

응력이력과 시간이력에 따른 과압밀점토의 응력-변형-변형률 속도

Stress-Strain-Strain Rate of Overconsolidated Clay Dependent on Stress and Time History

한 상재^{*1} Han, Sang-Jae

김 수삼^{*2} Kim, Soo-Sam

김 병일^{*3} Kim, Byung-Il

Abstract

This study deals with the stress-strain-strain rate behaviour of overconsolidated clay. Consolidated-drained stress path tests were performed on the stress-time dependent condition. Stress history consists of rotation angle of stress path, overconsolidation ratio, and magnitude of length of recent stress path. Time history includes loading rate of recent and current stress path. Test results show that all influence factors have an increasing strain rate with time, and the strain rate varies with the change of the rotation angle of stress path. With the increase of overconsolidation ratio and loading rate of current stress path, the strain rate also increases. For the stress history, correlation between stress-strain and strain rate is indicated but the time history is not.

요지

과압밀점토의 응력-변형 거동에 중요한 영향을 미치는 변형률 속도에 관하여 다루었다. 본 연구에서는 응력경로 회전각, 과압밀비 그리고 접근길이를 포함한 응력이력과 재하속도 이력 및 재하속도를 포함한 시간이력을 변화시켜 압밀-배수 응력경로 삼축 실험을 수행하였다. 실험 결과 모든 영향인자에 대하여 시간이 증가할수록 변형률 속도 역시 증가하였다. 또한, 회전각의 정의에 따라 상이한 변형률 속도의 값을 보였고, 과압밀비와 재하속도가 증가할수록 변형률 속도 역시 증가하였다. 응력이력에서는 응력-변형 거동과 변형률 속도간의 상관성이 존재하였지만 시간이력에서는 응력-변형-변형률 속도의 상관성을 보이지 않았다.

Keywords : Overconsolidated clay, Stress history, Stress path tests, Stress-strain-strain rate, Time history

1. 서론

지반의 응력-변형 거동은 유발되는 변형률 속도(Strain rate)에 크게 의존한다. 현장 지반에서 압밀시 유발되는 변형률 속도는 실내 실험에서 수행된 변형률 속도보다 일반적으로 2~4계(Order) 정도 작다. 즉, 변형률 속도는 지반의 응력-변형 관계, 압밀지반의 두께, 투수계수 크기

등에 의존적이기 때문에 실내 실험시 유발되는 변형률 속도는 $10^{-5} \sim 10^{-7} s^{-1}$ 범위이나, 현장 지반의 경우 두께가 실내 시료의 높이보다 매우 크므로 변형률 속도가 약 $10^{-9} s^{-1}$ 보다 작은 경우가 일반적이다. 따라서 현장 지반의 압밀해석시에 변형률 속도의 영향을 고려

*1 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 연구교수/서경대학교 토목공학과 겸임교수 (Member, Research Prof., Dept. of Civil & Environ. Engng., Hanyang Univ., herp@orgio.net)

*2 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environ. Engng., Hanyang Univ.)

*3 정회원, 한양대학교 토목·환경공학과 박사과정 (Member, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil & Environ. Engng., Hanyang Univ.)

할 필요가 있다(Leroueil et al., 1996).

전통적인 24시간 Oedometer 실험에서의 응력-변형률 곡선과 CRS 시험에서의 응력-변형률 곡선이 다르게 나타나는 것도 이와 같은 변형률 속도 효과 때문이며, 또한 압밀이 진행되고 있는 지반에서, 서로 다른 깊이에서 얻은 유효응력-변형률 곡선이 서로 다르게 나타나는 것도 변형률 속도 이력에 대한 의존성과 재하 시작시에 배수면 근처의 변형률 속도가 가장 높게 나타나기 때문이다(김 and Leroueil, 1999).

위와 같이 변형률 속도는 응력-변형 거동에 중요한 영향인자임에도 불구하고 국내 점토를 이용한 응력-변형-변형률 속도 관계 및 응력제어 조건하에서 발생되는 변형률 속도의 범위에 대한 실험적 결과가 미흡한 상태이다. 이에 본 연구에서는 과압밀 조건하에서 응력-변형-변형률 속도에 영향을 미치는 인자로 응력이력(응력경로 회전각, 과압밀비 그리고 접근길이)과 시간이력(재하속도 이력 및 재하속도)을 선정하여 Oedometer 실험 그리고 일정변형률속도(CRS) 시험이 아닌 연속 하중재하-배수응력경로 삼축 실험을 통하여 서로의 상관성을 규명하고자 하였다.

