한국지반공학회논문집 제22권 10호 2006년 10월 pp. 151 ~ 163

낙동강 모래의 비배수 정적 및 반복 전단거동 상호관계 분석

Analysis of Interrelationship between Undrained Static and Cyclic Shear Behavior for Nak-Dong River Sand

김 대 만[1] Kim, Dae-Man
김 병 탁[2] Kim, Byung-Tak

Abstract

This paper presents the interrelationship between undrained static and cyclic shear behavior. Laboratory works were performed through the undrained static and cyclic triaxial test using Nak-Dong River sand. And static triaxial test involved the triaxial extension test for comparison with cyclic shear behavior. Cyclic triaxial test was performed with a variety of combination conditions of initial static shear stress (q_{st}) and cyclic stress (q_{cy}). In this result, the stress path of cyclic shear behavior was correspondent with static shear behavior passing the critical stress ratio (CSR) line because of the development of flow deformation. After that, a failure occurred according to failure line (FL) of static shear behavior. The stress path of cyclic shear behavior showed essentially the same with static shear behavior, although it appears a little different in test method.

요 지

본 논문에서는 모래의 비배수 정적전단거동과 반복전단거동의 상호관계를 분석하기 위하여 낙동강 모래를 사용하여 비배수 정적 및 반복삼축시험을 실시하였다. 정적삼축시험은 반복전단거동과의 상호비교를 위하여 인장시험을 포함하여 실시하였다. 그리고 반복삼축시험은 초기정적전단응력(q_{st})과 반복응력(q_{cy}) 조건을 조합하여 여러 응력조건하에서 실시하였다. 시험결과 반복전단거동의 응력경로는 정적전단거동의 한계응력비(CSR) 선을 지나면서 유동변형이 발생하여 정적전단거동과 일치하였으며, 그 후 정적전단거동의 파괴선(FL)을 따라 파괴가 발생하였다. 이러한 반복전단거동의 응력경로는 시험방법이 다름에 따른 약간의 차이는 있으나 정적전단거동의 응력경로와 본질적으로 동일함을 알 수 있었다.

Keywords : Critical stress ratio, Cyclic triaxial test, Liquefaction, Nak-Dong River sand

1. 서 론

아르메니아 지진(1988, 규모 6.8), 캘리포니아 로마프리에타 지진(1989, 규모 7.1), 일본 고베 지진(1995, 규모 7.2), 터키 이즈미트 지진(1999, 규모 7.8), 인도 구자라트 지진(2001, 규모 7.9) 등 최근 세계 곳곳에서 강진이 빈번이 발생하고 있으며, 지난 5월에는 인도네시아 자바섬 족자카르타 부근에서 지진규모 6.3의 강진이 발생하여 많은 인명피해가 발생하였다. 이와 같이 지진에 의한 피해는 상상을 초월하며, 한반도에서만 1998년

1 정회원, 진주산업대학교 토목공학과 겸임교수 (Member, Lecturer, Jinju National Univ., ksmans11@hanmail.net, 교신저자)
2 정회원, GS건설 토목TK설계팀 과장 (Member, Manager, Civil Design-Build Team, GS Engrg. & Construction Corp.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

32회, 1999년 37회, 2000년 28회 등의 지진이 발생하였다. 올해 들어서는 울진군 동쪽 해역에서 무려 5차례의 리히터 규모 2.1~2.5의 지진이 발생하는 등 10차례나 지진이 발생되어 우리나라가 더 이상 지진 안전지대가 아님이 입증되고 있다.

지진에 대한 피해를 최소화하기 위하여 현재 국내외적으로 지진에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, 본 논문에서는 이러한 연구의 일환으로 지진 등의 반복하중에 의한 모래지반의 액상화 현상을 정적하중에 의한 것과 상호연관성을 규명해 보기 위하여 일련의 정적 및 반복삼축시험을 실시하였다. 이러한 일련의 정적 및 반복삼축시험을 통하여 규명된 상호연관성을 바탕으로 하여 모래지반의 정적삼축시험을 통하여 그 지반의 반복거동의 특성을 대략적으로 예측할 수 있을 것으로 사료된다. 시험에 사용된 모래는 낙동강 중류지역의 모래로 상대밀도, 이방압밀비를 달리하였으며, 정적삼축시험에서는 반복삼축시험 결과와의 비교분석을 위하여 삼축인장시험을 포함하였고, 반복삼축시험에서는 다양한 초기 정적전단응력과 반복하중을 조합하여 실시하였다.

2. 이론적 배경

Hanzawa et al.(1979), Vaid & Chern(1983), 그리고 최근의 많은 연구에서 유동액상화 발생시의 유효응력조건을 나타내는 점들은 응력경로의 원점을 통과하는 하나의 직선임을 발견했는데, 이러한 점은 응력경로공간에서 유동액상화면(flow liquefaction surface, FLS)으로 정의하며, 이러한 면은 비배수전단에서의 안정과 불안정상태 사이의 경계를 의미하는 것으로 FLS는 유동액상화가 시작되는 조건을 나타낸다.

또한 Vaid & Chern(1985)은 비배수 삼축시험을 통해 포화 모래의 응력상태 범위에서 연화거동을 관찰하였다. 모든 경우에 있어서 연화거동의 시작은 한계간극비로 정의한 위치에서 시작되고, 이때의 응력비를 한계응력비(critical stress ratio, CSR)라 하며, 이는 응력경로 공간상에서 원점을 통과하는 직선으로 표현되고, 이 선을 한계응력비선(CSR line)이라 한다. 그리고 CSR선은 3차원 공간에서는 FLS를 형성한다. 따라서 CSR선은 연화거동의 시작점으로 표시되고 상전이선(PTL)에 상응하는 유효응력비에 도달할 때까지 계속된다. 상전이점은 압축에서 팽창으로 변하는 시점 즉, 과잉간극수압이 감소하는 순간을 상전이점이라 하고, 상전이점은 원점을 통과하는 직선으로 표현되는데, 이를 상전이선(PTL)이라 한다. PTL에 상응하는 유효응력비를 지난 후 흙은 더 많은 변형과 함께 파괴선(failure line, FL)에 이르게 된다.

그림 1은 상대밀도를 달리하여 동일 시료를 같은 구속압 하에서 등방압밀된 시료의 FL, PTL, CRS선을 나타낸 것으로 초기에 과잉간극수압의 급속한 증가로 응력경로의 좌측으로 이동하고 그 후 연화거동의 시작점인 CSR선에 이른다. CSR선을 지나 연화현상이 나타난 후 팽창거동을 시작하면서 응력경로의 전환점인 PTL에 도달하게 되는데, PTL을 지나면 시료는 곧 팽창거동을 하며 FL을 따라 거슬러 올라가게 된다. 여기서, 상전이점에서의 강도를 S_{PT}, CSR점에서의 강도를 S_{CSR}로 정의한다. 이러한 거동의 차이는 시료의 초기상태 즉, 상대밀도와 구속압, 전단응력 그리고 하중재하방법 등에 따라서 결정된다. Castro(1969), Seed(1979)는 type 1과 같은 느슨한 시료에서의 응력 연화현상을 액상화로 정의하였고, Vaid & Chern(1985)은 진액상화(true liquefaction)라고 하였다. 이러한 거동의 특성은 일정한 전단응력과 간극비에서 변형이 계속해서 발생하는 것으로 느슨한 상태에서는 변형률 연화현상에 의해 유동액상화의 경향을 보인다. Type 2는 상대밀도가 중간정도의 시료에서 발생되는 변형률 연화현상을 나타내며 이를 Castro(1969)는 제한적 액상화(limited liquefaction)라고 하였다. Type 3은 조밀한 모래에 해당하고 Vaid & Chern(1985), Vaid & Thomas(1995)는 이 상태에서 모래는 많은 양의 부(-)의 간극수압을 발생시키고, 구속압이 커질수록 보다 압축하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

