

## 풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 외삽 파괴하중 신뢰성 분석 Reliability Evaluation of Extrapolated Failure Load of Drilled Shafts Embedded in Weathered Rock

정성준<sup>1)</sup>, Sung-Jun Jung, 이상인<sup>2)</sup>, Sang-Inn Lee, 전종우<sup>3)</sup>, Jong-Woo Jeon, 김명모<sup>4)</sup>, Myoung-Mo Kim

<sup>1)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 박사과정, Graduate student, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 통계학과 박사과정, Graduate student, Dept. of Statistics, Seoul National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 통계학과 교수, Professor, Dept. of Statistics, Seoul National University

<sup>4)</sup> 서울대학교 건설환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Seoul National University

**SYNOPSIS :** 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 failure load of the pile is attained. If a reliable failure 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 standard for judging the reliability of the failure load of piles that is obtained from extrapolated load test data. To this aim, eleven 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 failure load was re-determined for each extrapolated data by the ASCE 20-96 method (1997). Statistical analysis was performed on the reliability of the re-evaluated failure loads. The results showed that if the ratio of the maximum-available displacement to the failure-load displacement exceeds 0.6, the extrapolated failure load may be regarded as reliable, having less than a conservative 20% error on average. The applicability of the proposed standard of judgment was also verified with static load test data of driven piles.

**Keywords :** drilled shafts, pile load tests, prediction, failure loads

### 1. 서론

최근 대형 구조물들의 큰 하중을 지지하기 위해 하부 기초구조물 중 대구경 현장타설말뚝의 사용이 증가하고 있다. 대구경 현장타설말뚝은 소구경 기성말뚝과 달리 대부분 암반에 선단 지지되므로 지지력이 매우 크다. 현장타설말뚝의 지지력을 정밀히 산정하기 위해서는 말뚝 근입부 암반의 공학적 특성을 파악해야 하지만 암 시료채취와 암반상태 평가 등이 어렵고 실무적으로 잘 이루어지지 않기 때문에 많은 가정 사항을 통하여 지지력을 산정하고 있다. 이러한 경우 여러 가지 이론적 또는 경험적 지지력 공식으로 산정된 지지력 값은 신뢰성이 크게 떨어진다.

일반적으로 말뚝의 지지력을 예측하는 가장 정확한 방법은 실제 말뚝두부에 하중을 재하하여 지지력

을 확인하는 정재하시험을 수행하는 것이다. 그러나 풍화된 암에 근입된 현장타설말뚝은 지지력이 매우 크므로 많은 경우에 설계하중만을 검증한 다음 파괴하중을 확인하기 전에 재하시험을 종료한다. 그러나 만일 미완성 하중-침하 곡선으로부터 신뢰할 수 있는 파괴하중의 예측이 가능하다면 설계의 질적인 향상뿐만 아니라 경제적인 면에서도 크게 기여를 할 수 있을 것이라고 생각된다.

본 연구에서는 파괴하중을 얻지 못한 말뚝 재하시험의 하중-침하 곡선으로부터 외삽법을 이용하여 추정된 파괴하중의 신뢰성 판단방법을 제안하고자 한다. 이를 위해 풍화된 암반에 지지되고 파괴하중이 얻어진 3개 현장의 총 11본의 현장타설말뚝의 재하시험 자료를 수집하여 연구를 수행하였다. 본 재하시험 자료의 파괴하중은 ASCE 20-96 (1997)에서 제안한 방법을 이용하여 산정하였다. 실제 파괴하중이 얻어진 재하시험 결과를 대상으로 각 재하시험의 계측 파괴하중까지의 하중-침하 곡선 자료를 100%로 보았을 때, 의도적으로 극한하중의 25%~90%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만을 이용하여 외삽한 후 다시 ASCE 20-96 방법으로 외삽 파괴하중을 결정하였다. 그리고 외삽법으로 얻어진 예측 파괴하중의 신뢰성 판단을 위한 기준을 마련하기 위하여 확보한 자료의 최대하중 대 외삽 파괴하중 비와 확보한 자료의 최대침하량 대 외삽 파괴하중에서의 침하량 비를 각각 달리하여 외삽 파괴하중과 실제 파괴하중을 통계학적으로 비교 분석하였다. 끝으로 문헌에서 얻은 항타말뚝 자료에 대하여 본 연구에서 얻은 결과의 적용성을 평가하였다.

