

## 세립분 함유량에 따른 새만금준설토의 액상화 특성에 관한 연구

김유성<sup>1)</sup>, You-Seong Kim, 이수근<sup>2)</sup>, Soo-Guen Lee, 고흥우<sup>2)</sup>, Hyoung-Woo Ko

<sup>1)</sup> 전북대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

<sup>2)</sup> (주)경동기술공사 사원, A staff member, Kyongdong Engineering company

<sup>3)</sup> 전북대학교 토목공학과 박사과정, Doctor candidate, Dept. of Civil Engineering, Chonbuk National University

**SYNOPSIS :** A lot of dredging and reclaiming projects are recently under way in Korea for the efficient use of limiting land space. Saemanguem area is special case of reclaiming by dredged soil. In case of a confined disposal of dredged soils by a pump dredger, generally coarse grained soils are separated from fines with dropping at the near part of the pump dredger. This kind of separation of fine contents could be a factor of liquefaction by earthquake. In Korea, recently, earthquakes with magnitude of 3.0 or higher are distinctively increasing in 1990. In this study, cyclic shear characteristics of Saemanguem Dredged sand depending on fine content were analyzed. A series of undrained cyclic triaxial test with cyclic stress ratio ( $\sigma_d/2\sigma_{vc}'$ ) were performed on both isotropic consolidated specimen and sand with fine contents of 0%, 5%, 15%, 30%, 40% under the effective vertical stress of 100kPa and 50% and 60%, 70% of relative density for fine content of 0%, respectively. In the test results, cyclic shear strength increased by increasing of cyclic stress ratio( $\sigma_d/2\sigma_{vc}'$ ) with increasing the relative density at the same number of cyclic under the effective confining pressure of 100kPa. It is almost highest the double amplitude(DA) 1%, 3%, 5%, 7.5% and 10% at fine content of 15% between Cyclic stress ratio( $\sigma_d/2\sigma_{vc}'$ ) value at cyclic number five and fine content. Number of cyclic is 30 under the effective vertical stress of 100kPa, 70% of relative density for fine content of 15%. when the cyclic stress ratio at each relative density was compared at cyclic number five, the double amplitude(DA) 1%, 3%, 5%, 7.5% and 10%, and the pore-pressure ratio ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95 value were compared; under the relative density of 70% and the effective confining pressure of 100kPa. The pore-pressure ratio ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95 value showed a similar trend to the double amplitude (DA) 5% line.

**Keywords :** Cyclic Triaxial Test, Liquefaction, Dredged Sand

### 1. 서 론

삼면이 바다인 우리나라에서는 협소한 국토의 효율적 사용을 위하여 서, 남해안을 중심으로 해안매립이 꾸준히 증가하고 있는 추세이다. 지난 62년 이후 전국 연안지역에 만들어진 해안매립지는 2648곳 3억 7783만 $m^2$ 이고 현재 매립중인 곳만도 83곳 7억 2476만여 $m^2$ 에 이른다.(해양수산부) 인천국제공항, 울진공단, 아산만 국가공업단지, 광양만 공업단지 등이 수심이 얇은 해안지역 매립을 통하여 조성된 부지들이다. 1991년 공사가 시작된 이후, 최근 방조제 물막이 공사를 완성한 새만금간척지역 역시 해안지역 매립의 대표적인 예이다. 이러한 매립지반의 경우 지진이 발생하게 되면 액상화 현상이 발생하여 지진 피해가 가중될 가능성이 매우 높기 때문에 투수성이 좋고 압축성이 작은 사질토로 매립해야 한다. 그러나 최근에는 자연과피 및 경제적인 이유로 준설토를 이용한 매립이 대부분이고, 새만금 방조제 역시 준설토를 이용한 매립이다. 준설토를 이용한 매립은 일반적으로 펌프준설선에 의해 매립지에 투입되는데 투입시 조립토와 세립분이 분리되어 불균형한 입도분포를 형성하게 된다. 세립분은 액상화 강도에 영향을 미치는 요인 중 하나로서 최근에는 세립분 함유량이 액상화 가능성에 끼치는 영향에 대한 연구가 여

