

미소변형 전단강성에 시간효과가 미치는 영향

The Shear Stiffness of Small Strain with Time Effect

김수삼* 신현영** 김병일***
Kim, Soo-Sam Shin, Hyun-Young Kim, Byung-Il

ABSTRACT

This study investigated the shear stiffness of level of small strain with time effect. Time effect consists of rest time, loading rate of recent and current stress path. In addition, for the measurement of small strain, overconsolidated state was represented in a triaxial cell, and drained stress path tests were carried out. Test results show that the loading rate of recent stress path has no effects on the stiffness of very small strain, but the shear stiffness of level of small strain increases with it. Finally, the rest time and the loading rate of current stress path have the effects on the shear stiffness of initial and small strain.

1. 서론

실내 실험 장비 및 실험법 등의 발전 그리고 계산 능력의 향상 등으로 인하여 비선형 응력-변형 거동을 보이는 과압밀 영역에서 특히 미소변형에서의 거동에 관한 정교한 측정 및 파라미터 산정이 가능하게 됨에 따라 사용성과 경제성을 고려한 지반 구조물의 시공이 요구되어 왔다. 이와 같은 추세에 부합하여 지반 동역학에서는 0.001%~0.0001%이하의 변형률 수준에서의 흙의 거동을 탄성으로 간주하고 응력-변형률 곡선의 기울기로 정의되는 강성(Stiffness)이 일정하다는 개념으로 지반의 동적 특성 등을 연구하여 왔으며, 지반 정역학에서는 0.01% 이상의 변형률 수준에 대한 비선형 강성에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 실제 흙의 경우 재하 하중이 적용됨에 따라 매우 미소한 변형에서 대변형에 이르기까지 연속적인 응력-변형 거동을 보이고 있기 때문에 지반 동역학과 지반 정역학을 구별하여 연구할 필요가 없다는 주장이 Atkinson and Sallfors(1991), Ishihara(1996) 그리고 Shibuya et al.(1999)에 의해 제기 되었다. 이와 같이 지반 정역학과 동역학에서 다루는 변형의 구분이 모호해 지면서 지반의 응력-변형 거동을 비선형 강성을 고려하여 매우 미소한 변형(0.001%이하), 미소변형($0.001 \leq \gamma_s \leq 1.0\%$) 그리고 중간 및 대변형(1.0%이상)으로 분류하고 있다(Atkinson and Sallfors, 1991).

실제 과압밀된 지반 또는 터널, 굴착, 옹벽 건설 등의 경우 작업하중 조건에서 발생되는 변형률은 0.5% 이하이며 비선형 탄소성 거동을 보이는 미소변형에 해당한다는 것이 기존 연구 결과에 의해 제시되어 왔다(예; Burland, 1989). 이에 본 연구에서는 미소변형률 수준에서의 비선형 전단 강성에 시간효과가 미치는 영향을 실험적으로 규명하고자 하였다.

* 중앙대학교 건설환경공학과 교수, 정회원

** 중앙대학교 토목공학과 대학원, 학생회원

*** 중앙대학교 토목공학과 대학원 학생회원

2. 실험

2.1 시료의 물성

본 연구에서 사용한 시료는 남해안 가덕도 지역에서 채취한 교란된 해성점토로서 실내에서 재조성하여 사용하였다. 사용된 시료의 기본 물성은 표 1과 같다.

