

## 개선된 직접전단시험기(CNS)를 이용한 보강재의 인발력 추정 Estimation of Pull-out force by using modified Direct Shear Apparatus

유병선<sup>1)</sup>, Kyung-Tae Kim, 이학무<sup>2)</sup>, Hak-moo Lee, 장기태<sup>3)</sup>, Ki-Tae Chang, 한희수<sup>4)</sup>, Heui-Soo Han

- 1) (주)GMG 과장, Section Chief, GMG Co. Ltd.
- 2) 금오공과대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. Civil Eng, KIT
- 3) 금오공과대학교 토목공학과 교수, Professor, Kumoh National Institute of Technology
- 4) 금오공과대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Kumoh National Institute of Technology

**Abstract** : When a nail pulled out in dense, granular soil, the soil in the vicinity of the nail tends to dilate, but its dilatancy results in a normal stress concentration at the soil/nail interface, thereby increasing the pull-out resistance of the inclusion. It is thought to be occurring within the resistance zone where the soil mass is at stationary state and the reinforcement are held in position by the soil, due to the friction or bond. In this paper, A series of direct shear and interface tests were conducted by using so called ' Constant Normal Stiffness Test Apparatus' which was modified and improved from the conventional direct shear box test rig. Unlike the normal shear box test, this enables to simulate the different constraint effects of surrounding soil during shear under the conditions of constant stress and volume, constant normal stiffness. The aim of the research programme is to get better understanding of pull-out bond mechanism, thus to explore the possibility of evaluating the pull-out bond capacity of soil/reinforcement at the preliminary design stage from the laboratory test.

**Key words** : Dilatancy, Pull-out resistance, Constant stress, Constant volume, Constant normal stiffnes

### 1. 서론

보강재의 발휘 능력을 알기 위해 수행하는 것이 Pull-out test(인발시험)인데, 인발저항력은 일반적으로 인발저항력 산정식 또는 인발시험에 의해 구해진다. 하지만, 현재로서는 Pull-out mechanism에 많은 불확실성들(Restrained dilation, Pull-out의 적용영역, Transition zone의 존재, Debonding mechanism, Boundary condition)이 내포 되어있어 확립된 이론이 없다. 인발저항력 추정을 위해 그 동안 수많은 이론적인 시도와 노력이 있었음에도 불구하고 아직은 현장 인발시험이 현장 지반설계에 가장 적합한(Site-relevant Design) 방법으로 통용되고 있는 실정이며, 필수적인 사항(Paramount importance)으로 권장 되고있다.

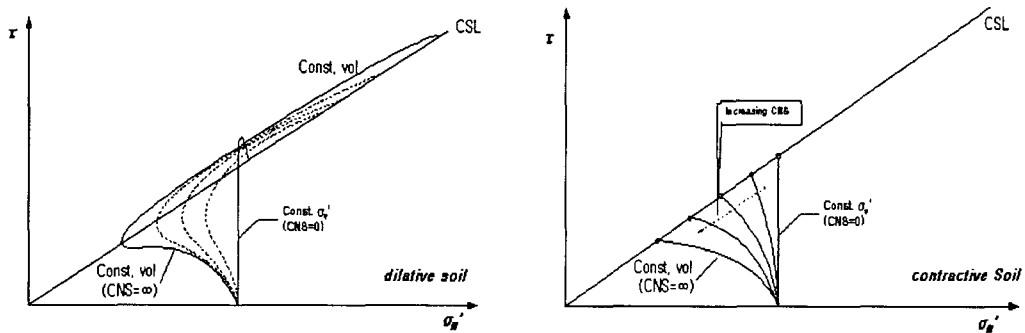
토질역학에서 전단강도의 매개변수는 바로 흙의 마찰각과 점착력이다. 이 시험에서는 사질토를 이용하는 Interface 시험이므로 흙의 거동과 함께 가장 고려해야할 것은 구속력에 의한 Dilation

영향이다. 기존의 설계방법이 흙의 물성치에 근거한 방법이었다면, 여기서는 좀더 현실적인 흙과 보강재 사이의 관계를 규명함으로써 구체적인 예비설계의 틀을 마련하고자 한다.

