

# 스미어 현상이 발생한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변부 거동예측을 위한 변수분석

## A Parametric Study for Estimating the Side Performance of Drilled Piers Socketed in Smeared Rock

김 홍 택<sup>†</sup> · 남 열 우<sup>1)</sup>

Kim Hongtaek · Nam Yelwoo

**ABSTRACT** : Just as infill material can reduce the shear strength of a rock joint, a layer of soft material between concrete and the surrounding rock socket can reduce pile shaft resistance of drilled shafts socketed in rocks. This can also result from construction methods that leave smeared or remoulded rock or drilling fluid residue on the sides of the rock sockets after concrete placement. The nature of the interface between the concrete pile shaft and the surrounding rock is critically important to the performance of the pile, and is heavily influenced by construction practice. Characteristics of the concrete-rock interface, such as roughness and the presence of the soft materials deposited during or after construction can significantly affect the shaft resistance response of the pile. In this study, we conducted the parametric study to examine the performance characteristics of drilled shafts socketed in smeared rock under the vertical load with the code of finite difference method of FLAC 2D. As the results of the current research, the parameters that affect the settlement of the pile head and the ultimate unit shaft resistance could be identified.

**Keywords** : Drilled shaft, Soft material, Rock socket, Shaft resistance, Roughness, Parametric study

**요 지** : 충전물이 암 절리면의 전단강도를 감소시키는 것과 유사하게 콘크리트와 주변 암반근입부 사이의 연약한 물질은 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변저항력을 감소시킨다. 이러한 현상은 콘크리트 타설 후에 암반 근입부 측면에서 천공잔류물이나 스미어 또는 재성형 암반을 생성시키는 시공과정에서도 형성되게 된다. 콘크리트 말뚝과 주변 암반 사이의 접촉면의 특성은 시공법에 따라서 크게 영향을 받는다. 콘크리트 타설과정 또는 그 이후 형성되는 연약한 물질이 존재하거나 거칠기와 같은 콘크리트-암 접촉면의 특성은 말뚝의 주변부 거동에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 유한차분법 코드를 기반으로 하는 FLAC 2D를 이용하여 스미어현상이 발생한 암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동특성을 조사하기 위하여 변수분석을 실시하였다. 본 연구의 결과로서, 정적연직하중을 받는 암반에 근입된 현장타설말뚝의 극한주면저항력에 영향을 미치는 요소와 말뚝두부의 침하에 영향을 미치는 요소들을 확인할 수 있었다.

**주요어** : 현장타설말뚝, 연약한 물질, 암반 근입부, 주면저항력, 거칠기, 변수연구

## 1. 서 론

암반 절리면의 전단강도가 충전물에 의해서 작아지는 것과 마찬가지로, 주변 암반과 콘크리트 사이의 연약한 층은 말뚝의 주변저항력을 감소시킨다. 이것은 콘크리트 타설 후 암반 근입부의 측면에 천공액이 잔류하거나 근입부 암반이 재성형되거나 스미어현상이 발생한 암이 시공과정에서 발생하기 때문이다.

스미어현상이 예상되는 암반에서는 벤토나이트 슬러리의 사용과 관련된 시공시 시공관리의 정확성이 말뚝의 거동에 매우 큰 영향을 미친다. 벤토나이트를 사용하는 경우,

암반에 근입된 현장타설말뚝의 현재 설계 접근법은 주면저항력에 대해서 공칭저감계수를 가정하고, 임의의 유해한 영향을 제한하기 위해서 시공관리를 철저히 하도록 규정하고 있다. 보다 적절한 설계법은 여러 시공과정의 영향을 정량화하고 이를 통해서 실제 프로젝트에서 사용되는 시공법에 적합한 감소계수를 설계자는 구할 수 있다. 벤토나이트를 이용한 시공의 경우는 불필요한 과다설계를 피하기 위해서 주면저항력에 슬러리 시공법의 영향을 보다 자세히 이해하는 것이 필요한 것과 유사하게 스미어현상이 예상되는 암반에서도 설계인자들의 주변부 거동에 미치는 영향을 이해할 필요가 있다.

† 정희원, 홍익대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사(E-mail : htaek@hongik.ac.kr)

1) 정희원, (주)신성엔지니어링 지반공학부 부사장, 공학박사

본 연구에서는 FLAC 2D(Ver. 3.3)의 축대칭모형을 이용하여 스미어현상이 발생한 암반근입부에서의 주면저항력 발현기구를 확인하기 위하여 현재까지 스미어현상이 발생한 암반에 영향을 미치는 인자로 알려진 요소들에 대한 변수분석을 실시하고 이를 통하여 스미어현상이 발생한 암반의 거동특성을 조사하였다.

