

암반 근입 현장타설말뚝의 선단지지 특성에 관한 연구 - 축소모형 실험을 중심으로 -

최세근, 전석원(서울대학교 에너지시스템공학부)

박완서(삼성물산 건축ENG팀)

1. 서론

현장타설말뚝은 시공시 소음 및 진동이 거의 없고, 지지층의 깊이에 구애받지 않으며, 어떠한 토질조건에서도 시공이 가능하다는 특징을 가지고 있으므로 매우 효과적인 기초공법이라 할 수 있다(1989, 대한주택공사). 최근 대형건물 및 구조물이 시공되는 사례가 증가함에 따라 앞으로 현장타설말뚝의 시공수요는 더욱 더 증가할 것으로 전망이 된다. 하지만 국내의 현장 타설말뚝에 대한 연구는 다른 기초공법의 연구에 비하여 상대적으로 미진한 실정이다. 특히 현장과 관련된 사례 연구가 빈번하며 이를 바탕으로 한 경험적 연구가 주류를 이루고 있는 실정이다. 최근 이명환과 조천환(2004)에 의하여 암반층에 지지하는 현장타설말뚝의 설계기법을 위한 연구가 진행되기도 하였으나 이 역시 경험적인 자료에 의존하여 앞으로 체계적인 실험 연구 결과와 해석이 필요할 것으로 생각된다. 현장타설말뚝의 설계는 주로 주면마찰력과 선단지지력을 기준으로 이루어지는데 하중과 침하량이 작은 구간에서는 주면마찰력의 비율이 크고, 하중과 침하량이 커짐에 따라 선단지지력이 커지는 경향을 보인다(1989, 대한주택공사). 그러나 설계자들이 대부분 말뚝의 초기 거동에 민감하기 때문에 선단지지력 보다는 주면마찰력에 대한 연구가 그동안 많이 수행되어 왔으며 이러한 결과로 선단지지력에 대한 연구결과는 부족한 실정을 보이고 있다.

본 연구에서는 현장타설말뚝의 선단지지력에 대한 연구를 현장단위에서 실내규모로 전환하고, 체계적이고 신뢰성 있는 실험 결과를 얻음으로써 실험결과를 정량적으로 함수화하여 말뚝의 선단지지력에 대한 이해를 높이기 위하여 선단지지력 및 거동 평가를 위한 축소모형 실험을 수행하였다. 축소모형실험에서는 현장의 경계 조건을 차원해석을 통해 축소율로 환산하여 현장 상태를 실험실에서 유사하게 재현할 수 있다. 또한 이 실험이 물리적이고 실제적인 실험이기 때문에 그 결과를 가시적으로 확인할 수 있는 장점이 있어, 축소모형실험을 통하여 말뚝의 선단부분과 암반 사이의 변형거동을 평가하고 불연속면을 포함한 암반의 하중전이 메카니즘을 규명하는데 매우 유용하게 활용될 수 있으리라 생각된다.

2. 실내실험 계획

2.1 차원해석

현장타설말뚝의 지반특성 및 현장조건을 실내모형실험에 잘 반영하도록 하기 위해서는 모델링의 규모 및 물성이 객관적이고 사실성에 근거하여 결정되어야 한다. 본 연구에서는 실내실험 모델의 크기 및 형상을 결정하기 위하여 차원해석을 이용하도록 하였다. 차원해석이란 가속도, 점성, 에너지 등과 같은 물리적 성질을 길이(L)·질량(M)·시간(T)의 기본적인 차원으로 바꾸기 위해 물리학·공학에서 사용하는 기법으로, 이 기법은 물리계(또는 물리계의 모형들) 사이의 상호관계와 그들의 특성에 대한 연구를 용이하게 하고 일치하지 않는 단위계 사이에서 생기는 문제들을 피할 수 있는 장점이 있다.

본 연구에 적용될 실내 실험 모델의 크기는 차원해석을 통하여 결정하도록 하였으며, 실험장치가 수용 가능한 범위 내에서 그 크기를 결정하도록 하였다. 합리적인 시료의 크기를 선정하기 위해서는 현장타설말뚝이 시공되는 현장의 지반강도 및 변형계수는 실제 실내에서 실험하는 모형재료의 강도와 변형계수의 축소율이 같은 범주에 속하는 것으로 사용해야 한다. 그러나 축소모형실험에서 강도 축소율을 기준으로 모형재료를 구성할 경우 암반의 변형거동을 나타내주는 변형계수의 축소율이 부합하지 않으며, 반대로 변형계수를 기준으로 모형재료를 구성할 경우 지반의 강도가 부합되지 않는 경향이 있다. 따라서 지반의 강도와 변형계수를 동시에 만족하는 축소 모형재료를 사용하는 것이 이상적이지만, 이러한 축소모형재료는 현실적으로 존재하지 않으므로 본 연구에서는 현장타설말뚝과 현지 암반과의 변형거동을 관찰하는 것을 주목적으로 하여 강도를 중심으로 모형재료를 선정하도록 하였다. 따라서 전체적인 축소율 산정은 강도에 대한 차원해석 관계식을 이용하여 축소율을 산정하였으며 그 결과 본 연구모델의 축소율은 1/45 로 결정하여 수행하도록 하였다. 표 1은 차원해석을 통하여 결정할 수 있는 실내실험 모델의 축소율을 요약한 것이며, 이러한 관계식을 사용하여 실내실험 시 측정된 자료를 이용하여 현지 지반의 물리적 특성이 충분히 반영되도록 하였다.

