

'98 추계학술발표회 논문집  
한국원자력학회

## 벤토나이트-모래 혼합토의 응력-변형률 거동 Stress-Strain Behavior of Bentonite-Sand Mixtures

황신일, 김대홍, 심재구, 최규섭, 김병태

한전 원자력환경기술원  
대전시 유성구 덕진동 150번지

### 요 약

벤토나이트의 혼합비를 10, 15, 20%로 한 벤토나이트-모래 혼합토의 시료들에 대하여 삼축실험기를 사용하여 비배수 상태에서 실내시험을 수행하여 파괴전과 파괴상태시의 응력-변형률 거동을 조사하였다. 슬러리 상태로 제작한 혼합토 시료들을 400kPa의 유효 구속압력까지 등방압밀시킨후 압밀하중을 감소시키며 구속압이 400, 200, 100, 33kPa인 경우에 비배수 상태로 삼축압축 및 삼축인장시험을 하였다. 본 실험결과 과압밀비나 응력경로는 달라도 극한상태인 파괴상태에 도달하였고 압축의 경우 한계상태정수  $M=1.4-1.3$ 으로 나타났다. 정규압밀된 경우 벤토나이트 혼합비가 20% 시료에서는 전단하에서 양의 간극수압 증가로 인해  $p'$ 이 계속 감소하여 점성토의 거동특성을 보였지만 15%와 10% 시료에서는 전단초기에는 체적감소현상이 발생하다가 실트나 사질토에서 나타나는 상태변형선을 지나서는 체적팽창현상을 나타냈다.

### Abstract

The undrained stress-strain behavior of bentonite-sand mixtures with bentonite's ratio of 10, 15, and 20% was investigated by using an automated triaxial testing device in a laboratory at the pre- and post-failure states. The mixture samples prepared in states of slurry were normally consolidated upto 400 kPa of effective mean confining pressure and unloaded to 200, 100, and 33 kPa, respectively. And then the undrained triaxial compression and extension tests were performed. According to experimental results, the test samples approached to ultimate failure lines even the overconsolidation ratios and stress paths were different and it was shown that the critical state parameter  $M=1.4-1.3$  in case of compression. In case of normally consolidated samples, the sample of bentonite's ratio of 20% showed the behavior characteristics of clay in shear, continuously decreasing  $p'$  because of build-up of positive pore water pressures. Meanwhile the samples of bentonite's ratio of 15% and 10% showed the volume decreasing tendency in early stages of shear but, after crossing the phase transformation line, showed the volume dilation tendency which is seen in silt and sand.

## 1. 서 론

중저준위 방사성폐기물 처분시설에는 지하수 및 핵종의 이동을 억제하기 위해 투수성이 매우 낮은 재료로 뒷채움을 하거나 인공방벽을 설치한다. 이 재료로서는 기존 재료와의 적합성을 고려할 때 자연의 지반재료를 사용하는 것이 바람직하고 외국의 경우 벤토나이트가 많이 활용되고 있다. 본 연구에서는 인공방벽 재료로서 사용가능성이 높은 벤토나이트-모래 혼합토에 대하여 응력-변형률 거동특성을 규명하여 일차적으로는 점토질 흙에 대해 널리 사용되는 한계상태 이론모델의 타당성을 검증하고 추후 새로운 재료모델을 정립하기 위한 토대를 마련하는데 목적을 두었다.

## 2. 실 험

### 2-1. 시료

본 실험에서 사용된 혼합토 시료는 벤토나이트와 모래로 구성되었다. 벤토나이트는 한국 아이엠(주)에서 생산되는 활성 벤토나이트인 Tixoton 분말이고 모래는 주문진 표준사(KS L 5100) 중 압축강도 시험용이다. 모래는 체분석 결과 중간에서 세립의 모래에 속하고 유효입경은 0.33mm, 균등계수는 1.5, 곡률계수는 1.0, 비중은 2.63으로 측정되었다. 벤토나이트는 통일분류상 CH에 속하는 점토로 액성한계는 292%, 소성한계는 50%, 비중은 2.67로 측정되었다.

혼합토 시료는 벤토나이트와 모래를 중량비로 10:90, 15:85, 20:80의 비율로 혼합한 후 증류수를 첨가하여 슬러리로 만들어 포화시켰으며 각각 길이 45cm, 폭 35cm, 높이 22cm의 상자에 넣고 배수를 허용하면서 상재압을 가하여 10일 이상 압밀시켜 시료의 성형이 가능하게 되었을 때 지름 3.5cm, 길이 7cm 크기의 원통형 공시체들을 성형하여 실험을 하였다.

