

극한상태의 정재하시험결과를 이용한 타입말뚝의 안전율 적용성 평가

기완서¹ · 박노환² · 김선학^{3*}

¹조선이공대학 토목건설과, ²금호건설(주), ³조선대학교 토목공학과

An Applicative Estimation of Safety Factors about Driven Pile Using the Results of Static Loading Test on the Ultimate State

Wan-Seo Ki¹, Noh-Hwan Park², and Sun-Hak Kim^{3*}

¹Department of Civil Construction Engineering, Chosun College of Science&Technology

²Kumho Engineering&Construction Co., Ltd.

³Department of Civil Engineering, Chosun University

본 연구는 국내·외의 사질지반에 시공된 타입말뚝에 대해 파괴가 현저하게 나타날 때까지 재하한 정재하시험 실측값을 이용하여 극한하중·항복하중·침하량기준의 각각 판정법으로 극한하중을 추정하였다. 추정된 극한하중을 실측된 파괴하중으로 정규화하고 말뚝특성에 따라 판정법별 비교·분석 하였다. 또한 극한하중 추정시 적합한 판정법을 검토하고 허용하중 결정시 안전율을 재평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 극한하중 판정법으로 구한 극한하중은 Chin 방법에 의해 해석된 값이 실측값 보다 과대평가하는 경향을 나타냈으며 B. Hansen 80%기준과 Stability Plot 방법이 실측치와 거의 일치하여 가장 신뢰성이 있는 방법으로 판단되었다. 허용하중 산정시 극한하중 판정법에 의해 구한 파괴하중에 적용해야 할 안전율을 구조물기초설계기준에 적용된 안전율을 기준으로 환산하면 B. Hansen 90% 방법을 제외하고 3.0보다 큰 값이 적용되어야 할 것으로 판단되었으며 항복하중 판정법들의 경우 기준안전율 2.0보다 큰 값이 적용되어야 할 것으로 판단되었다. 침하량 기준에 의해 구한 하중에 적용해야 할 안전율을 극한하중에 대한 안전율 3.0을 기준으로 환산해 보면, 전침하량 기준 및 순침하량 기준은 3.0보다 작은 값이 적용되어야 할 것으로 판단되었다.

주요어 : 정재하시험, 극한하중, 항복하중, 허용하중, 안전율

This study estimated ultimate load by the determination methods based on ultimate load, yield load and settlement using experimental data from static load tests that applied load to driven piles used in sandy grounds at home and overseas until failure appeared markedly. Estimated ultimate load was normalized with actually measured failure load, and was compared among the determination methods according to the characteristics of pile. In addition, I have identified to the determination methods suitable for estimating ultimate load, and reevaluated the safety factor when determining allowable load. From the results of this study were drawn conclusions as follows. Among ultimate loads estimated by the ultimate-load-based determination methods, the value interpreted by Chin's method tended to overestimate actual measurements, and B. Hansen 80% standard and the stability plot method were considered most reliable as their results were closest to actual measurements. According to the results of this study, in calculating the allowable load, if the safety factor to be applied to failing load obtained by the method of determining extreme load is converted to the safety factor applied to the Standards for Structure Foundation Design, a value larger than 3.0 should be applied except the B. Hansen 90% method, and a value larger than 2.0 should be applied in the methods of determining yield load. In addition, if the safety factor to be applied to load obtained by the settlement standard is converted based on safety factor 3.0 for extreme load, a value smaller than 3.0 should be applied to the total settlement standard and the net settlement standard.

Key words : static load test, ultimate load, yield load, allowable load, safety factor

*Corresponding author: sun93k@naver.com

서 론

말뚝의 지지력 평가방법 중 말뚝재하시험을 통한 지지력 평가방법이 가장 신뢰성이 높은 것으로 평가되고 있다. 그러나 말뚝재하시험을 통한 평가방법은 그 결과 분석 및 판정법이 매우 다양하고 안전율의 적용기준에 따라 서로 허용지지력의 평가가 다르게 나타나는 문제점으로 인해 보다 정확하고 합리적인 지지력 평가에 대한 방법 및 기준의 필요성이 절실히 요구되어지고 있다. 말뚝재하시험 결과로 항복하중이나 극한하중을 판정하고 이 값의 안전율을 적용하여 허용하중을 결정하는 방법으로는 하중-침하량 곡선을 분석하는 도해법, 말뚝두부 침하량을 기준으로 하는 방법, 수학적 기법으로 판정하는 방법 등으로 크게 구분할 수 있다(오세욱 외, 2000). 이중 많이 이용되고 있는 주요 방법들에는 Brinch-Hansen의 방법, De-Beer의 방법, Chin의 방법, Davisson의 방법, Butler and Hoy의 방법, 말뚝 선단부의 침하량이 말뚝직경의 10%일 때의 하중을 극한하중으로 간주하는 Tomlinson의 방법 등이 있다. 말뚝설계시 지지력 평가에 가장 중요한 것이 말뚝의 허용하중이며, 이는 극한하중 또는 항복하중에 일정 값의 안전율을 적용하여 결정된다. 그러나 주요 판정법의 안전율에 대한 기준의 제시가 명확하지 못하는 경우가 많다. 또한 극한하중을 확인한 시험사례 부족으로 판정기준별 합리적인 안전율 평가에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 허용하중은 여러 지지력 예측방법에 의해 극한하중을 산정할 경우 통상 안전율 3.0 이상을 적용하고 있으며, 정재하시험에 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 극한하중과 이론식에 의한 극한하중에 동일한 안전율을 적용하도록 한 점은 개선의 여지가 있는 것으로 판단되며 재하시험결과와 예측이론별 극한지지력 분석을 통한 안전율 적용기준의 평가가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

따라서 본 연구에서는 국내·외의 현장에 시공된 타입말뚝에 대해 파괴가 현저하게 나타날 때까지 실시한 47개 정재하시험에서 얻어진 실측값을 이용하여 하중-침하량 곡선을 분석하였다. 분석된 자료를 활용하여 극한하중 및 항복하중 판정법과 침하량기준으로 구한 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화 하여 평균과 표준편차를 산정하였다. 판정법에 따른 이들의 값을 비교·

분석하여 극한하중 판정법들의 적절성을 검토하였다. 또한, 각각의 판정법으로 얻어진 항복하중 및 극한하중으로 허용하중 산정시 적용 가능한 안전율을 재평가하였다.

연구내용

말뚝의 정재하시험결과를 이용한 극한하중 판정법에는 하중-침하-시간곡선과 침하량기준을 이용한 방법이 있다. 하중-침하-시간 곡선을 이용한 방법으로는 항복하중 및 극한하중을 추정한 판정법이 있으며, 침하량기준 판정법에는 전침하량기준과 순침하량기준으로 판정하는 방법이 있다.

본 연구에서는 하중-침하 관계를 이용한 극한하중 판정법에 사용되고 있는 Brinch Hansen의 80% 판정법, Mazurkiewicz 판정법, Chin 판정법, Stability Plot 판정법, Brinch Hansen의 90% 판정법을 적용하여 국내·외의 현장에 총 47개의 말뚝에 대해 극한하중을 추정하고 상호 비교·분석하였다. Brinch Hansen의 80% 판정법은 재하시험에서 적용된 단계별 하중(Q)과 말뚝두부의 침하량(Δ)을 이용하여 $\sqrt{\Delta/Q}$ 와 Δ 에 대한 좌표로 관계곡선을 구하고 직선구간의 1차식의 기울기와 절편을 이용하여 극한하중을 산정한다. Mazurkiewicz의 판정법은 말뚝두부의 침하량을 같은 크기로 분할하여 각 점에서 수직선을 그려 올려 하중-침하량 곡선과의 교차점을 구한다. 이 교차점에서 수평선을 그려 하중 축과 교차점에서 45° 직선을 그어 위에 있는 다음 하중선과 만나게 한다. 이때 하중선과의 교차점들 거의 모두가 일직선상에 떨어지게 되며 이 직선의 연장선과 하중 축과의 교차점이 극한하중이 된다. Chin의 판정법은 하중-침하 곡선이 일반적인 쌍곡선 형태로 나타날 때 직선 식으로 축을 변환하여 직선의 기울기로부터 극한하중을 구할 수 있다. Stability Plot 판정법은 Chin 판정법과 같은 방법으로 재하시험결과를 정리하여 극한 주변마찰력은 초기 직선의 기울기의 역수이며 전체 극한하중은 침하량과 극한하중의 관계식으로 산정한다. Brinch Hansen의 90% 판정법은 극한하중($Q_{u(ult)}$)을 가정하고 이때의 침하량(u)를 산정한다. $0.5u$ 에서의 하중이 극한하중의 90%이면, 가정한 $Q_{u(ult)}$ 가 극한하중이다. 극한하중을 가정하고 90%에서의 침하량과 비교하는 반복 작업을 통하여 극한하중이 결정된다. 각 판정법에 의해 산정된 극한하중과 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중과 비교·분석하여 판정법의 적용성을 검토하였으며 이용 가능한 안전율을 제시하였다.

또한, 하중-침하-시간곡선을 이용한 항복하중 판정법인 S-log t, log P-log S, ds/d(log t)-P, Davisson 판정법을

이용하여 항복하중을 산정하고 항복하중에 안전율을 역으로 고려하여 극한하중을 추정하여 상호 비교·분석하였다. S-log t 법은 각 재하단계에 대하여 경과시간을 대수눈금(log t)에, 말뚝두부의 침하량(S)을 산술눈금에 나타낸 후 각 하중단계의 관계선이 직선이 되지 않는 점의 하중을 항복하중으로 산정한다. log P-log S 법은 대수 좌표를 이용하여 하중-침하량 곡선을 그리면 이때 결과치가 두개의 직선상에 나타나게 되는데 두 직선의 교차점이 항복하중으로 결정된다. ds/d(log t)-P 법은 각 재하단계에서 일정시간 후의 대수침하속도(ds/d(log t)) 즉, S-log t의 경사를 구하고, ds/d(log t)와 하중을 좌표에 표시한다. 이와 같은 방법으로 구한 선이 급격히 구부러지는 점의 하중을 항복하중으로 한다. Davisson 방법은 말뚝의 탄성변형을 각 하중단계별 재하하중에 대하여 PL/AE로 계산된 침하량을 직선으로 연결한다. 이때 하중 축과 침하축의 스케일을 조정하여 직선이 하중 축으로부터 20° 이내의 각도를 가지도록 한다. 탄성변형 직선에 대해 (3.81+D/120)mm 만큼 평행 이동시켜 Davisson Offset Line을 그린다. 평행이동시킨 직선과 하중-침하량 곡선의 교점을 항복하중으로 결정한다. 각 판정법에 의해 산정된 극한하중과 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중과 비교·분석하여 판정법의 적용성을 검토하였으며 이용 가능한 안전율을 제시하였다.