표 1. 차원해석을 통한 실험모형의 축소율 관계 및 산정결과

물리적 성질	차원	축소율
길이	[L]	1 / 25
시간	[T]	1 / 5
질량	[M]	1 / 28125
강도, 응력 및 변형계수	[ML ⁻¹ T ⁻²]	1 / 45

현장타설말뚝의 실내실험에 있어 말뚝 선단부의 응력범위 및 분포는 현장단위의 실제 조건을 그대로 반영할 수 있는가에 대한 중요한 고려사항이 될 수 있다. 따라서 이를 검증하

기 위하여 본 연구에서는 수치해석 검증을 통하여 그 타당성을 검증하도록 하였다. 수치해석 검증 프로그램은 유한차분해석 프로그램인 미국 ITASCA의 FLAC2D 를 사용하였으며 말뚝의 직경을 다양하게 변화시켜가며 그 영향반경을 확인, 검토하는데 활용하였다(그림 1 참조).

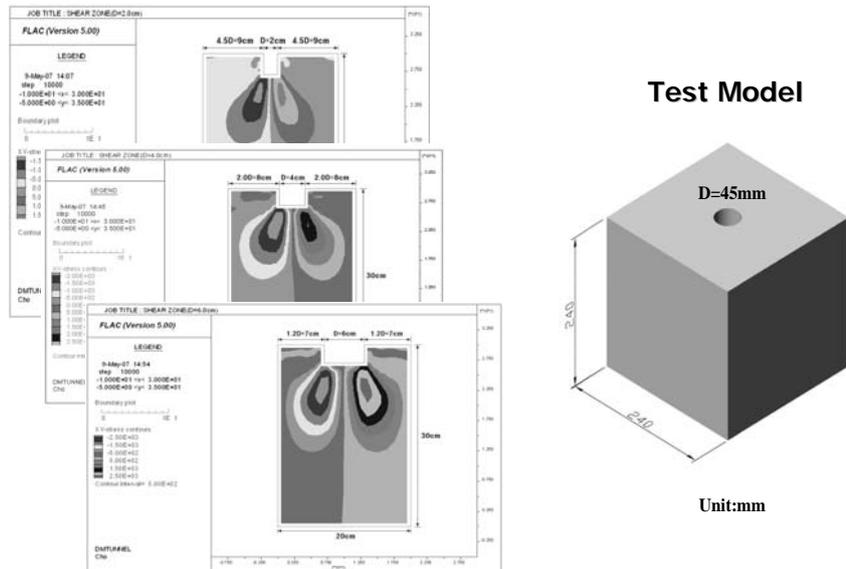


그림 1. 축소율을 고려한 모형시료의 응력 영향 범위 검토

2.2 시료의 형상 결정

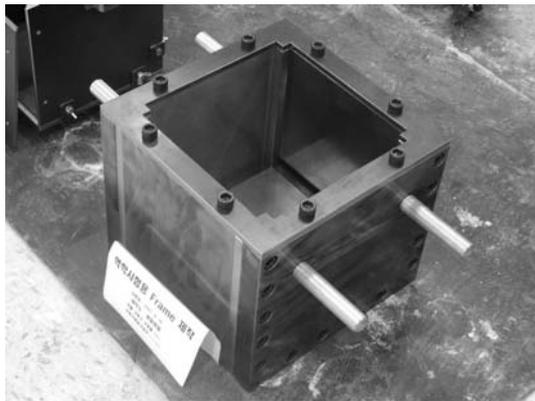
실험모델의 크기는 앞서 언급한 바와 같이 차원해석을 통하여 결정하고 모델의 형상은 본 연구목적에 부합되는 조건을 충족하도록 제작하였다. 특히 지중 암반의 축압계수를 고려하여 이에 따른 암반과 현장타설말뚝간의 상호관계를 분석해야 하므로 암반의 시료형상을 육방면체로 결정하여야 축압의 범위를 자유롭게 조정하여 실험할 수 있을 것으로 판단하였다. 현장타설말뚝의 형상은 현장시공말뚝과 같은 원주상의 형태를 유지하여 실험하고, 말뚝의 지름과 길이에 대해서는 차원해석을 고려하여 현지어건과 동일한 범위내에서 모델링하도록 하였으며, 말뚝의 근입깊이는 말뚝의 지름을 기준으로 약 1D 정도의 일정한 조건을 유지하여 제작하였다(그림 3 참조).