## 2. 기존연구검토

암반 근입부에 발생하는 스미어현상은 일반적으로 암종이 퇴적암일 때 우세하게 발생하는 것으로 알려져 있으며 퇴적암으로 형성된 단층대의 경우, 단층대에서 두 암괴의 상대적으로 큰 이동과 풍화작용 및 높은 수압 등에 의해서 단층면에 연약한 흙(특히 점토)과 같은 물질이 생성되는 현상을 말한다. 이것은 현장타설말뚝 시공시 말뚝 근입부 천공과정에서 천공액을 사용하거나 천공과정에서 주변지반으로부터 지하수가 유입되어 발생하게 된다. 천공 과정에서 지반의 스미어현상 발생은 이암(Williams, 1980; Holden, 1984; Baycan, 1996), 사암(Pells 등, 1980), 점토 쉘일(O'Neill과 Hassan, 1994)에서 발생한다고 보고되었다. Williams는 건조 상태로 이암을 천공한 근입부에서 10~15mm 두께의 스미어층을 관찰하였으며 재생성 물질을 제거하기 위해서 물을 근입부에 채웠다. 벤토나이트를 이용한 시공조건에서는 이암에 시공된 근입부로부터 추출한 접촉면 코어로부터 상당한 두께의 스미어층이 발생한 것이 Holden에 의해서도 관찰되었다. 이것은 여러 가지 천공 과정에서 스미어 현상이 이암 근입부에서 발생한다는 것을 의미한다. O'Neill과 Hassan은 미국 중서부 이암 쉘일에서 스미어 현상이 일반적으로 발생하며, 근입부 벽면에 자유수가 존재하는 경우

가속화된다고 보고하였다. 그들은 이들 풍화된 물질들이 천공시 흙과 같은 재료로 분해되기 쉽다고 보고하였다. 반대로 Pells 등은 사암에서 스미어 문제는 건조 또는 습윤 상태에서 근입부 천공에 의해서 악화되며, 천공과정에서 잔류수를 사용함으로써 효과적으로 근입부 벽을 청소할 수 있다고 보고하였다. 이를 통해서 일부 조건하에서 대부분의 퇴적암은 스미어현상이 발생하기 쉽다는 것을 알 수 있다.

Pells 등(1980)에서는 Sydney 사암 근입부에서 지반재료의 스미어현상과 천공잔류물이 상당히 많이 있는 것이 관찰되었다. 사암에서 Pells 등의 암반 근입부에서 벤토나이트 필터케이크와 벽의 스미어의 효과가 그림 1에 제시되어 있다.

유해한 층의 영향으로 발생하는 주면저항력의 큰 손실을 방지하기 위해서는 거칠기요소가 중요하다는 것이 지적되었다. Pells 등에 의해서 사암 근입부의 시공시 근입부 벽면으로부터 스미어를 제거하는 데에 물이 사용되어야 한다고 보고하였다. Hassan과 O'Neill (1997)은 점토질 중간 지반재료(IGMs) 근입부의 거동에 대한 스미어층의 영향을 조사하였다. 이들 연구에서 IGM이란 0.5MPa에서 5MPa 사이의 일축압축강도를 갖는 흙이나 암으로 정의하였다. 그들의 연구는 매끈하거나 거친 경우 및 스미어현상이 발생한 거친 근입부를 표현하는 이상화된 콘크리트-암 접촉면에 대한 탄소성 유한요소모델링을 포함한다. 그림 2는 이들의 연구에서 모델링한 스미어층을 가진 이상화한 콘크리트-암 접촉면을 나타낸 것이다. 채택한 근입부 조건은 북아메리카에서 풍화된 이암 및 쉘일에서 매끈하거나 거친 극한 조건의 근입부를 나타내는 것으로 판단된다. 암석의 일축압축강도가 2.4MPa인 거친 암 근입부에 대한 스미어층의 영향을 조사하였다. 그림 3에 거칠거나 매끈한 또는 거친 스미어현상이 발생한 근입부에 대한 Hassan과 O'Neill에 의해 예측된 주면저항력 거동을 제시하였다. 거칠고 스미어현상이 발생한 근입부에 대한 거동 예측은 매끈한 근입부에 대한 것과 유사하며, 최대전단응력이 깨끗한 거친 근입부에 대한 값

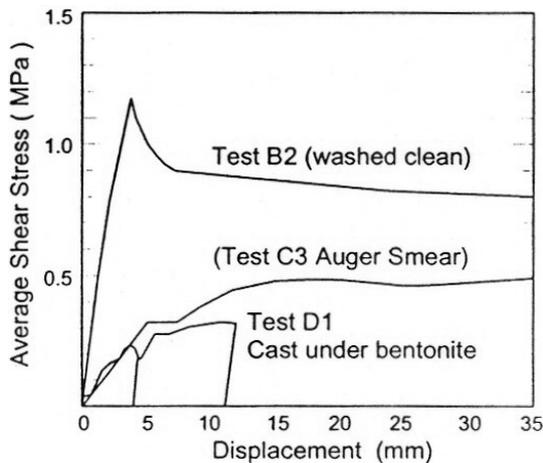


그림 1. 주면저항력에 벽체 스미어 오염과 벤토나이트의 영향(Pells 등, 1980)