다음으로 침하량기준에 의한 극한하중 판정법은 말뚝두부의 침하량을 기준으로 산정하는 방법인 전침하량기준과 전침하량에서 탄성침하량을 뺀 순침하량 기준이 있다. 전침하량기준과 순침하량기준에는 다시 절대침하량과 상대침하량 기준으로 구분되는데, 본 연구에서 적용된 전침하량기준 판정법은 0.1D(Tomlinson, De Beer), 25.4 mm(Terzaghi-Peck), 20 mm(Muns, 프랑스 등)의 판정법을 적용하였으며 순침하량기준 판정법은 0.025D(독일 DIN 4026, 일본건축기초연구원), 6.3 mm(Mansur -Kaufman, 미국 AASHTO

등), 12.7 mm(Woodward, 미국 보스턴 건축기준) 기준을 적용하여 극한하중을 추정하고 상호 비교·분석하였다. 각 판정법에 의해 산정된 극한하중과 재하시험에서 확인된 파괴하중과 비교·분석하여 판정법의 적용성을 검토하였으며 이용 가능한 안전율을 제시하였다.

대상말뚝의 현황

국내·외의 현장에 시공된 타입말뚝에 대해 극한하중이 비교적 분명하게 나타날 때까지 재하한 47개 정재하시험에서 얻어진 실측값을 이용하여 극한 및 항복하중 판정법과 침하량기준에 의한 판정법으로 극한하중을 산정하였다. 국내현장의 대상말뚝은 현장에 따라 1-1에서 10-1까지 번호를 부여하여 10개 현장의 19개 정재하시험결과를 연구대상말뚝으로 활용하였다((주)고려기초연구원, 1994a-f; (주)고려기초연구원, 1994g-l). 대상말뚝은 모두 사질성분을 함유한 풍화산류토층(N=18~45)에 시공되었으며, 시공법에 따라 구분하면 디젤해머에 의한 직항타 16개와 선굴착 후 경타에 의해 시공된 말뚝이 3개이다. 말뚝재료에 따른 종류를 살펴보면 PC말뚝이 16개, 강말뚝(ST)이 3개이며 말뚝의 직경이나 폭에 따라 구분하면 350mm이하의 대상말뚝이 9개, 350~450 mm 미만인 대상말뚝이 6개, 450 mm 이상인 대상말뚝이 4개이다. 국내의 대상말뚝은 대부분 사질지반에 타입식으로 시공된 PC말뚝으로 극한하중 판정법의 적용성 평가를 위해 재하시험에서 확인된 파괴하중으로 정규화 하여 비교·분석에 활용하였다(Table 1). 국외현장의 대상말뚝은 현장에 따라 11-1에서 20-1까지 번호를 부여하여 10개 현장의 28개 정재하시험결과를 대상말뚝으로 활용하였다(Curtis and Lingo, 1980; Edward and Michael, 1980; Kessler, 1979; Larry and Alan, 1980; Meigh, 1970; Patrick and

Table 1. Piles in domestic fields.

Test No.	Diameter (mm)	A pile kind	Intrusion length(m)	Construction method	A thickness sandy soils(m)	Results of SPT
1-1	350	PC	10.1	pile driving directly	13.5	19/30-35/30
1-2	350	PC	9.0	pile driving directly	12.4	18/30-28/30
1-3	350	PC	11.1	pile driving directly	14.2	18/30-32/30
2-1	400	PC	19.0	pile driving directly	22.7	20/30-36/30
3-1	350	PC	9.5	pile driving after pre-boring	13.6	19/30-45/30
4-1	609	ST	11.7	pile driving directly	12.1	19/30-43/30
4-2	609	ST	7.4	pile driving directly	9.8	23/30-46/30
5-1	500	PC	20.7	pile driving directly	24.0	18/30-48/30
6-1	350	PC	7.0	pile driving directly	9.5	25/30-48/30
6-2	350	PC	5.0	pile driving directly	8.4	20/30-34/30

Table 1. Continued.

Test No.	Diameter (mm)	A pile kind	Intrusion length(m)	Construction method	A thickness sandy soils(m)	Results of SPT
6-3	350	PC	7.4	pile driving directly	10.2	18/30-31/30
7-1	350	PC	6.2	pile driving directly	9.5	20/30-39/30
7-2	350	PC	5.4	pile driving directly	9.5	21/30-37/30
8-1	400	PC	13.0	pile driving directly	15.2	22/30-35/30
8-2	400	PC	13.5	pile driving directly	15.2	18/30-38/30
8-3	400	PC	13.4	pile driving directly	16.2	18/30-36/30
9-1	400	PC	11.5	pile driving after pre-boring	15.3	18/30-29/30
9-2	400	PC	13.5	pile driving after pre-boring	17.2	20/30-40/30
10-1	508	ST	9.6	pile driving directly	10.4	22/30-44/30

Paul, 1979; Richard and Richard, 1980; Thorburn and MacVicar, 1980). 대상말뚝은 모두 사질지반(N=17~48)에 시공되었으며, 시공법에 따라 구분하면 디젤해머에 의한 직항타 10개와 단동해머에 의한 직항타 9개, B400해머 직항타 2개, 유압해머에 의한 항타 3개, West Shell 타입 2개, BSP vibro 해머에 의한 항타 2개, 기타 시공법에 의해 1개이다. 말뚝재료에 따른 종류를 살펴보면 PC말뚝이 7개, 강말뚝(ST)이 5개, 콘크리트말뚝이 16개이며 말뚝의 직경에 따라 구분하면 350 mm 이하의 대상말뚝이 9개, 350-450 mm 미만인 대상말뚝이 13개, 450 mm 이상

인 대상말뚝이 6개이다. 국외의 대상말뚝은 대부분 사질 지반에 타입식으로 시공된 PC말뚝과 콘크리트말뚝으로 극한하중 판정법의 적용성 평가를 위해 재하시험에서 실측된 파괴하중으로 정규화 하여 비교·분석에 활용하였다 (Table 2).

하중-침하곡선 및 극한하중

정재하시험에 의한 하중-침하곡선

일반적으로 하중-침하곡선의 모양에 따라 말뚝의 특

Table 2. Piles in overseas fields.

Test No.	Diameter (mm)	A pile kind	Intrusion length(m)	Construction method	A thickness sandy soils(m)	Results of SPT
11-1	340	ST	10.7	pile driving directly	14.8	19/30-35/30
11-2	340	ST	22.5	pile driving directly	26.2	18/30-28/30
12-1	760	Con'c	8.8	pile driving after pre-boring	13.6	-
13-1	445	Con'c	21.5	pile driving directly	24.0	17/30-27/30
13-2	368	Con'c	18.5	pile driving directly	22.5	19/30-25/30
13-3	432	Con'c	21.7	pile driving directly	23.8	20/30-35/30
13-4	432	Con'c	21.7	pile driving directly	25.9	17/30-27/30
13-5	533	Con'c	15.3	pile driving directly	18.7	22/30-40/30
14-1	445	Con'c	34.2	pile driving directly	40.0	19/30-36/30
14-2	445	Con'c	34.7	pile driving directly	42.4	20/30-30/30
15-1	530	ST	6.1	pile driving directly	10.5	-
16-1	406	ST	21.0	pile driving directly	25.7	17/30-45/30
16-2	406	ST	21.0	pile driving directly	25.7	17/30-45/30
17-1	254	PC	13.4	pile driving directly	16.9	19/30-26/30
17-2	356	PC	10.0	pile driving directly	17.3	19/30-45/30
17-3	457	PC	18.9	pile driving directly	24.2	21/30-43/30
17-4	273	Con'c	17.4	pile driving directly	24.0	23/30-41/30
17-5	457	PC	15.6	pile driving directly	19.8	18/30-48/30
17-6	289	Con'c	10.4	pile driving directly	22.4	25/30-48/30
17-7	254	Con'c	8.5	pile driving directly	15.2	17/30-28/30

Table 2. Continued.

Test No.	Diameter (mm)	A pile kind	Intrusion length(m)	Construction method	A thickness sandy soils(m)	Results of SPT
17-8	254	Con'c	8.5	pile driving directly	13.2	20/30-40/30
17-9	457	PC	13.7	pile driving directly	17.4	20/30-48/30
18-1	305	PC	10.7	pile driving directly	16.8	21/30-36/30
18-2	305	PC	19.8	pile driving directly	25.3	21/30-37/30
19-1	444	Con'c	21.5	pile driving directly	28.6	19/30-38/30
19-2	368	Con'c	18.5	pile driving directly	22.4	17/30-28/30
19-3	432	Con'c	21.6	pile driving directly	25.1	21/30-37/30
20-1	406	Con'c	17.1	pile driving directly	19.3	17/30-26/30

성을 분류할 수 있는데, 이차곡선 형태이면 선단지지말뚝, 쌍곡선 형태이면 주면마찰말뚝 그리고 지수곡선 형태이면 중간형으로 분류된다(阪口 등, 1993). 또한, 정상적으로 시공된 항타말뚝의 하중-침하곡선은 주로 이차곡선의 유형을 나타내고, 매입말뚝의 하중-침하량 곡선은 주로 쌍곡선의 유형을 나타내고 있는 것으로 연구되었다(천병식과 조천환, 1997).

국내 · 외의 각각 10 곳의 현장에 시공된 말뚝에 대해 파괴하중이 비교적 분명하게 나타날 때까지 재하한 47개 정재하시험의 실측값으로 나타난 하중-침하량 곡선의 분포형태는 Fig. 1~Fig. 2와 같다. 국내 대상말뚝의 하중-침하량 곡선의 형태는 타입말뚝에서 나타날 수 있는 이차곡선 및 쌍곡선의 형태가 모두 나타났으나 주로 선단지지말뚝과 항타말뚝에 나타나는 이차곡선의 형태로 나타났다(Fig. 1). 이차곡선의 형태는 선단지지말뚝, 쌍곡선의 형태는 주면마찰말뚝의 특성을 나타내므로 하중-침하량 곡선의 형태가 결정된 후 이를 바탕으로 각종의 수학적 기법들을 적용해야만 신뢰도가 있다. 국내 대상말뚝의 전체적인 파괴하중분포는 4-1, 4-2, 10-1의 경우

침하량이 30 mm 이상에서 1960 kN 이상으로 나타났으며 나머지 대상말뚝에서는 침하량이 10 mm 이상에서 1960 kN 이하로 나타났다. 국외 대상말뚝의 하중-침하량 곡선의 형태도 국내의 대상말뚝과 유사하게 이차곡선 및 쌍곡선의 형태가 모두 나타났으나 주로 이차곡선의 형태로 나타났다(Fig. 2). 국외 대상말뚝의 전체적인 파괴하중분포는 13-5, 15-1, 16-1, 16-2, 17-3, 17-9의 경우 침하량 30 mm 이상에서 1960 kN 이상으로 나타났으며 나머지 대상말뚝에서는 침하량 15 mm 이상에서 1960 kN 이하로 나타났다. 전체적으로 파괴하중은 490~3920 kN의 범위에 분포하는 것으로 나타났다.

