

## 암반 정착 대구경 피어기초의 거동특성에 관한 연구 The Behavior of Large Diameter Rock Socketed Piles

김태현<sup>1)</sup>, Tae-Hyun Kim, 김찬국<sup>2)</sup>, Chan-Kook Kim, 황의석<sup>3)</sup>, Eui-Seok Hwang,  
이봉열<sup>4)</sup>, Bong-real Lee, 김학문<sup>5)</sup>, Hak-Moon Kim

- 1) 다산이엔지 지반사업본부 지반사업2부, Geotechnical Division Geotechnical Dept. II, DASAN \ENGINEERING Co. Ltd
- 2) 단국대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook University
- 3) 대림산업(주) 건설사업부, Construction Division, Daelim Industrial Co., Ltd.
- 4) 씨지이엔씨 상무이사, An Executive Director, C&G Enc.
- 5) 단국대학교 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environment Engineering, Dankook University

**SYNOPSIS** : The rapid growth of the economy recently has led to increasing social needs for large scaled structures, such as high-rise buildings and long span bridges. In building these large-scaled structures the trend has been to construct foundations bearing on or in rock masses in order to ensure stability and serviceability of the structure under several significant loads.

However, when designing the drilled shaft foundation socketed in rock masses in Korea, the bearing capacity for the pier used to be determined by using the empirical expression, which depends on the compressive strength of the rock, or presumable bearing capacity recommended on foreign references or manuals.

In this study, numerical analyses are used to trace rock-socketed pile behavior and are made alike with pile load test result in field. The result of this numerical analyses study have shown that following factors have a significant influence on the load capacity and settlement of the pier. Significant influence first factor of the geometry of the socket as defined by the length to diameter ratio. Second factor of the modulus of the rock both around the socket and below the base. third factor of the condition of the end of the pier with respect to the removal of drill cuttings and other loose material from the bottom of the socket.

**Key words** : Rock socketed, Influence factor, p-y curve, Settlement ratio, Large diameter

### 1. 서 론

국내에서는 근래에 초고층 건물이나 장대 교량과 같은 대규모의 토목구조물의 건설수요가 증가함에 따라 말뚝의 한 본당 부담해야 하는 하중의 크기가 점점 증가하고 있다. 그러므로 구조물의 사용성과 안정성을 보장하기 위하여 확실한 지지층에 구조물 기초를 시공하기 위해 암반까지 근입된 대구경 피어기초의 필요성이 점차 대두 되고 있다.

그러나 암반에 근입된 말뚝의 지지력은 암반의 종류와 암반의 상태 그리고 시공방법에 따라 그 거동

특성이 상이하게 나타나고 있다. 암반에 근입된 말뚝의 지지력은 암의 종류와 지질학적인 상태, 시공상황 등에 매우 의존적이며 이러한 말뚝의 지지력 예측은 매우 어려운 문제이다. 현재로서는 암을 공학적인 성질에 따라 분류하고, 다양한 암반 조건에서의 현장재하시험 및 수치해석적인 방법으로 암반근입 말뚝의 정확한 지지메커니즘을 규명하여 지지력과 침하량을 산정할 수 있는 방법에 대한 연구가 수행중이다. 국내에서는 이에 대한 연구가 부족하여 적절한 기준이 명확하게 정립되어있지 못하고 국내의 시방서 상의 실험을 통하여 구해진 암석의 일축압축강도에 의존하거나 외국 문헌이나 외국 시방서 상에 제시된 방법을 사용하고 있는 실정이다.

본 연구는 국내에서 시공된 암반정착 대구경 피어기초 현장의 재하시험자료의 결과를 이용하여 재하 현장들의 지반조건 및 하중재하에 의한 각각의 현장에 대한 암반특성을 비교 검토하여 국내의 암반의 특성에 대하여 분석 후 수치해석법(numerical analysis method)으로 현장자료의 적용성을 검증하였다. 검증된 현장자료를 사용하여 암반에 근입된 말뚝의 지지력에 많은 영향을 미치는 요소인 형상비(L/B), 탄성계수, 측벽의 조건, 선단의 상태 등을 고려하여 수치해석을 수행한 후 결과를 토대로 각각의 요소의 변화에 따른 하중-침하곡선의 형태와 거동특성에 대한 평가를 목적으로 수행하였다.