표 1. 시료의 기본 물성

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

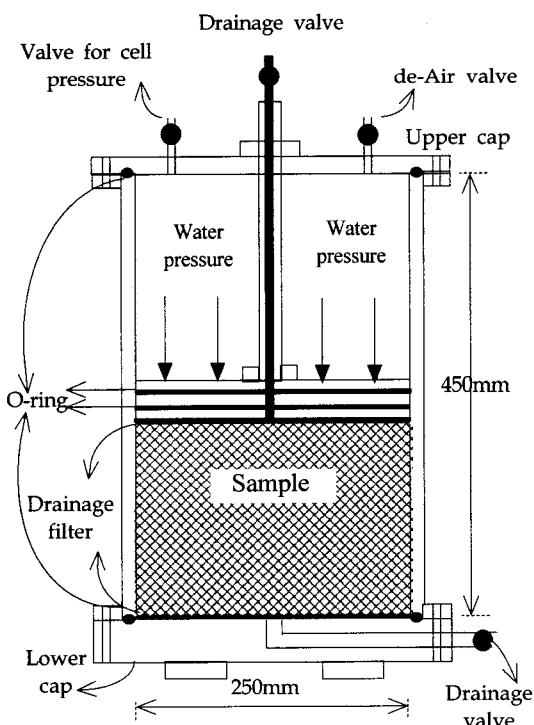


그림 1. 대형 1-D 재조성셀

2. 실험

2.1 시료의 물성

본 연구에서 사용한 시료는 남해안 가덕도 지역에서 채취한 해성점토로서 불교란 시료를 확보하는 것이 매우 어려워 시료를 교란된 상태로 채취하였다. 이후 실내에서 습윤상태의 흙을 #140체로 체가름하여 사용하였다. 이 과정 중 실험 결과에 영향을 미칠 정도의 큰 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였으며, 동시에 시료 채취지점과 동일한 위치에서 운반해온 해수를 첨가하여 액성한계의 1.5배 정도의 함수비를 갖는 슬러리 상태로 시료를 준비하였다. 이후 슬러리를 대형 1-D 재조성셀에 넣고, 60kPa의 압력을 적용하여 예압밀시켰다(그림 1). 이후 비배수 상태로 30일간을 방치하여 재조성 시료를 제작하였다. 본 연구에서 사용된 시료의 기본 물성을 정리하면 표 1과 같다.

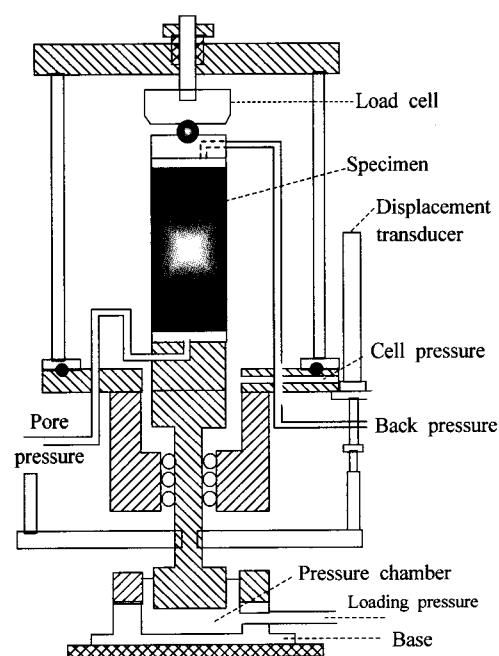


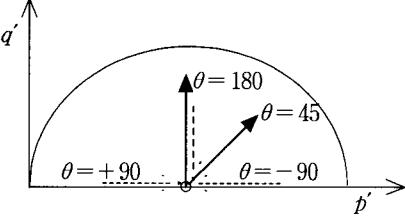
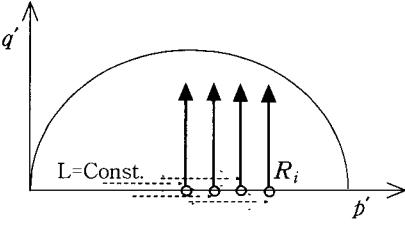
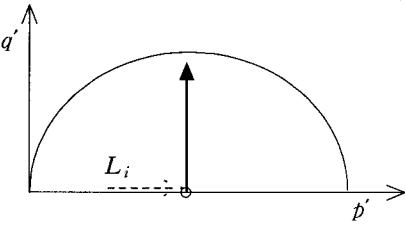
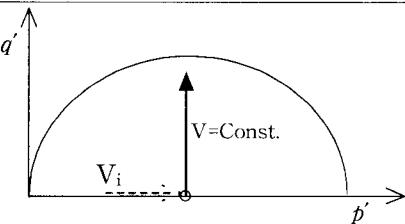
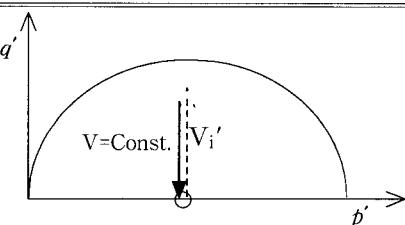
그림 2. 삼축셀의 상세도(Bishop and Wesley type)

