

## 현장정재하시험 결과를 통한 타입말뚝 지지력 판정법 비교 연구

### A Comparative Study on the Evaluation of Bearing Capacity for Driven Pile in Static Load Test

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 서덕동<sup>2)</sup>, Deok-Dong Seo, 최현길<sup>3)</sup>, Heon-Kil, Choi,  
윤환호<sup>4)</sup>, Hwan-Ho Yoon

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

<sup>2)</sup> 대림산업(주) 기술연구소 토목설계지원팀 과장, Section Chief, Civil Research & Eng., Daelim Industrial Co.

<sup>3)</sup> 대림산업(주) 기술연구소 토목설계지원팀 과장 Section Chief, Civil Research & Eng., Daelim Industrial Co.

<sup>4)</sup> 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

**SYNOPSIS** : The allowable bearing capacity of a pile, the most important factor in stability estimation, is determined by applying safety factor to the ultimate load or yield load. There are several but contradictory methods available in current design codes to estimate the allowable bearing capacity and the safety factor. This paper analyzes load-settlement curves obtained from 19 static load tests measured from 11 sites. At all tests, the load is applied until apparent failure is observed. The validity of the ultimate and yield load estimation method and load calculated from the settlement criterion is investigated through comparison with the measured data. In addition, a new procedure to estimate allowable load and safety factor is proposed. Additional data from field static load tests, such as those incorporated in this study, are needed to more reliably apply the proposed method in design practice.

**Key words** : Bearing capacity, Driven pile, Static load test, Load-settlement curve

## 1. 서 론

말뚝의 설계 시 지지력에 대한 안정 평가에 가장 중요한 것이 말뚝의 허용지지력이며, 이는 극한하중 또는 항복하중에 일정값의 안전율을 적용하여 결정된다. 허용지지력은 여러 지지력 예측방법에 의해 극한지지력을 산정할 경우 통상 안전율 3.0 이상을 적용하고 있으며, 재하시험(특히, 정재하시험)에 의해 지지력을 확인할 경우는 시험횟수, 지반조건 등에 따라 조금씩 다른 안전율을 적용하도록 규정되어 있기도 하다(한국지반공학회, 2003). 이 규정은 재하시험횟수와 지반조건을 고려하여 기존의 일률적인 안전율 적용에 따른 불합리성을 개선한 장점은 있으나 시험횟수가 적을 경우 재하시험에 의한 극한지지력과 이론식에 의한 극한지지력에 동일한 안전율을 적용하도록 한 점은 개선의 여지가 있는 것으로 판단되며, 재하시험결과와 예측이론별 극한지지력 분석을 통한 안전율 적용기준의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 특히, 재하시험으로 실측된 하중-침하 특성을 분석하여 실측 허용지지력을 판정하는 기준은 하중 및 침하량 곡선을 분석하는 방법, 침하량기준을 적용하는 방법 등에 따라 국내외적으로 다양한 기준이 있고 기준별로도 안전율의 적용 또한 매우 다양하게 제시되어 있다. 따라서 어떤 기준을 적용하느냐에 따라 허용지지력은 각기 다르게 평가되므로, 기준별 허용지지력 평가에 관한 비교연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 극한하중이 비교적 분명하게 나타난 타입말뚝의 정재하시험 결과(하중 및 침하 특성)를 이용하여 침하량 기준과 극한 및 항복하중 판정기준으로 구한 극한하중을 비교 분석하였으며,

기준별로 제시된 안전율의 타당성과 안전율이 제시되지 않았거나 다양하게 제시되어 안전율 적용시 혼돈을 일으킬 가능성이 있는 주요 판정기준에 대해서는 극한하중 실측값을 이용하여 적용 가능한 안전율을 제시하고자 한다.

## 2. 극한하중 판정법

건설부 제정 구조물기초 설계기준 해설(2003)에 의하면, 극한하중이 규명되지 않을 때에는 말뚝에 하중이 재하되었을 때의 하중(P)-시간(t)-침하량(S) 거동특성에 의하여 항복하중을 구하여 판정하며 국내의 경우 "①  $S - \log t$  곡선법, ②  $dS/d\log t - P$  곡선법, ③  $\log P - \log S$  곡선법"을 참고로 하여 종합적으로 판단해야 한다고 제시하고 있다. 또한, 하중-침하곡선을 이용하여 Prakash & Sharma(1990), 그리고 Tomlinson(1995)에 의하면 파괴하중 또는 극한하중을 산정하기 위하여 Davisson's Method(1972), Chin's Method(1970),  $\log P - \log S$  곡선법, Brinch Hansen's Criterion(1961, 1963) 등을 사용하고 있으며, 이외에도 침하량기준으로 판정하는 방법이 있다. 한편, 국내의 경우 파괴하중이나 극한하중의 산정이 아닌 항복하중의 산정에 이들 방법을 이용하는 경우도 있고 안전율의 적용이 불명확한 경우나, 동일한 방법이라도 기준에 따라 다른 안전율을 적용하는 등의 문제점이 있어 합리적인 적용에 관한 검토가 시급하다.

