

## 과압밀점토의 응력이력 의존성에 관한 연구

### The Effects of Stress History on the Behaviour of Overconsolidated Clay

김병일<sup>1)</sup>, Byung-Il Kim, 신현영<sup>2)</sup>, Hyun-Young Shin, 김용수<sup>3)</sup>, Yong-Su Kim, 김수삼<sup>4)</sup>, Soo-Sam Kim

1) 중앙대학교 공과대학 토목공학과 대학원, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

2) 중앙대학교 공과대학 토목공학과 대학원, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

3) 중앙대학교 공과대학 토목공학과 대학원, Dept. of Civil Eng. Chung-ang University

4) 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng.

Chung-ang University

**SYNOPSIS :** Overconsolidated clays have a different stress history according to the deposit environment. The stress history is classified into (i) rotation angle of stress path, (ii) overconsolidation ratio, and (iii) magnitude of length of recent stress path. Stress-strain behaviour of overconsolidated clays strongly depends on these stress history. In this study a series of drained stress path tests were carried out. Test results indicated that stress-strain behaviour of overconsolidated clay(focused on strain rate) depends on OCR and length of recent stress path, especially rotation angle.

Key words : Overconsolidated clays, Stress history, Rotation angle, OCR, Length of stress path.

## 1. 서론

과압밀된 점성토 지반은 퇴적 이후의 환경에 따라 각기 다른 응력이력(Stress history)을 가지고 있다. 이와 같은 응력이력에는 현 응력경로와 최근 응력경로가 이루는 각으로 정의되는 응력경로 회전각(Rotation angle of stress path), 과압밀비(Overconsolidation ratio), 최근 응력경로의 길이로 정의되는 접근길이(Length of recent stress path) 등으로 분류할 수 있다(Atkinson et al., 1990). 과압밀점토의 응력-변형 거동은 위에서 제시한 바와 같은 응력이력에 강한 의존성을 지니고 있다. 본 연구에서는 과압밀점토의 응력이력 의존성을 파악하고자 재조성 시료에 대한 삼축 등방압밀 및 팽창실험을 수행하여 과압밀 상태를 구현하였고, 각기 다른 응력이력을 적용하여 현재의 응력경로에서 나타나는 과압밀점토의 배수시 응력-변형 거동 특성을 변형률 속도 중심으로 제시하였다.

## 2. 실험

### 2.1 시료의 물성

본 연구에서 사용한 시료는 남해안 가덕도 지역에서 채취한 해성점토로서 #140 체로 체가름하여 사용하였다. 액성한계의 1.5배정도의 합수비를 갖는 슬러리 상태로 시료를 준비하였고, 이후 슬러리를 대형 1-D 재조성셀에 넣고, 60kPa의 수압을 적용하여 예압밀시켜 재조성 시료를 제작하였다. 본 연구에서 사용된 시료의 기본 물성을 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 시료의 기본 물성

Classification	Percent passing No. 200 sieve(%)	Dry unit weight (t/m <sup>3</sup> )	Specific gravity	Liquid limit(%)	Plastic index
CH	94.3	1.1	2.71	61	36

## 2.2 배수 응력경로 실험

### 2.2.1 시료의 초기조건

본 연구에서 수행된 실험은 과압밀 상태에서의 배수 응력경로 삼축실험이다. 단기간에 포화도를 높이고 시료의 교란을 최소화하기 위해서 초기에 셀압=110kPa, 배압=100kPa을 적용하여 약 1시간 정도 포화시킨 후, 다시 셀압=220kPa, 배압=200kPa을 적용하여 간극수압과 배압이 거의 동일한 값을 보일 때까지 방치하였다. 단계 포화 후 Skempton의 간극수압계수, B-값을 확인하기 위하여 셀압을 30kPa까지 증가시켰으며, B=0.98이 되는 시점에서 재하속도>Loading rate) 10kPa/hr로 평균 유효응력이 400kPa이 될 때까지 등방압밀시켰다. 이후 발생하였을지도 모르는 과잉간극수압을 소산시키기 위해서 약 3시간 정도를 일정 구속압에서 방치하였다. 또한, 과압밀 상태를 구현하기 위해서 재하속도와 동일한 속도인 10kPa/hr로 각 조건에 해당하는 평균 유효응력이 될 때까지 제하(Unloading)를 수행하였다. 위와 같은 과정을 경험한 시료의 상태를 초기조건(Initial condition)으로 정의하였다.