2.2 영향인자 실험

하나의 재료에 대하여 하나의 값을 가지는 재료 파라미터는 실험기나 실험방법 등에 의존하지 않지만 토질파라미터의 경우 실험기나 실험방법에 의존적이라 할 수 있다(김병일, 2001a). 본 연구는 응력상태 및 이력을 제어할 수 있어야 하므로 응력제어 실험기를 선택하였다. 사용한 실험기는 Bishop and Wesley Type의 응력경로 삼축실험기로 영국의 GDS사에서 제작한 실험기이다(그림 2).

시료를 삼축셀에 장착한 후 양호한 포화도를 얻기 위해서 셀압=220kPa, 배압=200kPa이 되도록 단계적으로 포화를 시켰으며, 배압과 간극수압이 거의 동일한 값을 보일 때까지 방치하였다. 단계 포화 후 Skempton의 간극수압계수인 B-값을 확인하여 B=0.98이 되는 시점에서 재하속도>Loading rate, V)=10kPa/hr로 평균 유효응력이 400kPa이 될 때까지 등방압밀시켰다. 이후 발생하였을지도 모르는 과잉간극수압을 소산시키기 위해서 약 3시간 정도를 일정 구속압 조건에서 방치하였다. 또한, 과압밀 상태를 구현하기

표 2. 영향인자 실험

Influence Factors	Description	Fixed Value	Controlled Value	Remarks
Rotation Angle of Stress Path (θ , Deg.)		L=100 T=0 V=10 R=2	45 +90 -90 180	Solid line: Current stress path Dotted line: Recent stress path
OCR (R, N.D)		L=100 $\theta=90$ T=0 V=10	1.3 1.6 2 2.7	Solid line: Current stress path Solid circle: Recent stress history(OCR)
Length of Recent Stress Path (L, kPa)		$\theta=90$ T=0 V=10 R=2	150 120 70 50	Solid line: Current stress path Dotted line: Recent stress path
Loading Rate of Recent Stress Path (V, kPa/hr)		L=100 $\theta=90$ T=0 R=2	5 10 15 25	Solid line: Current stress path Dotted line: Recent stress path
Loading Rate of Current Stress Path (V', kPa/h)		L=100 $\theta=180$ T=0 R=2	10 15 20	Solid line: Recent stress path Dotted line: Current stress path

Note :

- (p', q') : Cambridge stress field
- Legend : Rotation(Value), OCR(Value), Length(Value), Rate(Value), CRate(Value)

위해서 재하속도와 동일한 속도인 10kPa/hr로 각 조건에 해당하는 평균 유효응력이 될 때까지 제하(Unloading)를 수행하였다. 위와 같은 과정을 경험한 시료의 상태를 초기 조건으로 정의하였다. 이후 각 영향인자 조건에 따라 배수 응력경로 삼축실험을 수행하였다. 표 2에 초기조건 이후에 수행된 각 영향인자 실험의 세부사항을 제시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 응력경로 회전각에 따른 응력-변형-변형률 속도

축차변형률에 따른 축차응력의 변화를 그림 3에 제시하였다. 회전각 180°인 경우의 응력-변형률 곡선이 다른 회전각 45°, -90° 및 90°와는 초기 변형률 수준부터 상이하게 나타났다. 이는 회전각 180°의 정의 즉, 완전 응력반전을 고려하면 쉽게 이해할 수 있을 것이다. 그러나, 시간에 따른 변형률 속도를 나타내는 그림 4의 경우 각 회전각의 정의에 따라 서로 다른 변형률 속도의 값을 보여 회전각의 크기에 따른 경향은 찾아볼 수 없었다. 또한, 회전각 180°인 경우 변형률 속도는 재하 시작시부터

지속적으로 증가하고 있는 경향이 다른 회전각과는 구별되는 경향임을 알 수 있다. 이 역시 팽창후의 재압축에 해당되는 응력반전 때문이다. 전체적인 경향은 시간이 증가함에 따라 초기 재하 부분에서는 거의 일정한 변형률 속도를 보이다가 각각 어느 순간(최근 응력이력의 기억이 상실되는 점; Stallebrass, 1990; 김병일, 2001b)을 넘어서면서 지속적으로 변형률 속도가 증가하였다.