### 2.1 침하량 기준

침하량 기준 판정법은 파괴하중이나 극한하중을 말뚝두부의 침하량을 기준으로 산정하는 방법으로 전침하량 기준과 전침하량에서 탄성침하량을 뺀 잔류침하량 기준이 있다. 잔류침하량 기준은 순침하량 기준이라고 한다.

영국의 BS8004(1986)에서는 말뚝두부의 전침하량이 말뚝선단부 직경의 10%를 이동하였을 때의 하중을 극한하중으로 간주하고 있으며 일반적으로 안전율은 2에서 3사이의 값을 추천하고 있다. 독일의 DIN4026(1975)에 의하면 현장타설말뚝의 경우 말뚝두부의 전침하량이 20mm일 때의 하중이나 타입말뚝의 경우 잔류침하량이 말뚝직경의 2.5%일 때의 하중을 극한하중으로 간주하고 있다.

현장마다 공사시방을 마련하여 말뚝두부의 침하량으로 파괴여부를 결정하기도 한다. Prakash & Sharma(1990)에 의하면 설계하중의 2배에서 전침하량이 38mm 이하이고, 순침하량이 19mm 이하가 되도록 관리하도록 하고 있다.

#### 2.1.1 전침하량 기준

구조물의 기초를 설계하는 데에는 파괴에 대하여 안전할 것과 허용된 침하범위 이상의 침하가 발생하지 말아야 할 것 등 두 가지 기준에 의한다. 파괴에 대하여 안전하도록 하는 지지력 개념의 설계에서는 파괴를 유발하는 극한지지력을 구하고 비교적 높은 2.0~3.0의 안전율을 적용한다. 따라서 지지력 개념의 설계는 극한 지지력의 확인에 의한 것이 가장 바람직하다(한국지반공학회, 2003).

극한상태의 정의는 하중의 증가없이 침하량이 무한대로 증가하는 상태이지만 대부분의 말뚝 재하시험에서는 이와 같은 이론적인 극한지지력은 확인되지 않는다. 따라서 인위적인 침하량에 도달하면 그 때의 하중을 극한하중으로 인정하는 방법이 보다 폭넓게 적용되고 있다(Tomlinson, 1995).

표 1. 전침하량 기준(한국지반공학회, 2002)

기준명 또는 제안자		침하량 기준 (mm)	허용지지력을 구할 때의 안전율	비 고
절	독일, 프랑스, 벨기에	20		현장타설말뚝
	체코슬로바키아	15~20	2.0	
	오스트리아	25		
	네덜란드, 뉴욕시 기준	25.4		
	인도 IS:2911 기준	12	1.5	
대	Muns (1959)	20		
	Terzaghi/Peck(1961)	50.8	2.0	
	Terzaghi/Peck(1967)	25.4	1.5	
	Woodward(1972)	12.7~25.4	1.5 ~ 2.0	
침	Touma/Reese(1974)	25.4	2.0	
	키에프 건축공정 연구소	> 30~40		
하	우크라이나 건축시공 과학연구소	80		부등침하에 민감하지 않은 구조물
		40		부등침하에 민감한 구조물
	중국 협서성 도로연구소	60		대구경 현장타설말뚝
	중국 도로연구원	40		대구경 현장타설말뚝
	중국 북경시 말뚝기초연구소	15~20	2.0	소구경 현장타설말뚝
상	일본 구건축학회 기준	25	2.0	현장타설말뚝
	일본 토질공학회	0.1D		제 2 한계하중
	영국 기초공업기준	0.1D		
대	Tomlinson	0.1D		
		6~9		설계하중에서
침	Singapore 지하철 기준	9~20		설계하중의 1.5배에서
		25		
하	일본 토질공학회	40~80		
		0.1D		타입말뚝
	De Beer	0.3D		현장타설말뚝

전침하량 기준으로는 표 1에서와 같이 여러 가지 기준들이 제안되어 있으나 전침하량의 절대값만으로 말뚝의 설계하중을 결정하는 것은 말뚝의 길이와 재료특성으로부터 결정되는 탄성압축량의 영향을 고려할 수 없기 때문에 장대말뚝의 경우 적용이 곤란한 문제가 있다. 또 말뚝의 지지력이 지반조건, 말뚝설치방법에 따라 선단지지력 또는 주변마찰력의 비율이 상이하게 되고, 이에 따라 말뚝의 하중-침하량 거동이 결정되는 점을 감안할 수 없다는 단점이 있다. 절대침하량 기준에 비해 말뚝직경의 영향을 고려한 상대침하량 기준은 훨씬 합리적인 것으로 알려져 있으나 전침하량 기준에 의한 말뚝의 설계하중 결정은 극히 제한적인 경우에 국한하여 적용할 수 있으며, 반드시 다른 해석결과와 비교하는 과정이 필요하다. 한편, 전침하량 기준으로는 말뚝직경의 10%를 극한지지력으로 보는 기준이 국내에서 많이 적용되고 있다.

