

외삽법을 이용한 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 극한하중 예측

Prediction of Ultimate Load of Drilled Shafts Embedded in Weathered Rock by Extrapolation Method

정성준* · 이상인** · 전종우*** · 김명모****

Jung, Sung Jun · Lee, Sang In · Jeon, Jong Woo · Kim, Myoung Mo

Abstract

In general, a drilled shaft embedded in weathered rock has a large load bearing capacity. Therefore, most of the load tests are performed only up to the load level that confirms the pile design load capacity, and stopped much before the ultimate load of the pile is attained. If a reliable ultimate load value can be extracted from the premature load test data, it will be possible to greatly improve economic efficiency as well as pile design quality. The main purpose of this study is to propose a method for judging the reliability of the ultimate load of piles that is obtained from extrapolated load test data. To this aim, ten static load test data of load-displacement curves were obtained from testing of piles to their failures from 3 different field sites. For each load-displacement curve, loading was assumed as 25%, 50%, 60%, 70%, 80%, and 90% of the actual pile bearing capacity. The limited known data were then extrapolated using the hyperbolic function, and the ultimate capacity was re-determined for each extrapolated data by the Davisson method (1972). Statistical analysis was performed on the reliability of the re-evaluated ultimate loads. The results showed that if the ratio of the maximum-available displacement to the predicted displacement exceeds 0.6, the extrapolated ultimate load may be regarded as reliable, having less than a conservative 20% error on average. The applicability of the proposed method of judgment was also verified with static load test data of driven piles.

Keywords : drilled shaft, extrapolation method, ultimate load prediction, pile loading test, hyperbolic curve method

요 지

일반적으로 풍화암에 근입된 현장타설말뚝은 지지력이 매우 크므로 많은 경우에 설계하중만을 검증한 다음 극한하중을 확인하기 전에 재하시험을 종료한다. 그러나 만일 미완성 하중-침하 곡선으로부터 신뢰할 수 있는 극한하중의 예측이 가능하다면 설계의 질적인 향상뿐만 아니라 경제적인 면에서도 크게 기여를 할 수 있을 것이라고 생각된다. 본 연구의 목적은 극한하중을 얻지 못한 말뚝 재하시험의 하중-침하 곡선으로부터 외삽법을 이용하여 추정된 극한하중의 신뢰성 판단 방법을 제안하는 데 있다. 이를 위해 극한하중이 구해진 10본의 말뚝을 3개 현장에 걸쳐서 수집하였다. 그리고 이 10개의 하중-침하 곡선으로부터 Davisson 방법을 이용하여 구한 실제 계측 극한하중의 25%, 50%, 60%, 70%, 80%, 그리고 90%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만이 확보되었다고 가상하고 각각의 자료에 대하여 쌍곡선 방법으로 외삽한 다음, 극한하중을 새로이 결정하였다. 이렇게 결정된 외삽 극한하중의 신뢰성을 통계분석을 통하여 평가하였다. 그 결과, 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대 침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량 비가 0.6 이상인 경우, 외삽으로 예측한 극한하중은 실제 계측 극한하중보다 평균적으로 20% 이내에서 보수적인 값을 나타내었다. 또한, 향타말뚝의 정재하시험 자료에 대하여 본 논문에서 제안한 방법으로 분석하여 동일한 결과를 확인하였다.

핵심용어 : 현장타설말뚝, 외삽법, 극한하중 예측, 말뚝재하시험, 쌍곡선 방법

1. 서 론

최근 대형 구조물의 큰 하중을 지지하기 위해 허부 기초 구조물 중 대구경 현장타설말뚝의 사용이 증가하고 있다. 대구경 현장타설말뚝은 소구경 기성말뚝과 달리 대부분 암반에 선단 지지되므로 지지력이 매우 크다. 현장타설말뚝의 지

지력을 정밀히 산정하기 위해서는 말뚝선단부 암반의 공학적 특성을 파악해야 하지만 암 시료채취와 암반상태 평가 등이 어렵고 실무적으로 잘 이루어지지 않기 때문에 많은 가정사항을 통하여 지지력을 산정하고 있다. 이러한 경우 여러 가지 이론적 또는 경험적 지지력 공식으로 산정된 지지력 값은 신뢰성이 크게 떨어진다.

*정희원 · 서울대학교 건설환경공학부 박사과정 (E-mail : brian76@snu.ac.kr)

**서울대학교 통계학과 박사과정 (E-mail : lsi44@statcom.snu.ac.kr)

***서울대학교 통계학과 교수 (E-mail : jwjeon@plaza.snu.ac.kr)

****정희원 · 교신저자 · 서울대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : geotech@snu.ac.kr)

지지력을 예측하는 가장 정확한 방법은 실제 말뚝두부에 하중을 재하여 지지력을 확인하는 정재하시험을 수행하는 것이다. 그러나 현장타설말뚝은 대부분 암반에 지지되어 지지력이 매우 크기 때문에 재하시험으로 극한하중을 확인할 수 있는 경우는 극히 드물다. 정성준 등(2007)이 국내에서 수행된 현장타설말뚝 정재하시험자료를 약 80본 정도 수집하여 분석한 결과 극한하중이 확인된 경우는 연구목적으로 수행된 10본에 불과하였다.