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

2.2 초기조건

본 연구에서는 미소변형 전단강성을 측정하고자 과압밀 상태에서 배수 응력경로 삼축실험을 수행하였다. 양호한 포화도를 얻기 위해서 초기에 배압(back pressure)=100kPa, 셀압(cell pressure)=110kPa를 적용하여 약 1시간 정도를 포화시킨 후, 다시 셀압=220kPa, 배압=200kPa를 적용하고 배압과 간극수압이 거의 동일한 값을 보일 때까지 방치하였다. 단계 포화 후 B-값(Skempton, 1954)을 확인하기 위하여 셀압을 30kPa까지 증가시켰으며, B=0.98이 되는 시점에서 재하속도 10kPa/hr로 평균 유효응력이 400kPa이 될 때까지 등방압밀시켰다. 이후 발생하였을지도 모르는 과잉간극수압을 소산시키기 위해서 약 3시간 정도를 일정 구속압에서 방치하였다. 또한, 과압밀 상태(수정 Cam-clay 상태경계면 내부에 존재하는 상태로 정의)를 구현하기 위해서 재하속도와 동일한 속도인 10kPa/hr로 각 조건에 해당하는 평균 유효응력이 될 때까지 재하(unloading)하였다. 위와 같은 과정을 경험한 시료의 상태를 초기조건(Initial conditions)으로 정의하였다.

2.3 재하속도 이력 실험

과압밀된 흙의 강성에 재하속도가 미치는 영향은 아직도 명확한 결론이 확립되어 있지 않지만, 영향이 없을 것이라는 것이 많은 학자들에게 지지를 받고 있다. 그러나, 기존 연구의 결과는 대부분 변형제어 방식과 상대적으로 빠른 재하속도로 수행되는 동적 실험의 결과를 토대로 하여 이루어진 것이기 때문에, 본 연구에서는 흙 골격의 점성이 존재하는 한 재하속도도 흙의 강성에 영향을 미칠 것이라는 Dorby and Vucetic(1987)의 주장이 더 타당성이 있다고 판단하였다. 이를 확인하기 위해 먼저 최근 응력경로(현 응력경로 바로 직전의 응력경로)의 재하속도를 변화시키면서 현 응력경로에서는 동일한 조건으로 수행되는 재하속도 이력 실험을 실시하였다. 여기서 적용된 재하속도는 완속재하(완전배수 조건)에서의 5, 10kPa/hr와 급속재하(불완전 배수 조건)에서의 15, 25kPa/hr로 구분하여 실험을 수행하였고 접근길이(최근 응력경로의 길이, L; 100kPa), 응력경로 회전각(현 응력경로와 최근 응력경로가 이루는 각, θ ; 90°), 정지시간(현 응력경로 바로 직전 일정한 평균 유효응력하에서의 지속시간, T; 0hr) 그리고 과압밀비(R; 2.0)는 모두 동일하게 적용하였다(표 2 참조). 여기서 완속재하와 급속재하로 분리할 수 있었던 기준은 재하속도 결정 실험(본 논문에는 제시되지 않았음; 김병일 등(2001b) 참조)에서의 10kPa/hr보다 작은 재하속도인 경우에 과잉간극수압이 허용 가능한 범위에 있었기 때문이다.

표 2. 재하속도 이력 실험

Influence factor	Description	Fixed value	Controlled value (kPa/hr)	Remarks
Lading rate of recent stress path (V)		L=100 $\theta = 90$ T=0 R=2	5	Solid line:
			10	Current stress path
			15	Dotted line:
			25	Recent stress path

Note: i) p' and q' → Cambridge stress field, ii) Legend → Rate(Controlled value)

2.4 현 재하속도 실험

재하속도 이력 실험과는 달리 현 응력경로에서의 재하속도가 미소변형 전단강성에 미치는 영향을 파악하고자 표 3과 같은 조건의 실험을 실시하였다. 최근 응력경로에서는 재하속도를 10kPa/hr로 고정하였고 현 응력경로에 대한 재하속도를 10, 15, 25kPa/hr로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 그러나 다른 조건 즉, 접근길이(100kPa), 정지시간(0hr), 과압밀비(2.0), 회전각(180°)으로 동일하게 적용하였다. 다른 실험과는 달리 회전각을 180°로 선정한 이유는 회전각이 180°일 때 응력-변형을 곡선의 기울기로 정의되는 강성의 변화가 가장 크게 나타난다는 사실을 알 수 있었기 때문이다(김병일 등, 2001a).