### 2-2. 실험방법

성형된 각 공시체들은 자동화된 삼축실험기를 사용하여 유효구속압력을 점진적으로 50, 100, 200, 400kPa로 증가시키며 등방압밀시켰고 각 구속압력 단계에서 일정한 시간동안 체적 변화가 없을 때 압밀이 종료되었다고 보았다. 그후에는 압밀압력을 서서히 감소시켜 과압밀비 1, 2, 4, 12인 시료를 만들어 각각 400, 200, 100, 33kPa의 초기 유효구속압을 갖도록 하였다. 전단실험은 각각의 초기 유효구속압을 갖는 상태에서부터 비배수 상태로 실시하였으며 분당 0.05%의 변형률속도로 변형률 제어실험을 하였고 구속압을 일정하게 유지시키며 압축실험인 경우는 축방향 응력( $\sigma_1$ )을 증가시켜 25-30%의 축변형률까지, 인장실험인 경우는  $\sigma_1$ 을 감소시켜 약 15%의 축변형률 까지 실험하였다. 벤토나이트의 혼합비가 10, 15, 20%인 각 시료들에 대한 삼축실험 수행시의 조건은 표 1과 같다. 표 1에서  $\lambda$ 는  $v - \ln p'$  공간에서 정규압밀선의 경사이고  $\kappa$ 는 과압밀 단계에서의 팽창선의 경사로서 정규압밀 시료에 대해서는  $\lambda$ 만을, 과압밀 시료에 대해서는  $\kappa$ 만을 표시하였다.

## 3. 결과 및 분석

본 연구에서 수행한 삼축압축 및 삼축인장실험의 결과는 표 2에 제시되었다. 표 2의 기호들에서  $q_f$ 는 파괴시 축차응력,  $A_f$ 는 전단 파괴시 간극압계수,  $S_u$ 는 비배수 강도이고  $M$ 은 한계상태 응력비로써  $q-p'$  공간에서 한계상태선의 경사이다.

표 1. 삼축압축 및 삼축인장실험 조건

하중종류	벤토나이트 혼합비(%)	초기 유효 구속압(kPa)	과압밀비 (OCR)	공시체번호	초기간극비	$\lambda$ 또는 $\kappa$	
압축	10	400	1	sb103	0.882	0.046	
		200	2	sb102	0.820	0.015	
		100	4	sb1032	0.991	0.012	
		33	12	sb104	0.897	0.010	
	15	400	1	sb1501	0.747	0.157	
		200	2	sb152	0.708	0.006	
		100	4	sb153	0.852	0.010	
		33	12	sb154	0.881	0.008	
	20	400	1	sb201	0.925	0.513	
		100	4	sb203	1.098	0.007	
	인장	10	400	1	sb10E1	0.751	0.045
			33	12	sb10E3	0.926	0.011
15		100	4	sb15E2	0.846	0.010	
20		400	1	sb20E1	1.248	0.244	
		100	4	sb20E2	1.219	0.015	

표 2. 삼축압축 및 삼축인장실험 결과

공시체번호	과압밀비	$q_f$ (kPa)	$\epsilon_f$ (%)	$S_u/\sigma_{3c}'$	$A_f$	$\varphi'$ ( $^\circ$ )
sb103	1	196	12.0	0.25	1.72	37.5
sb102	2	264	9.0	0.66	0.46	38.9
sb1032	4	170	9.6	0.84	0.22	35.0
sb104	12	168	7.9	2.54	-0.13	36.9
sb1501	1	218	17.7	0.27	1.46	34.8
sb152	2	209	19.7	0.52	0.64	37.6
sb153	4	188	19.0	0.93	0.18	35.7
sb154	12	157	17.5	2.31	-0.08	39.7
sb201	1	149	4.5	0.19	1.79	20.8
sb203	4	121	12.1	0.60	0.27	28.3
sb10E1	1	-200	-6.5	-0.25	-1.27	-
sb10E3	12	-117	-3.6	-1.72	0.34	-
sb15E2	4	-159	-9.9	-0.80	0.30	-
sb20E1	1	-197	-9.7	-0.25	-0.80	-
sb20E2	4	-136	-8.5	-0.67	0.68	-