## 2. 현장타설말뚝 재하시험 자료수집

본 연구에서는 풍화된 암반에 지지되고 파괴하중이 얻어진 3개 현장의 총 11본의 현장타설말뚝의 재하시험 자료를 수집하여 연구를 수행하였다. 본 재하시험 자료의 파괴하중은 여러 지지력 결정 방법과 비교하여 가장 보수적이면서 편차가 적은 ASCE 20-96 방법(1997)을 이용하여 산정하였다 (한국건설기술연구원, 2008). 표 1에 재하시험 자료들의 말뚝제원, 암 풍화상태, 최대 재하하중 그리고 ASCE 20-96 방법(1997)으로 구한 파괴하중 등을 정리하였다. 말뚝 지름은 말뚝 9본이 400mm이고 나머지 2본이 1,000mm 이다. 그리고 말뚝선단의 암반 근입깊이는 0.2~6m이다. 또한 각 말뚝들의 파괴하중은 직경 400mm의 경우 620kN~2,700kN이고, 직경 1,000mm 말뚝의 경우 10,480kN~12,500kN이었다.

표 1. 연구대상 말뚝의 제원

현장	말뚝 No.	지름 (mm)	암 풍화 상태 <sup>1)</sup>	길이 (m)	암반 근입깊이 (m)	시험최대하중 (kN)	ASCE 20-96 방법에 의한 파괴하중 (kN)	출처
WR1	1	400	MW	10.4	0.36	1,160	890	김정환 (1997)
	2	400	MW	9.7	0.2	2,900	910	
	3	400	MW	9.8	0.48	1,800	1,240	
	4	400	MW	10.0	0.76	3,500	2,700	
WR2	5	400	HW	13.2	6.0	2,950	2,120	전경수 (2000)
	6	400	CW	10.2	3.0	2,800	1,670	
	7	400	CW	10.2	3.0	1,450	620	
	8	400	CW	10.2	3.0	1,660	800	
	9	400	HW	13.3	6.0	4,000	2,300	
WR4	10	1,000	HW	13.5	2.0	14,000	12,500	권오성 (2004)
	11	1,000	HW	13.5	2.2	19,000	10,480	

<sup>1)</sup> MW = Moderately Weathered, HW=Highly Weathered, CW=Completely Weathered

### 3. 외삽법을 이용한 파괴하중 산정

#### 3.1 외삽방법

본 연구에서는 미완성 하중-침하 곡선의 외삽을 위하여 Paikowsky 등(1999)의 연구결과를 바탕으로 쌍곡선 방법을 사용하였으며, 쌍곡선 방법 적용 시, 외삽 결과의 신뢰성을 높이기 위하여 회귀곡선의 상관계수( $R^2$ )가 0.8 이상이 될 때까지 초기자료(침하량 0에 가까운 자료)를 제거한 후 계수 a, b를 결정하였다.

#### 3.2 분석절차

파괴하중이 얻어진 총 11본의 재하시험 자료(표 1)에 대하여 쌍곡선 방법에 의한 외삽 파괴하중의 신뢰성을 판단하기 위한 분석과정은 다음과 같다.

- (1) 계측 하중-침하 곡선으로부터 ASCE 20-96 방법을 이용하여 구한 실제 계측 파괴하중의 25%, 50%, 60%, 70%, 80%, 그리고 90%에 해당하는 하중-침하 곡선 자료만이 확보되었다고 가정하고 각각의 자료에 대하여 쌍곡선 방법으로 외삽한 다음, ASCE 20-96 방법으로 파괴하중을 새로이 결정한다. 그림 1에 확보 자료 범위가 다른 하중-침하 곡선을 외삽한 다음 파괴하중을 구하는 예를 도시하였다.

