

실트질 모래의 액상화 후 반복하중에 의한 동적거동

Post-liquefaction Behavior under Cyclic Loading of a Silty Sand

강 병 희*¹ Kang, Byung-Hee
박 근 보*² Park, Keun-Bo
서 명 하*² Seo, Myoung-Ha

Abstract

A series of cyclic triaxial tests with several consolidation pressure ratios was performed to investigate the post-liquefaction undrained cyclic behavior of the medium dense silty sand($D_r=50\%$) in comparison with the pre-liquefaction behavior in virgin state.

As the results, the effects of the consolidation pressure ratio on the liquefaction behavior are presented, and the post-liquefaction cyclic behaviors are compared with the pre-liquefaction. It is also shown that the post-liquefaction behavior of sand depends absolutely on whether the cycle stress reversal occurred during the previous liquefaction. It is concluded that the cyclic resistance to liquefaction for the specimen, which has been liquefied, is higher than that for the virgin specimen in the anisotropic consolidation, whereas lower in the isotropic consolidation.

요 지

보통으로 다져진 실트질 모래($D_r=50\%$)에 대한 액상화 전후 상태에서의 반복하중에 의한 동적거동을 연구하기 위하여 몇 가지의 압밀응력비로서 압밀시킨 공시체에 대해서 일련의 반복삼축시험을 수행 하였다. 연구결과로서 압밀응력비가 액상화거동에 미치는 영향을 나타내었으며 또한 액상화 전후의 동적거동을 비교하였다. 그리고 액상화 후의 거동은 선행액상화시의 응력반전 여부에 의해서 절대적으로 좌우된다는 사실을 보여주고 있다. 결론적으로 액상화를 경험한 공시체의 액상화저항은 액상화를 경험하지 않은 공시체에 비해서 이방압밀의 경우에는 높고 등방압밀의 경우에는 낮다.

Keywords : Post-liquefaction behavior, Cyclic resistance to liquefaction, Medium dense, Silty sand, Consolidation pressure ratio

1. 서 론

사질토지반의 액상화는 지진과 같은 대규모의 지반진동 뿐만 아니라 발파진동, 교통진동, 건설진동, 기계진동 및 파도 등과 같은 비교적 수준이 낮은 비지진 진동에 의해서도 발생된다(Szerdy, 1985 ; Carter와 Seed, 1988 ; Long 등, 1981). 또한 자연상태로 퇴적되었거나 인공적으로 건

설된 사질토의 수평지반 및 경사지내의 응력상태는 이방 압밀상태에 있으므로 이미 정적전단응력을 받고 있으며 이러한 초기응력상태는 비배수동적거동인 액상화에 영향을 끼치고 있다고 알려져 있다(Ishihara와 Okada, 1978 ; Vaid와 Chern, 1983 ; Vaid등, 1989). 이러한 실제 현장의 초기정적전단응력을 고려하여 실내시험에서 이방압밀시킨 공시체로서 반복삼축시험을 수행한 결과에 의하면

*1 정회원, 인하대학교 공과대학 건설공학부 교수

*2 인하대학교 대학원 토목공학과

이방압밀공시체의 반복하중하의 거동은 압밀응력비와 반복응력의 크기에 의해서 크게 달라진다고 하였다(Seed와 Lee, 1966 ; Lee와 Seed, 1967 ; Vaid와 Chern, 1983). 또한 Vaid와 Chern(1983)은 상대밀도, 정적전단응력 및 변형률에 의한 액상화의 정의에 따라서 액상화저항은 초기정적전단응력의 증가에 따라 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다고 하였다.

한편 모래의 액상화저항은 초기정적전단응력 뿐만 아니라 이전에 받았던 전단변형에 의해서도 크게 달라지며 어느 경계치를 중심으로 해서 정반대의 영향을 나타낸다(Finn등 1970). 액상화를 이미 경험한 사질토의 액상화후 거동에 관한 연구도 여러 가지 형태로 수행된바 있다(Castro등, 1985 ; Yasuda등, 1995 ; Vaid와 Thomas, 1995 ; Vaid와 Sivathaylan, 1997). 그러나 최근 Kobe지진(1995)과 같은 대규모 지진 이후에 지진이 한번 발생했던 지역의 동적거동에 대해서 더 큰

관심을 끌게 되었다.

