

국내 암반에 근입된 현장타설말뚝의 소켓벽면 거칠기에 관한 연구 A Study on the Surface Roughness of Drilled Shaft into Rock in Korea

이명환¹⁾, Myung-Whan Lee, 조천환²⁾, Chun-Whan Cho, 유한규³⁾, Han-Kyu Yoo, 권형구⁴⁾, Hyung-Gu Kwon

¹⁾ (주)파일테크 소장, President, Piletech Consulting Co.

²⁾ (주)파일테크 부사장, Vice-President, Piletech Consulting Co.

³⁾ 한양대학교 토목·환경공학과 조교수, Assistant Prof., Dept. of Civil & Environmental Engng., Hanyang Univ.

⁴⁾ 한양대학교 토목·환경공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engng., Hanyang Univ.

SYNOPSIS : The domestic design method for the shaft resistance of drilled shafts into a bedrock is based on the empirical method, where the uniaxial compressive strength of rock specimen is utilized for calculation of the shaft resistance. This method has uncertainties in prediction of capacity of drilled shafts and result in uneconomic engineering design. Recently a new improved design method was suggested, which reflects important factors that affect the strength of pile sockets. Socket roughness is one of significant factors influencing the shaft resistance of drilled shaft socketed into rock. In this paper roughness information for the shaft resistance design of socket pile was suggested on the basis of statistical analysis of data measured from wall surface in the bore holes of drilled shafts.

Key words : roughness, drilled shaft, shaft resistance, rock socketed pile, unconfined compressive strength

1. 서 론

대규모 하중을 지지하기 위한 방안으로 암반에 근입된 현장타설말뚝의 사용이 일반화되어 있다. 이러한 현장타설말뚝의 설계는 전통적으로 실재하의 정재하시험을 통한 현장경험과 암석의 일축압축강도와 경험계수, 혹은 보수적인 시방안을 따르고 있으며, 이렇게 시공된 현장타설말뚝의 설계는 일반적으로 보수적인 값을 갖는 것으로 알려 졌다(Seidel and Haberfield, 1994).

암반에 근입된 현장타설말뚝은 주면저항력 또는 선단저항력 만으로 지지되거나, 혹은 두 지지력 성분이 동시에 발현되는 것으로 설계될 수 있다. 그러나, 일반적으로 선단저항력의 이용은 깊은 소켓(socket) 침도에 따른 공내 검사의 곤란함 및 위험성에 의해 시공성 저하와 고비용의 문제를 발생시킨다. 또한, 주면저항력을 발현시키는 변위량은 선단저항의 그것에 비해 작으므로 대부분의 사용하중은 주면저항력에 의해 지지된다. 따라서 암반에 근입된 현장타설말뚝의 설계에 대한 초점은 주면저항력이 될 수밖에 없다.

암반에 근입된 현장타설말뚝의 주면마찰력을 예측하는 것은 매우 복잡한 문제이므로, 일반적으로 극한 주면마찰력의 예측은 재하시험결과와 일축압축강도와 경험적인 관계를 이용하고 있는 실정이다. 그러나 암반에 근입된 현장타설말뚝으로부터 얻은 여러 실측값을 참조해 볼 때, 이러한 경험적인 방법은 신뢰도가 떨어진다는 것을 알 수 있다(Seidel and Collingwood, 2001).

암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변마찰력의 주요 영향인자는 암석의 일축압축강도, 소켓벽면의 거칠기, 암반의 변형계수, 암반 근입부의 직경, 수직응력과 시공방법 등으로 밝혀졌으며(Seidel and Harberfield, 1995a, 1995b), 특히 거칠기에 대한 중요성은 많은 연구자들(Pells 등,1980; Horvath & Kenny, 1979; Williams, 1980; Johnston & Lam, 1989)에 의해 언급되었다. Pells 등(1980)은 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변지지력에 있어 소켓벽면의 거칠기를 중요한 인자로 보고 표 1과 같이 거칠기를 4등급으로 분류하여 주변 지지력에 관한 설계도표를 제안하였다.