표 3. 재하속도 실험

Influence factor	Description	Fixed value	Controlled value (kPa/hr)	Remarks
Loading rate of current stress path (V')		L=100 $\theta = 180$ T=0 R=2	10	Solid line:
			15	Recent stress path
			20	Dotted line:
				Current stress path

Note: i) p' and q' → Cambridge stress field, ii) Legend → CRate(Controlled value)

2.5 정지기간 실험

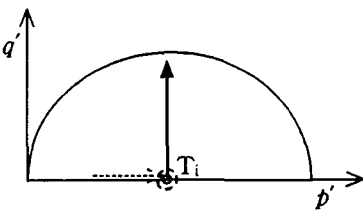
현 응력경로 바로 직전 일정 평균 유효응력하에서 경험하였던 지속시간을 의미하는 정지기간 역시 이후의 응력-변형 거동에 영향을 미칠 수 있다. 이중 가장 중요한 것은 아래와 같다(Atkinson and Salfors, 1991).

- (1) 이전 단계에서 생성된 과잉간극수압의 소산
- (2) 시료의 비체적을 감소시키고 유사 과압밀비를 증가시키는 크리프(Creep)

본 연구에서는 연속적인 재하단계 중간의 정지기간이 이후의 미소변형 전단강성에 중요한 영향을 미칠 것으로 판단하여 그 영향을 조사하고자 하였다(표 4 참조).

최근 응력경로에서의 조건은 모두 동일하게($L=100\text{kPa}$, $\theta=90^\circ$, $V=10\text{kPa/hr}$, $R=2.0$) 수행되었으며, 단지 최근 응력경로의 재하가 완료된 시점에서 각각 0hr, 25hr, 58.5hr의 배수 크리프(Creep)를 허용하였다. 이 후 현 응력경로에서는 동일한 재하속도(10kPa/hr)로 순수전단 실험(평균 유효응력 일정 실험)을 수행하였다.

표 4. 정지기간 실험

Influence factor	Description	Fixed value	Controlled value (hr)	Remarks
Rest time (T)		$L=100$ $\theta=90$ $V=10$ $R=2$	0	Solid line: Current stress path Dotted circle: Rest time
			25	
			58.5	

Note: i) p' and q' → Cambridge stress field, ii) Legend → Rest(Controlled value)

3. 결과 및 고찰

3.1 재하속도 이력에 따른 전단강성

그림 1은 응력-변형률 곡선의 기울기로 정의되는 전단강성의 재하속도 이력에 따른 변화 양상을 보여주고 있다. 초기 전단계수(G_0)는 재하속도 이력 5, 10, 15, 25kPa/hr 에 대하여 각각 11.2, 11.5, 11.7, 11.7MPa 로 나타나 재하속도 이력의 영향을 받지 않았다. 여기서 초기 전단계수의 값(그림에서 점선 부분에 해당함)은 실험에서 측정된 결과를 바탕으로 외삽법을 적용하여 산정하였다. 이후 변형률이 증가함에 따라 재하속도 이력이 증가할수록 전단계수 역시 증가함을 보였다. 이는 다음 절에서 다루게 될 재하속도의 영향 즉, 초기 전단계수(G_0)의 값이 큰 차이를 보이다가 이후 유사한 값으로 수렴하였던 결과와는 다르게 G_0 의 값이 거의 유사하면서 이후의 전단계수에서 차이를 보였다. 그러나 재하속도 이력의 증가에 따른 전단계수의 증가는 동일한 것으로 판단된다.

