

## 하중재하속도에 따른 과압밀점토의 응력-변형 거동 Stress-Strain Behaviour of Overconsolidated Clay with Loading Rate

김병일<sup>1)</sup>, Byung-Il Kim, 신현영<sup>2)</sup>, Hyun-Young Shin, 이승원<sup>3)</sup>, Seung-Won Lee, 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) 현대건설 기술연구소, 선임연구원, Ph.D, Senior Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology
- 4) 중앙대학교 공과대학 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng. Chung-ang University

**SYNOPSIS** : Natural clayey soils or improved grounds are in a overconsolidated conditions due to changes in vertical stress and pore pressures, desiccation, ageing and so on. These grounds show inelastic stress-strain behaviour characteristics within all range of strain except very small strain ( $\gamma_s \leq 10^{-3} \sim 10^{-4}\%$ ) when construction, such as excavations and retaining walls, is performed. Also it strongly depends on loading rate of current stress path and recent stress path. This study carried out drained stress path tests by varying loading rate of current and recent stress path. Test results indicated that stress-strain behaviour of overconsolidated clay depends on loading rate, especially loading rate of current stress path.

Key words : Overconsolidated clay, Stress-strain behaviour, Loading rate, Stress path test.

### 1. 서론

자연 점성토 지반 또는 개량 지반은 연직응력 및 간극수압의 변화, Desiccation, Ageing 등과 같은 요인으로 인하여 과압밀 상태에 있게 된다(Jamiolkowski et al., 1985). 이와 같은 과압밀 지반에서의 굴착 및 옹벽 시공과 같은 건설작업 등으로 인하여 발생하는 응력-변형 거동은 매우 미소한 변형률 범위를 제외한 거의 모든 변형 범위에 있어서 비선형 탄소성을 보이고 있으며, 현 재하속도 및 이전 응력경로에서 적용되었던 재하속도 이력에 강한 의존성을 지니고 있다. 따라서 본 연구에서는 하중재하속도에 따른 과압밀점토의 응력-변형 거동을 규명하고자 현 재하속도와 최근 응력경로에서의 재하속도를 조절하여 압밀배수(Consolidated Drained) 응력경로(Stress Path) 삼축실험을 수행하였다.

### 2. 실험

#### 2.1 시료의 물성

본 연구에서 사용된 시료는 남해안 가덕도 지역에서 채취한 해성점토로서 불교란 시료를 확보하는 것이 어려워 시료를 교란된 상태로 채취하였다. 이후 실내에서 습윤상태의 흙을 140번 체로 체가름하여 사용하였다. 이 과정 중 자갈이나 조개껍데기 등의 불순물을 제거하였으며, 동시에 시료 채취지점과 동

일한 위치에서 운반해온 해수를 첨가하여 액성한계의 1.5배 정도의 함수비를 갖는 슬러리 상태로 시료를 준비하였다. 이후 슬러리를 대형 1-D 재조성셀에 넣고, 60kPa의 수압을 적용하여 예압밀시켰다. 예압밀이 어느 정도 종료되었다고 판단되는 시점에서 비배수 상태로 30일간을 방치하여 재조성 시료를 제작하였다. 본 연구에서 사용된 시료는 200번 체 통과량=94.3%, 건조단위중량=1.1t/m<sup>3</sup>, 비중=2.71, 액성한계=61% 그리고 소성지수=36으로서 통일분류법상 CH에 해당한다.

## 2.2 영향인자 실험

### 2.2.1 시료의 초기조건

본 연구에서 수행된 실험은 과압밀 상태(수정Cam-clay 상태경계면 내부의 상태로 정의)에서의 배수 응력경로 삼축실험이다. 양호한 포화도를 얻기 위해서 초기에 back pressure=100kPa, cell pressure=110kPa을 적용하여 약 1시간 정도 포화시킨 후, 다시 cell pressure=220kPa, back pressure=200kPa을 적용하고 pore pressure와 back pressure가 거의 동일한 값을 보일 때까지 방치하였다. 단계 포화 후 B-value를 확인하기 위하여 cell pressure를 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 압력하에서 방치하였다. 또한, 과압밀 상태를 구현하기 위해서 재하속도와 동일한 속도인 10kPa/hr로 각 조건에 해당하는 평균 유효응력이 될 때까지 재하(unloading)를 수행하였다. 위와 같은 과정을 경험한 시료의 상태를 초기조건(initial condition)으로 정의하였다.