러 관점에서 진행되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 새만금 준설토의 세립분이 액상화 거동에 미치는 영향과 원인을 알아보기 위하여 세립분을 배제한 상태로 상대밀도와 축차응력을 변화하여 비배수 반복삼축 압축시험을 수행하였다. 또한 세립분의 함유량을 달리한 시료를 만들어 최대 및 최소간극비의 변화특성을 알아보고 액상화가 발생하는데 상대밀도와 축차응력, 세립분 함유량이 미치는 영향을 파악하여 새만금 준설토의 액상화 특성을 평가하는데 그 목적이 있다. 새만금 준설토의 경우 입도분포시험 결과 점토를 0.5%포함하고 있으나, 그 양이 미량이므로 본 연구에서는 준설토에서 세립분으로서 실트만을 취해 함유율에 따른 액상화 강도에 관한 연구를 수행하여 점토의 영향은 배제하였다. 세립분의 함유율은 0%, 5%, 15%, 30%, 40%로 달리하였으며 세립분이 0%인 경우에만 상대밀도를 50%, 60%, 70%로 변화시켰으며 각각의 상대밀도에 따른 세 종류의 축차응력을 가해 시험을 진행하였다. 나머지 함유율의 경우 상대밀도는 70%, 축차응력은 40kPa로 제한하였다. 시료는 진동다짐법을 이용하여 성형하였으며 직경 75mm, 높이 150mm의 원주형 시료를 이용하였다. 진동수는 0.1Hz로 고정하였고 유효구속압은 모두 100kPa로 동일하였다. 압밀은 등방압밀만을 선행하여, 제한된 범위에서 비배수 반복삼축압축시험을 수행하였다.

## 2. 대상토 및 시험조건

본 연구에서 사용한 시료는 새만금 준설토로서 모래와 실트 외의 이물질을 제거하기 위하여 0.425mm 체로 체가름 하였으며 체가름 한 시료에 대해 모래는 #40번체를 100% 통과하고 #200번체에 남는 모래를 사용하였다. 세립분 함유량이 0%인 모래의 최대간극비 및 최소간극비는 각각  $e_{max} = 1.183$ ,  $e_{min} = 0.749$ 이다. 최대상대밀도와 최소상대밀도는 농촌공사 새만금사업단시험실에 있는 상대밀도 시험기를 이용하여 비점성토의 상대밀도 시험방법(KSF2345)으로 시험을 실시하였다. 최대상대밀도는 3회, 최소 상대밀도2회를 측정하여 평균한 값으로 결정하였으며 실험에 이용한 시료의 세립분 함유량에 따른 물리적 성질은 표 2.1에 나타내었다. 세립분은 본래 새만금 준설토에 함유된 입자로서 #200번체를 100%통과하고 #325번체에 남는 것을 이용하였다. 이와 같은 방법으로 준비된 모래와 세립분을 건조중량비로 100 : 0, 95 : 5, 85 : 15, 70 : 30, 60 : 40으로 혼합하여 상대밀도에 따른 시료를 제작하여 실험에 이용하였다.

표 2.1 세립분 함유량에 따른 각 시료의 물리적 특성

시료	$G_s$	$D_{50}$	$\gamma_{dmax}$	$\gamma_{dmin}$	$e_{min}$	$e_{max}$	$e_{max} - e_{min}$
sand	2.653	0.135	1.517	1.201	0.736	1.209	0.469
F.C 5%	2.663	0.124	1.530	1.207	0.742	1.206	0.465
F.C 15%	2.672	0.111	1.559	1.218	0.722	1.194	0.466
F.C 30%	2.685	0.089	1.548	1.211	0.734	1.210	0.475
F.C 40%	2.696	0.080	1.541	1.213	0.750	1.217	0.473

