

# 항타 및 매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 분석

Analysis of Load-Settlement Curves in Driven and Embedded Piles

천 병 식\*1  
Chun, Byung-Sik  
조 천 환\*2  
Cho, Chun-Whan

---

## Abstract

Although the load-settlement curve characteristics of embedded piles are different from those of driven piles, for the determination of their allowable loads the same analysis method has been adopted without any considerations. According to the related domestic criteria, the analysis methods of load-settlement curve have some conflicts among themselves and have several vague points in obtaining the allowable capacity from ultimate or yield capacity. In order to solve those problems, the relevant literatures were reviewed. And also the result of 106 pile load tests was analyzed. Analysis result indicates that analysis methods of the load-settlement curve based on single mathematical curve are not suitable for the general analysis method of load-settlement curves due to their various characteristics. As a result, the appropriate analysis methods and safety factors for the determination of allowable capacity of pile are suggested in this paper.

## 요 지

매입말뚝공법으로 시공된 말뚝의 거동은 항타말뚝의 그것과는 다르고 또한 여기서 얻어지는 하중-침하량 곡선의 특성도 다름에도 불구하고 이에 대한 기본적인 고찰없이 항타공법에서 적용해 왔던 허용하중 결정방법을 그대로 매입말뚝공법에도 준용하고 있다. 국내의 관련기준에 의하면 허용지지력을 결정하는 방법들이 기준마다 서로 다르고 또한 적용 안전율도 차이가 있어서 서로 상충되는 면이 있다. 본 논문에서는 106개 말뚝의 정재하시험을 통해 얻어진 하중-침하량 곡선을 분석하고 이들 결과를 공법별로 비교하였다. 분석결과 일정한 곡선을 기준하여 제시된 각종의 수학적 기법들은 허용지지력을 결정하기 위한 적절한 방법이 아님을 알 수 있었다. 또한 분석결과를 바탕으로 적절한 허용하중 판정방법 및 적용안전율을 제안하였다.

Keywords : Load-settlement curve, Allowable capacity, Ultimate capacity, Failure load, Limiting load.

---

\*1 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

말뚝의 재하시험결과로부터 얻어지는 하중-침하량 곡선을 이용하여 허용 지지력을 결정하는 방법에는 수많은 방법이 있다(土質工學會, 1993). 그러나 실물 재하시험으로 정의에 의한 실제의 극한지지력(일정한 하중하에서 급격한 파괴가 발생하는 경우, 즉 하중-침하량 곡선이 침하량축에 거의 평행될 때)을 구하는 것은 매우 곤란하므로 대부분의 경우 이에 대한 대안으로 침하량을 기준으로 극한지지력을 산정하거나 항복하중을 결정한 후 기준에서 주어진 안전율을 적용하여 말뚝의 허용지지력을 계산하고 있다. 여기서 침하량을 기준으로 선택되는 하중은 제한하중(limiting load)이라고 하며 이에 의해 결정된 값은 방법에 따라서 정의에 의한 극한지지력과는 큰 차이가 있을 수 있으므로 적용 시에는 반드시 구분되어야 한다. 또한 항복하중을 결정하는 방법에 있어서도 제한하중법외에 도해법, 수학적기법으로 분류되는 각종의 방법이 있지만 이들 역시 방법들 간의 결과에 차이가 있으며 또한 분석자 또는 곡선의 크기에 따라 오차가 발생할 수 있다.

최근에 환경에 대한 인식이 제고됨에 따라 건설공사에 대한 소음 및 진동 규제법이 매우 엄격하게 개정(1994. 11. 21)된 바 있다. 따라서 과거에는 말뚝의 항타공법이 도심지 위주로만 제한되었으나 이제는 민원이 일어날 수 있는 곳이라면 모든 지역에서 사실상 적용이 불가능하게 되었으며, 이에 대한 대안으로 각종의 매입공법이 이용되고 있다(박 등, 1996). 그러나 이러한 매입공법으로 시공된 말뚝의 거동은 항타말뚝의 그것과는 크게 다르며 또한 여기서 얻어지는 하중-침하량 곡선의 특성도 다름에도 불구하고 이의 해석기법에 대한 기본적인 고찰도 없이 항타공법에서 적용해 왔던 방법을 그대로 준용하고 있다.

국내의 기준에서는 하중-침하량 곡선으로부터 극한지지력 혹은 항복하중을 결정하여 주어진 안전율을 적용한 후 허용지지력을 결정하도록 되어 있다. 그러나 기준에 따라 적용 안전율

이 다르고, 기준에서 제안하는 분석기법도 차이가 있으며 또한 이들 기준에서도 앞서 언급한 근본적인 문제점이 내재 되어 있다. 따라서 국내에서는 최근에 이러한 문제의 대안으로써 항복하중의 단일해를 구하기 위한 방법들이 제안되었으나 이들 역시 제안자의 방법으로만 단 순화시키는 경향이 있어 복잡 다양한 말뚝의 지지력거동을 만족할 수 있도록 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다. 그러나 실무에서는 만족할 만한 분석 기법이 반드시 필요한 것이 현실이다.

상기의 관점에서 본 논문에서는 국내에서 실시된 60개 항타말뚝과 46개 매입말뚝의 정재하시험을 통해 얻어진 하중-침하량 곡선의 특성을 분석하고 허용지지력을 구하기 위한 여러가지 방법들을 비교 평가한 후 이들 결과를 공법별로 비교해 보았다.