그림 2는 동일한 응력조건에서 이방압밀된 후 각각 정적, 반복전단응력을 받는 두 개의 느슨하고 포화된 모

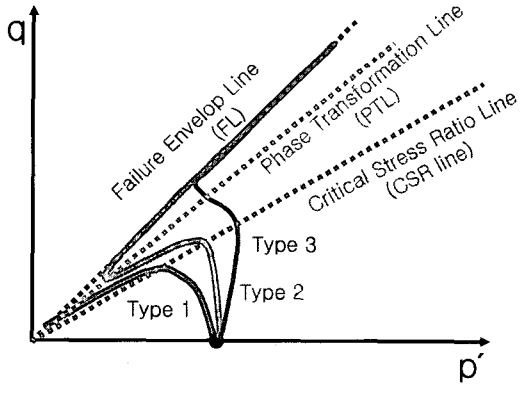


그림 1. 응력경로 상의 FL, PTL, CSR선(Vaid & Chern, 1985)

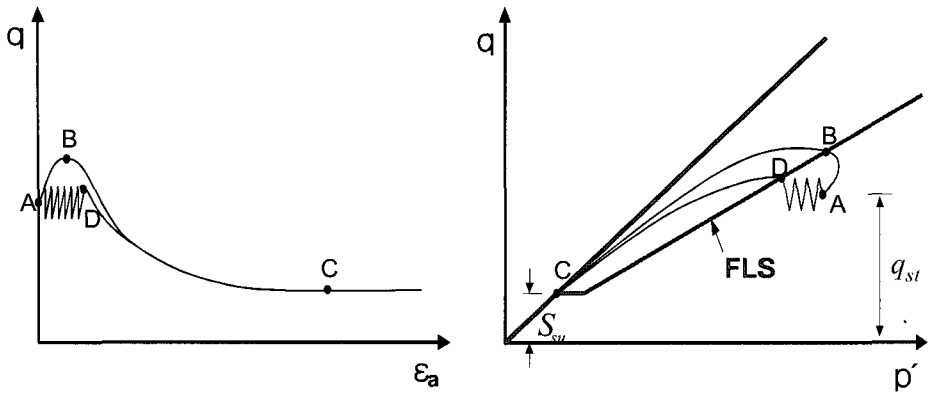
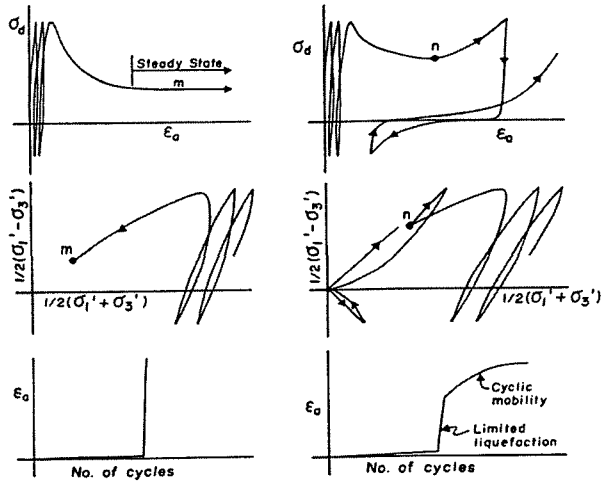


그림 2. 정적하중 및 반복응력에 의한 유동액상화의 발생(Kramer, 1996)

래의 거동을 나타냈다. 초기에 시료는 정상상태강도(S_{su})보다 큰 정적전단응력(q_{st})을 받는 배수 평형상태(A점)에 있다. 시료는 비배수 조건에서 정적응력을 받으면 응력경로가 FLS(B점)에 도달할 때 전단저항은 첨두값을 나타내고 곧 불안정하게 되어 정상상태점(C점)으로 급속히 변형한다. 반복응력을 받는 시료는 유효응력경로에서 정(+)의 과잉간극수압이 전개됨에 따라 왼쪽으로 움직이고 영구 변형률이 축적된다. 유효응력경로가 FLS에 도달할 때(D점) 시료는 변형의 정상상태점(C점)으로 급속히 변형되어 불안정한 상태가 된다. 비록 액상화 발생시의 유효응력조건은 다르지만, 두 경우 모두 FLS위에 놓이게 된다. 따라서 FLS는 유동액상화를 발생시키는 불안정상태의 시작을 의미한다.

Castro et al.(1982), Chern(1985)도 또한 모래 지반의 정적거동과 반복거동의 유사함을 밝혔는데, 그림 3은 반복응력에 의한 유동액상화와 제한적 액상화를 비교하여 나타낸 것이다. Vaid & Chern(1985)은 정적전단시험에서 나타나는 CSR에서 반복전단시험의 응력 연화현상이 시작되는 것을 발견하였다. m과 n점은 정적전단시험에서의 정상상태에 해당되며, 포화된 모래의 비배수 반복응력 상태에서의 거동은 상대밀도, 구속압, 반복축차응력(q_{cy})의 크기 등이 중요한 요소로 응력경로에 큰 영향을 미친다.



(a) 유동액상화 (b) 제한적 액상화

그림 3. 동적거동의 일반적인 응력경로(Vaid & Chern, 1985)

3. 시험내용 및 방법

3.1 시료특성

본 연구에서는 낙동강 중류 지역의 모래를 채취한 후 균질한 모래에 대한 시험을 위하여 #20체~#200체 사

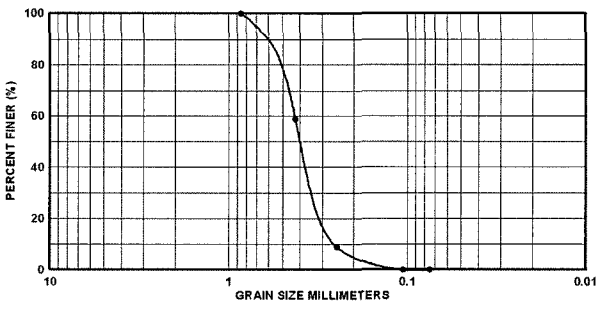


그림 4. 낙동강 모래의 입도분포 곡선

표 1. 낙동강 모래의 물성치

G_s	D_{50}(mm)	D_{10}(mm)	C_u	C_c	e_{max}	e_{min}	Roundness	USCS
2.676	0.360	0.235	1.700	1.230	1.137	0.765	Subangular or Subrounded	SP

이의 잔류모래를 흐르는 물에 씻어서 깨끗한 모래로 만들어 시험에 사용하였다. 시료에 대한 기본 물성치의 시험결과는 표 1과 같고, 그림 4는 모래시료의 입도곡선으로 USCS에 의한 분류는 SP로 나타났다.

표 2는 XRF(X-ray fluoroscopy)의 분석결과로 낙동강 모래시료의 주성분으로는 SiO_2(silicon dioxide, 이산화규소)가 72.522%로 가장 많이 함유되어 있으며, 그 외 나머지 성분으로는 Al_2O_3(aluminium oxide, 산화알루미늄)이 14.551%, K_2O(potassium oxide, 산화칼륨) 5.224%, Na_2O(sodium oxide, 산화나트륨) 3.684%, 그리고 Fe_2O_3(ferric oxide, 산화제2철) 2.219% 등의 순으로 함유되어 있다. 사진 1은 낙동강 모래시료에 대한 SEM(Scanning Electron Micrograph) 사진으로 시료입자가 subangular 형태와 subrounded 형태를 동시에 띠고 있는 것을 볼 수 있다.