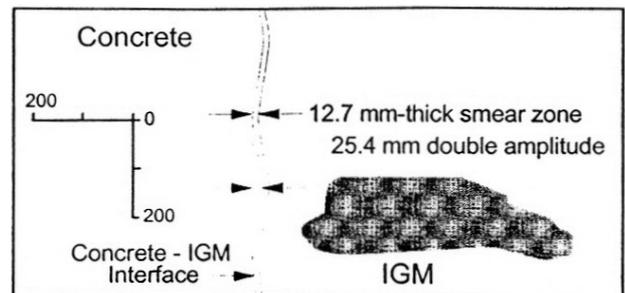


그림 2. Hassan과 O'Neill(1997)의 이상화한 거친 콘크리트-암 접촉면

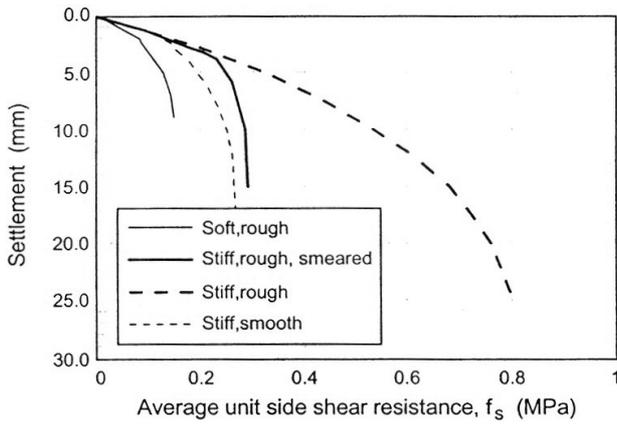


그림 3. 거친 IGM 근입부의 주변저항력에 주변부 스미어의 영향

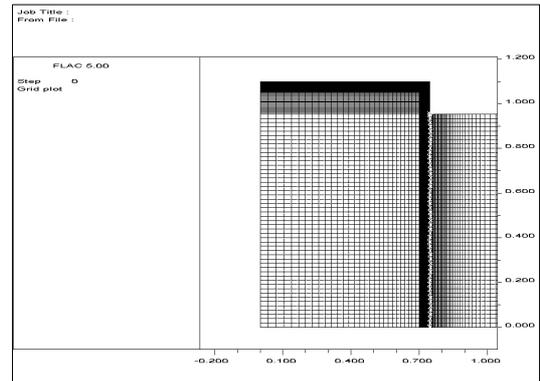
의 반보다 작다고 보고되었다. 이 연구를 통하여 대표적인 근입부 거칠기와 스미어층 두께의 범위에 기초하여 스미어 효과의 상·하한을 확인할 수 있다. 연구 결과가 점토질 중간 지반재료에 대한 설계법에 포함되어 있으며, 이것은 Hassan 등(1997)에 제시되어 있다. 이 방법은 근입부를 ‘거친’, ‘매끈한’ 및 ‘스미어현상이 발생한’, ‘스미어현상이 발생하지 않은’으로 분류하고 있다. 스미어현상이 발생한 경우, 거칠기 효과는 없어지며 근입부는 매끈한 근입부 거동을 한다고 가정한다.

Hassan 등(1997)의 설계법은 북아메리카 점토-셰일 근입부의 배수 조건( $c'=0$ )에 기초한 것으로, 주변저항력에 스미어층이 미치는 범위를 정량화하여 설계자가 확인할 수 있는 실용적인 설계법이다. 유한요소 code(ABAQUS)를 이용하여 변수분석을 실시한 연구결과(Hassan과 O'Neil, 1997)를 이용하여 실제 지반, 현장 상황에 적용하는 방법을 제시하였다. 접촉면에서의 미끄러짐 마찰각, 근입부의 콘크리트 압력, 천공홀의 스미어현상, 거칠기 및 지반재료의 일축압축강도, 탄성계수 등이 변수로 이용된다. 그러나 세계적으로 발견되는 스미어층 두께와 물성치 및 근입부 거칠기 특성의 전체 범위를 모델링한 것은 아니다. 이 때문에 이 방법을 다른 암중 및 국내 암중에 적용하는 것은 점토-셰일과 상당히 다른 거칠기 특성을 가지는 근입부이기 때문에 불가능하다.

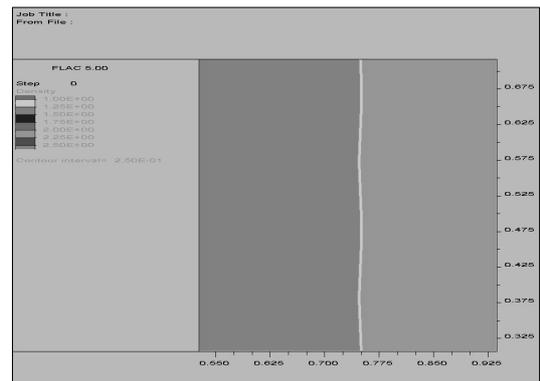
### 3. 해석방법, 결과 및 분석

#### 3.1 해석방법

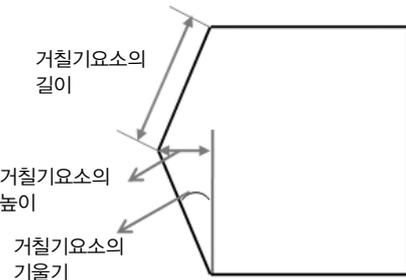
변수분석에 사용된 프로그램은 지반공학분야에서 널리 쓰이고 있는 FLAC 2D(Itasca Consulting Group, 1995)로서, 연속체역학에 기초한 프로그램으로 말뚝과 스미어층의 접촉면 및 암반과 스미어층의 접촉면을 제외한 부분은 연속



