

암반에 근입된 말뚝의 선단 거동 특성에 관한 축소모형시험 연구 Scaled Test on the Behavior of the Toe of Drilled Shaft on Rock Mass

박완서¹⁾, Woan Suh Park, 최세근²⁾, Se Keun Choi 전석원³⁾, Seokwon Jeon, 한용희⁴⁾, Yong Hee Han

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

2) 서울대학교 에너지시스템공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Energy System Engineering, Seoul National University

3) 서울대학교 에너지시스템공학과 대학원생, Graduate Student, Dept. of Energy System Engineering, Seoul National University

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

SYNOPSIS : Despite of the increasing number of the application of drilled shaft piles in construction site, most studies on pile capacity have been focused on the side shear resistance. But it is common that the drilled shaft is socketed on the rock so as to use its bearing resistance. The prediction of the end movement and characteristics of the bearing capacity of the pile is great important as well.

Therefore, a series of scaled model tests were carried out in order to study the characteristics of the bearing capacity on rock mass. The material of the test block was cement mortar which was mixed with sand, cement and water, and the size of a test block size was 240×240×240mm. The axial load was applied by a miniaturized pile of 45mm in diameter and flat jacks and steel plate were used for confinement to simulate the real underground loading conditions. The relation of load-displacement was measured in various different conditions of rock mass such as strength, discontinuity of the rock mass and in-situ stress, so $q-w$ curves of the end of the pile were presented for each condition.

Key words : bearing capacity, rock mass, model test

1. 서 론

암반상에 놓여지는 직접기초 또는 말뚝기초의 선단 거동과 지지력에 대한 예측식에서 암반(rock mass)의 불연속면 특징을 고려하여 계산하는 제안식이 있지만, 대부분 암석(intact rock)의 일축압축강도만을 이용하여 말뚝의 지지력을 설계한다. 그러나 말뚝이 근입되는 지반에는 강도특성 이외에도 다양한 불연속면이 존재하고 있으며, 말뚝을 통해 가해진 하중은 불연속면으로 구분되어진 암반 블록간의 상호작용을 통해 지중으로 하중이 전이되게 한다. 특히, 최근 도심지 공사에서 현장타설말뚝의 사용이 급격하게 증가하면서 말뚝의 거동 특성 연구가 활발하게 수행되어지고 있으나 대부분 말뚝의 주면마찰저항에 대해서 국한되어 있는 현실이며, 선단 거동과 관련된 연구는 수행된 사례가 거의 없는 실정이다. 이에 따라 말뚝의 선단 거동에 대한 예측기법이 거의 없는 상황이며, 경제적인 설계를 위해서 선단 거동에 대한 연구가 절실히 필요한 상태이다.

본 논문은 암반에 근입된 말뚝의 선단 거동에 대한 지지력 및 거동 예측기법을 개발하기 위한 것으로서 지중의 암반상태와 응력상태를 모사할 수 있는 장치를 제작하여 모형실험을 실시하였고, 시멘트 모르타르를 이용한 축소모형실험을 통하여 말뚝의 선단지지거동에 영향을 주는 암반강도, 절리의 간격, 절리의 거칠기, 축압, 절리의 방향성에 대하여 고찰하였다.

2. 선단 지지력 예측식

말뚝의 선단지지력 예측기법은 국외에서 개발한 기법들이 대부분이며, 특히 작은 직경의 말뚝과 불연속면이 거의 없는 암반에서 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, 1987a & 1987b; 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 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 예측식(CGS, 1985)이 사용되기도 한다.

$$q_{max} = 3\sigma_c K_{sp} D \quad (2)$$

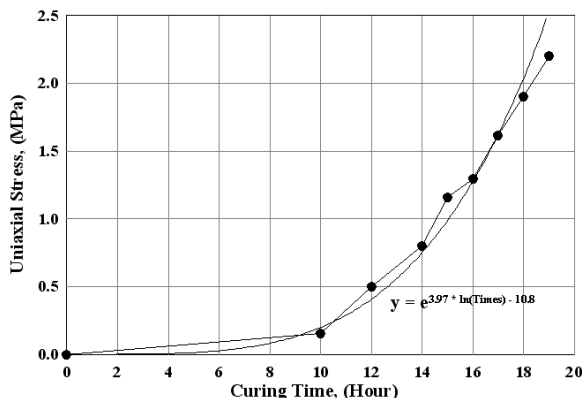
$$K_{sp} = [3 + s/B] / [10(1 + 300g/s)^{0.5}]$$

