

비소성실트지반의 액상화 및 측방유동량 예측

Prediction for Liquefaction and Lateral Flow on Non-plastic Silt

양 태 선¹⁾ · 송 병 웅[†]

Yang, Taeseon · Song, Byungwoong

ABSTRACT : It is well known all much information for evaluation on possibility of liquefaction and lateral flow for sand over the world. Recently, it is started to be known that liquefaction happens on non-plastic silt, too. But cyclic and post-cyclic characteristics for non-plastic silt is a few familiar to the world. Specially, it is not aware of the estimating method for lateral flow on non-plastic silt. The main purpose in this paper is to propose the evaluation for liquefaction and lateral flow on non-plastic silt. The method used in this research is that possibility for liquefaction on non-plastic silt was evaluated with cyclic direct simple shear test, and then residual strength was estimated with static shear test. Through the test results liquefaction on non-plastic silt is well not happened but strength decreases rapidly with increasing shear stress. With the proposed method it can be evaluated possibility of liquefaction and propose lateral flow.

Keywords : Non-plastic silt, Liquefaction, Lateral flow, Cyclic direct simple shear test

요 지 : 모래지반의 액상화 발생 가능성 및 측방유동 평가 방법에 대한 연구는 많이 알려져 있다. 최근에는 비소성 실트의 액상화 발생 가능성에 대해서도 연구하고 있다. 그러나 비소성실트의 동적하중이 작용하는 동안과 그 이후의 거동에 대해서는 세계적으로도 다소 알려져 있을 뿐이다. 특히 비소성실트의 측방유동에 대한 평가방법에 대해서는 거의 알려져 있지 않다. 이에 본 연구에서는 비소성실트지반에서의 액상화 발생 가능성 및 측방유동량의 평가 방법을 제안하는 것을 목적으로 하였다. 연구방법은 정적 및 동적 시험을 수행할 수 있는 직접단순전단시험기를 이용하여 동적하중을 받은 비소성실트의 액상화 가능성을 평가하였으며, 그 후 정적 시험을 수행하여 잔류강도를 측정하였다. 이 시험결과 비소성실트는 유효응력이 완전히 소멸되는 것은 곤란하지만 액상화에 거의 가깝게 발생하는 것을 확인하였다. 특히, 전단응력의 증가에 따른 강도저하는 매우 현저한 것을 확인하였다. 이 시험결과를 이용하여 액상화 발생 가능성 및 측방유동량을 추정할 수 있는 방법을 제안하였다.

주요어 : 비소성실트, 액상화, 측방유동, 동적단순전단시험

1. 서 론

액상화가 세상에 알려진 이후로 약 50여 년이 지났으며 그 동안 전 세계의 많은 학자와 기술자들이 액상화에 관하여 많은 연구와 기술을 개발하였다. 1964년 일본 니가타(新潟)현에서 발생한 모래지반에서의 액상화 피해, 1989년 미국 Loma Prieta 해양연구소에서 세립분을 함유한 흙의 액상화와 그 후의 측방유동이 보고되었고, 1994년 미국의 Northridge지진의 경우에는 실트질 모래에서 액상화 후의 측방유동과 같이 점토지반에서 반복응력 후 지반변위가 발생한 것으로 보고 되어 있다(濱田 등, 1986; Boulanger 등, 1998; Holzer 등, 1999).

1995년 일본 효고현 남부지진의 경우에는 화강풍화토와 자갈 등으로 구성된 지반에서 대규모 액상화 및 측방유동이 발생하였다(Hamada 등, 1996). 그리고 2000년 일본 토토리

현 서부지진에서는 비소성실트 지반에서 일어난 액상화에 의한 피해 사례가 보고되었다(Song, 2003b).

하지만 기존의 국내외 연구성과를 분석하면 세립분을 포함한 모래지반에서의 액상화 발생 가능성 여부에 대해서만 중점적으로 연구하였다. 몇 편의 연구성과에서는 세립분을 포함한 모래지반에서도 모래와 같이 액상화가 발생하지만 그 측방변위량은 작다는 연구 성과 정도까지만 알려지고 있다(濱田 등, 1986; Boulanger 등, 1998; Holzer 등, 1999).