3. 실험기구 및 실험방법

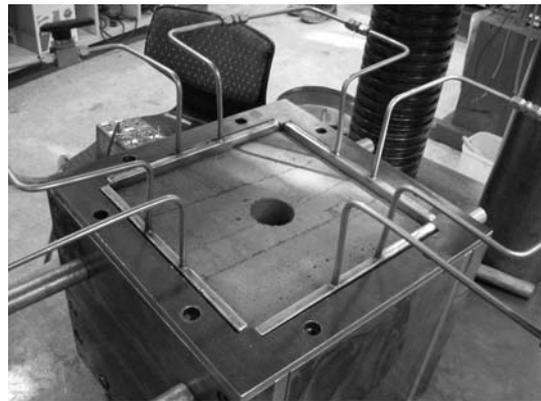
3.1 실험장치 및 제작

실내실험 장치는 차원해석 및 축소율 산정결과를 이용하여 가압말뚝을 직경 45 mm로 하고 그림 2와 같이 240 × 240 × 240 mm의 정육면체 시료를 시험 가능하도록 하였다. 또한 본 연구에서는 축압제어가 가능한 모형 압축시험 프레임을 고안하여 제작하였으며 프레

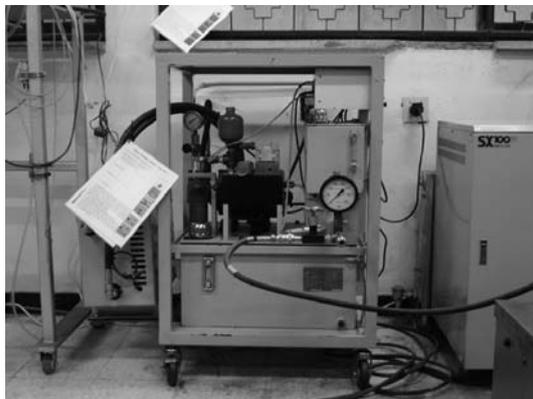
입의 두께는 측벽변위를 막기 위하여 충분히 크게(35~50 mm)하였고 편심 및 변위억제를 위하여 열처리된 평면강판을 재질로 사용하였다. 시료의 측압 제어는 본 연구를 위해 특별히 제작한 스테인리스 스틸의 플랫폼을 사용하였으며 지중의 수직응력을 고려하기 위해서 강철판($t=20$ mm, 약 9.0 kg)을 이용하여 시료의 상부면에 사하중으로 작용하도록 하였다. 플랫폼에 공급되는 유압은 30 MPa 용량의 서보제어가 가능한 유압펌프를 사용하였으며 가압장비는 200 ton 하중기를 사용하였고, 변위 측정은 LVDT를 2 곳에 설치하여 계측하도록 하였다(그림 2). 모형 가압말뚝의 재하방식은 1 mm/min의 변위제어 방식을 채택하여 실험결과를 용이하게 분석하도록 하였다.



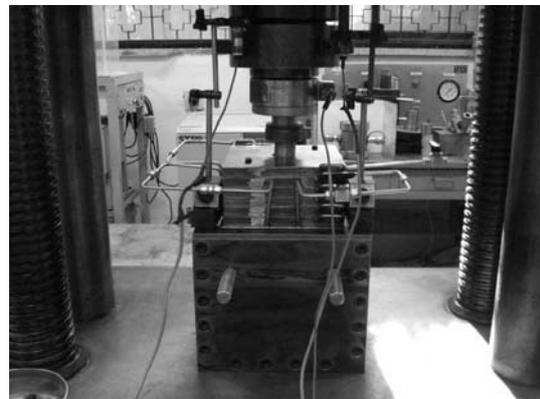
(a) 모형시험 프레임



(b) 시료 및 가압 플랫폼



(c) 서보 제어 유압장치



(d) 하중기 및 시험 장치 셋업

그림 2. 모형시험 프레임 및 시험장비

3.2 실내실험 방법

암반에 근접한 현장타설말뚝의 선단지지력을 평가하기 위해서는 우선적으로 암석의 압축강도를 고려하여야 하겠지만 무엇보다 불연속면의 영향정도를 함께 고려하여야 한다. 그러나 기존의 경험적 연구방법에서는 이를 정량적으로 표현하기가 어려우므로 국외의 경우 Canadian Geotechnical Society(1992)이나 AASHTO(2000)에서는 불연속면에 대하여 경험적 무차원 계수를 활용하여 반영토록 하였으며, 국내에서도 일부 설계기준에 이들의 기준과 동일하게 적용하여 활용하고 있다. 그러나 이들은 모두 경험에 의한 정성적인 평가방법

이며 설계자들이 대부분 암석의 일축압축강도(UCS)에 의존하여 경험적으로 지지력을 산정하는 경우가 많으므로 현장타설말뚝이 근입되는 지반조건에 부합한 좀 더 현실성있는 조건들에 대한 정량적인 실험결과가 필요할 것으로 판단되었다. 따라서 본 실험에서는 다음의 다섯 가지 지반조건을 선정하여 선단지지력에 미치는 중요인자 및 그 영향정도를 찾으려 하였다(그림 3 참조).