### 2.2.2 응력경로 회전각 영향 실험

Stallebrass(1990)는 가장 최근의 응력경로와 현재의 응력경로간의 회전각,  $\theta$ 가 흙의 응력-변형 거동에 상당한 영향을 미친다고 제시하였다. 본 연구에서는 최근 응력경로의 경우 재하속도( $V=10\text{kPa/hr}$ ), 접근길이( $L=100\text{kPa}$ ), 과압밀비( $OCR=2.0$ ), 정지기간( $T=0\text{hr}$ )을 동일하게 적용하고 이후 응력경로를 회전각이  $-90^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $+90^\circ$ ,  $180^\circ$ 가 되도록 축압과 셀압을 조절하여 실험을 수행하였다. 여기서 회전각의 부호는 최근 응력경로의 방향과 현 응력경로의 방향이 반시계 방향일 경우를 양(+)으로 정의하였으며, 현 응력경로에서의 재하속도는  $10\text{kPa/hr}$ 로 모두 동일하게 적용하였다.

### 2.2.3 과압밀비 영향 실험

과압밀비에 따른 응력-변형 거동을 파악하고자 접근길이가  $100\text{kPa}$ 로 동일하면서 각 과압밀비를 조절할 수 있도록 등방압밀 후(평균 유효응력= $400\text{kPa}$ ), 평균 유효응력이  $50$ ,  $100$ ,  $150$ ,  $200\text{kPa}$ 이 될 때까지 팽창시켰다. 이후 접근길이( $100\text{kPa}$ ), 재하속도( $10\text{kPa/hr}$ ), 정지기간( $0\text{hr}$ ) 그리고 회전각( $90^\circ$ )을 동일하게 하여 실험을 실시하였다. 이러한 과정을 거친 상태에서의 과압밀비는  $2.7$ ,  $2.0$ ,  $1.6$ ,  $1.3$ 에 해당한다.

### 2.2.4 접근길이의 영향 실험

최근 응력경로의 길이로 정의되는 접근길이에 따른 응력-변형 거동 특성을 파악하고자 현재의 응력경로에 해당하는 평균 유효응력은 모두 동일한 즉, 동일한 과압밀비( $OCR=2.0$ )를 가지도록 등방압밀 후 평균 유효응력이  $50$ ,  $80$ ,  $130$ ,  $150\text{kPa}$ 이 될 때까지 팽창을 시켰다. 팽창을 완료한 후 접근길이( $150$ ,  $120$ ,  $70$ ,  $50\text{kPa}$ )를 정의하기 위한 최근 응력경로에서는 재하속도를  $10\text{kPa/hr}$ 로 적용하였고, 동일한 평균 유효응력( $200\text{kPa}$ )에 도달한 후 순수전단( $p=\text{Const.}$ ) 실험을 동일한 재하속도( $10\text{kPa/hr}$ ), 회전각( $90^\circ$ ), 정지기간( $0\text{hr}$ )으로 수행하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 응력경로 회전각의 영향

응력경로 회전각에 따른 실험 결과를 그림 1과 그림 2에 제시하였다. 그림 1은 축차변형률에 따른 축차응력을 나타낸 것으로 회전각이  $180^\circ$  즉, 완전 응력반전이 이루어지는 응력경로에서는 회전각의 영향이 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 회전각  $180^\circ$  와 유사한 팽창 후 경로인 회전각  $-90^\circ$ 의 응력경로에서는 회전각  $45^\circ$  그리고  $90^\circ$ 인 경우와 유사한 거동을 보였다.

