

암반에 근입된 말뚝의 선단 거동 특성에 관한 연구

Study on the Behavior of Toe of Drilled Shaft on the Rock Mass

박완서¹⁾, Woan Suh Park, 전석원²⁾, Suk Won Jeon, 한용희³⁾, Yong Hee Han, 최세근²⁾, Se Kun Choi

¹⁾ 삼성물산 건축ENG팀, Assistance, Civil Part of Architecture ENG Team, Samsung Corp.

²⁾ 서울대학교 에너지자원공학과 교수, Assistant Professor, Dept. of Energy Resources Engineering, Seoul National University

³⁾ 삼성물산 건축ENG팀, General Manager, Civil Part of Architecture ENG Team, Samsung Corp.

⁴⁾ 서울대학교 에너지자원공학과 석사과정, Dept. of Energy Resources Engineering, Seoul National University

SYNOPSIS : Despite of the increasing number of the application of the drilled shaft pile in construction site, most of the study of pile capacity has been centered side shear resistance.

But it is common that the drilled shaft is socketed on the rock so as to use the bearing resistance, so prediction of the toe's movement and characteristic of the bearing capacity is important as the side shear resistance.

Therefore the model tests were performed in order to study the characteristic of bearing capacity on rock mass. The material of the test blocks were the mortar which was mixed with sand, cement and water, and test block size was 240×240×240mm. Load was pressed by the 45mm of diameter of miniaturized pile and plate jack and steal plate were used to the confined stress for representing the underground condition. The relation of load-displacement was measured in many different conditions of rock mass such as direction of discontinuities, spacing and strength, and $q-w$ curves of the toe of the pile were verified in each condition.

Key words : bearing capacity, rock mass, model test

1. 서 론

암반상에 놓여지는 직접기초 또는 말뚝기초의 선단 거동과 지지력에 대한 예측식은 부분적으로 암반 (rock mass)의 불연속면 등을 고려하지만 대부분은 암석(intact rock)의 일축압축강도를 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 상부 하중을 전달하는 기초 하부의 암반은 강도이외에도 다양한 불연속면이 존재하고 있으며, 하중이 가해지면 절리를 통한 복합적인 매커니즘을 거쳐 하중이 지중으로 전달되게 된다. 최근 도심지 공사에 급격하게 사용되고 있는 현장타설말뚝의 경우에 많은 연구가 수행되어지고 있으나 대부분 암반과 말뚝 상호간의 주면마찰저항에 대해서 국한되어 있는 현실이며, 선단 거동과 관련된 연구는 수행된 사례가 거의 없는 실정이다. 따라서 선단 거동과 관련하여 예측 및 분석이 어려울 뿐만 아니라 설계시 많은 안전율을 포함한 경험식을 사용하게 된다. 그러나 향후 더 큰 중량의 구조물에서 사용시 안전하고, 경제적인 말뚝의 설계를 위해서 선단 거동에 대한 연구가 절실히 필요한 상태이다.

본 논문은 말뚝의 선단 거동에 대한 지지력 및 거동 예측기법을 개발하기 위하여 실험시 제약이 많은 현장실험을 대신하여 여러 형태의 절리 특성과 지반상태를 모사할 수 있는 실내모형실험을 실시하였다. 모르타르를 이용한 모형실험을 통하여 말뚝의 선단지지에 영향을 주는 강도, 절리의 간격, 절리의 거칠기, 측압, 절리의 방향성에 대한 하중-변위 특성 그래프를 얻을 수 있었다.

2. 선단 지지력 예측식

말뚝의 선단지지력의 예측기법은 국외에서 개발한 기법이 대부분이며, 특히 작은 직경의 말뚝으로부터 얻어진 경험식을 사용하고 있다. 식(1)은 암석의 일축압축강도를 이용한 지지력 산정식이며, α 는 지역 및 암반조건에 따라 달리 쓰이는 계수이다(Coates, 1967., Rowe and Armitage, 1987., Findlay et al, 1997).

$$q_{\max} = \alpha \sigma_c \quad (1)$$

여기서, α 는 1~4.5의 상수이며, σ_c 는 암석(intact rock)의 일축압축강도를 나타내고 있다.