- (a) 암반의 강도에 따른 하중-변위 특성
- (b) 측압계수($K = \sigma_h / \sigma_v = 1 \sim 2.6$)에 따른 지지력 특성
- (c) 단일 경사 절리면의 거칠기(JRC)에 따른 지지력 특성
- (d) 수평 절리면의 RQD에 따른 지지력 변화
- (e) 수직 절리면의 RQD에 따른 지지력 변화

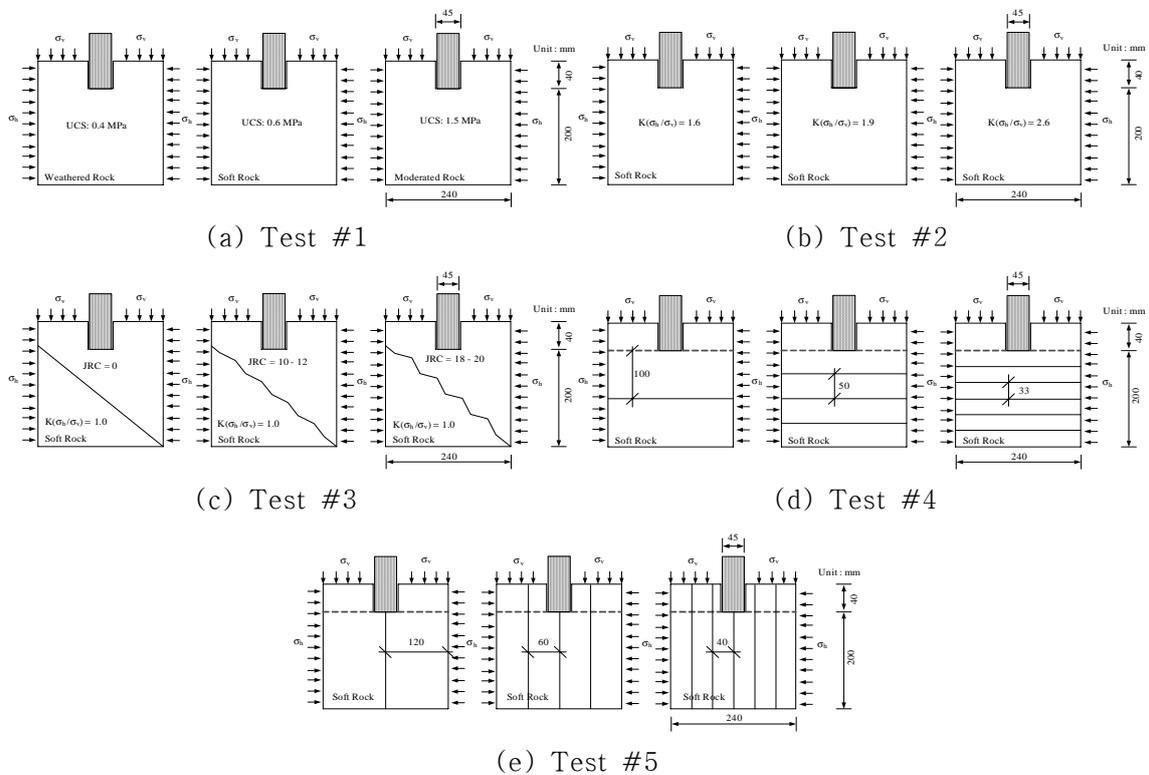


그림 3. 실내실험 모델의 종류

3.3 시료의 성형

시멘트 모르타르는 양생기간에 따라 강도의 범위가 넓으며 암반의 역학적 거동을 잘 모사할 수 있는 것으로 알려졌다(윤용균 외, 1987; 이희근과 양형식, 1990; 김중우 외, 2004; 성백옥 외, 2004; 배성호 외, 2005; 천대성외, 2007). 따라서 본 실험에서는 시험시 필요한 강도의 발현 및 시료 제작시 성형편의를 고려하여 시멘트 : 모래를 1 : 2, W/C=45 %로 결

정하고, 모르타르의 균일성을 유지하기 위하여 0.8 m³의 용량인 전동 레미콘을 이용하여 10분간 교반한 후 시료를 성형하였다. 본 연구에서는 시료의 강도 측정이 매우 중요하므로 그림 4와 같이 양생시간에 따른 시료의 압축강도 변화를 확인하여 축소율에 맞는 원하는 강도의 시점에서 말뚝 모형시험이 가능하도록 사전 준비하였다. 또한 차원해석을 통하여 결정된 말뚝모형시료를 성형하기 위하여 특별히 고안된 시료성형틀을 이용하여 시료성형이 용이하도록 준비하였다.