따라서 본 연구에서는 실트질 모래지반에 있어서 액상화 전후의 반복하중에 의한 비배수동적거동을 비교하고 특히 압밀응력비가 이들 거동에 미치는 영향에 관해서 검토하였다. 이를 위하여 보통상태로 다진 실트질 모래 공시체에 몇 가지의 압밀응력비($K_c = \sigma_{hc}' / \sigma_{vc}'$)로서 구속압밀 시킨 후 반복하중을 가하여 일차로 액상화시켰다. 이렇게 액상화를 경험시킨 공시체에 대해서 다시 반복하중을 가하여 동적 비배수거동을 구하고 이를 액상화전의 거동과 비교 검토하였다.

2. 실험

2.1 시료 및 공시체

사용된 시료는 점토분이 없는 실트분의 세립토를 약 30%

Table 1 Summary of test results for pre-liquefaction and post-liquefaction cyclic triaxial tests

Test No.	B value	Mean consolidation pressure, p_c' (kPa)	Relative density, (Void ratio) D_r (%), (e)			Stress ratio, $\sigma_d / 2\sigma_{vc}'$	Number of cycles at liquefaction	
			Initial	After consolidation	Post-liquefaction		Pre-liquefaction	Post-liquefaction
C-1.0-100	0.98	100	50.1(0.684)	60.6(0.638)	68.3(0.605)	0.1	172	123
	0.99	100	49.9(0.685)	58.9(0.646)	67.8(0.607)	0.12	47	25
	0.99	100	49.8(0.685)	58.5(0.647)	65.3(0.618)	0.14	32	13
	0.99	100	49.9(0.685)	60.6(0.638)	71.3(0.591)	0.15	27	9
	0.99	100	50.3(0.683)	59.5(0.643)	67.3(0.609)	0.17	11	6
	0.99	100	63.2(0.627)	67.7(0.607)	-	0.12	125	-
C-0.7-100	0.99	80	50.2(0.683)	57.8(0.650)	60.6(0.638)	0.1	140	502
	0.99	80	50.1(0.684)	58.2(0.649)	61.4(0.635)	0.13	41	179
	0.98	80	50.3(0.683)	55.5(0.661)	56.5(0.656)	0.15	28	80
	0.99	80	49.8(0.685)	57.3(0.677)	60.3(0.640)	0.16	10	52
	0.99	80	50.6(0.682)	56.4(0.657)	60.7(0.638)	0.25	1	2
	0.99	80	55.0(0.663)	61.0(0.636)	-	0.13	99	-
C-0.55-100	0.98	70	50.1(0.684)	57.3(0.653)	59.2(0.644)	0.1	233	855
	0.99	70	50.1(0.684)	57.0(0.654)	58.1(0.649)	0.15	30	138
	0.99	70	50.1(0.684)	56.3(0.657)	58.1(0.649)	0.17	28	102
	0.98	70	50.1(0.684)	57.0(0.654)	60.3(0.640)	0.18	18	90
	0.99	70	56.2(0.658)	60.2(0.640)	-	0.15	50	-
C- K_o -100	0.97	63.3	49.8(0.685)	54.8(0.664)	54.9(0.664)	0.1	249	828
	0.98	63.3	50.1(0.684)	55.9(0.659)	58.6(0.647)	0.15	51	160
	0.97	63.3	50.1(0.684)	57.3(0.652)	57.7(0.651)	0.25	10	28
	0.98	63.3	53.1(0.649)	58.1(0.649)	-	0.15	98	-

함유하고 평균입경 0.17mm, 균등계수 3.8인 실트질 모래 (SM)로서 최대 및 최소간극비는 각각 0.90 및 0.47이다. 삼축시험공시체는 직경 50mm, 높이 100mm의 크기로서 건조 퇴적법에 의해서 몰드내에 퇴적시키고 초기상대밀도가 50%가 되도록 몰드주위를 상하좌우 대칭으로 가볍게 두드리면서 성형하였다. 공시체를 포화시키기 위하여 낮은 압력으로 CO₂가스를 순환시킨 후 탈기수로서 어느정도 포화시키고 100kPa의 배압을 서서히 가하여 B계수가 0.97이상 되도록 포화시켰다.

2.2 시험종류 및 시험방법

4가지의 압밀응력비 1.0, 0.7, 0.55 및 K₀에 대해서 100kPa의 연직압밀응력으로 공시체를 정규압밀시킨 후 몇 가지 반복응력비로서 하중을 가하여 액상화시키므로써 액상화를 경험하지 않은 사질토의 액상화전 비배수동적거동을 구하였다. 그리고 계속해서 액상화 중에 발생한 과잉간극수압을 초기압밀응력상태로 완전히 소산시킨 다음 위와 동일한 반복응력비로서 반복하중을 가하여 다시 액상화시키므로써 액상화후의 비배수동적거동을 구하였다.