Peck(1974)은 RQD와 말뚝의 선단 허용지지력과의 관계를 도표로 하여 나타냈는데, 정밀하지 않기 때문에 간단하게 지지력을 평가할 경우에 사용토록 권고하고 있다. 또한 기초저면의 절리 간격과 말뚝의 직경간의 관계를 이용한 지지력 산정 기법(Kulhawy and Goodman, 1980)을 제안하기도 하였으며, 말뚝과 직경의 비(L/B)가 6이하인 경우에 대하여 식(2)와 같이 절리 간격과 절리면의 틈을 고려한 지지력 예측관련 식(CGS, 1985)이 사용되기도 한다.

$$\begin{aligned} q_{\max} &= 3\sigma_c K_{sp} D \\ K_{sp} &= [3 + s/B]/[10(1 + 300g/s)^{0.5}] \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 K_{sp} 는 경험상수, s 는 절리의 간격, B 는 말뚝의 직경, g 는 불연속면간의 틈의 크기를 나타내고 있다.

3. 시료 및 시험 장치의 특징

3.1 시료의 성형

암반에 근입된 말뚝을 모사하기 위해서 암반의 거동과 유사한 모르타르를 이용하여 시료를 제작하였으며, 실험시 필요한 강도의 발현 및 시료 제작시 성형성을 고려하여 시멘트:모래를 1:2, W/C=45%로 하였고, 모르타르의 균일성을 유지하기 위하여 0.8m³의 용량인 전동 레미콘에 10분간 비빈 후 강판으로 제작된 성형틀(그림1(b))을 이용하여 시료를 제작하였다.