### 3-1. 축차응력과 축변형률의 관계

삼축압축실험 결과로부터의 벤토나이트 10%, 15%, 20% 혼합토 시료에 대한 축차 응력-축변형률 곡선은 그림 1에, 삼축인장실험의 곡선은 그림2에 제시되었다. 벤토나이트 함량이 많아질수록 또한 과압밀비가 증가할수록 전단강도가 저하되는 것을 알 수 있다. 벤토나이트 혼합비 10%의 정규압밀 시료에서는 사질토에서처럼 초기에 피크를 나타낸 후 서서히 증가하는 양상을 보이는 반면에 혼합비 20%의 과압밀 시료에서는 초기에 최대값에 도달한후 계속 서서히 증가하는 것을 보여주는데 이로부터 벤토나이트 함량이 증가함에 따라 점차 점토의 특성으로 변화되는 것을 알 수 있다.

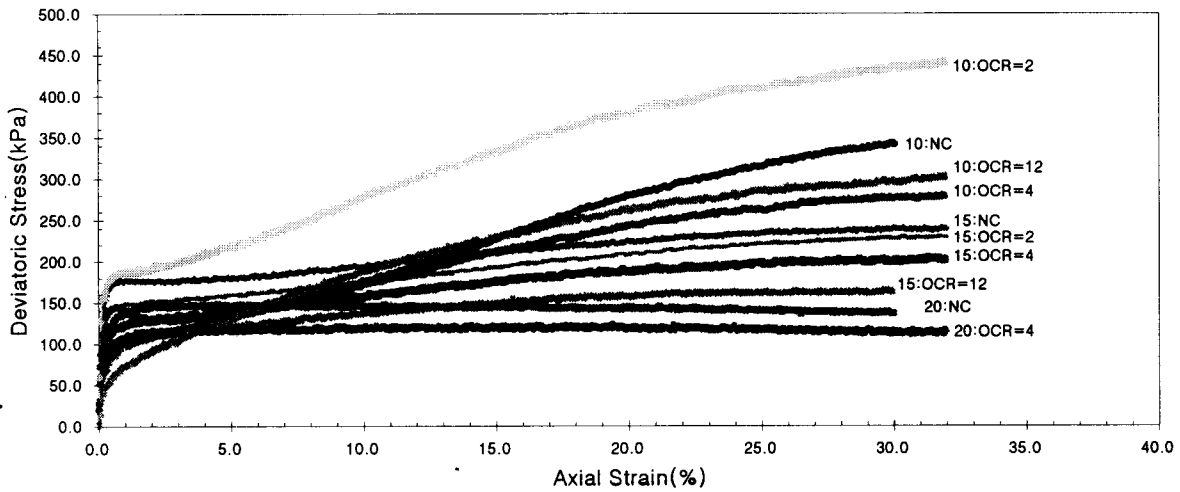


그림 1. 삼축압축실험에 의한 응력-변형률 곡선

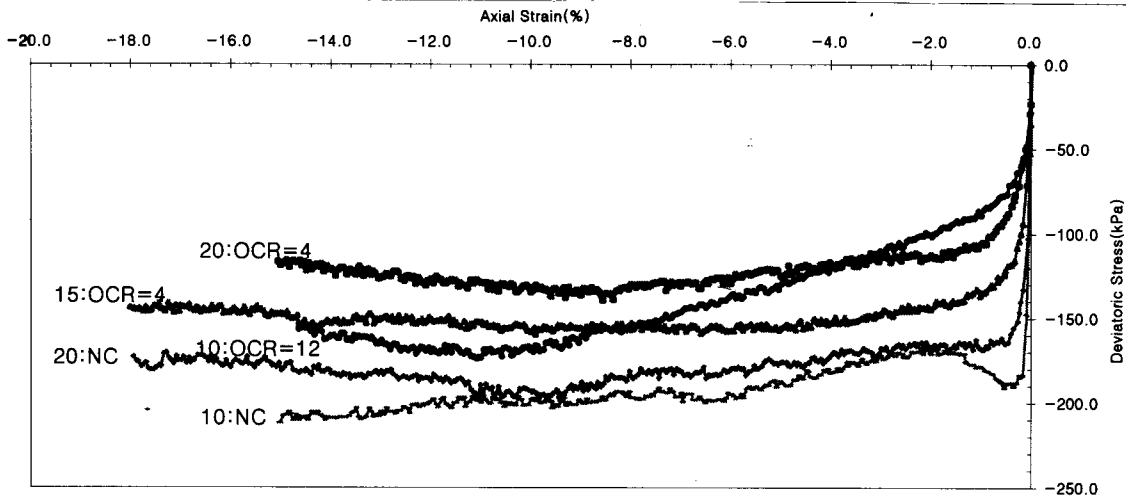


그림 2. 삼축인장실험에 의한 응력-변형률 곡선

### 3-2. 등방압밀 곡선과 팽창곡선

슬러리 상태로 성형한 시료에 대해 유효구속압( $p'$ )을 100, 200, 400kPa로 증가하며

등방압밀시킨 다음 각 시료의 과압밀비에 따라 팽창시킨 경우의 유효구속응력과 비체적( $v$ )과의 관계를 벤토나이트 혼합비 10%의 과압밀비=12인 시료에 대해서만 그림 3의  $\ln p'-v$  공간에 제시하였다. 