이에 본 연구에서는 연구자료가 많지 않은 비소성실트 지반에서의 액상화 발생가능성 및 그 특성과 액상화 발생 후 예상되는 측방유동량을 평가하는 방법에 대하여 제안하고자 한다. 연구 방법은 반복하중시험과 반복하중 후 정적 시험을 바로 수행할 수 있는 직접단순전단시험기를 이용하여 시험을 수행하였다. 본 연구에 이용된 비소성실트는 일본의 공장에서 생산되어 판매되는 제품을 사용하였다.

1) 비회원, 김포대학 건설정보과 부교수

† 정회원, (주)다산컨설팅 토목1사업본부/지반부 이사(E-mail : songbw@dasan93.co.kr)

2. 시험개요

본 연구에서 이용한 시험장치는 일본 이바라키(茨城) 대학에 있는 NGI형 직접단순전단시험장치를 사용하였다. 실험은 직경 70mm, 높이 30mm의 원형공시체를 자유낙하 방식으로 제작하여 K_0 압밀조건하에서 압밀 시킨 후, 정체적조건에서 초기구속응력을 조절해서 전단시험을 행하였다. 과잉간극수압은 반복전단응력을 가한 전후의 연직유효응력 차로 결정하였다(Song, 2003a; Song 등, 2003; 宋炳雄 등, 2004; Song 등, 2004; 송병웅 등, 2005).

그림 1은 본 연구에서 이용한 비소성실트의 입도분포곡선이며 이 재료는 공장에서 암석을 분쇄하여 만든 제품이다. 한편, 표 1은 본 연구에서 이용한 흙의 특성을 정리하였다(宋炳雄 등, 2004).

본 연구에 사용한 시료는 재성형 후 일정한 구속압을 가한 상태에서 전단시험을 수행하였고 표 2에 정리하였다. 본 연구에서 수행한 전단시험은 연직구속응력을 196 kPa 까지 가한 후 정체적상태를 유지하며, 응력제어방법으로 0.1 Hz

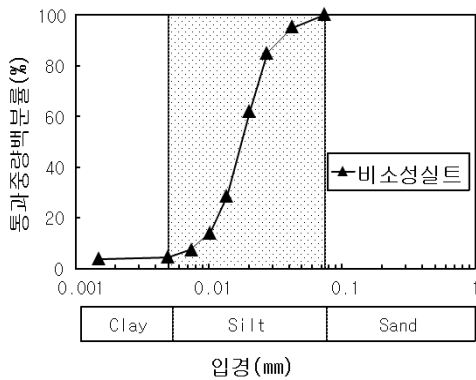


그림 1. 입도분포곡선

표 1. 흙의 특성

항 목	DL 실트
비 중 Gs	2.64
유효내부마찰각 ϕ (°)	23
최대간극비 e_{max}	1.47
최소간극비 e_{min}	0.71

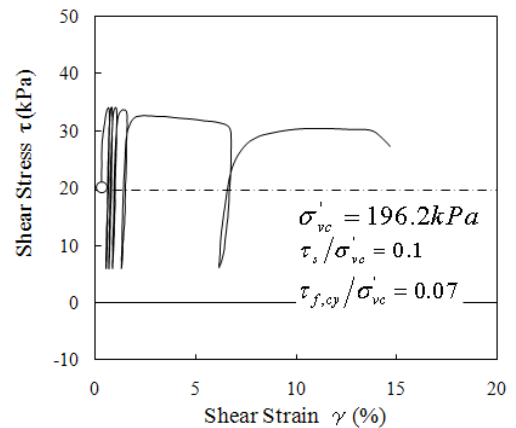
표 2. 구속압을 가한 전후 공시체의 상태

항 목	DL실트	
연직구속응력 (kPa)	196	
간극비 e	압밀 전	1.16
	압밀 후	0.94
여유간극비 ef	0.23	
상대밀도 Dr (%)	압밀 전	42(평균)
	압밀 후	70(평균)

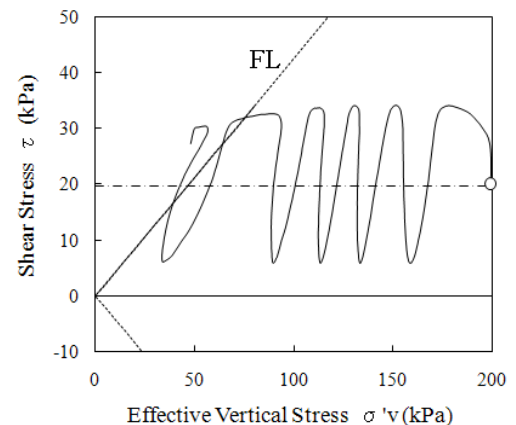
의 정현파를 최대 50회까지 반복하중을 가하였고 전단변형률은 $\pm 10\%$ 까지 측정하였다(Song, 2003a; Song 등, 2003; 宋炳雄 등, 2004; Song 등, 2004).