재하속도 이력이 가장 느린 경우에 해당하는 5kPa/hr 에서는 전단계수의 감소 경향이 거의 선형적인 것으로 보아 전단계수가 반드시 비선형적으로 감소하는 것만은 아님을 알 수 있었다. 이는 재하속도 이력이 5kPa/hr 인 경우에 해당하는 시료에 현 응력경로에서의 재하속도인 10kPa/hr 를 적용하면 시료는 갑작스런 재하속도의 증가로 유사전단계수에 도달하였다가 이후 변형률이 증가하면서 꾸준히 전단계수가 감소하였기 때문이라 사료된다. 이와 반대의 경향이 갑작스런 재하속도의 감소에 해당하는 15kPa/hr 와 25kPa/hr 에서 나타났다. 이와 같이 재하속도의 변화에도 불구하고 초기 전단계수가 동일하게 나타난 것은 최근 응력경로에서 축차변형률이 증가함에 따라 감소하였던 전단계수가 재하속도의 변화에 의해 모두 유사전단강성에 도달하였기 때문이라 사료된다.

동일한 축차변형률에서의 재하속도 이력에 따른 전단계수의 변화를 그림 2에 제시하였다. 서로 다른 재하속도 이력을 가지고 있다 하더라도 현재의 응력경로에 적용된 조건(재하속도= 10kPa/hr)이 동일한 경우의 초기 전단계수(G_0)는 동일하게 나타났다. 이후 변형률의 증가에 따라 재하속도

이력의 영향이 나타나지만 일정 변형률 수준을 넘어서면 재하속도의 이력은 사라지게 되어 결국 모든 재하속도 이력에 대하여 동일한 전단계수를 보일 것이라 판단된다.

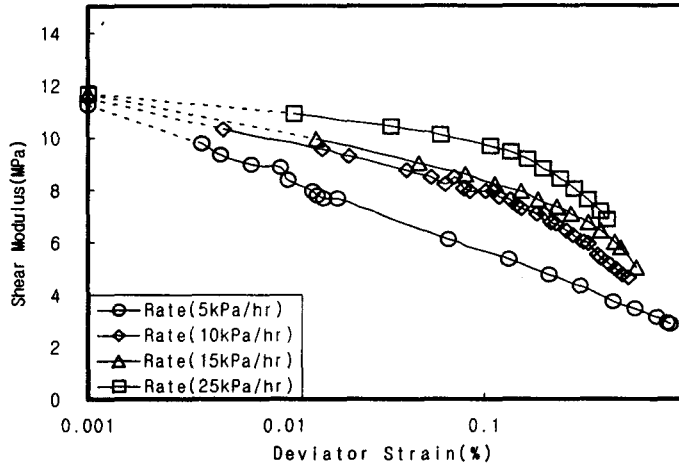


그림 1. 축차변형률-전단계수 관계(재하속도 이력)

