항타말뚝의 하중-침하량 곡선 특성분석

Analysis of load-settlement curves in driven piles

천병식[1] Chun, Byung-Sik, 조천환[2] Cho, Chun-Whan, 이명환[3] Lee, Myung-Whan, 이원제[3] Lee, Won-Je, 엄재경[3] Um, Jae-Kyung,

[1] 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Cilvil Engineering, Hanyang Univ.
[2] 삼성물산(주), (02) 2145-6584
[3] (주)파일테크, PILETECH Consulting Engineers. (02) 3402-2361

SYNOPSIS : According to the domestic related criteria the analysis methods of load-settlement curve have some conflicts each other and some vague points in determining the allowable capacity from ultimate or yielding capacity. This paper presents some suggestions for solving the problems from reviewing relevant materials and analysis of 57 pile load test results.

Key words : Pile Load Test, Load-Settlement Curve, Allowable Capacity, Ultimate Capacity, Yielding Capacity

1. 서 론

말뚝의 재하시험결과로부터 얻어지는 하중-침하량 곡선을 이용하여 허용 지지력을 결정하는 방법에는 많은 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 평행될때)을 구하는 것은 매우 곤란하므로 대부분의 경우 이에 대한 대안으로 침하량을 기준으로 극한지지력을 선정하거나 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 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 분석자에 따라 오차가 발생하거나 방법들 간의 결과에 차이가 발생할 수 있다.

국내의 기준에서는 하중-침하량 곡선으로부터 극한지지력 혹은 항복하중을 결정하여 주어진 안전율을 적용한 후 허용지지력을 결정하도록 되어 있다. 그러나 기준에 따라 적용 안전율이 다르고 , 제안하는 분석기법도 차이가 있으며 또한 이들 기준에서도 앞서 언급한 근본적인 문제점이 내재 되어 있다. 따라서 국내에서도 최근에 이러한 문제의 대안으로써 항복하중의 단일해를 구하기 위한 방법들이 제안되었으나 이들 역시 제안자의 방법으로만 단순화시키는 경향이 있어 복잡 다양한 말뚝의 지지력거동을 만족할 수 있도록 적용하기에는 한계가 있다고 판단된다. 그러나 실무에서는 만족할 만한 분석 기법이 반드시 필요한 것이 현실이다.

이러한 관점에서 본 논문에서는 이미 실시된 57개 항타말뚝의 정재하시험을 통해 얻어진 하중-침하량 곡선의 특성을 분석하고 허용지지력을 구하기 위한 여러가지 방법들을 비교 평가해 보았다.

2. 기존 허용하중판정법의 고찰

국내의 기준중 구조물기초설계기준(건설부, 1986)에서는 극한하중(안전율 최소 3적용)을 구하되 극한하중이 확인되지 않을 경우는 항복하중(안전율 2 적용)을 구하여 이값의 1.5배를 극한하중으로 하며 어느경우에도 항복하중에서 구한 극한하중은 실제 극한하중보다 작도록 규정하고 있다. 여기에서는 항복하중을 구하는 방법을 3가지 도해방법으로 명확히 명시하였지만 정의에 의한 극한하중이 주어지지 않을 경우 극한하중을 판정하는 방법은 모호하게 서술하고 있다.

도로교표준시방서(대한토목학회, 1996)의 경우 재하시험 결과로 부터 말뚝의 허용지지력을 판정할 경우 정의에 의한 극한지지력을 구하되 이것이 곤란할 때는 말뚝머리의 침하량이 말뚝직경의 10 %에서의 하중을 극한지지력으로 하도록 되어있으며 안전율은 평시기준으로 지지말뚝의 경우 2.5, 마찰말뚝의 경우 3을 적용하도록 되어 있다. 또한 구체적인 항복하중 판정기법은 명시되어있지 않다.

상기에서와 같이 기준마다 안전율의 개념이 서로 다르고 또한 극한하중과 항복하중의 판정기준의 분류가 모호한 면이 있다. 특히, 정의에 의한 극한지지력과 침하량이 말뚝직경의 0.1D에서 하중을 극한하중으로 동일시 하는 것은 큰 차이가 있을 수 있으며 이때 항복하중에 1.5배 한것이 극한하중이라는 수식적기준에 혼돈이 일어날 수 있다.