3. 비소성실트의 액상화 발생 가능성 평가

그림 2는 비소성실트에 대한 시험결과를 나타낸 그림이다. 그림 2에 의하면 비소성실트는 반복하중에 대한 전단저항력이 작아 유효응력이 절반 이하로 저하하는 속도가 매우 빠른 것을 알 수 있다. 그림 2(a)에 의하면 유효연직구속압은 심도 20m에서 액상화가 발생할 수 있는 최대의 심도를 가정한 구속압을 가정하였다. 초기전단응력도 연직구속압의 10% ($\tau_s/\sigma'_{vc}=0.1$)이며 반복하중은 연직하중의 7% ($\tau_{f,cy}/\sigma'_{vc}=0.07$) 정도로 작았음에도 불구하고 5회 정도의 반복하중에 의하여 전단변형률이 15% 정도 크게 변형률이 발생한 것을 알 수 있다. 그림 2 (b)에 의하면 반복하중에 의한 유효연직응력 저하가 매우 빠르게 발생하였으며 초기전단응력의 영향으로 액상화 발생 전에 파괴에 도달한 것을 알 수 있다.



(a) 전단응력과 전단변형률과의 관계



(b) 전단응력과 유효연직응력과의 관계

그림 2. 초기전단응력의 영향을 받은 비소성실트의 특성

그림 3은 초기전단응력의 영향이 없는 상태에서 반복전단응력비 CSSR에 의하여 발생한 피크전단변형률 γ_p 이 1%에서 10%까지 도달할 때까지 가한 재하회수 N_c 를 찾아 나타낸 것이다. 여기서 피크전단변형률 γ_p 은 진동삼축시험에서 구하는 양진폭변형률 DA의 개념을 직접단순전단시험에 응용한 것이다. 진동삼축시험에서 양진폭변형률(체적변형률) DA가 5%일 경우에 액상화 강도를 구하므로 같은 원리를 이용하여 직접단순전단시험에서는 액상화발생 시 포아슨 비가 0.5에 근접하므로 양진폭변형률(전단변형률) DA를 7.5%인 경우에 구하게 된다(地盤工學會, 2000).

본 연구에서는 초기전단응력의 영향도 고려하여 시험을 수행하였으므로 이러한 경우에 발생하는 전단변형률이 초기전단응력의 영향을 받은 방향으로 진행하여 양진폭변형률 DA를 피크전단변형률 γ_p 이라는 용어로 변형하여 발생하는 전단변형률을 정리하였다. 본 연구에서는 피크전단변형률 γ_p 이 10%에 도달하기 전에 과잉간극수압비 NPP가 0.95 이상 발생하는 것을 알았다.

그림 3에 의하면 비소성실트는 피크전단변형률 γ_p 이 1%에서 10%까지 발생하는데 필요한 재하회수 N_c 가 작은 것으로 나타났다. 그림 2의 결과에 의하면 비소성실트 지반에서 지진이 발생할 경우 큰 변형이 발생하는 시간이 다른 모래나 화강풍화토지반 보다 상대적으로 짧을 것으로 예상된다(Song, 2003a; Song 등, 2003; 宋炳雄 등, 2004; Song 등, 2004).

Seed 등(1975)은 정규화한 재하회수와 과잉간극수압과의 관계를 식 (1)과 같이 제안하였다. 본 연구에서도 식 (1)과 비소성실트의 특성을 비교하였다.

$$\frac{\Delta u}{\sigma_{vc}} = \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \arcsin \left\{ 2 \left(\frac{N_c}{N_{cl}} \right)^{1/\alpha} - 1 \right\} \quad (1)$$