국내의 연구자들은 재하시험 결과로부터 극한하중 확인의 중요성을 깨닫고 재하곡선의 변화 추세선을 연장하여 극한하중을 구하는 외삽법의 적용성을 연구한 바 있다. 천병식 등(1997)은 하중-침하 곡선의 유형이 항타말뚝의 경우에는 이차함수 형태, 매입말뚝의 경우에는 쌍곡선 형태로 나타난다고 하였다. 또한, Paikowsky(1999) 등은 토사층에 근입된 항타말뚝에 대해 하중-침하 곡선을 쌍곡선 방법으로 외삽하여 연장한 후, Davisson 방법(1972)으로 파괴하중을 예측하는 방법을 제안하였다. 그러나 외삽법을 이용하여 극한지지력을 예측하는 경우에 확보된 하중-침하 곡선의 상태에 따라 그 결과의 신뢰도가 크게 달라질 수 있다.

본 연구에서는 국내 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝을 대상으로 극한하중을 얻지 못한 말뚝 재하시험의 하중-침하 곡선으로부터 외삽법을 이용하여 추정된 극한하중의 신뢰성 판단방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 풍화된 암반에 지지되고 극한하중이 얻어진 3개 현장의 총 10본의 현장타설말뚝의 재하시험 자료를 수집하여 연구를 수행하였다. 본 재하시험 자료의 극한하중은 4가지 기준(Davisson, 25.4mm, FHWA 5%, ASCE 20-96)을 적용하여 통계분석을 수행한 결과, 4가지 방법의 평균지지력에 가까우면서 보수적인 그리고 가장 보편적으로 사용되는 Davisson 방법(1972)을 이용하여 산정하였다(한국건설기술연구원, 2008). 실제 극한하중이 얻어진 재하시험 결과를 대상으로 각 재하시험의 실제 계측 극한하중까지의 하중-침하 곡선 자료를 100%로 보았을 때, 실제 계측 극한하중의 25%~90%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만이 확보되었다고 가상하고 각각의 자료에 대하여 외삽한 다음, Davisson 방법으로 극한하중을 새로이 결정하였다. 그리고 외삽법으로 얻어진 예측 극한하중의 신뢰성 판단을 위한 방법을 제안하기 위하여 확보하였다고 가상

한 하중-침하 곡선의 최대침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량 비와 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대하중 대 외삽 극한하중 비를 각각 달리하여 외삽 극한하중과 실제 계측 극한하중을 통계학적으로 비교 분석하였다. 끝으로 문헌에서 얻은 항타말뚝 자료에 대하여 동일한 방법으로 외삽 극한하중의 신뢰성을 분석하였다.

2. 현장타설말뚝 재하시험 자료수집

2.1 자료 수집

본 연구에서는 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝을 대상으로 80여개의 국내 정재하시험자료를 수집하였다. 그러나 이중 Davisson 방법으로 극한하중 산정이 가능한 자료는 3개 현장의 총 10본이었다. 표 1에 재하시험 자료들의 말뚝제원, 암 풍화상태, 최대 재하하중 그리고 Davisson 방법(1972)으로 구한 극한하중 등을 정리하였다. 말뚝 지름은 연구목적의 시험말뚝 9본이 400mm이고 나머지 1본이 1,000mm 이다. 그리고 말뚝선단의 암반 근입깊이는 0.2~6m이다. 또한 각 말뚝들의 극한하중은 직경 400mm의 경우 570kN~2,620kN이고, 직경 1,000mm 말뚝의 경우 18,800kN이었다.

3. 외삽법을 이용한 극한하중 산정

3.1 외삽방법

본 연구에서는 미완성 하중-침하 곡선의 외삽을 위하여 쌍곡선 방법과 이차곡선 방법 등 2가지 방법을 사용하였으며, 표 2에 각 방법에 대하여 간략하게 정리하였다.

쌍곡선 방법 적용 시, 표 2에 정의한 계수 a와 b를 결정하기 위해 하중-침하 곡선의 침하량 S를 횡축에 그리고 하중에 대한 침하량비, S/P를 종축으로 하여 데이터를 도시한 다음 회귀분석을 수행하였다. 그 예를 그림 1에 나타내었다. Paikowsky 등(1999)은 외삽 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 회귀곡선의 상관계수(R²)가 0.8이상일 때까지 초기자료(침하량 0에 가까운 자료)를 제거한 후 계수 a, b를 결정하였는데, 본 연구에서도 이 방법을 따랐다.