표 2. XRF 분석결과

Compound	Conc. (%)
Na_2O	3.684
Al_2O_3	14.551
SiO_2	72.522
K_2O	5.224
CaO	1.415
TiO_2	0.323
Fe_2O_3	2.219
SrO	0.062

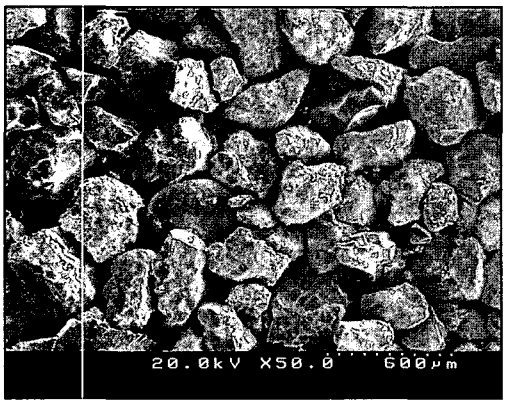


사진 1. 모래시료의 SEM 사진

3.2 시험 방법 및 내용

본 연구에 사용된 삼축시험기는 Clarence K. Chan (C.K.C)이 개발한 자동화 삼축시험기로 정적 및 동적 시험이 모두 가능한 형식이다. 시료의 크기는 직경 70mm, 높이 140mm이고 느슨한 모래의 경우는 초기 상대밀도 30%, 중간 상태인 경우는 50%가 되도록 하여 건조퇴적법(dry deposition method)으로 성형하였다. 시료 성형 후 포화단계에서는 배압(σ_b)을 300kPa까지 서서히 가하여 B value가 0.95 이상이 되도록 포화를 실시하였다.

등방압밀조건에서는 같은 크기의 유효수직응력(σ_{1c}')과 유효수평응력(σ_{3c}')을 가하여 압밀을 실시하였으나, 이방압밀조건에서는 표 3과 같이 σ_3'을 점차적으로 86kPa과 75kPa로 증가시키는 동안 $q_s'(=\sigma'_{1c}-\sigma'_{3c})$값도 점차적으로 각각 43kPa, 75kPa만큼 증가시켜 최종적으로 이방압밀비($K_c=\sigma_{1c}'/\sigma_{3c}'$)의 값이 1.5, 2.0가 되도록 하여 이방압밀을 실시하였으며, 모든 조건에서의 압밀시간은

표 3. 압밀응력 조건

K_c	σ_{3c}(kPa)	σ_{1c}(kPa)	σ_b(kPa)	σ_{3c}'(kPa)	σ_{1c}'(kPa)	q_{st}(kPa)
1.0	400	400	300	100	100	0
1.5	386	429	300	86	129	43
2.0	375	450	300	75	150	75

표 4. 정적삼축시험 조건

Sample state	K_c	q_{st}(kPa)	p'(kPa)	Consolidation time (min.)	Mode
Loose sand (Dr=34%) And Medium sand (Dr=56%)	1.0	0	50	10	Compression
			100	10	
			200	10	
	1.5	43	100	10	
	2.0	75	100	10	
	1.0	0	50	10	Extension
			100		
			200		

10분으로 하였다. 이때 모든 압밀응력비에서 평균유효주응력, $p_c' = (\sigma'_{1c} + 2\sigma'_{3c})/3$은 100kPa로 일정하게 하였고, 압밀 후의 상대밀도는 K_c값에 상관없이 느슨한 시료의 경우는 34%, 중간 조밀한 시료는 56% 정도로 나타났다.

압밀이 완료된 시료는 변형률 속도 0.1%/min의 변형률 제어에 의한 비배수 정적삼축시험과 0.1Hz 주기의 정현(sine)파 반복응력을 이용한 응력 제어의 비배수 반복삼축시험을 각각 실시하였다.

표 4와 5는 본 연구에서 실시된 정적 및 반복삼축시험의 조건을 나타낸 것이다.

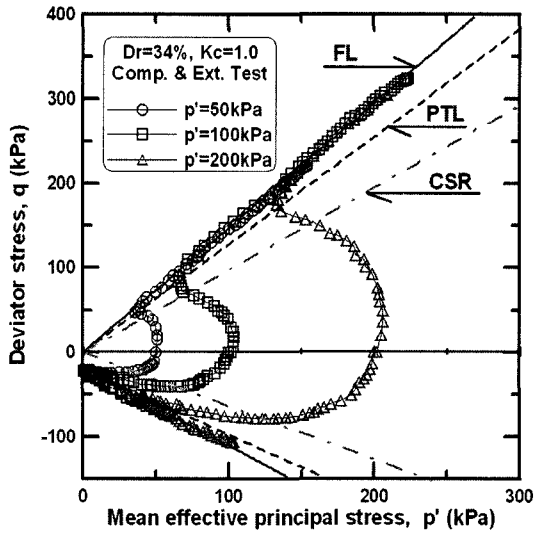
4. 결과 분석

4.1 비배수 정적전단거동

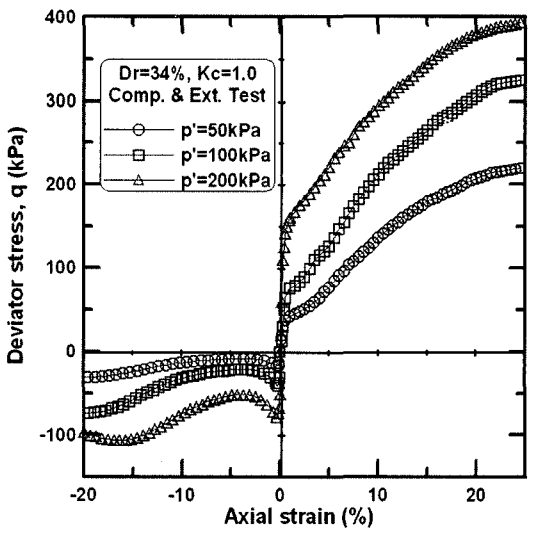
그림 5는 느슨한 모래시료에 구속압 50, 100, 200kPa에서의 전단에 따른 압축과 인장시험을 통하여 구하여진 응력경로와 축변형률-축차응력을 나타낸 것이다. 시료는 초기에 과잉간극수압의 급속한 증가로 응력경로의 좌측으로 이동하고 그 후 연화거동의 시작점인 한계응력비에 이른다. 압축시험의 응력-변형률 곡선의 경우 세 가지 구

표 5. 반복전단시험 조건

Sample state	K_c	q_{st} (kPa)	q_{cy} (kPa)	Consolidation time (min.)	q_{cy}/q_{st}	Stress reversal
Loose sand (Dr=34%)	1.0	0	35	10	>1	Reversal
			40	10	>1	Reversal
			45	10	>1	Reversal
	1.5	43	45	10	1.05	Intermediate
			55	10	1.30	Reversal
			60	10	1.40	Reversal
	2.0	75	45	10	0.60	No reversal
			60	10	0.86	No reversal
			70	10	0.93	Intermediate
Medium sand (Dr=56%)	1.0	0	35	10	>1	Reversal
			40	10	>1	Reversal
			45	10	>1	Reversal
	1.5	43	35	10	0.78	No reversal
			45	10	1.05	Intermediate
			55	10	1.30	Reversal
	2.0	75	45	10	0.60	No reversal
			75	10	1.00	Intermediate
			85	10	1.13	Reversal