표 1. Pells 등(1980)이 제안한 거칠기 분류

Roughness Class	Description
Smooth(R1)	Straight, smooth-sided socket, grooves or indentations less than 1mm deep.
Medium(R2)	Grooves of depth 1~4mm, width greater than 2mm, at spacing of 50 mm to 200mm.
Rough(R3)	Grooves of depth 4~10mm, width greater than 5mm, at spacing of 50 mm to 200mm.
Very Rough(R4)	Grooves or undulations of depth>10mm, width>10mm at spacing of 50mm to 200mm.

또한, Kulhawy and Phoon(1993)은 그림 1과 같이 주변저항계수, α 를 구하기 위한 일반식($\Psi[q_u/2p_a]^{-0.5}$)에서 벽면거칠기에 따른 계수, Ψ 값을 제안하였는데, 계수값은 소켓 벽면의 거친 정도에 따라 작은 경우(smooth)는 1.0, 거친(rough) 경우는 3.0, 평균적인 경우는 2.0, 흙의 경우는 0.5로 제안하였다. 이후, Seidel(1996)은 암석의 일축압축강도와 거칠기의 특성치를 통계적으로 분석하여 주변부의 전단거동에 이를 반영하는 방법을 제안하였으며, 이러한 일련의 연구들로 인하여 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변마찰력에 대한 보다 신뢰도 있는 예측이 가능하게 되었다.

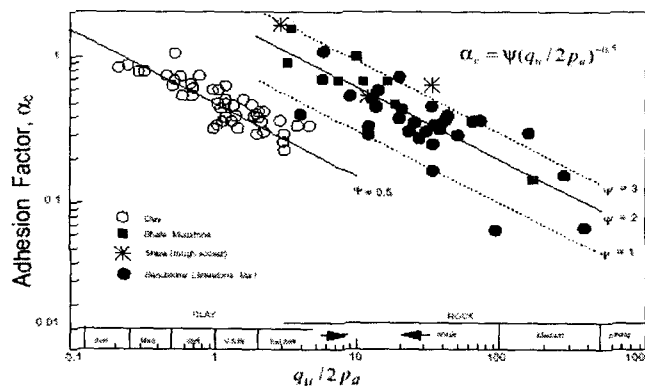


그림 1. Kulhawy and Phoon(1993)이 제안한 주변저항계수 α 에 대한 설계도표

본 연구에서는 암반에 근입된 현장타설말뚝의 주변 저항력에 영향을 미치는 인자 중 중요한 인자라고 할 수 있는 굴착면 거칠기의 특성을 조사하였다. 또한 조사된 자료를 이용하여 국내 현장타설말뚝의 암반부 굴착벽면의 거칠기 특성을 분석하여 설계에 적용할 수 있는 거칠기 정수에 대해 고찰해 보았다.

2. 현장조사 및 개요

2.1 현장조사 및 시험방법

본 연구에서는 현장타설말뚝의 굴착공벽면의 거칠기 형상에 대해 본을 뜬 후, 이를 레이저 프로파일 게이지(razer profile gage)로 디지털화(digitize)하여 수치화하였다. 최종적으로 디지털화된 수치자료