## 2. 현장재하시험 및 분석

### 2.1 오스터버그셀 시험법

본 연구에서는 거대하중을 받는 암반정착피어기초의 지지특성을 검토하기위한 현장시험방법으로 선단 유압재하장치를 이용하여 주면마찰력 및 선단지지력을 동시에 측정할 수 있는 오스터버그셀 시험에 대하여 소개하고자 한다.

오스터버그셀 시험은 미국 노스웨스턴 대학의 명예 교수인 Jory O. Osterberg 박사에 의해 처음 고안되었다. 오스터버그셀 시험을 특수하게 제작된 고압의 유압식 잭(Jack)을 일반적으로 말뚝선단 가까이 설치하여 선단지지력과 주면지지력에 의해 하중재하에 필요한 반력을 상호간에 마련해 주는 방법이므로 별도의 하중재하장치가 필요 없고, 좁은 시험공간이나 경사진 곳에서도 적용이 가능하다.

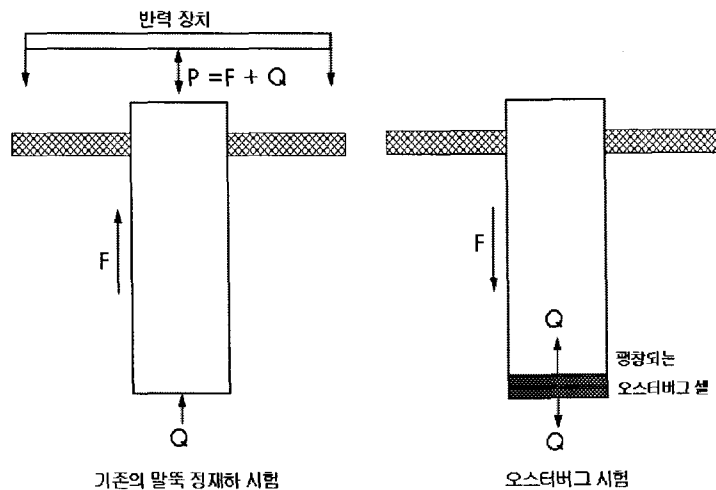


그림 1. 종래의 말뚝 정재하시험과 오스터버그셀 시험의 비교

그림 1은 종래의 말뚝정재하시험방법과 오스터버그셀 시험방법의 차이를 보여준다. 종래의 말뚝정재하시험은 두부에서 하중을 재하 하므로 사하중이나 반력말뚝, 반력앵커 등의 반력장치와 큰 재하장치가 필요하다. 이때 말뚝두부에 재하되는 하중 P는 주면지지력 F와 선단지지력 Q에 의해 지지되고, 이 두 지지력을 분리하기 위해서는 말뚝의 하중전이 측정이 반드시 수행되어야 한다.

오스터버그셀 시험의 경우, 지상에서 유압을 가하면 오스터버그셀의 하부는 하향으로 움직여 선단지 지력을 발생시키고 상부는 동일한 힘으로 상향으로 움직이면서 말뚝에 주면 마찰력을 발생시킨다. 또한 말뚝두부가 아닌 선단이나 말뚝의 임의 위치에서 하중을 재하 하므로 주면지지력 F와 선단지지력 Q는 서로에 대해 반력으로 작용하게 된다.

## 2.2 현장재하시험 분석

암반정착 피어기초의 거동특성을 연구하기 위하여 국내 7개 현장에서 수행된 재하시험자료를 비교 검토하여 현장의 지층조건, 하중조건 등의 변화에 따른 지지거동특성을 검토하였다. 그림 2는 암반의 종류에 따른 재하현장의 주면저항력분석을 나타낸 그래프이다. 그림 2(a),(b)의 그래프에서 나타나듯이 선형적인 증가를 나타내고 있으며 주면마찰력의 크기의 차이를 보이고 있다.