극한상태파괴하중은 단지 학술적으로 관심이 있을 뿐이면 인접한 단독말뚝이나 무리말뚝 사이의 상대변위량이 상부골조의 과도한 뒤틀림이나 외장재나 마무리철에 손상을 줄 경우 말뚝기초는 공학적 기능면에서 파괴가 발생한 것으로 간주할 수 있다. 본 연구에서는 재하시험으로 실측된 파괴하중을 전 하중단계에서 침하량을 기준으로 침하량이 10% 이상 발생되거나 하중증가는 2% 이하로 나타나는 시점에서의 하중으로 결정하여 활용하였다.

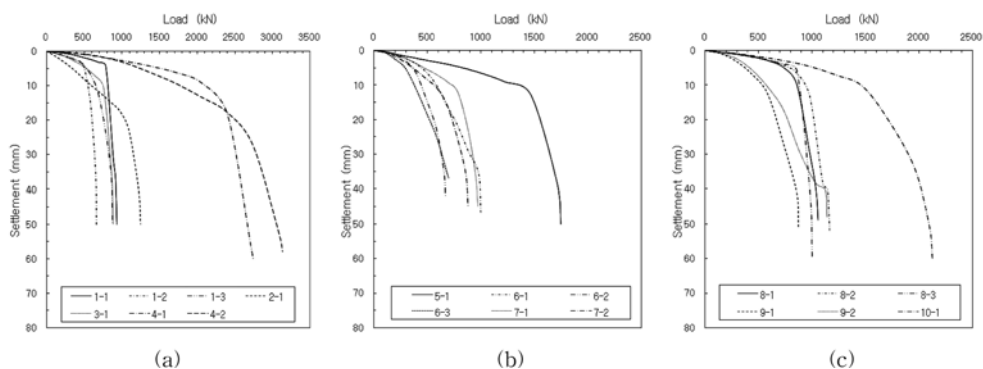


Fig. 1. Relationship curves between load and settlement of a domestic fields:(a), Test No. 1~4; (b), Test No. 5~7; (c), Test No. 8~10.

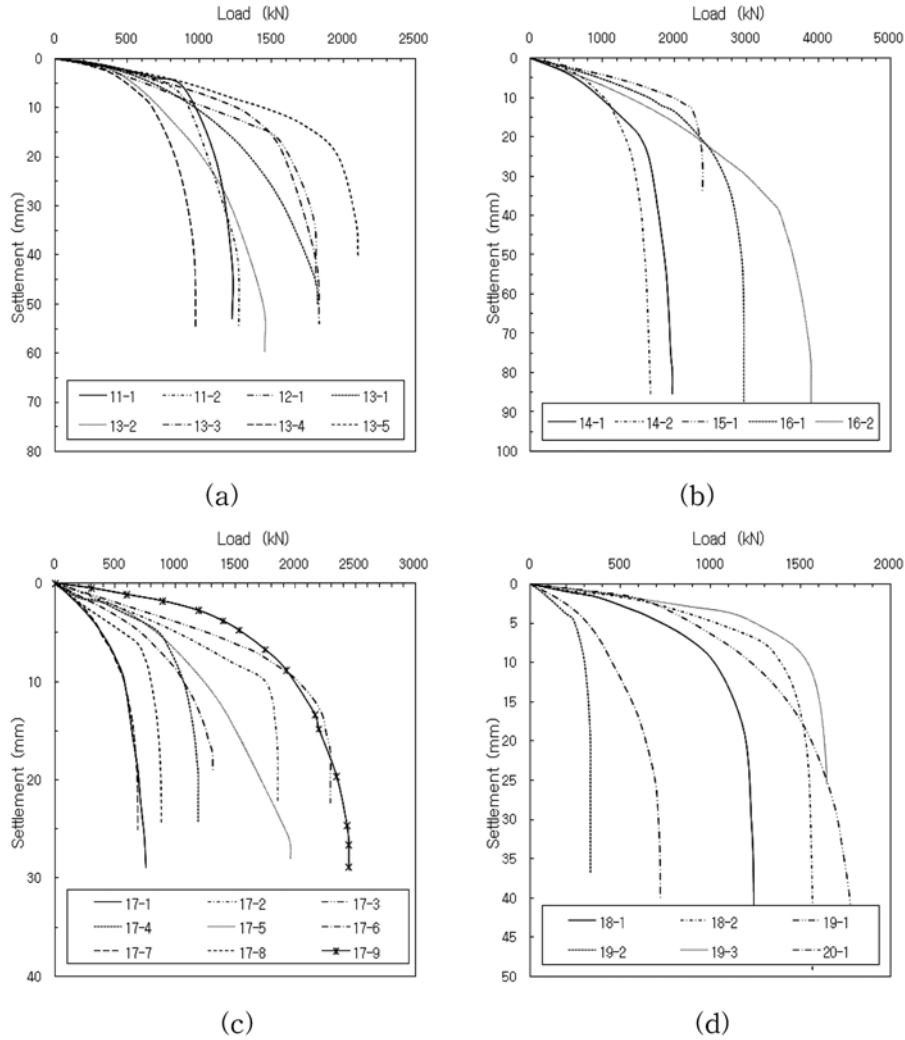


Fig. 2. Relationship curves between load and settlement of an overseas fields:(a), Test No. 11~13; (b), Test No. 14~16; (c), Test No. 17; (d), Test No. 18~20.

극한하중 판정법에 의한 극한하중 평가 및 분석
 사질지반에 시공된 타일밭둑에 대해 정재하시험 데이터를 이용하여 극한하중 판정법으로 극한하중을 산정하고 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화 하였다. 정규화된 값을 비교·분석하여 신뢰할 수 있는 판정법을 검토하였다. 현장에서 실시한 정재하시험에서 확인된 파괴하중과 극한하중 판정법에 따라 산정한 결과를 비교함으로써 각 판정법별로 실제 파괴하중에 대한 정확성을 분석하였다. 정확성을 판정하는데 있어서 각 판정법에서 산정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하고 이들의 값을

비교·분석하여 적합성을 평가하였다(Table 3과 Table 4).

Fig. 3에 제시된 파괴하중은 극한상태까지 재하된 정재하시험에서 얻어진 Fig. 1과 Fig. 2에서 실제 확인된 파괴하중을 나타내었다. Fig. 3은 극한하중 판정법에 사용되고 있는 B. Hansen의 80% 판정법, Mazurkiewicz 판정법, Chin 판정법, Stability Plot 판정법, B. Hansen의 90% 판정법으로 극한하중을 산정하여 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중과 비교하여 제시하였다. 국내·외 대상밭둑을 분석한 결과 대부분의 대상밭둑에서 극한하중 판정법에 의한 극한하중의 추정값은 실제 확인된 파괴하중의 25%에 내에 분포하는 것으로 나타났다. 대부분의

국내대상말뚝에서 B. Hansen의 80% 판정법과 Chin 판정법에 의한 극한하중은 대칭선 위에 분포하여 실제 확인된 파괴하중보다 크게 산정되는 것으로 나타났으며, Mazurkiewicz 판정법에 의한 극한하중은 대칭선 아래에 분포하여 실측된 파괴하중보다 작게 산정되는 것으로 나타났다. 그러나 Stability Plot 판정법과 B. Hansen의 90%

Table 3. Comparison of ultimate load and normalization data between ultimate-load determination methods(piles in domestic fields).

Test No.	Failure load (kN)	B. Hansen80%		Mazurkiewicz		Chin		Stability Plot		B. Hansen90%		Mean	
		E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
1-1	911.4	940.8	1.032	940.8	1.032	933.0	1.024	903.6	0.991	-	-	930.0	1.020
1-2	656.6	672.3	1.024	695.8	1.060	694.8	1.058	651.7	0.993	-	-	679.1	1.034
1-3	862.4	871.2	1.020	833.0	0.966	951.6	1.103	846.7	0.982	-	-	876.1	1.016
2-1	1225.0	1274.0	1.040	1176.0	0.960	1507.2	1.230	1291.6	1.054	1225.0	1.000	1294.6	1.057
3-1	862.4	864.4	1.002	803.6	0.932	970.2	1.125	866.3	1.005	-	-	876.1	1.016
4-1	2744.0	2749.9	1.002	2459.8	0.896	2969.4	1.082	2757.7	1.005	2548.0	0.929	2697.0	0.983
4-2	3087.0	3177.2	1.029	2940.0	0.952	3499.6	1.134	3108.6	1.007	-	-	3181.1	1.031
5-1	1715.0	1716.0	1.001	1617.0	0.943	2000.2	1.166	1833.6	1.069	1715.0	1.000	1776.7	1.036
6-1	980.0	1184.8	1.209	931.0	0.950	1077.0	1.099	911.4	0.930	-	-	1026.1	1.047
6-2	656.6	726.2	1.106	617.4	0.940	699.7	1.066	631.1	0.961	-	-	668.4	1.018
6-3	686.0	674.2	0.983	617.4	0.900	778.1	1.134	639.9	0.933	-	-	677.2	0.987
7-1	950.6	978.0	1.029	950.6	1.000	1065.3	1.121	933.9	0.983	931.0	0.979	972.2	1.023
7-2	862.4	941.8	1.092	784.0	0.909	1021.2	1.184	839.9	0.974	-	-	896.7	1.040
8-1	1038.8	1021.2	0.983	940.8	0.906	1101.5	1.060	1028.0	0.990	1009.4	0.972	1020.2	0.982
8-2	1146.6	1103.5	0.962	1058.4	0.923	1210.3	1.056	1129.0	0.985	1009.4	0.880	1102.5	0.962
8-3	980.0	1036.8	1.058	911.4	0.930	1042.7	1.064	985.9	1.006	-	-	994.7	1.015
9-1	856.5	827.1	0.966	715.4	0.835	980.0	1.144	827.1	0.966	-	-	837.9	0.978
9-2	1121.1	1134.8	1.012	1078.0	0.962	1289.7	1.150	1031.0	0.920	-	-	1133.9	1.011
10-1	2097.2	2161.9	1.031	1862.0	0.888	2333.4	1.113	2069.8	0.987	-	-	2107.0	1.005

E.M, Estimation with ultimate load determination methods.; N.M, Normalization with failure load.

Table 4. Comparison of ultimate load and normalization data between ultimate-load determination methods (piles in overseas fields).