표 1. 연구대상 말뚝의 제원

현장	말뚝 No.	지름 (mm)	암 풍화 상태 ¹⁾	길이 (m)	암반 근입깊이 (m)	시험최대하중 (kN)	Davisson 방법에 의한 극한하중 (kN)	출처
WR1	1	400	MW	10.4	0.4	1,160	860	Kim(1997)
	2	400	MW	9.7	0.2	2,900	890	
	3	400	MW	9.8	0.5	1,800	1,220	
	4	400	MW	10.0	0.8	3,500	2,620	
WR2	5	400	HW	13.2	6.0	2,950	2,100	Jeon(2000)
	6	400	CW	10.2	3.0	2,800	1,650	
	7	400	CW	10.2	3.0	1,450	570	
	8	400	CW	10.2	3.0	1,660	750	
	9	400	HW	13.3	6.0	4,000	2,210	
WR4	10	1,000	HW	13.5	2.2	19,000	18,800	Kwon(2004)

¹⁾MW: Moderately Weathered, HW: Highly Weathered, CW: Completely Weathered.

표 2. 쌍곡선 방법과 이차곡선 방법 개요

방법	식	비고
쌍곡선 방법	$P = \frac{S}{a+bS}$	S: 침하량, P: 하중 a, b: 회귀분석으로부터 결정되는 계수
이차곡선 방법	$S = cP^2 + dP + e$	c, d, e : 이차곡선 근사곡선과 재하곡선의 회귀분석으로 결정되는 계수

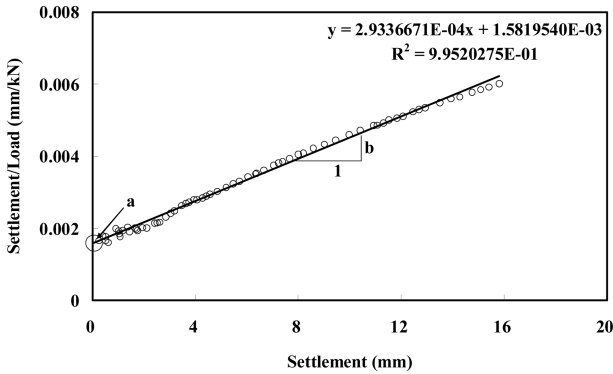


그림 1. 쌍곡선 방법의 입력변수 a와 b의 결정 예

3.2 분석 절차

극한하중이 얻어진 총 10본의 재하시험 자료(표 1)에 대하여 쌍곡선 방법과 이차곡선 방법에 의한 외삽 결과를 비교하였다. 분석 과정은 다음과 같다.

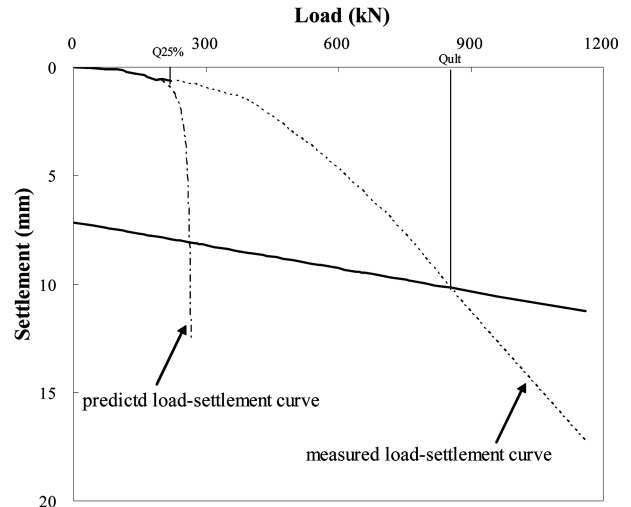
- (1) 계측 하중-침하 곡선으로부터 Davisson 방법을 이용하여 구한 실제 계측 극한하중의 25%, 50%, 75%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만이 확보되었다고 가상하고 각각의 자료에 대하여 쌍곡선 및 이차곡선 방법으로 외삽한 다음, Davisson 방법으로 극한하중을 새로이 결정한다. 그림 2에 확보 자료 범위가 다른 하중-침하 곡선을 외삽한 다음 극한하중을 구하는 예를 도시하였다.
- (2) 각기 다른 크기의 자료로부터 외삽하여 새로 예측한 극한하중을 실제 계측 극한하중과 비교한다.

3.3 쌍곡선 방법 및 이차곡선 방법의 외삽 결과 비교

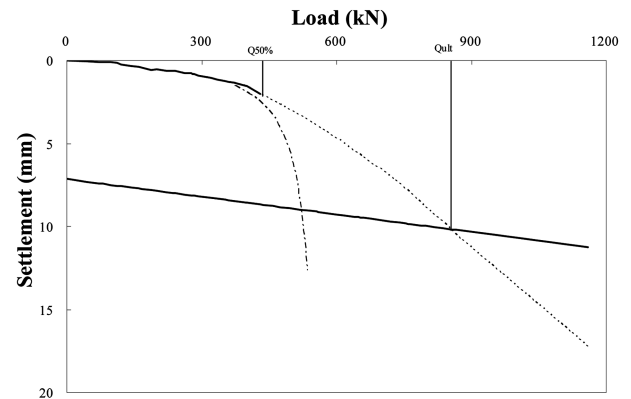
표 3에 다양한 범위의 자료를 이용하여 쌍곡선 방법 및 이차곡선 방법으로 예측한 극한하중과 실제 계측 극한하중 비율의 평균, 표준편차, 그리고 변동계수를 나타내었다. 변동계수는 표준편차와 평균의 비로서 그 크기가 작을수록 불확실성은 작아지고 신뢰성은 높아진다. 또한 같은 표에서 평균값이 1보다 크면 그 자료범위에서의 예측 극한하중이 실제 계측 극한하중보다 크다는 의미이다.