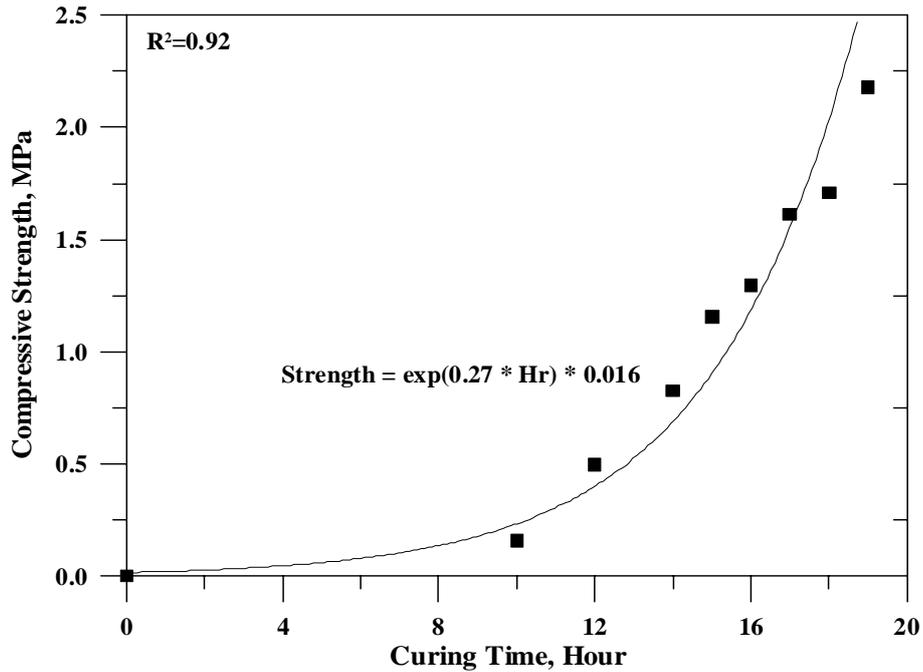


그림 4. 양생시간에 따른 모르타르의 강도변화 곡선

4. 실험결과 및 해석

4.1 암반강도를 고려한 거동 특성 시험

암반강도에 따른 말뚝의 선단지지 거동 실험은 일축압축강도가 다른 다양한 시료를 성형하여 그 거동 특성을 분석하고자 하였다. 암반강도를 고려한 거동 특성시험에서 축압계수가 ($K = \sigma_h / \sigma_v$)가 1.9인 경우 시료의 강도가 증가함에 따라 나타나는 하중-변위 곡선은 그림 5(a)와 같다. 시료의 강도가 증가함에 따라 초기 기울기 값이 증가하는 경향을 보이며, 시료의 강도가 클수록 시료의 파괴로 인하여 응력이 순간적으로 크게 떨어지는 경향을 보였다. 이는 시료의 강도가 커지면서 시료 자체가 취성파괴의 거동을 보이기 때문인 것으로 보인다. 응력-변위 곡선을 통하여 항복점까지의 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)과 시료의 일축압축강도(UCS)를 비교하여 분석한 결과 $K_c = 4.1\sigma_c$ 의 상관관계를 보이며 시료의 강도 증가에 따

라 일정한 경향을 나타내었다(그림 5).

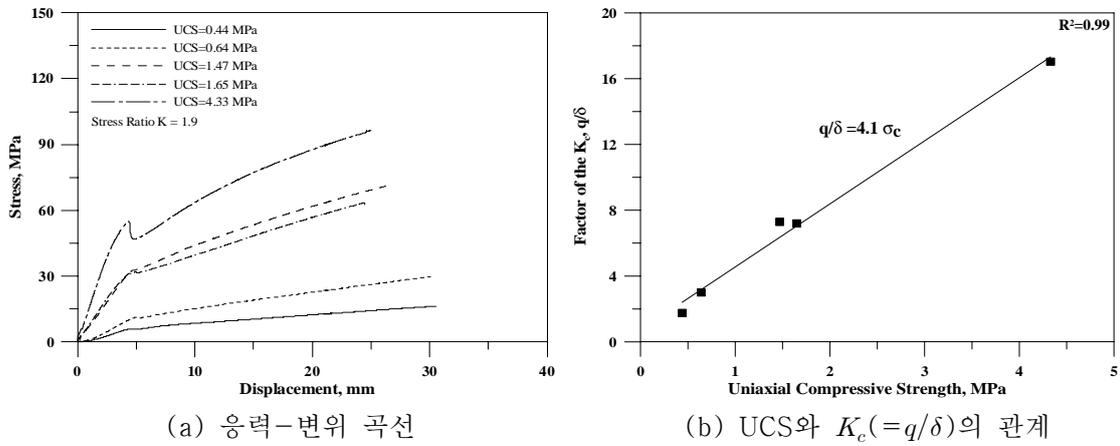


그림 5. 강도변화에 따른 응력-변위 곡선 결과

4.2 현지응력(In-situ)을 고려한 거동 특성 시험

현지응력의 크기에 따른 말뚝의 응력-변위 곡선의 변화를 관찰하기 위하여 본 실험을 위해 특별히 제작된 시험장치를 통해 측압계수($K = \sigma_h / \sigma_v$)에 따른 지지 거동 특성을 분석한 결과, 측압계수가 증가함에 따라 말뚝의 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)이 증가하는 경향을 보였다(그림 6). 측압계수의 변화는 일정수직응력을 기준으로 수평응력을 조정하여 실험하였으며 측압의 작은 변화에도 말뚝의 선단지지 거동이 민감하게 영향을 받는 것으로 나타났다. 측압계수(K)와 말뚝의 초기 기울기 값의 상관관계는 $K_c = 0.6K$ 로 나타났으며 측압의 변화에 따른 일정한 경향을 확인할 수 있었다.