### 2.1.2 순침하량 기준

순침하량은 하중제거시의 탄성침하량을 배제한 잔류침하량을 기준으로 하여, 지반의 특성을 보다 잘 반영하므로 많은 설계기준에서 채택되고 있다. 국내에서의 말뚝재하시험 결과를 각종 해석기준에 의거 설계하중을 결정하고 비교해 본 결과, 국내의 극한하중 해석법 및 항복하중 해석법과 DIN의 말뚝직경의 2.5% 순침하량 기준과 COE의 0.25inch 순침하량은 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 분석되었으나 많은 설계기준에서 채택하고 있는 0.01 inch/ton 순침하량 기준은 타 해석기준에 비해 지나치게 높은 허용하중을 주고 있는 것으로 알려져 있다.

특히, 순침하량 기준은 국내의 극한하중 해석법 및 항복하중 해석법이 갖고 있는 문제점을 어느 정도 해소해 주고 있기 때문에 국내설계기준을 보완해 줄 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서, 설계하중 결

정시 타 설계기준으로 해석한 결과를 이 기준을 통해 주로 확인하고 있으며, 국내에서는 말뚝 직경의 2.5% 기준이 많이 적용되고 있다.

표 2는 다양한 순침하량 판정법들을 정리한 것이다.

표 2. 순침하량 기준(한국지반공학회, 2002)

기준명 또는 제안자		침하량 (mm)	허용지지력을 구할 때의 안전율	비 고
상 대 침 하	독일 DIN 4026기준	2.5% D		
	미 국	2% D		
	일본 건축기초구조 설계기준·동해설	2.5% D	3.0	
	덴마크 기초실용기준 DS:415-1965	10% D		
절 대 침 하	미국 도로교 설계기준	6.3 mm		
	미국 AASHTO 기준	6.3 mm		
	미국 루이지아나 도로국	6.3 mm	2.0	
	미국 보스톤 건축기준	12.7 mm	2.0	
	인도 IS:2911 기준	6 mm	1.5	
	캐나다 건축기준	25 mm		
	파리 Veritas 사무소	20 mm	2.0	
	Magnel (1948)	8 mm		
	Mansur / Kaufman	6.3 mm		
	Woodward	12.7 mm	1.5	
Newyork City, BOCA Uniform Building Code	0.01 in/ton			

## 2.2 하중-침하-시간곡선을 이용한 방법

하중-침하량 곡선을 해석하여 항복하중 또는 극한하중을 판정하기 위하여 곡선의 특성을 기하학적으로 분석하거나 수학적 변형을 통한 방법, 하중-침하량 외에 침하량 발생의 시간경과에 따른 특성을 추가하여 해석하는 방법, 하중재하에 따른 말뚝재료의 탄성변위를 감안하는 방법 등 다양한 해석기법이 제안되어 왔지만, 지반조건, 말뚝조건, 시공조건의 다양함을 모두 만족시키는 범용성 있는 해석법은 아직까지 개발되지 못한 실정이다.

이와 같이 하중-침하량 곡선의 해석문제는 말뚝재하시험 결과로부터 결정되는 설계하중에 각 해석법 간 상당한 차이를 발생시키므로 상당히 큰 값의 안전율 적용이 불가피한 실정이다. 이러한 해석기준상 불가피한 차이를 해소하는 방안으로 하중재하 시 발생하는 침하량만을 기준으로 하여 극한하중 또는 설계하중을 결정하는 방법이 폭넓게 사용되기도 한다.

그리고 항복하중에 의한 해석은 극한하중을 낮게 평가한다는 지적도 있다. 캐나다의 설계기준에서는 도해법에 의한 항복하중의 판정은 semi-elastic 영역과 semi-plastic 영역의 중간에서 결정되는 경우가 많으며 극한지지력을 과소평가할 수 있음을 지적하고 있다(Canadian Geotechnical Society, 1985).

하중-침하-시간곡선을 이용하여 말뚝의 항복하중 및 극한하중을 판정하는 방법을 정리하면 다음 표와 같다.

표 3. 하중-침하-시간 관계를 이용한 지지력판정법

구 분	판정방법	비고
하중-침하-시간관계	Brinch Hansen의 80% 기준	· 극한하중 판정법 · 안전율 3내지 2.5 적용
	Mazurkiewicz 방법	
	Chin 방법	
	Stability Plot 방법	
	Brinch Hansen의 90% 기준	· 항복하중 판정법 · 안전율 2 적용
	S - log t	
	log P - log S	
	ds/d(log t) - P	
	Davisson 방법	

### 3. 현장시험 결과 및 분석

#### 3.1 현장개요

본 연구에서는 다양한 극한하중 판정법들과 현장 시험결과와의 비교를 위해 11개 현장에서 파괴가 현저하게 나타날 때까지 수행한 19개의 정적압축재하시험 결과를 분석하였다. 정적압축재하시험은 ASTM D1143(1994)에 준하여 수행하였으며 분석에 이용된 재하시험 자료는 표 4에 요약하였다.