이를 위하여 모든 시험과정을 컴퓨터에 의해 제어하도록 설계된 개선된 직접전단시험기를 제작하여 이용하였다. 개선된 직접전단시험기는 컨트롤박스와 기계본체 그리고 콤프레셔, 컴퓨터, data logging system 등으로 이루어져 있다. 최신의 시험방법으로서 특수 제작된 컴퓨터제어 시스템으로 수직응력은 공기압을 사용하였으며 하중 측정장치는 loadcell을 이용하였다.

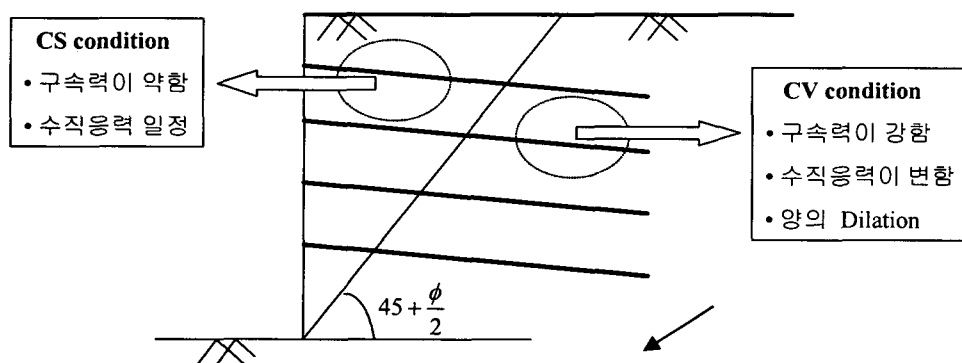
## 2. Constant Stress condition과 Constant Volume condition

### 2.1. CNS에 의한 CS & CV condition 분류



<그림 2.1> CNS값에 따른 CS & CV condition (K.T.Chang, 1999)

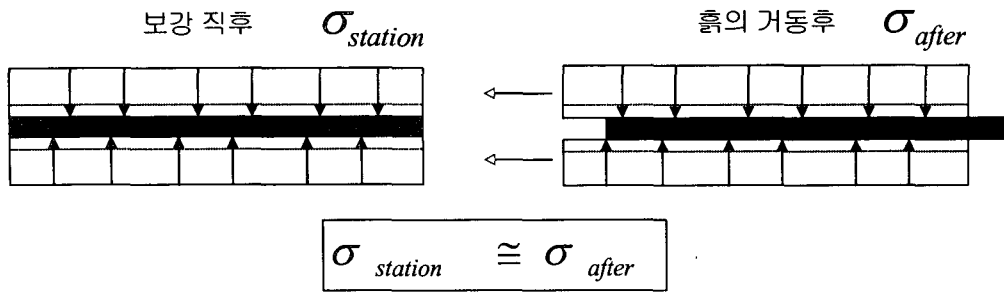
그림 2.1에 의하면 Constant Normal Stiffness값에 따라 Constant Stress condition과 Constant Volume condition이 된다. 만약 강성이 거의 zero에 가깝다면 기존의 직접전단시험과 같이 경계조건이 자유롭게 되고 초기응력은 전단변위가 전개되는 동안 변하지 않는 것이다. 반대로 강성이 무한대로 가깝고 경계조건이 구속되어있다면 이는 이 경계에 작용한 초기응력은 전단변위가 전개되는 동안 증가할 것이다. 이를 각각 CS & CV condition이라 한다.



<그림 2.2> 보강 단면에서의 CS & CV condition

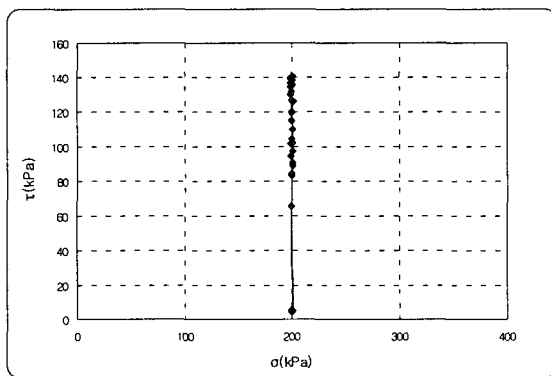
### 2.2. Constant Stress condition

기존의 직접전단시험 처럼 수직응력을 동일하게 주는 상태가 된다. 여기서의 흙의 거동은 Constant stress 상태라 한다.