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

3. 하중-침하곡선의 유형

표-1은 분석에 이용된 재하시험자료를 요약해 놓은 것이다. 표에서와 같이 분석에 이용된 자료에는 각종의 해머 및 다양한 말뚝의 종류가 포함되어 있음을 알 수가 있다. 표에서 제시된 재하시험 결과를 이용하여 하중-침하량 곡선의 유형을 파악하기 위해 다음과 같은 3종류의 곡선으로 회귀분석 하였다.

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

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

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

여기서 y는 침하량이며 x는 하중이고 a, b, c는 관련 상수이다.

표-1에서와 같이 회귀분석한 결과는 57개의 하중-침하곡선중 65 %가 이차곡선에, 35 %가 쌍곡선에 가장 일치하는 것으로 분석되었으며 지수곡선의 유형은 나타나지 않았다. 이들의 대표적인 하중침하곡선의 유형을 그림-1에 도시하였다. 그림에서와 같이 이차곡선에 일치하는 하중-침하량곡선은 선단지지말뚝의 형태를, 쌍곡선에 일치하는 하중-침하량곡선은 마찰말뚝의 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로 부터 정상적으로 항타시공된 말뚝의 하중-침하곡선은 일반적으로 이차함수 곡선의 유형을 보여주고 있음을 알 수 있고, 따라서 국내의 경우 항타공법으로 시공된 말뚝은 주로 선단지지 형태로 지지되고 있다고도 볼 수 있다.

표-1과 그림-1로부터 하중-침하량곡선은 어느 일정한 곡선의 형태로 회귀되는 것이 아니며 따라서 일정한 곡선형태를 기준으로하여 제시된 분석기법은 허용지지력을 분석하기 위한 일반적인 방법으로 적용하기에는 문제가 있다고 판단된다.

표-1 분석된 재하시험 자료

말뚝 번호	말뚝종류 및 직경	해 머	관입깊이(m)	설계하중 (ton)	곡선유형	결정계수(R^2)	비 고
4	PC 350	K-25	5.4	40	이차곡선	0.96	침하량 말뚝직경 0.1D 이상
6	PC 350	K-25	4.0	40		0.99	
7	PC 350	K-25	7.4	40		0.99	
15	PC 400	유압	11.5	60		0.99	
16	PC 350	K-25	7.0	40		0.99	
32	ST 406.4, 9t	K-25	48.1	70		0.99	
18	PC 400	유압 6 ton	7.0	60	이차곡선	0.98	침하량 말뚝직경 0.1D 이하
23	PC 400	K-25	22.6	60		0.99	
34	PC 350	K-25	3.8	40		0.99	
35	PC 350	K-25	5.4	40		0.99	
36	PC 350	K-25	5.4	40		0.99	
37	ST 508, 12t	K-25	7.3	100		0.99	
38	PC 350	K-25	6.0	40		0.99	
39	PHC 400	유압 S-60	7.5	70		0.99	
40	PC 350	K-25	18.0	40		0.99	
41	PHC 400	K-35	16.9	70		0.99	
42	PC 400	K-25	11.2	50		0.99	
43	PHC 500	유압 S-60	10.3	100		0.99	
45	ST 812.8, 16t	K-45	49.81	150		0.99	
46	ST 406.4, 9t	K-25	52.1	80		0.99	
47	ST 406.4, 9t	K-25	23.0	80		0.99	
48	PHC 400	K-35	25.4	60		0.99	
49	PHC 450	K-35	17.5	70		0.99	
50	PHC 400	K-35	8.3	60		0.99	
51	ST 609.6, 12t	K-35	10.7	133.9		0.99	
52	PC 350	K-25	8.0	40		0.99	
53	ST 609.6, 12t	K-45	14.83	133.9		0.97	
54	PHC 500	K-35	7.75	90		0.99	
55	PC 400	K-25	21.9	60		0.99	
56	ST 508, 10t	K-35	43.2	110		0.99	
57	PC 350	K-25	7.5	40		0.99	
1	PC 350	K-25	5.0	40	쌍곡선	0.99	침하량 말뚝직경 0.1D 이상
2	ST 508, 10t	K-25	9.6	100		0.99	
3	ST 406.4, 9t	K-25	10.5	62		0.99	
5	ST 609.6, 12t	K-35	11.7	140		0.99	
8	PC 350	K-25	7.1	40		0.99	
9	PC 350	K-25	9.0	40		0.99	
10	PC 350	K-25	11.1	40		0.99	
11	PHC 400	K-35	19.0	50		0.98	
12	PC 350	K-25	10.1	40		0.98	
13	PC 350	K-25	6.2	40		0.98	
14	PC 400	유압 5ton	13.5	60		0.98	
19	PC 400	K-25	10.1	60		0.99	
20	PC 400	K-25	12.5	60		0.99	
22	ST 812, 12t	K-65	51.5	150		0.98	
25	PHC 400	S-35	25.3	60		0.99	
27	ST 711.2, 9t	K-35	19.4	140		0.98	
28	PC 350	K-25	14.7	40		0.96	
29	PHC 400	K-35	18.8	60		0.99	
30	PHC 400	K-35	26.7	60		0.99	
33	PC 400	K-25	11.8	50		0.99	