를 통계분석하여 거칠기의 특성을 정량화 하였으며 이를 기존의 자료와 비교 평가하였다. 거칠기 측정을 위한 현장조사 및 수치화 방법을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 암반 소켓부의 연암층에서 거칠기 형상의 모형시편 제작 : 암반에 근입된 현장타설말뚝의 굴착공내 노출된 암반면을 성형하기 위해 아크릴로 제작된 틀(15cm×15cm)을 굴착공벽면에 고정된 후 성형이 용이하고 급속경화성이 있는 알지노플라스트(치의료용 제품)를 틀에 넣어 경화시켜 음각을 뜬다. 알지노플라스트는 수축성이 있어 장기적인 보관이 곤란하므로 이를 즉시 석고로 양각하여 거칠기 시편을 제작하였다.
- (2) 거칠기 모형의 디지털화 작업 : 석고로 제작된 거칠기 시편을 레이저 프로파일 게이지(레이저 파장은 670nm, 최소측정치는 0.5 μ m)를 이용하여 3차원(1cm간격, 12cm길이)으로 디지털화하여 수치화하였다.
- (3) 수치자료의 분석 및 거칠기의 정량화 : 수치화된 데이터를 이용하여 3차원으로 도시해 봄으로써 거칠기의 형상을 재현해보고, 데이터를 통계 분석에 의해 요소길이(segment length, 거칠기의 높이 및 각을 측정하는 단위, 밀변길이가 2mm에서 120mm 까지 변화, 그림 3 참조)별로 거칠기의 평균높이 및 평균각을 구하였다. 통계분석치로부터 일정 요소길이를 결정한 후 결정된 요소길이에 대한 거칠기의 통계치를 도출하였다.
- (4) 분석된 거칠기 통계치를 국외에서 조사된 자료와 비교 평가 : 일정 요소길이에 대한 거칠기의 통계치와 암석의 일축압축강도와 관계를 구한 후 이를 기존의 연구자료(Seidel & Collingwood, 2001)와 비교 평가하였다.

2.2 현장개요

본 조사는 암반에 근입된 현장타설말뚝의 소켓 벽면의 거칠기를 정량적으로 분석하여 이를 반영하는 새로운 설계법(파일테크 등, 2002)의 자료를 제시하기 위한 것이다. 따라서 국내 현장타설말뚝 시공현장들을 방문하여, 천공이 완료된 공내에 진입하여 벽면을 조사하였다.

표 2. 거칠기 측정 작업 현장 개요

시편번호	현장명	암종	공법	말뚝직경	공내벽면상태	시편상세	지반조사내용
1	용인	편마암	RCD	1.5m	부분적 절리 내재	1-#1:매끈한(smooth)벽면 1-#2:거친(rough)벽면	변형계수 735.5MPa TCR 50~95% RQD 9~11% 점착력 0.1MPa 내부마찰각 35° 포아송비 0.25
2	청도	화강암	All Casing	1.5m	굴착 벽면이 비교적 매끈	2-#1:매끈한(smooth)벽면 2-#2:거친(rough)벽면	TCR : 28% RQD : 6% q _u : 107MPa
3	청도	안산암	RCD	1.5m	-	3-#1:거친(rough)벽면 3-#2:매끈한(smooth)벽면	TCR은 30% RQD는 0% q _u : 75.1MPa~77.3MPa
4	성남	편마암	RCD	2.2m	부분적 절리 내재 풍화 진행된 상태	4-#1:거친(rough)벽면 4-#2:매끈한(smooth)벽면	TCR : 63% RQD : 13% q _u : 25~50MPa RMR IV등급
5	청도	화강암	RCD	1.5m	굴착 벽면의 다수 패임 내재	5-#1:거친(rough)벽면 5-#2:매끈한(smooth)벽면	q _u : 138.7MPa
6	서울강남	편마암	RCD	1.5m	굴착 벽면의 다수 패임 (사공 중 드립 움직임으로 발생)	6-#1:거친(rough)벽면 6-#2:거친(rough)벽면 6-#3:매끈한(smooth)벽면	TCR : 48% RQD : 6% q _u : 125.2MPa
7	서울강남	편마암	RCD	1.5m	굴착 벽면의 다수 패임 (사공 중 드립 움직임으로 발생)	7-#1:공내 상부 벽면 7-#2: 7-#3: 7-#4:공내 하부 벽면	연암층 q _u : 58.8MPa

대상 현장은 국내의 주요 기반암인 화강암 및 편마암이 기반암인 곳을 주 대상으로 하였으며 거칠기 측정은 총 7개소 현장의 17개 지점에서 실시되었다. 표 2는 거칠기 측정 작업이 실시된 현장 개요이며, 각 조사 현장들의 기반암을 암종 및 시공법에 따라 분류하면, 편마암인 현장이 4개소, 화강암인 현장이 2개소, 안산암인 현장이 1개소였으며, 시공방법별로는 RCD공법이 6개소, 올케이싱공법이 1개소이다.