(a) 해석 모델링



(b) 접촉면에 대한 모델링 상세도



(c) 거칠기 요소의 기하학적 특성을 설명하기 위하여 사용된 용어의 정의

그림 4. 해석 모델링에 사용된 메쉬 및 거칠기 요소의 용어 설명

체로 가정하였다. 말뚝과 스미어층의 접촉면 및 암반과 스미어층의 접촉면에서는 interface 요소(그림 4)로 설정하고 해석을 실시하여 말뚝과 스미어층 및 암반 경계면의 미끄러짐과 분리 현상을 모델링하였다. 암반에 근입되는 현장타설 말뚝의 경우는 통상 균효과를 무시함으로 본 연구에서는 단항 형태의 현장타설말뚝에 대해서 축대칭모델(axi-symmetric model)을 이용하여 해석을 실시하였다. 수평방향 모델링은 대칭축으로부터 40D(D : 말뚝의 직경), 연직방향 모델링은 암반 근입부만을 모델링하였다. 또한 선단지지력 효과의 배제를 위하여 선단부 하부 지반은 모델링하지 않았다. 단지, 경계조건은 말뚝 하부는 자유단으로 설정하고, 스미어층 및 암반층 하부는 y축 방향의 변위를 억제하는 로울러

로, 암반층 측면은 x축 방향의 변위를 억제하는 로올러로 설정하였다.

콘크리트 말뚝은 등방성, 동질성, 탄성 솔리드요소로 모델링하였다. 콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 25.5 GPa이고, 포아슨비( $\nu_c$ )는 0.15이다. 암반 근입부의 적용 물성치는 균질한 등방성 재료로 가정하였다.

암반-말뚝의 접촉면은 연속된 삼각형 형태의 선형 세그먼트를 이어서 형상화하였다. 거칠기 높이는 조천환 등(2003)에 제시된 국내 현장에 대한 거칠기 측정자료로부터, 2mm, 4mm 및 6mm로 설정하였다. 그리고 거칠기 경사의 영향을 없애기 위하여 거칠기 경사는 4°로 일정하게 유지하였다. 충전물에 대한 해석 물성치의 결정과정은 Collingwood(2000)의 연구결과를 이용하였다. 이상의 입력치를 정리하면 표 1과 같다.

거칠기 요소와 스미어층 하나를 모델링하는데 약 100개의 요소를 사용하여 형상화하여 거칠기요소의 파괴면 형상을 확인하였으며, 말뚝과 스미어층 및 스미어층과 주변 암반의 접촉면(interface)을 따라서 발생하는 미끄러짐, 다이레이션 및 분리는 FLAC 프로그램상에서 제시하고 있는 개별요소법을 이용하였다. 본 연구에서 적용된 개별요소법은 Coulomb의 마찰모델을 사용하여 두 물질 사이의 미끄

러짐을 표현하였으며 접촉면에 사용된 Coulomb의 모델은 내부마찰각은 30°, 점착력 및 인장강도 성분은 없는 것으로 설정하였다. 또한 파괴로 정의할 수 있는 상태에 이르기 전의 상태는 탄성상태로 간주하여 FLAC 메뉴얼(Itasca Consulting Group, 1995)에 제시된 식 (1)을 이용하여 강성도( $F$ )를 결정하였다. 그리고 스미어층과 말뚝 사이의 접촉면은 비배수상태로 가정하여 다음의 식 (2)에  $\alpha=0.42$ 를 대입하여 부착강도를 결정하였다(Desai, 1977).

$$F = \max \left[ \frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{\min}} \right] \quad (1)$$

여기서,  $K, G$  : 각각 체적 및 전단탄성계수

$\Delta z_{\min}$  : 인접한 zone의 접촉면에 대한 수직방향으로 가장 작은 폭

$$c_{ua} = \alpha \times c_u \quad (2)$$

여기서,  $c_{ua}$  : 충전물과 말뚝 사이의 부착강도(kPa)

$\alpha$  : 부착력계수

$c_u$  : 충전물의 비배수전단강도(kPa)

표 1. 해석에 적용된 물성치

Case No.	암반의 탄성계수 (MPa)	암반의 내부마찰각 (°)	암반의 점착력 (kPa)	거칠기 경사 (°)	거칠기 높이 (mm)	근입부 최상부의 심도 (m)	암반의 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	스미어층의 탄성계수 (kPa)	스미어층의 비배수 전단강도 (kPa)	스미어층의 두께 (mm)	스미어층의 단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	말뚝 직경 (m)
1	100	37.5	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
2	500	37.5	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
3	1,000	37.5	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
4	500	35	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
5	500	40	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
6	500	37.5	50	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
7	500	37.5	100	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
8	500	37.5	75	2	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
9	500	37.5	75	6	4	10	21	800	50	3	1.4	1.5
10	500	37.5	75	4	4	5	21	800	50	3	1.4	1.5
11	500	37.5	75	4	4	15	21	800	50	3	1.4	1.5
12	500	37.5	75	4	2	10	21	800	50	3	1.4	1.5
13	500	37.5	75	4	6	10	21	800	50	3	1.4	1.5
14	500	37.5	75	4	4	10	21	100	50	3	1.4	1.5
15	500	37.5	75	4	4	10	21	1500	50	3	1.4	1.5
16	500	37.5	75	4	4	10	21	800	30	3	1.4	1.5
17	500	37.5	75	4	4	10	21	800	70	3	1.4	1.5
18	500	37.5	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	1
19	500	37.5	75	4	4	10	21	800	50	3	1.4	2
20	500	37.5	75	4	4	10	21	스미어층은 모델링하지 않았음.				1.5
21	500	37.5	75	0	0	10	21	스미어층과 거칠기 요소를 모델링하지 않았음.				1.5
22	500	37.5	75	4	4	10	21	800	50	1	1.4	1.5
23	500	37.5	75	4	4	10	21	800	50	5	1.4	1.5

해석은 크게 나누어 다음의 두 단계로 실시하였다.