### 2.2.2 재하속도 이력 실험

재하속도가 과압밀된 흙의 응력-변형 거동에 미치는 영향을 살펴보고자, 먼저 최근 응력경로의 재하속도를 변화시키면서 현 응력경로에서는 동일조건으로 수행되는 재하속도 이력 실험을 실시하였다. 여기서 적용된 재하속도는 5, 10, 15, 25kPa/hr로 구분하여 실험을 수행하였다(표 1 참조).

표 1. 재하속도 이력 실험

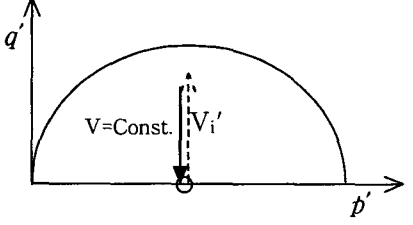
Influence Factor	Description	Fixed Value	Controlled Value (kPa/hr)	Remarks
Loading Rate of Recent Stress Path (V)		L=100 $\theta=90$ T=0 R=2	5	Solid line: Current stress path Dotted line: Recent stress path
			10	
			15	
			25	

Note: i)  $p'$ 과  $q'$ 은 Cambridge 응력장; ii) L=접근길이(kPa),  $\theta$ =응력경로 회전각( $^{\circ}$ ), T=정지시간(hr), R=과압밀비(N.D)

### 2.2.3 재하속도 영향 실험

현재의 재하속도가 과압밀점토의 응력-변형 거동에 미치는 영향을 파악하고자 표 2와 같은 재하속도 영향 실험을 실시하였다. 재하속도 이력 실험과는 달리 최근 응력경로에 적용하였던 재하속도는 10kPa/hr로 고정하였고 현 응력경로에 대한 재하속도를 10, 15, 25kPa/hr로 변화시키면서 실험을 수행하였다. 재하속도를 제외한 나머지 조건은 접근길이(최근 응력경로의 길이; 100kPa), 정지시간(현 응력경로 직전에 경험하였던 일정 구속압하에서의 지속시간; 0hr), 과압밀비(2.0), 회전각(최근 응력경로와 현재의 응력경로가 이루는 각으로 반시계 방향을 양으로 정의;  $180^{\circ}$ )등이며 모두 동일하게 적용하였다. 여기서, 응력경로 회전각을  $180^{\circ}$ 로 선정할 이유는 회전각이  $180^{\circ}$ 일 때 응력-변형을 곡선의 기울기로 정의되는 강성(stiffness)의 변화가 가장 크게 나타나기 때문이다.

표 2. 재하속도 영향 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: Recent stress path Dotted line: Current stress path
			15	
			20	

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 재하속도 이력에 따른 응력-변형-변형률 속도

서로 다른 재하속도 이력에 대하여 동일한 재하속도의 현 응력경로에서 보이는 응력-변형-변형률 속도 특성을 그림 1과 그림 2에 제시하였다. 그림 1의 경우 동일한 재하속도의 현 응력경로 실험임에도 불구하고 재하속도 이력에 따라 서로 다른 응력-변형 거동을 보이고 있다. 즉, 동일한 축차응력에서 재하속도 이력이 증가할수록 변형률이 작게 발생함을 알 수 있었다. 그러나 축차변형률에 따른 체적변형 특성을 나타내는 그림 2의 경우 최근 응력경로에서의 재하속도가 가장 느렸던 5kPa/hr에서 가장 큰 체적변형 특성을 보이는 것 외에는 특별한 경향을 찾기가 어려웠다. 그림 3은 재하속도 이력에 따른 축차 응력-축변형률 속도 관계 곡선으로 대체로 재하속도 이력이 감소할수록 축변형률 속도가 증가하는 경향을 보이고 있다. 즉, 재하속도 이력이 5kPa/hr인 경우가 동일한 축차응력에서 가장 큰 축변형률 속도를 나타내었다. 이는 갑작스런 재하속도의 증가와 관련이 있는 것으로 판단된다.

