KGS Spring '97 National Conference/27, March, 1997/Seoul/Korea

매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 특성 및 분석기법 연구
Analysis of load-settlement curves in embedded piles

조천환[1], Chun-Whan Cho, 이명환[2], Myung-Whan Lee, 홍헌성[3], Hun-Sung Hong,
엄재경[4], Jae-Kyung Um,

[1] 삼성물산(주), (02) 2145-6584
[2] 파일테크 연구소장, Research Fellow, Piletech Consulting Engineers
[3] 파일테크 사장, Principal, Piletech Consulting Engineers
[4] 파일테크 대리, Assistant Chief Engineer, Piletech Consulting Engineers

SYNOPSIS : Although the load-settlement curve characteristics of embedded piles are different from those of driven piles, the same analysis method for their allowable loads is adopted without any considerations. According to the domestic related criteria the analysis methods of load-settlement curve have some conflicts each other and have some vague points in determining the allowable capacity from ultimate or yield capacity. This paper presents some suggestions for solving those problems by reviewing relevant materials and analyses of 42 embeded pile load test results.
Key words : Load-Settlement Curve, Allowable Capacity, Embedded pile, Failure load, Limiting

load.

1. 서　론

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 적용해왔던 방법을 그대로 준용하고 있다.

말뚝의 재하시험결과로부터 얻어지는 하중-침하량 곡선을 이용하여 허용 지지력을 결정하는 방법에는 수많은 방법이 있다. 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 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 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.

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

상기의 관점에서 본 논문에서는 국내에 이미 실시된 42개 매입말뚝의 정재하시험을 통해 얻어진 하중-침하량 곡선의 특성을 분석하고 허용지지력을 구하기 위한 여러가지 방법들을 비교 평가한 후 또한 이들 결과를 항타말뚝에서의 분석 내용과 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 말뚝선단부 침하량이 말뚝직경의 10%일 때의 하중을 파괴하중으로 간주하는 방법, Davisson 방법(1972), Chin 방법(1970), De Beer 방법, Brinch-Hansen 방법(1963), Butler and Hoy's 방법(1977) 등이 있다.

그림 1.은 재하시험결과를 9가지의 각 종의 방법에 의해 파괴하중(failure load)을 구한 결과를 보여주고 있다. 그림에서와 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 판정결과는 그림에서 나타나 있는 판정방법에 의해서만 의존하는 것은 아니고 시공법 및 재하시험방법 등에 의해서도 달라지게 된다. 따라서 허용하중을 구하기 위한 합리적인 단일 방법을 선정한다는 것은 실제로 불가능하다고 볼 수 있다.

따라서 Joshi and Sharma(1987)의 경우 파괴하중을 구하기 위한 방법으로 재하시험법별로 시공법별로 적절한 판정방법들을 제시하고 있다. 또한 Fellenius(1980)의 경우도 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 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 3.0을 적용하도록 되어 있다. 또한 구체적인 항복하중 판정기법은 명시되어 있지 않다.

상기에서와 같이 기준마다 안전율의 개념이 서로 다르고 또한 극한하중과 항복하중의 판정기준의 분류가 모호한 면이 있다. 특히, 정의에 의한 극한지지력과 침하량이 말뚝직경의 10%에서 하중을 극한하중으로 동일시 하는 것은 차이가 있을 수 있으며, 이 때 항복하중에 1.5배 한것이 극한하중이라는 수식적 기준에 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 축척에 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 있어야 하므로 일반적으로 모든 말뚝에 적용하기에는 한계가 있다.