Test No.	Failure load (kN)	B. Hansen80%		Mazurkiewicz		Chin		Stability Plot		B. Hansen90%		Mean	
		E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
11-1	1227.9	1213.2	0.988	1205.4	0.988	1324.0	1.078	1199.5	0.977	1234.8	1.006	1235.8	1.006
11-2	1269.1	1250.5	0.985	1274.0	0.985	1400.4	1.103	1226.0	0.966	-	-	1287.7	1.015
12-1	1793.4	1868.9	1.042	1764.0	1.042	2279.5	1.271	2048.2	1.142	1803.2	1.005	1953.1	1.089
13-1	1799.3	2259.9	1.256	1666.0	1.256	2390.2	1.328	1794.4	0.997	-	-	2027.6	1.127
13-2	1441.6	1781.6	1.236	1543.5	1.236	1633.7	1.133	1304.4	0.905	-	-	1566.0	1.086
13-3	1805.2	1841.4	1.020	1764.0	1.020	2130.5	1.180	1836.5	1.017	1832.6	1.015	1880.6	1.042
13-4	963.3	1003.5	1.042	906.5	1.042	1101.5	1.143	965.3	1.002	965.3	1.002	988.8	1.026
13-5	2081.5	2144.2	1.030	2082.5	1.030	2450.0	1.177	2231.5	1.072	2077.6	0.998	2197.2	1.056
14-1	1973.7	1971.8	0.999	1964.9	0.999	2177.6	1.103	1836.5	0.930	1969.8	0.998	1984.5	1.005
14-2	1633.7	1636.6	1.002	1528.8	1.002	1849.3	1.132	1576.8	0.965	1631.7	0.999	1644.4	1.007
15-1	2391.2	2387.3	0.998	2352.0	0.998	2579.4	1.079	2474.5	1.035	2381.4	0.996	2435.3	1.018
16-1	2959.6	2962.5	1.001	2940.0	1.001	3161.5	1.068	2865.5	0.968	2954.7	0.998	2977.2	1.006
16-2	3895.5	3961.2	1.017	3871.0	1.017	4454.1	1.143	3501.5	0.899	3890.6	0.999	3935.7	1.010

Table 4. Continued.

Test No.	Failure load (kN)	B. Hansen80%		Mazurkiewicz		Chin		Stability Plot		B. Hansen90%		Mean	
		E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
17-1	753.6	831.0	1.103	676.2	1.103	916.3	1.216	739.9	0.982	-	-	790.9	1.049
17-2	1854.2	1854.2	1.000	1866.9	1.000	1960.0	1.057	1896.3	1.023	1852.2	0.999	1885.5	1.017
17-3	2293.2	2303.0	1.004	2298.1	1.004	2722.4	1.187	2546.0	1.110	2293.2	1.000	2432.4	1.061
17-4	1190.7	1201.5	1.009	1180.9	1.009	1379.8	1.159	1242.6	1.044	1190.7	1.000	1238.7	1.041
17-5	1960.0	2049.2	1.046	2018.8	1.046	2722.4	1.389	2185.4	1.115	-	-	2244.2	1.145
17-6	1311.2	1620.9	1.236	1269.1	1.236	2041.3	1.557	1545.5	1.179	-	-	1619.0	1.235
17-7	685.0	693.8	1.013	641.9	1.013	907.5	1.325	721.3	1.053	681.1	0.994	729.1	1.064
17-8	884.0	885.9	1.002	828.1	1.002	980.0	1.109	899.6	1.018	877.1	0.992	893.8	1.012
17-9	2446.1	2501.0	1.022	2435.3	1.022	2799.9	1.145	2577.4	1.054	2445.1	1.000	2551.9	1.043
18-1	1238.7	1237.7	0.999	1166.2	0.999	1324.0	1.069	1219.1	0.984	1215.2	0.981	1232.8	0.995
18-2	1569.0	1574.9	1.004	1450.4	1.004	1633.7	1.041	1546.4	0.986	1548.4	0.987	1550.4	0.988
19-1	1781.6	1822.8	1.023	1734.6	1.023	2085.4	1.171	1809.1	1.015	1778.7	0.998	1846.3	1.036
19-2	335.2	336.1	1.003	313.6	1.003	368.5	1.099	346.9	1.035	333.2	0.994	340.1	1.013
19-3	1642.5	1639.5	0.996	1626.8	0.996	1775.8	1.081	1710.1	1.041	1621.9	0.987	1674.8	1.019
20-1	721.3	766.4	1.063	725.2	1.063	970.2	1.345	770.3	1.068	-	-	808.5	1.120

E.M, Estimation with ultimate load determination methods.; N.M, Normalization with failure load.

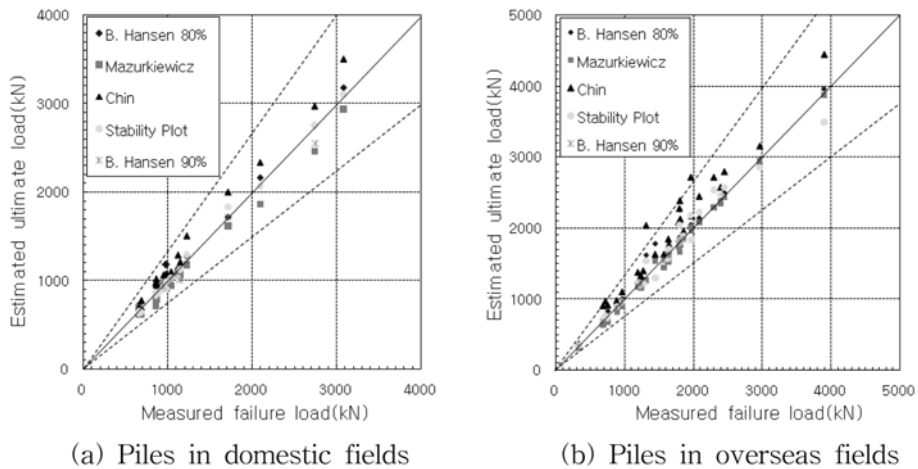


Fig. 3. Comparison of ultimate loads estimated by the ultimate-load-based determination methods and measured failure loads.

판정법에 의한 극한하중은 대칭선에 근접하게 나타나 실제 확인된 파괴하중과 유사한 값으로 나타났다. 국외대상말뚝에서도 B. Hansen의 80% 판정법과 Chin 판정법에 의한 극한하중은 대칭선 위에 분포하여 실제 확인된 파괴하중보다 크게 산정되는 것으로 나타났으며 Mazurkiewicz 판정법, Stability Plot 판정법과 B. Hansen의 90% 판정법에 의한 극한하중은 대칭선에 근접하게 나타나 실제 측된 파괴하중과 유사한 값으로 나타났다.

국내·외 대상말뚝에 대해 극한하중 각 판정법에서 산정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하였다(Table 5). B. Hansen의 80% 판정법에 의한 극한하중의 정규화 값은 평균 1.037, 표준편차 0.067로 평가되어 실제 확인된 극한하중보다 3.7% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 6.7% 정도로 나타났다. Mazurkiewicz의 판정법에 의한 정규화 값은 평균 0.962, 표준편차 0.046으로 평가되어

Table 5. Mean or standard deviation of normalization data between ultimate-load determination methods.

		B. Hansen80%	Mazurkiewicz	Chin	Stability Plot	B. Hansen90%	Mean
Mean	domestic	1.031	0.941	1.111	0.986	0.960	1.014
	oversea	1.041	0.976	1.175	1.021	0.998	1.047
	total	1.037	0.962	1.149	1.007	0.989	1.034
Standard deviation	domestic	0.056	0.050	0.050	0.036	0.043	0.025
	oversea	0.074	0.037	0.118	0.065	0.007	0.054
	total	0.067	0.046	0.101	0.057	0.026	0.048

실제 확인된 극한하중보다 3.8% 과소하게 산정되었으며 표준오차는 4.6% 정도로 나타났다. Chin의 판정법에 의한 정규화 값은 평균 1.149, 표준편차 0.101로 평가되어 실제 확인된 극한하중보다 14.9% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 10.1% 정도로 나타났다. Stability Plot의 판정법에 의한 정규화 값은 평균 1.007, 표준편차 0.057로 평가되어 실제 확인된 극한하중보다 0.7% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 5.7% 정도로 나타났다. 마지막으로 B. Hansen의 90% 판정법에 의한 정규화 값은 평균 0.989, 표준편차 0.026으로 평가되어 실측한 극한하중보다 1.1% 과소하게 산정되었으며 표준오차는 2.6% 정도로 나타났다. 분석결과, 극한하중 판정법 중 Mazurkiewicz 판정법이 가장 작은 값을, Chin의 방법이 가장 큰 값을 나타내었으며, B. Hansen 80% 및 90% 방법과 Stability Plot 방법으로 결정된 극한하중이 재하시험에서 확인된 값과 가장 일치하는 것으로 나타났다. 이 중 시행착오방법으로 산정하는 B. Hansen 90% 방법에 의한 값이 실제 확인된 극한하중과 가장 일치하는 것으로 나타났으며 표준오차도 2.6%로 가장 신뢰성이 높은 것으로 나타났으나 이는 B. Hansen의 90% 시행착오 방법으로 가능한 대상말뚝에 대해서 산정했기 때문인 것으로 사료된다. 극한하중 판정법에 의한 전체적인 정규화 값은 평균 1.034, 표준편차 0.048로 평가되어 재하시험에 실제 확인된 극한하중보다 3.4% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 4.8% 정도로 나타났다.

항복하중 판정법에 의한 극한하중 평가 및 분석

사실지반에 시공된 타입식 말뚝에 대해 정적재하시험 결과를 이용하여 항복하중판정법으로 항복하중을 산정하고 허용하중 결정시 고려되는 안전율을 역으로 적용하여 극한하중을 추정하였다. 추정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화 하였다. 정규화된 값을 비교·분석하여 신뢰할 수 있는 판정법을 검토하였다. 현장에서 실시한 정재하시험의 극한하중 결과와 항복하중 판정법에 따라 항복하중을 산정하고 허용하중 결정시 고

려되는 안전율을 역으로 적용하여 추정된 극한하중 결과를 비교함으로써 각 판정법별로 실제 확인된 파괴하중에 대한 정확성을 분석하였다. 정확성을 판정하는데 있어서 각 판정법에서 산정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하고 이들의 값을 비교·분석하여 적합성을 평가하였다(Table 6과 Table 7).

Fig. 4는 항복하중 판정법에 사용되고 있는 S-log t 분석법, log P-log S 분석법, dS/d(log t)-P 분석법, Davisson 판정법으로 항복하중을 산정하고 허용하중 결정시 고려되는 안전율을 역으로 적용하여 극한하중을 추정하였다. 항복하중 판정법으로 추정된 극한하중과 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중과 비교하여 나타내었다. 모든 국내·외 대상말뚝을 분석한 결과 대부분의 대상말뚝에서 항복하중 판정법에 의한 극한하중의 추정값은 대부분 실제 확인된 파괴하중의 25%에 내에 분포하는 것으로 나타났다. 대부분의 국내대상말뚝에서 S-log t 분석법, log P-log S 분석법, dS/d(log t)-P 분석법에 의한 극한하중은 대칭선 위에 분포하여 실제 확인된 극한하중보다 크게 산정되는 것으로 나타났으며, Davisson 판정법에 의한 극한하중은 대칭선 위·아래에 전체적으로 분포하는 것으로 나타났다. 국외대상말뚝에서도 S-log t 분석법, log P-log S 분석법, dS/d(log t)-P 분석법, Davisson 판정법에 의한 극한하중은 대부분 대칭선 위에 분포하여 실제 확인된 파괴하중보다 크게 산정되는 것으로 나타났다.