여기서 K_{sp} 는 경험상수, s 는 절리의 간격, B 는 말뚝의 직경, g 는 불연속면간의 틈(aperture)의 크기를 나타내고 있으며, $D = 1 + 0.4(L/B) \leq 3.4$ 는 말뚝의 깊이 상수이다.

3. 시료 및 실험 장치

3.1 시료의 성형

암반에 근입된 말뚝을 모사하기 위해서 암반의 거동과 유사한 시멘트 모르타르를 이용하여 시료를 제작하였으며, 시험시 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 교반한 후 강판으로 제작된 성형틀(그림1b)을 이용하여 시료를 제작하였다.



(a) 양생시간 및 일축압축강도



(b) 시료 성형틀 상자

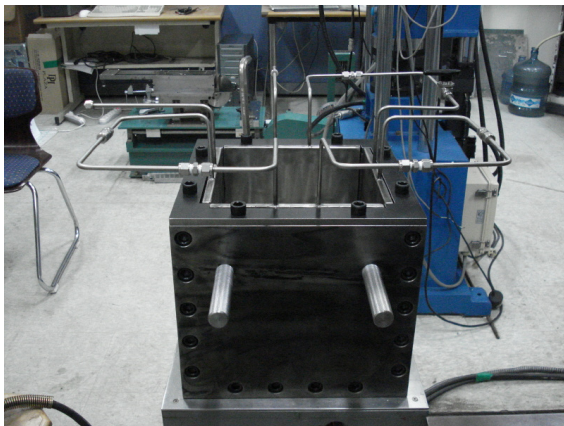
그림 1. 시료의 강도 특성 및 제작기구

본 실험은 현장에서 많이 사용되고 있는 말뚝에 대하여 길이 및 질량에 대한 축소율을 고려한 물성

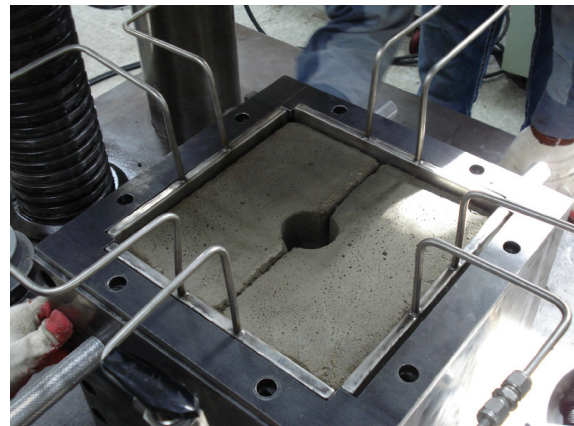
을 이용하여 실험을 수행하였다. 그리고 시료의 강도 측정이 매우 중요하기 때문에 그림1a에서와 같이 사전에 일축압축강도 시험을 실시하여 모르타르의 강도와 양생시간의 관계를 확인하였으며, 시멘트 모르타르의 제작과 양생과정에서 강도에 대한 값의 편차가 발생하기 때문에 모형실험 실시전 각각의 시료에 대하여 일축강도실험을 실시하였다.