#### 3.2 재하속도 변화에 따른 체적변형 특성

재하속도 이력에 따른 변형 특성을 좀더 자세히 살펴보기 위해서 그림 4와 같이 각 재하속도 이력 실험에서 수행된 하나의 응력경로 사이클을 고려하였다. 그림에서와 같이 경로 AB에서 적용되었던 재하속도를 재하속도 이력이라고 정의하였으며, 이후의 모든 조건은 동일하게 수행되었다. 그림 5는 증가시간에 따른 체적변형 특성으로서 동일한 현 재하속도 즉, 현재의 응력경로(BC)에서 적용된 재하속도가 10kPa/hr로 동일함에도 불구하고 발생한 체적변형량은 재하속도 이력에 따라 다르게 나타났다. 즉, 완속 재하 조건에 해당하는 5kPa/hr의 경우 비교적 큰 체적변형이 발생하였지만, 재하속도 이력이 빠른 경우에 해당하는 15와 25kPa/hr의 경우 미소한 체적변형이 발생하였다. 또한, 재하속도 이력 15와 25kPa/hr를 비교해 볼 때 거의 유사한 체적변화 양상을 나타내는 것을 알 수 있었다. 단지, B2와 B3 그리고 C2와 C3점이 다른 이유는 재하속도 이력을 정의하기 위해서 조절되었던 시간의 차이에 의한 것으로, 최근 응력경로에서는 체적변형률 곡선의 기울기(체적변형률 속도)가 다르게 나타났고 현 응력경로 이후의 기울기는 거의 동일하게 나타난 것으로 보아 본 실험이 유효하며 아울러 배수조건과 관련이 있는 재하속도 이력이 과압밀점토의 응력-변형 거동에 큰 영향을 미칠 수 있음을 확인하였다.