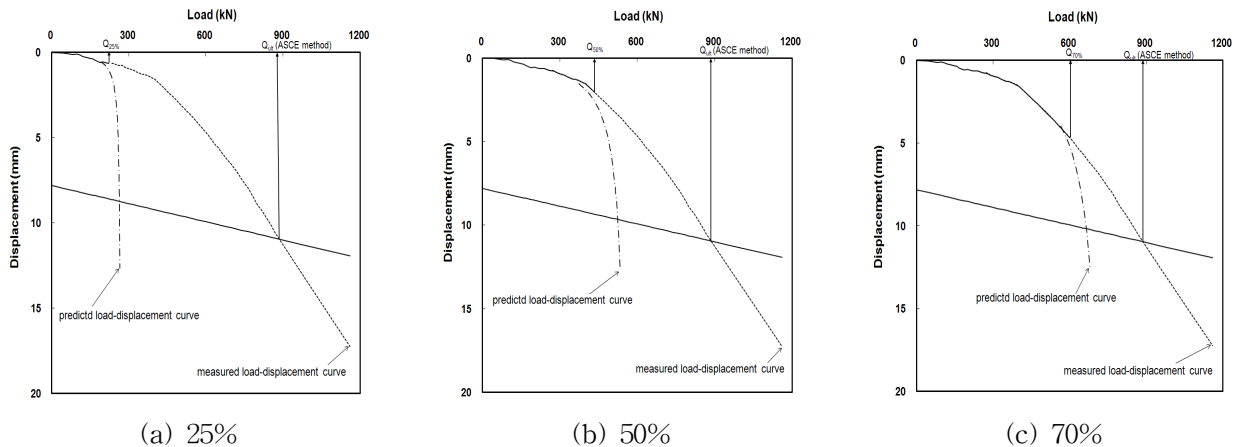


그림 1. 계측 하중-침하 곡선의 일부(25%, 50%, 70%)를 이용한 파괴하중 산정 예

표 2에 각 하중기준 자료 범위(25%, 50%, 60%, 70%, 80%, 그리고 90%)에 대한 외삽 파괴하중 및 외삽 파괴하중에서의 침하량 그리고 실제 계측 파괴하중 및 실제 계측 파괴하중에서의 침하량 등을 정리하였다.

표 2. 각 자료 범위(하중기준)에 대한 외삽 파괴하중 및 외삽 파괴하중에서의 침하량과 각각의 계측값

말뚝 No.	계측 파괴값 (ASCE 방법)		확보 자료 범위 25%				확보 자료 범위 50%				확보 자료 범위 60%			
			입력자료 최대값		외삽 파괴값		입력자료 최대값		외삽 파괴값		입력자료 최대값		외삽 파괴값	
	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	890	10.3	222	0.6	263	8.7	438	2.1	536	9.7	518	3.3	583	9.9
2	910	10	205	0.4	684	10.1	446	2.7	552	9.6	534	4.1	589	9.8
3	1,240	11	300	1.1	1,059	11.4	600	1.6	N.A	N.A	726	2	2,077	14.8
4	2,700	15.5	669	1.4	1,342	12.4	1,350	3.6	2,268	15.5	1,601	4.9	2,275	15.6
5	2,120	16.5	508	1.7	3,091	21.8	1,057	5.4	1,509	14.6	1,263	7.1	1,633	15.2
6	1,670	12.8	410	1	545	9.7	828	3.3	1,019	11.4	960	4.2	1,118	11.7
7	620	10.5	153	0.7	271	8.8	304	2	432	9.3	357	2.8	450	9.4
8	800	10.6	195	0.9	376	9.1	400	3.1	508	9.6	480	3.9	557	9.8
9	2,300	17.5	570	4	2,351	18.5	1,139	8.1	2,515	19.3	1,364	9.8	2,572	19.5
10	12,500	23.44	3,107	3.8	9,107	20.6	6,193	8.9	10,816	21.8	7,382	11	11,491	22.3
11	10,480	21	2,539	3	6,596	18.7	5,190	8	7,943	19.7	6,256	10.4	8,428	20