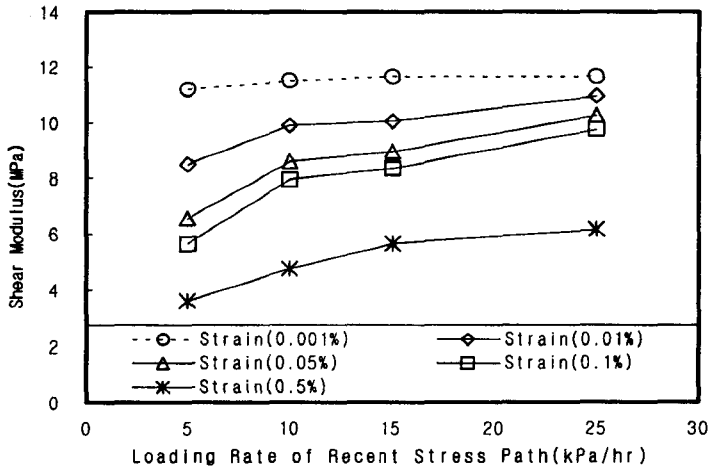


그림 2. 재하속도 이력에 따른 전단계수

3.2 재하속도에 따른 전단강성

현재의 응력경로에 적용된 서로 다른 재하속도에 따른 전단계수의 변화를 그림 3과 그림 4에 제시하였다. 그림 3에서는 축차변형률이 증가함에 따라 전단계수가 감소하는 경향을 보인다는 것은 모든 재하속도에서 나타났지만, 재하속도가 상대적으로 빠른 15, 20kPa/hr의 경우 초기 변형률 수준에서 급격한 감소 경향을 보이고 있었다. 또한 재하 초기에서부터도 탄성한계 전단변형률이라 할 수 있는 변형률이 존재하지 않았으며, 감소 곡선이 위로 볼록한 형태가 아닌 아래로 볼록한 형태를 보였다. 재하속도가 10kPa/hr일 경우 초기 전단계수는 약 20MPa 정도였지만, 속도가 2배로 증가된 20kPa/hr인 경우의 초기 전단계수는 약 50MPa 정도로 약 2.5배 정도가 증가하였다. 이는

응력경로 삼축실험을 수행할 때 현재의 재하속도가 초기 전단계수 (G_0)의 값에 큰 영향을 미치고 있음을 의미하는 것이다. 즉, 흙 골격의 점성은 초기 전단계수에 영향을 미칠 수 있다는 것으로 이는 Dorby and Vucetic(1987)의 주장과 동일한 결과에 해당한다. 추가적으로 재하속도가 15kPa/hr인 경우와 20kPa/hr인 경우를 비교해 보면 거의 유사한 감소 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과가 나타난 것은 최근 응력경로에서 적용된 10kPa/hr에 이어, 현 응력경로에서는 5kPa/hr(현 재하속도=15kPa/hr)와 10kPa/hr(현 재하속도=20kPa/hr)를 더 증가시켰기 때문에 나타나는 결과라 판단된다. 즉, 갑작스런 재하속도의 증가에 따른 결과라 판단된다. 또는 완속재하(10kPa/hr)인 경우와 급속재하(15, 20kPa/hr)인 경우로 분리하여 생각할 수도 있을 것이다.

그림 4의 경우 동일한 축차변형률에서 재하속도에 따른 전단계수의 변화를 나타낸 것으로서 변형률이 0.05% 이상이 되면 재하속도의 영향이 사라졌음을 확인할 수 있었으며, 이 변형률 값은 상대적으로 작은 값에 속하는 것으로 보아, 현 재하속도는 초기 변형률 수준에서만 그 영향을 미친다고 추정할 수 있다.

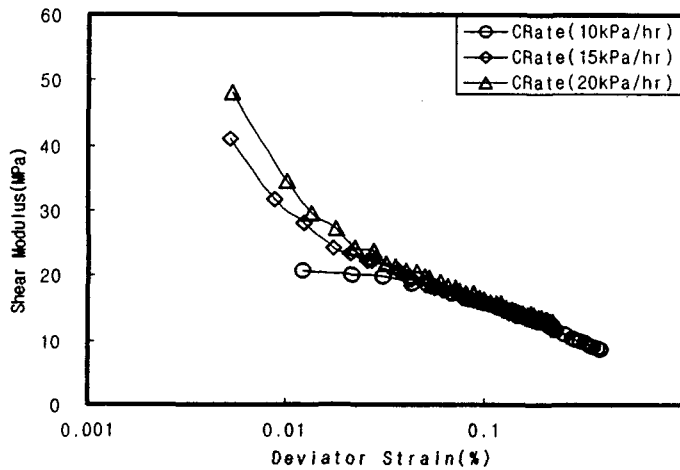


그림 3. 축차변형률-전단계수 관계(재하속도)

