

# 연암부 벽면거칠기를 이용한 단위주면마찰력 특성에 관한 연구

## A Study on Characteristics of the Unit Skin Friction Using the Wall Roughness in the Soft Rock

홍 석 우<sup>1</sup> Hong, Seok-Woo  
황 근 배<sup>2</sup> Hwang, Geun-Bae

### Abstract

In the case of the drilled shaft, one of the methods for calculating unit skin friction stress of rock socket parts is to measure the roughness of the excavated face. This method is to estimate the unit skin frictional resistance using a device which measures the roughness shape of the excavated face in the excavation step. In this study, the roughness shapes of the face of the rock socket part in the drilled shaft were measured directly in the perforated hole and the results are used to identify the characteristics of the unit skin friction of the bedrock. In addition, the static load test and the load transfer test were performed on the same pile to verify the result of the roughness test.

### 요 지

현장타설말뚝인 경우에 연암 소켓부의 단위주면마찰응력을 산정하는 방법 중 벽면 거칠기에 의한 산정 방법이 있다. 이 방법은 현장타설말뚝을 시공하기 위한 굴착 단계에서 거칠기 측정 장치를 굴착공에 설치하여 암반 벽면의 거칠기 양상을 측정하여 주면마찰력을 산정하는 것이다. 본 연구에서는 현장타설말뚝의 암반 소켓부 벽면의 거칠기 양상을 천공홀에서 직접 측정하였으며 그 결과를 이용하여 암반의 주면마찰력 특성을 파악하고자 한다. 그리고, 거칠기 시험 결과를 검증하기 위하여 동일 말뚝에 정재하시험 및 하중전이시험을 수행하였다.

**Keywords :** A roughness measuring device, Drilled shaft, Rock socket, Unit skin friction

## 1. 서 론

대형 구조물의 증가 추세로 인하여 상부 하중의 크기가 증가되어 기성말뚝의 지지능력만으로는 기초의 안정성 확보가 어려운 실정이다. 이로 인하여 현장타설말뚝의 시공이 증가되고 있으며 현장타설말뚝 직경의 범위가 종래보다 매우 다양하게 변화하고 있다.

국내 지반 특성 상 현장타설말뚝의 선단 조건이 대부분 연암에 근입되고 있어 연암부의 주면마찰력이 말뚝의 지지능력에 상당부분을 차지하고 있다. 현재까지 암반부의 주면마찰력을 결정하는 방법은 제안식에 의한 방법과 하중전이시험을 동반한 재하시험에 의한 방법 등으로 크게 나눌 수 있다. 제안식에 의한 방법은 실제 말뚝의 거동을 정확히 모사하기에는 한계가 있으며 재

1 정회원, 동의대학교 토목공학과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Eng., DongEui Univ., Tel: +82-51-890-1632, Fax: +82-505-182-6889, hongwoo@deu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

2 정회원, (주)지텍 부장 (Member, General Manager of G-TEC Ltd.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2020년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

하시험은 설계단계에서 수행하기가 거의 어려운 실정이다. 그리고, 하중전이시험은 현장타설말뚝의 콘크리트가 양생된 후 시험이 가능하기 때문에 시공 초기에 암반의 주면마찰력을 확인하는 것이 어려운 실정이다.

상기와 같이 현실적으로 어려운 면을 극복하기 위하여 암반 벽면 거칠기에 의한 주면마찰력 특성을 측정할 수 있는 방법이 있다. 이 방법은 현장타설말뚝을 시공하기 위한 굴착 단계에서 굴착공에 거칠기 측정 장치를 설치하고 암반 벽면의 거칠기 양상을 측정하여 주면마찰력을 산정하는 것이다.

본 연구에서는 현장타설말뚝의 암반 소켓부 벽면의 거칠기 양상을 천공홀에서 직접 측정하였으며 그 결과를 이용하여 암반 구간의 주면마찰력을 산정하였고, 동일 말뚝에 대해 정재하시험 및 하중전이시험을 수행하여 그 차이를 비교·분석하였다.