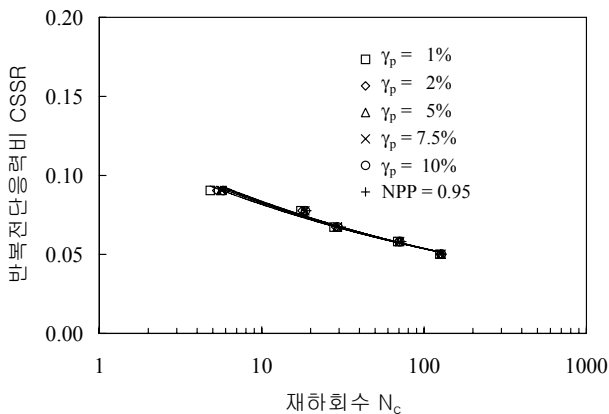


그림 3. 비소성실트의 반복전단응력과 재하회수와의 관계

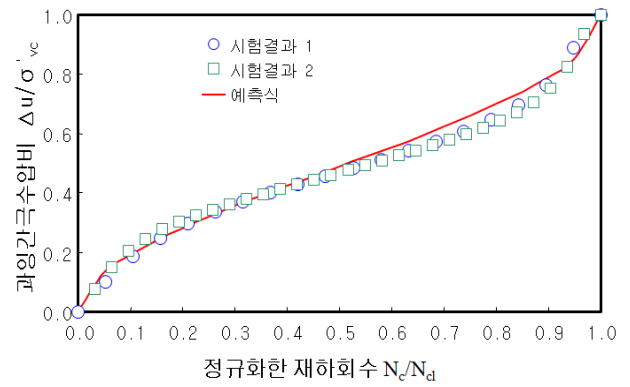


그림 4. 정규화된 반복전단응력비와 과잉간극수압비와의 관계

그림 4에 의하면 정규화한 재하회수비 N_c/N_{cl} 이 0.5를 상회하면 Seed 등(1975)이 제안한 식 (1)보다 다소 작게 나타나는 것을 알았다. 이는 비소성실트가 모래와 달리 반복하중에 의하여 유효응력의 저하가 빠르게 진행하여 과잉간극수압이 90% 전후까지는 쉽게 발생하지만 100%까지 발생하는 것이 어려운 특성 때문인 것으로 판단된다. 한편, 비소성실트의 경우 식 (1)에서 계수 α 는 적용하기 타당한 계수가 0.94인 것으로 나타났다.

그림 5는 본 연구에서 초기전단응력을 고려한 반복전단응력비와 피크전단변형률과의 관계를 정리한 그림이다. 그림 5에 의하면 초기전단응력비 ISSR이 없는 경우에 반복전단응력비 CSSR가 작을수록 피크전단변형률은 크게 증가하지 않지만 반복전단응력비 CSSR이 0.07을 초과한 경우에는 피크전단변형률이 10% 이상 발생하는 것을 알 수 있다. 그림 5에 의하면 초기전단응력비 ISSR이 증가할수록 반복응력비 CSSR이 작아도 피크전단변형률은 10% 이상 발휘되는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 초기전단응력비 ISSR은 초기전단응력과 구속압력과의 비를 나타내며, 반복전단

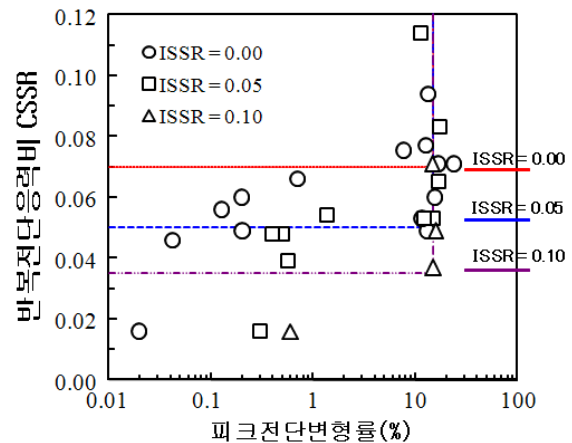


그림 5. 초기전단응력의 영향을 고려한 반복전단응력비와 피크전단변형률과의 관계

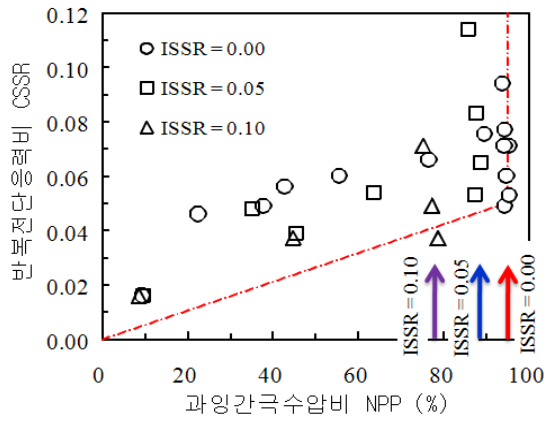


그림 6. 초기전단응력의 영향을 고려한 반복전단응력비와 과잉간극수압 비와의 관계

응력비 CSSR도 반복전단응력과 구속압력과의 비이다.