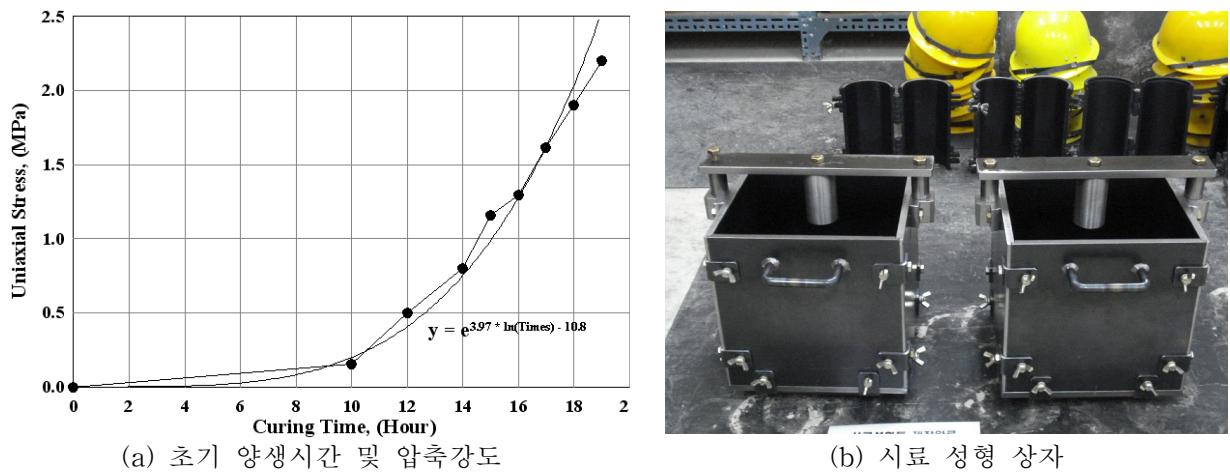


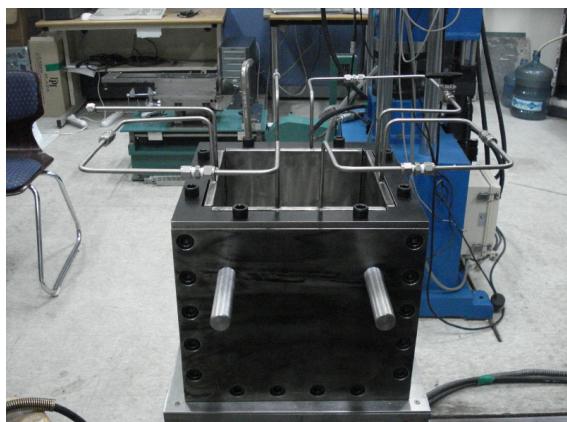
그림 1. 시료의 강도 특성 및 성형기구

본 실험은 실제 수행된 현장타설말뚝의 정재하시험과 결과와 비교검증하기 위해서 현장실험 말뚝에

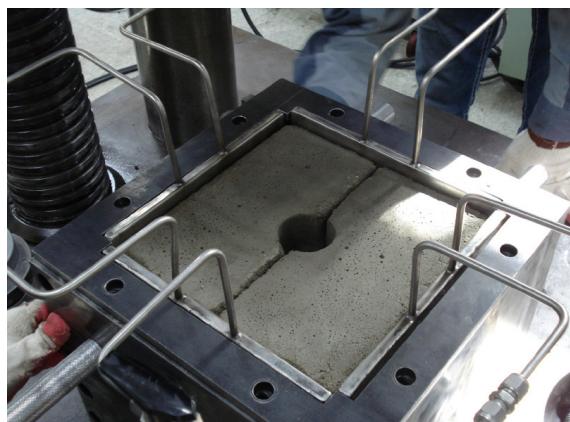
대한 길이 및 질량에 대하여 축소율을 고려한 물성을 이용하여 실험을 실시하였으며, 하중재하시험시 강도의 측정이 매우 중요하기 때문에 그림1(a)에서와 같이 사전 시험을 실시하여 모르타르의 초기 강도와 양생시간의 관계를 확인하였으며, 모르타르의 제작과 양생과정에서 온도 및 관리 정도에 따라 약간의 편차가 발생하기 때문에 모형실험 실시전 각 시료에 대한 일축강도실험을 실시하였다.

3.2 실험 장치의 특징

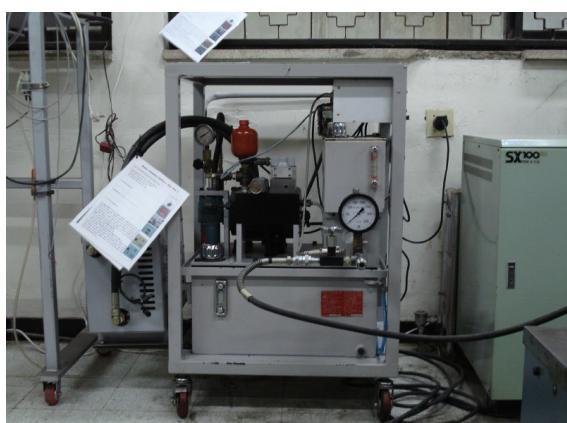
일반적으로 현장타설말뚝은 견고한 지반 또는 암반상에 근입을 시켜 지지력을 발휘하는 경우가 많기 때문에 구조물의 굴착면 보다 더 깊게 천공된다. 따라서 암반상에 직접 놓인 기초와 달리 말뚝은 근입지점에서 상부와 측면의 압력에 대한 영향을 받기 때문에 모형실험 장치에 이러한 상황을 반영한 환경을 구현하는 것이 매우 중요하다. 따라서 측면과 상부의 하중을 동시에 가하여 지중 상태를 유지 할 수 있는 시험 장치를 제작하였다. 시험 장치의 크기는 가압말뚝의 직경($D=45mm$)을 고려한 수치해석 결과를 반영하여 수평 길이는 1:2D, 수직 길이는 1:4D의 영향범위를 고려하여 그림2(a)와 같이 $240 \times 240 \times 240\text{mm}$ 의 정육면체의 시료를 이용하여 실험을 수행할 수 있는 장치를 제작하였으며, 장치의 측면은 하중 재하시 변위가 발생하지 않도록 3cm의 열처리 된 강판을 사용하였다. 또한 근입되는 말뚝 선단부에서 상부로부터 작용하는 압력은 강철판($t=10\text{mm}$, 9kg)을 이용한 사하중으로 수직하중을 재하하였으며, 측면에 작용하는 압력은 일정하게 유압을 가할 수 있는 자동 유압조절장치를 사용하였다. 이때 그림2(c)의 자동 유압장치는 연성의 재질로 제작된 Plate Jack과 연결이 되어 실험시 자동으로 필요한 압력을 시료에 가할 수 있도록 되어 있다.