국내·외 대상말뚝에 대해 항복하중 각 판정법에서 산정된 항복하중을 허용하중 결정시 고려되는 안전율을 역으로 적용하여 추정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하였다(Table 8). S-log t 분석법에 의한 극한하중의 정규화 값은 평균 1.215, 표준편차 0.158로 평가되어 실제 확인된 파괴하중보다 21.5% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 15.8% 정도로 나타났다. log P-log S 분석법에 의한 정규화 값은 평균 1.147, 표준편차 0.137로 평가되어 실제 확인된 파괴하중보다 14.7% 과대하게 산정되었으며

Table 6. Comparison of ultimate load and normalization data between yield load determination methods(piles in domestic fields).

Test No.	Failure load	S - log t			log P - log S			dS/d(log t) - P			Davisson's method			Mean		
		E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M
		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate	
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
1-1	911.4	882.0	1323.0	1.452	764.4	1146.6	1.258	637.0	955.5	1.048	803.6	1205.4	1.323	772.2	1158.4	1.270
1-2	656.6	588.0	882.0	1.343	490.0	735.0	1.119	294.0	441.0	0.672	519.4	779.1	1.187	473.3	710.5	1.080
1-3	862.4	784.0	1176.0	1.364	686.0	1029.0	1.193	460.6	690.9	0.801	617.4	926.1	1.074	637.0	955.5	1.108
2-1	1225.0	1097.6	1646.4	1.344	1097.6	1646.4	1.344	1078.0	1617.0	1.320	666.4	999.6	0.816	984.9	1477.8	1.206
3-1	862.4	754.6	1131.9	1.313	754.6	1131.9	1.313	754.6	1131.9	1.313	686.0	1029.0	1.193	737.9	1107.4	1.283
4-1	2744.0	2401.0	3601.5	1.313	2352.0	3528.0	1.286	2352.0	3528.0	1.286	2058.0	3087.0	1.125	2291.2	3436.9	1.252
4-2	3087.0	2401.0	3601.5	1.167	2401.0	3601.5	1.167	2156.0	3234.0	1.048	1705.2	2557.8	0.829	2165.8	3248.7	1.052
5-1	1715.0	1470.0	2205.0	1.286	1470.0	2205.0	1.286	1470.0	2205.0	1.286	1401.4	2102.1	1.226	1453.3	2180.5	1.271
6-1	980.0	588.0	882.0	0.900	490.0	735.0	0.750	656.6	984.9	1.005	539.0	808.5	0.825	568.4	852.6	0.870
6-2	656.6	392.0	588.0	0.896	392.0	588.0	0.896	450.8	676.2	1.030	411.6	617.4	0.940	411.6	617.4	0.940
6-3	686.0	392.0	588.0	0.857	392.0	588.0	0.857	490.0	735.0	1.071	343.0	514.5	0.750	404.7	607.6	0.884
7-1	950.6	784.0	1176.0	1.237	764.4	1146.6	1.206	764.4	1146.6	1.206	637.0	955.5	1.005	737.9	1107.4	1.164
7-2	862.4	686.0	1029.0	1.193	686.0	1029.0	1.193	539.0	808.5	0.938	470.4	705.6	0.818	595.8	893.8	1.036
8-1	1038.8	857.5	1286.7	1.238	857.5	1286.7	1.238	833.0	1249.5	1.203	852.6	1278.9	1.231	850.6	1276.0	1.228
8-2	1146.6	857.5	1286.7	1.122	857.5	1286.7	1.122	784.0	1176.0	1.026	911.4	1367.1	1.192	852.6	1278.9	1.115
8-3	980.0	857.5	1286.7	1.313	735.0	1102.5	1.125	715.4	1073.1	1.095	862.4	1293.6	1.320	792.8	1189.7	1.213
9-1	856.5	588.0	882.0	1.030	588.0	882.0	1.030	588.0	882.0	1.030	480.2	720.3	0.841	561.5	842.8	0.983
9-2	1121.1	735.0	1102.5	0.983	735.0	1102.5	0.983	568.4	852.6	0.760	539.0	808.5	0.721	644.8	967.3	0.862
10-1	2097.2	1715.0	2572.5	1.227	1715.0	2572.5	1.227	1568.0	2352.0	1.121	1323.0	1984.5	0.946	1580.7	2371.6	1.130

E.M, Estimation with yield load determination methods.; N.M, Normalization with failure load.

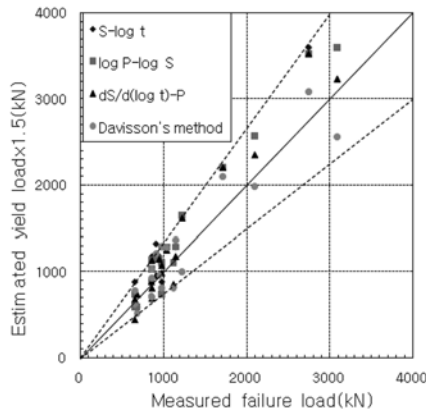
Table 7. Comparison of ultimate load and normalization data between yield load determination methods (piles in overseas fields).

Test No.	Failure load	S - log t			log P - log S			dS/d(log t) - P			Davisson's method			Mean		
		E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M	E.M		N.M
		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate	
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	
11-1	1227.9	1166.2	1749.3	1.425	1038.8	1558.2	1.269	872.2	1308.3	1.065	901.6	1352.4	1.101	994.7	1492.5	1.215
11-2	1269.1	1127.0	1690.5	1.332	960.4	1440.6	1.135	597.8	896.7	0.707	842.8	1264.2	0.996	882.0	1323.0	1.042
12-1	1793.4	1607.2	2410.8	1.344	1411.2	2116.8	1.180	970.2	1455.3	0.811	1146.6	1719.9	0.959	1283.8	1925.7	1.074
13-1	1799.3	1626.8	2440.2	1.356	1568.0	2352.0	1.307	1548.4	2322.6	1.291	1136.8	1705.2	0.948	1470.0	2205.0	1.225
13-2	1441.6	1254.4	1881.6	1.305	1254.4	1881.6	1.305	1185.8	1778.7	1.234	803.6	1205.4	0.836	1125.0	1687.6	1.170
13-3	1805.2	1597.4	2396.1	1.327	1509.2	2263.8	1.254	1440.6	2160.9	1.197	1489.6	2234.4	1.238	1509.2	2263.8	1.254
13-4	963.3	833.0	1249.5	1.297	793.8	1190.7	1.236	774.2	1161.3	1.205	695.8	1043.7	1.083	774.2	1161.3	1.205
13-5	2081.5	1597.4	2396.1	1.151	1401.4	2102.1	1.010	1538.6	2307.9	1.109	1675.8	2513.7	1.208	1553.3	2330.4	1.119
14-1	1973.7	1195.6	1793.4	0.909	1185.8	1778.7	0.901	1342.6	2013.9	1.020	1558.2	2337.3	1.184	1321.0	1981.6	1.004
14-2	1633.7	911.4	1367.1	0.837	901.6	1352.4	0.828	1156.4	1734.6	1.062	1293.6	1940.4	1.188	1066.2	1599.4	0.979
15-1	2391.2	1999.2	2998.8	1.254	1911.0	2866.5	1.199	1901.2	2851.8	1.193	1764.0	2646.0	1.107	1894.3	2842.0	1.188
16-1	2959.6	2322.6	3483.9	1.177	2312.8	3469.2	1.172	1813.0	2719.5	0.919	1744.4	2616.6	0.884	2048.2	3072.3	1.038
16-2	3895.5	2949.8	4424.7	1.136	2930.2	4395.3	1.128	2675.4	4013.1	1.030	1372.0	2058.0	0.528	2482.3	3724.0	0.956
17-1	753.6	617.4	926.1	1.229	607.6	911.4	1.209	597.8	896.7	1.190	548.8	823.2	1.092	592.9	889.8	1.180
17-2	1854.2	1362.2	2043.3	1.102	1362.2	2043.3	1.102	1283.8	1925.7	1.039	1744.4	2616.6	1.411	1438.6	2158.0	1.163

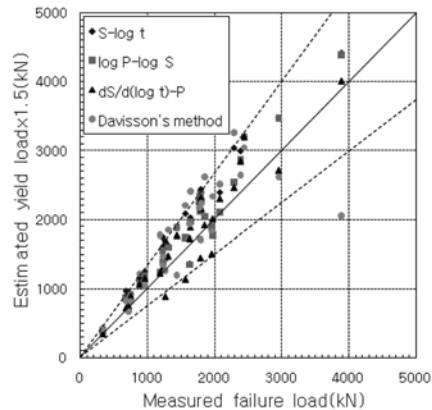
Table 7. Continued.

Test No.	S - log t		log P - log S			dS/d(log t) - P			Davisson's method			Mean				
	E.M.		N.M.	E.M.		N.M.	E.M.		N.M.	E.M.		N.M.	E.M.			
	yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		yield	ulti-mate		
	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)			
11-1	1227.9	1166.2	1749.3	1.425	1038.8	1558.2	1.269	872.2	1308.3	1.065	901.6	1352.4	1.101	994.7	1492.5	1.215
17-3	2293.2	2028.6	3042.9	1.327	1695.4	2543.1	1.109	1646.4	2469.6	1.077	2175.6	3263.4	1.423	1886.5	2830.2	1.234
17-4	1190.7	833.0	1249.5	1.049	823.2	1234.8	1.037	823.2	1234.8	1.037	1185.8	1778.7	1.494	916.3	1374.9	1.154
17-5	1960.0	1264.2	1896.3	0.968	1264.2	1896.3	0.968	1009.4	1514.1	0.773	1225.0	1837.5	0.938	1190.7	1786.5	0.911
17-6	1311.2	1087.8	1631.7	1.244	1068.2	1602.3	1.222	989.8	1484.7	1.132	1234.8	1852.2	1.413	1095.6	1643.5	1.253
17-7	685.0	646.8	970.2	1.416	578.2	867.3	1.266	490.0	735.0	1.073	558.6	837.9	1.223	568.4	852.6	1.125
17-8	884.0	774.2	1161.3	1.314	715.4	1073.1	1.214	715.4	1073.1	1.214	813.4	1220.1	1.380	754.6	1131.9	1.120
17-9	2446.1	2136.4	3204.6	1.310	2136.4	3204.6	1.310	2136.4	3204.6	1.310	2028.6	3042.9	1.244	2109.9	3165.4	1.124
18-1	1238.7	1078.0	1617.0	1.305	921.2	1381.8	1.116	882.0	1323.0	1.068	980.0	1470.0	1.187	965.3	1448.4	1.126
18-2	1569.0	1391.6	2087.4	1.330	1156.4	1734.6	1.106	764.4	1146.6	0.731	1470.0	2205.0	1.405	1195.6	1793.4	1.121
19-1	1781.6	1577.8	2366.7	1.328	1509.2	2263.8	1.271	1509.2	2263.8	1.271	1450.4	2175.6	1.221	1512.1	2268.7	1.119
19-2	335.2	264.6	396.9	1.184	254.8	382.2	1.140	235.2	352.8	1.053	284.2	426.3	1.272	259.7	390.0	1.112
19-3	1642.5	1352.4	2028.6	1.235	1313.2	1969.8	1.199	1264.2	1896.3	1.155	1607.2	2410.8	1.468	1384.7	2077.6	1.107
20-1	721.3	637.0	955.5	1.325	548.8	823.2	1.141	509.6	764.4	1.060	450.8	676.2	0.938	537.0	805.6	1.106

E.M, Estimation with yield load determination methods.; N.M, Normalization with failure load.



