

## 국내 현장타설말뚝의 주면 접촉부에 대한 일정강성도 전단시험 CNS Shear Tests for Granite-Concrete Interface of drilled shaft

조천환<sup>1)</sup>, Chun-Whan, Cho, 이명환<sup>2)</sup>, Myung-Whan, Lee, 김성희<sup>3)</sup>, Sung-Hoe, Kim,  
이혁진<sup>4)</sup>, Hyuk-Jin, Lee, 유한규<sup>5)</sup>, Han-Kyu, Yoo.

<sup>1)</sup>(주) 파일테크 부사장, Vice President, Piletech Consulting Engineers.

<sup>2)</sup>(주) 파일테크 소장, Principal Researcher, Piletech Consulting Engineers.

<sup>3)</sup>(주) 파일테크 부장, Chief Engineer, Piletech Consulting Engineers.

<sup>4)</sup>(주) 파일테크 연구원, Researcher, Piletech Consulting Engineers.

<sup>5)</sup>한양대학교, 토목환경공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Eng., Hanyang Univ.

**개요(SYNOPSIS)** : The purpose of this paper is to develop an understanding of fundamental mechanism of shear behaviour between granite and concrete interfaces. The interface of pile socketed in rock can be modeled in laboratory tests by resolving the axisymmetric pile situation into the two dimensional situation under CNS(constant normal stiffness) direct shear condition. In this paper, the granite core samples were used to simulate the interface condition of piles socketed in granite. The samples were prepared in the laboratory to simulate field condition, roughness(angle, height), stress boundary condition, and then tested by CNS direct shear tests. This paper gives some points about shearing behaviour of socket piles into domestic granite through the analysis of CNS tests results.

**주요어(Key words)** : constant normal stiffness, roughness, drilled shaft, granite, socket

### 1. 서론

암반 근입부의 주면지지력에 영향을 주는 요인에는 암석의 강도( $q_u$ ), 근입부의 거칠기( $\Delta r$ ), 암반의 변형계수 및 포아송비( $E_m, \nu_m$ ), 근입부의 직경( $d=2r$ ), 초기수직응력, 굴착방법 등이 있다.

암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동을 실내에서 실험하기 위해서는 이러한 영향요인을 반영한 현장에서의 전단거동을 모델링해야 한다. 현장에서의 전단거동은 일정수직강성도(constant normal stiffness; CNS)조건으로 모델링할 수 있다.

모델링에서의 주요 관점은 현장타설말뚝의 축방향 전단시 거칠기에 의한 말뚝직경의 증가( $\Delta r$ )와 이에 따른 수직응력의 증가( $\Delta \sigma_n$ )이며 이러한 조건은 식(1)과 그림 1에서와 같이 일정수직강성도로 설명된다. 이러한 전단조건은 암반의 사면에서 일어나는 전단거동조건, 즉 일정수직응력(constant normal stress)조건과는 완전히 다른 것이며 얻어지는 결과치는 크게 차이가 있다.

$$\Delta \sigma_n = \frac{E_m}{(1 + \nu_m)} \frac{\Delta r}{r} \quad (1)$$

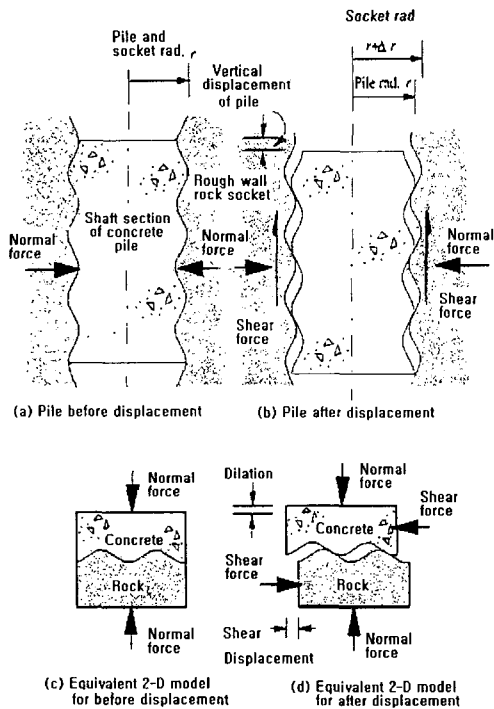


그림 1. 록소켓의 이상화된 일정수직강성도 조건 (Seidel, 1993)

암반에 근입된 현장타설말뚝의 전단거동을 파악해 보았다.

