

말뚝의 정역학적 지지력 공식의 적용성에 대한 고찰

차경호 / 토목기술부 과장, **황세환** / 토목기술부 사원

표 준관입저항치 N 값을 이용하여 말뚝의 지지력을 직접 구하는 경험식은 Meyerhof에 의해 제안되어 적용의 간편함 때문에 많이 사용되어 왔으며, 이 공식을 근간으로 각국의 실정에 부합하는 시방기준을 설정해서 사용하고 있다. 현재 국내의 거의 모든 설계에서도 Meyerhof의 공식이 사용되고 있으나 정재하시험결과와의 비교를 통해 기준에 제안된 공식의 신뢰성에 대한 비교와 보정 등에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서 본고에서는 풍화토 지반에 설치된 항타말뚝에 대한 정재하시험 결과를 5가지 시방기준을 적용하여 예측한 지지력과 비교 분석을 통해 각 기준의 예측신뢰성에 대해 고찰하였다.

말뚝의 연직지지력

말뚝의 극한 지지력은 다음 식과 같이 주면
마찰력과 선단지지력으로 구성되며, 이 계산
에서는 두가지 요소의 저항력이 동시에 유발
된다는 가정이 사용되고 있다.

$$Qu = Qs + Qp = fs \cdot As + g_0 \cdot Ap$$

여기서, Q_s 와 Q_p : 말뚝의 주면마찰력과
서단지지력

fs 와 oo : 담워주면마찰력과 담워서단지지력

As 와 Ap : 말뚝의 주면적과 선단지지면적

말뚝의 지지력을 결정하는 방법에는 실내

시험으로부터 말뚝이 관입된 지반의 강도정수를 결정하여 이론식으로부터 구하는 방법과 N 값을 이용하여 경험식으로 직접 구하는 방법이 있다. 말뚝의 지지력을 결정하기 위한 이론적인 접근은 1930년대 중반 Caquot 와 Buisman에 의해 시작되었다. 이들은 Prandtl과 Reissner에 의해 이루어진 관입파괴에 대한 고전적인 연구를 보다 심화하였고 계속해서 여러 연구자에 의해 다른 형태의 가정된 파괴 패턴에 대한 몇 가지의 다른 이론식이 제시되어 왔다.

Meyerhof는 실험적 방법으로부터 표준관 입저항치와 말뚝의 지지력과의 경험적인 관계식을 제안하였고 각국은 이 공식을 근간으로 하여 자기 실정에 부합하는 시방기준을 설정하여 사용하고 있다. 국내의 경우, 적용의 간편성때문에 Meyerhof의 경험식이 대부분의 설계에 사용되고 있다. (표 1)은 본 비교검토에 사용될 경험식들의 요약이다.

재하시험 결과와 예측지지력의 비교분석

1. 비교 검토에 사용된 재하시학

16개의 PC(Pretensioned Concrete Pile) 말뚝 및 PHC(Pretensioned Spun High Strength Concrete Pile) 말뚝에 대한 정재화 시험 결과를 근거로 하여 정역학적 지지력 공식들의 신뢰성에 대한 검토를 수행하였다. 말뚝의 지름은 350mm에서 500mm의 범위에

(표 1) 표준관입시험결과를 이용한 말뚝의 지지력 산정식

구분	선단지지력 (qo)	주면마찰력(fs)		비 고
		사질토	점성토	
도로교 시방서	$(10+4(L/D))N \leq 30N$	$0.2 N \leq 10$	$N \leq 15$	$N = (N_1 + N_2)/2 \leq 40$ $N_1 =$ 선단아래 1D 깊이의 평균 N값 $N_2 =$ 선단상부 4D 깊이의 평균 N값
구조물기초설계기준	$4(L/D)N$	$0.2 N \leq 10$	-	말뚝선단의 N 값
일본건축기초설계기준	$30 N$	$0.2 N \leq 10$	-	$N = (N_1 + N_2)/2 \leq 50$
일본항만설계기준	$40 N$	$0.2 N \leq 10$	-	$N = (N_3 + N_4)/2$ $N_3 =$ 선단아래 1D 깊이의 평균 N값 $N_4 =$ 선단상부 4D 깊이의 평균 N값
일본철도설계기준	$30 N$	$K\sigma \tan \delta$	$K\sigma \tan \delta$	말뚝선단의 N 값 ≤ 50

도로교 시방서의 경우
근입비가 5 이상이면
말뚝의 선단 지지력이
충분히 발휘되는 것으
로 규정되어 있는 것
을 고려할 때 구조물
기초설계 기준식은 근
입비의 영향을 크게
평가한다

있으며 말뚝이 설치된 지반은 사질토의 특성
이 우세한 다층토로 말뚝의 선단은 대부분 풍
화토와 풍화암에 지지되어 있다.