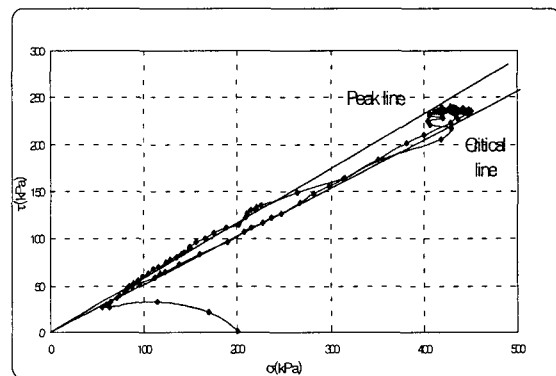


<그림 2.3> Slippage에 의한 Boundary displacement problem의 CS condition에  
서의 수직하중 조건 (거동 전후의 비교) (K.T.Chang, 1999)

그림 2.3에서 알 수 있는 것은 사면의 경우 주동영역의 소성영역은 구속력이 약하여 flexible한 상태가 된다. 흙의 거동전후의 수직응력은 동일하다. 사면의 경우 이 범위는 최소 주응력 방향에서  $45 + (\phi_{ds}/2)$ 가 된다. 이 시험에서의 응력경로는 그림 2.4와 같다.



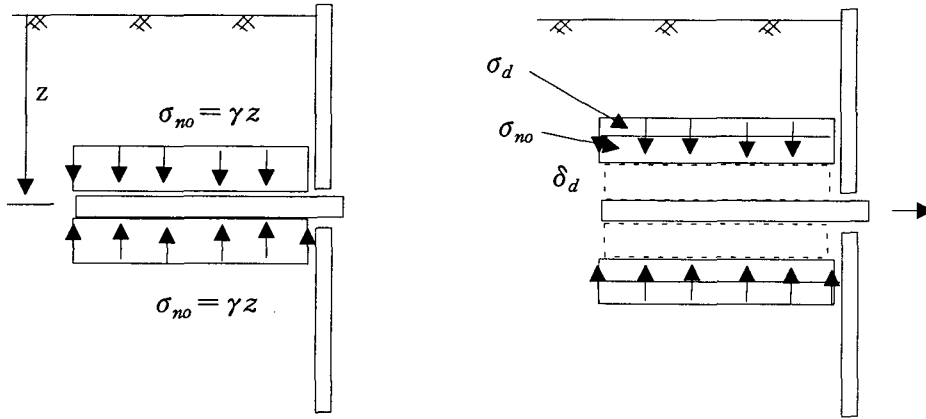
<그림 2.4> CS Stress path



<그림 2.5> CV Stress path

### 2.3. Constant Volume condition

전단변형이 시작되었을 때, 수직변형률을 제어하여 Zero로 구속시키면 입자의 상호작용에 의하여 밀도가 증가하게 되고 변형에 의하여 발생된 또 다른 힘은 수직변형률이 구속된 압력으로 Zero 상태로 지속된다. 이때 발생하는 새로운 힘은 응력의 증가를 일으킨다(Dilation effect).



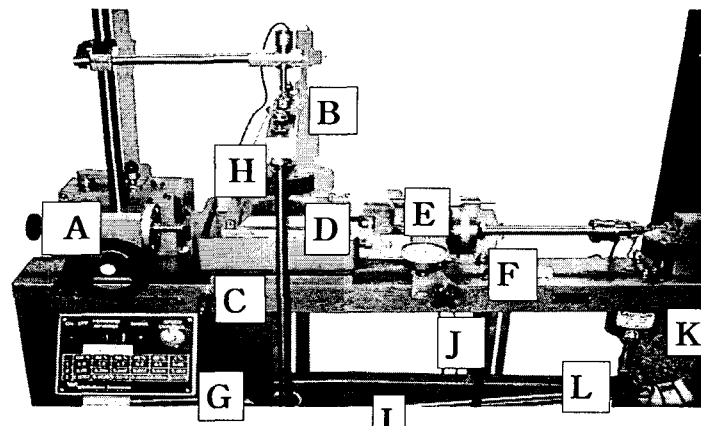
<그림 2.6> Restrained dilation시 초기조건과 거동후의 상태  
(Dmitry yu. sobolevsky, Minsk, Republic of Belarus, 1995)

그림 2.6에서 알 수 있는 것은 전단변위가 전개함에 따라  $\delta\sigma$ 의 값이 존재함을 알 수 있다. 이 값은 기존의 장치로는 측정할 수 없으며 계산할 수도 없다. 앞으로 설명하는 시험기에서는 위와 같은 현상을 측정하기 위해 그대로 재현하였으며 마찰각의 변화에 의한 기존의 직접전단시험기가 아닌 computer control을 도입하여 여러 가지 형태의 시험을 수행할 수 있었다.