## 2. 거칠기 프로파일 정량화 및 분석

측정된 거칠기 데이터를 정량화하는 방법들이 여러

연구자들(Barton and Choubey, 1997; Pell et al., 1980; Horvath et al., 1983; Seidel and Haberfield, 1995)에 의해 제안되었다.

본 연구에서는 FHWA(1999)에 명시된 주면마찰력 제안식(Table 1)을 사용하기 위하여 Horvath et al.(1983)이 제안한 Horvath Roughness Model(Fig. 1)을 적용하여 거칠기 인자를 결정하였다. 이들 제안방법 중 국내 암반 특성과 공사현황을 고려할 때 FHWA(1999)에서 제안한 방법이 적합한 것으로 판단되어 본 연구에 적용하여 분석하였다.

$$RF = \frac{\Delta r_h L_t}{r_s L_s} \quad (1)$$

여기서, RF = Roughness Factor

$\Delta r_h$  = Mean Roughness Height

$r_s$  = Socket Radius

$L_t$  = Traversed Length of the Socket

$L_s$  = Socket Length

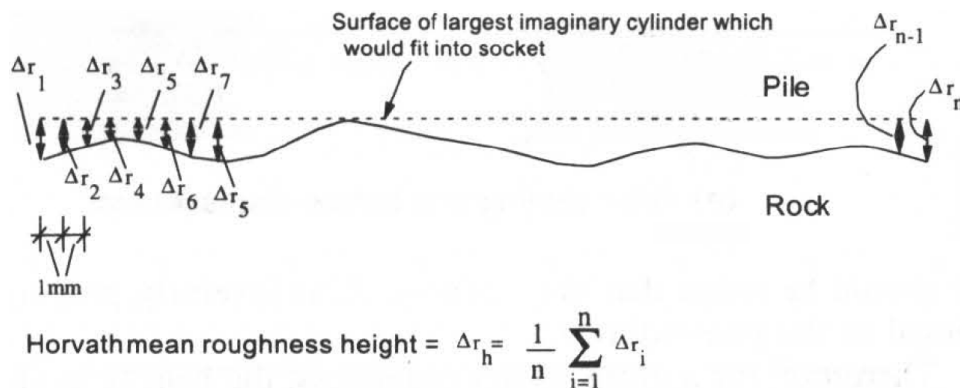


Fig. 1. Horvath Roughness Model (Pell et al., 1980)

Table 1. Estimation equations of the ultimate skin friction by design codes

Division	Skin Friction Design Equation	Condition 1	Condition 2
FHWA (1999)	$0.65p_a \left(\frac{q_u}{p_a}\right)^{0.5} \leq 0.65p_a \left(\frac{f'_c}{p_a}\right)^{0.5}$	Smooth Rock Socket	
	$\frac{q_s}{\sigma_{cw}} = 0.8 \left[ \frac{\Delta r}{r} \left( \frac{L'}{L} \right) \right]^{0.45}$	Rough Rock Socket	
Canadian Foundation Engineering Manual (2006)	$\mu p_a \left(\frac{q_u}{p_a}\right)^{0.5}$	$q_u < f'_c$	Smooth : 0.63 Middle : 1.41 Rough : 1.91
	$0.05f'_c$	$q_u > f'_c$	
FHWA (2010)	$p_a c \left(\frac{q_u}{p_a}\right)^{0.5}$	General : c=1 Lower value : c=0.63 Artificiality swelling : c=1.9	

$q_u$  : Uniaxial compressive strength,  $f'_c$  : Skin friction per unit area,  $\Delta r$  : Average roughness height,  $\mu$  : Skin friction Resistance Factor,  $c$  : Roughness factor

국내의 설계기준들에서 제시된 암반에 근입된 현장타설말뚝의 단위면적당 주변마찰력 산정식은 Table 1과 같다. FHWA(1999)는 현장에서 측정한 거칠기 인자를 이용하여 주변마찰력을 산정하는 방법을 제시하고 있다.