말뚝 No.	계측 파괴값 (ASCE 방법)		확보 자료 범위 70%				확보 자료 범위 80%				확보 자료 범위 90%			
			입력자료 최대값		외삽 파괴값		입력자료 최대값		외삽 파괴값		입력자료 최대값		외삽 파괴값	
	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	890	10.3	614	4.9	641	10.1	697	6.5	697	10.3	798	8.9	759	10.5
2	910	10	628	5.5	651	10	723	7.1	709	10.2	817	8.7	767	10.4
3	1,240	11	849	2.8	1,514	12.9	990	5	1,329	12.3	1,115	8.5	1,363	12.4
4	2,700	15.5	1,878	7	2,332	15.8	2,119	9.4	2,453	16.2	2,416	12.9	2,575	16.6
5	2,120	16.5	1,439	8.6	1,743	15.7	1,676	10.9	1,882	16.3	1,893	13.7	1,953	16.6
6	1,670	12.8	1,126	5.7	1,237	12.1	1,319	7.8	1,394	12.7	1,493	10.1	1,467	12.9
7	620	10.5	430	4.2	506	9.6	491	5.9	537	9.7	556	8.2	555	9.7
8	800	10.6	560	5.2	625	10	638	6.7	669	10.1	720	8.5	711	10.3
9	2,300	17.5	1,600	11.7	2,591	19.6	1,800	13.3	2,555	19.4	2,018	15.2	2,515	19.3
10	12,500	23.44	8,636	13.3	11,973	22.7	10,000	16.7	12,111	22.8	11,130	19.7	12,149	22.8
11	10,480	21	7,321	12.7	8,776	20.3	8,141	14.7	9,075	20.5	9,371	17.9	9,612	20.9

<sup>1)</sup> : 상수 a와 b 결정시 기울기(b)가 음수인 경우

(2) 외삽하기 전에 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대하중 대 외삽 파괴하중비와 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대침하량 대 외삽 파괴하중에서의 침하량비 각각에 대하여 외삽 파괴하중과 실제 계측 파괴하중을 비교한다.

하중 비와 침하량 비를 이용한 파괴하중 비교 결과를 다음에 기술하였다.

### 3.3 하중 비

그림 2는 표 2의 자료를 이용하여 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대하중 대 외삽 파괴하중비에 따른 외삽 파괴하중에 대한 실제 계측 파괴하중 비를 도시한 결과이다. 그림 2에서 보는 것처럼 확보한 자료 범위가 증가할수록 실제 파괴하중 대 외삽 파괴하중 비의 변동폭은 줄어들으나 횡축 값의 크

기가 증가하더라도 실제 파괴하중 대 외삽 파괴하중 비가 수렴하는 경향성을 보이지 않는다. 따라서 하중 비 기준으로 외삽 결과의 신뢰성을 평가하기는 어려울 것으로 판단하였다.