그림 2.5와 같이 CS 상태와는 달리 Phi peak 와 Critical을 응력경로 그래프를 통하여 구할 수도 있고 Normalized 그래프를 통하여서도 구할 수 있다. 물론 Critical에서 Peak까지의 사이의 각은 Dilation에 의한 angle이다. CS 상태는 시험이 끝날 때까지 수직응력에 의한 구속력은 변함이 없는 반면 CV 상태는 처음에는 약간 줄어들다가 계속하여 약 2배 정도까지 수직응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이 증가하는 수직응력은 주위의 구속을 증가시켜 저항력을 높여준다.

### 3. 시험장비 및 시험방법

#### 3.1 기계장치



<그림 3.1> CNJ 장비 설명

A. Motor Box	F. 전단 Load Cell	K. Pressure Filter
B. 수직 LVDT	G. 모터의 속도조절 레버	L. 자동 압력조절 Controller
C. 전단상자	H. 압력조절 상부 프레임	
D. 수직 Load Cell	I. 압력조절 하부 프레임	
E. 수평 LVDT	J. 수평변위 Dial Gauge	

### 3.2 시험의 종류

시험의 종류는 크게 두 종류로 나눌 수 있다. 첫째는 흙과 흙의 전단을 시험한 Soil to Soil test 이며, 이는 기존 직접전단시험에서 관찰할 수 있는 방법이다. 둘째는 Interface test로서 Soil과 다른 재료를 이용한 전단시험이라고 할 수 있다. 전자는 Soil to Soil, 후자를 Interface 시험이라 한다. 장비의 측면에서 설명할 수 있는 시험은 CV, CS, CNS Test라고 명한다. CV TEST 는 일정 체적 상태에서 시험하는 시험으로서 수직응력과 전단응력, 전단변형율을 측정할 수 있다. CS TEST 는 일정 응력 상태에서 시험하는 시험으로서 전단응력, 변형율등을 측정한다. CNS TEST 는 일정 응력 상태에 있지만 응력의 변화보다는 전단응력, 변형율등을 측정하며 일정 체적 상태와 흡사하다.

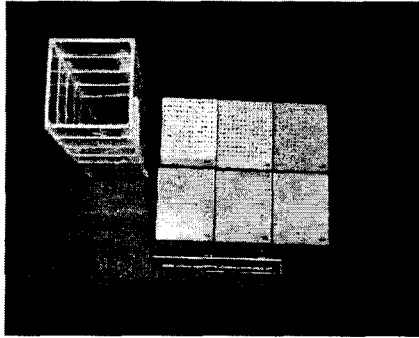
### 3.3 Density control 기구

밀도조절기구는 비처럼 위에서 뿌려준다 하여 Raining Box(그림 3.2)라 한다. 틀의 규격은 110×110×370mm이다. 총 4단계의 배열이 가능하다. 바닥에는 모래의 낙하시 모래가 새는 것을 방지하기 위하여 패킹재료를 사용하여 밀착시켰다. 바닥에서 1단계의 높이는 150mm, 1단계에서 2,3,4 단계사이의 높이는 동일하며 그 사이의 길이는 대략 60mm이며 각 단계의 홈은 밀도조절판의 두께(대략 1.5mm)와 같다. 밀도조절판은 총 7개를 만들었으며 1단계의 판은 홈의 크기가 같은 2개의 조절판을 엇갈리게 놓아 시료를 안치시키고 하나의 판은 고정시키고 다른 하나는 밀어 넣어 시료를 낙하시킨다.