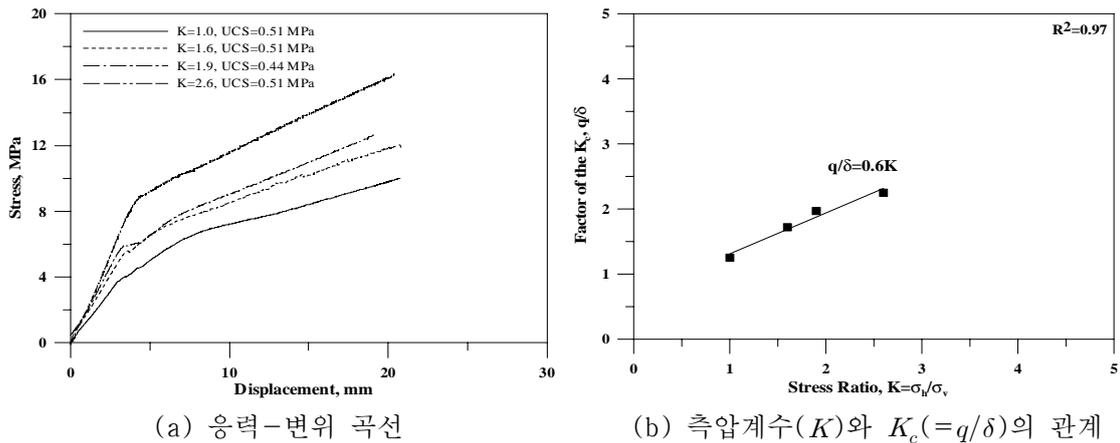
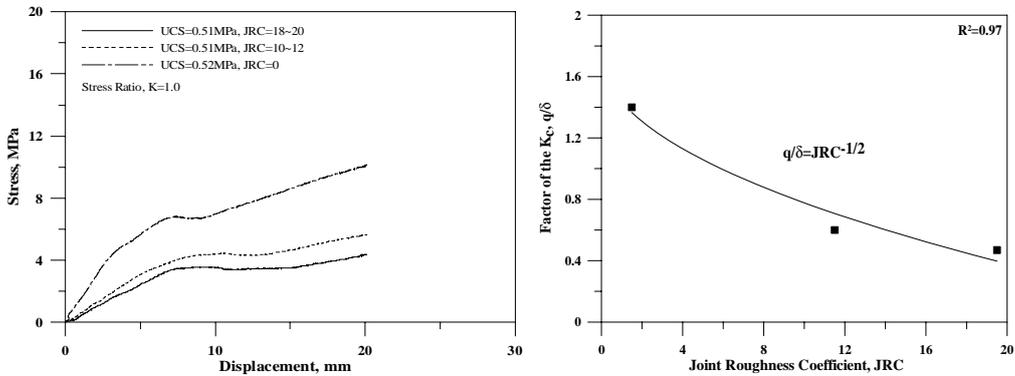


그림 6. 측압계수에 따른 응력-변위 곡선 결과

4.3 절리 거칠기(JRC)를 고려한 거동 특성 시험

본 실험에서는 단일 경사 절리면의 JRC가 말뚝의 지지거동에 미치는 영향을 확인하기 위하여 JRC를 0-2, 10-12, 그리고 18-20의 3부분으로 크게 나누어 시료를 성형하였다. JRC 산정은 Tse & Cruden(1979)의 제안식을 활용하였으며 함석판을 사용하여 거칠기를 성형하였다. 실험결과는 JRC가 낮을수록 말뚝의 지지력이 높은 결과를 나타내었는데 일반적인 생각과는 정반대의 경향을 보였다(그림 7참조). 이러한 결과는 불연속면의 전단강도가 낮을수록 시험틀 프레임의 반발력이 더 크게 작용한 결과인지 혹은 JRC가 클수록 절리선(joint trace)의 길이가 커지기 때문에 내재된 불연속면의 밀도가 커짐으로 지지력이 저하된 것인지 추가 실험 및 수치해석 검증을 통하여 확인해 보아야 할 것으로 보인다.