3.2 실험 장치

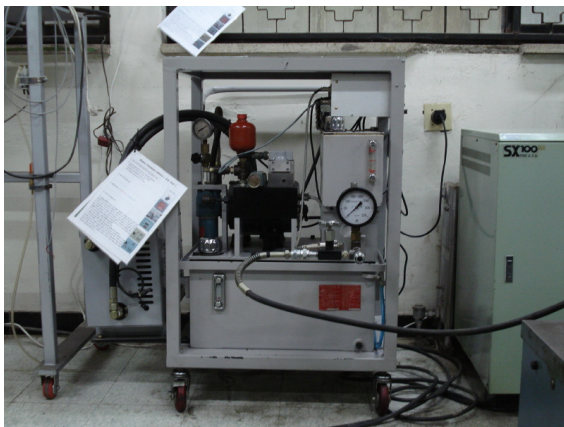
현장타설말뚝은 수m에서 수십m의 깊이로 시공되기 때문에 지중응력 상태에 따른 거동의 확인이 매우 중요하다. 이에 따라 시료의 측면과 상부에 필요한 하중을 가하여 여러 가지 지중 상태를 모사할 수 있는 시험 장치를 새로이 제작하였다. 시험 장치의 크기는 가압말뚝(D=45mm)으로 하중을 재하할 때 경계효과를 줄이기 위해서 시료의 수평 길이는 말뚝직경에 대하여 2D, 수직 길이는 4D의 영향범위를 고려하여 그림2a와 같이 240×240×240mm의 정육면체의 시료를 이용하여 실험을 수행할 수 있는 장치를 제작하였으며, 장치의 측면은 하중 재하시 변위가 발생하지 않도록 35mm 두께의 열처리 된 강판을 사용하였다. 시료에 가압되는 말뚝은 변위가 발생하지 않도록 강봉으로 제작되었고, 상부로부터 작용하는 압력은 필요한 하중 만큼의 강철판(t=20mm, 9kg)을 쌓아 올려 가압하였으며, 측면에 작용하는 압력은 일정하게 유압을 가할 수 있는 유압조절장치를 사용하였다. 이때 그림2c의 서보제어 유압장치는 연성의 재질로 제작된 flat Jack과 연결이 되어 실험시 설정된 압력을 정확히 시료에 가할 수 있도록 되어 있다.



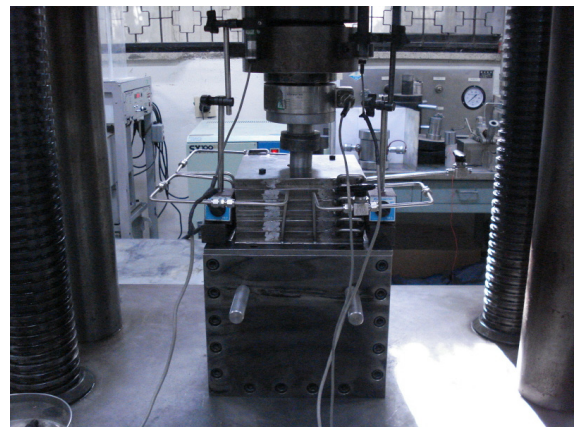
(a) 실험 장치



(b) 시료 및 가압 Flat Jack



(c) 소보제어 유압장치



(d) 하중기 및 시험 장치 Setup

그림 2. 실험 장치 및 주변기기

4. 시험방법 및 시험 종류

모형실험의 목적은 말뚝이 근입된 지중에 존재하는 불연속면과 현지응력상태에서 선단 거동을 확인하는 것으로서, 일반화된 암반 분류 기법인 RMR을 구성하는 있는 인자들을 고려하여 실험을 실시하였다.

그림3은 실험을 위하여 제작된 모형 시료의 형태와 제원을 나타낸 것이며, 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 절리 존재 여부 및 절리면 거칠기에 대한 특성
- (d~e) 절리의 방향성 및 절리의 간격을 고찰하고자 하였다.

모형말뚝을 통해 시료로 가압될 때 말뚝 주면과 시료가 부착이 될 경우 말뚝 선단에서 발생하는 $q-w$ 의 관계를 정확하게 파악할 수 없기 때문에 모형말뚝과 시료의 벽면 사이에 1mm의 간격을 두어 말뚝의 두부에 가해진 하중이 선단에 곧바로 작용할 수 있도록 하였다.

시료 성형시 절리면의 거칠기는 Cruden(1979)이 제안한 절리 모사 방법을 적용하여 3가지 형태의 JRC를 나타내어 시료를 제작하였고, 수평과 수직 절리는 모형틀을 이용한 시료 제작시 얇은 강판을 사용하였다. 재하방식은 1mm/min로 가압하는 변위제어방식을 적용하였으며, 작용하는 하중과 발생하는 변위는 하중계와 2개의 변위계를 이용하여 측정하였다.