3.2 과압밀비에 따른 응력-변형-변형률 속도

동일한 선행압밀하중을 경험한 시료에 대하여 서로 다른 과압밀비를 적용하여 수행한 압밀-배수 응력경로 삼축 실험은 평균 유효응력 또는 구속압이 과압밀점토의 응력-변형-변형률 속도에 미치는 영향이라고 할 수 있으며, 이와 같이 수행된 실험 결과를 그림 5에 제시하였다. 그림 5에서는 과압밀비가 2.7인 경우와 2.0인 경우가 유사한 응력-변형 거동을 보였으며, 과압밀비가 1.6인 경우와 1.33인 경우가 유사한 거동을 보였다. 또한, 시간에 따른 변형률 속도의 관계 곡선(그림 6)에서도 역시 과압밀비 2.7과 2.0 그리고 1.6과 1.33이 유사하게 나

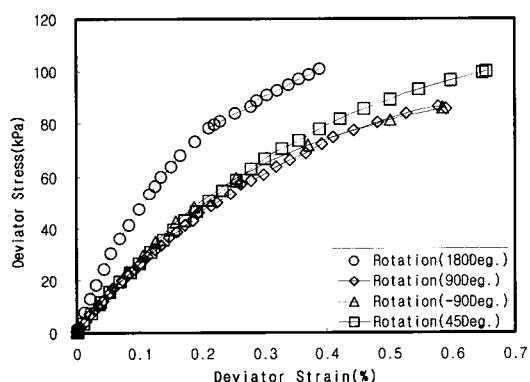


그림 3. 축차응력-축차변형률 관계(회전각)

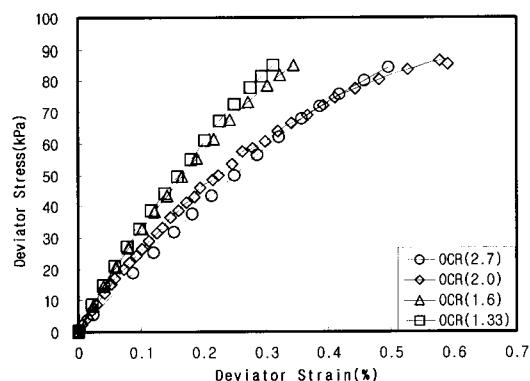


그림 5. 축차응력-축차변형률 관계(OCR)

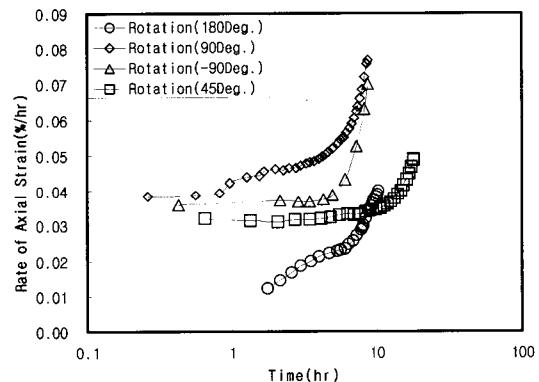


그림 4. 시간-변형률 속도 관계(회전각)

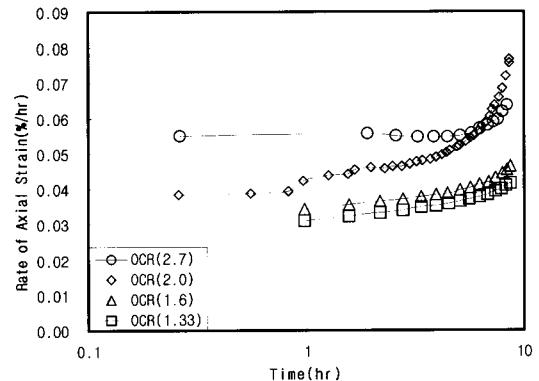


그림 6. 시간-변형률 속도 관계(OCR)

타난 것으로 보아 응력-변형 거동이 변형률 속도와 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 전체적인 경향은 OCR이 감소할수록 즉, 평균 유효응력이 증가할수록 동일한 축차변형률에서 더 큰 축차응력을 보였으며, 발생된 변형률 속도는 감소함을 보였다. 추가적으로 그림 6에서 변형률 속도의 변화가 발생하는 시점(시간-변형률 속도 곡선의 변곡점)은 거의 유사한 시점인 것으로 판단된다. 이상과 같은 결과로부터 변형률 속도의 변화로 표현된 흙의 거동은 과압밀비 의존성을 가지고 있음을 알 수 있었다. 즉, 상대적으로 낮은 과압밀비를 가진 흙의 경우 시간에 따라 압축하려는 경향 또는 양의 과잉간극수 압을 발생시키려는 경향을 가지고 있는 반면 높은 과압밀비를 가진 시료의 경우 반대의 경향을 보이기 때문이다. 또한, 동일한 선행압밀하중에 대하여 과압밀비를 변화시키기 위해서 적용하였던 평균 유효응력과도 관련이 있을 것이라 판단된다.