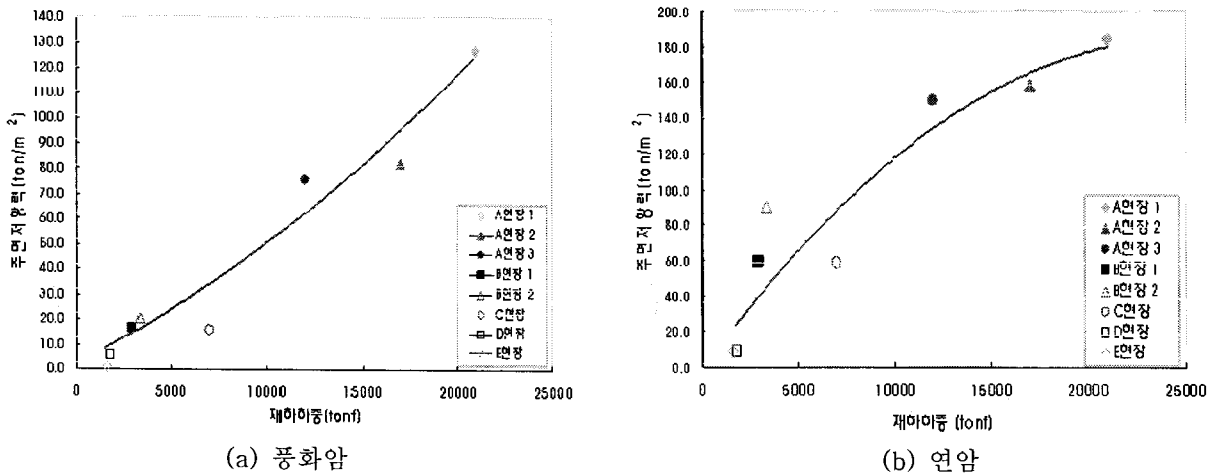


그림 2. 암반의 종류별 재하현장의 하중에 따른 평균주면저항력 분석

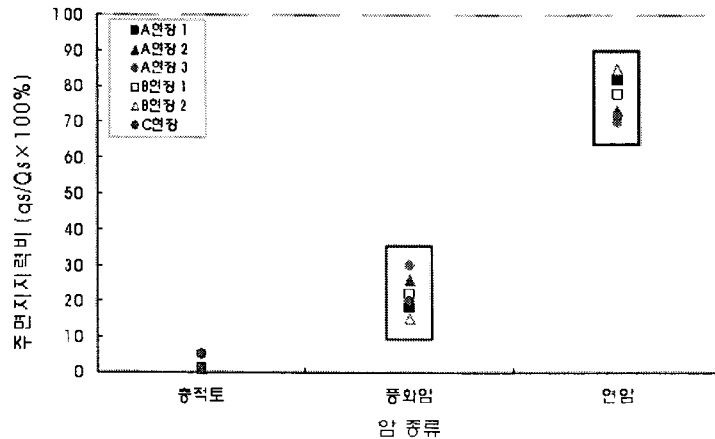


그림 3. 현장의 지층에 따른 주면지지력비( $q_s/Q_s \times 100\%$ )

그림 3은 현장재하시험의 전체주면지지력에 대하여 각 지층의 주면지지력비( $q_s/Q_s \times 100\%$ )로 나누어 나타낸 그림으로 지층에 따른 주면지지력의 영향을 나타내고 있으며 풍화암과 연암층에서 90%이상의 주면지지력으로 지지하고 있는 것으로 나타나고 있으며 충적토의 영향은 미비하게 나타나고 있다. 이는 상부의 충적토 지층에 대한 영향에 대해서 고려하지 않아도 되지만 주면지지력의 15-30%정도의 주면지 지 지력을 발휘하고 있는 풍화토 지층의 경우에는 고려되어야 한다. 국내지층에 대부분 존재하고 있는 풍화암 지층의 적용을 위해 좀 더 많은 연구와 조사가 진행되어야 할 것이다.