2. 경험식을 이용한 지지력 산정 결과

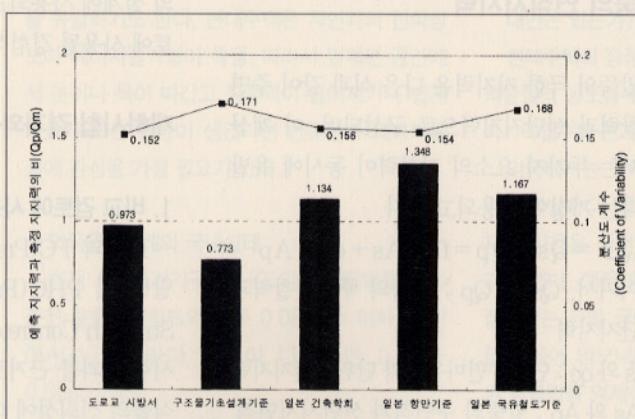
5가지의 경험식으로 구한 타입말뚝의 지지
력에 대한 예측 신뢰도는 (그림 1)에 나타나
있다. 이 그림에서 막대그래프는 예측지지력
과 측정값의 비의 평균을 나타내고 있는데 이
값은 예측의 정확도(Accuracy)를 의미하는
것으로 도로교 시방서의 기준을 적용하였을
때 0.973으로 안전측에서 1.0에 근접하고 있
다. 선그래프는 분산도 계수를 나타내고 있으
며 이 값은 예측의 정밀도(Precision)를 의미
하는 수치이다. 도로교 시방서의 기준식을 사
용한 경우가 0.152로 가장 작은 분산정도를

보였고 구조물기초설계기준의 경우는 가장
큰 분산을 보이고 있다. 구조물기초설계 기준
식의 경우 말뚝의 근입비(Lb/D)에 따라 단위
선단지지력의 범위가 $4N$ 에서 $40N$ 까지 변하
는데 근입비가 큰 경우 말뚝의 지지력을 과대
평가하고 있고 근입비가 작을 경우는 과소평
가하고 있다. 도로교 시방서의 경우 근입비가
5 이상이면 말뚝의 선단 지지력이 충분히 발
휘되는 것으로 규정되어 있는 것을 고려할 때
구조물기초설계 기준식은 근입비의 영향을
크게 평가하는 것으로 판단된다.

일본건축기초설계기준, 일본항만기준 그리
고 일본국유철도 기준은 근입비에 대한 규정
이 없으나 각 제안식 나름대로 근입비의 영향
을 고려한 보정을 하고 있다.

일본항만기준의 경우 단위 선단지지력을
 $40Nb$ 을 사용하나, 말뚝선
단의 상부 $10B$ 구간의 평
균 N치인 N_1 과 말뚝 하부
 $2B$ 구간의 N치의 평균
 N_2 의 평균값을 선단의
 Nb 로 적용하고 있다. 그
럼에도 1.35배 정도로 과
대한 예측 결과를 보이는
것으로 볼 때 $40N$ 보다 작
은 값을 적용하는 것이 합
리적이라고 판단된다.