시험부지 상부에는 매립층이 2.7m 정도 분포하고 있으며, 퇴적층이 1.8m, 풍화토층이 2.5m, 풍화암층이 3.0m, 하부로 연암층이 분포하고 있었다. 연암의 경우 TCR=40%~100%의 분포를 보이고 있으며, RQD=10%~68%의 분포를 보이고 있었다.

### 3. 지반조건 및 시험말뚝의 제원

본 연구에서 시공한 말뚝의 제원은 Table 2와 같다.

시험부지의 지층개요 및 흙의 특성은 Fig. 2와 같다.

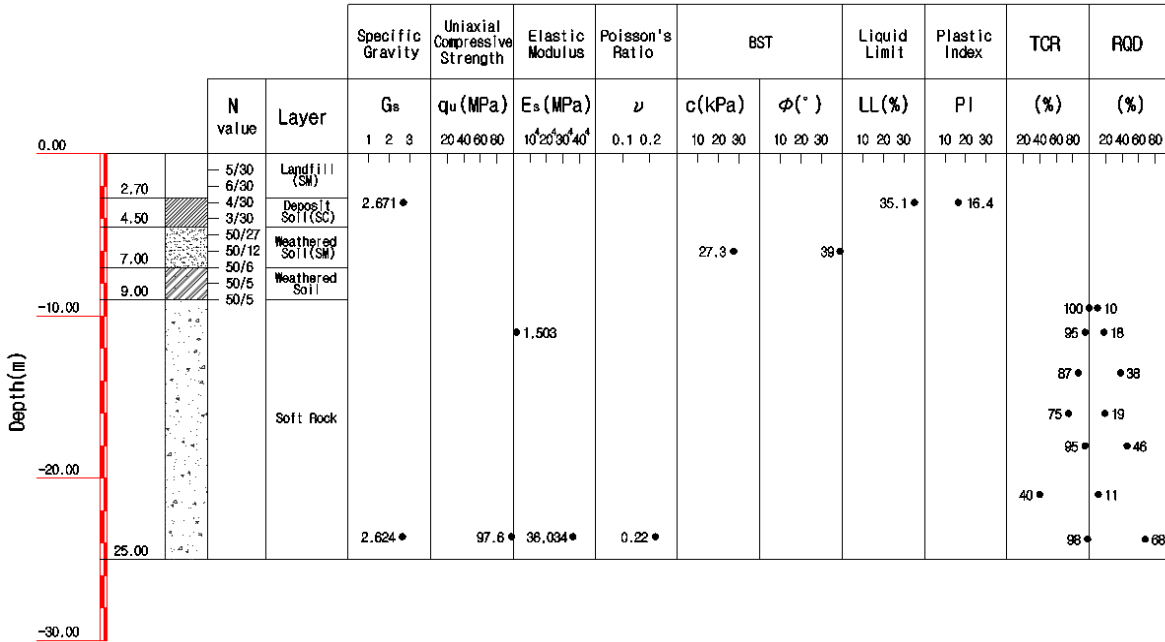
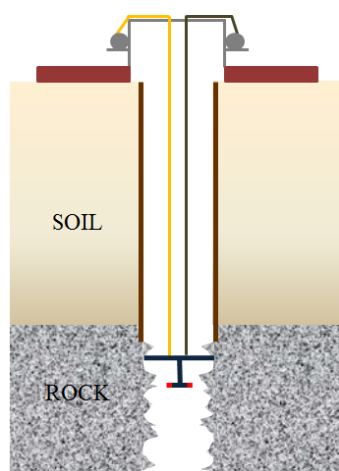
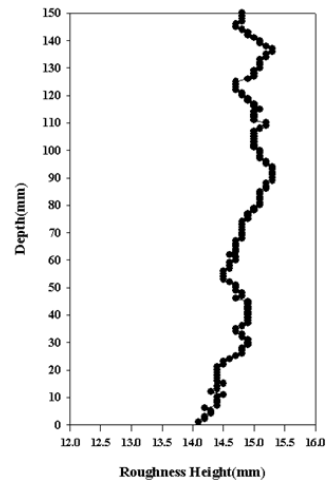