(a) 응력경로



(b) 변형률-축차응력

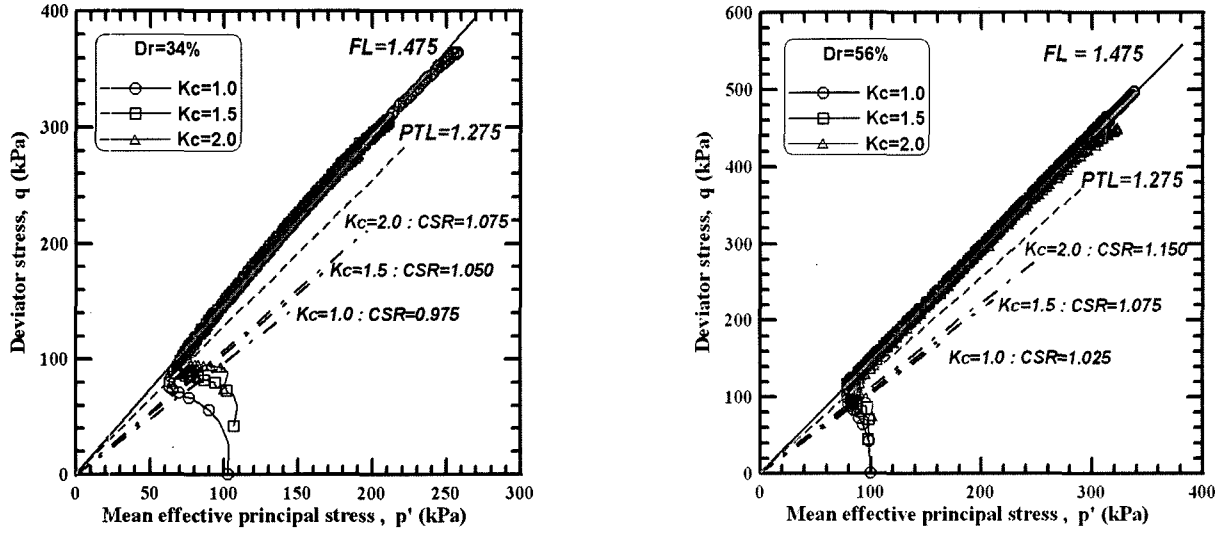
그림 5. 구속압에 따른 압축 및 인장전단시험결과

속압 모두에서 뚜렷한 첨두점을 보이지 않아 연화거동이 시작되는 변형률의 위치를 찾아서 CSR선을 결정하였으며, 상전이선과 파괴선의 경우는 뚜렷하여 쉽게 찾을 수 있었다. 반면 인장시험의 응력-변형률 곡선에서는 뚜렷한 첨두점을 나타낸 후 중간정도의 변형률까지 연화거동을 거쳐서 다시 팽창하는 제한적 액상화의 거동을 나타내었다. 인장측에서의 CSR선은 원점을 통과하지만 FL, PTL의 경우(0, -20kPa)의 좌표를 지나는 특징을 보였는데, 이는 유사정상상태변형을 보인 후 전술한 바와 같이 낙동강 모래의 subangular한 특징에 의하여 다시 인장력이 증가됨에 기인되는 현상으로 사료된다.

FL과 PTL은 구속압, 상대밀도, 압밀응력비에 무관하게 일정한 값을 나타내었으며 반복하중에 의한 거동과도 밀접한 관계가 있는데, 이는 4.3절에서 다루기로 한다.

그림 6은 느슨한 상태와 중간상태 시료에 대한 압밀응력비에 따른 응력경로를 나타낸 것이다. K_c가 증가할수록 FL과 PTL의 기울기는 변하지 않으나 CSR선의 기울기는 조금씩 증가하였는데, 이와 같이 FL과 PTL의 기울기가 구속압력, 압밀응력비 그리고 상대밀도에 상관없이 항상 일정하게 나타난 것은 Hanzawa(1980), Vaid & Chern(1983) 등 많은 학자의 연구에서도 이미 밝혀진 사실이다.

표 6은 그림 6에서 구한 FL, PTL, CSR 선의 기울기와 상전이점 그리고 CSR점에서의 강도인 S_{PT}, S_{CSR}을 나타내었다. 느슨한 상태 K_c=1.0에서 구속압이 증가함에 따라 S_{PT}, S_{CSR} 값이 증가하였으며, 또한 동일한 상대밀도의 경우에서는 압밀응력비가 증가함에 따라 S_{PT}, S_{CSR}의 값이 증가하였다. 그리고 압밀 후의 상대밀도가 34%에서 56%로 증가함에 따라서도 S_{PT}, S_{CSR} 값이 증가하는



(a) Dr=34%　　(b) Dr=56%

그림 6. 압밀응력비에 따른 응력경로

표 6. FL, PTL, CSR선 기울기 및 S_{PT}, S_{CSR}

Dr(%)	K_c	FL	PTL	CSR	p_c'(kPa)	S_{PT}(kPa)	S_{CSR}(kPa)	Mode
34	1.0	1.475	1.275	0.975	50	45	38	Compression
					100	79	70	
					200	168	151	
	1.5			1.050	100	92	83	
	2.0			1.075	100	97	92	
56	1.0			1.025	100	92	84	
	1.5			1.075	100	100	90	
	2.0			1.150	100	111	101	
34	1.0	0.905	0.775	0.635	50	−25	−21	Extension
					100	−39	−32	
					200	−78	−52	

경향을 보였다. 김영수 등(2004)은 등방압밀시료에서 S_{PT}, S_{CSR}는 압밀시간 증가에 따라 증가하는 aging 효과 경향을 보인다고 하였다.

4.2 비배수 반복전단거동

Hyodo et al.(1991)은 초기정적전단응력(q_{st})과 반복응력(q_{cy})의 복합적인 조건에서 $q_{cy}/q_{st} > 1$일 때 응력반전

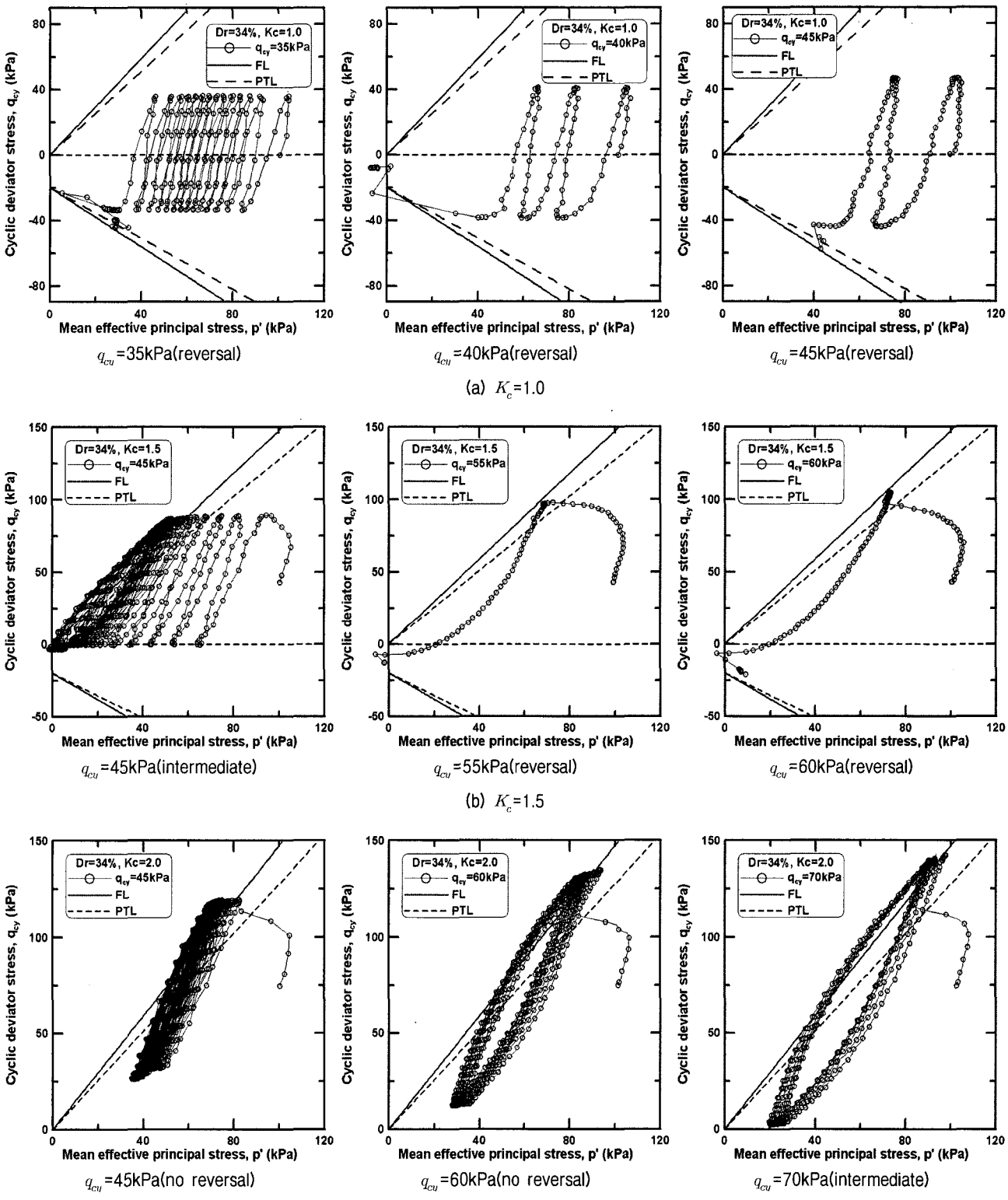


그림 7. 느슨한 모래의 응력경로

이 생기는 조건을 응력반전조건(reversal), $q_{cy}/q_{st}<1$일 때는 응력반전이 없으므로 응력비반전조건(no-reversal)이라고 하며, q_{cy}/q_{st}=0.9～1.1 사이에 있을 때는 응력준반전조건(intermediate)라고 구분하였다.