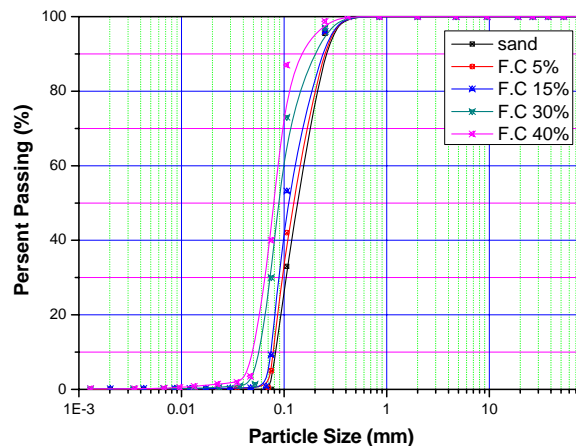


그림 2.1 세립분 함유량에 따른 입도분포곡선

### 3. 시험과정 및 결과

#### 3.1 시험과정

본 연구에서는 반복압밀비배수삼축시험을 실시하였다. 시험에 사용된 시료는 일정 상대밀도로 제작하기 위해 총 5층으로 나누어서 건조한 대상토를 낙하고 없이 퇴적되게 하였고, 몰드를 고무망치로 두드려 시료를 제작하였으며 시료크기는 지름 75mm, 높이 150mm이다. 이러한 방법으로 제작한 시료를 이중부압법을 이용하여 포화한 후 B-value 0.95이상의 시료만 사용하여 압밀한 후 비배수조건으로 반복삼축시험을 수행하였다. 표 3.1은 실시한 시험의 조건을 나타내고 있다.

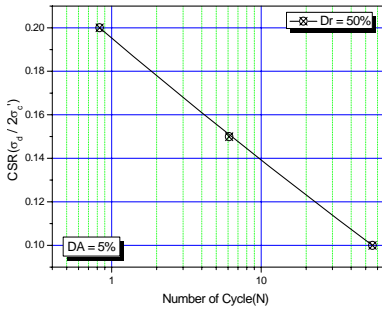
표 3.1 시험 조건

시료	세립분함유량 (%)	상대 밀도	유효구속압 ( $\sigma'_c$ )	축차응력 ( $\sigma'_d$ )	재하속도 (Hz)
새만금 준설토	0	50	100	20, 30, 40	0.1
		60		30, 40, 50	0.1
		70		40, 50, 60	0.1
	5	70	100	40	0.1
	15			20, 40, 60	0.1
	30			15, 40, 60	0.1
	40			30, 40, 80	0.1

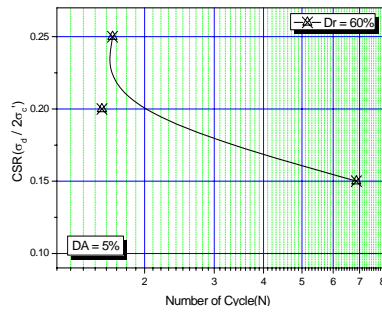
#### 3.2 시험결과

##### 3.2.1 상대밀도 변화에 따른 액상화 강도의 변화

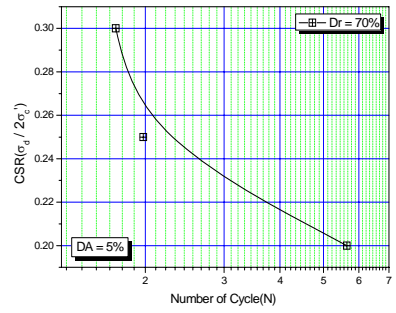
그림 3.1에 세립분의 함유율이 0%일 때 대표적으로 양진폭변형률 5%일 때 각각의 상대밀도에 따른 반복응력비( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ )와 반복횟수와의 관계를 나타내었다. 그림 3.2, 3.3에는 위와 같은 방법으로 양진폭변형률 1%, 3%, 5%, 7.5%, 10%에서 상대밀도에 따른 반복응력비( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ )와 반복횟수와의 관계를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 동일 반복재하 횟수에서 상대밀도가 높아질수록 반복응력비( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ )가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.4에는 반복횟수 5회일 때 대응하는 반복응력비의 값을 양진폭변형률을 기준으로 상대밀도와 응력비의 관계를 나타내고 있다. 여기서 양진폭변형률 1%, 3%의 그래프는 완벽히 나타낼 수는 없었지만 이외의 양진폭변형률에서 상대밀도가 높을수록, 양진폭변형률(DA)가 클수록 반복응력비가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3.5는 상대밀도 50%, 60%, 70%일 때 양진폭변형률 1%, 3%, 5%, 7.5%, 10%에서 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95 일 때 반복횟수와 반복응력비로 나타낸 것이다. 상대밀도 50%일 때는 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95값이 양진폭변형률 10%와 유사 했으며 상대밀도 60%일 때는 양진폭변형률 3%와 5% 중간의 값을 보였다. 상대밀도 70%일 때는 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95값은 양진폭변형률 5%와 비슷한 값을 보였다.