Fig. 2. Characteristics of soil



(a) Concept map



(b) Examples of results

Fig. 3. Rock socket Roughness test fundamental concept

Table 2. Specification of Pile

Diameter (mm)	Length (m)	Design Load (kN)	Test Load (kN)
1,000	7.5	10,000	15,000

## 4. 거칠기 측정을 위한 현장시험

### 4.1 시험 개요

암반에 근입되는 현장타설말뚝의 주변마찰력은 암석의 일축압축강도 외에 소켓 벽면의 거칠기, 암반의 재료 특성, 초기 수직응력, 말뚝의 직경, 암반의 절리 및 풍화 등에 크게 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 특히 암반 소켓 벽면의 거칠기는 현장타설말뚝의 주변마찰력에 큰 영향을 미치는 것으로 여러 학자들의 연구에 의해 증명되었다. 현장타설말뚝의 국내 설계기준들(도로교 설계기준 해설(2001), 한국도로공사 설계기준(2002), 구조물 설계기준(2009) 등)에서도 암반 소켓 벽면의 중요성을 인지하고 주변마찰력 예측 시 거칠기를 고려하도록 명시 되어있다. 하지만 국내 거칠기 측정 데이터의 부족 및 현장에서 직접 측정할 수 있는 장비의 한계로 인해 실무에서는 고려하기가 힘든 실정이다. 이러한 문제를 해결하기 위해 G-ROUGHNESS TEST가 개발되었으며 이를 통해 암반 소켓 벽면의 거칠기 양상을 측정하여 암반부의 주변마찰력을 시공과 동시에 산정할 수 있도록 하고자 한다.

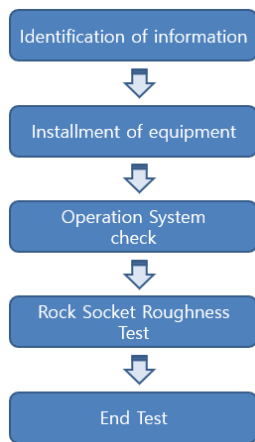


Fig. 4. Rock socket Roughness test Sequence



(a) System installation

### 4.2 시험순서 및 시험 광경

본 연구에서 수행한 암반 벽면 거칠기 시험 순서를 Fig. 4에 나타내었다. 거칠기 시험은 4방향으로 측정하였으며 수직방향으로 500mm마다 측정을 수행하였다. 시험을 수행한 전경은 Photo 1과 같다.

### 4.3 시험 결과 및 분석

직경 1,000mm 현장타설말뚝에 대한 연암부의 거칠기 양상을 측정한 결과는 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 보는