시험번호의 한 예로서 C-0.7-100은 연직압밀응력 100kPa, 압밀응력비 0.7인 비배수반복삼축압축시험을 나타낸다. 반복하중의 파형은 정현파(sine wave)이고 주파수는 0.1Hz이다.

본 연구에서 시행한 시험종류는 표 1에 나타난 바와 같다. 등방압밀의 경우 반복하중에 의해서 발생하는 과잉간극수압이 유효구속응력과 같아지는 초기액상화(initial liquefaction)의 발생시점은 Ishihara(1993)가 언급한 바와 같이 양진폭변형률이 5%되는 점으로 하였다. 그리고 이방압밀의 경우 본 연구에서는 반복전단응력이 초기정적전단응력보다 적기때문에 응력반전(stress reversal)이 일어나지 않으므로 과잉간극수압이 유효구속응력보다 적게 발생하여 초기액상화는 발생하지 않을 뿐만 아니라 양진폭변형률

은 5%보다 훨씬 적게 일어난다. 따라서 이 경우 액상화의 발생시점을 과잉간극수압이 급격히 증가하다가 어느 일정한 최대치에 수렴하면서 더 이상 증가하지 않는 시점을 고려하여 정하였다. 본 연구에서는 이러한 시점을 대체로 영구변형률이 3~5%정도에서 발생하였으므로 5%의 축변형률이 일어나는 시점을 파괴기준인 액상화 발생 시점으로 간주하였다. 즉 본 연구에서는 액상화의 발생시점을 등방압밀과 이방압밀의 경우 각각 양진폭변형률과 영구변형률이 5%인 상태로 규정하였다. Hyodo등(1991)은 응력반전 및 비반전의 경우 모두 10%의 영구변형률을 파괴 상태로 간주하였다.

한편 본 연구에서 사용한 실트질 모래를 50%의 상대밀도로 다진 공시체의 정지토압계수 K₀는 시험결과 구속응력의 크기에 따라 차이를 나타내었으나 연직구속응력이 100kPa이상인 경우에는 0.45에 수렴하므로 0.45의 일정한 값으로 정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 액상화전 반복재하 거동

액상화를 경험하지 않은 등방압밀공시체의 경우 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 반복회수가 증가함에 따라 과잉간극수압은 계속해서 증가하나 축변형률은 초기에는 거의 발생하지 않다가 반복회수가 32회에서 양진폭변형률이 5%에 이르고 동시에 과잉간극수압이 유효구속응력 100kPa과 같아져서 초기액상화가 발생한다. 그림에서 FL과 PTL은 각각 단일하중의 경우 파괴전과 상전이선을 나타낸다.

그러나 이방압밀공시체의 경우는 그림 2에서와 같이 반복응력(σ_d)이 초기정적응력(q_s)보다 적기 때문에 응력반전이 되지 않으므로 초기액상화는 일어나지 않는다. 즉 과잉간극수압은 초기에는 급하게 증가하나 어느 반복회수 이후에는 더 이상 증가하지 않고 최대치에 수렴하는 경향을

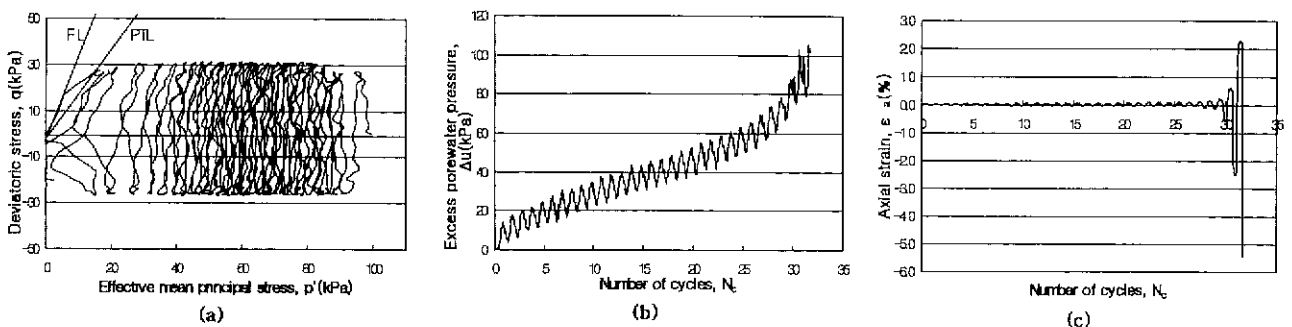


Fig. 1. Typical results of the pre-liquefaction cyclic triaxial tests for $K_c=1.0$ ($\sigma_{vc}'=100\text{kPa}$, $\sigma_d/2\sigma_{vc}'=0.14$, $\sigma_d = \pm 30\text{kPa}$)

