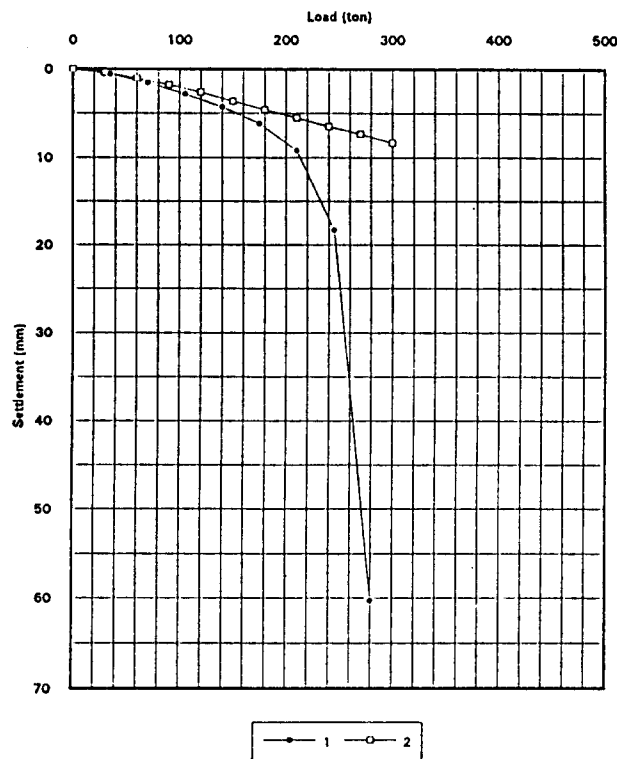


그림 15 말뚝재하시험결과(IV)

참 고 문 헌

1. 포항제철(1994), “강관말뚝의 설계, 시공 및 적산”
2. Meyerhof,G.G.(1956), “Penetration tests and bearing capacity of cohesionless soils”, Jour of Soil Mechanics and Foundation Engineering, ASCE, Vol.82, SMI, pp.1-19.