그림 2의 경우 축차변형률에 따른 체적변형 특성을 나타내고 있다. 그림에서 회전각  $-90^\circ$ 는 팽창 후 경로로서 초기 축차변형률에서는 체적 팽창이 발생하였지만, 데이터 수가 작아 그림 2에서는 이 부분을 제외시켰다. 이는 통상적인 팽창 후 거동과 동일한 결과라 할 수 있다. 그림 3에서도 위와 동일한 팽창 후 거동에 따른 특성을 확인할 수 있다. 즉, 초기에 부의 과잉간극수압이 생성됨을 알 수 있었다. 본 실험의 배수 실험임에도 불구하고 과잉간극수압이 최근 응력경로에서 발생하여 이후 현 응력경로에서도 어느 정도 지속되고 있었다. 이와 같은 과잉간극수압 발생 현상이 본 논문에서는 제시되지 않았지만, 재하속도가 가장 느린 5kPa/hr에서도 발생하였다.

그림 4는 축차응력에 따른 축변형률 속도(Rate of axial strain)의 변화를 나타낸 것으로서 축차응력이 증가함에 따라 변형률 속도가 비선형적으로 증가하였으며, 각 회전각의 정의에 따라 서로 다른 변형률 속도의 값을 나타내었다. 또한 이와 같은 곡선은 기존에 제시되었던 일정 평균응력하에서 진행된 크리프(Creep) 곡선과 유사하다고 판단된다. 회전각  $180^\circ$ 의 경우에 변형률 속도는 모든 재하시간 동안 가장 작게 나타났다. 이는 완전 응력반전에 따른 결과라고 사료된다. 또한, 회전각  $45^\circ$ 인 경우 축차응력이 증가함에도 변형률 속도는 대체로 일정한 값을 보이다가 약 70kPa이후에 증가하는 경향을 나타내었다.

#### 3.2 과압밀비의 영향

서로 다른 과압밀비에 따른 응력-변형 거동을 그림 5와 그림 6에 제시하였다. 그림 5에서는 과압밀비가 2.7과 2.0 그리고 1.6과 1.33으로 그룹화되어 전체적인 경향이 유사하게 나타났으며, 대체로 OCR이 증가할수록 동일한 축차응력에서 더 큰 변형률이 발생하였다. 그림 7의 과잉간극수압 거동에서는 위와는 달리 과압밀비가 2.0일 때 가장 큰 과잉간극수압이 발생하였다.

변형률 속도의 과압밀비 의존성을 규명하기 위해서 그림 8과 같이 축변형률 속도를 축차응력에 대하여 도시하였다. 그림에서와 같이 변형률 속도는 과압밀비가 증가함에 따라 증가하는 경향이 있었으며,  $OCR=1.6$ 이하가 되면 유사한 경향을 나타내었다.

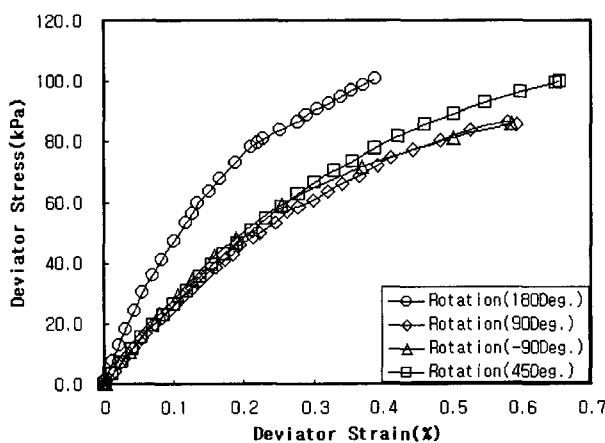


그림 1. 축차응력-축차변형률 관계(회전각)