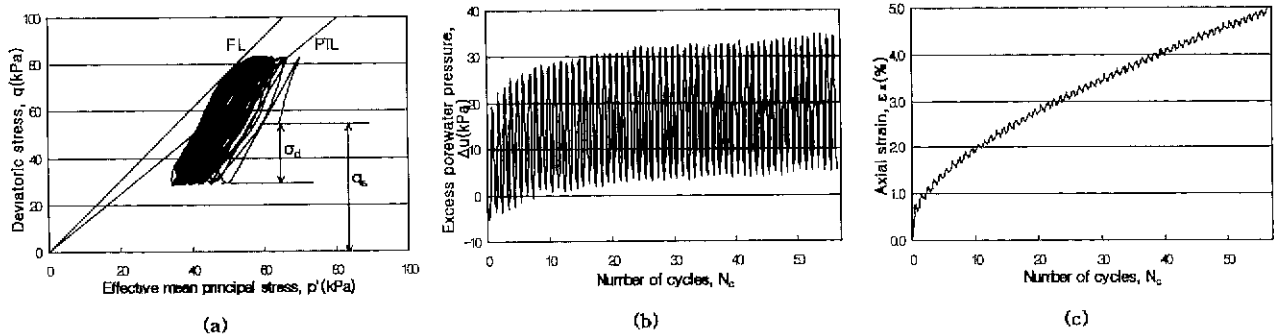


Fig. 2. Typical results of the pre-liquefaction cyclic triaxial tests for $K_c = K_o$ ($\sigma_{vc}' = 100\text{kPa}$, $\sigma_d/2\sigma_{vc}' = 0.14$, $\sigma_d = \pm 30\text{kPa}$)

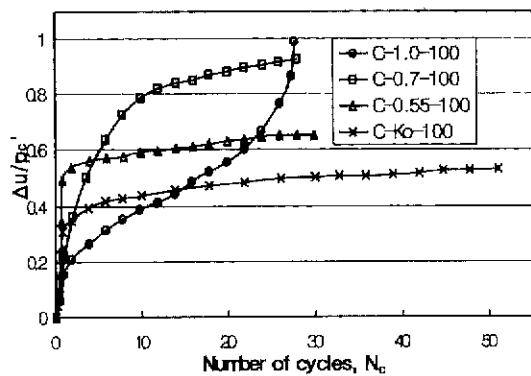


Fig. 3. Normalized uppermost excess pore water pressure, $\Delta u/p_c'$ versus number of cycles for various consolidation pressure ratios ($\sigma_d/2\sigma_{vc}' = 0.15$)

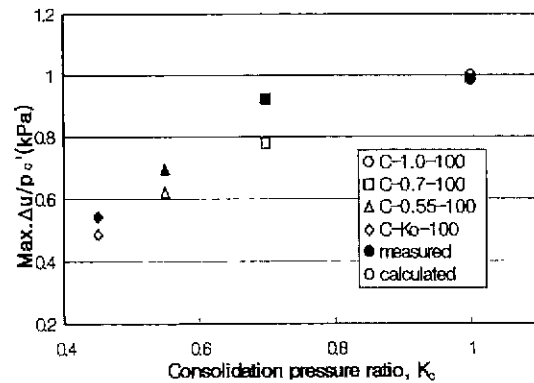


Fig. 4. Normalized maximum excess pore water pressure, $\max \Delta u/p_c'$ versus consolidation pressure ratio ($\sigma_d/2\sigma_{vc}' = 0.15$)

보이고 이 최대과잉간극수압은 유효구속응력에 미치지 못한다. 또한 축변형률에 있어서는 등방압밀의 경우와는 달리 양진폭변형률은 대단히 미소하나 영구변형률은 계속해서 증가한다. 이는 반복하중으로 인해서 과잉간극수압이 발생함에 따라 공시체내에 이미 작용하고 있는 초기정적응력에 의해서 변형이 계속되기 때문이다. 이러한 현상은 본 논문에서 제시하지 않았으나 압밀응력비가 0.7 및 0.55인 경우에도 일어났으며 이미 여러 학자들의 연구에 의해서 나타낸 바와 같다(Vaid와 Chern, 1983; Hyodo등, 1991, 1994).