상대밀도 50%

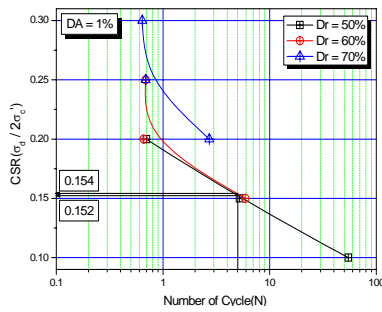


상대밀도 60%

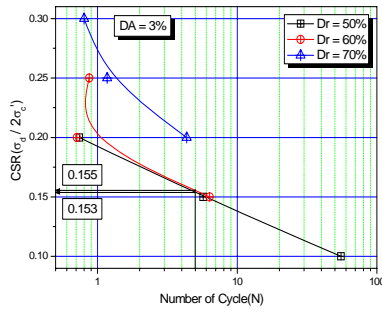


상대밀도 70%

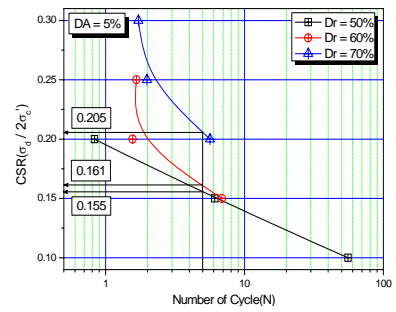
그림 3.1 반복횟수와 반복응력비 관계 (세립분 0%, 구속압 100kPa, DA 5%)



DA=1%

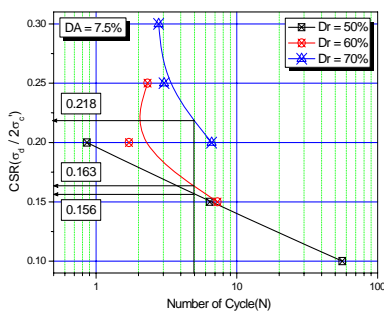


DA=3%

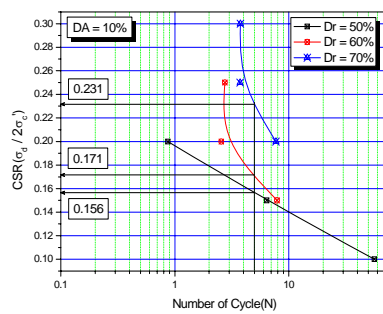


DA=5%

그림 3.2 상대밀도에 따른 반복횟수와 응력비의 관계(세립분 0%)



DA=7.5%



DA=10%

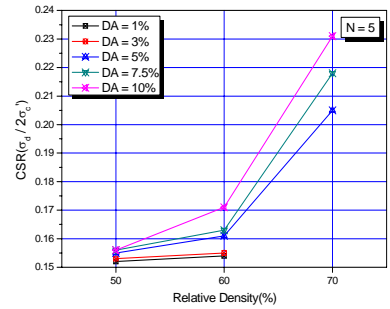
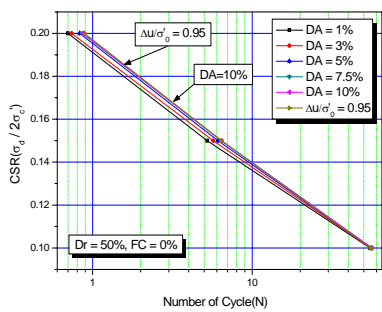
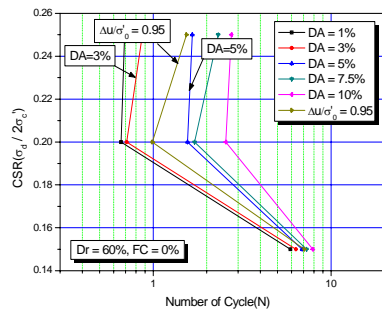


그림 3.4 양진폭변형률(DA)에 따른 상대밀도와 응력비 관계(세립분 함유량 0%, N=5)