쌍곡선 방법의 경우, 표 3에서 보는 것처럼 하중기준 자료범위 25%, 50%, 그리고 75%에서 얻은 예측 극한하중 대 실제 계측 극한하중 비의 평균값은 각각 0.54, 0.73, 그리고 0.89로서 일관되게 보수적으로 예측하였으며 자료범위가 증가함에 따라 예측 극한하중과 실제 계측 극한하중의 표준편차는 점점 작게 나타났다. 그리고 변동계수 또한 각각 0.37, 0.20, 그리고 0.15로서 점점 작아지는 결과를 나타내었다.

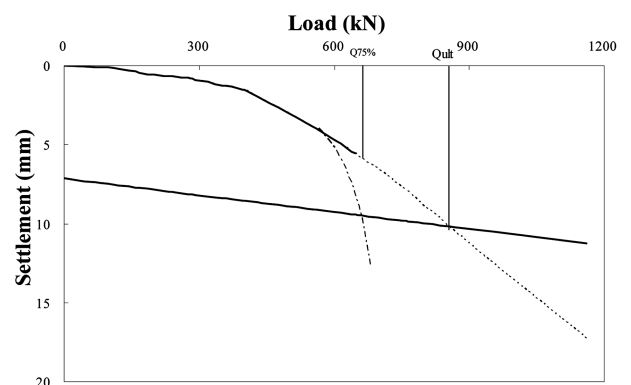
그러나 이차곡선의 경우 하중기준 자료범위 25%, 50%, 그리고 75%에서 예측 극한하중 대 실제 계측 극한하중 비의 평균값은 각각 1.34, 1.12, 그리고 1.15로서 지지력을 실제보다 더 크게 예측하였다. 그리고 하중기준 자료 범위가



(a) 25%



(b) 50%



(c) 75%

그림 2. 계측 하중-침하 곡선의 일부(25%, 50%, 75%)를 이용한 외삽 극한하중 산정 예

증가함에 따라 예측 극한하중과 실제 계측 극한하중의 표준편차와 변동계수는 처음에 감소하였다가 다시 증가하는 결과를 나타내었다.

따라서 쌍곡선 방법이 이차곡선 방법과 비교하여 극한하중을 늘 보수적으로 예측하고 확보 자료범위가 늘어날수록 꾸

표 3. 각 자료 범위에 대한 쌍곡선 방법 및 이차곡선 방법의 파괴하중 예측 결과

분석 방법	말뚝 No.	최대하중 (kN)	계측 극한하중 (Davisson) Q_{ult} (kN)	확보 자료 범위별 외삽 극한하중		
				Q_{25}^1 (kN)(Q_{25}/Q_{ult}) ²⁾	Q_{50} (kN)(Q_{50}/Q_{ult})	Q_{75} (kN)(Q_{75}/Q_{ult})
쌍곡선 방법	1	1,160	860	262 (0.30)	521 (0.61)	659 (0.77)
	2	2,900	890	382 (0.43)	548 (0.62)	672 (0.76)
	3	1,800	1,220	1,040 (0.85)	N.A ³⁾	1,446 (1.19)
	4	3,500	2,620	1,332 (0.51)	2,272 (0.87)	2,424 (0.93)
	5	2,950	2,100	1,095 (0.52)	1,486 (0.71)	1,794 (0.85)
	6	2,800	1,650	543 (0.33)	1,010 (0.61)	1,326 (0.80)
	7	1,450	570	275 (0.48)	422 (0.74)	497 (0.87)
	8	1,660	750	378 (0.50)	479 (0.64)	620 (0.83)
	9	4,000	2,210	2,134 (0.97)	2,355 (1.07)	2,404 (1.09)
	10	19,000	18,800	9,565 (0.51)	12,766 (0.68)	15,433 (0.82)
	평균			0.54	0.73	0.89
	표준편차			0.20	0.14	0.13
	변동계수			0.37	0.20	0.15
분석 방법	말뚝 No.	최대하중 (kN)	계측 극한하중 (Davisson) Q_{ult} (kN)	확보 자료 범위별 외삽 극한하중		
				Q_{25} (kN)(Q_{25}/Q_{ult})	Q_{50} (kN)(Q_{50}/Q_{ult})	Q_{75} (kN)(Q_{75}/Q_{ult})
이차곡선 방법	1	1,160	860	893 (1.04)	1,158 (1.35)	855 (0.99)
	2	2,900	890	1,198 (1.35)	819 (0.92)	837 (0.94)
	3	1,800	1,220	2,934 (2.40)	N.A ³⁾	2,410 (1.98)
	4	3,500	2,620	3,908 (1.49)	3,633 (1.39)	2,907 (1.11)
	5	2,950	2,100	2,653 (1.26)	2,106 (1.00)	2,191 (1.04)
	6	2,800	1,650	2,483 (1.50)	1,814 (1.10)	1,793 (1.09)
	7	1,450	570	691 (1.21)	743 (1.30)	662 (1.16)
	8	1,660	750	758 (1.01)	745 (0.99)	820 (1.09)
	9	4,000	2,210	2,859 (1.29)	2,430 (1.10)	2,396 (1.08)
	10	19,000	18,800	15,420 (0.82)	17,431 (0.93)	18,640 (0.99)
	평균			1.34	1.12	1.15
	표준편차			0.41	0.17	0.28
	변동계수			0.31	0.15	0.25