그림 7의 (a), (b), (c)는 각각 다른 K_c의 q_{st}조건과 q_{cy}에서 느슨한 모래의 응력경로를 나타낸 것이다. K_c=1.0의 경우 시료는 q_{st}=0 상태에서 세 가지 반복하중 q_{cy}=35, 40, 45kPa을 받아 모두 응력반전 조건으로 응력경

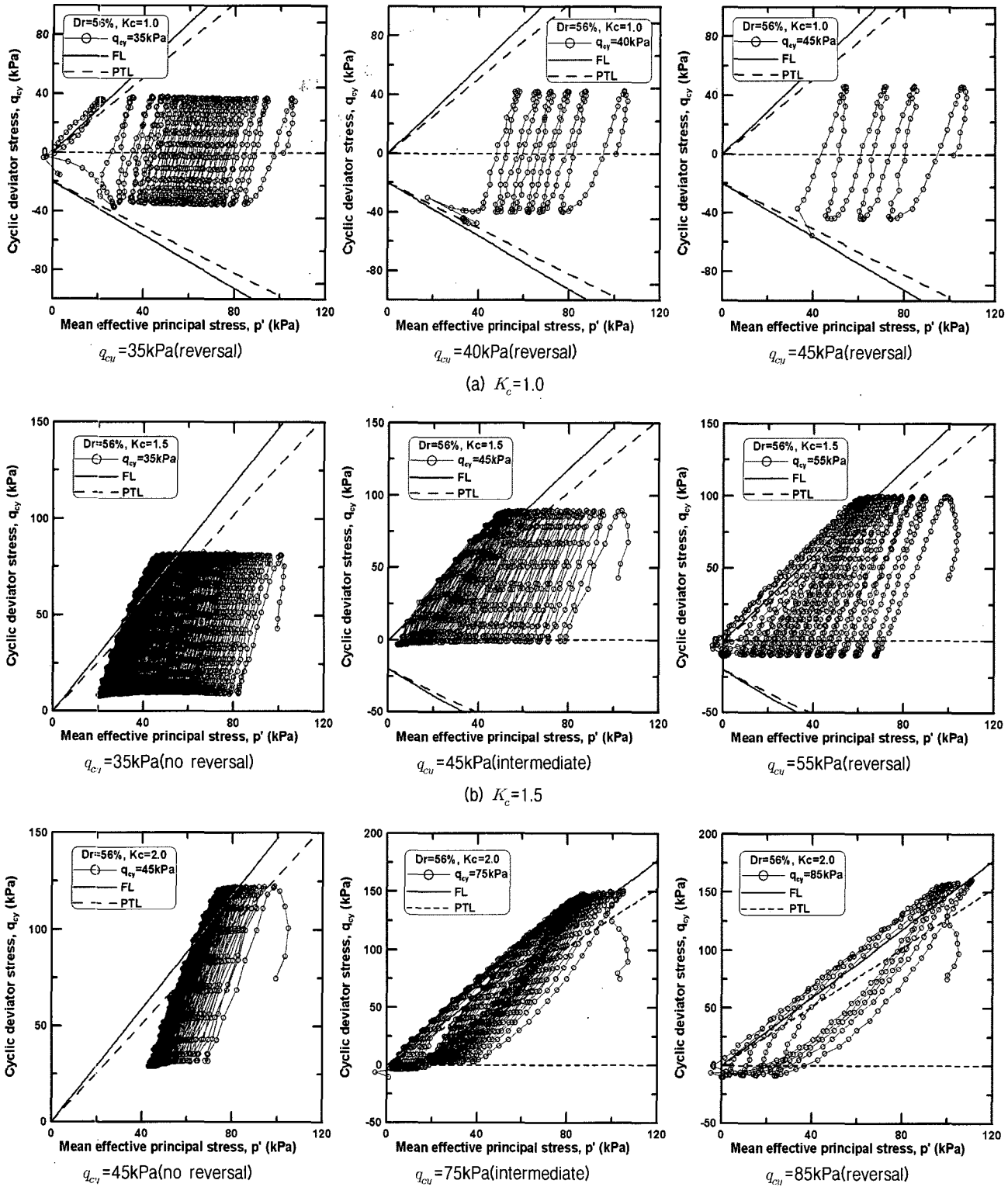


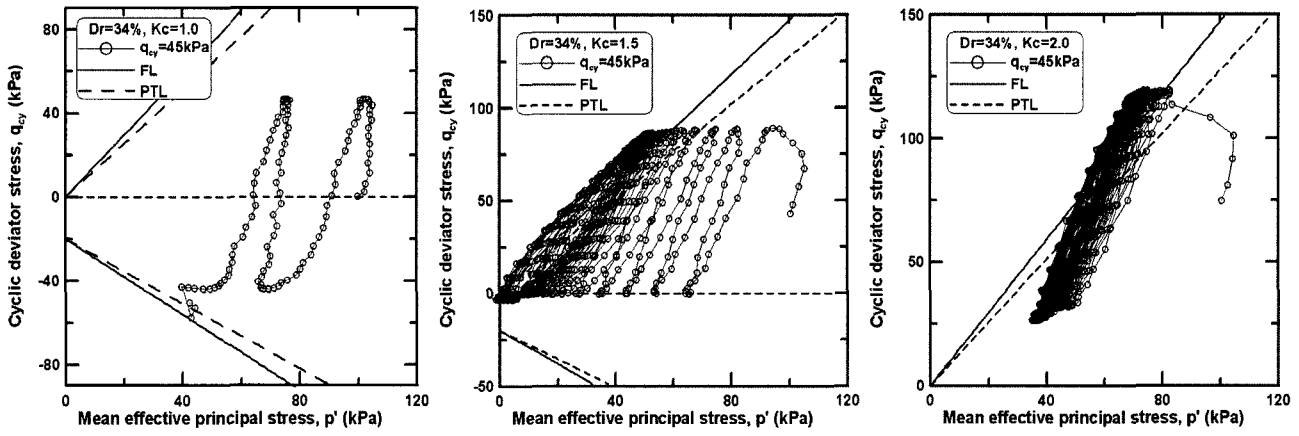
그림 8. 중간상태 모래의 응력경로

로는 반복응력에 의해 압축측과 인장측을 오가며 간극수압의 증가로 인하여 왼쪽으로 움직이고 응력반전에 의하여 인장측의 파괴선과 만나면서 갑작스런 파괴가 발생하였으며, q_{cy}의 반복횟수(N)만 다를 뿐 파괴양상은 모두 유사하게 나타났다. K_c=1.5에서는 q_{st}=43kPa을 받고 있어 q_{cy}=45kPa의 응력준반전조건에서는 압축측의 상전이선(PTL)에 이르기까지는 간극수압이 크게 증가하여 평균유효주응력(p')이 크게 감소하다가 PTL 이후에서는 거의 간극수압의 변화가 없어 서서히 왼쪽으로 진행되면서 p'=0, q=0 상태의 반복변동이 발생하였고, q_{cy}=55, 60kPa의 응력반전조건에서는 큰 반복하중에 의하여 바로 압축측 파괴선(FL)을 지나면서 유동액상화에 의한 파괴 거동을 보였다. K_c=2.0에서는 q_{st}=75kPa의 큰 초기정적전단응력으로 q_{cy}=45, 60kPa에서의 응력비반전조건과 q_{cy}=70kPa에서의 응력준반전조건을 보였는데, 응력경로는 초기 큰 간극수압의 증가로 모두 PTL을 지나 FL에 이르고 변형은 미소하게 계속적으로 일어나면서 왼쪽으로 조금씩 이동하지만 더 이상의 간극수압의 증가는 없어 세 가지 모두 p'=0의 초기액상화는 발생하지 않았다.