동일한 반복응력($\sigma_d = \pm 30\text{kPa}$)에 의해서 발생한 과잉간극수압을 그림 3에 나타내었으며 최대치는 그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 압밀응력비가 클수록 증가한다. 즉 반복응력에 의한 최대과잉간극수압은 초기정적응력이 클수록 감소한다. 또한 Vaid와 Chern(1983)이 제시한 최종간극수압과 압밀응력비와의 관계식에 의해서 계산한 값과도 비교적 잘 일치함을 볼 수 있다.

동일한 반복응력비에 대해 액상화가 발생하는 반복회수와 압밀응력비와의 관계를 살펴보면 압밀응력비가 증가할수록 반복회수는 완만하게 감소한다(그림 8). 또한 20회

의 반복회수에서 액상화를 발생시키는 반복응력비 역시 압밀응력비가 증가할수록 감소한다(그림 9).

즉 공시체내에 이미 작용하고 있는 초기 정적응단응력이 감소할수록 액상화저항은 감소한다. 이러한 경향은 공시체의 상대밀도가 클수록 뚜렷하나 대단히 느슨한 경우는 반드시 그렇지 않다고 Vaid와 Chern(1983)은 밝힌바 있다.

3.2 액상화후 반복재하 거동

진술한 바와 같이 100kPa의 연직압밀응력으로 등방 및 이방압밀시킨 공시체에 대해 액상화 전후 상태에서 시행한 반복삼축시험 결과를 표 1에 나타내었다. 액상화를 경험한 등방압밀공시체의 경우 반복회수에 따른 과잉간극수압과 변형률의 증가형태는 액상화를 경험하지 않은 공시체와 비슷하나 초기액상화가 일어나는 반복회수는 공시체가 크게 조밀해졌음에도 불구하고 감소한다. 이러한 경향은 Finn등(1970), Ishihara와 Okada(1978), Suzuki와 Toki(1984), Vaid등(1989)의 연구결과와 유사하다.

이방압밀공시체의 경우에도 액상화후의 공시체는 액상

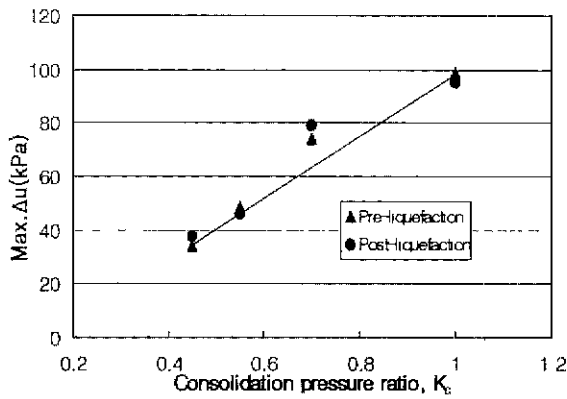


Fig. 5. Comparison of max. excess pore water pressure between pre-liquefaction and post-liquefaction($\sigma_{vc}'=100\text{kPa}$)

화전의 공시체와 마찬가지로 최대과잉간극수압은 유효구속응력보다 적게 발생하고 축변형률도 과잉간극수압이 최대치에 수렴하더라도 영구변형률이 계속해서 증가하는 경향을 나타낸다. 그러나 축변형률이 5%인 반복회수는 등방압밀공시체와는 달리 액상화전 공시체에 비해서 오히려 크게 증가한다. 액상화후의 최대과잉간극수압은 그림 5에서 볼 수 있는 바와 같이 액상화전 공시체와 마찬가지로 압밀응력비가 증가할수록 증가하며 또한 그크기도 액상화전과 비슷하다.

그림 6와 그림 7은 각각 등방압밀과 이방압밀공시체에 대해서 변형률 5%를 발생시키는데 필요한 반복응력비와 반복회수의 관계를 액상화전후 상태에서 비교하여 나타내었다. 그림 6에서 등방압밀공시체는 액상화를 경험하므로서 이후의 반복하중에 의한 액상화저항은 크게 감소함을 볼 수 있다. 이는 선행초기액상화로 인해서 공시체 전체의 상대밀도는 크게 증가했으나 공시체의 일부 상부층이 오히려 느슨해졌기 때문이라고 일부학자들은 주장하였다(Emery 등, 1973 ; Toki 등, 1981). Emery 등(1973)은 한번 액상화시킨 모래공시체를 젤라틴(gelatin)을 이용하여 고형화시키고 위치별 간극비의 변화를 측정한 결과 공시체 상부가 느슨해졌음을 확인하였다. 또한 Toki 등(1981)도 액상화를 경험시킨 삼축공시체내에 특별히 고안한 조그만 콘을 관입시키므로서 공시체 상부층이 현저하게 연약하다는 사실을 확인한 바 있다.