## 2. 시험장비

암석과 콘크리트의 부착면에 대한 전단시험은 일정수직강성도 전단시험장비를 이용하여 수행되었다. 이 장비는 1990년도에 호주 멜번의 Monash 대학에서 제작된 것으로 크기는 높이가 4m, 길이 4m 정도이다. 그림 2는 시험장비의 개요를 보여주고 있다. 이 장비에 대한 특징은 다음과 같다.

- 시편의 크기는 길이 600mm, 너비 200mm, 높이 135mm까지 조립할 수 있다.
- 시료의 축방향 전단변위는 2개의 변위계(LVDT,  $\pm 0.01\text{mm}$ ), 시료의 축직각 방향 변위는 3개의 변위계(LVDT,  $\pm 0.002\text{mm}$ )에서 측정하고, 축방향 및 축직각 방향의 하중은 각 하중계에서 측정한다. 이러한 변위와 하중은 컴퓨터에 의해 자동으로 기록된다.
- 수직력과 전단력은 자동조절장치(servo controller)가 달린 25톤 용량의 actuator에 의해 작동된다.
- 단상 및 주기적인 하중과 변위의 작동이 가능하다.
- 수직응력에 대한 하중조절을 위해 전단변위에 따른 강성도의 조절이 자동적으로 이루어진다.
- 전단하중의 자동조절장치는 변위제어 및 하중제어가 가능하다. 본 시험은 변위제어방식(0.5mm/min)으로 수행되었으며 이 값은 시험하는 동안의 과잉간극수압의 영향을 배제하도록 결정되었다.
- 전단시 축방향 및 축직각방향의 면적수정이 가능하다.
- PC를 이용한 동시 화상 관찰 및 제어가 가능하고 비디오 카메라를 이용하여 전단과정의 촬영이 가능하다.

암반에 근입된 현장타설말뚝의 거동 시험은 말뚝의 축방향대칭성을 고려해 암반에 근입된 전단면(또는 암-콘크리트 접촉부)은 2차원으로 실험실에서 모델링함으로써 일정강성도 조건의 전단시험을 실시할 수 있다. 그림 2는 암과 콘크리트의 접촉면을 모사하여 전단시험을 하는 개념을 보여주고 있다. 적용된 수직응력은 전단시 시료의 팽창 조건과 관련된 것으로 피이드 백(feed back) 조절장치 등을 통해 일정강성도 조건을 유지할 수 있다(파일테크 등, 2002).

콘크리트와 암반 접촉면의 거칠기는 현장타설말뚝의 주면저항력을 지배하는 중요한 요소이다. 그러므로 본 시험은 화강암과 콘크리트 접촉부의 전단거동에 대한 거칠기의 영향을 검토할 수 있도록 고려되었다. 그동안 여러 연구에서 현장타설말뚝의 암반근입부의 거칠기에 대해 측정이 이루어 졌으며 이들 결과의 대부분은 근입부의 거칠기는 변화가 매우 크다는 결론에 이르고 있다. 따라서 본 논문에서는 현장에서의 거칠기 형상을 조사하여 모사한 시편을 전단시험에 적용하였다.