### 3. 현장재하시험 수치해석결과 및 분석

본 연구는 수치해석으로 암반정착 대구경 말뚝기초의 지지력 및 침하특성을 평가할 목적으로 수행된 것으로 현장재하시험을 검증한 후 깊이비, 형상비, 탄성계수비, 선단의 상태 등에 대해서 탄성영역을 고려한 유한요소해석을 실시하였고 해석결과를 분석하면 다음과 같다.

#### 3.1 형상비를 고려한 하중-변위 거동특성

수치해석시에 실제와 유사하게 적용시키기 위하여 일정깊이의 풍화암층과 탄성비가  $E_r / E_c = 0.08$  인 지층에 근입을 시킨 후 탄성비가  $E_r / E_c = 0.08$  지층의 깊이비에 변화시켜 하중재하시 하중-변위에 대한 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다.

표 1. 형상비에 변화에 따른 영향요소 Case

Case	영향요소	탄성계수비	형상비 (근입깊이 / 직경)
Case 1	$E_r / E_c = 0.08$ (하부지반)	$E_r / E_c = 0.08$ (하부지반)	L = B
Case 2			L = 2B
Case 3			L = 3B
Case 4			L = 4B

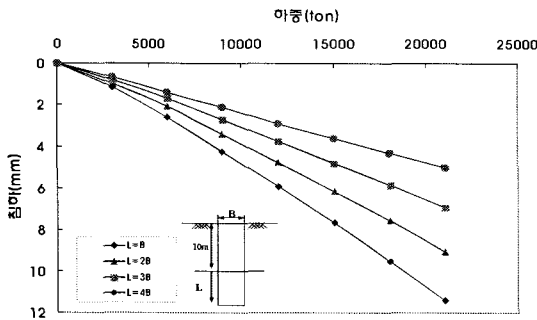


그림 4. 형상비에 따른 하중-침하특성

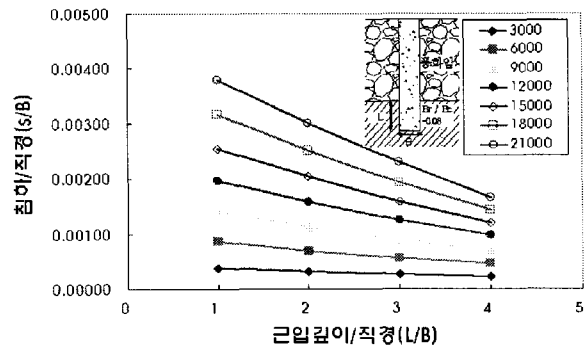


그림 5. 근입깊이비(L/B)에 따른 침하비(s/B) 평가

그림 4은 형상비의 변화에 따른 영향을 나타낸 것으로 그 영향을 무차원화 하여 그림 5와 같이 하중의 변화에 따른 근입깊이비(L/B)와 침하비(s/B)의 그래프로 나타내었다. 근입깊이비가 증가함에 따라 침하비는 선형적인 감소경향을 나타내고 있다. 이러한 경향을 사용하기 위해 유사한 경향의 현장 조건이어야 한다.

#### 3.2 주면탄성비를 고려한 하중-변위 거동특성

수치해석시에 소켓된 파일의 주면탄성계수비를 변화하여 하중재하시 하중-변위에 대한 거동특성을 파악하여 소켓시 주면의 탄성계수비에 대하여 하중-변위에 대한 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다.