- (1) 주변암반과 스미어층 및 현장타설말뚝 콘크리트의 자중에 대하여 모델링하기 위하여 초기 geostatic stress 적용.
- (2) 말뚝 두부에서 단계적으로 올려서 적용.

파괴상태로 정의되는 말뚝의 거동은 재하시험시 이용되는 두부의 하중-침하 곡선을 이용한 것이 아니라 해석 결과에서 불평형력(unbalanced force)이 수렴하지 않는 상태를 파괴가 발생한 상태로 정의하였으며, 3.2절에 제시한 두부의 하중-침하 곡선은 두부에서 단계적으로 작용하중을 증가시켜서 파괴로 정의되는 상태를 유발시킨 두부하중까지의 하중-침하 관계곡선을 제시한 것이며 파괴를 유발시킨 두부하중보다 앞선 해석에 사용된 전단계의 두부하중을 최대주면저항력으로 간주하여 분석을 실시하였다.

### 3.2 해석결과

#### 3.2.1 암반의 탄성계수

암반의 탄성계수 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 5에 제시되어 있다. 동일한 두부하중에 대해서

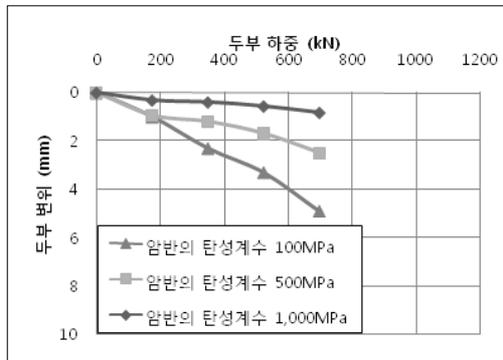


그림 5. 암반의 탄성계수에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 1, 2, 3)

암반의 탄성계수가 커짐에 따라 말뚝두부의 침하는 작아지는 것을 알 수 있다. 그러나 파괴를 발생시키는 두부하중은 차이가 없음을 알 수 있다.

#### 3.2.2 암반의 내부마찰각

암반의 내부마찰각 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 6에 제시되어 있다. 거의 두부하중에 따른 침하 곡선이 세 가지 모두 유사한 것을 알 수 있으며, 단지 암반의 내부마찰각의 차이에 무관하게 두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기는 차이가 없는 것을 볼 수 있다.

#### 3.2.3 암반의 점착력

암반의 점착력 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 7에 제시되어 있다. 두부하중에 따른 침하 곡선이 세 가지 모두 거의 유사한 것을 알 수 있으며, 단지 암반의 점착력이 증가함에 따라 파괴를 유발시키는 말뚝두부에서의 하중이 증가하는 것을 알 수 있다.

#### 3.2.4 암반층 근입부 최상부의 지표면으로부터의 깊이

암반층 근입부 최상부의 지표면으로부터의 깊이는 해석 초기에 geostatic stress의 크기로 그 영향을 검토하였다. 근

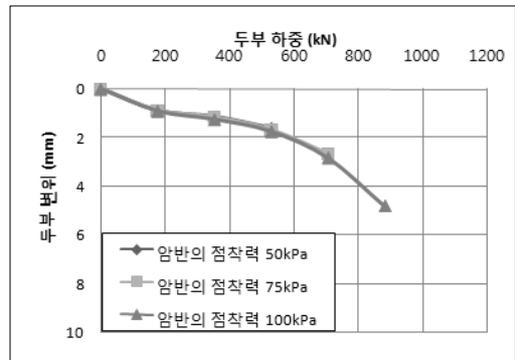


그림 7. 암반의 점착력에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 6, 7)

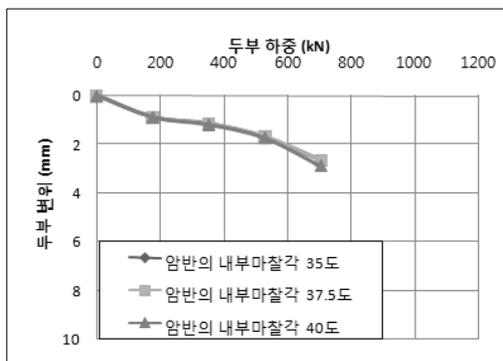


그림 6. 암반의 내부마찰각에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 4, 5)

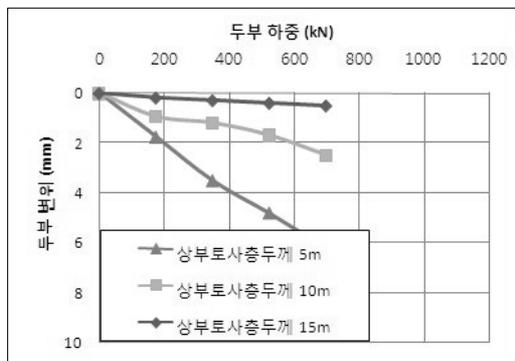


그림 8. 암반근입부 최상부의 깊이에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 10, 11)

입부 상부의 토사 단위중량은  $20\text{kN}/\text{m}^3$ 으로 가정하여 근입부 상부 지표면에 연직방향 응력으로 작용시킨 것이다. 이렇게 해석된 결과가 그림 8에 제시되어 있다. 동일한 두부 하중에 대해서 상부토사층의 두께가 증가함에 따라서 말뚝두부에서 발생하는 변위의 크기는 작아지는 것을 볼 수 있다.