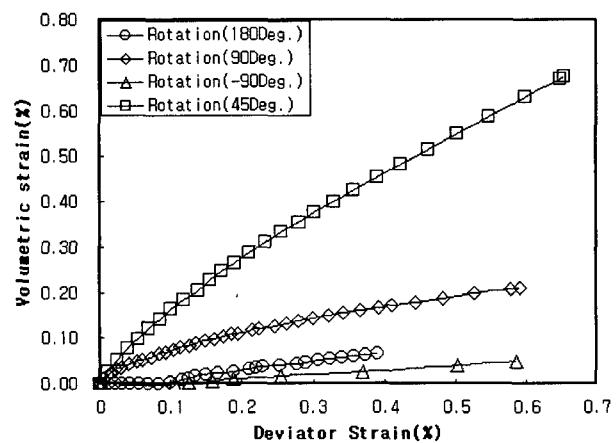


그림 2. 축차변형률-체적변형률 관계(회전각)

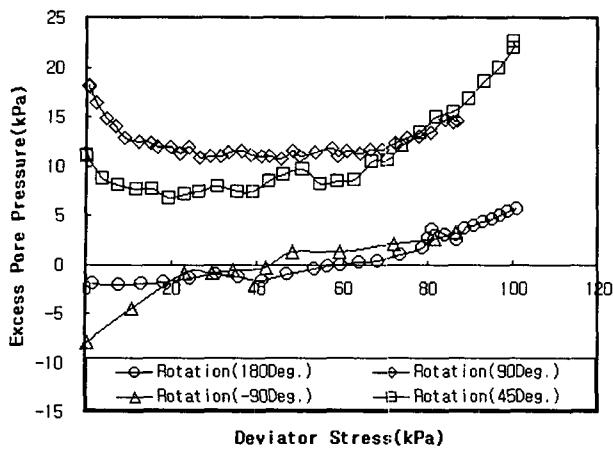


그림 3. 축차응력-과잉간극수압 관계(회전각)

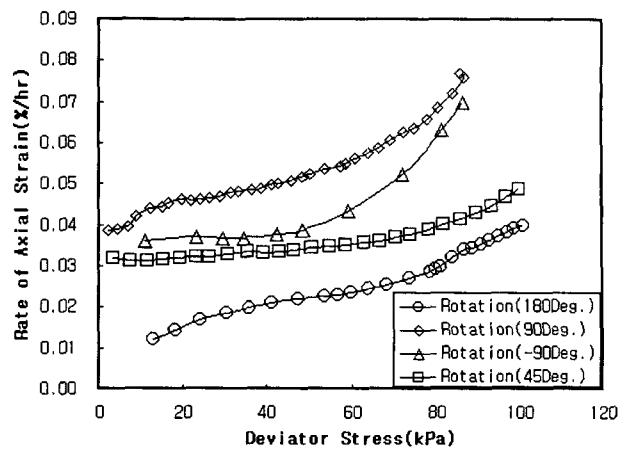


그림 4. 축차응력-축변형률 속도(회전각)

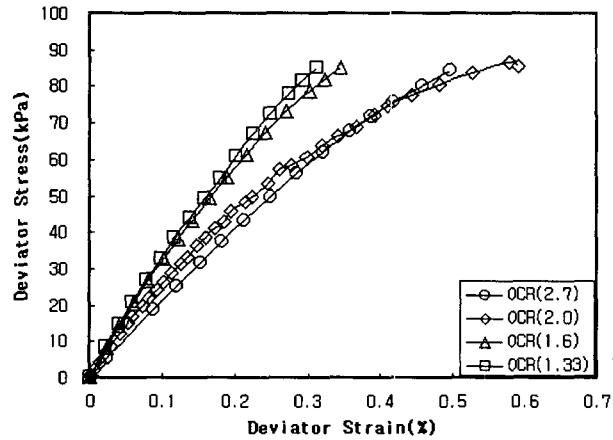


그림 5. 축차응력-축차변형률 관계(OCR)