표 4. 현장 및 말뚝 제원 ((주)고려기초연구소, 1994a~1994l)

현 장	시험 번호	말뚝직경 및 종류	시공법	근입깊이
군산 ○○아파트	1-1	ø350 PC	디젤해머로 직항타	10.1 m
	1-2	ø350 PC	디젤해머로 직항타	9.0 m
	1-3	ø350 PC	디젤해머로 직항타	11.1 m
포항 ○○아파트	2-1	ø400 PHC	천공 후 디젤해머로 타입	19.0 m
부천 ○○역사	3-1	ø350 PC	시멘트풀 주입공법	9.5 m
경부고속철도 제○-○공구	4-1	609.6×12t ST	디젤해머로 직항타	11.7 m
부산 ○○아파트	5-1	ø500 PC	시멘트풀 주입공법	20.7 m
천안시 ○○아파트	6-1	ø350 PC	디젤해머로 직항타	7.0 m
	6-2	ø350 PC	디젤해머로 직항타	5.0 m
	6-3	ø350 PC	디젤해머로 직항타	7.4 m
분당 ○○아파트	7-1	ø350 PC	디젤해머로 직항타	6.2 m
	7-2	ø350 PC	디젤해머로 직항타	5.4 m
경부고속철도 제○-○공구	8-1	609.6×12t ST	디젤해머로 직항타	7.4 m
부산 해운대 ○○아파트	9-1	ø400 PC	시멘트풀 주입공법	13.0 m
	9-2	ø400 PC	시멘트풀 주입공법	13.5 m
	9-3	ø400 PC	시멘트풀 주입공법	13.4 m
마산시 ○○아파트	10-1	ø400 PC	디젤해머로 직항타	11.5 m
	10-2	ø400 PC	디젤해머로 직항타	13.5 m
○○-○○간 도로확포장공사	11-1	508×10t ST	디젤해머로 직항타	9.6 m

### 3.2 정재하시험 결과 및 분석

#### 3.2.1 현장재하시험 분석방법에 따른 극한지지력 산정 결과

현장재하시험 결과 하중-침하곡선과 각 분석방법에 따른 극한지지력 산정결과는 다음과 같다.