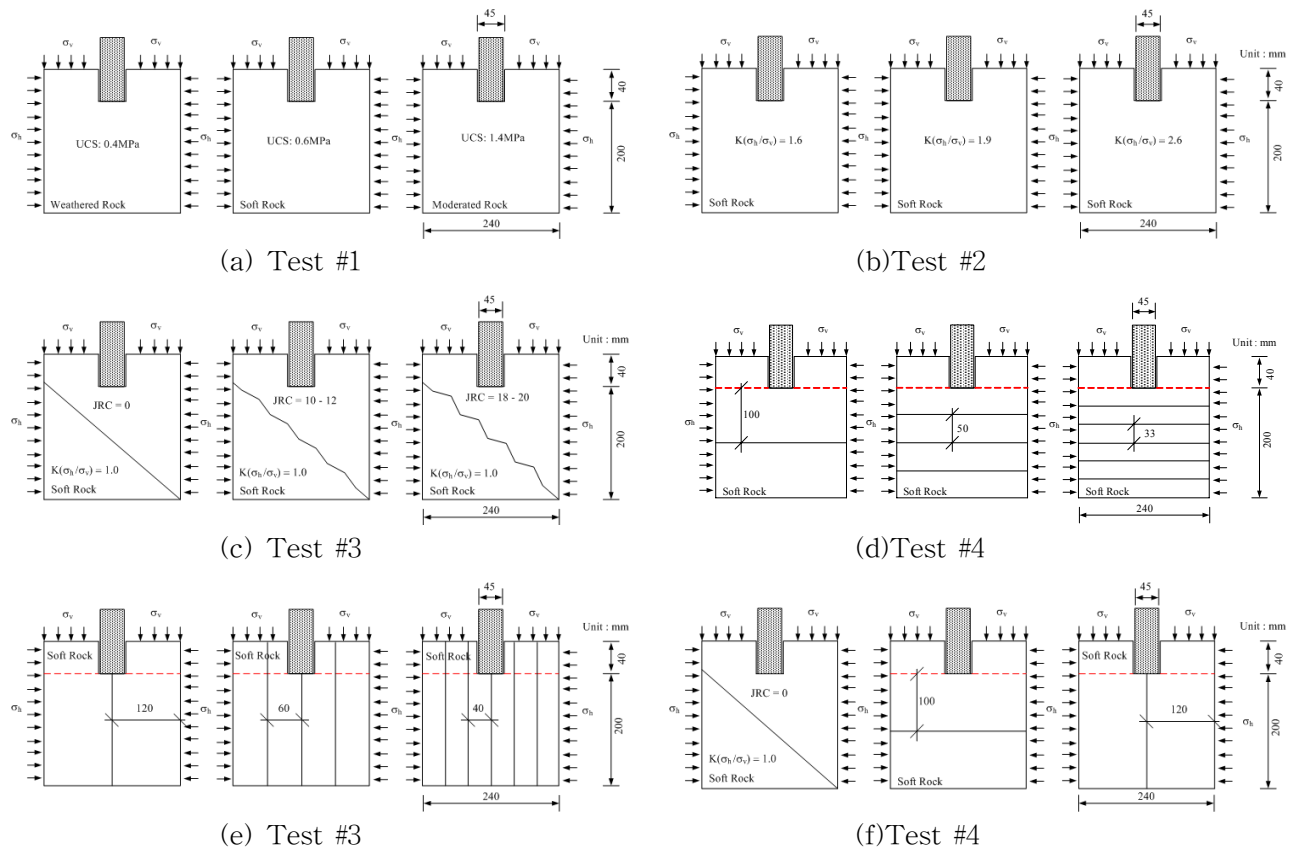
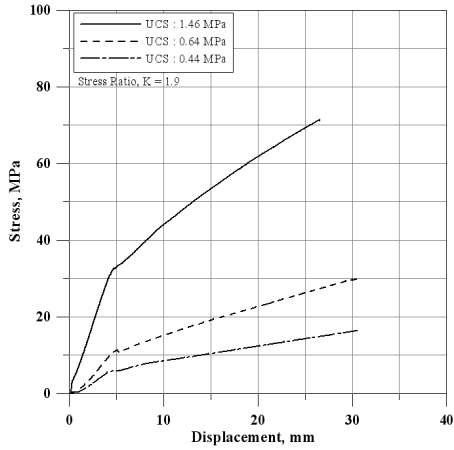