3. 거칠기 데이터 분석

3.1 분석방법

암반 소켓의 거칠기를 정량화하기 위한 Monash 대학의 연구는 암반의 표면을 일정한 길이를 갖는 현(chord)이 서로 연결되어 있는 것으로 이상화시켰다(Seidel and Haberfeld, 1995a, 1995b). 단위길이를 갖는 거칠기 단면은 그림 2에서처럼 일정한 길이, l_a 를 갖는 N 개의 선분이나 현으로 구성되어 질 수 있다.

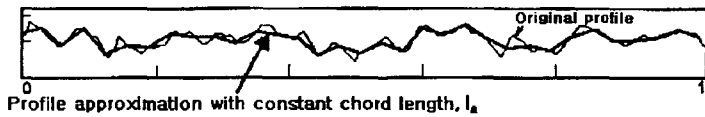


그림 2. 연속된 현으로 이루어진 이상화된 프로파일.

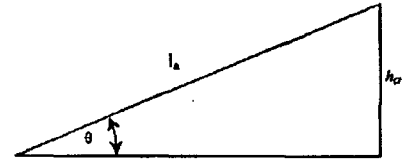


그림 3. 개별적인 요철의 형상.

현의 각도 θ 는 평균, μ_θ 와 표준편차, S_θ 를 갖는 정규분포(Gaussian)를 따라 분포하는 것으로 가정한다. 만약 종단면의 방향을 수평의 두 점을 지나는 선으로 가정한다면, 평균 μ_θ 는 0이 될 것이다. 그림 3과 같은 단위 거칠기에 대해서 거칠기 높이에 대한 표준편차 S_h 는 다음 식 (1)로 주어진다.

$$s_h \cong l_a \sin(s_\theta) \quad (1)$$

따라서, 거칠기의 높이와 각도는 서로 독립적인 인자가 아니며, 상기와 같이 직접적으로 상관관계에 있음을 알 수 있다. 거칠기의 각도가 정규분포의 빈도수를 보인다고 가정한다면, 거칠기 각의 절대 평균값은 표준편차로부터 다음 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$|\bar{\theta}| = \sqrt{\frac{2}{\theta}} s_\theta \quad (2)$$

그림 3의 삼각형을 고려하여 거칠기 높이의 절대 평균값은 다음 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$|\bar{h}_a| = l_a \sin(|\bar{\theta}|) = \Delta r \quad (3)$$

여기서, 거칠기 높이의 절대평균값은 모든 거칠기 요소들의 높이에 대한 스칼라 값의 평균이며, 단순화하여 평균 거칠기 높이, Δr 로 나타낼 수 있다.

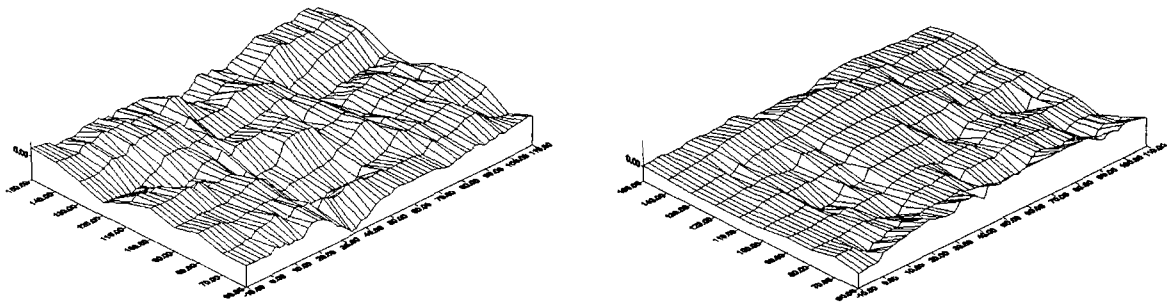
본 연구에서는 Monash 대학의 방법과 같이 통계적 방법을 이용한 거칠기 분석을 수행하였다. 따라서 다음 식 (4)에 의해서 요소길이(segment length, 개별적인 경우 그림 3에서 밑변의 길이를 의미)별로 보면 거칠기의 평균높이와 평균각을 계산하였다. 요소길이는 2mm에서 100mm까지(측정된 복사본의 디지털타입 길이는 120mm) 변화시키면서 거칠기의 평균높이와 평균각의 변화양상을 분석하였다.