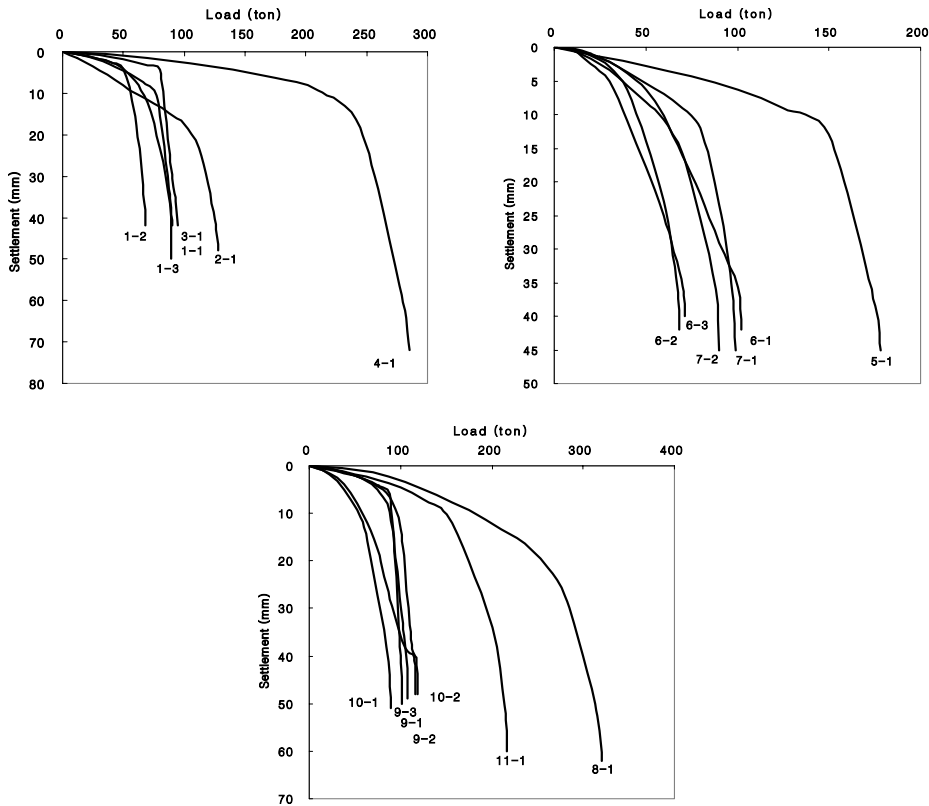


그림 1. 하중-침하량 곡선

표 5. 극한하중판정법에 의한 파괴하중 비교

시험 번호	(1) 실측치 (ton)	극한하중판정법						(8) (2)/(1) ×100 (%)	(9) (3)/(1) ×100 (%)	(10) (4)/(1) ×100 (%)	(11) (5)/(1) ×100 (%)	(12) (6)/(1) ×100 (%)
		(2) B. Hansen 80% 기준 (ton)	(3) Mazur -kiewicz (ton)	(4) Chin (ton)	(5) Stability Plot (ton)	(6) B. Hansen 90% 기준 (ton)	(7) 평균 (ton)					
1-1	95.0	96.0	96.0	94.3	90.5		94.2	101.05	101.05	99.26	95.26	
1-2	68.0	68.6	71.0	70.9	66.5		69.3	100.88	104.41	104.26	97.79	
1-3	89.5	88.9	85.0	97.1	86.4		89.4	99.32	94.97	108.49	96.53	
2-1	127.5	130.0	120.0	153.8	131.8	125.0	132.1	101.96	94.11	120.62	103.37	98.03
3-1	90.0	88.2	82.0	99.0	88.4		89.4	98.00	91.11	110.00	98.22	
4-1	285.0	280.6	251.0	303.0	281.4	260.0	275.2	98.45	88.07	106.31	98.73	91.22
5-1	178.5	175.1	165.0	217.4	187.1	175.0	183.9	98.09	92.43	121.79	104.81	98.03
6-1	102.0	86.0	95.0	109.9	93.0		96.0	84.31	93.13	107.74	91.17	
6-2	68.5	62.9	63.0	71.4	64.4		65.4	91.82	91.97	104.23	94.01	
6-3	71.5	68.8	63.0	79.4	65.3		69.1	96.22	88.11	111.04	91.32	
7-1	99.0	99.8	97.0	108.7	95.3	95.0	99.2	100.80	97.97	109.79	96.26	95.95
7-2	90.0	96.1	80.0	104.2	85.7		91.5	106.77	88.88	115.77	95.22	
8-1	320.0	324.2	300.0	357.1	317.2		324.6	101.31	93.75	111.59	99.12	
9-1	108.0	104.2	96.0	112.4	104.9	103.0	104.1	96.48	88.88	104.07	97.12	95.37
9-2	119.0	112.6	108.0	123.5	115.2	103.0	112.5	94.62	90.75	103.78	96.80	86.55
9-3	102.0	105.8	93.0	106.4	100.6		101.5	103.72	91.17	104.31	98.62	
10-1	89.0	84.4	73.0	100.0	84.4		85.5	94.83	82.02	112.35	94.83	
10-2	116.0	115.8	110.0	131.6	105.2		115.7	99.82	94.82	113.44	90.68	
11-1	217.0	220.6	190.0	238.1	211.2		215.0	101.65	87.55	109.72	97.32	
평균								98.42	92.37	109.39	96.69	94.19
표준 편차								4.75	4.95	5.65	3.54	2.30

표 6. 항복하중판정법에 의한 파괴하중 비교

시험 번호	항복하중판정법						(7) $\frac{\{(2) \times 1.5\}}{\{(1) \times 100\}}$ (%)	(8) $\frac{\{(3) \times 1.5\}}{\{(1) \times 100\}}$ (%)	(9) $\frac{\{(4) \times 1.5\}}{\{(1) \times 100\}}$ (%)	(10) $\frac{\{(5) \times 1.5\}}{\{(1) \times 100\}}$ (%)
	(1) 실측치 (ton)	(2) S-log t (ton)	(3) log P -log S (ton)	(4) dS/d(log t) -P (ton)	(5) Davisson (ton)	(6) 평균 (ton)				
1-1	95.0	90.0	78.0	65.0	82.0	78.8	142.10	123.15	102.63	129.47
1-2	68.0	60.0	50.0	30.0	54.0	48.5	132.35	110.29	66.17	119.11
1-3	89.5	80.0	70.0	47.0	66.0	65.8	134.07	117.31	78.77	110.61
2-1	127.5	112.0	112.0	110.0	73.0	101.8	131.76	131.76	129.41	85.88
3-1	90.0	77.0	77.0	77.0	75.0	76.5	128.33	128.33	128.33	125.00
4-1	285.0	245.0	240.0	240.0	230.0	238.8	128.94	126.31	126.31	121.05
5-1	178.5	150.0	150.0	150.0	152.0	150.5	126.05	126.05	126.05	127.73
6-1	102.0	60.0	50.0	67.0	55.0	58.0	88.23	73.52	98.52	80.88
6-2	68.5	40.0	40.0	46.0	42.0	42.0	87.59	87.59	100.72	91.97
6-3	71.5	40.0	40.0	50.0	35.0	41.3	83.91	83.91	104.89	73.42
7-1	99.0	80.0	78.0	78.0	67.0	75.8	121.21	118.18	118.18	101.51
7-2	90.0	70.0	70.0	55.0	48.0	60.8	116.66	116.66	91.66	80.00
8-1	320.0	245.0	245.0	220.0	198.0	227.0	114.84	114.84	103.12	92.81
9-1	108.0	87.5	87.5	85.0	88.0	87.0	121.52	121.52	118.05	122.22
9-2	119.0	87.5	87.5	80.0	97.0	88.0	110.29	110.29	100.84	122.26
9-3	102.0	87.5	75.0	73.0	89.0	81.1	128.67	110.29	107.35	130.88
10-1	89.0	60.0	60.0	60.0	50.0	57.5	101.12	101.12	101.12	84.26
10-2	116.0	75.0	75.0	58.0	57.0	66.3	96.98	96.98	75.00	73.70
11-1	217.0	175.0	175.0	160.0	157.0	166.8	120.96	120.96	110.59	108.52
평균							116.60	111.52	104.61	104.27
표준 편차							16.86	15.66	17.45	19.97