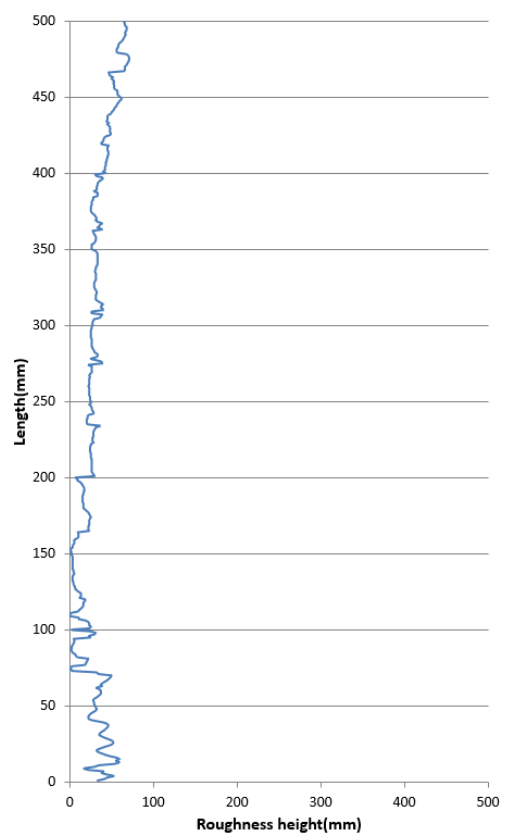


Fig. 5. Result of roughness test



(b) Roughness measurement

Photo 1. Roughness field test view

Table 3. Roughness factor and Skin friction

Average Roughness Height, $\Delta r$ (mm)	Roughness Factor	Unit Skin Friction ( $\text{kN/m}^2$ )
24.79	0.0105	2,620

바와 같이 연암부의 길이 방향으로 500mm 범위를 측정하였다.

Fig. 5의 결과를 Fig. 1에 도시한 Horvath Roughness Model을 이용한 프로파일을 정량화 과정을 수행하여 Table 3과 같이 거칠기 계수(RF)를 도출하였다. Table 3과 같이 시험말뚝의 연암부 단위주면마찰응력은  $2,620 \text{ kN/m}^2$ 로 산정되었다.

### 5. 거칠기 시험 검증 절차

4.3절과 같은 결과를 검증하기 위하여 동일한 현장타설말뚝(직경 1,000mm)에 대하여 정재하시험 및 하중전이시험을 수행하였다.

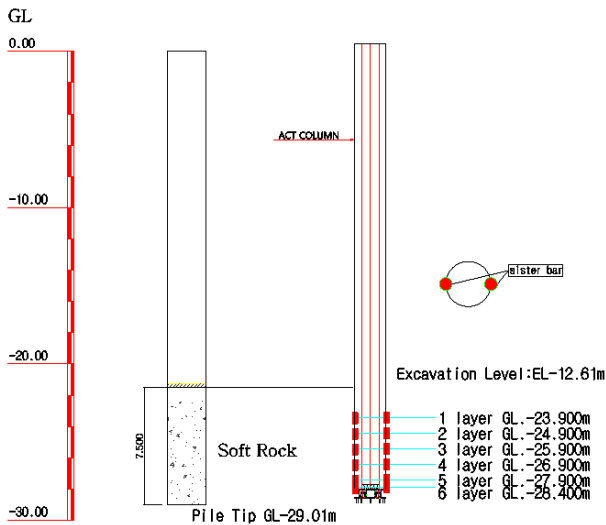


Fig. 6. Installation location of load cells and load transfer sensors

### 5.1 재하장치 및 하중전이센서 설치

Photo 2는 본 연구에 사용한 재하장치와 하중전이센서의 설치 광경을 보이고 있다. 재하장치 및 하중전이센서 설치 위치는 Fig. 6과 같다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 재하장치는 연암 선단에 설치하였으며 하중전이센서는 연암부에 총 6개소를 2방향으로 설치하였다.

### 5.2 정재하시험 및 하중전이시험 결과

정재하시험의 결과인 하중-침하량 곡선을 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 보는 바와 같이 최대재하하중  $15,000 \text{ kN}$ 을 가했을 때 상향변위  $1.473 \text{ mm}$ , 하향변위  $1.530 \text{ mm}$ 가 발생하였으며 이때, 말뚝은 항복이 발생하지 않은 탄성 거동을 보이고 있었다.