표 2. 주변탄성계수비의 변화에 따른 영향요소 Case

영향요소	Case	소켓된 지반의 탄성계수비	주변탄성계수비 (Er / Ec)
선단과 주변 탄성계수비 동일	Case 1		Er / Ec = 0.6
	Case 2		Er / Ec = 0.2
	Case 3		Er / Ec = 0.06
	Case 4		Er / Ec = 0.02
	Case 5		Er / Ec = 0.01

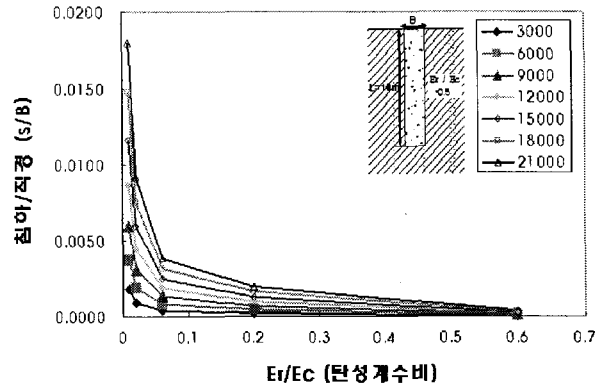
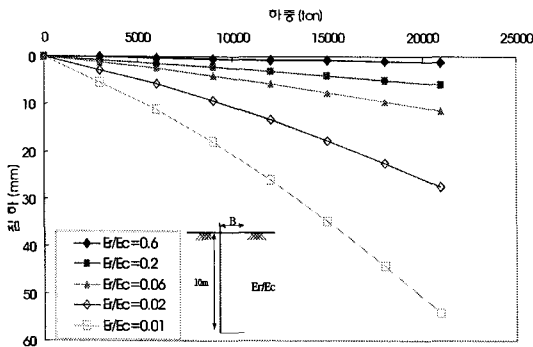


그림 6. 주변탄성비에 따른 하중 - 침하곡선

그림 7. 탄성계수비(Er/Ec)에 따른 침하비(s/B) 평가

그림 6에서는 근입이 탄성계수비의 변화에 따라 영향을 나타내고 있으며 이를 그림 7과 같이 무차원화 하여 탄성계수비에 대한 침하비를 나타내었는데 연암강도의 탄성계수비에서 급격한 침하비가 증가하는 경향을 나타낼 수 있었다. 즉 연암구간의 탄성계수의 침하비 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이러한 경향을 사용하기 위해 유사한 경향의 현장 조건이어야 한다.

### 3.3 형상비와 선단상태를 고려한 하중-변위 거동특성

수치해석시에 선단의 탄성계수비를  $E_b / E_c = 0.0003$ 인 불량한 지층에 선단지지 후 탄성비가  $E_r / E_c = 0.08$ 인 지층에 형상비를 변화하며 하중-변위에 대한 거동특성에 미치는 영향을 분석하였다.

표 3. 선단의 상태를 고려한 형상비의 변화에 따른 영향요소 Case

영향요소	Case	탄성계수비	형상비 (적경대 길이비)
Eb / Ec = 0.0003 Er / Ec = 0.08	Case 1		L = B
	Case 2		L = 2B
	Case 3		L = 3B
	Case 4		L = 4B

그림 8은 선단이 불량한경우의 형상비 변화에 대한 영향을 그림 9과 같이 무차원화 하여 나타낸 결과 근입깊이비가 증가함에 따라 침하비의 감소량이 비선형 적으로 근입비가 증가할수록 침하비는 급격히 작아지는 경향을 알 수 있었다.