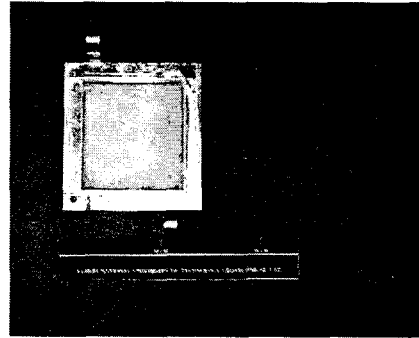
밀도조절은 대략적인 값은 추정할 수 있으나 전단하기 직전의 상태를 측정하는 것이 일반적인 것이므로 시험하고자 하는 수직응력 상태를 서서히 증가시켜 일정체적에 대한 시료의 무게를 재는 방법을 병행하였다. Raining Box system이 검증되어도 실제 측정된 밀도와는 약간의 차이가 있으므로 주의할 필요가 있다. 하지만, 홈의 크기와 각 단계의 적절한 조합은 밀도를 변화시키는 주요 요소임은 틀림없었다. 이 시험에서는 A. B. C의 방법으로 규정하여 적절히 조합하여 예상 밀도를 추정하여 참고자료로 이용하였다. A방법 60-70%(No.1 + No.3&4), B방법 70-80%(No.1 + No.6), C방법 80-90%(No.1 + No.5)으로 사용하였다.

<표 3.1> 밀도조절 판의 크기

	No.1 & 1-1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
직경(mm)	4	3	2.5	2	1.5	1



<그림 3.2> Raining box system



<그림 3.3> Grouting 성형 후

### 3.4 grout interface 성형

현장의 grouting 배합 W/C 55%의 상태를 그대로 재현하였다. 양생시간은 24시간이며, 규격은 100×100×25mm이다. steel로 되어있는 하부상자의 내부에 윤활유를 칠하여 시험후 떼어내기 쉽도록하였다. grout의 성형시 수축을 우려하여 규격보다 약간 높게 쌓아 매끈한 면이 되도록 각았다. (그림 3.3)

## 4. Data Analysis

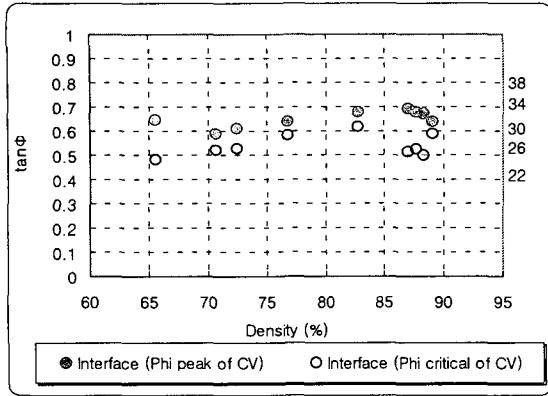
### 4.1. 동일한 모래를 사용한 기존시험의 마찰각과의 비교분석

(Grouting Interface CV condition)

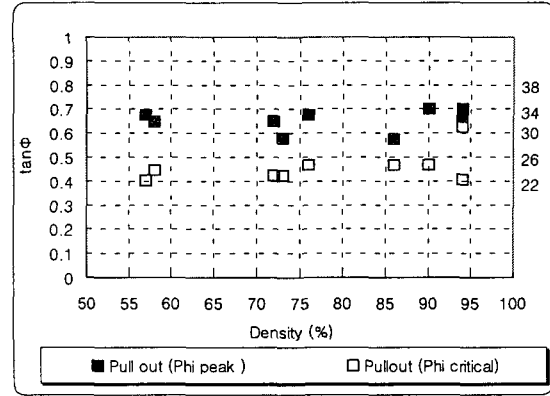
그림 4.1은 개선된 직접전단시험결과에서 얻어진 마찰 저항각이다. 이는 파일이나 앵커 Soil nailing의 시공에서 그라우팅면과 흙과의 마찰을 모델링한 것이다. 그림 4.2는 개선된 직접전단시험을 이용한 이 시험의 모델이 된 Soil nailing 실내 인발시험에서 얻어진 마찰저항각을 나타낸 것이다. K.T.Chang (1996~1998)은 네일의 외부에 4곳의 위치로 Loadcell을 설치하여 각각의 모든 data를 통한 4개의 마찰각이 얻어진다. 위치가 Top, Bottom, Right, Left라 한다면 Top의 위치에서의 마찰각을 밀도에 따라 Phi peak & Phi critical을 각각 나타내었다. 시험은 초기 수직응력 100~200kPa이며 시험조건은 Constant volume condition이 된다. 이 data 비교의 목적은 개선된 직접전단시험기에서 측정된 data가 올바르게 작동하는지 유무를 알기 원함이다. 개선된 직접전단시험기의 시험조건도 역시 Constant volume condition이며 초기 수직응력은 100~300kPa이므로 기존 시험결과와의 비교는 합리적이다.