그림 8의 (a), (b), (c)는 상대밀도 56%의 중간상태 모래시료에 대한 응력경로를 나타낸 것이다. K_c=1.0의 경우는 모든 반복응력에 대하여 응력반전조건으로 q_{cy}=35kPa에서는 느슨한 상태의 동일한 경우에 비하여 상대밀도의 증가로 인하여 파괴시 압축측과 인장측의 FL을 오가면서 제한적 액상화가 발생되었고, q_{cy}=40, 45kPa에서는 느슨한 상태와 유사하게 응력경로는 압축측과 인장측을 오가면 진행되다가 인장측의 FL을 만나면서 갑작스런 파괴가 발생되는 것을 볼 수 있었다. K_c=1.5, 2.0에서 응력조건이 응력비반전조건일 때는 인장응력을 받지 않아 반복변동은 발생되지 않고 FL상에서 변형만이 서서히 일어나는 반면, 응력준반전조건과 응력반전조건에서는 계속적인 반복응력에 의하여 간극수압이 축적되어 반복변동 거동을 나타내었다. 응력경로의 1 주기(cycle)당 기울기는 반복응력이 증가할수록 FL의 기울기에 가깝게 기울어지는 것을 볼 수 있는데, 이는 반복응력이 증가함에 따라 발생되는 간극수압의 크기도 증가하여 p'의 감소가 크게 일어나기 때문에 나타나는 현상이다.

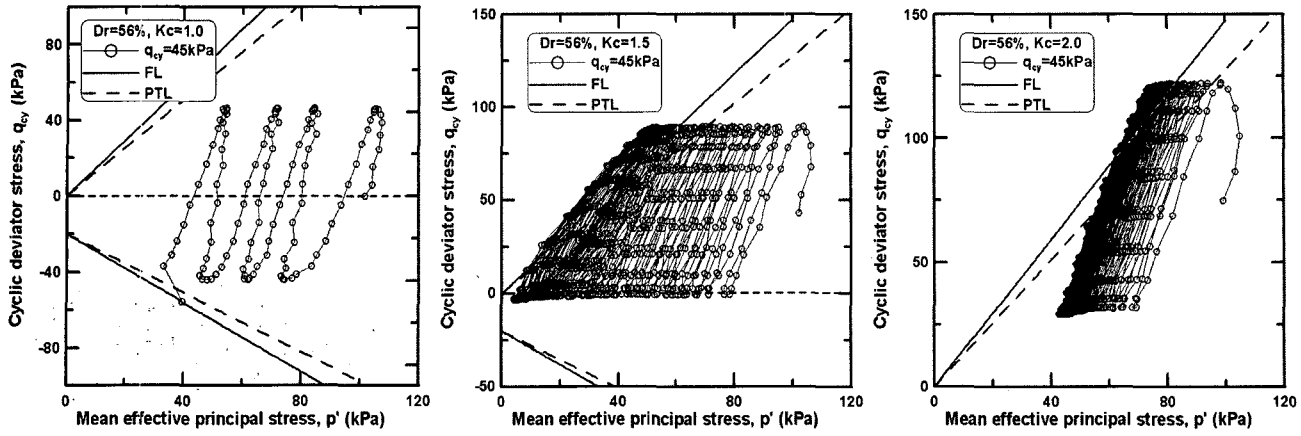
느슨한 상태와 중간상태 시료 모두 동일한 반복응력하에서 초기정적전단응력의 존재로 인한 응력조건의 변화에 따라 응력경로의 거동이 완전히 상이하게 나타났는데, 그림 9, 10은 각각 다른 압밀이방비(K_c=1.0, 1.5, 2.0)에서 동일한 반복응력 q_{cy}=45kPa을 가하였을 때를 나타냈다. q_{st}의 크기에 따라 응력조건이 각각 다른 응력반전, 응력준반전, 응력비반전 조건을 보였는데, K_c=1.0의 응력반전조건에서는 몇 번의 반복응력으로 인하여 인장측 파괴선(FL)을 따라 올라가면서 유동액상화에 의한 파괴가 발생되었고, K_c=1.5의 응력준반전조건에서는 상전이선(PTL) 이후로 지속적인 간극수압의 감소에 의한 p'의 감소로 반복변동거동이 발생되었으며, K_c=2.0의 응력비반전조건에서는 PTL을 지난 후 간극수압의 변화가 거의 없고 FL상에서 변형만 조금씩 일어날 뿐 초기액상화는 발생하지 않았다.

이와 같이 동일한 반복하중에서 초기정적전단응력의 크기에 따라 완전히 다른 파괴의 양상을 보여 모래의 반복거동에서 가장 중요한 인자임을 알 수 있었다.



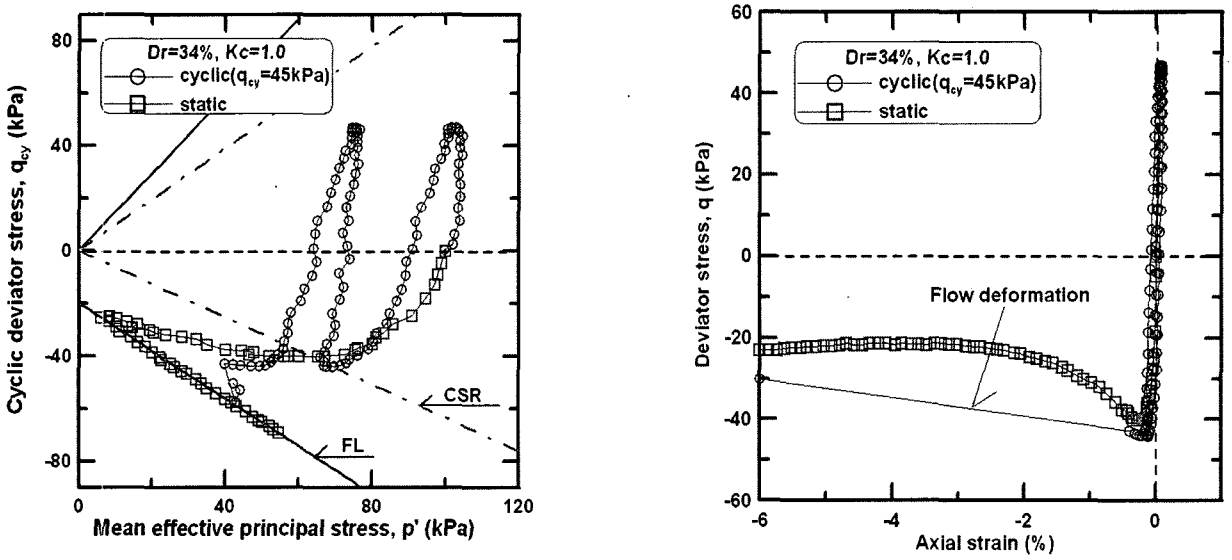
(a) q_{st}=0kPa(reversal) (b) q_{st}=43kPa(intermediate) (c) q_{st}=75kPa(no reversal)

그림 9. 느슨한 시료의 초기정적전단응력에 따른 응력경로(q_{cy}=45kPa)



(a) q_{st}=0kPa(reversal) (b) q_{st}=43kPa(intermediate) (c) q_{st}=75kPa(no reversal)

그림 10. 중간상태 시료의 초기정적전단응력에 따른 응력경로(q_{cy}=45kPa)