그림으로부터 회귀분석한 등방정규압밀선(iso-ncl)의 식은  $v = 2.123 - 0.042 \ln p'$ 이고 팽창선(sl)의 식은  $v = 1.932 - 0.010 \ln p'$ 이다. 여기서  $\lambda=0.042$ ,  $\kappa=0.01$  이다. 나머지 시료에 대해서도 같은 방법으로 구한 한계상태정수  $\lambda$ ,  $\kappa$ 의 값이 표 1에 제시되어있다.

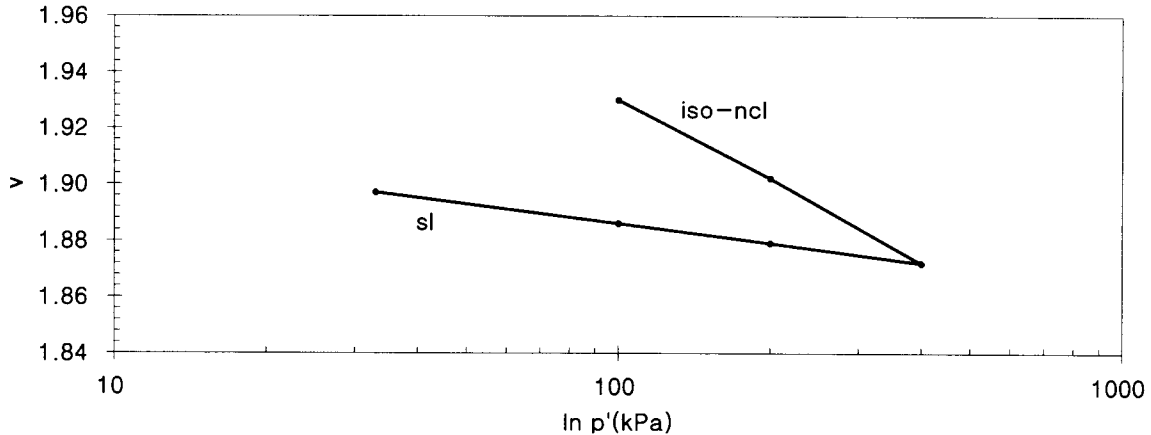


그림 3. 등방정규압밀 및 팽창선(sb104 시료)

### 3-3. $p'-q$ 관계

전단시의 유효응력경로는  $p'-q$  공간에 표시되는데 본 연구에서의 삼축압축실험으로부터의 응력경로가 그림 4에 제시되었고, 벤토나이트 혼합비 10%인 시료들에 대한 삼축압축 및 삼축인장 실험으로부터의 응력경로가 그림 5에 제시되었다. 그림 4와 5에서 나타나듯이 정규압밀 시료와 과압밀 시료는 서로 다른 응력경로를 보이지만 응력경로의 최종 점은 하나의 직선으로 수렴하고 있음을 알 수 있다. 한계상태 이론에서는 이 직선을 한계상태선(Critical State Line)이라 하고  $q=Mp'$ 으로 표현하는데 본 실험에서 사용된 벤토나이트-모래 혼합토의 한계상태정수  $M$ 의 값은 삼축압축의 경우 1.4-1.3을 얻을 수 있었으나 삼축인장의 경우는 실험 데이터의 부족으로 구하지 않았다.

