

과압밀점토의 반복전단응력에 의한 강도 및 강성저하 예측

송 병 웅^{*1}, Yasuhara Kazuya^{*2}

1. 서론

일반적으로 지반의 파괴는 반복하중에 의해서 생기는 과잉간극수압과 전단변형에 의존하는 것으로 알려져 있다. 반복전단하중에 의해서 액상화가 자주 발생하는 사질토에 비해서 소성이 있는 흙은 액상화가 일어나는 것은 아니지만, 강도와 강성은 저하하는 것으로 예상되므로 그 지반은 반복하중을 가한 후도 고려할 필요가 있다(Yasuhara 등, 1982; Yasuhara, 1997). 본 연구에서는 비배수상태조건에서 과압밀점토의 반복하중이력 후 강도 및 강성저하 예측을 목적으로 한다. 이를 위하여 간극비, 전단강도 및 강성과 압밀압력과의 관계를 이용하여 반복전단응력 이력 후 과압밀점토의 강도와 강성을 예측하는 방법을 제안하였으며, 이 식의 적용성을 검토하기 위하여 반복삼축시험 후 비배수 전단시험을 수행하였으며, 그 후 반복이력을 받은 과압밀점토의 강도와 강성저하에 대한 예측식을 시험결과와 비교 검토 하였다.

2. 반복하중재하 후의 과압밀점토의 강도와 강성저하 예측

그림 1은 설계 시 필요한 변수를 구하기 위한 방법으로 반복삼축시험에 의해서 반복하중을 가하는 동안과 그 후 흙의 거동을 예측하는 과정을 나타내고 있다 (Song, 2003a; Song, 2003b). 그림 2는 비배수상태에서 과압밀된 점토의 강도와 강성의 저하에 관한 기본이 되는 고려방법을 나타내고 있다. 그림 2의 간극비와 압밀압력의 관계에서 정규압밀상태의 점 A에 작용하고 있는 응력을 점 B까지 감소시키면 이 흙은 과압밀상태가 된다. 한편, 점 C에 작용되어 있는 응력을 점 D까지 감소시킨 후 반복재하하중에 의하여 점 B의 방향으로 이동하는 경우를 생각할 수 있는데, 본 연구에서는 비배수 조건의 과압밀점토에 대하여 반복재하에 의한 압밀압력 (C→D→B)과 정규압력에서 과압밀된 점토의 압밀압력 (A→B)이 같다고 고려한다. 위의 가정과 기존에 발표된 정규압밀점성토에 대한 강도와 강성저하의 예측식을 과압밀토에 맞게 수정하여 그 적용성을 논한다 (Yasuhara 등, 1982; Yasuhara, 1997).

^{*1} (주)다산컨설팅 (songbw@dasan93.co.kr)

^{*2} Ibaraki(茨城) 대학 도시시스템공학과, 일본 (yasuhara@civil.ibaraki.ac.jp)