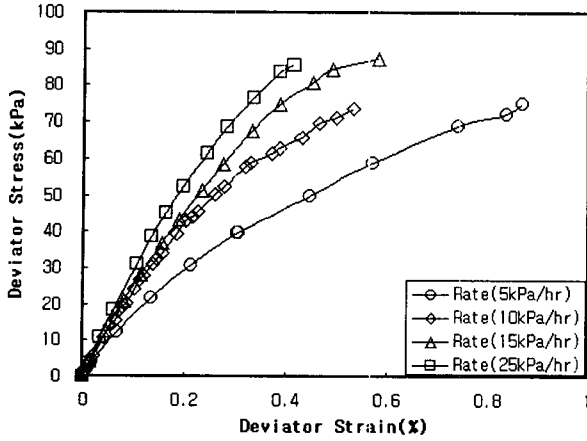


그림 1. 응력-변형률 관계

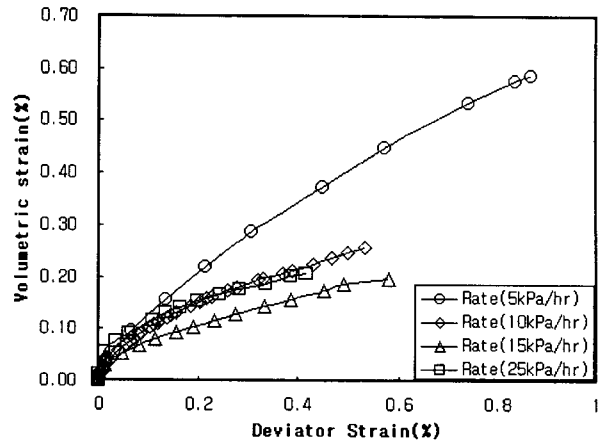


그림 2. 축차변형률-체적변형률 관계

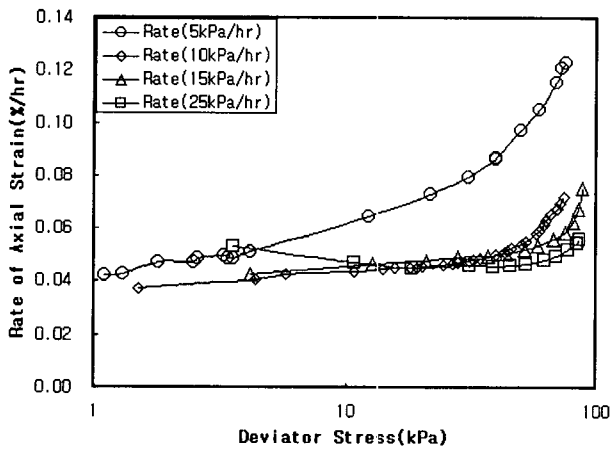


그림 3. 재하속도 이력에 따른 축차응력-축변형률 속도

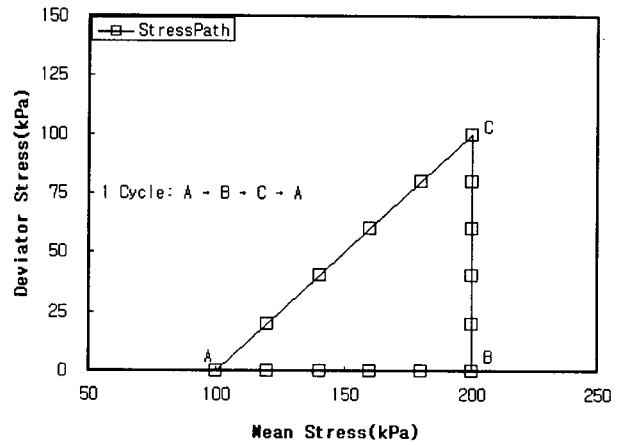


그림 4. 재하속도 이력 실험에서의 응력경로

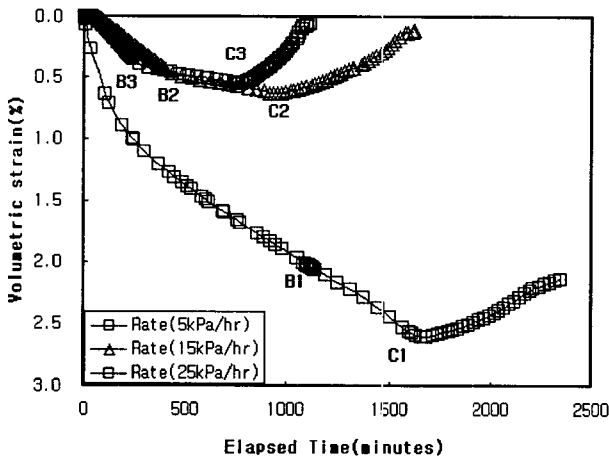


그림 5. 시간에 따른 체적변형률

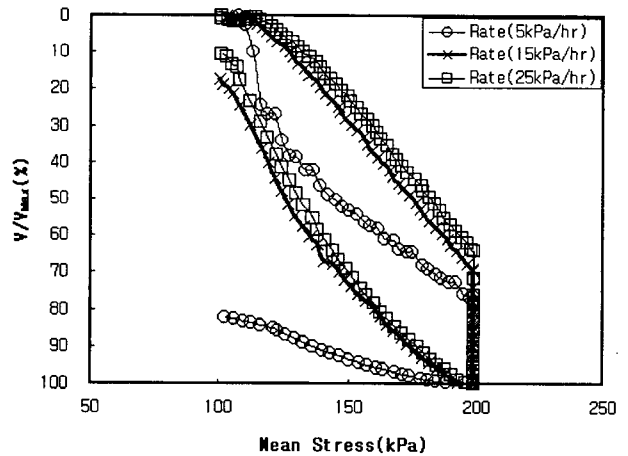


그림 6. 평균 유효응력에 따른 정규화된 체적변형률

그림 6은 이러한 결과를 재확인하기 위해서 체적변형률을 하나의 응력경로 사이클에서 발생된 최대 체적변형률 ( $V_{max}$ ; C1, C2 그리고 C3에서의 체적변형률)로 정규화 하여 도시하였다. 그림에서와 같이 재하속도 이력이 5kPa/hr인 경우와 25kPa/hr인 경우를 비교하면 재하속도 이력에 해당하는 최근 응력경

로에서 각 재하속도에 따른 체적압축 특성에 상당한 차이가 나타나 이후의 팽창 곡선에까지 그 영향을 미치고 있지만, 15kPa/hr와 25kPa/hr의 경우 거의 유사한 경향을 나타내었다. 이로서 재하속도 이력이 흙의 체적압축 및 팽창 특성에 상당한 영향을 미치고 있으며, 재하속도가 느릴수록 체적변화는 크게 발생함을 알 수 있었다.