### 3-4. 벤토나이트 함량에 따른 거동변화

각 벤토나이트 혼합비에 따른 거동을 살펴보기 위하여 그림 6에서는 삼축압축실험에 대하여 정규압밀 시료의  $p'-q$  응력경로를 초기응력으로 정규화시켜 나타내었다. 벤토나이트 혼합비가 20%인 시료는 낮은 응력비에서 파괴가 일어나고 모래의 함량이 많아질수록 상대적으로 큰 응력비에서 파괴가 일어나며 그후에도 응력증가가 계속 발생하였다. 또한 실트질 흙이나 사질토에서 나타나는 상태변형선(Phase Transformation Line)은 벤토나이트 혼합비가 20%인 시료의 경우에는 나타나지 않고 15% 이하인 시료의 경우에서만 나타났는데 이로부터 벤토나이트 혼합비가 20%인 경우는 점성토의 특성을 나타내고 15% 이하인 경우에는 사질토의 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

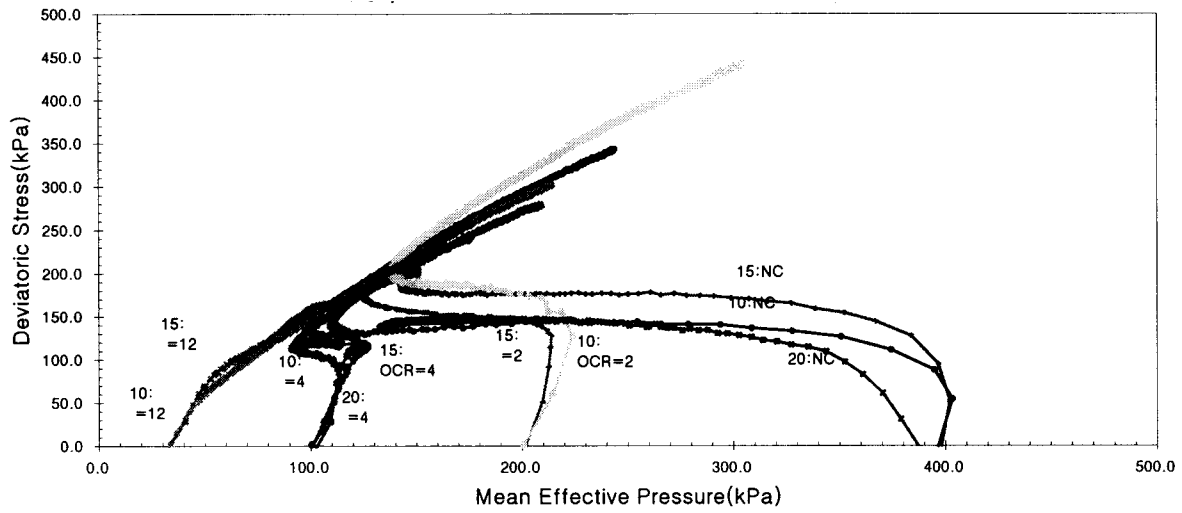


그림 4. 삼축압축실험에 의한  $p' - q$  응력경로

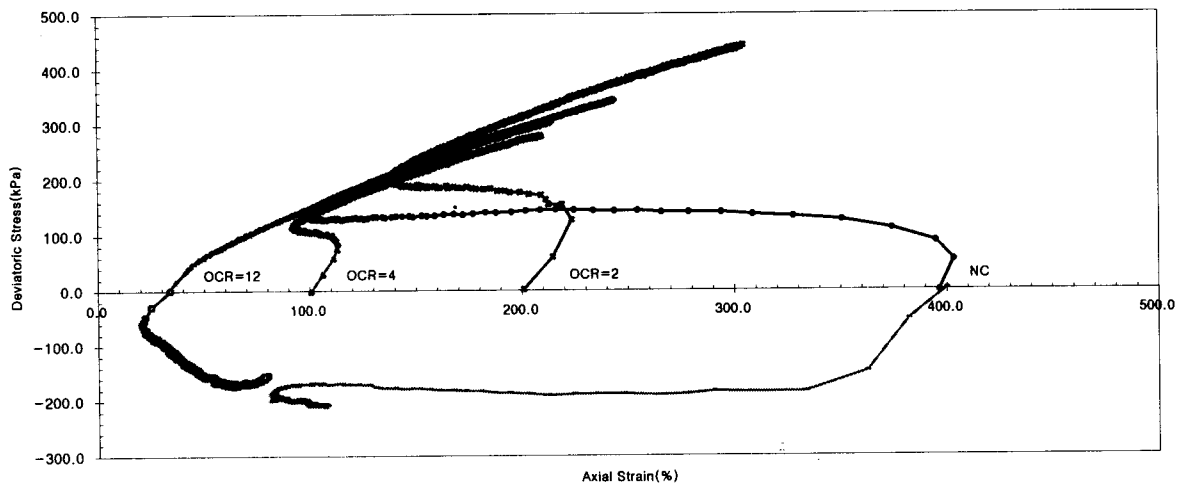


그림 5. 벤토나이트 10% 시료의  $p' - q$  응력경로

#### 4. 결 론

본 연구에서는 벤토나이트 혼합비가 10, 15, 20%인 벤토나이트-모래 혼합토의 응력-변형률 거동을 살펴보았다. 삼축압축 및 삼축인장실험의 결과 과압밀비나 응력경로는 달라도 극한상태인 파괴상태에 도달하였고 압축의 경우  $M=1.4-1.3$ 으로 나타났다. 정규압밀된 경우 벤토나이트 혼합비가 10%와 15%인 시료에서는 전단초기 체적감소현상이 발생하다가 실트나 사질토에서 나타나는 상태변형선을 지나 체적증가현상을 보였지만 혼합비가 20%인 시료에서는 상태변형을 보이지 않는 점성토의 특성을 나타내었다.