- 1) : 자료 범위 25%를 이용하여 외삽한 극한하중
 2) : 확보 자료 범위별 외삽극한하중/실제 계측 극한하중의 비
 3) : 쌍곡선 및 이차곡선 함수의 계수 a와 b 결정시 기울기(b)가 음수인 경우

준히 극한하중은 실제 값에 수렴하고 변동계수는 작아지는 경향을 보이므로 쌍곡선 방법이 이차곡선 방법보다 하중-침하 곡선 외삽에 있어서 우수한 것으로 판단하였다.

4. 외삽 극한하중의 신뢰성 평가

4.1 분석방법

쌍곡선 방법을 이용한 외삽 극한하중의 신뢰성을 판단하기 위한 분석과정은 다음과 같다.

- (1) 계측 하중-침하 곡선으로부터 Davisson 방법을 이용하여 구한 실제 계측 극한하중의 25%, 50%, 60%, 70%, 80%, 그리고 90%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만이 확보되었다고 가상하고 각각의 자료에 대하여 쌍곡선 방법으로 외삽한 다음, Davisson 방법으로 극한하중을 새로이 결정한다. 표 4에 각 하중기준 자료 범위(25%, 50%,

60%, 70%, 80%, 그리고 90%)에 대한 외삽 극한하중 및 외삽 극한하중에서의 침하량 그리고 실제 계측 극한하중 및 실제 계측 극한하중에서의 침하량 등을 수록하였다.

- (2) 외삽하기 전에 확보하였다고 가상한 하중-침하 곡선의 최대침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량비와 확보하였다고 가상한 하중-침하 곡선의 최대하중 대 외삽 극한하중 비 각각에 대하여 외삽 극한하중과 실제 계측 극한하중을 비교한다.

4.2 하중비

그림 3은 표 4의 자료를 이용하여 확보하였다고 가상한 하중-침하 곡선의 최대하중 대 외삽 극한하중 비에 따른 외삽 극한하중에 대한 실제 계측 극한하중 비를 도시한 결과이다. 그림 3에서 보는 것처럼 확보한 자료 범위가 증가할수록 실제 계측 극한하중 대 외삽 극한하중 비의 변동폭은

표 4. 각 자료 범위(하중기준)에 대한 외삽 극한하중 및 외삽 극한하중에서의 침하량과 계측값의 비교

말뚝 No.	계측 극한값		자료 범위 25%				자료 범위 50%				자료 범위 60%			
			입력자료 최대값		외삽 극한값		입력자료 최대값		외삽 극한값		입력자료 최대값		외삽 극한값	
	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)
1	860	10.3	222	0.6	262	8.1	431	2.0	521	9.0	518	3.3	579	9.2
2	890	10.0	229	0.6	382	8.4	446	2.7	548	9.0	534	4.1	584	9.1
3	1,220	11.0	300	1.1	1,040	10.6	600	1.6	N.A ¹⁾	N.A ¹⁾	726	2.0	2,044	14.0
4	2,620	15.5	669	1.4	1,332	11.7	1,312	3.5	2,272	14.9	1,550	4.6	2,243	14.8
5	2,100	16.5	531	2.0	1,095	12.1	1,057	5.4	1,486	13.9	1,263	7.1	1,606	14.4
6	1,650	12.8	410	1.0	543	9.0	828	3.3	1,010	10.7	1,006	4.6	1,134	11.1
7	570	8.7	143	0.6	275	8.1	286	1.7	422	8.6	333	2.4	438	8.7
8	750	9.3	191	0.9	378	8.5	375	2.8	479	8.8	455	3.6	531	9.0
9	2,210	17.0	545	3.8	2,134	16.9	1,100	7.8	2,355	17.9	1,300	9.3	2,402	18.1
10	18,800	47.0	4,698	7.0	9,565	40.4	9,371	17.9	12,766	42.8	11,174	22.7	13,711	43.5