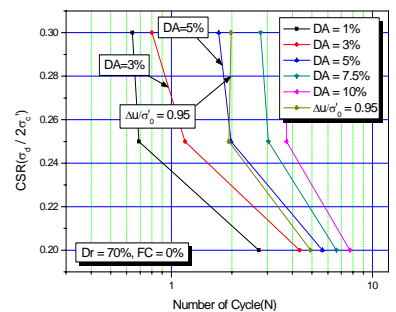
그림 3.3 상대밀도에 따른 반복횟수와 응력비의 관계(세립분 0%)



상대밀도 50%



상대밀도 60%



상대밀도 70%

그림 3.4 양진폭변형률에 따른 간극수압비0.95값의 강도 곡선 (세립분함유량 0%, N=5)

### 3.2.2 세립분 함유율에 따른 액상화 강도의 변화

그림 3.5는 상대밀도가 70%일 때 세립분 함유율 0%, 15%, 30%, 40%의 변화에 따른 반복응력비 ( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ )와 양진폭변형률이 5%일 때의 반복횟수와 관계의 관계를 각각 나타낸 것이다. 그림 3.6에 위와 같은 방법으로 비교적 조밀한 상태인 상대밀도 70%일 때 양진폭변형률 1%, 3%, 5%, 7.5%, 10%에서 각각의 세립분 함유율의 변화에 따른 반복횟수와 응력비의 관계를 나타내었다. 양진폭변형률 1%, 3%일 때 세립분의 함유량이 15%까지는 반복응력비가 증가하는 경향이 있으나 세립분 함유율 30%와 40%는 불규칙성을 나타내었다. 양진폭변형률 7.5%, 10%에서는 불규칙성을 보이던 세립분 함유율 30%와 40%가 일정한 경향을 보이기 시작하였는데 세립분 함유율 40%일때가 30%일때보다 반복응력비가 더 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 비교적 조밀한 상태인 상대밀도 70%를 갖는 새만금 준설토를 이용한 공시체에서 한계실트 함유량을 초과한 후 반복 응력비가 급격히 감소하는 경향을 살펴 볼 수 있다. 기존의 연구 결과 중에는 세립분(실트)의 함유량이 증가하면 액상화 강도가 증가하거나(Chang etc, 1982) 감소하고(Tronsco와 verdugo, 1985) 또는, 임의의 함유량까지 감소하다가 다시 증가한다고(Koester, 1994)하는 연구 결과가 있다. 그림 3.7은 유효구속압 100kPa, 상대밀도 70%일 때 세립분 함유율에 따른 양진폭변형률 1%, 3%, 5%, 7.5%, 10%에서 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95 일 때 반복횟수와 반복응력비로 나타낸 것이다. 세립분 함유율 40%일 때를 제외하고는 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95값이 양진폭변형률 5%와 유사 하거나 양진폭변형률 3%와 5% 중간의 값을 보였다. 양진폭변형률 5%와 간극수압비( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95값은 다소 차이를 보였다. 한계실트 함유량을 초과한 후 생기는 반복응력비의 감소는 다음 그림에서도 살펴볼 수 있다. 그림 3.8은 반복 횟수 5회일 때 대응하는 반복응력비의 값을 양진폭변형률을 기준으로 세립분의 함유율과 응력비의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서도 알 수 있듯이 실트 함유량 15%가량에서 가장 큰 반복응력비( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ )의 값을 보이고 있다. 그림3.9는 상대밀도 70%일 때 반복응력비( $\sigma'_d / 2\sigma'_c$ ) 0.2를 기준으로 세립분의 함유율과 반복횟수와의 관계를 나타낸 것으로 이 그림에서도 알 수 있듯이 같은 상대밀도(조밀한 상태)와 반복응력비 조건에서 세립분 함유율 15%일 때 반복횟수가 약 30회로 가장 많았다.