(그림 2)의 표준정규분

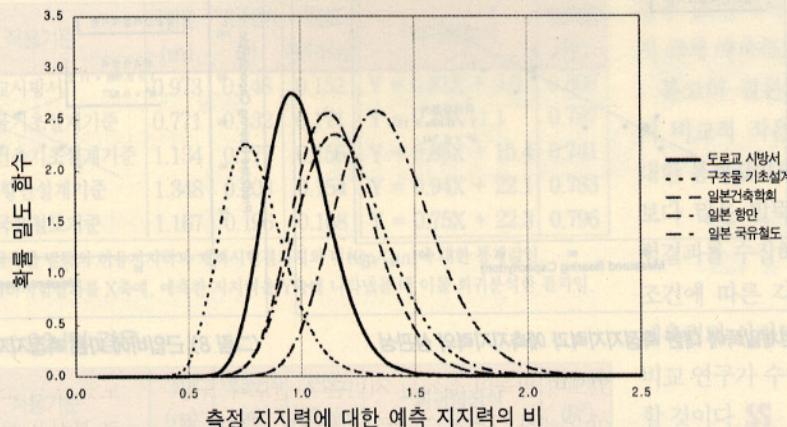


(그림 1) 타입말뚝에 대한 경험식의 예측신뢰성

포곡선에서도 도로교 시방서의 경우가 측정 지지력과 예측지지력의 비가 안전측으로 1.0

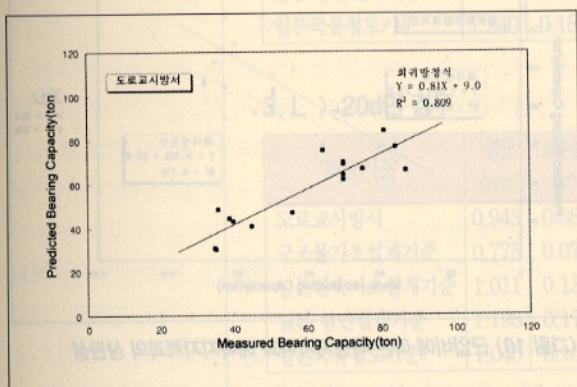
에 근접하고 분포의 폭이 좁아서 상대적으로 신뢰성있는 예측을 하고 있음을 알 수 있다.

1) 전체대상 말뚝 (N=16개)