본 연구의 주 목적은 화강암과 콘크리트의 부착면에서의 전단거동을 이해하기 위한 것이다. 따라서 현장에서 채취한 화강암면에 콘크리트를 타설하여 만든 시편을 가지고 CNS 전단시험을 실시하여

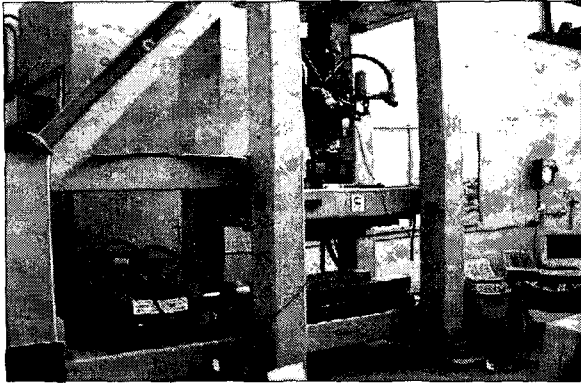


그림 2. CNS 전단 시험장비의 전경



그림 3. 시험시편이 설치된 전단상자 모습

분리형 전단박스는 각각 암과 콘크리트를 설치할 수 있도록 되어있고 이의 크기는 600mm×200mm, 높이는 135mm 이다. 하부상자의 깊이는 60mm로 콘크리트를 설치하고, 상부상자는 50mm로 암석시료를 설치하도록 고안되었다. 2개의 전단상자는 분리형 철판으로 연결되는데, 이는 시료준비과정에서 설치되었다가 시험시는 제거되어 상하부 전단상자가 전단면을 중심으로 25mm의 유격이 만들어진다. 따라서 이를 통해 전단부의 관찰과 기록이 가능하다. 전단상자, 지지 시스템, actuator, 조절장치, 측정장치, 출력장치 등의 상세는 Seidel (1993), Seidel and Haberfield (1994)를 참고할 수 있다.

### 3. 시험시편

국내에서 현장타설말뚝이 시공되는 암의 종류는 풍화암에서 연암정도의 풍화도이다. 국내의 타설 콘크리트의 배합강도는 약 29MPa이며 최대 36MPa까지 이용되고 있다. 따라서 실험에 이용될 암의 강도는 콘크리트의 강도, 36MPa를 기준으로 3종류(26MPa 이하, 26MPa 이상 36MPa 이하, 36MPa 이상)로 구분하였다. 실험에 이용된 암은 자연상태에서 코어링된 화강암으로 선산과 광주 지역에서 채취한 암석으로 일축압축강도와 필요한 물성시험이 수행되었다. 현장상태를 반영하기 위해 일축압축강도가 비교적 낮은 시편들도 포함시켰는데 이들의 경우는 시편들의 풍화도가 비교적 심하고 미세한 균열을 포함하고 있는 경우가 많았다. 한편, 콘크리트의 배합설계 강도는 암에서의 전단거동을 살펴보는 것이 주목적이므로 암에서만 전단이 되도록 압축강도를 시험에 맞는 양생일정에 따라 50MPa~60MPa 정도로 유지하였다.

시험에 적용한 거칠기는 국내의 현장타설말뚝에서 직접 측정된 거칠기 분류(rough, medium, smooth)를 이용하였는데, 국내 현장타설말뚝의 거칠기는 평균적인 돌기의 각도를 rough(15°), medium(10°), smooth(5°)로 조사하였다. 이를 기준으로 현의 단위길이(chord length)를 16mm로 설정한 후 Seidel (1993)의 방법에 따라 거칠기의 단면을 작성하여 시험에 이용하였다.

암석코어는 고압살수절단기(water-jet cutter)를 이용하여 결정된 거칠기 단면대로 절단하였다. 단면이 절단된 후 절단면 위에 얇은 랩(wrap)을 씌우고 콘크리트를 타설한 후 항온항습조(fog room)에서 양생시켰다. 암석과 콘크리트를 분리시킨 이유는 콘크리트와 암석의 부착력을 제외함으로써 전단기구를 보다 용이하게 확인하기 위함이다. 암석과 콘크리트의 전단기구에 대한 부착력의 영향은 Gu(2001)의 연구를 참고할 수 있다.

시험 시편이 양생된 후에는 비닐을 제거하고 시편은 강판 등을 이용하여 전단박스에 고정 설치한 후 공간은 플라스틱을 타설하여 양생함으로써 고정시켰다. 그림 3은 시험시편이 전단상자에 설치된 모습을 보여주고 있다.