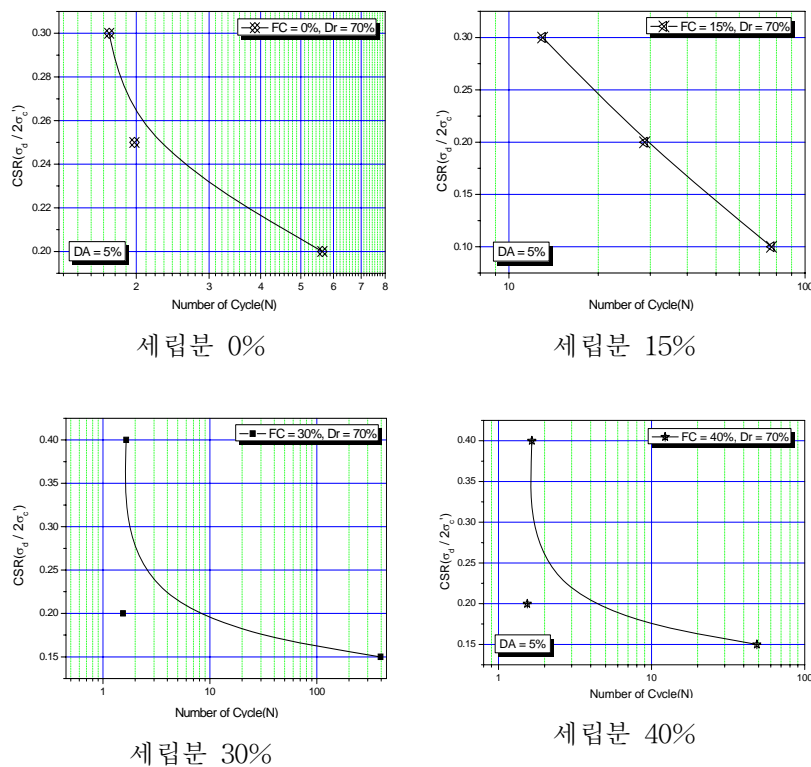
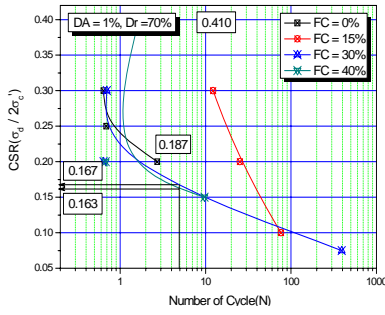
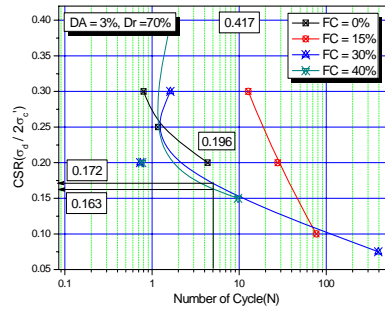


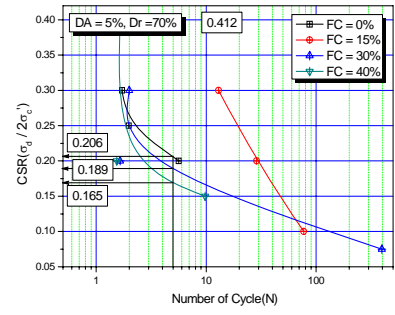
그림 3.5 반복횟수와 반복응력비 관계(상대밀도 70%, 구속압 100kPa, DA 5%)