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

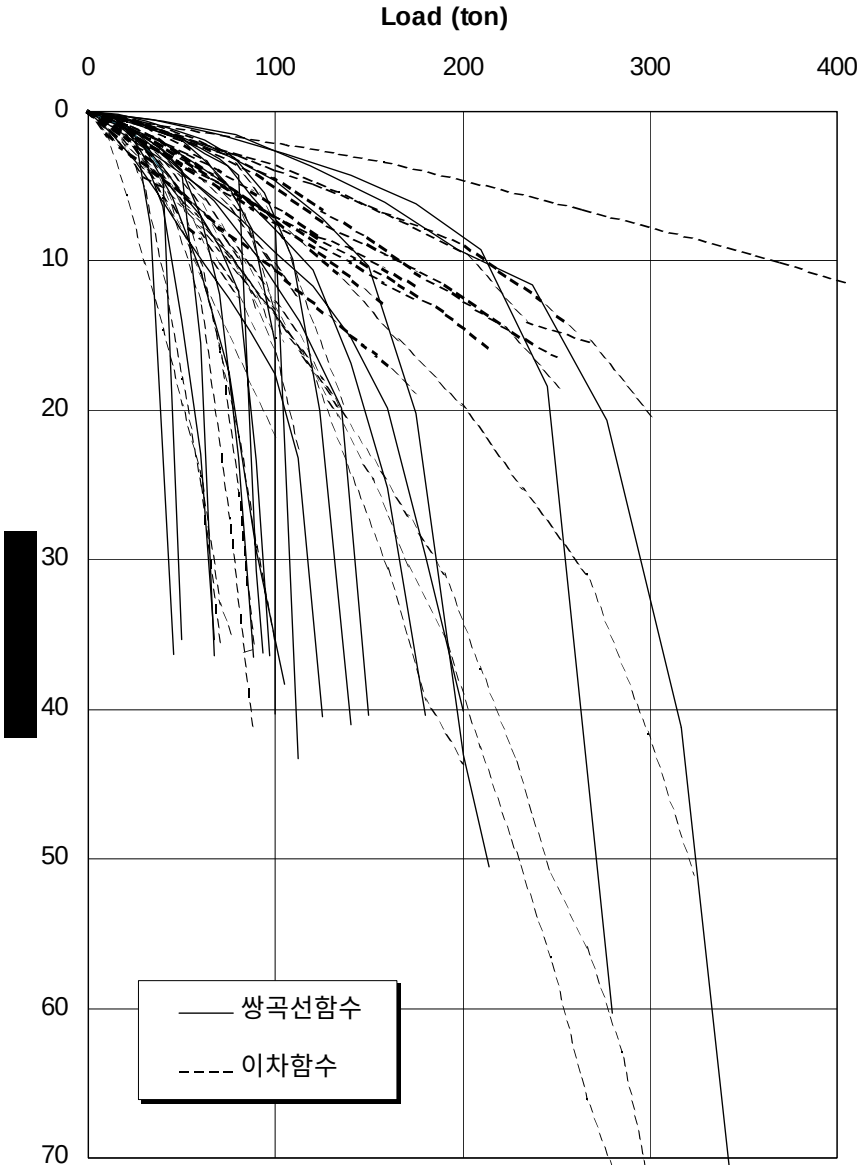

그림-1 하중-침하량곡선

표-2 각종 판정기준에 의한 하중

말뚝번호	(1) log P-log S	(2) ds/d(logt)-P	(3) S - log t	(4) P-net. S	(5) Davisson	평균	(6) P(0.1*D)	(7) Chin 방법	(1)/(6)*100	(2)/(6)*100	(3)/(6)*100	(4)/(6)*100	(5)/(6)*100	(6)/(7)*100
4	60	65	70	-	58	63.25	88	96	68.18	73.86	79.55		65.91	91.67
6	X	50	40	38	23	37.75	76.8	98		65.10	52.08	49.48	29.95	78.37
7	X	44	40	44	34	40.50	70	73.5			57.14	62.86	48.57	95.24
15	50	55	60	64	60	57.80	87.4	93.4	57.21	62.93	68.65	73.23	68.65	93.58
16	50	70	60	66	66	62.40	100	104.2	50.00	70.00	60.00	66.00	66.00	95.97
32	270	X	247	230	286	258.25	222	454.5	121.62		111.26	103.60	128.83	48.84
2	158	162	150	170	156	159.20	214	227.3	73.83	75.70	70.09	79.44	72.90	94.15
3	90	118	124	111	113	111.20	140	144.9	64.29	84.29	88.57	79.29	80.71	96.62
5	215	240	245	228	230	231.60	280	294.1	76.79	85.71	87.50	81.43	82.14	95.21
8	40	X	30	42	42	38.50	50	51.8	80.00		60.00	84.00	84.00	96.53
9	52	48	60	54	54	53.60	67	69.9	77.61	71.64	89.55	80.60	80.60	95.85
11	100	110	112	107	76	101.00	125	172.4	80.00	88.00	89.60	85.60	60.80	72.51
12	85	78	90	83	82	83.60	93	95.2	91.40	83.87	96.77	89.25	88.17	97.69
13	80	80	80	81	67	77.60	97	105.26	82.47	82.47	82.47	83.51	69.07	92.15
19	90	110	112.1	104	94	102.02	124.5	136.9	72.29	88.35	90.04	83.53	75.50	90.94