한편 선행액상화시에 발생한 상대밀도의 증가가 액상화후의 액상화저항에 미치는 영향을 조사하기 위해서 동일한 상대밀도 67.7%인 공시체를 따로 준비하였다. 이 공시체에 동일한 반복응력비(0.12)로써 반복하중을 가하여 액상화가 발생된 반복회수는 125회로서 액상화를 경험한 공시체의

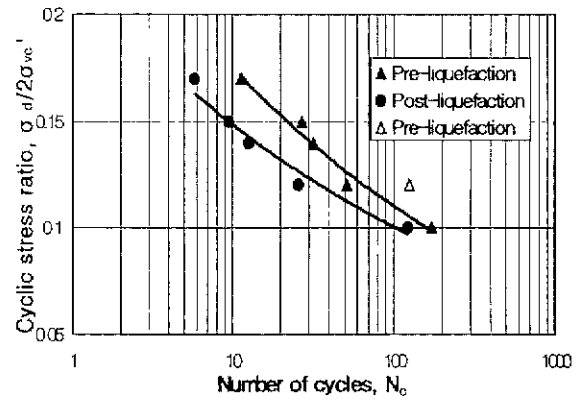


Fig. 6. Comparison of the liquefaction resistance between pre-liquefaction and post-liquefaction for $K_c=1.0$ (initial liquefaction)

25회보다 훨씬 크다(표 1 및 그림 6의 Δ 표시 참고). 즉 이 두 반복회수의 차이는 액상화로 인한 공시체의 상대밀도의 차이 이외의 또 다른 원인에 의해서 발생한 차이이다.

또한 다른 연구에 의하면 선행전단변형이 액상화저항에 큰 영향을 미친다. 즉 초기액상화처럼 큰 선행전단변형은 물론 비록 초기액상화는 일어나지 않았더라도 어느 정도의 큰 선행전단변형은 이후의 액상화저항을 감소시키는 반면 대단히 적은 선행전단변형은 액상화저항을 오히려 증가시킨다. Ishihara와 Okada(1973)는 이 선행전단변형의 경계를 상전이선(phase transformation line)개념을 이용하여 정의하였으나 이러한 경계설정은 대단히 느슨하거나 대단히 조밀한 모래의 경우에는 한계가 있다고 Tatsuoka 등(1978)은 밝혔다. 그리고 Suzuki와 Toki(1984)는 선행전단변형의 크기뿐만 아니라 방향에도 큰 영향을 받는다고 하였다. 즉 선행전단변형과 반대방향의 변형을 일으키는 반복하중 하에서는 높은 과잉간극수압이 발생하기 때문에 액상화저항이 감소한다고 하였다.

따라서 등방압밀공시체의 경우와 같이 응력반전이 일어날 경우 전단변형 역시 압축 및 신장의 두 방향으로 비교 적 큰 선행전단변형이 일어나므로 응력반전에 의한 선행전단변형을 받은 공시체는 이후의 반복하중에 대한 액상화저항이 크게 감소된다.

결론적으로 등방압밀공시체의 경우 액상화후의 반복하중에 대한 액상화저항이 감소되는 이유는 선행액상화시 공시체 상부의 느슨한 층의 형성과 응력반전에 따른 양방향의 상당히 큰 전단변형 때문이다.

그림 7은 이방압밀공시체기($K_c=K_0$) 영구변형률 5%로 규정한 액상화를 경험하므로서 이후의 반복하중에 의한 액상화저항이 등방압밀공시체와는 달리 크게 증가한다는 사실

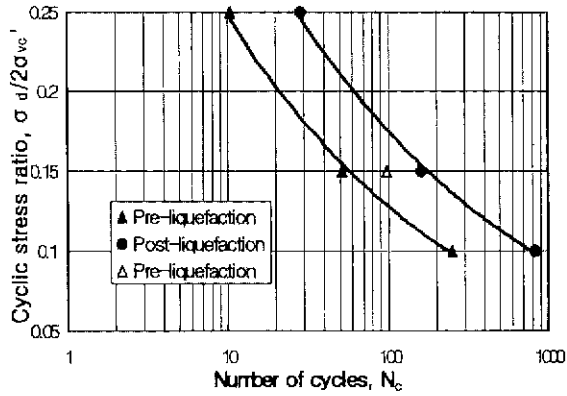


Fig. 7. Comparison of the liquefaction resistance between pre-liquefaction and post-liquefaction for $K_c=K_{c0}$ ($\varepsilon_v=5\%$)