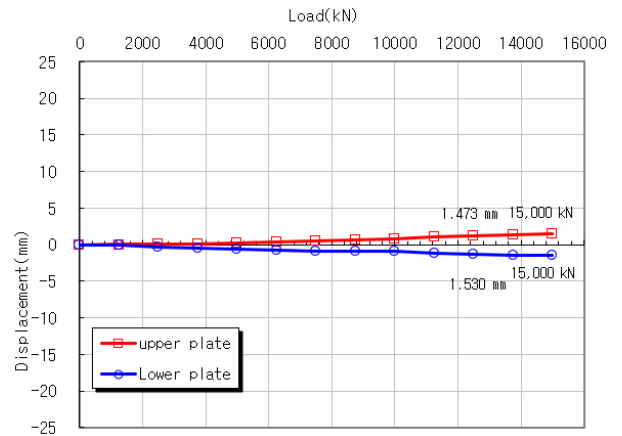


Fig. 7. Load-Displacement curve

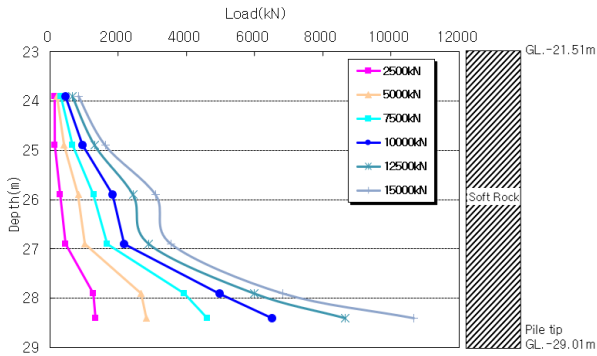


(a) Load cells

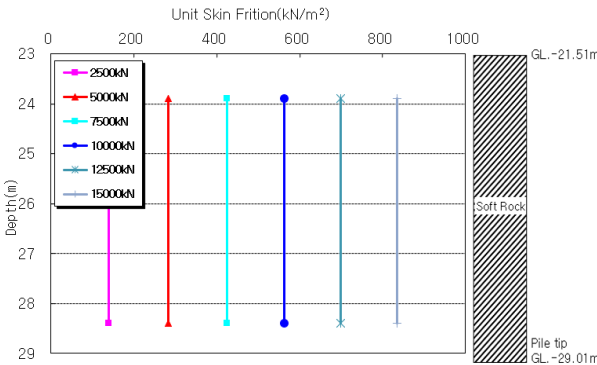


(b) Load transfer sensor installation

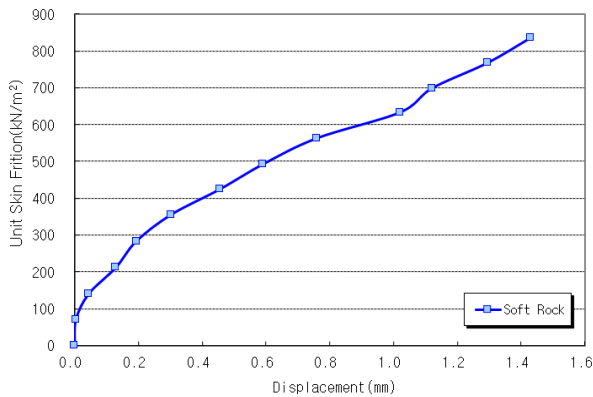
Photo 2. Installation of Load cells and load transfer sensors



(a) Load transfer curve



(b) Average skin friction curve



(c) t-z Curve

Fig. 8. Result of load transfer test

Fig. 8은 하중전이시험 결과를 나타내고 있다. Fig. 8(a)는 재하하중 단계에 대한 깊이별 하중전이분포를 나타내고 있으며, Fig. 8(b)는 재하하중 별 연암부 평균 주면마찰력을 나타내고 있고, Fig. 8(c)는 t-z곡선을 나타내고 있다. Fig. 8에서 보는 바와 같이 최대재하하중인 15,000kN에서 연암의 평균주면마찰력은 835kN/m<sup>2</sup>이었다.