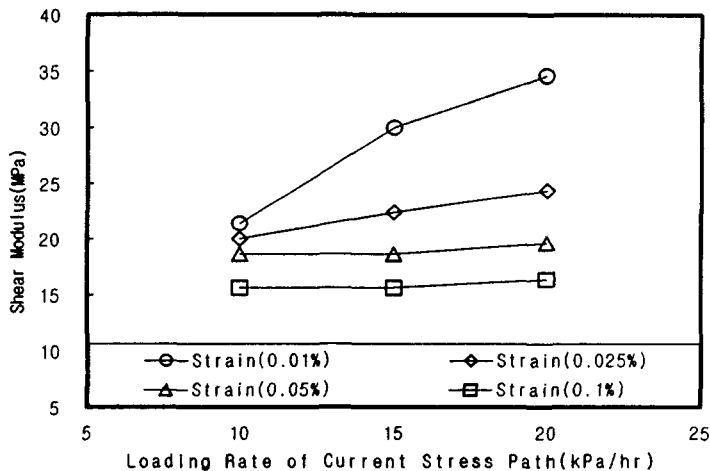


그림 4. 재하속도에 따른 전단계수

3.3 정지기간에 따른 전단강성

전단계수의 시간 의존적 거동을 이해하고 평가한다는 것은 실내에서 측정된 전단계수로부터 원 위치 전단계수를 예측하고자 할 때 매우 중요하다. 현 응력경로 직전 일정한 응력상태에서 유지되었던 지속시간을 정지기간이라 하는데, 정지기간이 증가함에 따라 간극비가 감소하는 체적 크리프 현상이 발생하여 유사 과압밀비를 증가시키고, 결과적으로 강성을 증가시킬 수 있다. 이와 같은 강성의 증가는 재하의 초기 부분에서만 발생하며, 이후 재하가 지속됨에 따라 점차 감소하여 정지기간 없이 수행된 실험에서 관측된 값에 도달하게 된다.

본 연구에서는 위와 같은 사실을 확인하고자 그림 5 및 그림 6과 같은 곡선을 도시하였다. 그림 5에는 축차변형률에 따른 전단계수를 제시하였다. 그림에서와 같이 정지기간이 증가할수록 초기 전단계수 역시 증가하였으며, 정지기간의 유무에 따라 감소 경향이 다르게 나타났다.

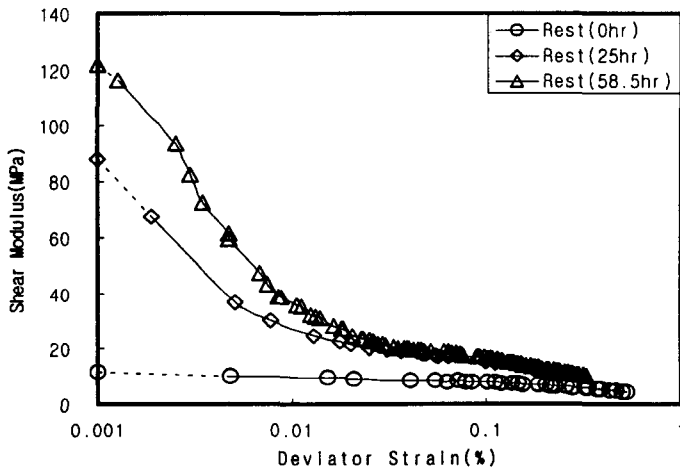


그림 5. 축차변형률-전단계수 관계(정지기간)