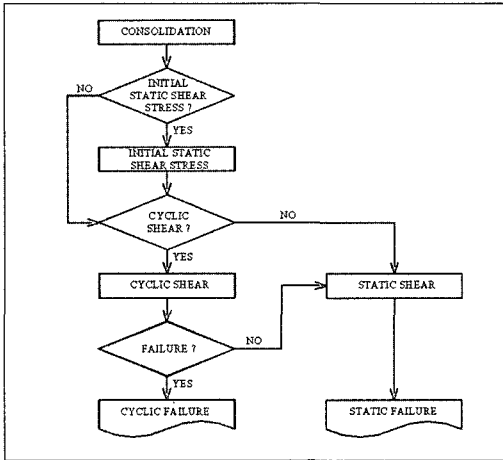


그림 1. 반복삼축시험 방법

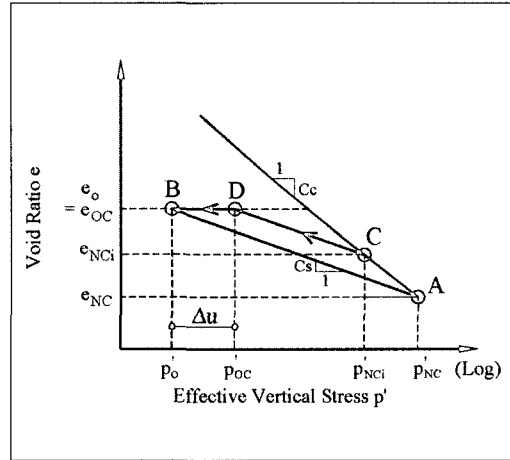


그림 2. 간극비와 압밀압력과의 관계

2.1 강도저하 예측식

Ladd 등(1977)은 과압밀점토와 정규압밀점토와의 비배수강도 증가율의 비로서 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\left(\frac{S_u}{p'}\right)_{OC} / \left(\frac{S_u}{p'}\right)_{NC} = OCR^4 \quad (1)$$

여기서, $(S_u/p')_{OC}$ 와 $(S_u/p')_{NC}$ 는 정규화한 과압밀과 정규압밀상태에서 비배수전단강도, OCR은 과압밀비, A_0 는 경험값인 재료정수이다. 또한, $p'_{NC}/p'_{OC} = OCR$ 의 관계가 되며, 식 (1)은 식 (2)와 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\frac{S_{u, OC}}{S_{u, NC}} = OCR^{4 \cdot 1} \quad (2)$$

그림 3의 비배수강도와 압밀압력의 관계에서 점 A에서 점 B까지 이동하는 과정은 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{S_{u, cy}}{S_{u, NC}} = OCR_{post}^{4 \cdot 1} \quad (3)$$

여기서, $OCR_{post} = p'_{NC}/p'_{OC}$ 가 된다. 또한, 점 C에서 점 D로의 과압밀과정은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{S_{u, OC}}{S_{u, NCI}} = OCR^{4 \cdot 1} \quad (4)$$

여기서, $OCR = p'_{NCI}/p'_{OC}$ 가 된다. 위의 식 (3)

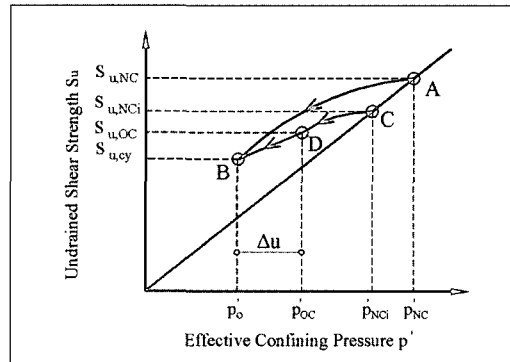


그림 3. 비배수강도와 압밀압력과의 관계

과 식 (4)에서 식 (5)가 얻어진다.

$$\begin{aligned} \frac{S_{u, cy}}{S_{u, OC}} &= \frac{S_{u, NC}}{S_{u, NCi}} \cdot \frac{S_{u, cy}}{S_{u, NC}} \cdot \frac{S_{u, NCi}}{S_{u, OC}} \\ &= \frac{S_{u, NC}}{S_{u, NCi}} \cdot \left(\frac{OCR_{post}}{OCR} \right)^{A+1} \end{aligned} \quad (5)$$

그림 2에서 AB구간과 ACD구간의 간극비의 차는 같으므로 그것을 이용해서 식(6)이 얻어진다.

$$\left(\frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \right) = \left(\frac{OCR_{post}}{OCR} \right)^{\frac{C_s}{OC}} = \left(\frac{OCR}{OCR_{post}} \right)^A \quad (6)$$

또한, 그림 3에서 다음의 관계가 성립될 수 있다.

$$\frac{S_{u, NC}}{S_{u, NCi}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} = \left(\frac{OCR}{OCR_{post}} \right)^A \quad (7)$$

식 (7)을 식 (5)에 대입하면 식 (8)이 얻어진다.

$$\frac{S_{u, cy}}{S_{u, OC}} = \left(\frac{OCR}{OCR_{post}} \right)^{1+A} \quad (8)$$

식 (9)에 OCR_q 로 명명된 기호를 사용하고 그림 2에서 얻어진 식 (10)을 이용하면 식 (11)이 된다.