## 2. 허용하중판정법의 고찰

일본을 제외한 국외의 경우 허용하중을 구하기 위한 기준이 우리와 차이가 있기 때문에 우리가 일반적으로 사용하는 극한하중(ultimate capacity)과 항복하중(yield capacity)을 명확히 구분하지 않는 것 같다. 따라서 정의에 의한 극한하중(plunging load)을 구하기 위한 대안으로 제한하중(limiting load) 또는 파괴하중(failure load)을 구하는 것이 일반적이다. 이들 중 많이 이용되는 주요 방법들은 제한하중 판정법으로는 말뚝선단부 혹은 머리의 침하량이 말뚝직경의 10%일 때의 하중을 파괴하중으로 간주하는 방법(Van Impe, 1988; 土質工學會, 1993) 등이 있고, 파괴하중 판정법으로는 Davisson 방법(1972), Chin 방법(1970), De Beer 방법, Brinch-Hansen 방법(1963), Butler and Hoy's 방법(1977) 등이 있다(Fellenius, 1980; Prakash 1990).

그림 1은 재하시험결과를 9가지의 방법에 의해 파괴하중(failure load)을 구한 결과를 보여주고 있다. 그림 1에서와 같이 방법에 따라 결정되는 파괴하중에는 많은 차이가 있으며 이들

중 Davisson 방법이 가장 작은값을, Chin의 방법이 가장 큰 값을 주고 있음을 알 수 있다. 실제로 하중 판정결과가 그림 1에서 나타나 있는 판정방법에 의해서만 의존하는 것은 아니고 시공법 및 재하시험방법 등에 의해서도 달라지게 된다. 따라서 허용하중을 구하기 위한 합리적인 단일 방법을 선정한다는 것은 실제로 불가능하다고도 볼 수 있다.

따라서 Joshi and Sharma(1987)는 파괴하중을 구하기 위한 방법으로 재하시험법이나 시공법별로 적절한 판정방법들을 제시하고 있다. 또한 Fellenius(1980)는 파괴하중을 결정할 때 한가지 방법에 의존하지 않고 3~4개의 방법으로 판단할 것을 제안하고 있다.

국내의 기준중 구조물기초설계기준(건설부, 1986)에서는 극한하중(안전율 최소 3.0 적용)을 구하되 극한하중이 확인되지 않을 경우는 항복하중(안전율 2.0 적용)을 구하여 이값의 1.5배를 극한하중으로 하며 어느 경우에도 항복하중에서 구한 극한하중은 실제 극한하중보다 작도록 규정하고 있다. 여기에서는 항복하중을 구하는 방법을 3가지 도해방법으로 명시하였지만 정의에 의한 극한하중이 주어지지 않을 경우 극한하중을 판정하는 방법은 모호하게 서술되어 있다.

도로교표준시방서(대한토목학회, 1996)의 경우 재하시험 결과로부터 말뚝의 허용지지력을 판정할 경우 정의에 의한 극한지지력을 구하되 이것이 곤란할 때는 말뚝머리의 침하량이 말뚝 직경의 10%에서의 하중을 극한지지력으로 하도록 되어있으며 안전율은 평시기준으로 지지 말뚝의 경우 2.5, 마찰말뚝의 경우 3.0을 적용하도록 되어 있다. 또한 구체적인 항복하중 판정기법은 명시되어 있지 않다.

상기에서와 같이 기준마다 안전율의 개념이 서로 다르고 또한 극한하중과 항복하중의 판정 기준의 분류가 모호한 면이 있다. 특히, 정의에 의한 극한하중과 침하량이 말뚝직경의 10%에서 하중을 극한하중으로 동일시 하는 것은 차이가 있을 수 있으며, 이 때 항복하중에 1.5배

한 것이 극한하중이라는 수식적 기준과 혼돈이 일어날 수 있다.

구조물기초설계기준에서 제안하는 3가지 항복하중 판정법은 모두 도해적 기법에 해당하는 것으로 개인 오차를 반영할 가능성이 있다. 따라서 류 등(1995)은 쌍곡선(hyperbola)식에서 곡률이 최대가 되는 점을 파괴하중으로 제안한 바 있으나, 이 방법은 단위 또는 축척에 따라 최대곡률점이 변할 수 있으므로 원 등(1996)은 정규화 과정을 통해 유일한 최대곡률점을 구하는 방법을 제안한 바 있다. 그러나 이들 방법 역시 재하시험으로부터 얻어진 하중-침하량곡선이 쌍곡선에 일치한다는 전제가 있어야 하므로 일반적으로 모든 말뚝에 적용하기에는 한계가 있다.

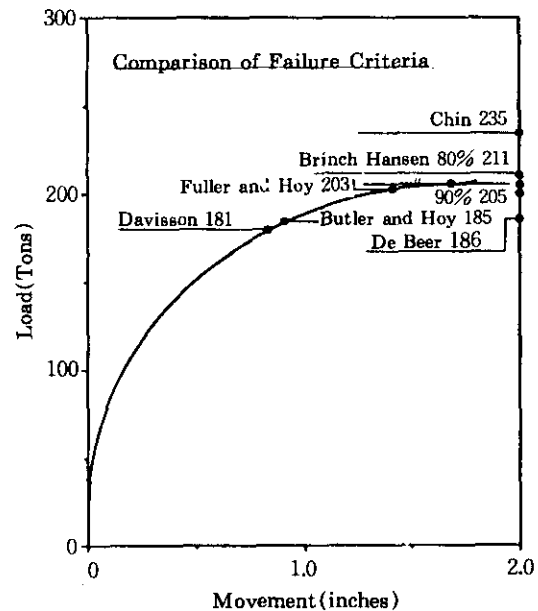


그림 1. 각종 기준으로 결정된 파괴하중들의 비교 (Fellenius, 1980)