(a) Piles in domestic fields



(b) Piles in overseas fields

Fig. 4. Comparison of ultimate loads estimated by the yield-load-based determination methods and measured failure loads.

표준오차는 13.7% 정도로 나타났다. dS/d(log t)-P 분석법에 의한 정규화 값은 평균 1.070, 표준편차 0.167로 평가되어 실제 확인된 파괴하중보다 7.0% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 16.7% 정도로 나타났다. Davisson 판정법에 의한 정규화 값은 평균 1.101, 표준편차 0.221로 평가되어 실제 확인된 극한하중보다 10.1% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 22.1% 정도로 나타났다. 분석결과, 항복하중 판정법 중 dS/d(log t)-P분석법이 가장 작은 값을, S-log t 분석법이 가장 큰 값을 나타내었으며, dS/d(log t)-

P분석법과 Davisson 판정법으로 결정된 극한하중이 실제 확인된 파괴하중과 가장 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다. 그러나 항복하중 판정법에 의한 극한하중은 실제 확인된 파괴하중에 비해 전반적으로 과대평가되는 경향을 보였다. 항복하중 판정법에 의한 전체적인 정규화 값은 평균 1.119, 표준편차 0.146로 평가되어 실제 확인된 극한하중보다 11.9% 과대하게 산정되었으며 표준오차는 14.6% 정도로 나타나 표준오차도 상당히 크게 나타났다.

Table 8. Mean or standard deviation of normalization data between yield-load-based determination methods.

		S-log t	log P-log S	dS/d(log t)-P	Davisson's method	Mean
Mean	domestic	1.188	1.136	1.066	1.019	1.102
	oversea	1.233	1.155	1.072	1.156	1.122
	total	1.215	1.147	1.070	1.101	1.119
Standard deviation	domestic	0.172	0.160	0.179	0.196	0.138
	oversea	0.145	0.118	0.158	0.220	0.086
	total	0.158	0.137	0.167	0.221	0.146

침하량기준 판정법에 의한 극한하중 평가 및 분석
 사질지반에 시공된 타입식 밀뚝에 대해 재하시험 결과를 이용하여 침하량기준 판정법으로 극한하중을 산정하고 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중으로 정규화 하였다. 정규화된 값을 비교·분석하여 신뢰할 수 있는 판정기준을 검토하였다. 현장에서 실시한 정재하시험의 극한하중 결과와 침하량판정기준에 따라 산정한 극한하중 결과를 비교함으로써 각 판정기준별로 실제 확인된 파괴하중에 대한 정확성을 분석하였다. 정확성을 판정하는데 있어서 각 판정기준에서 산정된 극한하중을 재하시험에서 실제

확인된 파괴하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하고 이들의 값을 비교·분석하여 적합성을 평가하였다(Table 9와 Table 10).

Fig. 5는 전침하량 판정기준으로 사용되고 있는 0.1D (Tomlinson; De Beer; 일본 토질공학회 등), 25.4 mm (Terzaghi-Peck기준, Touma-Reese기준), 20 mm (프랑스 기준; Muns기준 등)와 순침하량 판정기준으로 사용되고 있는 0.025D(독일 DIN 4026기준; 일본 건축기초연구소 등), 6.3 mm(미국 도로교 설계기준; 미국 AASHTO 기준 등), 12.7 mm(Woodward; 미국 보스톤 건축기준 등)의 판

Table 9. Comparison of ultimate load and normalization data between settlement determination methods (piles in domestic fields).

Test No.	Failure load (kN)	Total settlement						Net settlement						Mean Mean (kN)	
		Tomlinson (0.1D)		Terzaghi/Peck (25.4 mm)		France (20mm)		DIN 4026 (0.025D)		AASHTO (6.3mm)		Woodward (12.7mm)			
		E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
1-1	911.4	904.5	0.992	862.4	0.946	841.8	0.924	813.4	0.892	800.7	0.878	823.2	0.903	840.8	0.923
1-2	656.6	651.7	0.993	620.3	0.945	602.7	0.918	529.2	0.806	490.0	0.746	588.0	0.896	580.2	0.884
1-3	862.4	853.6	0.990	796.7	0.924	755.6	0.876	656.6	0.761	617.4	0.716	705.6	0.818	731.1	0.848
2-1	1225.0	1221.1	0.997	1113.3	0.909	1031.0	0.842	1038.8	0.848	999.6	0.816	1078.0	0.880	1080.0	0.882
3-1	862.4	860.4	0.998	819.3	0.950	795.8	0.923	-	-	-	-	-	-	825.2	0.957
4-1	2744.0	2748.9	1.002	2458.8	0.896	2414.7	0.880	2254.0	0.821	2107.0	0.768	2224.6	0.811	2367.7	0.863
4-2	3087.0	3131.1	1.014	2672.5	0.866	2479.4	0.803	2548.0	0.825	1901.2	0.616	2430.4	0.787	2527.4	0.819
5-1	1715.0	1739.5	1.014	1590.5	0.927	1538.6	0.897	1499.4	0.874	1479.8	0.863	1504.3	0.877	1559.2	0.909
6-1	980.0	970.2	0.990	833.0	0.850	753.6	0.769	646.8	0.660	597.8	0.610	725.2	0.740	754.6	0.770
6-2	656.6	654.6	0.997	601.7	0.916	555.7	0.846	450.8	0.687	421.4	0.642	509.6	0.776	532.1	0.811
6-3	686.0	681.1	0.993	590.9	0.861	519.4	0.757	421.4	0.614	362.6	0.529	490.0	0.714	510.6	0.745
7-1	950.6	942.8	0.992	886.9	0.933	852.6	0.897	803.6	0.845	764.4	0.804	823.2	0.866	845.7	0.890
7-2	862.4	855.5	0.992	782.0	0.907	728.1	0.844	607.6	0.705	558.6	0.648	646.8	0.750	696.8	0.808
8-1	1038.8	1036.8	0.998	953.5	0.918	920.2	0.886	813.4	0.783	784.0	0.755	852.6	0.821	893.8	0.860
8-2	1146.6	1139.7	0.994	1038.8	0.906	1012.3	0.883	989.8	0.863	882.0	0.769	1009.4	0.880	1012.3	0.883
8-3	980.0	975.1	0.995	924.1	0.943	905.5	0.924	803.6	0.820	764.4	0.780	823.2	0.840	866.3	0.884
9-1	856.5	845.7	0.987	716.4	0.836	661.5	0.772	607.6	0.709	548.8	0.641	656.6	0.767	673.3	0.785
9-2	1121.1	1103.5	0.984	833.0	0.743	766.4	0.684	666.4	0.594	607.6	0.542	725.2	0.647	784.0	0.699
10-1	2097.2	2100.1	1.001	1807.1	0.862	1710.1	0.815	1666.0	0.794	1509.2	0.720	1666.0	0.794	1743.4	0.831

E.M, Estimation with settlement determination methods.; N.M, Normalization with failure load.

Table 10. Comparison of ultimate load and normalization data between settlement determination methods (piles in overseas fields).

Test No.	Failure load (kN)	Total settlement						Net settlement						Mean	
		Tomlinson (0.1D)		Terzaghi/Peck (25.4mm)		France (20mm)		DIN 4026 (0.025D)		AASHTO (6.3mm)		Woodward (12.7mm)			
		E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M	E.M	N.M
		(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)	(kN)
11-1	1227.9	1188.7	0.968	1145.6	0.933	1102.5	0.898	1069.2	0.871	1048.6	0.854	1093.7	0.891	1108.4	0.902
11-2	1269.1	1206.4	0.951	1111.3	0.876	1044.7	0.823	980.0	0.772	849.7	0.669	1053.5	0.830	1040.8	0.820
12-1	1793.4	1813.0	1.011	1692.5	0.944	1614.1	0.900	1599.4	0.892	1408.3	0.785	1530.8	0.854	1610.1	0.898
13-1	1799.3	1798.3	0.999	1476.9	0.821	1350.4	0.751	1396.5	0.776	1298.5	0.722	1419.0	0.789	1456.3	0.810
13-2	1441.6	1298.5	0.901	1128.0	0.782	1021.2	0.708	998.6	0.693	834.0	0.579	1027.0	0.712	1051.5	0.729
13-3	1805.2	1811.0	1.003	1644.4	0.911	1587.6	0.879	1421.0	0.787	1352.4	0.749	1470.0	0.814	1547.4	0.857
13-4	963.3	965.3	1.002	879.1	0.913	826.1	0.858	837.9	0.870	719.3	0.747	854.6	0.887	846.7	0.879
13-5	2081.5	2107.0	1.012	2011.0	0.966	1959.0	0.941	1847.3	0.887	1502.3	0.722	1828.7	0.879	1875.7	0.901
14-1	1973.7	1815.9	0.920	1642.5	0.832	1423.0	0.721	1446.5	0.733	1201.5	0.609	1463.1	0.741	1498.4	0.759
14-2	1633.7	1566.0	0.959	1408.3	0.862	1316.1	0.806	1247.5	0.764	1091.7	0.668	1290.7	0.790	1320.1	0.808
15-1	2391.2	2391.2	1.000	2382.4	0.996	2352.0	0.984	2202.1	0.921	1803.2	0.754	2166.8	0.906	2216.8	0.927
16-1	2959.6	2851.8	0.964	2564.7	0.867	2350.0	0.794	2350.0	0.794	1983.5	0.670	2389.2	0.807	2414.7	0.816
16-2	3895.5	2939.0	0.754	2684.2	0.689	2273.6	0.584	2421.6	0.622	1919.8	0.493	2463.7	0.632	2450.0	0.629
17-1	753.6	742.8	0.986	742.8	0.986	697.8	0.926	612.5	0.813	606.6	0.805	661.5	0.878	677.2	0.899
17-2	1854.2	1854.2	1.000	1854.2	1.000	1854.2	1.000	1507.2	0.813	1471.0	0.793	1614.1	0.871	1692.5	0.913
17-3	2293.2	2293.2	1.000	2293.2	1.000	2293.2	1.000	2079.6	0.907	1902.2	0.829	2102.1	0.917	2160.9	0.942
17-4	1190.7	1190.7	1.000	1190.7	1.000	1190.7	1.000	1010.4	0.849	1005.5	0.844	1060.4	0.891	1108.4	0.931
17-5	1960.0	1960.0	1.000	1931.6	0.986	1712.1	0.874	1722.8	0.879	1420.0	0.725	1770.9	0.904	1753.2	0.894
17-6	1311.2	1318.1	1.005	1318.1	1.005	1318.1	1.005	999.6	0.762	963.3	0.735	1116.2	0.851	1172.1	0.894
17-7	685.0	685.0	1.000	685.0	1.000	682.1	0.996	578.2	0.844	576.2	0.841	610.5	0.891	636.0	0.929
17-8	884.0	884.0	1.000	884.0	1.000	878.1	0.993	744.8	0.843	740.9	0.838	787.9	0.891	820.3	0.928
17-9	2446.1	2446.1	1.000	2436.3	0.996	2350.0	0.961	2092.3	0.855	1863.0	0.762	2120.7	0.867	2217.7	0.907
18-1	1238.7	1226.0	0.990	1212.3	0.979	1190.7	0.961	838.9	0.677	831.0	0.671	1005.5	0.812	1050.6	0.848
18-2	1569.0	1557.2	0.993	1549.4	0.988	1526.8	0.973	1369.1	0.873	1326.9	0.846	1437.7	0.916	1461.2	0.931
19-1	1781.6	1781.6	1.000	1663.1	0.933	1559.2	0.875	1414.1	0.794	1235.8	0.694	1447.5	0.812	1517.0	0.851
19-2	335.2	335.2	1.000	335.2	1.000	334.2	0.997	268.5	0.801	256.8	0.766	277.3	0.827	300.9	0.899
19-3	1642.5	1656.2	1.008	1645.4	1.002	1631.7	0.993	1544.5	0.940	1422.0	0.866	1598.4	0.973	1582.7	0.964
20-1	721.3	723.2	1.003	693.8	0.962	638.0	0.885	595.8	0.826	539.0	0.747	618.4	0.857	635.0	0.880

E.M, Estimation with settlement determination methods.; N.M, Normalization with failure load.