(a) 실험 장치



(b) 시료 및 가압 Flate Jack



(c) 유압 유닛 (kstest 3.0)



(d) 하중기 및 실험 장치 Setup

그림 2. 실험 장치 및 주변기기

4. 시험방법 및 시험 종류

불연속면과 지중상태에서의 암반(Rock Mass)과 말뚝의 관계를 확인하고, 일반적으로 지반조사시 얻을 수 있는 범용적인 지중상태를 표한하기 위하여 RMR을 구성하는 있는 인자들을 적용하여 실험을 실시하였다.

그림3는 실험을 위하여 제작된 시료의 형태를 나타내는 것으로써, 각 시험 방법 및 제작된 시료의 형태에 따라서,

- (a)암반의 강도에 따른 하중-변위 특성
- (b)구속압($K = \sigma_h / \sigma_v = 1\sim 2.6$)에 따른 특성
- (c)말뚝 하부의 절리면 거칠기에 대한 특성 분석
- (d~e)절리의 방향성 및 절리의 간격을 고려한 실험을 실시하였다.

여기서 절리면의 거칠기는 Cruden(1979)이 제안한 절리 모사 방법을 적용하여 3가지 형태의 JRC를 나타내어 시료를 제작하였다.

그림에서 보는 것과 같이 모형말뚝의 시료에 가압될 때 말뚝 주면과 시료가 부착이 될 경우 말뚝의 주면부와 시료의 주면저항으로 인하여 말뚝 선단으로 작용하는 $q-w$ 의 관계를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 모형말뚝과 시료 사이는 1mm의 간격을 두어 말뚝의 두부에 가해진 하중이 선단에 곧바로 작용할 수 있도록 실험을 실시하였다. 하중은 1mm/min로 가압하는 변위제어방식을 적용하여 실험을 실시하였으며, 하중과 발생되는 변위에 대해서는 Load Cell과 2개의 LVDT이용하였고, 데이터는 10초당 1개를 얻을 수 있도록 조절하였다(그림 2d).