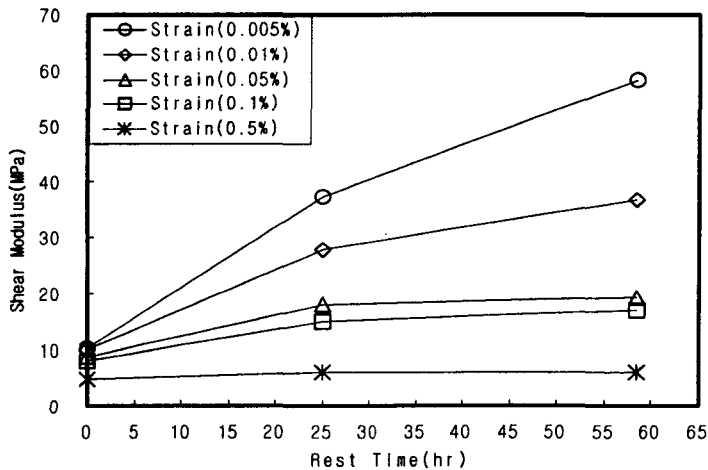


그림 6. 정지기간에 따른 전단계수

그림 6의 경우 동일 축차변형률 조건에서 정지시간에 따른 전단계수를 나타낸 것으로서 변형률 수준이 낮은 범위에서는 정지시간이 증가함에 따라 전단계수가 증가하는 경향을 보이다가 0.05% 이상부터는 정지시간 25hr와 58.5hr인 경우가 유사한 값을 가지기 시작하였고 약 0.4% 이상이 되면서는 모든 조건에서 거의 동일한 값을 보이고 있었다. 이처럼 약 0.4% 이상이 되어야만 모든 전단계수의 값이 유사하게 나타나는 본 연구의 결과와는 달리 기존 문헌(예, Atkinson and Salfors, 1991)에서는 재하 초기 부분에서만 서로 다른 전단계수의 값을 보인다고 제시되어 있다. 이와 같은 차이를 규명하기 위해서는 정지시간에 따른 체적 크리프의 양적인 변화를 파악하여야 할 것이지만, 본 연구에서는 정지시간에 따른 시료의 높이 변화 또는 체적 변화를 측정하지 못하였다. 다만 정지시간 동안 배수 크리프가 아닌 비배수 크리프 조건이 되었을 가능성을 배제할 수는 없을 것이라 판단되며, 추후 정지시간에 대해서는 더 많은 연구가 수행되어 할 것으로 사료된다.

4. 결론

시간효과가 미소변형 전단강성에 미치는 영향을 규명하고자 실시한 배수응력경로 삼축실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 초기 전단강성은 재하속도 이력에 영향을 받지 않았지만, 이후 변형률이 증가함에 따라 재하속도 이력이 증가할수록 미소변형 전단강성 역시 증가하였다. 이는 비선형 응력-변형 거동이 재하속도 이력에 따라 다르게 나타남을 의미하는 것이다.
2. 재하속도 증가에 따른 전단강성의 증가는 재하 초기에 해당하는 0.05% 이하인 변형률 수준에서만 발생하였다.
3. 낮은 변형률 수준에서는 정지시간이 증가함에 따라 전단강성이 선형적으로 증가하는 경향을 보이다가 0.05% 이상부터는 정지시간이 25hr와 58.5hr인 경우가 유사한 값을 가지기 시작하였고 약 0.4% 이상이 되면서는 모든 조건에서 거의 동일한 값을 보였다.

참고문헌

1. 김병일, 신현영, 김용수, 김수삼(2001a). "과압밀점토의 응력이력 의존성에 관한 연구" 한국지반공학회, 2001 봄 학술발표회 논문집, pp.161-166.
2. 김병일, 신현영, 이승원, 김수삼(2001b). "하중재하속도에 따른 과압밀점토의 응력-변형 거동" 한국지반공학회, 2001 봄 학술발표회 논문집, pp.239-244.
3. Atkinson, J. H. and Salfors, G.(1991). "Experimental determination of soil properties" General Report to Session 1. *Proceedings of the 10th ECSMFE*, Florence 3, pp.915-956.
4. Shibuya, S., Mitachi, T., Tanaka, H., Kawaguchi, T., and Lee, I. M.(1999). "Measurement and application of quasi-elastic properties in geotechnical site characterisation" *11th Asian Regional Conferences*, pp.85-156.
5. Burland, J. B.(1989). "Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: Small is beautiful-the stiffness of soils at small strains" *Can. Geotech. J.*, 26, pp.499-516.
6. Dorby, M. and Vucetic, R.(1987). "Dynamic properties and seismic response of soft clay deposits" *Proc. of Iner. Sympo. on Geotech. Engr. of Soft Soils*, Mexico City, Vol. 2, pp.51-87.