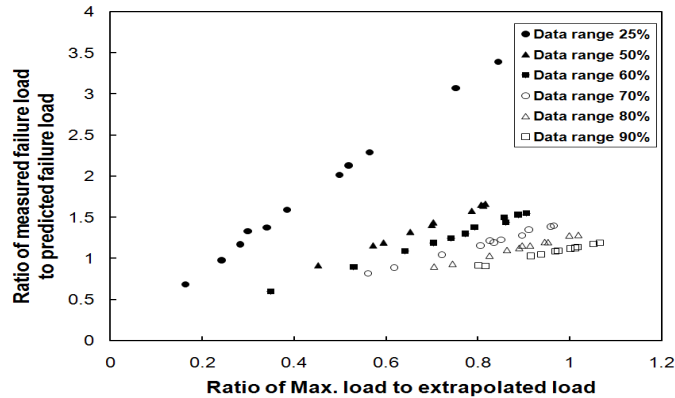


그림 2. 외삽 파괴하중에 대한 실제 계측 파괴하중 비 vs. 외삽 파괴하중에 대한 확보한 하중-침하 곡선의 최대하중 비

### 3.4 침하량 비

그림 3은 표 2의 자료를 이용하여 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대 침하량 대 외삽 파괴하중에서의 침하량 비에 따른 외삽 파괴하중에 대한 실제 계측 파괴하중 비를 도시한 결과이다. 이 그림에서 보면, 확보하였다고 가정한 하중-침하 곡선의 최대침하량 대 외삽 파괴하중에서의 침하량 비가 증가함에 따라 파괴하중 비의 변동폭이 줄어들 뿐 아니라 확보한 침하량 비(횡축)가 증가함에 따라 파괴하중 비는 1에 수렴하는 것을 알 수 있다. 따라서 침하량 비로서 외삽 대 실제 계측 파괴하중 비에 대한 통계분석을 수행하였다.

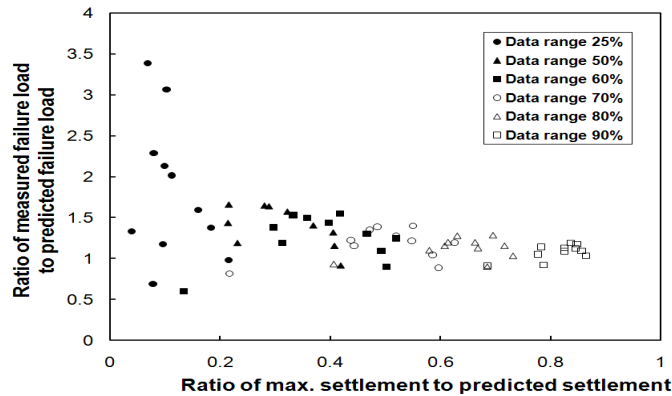


그림 3. 외삽 파괴하중에 대한 실제 계측 파괴하중 비 vs. 외삽 파괴하중에서의 침하량에 대한 확보한 하중-침하 곡선의 최대 침하량 비

### 3.5 통계학적 분석 결과

침하량 비로 산정한 파괴하중 비(그림 3)에 대해 통계학적 분석을 수행하였다. 우선 그림 3의 Y값(실제 계측 파괴하중/외삽 파괴하중)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 작아

지는 경향이 있으므로, 가중최소제곱법을 사용하여 추세곡선을 적합시켰다. 그림 4는 Y값을 로그 변환한 후의 추세곡선과 95% 신뢰구간을 나타내고 있다. 표 3에서 보면 추세곡선의 절편(양수)과 기울기(음수) 모두 유의한 값을 가짐을 알 수 있으며 (일반적인 유의확률 기준:0.05) 이 결과는 그림 4에서 확보한 침하량 비가 증가함에 따라 외삽 파괴하중이 실제 파괴하중에 수렴하는 것과 일치한다. 확보한 침하량 비와 실제 계측 파괴하중 대 외삽 파괴하중 비에 대한 통계분석 결과를 표 4에 정리하였다. 표 4에서 보면 침하량 비가 0.2인 경우 파괴하중 비의 평균값은 약 1.3이며, 침하량 비가 0.6보다 커지면 파괴하중 비의 평균값이 1.2 이내로 수렴한다.

즉, 풍화된 암반에 근입된 현장타설말뚝에서, 침하량 비가 0.6이상인 경우 외삽으로 예측한 파괴하중은 실제 계측 파괴하중보다 평균적으로 20% 이내에서 보수적인 값을 갖는다고 볼 수 있다.