표 7. 침하량 기준에 의한 파괴하중 비교

시험 번호	침하량 기준							(8) 평균 (ton)	(9) $\frac{(2)}{(1)} \times 100$ (%)	(10) $\frac{(3)}{(1)} \times 100$ (%)	(11) $\frac{(4)}{(1)} \times 100$ (%)	(12) $\frac{(5)}{(1)} \times 100$ (%)	(13) $\frac{(6)}{(1)} \times 100$ (%)	(14) $\frac{(7)}{(1)} \times 100$ (%)
	(1) 실측치 (ton)	전침하량 기준			순침하량 기준									
	(2) 0.1D (ton)	(3) 25.4 mm (ton)	(4) 20mm (ton)	(5) 2.5%D (ton)	(6) 6.3mm (ton)	(7) 12.7 mm (ton)								
1-1	95.0	92.3	88.0	85.9	83.0	81.7	84.0	85.8	97.15	92.63	90.42	87.36	86.00	88.42
1-2	68.0	66.5	63.3	61.5	54.0	50.0	60.0	59.2	97.79	93.08	90.44	79.41	73.52	88.23
1-3	89.5	87.1	81.3	77.1	67.0	63.0	72.0	74.6	97.31	90.83	86.14	74.86	70.39	80.44
2-1	127.5	124.6	113.6	105.2	106.0	102.0	110.0	110.2	97.72	89.09	82.50	83.13	80.00	86.27
3-1	90.0	87.8	83.6	81.2				84.2	97.55	92.88	90.22			
4-1	285.0	280.5	250.9	246.4	230.0	215.0	227.0	241.6	98.42	88.03	86.45	80.70	75.43	79.64
5-1	178.5	177.5	162.3	157.0	153.0	151.0	153.5	159.1	99.43	90.92	87.95	85.71	84.59	85.99
6-1	102.0	99.0	85.0	76.9	66.0	61.0	74.0	77.0	97.05	83.33	75.39	64.70	59.80	72.54
6-2	68.5	66.8	61.4	56.7	46.0	43.0	52.0	54.3	97.51	89.63	82.77	67.15	62.77	75.91
6-3	71.5	69.5	60.3	53.0	43.0	37.0	50.0	52.1	97.20	84.33	74.12	60.13	51.74	69.93
7-1	99.0	96.2	90.5	87.0	82.0	78.0	84.0	86.3	97.17	91.41	87.87	82.82	78.78	84.84
7-2	90.0	87.3	79.8	74.3	62.0	57.0	66.0	71.1	97.00	88.66	82.55	68.88	63.33	73.33
8-1	320.0	319.5	272.7	253.0	260.0	194.0	248.0	257.9	99.84	85.21	79.06	81.25	60.62	77.50
9-1	108.0	105.8	97.3	93.9	83.0	80.0	87.0	91.2	97.96	90.09	86.94	76.85	74.07	80.55
9-2	119.0	116.3	106.0	103.3	101.0	90.0	103.0	103.3	97.73	89.07	86.80	84.87	75.63	86.55
9-3	102.0	99.5	94.3	92.4	82.0	78.0	84.0	88.4	97.54	92.45	90.58	80.39	76.47	82.35
10-1	89.0	86.3	73.1	67.5	62.0	56.0	67.0	68.7	96.96	82.13	75.84	69.66	62.92	75.28
10-2	116.0	112.6	85.0	78.2	68.0	62.0	74.0	80.0	97.06	73.27	67.41	58.62	53.44	63.79
11-1	217.0	214.3	184.4	174.5	170.0	154.0	170.0	177.9	98.75	84.97	80.41	78.34	70.96	78.34
평균									97.74	88.00	83.36	75.82	70.02	79.43
표준 편차									0.80	4.77	6.37	8.39	9.52	6.46

### 3.2.2 현장재하시험 분석방법에 따른 극한지지력 비교 분석

11개의 현장에서 실시한 현장재하시험의 극한지지력 결과와 극한하중 판정방법, 항복하중 판정방법, 전침하량 기준, 그리고 순침하량 기준의 결과를 비교함으로써, 각 판정 방법별로 실측치에 대한 정확성을 분석하고자 하였다.

이때, 판정된 항복하중에 대해서는 안전율 1.5를 곱한 값을 극한하중으로 하여 실측값과 비교하였다.