### 3. 하중 - 침하량 곡선의 유형

말뚝의 하중-침하량 곡선의 특성 및 분석기법을 연구하기 위해 국내의 전국 각 지에서 수

행한 106개의 정적압축재하시험 결과를 분석하였다. 여기서 106개의 곡선은 더 많은 하중-침하량 곡선들로부터 침하량이 일정기준 이상(여기서는 Davisson offset line 이상) 초과하는 것들만 선별한 것이다. 정적압축재하 시험은 ASTM D 1143에 준하여 수행하였으며 분석에 이용된 재하시험 자료는 표 1에 요약하였다. 표 1에서 보인 바와 같이 총 106개의 재하시험중 60개는 항타말뚝이고 46개는 매입말뚝이며, 분석에 이용된 자료에는 각 종의 시공법 및 다양한 말뚝의 종류가 포함되어 있음을 알 수 있다.

표 1에서 제시된 재하시험 결과를 이용하여 하중-침하량 곡선의 유형을 파악하기 위해 다음과 같은 3종류의 곡선식으로 회귀분석을 실시하였다.

$$y = x / (ax - b) \quad (\text{쌍곡선}) \dots\dots\dots (1)$$

$$y = ax^2 + bx + c \quad (\text{이차곡선}) \dots\dots\dots (2)$$

$$y = a \cdot e^{bx} \quad (\text{지수곡선}) \dots\dots\dots (3)$$

여기서  $y$ 는 침하량이며  $x$ 는 하중이고  $a, b, c$ 는 관련 상수이다.

이러한 사실은 말뚝의 하중-침하량 곡선은 어느 일정한 곡선의 형태로 회귀되지 않고 공법, 지반 등의 조건에 의해 달라질 수 있음을 의미하는 바 일정한 곡선형태를 기준으로 하여 제시된 각종의 수학적 분석기법들은 허용지력을 결정하기 위한 일반적인 방법으로 적용하기에는 문제가 있다고 판단된다. 즉, 하중-침하량 곡선의 형태가 결정된 후 이를 바탕으로 각종의 수학적 기법들을 적용해야만 분석된 결과들이 신뢰도가 있는 것이다.

표 2에는 106개 하중-침하량 곡선을 3종류의 회귀곡선으로 분석한 후 가장 일치하는 곡선( $R^2$ 이 가장 큰 곡선)을 공법별로 요약하였다. 표 2에서와 같이 항타말뚝의 경우 60개의 하중-침하량 곡선중 56.7%가 이차곡선, 43.3%가 쌍곡선에 가장 일치하는 것으로 분석되었으며 지수곡선의 유형은 나타나지 않았다. 한편, 매입말뚝의 경우 46개의 하중-침하량 곡선중 58.7%가 쌍곡선, 39.1%가 이차곡선,

표 2. 회귀분석결과

(단위:%)

	쌍곡선	이차곡선	지수곡선
항타말뚝	43.3	56.7	-
매입말뚝	58.7	39.1	2.2

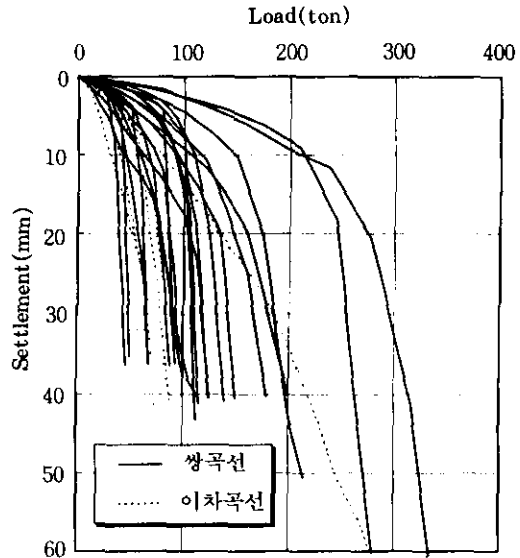


그림 2a. 항타말뚝의 하중-침하량 곡선

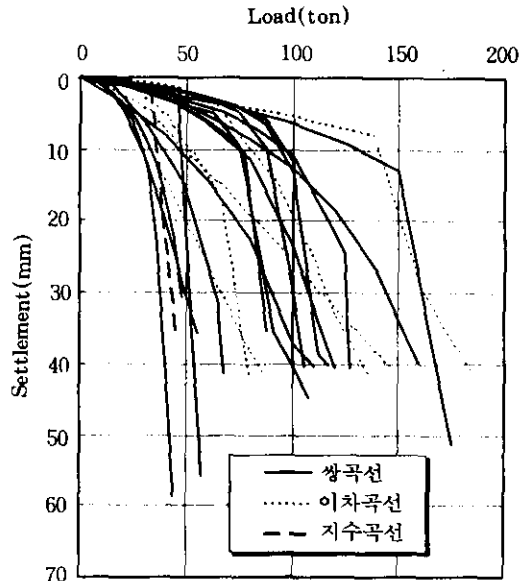


그림 2b. 매입말뚝의 하중-침하량 곡선

표 1. a. 분석된 재하시험 자료(항타말뚝)