그림 1에서와 같이 현장타설말뚝은 전단시 거칠기 면을 따라 팽창이 발생한다. 팽창이 일어남에 따라 부가적인 수직응력이 선형적으로 증가하게 되며 결국 전단은 일정수직강성도 조건에서 발생하게 된다. 또한 현장타설말뚝은 콘크리트의 타설로 인해 초기수직응력을 포함하고 있으므로 시험시는 이를 고려해

야 한다. 따라서 전단시험의 경계조건은 국내 현장타설말뚝의 평균조건을 고려하여 초기수직응력(initial normal stress)은 250kPa로 고정하고, 강성도는 평균값 320kPa/mm를 기준으로 100kPa/mm 와 960kPa/mm로 변화시켜 적용하였다.

전술한 강도 수준 및 거칠기 조건에 시험 경계 조건을 고려하여 시험의 경우의 수를 총 15개로 선정하였다. 표 1에는 시험이 수행된 총 15개의 시편 중 분석에 이용된 시험조건 5개를 요약하였다.

표 1. CNS 시험을 위한 시편조건

No.	Test No	Specimen Description (LxD) (mm×mm)	UCS (MPa)	Roughness			Stress Boundary Condition		
				Category	Mean Angle (deg)	Mean Height (mm)	Intial Normal Stress (kPa)	Constant Normal Stiffness (kPa/mm)	
1	FQA01	235×51	≤26	21	Smooth	5	1.26	250	320
2	FQA04	262×51		21	Medium	10	2.53	250	100
3	FQA05	230×51		25.7	Medium	10	2.53	250	320
4	FQA06	245×51		26	Medium	10	2.53	250	960
5	FQA13	510×52		22	Rough	15	3.84	250	320

#### 4. 시험결과 및 고찰

본 연구에서는 총 15개의 전단시험이 실시되었다. 각각의 시험조건은 표 1과 같은데 전체적으로 시험 조건은 암석의 일축압축강도에 따라 3부류로 구분할 수 있다. 전반적인 시험 결과를 본 논문에서 모두 제시하는 것은 어려우므로, 전반적인 시험결과와 경향이 유사한 점을 고려하여 여기에서는 표 1에서 소개한 첫 번째 부류(일축압축강도 ≤ 26MPa)의 시험결과에 대해서만 언급한다.

그림 4는 동일 경계조건, 초기수직응력과 일정수직강성도(initial normal stress /constant normal stiffness(INS/CNS)가 250kPa/320kPa/mm인 조건에서 요철부의 평균 경사각(mean asperity angle; MAA)이 5°, 10°, 15°로 변할때의 전단거동을 보여주고 있다. 그림에서와 같이 첨두 전단강도는 요철부의 경사각이 증가할수록 증가함을 알 수가 있다. 이는 요철부의 경사각이 클수록 후술할 팽창량(dilation)이 커짐에 따라 수직응력이 증가하는 것에 기인하는 것이다. 이러한 사실은 시편번호 FQA01에 대한 전단변위 및 팽창량에 따른 수직응력의 변화를 도시한 그림 5와 6으로부터 알 수가 있다. 즉 그림 5에서와 같이 전단이 진행됨에 따라 요철부를 미끄러지면서 수직응력이 커지다가 최대 요철부를 지나서는 보다 작은 요철부에 의해 지배되어 수직응력은 더 이상 커지지 않는다. 암반과 콘크리트의 접촉부가 팽창되면서 변화되는 수직응력은 그림 6에서와 같이 이미 계획된 일정수직강성도 조건으로 제어되는 것을 알 수가 있다.