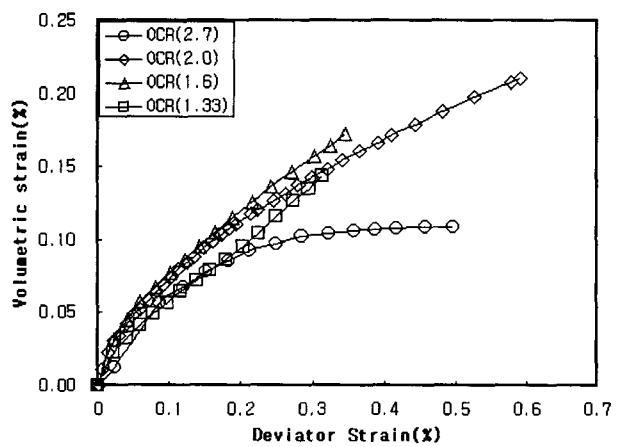


그림 6. 축차변형률-체적변형률 관계(OCR)

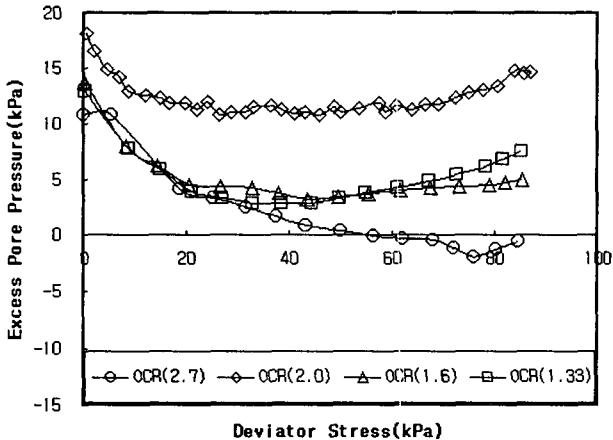


그림 7. 축차응력-과잉간극수압 관계(OCR)

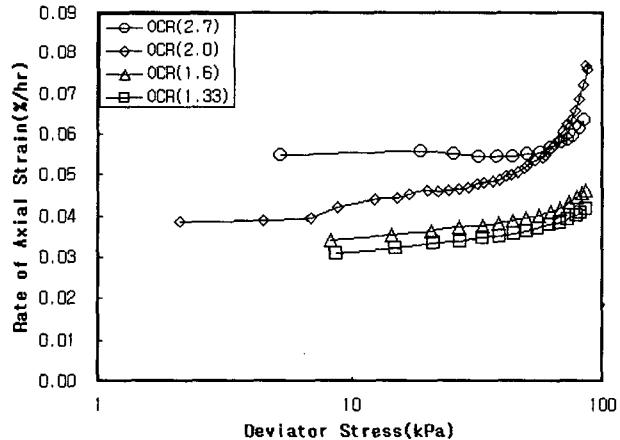


그림 8. 축차응력-축변형률 속도(OCR)

### 3.3 접근길이의 영향

접근길이를 조절하여 실시한 순수전단( $p=Const.$ ) 실험 결과를 그림 9와 그림 10에 제시하였다. 그림 9에서 접근길이가 150, 120kPa인 경우의 응력-변형 거동과 접근길이가 70kPa과 50kPa인 경우의 응력-변

형 거동이 유사한 경향을 나타내었으며, 동일한 축차응력에서는 접근길이가 증가할수록 더 큰 축차변형률이 발생하였다. 또한, 체적변형 특성을 나타내는 그림 10의 경우 접근길이가 길어질수록 현재의 응력경로에서 발생되는 체적변형은 크게 나타났다. 과잉간극수압 거동 역시 접근길이가 증가할수록 큰 과잉간극수압이 발생하였다(그림 11).