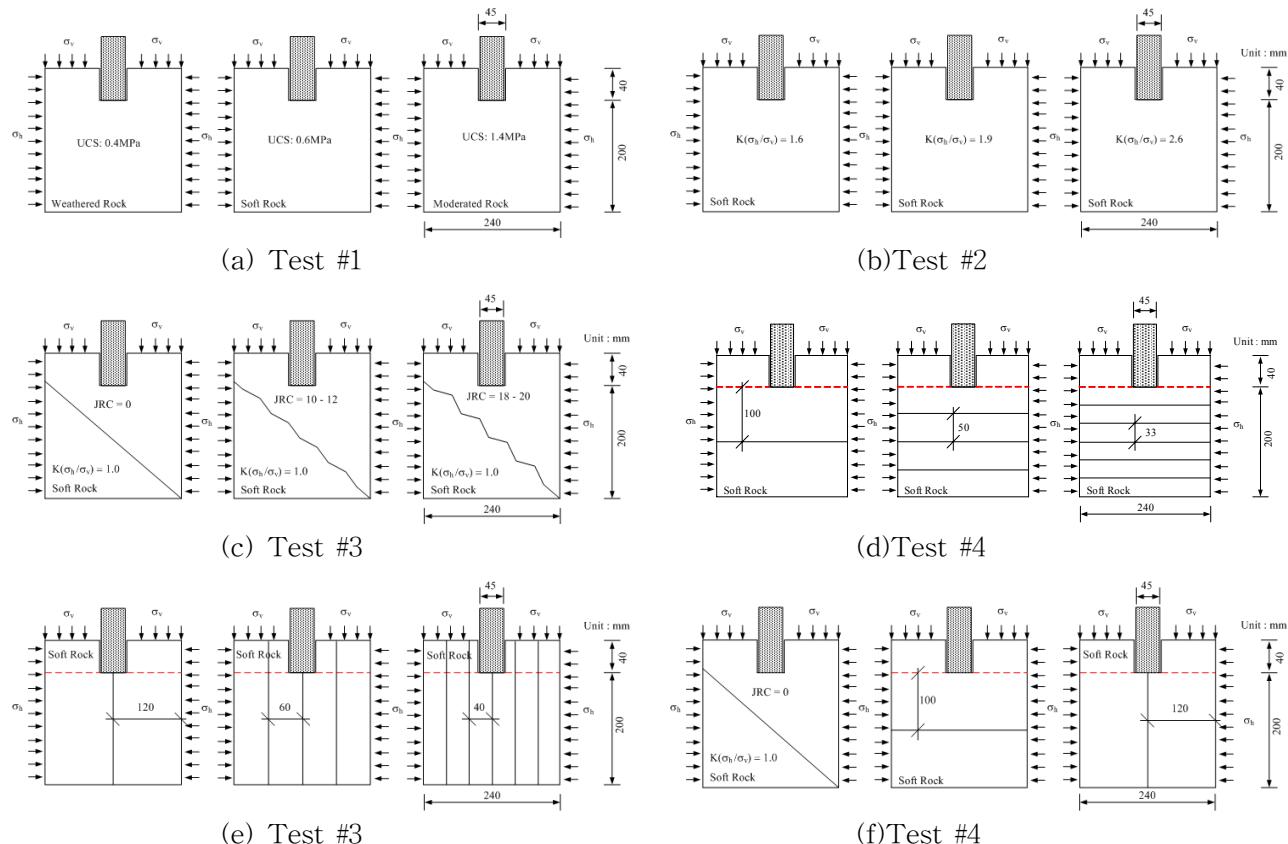


그림 3. 실험 장치 및 주변기기

5. 시험결과

그림 4는 하중 실험을 통해 얻어진 $q-w$ 의 관계곡선을 나타내고 있다.