$$h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_{i+1} - y_i|, \quad \theta = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \tan^{-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right) \quad (4)$$

- 여기서, h : 시편의 거칠기 평균높이 (mm)
- θ : 시편의 거칠기 평균각 (degree)
- y : 각 요소길이에 따른 높이 (mm)
- Δx : 요소길이 (mm)
- n : 요소길이에 따른 측정 횟수

3.2 거칠기 측정결과

그림 4는 6번 굴착공의 매끈한 시편(6-#2)과 거친 시편(6-#1)을 측정 후, 디지털화하여 3차원적으로 도시한 것이다. 그림에서와 같이 거칠기의 정도에서 차이가 나타남을 알 수가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 데이터를 사용하여 요소길이에별 거칠기의 높이와 거칠기 각의 평균치를 산출하였다.



(a) 시편 6 - #1.

(b) 시편 6 - #2.

그림 4. 양각된 본을 디지털화하여 3차원적으로 도시한 거칠기의 모양.

그림 5와 6은 굴착공 내에서 측정된 거칠기 모형을 레이저 프로파일게이지를 이용하여 수치화 한 후 전술한 통계적 방법으로 분석한 결과를 도시한 것으로 각각 요소길이에별로 거칠기의 평균높이와 평균각 (요소길이에별 평균 거칠기 높이와 각은 표 3참조)을 나타낸 것이다. 그림 5와 6에서와 같이 거칠기의 높이와 각은 요소길이에 따라 증가하다가 수렴하는 경향을 보여주고 있는데 수렴하는 요소길이는 50mm 정도가 됨을 알 수가 있다.

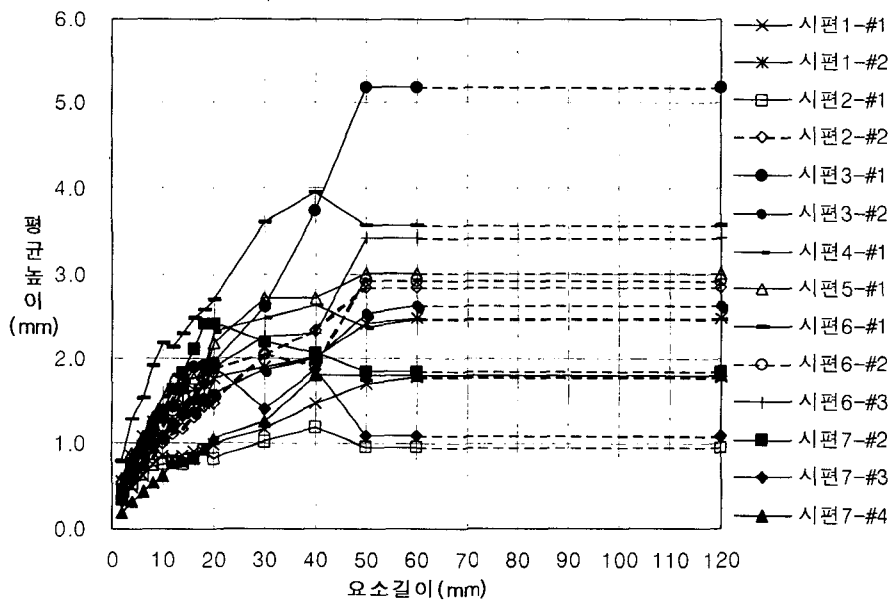


그림 5. 거칠기 시편의 요소길이 변화에 따른 평균 높이의 변화.