	말뚝번호	말뚝종류 및 직경	해머	관입깊이(m)	결정곡선 및 결정계수(R <sup>2</sup> )
침하량이 말뚝직경의 0.1D 이상	1	PC 350	K-25	5.0	0.99
	2	ST 508, 10t	K-25	9.6	0.99
	3	ST 406.4, 9t	K-25	10.5	0.99
	5	ST 609.6, 12t	K-35	11.7	0.99
	8	PC 350	K-25	7.1	0.99
	9	PC 350	K-25	9.0	0.99
	10	PC 350	K-25	11.1	0.99
	11	PHC 400	K-35	19.0	0.98
	12	PC 350	K-25	10.1	0.98
	13	PC 350	K-25	6.2	0.98
	14	PC 400	유압 5 ton	13.5	0.98
	19	PC 400	K-25	10.1	0.99
	20	PC 400	K-25	12.5	0.99
	22	ST 812, 12t	K-65	51.5	0.98
	24	PC 400	K-25	9.0	0.99
	25	PHC 400	유압 S-35	25.3	0.99
	27	ST 711, 2, 9t	K-35	19.4	0.98
	28	PC 350	K-25	14.7	0.96
	29	PHC 400	K-35	18.8	0.99
	30	PHC 400	K-35	26.7	0.99
	33	PC 400	K-25	11.8	0.99
	58	PHC 350	유압 DKH-7	9.3	0.99
	4	PC 350	K-25	5.4	0.96
	6	PC 350	K-25	4.0	0.99
	7	PC 350	K-25	7.4	0.99
	15	PC 400	유압해머	11.5	0.99
	16	PC 350	K-25	7.0	0.99
	32	ST 406. 4, 9t	K-25	48.1	0.99
	17	ST 609. 6, 12t	K-35	7.4	0.99
	21	ST 609. 6, 12t	K-35	15.0	0.94
	31	ST 711, 9t	K-35	16.7	0.99
	44	PC 350	K-25	5.5	0.99
	18	PC 400	유압 6 ton	7.0	0.98
23	PC 400	K-25	22.6	0.99	
26	ST 711, 9t	K-35	18.4	0.94	
34	PC 350	K-25	3.8	0.99	
35	PC 350	K-25	5.4	0.99	
36	PC 350	K-25	5.4	0.99	
37	ST 508, 12t	K-25	7.3	0.99	
38	PC 350	K-25	6.0	0.99	
39	PHC 400	유압 S-60	7.5	0.99	
40	PC 350	K-25	18.0	0.99	
41	PHC 400	K-35	16.9	0.99	
42	PC 400	K-25	11.2	0.99	
43	PHC 500	유압 S-60	10.3	0.99	
45	ST 812, 8, 16t	K-45	49.72	0.99	
46	ST 406. 4, 9t	K-25	52.1	0.99	
47	ST 406. 4, 9t	K-25	23.0	0.99	
48	PHC 400	K-35	25.4	0.99	
49	PHC 450	K-35	17.5	0.99	
50	PHC 400	K-35	8.3	0.99	
51	ST 609. 6, 12t	K-35	10.7	0.99	
52	PC 350	K-25	8.0	0.99	
53	ST 609. 6, 12t	K-45	14.83	0.97	
54	PHC 500	K-35	7.75	0.99	
55	PC 400	K-25	21.9	0.99	
56	ST 508, 10t	K-35	43.2	0.99	
57	PC 350	K-25	7.5	0.99	
59	PHC 400	유압 NH-40	8.0	0.99	
60	PHC 400	유압 DKH-7	8.7	0.99	

주) PC : PC말뚝, PHC : 고강도 PC말뚝, ST : 강관말뚝, K : Kobe 디젤해머

표 1. b. 분석된 재하시험 자료(매입말뚝)

	말뚝번호	말뚝종류 및 직경	시공법	관입깊이(m)	결정곡선 및 결정계수(R <sup>2</sup> )			
침하량이 말뚝직경의 0.1D 이상	2	PC 400	SIP	13.0	쌍곡선	0.99		
	11	PC 400	SIP	7.0		0.98		
	12	PC 400	SIP	6.0		0.99		
	15	PHC 400	SIP	13.0		0.99		
	16	PHC 350	SIP	4.0		0.98		
	17	PHC 400	SIP	12.4		0.99		
	18	PHC 400	SIP	10.0		0.99		
	23	PC 350	선굴착 후 최종경타	7.0		0.97		
	25	PC 400	SIP	13.4		0.97		
	26	PC 500	SIP	20.7		0.98		
	27	PC 400	SIP	13.5		0.99		
	28	PC 350	SIP	9.5		0.99		
	36	ST 406×9t	COREX	19		0.99		
	45	ST 216×9t	SIP	2.9		0.99		
	46	ST 216×9t	SIP	2.7		0.99		
	침하량이 말뚝직경의 0.1D 이하	9	PC 400	SIP		6.3	이차곡선	0.99
		13	PC 400	SIP		6.5		0.99
14		PHC 400	SIP	14.9	0.99			
24		PC400	SIP	8.0	0.98			
44		ST406×9t	COREX	20	0.99			
29		PC350	SIP	10.2	지수곡선	0.99		
1		PHC350	SIP	13.0	쌍곡선	0.99		
6	PC400	SIP	9.5	0.99				
19	PC350	SIP	14.0	0.99				
20	PHC350	SIP	7.5	0.99				
21	PC350	SIP	14.0	0.99				
31	PC350	SIP	8.5	0.99				
34	PHC400	SIP	10.2	0.99				
37	PHC350	SIP	8.6	0.99				
38	PC500	SIP	9.7	0.99				
39	PC400	SIP+JSP	8.5	0.99				
41	PHC350	SIP	8.2	0.99				
5	PHC400	선굴착후최종경타	21.5	0.94				
침하량이 말뚝직경의 0.1D 이하	3	PC350	SIP	8.6		쌍곡선	0.99	
	4	PC400	SIP	19.0	0.94			
	7	ST406×9t	선굴착후최종경타	18.0	0.99			
	8	PC400	SIP	9.0	0.99			
	10	PHC400	SIP	9.0	0.99			
	22	PC400	SIP	6.5	0.99			
	30	PHC400	SIP	13.9	0.99			
	32	PHC350	SIP	10.0	0.99			
	33	PC350	SIP	13.7	0.99			
	35	PHC350	SIP	8.6	0.99			
	40	PC350	SIP	10.0	0.99			
	42	PHC400	SIP	13.5	0.99			
43	PHC350	SIP	7.5	0.99				