20	98	96	112.1	103	101	102.02	112.1	117.6	87.42	85.64	100.00	91.88	90.10	95.32
22	550	530	607.3	520	470	535.46	607.3	666.7	90.56	87.27	100.00	85.62	77.39	91.09
25	140	X	135	140	134	137.25	150	175.4	93.33		90.00	93.33	89.33	85.52
28	X	26	33.2	33	34	31.55	45.7	47.2		56.89	72.65	72.21	74.40	96.82
33	100	83	99.7	100	92	94.94	99.7	105.3	100.30	83.25	100.00	100.30	92.28	94.68
1	30	43	50	46	42	42.20	66	69.4	45.45	65.15	75.76	69.70	63.64	95.10
10	55	67	70	67	66	65.00	86	94.3	63.95	77.91	81.40	77.91	76.74	91.20
14	75	50	60	68	67	64.00	114	121.9	65.79	43.86	52.63	59.65	58.77	93.52
29	110	115	140	146	140	130.20	180	212.8	61.11	63.89	77.78	81.11	77.78	84.59
30	160	150	160	167	168	161.00	200	263.2	80.00	75.00	80.00	83.50	84.00	75.99
27	250	238	277	287	282	266.80	342	370.4	73.10	69.59	80.99	83.92	82.46	92.33
평균									76.38	74.56	80.56	80.04	75.72	89.67
표준편차									16.92	11.65	15.66	12.18	17.56	10.64

주) X는 판정곤란, -는 순침하량 미측정

4. 허용하중판정법의 비교

표-2는 표-1의 자료중 침하량이 말뚝직경의 10 % 이상 얻어진 하중-침하량곡선에 대해 각종 허용하중 판정법을 적용하여 극한하중 또는 항복하중을 구한 후 이들에 대해 통계분석한 것이다.

항복하중 판정기법은 구조물기초 설계기준에 제안하는 3가지 도해법(S-log t 곡선법, ds/d(log t)-P 곡선법, logP-logS 곡선법)을 그리고 Davisson 방법, DIN 4026의 순침하량 판정기법(순침하량 0.025 D에서의 하중)을 적용하였고, 극한하중 판정기법은 도로교 표준시방서에서 채택된 말뚝직경의 10 %(말뚝머리 침하량 0.1 D에서의 하중 : 0.1D 방법)와 Terzaghi가 제안하여 Chin이 개량한 $\Delta/\mathrm{P} - \Delta$방법(Chin, 1970)을 이용하여 분석하였다.