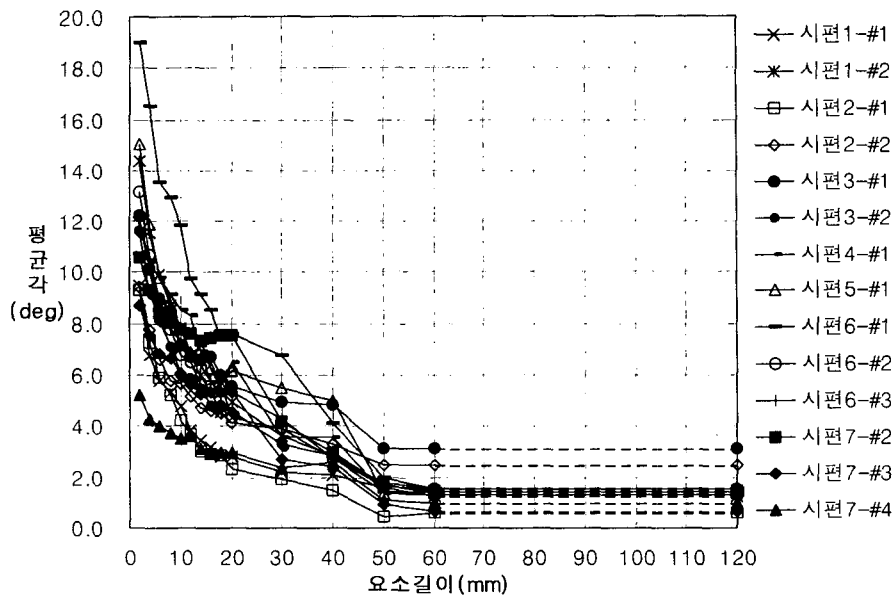


그림 6. 거칠기 시편의 요소길이 변화에 따른 평균각의 변화.

표 3. 요소길이별 거칠기의 높이 평균치와 각 평균치

요소길이 (mm)	10	12	14	16	18	20	30	40	50	60	120
거칠기 높이 평균치 (mm)	1.22	1.33	1.42	1.52	1.63	1.77	2.04	2.28	2.55	2.57	2.57
거칠기 각 평균치 (deg)	6.81	6.24	5.74	5.37	5.08	5.02	3.80	3.12	1.62	1.49	1.49

그림 5와 6의 결과로부터 7개소 현장의 14개 지점에 대한 요소길이에 따른 거칠기의 평균높이 및 평균각은 50mm 정도에서 수렴하는 것으로 분석되었다. 그러나 이러한 값은 시편의 길이가 150mm이고 디지털 분석 길이가 120mm이므로 이들의 영향이 포함되었을 가능성이 있는 것으로 사료된다. 또한 어떠한 결론에 이르기에는 분석에 이용된 데이터 수량이 아직 충분치 못한 면이 있어 추후 더 많은 조사에 의해 확인하는 것이 필요하다.

3.3 분석결과와 기존자료의 비교

Seidel & Collingwood(2001)는 암반 근입부의 거칠기를 그림 7에서 보는 바와 같이 암석의 일축압축강도와 유효 거칠기 높이와의 상관관계로 제시하였다. 그림에서의 유효 거칠기 높이는 기존의 현장 재하시험자료를 Rocket program(Seidel, 2000)을 이용하여 역해석하여 도출한 것이다. 그림 7에서 점선으로 표시된 영역은 Seidel 등(1996)에 의해 제안된 범위이며, 실선으로 표시된 영역은 Seidel & Collingwood(2001)가 데이터를 보완하여 제안한 암반근입부 거칠기 높이의 상한과 하한의 영역을 나타내고 있다.