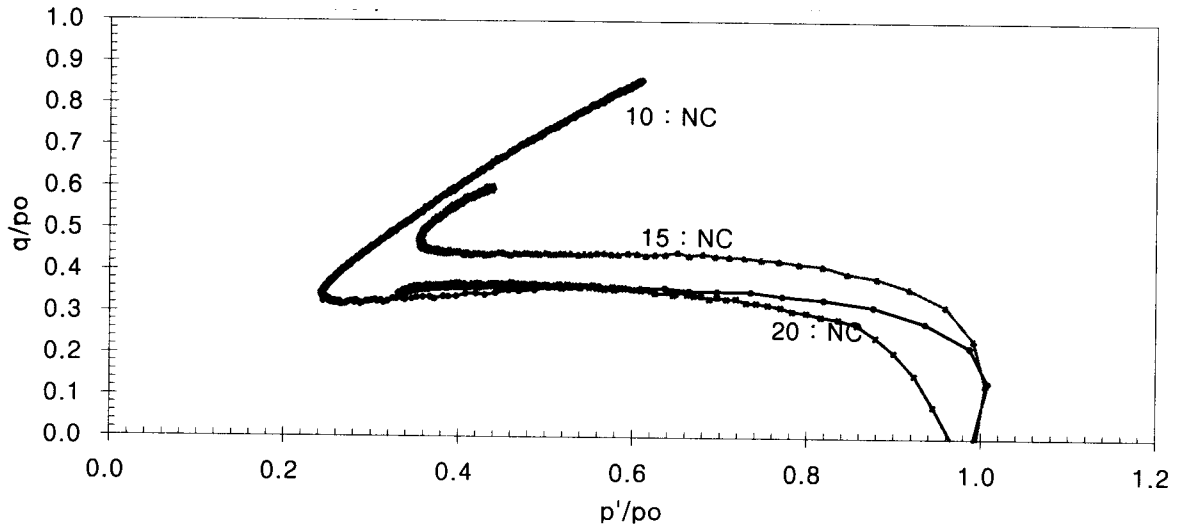


그림 6. 정규압밀 시료의  $p'/p_0 - q/p_0$  응력경로(삼축압축)

#### 참고문헌

1. A. M. Britto and M. J. Gunn, "Critical State Soil Mechanics via Finite Elements", Ellis Horwood Limited, pp.161-184 (1987).
2. J. H. Atkinson and P. L. Bransby, "The Mechanics of Soils. An Introduction to Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill, pp.150-212 (1978).
3. B. M. Das, "Advanced Soil Mechanics", McGraw-Hill, pp.402-499 (1983).
4. D. M. Wood, "Soil Behaviour and Critical State Soil Mechanics", Cambridge, pp.1-274 (1990).
5. A. N. Schofield and C. P. Wroth, "Critical State Soil Mechanics", McGraw-Hill, pp.134-164 (1968).
6. 정상섭, "사질토 및 점성토와 비교한 순수실트의 응력-변형률 거동", 한국지반공학회지, 제9권, 제4호, 한국지반공학회, pp.27-35 (1993).