### 3.2.5 거칠기요소의 경사

암반의 거칠기요소의 경사 변화에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선이 그림 9에 제시되어 있다. 동일한 두부 하중에 대해서 말뚝두부에서의 침하는 거칠기요소의 경사가 작아짐에 따라 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기는 그 크기에 있어서 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2.6 거칠기요소의 높이

암반의 거칠기요소의 높이 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 10에 제시되어 있다. 동일한 두부 하중에 대해서 말뚝두부에서의 침하는 거칠기요소의 높이가 커짐에 따라 감소하는 것을 볼 수 있다. 또한, 거칠기요소의 높이가 증가함에 따라서 두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기도 증가하는 것을 확인할 수 있다.

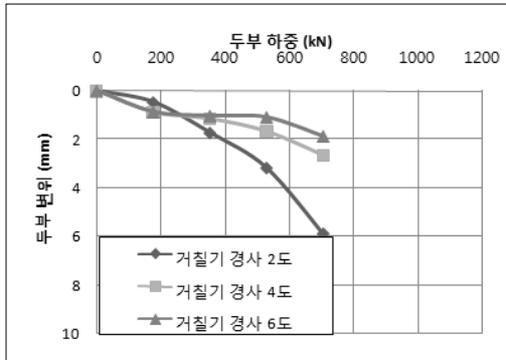


그림 9. 암반근입부의 거칠기요소 경사에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 8, 9)

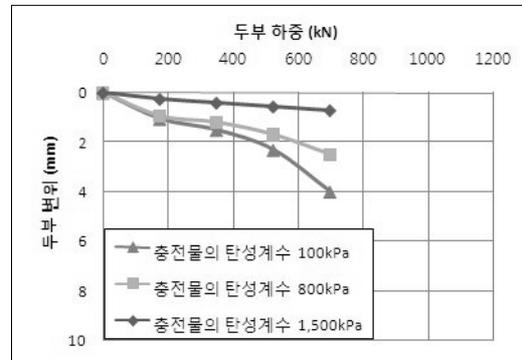


그림 11. 충전물의 탄성계수에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선 (Case 2, 14, 15)

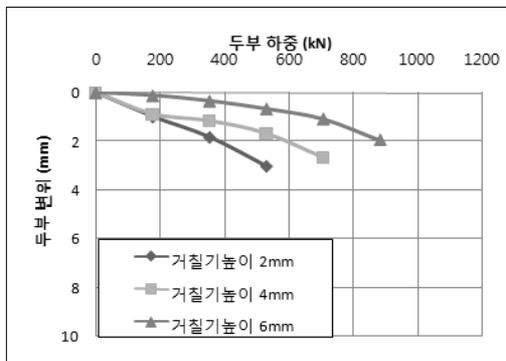


그림 10. 암반근입부의 거칠기요소 높이에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 12, 13)

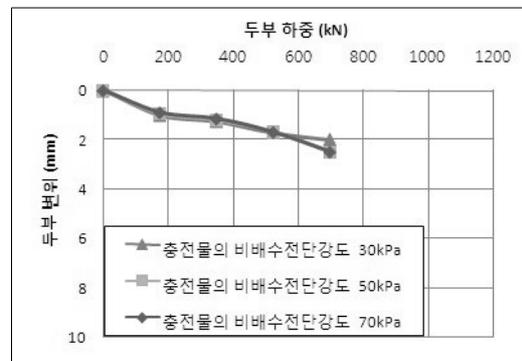


그림 12. 충전물의 비배수전단강도에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 16, 17)

### 3.2.7 충전물의 탄성계수

충전물의 탄성계수 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 11에 제시되어 있다. 동일한 두부하중에 대해서 말뚝두부에서의 침하는 충전물의 탄성계수가 증가함에 따라서 감소하는 것을 볼 수 있다. 그러나 거칠기 요소의 탄성계수 변화에 따른 말뚝두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기는 변화가 없는 것을 확인할 수 있다.

### 3.2.8 충전물의 비배수전단강도

충전물의 비배수전단강도에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 12에 제시되어 있다. 동일한 두부하중에 대해서 말뚝두부에서의 침하는 충전물의 비배수전단강도의 변화와 무관하게 거의 유사한 것을 볼 수 있으며, 두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기도 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

즉, 초기 geostatic stress 적용한 바로 직후 파괴가 발생하여 수렴이 되지 않았다. 이러한 결과는 Collingwood(2000)의 연구결과와 일치하는 것으로서 충전물의 두께가 충전물의 두께를 넘어서는 크기로 형성되게 되면 파괴면이 암반 근입부 내부에 생성되는 것이 아니라 충전물의 전단파괴에 의해서 근입부 주변부의 파괴가 발생하는 것을 의미한다.

### 3.2.9 충전물층의 두께

충전물의 두께 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선이 그림 13에 제시되어 있다. 동일한 두부하중에 대해서 충전물의 두께가 증가함에 따라서 말뚝두부에서 발생하는 침하는 증가하는 것을 볼 수 있으며, 두부에서 파괴를 유발시키는 하중의 크기는 충전물의 두께가 1mm와 3mm의 경우는 동일하지만 충전물의 두께가 5mm의 경우는 파괴를 유발시키는 두부의 하중이 충전물의 두께가 1mm이거나 3mm인 경우에 비해서 작은 것을 확인할 수 있다.