$$OCR_q = p'_{OC} / p'_o = \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{OC}} \right)^{-1} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \log \left(\frac{p'_{OC}}{p'_o} \right) &= \log \left(\frac{p'_{NC}}{p'_o} \right) - \left\{ \log \left(\frac{p'_{NCi}}{p'_{OC}} \right) + \right. \\ &\quad \left. \log \left(\frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} \right) \right\} \end{aligned} \quad (10)$$

$$OCR_{post} = OCR_q^{\frac{1}{1+A}} \cdot OCR \quad (11)$$

식 (9)와 식 (11)을 식 (8)에 대입하면 식 (12)가 유도된다.

$$\frac{S_{u, cy}}{S_{u, OC}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{OC}} \right)^{\left(1 - \frac{A}{1+A} \right)} \quad (12)$$

식 (12)에서 과압밀점토의 반복재하 후 비배수강도저하는 반복하중이력 전의 재하압밀압밀 p'_{OC} 과 반복재하에 의해서 발생한 과잉간극수압 Δu 에 의해서 표현할 수 있다.

2.2 강성저하 예측식

Ladd(1977)는 일반적으로 점성토의 강성저하는 유효응력의 감소와 과압밀비 OCR의 증가에 따른다고 하였다. 과압밀비 OCR의 증가에 의한 강성저하는 Worth and Houlsby(1985)가 제안한 경험식을 이용하였다.

$$\left(\frac{G}{p'} \right)_{OC} / \left(\frac{G}{p'} \right)_{NC} = 1 + C \cdot \ln(OCR) \quad (13)$$

여기서, $(G/p')_{OC}$ 와 $(G/p')_{NC}$ 는 정규화한 과압밀과 정규압밀상태에서 비배수전단 강도, OCR은 과압밀비, C는 경험적인 재료정수이다. 또한 $p'_{NC}/p'_{OC}=OCR$ 인 관계이다. 본 연구에서는 등방탄성체에서 $E=2G(1+\nu)$ 의 관계에서 $\nu=constant$ 라고 고려하여 다음과 같은 식을 얻었다.

$$\frac{E_{OC}}{E_{NC}} = \frac{1+C \cdot \ln(OCR)}{OCR} \quad (14)$$

그림 4의 변형계수와 압밀압력과의 관계에서 점 A에서 점 B까지 이동하는 그 과정은 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

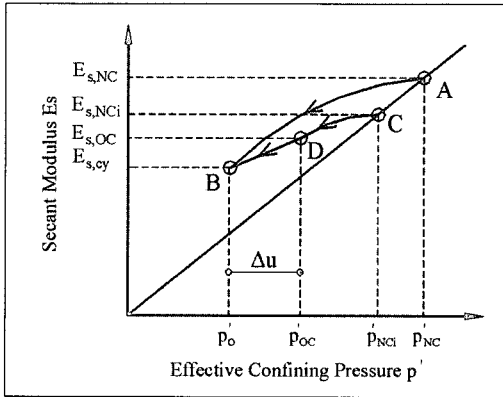


그림 4. 변형계수와 압밀압력과의 관계

$$\frac{E_{s,cy}}{E_{s,NC}} = \frac{1+C \cdot \ln(OCR_{post})}{OCR_{post}} \quad (15)$$

여기서, $OCR_{post} = p'_{NC} / p'_{o}$ 가 된다. 또한, 점 C에서 점 D까지의 과압밀과정은 식 (16)과 같이 된다.

$$\frac{E_{s,OC}}{E_{s,NCi}} = \frac{1+C \cdot \ln(OCR)}{OCR} \quad (16)$$

여기서, $OCR = p'_{NCi} / p'_{oc}$ 이 되며, 위의 식 (15)와 식 (16)에서 식 (17)이 얻어진다.

$$\frac{E_{s,cy}}{E_{s,OC}} = \frac{E_{s,NC}}{E_{s,NCi}} \cdot \frac{E_{s,cy}}{E_{s,NC}} \cdot \frac{E_{s,NCi}}{E_{s,OC}} = \frac{E_{s,NC}}{E_{s,NCi}} \cdot \frac{1+C \cdot \ln(OCR_{post})}{1+C \cdot \ln(OCR)} \cdot \frac{OCR}{OCR_{post}} \quad (17)$$

식 (6)과 그림 4에서 다음의 관계가 성립하는 것을 알 수 있다.