주) PC : PC말뚝, PHC : 고강도 PC말뚝, ST : 강관말뚝, SIP : Soil cement injected pile공법, COREX : 코렉스공법

2.2%가 지수곡선에 가장 일치하는 것으로 분석되었다.

일반적으로 하중-침하량 곡선의 모양에 따라 말뚝의 특성을 분류할 수 있는데, 이차곡선 형태이면 선단지지말뚝, 쌍곡선 형태이면 주면지지말뚝 그리고 지수곡선 형태이면 중간형으로 분류된다(阪口 등(1993) 참조). 그림 2에는 표 1의 분석자료중 침하량이 0.1D(D는 말뚝의 직경) 이상 발생한 것들에 대한 하중-침하량 곡선의 유형을 도시하였다. 그림 2에서도 이차곡선에 일치하는 하중-침하량 곡선은 선단지지말뚝의 특성을, 쌍곡선에 일치하는 하중-침하량 곡선은 마찰말뚝의 특성을 보여주고 있으며 지수 곡선의 경우는 양자의 중간특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 2 와 그림 2 로부터 정상적으로 시공된 항타말뚝의 하중-침하량 곡선은 주로 이차함수 곡선의 유형을 나타내고, 매입말뚝의 그것은 주로 쌍곡선의 유형을 나타내고 있는 것으로 나타났다. 따라서 이들 곡선의 유형별로 지지특성을 분류해보면 국내에서 정상적으로 시공된 항타말뚝은 일반적으로 선단지지말뚝, 매입말뚝은 주로 마찰말뚝의 형태로 지지되었다고 평가할 수 있다.

#### 4. 허용하중판정법의 비교

표 3과 표 4는 표 1의 자료중 침하량이 말뚝 직경의 10% 이상 얻어진 하중-침하량곡선에 대해 각종 판정법을 적용하여 파괴하중(극한하중 또는 항복하중)을 구한 후 이들에 대해 통계분석한 것이다.

항복하중 판정기법은 구조물기초설계기준에 제안하는 3가지 도해법((1)  $\log P - \log S$  분석법, (2)  $ds/d(\log t) - P$  분석법, (3)  $S - \log t$  분석법)을 그리고 (4) DIN 4026의 순침하량 판정기법(순침하량 0.025D에서의 하중), (5) Davisson 방법을 적용하였고, 극한하중 판정기법으로는 도로교표준시방서에서 채택된 말뚝직경의 10%에서의 하중(말뚝머리 침하량 0.1D에서의

하중: 0.1D 방법)과 Terzaghi가 제안하여 Chin이 개량한  $\Delta/P - \Delta$  방법(Chin, 1970)을 이용하여 분석하였다.

표 3과 표 4에서와 같이 도해법에서는 판정 곤란의 경우가 많이 있고 얻어진 값들에 있어서도 평균치로 보아 신뢰도에 문제가 있음을 알 수가 있다. 표 3과 표 4의 내용을 종합적으로 판단해보면 항복하중 판정기법 중 순침하량 판정법과 Davisson 판정기법이, 극한하중법의 경우 Chin의 방법이 비교적 신뢰도가 있는 것으로 볼 수 있다. 도해법중에서는  $S - \log t$  분석법이 상대적으로 신뢰도가 있는 것으로 평가된다.

표 3과 표 4에서 보면 침하량을 기준으로 항복하중을 판정하는 순침하량법과 Davisson 방법에 의한 항복하중은 매입말뚝쪽이 항타말뚝에 비해 작게 평가되는 것으로 나타났다. 이는 매입말뚝의 경우 마찰말뚝의 형태가 우세하여 파괴하중(여기서는 0.1D 이상 침하시 하중)은 마찰력쪽에 상대적으로 더 의존하게 되어 침하량측면에서는 불리한 현상을 반영한 것으로 판단된다. 이러한 사실은 표 3과 표 4에서 매입말뚝들의 항복하중 평균치가 비교적 작게 나타나는 것으로도 유추해 볼 수 있다. 따라서 순침하량법, Davisson방법 등으로 매입말뚝의 허용하중을 판정할 경우는 도해법의 결과와 반드시 비교하여 결정해야 할 필요가 있다고 판단된다.