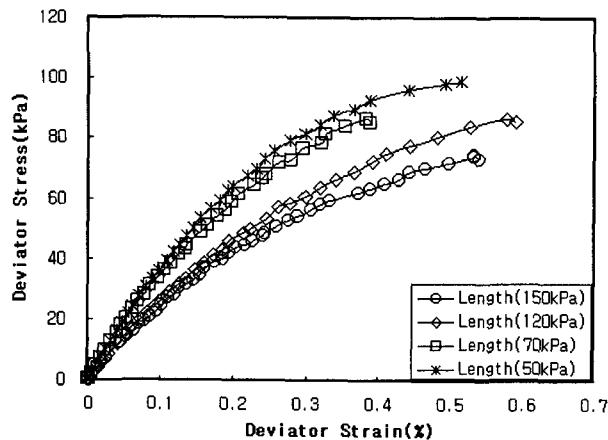


그림 9. 축차응력-축차변형률 관계(접근길이)

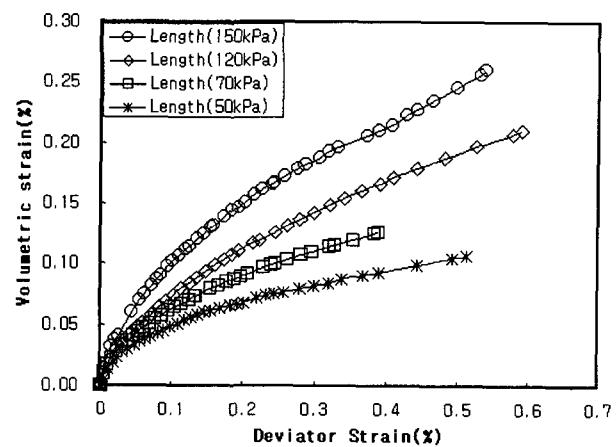


그림 10. 축차변형률-체적변형률 관계(접근길이)

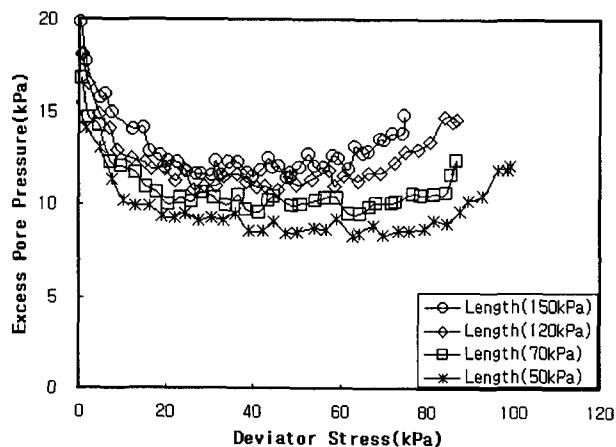


그림 11. 축차응력-과잉간극수압 관계(접근길이)

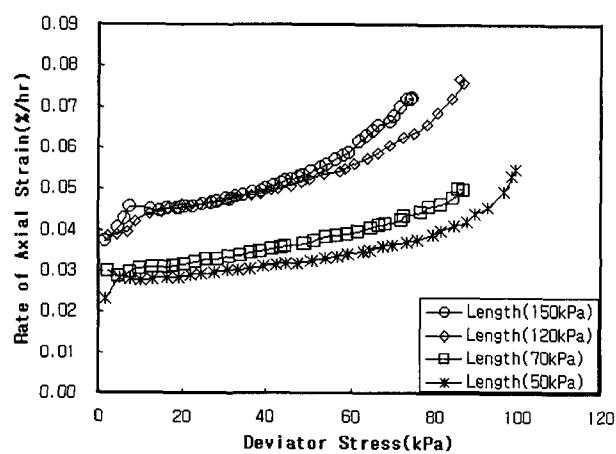


그림 12. 축차응력-축변형률 속도(접근길이)