그림 6은 초기전단응력을 고려한 반복전단응력비와 과잉간극수압비와의 관계를 정리한 그림이다. 그림 6에 의하면 반복전단응력비가 증가함에 따라 과잉간극수압비가 증가하는 것은 당연하지만 점선으로 나타난 직선과 같이 초기전단응력의 영향에 따라 경향이 크게 달라지지는 않는 것으로 판단된다. 하지만 초기전단응력비 ISSR의 증가에 따라 과잉간극수압비의 발생한계는 있는 것으로 사료된다. 즉, 초기전단응력비 ISSR이 없는 경우 과잉간극수압비가 거의 100%에 가까운 95%까지 발생되지만, 초기전단응력비 ISSR이 0.05와 0.1인 경우에는 각각 90%, 78% 정도가 발생한계치인 것으로 판단된다.

4. 비소성실트의 측방유동량 평가 방법

그림 6에서 초기전단응력비 ISSR의 영향을 받은 경우에는 액상화가 발생되지 않는 것으로 판단되어 초기전단응력의 영향을 받지 않은 시료에 대해서만 반복전단응력시험 후 정적전단시험을 수행하였다. 그림 7은 반복전단응력의 영향을 받은 후 남아 있는 지반의 강도특성을 확인하기 위하여 정적전단시험을 수행한 결과를 나타낸 그림이다. 그림 7에 의하면 반복전단응력의 영향을 받지 않은 경우에는 최대 전단강도가 약 25 kPa를 나타내지만, 반복전단응력의 영향에 따라 과잉간극수압비가 최대 0.94까지 발생한 경우에는 잔류강도가 거의 없는 것으로 나타났다. 즉, 액상화 발생 수준까지 과잉간극수압이 발생한 경우에는 잔류강도가 거의 없는 것을 의미한다.

만약 비소성실트지반에서 액상화가 발생한 경우에는 그림 7의 그림과 같이 잔류전단강도가 거의 발휘될 수 없으므로 측방유동이 발생되기 쉬운 것을 알 수 있다.

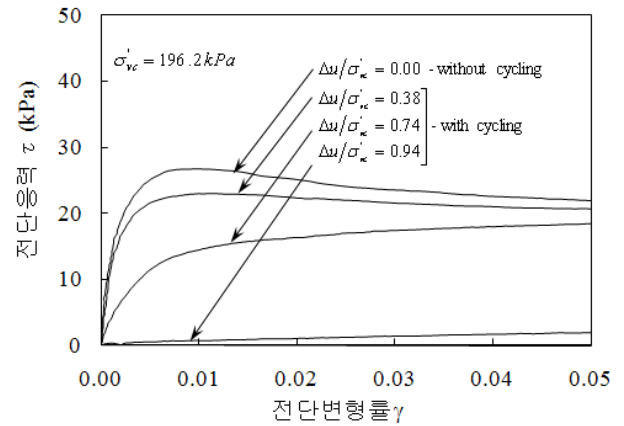


그림 7. 반복전단응력의 영향을 받은 후 정적시험

일반적으로 포화된 지반은 동적하중 이력을 받은 후 과잉간극수압이 발생하였지만 그 정도에 따라 잔류강도는 다를 것이다. 비소성실트지반에서 과잉간극수압의 정도에 따라 잔류강도를 파악할 수 있다면 동적이력을 받은 비소성실트지반에서 발생될 측방유동량을 추정할 수 있을 것으로 판단하였다. 이에 따라 본 연구에서는 그림 7과 같이 다양한 과잉간극수압이 발생되도록 동적반복이력의 크기를 변경하면서 시험하였다.