전반적으로 Davisson방법에 의한 전체 평균하중은 다른 방법들에 의한 하중보다 과소평가되는 것으로 나타났다. 그림 3은 표 3과 표 4에서 Davisson판정값을 정규화한 값( $(5)/(6) \times 100$ )중 표준편차의 범위를 벗어난 경우에 대해 이들의 원인을 분석한 후 결과를 도시한 것이다. 그림에서와 같이 Davisson방법에 의한 하중은 짧은 말뚝의 경우 과소 평가, 긴말뚝의 경우 과대평가되는 것으로 나타났으며, 극한하중이 나타난 말뚝(plunging 파괴가 발생한 말뚝)의 경우는 선단지형 파괴에서는 과소평가, 주면마찰지지형에서는 과대평가되는 것으로 분석되었다. 이러한 사실은 항복하중을 결정할

때 적용되는 Davisson방법의 offset line은 전술한 경우들에 대해서 실제의 침하량의 현상을 적절히 반영하지 못하는 한계를 보여주는 것이라고 판단된다. 따라서 반복재하시험, 짧은말뚝 또는 긴말뚝 그리고 극한하중이 나타나는 말뚝 등의 허용하중을 구하기 위해 Davisson 방법을 적용할 때는 이러한 점을 감안하여 순침하량법의 결과를 참고하여 결정하는 것이 바람직하다고 평가된다.

각 종 항복하중 판정기법에 의해 결정된 하중을 0.1D 방법으로 결정된 하중으로 정규화한 값의 평균은 약 0.78 정도(항타말뚝 0.775, 매입말뚝 0.782)를 보여주고 있는데, 이를 국내 기준에서 제시하는 안전율 개념(항복하중/극한하중=2/3 = 0.67)과 비교해 볼 때, 0.1D 방법에 의한 하중을 극한하중으로 판정하는 기

준에 문제가 있음을 알 수 있다. 이는 침하량 0.1D에서의 극한하중을 Chin의 방법으로 결정된 극한하중으로 정규화 시켰을 때 나타나는 결과로도 확인해 볼 수가 있다. 즉 0.1D 방법에 의해 결정된 극한하중을 Chin의 방법에 의해 결정된 극한하중으로 정규화한 값은 항타말뚝의 경우 0.89, 매입말뚝의 경우 0.84 정도를 보여주고 있어, 0.1D 방법으로 결정된 하중은 극한하중이 아닌 항복하중과 극한하중 사이에서 존재하는 일종의 제한하중(limiting load)임을 알 수가 있다. 결국, 허용하중을 결정하기 위해 극한하중 취득시 안전율 3.0, 항복하중 취득시 안전율 2.0을 적용하는 우리나라의 기준에서, 0.1D방법에 의해 결정된 하중을 정의에 의한 극한하중과 동일하게 취급하는 것은, 실무적으로 정의에 의한 극한하중을 구

표 3. 각종 판정기준에 의한 파괴하중 비교(항타말뚝)

말뚝 번호	(1) log P-log S(t)	(2) ds/d(lot)-P (t)	(3) S-log t (t)	(4) P-net.S (t)	(5) Davisson (t)	(8) 평균 (t)	(6) P(0.1D) (t)	(7) Chin 방법 (t)	(1)/(6) ×100 (%)	(2)/(6) ×100 0(%)	(3)/(6) ×100 (%)	(4)/(6) ×100 (%)	(5)/(6) ×100 (%)	(6)/(7) ×100 (%)	비 고
1	30	43	50	46	42	42.20	66	69	45.45	65.15	75.76	69.70	63.64	95.10	
2	158	162	150	170	156	159.20	214	227	73.83	75.70	70.09	79.44	72.90	94.15	
3	90	118	124	111	112	111.00	140	145	64.29	84.29	88.57	79.29	80.00	96.62	
4	60	65	70	62	48	60.75	88	96	68.18	73.86	79.55	70.45	54.55	91.67	S
5	215	240	245	228	230	231.60	280	294	76.79	85.71	87.50	81.43	82.14	95.21	
6	×	50	×	38	23	37.00	77	98		65.10		49.48	29.95	78.37	S
7	×	44	40	44	34	40.50	70	74		62.86	57.14	62.86	48.57	95.24	P <sub>1</sub>
8	40	×	30	42	42	38.50	50	52	80.00		60.00	84.00	84.00	96.53	
9	52	48	60	54	54	53.60	67	70	77.61	71.64	89.55	80.60	80.60	95.85	
10	55	67	70	67	66	65.00	86	94	63.95	77.91	81.40	77.91	76.74	91.20	
11	100	110	112	107	76	101.00	125	172	80.00	88.00	89.60	85.60	60.80	72.51	
12	85	78	90	83	82	83.60	93	95	91.40	83.87	96.77	89.25	88.17	97.69	
13	80	80	80	81	67	77.60	97	105	82.47	82.47	82.47	83.51	69.07	92.15	
14	75	×	60	68	67	67.50	114	122	65.79		52.63	59.65	58.77	93.52	
15	50	55	60	64	60	57.80	87	93	57.21	62.93	68.65	73.23	68.65	93.58	
16	50	70	60	66	66	62.40	100	104	50.00	70.00	60.00	66.00	66.00	95.97	
19	90	110	112.1	104	94	102.02	125	137	72.29	88.35	90.04	83.53	75.50	90.94	
20	98	96	112.1	103	101	102.02	112	118	87.42	85.64	100.00	91.88	90.10	95.32	
22	550	530	607.3	520	470	535.46	607	667	90.56	87.27	100.00	85.62	77.39	91.09	
24	100	90	106	97	99	98.40	115	120	86.96	78.26	92.17	84.35	86.09	95.83	
25	140	×	135	140	134	137.25	150	175	93.33		90.00	93.33	89.33	85.52	
27	250	238	×	287	280	263.75	342	370	73.10	69.59		83.92	81.87	92.33	
28	×	26	33.2	33	34	31.55	46	47		56.89	72.65	72.21	74.40	96.82	
29	110	115	140	146	140	130.20	180	213	61.11	63.89	77.78	81.11	77.78	84.59	
30	120	150	160	169	168	153.40	200	263	60.00	75.00	80.00	84.50	84.00	75.99	
32	200	×	247	230	290	241.75	222	455	90.09		111.26	103.60	130.63	48.84	L
33	100	83	99.7	100	90	94.54	100	105	100.30	83.25	100.00	100.30	90.27	94.68	
58	78	67	70	★	37	63.00	96	164	81.25	69.79	72.92	★	38.54	58.57	P <sub>1</sub>
평균									74.92	74.63	82.65	79.72	74.3/77.31	88.78	
표준 편차									(14.34)	(9.53)	(14.77)	11.87	18.52/ 9.16	11.67	