즉, 초기 geostatic stress 적용한 바로 직후 파괴가 발생하여 수렴이 되지 않았다. 이러한 결과는 Collingwood(2000)의 연구결과와 일치하는 것으로서 충전물의 두께가 충전물의 두께를 넘어서는 크기로 형성되게 되면 파괴면이 암반 근입부 내부에 생성되는 것이 아니라 충전물의 전단파괴에 의해서 근입부 주변부의 파괴가 발생하는 것을 의미한다.

### 3.2.10 충전물 및 거칠기요소의 모델링 유·무

해석시 충전물을 모델링하지 않고 거칠기요소의 높이 및 경사를 각각 4mm 및 4°로 가정한 경우와 위와 동일한 조건에 충전물의 두께를 3mm로 모델링한 경우 및 거칠기 및 충전물을 모델링하지 않은 세 가지의 해석결과로서 두

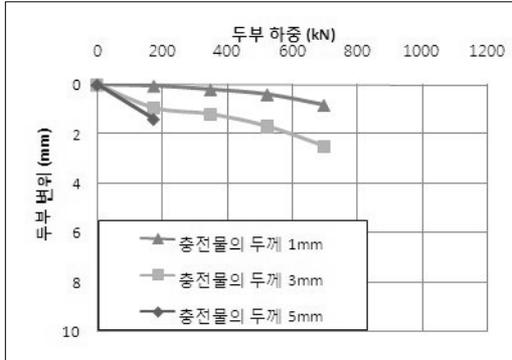


그림 13. 충전물층의 두께에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 22, 23)

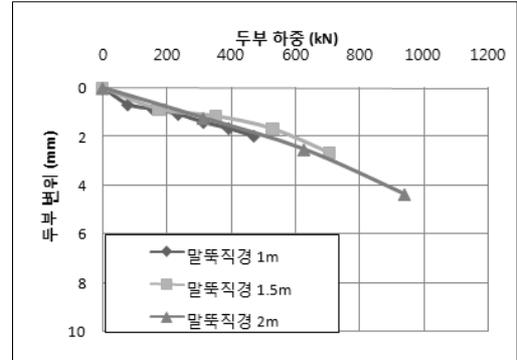


그림 15. 말뚝직경에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 18, 19)

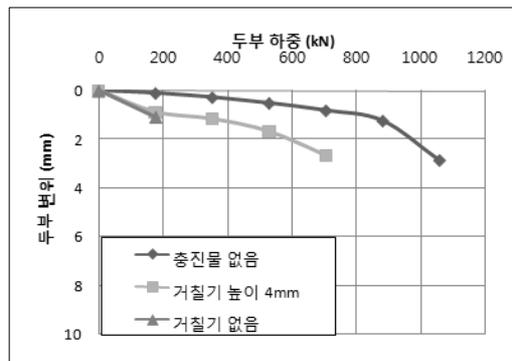


그림 14. 충전물 및 거칠기요소 모델링 유·무에 따른 말뚝두부에서의 하중-침하 곡선(Case 2, 20, 21)

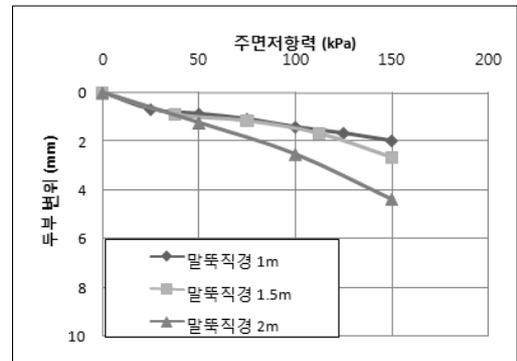


그림 16. 말뚝직경에 평균단위주면저항력-침하 곡선(Case 2, 18, 19)

부의 하중-침하 곡선이 그림 14에 제시되어 있다. 동일한 두부하중에 대해서 충전물을 모델링하지 않은 경우가 가장 두부 침하가 적게 발생하는 것으로 밝혀졌으며, 거칠기 요소와 충전물을 모두 모델링하지 않은 해석결과로 도출된 두부의 침하가 가장 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 그리고 마지막으로 거칠기요소와 충전물을 모두 모델링한 해석결과로 도출된 말뚝두부의 침하가 위의 두 경우에 대한 침하량의 중간값을 나타내는 것으로 나타났다. 또한 파괴를 유발시키는 두부의 하중도 거칠기요소만을 모델링하고 충전물을 모델링하지 않은 해석결과로 도출된 파괴하중이 가장 큰 것을 볼 수 있으며 거칠기요소와 충전물을 모두 모델링하지 않은 경우에 대한 해석결과로 도출된 파괴하중이 가장 작은 것을 확인할 수 있다. 또한 위의 중간 경우로서 거칠기요소와 충전물을 모두 모델링한 경우에 대한 해석결과로서 도출된 파괴하중이 위의 파괴하중크기의 중간값 정도에 해당하는 것을 볼 수 있다.

### 3.2.11 말뚝의 직경

말뚝의 직경 변화에 따른 말뚝두부의 하중-침하 곡선 및 평균단위주면저항력-두부 침하 곡선이 각각 그림 15 및 그림 16에 제시되어 있다.