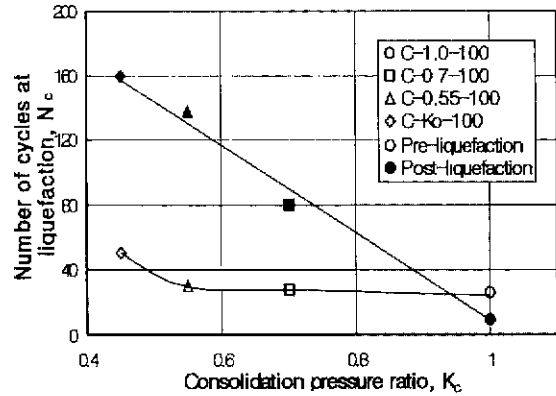


Fig. 8. Relationship between number of cycle at liquefaction and consolidation pressure ratio for both pre-liquefaction and post-liquefaction ($\sigma_d/2\sigma_{vc}'=0.15$)

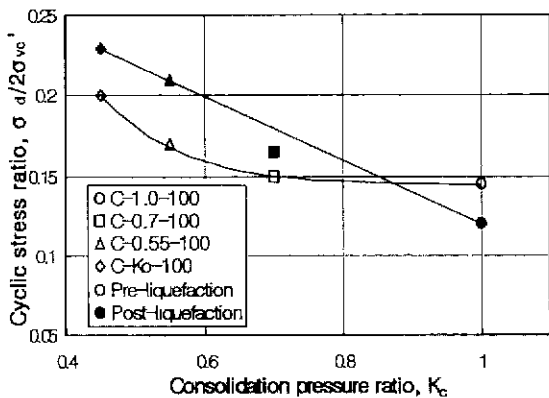


Fig. 9. Relationship between cyclic stress ratio for liquefaction and consolidation pressure ratio for both pre-liquefaction and post-liquefaction ($N_c=20$)

을 보여주는 그림이다. 이와 같은 이유는 액상화를 경험하므로써 공시체의 상대밀도가 증가되었을 뿐만 아니라 선행 액상화시 응력반전이 일어나지 않으므로 공시체 상부의 느슨한 층이 발생되지 않기 때문이다. 또한 이는 비록 선행전단 변형은 크게 발생하였으나 반복하중 작용시 일어나는 변형의 방향이 선행액상화시의 변형과 동일하기 때문이라고 생각된다.

그림 2(a)에서 볼 수 있는 바와 같이 선행제하시 응력경로가 단일하중에 의해서 구한 상전이선을 넘어 파괴선과 접촉하였는데도 불구하고 Ishihara와 Okada(1973)와 Suzuki와 Toki(1984)가 주장한 바와는 달리 액상화저항이 오히려 증가하였다. 이 경우에 있어서도 선행액상화시에 발생한 상대밀도의 증가로 인한 액상화저항의 증가량을 배제하기 위하여 압밀후의 상대밀도가 58.1%인 공시체를 따로 준비하여 동일한 반복응력비(0.15)로서 반복제하시킨 결과 98회의 반복회수에서 액상화가 발생하였다. 이 반복회수는 액상

화를 경험한 공시체와 비교되는 160회 보다 훨씬 적다. 이 차이는 적어도 상대밀도의 차이 이외의 다른 원인으로 인해서 증가된 반복회수이다. 이와 같은 경향은 압밀응력비가 0.7 및 0.55인 이방압밀 공시체의 경우에도 나타난다(표 1).

그림 8과 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 액상화를 경험한 공시체의 액상화저항은 액상화전 공시체와 마찬가지로 압밀응력비가 증가할수록 감소하나 감소율은 훨씬 크다. 그리고 액상화를 경험하므로써 이방압밀공시체의 경우 액상화저항은 증가하며 그 차이는 압밀응력비가 증가할수록 감소한다. 그러나 등방압밀공시체의 경우는 액상화저항이 오히려 감소함을 볼 수 있다.

4. 결론

보통 정도로 다진($D_r=50\%$) 실트질 모래 공시체를 여러 가지의 압밀응력비로서 등방 및 이방압밀 시키고 액상화를 경험하게 한 후 반복하중에 의한 비배수거동에 관해서 실험적으로 연구한 결과 아래와 같은 결론을 얻었다.