주) × 판정곤란; ★ 순침하량 미측정; ( )는 판정된 것에 대해서만 계산; S(짧은 말뚝), L(긴말뚝), P(P<sub>1</sub>는 선단지형, P<sub>2</sub>는 주면지형 plunging과괴); S, L, P는 Davisson 항목에서 표준편차를 벗어난 말뚝에 대해 원인 분석한 것임; \_은 S, P, L의 경우를 제외하고 계산



표 4. 각종 판정기준에 의한 파괴하중 비교(매입말뚝)

말뚝 번호	(1) log P-log S (t)	(2) ds/d(log t)-P (t)	(3) S-log t (t)	(4) P-net.S (t)	(5) Davisson (t)	(8) 평균 (t)	(6) P(0.1D) (t)	(7) Chin 방법 (t)	(1)/(6) ×100 (%)	(2)/(6) ×100 (%)	(3)/(6) ×100 (%)	(4)/(6) ×100 (%)	(5)/(6) ×100 (%)	(6)/(7) ×100 (%)	비고
2	86	85	100	87	88	89	105	112	81.90	80.95	95.24	82.86	83.81	93.42	
9	×	×	×	92	76	84	133	137				69.17	57.14	97.15	
11	75	×	×	75	77	76	100	112	75.00			75.00	77.00	88.97	
12	100	80	100	104	92	95	128	143	78.13	62.50	77.89	81.25	71.88	89.64	
13	×	×	×	34	29	34	83	108				40.96	34.94	77.21	P <sub>t</sub>
14	×	×	49	★	48	48	155	244			31.45	★	30.97	63.55	P <sub>t</sub>
15	×	70	100	63	44	69	110	185		63.64	90.91	57.27	40.00	59.40	P <sub>t</sub>
16	66	×	65	37	33	50	66	80	100.00			98.48	56.06	50.00	S
17	82	74	100	★	78	84	120	139	68.33	61.67	83.33	★	65.00	86.33	
18	110	105	160	114	89	116	160	192	68.75	65.63	100.00	71.25	55.63	83.20	
23	×	×	×	★	25	25	55	65				★	45.45	85.27	P <sub>t</sub>
24	66	52	66	56	48	58	78	86	84.62	66.67	84.62	71.79	61.54	91.23	
25	88	73	100	100	99	92	100	106	88.00	73.00	100.00	100.00	99.00	93.98	P <sub>s</sub>
26	150	147	150	155	151	151	175	204	85.71	84.00	85.71	88.57	86.29	85.74	P <sub>s</sub>
27	85	96	100	101	97	96	117	123	72.65	82.05	85.47	86.32	82.91	94.81	
28	75	77	88	★	74	79	88	99	85.23	87.50	100.00	★	84.09	88.89	
29	42	33	42	27	36	36	46	45	91.30	71.74	90.22	58.70	78.26	102.22	
36	×	40	57	★	47	48	53	58		75.47	107.55	★	88.68	91.17	P <sub>s</sub>
44	150	138	161	★	147	149	182	208	82.42	75.82	88.46	★	80.77	87.50	
45	35	33	40	★	26	34	43	85	81.40	76.74	93.02	★	60.47	50.77	
46	32	32	36	★	24	31	36	46	88.89	88.89	100.00	★	66.67	77.75	
평균									82.16	74.42	88.96	72.25	66.69/71.17	84.32	
표준편차									(8.32)	(8.75)	(16.25)	15.43	18.57/10.17	12.40	

주) × 판정공란; ★ 순침하량 미측정; ( )는 판정된 것에 대해서만 계산; S(짧은 말뚝), L(긴말뚝), P(P<sub>t</sub>는 선단지지형, P<sub>s</sub>는 주면지지형 Plunging 파괴); S, L, P는 Davisson 항목에서 표준편차를 벗어난 말뚝에 대해 원인 분석한 것임; \_은 S, P, L의 경우를 제외하고 계산

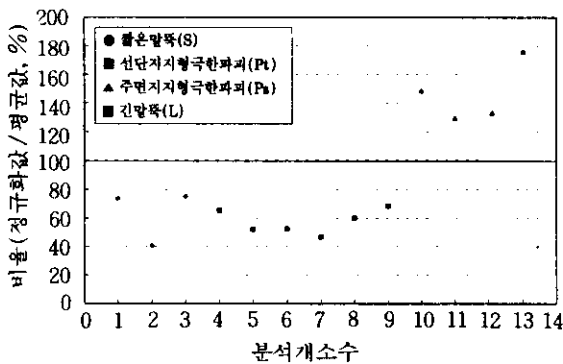


그림 3. 특수한 경우에 대한 Davisson 판정법의 신뢰도

하기가 어렵다는 것을 감안하면 대부분의 재하시험 결과가 안전측으로 해석될 수 있음을 보여주는 것이다.