### 3.3 현 재하속도에 따른 응력-변형-변형률 속도

동일한 이력을 가진 시료에 대해 현 응력경로의 재하속도를 10, 15, 20kPa/hr로 변화시켜서 실시한 순수전단 실험(평균 유효응력=일정)의 결과를 그림 7과 그림 8에 제시하였다. 그림 7에서는 재하 초기부분을 제외하면 모든 재하속도에 대하여 거의 유사한 거동을 보였지만, 체적변형 특성을 나타내는 그림 8에서는 재하속도 10kPa/hr와 15kPa/hr가 재하 초기에 팽창을 보인 후 일정한 체적변형률에서 지속적인 축차변형률이 발생하다가 증가하는 경향을 보였고, 20kPa/hr인 경우 10kPa/hr 그리고 15kPa/hr와 동일한 응력반전(응력경로 회전각=180°)임에도 불구하고 가장 빠른 재하속도로 인하여 재하 초기부터 지속적인 체적압축이 발생하고 있었다. 그림 9는 축차응력에 따른 축변형률 속도를 나타낸 것으로, 현 재하속도가 증가할수록 축변형률 속도 역시 증가하고 있으며, 크리프 곡선에서와 유사하게 나타났던 비선형성(nonlinearity)이 사라지고 있었다.

그림 10에는 재하속도 이력과 현 재하속도에 따른 체적변형률 속도를 나타내었다. 그림에서와 같이 재하속도 변화로 인하여 체적변형률 속도는 최대  $3.42 \times 10^{-5} \%$ /sec에서 최소  $2.43 \times 10^{-6} \%$ /sec까지 변화함을 알 수 있었다.