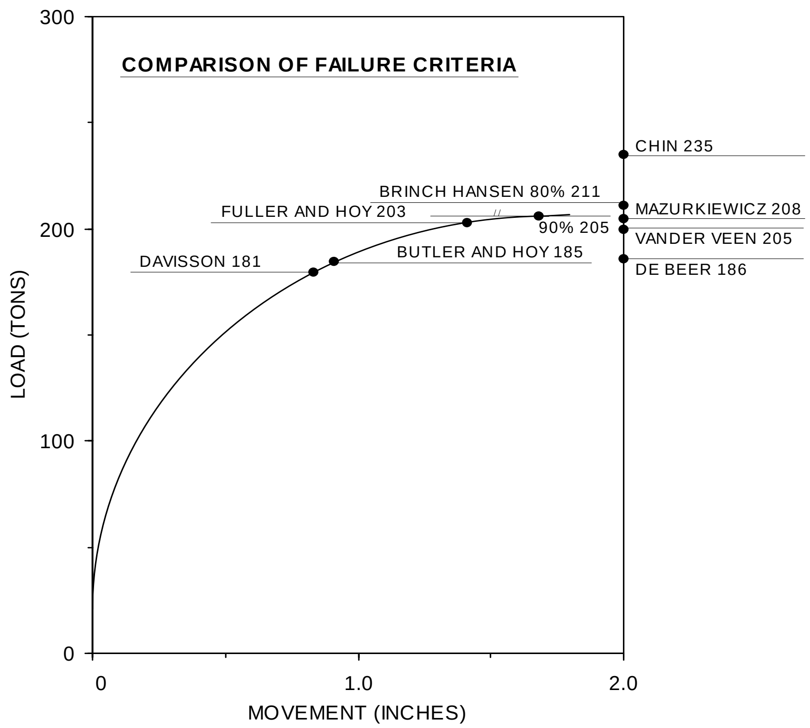

그림 1. 각종 기준으로 결정된 파괴하중들의 비교(Fellenius, 1980)

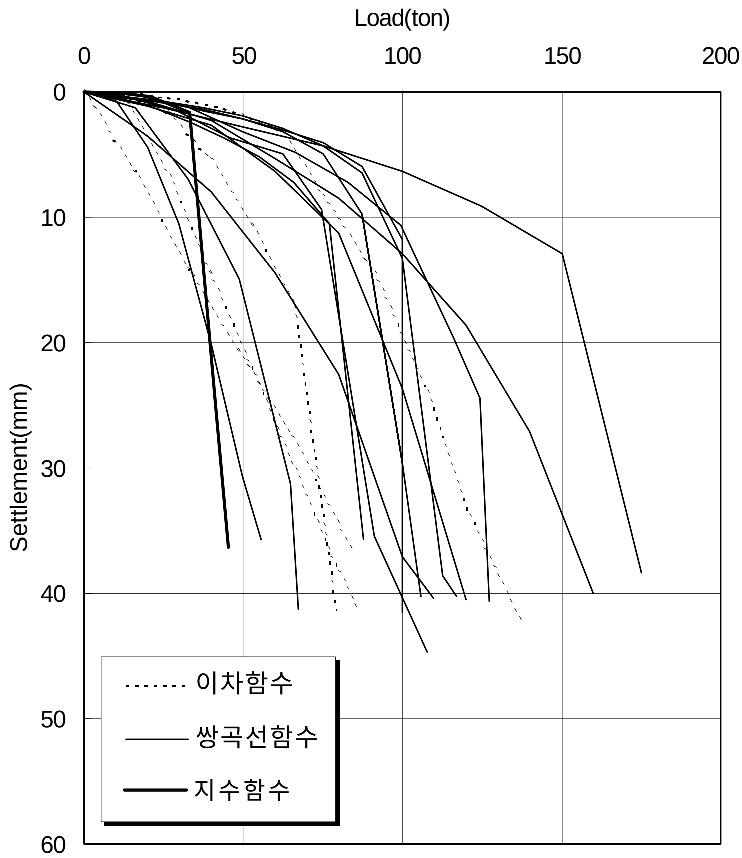

그림 2. 매입말뚝의 하중-침하량 곡선

3. 항타말뚝의 하중-침하량 곡선 특성

천 등(1996)은 57개의 항타말뚝의 정재하시험 결과를 이용하여 하중-침하량 곡선의 유형, 각종 허용하중 판정법을 비교 평가한 결과 다음과 같은 결론을 도출한 바 있다.

- 하중-침하량 곡선을 수학적인 곡선(쌍곡선, 이차곡선, 지수곡선)으로 회귀분석한 결과 65% 정도가 이차함수 형태, 35% 정도가 쌍곡선 함수 형태를 나타냈는 바 우리나라의 일반적인 항타말뚝의 경우 선단지지말뚝 형태가 우세한 것으로 보인다. 따라서 수학적인 특정곡선을 기준으로 하여 제안된 기존의 허용하중 판정기법들은 일반적으로 적용하는 데 한계가 있다.
- 항타말뚝으로부터 얻어진 하중-침하량 곡선에 여러 가지 항복하중 판정기법들을 적용해 본 결과 Davisson 방법과 순침하량 판정방법(DIN 4026)이 비교적 신뢰도가 높게 나타났으며, 도해법의 경우 신뢰도가 상대적으로 낮은 것으로 분석되었다.
- 말뚝머리 침하량, 0.1D에서 결정된 하중은 정의에 의한 극한하중과 차이가 있으며 이는 항복하중과 극한하중 사이에 존재하는 제한하중의 일종으로 판단된다. 따라서 도로교 표준시방서에서와 같이 허용하중을 결정할 때 이를 극한하중으로 간주하는 것은 대부분의 시험결과를 안전측으로 평가할 수 있다. 이 기준에 의한 하중을 허용하중으로 환산하기 위해 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에 따른 안전율로 환산해 보면 약 2.6이 적용될 수 있음을 알 수 있다.