표-2에서와 같이 각 방법별로 분석된 항복하중 판정기법들은 큰 차이 없이 비교적 일치하는 것으로 나타났지만 역시 도해법의 경우 평균치와 표준편차로 보아 신뢰도에 문제가 있음을 알 수가 있다. 또한항복하중 판정기법중 Davisson 판정기법과 순침하량 판정기법이 가장 신뢰도가 높은 것으로 나타났다.

각종 항복하중 판정기법에 의해 결정된 하중을 0.1D 방법으로 결정된 하중으로 정규화한 값은 평균 약 0.75 정도를 보여주고 있는데, 국내기준에서 제시하는 안전율개념(항복하중/극한하중=2/3=0.67)과 비교해 볼 때, 0.1D 방법을 극한하중으로 판정하는 기준에 문제가 있음을 보여주고 있다. 이는 침하량 0.1D에서의 극한하중을 Chin의 방법으로 결정된 극한하중으로 정규화 시켰을 때 나타나는 결과로도 유추해 볼 수가 있다. 즉 0.1D 방법에 의해 결정된 극한하중을 Chin의 방법에 의해 결정된 극한하중으로 정규화한값은 0.91정도를 보여주고 있어, 0.1D 방법으로 결정된 하중은 극한하중이 아닌 항복하중과 극한하중에서 존재하는 제한하중(limiting load)임을 알 수가 있다. 결국, 허용하중을 결정하기 위해 극한하중 취득시 안전율 3, 항복하중 취득시 안전율 2를 적용하는 우리나라의 기준에서 0.1D방법에 의해 결정된 하중을 정의에 의한 극한하중과 동일하게 취급하는 것은, 실무에서 정의에 의한 극한하중을 구하기가 어렵다는 것을 감안하면 대부분의 재하시험 결과가 매우 안전측으로 해석될 수 있음을 보여주는

것이다. 0.1D 방법으로 구해지는 극한하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에서의 안전율로 환산하면 2.6(2/0.75) 정도가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

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

⑴ 항타시공된 말뚝의 재하시험결과로 부터 얻어진 하중-침하량곡선의 유형을 분석한 결과 약 65% 정도가 이차함수 형태, 35%정도가 쌍곡선 함수형태를 나타내 우리나라의 항타말뚝의 경우 선단지지말뚝이 우세한 것으로 보인다. 따라서 특정곡선을 기준으로하여 제안된 기존의 허용하중 판정기법들은 일반적으로 적용하는데 한계가 있다고 볼 수 있다.

⑵ 항타말뚝의 경우 여러가지 항복하중 판정기법들은 비교적 일치하는 결과를 보여주고 있으며 특히 이들중 Davisson 방법과 순침하량 판정기법의 신뢰도가 높게 나타났으며, 도해법의 경우 신뢰도가 비교적 낮은 것으로 분석되었다.

⑶ 말뚝머리침하량 0.1D에서의 하중은 정의에 의한 극한하중과 차이가 있고 이는 항복하중과 극한하중 사이에 존재하는 제한하중(limiting load)의 일종으로 판단된다. 따라서 허용하중을 결정할 때 이를 극한하중으로 간주하는 것은 대부분의 재하시험결과를 안전측으로 평가할 수 있다. 이의 제한하중에 적용해야할 안전율을 구조물기초설계기준에 따른 안전율로 환산해보면 약 2.6이 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

최근에 개정된 도로교 표준 시방서의 경우 안전율이 2.5로 변경되어 상기에서 제안한 0.1 D방법의 내용을 수용할 수 있을 것으로 판단되나, 역시 극한하중과의 개념차이 및 구체적인 항복하중판정기법의 삽입 등은 조정되어야 할 것으로 보이며 또한 향후 개정예정인 관련 기준에서는 본 논문에서 제안한 결과를 참조하도록 제안한다.

참고문헌

1. 건설부(1986), **구조물기초설계기준**, pp191 197, pp306 308.
2. 류정수, 김석열(1995), “최대곡률 방법을 이용한 말뚝의 연직지지력 연구,” **한국지반공학회지**, 제 11권, 제 4호, pp5 12.
3. 원상연(1995), “하중-침하 곡선의 쌍곡선 근사에 의한 말뚝기초의 항복하중,” **석사학위논문, 국민대학교**, pp26 33.
4. 대한토목학회(1996), **도로교표준시방서**, pp682 688.
5. 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, pp81 90.
6. 土質工學會(1993), **土質工學會基準 杭の 鉛直載荷試方法**·同解說 日本土質工學會, pp.151 206.