$$\frac{E_{s,NC}}{E_{s,NCi}} = \frac{p'_{NC}}{p'_{NCi}} = \left(\frac{OCR}{OCR_{post}} \right)^{\lambda} \quad (18)$$

식 (18)을 식 (17)에 대입한다.

$$\frac{E_{s,cy}}{E_{s,OC}} = \left(\frac{OCR}{OCR_{post}} \right)^{1-\lambda} = \frac{1+C \cdot \ln(OCR_{post})}{1+C \cdot \ln(OCR)} \quad (19)$$

식 (9)와 식 (11)을 이용해서 식 (20)이 유도된다.

$$\frac{E_{s,cy}}{E_{s,OC}} = \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{oc}} \right)^{-1} \left[\frac{1+C \cdot \ln(OCR) - \frac{C}{1-\lambda} \ln \left(1 - \frac{\Delta u}{p'_{oc}} \right)}{1+C \cdot \ln(OCR)} \right] \quad (20)$$

이와 같이 식 (20)에 의해서 과압밀점토의 반복재하 전후 환산변형계수비는 최종 응력상태에 의해서 과압밀비 OCR와 거기서 발생한 과잉간극수압비의 관계로 나타낼 수 있다.

3. 시험방법 및 재료특성

본 연구에서는 반복이력 후 점토의 전단거동에 미치는 과압밀의 영향을 조사하기 위해서 과압밀된 점토에 대해서 반복삼축시험을 행하고 그 후 단조재하 시험을 행하여 반복재하에 의한 강도 및 변형계수저하를 조사하였다. 그림 2에서 점 C에서 점 D까지는 과압밀상태이므로 삼축시험에서 과압밀상태의 시료를 제작하고, 반복하중에 의해서 점 D에서 점 B로 이동은 삼축시험에서 반복재하를 작용시켰다. 그때 반복하중의 크기를 변화시켜서 발생하는 과잉간극

수압의 크기를 변화시켰다. 반복재하 후 반복하중에 의해 저하한 강도와 강성을 조사하기 위하여 단조재하시험을 행하였다(安原一哉 등 2000; Yasuhara et. al., 2003).

본 연구에서 사용한 시료는 Kueper Marl Silty Clay라고 불리는 영국에서 수입한 점토를 이용하였다. 밀도 ρ_s 와 소성지수 PI는 각각 2.79 mg/cm^3 , 19.7이며, 이 시료에 대한 다른 재료특성은 기존 문헌을 참고 바란다(橫川清兒, 1997; 安原一哉 등, 2000; Song, 2003a; 2003b; Yasuhara et. al., 2003).

4. 시험결과와의 비교

4.1 강도의 시험결과와 예측식 비교

그림 5는 반복재하 이력을 받지 않은 비배수전단강도 $s_{u,oc}$ 로 반복재하 이력을 받은 비배수전단강도 $s_{u,cy}$ 를 정규화한 비배수전단강도비 $s_{u,cy}/s_{u,oc}$ 와 과잉간극수압비 $\Delta u/p'_{oc}$ 와의 관계를 나타낸다. 그 관계

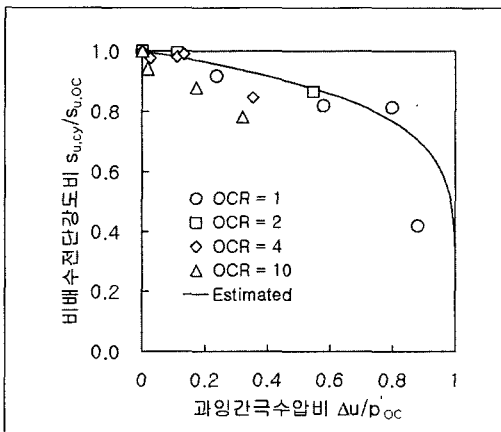


그림 5. 비배수전단강도와 과잉간극수압과의 관계

는 과압밀비 OCR가 클수록 발생한 과잉간극수압비에 대해서 비배수전단강도비의 저하는 크지만, 정규압밀과 과압밀효의 사이에 큰 차는 없고 제안한 예측식과 같이 반복재하에 의해서 발생한 과잉간극수압을 변수로 과압밀에 의하지 않고 하나의 곡선으로 표현하는 것이 가능하다(橫川清兒, 1997; 安原一哉 등, 2000; Yasuhara et. al., 2003).