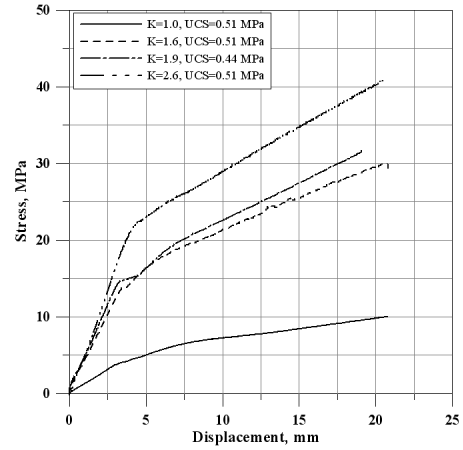
그림 3. 모형의 형태와 제원

5. 시험결과

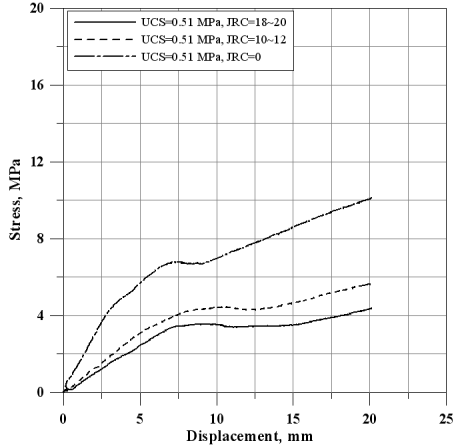
그림 4는 하중 실험을 통해 얻어진 $q-w$ 의 관계곡선을 나타내고 있다. 그림4a와 4b에서처럼 강도와 구속압이 클수록 $K_s = \sigma/\delta$ 가 더욱 커지는 경향을 보이고 있으며, 그림4c의 절리면 거칠기 효과의 시험 결과에서 보는 것과 같이 하중이 작용하는 응력 범위내에 절리면의 접촉면이 넓을수록 K_s 값이 작은 것을 확인 할 수 있었다.