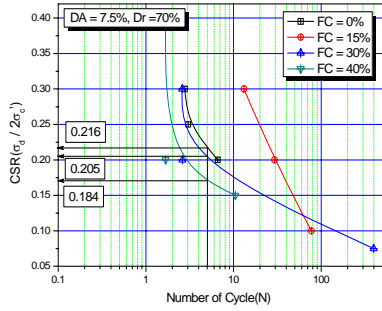
DA=1%



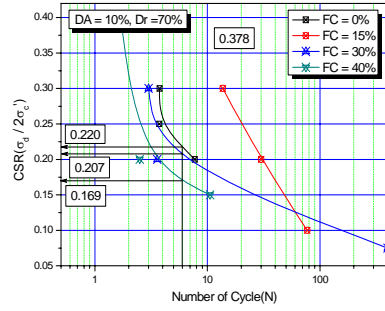
DA=3%



DA=5%

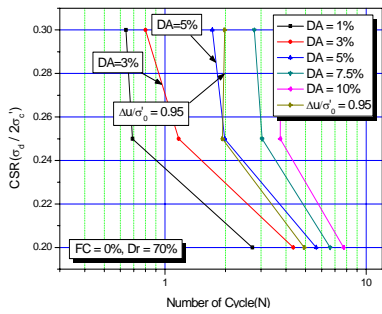


DA=7.5%

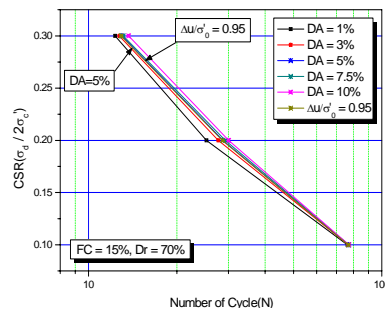


DA=10%

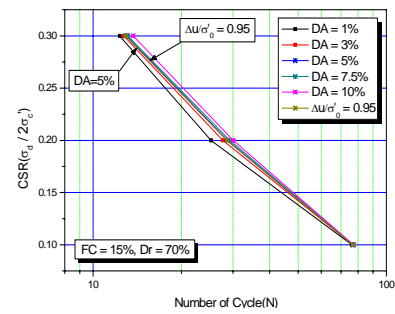
그림 3.6 세립분 함유량에 따른 반복횟수와 응력비의 관계  
(상대밀도 70%, 구속압 100kPa)



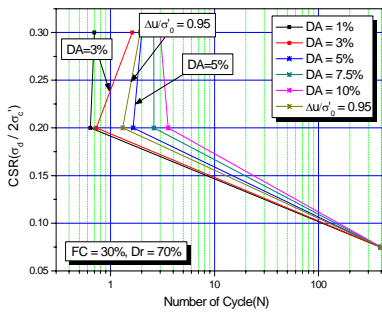
세립분함유량 0%



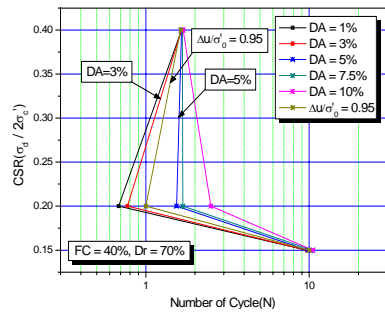
세립분함유량 15%



세립분함유량 15%



세립분함유량 30%



세립분함유량 40%

그림 3.7 양진폭변형률에 따른 간극수압비0.95값의  
강도 곡선(상대밀도 70%, N=5)



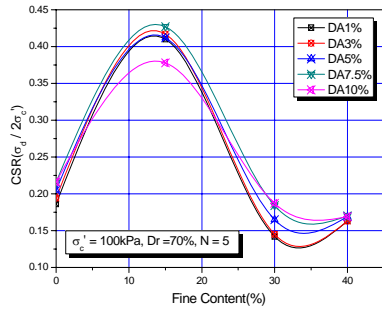


그림 3.8 양진폭변형률에 따른 세립분 함유량과 응력비 관계 (구속압 100kPa, 상대밀도 70%, N=5)

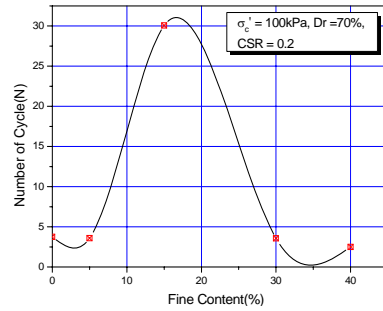


그림 3.9 세립분 함유량과 반복횟수와의 관계(CSR=0.2, 구속압 100kPa, 상대밀도 70%)

#### 4. 결론

본 연구에서는 반복삼축시험을 이용하여 세만금준설토에 세립분의 함유량이 액상화 강도에 미치는 영향을 연구하기 위하여 구속압 100kPa, 상대밀도 70%에 한하여 세립분 함유량을 0%, 5%, 15%, 30%, 40%등으로 변화시켜 시험을 시행하였다. 또한 세립분 함유량 0%에 한하여 구속압 100kPa일 때 상대밀도를 50%, 60%, 70%로 변화를 주어 실험을 수행한 결과 다음과 같은 연구 결과를 얻었다.