4.2 강성의 시험결과와 예측식 비교

본 연구에서는 식 (20)과 시험결과와의 비교를 행한 결과가 그림 6과 같다. 이 그림에서 시험결과가 정규압밀효과 과압밀효가 두 개의 그룹으로 나뉘는 것을 알 수 있다. 한편, 예측식이 시험결과와 잘 맞지 않는 듯 보이나 이는 매우 예민한 실험값 때문으로 얻어진 실험 결과치의 작은 차이에도 예측식과 매우 큰 차이를 보이는 경우가 많다. 제안된 예측식은 시험결과와 경향과 같이 과압밀비가 클수록 작은 간극수압비에서도 활선변형계수비가 크게 저하하는 것을 알 수 있다(橫川清兒, 1997; 安原一哉 등, 2000; Yasuhara et. al., 2003).

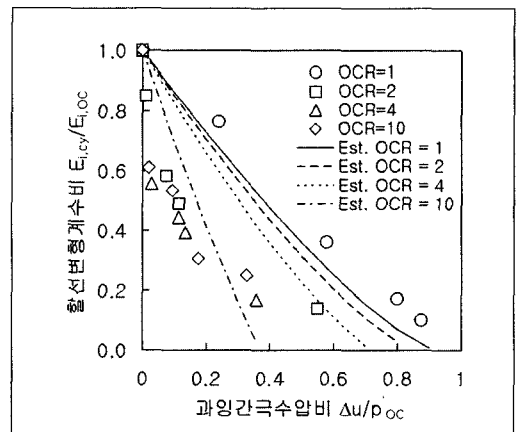
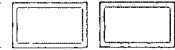


그림 6. 활선변형계수와 과잉간극수압과의 관계



5. 결론

본 연구에서는 반복삼축시험을 수행하지 않고도 과잉간극수압비와 정적삼축시험만을 통하여 비배수 상태의 과압밀점토에 대하여 반복하중 작용 후 강도 및 강성을 예측하는 방법을 제안하였으며, 실험결과와 비교한 결과 제안된 예측식으로 과잉간극수압의 증가에 따른 저하된 과압밀점토의 강도와 강성을 예측할 수 있는 것을 알았다.

참고문헌

1. 安原一哉, 村上哲, 横川清児, 宋炳雄(2000), 過圧密された塑性シルトの繰返し載荷履歴による強度 剛性の劣化特性. 過圧密土および過圧密地盤の力学に関するシンポジウム. 地盤工学会, 2000. 12. 57-62
2. 横川清児,(1997), 地震時における過圧密粘性土地盤の沈下予測, 平成9年度茨城大学修士学位論文.
3. Ladd, C. C. et al. (1977), "Stress-Deformation and Strength Characteristics", Proc. 9th ICSMFE, Vol. 2, pp.421-494
4. Song, B.W. (2003a), *Evaluation for Lateral Flow of Non-plastic Silt induced by Earthquakes*, Doctoral dissertation, Graduate school of Science and Engineering, Ibaraki University
5. Song, B.W. (2003b), "The Influence of Initial Static shear Stress on Post-cyclic Degradation of non-plastic Silt", Lowland Technology International, IALT, Vol. 5, No. 1, pp.14-24
6. Wroth, C. P. and Houlsby, G. T. (1985), "Soil Mechanics, Property Characteristics and Analysis", Proc. 11th ICSMFE, Vol.1, pp. 1-55
7. Yasuhara, K., Hirao, K. and Yamanouchi, T. (1982), "Cyclic Strength and Deformation of Normally Consolidation Clay", Soil and Foundations, JGS, 22(3), pp.77-91
8. Yasuhara, K. (1997), "Method for Estimating Postcyclic Undrained Secant Modulus of Clays", J. of Geotechnical Eng. and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol.123, No.3, pp.204-211
9. Yasuhara, K., Murakami, S., Song, B.W., Yokokawa S.,and Hyde, A.F. L. (2003), "Postcyclic Degradation of Strength and Stiffness for Low Plasticity Silt", J. of Geotechnical Eng. and Geoenvironmental Eng., ASCE, Vol.129, No.8, pp.756-769