개선된 직접전단시험기의 결과는 Density 65~90 %에서 Phi peak는 30°~34°이며 Phi critical은 26°~30°값을 보인다. Soil Nailing 실내 인발시험의 결과는 Density 55~94%에서 Phi peak는 28°~34°이며 Phi critical은 22°~26°사이에 있다.

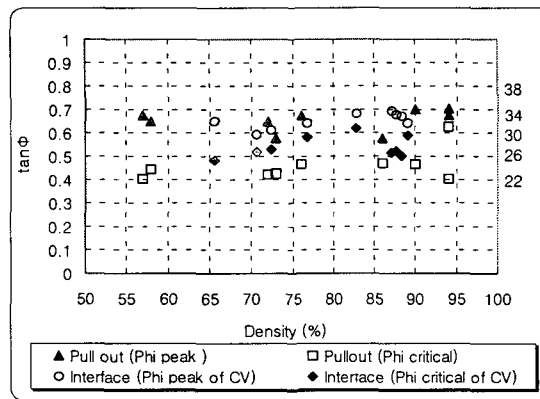
그림 4.3은 두 시험의 결과를 비교한 것이다. Density의 폭이 Soil nailing 인발시험이 넓게 실시되었고, 실험수도 2배정도 많다. 하지만 전체적인 경향을 보았을 때 개선된 직접전단시험기의 작동상의 문제는 없는 것으로 평가된다.



<그림 4.1> 개선된 직접전단시험에서의 마찰각 (Grouting Interface CV condition)



<그림 4.2> Soil nailing 실내인발시험에서의 마찰각 (Interface CV condition; K.T.Chang, 1996)



<그림 4.3> 동일한 모래를 사용한 개선된 직접전단시험기 & Pullout 시험에 의한 마찰각 비교

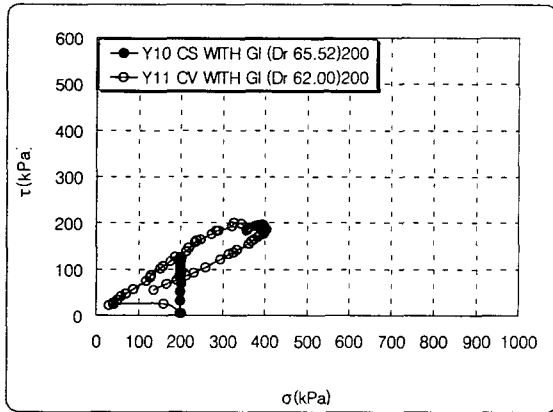
#### 4.2. Constant normal stiffness에 의한 Grouting Interface 시험분석 (밀도와 구속력의 영향분석)

여기서 분석하려는 것은 E.Wernick (1977), K.T.Chang (1996)이 연구하였던 다일레이션효과에 대한 규명이라 하겠다. 그림 4.4에서 그림 4.6은 초기 구속응력은 200kPa로 일정하지만 밀도는 다르게(Dr 60~70%, Dr 70~80%, Dr 80~90%) 시험한 결과 중 아주 전형적인 시험결과만을 비교하였다. 각 단계마다  $CNS \approx 0$ (CS condition)와  $CNS \approx \infty$ (CV condition)의 응력경로를 나타낸 것이다. 그림 4.7에서 그림 4.8은 앞의 세 그림과 비슷하지만 동일한 밀도에서 초기응력의 변화에 따른 이들의 영향을 응력경로로 나타낸 것이다. 그림 4.9는  $CNS \approx 0$ (CS condition)와  $CNS \approx \infty$ (CV condition)의 Phi peak와 Phi critical을 비교한 것이다.