말뚝 No.	계측 극한값		자료 범위 70%				자료 범위 80%				자료 범위 90%			
			입력자료 최대값		외삽 극한값		입력자료 최대값		외삽 극한값		입력자료 최대값		외삽 극한값	
	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)	하중 (kN)	침하량 (mm)
1	860	10.3	600	4.7	624	9.4	697	6.5	691	9.6	763	7.9	736	9.8
2	890	10.0	628	5.5	645	9.3	709	6.7	692	9.4	801	8.5	748	9.6
3	1,220	11.0	849	2.8	1,495	12.2	990	45.0	1,314	11.5	1,090	7.8	1,328	11.6
4	2,620	15.5	1,839	6.7	2,303	15.0	2,119	9.4	2,425	15.4	2,358	12.1	2,537	15.8
5	2,100	16.5	1,487	9.1	1,737	15.0	1,676	10.9	1,846	15.5	1,893	13.7	1,915	15.8
6	1,650	12.8	1,173	6.2	1,251	11.5	1,319	7.8	1,377	12.0	1,493	10.1	1,448	12.2
7	570	8.7	400	3.5	488	8.9	461	5.0	524	9.0	509	6.6	532	9.0
8	750	9.3	528	4.7	587	9.2	601	6.0	641	9.4	680	7.6	675	9.5
9	2,210	17.0	1,555	11.2	2,424	18.2	1,780	13.1	2,391	18.0	2,000	15.1	2,356	17.9
10	18,800	47.0	13,388	28.7	14,828	44.3	15,000	33.2	16,075	45.2	16,831	39.2	16,630	45.7

1) : 쌍곡선 함수의 계수 a와 b 결정시 기울기(b)가 음수인 경우

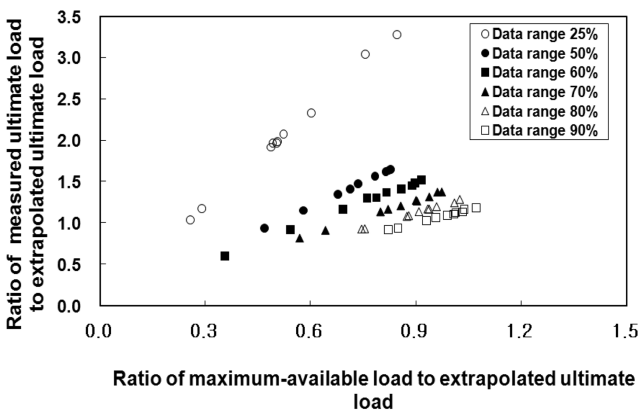


그림 3. 외삽 극한하중에 대한 실제 계측 극한하중 비 대 외삽 극한하중에 대한 확보한 하중-침하 곡선의 최대하중 비

줄어든다. 횡축값의 크기가 증가하더라도 실제 계측 극한하중 대 외삽 극한하중 비가 수렴하는 경향성을 보이지 않는다. 따라서 하중비 기준으로 외삽 결과의 신뢰성을 평가하기는 어려울 것으로 판단하였다.

4.3 침하량비

그림 4는 표 4의 자료를 이용하여 확보하였다고 가정한

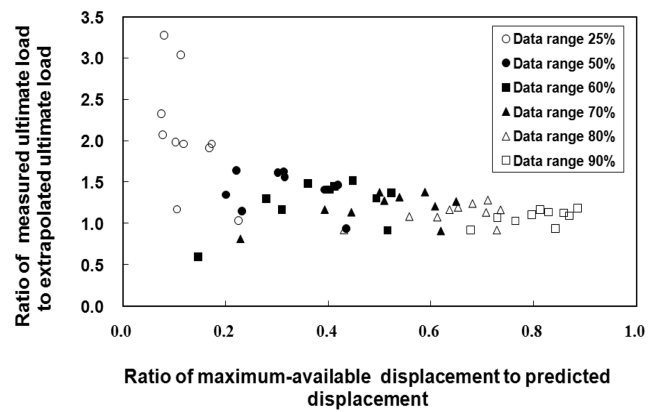


그림 4. 외삽 극한하중에 대한 실제 계측 극한하중 비 대 외삽 극한하중에서의 침하량에 대한 확보한 하중-침하 곡선의 최대 침하량 비

하중-침하 곡선의 최대 침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량 비에 따른 외삽 극한하중에 대한 실제 계측 극한하중 비를 도시한 결과이다. 이 그림에서 보면, 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량 비가 증가함에 따라 극한하중 비의 변동폭이 줄어들 뿐 아니라 확보한 침하량 비(횡축)가 증가함에 따라 극한하

중 비는 1에 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 침하량 비로서 외삽 대 실제 계측 극한하중 비에 대한 통계분석을 수행하였다.

4.4 통계학적 분석 결과

침하량 비로서 산정한 극한하중 비(그림 4)에 대해 통계학적 분석을 수행하였다. 우선 그림 4의 Y값(실제 계측 극한하중/외삽 극한하중)은 비율 자료(data)이기 때문에 일반적으로 정규분포를 따르지 않는 것으로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 회귀분석의 기본가정인 정규분포 가정을 만족시키기 위하여, Y값을 로그 변환한 후 분석에 사용하였다. 또한 X축의 값에 따라 Y축 값의 분산이 일정하지 않고 작아지는 경향이 있으므로, 가중최소제곱법을 사용하여 추세곡선을 적합시켰다. 그림 5는 Y값을 로그 변환한 후의 추세곡선과 95% 신뢰구간을 나타내고 있다. 표 5에서 보면 추세곡선의 절편(양수)과 기울기(음수) 모두 유의한 값을 가짐을 알 수 있으며 이 결과는 그림 5에서 확보한 침하량 비가 증가함에 따라 외삽 극한하중이 실제 계측 극한하중에 수렴하는 것과 일치한다. 확보한 침하량 비와 실제 계측 극한하중 대 외삽 극한하중 비에 대한 통계분석 결과를 표 6에 정리하였다. 표 6에서 보면 침하량 비가 0.2인 경우 극한하중 비의 평균값은 약 1.4이며, 침하량 비가 0.6보다 커지면 극한하중 비의 평균값이 1.2 이내로 수렴한다.