동일한 두부하중에 대해서 말뚝두부에서의 침하는 말뚝의 직경변화에 크게 영향을 받지 않는 것을 확인할 수 있으며 단지 파괴를 유발시키는 두부의 하중은 말뚝직경이 증가함에 따라서 함께 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 말뚝두부의 하중을 주변부의 넓이로 나눈 평균단위주면저항력을 제시한 그림 16을 보면 최대평균단위주면저항력은 말뚝의 크기와 무관하게 일정한 것을 알 수 있다.

## 4. 분석 및 고찰

암반에 근입된 현장타설말뚝에 대한 수치해석을 통한 변위 연구를 통하여 확인된 사항들을 정리하면 다음과 같다.

### (1) 침하특성

현장타설말뚝의 두부침하특성은 근입부암반의 탄성계수, 암반층 근입부 최상부의 지표면으로부터의 깊이, 거칠기요소의 경사, 거칠기요소의 높이, 충전물층의 두께 및 탄성계수 등에 의해 큰 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 근입부 암반과 충전물의 강도 특성은 큰 영향이 없는 것을 확인하였다. 즉, 일반적으로 침하특성은 충전물 및 근입부 암반의 강도특성보다 강성에 큰 영향을 받는다는 것을 확인할 수 있었다.

### (2) 주면저항력특성

스미어현상이 발생할 것으로 예상되는 근입부에 대해서는 근입부 암반의 점착력, 거칠기요소의 높이, 충전물층의 두께 등을 고려하여야 한다. 이렇게 현장타설말뚝에 스미어현상이 발생할 것으로 예상되는 경우에는 스미어현상이 발생하는 부분의 두께를 최대한 축소시키고 주변부의 인공적인 거칠기 요소를 생성시킴으로써 스미어현상이 발생하는 것을 방지하고 거칠기요소를 크게 형성시키는 것이 바람직할 것이다. 또한, 스미어현상이 발생할 것으로 예상되는 현장타설말뚝의 근입부에 대해서 연속체 역학을 바탕으로 하는 수치해석을 실시하는 경우, 근입부 거칠기요소에 대한 검토가 반드시 수행되어야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 암반에 근입된 현장타설말뚝에 스미어현상이 발생한 경우에 대해서 수치해석을 통한 변수분석을

실시하고 이를 통하여 각각의 변수가 현장타설말뚝의 주변부 거동에 미치는 영향에 대해서 알아보았다. 이를 통하여 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 현장타설말뚝의 주변부에서는 거칠기요소의 높이와 스미어현상이 발생한 부분의 두께에 대한 상대적인 크기가 전체적인 거동(두부침하 및 최대주면저항력)에 크게 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다.
- (2) 주변부 거칠기요소의 높이가 증가할수록, 스미어현상이 발생한 층의 두께가 감소할수록 최대주면저항력의 크기는 증가하고 말뚝두부의 침하는 감소하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변부 거동특성을 분석하기 위해서는 주변부의 거칠기 요소를 고려하여야 한다.
- (4) 벤토나이트를 사용하는 것은 말뚝두부의 침하량 및 최대주면저항력이 크게 발생할 우려가 있으므로 현장관리를 충실히 하여야 한다.

## 감사의 글

이 논문은 2006년도 홍익대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었음.

## 참 고 문 헌

1. 조천환, 이명환, 유한규, 권형구, 박언상(2003), 암반에 근입된 현장타설말뚝의 벽면거칠기 특성, 2003, *한국지반환경공학회 논문집*, 제4권, 제2호, pp. 5~13.
2. Baycan, S.(1996), *Field Performance of Expansive Anchors and Piles in Rock*. Ph. D. Dissertation. Dept. of Civil Engg., Monash University, Melbourne, Australia, pp. 42~83.
3. Collingwood B.E., Benjamin(2000), *The Effects of Construction Practices on the Performance of Rock Socketed Drilled Bored Piles*. Ph. D. Dissertation. Dept. of Civil Engg., Monash University, Melbourne, Australia, Chapter 8~Chapter 11.
4. Desai, C.S.(1977), *Soil-Structure Interaction and Simulation Problems, Finite Elements in Geomechanics*, Edited by G. GuDehus, John Wiley & Sons, pp. 231~232.
5. Hassan, K.M., O'Neill, M.W.(1997), Side load transfer mechanisms for drilled shafts in soft argillaceous rock. Design method for drilled shafts in soft argillaceous rock. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(2): 145~152.
6. Hassan, K.M., O'Neill, M.W., Sheikh, S.A., and Ealy, C.D. (1997), Design method for drilled shafts in soft argillaceous rock. *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 123(3): 272~280.
7. Holden J.C.(1984), *Construction of bored piles in weathered*

- rocks. Technical Report no. 69, Road Construction Authority of Victoria, pp. 8~28.
8. Itasca Consulting Group(1995), *Fast Lagrangian Analysis of Continua*(FLAC-2D): User's manual. Version 3.3.
  9. O'Neill, M. W., Hassan, K. M.(1994), Effects of construction on performance and design criteria, *Proceedings of the International Conference on Design and Construction of Deep Foundations* 1, pp. 137~187.
  10. Pells, P.J.N., Rowe, R.K. and Turner, R.M.(1980), An experimental investigation into side shear for socketed piles in sandstone, *Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock*. Balkema, Sydney, pp. 278~297.
  11. Williams, A.F.(1980), *The side resistance of piles socketed into weak rock*, Ph. D. dissertation, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, pp. 78~128.

(접수일: 2007. 12. 14 심사일: 2008. 1. 11 심사완료일: 2008. 5 27)