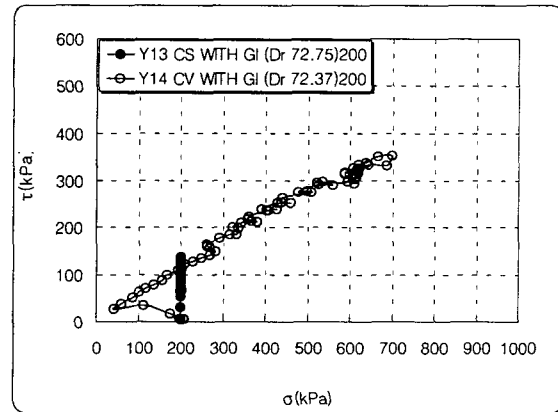
그림 4.4~그림 4.6에서 알 수 있는 사실은  $CNS \approx \infty$ (CV condition)인 경우 동일한 초기응력에서 단지 밀도의 변화만으로 최고 낮은 밀도와 최고 높은 밀도에 비해 2.5배 정도의 수직 및 전단 응력의 증가효과를 측정할 수 있었다는 것이다. 하지만  $CNS \approx 0$ (CS condition)인 경우는 밀도의 차이에 상관없이 비슷한 값을 보이고 있다.

그림 4.7~그림 4.9는 초기응력을 조절하여 시험했을 때 이들의 영향을 응력경로로 표시한 것이다.  $CNS \approx \infty$ (CV condition)인 경우 초기응력이 50kPa, 100kPa, 200kPa에서의 수직 및 전단응력의

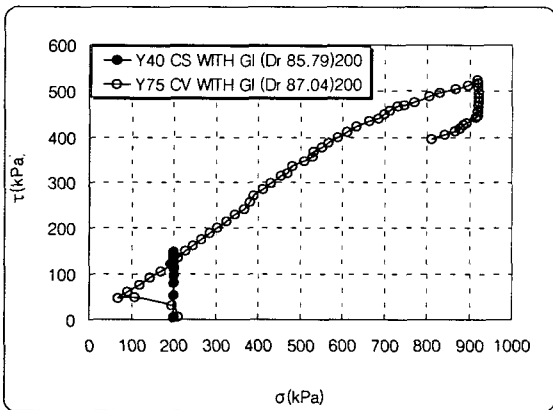
값은 비슷하게 700~900kPa로서 초기응력의 영향은 거의 없는 것으로 나왔다. 이들의 결과는 밀도와 구속력의 효과를 잘 설명하고 있다. CNS≈0(CS condition)인 경우는 초기응력 50kPa 인 경우보다 200kPa에서의 전단응력의 증가는 3배정도가 됨을 알 수 있다. 앞의 밀도에 의한 비교에서의 그림들보다 큰 폭의 변화이다. 이로써 CNS≈0(CS condition)인 경우는 Density에 의한 영향도 약간 있겠지만 초기 구속응력에 큰 변화를 보임을 알 수 있었다. 그림 4.10에서는 이들 두 조건을 마찬가지로 비교했다. CS 상태의 Phi peak는 30°~38°를 보이며 Phi critical은 26°~32°사이에 있다. CV 상태에서의 Phi peak는 30°~34°이며 Phi critical은 26°~30°값을 보인다.



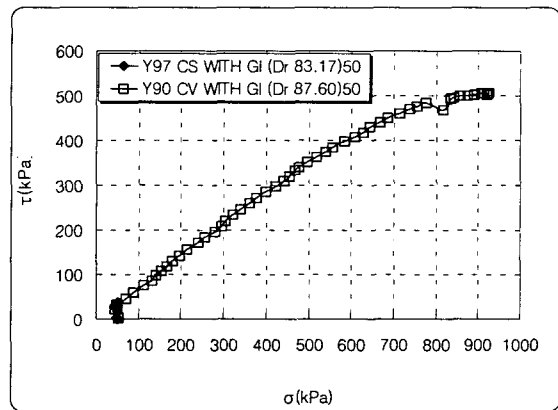
<그림 4.4> Density 60~70%, 초기응력 200kPa에서의 Stress paths