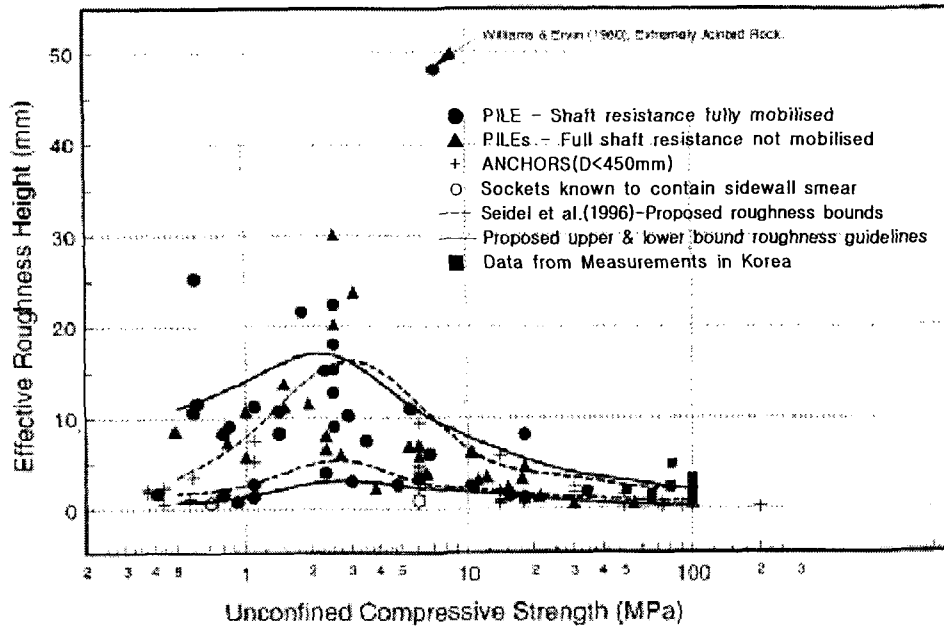


그림 7. 국내 7개 현장의 평균 거칠기 높이와 일축압축강도의 관계.

본 연구에서는 측정자료 중 일축압축강도 자료가 있는 14개 지점에 대한 요소길이 50mm에서의 평균 높이 및 일축압축강도를 그림 7에 함께 도시함으로써 Seidel & Collinwood(2001)가 제안한 상관관계와 국내 암중에 대한 측정결과의 적용성을 검토하였다.

그림 7에서 보는 바와 같이 국내에서 측정한 요소길이 50mm에서의 평균높이와 일축압축강도와 상관은 Seidel & Collinwood가 제안한 상하부 경계영역 내부에 대부분이 도시되고 있으나, 일부의 결과들은 상한치를 초과하는 것으로 나타났다. 상한경계를 초과하는 몇몇 결과치들은 시추 및 실내시험에서 수행한 암석시편의 채취심도(일반적으로 굴착면 하단부에서 시료채취)가 대상 암반의 거칠기 측정심도(일반적으로 굴착면의 상부 및 중앙부에서 측정)보다 다소 깊은 것에 기인하는 것으로 사료된다.

본 연구에서 측정한 국내 암반 굴착면의 유효 거칠기 높이와 일축압축강도의 상관관계는 Seidel & Collinwood(2001)가 제안한 경계영역 내에 존재하며, 이는 이들이 제시한 상관관계도를 국내에서도 사용할 수 있다는 것을 의미한다. 그러나 최종적인 판단은 본 연구에서 측정한 데이터 수의 한계 및 강도치의 신뢰도를 감안하여 향후 다양한 대상암반의 거칠기 측정작업을 통해 이루어지는 것이 바람직하다고 생각된다. 이러한 결론이 도출될 경우 이를 바탕으로 암반근입부 현장타설말뚝에 대한 새로운 설계법(즉 거칠기의 영향을 반영할 수 있는 설계법)의 국내 적용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 거칠기 조사는 국내 현장타설말뚝의 설계방법을 개선하기 위한 방안으로 굴착면의 거칠기를 반영하는데 필요한 기초자료를 제공하기 위해 이루어 졌다. 따라서 국내 현장타설말뚝 시공 현장의 굴착공벽면의 암반 근입부의 거칠기를 조사하여 통계분석하는 방법으로 거칠기 특성을 분석해 보았다.