반복전단응력 시험 후 정적시험을 수행하여 과잉간극수압과 피크전단변형률과의 관계를 도출하여 측방유동량의 예측방법을 제안하고자 하였다. 본 연구에서는 식 (2)와 같은 Hardin-Drnevich 모델을 응용하였다(Hardin 등, 1972; Song, 2003b).

$$\tau = \frac{G_{\max} \cdot \gamma}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}} \quad (2)$$

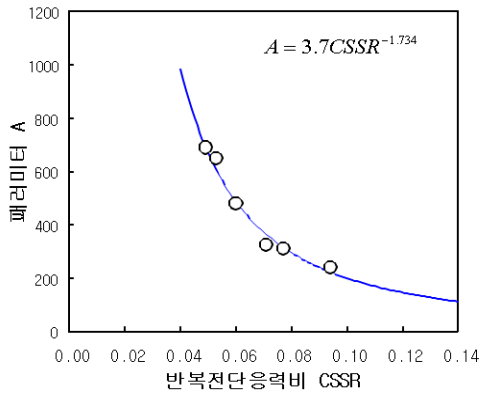
식 (2)를 응용하여 시험결과를 분석하였으며 그 결과 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)에서 패러미터 A와 B는 각각 그림 8과 같다.

$$\gamma_{peak}(\%) = \frac{NPP(\%)}{A - \frac{NPP(\%)}{B}} \quad (3)$$

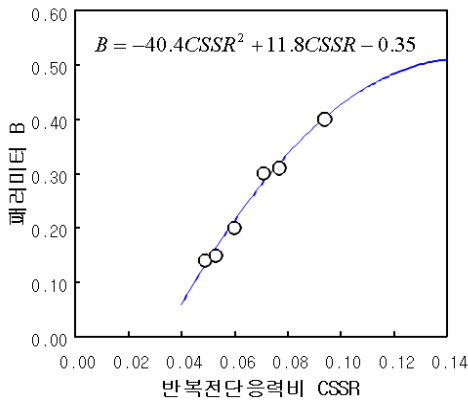
여기서, $A = 3.7CSSR^{-1.734}$,

$$B = -40.4CSSR^2 + 11.8CSSR - 0.35 \text{이다.}$$

그림 9는 식 (3)과 그림 8을 이용하여 나타낸 과잉간극수압비와 피크전단변형률과의 관계를 나타내고 있다. 그림 9에 의하면 비소성실트는 과잉간극수압이 95% 정도 발생하면 피크전단변형률이 대략 4% 예상되므로 측방유동량은



(a) 패러미터 A



(b) 패러미터 B

그림 8. 패러미터 A와 B의 결정

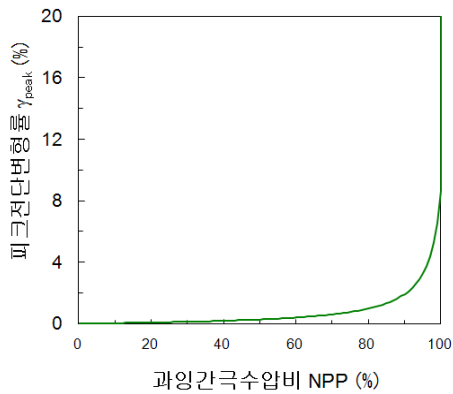


그림 9. 피크전단변형률과 과잉간극수압비의 관계

액상화 발생되는 비소성실트층 두께의 4%가 수평방향으로 발생하는 것으로 평가할 수 있다. 예를 들어 비소성실트층의 두께가 10m이고 전 층에서 액상화가 예상된다면 0.4m의 측방유동량이 발생하는 것으로 평가할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 지금까지 많이 알려지지 않은 비소성실트의 액상화 발생 여부 및 이에 따른 측방유동량의 평가 방법

에 대하여 제안하였다. 지금까지의 연구 결과에 대하여 정리하면 다음과 같다.

- (1) 비소성실트의 반복전단응력에 의한 거동은 일반적으로 알려진 모래의 거동과 매우 다르게 반복전단응력의 영향을 받으면 쉽게 유효응력의 저하가 발생되고 이에 따라 과잉간극수압이 많이 발생된다.
- (2) 기존에 Seed가 제안한 방법과 비교하여 비소성실트의 과잉간극수압 발생 경향을 분석한 결과 과잉간극수압비가 50%를 상회하면 제안식과 다소 차이가 발생한다. 그 원인으로서는 비소성실트가 과잉간극수압이 90% 전후까지는 쉽게 발생하지만 100%까지 발생하는 것이 어려운 특성 때문인 것으로 판단된다. Seed의 방법으로 적용하고자 하면 패러미터 α 값으로 0.94가 타당한 것으로 판단된다.
- (3) 반복전단응력비가 증가함에 따라 과잉간극수압비가 증가하는 것은 당연하지만 초기전단응력의 영향에 따라 경향이 크게 달라지지 않는 것으로 판단된다. 하지만 초기전단응력비 ISSR이 없는 경우 과잉간극수압비가 거의 100%에 가까운 95%까지 발생되지만, 초기전단응력비 ISSR가 0.05와 0.1인 경우에는 각각 90%, 78% 정도가 발생한계치인 것으로 판단된다.
- (4) 비소성실트지반에서 액상화가 발생한 경우에는 잔류전단강도가 거의 발휘될 수 없으므로 측방유동이 발생되기 쉬운 것으로 판단된다.
- (5) 비소성실트지반에서 액상화 발생 후 예상되는 측방유동량을 평가하는 방법을 제시하여 유사 연구에 도움이 되리라 판단한다.

본 연구는 전단변형률이 최대 20%인 시험장치에서 시험을 수행하였으며, 본 연구에서 제안된 측방유동 예측식은 실험기의 한계치의 영향을 내포하고 있으므로 실무 적용 시 본 연구의 한계를 감안하여 적용하기를 바란다.

참 고 문 헌

1. 송병용, 安原一哉, 김정호, 최인걸, 양태선(2005), 직접단순전단시험을 통한 세립토의 강도와 강성저하 예측, *분학술발표회 논문집*, 한국지반공학학회, pp. 187~189.
2. 宋炳雄, 安原一哉, 村上哲, 小峯秀雄(2004), 余裕間隙比の概念に基づいた非塑性シルトの繰返し強度と剛性低下の評価, *土木学会論文集*, 第764号/III-67, 土木学会, pp. 11~24.
3. 地盤工學會(2000), *土質試験の方法と解説*, 第一回改訂版, 地盤工学会, pp. 635~725.
4. 濱田政則, 安田進, 磯山龍二, 惠本克利(1986), 液状化による地盤の永久変位の測定と考察, *土木学会論文集*, 第376号/III-6,

- pp. 211~220.
5. Boulanger, M. W., Meyers, L., H., Mejia, L., H. and Idriss, I. M.(1998), Behavior of a Fine-grained Soil During the Loma Prieta Earthquake, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 35, No. 1, pp. 146~158.
 6. Hamada, M., Ioyama, R., and Wakamatsu, K.(1996), Liquefaction-induced Ground Displacement and its Related Damage to Lifeline Facilities, *Special Issue of Soils and Foundations*, JGS, pp. 81~97.
 7. Hardin, B. O. and Drnevich, V. P.(1972), Shear Modulus and Damping in Soils: Design Equations and Curves, *Journal of Soil Mechanics and Foundations Engineering Division*, Vol. 98, No. 7, pp. 667~692.
 8. Holzer, T. L., Bennett, M., J., Ponti, D. J. and Tinsley, J. (1999), Liquefaction and Soil Failure During 1994 Northridge Earthquake, *Journal of Geotechnical. and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 125, No. 6, pp. 438~452.
 9. Seed, B., martin, P., and Lysme, J.(1975), Pore-Water Pressure Changes During Soil Liquefaction, *Journal of Geotechnical. and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 102, No. 4, pp. 323~346.
 10. Song, B.-W.(2003a), The Influence of Initial Static Shear Stress on Post-cyclic Degradation of Non-plastic Silt, *Low Land Technology International*, Vol. 5, No. 1, pp. 14~24.
 11. Song, B. W.(2003b), *Evaluation for Lateral Flow of Non-plastic Silt Induced by Earthquakes*, Ibaraki University, Doctoral Dissertation, pp. 34.
 12. Song, Byung-Woong, Kim, Hong-Taek, Yasuhara, Kazuya, Murakami Satoshi, Park, Inn-Joon(2003), Post-cyclic Degradation of Strength and Stiffness for Non-plastic Silt, *학술발표회 논문집, 한국지반공학회*, pp. 87~93.
 13. Song, Byung-Woong, Yasuhara, Kazuya, Murakami, Satoshi(2004), Direct Simple Shear Testing for Post-cyclic Degradation in Stiffness of Non-plastic Silt, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol. 27, No. 6, pp. 607~613.

(접수일: 2011. 8. 29 심사일: 2011. 9. 14 심사완료일: 2011. 10. 18)