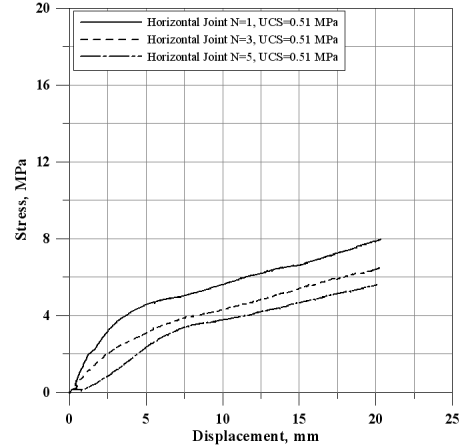
(a) 강도에 따른 거동 분석



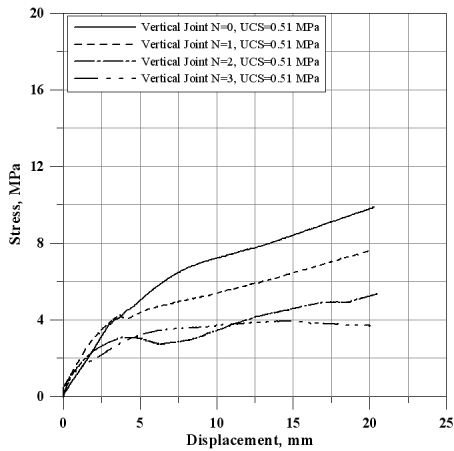
(b) 구속압에 따른 거동 특성 분석



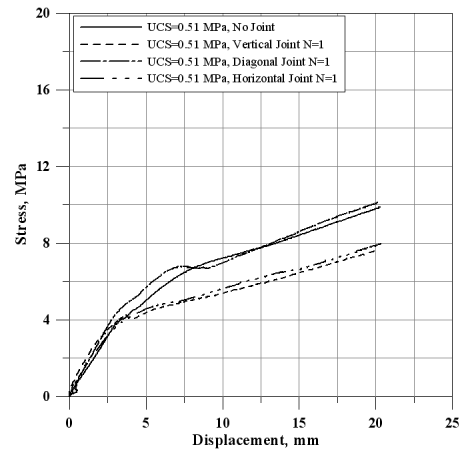
(c) 절리면 거칠기의 따른 거동 분석



(d) 절리의 수평 간격에 따른 거동 분포



(e) 수직 절리 간격에 따른 거동 분석



(f) 절리의 방향성에 따른 거동 분석

그림 4. 시험조건의 변화에 따른 하중-변위 그래프의 변화 양상

그림4d~f는 절리면의 영향에 따른 거동특성을 나타낸 것으로써 절리의 수가 많은 수록 더 많은 변형이 발생하였다.

6. 결론

암반에 근입된 말뚝의 거동 특성을 분석하기 위해서 3축 방향으로 가압할 수 있는 축소모형 실험장치를 제작하였다. 시멘트 모르타르를 이용하여 시료를 제작하여 여러 형태의 절리면과 지중상태를 모사하였고, 변위제어를 통해 하중재하 실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 말뚝하부에 놓여진 암반의 강도와 구속압에 따라 선단부의 거동특성이 많은 영향을 받고 있었으며, 강도가 크고 축압계수가 클수록 K_s 값과 지지력이 증가함을 확인할 수 있었다.
- 2) 절리면을 포함하는 지반의 거동 특성에 대한 실험에서 말뚝의 응력 영향 범위내에 존재하는 절리면의 면적이 더 넓을수록 K_s 값이 낮아지는 경향을 보였다.
- 3) 수직절리의 간격에 대한 실험에서 하중 재하시 말뚝 하부에 위치하고 있는 절리에서 좌굴에 의한 파괴가 발생하였으며, 그림4e와 같이 수직 절리의 폭이 좁고 절리의 개수가 많을수록 변위가 더 많이 발생하였고, 절리의 개수가 적을 경우에는 수직 절리와 수평 절리를 포함한 시료의 거동이 유사하게 나타났다.

향후에 금번 시험결과를 이용하여 다양한 조건에서 말뚝의 선단 거동의 특성을 분석할 예정에 있으며, 이를 통하여 실제 수행된 말뚝의 시험결과와 비교하여 국내 지반환경에 적합한 지지력 예측기법을 제안코자 한다.

참고문헌

1. ASCE (1996), Rock Foundation: Technical Engineering and Design Guides as Adopted from the US Army Corps of Engineers. No 16, ASCE Press, New York, NY.
2. CGS (1985), Canadian Foundation Engineering Manual, Canadian Geotechnical Society, Vancouver, Canada.
3. Coates, B.G.(1967), *Rock Mechanics Principles*. Energy Mines and Resources, Ottawa, Canada, Monograph 874.
4. Cruden, D.M.(1979), Estimating Joint Roughness Coefficients, Ottawa, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 16. pp. 303~307
5. Findlay, J.D., Brooks, N.J., Mure, J.N., Heron W.(1997), Design of axially loaded piles-United Kingdom practice. *Design of Axially Loaded Piles-European Practice*, Balkema, Rotterdam.
6. Kulhawy, F.H., Goodman, R.E.(1980), Design of foundations on discontinuous rock. *Int. Conf. on Struc. Found. on Rock*, Balkema, Rotterdam, 209~220.
7. Peck, R.B., Hanson, W.E., Thornborn, T.H.(1974), *Foundation Engineering*. John Wiley and Sons, New York.
8. Rowe, R.K., Armitage, H.H.(1987a), Theoretical solutions for the axial deformation of drilled shafts in rock. *Can. Geotech. J., Ottawa, Canada*, 24, 114-125.
9. Rowe, R.K., Armitage, H.H.(1987b), A design method for drilled piers in soft rock. *Can. Geotech. J., Ottawa, Canada*, 24, 126-142.