4. 매입말뚝의 하중-침하량 곡선 특성

4.1 하중-침하곡선의 유형

매입말뚝의 하중-침하곡선의 유형을 분석하기 위해 42개 매입말뚝의 정재하시험 결과(하중-침하량 곡선)에 대해 대표적인 곡선형태(쌍곡선, 이차곡선, 지수곡선)로 회귀분석한 후 이들결과를 비교하였다.

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

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

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

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

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

표 1.에서와 같이 회귀분석한 결과는 42개의 하중-침하곡선중 57%가 쌍곡선에, 40%가 이차곡선에, 3%가 지수곡선에 가장 일치하는 것으로 분석되었다. 이들중 침하량이 0.1D 이상 발생한 것들에 대한 하중침하곡선의 유형을 그림 2.에 도시하였다. 그림에서와 같이 이차곡선에 일치하는 하중-침하량곡선은 선단지지말뚝의 형태를, 쌍곡선에 일치하는 하중-침하량곡선은 마찰말뚝의 형태를 보여주고 있으며 지수곡선의 경우는 양자의 중간 형태를 보여주고 있음을 알 수 있다. 이러한 사실로 부터 정상적으로 시공된 매입말뚝의 하중-침하곡선은 일반적으로 쌍곡선의 유형을 보여주고 있음을 알 수 있고, 따라서 국내의 경우 매입말뚝공법으로 시공된 말뚝은 주로 주면마찰 말뚝의 형태로 지지되고 있다고 볼 수 있다.

표 1.과 그림 2.로부터 하중-침하량곡선은 어느 일정한 곡선의 형태로 회귀되는 것이 아니며 따라서 일정한 곡선형태를 기준으로하여 제시된 각종의 수학적 분석기법들은 허용지지력을 분석하기 위한 일반적인 방법으로 적용하기에는 문제가 있다고 판단된다. 즉, 하중-침하곡선의 형태가 결정된후 이를 바탕으로 각 종의 수학적 기법들을 적용해야만 분석된 결과들이 신뢰도가 있는 것이다.

표 1. 분석된 재하시험 자료

분석 내용 / 분류 번호	말뚝종류 및 직경	시공법	관입깊이 (m)	설계하중 (ton)	결정계수 (R^2)	결정 곡선	비 고
2	PC 400	SIP	13.0	50	0.9973	쌍곡선	침하량 0.1D 이상
11	PC 400	SIP	7.0		0.9856		
12	PC 400	SIP	6.0		0.9914		
15	PHC 400	SIP	13.0	80	0.9979		
16	PHC 350	SIP	4.0		0.9865		
17	PHC 400	SIP	12.4	80	0.9945		
18	PHC 400	SIP	10.0		0.9926		
23	PC 350	선굴착후 최종경타	7.0	40	0.9751		
25	PC 400	SIP	13.4	50	0.9792		
26	PC 500	SIP	20.7	100	0.9846		
27	PC 400	SIP	13.5	50	0.9990		
28	PC 350	SIP	9.5		0.9924		
36	PHC 350	SIP	4.0		0.9993	이차함수	
9	PC 400	SIP	6.3		0.9949		
13	PC 400	SIP	6.5		0.9933		
24	PC 400	SIP	8.0		0.9882		
29	PC 350	SIP	10.2		0.9959	지수함수	

표 1. 분석된 재하시험 자료(계속)