즉, 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝에서, 침하량 비가 0.6이상인 경우 외삽으로 예측한 극한하중은 실제 계측 극한하중보다 평균적으로 20% 이내에서 보수적인 값을 갖는다.

5. 항타말뚝의 외삽 극한하중 신뢰성 분석

본 절에서는 항타말뚝에 대하여 동일한 방법으로 외삽 극한하중의 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 수집된 말뚝의 제원, 시험 최대하중, 그리고 Davisson 방법에 의한 극한하중

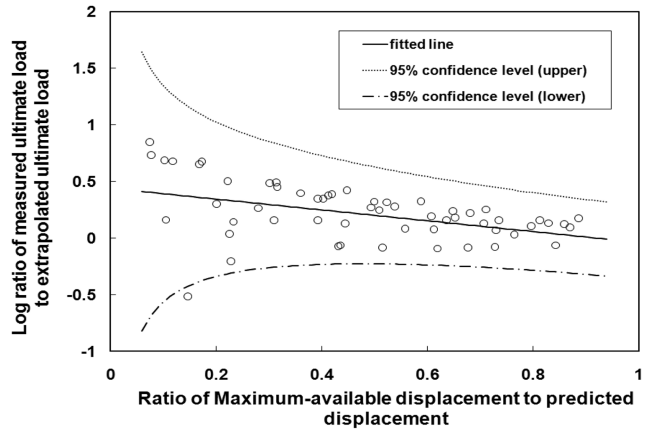


그림 5. 통계학적 분석을 이용한 예측 극한하중의 추세선과 95% 신뢰구간

표 5. 적합된 모형에 대한 분석결과

	추정치	표준오차	t 값	유의확률
절편	0.44736	0.07005	6.386	3.33e-08
기울기	-0.45853	0.11210	-4.090	0.000137

등을 표 7에 나타내었다.

그림 6은 항타말뚝에 대해 현장타설말뚝과 동일한 방법으로 산정한 추세곡선과 95% 신뢰구간을 나타내고있다. 또한 적합된 모형의 분석결과 및 확보한 침하량 비와 실제 계측 극한하중 대 외삽 극한하중 비에 대한 통계분석 결과를 각각 표 8 및 표 9에 정리하였다. 표 8에서 보면 추세곡선의 절편(양수)과 기울기(음수) 모두 유의한 값을 가짐을 알 수 있다. 그리고 표 9에서 보는 것처럼 침하량 비가 0.2인 경우 극한하중 비의 평균값은 약 1.5이며, 침하량 비가 0.6보다 커지면 현장타설말뚝과 유사하게 극한하중 비의 평균값이 1.2 이내로 수렴한다.

결론적으로 침하량 비가 0.6 이상인 경우 외삽으로 예측한 극한하중은 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝과 항타말뚝

표 6. 침하량 비에 대한 극한하중 비의 통계분석 결과

통계분석	침하량 비						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
극한하중 비	1.39	1.33	1.28	1.23	1.18	1.14	1.09

표 7. 검증대상 말뚝의 제원 (한국건설기술연구원, 2007)

말뚝 No.	지름 (mm)	길이 (m)	시험최대하중 (kN)	Davisson 방법에 의한 극한하중 (kN)	비고
1	508	15.5	5,500	5,292	풍화암
2	508	6.5	1,600	960	풍화암
3	508	24	4,380	3,038	풍화암
4	609	30	7,500	6,664	풍화암
5	609	13.1	9,000	7,311	풍화암
6	609	19.8	8,800	7,203	풍화암
7	609	30.3	9,000	7,399	풍화암
8	508	5.7	1,720	1,303	풍화암
9	508	12	3,000	2,323	풍화암
10	508	12	2,667	2,038	풍화암
11	508	12	3,250	2,185	풍화암

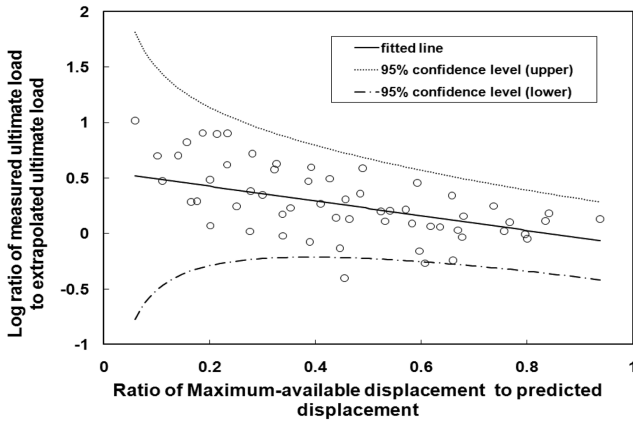


그림 6. 통계학적 분석을 이용한 예측 극한하중의 추세선과 95% 신뢰구간 (항타말뚝)