3.3 접근길이에 따른 응력-변형-변형률 속도

최근 응력경로(Recent stress path)의 길이로 정의되는 접근길이의 경우 다른 영향인자에 비하여 기존 연구결과가 미흡한 상태이다. 이에 접근길이가 과압밀점토의 응력-변형-변형률 속도에 미치는 영향을 살펴보고자 실시한 실험 결과를 그림 7에 제시하였다. 그림에서와 같이 과압밀비의 영향과 유사하게 응력-변형 거동이 양분화되는 경향을 보였다. 즉, 접근길이가 100kPa, 120kPa 그리고 150kPa인 경우가 다소 유사한 거동을 보인 반면 접근길이가 70kPa인 경우와 50kPa인 경우가 역시 유사한 거동을 보였다. 또한, 시간에 따른 변형률 속도를 나타내는 그림 8에서도 위와 같은 양분화 현상을 재확인할 수 있었으며, 접근길이가 100kPa 이상이 되면 시간에 따른 변형률

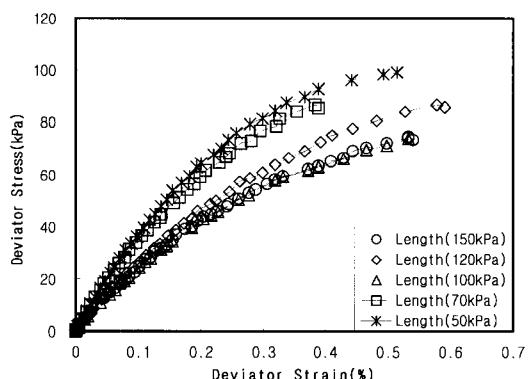


그림 7. 축차응력-축차변형률 관계 (접근길이)

속도는 거의 동일하게 나타났지만, 접근길이가 70kPa인 경우와 50kPa인 경우를 비교해 보면 접근길이가 감소할 수록 변형률 속도 역시 감소함을 보였다. 접근길이가 증가할수록 더 많은 시간동안 재하를 경험하여 더 많은 변형률이 이력 상태에서 미리 발생하였기 때문에 현 응력 경로에서 더 작은 변형률 속도를 보인 것이라 판단된다. 결과적으로 기존 Richardson(1988)의 결과(90kPa)와 비교해 보았을 때, 접근길이가 과압밀점토의 응력-변형-변형률 속도에 미치는 영향은 어느 대표값(100kPa)보다 작은 접근길이를 가질 경우로 국한되어 나타나리라 판단된다.

3.4 재하속도 이력에 따른 응력-변형-변형률 속도

최근 응력경로에서 적용된 재하속도를 의미하는 재하속도 이력에 따른 응력-변형 거동을 그림 9에 제시하였다. 현 응력경로에 적용된 재하속도가 10kPa/hr로 동일함에도 불구하고 응력-변형 거동은 초기 부분을 제외하면 서로 상이하게 나타났다. 그러나, 시간에 따른 변형률 속도 관계를 나타내는 그림 10의 경우 최근 응력경로에 적용되었던 재하속도가 5kPa/hr인 경우를 제외하면 거의 유사한 경향을 보였다. 여기서 재하속도 이력이 5kPa/hr인 경우가 가장 큰 변형률 속도를 보인 것은 현 응력경로에서의 갑작스런 재하속도의 증가($5\text{kPa/hr} \rightarrow 10\text{kPa/hr}$) 때문이라 판단된다. 그러나, 변형률 속도의 변곡점은 거의 유사한 시점으로 나타남을 그림을 통해서 알 수 있었다. 결과적으로 재하속도 이력이 현 응력경로에서의 재하속도(10kPa/hr)보다 작은 경우에만 재하속도 이력이 변형률 속도에 영향을 미침을 알 수 있었다.