<그림 4.5> Density 70~80%, 초기응력 200kPa에서의 Stress paths

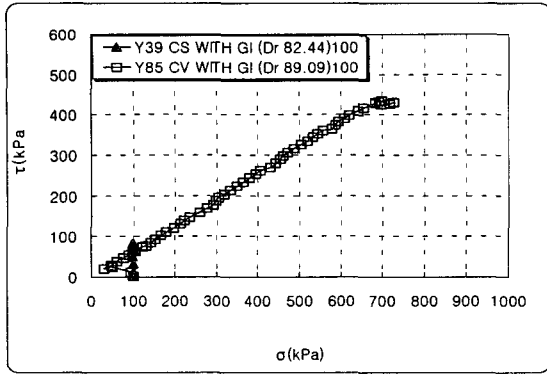


<그림 4.6> Density 80~90%, 초기응력 200kPa에서의 Stress paths

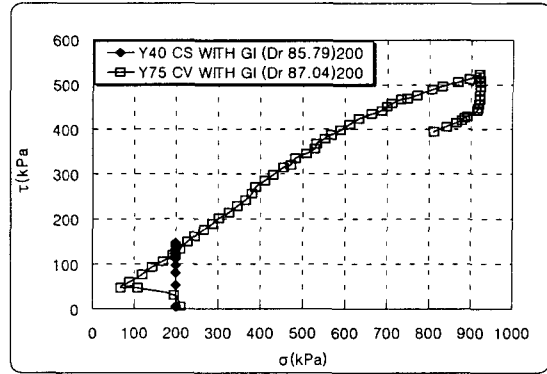


<그림 4.7> Density 80~90%, 초기응력 50kPa에서의 Stress paths

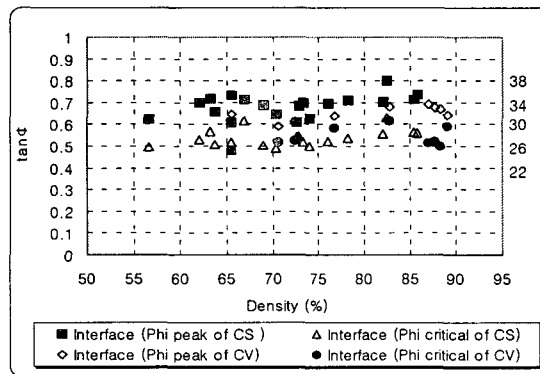




<그림 4.8> Density 80~90%, 초기응력 100kPa 에서의 Stress path



<그림 4.9> Density 80~90%, 초기응력 200kPa 에서의 Stress paths



<그림 4.10> Grouting interface 시험 CS & CV 조건에서의 Phi peak & Phi critical 비교

## 5. 결론

- 1) 다일레이션효과에 의한 응력증가의 원인은 Density와 구속력이 크게 작용함을 확인하였다.
- 2) 전체 시험 데이터를 볼 때, 초기 수직응력과 최대 수직응력의 차이는 대체로 2~3배로 차이가 남을 확인 할 수 있었다.
- 3) 응력경로와 마찰저항각을 통해 알 수 있는 사실은 밀도에 따라 마찰 저항각의 변화는 미소한 반면 수직 및 전단응력은 큰 차이를 보이며 증가하는 것이다. 또한 마찰각의 기울기로 선형적으로 증가한다는 것이다. 그렇다면 어떤 장비를 이용하여 현장의 인발력을 시험했다면 현장의 동일한 시료를 사용하여 개선된 직접전단시험 수행하여 역으로 기존설계방법에서 추정으로 구하는 수직응력을 구할 수가 있다는 것이다.

## 참고 문헌

1. K. T. Chang & G.W.E.Milligan, " Effect of the transition zone in a nailed wall model test. " University of oxford, UK, 1996
2. Dmitry yu, Sobolevsky " Strength of dilating soil and load-holding capacity of deep foundations ", Minsk, Republic of Belarus, pp1-33, 1995

3. Johnston, I.W., Seidel, J.P. and Haberfield, C. M " Cyclic constant normal stiffness direct shear testing of soft rock " Intl. Symp. on Hard Soils-Soft Rocks, Athens, pp 977- 984 , September 1993
4. G. T. Houlsby " How the dilatancy of soils affects theirs behaviour " Report Number OUEL 1888/91, Soil Mechanics Report Number 121/91, Oxford university, UK, 1991
5. John Atkinson, " An introduction to The mechanics of soils and foundations through critical state soil mechanics" city university, London, pp 1-36, 1993