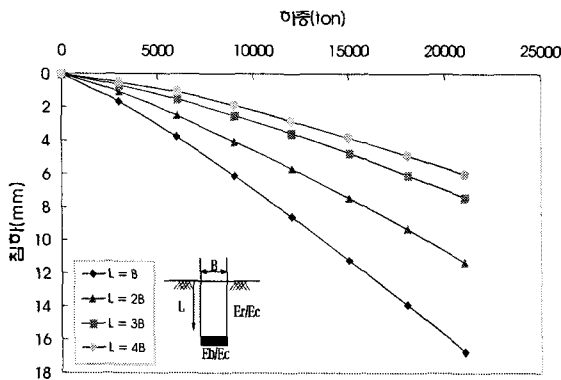


그림 8. 선단과 형상비에 따른 하중-침하곡선

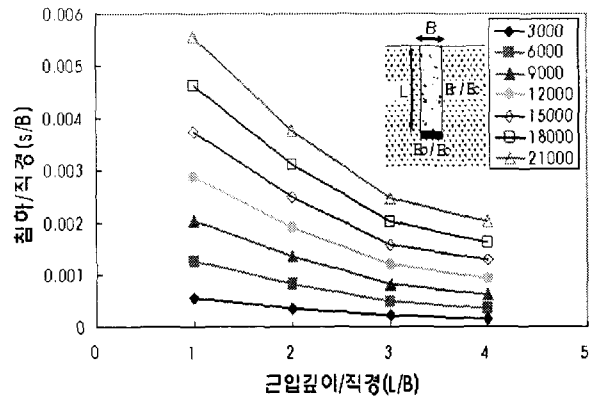


그림 9. 근입깊이비(L/B)에 따른 침하비(s/B) 평가

#### 4. 결론

암반정착 대구경 피어기초의 현장실험 데이터를 통하여 하중증가에 의한 암반의 지지력 특성을 비교분석한 결과와 검증된 현장의 지지력 영향요소에 대한 수치해석 결과를 통하여 다음의 결론을 얻었다.

1. 암반정착 대구경 피어기초의 하중조건 및 지층조건 따라 상이한 하중분포를 나타내고 있으며 재하하중의 대부분을 암반지층에서 지지하고 있는 것으로 나타나고 있다. 연암층의 평균마찰력의 기울기는 하중의 증가에 일정하게 선형적인 형태로 증가하는 결과를 나타내고 있으며 풍화암의 경우 큰 하중이 재하시 연암층과 유사하게 연암 평균마찰력의 1/2정도의 크기로 선형적인 증가의 경향을 나타내고 있다.
2. 암반의 지층별 주변지지력은 풍화암 이상의 암반에서 주변지지력의 90%이상을 지지하고 있는 것으로 나타났다. 국내에 많이 분포된 풍화암의 주변지지력은 현장에 따라 차이는 보이나 전체 지지력의 15~30%정도 발휘되는 것으로 나타나 암반정착대구경 피어기초 설계 시 풍화암의 지지특성까지 고려된 경제적이며 합리적인 설계가 되어야 한다.
3. 연암의 근입깊이비에 대하여 수치해석 결과를 무차원화 하여 나타낸 결과 근입깊이비(L/B)가 증가함에 따라 침하비(s/B)는 선형적으로 감소가 나타나고 있다. 현장조건이 연암에 근입되는 파일의 경우 하중변화에 따른 근입깊이비에 대한 침하비의 경향을 예측할 수 있다.
4. 주변탄성계수비에 대한 변화에 따른 수치해석 결과를 무차원화 하여 탄성계수비의 변화에 따라 나타낸 결과 연암강도의 범위에서 침하비의 영향이 급격하게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 연암의 강도범위의 강도변화에 대하여 침하비에 민감한 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.
5. 선단이 불량하게 시공된 경우 암의 강도별로 수치해석 결과 연암강도의 경우 영향이 크게 나타나며 결과를 무차원화 하여 근입깊이비(L/B)에 따른 침하비(s/B)로 나타낸 결과 비선형적 감소현상이 나타나고 있다. 현장조건이 연약지반이나 선단시공이 불량한 경우 하중 변화에 따른 근입깊이비에 대한 침하비의 경향을 예측할 수 있다.

#### 참고 문헌

1. 한국지반공학회(2002), "깊은기초"
2. 장학성(1996), "암반에 지지된 말뚝의 연직 지지력 및 침하 특성에 관한 연구", 서울대 대학원
3. 정선태(2003), "현장타설말뚝의 하중전이 특성 연구", 단국대 대학원
4. Canadian Geotechnical Society(1992), "Foundation Engineering Manual". 3rd Edition
5. Duncan C. Wyllie(1999), "FOUNDATION ON ROCK", E & FN SPON, 249-272
6. Joseph E. Bowles(1997), "FOUNDATION ANALYSIS AND DESIGN", FIFTH EDITION
7. Shamsher Prakash & Hari D. Sharma(1990), "PILE FOUNDATIONS IN ENGINEERING PRACTICE", John Wiley & Sons, Inc.