(a) 응력경로 (b) 응력-변형률

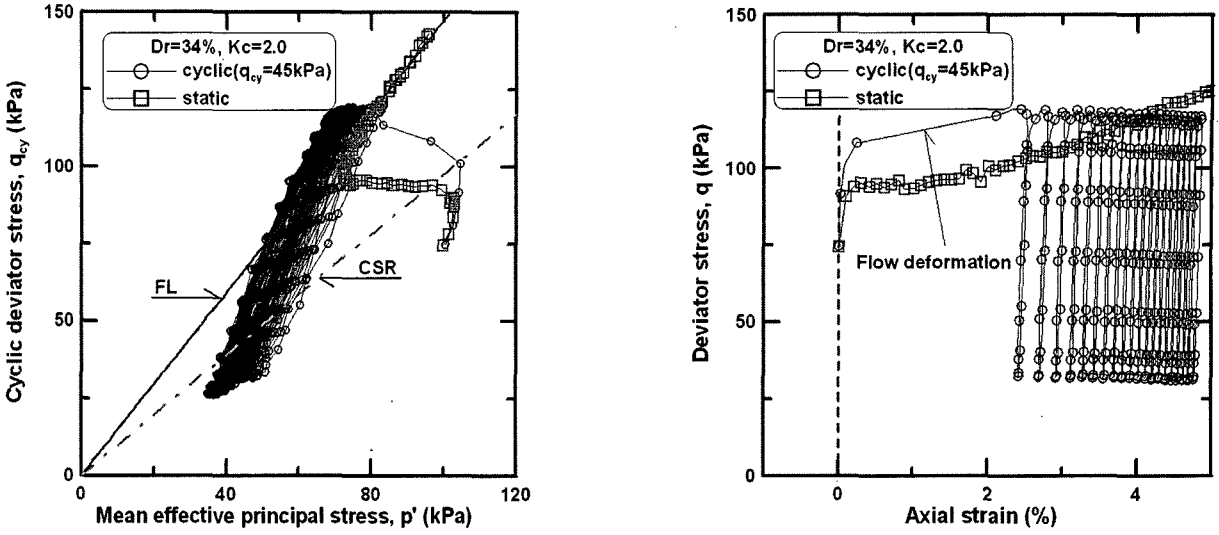
그림 11. 정적인장거동과 reversal 조건 반복거동의 관계

4.3 비배수 정적 및 반복거동 상호관계

본 연구에서는 초기정적전단응력이 존재하는 조건에서 정적 압축 및 인장시험결과를 이용하여 동일한 조건의 반복거동과의 상호관계를 비교분석하였다.

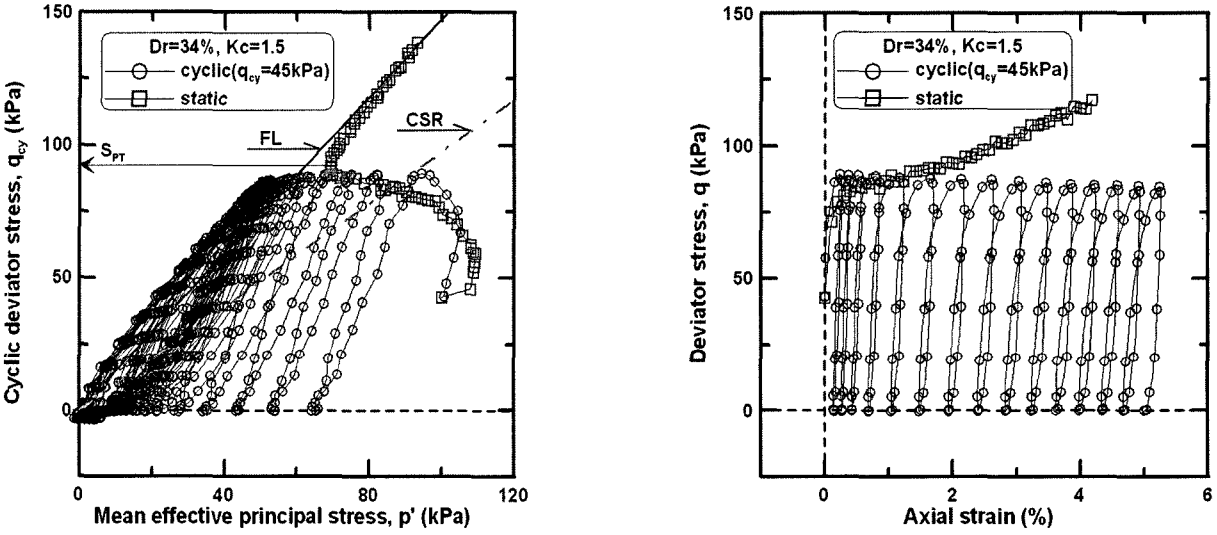
그림 11은 비배수 삼축인장시험과 q_{cy}=45kPa의 반복응력이 가해진 응력반전조건의 반복거동에 대한 응력경로와 응력-변형률 관계를 나타내었다. 등방조건의 초기정적전단응력이 없는 초기상태에서의 반복거동은 파괴선(FL) 및 한계간극비(CSR)선의 기울기 값이 인장측에서 더 작기 때문에 파괴에 이르는 큰 변형이 인장측에서 결정된다. 따라서 그림 11(a)와 같이 반복거동의 응력경로는 먼저 인장측의 CSR선을 지나면서 큰 폭의 변화를 일으키고 인장의 정적거동을 따라 FL에 도달한다. 응력-변형률 관계에서 반복거동은 초기에 작은 변형률에서 하중반복 후 CSR선을 지나면서 점차 인장 변형률이 발생하고 갑작스런 유동변형이 발생하는데, 이는 정적인장하중에 의한 연화거동과 거의 일치하였다.

그림 12는 초기상태에 q_{st}=75kPa이 존재하는 이방조건에서 반복응력 q_{cy}=45kPa이 가하여진 응력비반전조건으로 이러한 경우 파괴는 압축측에서 결정되므로 동일한 초기조건에서의 정적압축시험결과와 같이 나타내었다. 그림 12(a)와 같이 응력경로상에서 정적압축거동은 CSR선을 지나면서 응력 연화거동을 나타내며 상전이선(PTL)을 지난 후 바로 FL을 따라 거슬러 올라간다. 반복거동에서는 초기의 급격한 간극수압의 증가로 바