그림 4에서 전단거동은 요철부의 평균 경사각이 커지면 보다 취성적(brittle)이고 작으면 보다 연성적(ductile)인 것을 볼 수가 있다. 아울러 그림 4에서 보면 요철부의 경사각이 10°와 15°인 경우는 요철부가 파괴되고, 5°인 경우는 파괴되지 않고 요철부를 미끄러져 넘어가는 현상(overtopping)이 나타남을 알 수가 있다. 특히 FQA13의 경우는 파괴이후에도 전단응력이 계속 증가하는 것을 볼 수가 있는데 이는 첫 번째 요철부가 파괴된 후 2번째 요철부가 영향을 주기 시작한 것에 기인하는 것이다.

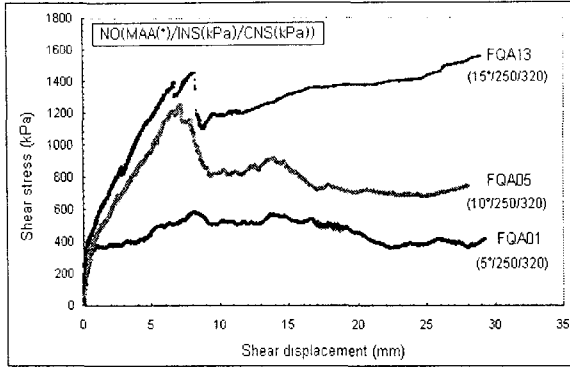


그림 4. 동일경계조건에서 요철부의 평균경사각에 따른 전단거동

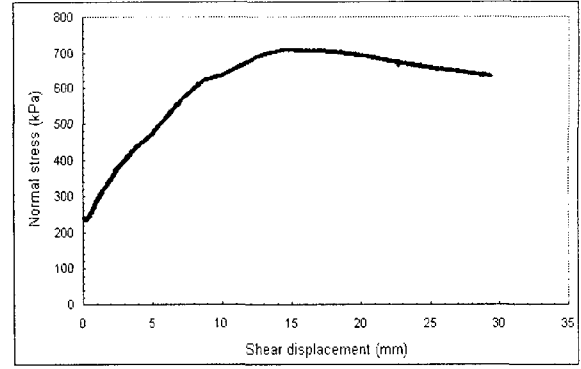


그림 5. 단위 전단변위에 따른 수직응력변화(FQA01)

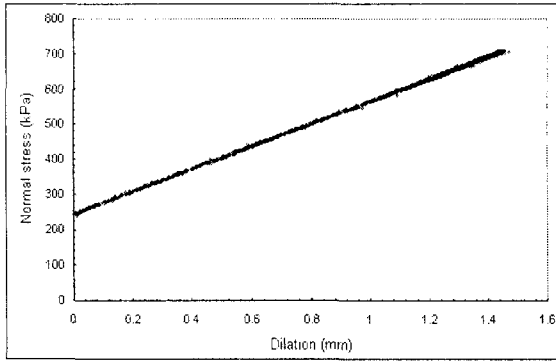


그림 6. 팽창량에 따른 수직응력변화(FQA01)