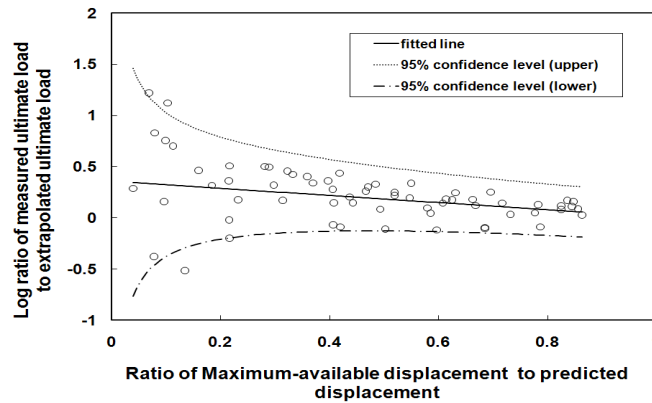


그림 4. 통계학적 분석을 이용한 예측 파괴하중의 평가

표 3. 적합된 모형에 대한 분석결과

	추정치	표준오차	t 값	유의확률
절편	0.35773	0.06248	5.725	3.37e-07
기울기	-0.34984	0.10014	-3.493	0.000894

표 4. 침하량 비에 대한 파괴하중 비의 통계분석 결과

통계분석	침하량 비						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
파괴하중 비	1.33	1.29	1.24	1.20	1.16	1.12	1.08

#### 4. 향타말뚝의 외삽 파괴하중 신뢰성 분석

본 절에서는 향타말뚝에 대하여 동일한 방법으로 외삽 파괴하중의 신뢰성을 분석하였다. 이를 위해 수집된 말뚝의 제원, 시험 최대하중, 그리고 ASCE 20-96 방법에 의한 파괴하중 등을 표 5에 나타내었다.

표 5. 검증대상 말뚝의 제원 (한국건설기술연구원, 2008)

말뚝 No.	지름 (mm)	길이 (m)	시험최대하중 (kN)	ASCE 20-96 방법에 의한 파괴하중 (kN)	비고
1	508	6.5	1,600	1,058	붕화암
2	508	12	3,000	2,421	붕화암
3	508	12	2,667	2,107	붕화암
4	508	12	3,250	2,450	붕화암
5	508	30	4,380	3,410	붕화암
6	609	30	7,500	6,889	붕화암
7	609	13.1	9,000	7,840	붕화암
8	609	19.8	8,800	7,678	붕화암
9	609	30.3	9,000	7,948	붕화암
10	508	5.7	1,720	1,385	붕화암

그림 5는 항타말뚝에 대해 현장타설말뚝과 동일한 방법으로 산정한 추세곡선과 95% 신뢰구간을 나타내고 있다. 또한 적합된 모형의 분석결과 및 확보한 침하량 비와 실제 파괴하중 대 외삽 파괴하중 비에 대한 통계분석 결과를 각각 표 6 및 표 7에 정리하였다. 표 6에서 보면 추세곡선의 절편(양수)과 기울기(음수) 모두 유의한 값을 가짐을 알 수 있으며 (일반적인 유의확률 기준:0.05) 이 결과는 현장타설말뚝과 동일하게 그림 5에서 확보한 침하량 비가 증가함에 따라 외삽 파괴하중이 실제 파괴하중에 수렴하는 것과 일치한다. 표 7에서 보면 침하량 비가 0.2인 경우 파괴하중 비의 평균값은 약 1.3이며, 침하량 비가 0.6보다 커지면 현장타설말뚝과 유사하게 파괴하중 비의 평균값이 1.2 이내로 수렴한다.