각 판정 방법에 의한 극한지지력 산정값과 현장재하시험으로부터의 실측값을 비교하여, 그림 2~그림 4에 나타내었다.

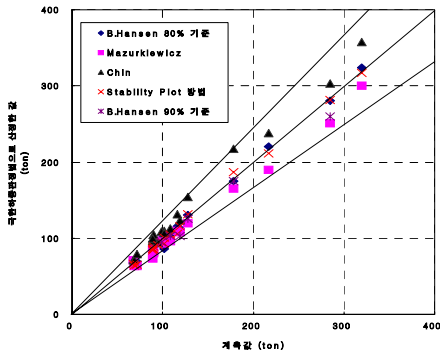


그림 2. 극한하중판정법으로 산정한 값과 실측값 비교

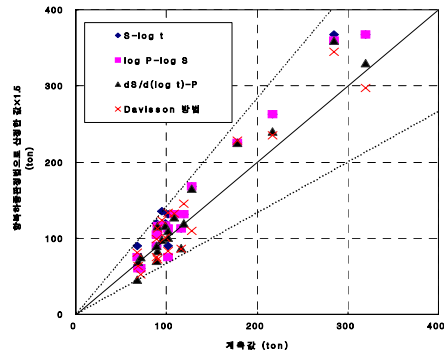


그림 3. 항복하중판정법으로 산정한 값과 실측값 비교

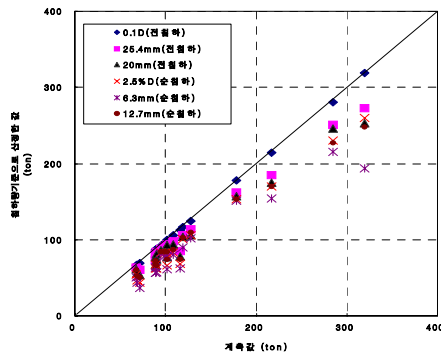


그림 4. 침하량기준으로 산정한 값과 실측값 비교

분석결과, 극한하중 판정법 중 Mazurkiewicz 방법이 가장 작은 값을, Chin의 방법이 가장 큰 값을 나타냈으며, B. Hansen 80%기준과 Stability Plot 방법으로 결정된 극한하중 값이 실측값과 가장 일치했고, 항복하중 판정법으로 구한 항복하중에 1.5배를 하여 비교한 결과 dS/d(log t)-P방법과 Davisson 방법이 실측값과 가장 유사한 값을 나타냈다. 항복하중 판정법은 다른 판정법보다 표준편차가 비교적 크게 나타났다. 그리고 침하량 기준 중에서는 0.1D 전침하 기준이 실측값과 가장 일치함을 보였고 그 외 기준들은 실측값보다 작은 값을 보였다.

위의 결과들로부터 허용하중을 결정하기 위해 국내에서 적용하고 있는 극한하중 취득시 안전율 3.0, 항복하중 취득시 안전율 2.0을 적용하는 기준과 비교해보면 극한하중 판정기법에 의해 결정된 하중을 계측값으로 정규화한 값의 평균을 국내기준에서 제시하는 안전율 개념으로 환산하여 안전율을 구하면 B. Hansen 80% 기준은 2.95, Mazurkiewicz 방법은 2.77, Chin 방법은 3.28, Stability Plot 방법은 2.90, B. Hansen 90% 기준은 2.82를 보였고, 항복하중 판정기법에 의해 결정된 항복하중을 계측값으로 정규화한 값의 평균을 국내기준에서 제시하는 안전율 2로 환산하여 안전율을 구하면 S-log t 방법은



2.33, log P-log S 방법은 2.23, dS/d(log t)-P 방법은 2.09, Davisson 방법은 2.08를 보였다. 그리고 침하량 기준으로 결정된 하중을 계측값으로 정규화한 값의 평균을 국내기준 안전율 개념으로 환산하여 안전율을 구하면, 전침하량 0.1D 기준은 2.93, 전침하량 25.4mm 기준은 2.64, 전침하량 20mm 기준은 2.50 그리고 순침하량 기준 2.5%D 기준은 2.27, 순침하량 6.3mm 기준은 2.10, 순침하량 12.7mm 기준은 2.38를 보였다.