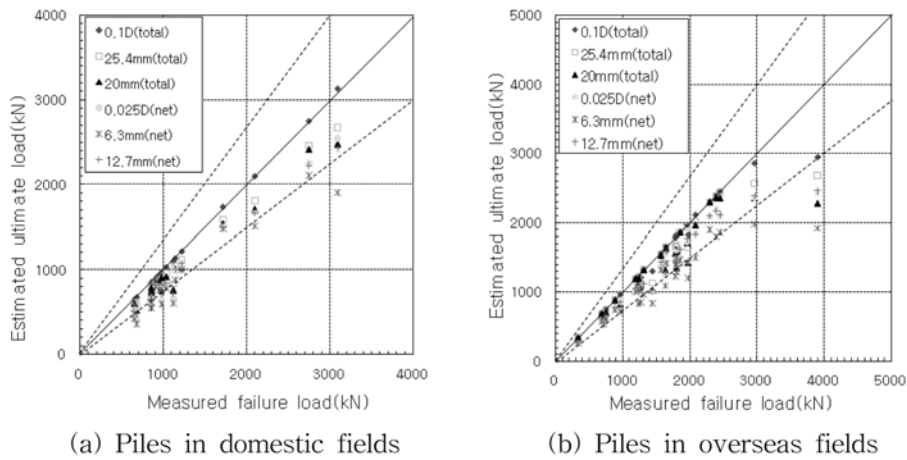


Fig. 5. Comparison of ultimate loads estimated by the settlement-based determination methods and measured failure loads.

정기준으로 극한하중을 산정하여 재하시험에서 실제 확인된 파괴하중과 비교하여 나타내었다. 본 연구에서의 모든 국내·외 대상말뚝을 분석한 결과 대부분의 대상말뚝에서 침하량기준에 의한 극한하중의 추정값은 순침하량기준 0.025D, 6.3 mm 판정기준에 대한 일부 대상말뚝을 제외한 나머지 대상말뚝에서는 실제 확인된 파괴하중의 25%에 내에 분포하는 것으로 나타났다. 국내대상말뚝에서 0.1D 침하량 판정기준에 의한 극한하중은 대칭선에 근접하게 나타나 실제 확인된 극한하중과 거의 유사한 것으로 나타났으며, 0.1D 침하량 판정기준을 제외한 나머지 침하량판정기준에 의한 극한하중은 대칭선 아래에 분포하여 실제 확인된 극한하중보다 작게 산정되는 것으로 나타났다. 국외대상말뚝에서는 0.1D 침하량기준과 25.4 mm 침하량기준에 의한 극한하중은 대칭선에 근접하게 나타나 실제 확인된 극한하중과 거의 유사한 것으로 나타났으며 0.1D 침하량기준과 25.4 mm 침하량기준을 제외한 나머지 침하량판정기준에 의한 극한하중은 대칭선 아래에 분포하여 실제 확인된 극한하중보다 작게 산정되었다.

국내·외 대상말뚝에 대해 각 침하량기준에서 산정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화하여 평균과 표준편차를 산정하였다(Table 11). 전 침하량 0.1D 기준에 의한 극한하중의 정규화 값은 평균 0.986, 표준편차 0.040으로 산정되어 실제 확인된 파괴하중보다 1.4% 과소평가되었으며 표준오차는 4.0% 정도로 나타났다. 25.4 mm 침하량기준에 의한 정규화 값은 평균 0.921, 표준편차 0.071로 나타나 실제 확인된 파괴하중보다 7.9% 과소평가되었으며 표준오차는 5.0% 정도로 나타났다. 20 mm 기준에 의한 정규화 값은 평균 0.877, 표준편차 0.095로 산정되어 실제 확인된 파괴하중보다 15.1% 과소평가되었으며 표준오차는 9.5% 정도로 나타났다. 순침하량 0.025D 기준에 의한 정규화 값은 평균 0.799, 표준편차 0.082로 산정되어 실제 확인된 파괴하

중보다 20.1% 과소평가되었으며 표준오차는 8.2% 정도로 나타났다. 6.3 mm 기준에 의한 정규화 값은 평균 0.731, 표준편차 0.094로 산정되어 실제 확인된 극한하중보다 26.9% 과소평가되었으며 표준오차는 9.4% 정도로 나타났다. 마지막으로 12.7 mm 기준에 의한 정규화 값은 평균 0.832, 표준편차 0.070으로 산정되어 실제 확인된 극한하중보다 16.8% 과소평가되었으며 표준오차는 7.0% 정도로 나타났다. 분석결과, 극한하중은 모든 침하량 기준에서 실제 확인된 값보다 과소평가되는 것으로 나타났으며 특히, 순침하량 6.3 mm 기준이 가장 작은 값으로 평가되었고, 전침하량 0.1D 기준이 가장 큰 값으로 평가되었다. 또한 침하량 판정기준에 의한 전체적인 정규화 값은 평균 0.859, 표준편차 0.069로 실제 확인된 극한하중보다 14.1% 과소평가되었으며 표준오차는 6.9% 정도로 나타났다.

안전율 평가 및 분석

극한하중 판정법에 따른 안전율 평가

Table 3과 Table 4의 결과들로부터 허용하중을 결정하기 위해 국내에서 적용하고 있는 극한하중 취득시 안전율 3.0의 기준에 근거하여 극한하중 판정법별 안전율을 재평가하고 비교·분석하였다. 극한하중 판정법에 의해 결정된 하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화한 값을 국내기준에서 제시하는 안전율 개념으로 환산하여 안전율을 구하였다(Table 12).

국내대상말뚝의 경우 B. Hansen 80% 기준은 3.09, Mazurkiewicz 판정법은 2.82, Chin 판정법은 3.33 Stability Plot 판정법은 2.96, B. Hansen 90% 기준은 2.88로 평가되었으며 이중 Stability Plot 판정법에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. B. Hansen의 80% 기준과 Chin의 판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 3.0보다 0.09~0.33 정도 크게 평가되었다. 이는 실측된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기준의 3.0보다 약간 상회

Table 11. Mean or standard deviation of normalization data between settlement-based determination methods.

		Total settlement			Net settlement			Mean
		Tomlinson (0.1D)	Terzaghi/Peck (25.4 mm)	France (20 mm)	DIN 4026 (0.025D)	AASHTO (6.3 mm)	Woodward (12.7 mm)	
Mean	domestic	0.996	0.897	0.849	0.772	0.713	0.809	0.840
	oversea	0.980	0.937	0.896	0.816	0.742	0.846	0.869
	total	0.986	0.921	0.877	0.799	0.731	0.832	0.859
Standard deviation	domestic	0.008	0.050	0.066	0.088	0.100	0.068	0.063
	oversea	0.051	0.079	0.107	0.074	0.088	0.069	0.072
	total	0.040	0.072	0.095	0.082	0.094	0.070	0.069

Table 12. Safety factors by ultimate load determination methods.

	B. Hansen 80%	Mazurkiewicz	Chin	Stability Plot	B. Hansen 90%	Mean
Domestic	3.09	2.82	3.33	2.96	2.88	3.04
Oversea	3.12	2.93	3.53	3.06	2.99	3.14
Total	3.11	2.89	3.45	3.02	2.97	3.10

하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 국외대상말뚝의 경우 B. Hansen 80% 기준은 3.12, Mazurkiewicz 판정법은 2.93, Chin 판정법은 3.53 Stability Plot 판정법은 3.06, B. Hansen 90% 기준은 2.99로 평가되었으며 이중 B. Hansen의 90% 기준에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. B. Hansen의 80% 기준, Chin의 판정법, Stability Plot 판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 3.0보다 0.06~0.53 정도 크게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기존의 3.0보다 약간 상회하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 전체대상말뚝의 경우 B. Hansen 80% 기준은 3.11, Mazurkiewicz 판정법은 2.89, Chin 판정법은 3.45 Stability Plot 판정법은 3.02, B. Hansen 90% 기준은 2.97로 평가되었으며 이중 Stability Plot 판정법에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. B. Hansen의 80% 기준, Chin의 판정법, Stability Plot 판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 3.0보다 0.02~0.45 정도 크게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기존의 3.0보다 약간 상회하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 여러 극한하중 판정법에 의한 전체적인 안전율은 국내대상말뚝의 경우 3.04, 국외대상말뚝의 경우 3.14, 전체대상말뚝의 경우 3.10으로 평가되어 극한하중판정법에 의해 허용하중 결정시 국내기준의 3.0보다 0.1(3.3%)정도 크게 적용해야 할 것으로 판단된다.

항복하중 판정법에 따른 안전율 평가

Table 6과 Table 7의 결과들로부터 허용하중을 결정하기 위해 국내에서 적용하고 있는 항복하중 취득시 안전율 2.0의 기준에 근거하여 항복하중 판정법별 안전율을 재평가하고 비교·분석하였다. 항복하중 판정법에 의해 결정된 하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화한 값을 국내기준에서 제시하는 안전율 개념으로 환산하여 안전율을 구하였다(Table 13).

국내 대상말뚝의 경우 S-log t 분석법은 2.38, log P-log S 분석법은 2.27, dS/d(log t)-P 분석법은 2.13, Davisson

Table 13. Safety factors by yield load determination methods.