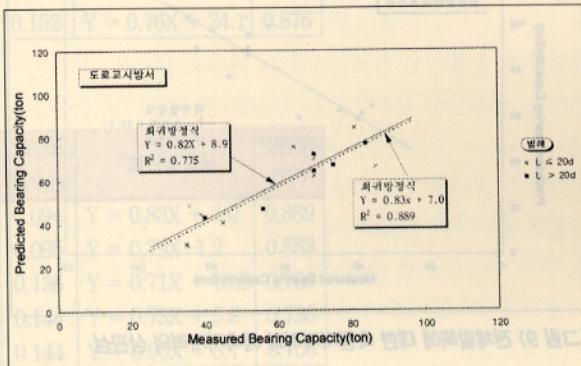


(그림 2) 경험식의 말뚝지지력 예측에 대한 정규분포곡선

1) 도로교 시방서

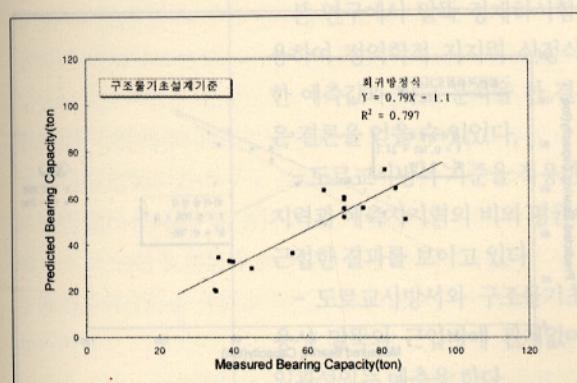


(그림 3) 전체말뚝에 대한 측정지지력과 예측지지력의 상관성

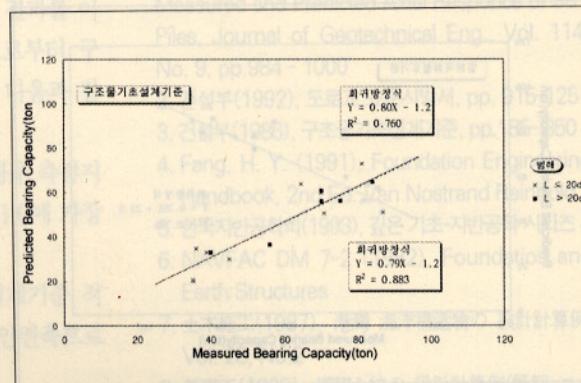


(그림 4) 근입비에 따른 측정지지력과 예측지지력과의 상관성

2) 구조물 기초 설계기준

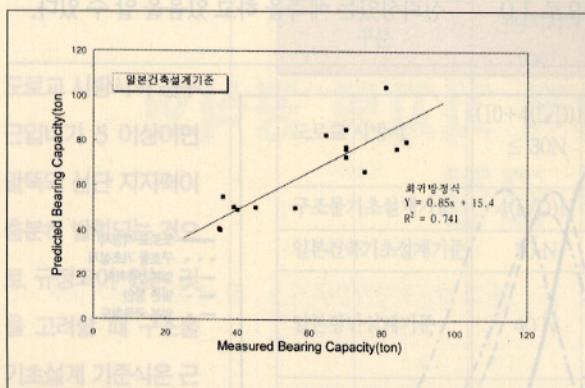


(그림 5) 전체말뚝에 대한 측정지지력과 예측지지력의 상관성

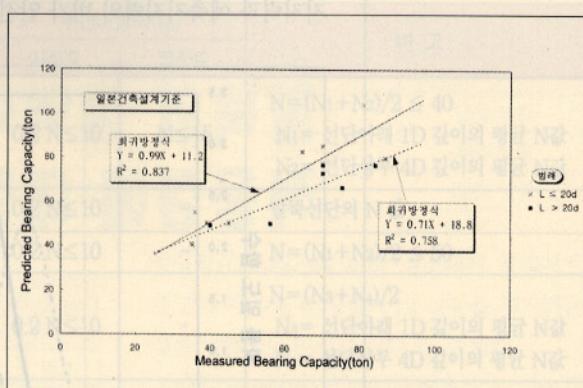


(그림 6) 근입비에 따른 측정지지력과 예측지지력과의 상관성

3) 일본 건축기초 설계기준

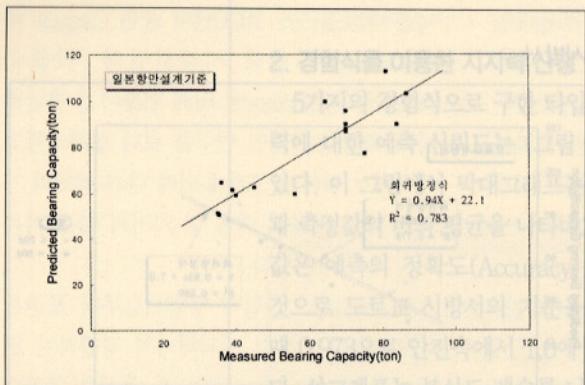


(그림 7) 전체말뚝에 대한 측정지지력과 예측지지력의 상관성

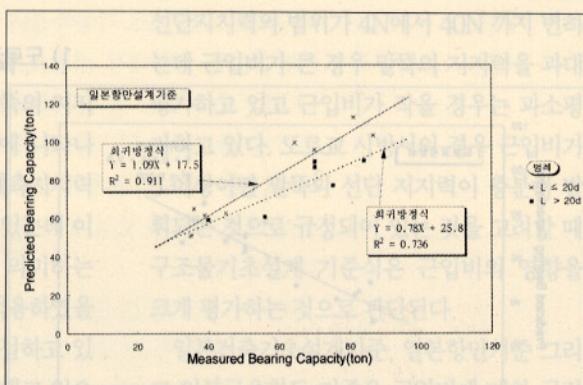


(그림 8) 근입비에 따른 측정지지력과 예측지지력과의 상관성

4) 일본 항만 설계기준

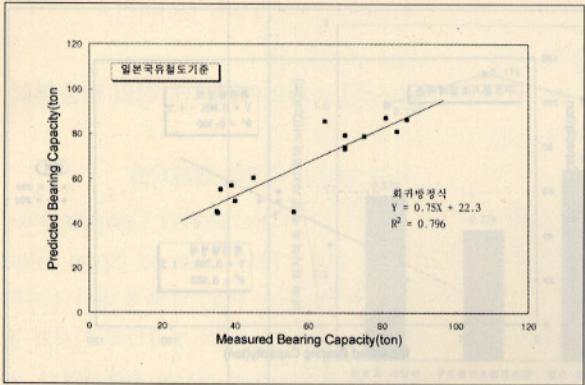


(그림 9) 전체말뚝에 대한 측정지지력과 예측지지력의 상관성

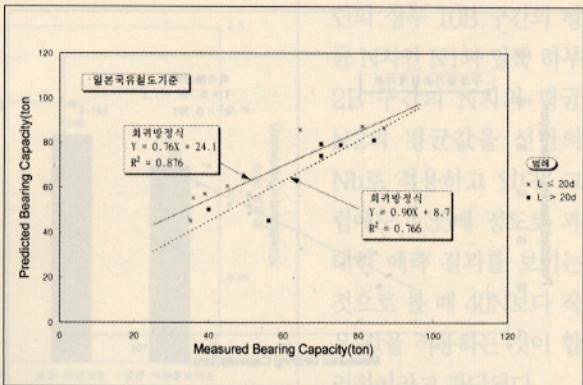


(그림 10) 근입비에 따른 측정지지력과 예측지지력과의 상관성

5) 일본 국유철도기준



(그림 11) 전체말뚝에 대한 측정지지력과 예측지지력의 상관성



(그림 12) 근입비에 따른 측정지지력과 예측지지력과의 상관성

결과 요약

1. 전체대상 말뚝 (N=16개)