#### 4. 결론 및 제언

본 연구에서는 말뚝직경이 350~609.6mm이고 근입깊이가 5.0~19.0m로 시공된 중구경 타입말뚝에 대한 재하시험 결과의 분석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 극한하중 판정법으로 구한 극한지지력은 Mazurkiewicz 방법이 가장 작은 값을, Chin의 방법이 가장 큰 값을 나타냈으며, B. Hansen 80%기준과 Stability Plot 방법으로 결정된 극한하중 값이 실측값과 가장 일치했다. 따라서 Chin 방법에 의해 해석된 극한지지력은 실제 지지력 보다 과대평가하는 경향을 나타냈다. 또한 B. Hansen 80%기준과 Stability Plot 방법이 실측치와 거의 일치하여 가장 신뢰성이 있는 방법으로 판단된다.
- (2) 항복하중 판정법에서 구한 항복하중에 1.5를 곱한 극한하중 값과 실측치를 비교해 본 결과 항복하중 판정법으로 구한 극한 지지력이 크게 나타났고, 표준편차가 전체적으로 크게 나타났으며, 판정법들의 결과에도 상당한 차이를 보여주고 있어 신뢰도가 매우 낮은 것으로 분석되었다.
- (3) 침하량 기준에 의한 극한하중 판정법 중 본 연구에서 다룬 전침하량 기준 3가지와 순침하량 기준 3가지 방법은 기준별로 차이가 크게 나타나 적용 시 반드시 다른 해석결과와 비교하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.
- (4) 극한하중 판정방법에 의해 구한 하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에 적용된 안전율을 기준으로 환산해 보면, Chin 방법은 약 3.3, Mazurkiewicz 방법과 B. Hansen 90% 기준은 2.8, B. Hansen 80% 기준과 Stability Plot 방법은 3.0이 적용될 수 있음을 알 수 있었다.
- (5) 항복하중 판정방법에 의해 구한 하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에 적용된 안전율 2를 기준으로 환산해 보면, S-log t 방법은 약 2.3, log P-log S 방법은 2.2, dS/d(log t)-P 방법과 Davisson 방법은 2.1이 적용될 수 있음을 알 수 있었다.
- (6) 침하량 기준에 의해 구한 하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준의 극한하중에 대한 안전율 3를 기준으로 환산해 보면, 전침하량 0.1D 기준은 2.9, 전침하량 25.4mm 기준은 2.6, 전침하량 20mm 기준은 2.5 그리고 순침하량 2.5%D 기준은 2.3, 순침하량 6.3mm 기준은 2.1, 순침하량 12.7mm 기준은 2.4가 적용될 수 있음을 알 수 있었다.
- (7) 본 연구에서 기 분석된 극한하중 판정법들의 보다 정확한 분석을 위해서는 본 연구에서 적용된 결과와 같이 보다 많은 현장에서 파괴시까지 하중재하를 실시하여 분석된 데이터의 축적이 필요하다. 따라서, 본 연구에서 내린 결론이 충분하다고 볼 수 없으며, 향후 보다 많은 계측 자료 및 사례 분석을 통하여 이에 대한 다양한 연구가 수행되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. (주)고려기초연구소(1994a), 군산시 나운동 우성아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-23(B).
2. (주)고려기초연구소(1994b), 동성 포항 장포 주공아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-28.
3. (주)고려기초연구소(1994c), 삼성 부천 민자역사 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-31.
4. (주)고려기초연구소(1994d), 삼환 부산 다대아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-38.
5. (주)고려기초연구소(1994e), 천안시 성성동 우성아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-39.
6. (주)고려기초연구소(1994f), 경부고속철도 제 4-2공구 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-37.

7. (주)고려기초연구소(1994g), 분당 주공 PC아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-45.
8. (주)고려기초연구소(1994h), 경부고속철도 제 4-3공구 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-49.
9. (주)고려기초연구소(1994i), 천안시 성성동 우성아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-52.
10. (주)고려기초연구소 (1994j), 부산 해운대 신시가지 11-3B/L 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-60.
11. (주)고려기초연구소(1994k), 마산시 해운동성아파트 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-65.
12. (주)고려기초연구소 (1994l), 과천-우면산간도로 확포장공사 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-68.
13. 한국지반공학회(2002), 깊은기초, 구미서관, pp. 173-186.
14. 한국지반공학회(2003), 건설교통부제정 구조물 기초설계기준 해설, pp.277-378.
15. ASTM D1143-81(Reapproved by 1994)(1994), "Standard Test Method for Piles Under Static Axial Tensile Load", American Society for Testing and Material, West Conshohocken, Pa.
16. Brinch Hansen, J.(1961), "The Ultimate Resistance of Rigid Piles Against Transversal Forces", Danish Geotechnical Institute Bull. No. 12, Copenhagen, pp. 5-9.
17. Brinch Hansen, J.(1963), "Discussion on hyperbolic stress-strain response. Cohesive soils.", American Society of Civil Engineers, ASCE, Journal for Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 89, SM4, pp. 241-242.
18. British Standard Institute(1986), British Standard Code of Practice for Foundation(BS 8004).
19. Canadian Geotechnical Society(1985), Foundation Engineering Manual, 2nd. Ed, p. 456.
20. 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.
21. Davisson, M. T.(1972), "High capacity piles. Proceedings of Lecture Series on Innovations in Foundation Construction", American Society of Civil Engineers, ASCE, Illinois Section, Chicago, March 22, pp. 81-112.
22. DIN 4026(1975), "Driven piles : construction procedure and permissible loads".
23. Tomlinson, M. J.(1995), Foundation Design and Construction, Longman Publishing Group, 6th. Ed, pp. 36-99.
24. Parakash and Sharma(1990), Pile Foundations in Engineering Praticce, John Wiley & Sons, Inc., pp. 634-676.