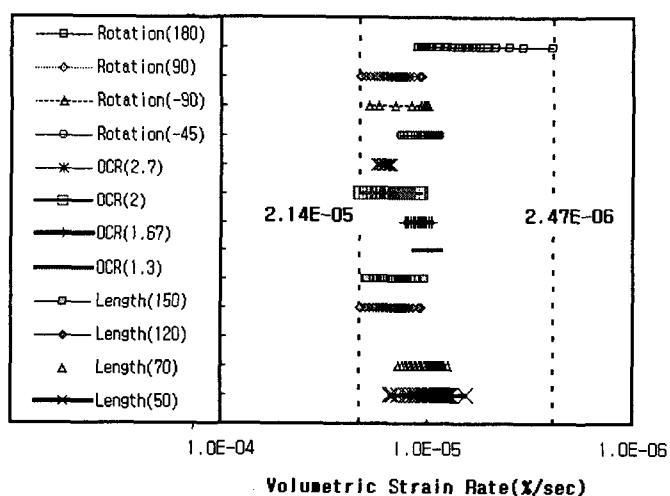


그림 13. 응력이력에 따른 체적변형률 속도

그림 12의 경우 접근길이에 따른 축차응력과 축변형률 속도 관계 곡선으로 응력-변형 거동에서와 유사하게 접근길이 150, 120kPa과 70, 50kPa이 서로 다른 축변형률 속도를 보이고 있었으며, 변화 양상에서는 모든 접근길이에 대하여 거의 유사하게 나타났다. 또한, 접근길이가 증가할수록 축변형률 속도 역시 증가하는 경향이 있었다.

그림 13의 경우 본 연구에서 수행된 회전각, 과압밀비 그리고 접근길이에서 발생하였던 체적변형률 속도를 나타낸 것으로 최대  $2.14 \times 10^{-5} / \text{sec}$ 에서 최소  $2.47 \times 10^{-6} / \text{sec}$ 의 범위에 존재하였으며, 이는 Leroueil et al.(1996)이 제시한  $10^{-5} \sim 10^{-7} / \text{sec}$ 와 유사한 범위를 나타낸다.

#### 4. 결론

응력경로 회전각, 과압밀비 및 접근길이로 정의된 응력이력에 따른 과압밀점토의 응력-변형 거동을 규명하고자 실시한 배수 응력경로 삼축 실험을 통해서 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 응력반전을 의미하는 응력경로 회전각  $180^\circ$  가 동일한 축차응력에서 가장 작은 축차변형률과 축변형률 속도를 보여 과압밀점토의 응력-변형 거동에 가장 큰 영향을 미친 것으로 판단되며, 회전각의 크기보다는 정의에 따라 축변형률 속도는 서로 다른 값을 보였다.
2. 동일한 축차응력에서는 과압밀비와 접근길이가 증가할수록 축차변형률과 축변형률 속도는 증가하였다.
3. 서로 다른 회전각, 과압밀비 그리고 접근길이에 대하여 실시된 응력경로 삼축 실험에서의 체적변형률 속도는 최대  $2.14 \times 10^{-5} / \text{sec}$ 에서 최소  $2.47 \times 10^{-6} / \text{sec}$ 의 범위에 존재하였다.

#### 참고문헌

1. Atkinson, J. H., Richardson, D. and Stallebrass, S. E.(1990), "Effect of recent stress history on the stiffness of overconsolidated soils." *Geotechnique* 40, No. 4, 531-540.
2. Kohata, Y., Tatsuoka, F., Mukabi, J. N. and Suzuki, M.(1995), "Effects of strain rate and drainage on deformation characteristics at small strain of geomaterials." *Earthquake Geotechnical Engineering*, Ishihara(ed.), 151-156.
3. Leroueil, S. and Marques, M. E. S.(1996), "Importance of strain rate and temperature effects in geotechnical engineering." *Measuring and Modeling Time Dependent Soil Behaviour*, ASCE GSP No. 61, 1-60.
4. Lo Presti, D. C. F., Pallara, O., Cavallaro, A. and Jamiolkowski, M.(1999), "Influence of reconsolidation technique and strain rate on the stiffness of undisturbed clays from triaxial tests." *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 22, No. 3, 211-225.
5. Stallebrass, S. E.(1990), "Modelling the effect of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils." *PhD thesis*, City University, London.