그림 12와 그림 13의 경우 재하속도 이력이 동일한 조건에서의 현 응력경로에 미치는 영향을 좀더 자세히 살펴보고자 재하속도 이력 실험에서의 최근 응력경로와

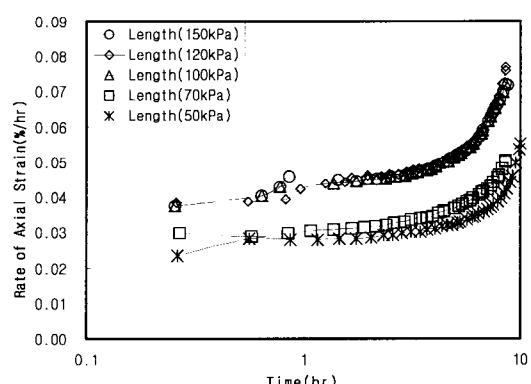


그림 8. 시간-변형률 속도 관계(접근길이)

현 응력경로를 모두 고려한 경우이다(그림 11 참조). 먼저 그림 12의 경우 평균 유효응력에 따른 체적변형률 속도의 관계로서 초기 평균 유효응력 100kPa에서 200kPa (점 B1, B2 그리고 B3)까지가 최근 응력경로에서의 체적변형률 속도를 나타내며, 이후 동일한 평균 유효응력인 200kPa에서 연직으로 나타난 부분이 현재의 응력경로이다. 본 연구에서 수행된 실험이 순수전단(평균 유효응력=일정) 실험이므로 현재의 응력경로에서는 동일한 평균 유효응력을 나타내고 있다. 그림 13의 경우 재하속

도 변화에 따른 급격한 변화를 보이는 재하 초기부분에서의 변형률 속도를 제외하면, 최근 응력경로(A→B)에서 하중이 적용됨에 따라 변형률 속도는 각 재하속도에 따라 비선형적으로 꾸준히 증가하다가 이후 현재의 응력경로를 적용하기 위한 응력경로의 변화로 인하여 동일한 평균 유효응력에서 지속적으로 변형률 속도가 감소하였다. 또한, 최근 응력경로에서 적용된 재하속도가 클수록 변형률 속도 역시 크게 증가하였다. 이후 동일한 재하속도 조건인 현 응력경로에서는 약 700분 이후에

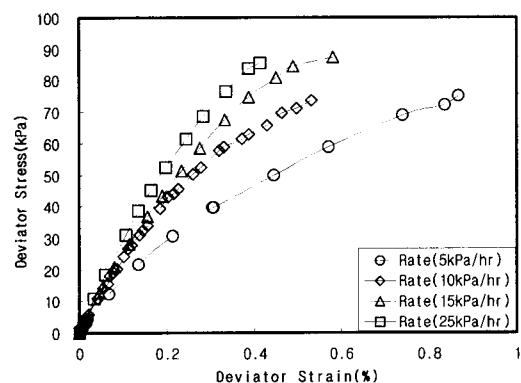


그림 9. 축차응력-축차변형률 관계(재하속도 이력)

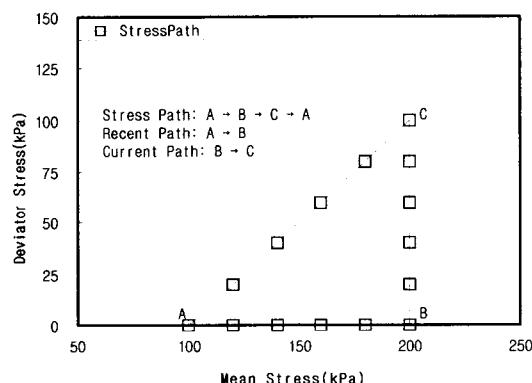


그림 11. 재하속도 이력 실험에서의 응력경로

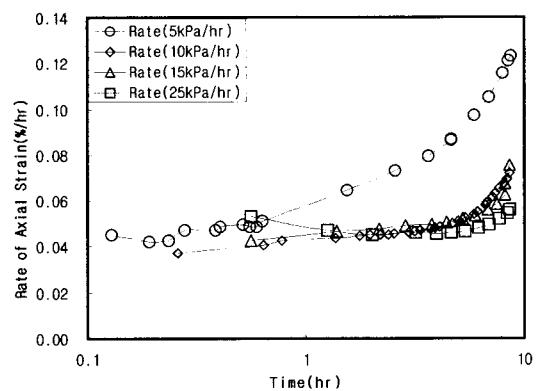


그림 10. 시간-변형률 속도 관계(재하속도 이력)