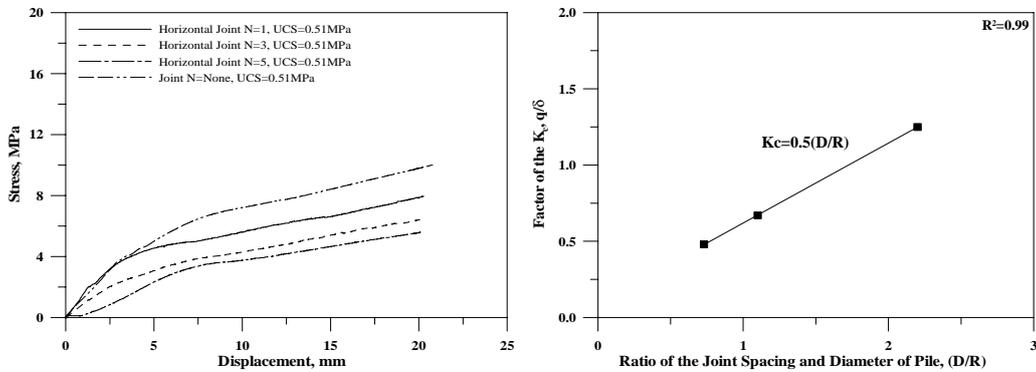


(a) 응력-변위 곡선 (b) JRC와 $K_c (=q/\delta)$ 의 관계

그림 7. 절리면의 거칠기(JRC)에 따른 응력-변위 곡선 결과

4.4 수평절리에서의 RQD를 고려한 거동 특성 시험

국외의 경우는 물론 국내에서도 현장타설말뚝의 극한선단지지력을 결정하는 주요인자에는 불연속면의 간격과 같은 RQD를 고려하는 경우를 흔히 볼 수 있다. Peck 등(1974)은 허용 선단지지력과 RQD 사이의 반경험적인 상관관계를 제시하기도 하였는데 이는 말뚝의 선단 지지력에 불연속면의 간격이 큰 영향을 미침을 의미한다.



(a) 응력-변위 곡선 (b) D/R 와 $K_c (=q/\delta)$ 의 관계

그림 8. 수평 절리에서의 RQD에 따른 응력-변위 곡선 결과

본 실험에서 RQD의 경우는 특히 정량적인 해석결과를 얻는데 매우 유용하기 때문에 이에 대한 영향을 검토하기 위하여 수평절리군과 수직절리군의 두 가지 그룹으로 나누어 RQD에 대한 영향정도를 파악하도록 하였다. RQD 산정은 시료의 성형이 가능한 범위내에서 정량적 실험결과 산출을 위하여 일정한 간격의 절리시료를 성형하도록 하였다. 따라서 절리의 수를 1, 3, 그리고 5개를 가지는 세가지 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 실험결과는 그림 8에서 나타나는 바와 같이 불연속면의 수가 많을 수록 말뚝의 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)이 낮아지는 경향을 확인할 수 있다. 실험결과에 얻어진 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)을 이용하여 절리의 간격(D)과 모형말뚝의 직경(R)비와 비교분석한 결과 초기 기울기 값(K_c)은 $K_c = 0.5(D/R)$ 의 상관관계식을 나타내었다.

4.5 수직절리에서의 RQD를 고려한 거동 특성 시험

수직절리에서의 RQD 영향정도는 수평절리에서의 시험결과와 같이 절리의 수가 많을 수록 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)이 낮아지는 경향을 확인할 수 있으며, 실험결과에 얻어진 초기 기울기 값($K_c = q/\delta$)을 이용하여 절리의 간격(D)과 모형말뚝의 직경(R)비와 비교분석한 결과 초기 기울기 값(K_c)은 $K_c = 0.4(D/R)$ 의 상관관계식을 보였다(그림 9).