표 8. 적합된 모형에 대한 분석결과(항타말뚝)

	추정치	표준오차	t 값	유의확률
절편	0.55642	0.08924	6.235	6.28e-08
기울기	-0.66406	0.15050	-4.412	4.70e-05

모두에서 실제 계측 극한하중보다 20% 이내에서 보수적인 값을 나타내었다. 따라서 재하시험 결과로부터 직접 극한하중을 확인할 수 없는 경우, 쌍곡선함수로 외삽하여 극한하중을 산정한 다음 확보한 최대침하량 대 외삽 극한하중에서의 침하량 비가 0.6보다 크면 이 때 얻어진 외삽 극한하중은 평균적으로 실제 극한하중보다 20% 이내에서 보수적인 값을 갖는다.

6. 결 론

이 연구에서는 국내 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝을 대상으로 정재하시험시 극한하중이 확인되지 않은 말뚝의 지지력을 외삽법으로 예측하는 경우, 예측한 극한하중의 신뢰성 판단방법을 제안하였다. 이 연구로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 외삽법을 이용한 극한하중 예측 방법으로 쌍곡선 방법과 이차곡선 방법을 비교한 결과, 늘 보수적으로 극한하중을 예측하고 변동계수가 작은 쌍곡선 방법이 이차곡선 방법에 비하여 우수한 것으로 평가되었다.
2. 쌍곡선 방법으로 극한하중을 예측하는 경우, 예측 극한하중의 신뢰성을 판단하기 위한 방법으로 외삽 극한하중 침하량에 대한 실제 계측 자료의 최대 침하량 비가 0.6이상인 경우 예측 극한하중은 실제 계측 극한하중보다 평균적으로 20% 이내에서 항상 보수적인 값을 나타내었다.
3. 항타말뚝에 대해 동일한 방법으로 예측 극한하중의 신뢰

성을 분석한 결과, 현장타설말뚝 결과와 동일하게 침하량 비가 0.6 이상인 경우 예측 극한하중은 실제 계측 극한하중보다 평균적으로 약 20% 이내에서 보수적인 값을 나타내었다.

4. 연구 결과를 종합하여 볼 때, 정재하시험 수행 시 극한하중에 도달하지 못하는 경우 이 논문에서 제안한 침하량 비 분석을 통하여 외삽하여 구하는 극한하중의 신뢰성을 판단할 수 있다고 생각된다. 다만, 제한된 자료로부터 도출된 결론이므로 기준 침하량 비율 등 본 논문에서 제시한 정량적인 값들에 대해서는 분석 자료가 늘어날 때 마다 꾸준히 검증 작업이 이루어져야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부 2005 건설기술기반구축 연구과제 “LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구” 및 서울대학교 SIR BK21 (안전하고 지속가능한 사회기반건설) 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

권오성(2004) **암반의 풍화도가 암반근입말뚝의 지지거동에 미치는 영향**. 박사학위논문, 서울대학교

김정환(1997) **편미암에 근입된 현장타설말뚝의 지지거동 분석**. 박사학위논문, 서울대학교

전경수(2000) **풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 연직 및 횡방향 지지거동 분석**. 박사학위논문, 서울대학교

정성준, 김성렬, 소진만, 김명모(2007) **풍화암에 근입된 현장타설말뚝 지지력 공식의 신뢰성 분석**. 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제23권 제2호, pp. 85-92.

천병식, 조천환(1997) **항타 및 매입말뚝의 하중-침하 침하량 곡선의 분석**. 한국지반공학회는논문집, 한국지반공학회, 제13권 제6호, pp. 61-70.

한국건설기술연구원(2007) **LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구**, 건설교통부 건설교통 R&D 정책 · 인프라 사업 2차년도 연구보고서, 건설교통부.

한국건설기술연구원(2008) **LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구**, 국토해양부 건설교통 R&D 정책 · 인프라 사업 3차년도 최종 연구보고서, 국토해양부

Davison, M. (1972) *High capacity piles*, In *Proceedings, Soil Mechanics Lecture Series on Innovation in Foundation Construction*, ASCE, Illinois Section, Chicago, IL, pp. 81-112.

Paikowsky, S.G. and Tolosko, T.A. (1999) *Extrapolation of Pile Capacity from non-failed load tests*, Federal Highway Administration, Report No. FHWA-RD-99-170, Washington, D.C.

(접수일: 2009.3.11/심사일: 2009.4.7/심사완료일: 2009.4.22)

표 9. 침하량 비에 대한 극한하중 비의 통계분석 결과(항타말뚝)

통계분석	침하량 비						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
극한하중 비	1.53	1.43	1.34	1.25	1.17	1.10	1.03