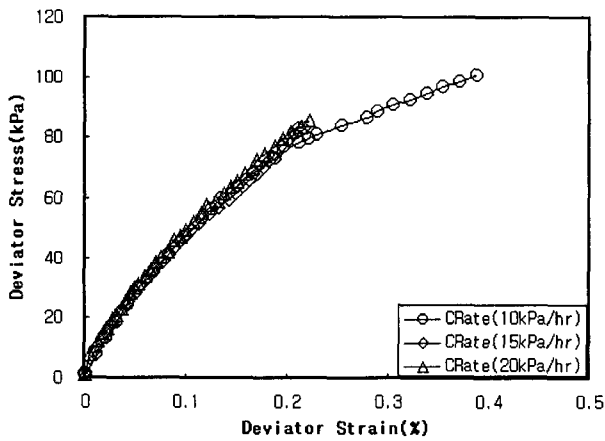


그림 7. 응력-변형률 관계

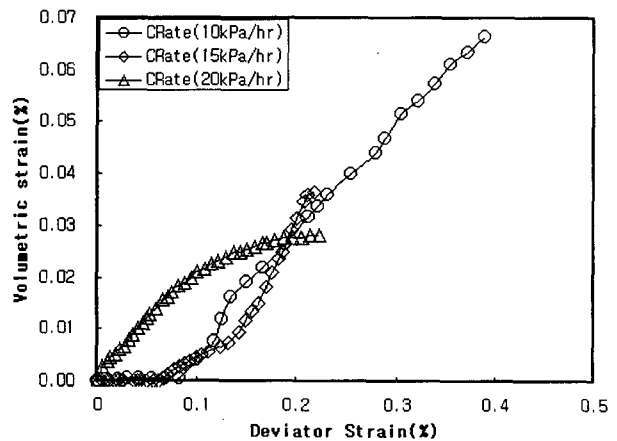


그림 8. 축차변형률-체적변형률 관계

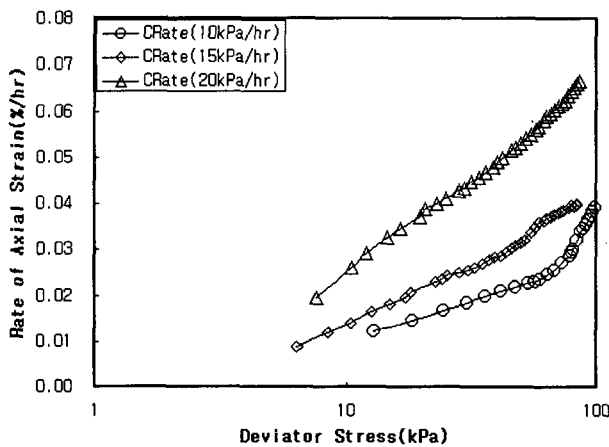


그림 9. 재하속도에 따른 축차응력-축변형률 속도

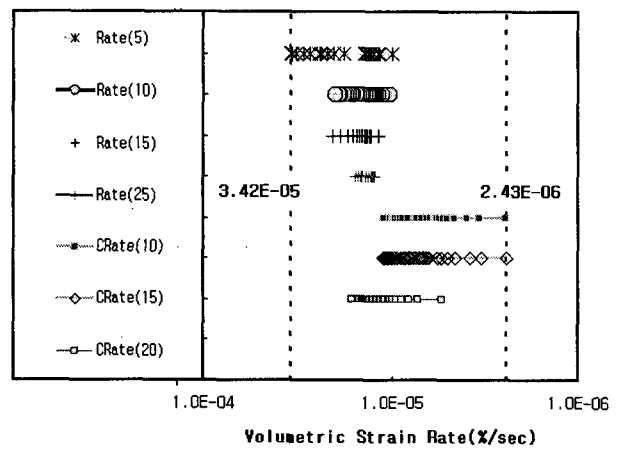


그림 10. 재하속도에 따른 체적변형률 속도

#### 4. 결론

재하속도 이력과 현 재하속도에 따른 과압밀점토의 응력-변형 거동 특성을 규명하고자 수행된 실내 압밀 배수 응력경로 삼축실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 과압밀점토의 응력-변형 거동은 재하속도 이력에 영향을 받아 동일한 축차응력에서 재하속도 이력이 증가할수록 축차변형률과 축변형률 속도는 감소하였다.
2. 현 응력경로에서 적용된 재하속도의 변화는 재하 초기 부분을 제외하면 과압밀점토의 응력-변형 거동에 큰 영향을 미치지 않았다. 그러나 축변형률 속도의 경우 재하속도가 증가할수록 증가하는 경향을 보였다.
3. 응력제어로 수행된 삼축실험에서의 체적변형률 속도는 최대  $3.42 \times 10^{-5} \%/sec$ 에서 최소  $2.43 \times 10^{-6} \%/sec$ 의 범위로 나타났다.

#### 참고문헌

1. Atkinson, J. H. and Salfors, G.(1991). "Experimental determination of soil properties." General Report to Session 1. *Proceedings of the 10th ECSMFE*, Florence 3, 915-956.
2. Georgiannou, V. N., Rampello, S. and Silvestri, F.(1991). "Static and dynamic measurement of undrained stiffness of natural overconsolidated clays. *Proceedings of the 10th ECSMFE*, Florence 1, 91-96.
3. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R.(1985). "New developments in field and laboratory testing of soils. *Proceedings, 11th ICSMFE*, San Fransicao, Vol. 1, 57-154.
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, 1-60.
5. Sandtucci de Magistris, F., Koseki, J., Amaya, M., Hamaya, S., Sato, T. and Tatsuoka, F.(1999). "A triaxial testing system to evaluate stress-strain behavior of soils for wide range of strain and strain rate." *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 22, No.3, 44-60.
6. Tatsuoka, F. and Shibuya, S.(1992). "Deformation characteristics of soils and rock from field and laboratory tests. Keynote lecture, 9th Asian Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, Bangkok. , 101-190.