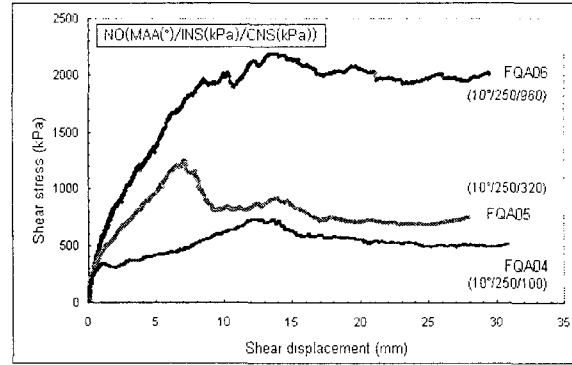


그림 7. 수직강성도 조건에서 전단거동

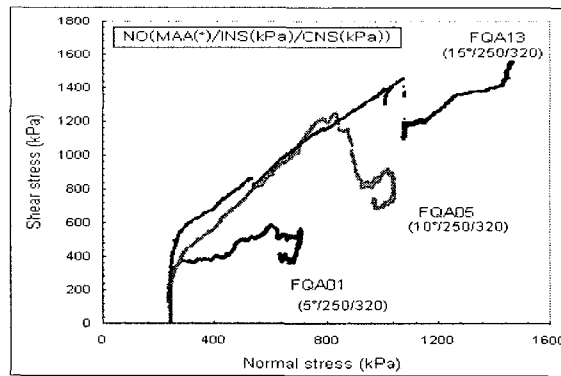


그림 8. 동일한 경계조건에서 요철부의 평균경사각에 따른 응력 변화

그림 7에서와 같이 수직강성도가 증가함에 따라 침투 전단강도는 커진다. 이러한 경향은 현장타설말뚝의 전단거동에 중요한 역할을 하는 것으로 일정 수직응력조건으로 전단되는 암사면의 경우와의 차이를 보여주는 것이다. 따라서 현장타설말뚝의 전단강도는 동일한 조건에서의 암사면에서의 그것보다 훨씬 크게 나타나고 치수효과에 영향을 받는다. 그림 7의 FQA05는 다른 것 보다 수직강성도가 작음에도 파괴된 것을 볼 수가 있는데 이는 시편내에 차별 풍화부를 포함하고 있어 이 부분이 먼저 파괴된 것을 반영한 것으로 보인다.

그림 8에서와 같이 요철부의 평균경사각이 클수록 전단응력과 수직응력은 커지는 것을 알 수가 있다. 전체마찰각은 Patton (1966)이 제안한 것처럼 요철부의 경사각과 미끄러짐 마찰각에 의존하는데 이는 그림 8에서와 같이 요철부의 경사각이 커질수록 전체 마찰각은 커지는 것을 알 수가 있다. 다만 시편들이 미세한 균열을 포함하고 있으므로 이들 각도에 대한 정량적인 값은 분명하게 찾기는 어렵다. 또한 그림 8에서 전체 마찰각은 일정한 값을 주지 않고 전단변위에 따라 점차 줄어드는 경향이 있는데 이는 본 시험시편에서는 거칠기 단면이 규칙적인 것(regular type)이 아닌 불규칙한 형태(random type)의 것을 사용함으로써 전단시 점진적 파괴를 반영한 것으로 사료된다.

## 5. 결론

콘크리트와 화강암시편의 접촉면에 대한 CNS 전단시험을 현장조건과 모사하여 실시한 결과, 암의 거칠기 단면이 불규칙한 형태이고, 암 코아의 단면에 미세 균열을 포함하고 있어 전단거동 자체가 규칙적인 단면(regular profile)에서와 같은 분명하지는 않았지만 전체적인 전단거동의 경향은 일관된 결과를 보여주고 있었다. 이러한 현상은 오히려 현장조건을 나타낸다고 할 수 있을 것이다.

화강암 시편의 CNS 전단시험 결과, 침투 전단강도는 요철부의 경사각이 증가할수록, 그리고 수직강성도가 증가할수록 증가하고, 또한 요철부의 평균경사각과 수직강성도가 클수록 전단응력과 수직응력이 커지는 것으로 나타나 암반에 근입된 현장타설말뚝의 전단거동을 이해할 수 있었다.

또한, 현장타설말뚝의 전단거동에 중요한 역할을 하는 전단시 팽창 현상 및 이에 따른 수직응력의 증가 현상을 관찰할 수 있었으며 이는 암반사면의 전단거동과 큰 차이가 있음을 알 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 2001 산학연 공동연구개발사업 ‘암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운 설계기법 개발’ 과제의 연구결과입니다.

## 참고문헌

1. 파일테크, 한양대학교(2002), **암반층에 근입된 현장타설말뚝의 새로운설계기법 개발 연구보고서**, 건설교통부/한국건설기술연구원, pp.153.
2. Gu, X. F.(2001), "Shear behaviour of sand stone-concrete joints and pile shafts in sand stone", Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia.
3. Patton, F. D.(1966), "Multiple models of shear failure in rock", *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, Vol. 1, pp.31-39.
4. Seidel, J. P.(1993), "The analysis and design of pile shafts in weak rock", Ph.D. dissertation, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia.
5. 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.