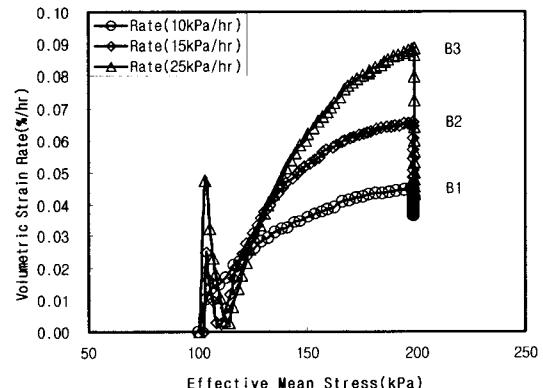


그림 12. 재하속도 변화에 따른 평균 유효응력-체적변형률 속도

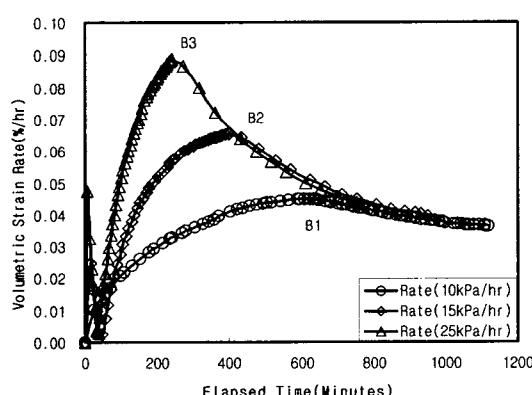


그림 13. 재하속도 변화에 따른 변형률 속도의 변화

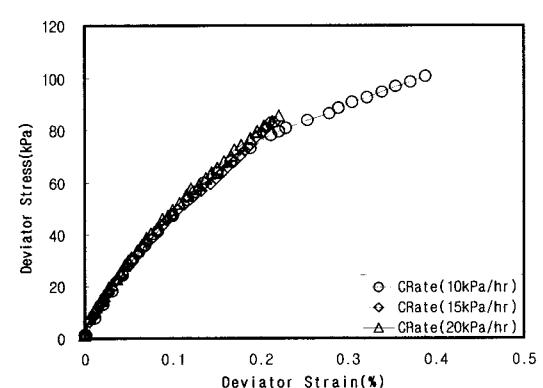


그림 14. 축차응력-축차변형률 관계(재하속도)

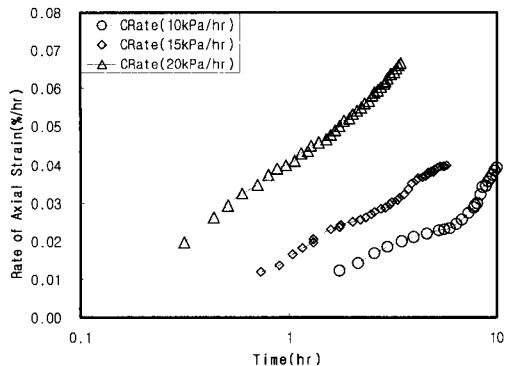


그림 15. 시간-변형률 속도 관계(재하속도)

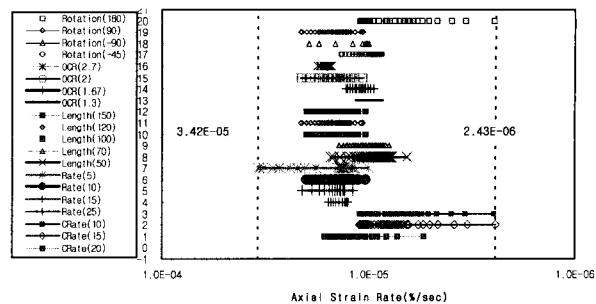


그림 16. 모든 영향인자에 따른 변형률 속도

동일한 변형률 속도에 접근하였음을 알 수 있었다. 이로서 과거 재하속도 이력은 현재의 응력경로의 재하 초기 부분에만 영향을 미치며 비록 과압밀 상태라 할지라도 어느 한계값(최근 응력이력의 기억이 상실되는 점)을 넘어서면 현 응력경로에서의 변형률 속도는 모든 재하 속도 이력에 영향을 받지 않음을 알 수 있었다.

3.5 재하속도에 따른 응력-변형-변형률 속도

재하속도 이력에 따른 응력-변형-변형률 속도 특성에 추가적으로 재하속도 이력이 동일한 시료에 대하여 현재의 응력경로에서 적용된 재하속도가 과압밀점토의 응력-변형-변형률 속도에 미치는 영향을 살펴보고자 실시된 재하속도 영향 실험에 대한 결과를 그림 14에 제시하였다. 그림에서와 같이 현 재하속도가 과압밀점토의 응력-변형 거동에 어떠한 영향을 미치는가는 거의 구별할 수 없었다. 그러나, 시간에 따른 변형률 속도의 관계를 나타내는 그림 15에서는 현재의 재하속도의 영향을 쉽게 구별할 수 있었다. 즉, 재하속도가 증가할수록 변형률 속도 역시 증가하였다. 결과적으로 재하속도 이력 실험과 동일하게 응력-변형-변형률 속도간의 상관성을 보이지 않았다.