결론적으로 침하량 비가 0.6이상인 경우 외삽으로 예측한 파괴하중은 붕화된 암반에 근입된 현장타설말뚝과 항타말뚝 모두에서 실제 계측 파괴하중보다 20% 이내에서 보수적인 값을 나타내었다. 따라서 재하시험 결과로부터 직접 파괴하중을 확인할 수 없는 경우, 쌍곡선함수로 외삽 한 다음 확보한 최대침하량 대 외삽 파괴하중에서의 침하량 비가 0.6보다 크면 이 때 얻어진 외삽 파괴하중은 실제 설계에 사용할 수 있다고 판단된다.

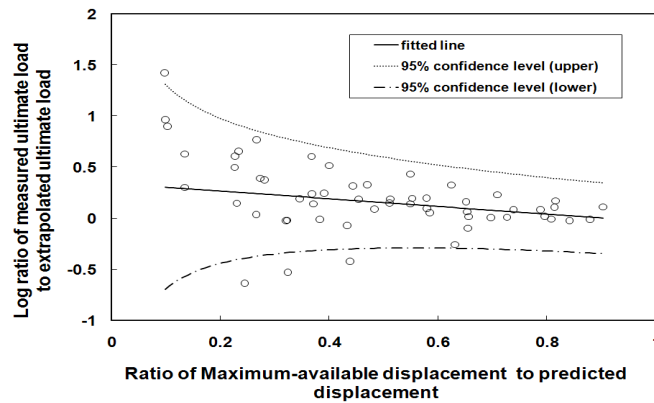


그림 5. 통계학적 분석을 이용한 예측 파괴하중의 평가 (항타말뚝)

표 6. 적합된 모형에 대한 분석결과 (항타말뚝)

	추정치	표준오차	t 값	유의확률
절편	0.34291	0.09267	3.700	0.000513
기울기	-0.37919	0.15007	-2.527	0.014532

표 7. 침하량 비에 대한 파괴하중 비의 통계분석 결과 (항타말뚝)

통계분석	침하량 비						
	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8
파괴하중 비	1.31	1.26	1.21	1.17	1.12	1.08	1.04

## 5. 결 론

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

1. 쌍곡선 방법으로 파괴하중을 예측하는 경우, 예측 파괴하중의 신뢰성을 판단하기 위한 방법으로 외삽 파괴하중 침하량에 대한 실제 계측 자료의 최대 침하량 비가 0.6이상인 경우 예측 파괴하중은 실제 계측 파괴하중보다 평균적으로 20% 이내에서 항상 보수적인 값을 나타내었다.
2. 항타말뚝에 대해 동일한 방법으로 예측 파괴하중의 신뢰성을 분석한 결과, 현장타설말뚝 결과와 동일하게 침하량 비가 0.6이상인 경우 예측 파괴하중은 실제 계측 파괴하중보다 평균적으로 약 20% 이내에서 보수적인 값을 나타내었다.
3. 연구 결과를 종합하여 볼 때, 정재하시험 수행 시 파괴하중에 도달하지 못하는 경우 이 연구에서 제안한 침하량비 분석을 통하여 외삽 파괴하중의 신뢰성을 판단할 수 있다고 생각된다. 다만, 제한된 자료로부터 도출된 결론이므로 기준 침하량 비율 등 본 논문에 제시된 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

1. 권오성(2004), **암반의 풍화도가 암반근입말뚝의 지지거동에 미치는 영향**, 박사학위논문, 서울대학교
2. 김정환(1997), **편마암에 근입된 현장타설말뚝의 지지거동 분석**. 박사학위논문, 서울대학교
3. 전경수(2000), **풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 연직 및 횡방향 지지거동 분석**, 박사학위논문, 서울대학교
4. 한국건설기술연구원 (2008), LRFD 기초구조물 설계를 위한 저항계수 결정 연구, 건설교통부 05 건설기술기반구축사업 3차년도 연차실적 및 계획서, 건설교통부
5. ASCE (1997), *Standard Guidelines for the Design and Installation of Pile Foundations*, ASCE 20-96, ASCE
6. 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.