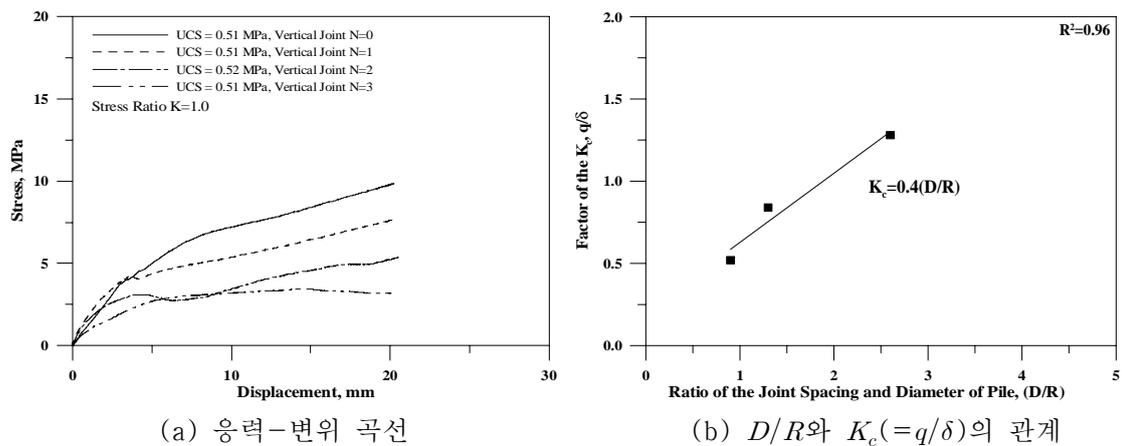


그림 9. 수직 절리에서의 RQD에 따른 응력-변위 곡선 결과

5. 결론

본 연구는 암반에 근입한 현장타설말뚝의 선단지지 특성에 관한 실험적 접근을 통하여 선단지지력의 영향인자를 분석, 확인하고 그들의 관계를 고찰하는데 목적을 두었다. 본 축소모형실험으로부터 계획된 일련의 실험모델들을 통하여 얻어진 실험 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- 1) 현장타설말뚝의 선단지지력은 암반에 내재되어 있는 여러 요인들에 영향을 받고 있으나 응력-변위 곡선 상의 초기 기울기값(K_c)은 현지응력, JRC, 그

리고 RQD의 영향보다는 상대적으로 암반의 강도에 매우 밀접한 영향 ($K_c = 4.1\sigma_c$)을 가지고 있음을 확인할 수 있었으며, 이는 기존의 경험적 설계에서 암석의 일축압축강도만을 고려하여 지지력을 산정하는 방법을 지지해주는 결과라고 생각이 된다.

- 2) 그러나 현장타설말뚝의 선단지지력은 금번 실험 결과에서와 같이 시료의 구속압(K)에 따라 응력-변위 곡선이 민감한 반응을 보이고 있으므로 좀 더 정량적이고 합리적인 설계기준이 마련되기 위해서는 보다 많은 연구 및 검토가 필요할 것으로 보인다.
- 3) 절리암반의 선단지지 특성의 경우, 수평절리군과 수직절리군의 영향 정도의 차이는 상관관계식이 각각 $K_c = 0.5(D/R)$ 와 $K_c = 0.4(D/R)$ 를 보임에 따라 수평절리와 수직절리는 선단지지력에 비슷한 영향력을 보이는 것으로 판단이 된다. 그러나 $0 \sim 90^\circ$ 내의 경사절리에 대해서는 충분한 실험결과를 바탕으로 판단하여야 할 것으로 보인다.
- 4) 단일절리를 포함하는 시료에서 JRC의 영향 정도는 본 실험에서 JRC가 낮을수록 선단지지력이 높은 결과를 보였는데, 이 결과는 불연속면의 전단강도가 낮을수록 시험틀 프레임에 작용하는 힘에 의하여 측압이 작용한 결과인지 혹은 JRC가 클수록 절리선(joint trace)의 길이가 커지기 때문에 내재된 불연속면이 많음으로써 시료의 결함이 증가된 의미로 해석하여야 하는지에 대해서는 추가실험 및 수치해석을 통하여 검증해야 할 필요가 있을 것으로 보인다.

참고문헌

1. 김종우, 전석원, 서영호, 2004, 지하 채굴적이 지표 구조물의 안정성에 미치는 영향에 관한 모형실험 연구, 한국암반공학회지, Vol. 14, No. 1, pp. 43-53
2. 대한주택공사, 1989, 현장타설말뚝의 실용성 검토, pp. 21-78
3. 배성호, 전석원, 박의섭, 2005, 축소 모형시험과 개별 요소 해석에 의한 원형 공동 주변의 점진적 취성과 파괴 특성에 관한 연구, 한국암반공학회지 : Vol. 15, No.4, pp. 250-263
4. 성백옥, 전석원, 배성호, 2004, 이축압축시험에 의한 암석모사 시료의 원형 공동 주변 취성과 파괴 특성, 한국암반공학회 2004년 추계 학술발표회 논문집, pp. 119-134
5. 윤용균, 신중호, 양형식, 이희근, 1987, 불연속암반내 공동주위의 변형거동에 관한 모형 실험 및 수치해석, 대한광산학회지, Vol. 24, No. 5, pp. 299-309
6. 이명환, 조천환, 2004, 암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법 개발 연구 보고서, 건설교통부, pp. 1-87
7. 이희근, 양형식, 1990, 이방성 암반내 공동굴착과정에서의 주위 암반거동에 관한 축적 모형실험 및 수치해석, 한국자원공학회지, Vol. 27, No. 6, pp. 390-411
8. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원, 2007, 취성과 파괴수준과 파괴개시시전에 관한 진삼축 모형

실험연구, 한국암반공학회지, Vol. 17, No.2, pp. 128-138

9. AASHTO(American Association of State Highway and Transportation Officials), 2000, Bridge Design Specifications
10. CGS(Canadian Geotechnical Society), 1985, Canadian Foundation Engineering Manual, Vancouver, Canada
11. Peck, R. B., Hanson, W. E., and Thornburn, T. H., 1974, Foundation Engineering, John Wiley and Sons, pp. 361-374
12. Tse, R. and Cruden, D. M., 1979, Estimating Joint Roughness Coefficients, International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts, Volume 16, Issue 5, pp. 303-307