- 1) 구속압 100kPa, 함유량 0%에 한하여 동일 반복재하 횟수에서 상대밀도가 높아질수록 반복응력비가 증가하여 액상화 강도가 증가하였고, 양진폭변형률(DA) 역시 증가한다.
- 2) 반복횟수 5회일 때 상대밀도(Dr=70%)와 반복응력비(CSR=0.2) 조건에서 세립분 함유율 15%일 때 액상화 강도가 가장 크게 나타났다.
- 3) 구속압 100kPa, 상대밀도 50%, 60%, 70%에 따른 응력비와 반복횟수와의 관계에서 간극수압비 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95의 값은 다소 불규칙적이거나 양진폭변형률 5%에 가깝고, 세립분 함유율에 따른 간극수압비 ( $\Delta u / \sigma'_c$ ) 0.95의 값은 대체적으로 양진폭변형률 5%와 일치한다.

#### 감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁 시행한 2007년도 건설핵심기술연구 개발사업(과제번호 : R&D/04-A01-02)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 김영수(2004). “연약 매립 지반상 철도노반의 액상화 평가연구”, 석사학위논문, 서울산업대학교
2. 김태훈(2000). “실트질 모래 지반의 액상화 특성”, 공학석사학위논문, 서울시립대학교.
3. 이송 외(1999), 반복삼축시험에 의한 실트 모래지반의 액상화 특성연구, 한국지반공학회 논문집 제 15권.
4. 정두영(1994), 해성실트질 모래지반의 지진시 액상화예측에 관한 연구, 전북대학교 대학원 박사학위 논문.

5. 최두현(2000). “새만금 준설 모래의 동적 액상화 거동 특성”, 석사학위 논문, 원광대학교
6. 한국지진공학회(1997), 한국건설기술연구원, “내진설계기준 연구(Ⅱ)”, 건설교통부, pp.29~41.
7. 한국해양연구소(1999), “항만 및 어항시설의 내진설계표준서”, 해양수산부, pp. 41~96
8. 황대진(1994), “실트를 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 미치는 재하속도의 영향”, 대한지반공학회 지, 제10권 제4호, pp. 119~131
9. 황대진(1993), “실트질을 포함하는 모래질 흙의 액상화강도에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, pp. 243~252
10. 吉見吉昭(1991), “모래지반의 액상화”, 원기술.
11. 石原 研而(1976), “土質動力學の基礎”, 鹿島出版會
12. 日本 地盤工學會(2000), “土質試驗の方法と解説 第1回改訂版“
13. Andrews, D. C. A. and Martin, G. R.(2000), "Criteria for Liquefaction of Silty Soils", 12th World Conference on Earthquake Engineering, Proceedings, Auckland, New Zealand.
14. Castro, G., "Liquefaction of sands", Harvard Soil Mechanics Series 87, Harvard University, Cambridge, Massachusetts, 1969.
15. Cetin, K. O. and Seed, R. B.(2001), "Nonlinear Shear Mass Participation Factor for Cyclic Shear Stress Ratio Evaluation", Research Report No. UCB/GT-200/08, Univ. of California ,Berkeley
16. Das, B. M., Puri, V. K., and Prakash, S., "Liquefaction of silty soils", Earthquake Geotechnical Engineering, Balkema, Vol.2, 1999, pp. 619~623
17. Erten, D. and Maher, M. H., "Cyclic Undrained Behavior of Silty Sand", Journal of Soil Dynamic and Earthquake Engineering, Vol.14, 1995, pp 115~123
18. Finn, W. D. L., Pickering, D. J., and Bransby, P. L., "Sand Liquefaction in Triaxial and Simple Shear Tests", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol.97, No. SM4,
19. Ishihara, K.(1977), "Simple Method of Analysis for Liquefaction of Sand Deposits during Earthquakes", Soils Found., Vol.17(3).
20. Ishihara, K., Tatsuoka, F., and Yasuda, S., "Undrained Deformation and Liquefaction of Sand Under Cyclic Stresses", Soil and Foundations, Vol.15, No.1, Mar. 1975, pp. 29~44
21. Iwasaki, T., Tatsuoka, F., Tokida, K. and Yasuda, S. "A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various site in Japan", Proc. 2nd Int. Conf. on Microzonation for Safer Construction : Research and Application, 2, 1978, pp. 885~896
22. Lee, K. L., and Seed, H. B., "Cyclic stress condition causing liquefaction of sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 93(6), 1967, pp. 117~141.