마지막으로 본 연구에서 수행된 모든 영향인자에 대한 압밀-배수 응력경로 삼축 실험(응력제어)에서 산정된 변형률 속도를 그림 16에 제시하였다. 그림에 제시된 바와 같이 최대 3.42×10^{-5} 에서 최소 2.43×10^{-6} 까지의 분포를 보였으며, 이 값들은 과거 Leroueil et al.(1996)에 의해 제시된 실내 실험시 유발되는 변형률 속도인 $10^{-5} \sim 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ 범위와 비교적 잘 일치함을 보였다. 본 연구의 경우 영향인자로 응력경로 회전각, 과압밀비, 접근길이, 재하속도 이력 그리고 재하속도에 따른 변형률

속도를 고려하였으므로 그림 16은 변형률 속도를 고려한 압밀해석시 좋은 참고 자료가 되리라 판단된다.

4. 결 론

지반의 응력-변형 거동은 유발되는 변형률 속도(Strain rate)에 크게 의존한다. 현장의 압밀속도는 실내 압밀속도보다 2-4계(Order)정도 작다. 따라서 현장지반의 압밀해석시에 변형률 속도의 영향을 고려할 필요가 있다. 본 연구에서는 이와 같은 응력-변형-변형률 속도의 상관성을 규명하고자 압밀-배수 응력경로 실험을 실시하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 응력경로 회전각의 경우 응력반전에 해당되는 회전 각 180° 를 제외하면 흙의 응력-변형 거동에는 큰 영향을 미치지 않았지만, 회전각의 정의에 따라 변형률 속도는 크게 변화하였다.
- (2) 동일한 변형률 조건하에서 과압밀비가 감소할수록 축차응력은 증가하였지만 발생된 변형률 속도는 감소하였다. 이로부터 응력-변형-변형률 속도 간에 상관성이 존재함을 알 수 있었다.
- (3) 접근길이의 경우 100kPa을 기준으로 하여 응력-변형-변형률 속도 거동이 다르게 나타났으며, 100kPa 이상이 되면 접근길이는 흙의 응력-변형-변형률 속도에 큰 영향을 미치지 않았다.
- (4) 재하속도 이력의 경우 응력-변형 거동에는 상당히 큰 영향을 미치고 있지만, 변형률 속도에는 가장 느린 재하속도 이력에 해당하는 5kPa/hr를 제외하면 큰 영향을 미치지 않았다. 즉, 재하속도 이력이 현재 재하속도보다 작을 경우만 재하속도 이력의 영향이 나타났다. 또한 재하속도는 본 연구에서 수행된 모

든 영향인자들 중에서 훑의 변형률 속도에 가장 큰 영향을 미쳤으며, 재하속도가 증가할수록 변형률 속도 역시 증가하였다. 그러나 응력-변형 거동과 변형률 속도간의 상관성을 보이지는 않았다.

(5) 응력경로 회전각, 과압밀비, 접근길이, 재하속도 이력 그리고 재하속도를 고려한 압밀-배수 응력경로 삼축 실험(응력제어)에서 나타난 변형률 속도는 최대 $3.42 \times 10^{-5} (\%/\text{sec})$ 에서 최소 $2.43 \times 10^{-6} (\%/\text{sec})$ 까지의 범위에 존재하였다.

참 고 문 헌

1. 김병일(2001a), “응력이력과 시간이력을 고려한 과압밀점토의 응력-변형 거동”, 중앙대학교 석사학위논문
2. 김병일, 신현영, 김용수, 김수삼(2001b), “과압밀 점토의 응력이력 의존성에 관한 연구”, 한국지반공학회 학술발표회, pp.161-166.
3. 김윤태, Leroueil(1999), 자연점토의 변형률속도 의존적인 압밀거동의 해석, 한국지반공학회논문집, Vol.15, No.6, pp.17-28
4. 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, pp.1-60.
5. Richardson(1988), “Investigations of threshold effects in soils deformations”, Ph.D thesis, City University, London.
6. Stallebrass, S. E.(1990), “Modelling the effect of recent stress history on the deformation of overconsolidated soils”, Ph.D thesis, City University, London.

(접수일자 2002. 10. 8, 심사완료일 2003. 2. 19)