적용기준	^{1) 평균 (m)}	^{2) 표준편차 (σ)}	^{3) 분산도 계수(σ/m)}	^{4) 회귀방정식}	^{5) 상관계수 (R²)}
도로교시방서	0.973	0.148	0.152	$Y = 0.81X + 9.0$	0.809
구조물기초설계기준	0.771	0.132	0.171	$Y = 0.79X - 1.1$	0.797
일본건축기초설계기준	1.134	0.177	0.156	$Y = 0.85X + 15.4$	0.741
일본 항만설계기준	1.348	0.208	0.154	$Y = 0.94X + 22.1$	0.783
일本国유철도기준	1.167	0.196	0.168	$Y = 0.75X + 22.3$	0.796

주 1) 예측한 말뚝의 허용지지력과 재하시험결과치의 비(Qp/Qm)에 대한 통계값임.

2) 재하시험결과를 X축에, 예측한 지지력을 Y축에 나타냈을 때 이를 회귀분석한 결과임.

2. L ≤ 20d인 경우

적용기준	^{1) 평균 (m)}	^{2) 표준편차 (σ)}	^{3) 분산도 계수(σ/m)}	^{4) 회귀방정식}	^{5) 상관계수 (R²)}
도로교시방서	0.995	0.177	0.178	$Y = 0.82X + 8.9$	0.775
구조물기초설계기준	0.768	0.161	0.209	$Y = 0.80X - 1.2$	0.760
일본건축기초설계기준	1.207	0.160	0.133	$Y = 0.99X + 11.2$	0.837
일본 항만설계기준	1.441	0.171	0.119	$Y = 1.09X + 17.5$	0.911
일本国유철도기준	1.240	0.189	0.152	$Y = 0.76X + 24.1$	0.876

3. L > 20d인 경우

적용기준	^{1) 평균 (m)}	^{2) 표준편차 (σ)}	^{3) 분산도 계수(σ/m)}	^{4) 회귀방정식}	^{5) 상관계수 (R²)}
도로교시방서	0.943	0.089	0.094	$Y = 0.83X + 7.0$	0.889
구조물기초설계기준	0.775	0.074	0.095	$Y = 0.79X - 1.2$	0.883
일본건축기초설계기준	1.011	0.138	0.136	$Y = 0.71X + 18.8$	0.758
일본 항만설계기준	1.198	0.172	0.144	$Y = 0.78X + 5.8$	0.736
일本国유철도기준	1.045	0.151	0.144	$Y = 0.90X + 8.7$	0.706

결론

본 연구에서 말뚝 정재하시험의 결과를 이용하여 정역학적 지지력 산정식으로부터 구한 예측값과 비교 분석을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 도로교시방서 기준을 적용한 경우 측정지지력과 예측지지력의 비의 평균이 1.0에 가장 근접한 결과를 보이고 있다

- 도로교시방서와 구조물기초설계기준 적용시 말뚝의 근입비에 관계없이 안전측으로 일관성있는 예측을 한다.

- 근입길이가 말뚝지름의 20배 이하인 말

참고문헌

- Briaud, J. L. and Tucker, L. M. (1988) Measured and Predicted Axial Response of 98 Piles, Journal of Geotechnical Eng., Vol. 114, No. 9, pp. 984 - 1000
- 건설부(1992), 도로교 표준시방서, pp. 915-1251
- 건설부(1986), 구조물기초설계기준, pp.185- 350
- Fang, H. Y. (1991), Foundation Engineering Handbook, 2nd Ed., Van Nostrand Reinhold
- 한국지반공학회(1993), 깊은 기초-지반공학 시리즈 4
- NAVFAC DM 7-2 (1982), Foundations and Earth Structures
- 土木施工(1987), 港湾 海洋構造物の 設計計算例, Vol. 28, No.2
- 基礎工(1995), 埋立杭の 設計計算例(既製 コート杭)

뜻의 경우 일본 건축기초설계기준, 일본 항만기준, 일본 철도기준의 경우 20%에서 44%까지 크게 예측하고 있다.

본고의 결론은 16개의 비교적 작은 집단에 대한 통계값이므로 향후 보다 많은 말뚝 재하시험 결과를 수집하여 지반 조건에 따른 각 시방의 예측력과 신뢰도에 대한 비교 연구가 수행되어야 할 것이다. **S**