(a) 응력경로 (b) 응력-축변형률

그림 12. 정적압축거동과 no reversal 조건 반복거동의 관계



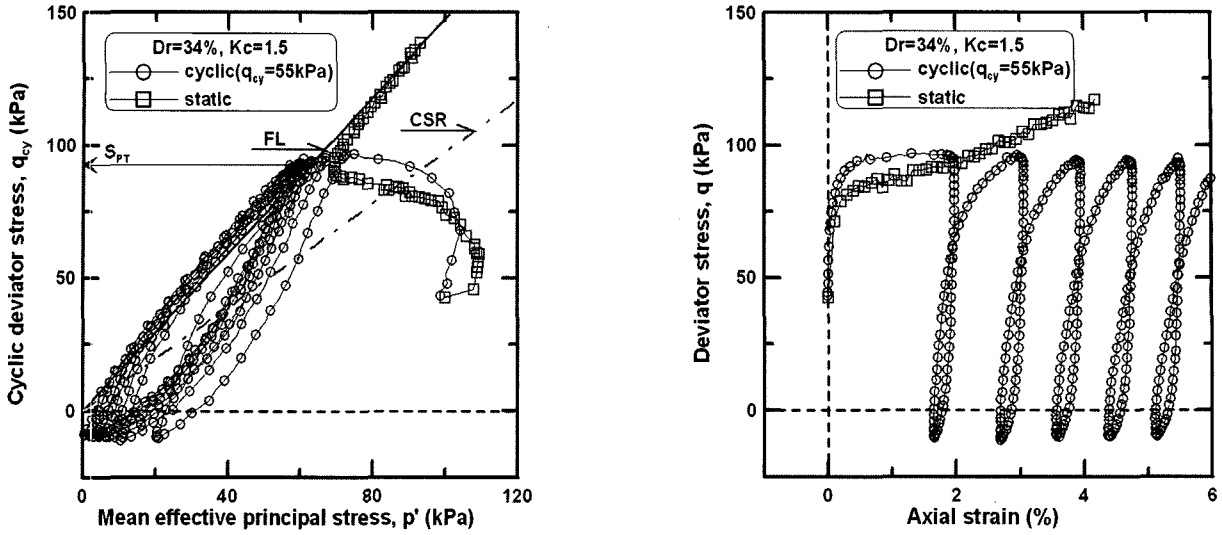
(a) 응력경로 (b) 응력-축변형률

그림 13. $(q_{st}+q_{cy}) < S_{PT}$인 조건에서의 정적압축과 반복거동관계

로 CSR선을 지나고 그 후 간극수압의 증가가 작아지면서 서서히 좌측으로 이동하여 정적거동의 상전이점을 지난 후 FL과 만나게 된다. 이러한 거동을 응력-변형률 관계에서 살펴보면 그림 12(b)와 같이 초기의 큰 간극수압의 증가에 의해 큰 유동변형이 발생하여 정적거동과 만나게 되고 그 후 작은 폭의 변형이 계속 발생되는 것을 볼 수 있다.

그림 13, 14는 동일한 초기정적전단응력을 가지는 정적압축거동과 반복거동의 상호관계를 나타내었는데, 반복응력의 최대값인 $(q_{st}+q_{cy})$과 상전이점에서의 강도, S_{PT}의 관계에 따라 그 거동양상이 아주 달라지는 것을 볼 수 있다. 먼저 $(q_{st}+q_{cy}) < S_{PT}$ 조건을 나타낸 그림 13에서의 응력경로는 초기에 큰 간극수압의 증가로 CSR선을 지나 FL에 이르기까지 p'가 크게 감소하고 FL에서는 더 이상의 간극수압의 증가 없이 서서히 좌측으로 이동하는 것을 볼 수 있는데, 이에 반하여 응력-변형률 관계에서는 초기에 큰 간극수압의 발생으로 p'가 크게 감소하여도 $(q_{st}+q_{cy})$값이 S_{PT}보다 작아 큰 변형은 일어나지 않고 서서히 좌측으로 이동하여 파괴에 이르게 된다.

그림 14의 $(q_{st}+q_{cy}) > S_{PT}$ 조건에서 응력경로는 큰 축차응력으로 인해 초기에 CSR선을 지나 FL선에 이르



(a) 응력경로 (b) 응력-축변형률

그림 14. $(q_{st}+q_{cy}) > S_{PT}$인 조건에서의 정적압축과 반복거동관계

게 되고 그 후 서서히 좌측으로 이동하고 응력-변형률에서는 $(q_{st}+q_{cy})$값이 S_{PT}보다 커서 초기에 큰 유동변형이 발생하여 FL에 이르게 된다.

이와 같이 반복거동의 응력경로는 시험방법이 다름에 따른 약간의 차이는 있으나 정적거동의 응력경로와 본질적으로 동일함을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 낙동강 유역에 분포하는 모래를 대상으로 상대밀도, 이방압밀비를 달리한 조건에서 실내 비배수 정적 및 반복삼축시험을 실시하였다. 그 결과 모래의 정적 및 반복전단거동 특성과 상호 관계에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 상전이점 강도(S_{PT})와 한계응력비점의 강도(S_{CSR})는 느슨한 상태 K_c=1.0에서 구속압이 증가함에 따라 증가하였으며, 동일한 상대밀도의 경우에서는 압밀응력비가 증가함에 따라 S_{PT}, S_{CSR}의 값이 증가하였다. 또한 상대밀도가 34%에서 56%로 증가함에 따라서도 S_{PT}, S_{CSR} 값이 증가하는 경향을 보였다.

(2) 초기정적전단응력(q_{st})의 크기에 따라 동일한 반복응력에서 응력조건이 응력반전(reversal), 응력준반전(intermediate), 응력비반전(no-reversal) 조건으로 변화되면서 유동액상화, 제한적 액상화 그리고 반복변동(cyclic mobility) 및 잔류변형으로 인한 파괴의 형태로 다르게 나타났으며, 초기정적전단응력(q_{st})이 작은 경우에는 인장측에서 그리고 큰 경우는 압축측에서 파괴가 발생하였다.

(3) 반복거동의 응력경로는 정적거동의 한계응력비(CSR)선을 지나면서 유동변형이 발생하여 정적거동과 일치하였으며, 그 후 정적거동의 파괴선(FL)을 따라 파괴가 발생하였다. 이러한 반복거동의 응력경로는 시험방법이 다름에 따른 약간의 차이는 있으나 정적거동의 응력경로와 본질적으로 동일함을 알 수 있었다.

(4) 이방압밀시료에서 정적압축거동과 반복거동은 반복응력의 최대값인 $(q_{st}+q_{cy})$과 상점이점에서의 강도, S_{PT}의 관계에 따라 거동양상이 크게 달라지는 것을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김영수, 김대만 (2004), "Aging 효과에 따른 모래의 비배수 정적 전단거동 특성", *한국지반공학회 논문집*, 제20권, 6호, pp.1-14.
2. Alarcon-Guzman, A., Leonards, G. A. and Chameau, J. L. (1988), "Undrained monotonic and cyclic strength of sands", *Jour. of the Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.114, No.10, pp.1089-1109.
3. Castro, G. (1969), "*Liquefaction of sands*", Ph.D Thesis, Harvard University, Cambridge, Massachusettes.
4. Castro, G., Poulos, S. J., France, J. W, and Enos, J. L. (1982), "Liquefaction induced by cyclic loading", *Report to National Science Foundation*, Washington. DC.
5. Chern, J. C. (1985), "*Undrained response of sands with emphasis on liquefaction and cyclic mobility*", Ph.D Thesis, University of

British Columbia, Vancouver, Canada.
6. Hanzawa, H., Itoh, Y., and Suzuki, K. (1979), "Shear characteristic of a quick sand in the Arabian Gulf", *Soils and Foundations*, Vol.19, No.4, pp.1-15.
7. Hanzawa, H. (1980), "Undrained strength and stability analysis for a quick sand", *Soils and Foundations*, Vol.20, No.2, pp.17-29.
8. Hyodo, M., Murata, H., Yasufuku, N., and Fujii T. (1991), "Undrained cyclic shear strength and residual shear strain of saturated sand by cyclic triaxial tests", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.3, pp.60-76.
9. Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S. (1975), "Undrained deformation and liquefaction of sand under cyclic stresses", *Soils and Foundations*, Vol.15, No.1, pp.29-44.
10. Ishihara, K. (1993), "Liquefaction and flow failure during earthquakes", *Geotechnique*, No.3, pp.351-415.
11. Kramer, S. L. (1996), "*Geotechnical earthquake engineering*", Prentice-Hall, Inc., pp.355-365.
12. Seed, H. B. (1979), "Soil liquefaction and cyclic mobility of evaluation for level ground during earthquakes", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.105, No.2, pp.201-255.
13. Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1983), "Effects of static shear on resistance to liquefaction", *Soils and Foundations*, Vol.23, No.1, pp.47-60.
14. Vaid, Y. P. and Chern, J. C. (1985), "Cyclic and monotonic undrained response of sands", *Proc. Advanced in the Art of Testing Soils under Cyclic Loading Conditions*, Detroit, pp.120-147.
15. Vaid, Y. P., Chung, E. K. F., and Kuerbis R. H. (1990), "Stress path and steady state", *Canadian Geotechnical Jour.*, Vol.27, No.27, pp.1-7.
16. Vaid, Y. P. and Thomas, J. (1995), "Liquefaction and post liquefaction behavior of sand", *Jour. of Geotechnical Eng. Div.*, ASCE, Vol.121, No.2, pp.163-173.

(접수일자 2006. 7. 24, 심사완료일 2006. 10. 24)