- (1) 동일한 평균압밀응력으로 구속된 공시체에 동일한 반복응력을 가했을 때 발생한 과잉간극수압의 최대치는 압밀응력비가 클수록 증가된다. 이러한 경향은 액상화를 경험했거나 경험하지 않은 공시체에 대해서 동일하며 최대과잉간극수압의 크기도 두 경우 거의 비슷하다.
- (2) 동일한 연직압밀응력으로 구속된 공시체의 반복응력에 의한 액상화저항은 공시체를 구속시킨 압밀응력비가 클수록 감소한다. 이러한 경향은 공시체의 액상화 경험 여부와 관계없이 동일하나 그 감소율은 액상화를 경험한

경우가 훨씬 크다.

- (3) 이방압밀공시체가 액상화를 경험하게되므로서 반복응력에 의한 액상화저항은 증가되며 증가량은 압밀응력비가 클수록 감소한다. 그러나 압밀응력비가 1.0인 등방압밀 공시체의 경우에는 액상화저항이 오히려 감소한다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 인하대학교 연구비 지원에 의해서 수행되었습니다. 이에 감사의 뜻을 표합니다.

참고 문헌

1. Carter, D. P. and Seed, H. B., (1988), "Liquefaction Potential of Sand Deposit under Low Levels of Excitation", Report No. UCB/EERC-88/11. Earthquake Engineering Research Center, University of California at Berkeley, pp. 1 ~ 85.
2. Finn, W. D. L., Bransby, P. L. and Pickering, D. J., (1970), "Effect of Strain History on Liquefaction of Sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 97, No. SM6, pp. 1917 ~ 1934.
3. Hyodo, M., Murata, H., Yasufuku, N. and Fujii, T., (1991), "Undrained Cyclic Shear Strength and Residual Strain of Saturated Sand by Cyclic Triaxial Tests", Soils and Foundations, Vol. 31, No. 3, pp. 60 ~ 76.
4. Hyodo, M., Tatumize, H., Yasufuku, N. and Murata, H., (1994), "Undrained Cyclic and Monotonic Triaxial Behavior of Saturated Loose Sand", Soils and Foundations, Vol.34, No.1, pp.19 ~ 32.
5. Ishihara, K., (1993), "Liquefaction and Flow Failure During Earthquake", Geotechnique, Vol.3, No.3, pp. 351 ~ 415.
6. Ishihara, K. and Okada, S., (1978), "Effects of Stress History on Cyclic Behavior of Sand", Soils and Foundations, Vol. 18, No 4, pp. 31 ~ 45.
7. Lee, K. L. and Seed, H. B., (1967), "Dynamic Strength of Anisotropically Consolidated Sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 93, No. SM5, pp. 167 ~ 190.
8. Long, H., Ries, E. R. and Michalopoulos, A. P., (1981), "Potential for Liquefaction Due to Construction Blasting", Proceeding International Conference on Recent Advance in Geotechnical Engineering and Soil Dynamics, University of Missouri-Rolla, St. Louis, Missouri, April, pp. 191 ~ 194.
9. Seed, H. B. and Lee, K. L., (1966), "Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp. 105 ~ 134.
10. Suzuki, T. and Toki, S., (1984), "Effects of Preshearing on Liquefaction Characteristics of Saturated Sand Subjected to Cyclic Loading". Soils and Foundations, Vol. 24, No. 2, pp. 16 ~ 28.
11. Szerdy, F. S., (1985), "Flow Slide Failures Associated with Low Level Vibrations", Ph. D. Thesis, Dept of civil engineering, University of California at Berkeley.
12. 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.
13. Vaid, Y. P. and Chern, J. C., (1985), "Cyclic and Monotonic Undrained Response of Saturated Sands", Advances in the art of testing soils under cyclic conditions, ASCE Convention, Detroit, Mich, pp. 120 ~ 147.
14. Vaid, Y. P., Chung, E. K. F., Kuerbis, R. H., (1989), "Preshearing and Undrained Response of Sand", Soils and Foundations, Vol 29, No.4, pp.49 ~ 61.
15. Vaid, Y. P. and Thomas, J., (1995), "Liquefaction and Post-liquefaction Behavior of Sand", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 121, No.2, pp.163 ~ 173.
16. Vaid, Y. P. and Sivathayalan, S., (1997), "Post-liquefaction Behavior of Saturated Sand under Simple Shear Loading", Proceeding 14th ICSMFE, Hamburg, Vol. 1, pp. 221 ~ 224.
17. Yasuda, S., Yoshida, N., Masuda, T., Nagase, H., Mine, K. and Kiku, H., (1995), "Shear-strain Relationships of Liquefied Sands", First Int. Conf. Earthquake Geotechnical Engineering, Kenji Ishihara(Ed), pp. 811 ~ 816.

(접수일자 2000 2 21)