현장타설말뚝의 암반부 굴착공벽면의 거칠기를 분석한 결과 거칠기의 높이는 요소길이에 따라 증가하다가 수렴하고, 거칠기 각은 요소길이에 따라 감소하다가 수렴하는 경향을 나타내었다. 수렴하는 요소길이는 50mm 정도가 되는 것으로 나타났다. 따라서 굴착공 벽면의 암반 근입부의 거칠기는 요소길이(측점간격)를 50mm로 하였을 때 나타나는 평균높이와 평균각으로서 전체 거칠기 형상을 표시할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 이러한 요소길이 결정시에는 전단거동을 표현하는 전단변위의 크기도 고려되어야 할 것이다.

제한된 자료이지만 국내의 현장타설말뚝 굴착공벽면의 거칠기 자료를 기존의 Seidel & Collinwood(2001)

가 제안한 값과 비교해 본 결과 기존의 상관관계는 국내에 적용할 수 있을 것으로 평가되었다. 그러나 최종적인 판단은 본 연구에서 측정된 데이터 수의 한계 및 강도치의 신뢰도를 감안하여 향후 보다 많은 대상암반의 거칠기 측정작업을 통해 이루어지는 것이 바람직하다고 생각된다.

본 연구는 수행 중인 연구결과의 일부분으로 향후 좀 더 많은 조사를 통하여 국내 암중에 따른 거칠기의 값의 확인과 시공 장비에 따른 각 암중에서의 거칠기 변화를 확인하는 것이 계획되어 있다. 이러한 거칠기 자료는 현재 연구 중인 암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법(파일테크 등, 2002)에 자료로 활용될 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2001 산학연 공동연구개발사업 '암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법 개발' 과제의 연구결과 일부입니다.

참 고 문 헌

1. 파일테크, 한양대학교(2002), **암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법 개발 연구보고서**, 건설교통부, 한국건설기술연구원.
2. Horvath, R. G. & Kenny, T. C.(1979), "Shaft resistance of rock-socketed drilled piers", *Proceeding of the Symposium on Deep Foundations*, ASCE National Convention, Atlanta, pp.183~214.
3. Johnston, I. W. & Lam, T. S. K.(1989), "Shear behaviour of regular triangular concrete/rock joints-analysis", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 115(5), pp. 711~727.
4. Kulhawy, F. H. & Phoon, K. K.(1993), "Drilled shaft side resistance in clay soil to rock", *Proceeding of Conference on Design and Performance of Deep Foudation : Piles and Piers in Soil and Soft Rock*, Geotechnical Special Publication No.38, ASCE, pp.172~183.
5. Pells, P. J. N., Rowe, R. K., and Turner, R. M.(1980), "An experimental investigation into side shears for socketed piles in sandstone", *Proceeding of International Conference on Structural Foundation on Rock*, Sydney, Australia, vol.1, pp.291~302.
6. Seidel, J. P. & Harberfield, C. M.(1994), "A new approach to the prediction of drilled pier performance in rock", *Proceedings of the U.S. Federal Highways Administration International Conference on Design and Construction of Deep Foundations*, December 1994, Orlando, Fla., pp.556~570.
7. Seidel, J.P., Haberfield, C.M.(1995a), "The Use of Fractal Geometry in a Joint Shear Model", *Mechanics of Jointed and Faulted Rock*, A. A. Balkema., Rotterdam, pp. 529~534.
8. Seidel, J.P., Haberfield, C.M.(1995b), "Towards and Under-standing of Joint Roughness", *Rock Mechanics and Rock Engineering*, springer-Verlag, 28.2, pp. 69~92.
9. Seidel, J.P. & Haberfield, C.M.(1996), "A New Design Method for Drilled Shafts in Rock", *6th Int. Conf. & Exhibition on Piling and Deep Foundation*, Bombay, India, pp. 1.21.1~1.21.7.
10. Seidel, J.P. & Haberfield, C.M.(2000), *Rocket Program Manual*.
11. Seidel, J.P. & Collinwood, B.(2001), "An improved socket roughness factor for prediction of rock socket shaft resistance", *Canadian Geotechnical Journal*, 38.1. pp. 138~153.
12. Williams, A. F.(1980), *The side resistance of piles socketed into weak rock*, Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia.