

직접단순전단시험을 통한 세립토의 강도와 강성저하 예측

Prediction for degradation of strength and stiffness of fine grained soil using Direct Simple Shear Test (DSST)

송병웅¹⁾, Byung-Woong Song, 安原一哉²⁾, Kazuya Yasuhara,
김정호³⁾, Jeong-Ho Kim, 최인걸⁴⁾, In-Gul Choi, 양태선⁵⁾, Yang, Tae-Seon

¹⁾ (주)다산컨설팅 지반공학부 차장, Vice Chief, Geotechnical Eng. Dept. Dasan Consultants

²⁾ 茨城大學 都市システム工學科 교수, Professor, Dept. of Urban and Civil Eng., Ibaraki University

³⁾ (주)다산컨설팅 지반공학부 부사장, Vice President, Geotechnical Eng. Dept. Dasan Consultants

⁴⁾ (주)유신코퍼레이션 지반공학부 상무, Director, Geotechnical Eng. Division, Yooshin Eng. Corporation

⁵⁾ 김포대학 환경토목과 조교수, Assistant Professor, Kimpo College

개요(SYNOPSIS) : Based on an estimating method for post-cyclic strength and stiffness with cyclic triaxial tests, Direct Simple Shear (DSS) tests were carried out to confirm whether the method can be adapted to DSS test on fine-grained soils: silty clay, plastic silt, and non-plastic silt. Results from post-cyclic DSS tests were interpreted by a modified method as adopted for post-cyclic triaxial tests. In particular, influence of plasticity index for fine-grained soils was emphasised. Findings obtained from the present study are: (i) the higher the plasticity index of fine-grained soils is, the less not stiffness ratio but strength ratio decreases with increment of a normalised excess pore water pressure; and (ii) post-cyclic strength and stiffness results from DSS tests agree well with those predicted by the method modified from a procedure used for triaxial test results.

Key words : Strength, Stiffness, KM Silt, Arakawa Clay, DL Silt, Direct Simple Shear Test

1. 서 론

최근의 지진에 의한 피해사례를 보면 세립토에서 지진에 의한 액상화 및 측방유동에 관하여 많이 보고되고 있는 것을 알 수 있다 (Stark and Contreras, 1998; Boulanger et al., 1998; 島本 등, 2001). 특히, 피해현장은 강가, 바닷가나 지하수위가 높은 지역에서 주로 나타나는 것을 알았다. 예를 들면, 1964년 미국 알래스카 지진의 경우에는, 지진 발생 3일 후 점성토 사면에서 대규모 활동이 발생하여 큰 피해를 입은 사례가 보고 되었다 (Stark and Contreras, 1998). 또한, 1989년 미국 Loma Prieta 해양연구소에서 세립분을 함유한 흙의 액상화 및 그 후의 측방유동이 관측이 보고되었다 (Boulanger et al., 1998). 1994년 미국의 Northridge 지진의 경우에는 실트질 모래에서 액상화 후의 측방유동과 같이 점토지반에서 반복응력 후 지반변위가 발생한 것으로 보고 되어 있다 (Holzer et al., 1999). 한편, 2000년 일본 톳토리현 서부지진에서는 비소성실트 지반에서 일어난 액상화에 의한 피해 사례가 보고 되었다 (地盤工學會(일본), 2002). 이와 같은 이전에 보고되어 있는 사례를 보면 지진 시 세립토의 종류에 따라 여러 가지 형태의 지반피해가 발생하는 것으로 나타나고, 지진에 의해 발생하는 과잉간극수압의 크기에 따른 지반의 전단강도 및 강성을 예측할 수 있는 방법이 진동삼축시험법을 이용하여 제안한 방법이 있다 (Yasuhara et al.1982; Yasuhara

and Hyde, 1997). 본 연구에서는 기존의 방법을 수정하여 직접단순전단시험법을 이용한 과잉간극수압의 크기에 따른 지반의 강도와 강성 예측방법을 제안하고자 한다.

2. 해석방법

반복삼축시험을 통한 반복응력이력을 받은 지반의 비배수전단강도 및 강성의 변화에 대한 예측방법은 이미 보고되어 왔다(Yasuhara et al.1982; Yasuhara, 1997). 본 연구는 기존에 알려진 반복삼축시험을 통한 흙의 강도와 강성 저하 예측법을 수정하여 직접단순전단시험에 적용하였다. 그림 1은 설계 시 필요한 변수들을 구하기 위한 방법으로서 직접단순전단시험을 이용하여 반복하중을 가한 후 흙의 강도와 강성을 예측하기위한 과정을 나타내고 있다.

일반적으로 지반의 파괴는 반복하중에 의해서 발생하는 과잉간극수압과 전단변형에 의존하는 것으로 알려져 있다. 반복하중에 의해서 액상화가 자주 발생하는 사질토에 비해서 점토와 실트같은 세립토는 일반적으로 액상화가 일어나기 어렵지만, 강도와 강성은 저하할 것으로 예상되므로 그 지반은 반복하중을 가한 후도 고려할 필요가 있다.

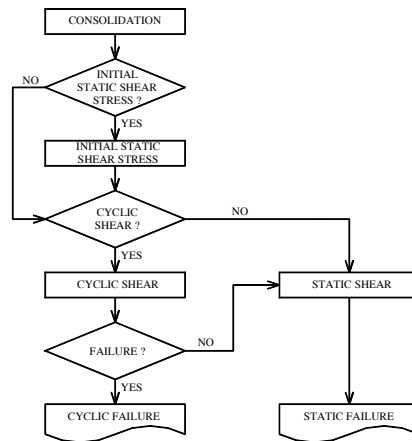


그림 1. 직접단순전단시험의 흐름도 (Song, 2003)

3. 흙의 종류에 따른 반복응력 강도와 강성저하특성 예측법

반복하중에 의한 세립토의 강도 및 강성저하에 대한 기본적인 고려방법은 아래와 같다. 그림 2는 간극비와 압밀응력과의 관계에서 정규압밀 상태에 있는 점 A에 작용하고 있는 응력을 점 B로 감소시키면 세립토는 과압밀 상태로 있게 된다. 본 연구에서는 점 C의 정규압밀 상태에 있는 흙에 대하여 일정체적 상태에서 반복하중을 가하면 점 B로 이동하는 경우를 고려한다. 다시 말하면, 정규압밀 상태의 세립토에 대하여 반복응력에 의한 구속압력(점 C → 점 B)과 정규압밀상태에서 정적 구속응력의 저하에 의한 과압밀 상태(점 A → 점 B)는 같다는 기본 가정 하에서 반복응력에 의한 강도와 강성저하를 예측하는 방법을 찾아보고자 한다.

3.1 강도저하 예측법

Ladd 등(1977)은 삼축압축시험을 통하여 과압밀점토와 정규압밀점토의 비배수강도증가율에 대한 비로서 식(1)을 제안하였다.

$$\left(\frac{S_u}{p'}\right)_{OC} / \left(\frac{S_u}{p'}\right)_{NC} = OCR^A \quad (1)$$

여기서, $(S_u/p')_{OC}$ 와 $(S_u/p')_{NC}$ 는 정규화된 과압밀과 정규압밀상태에서 비배수전단강도, OCR은 과압밀비, Λ_o 는 경험적 재료정수이다. 이를 직접단순전단시험에 적용하기 위하여 진동삼축시험에서의 비배수전단강도 S_u 를 전단강도 τ_f 로 고려하면, 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

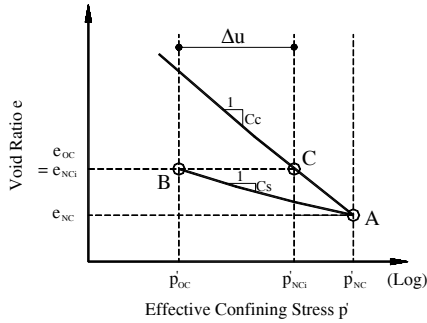


그림 2. 간극비와 유효구속응력과의 관계

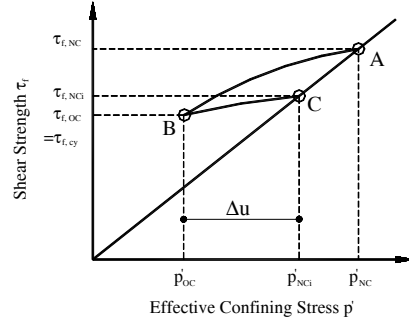


그림 3. 전단강도와 유효구속응력과의 관계

$$\tau_{f,OC}/\tau_{f,NC} = OCR^{\Lambda_o - 1} \quad (2)$$

여기서, $OCR = p'_{NC}/p'_{OC}$ 이다. 한편 그림 2에서 점 A와 C에서의 구속응력은 각각 p'_{NC} 와 p'_{NCi} 로 나타낼 수 있는데 점 B에서의 구속응력 p'_{OC} 와의 관계로 정리해 보면 식 (3) 및 (4)로 나타낼 수 있으며, 그 식들 중 나타나는 OCR_q 는 식(5)와 같다.

$$\log(p'_{NC}/p'_{NCi}) = \log(p'_{NC}/p'_{OC}) - \log(p'_{NCi}/p'_{OC}) = \log(OCR) - \log(OCR_q) \quad (3)$$

$$p'_{NC}/p'_{NCi} = OCR/OCR_q \quad (4)$$

$$OCR_q = p'_{NCi}/p'_{OC} = p'_{NCi}/(p'_{NCi} - \Delta u) = 1/(1 - \Delta u/p'_{NCi}) \quad (5)$$

한편, 그림 3에서 정적전단강도 $\tau_{f,NCi}$ 에 대한 반복응력 후 전단강도의 비는 식(6)과 같다.

$$\frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NCi}} = \frac{\tau_{f,NC}}{\tau_{f,NCi}} \cdot \frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NC}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \cdot \frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NC}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \cdot \frac{\tau_{f,OC}}{\tau_{f,NC}} \quad (6)$$

그림 2에서 구간 AB와 구간 AC와의 관계로 부터 식(7)~(9)와 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$C_s \cdot \log(OCR) = C_c \cdot \log(p'_{NC}/p'_{NCi}) \quad (7)$$

$$p'_{NC}/p'_{NCi} = OCR^{C_s/C_c} = OCR^\lambda \quad (8)$$

여기서, $\lambda = C_s/C_c$ 이며, C_s 는 팽윤지수이고 C_c 는 압축지수를 나타낸다. 한편, 식(2)와 식(8)을 식(6)에 대입하면 식(9)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NCi}} = OCR^{\lambda + A_o - 1} \quad (9)$$

한편, 식(4)를 식(8)에 대입하면 식(11)을 얻을 수 있다.

$$\frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} = \frac{OCR}{OCR_q} = OCR^\lambda \quad (10)$$

$$OCR = OCR_q^{\frac{1}{1-\lambda}} \quad (11)$$

식(11)을 식(9)에 대입하면 식(12)를 얻을 수 있다.

$$\frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NCi}} = OCR_q^{\frac{A_o}{1-\lambda} - 1} \quad (12)$$

식(5)를 식(12)에 대입하면 식(13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\tau_{f,cy}}{\tau_{f,NCi}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{NCi}}\right)^{1 - \frac{A_o}{1-\lambda}} \quad (13)$$

식(13)에 의해서 정규압밀된 세립토에 대한 반복하중이력 후 강도저하는 반복응력이 작용하기 전의 구속응력 p'_{NCi} 와 반복재하에 의한 과잉간극수압 Δu 에 의해서 표현하는 것이 가능하다.

3.2 강성저하 예측법

Ladd 등 (1977)은 일반적으로 점성토의 강성감소는 유효응력의 감소와 과압밀비 OCR의 증가에 따른다고 하였으며, Worth and Houlsby (1985)는 전단시험을 통하여 과압밀비 OCR의 증가에 의한 강성저하에 대한 경험식을 식(14)와 같이 제안하였다.

$$\left(\frac{G}{p'}\right)_{OC} / \left(\frac{G}{p'}\right)_{NC} = 1 + C \cdot \ln(OCR) \quad (14)$$

여기서, $\left(\frac{G}{p'}\right)_{OC}$ 와 $\left(\frac{G}{p'}\right)_{NC}$ 는 정규화한 과압밀과 정규압밀상태에서의 강성을 나타내며, C는 경험적 재료정수이다. 식(14)를 다시 정리하면 식(15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{G_{OC}}{G_{NC}} = \frac{1 + C \cdot \ln(OCR)}{OCR} \quad (15)$$

한편, 그림 4에서 정적강성 G_{NCi} 에 대한 반복응력 후 강성 G_{cy} 의 비는 식(16)과 같이 나타낸다.

$$\frac{G_{cy}}{G_{NCi}} = \frac{G_{NC}}{G_{NCi}} \cdot \frac{G_{cy}}{G_{NC}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \cdot \frac{G_{cy}}{G_{NC}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \cdot \frac{G_{OC}}{G_{NC}} \quad (16)$$

식(15)와 식(8)을 식(16)에 대입하면 식(17)을 얻을 수 있다.

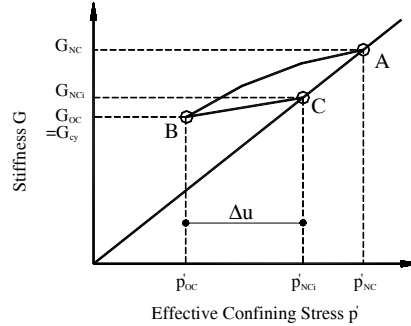


그림 4. 강성과 유효구속응력과 관계

$$\frac{G_{cy}}{G_{NCi}} = OCR^\lambda \cdot \frac{1 + \ln(OCR)}{OCR} \quad (17)$$

식(11)을 식(17)에 대입하면 식(18)을 얻을 수 있다.

$$\frac{G_{cy}}{G_{NCi}} = OCR^{(\lambda-1)} \cdot \{1 + C \cdot \ln(OCR)\} = \frac{1 + \frac{C}{1-\lambda} \cdot \ln(OCR_q)}{OCR_q} \quad (18)$$

식(5)를 식(18)에 대입하여 다시 정리하면 식(19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{G_{cy}}{G_{NCi}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{NCi}}\right) \cdot \left\{ \left(1 - \frac{C}{1-\lambda}\right) \cdot \ln\left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{NCi}}\right) \right\} \quad (19)$$

식(19)에 의해서 정규압밀된 세립토에 대한 반복하중이력 후 강성저하는 반복응력이 작용하기 전의 구속응력 p'_{NCi} 과 반복재하에 의한 과잉간극수압 Δu 에 의해서 표현하는 것이 가능하다.

4. 실험방법 및 재료특성

앞에서 제안된 과잉간극수압비의 증가에 따른 강도 및 강성저하 예측식의 적용성을 검증하기 위하여 토질시험을 수행하였다. 본 연구에 이용한 시험장치는 일본 이바라키(茨城) 대학에 있는 NGI형 직접단순전단시험장치를 사용하였다. 실험은 직경 7 cm, 높이 3 cm의 원형공시체를 K_0 압밀조건하에서 압밀시킨 후, 정체적조건에서 연직응력을 조절해서 전단시험을 행하였다. 과잉간극수압은 반복전단응력을 가한 전후의 연직유효응력의 차로 결정하였다 (Song, 2003; Song et al., 2003; 송병웅 등 2004a; 송병웅 등 2004b). 사용된 세립토는 세 종류로서 우선 Keuper Marl Clay (이하 KM점토; 실트질 점토)는 영국 현장에서 채취한 흙이고, DL실트 (비소성실트)는 공장에서 암석을 분쇄하여 얻은 것이며, 아라카와실트 (荒川실트; 소성실트)는 현장에서 채취한 시료이다 (송병웅 등, 2004a; 송병웅 등, 2004b). 한편, 시료는 재성형 후 일정한 구속압을 가한 상태에서 전단시험을 수행하였다 (地盤工學會(일본),

2000). 소성이 있는 KM점토와 아라카와 실트의 공시체는 각각 69 kPa, 49 kPa의 압력에서 예압밀 후 시료를 성형하였다. 여기서, 예압밀은 공시체 제작을 위한 압밀로서 흙의 종류에 따라 그 크기는 다르나 전단시험 시 가하는 구속압 보다 작아야 한다. 한편 소성이 없는 DL실트는 자유낙하방법으로 공시체를 제작하였다 (Song, 2003; Song 등, 2003). 한편, 연직구속응력을 196 kPa 까지 가한 후 정체적상태를 유지하며, 응력제어방법으로 0.1 Hz의 정현파를 최대 50회까지 반복하중을 가하였다. 地盤工學會(일본, 2000)에 의하면 정현파의 속도는 0.02 ~ 1 Hz 범위에서 소성이 있는 세립토의 경우 헤르츠(Hz)가 크면 세립토의 강도나 강성이 과대평가되는 경향이 있으므로 작을수록 좋다고 하였다. 본 연구에서는 시험 수행 속도를 감안하여 0.1Hz로 선정하였다. 그리고 전단변형률은 $\pm 10\%$ 까지 측정하였다 (Song, 2003; Song 등, 2003; 송병웅 등 2004a; 송병웅 등 2004b).

5. 실험결과와의 비교

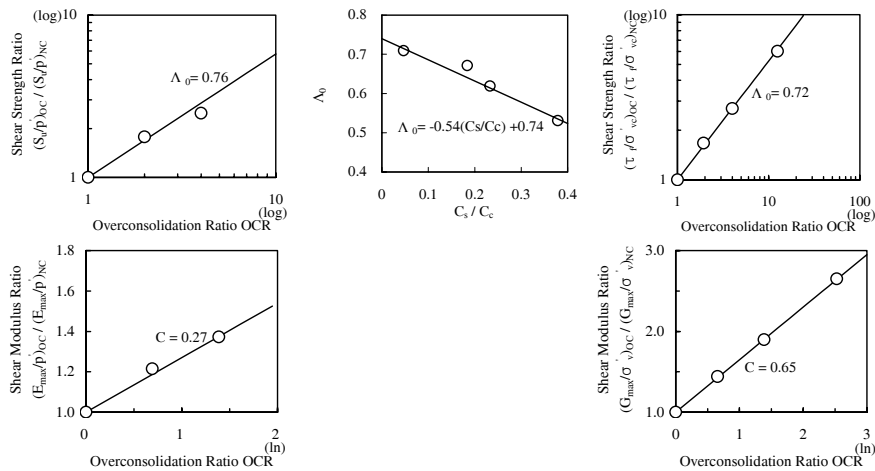
5.1 패러미터 Λ_0 , C 와 λ 의 선정

앞에서 언급한 바와 같이 반복하중에 의한 강도 및 강성저하를 예측하기 위하여 각각 식(13)과 식(19)가 필요하며, 두 식을 위한 패러미터 Λ_0 , C 와 λ 를 먼저 실험을 통하여 찾아야할 필요가 있다. 우선 패러미터 λ 의 경우 압밀시험을 통하여 구하였으며 그 값은 표 2에 정리하였다.

그림 6은 KM 실트와 DL 실트의 패러미터 Λ_0 와 C 를 나타내고 있으며, 각각 진동삼축압축시험과 직접단순전단시험을 통하여 구하였으며, 아라카와 실트의 경우 공시체 부족으로 구할 수 없는 상황이었다. 그래서 Mayne(1980)이 여러 종류의 세립토에 대하여 조사·정리한 압축지수와 팽윤지수 값들 중 아라카와 실트와 액성한계, 소성지수, 내부마찰각 등 특성이 비슷한 세립토와 비교하여 패러미터 Λ_0 를 구하였으나, 아라카와 실트에 대한 패러미터 C 는 구할 수 없어서 본 연구에서는 아라카와 실트의 실험결과를 토대로 예측식에 어울리는 패러미터 C 를 역으로 추정하였다.

표 2. 패러미터 λ

항 목	KM 점토	아라카와 실트	DL 실트
팽윤지수 C_s	0.042	0.046	0.003
압축지수 C_c	0.23	0.27	0.1
λ	0.18	0.17	0.03



(a) KM 점토

(b) 아라카와 실트

(c) DL 실트

그림 6. 패러미터 Λ_0 와 C

5.2 강도시험결과와 예측식과의 비교

그림 7은 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따른 전단강도비 $\tau_{f,cy}/\tau_{f,NCi}$ 의 감소 경향을 나타내고 있다. 그림 7에 플롯된 점은 직접단순전단시험을 통하여 구한 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따른 전단강도비 $\tau_{f,cy}/\tau_{f,NCi}$ 를 나타내며, 점선 및 실선은 식(13)을 이용하여 구한 예측 결과이다. 본 연구에서 이용한 세 종류의 세립토에서 모두 같은 경향을 나타내고 있지만, 특히 비소성실트인 DL 실트의 전단강도 감소 경향이 가장 현저한 것으로 나타났고 소성실트인 KM 실트에서 가장 덜 현저한 것으로 나타났는데, 소성지수 PI가 작을수록 전단강도의 감소경향이 더 큰 것으로 보인다. 한편, 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 가 0.8 부근 이후에는 급격한 전단강도비 $\tau_{f,cy}/\tau_{f,NCi}$ 의 저하가 나타나는데, 아마도 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 가 0.8을 초과해서 흡입자의 연결상태가 단절되어 전단강도의 손실이 급격히 커지는 것으로 판단된다. 본 연구에서 제안된 과잉간극수압비의 증가에 따른 강도저하 예측식은 전반적으로 실험결과와 매우 잘 맞는 것으로 나타났다.

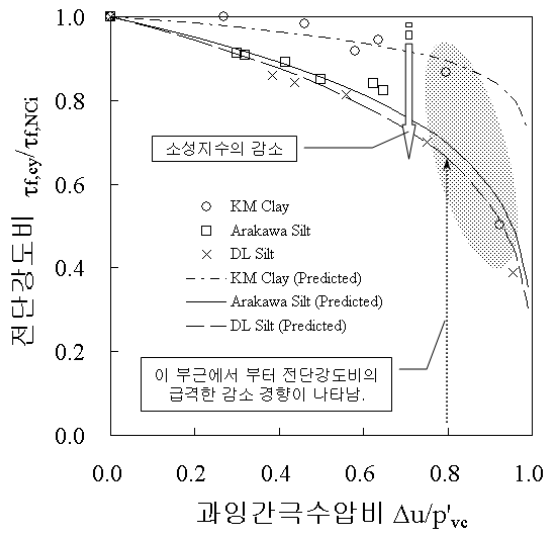


그림 7. 전단강도비와 과잉간극수압비와의 관계

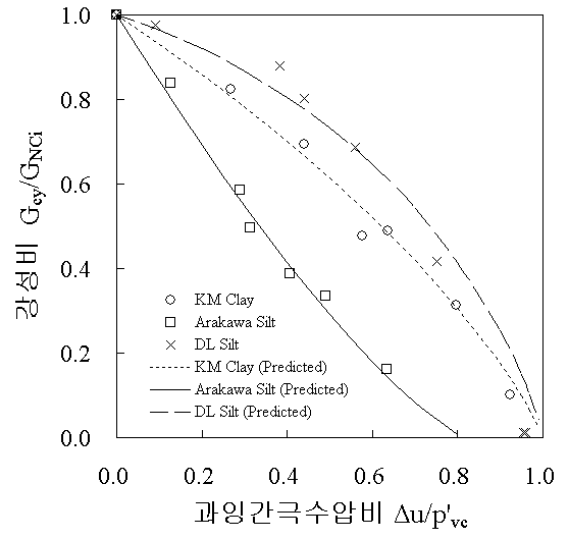


그림 8. 강성비와 과잉간극수압비와의 관계

5.3 강성시험결과와 예측식과의 비교

그림 8은 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따른 강성비 G_{cy}/G_{NCi} 의 감소 경향을 나타내고 있다. 그림 8에서도 플롯된 점은 직접단순전단시험을 수행하여 구한 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따른 강성비 G_{cy}/G_{NCi} 를 나타내며, 점선 및 실선은 식(19)를 이용하여 구한 예측 결과이다. 본 연구에서 이용한 세 종류의 세립토 모두 과잉간극수압비의 증가에 따라 강성이 저하하지만, 그 강성의 저하 경향은 약간 다른 것을 알 수 있다. 아라카와 실트의 경우 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따라 초반부터 급격한 감소 경향을 나타내지만, 다른 두 종류의 세립토는 이와 달리 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 가 상당히 증가한 후 급격히 강성이 감소하는 경향을 나타내었다. 한편 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{vc}$ 의 증가에 따른 강성저하의 경우는 강도 저하와 달리 소성지수 PI의 크기와 관련이 없는 것으로 나타났다. 한편, 본 연구에서 제안된 과잉간극수압비의 증가에 따른 강성저하 예측식은 아라카와 실트의 경우를 제외하고 실험결과와 매우 잘 맞는 것으로 나타났다.

6. 결론

본 연구에서는 정규압밀된 재성형 시료를 이용하여 반복하중에 의한 과잉간극수압의 증가에 따른 세립토의 강도 및 강성저하 특성을 직접단순전단시험기를 이용하여 조사하여 보았다. 실험에 이용한 시료는 소성이 있는 점토질 실트, 실트질 점토 및 비소성실트이었으며, 소성지수와 연관성을 중심으로 알아 보았다. 수행결과 제안된 과잉간극수압비의 증가에 따른 강도 및 강성저하 예측식은 실험결과와 상당히 잘 어울리는 것으로 판명되었으며, 강도저하의 경우는 소성지수의 크기가 작을수록 강도저하가 크게 발생하는 것을 알았다. 하지만, 강성저하의 경우에는 소성지수의 크기와 관련이 적은 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 송병웅, 야수하라 카주야 (2004a), “초기전단응력의 이력을 받은 세립토의 반복하중에 의한 전단강도 저하 특성”, 2004 대한토목학회 정기학술대회, 대한토목학회, pp.1706-1711 (CD-ROM).
2. 송병웅, 김홍택, 安原一哉, 村上哲 (2004b), “흙의 종류에 따른 강도와 강성저하 특성”, 2004년 한국지반공학회 정기학술발표회“, 한국지반공학회, pp. 253-260 (CD-ROM).
3. 地盤工學會 (1993)、液状化対策の調査、設計から施工まで、現場技術者のための土と基礎シリーズ、20、土質工学会。
4. 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。
5. 地盤工學會 (2002)、平成12年鳥取県西部地震災害調査報告書、地盤工学会 (CD-ROM)。
6. 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.
7. Holzer, T. L., Bennett, M., J., Ponti, D. J., and Tinsley, J. (1999), "Liquefaction and Soil Failure During 1994 Northridge Earthquake", *Journal of Geotech. and Geoenv.Eng.*, Vol. 125, No. 6, pp. 438-452.
8. Ladd, C. C. et al(1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", *Proc. 9thICSMFE*, vol.2, pp.421-494.
9. Mayne, P. W.(1980), "Cam-clay predictions of undrained strength", *J. Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 106, No. 11, pp.1219-1242.
10. Song, B.-W. (2003), "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, Byung-Woong, Kim, Hong-Taek, Yasuhara, Kazuya, Murakami Satoshi, Park, Inn-Joon (2003), "Post-cyclic Degradation of strength and stiffness for non-plastic silt", 한국지반환경공학회 2003 학술발표회 논문집, pp. 87-93.
12. Stark, T. and Contreras, I. (1998), "Fourth avenue landslide during 1964 Alaskan Earthquake", *Journal of Geotech. and Geoenv.Eng.*, Vol. 124, No. 2, pp. 99-109.
13. Yasuhara, K., Hirao, K. and Yamanouchi, T.(1982), "Cyclic Strength and Deformation of Normally Consolidation Clay", *Soil and Foundations*, 22(3), PP.77-91.
14. Yasuhara, K. and Hyde A.F.L (1997), "Method for Estimating Postcyclic Undrained Secant Modulus of Clays", *J. of Geotechnical Eng. and Geoenvironmental Eng.*, Vol.123, No.3, pp. 201-211.
15. Wroth, C. P. and Houlsby, G. T. (1985), "Soil Mechanics, Property Characteristics and Analysis", *Proc. 11th ICSMFE*, vol.1, PP. 1-55.