	S-log t	log P-log S	dS/d(log t)-P	Davisson's method	Mean
Domestic	2.38	2.27	2.13	2.04	2.20
Oversea	2.47	2.31	2.14	2.31	2.24
Total	2.43	2.29	2.14	2.25	2.24

판정법은 2.04로 평가되었으며 이중 Davisson 판정법에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 모든 항복하중판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 2.0보다 0.04~0.38 정도 크게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기존의 2.0보다 약간 상회하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 국외대상말뚝의 경우 S-log t 분석법은 2.47, log P-log S 분석법은 2.31, dS/d(log t)-P 분석법은 2.14, Davisson 판정법은 2.31로 평가되었으며 이중 dS/d(log t)-P 분석법에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 모든 항복하중판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 2.0보다 0.14~0.47 정도 크게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기존의 2.0보다 약간 상회하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 전체대상말뚝의 경우 S-log t 분석법은 2.43, log P-log S 분석법은 2.29, dS/d(log t)-P 분석법은 2.14, Davisson 판정법은 2.25로 평가되었으며 이중 dS/d(log t)-P 분석법에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 모든 항복하중판정법에 의해 얻어진 안전율은 국내기준의 2.0보다 0.14~0.43 정도 크게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 과대하게 산정되므로 기존의 2.0보다 약간 상회하는 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 여러 항복하중 판정법에 의한 전체적인 안전율은 국내대상말뚝의 경우 2.20, 국외대상말뚝의 경우 2.24, 전체대상말뚝의 경우 2.24로 평가되어 항복하중 판정법에 의해 허용하중 결정시 국내기준의 2.0보다 0.24(12.0%)정도 크게 적용해야 할 것으로 판단된다.

침하량 기준에 따른 안전율 평가

Table 9와 Table 10의 결과들로부터 허용하중을 결정하기 위해 국내에서 적용하고 있는 극한하중 취득시 안전율 3.0의 기준에 근거하여 침하량 기준별 안전율을 재평가하고 비교·분석하였다. 침하량 기준에 의해 결정된 하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화한 값을 국내기준에서 제시하는 안전율 개념으로 환산하여 안전율을 구하였다(Table 14).

Table 14. Safety factors by settlement determination methods.

	Total settlement			Net settlement			Mean
	Tomlinson (0.1D)	Terzaghi/Peck (25.4 mm)	France (20 mm)	DIN 4026 (0.025D)	AASHTO (6.3 mm)	Woodward (12.7 mm)	
Domestic	2.99	2.69	2.55	2.32	2.14	2.43	2.52
Oversea	2.94	2.81	2.69	2.45	2.23	2.54	2.61
Total	2.96	2.76	2.63	2.40	2.19	2.50	2.58

국내 대상말뚝의 경우 전침하량이 말뚝직경의 10% (0.1D), 25.4 mm, 20 mm의 기준에서 안전율은 2.55~2.99로 평가되었으며, 하중제거시의 탄성침하량을 배제한 순침하량이 말뚝직경의 2.5%(0.025D), 6.3 mm, 12.7 mm의 기준에서 안전율은 2.14~2.43으로 평가되었다. 이중 전침하량 0.1D기준에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 침하량 기준의 안전율은 국내 극한하중의 안전율 기준 3.0보다 0.01~0.86 정도 작게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 작게 산정되므로 기존의 3.0보다 작은 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 국외 대상말뚝의 경우 전침하량이 말뚝직경의 10% (0.1D), 25.4 mm, 20 mm의 기준에서 안전율은 2.69~2.94로 평가되었으며, 하중제거시의 탄성침하량을 배제한 순침하량이 말뚝직경의 2.5%(0.025D), 6.3 mm, 12.7 mm의 기준에서 안전율은 2.23~2.54로 평가되었다. 이중 전침하량 0.1D기준에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 침하량 기준의 안전율은 국내 극한하중의 안전율 기준 3.0보다 0.06~0.73 정도 작게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 작게 산정되므로 기존의 3.0보다 작은 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 전체대상말뚝의 경우 전침하량이 말뚝직경의 10%(0.1D), 25.4 mm, 20 mm의 기준에서 안전율은 2.63~2.96으로 평가되었으며, 하중제거시의 탄성침하량을 배제한 순침하량이 말뚝직경의 2.5%(0.025D), 6.3 mm, 12.7 mm의 기준에서 안전율은 2.19~2.50으로 평가되었다. 이중 전침하량 0.1D 기준에 의한 안전율이 기준 값과 거의 근사적으로 나타났다. 침하량 기준의 안전율은 국내 극한하중의 안전율 기준 3.0보다 0.04~0.81 정도 작게 평가되었다. 이는 실제 확인된 극한하중보다 작게 산정되므로 기존의 3.0보다 작은 안전율을 적용해야 할 것으로 판단된다. 여러 침하량 기준 판정법에 의한 전체적인 안전율은 국내대상말뚝의 경우 2.52, 국외대상말뚝의 경우 2.61, 전체대상말뚝의 경우 2.58로 평가되어 침하량기준에 의해 허용하중 결정시 3.0보다 0.42(14.0%)정도 작게 적용해야 할 것으로 판단된다.

결론

본 연구에서는 국내·외의 사질지반에 시공된 타입말뚝에 파괴가 현저하게 나타날 때까지 재하한 정재하시험 실측 데이터를 바탕으로 극한하중·항복하중·침하량 기준의 각각 판정법으로 극한하중을 추정하였다. 추정된 극한하중을 재하시험에서 실제 확인된 극한하중으로 정규화하고 판정법별로 비교·분석하였다. 또한 극한하중 추정시 적합한 판정법의 타당성을 검토하고 허용지지력 결정시 안전율을 재평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 극한하중 판정법으로 구한 극한하중은 Mazurkiewicz 방법이 가장 작은 값을, Chin의 방법이 가장 큰 값을 나타내었으며, B. Hansen 80% 방법과 Stability Plot 방법으로 결정된 극한하중이 재하시험으로 확인된 파괴하중과 가장 일치하는 것으로 나타났다. 따라서 Chin 방법에 의해 해석된 극한하중은 실제 확인된 파괴하중 보다 과대평가되는 경향을 보이며 또한 B. Hansen 80%기준과 Stability Plot 방법이 재하시험에서 확인된 파괴하중과 거의 일치하여 극한하중 판정법 중 가장 신뢰성이 있는 방법임을 알 수 있었다.

2) 항복하중 판정법으로 구한 극한하중은 $dS/d(\log t)$ -P 분석법이 가장 작은 값을, S-log t 분석법이 가장 큰 값을 나타내었으며, $dS/d(\log t)$ -P분석법과 Davisson 판정법으로 결정된 극한하중이 재하시험에서 확인된 파괴하중과 가장 유사한 값으로 나타났다. 그러나 항복하중 판정법에 의한 극한하중은 재하시험에서 확인된 파괴하중에 비해 전반적으로 과대평가되는 경향을 보였다.

3) 허용하중 산정시 극한하중 판정법으로 추정한 극한하중에 적용해야 할 안전율을 재하시험으로 확인된 파괴하중으로 재평가한 결과 B. Hansen 80% 방법과 Chin 방법은 극한하중이 과대하게 산정되는 경향을 보이므로 통상적으로 적용되고 있는 안전율 3.0보다 큰 값을 적용해야 할 것으로 판단된다.

4) 허용하중 산정시 항복하중 판정법으로 추정한 항복하중에 적용해야 할 안전율을 재하시험으로 확인된 파

피하중으로 재평가한 결과 S-log t 방법, log P-log S 방법, $dS/d(\log t)$ -P 방법, Davisson 방법 모두 과대하게 산정되는 경향을 보이므로 통상적으로 적용되고 있는 안전을 2.0보다 큰 값을 적용해야 할 것으로 판단된다.

5) 허용하중 산정시 침하량기준에 의해 추정된 하중에 적용해야 할 안전율을 극한하중에 대한 안전율을 기준으로 재평가한 결과 전침하량기준과 순침하량기준 모두 과소하게 산정되는 경향을 보이므로 통상적으로 적용되고 있는 안전율을 3.0보다 작은 값을 적용해야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 오세욱, 신방웅, 김광일, 2000, 모래지반에 설치된 H말뚝과 강관말뚝의 지지력 해석, 대한토목학회 논문집, 20(5), 405-418.
- (주)고려기초연구소(1994a-f), 1994, 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-23-39.
- (주)고려기초연구소(1994g-l), 1994, 말뚝재하시험 보고서, Report No. KFR-94-40-68.
- 천병식, 조천환, 1997, 항타 및 매입말뚝의 하중-침하량 곡선의 분석, 한국지반공학회, 13(6), 61-70.
- 한국지반공학회, 1997, 지반조사결과와 해석 및 응용, 한국지반공학회, 226-247.
- 한국지반공학회, 2003, 건설교통부제정 구조물 기초설계 기준 해설, 277-378.
- 阪口 理, 林 冠洲, 1993, 荷重-沈下量 曲線の 形状を 考慮した 場所打ち杭の 技術力, 土と基礎, 21-26.
- 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.
- Curtis, J.R. and Lingo, E.W., 1980, Behavior of Driven Piles on Soft Limestone, Symposium on Deep Foundations, ASCE, National Convention Atlanta, Georgia. 365-395.
- Edward, E.R. and Michael W. S., 1980, Pile Foundations for One Market Plaza, Symposium on Deep Foundations, ASCE, National Convention Atlanta, Georgia. 343-364.
- Kessler, K.A., 1979, Case history pile foundation in flood plain soils, Symposium on Deep Foundations, ASCE, National Convention Atlanta, Georgia. 215-234.
- Larry, G.O. and Alan, N.S., 1980, Capacities of Steel H Piles Supported in Shale, Symposium on Deep Foundations, ASCE, National Convention Atlanta, Georgia. 288-299.
- Meigh, A.C., 1970, Some driving and loading tests on piles in gravel and chalk, Behaviour of Piles, Proceedings of the Conference organized by the Institution of Civil Engineers in London, 9-16.
- Patrick, M.G. and Paul, A., 1979, Instrumented Drilled Shafts In CLAY-SHALE, Symposium on Deep Foundations, ASCE, National Convention Atlanta, Georgia. 149-165.
- Richard, E.A. and Richard, I.S., 1980, Load tests on piles driven into cretaceous sand, Symposium on Deep Foundations, 1-37.
- Thorburn, S. and MacVicar, R.S.L., 1980, Pile load tests to failure in the Clyde alluvium, Proceedings of the conference organized by the Institution of Civil Engineers in London, 1-7.

2009년 10월 31일 원고접수, 2009년 12월 8일 게재승인

기완서

조선이공대학 토목건설과
501-744 광주광역시 동구 서석동 290
Tel: 062-230-8662
Fax: 062-230-8677
E-mail: wski@mail.chosun-c.ac.kr

박노환

금호건설(주)
110-857 서울시 종로구 신문로 1가 115 금호아시아
나본관
Tel: 02-6303-0300
Fax: 02-6303-0738
E-mail: nhpark1@kumhoenc.com

김선학

조선대학교 토목공학과
501-759 광주광역시 동구 서석동 375
Tel: 062-230-7093
Fax: 062-230-7083
E-mail: sun93k@naver.com