분류번호 \ 분석내용	말뚝종류 및 직경	시공법	관입깊이 (m)	설계하중 (ton)	결정계수 (R^2)	결정 곡선	비 고
1	PHC 350	SIP	13.0	60	0.9969	쌍곡선	침하량 0.1D 이하
6	PC 400	SIP	9.5	60	0.9952		
19	PC 350	SIP	14.0		0.9971		
20	PHC 350	SIP	7.5		0.9975		
21	PC 350	SIP	14.0		0.9979		
31	PC 350	SIP	8.5		0.9966		
34	PHC 400	SIP	10.2		0.9971		
37	PHC 350	SIP	8.6		0.9976		
38	PC 500	SIP	9.7		0.9983		
39	PC 400	SIP＋JSP	8.5		0.9939		
41	PHC 350	SIP	8.2		0.9997		
5	PHC 400	선굴착후 최종경타	21.5		0.94135		
3	PC 350	SIP	8.6	40	0.9943	이차함수	
4	PC 400	SIP	19.0	80	0.9423		
7	ST 406 × 9t	선굴착후 최종경타	18.0	80	0.9988		
8	PC 400	SIP	9.0	55	0.9984		
10	PHC 400	SIP	9.0		0.9927		
22	PC 400	SIP	6.5		0.9930		
30	PHC 400	SIP	13.9	80	0.9988		
32	PHC 350	SIP	10.0		0.9989		
33	PC 350	SIP	13.7		0.9997		
35	PHC 350	SIP	8.6		0.9990		
40	PC 350	SIP	10.0	60	0.9968		
42	PHC 400	SIP	13.5	60	0.9993		
43	PHC 350	SIP	7.5		0.9988		

주) PC : PC말뚝　　PHC : 고강도 PC말뚝　　ST : 강관말뚝
SIP : Soil cement injected precast pile

표 2. 각종 판정기준에 의한 하중

분류 번호	(1) log P-log S	(2) ds/d(log t)-P	(3) S-log t	(4) P-net.S	(5) Davisson	평 균	(6) P(0.1XD)	(7) Chin방법	(1)/(6)X100	(2)/(6)X100	(3)/(6)X100	(4)/(6)X100	(5)/(6)X100	(6)/(7)X100
2	86	80	100	87	88	88.2	107	112.4	80.37	74.77	93.46	81.31	82.24	95.20
11	75	X	74.8	75	77	75.5	100	112.4	75.00		74.80	75.00	77.00	88.97
12	X	80	116	104	92	98.0	128	142.8		62.50	90.63	81.25	71.88	89.64
15	X	X	80	62	44	62.0	130	185.2			61.54	47.69	33.85	70.19
16	66	X	65	37	33	50.3	66	80.0	100.00		98.48	56.06	50.00	82.50
17	82	74	100	★	78	83.5	120	139.0	68.33	61.67	83.33		65.00	86.33
18	110	105	140	114	89	111.6	160	192.3	68.75	65.63	87.50	71.25	55.63	83.20
23	X	X	X	★	25	25.0	56	64.5					44.64	86.82
25	88	75	100	100	99	92.4	100	106.4	88.00	75.00	100.00	100.00	99.00	93.98
26	150	X	150	155	151	151.5	175	204.1	85.71		85.71	88.57	86.29	85.74
27	98	X	100	101	97	99.0	107	123.4	91.59		93.46	94.39	90.65	86.71
28	78	X	77	★	74	76.3	87	99.0	89.66		88.51		85.06	87.88
36	X	X	65	37	17	39.7	85	X			76.47	43.53	20.00	
9	X	X	X	92	76	84.0	133	136.9				69.17	57.14	97.15
13	X	X	32.8	34	29	33.4	87	107.5			37.70	39.08	33.33	80.93
24	66	52	66	56	48	57.6	78	85.5	84.62	66.67	84.62	71.79	61.54	91.23
29	X	X	41.5	27	36	34.8	46	45.0			90.22	58.70	78.26	102.22
평균									83.20	67.70	83.09	69.84	64.21	88.04
표준 편차									9.65	5.35	15.36	18.13	21.86	7.15

X 판정곤란
★ 순침하량 미측정

4.2 허용하중판정법의 비교

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

항복하중 판정기법은 구조물기초설계기준에 제안하는 3가지 도해법(① log P-log S 곡선법, ② ds/d(log t)-P 곡선법, ③ S-log t 곡선법)을 그리고 Davisson 방법, DIN 4026의 순침하량 판정기법(순침하량 0.025D에서의 하중)을 적용하였고, 극한하중 판정기법은 도로교 표준시방서에서 채택된 말뚝직경의 10%에서의 하중(말뚝머리 침하량 0.1D에서의 하중 : 0.1D 방법)와 Terzaghi가 제안하여 Chin이 개량한 $\Delta/\mathrm{P}-\Delta$방법(Chin, 1970)을 이용하여 분석하였다.