0.1D 방법으로 구해지는 극한하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에서의 안전율로 환산하면 항타말뚝의 경우  $2.58(F_s/0.775=2/0.775)$ , 매입말뚝의 경우  $2.56(F_s/0.782=2/0.782)$  정도가 됨을 알 수 있으며 또한

도로교표준시방서 기준에서의 안전율로 환산하면 항타말뚝의 경우 약  $2.22(F_s \times 0.89=2.5 \times 0.89)$ , 매입말뚝의 경우 약  $2.11(F_s \times 0.84=2.5 \times 0.84)$ 가 됨을 알 수 있어 공법별로는 큰 차이가 없는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

관련문헌의 고찰 및 시공된 말뚝에 대한 재하시험 결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 재하시험결과로부터 얻어진 하중-침하량곡선의 유형을 분석한 결과 항타말뚝의 경우 약 57%가 이차함수형태, 매입말뚝의 경우 약 58% 정도가 쌍곡선 형태로 나타나고 있으며 이들 곡선의 형태로 보아 우리나라의 항타말뚝의 경우는 선단지지말뚝이 우세하고, 매입말뚝의 경우 마찰말뚝이 우세한 것으로 보인다. 따라서 특정곡선을 기준으로하여 제안된 기존의

허용하중 판정기법들은 일반적으로 적용하는데 한계가 있다고 판단된다.

- (2) 여러가지 항복하중 판정기법들은 결과에 있어 상당한 차이를 보여주고 있는 데 이들중 순침하량 판정기법과 Davisson 방법의 신뢰도가 비교적 높게 나타났으며, 도해법의 경우 신뢰도가 매우 낮은 것으로 분석되었다. 한편 극한하중 판정법으로써 Chin의 방법은 비교적 안정된 결과를 보여주는 것으로 나타났다. 침하량을 기준으로 하는 순침하량법과 Davisson방법으로 매입말뚝의 항복하중을 결정할 때는 도해법의 결과를 참고할 필요가 있으며, 또한 Davisson방법을 짧은말뚝이나 긴 말뚝, 극한파괴가 나타나는 말뚝, 반복재하시험법 등에 적용할 경우는 순침하량법의 결과를 참고할 필요가 있음을 알 수 있었다.

이러한 결과들로부터 허용하중을 구하기 위한 항복하중은 한가지 방법에 의존하지 말고 시험방법, 시공법, 말뚝조건 등을 고려하여 여러가지 법으로 분석하여 비교한 후 최종적으로 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

- (3) 말뚝머리침하량 0.1D에서의 하중은 정의에 의한 극한하중과 차이가 있으며 이는 항복하중과 극한하중 사이에 존재하는 일종의 제한하중으로 판단된다. 따라서 허용하중을 결정할 때 이를 극한하중으로 간주하는 것은 대부분의 재하시험결과를 안전측으로 평가할 수 있다. 제한하중에 적용해야할 안전율을 구조물기초설계기준에 따른 안전율 기준으로 환산해보면 약 2.6이 적용될 수 있고, 도로교 표준시방서에 따른 안전율 기준으로 환산할 경우 2.2가 적용될 수 있음을 알 수 있었다. 최근에 개정된 도로교 표준시방서의 경우 안전율이 2.5로 변경되었지만 상기에 서 제안한 0.1D 방법을 극한하중이 아닌 일종의 제한하중으로 인정할 경우 안전율은 2.2까지 낮출 수 있을 것으로 보이며,

또한 극한하중과의 개념차이 및 구체적인 항복하중판정기법의 삽입 등은 조정되어야 할 것으로 보인다.

## 참고 문헌

1. 건설부(1986), 구조물기초설계기준, 건설부, pp. 191~197, pp. 306~308.
2. 대한토목학회(1996), 도로교표준시방서, 대한토목학회, pp. 682~688.
3. 류정수, 김석열(1995), "최대극률 방법을 이용한 말뚝의 연직지지력 연구," 한국지반공학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 5~12.
4. 박찬국, 박용부, 이명환, 조천환, 이장덕, 이원재(1995), "매입말뚝공법의 항타공해 저감효과," '95 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. I~31~I~40.
5. 원상연, 황성일, 조남준(1996), "쌍곡선 근사에 의한 현장타설 말뚝의 항복하중 판정," 한국지반공학회지, Vol. 12, No. 6, pp. 79~86.
6. 조천환, 이명환, 홍헌성, 엄재경(1997), "매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 특성 및 분석기법 연구," '97 봄 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 39~46.
7. 阪口 理, 林 冠洲(1993), 荷重-沈下量 曲線의 形狀을 考慮した 場所打ち杭의 支持力, 土と基礎, 1993. 4, pp. 21~26.
8. 土質工學會(1993), 土質工學會基準 杭의 鉛直載荷試方法·同解説, 日本土質工學會, pp. 151~206.
9. Chin, F. K. (1970), "Estimation of the Ultimate Load of Pile not carried to Failure," Proceedings of 2nd Southeast Asian Conference on Soil Engineering, Singapore, pp. 81~90.
10. Fellenius, B. H. (1980), "The analysis of results from routine pile load tests," Ground Engineering, September, 1980, pp. 19~31.
11. Prakash, Shamsheer(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc., pp. 634~676.
12. Van Impe(1988), "Different Behaviour of Bored and Driven Piles," Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe(ed.), Balkema, Rotterdam, pp. 47~82.

(접수일자 1997. 8. 29)