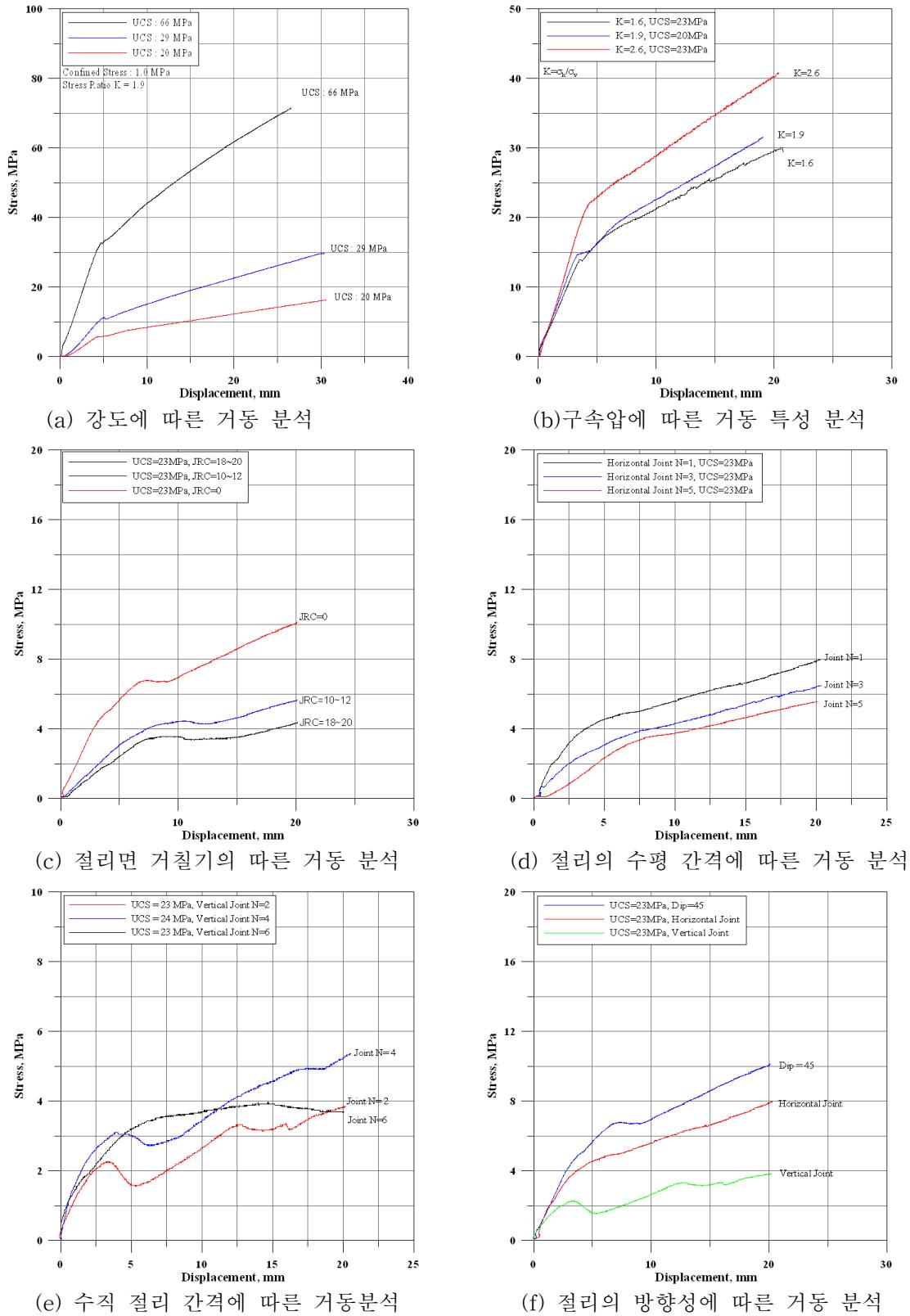


그림 4. 암반조건에 따른 하중-변위 그래프

6. 결 론

암반에 근입된 말뚝의 거동 특성을 분석하기 위해서 3축 방향으로 가압할 수 있는 모형 실험기를 제작하였다. 기존의 강도정수이외에 모르타르를 이용하여 암반의 방향성 및 불연속면을 고려한 지중상태를 모사하였고, 변위제어를 통해 하중재하 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 말뚝하부의 놓여진 암반의 강도의 크기와 구속압에 따라 선단부의 거동특성이 많은 영향을 받고 있었으며, 강도가 클수록 측압계수(K)가 클수록 변위-하중 곡선의 기울기가 증가됨을 증가함을 확인 할 수 있었다.
- 2) 하중 영향 범위내에 존재하는 절리면의 특성에 대한 실험에서 절리면 면적이 더 클수록 더 많은 변위가 발생함을 확인하였으며, 이는 그림4(c)에서와 같이 JRC의 값이 증가하는 경우와 하중 범위 내의 절리면의 면적이 수평절리에 비하여 더 넓은 수직절리에서 변위가 더 많이 발생함을 확인 할 수 있었다.
- 3) 수직절리의 간격에 대한 실험시 하중 재하시 절리를 모사한 시료에서 좌굴에 의한 붕괴가 발생하였으며, 그림4(e)와 같이 수직 절리 개수와 큰 영향이 없음을 보였다.

향후 금번 시험결과를 이용하여 암반상에 놓여진 말뚝이 지반하부의 암반상태에 따른 거동 특성을 분석할 예정에 있으며, 이를 통하여 실제 수행된 말뚝의 정재하시험과 비교하여 국내 지반에 적합한 지지력 예측기법을 제안코자 한다.

참고문헌

1. ASCE (1996) Rock Foundation: Technical Engineering and Desing Guides as Adaped from the US Army Corps of Engineers. No 16, ASCE Press, New York, NY.
2. CGS (1985). Canadian Foundation Engineering Manual. Part (2nd ed.). Canadian Geotechnical Society, Vancouver, Canada.
3. Coates, B.G.(1995), Rock Mechanics Principles. Energy Mines and Resources, Ottawa, Canada, Monograph 874.
4. Findlay, J.D., Brooks, N.J., Mure, J.N.,& Heron W.(1997). Design of axially loaded piles-United Kongdom practice. *Design of Axially Loaded Piles-European Practice*, Eds:De Cock & Legrand, Balkema, Rotterdam.
5. Kulhawy, F.H., Goodman, R.E.(1980). Design of foundations on discontinuous rock. *Int. Conf. on Struc. Found. on Rock*, Ed:P. J. N Pells, Balkema, Rotterdam, 209~220.
6. Peck, R.B., Hanson, W.E., & Thornborn, T.H.(1974) *Foundation Engineering*.(2nd ed.). John Wiley and Sons, New York.
7. Rowe, R.K., & Armitage, H.H.(1987) Theoretical solutions for the axial deformation of drilled shafts in rock. *Can. Geotech. J., Ottawa, Canada*, 24, 114-125.
8. Rowe, R.K., & Armitage, H.H.(1987) A design method for drilled piers in soft rock. *Can. Geotech. J., Ottawa, Canada*, 24, 126-142.