표 2.에서와 같이 도해법에서는 판정곤란의 경우가 많이 있고 얻어진 값들에 있어서도 평균치로 보아 신뢰도에 문제가 있음을 알 수가 있다. 표 2.의 내용을 종합적으로 판단해보면 항복하중 판정기법 중 순침하량 판정법과 Davisson 판정기법이, 극한하중법의 경우 Chin의 방법이 비교적 신뢰도가 높은 것으로 볼 수 있다.

각종 항복하중 판정기법에 의해 결정된 하중을 0.1D 방법으로 결정된 하중으로 정규화한 값의 평균은 약 0.74 정도를 보여주고 있는데, 이를 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 확인해 볼 수가 있다. 즉 0.1D 방법에 의해 결정된 극한하중을 Chin의 방법에 의해 결정된 극한하중으로 정규화한값은 0.88 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 구하기가 어렵다는 것을 감안하면 대부분의 재하시험 결과가 안전측으로 해석될 수 있음을 보여주는 것이다. 0.1D 방법으로 구해지는 극한하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에서의 안전율로 환산하면 2.7(F_s/0.74=2/0.74) 정도가 됨을 알 수 있으며 또한 도로교 표준시방서 기준에서의 안전율로 환산하면 약 2.2(F_s×0.88=2.5×0.88 2.2)가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

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

⑴ 매입말뚝의 재하시험결과로 부터 얻어진 하중-침하량곡선의 유형을 분석한 결과 약 57% 정도가 쌍곡선 형태, 35% 정도가 이차함수 형태, 3% 정도가 지수함수 형태를 나타내 우리나라의 매입말뚝의 경우 마찰말뚝이 우세한 것으로 보인다. 따라서 특정곡선을 기준으로하여 제안된 기존의 허용하중 판정기법들은 일반적으로 적용하는데 한계가 있다고 판단된다.

⑵ 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. 또한 극한하중 판정법으로써 Chin의 방법은 비교적 안정된 결과를 보여주는 것으로 나타났다.

이러한 결과들로부터 판단할 때 허용하중을 구하기 위한 항복하중 및 극한하중의 결정은 한가지 방법에 의존하지 말고 시험방법, 시공법 등을 고려하여 여러 가지 법으로 분석하여 비교한 후 최종적으로 평가하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

⑶ 말뚝머리침하량 0.1D에서의 하중은 정의에 의한 극한하중과 차이가 있는 바 이는 항복하중과 극한하중 사이에 존재하는 일종의 제한하중으로 판단된다. 따라서 허용하중을 결정할 때 이를 극한하중으로 간주하는 것은 대부분의 재하시험결과를 안전측으로 평가할 수 있다. 이의 제한하중에 적용해야할 안전율을 구조물기초설계기준에 따른 안전율 기준으로 환산해보면 약 2.7이 적용될 수 있고 도로교 표준시방서에 따른 안전율 기준으로 환산할 경우 2.2가 적용될 수 있음을 알 수 있었다.

최근에 개정된 도로교 표준 시방서의 경우 안전율이 2.5로 변경되었지만 상기에서 제안한 0.1D 방법을 극한하중으로 인정할 경우 안전율은 2.2까지 낮출 수 있을 것으로 보이며, 또한 극한하중과의 개념차이 및 구체적인 항복하중판정기법의 삽입 등은 조정되어야 할 것으로 보인다. 또한 향후 개정 예정인 구조물기초설계기준에서는 본 논문에서 제안한 결과를 참조하도록 제안한다.

참고문헌

1. 건설부(1986), 구조물기초설계기준, pp. 191 197, pp. 306 308.
2. 대한토목학회(1996), 도로교표준시방서, pp. 682 688.
3. 류정수, 김석열(1995), “최대곡률 방법을 이용한 말뚝의 연직지지력 연구,” 한국지반공학회지, 제 11권, 제 4호, pp. 5 12.
4. 박찬국, 박용부, 이명환, 조천환, 이장덕, 이원제(1995), “매입말뚝공법의 항타공해 저감효과,” '95 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. Ⅰ 31 Ⅰ 40.
5. 조남준(1995), “쌍곡선 근사에 의한 현장타설 말뚝의 항복하중 판정,” 한국지반공학회지, Vol.12, No.6
6. 천병식, 조천환, 이명환, 이원제, 엄재경(1996), “항타말뚝 하중-침하량 곡선의 특성 및 분석기법,” '96 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 351 356
7. 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.
8. 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.
9. Fellenius, B.H.(1980), "The analysis of results from routine pile load tests," Ground Engineering, september, 1980, pp. 19 31.
10. Prakash, Shamsher(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley & Sons, Inc.,

pp. 634 676.