### 5.3 거칠기 측정과 하중전이시험 결과의 비교 분석

거칠기 시험 결과와 하중전이 시험에 의한 단위주면

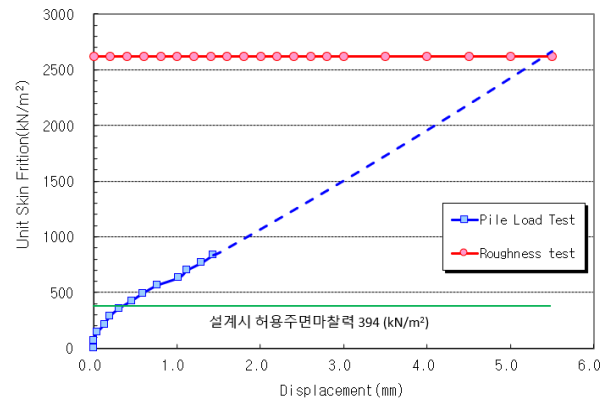


Fig. 9. Comparison of the results on the roughness test and load transfer test

마찰응력-변위 관계곡선을 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9에서 보는 바와 같이 측정된 변위가 1.473mm로 너무 작게 측정되었다. 연암 소켓길이가 7,500mm로 긴 반면에 직경 1,000mm인 현장타설말뚝에 배치 가능한 가압 실린더의 최대 용량이 15,000kN 밖에 되지 않아 주면마찰저항력의 초기 단계까지만 확인이 가능하였다.

Fig. 9에서 거칠기 시험 및 하중전이시험의 결과 모두 현재 사용하고 있는 제안식에 의한 허용단위주면마찰응력을 상회한다는 것을 알 수 있으며 t-z 곡선을 연장하면 변위 약 5.4mm에서 거칠기 시험의 결과와 만나는 것을 알 수 있었다. 즉, 기존의 제안식에 의한 단위주면마찰응력보다 실제 말뚝의 주면마찰저항이 상당히 크게 발휘된다는 것을 알 수 있었다.

Fig. 9의 결과는 직경 1,000mm, 연암소켓길이가 7,500mm인 경우에 한정된 시험 결과로서 향후 다양한 직경과 암반소켓길이에 대한 데이터를 확보하여 거칠기 시험에 의한 주면마찰력 산정 방법을 정량화할 필요가 있을 것이다.

## 6. 결론

본 연구에서는 현장타설말뚝의 암반 소켓부 벽면의 거칠기 양상을 천공홀에서 직접 측정하였으며 그 결과를 이용하여 암반의 주면마찰력 특성을 파악하고자 하였다.

Horvath Roughness Model을 이용한 프로파일을 정량화 과정을 수행하여 거칠기 계수(RF)를 도출하였으며 시험말뚝의 연암부 단위주면마찰응력은 2,620kN/m<sup>2</sup>로 산정되었다.

현재 사용하고 있는 제안식에 의한 허용단위주면

찰응력보다 거칠기 시험 및 하중전이시험의 결과가 상회한다는 것을 알 수 있었다. 즉, 기존의 제안식에 의한 단위주면마찰응력보다 실제 말뚝의 주면마찰저항이 상당히 크게 발휘된다는 것을 알 수 있었다.

본 연구는 직경 1,000mm, 연암소켓길이 7,500mm인 경우에 한정된 시험 결과로서 향후 다양한 직경과 압반소켓길이에 대한 데이터를 확보하여 거칠기 시험에 의한 주면마찰력 산정 방법을 정량화할 필요가 있을 것이다.

### 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부에서 시행한 과학기술 분야 연구개발사업(2018년 기술이전사업화 사업 2018-BS-RD-0003-01-201) 지원으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

### 참고문헌 (References)

1. Horvath, R. G., Kennet, T. C., and Kozick, P.i (1983), "Mehtods of Improving the Performance of Drilled Piers in Weak Rock", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, pp.758-772.
2. Kulhawy, F. H. and Phoon, K. K. (1993), "Drilled Shaft Side Resistance in Clay Soil to Rock", *Design and Performance of Deep Foundation, GSP No. 38, Ed. by P. P. Nelson, T. D. Smith and E. C. Clukey*, ASCE, October, pp.172-183.
3. Seidel, J. P. and Collingwood, B. (2001), "A New Socket Roughness Factor for Prediction of Rock Socket Shaft Resistance", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. February, pp.138-153.

Received : June 10<sup>th</sup>, 2019

Revised : October 28<sup>th</sup>, 2019

Accepted : October 29<sup>th</sup>, 2019