

반복전단을 받는 고화 처리토의 강성저하와 일축압축강도

Stiffness Degradation and Unconfined Strength of the Chemically Grouted Sand Subjected to Cyclic Shear

권영철[†] · 이봉직¹⁾ · 배우석²⁾

Kwon, Youngcheul · Lee, Bongjik · Bae, Wooseok

ABSTRACT : The performance of the improved soil against liquefaction depends upon the chemical density, and it has been decided on the basis of the unconfined compressive strength of the improved soil up to date. On the other hand, several authors have proposed that the stiffness degradation could be treated as the clue for the judgment of the possibility of liquefaction. In this study, therefore, the stiffness degradation of the improved soil was estimated as the resistance against liquefaction by using the strain controlled cyclic triaxial test equipment. Based on the test results, it is concluded that the chemically treated sand can resist against the liquefaction in aspect of the reduction in effective stress and in the stiffness. Furthermore, even in the case of low chemical density, such as 2% in this study, has enough liquefaction resistance when compared with the 5~6% which often used in practical design. Considering this fact, the design of chemical density based on the unconfined strength can lead the overestimation in chemical density, and chemical density can be reduced when considering the stiffness reduction shown in this study.

Keywords : Stiffness degradation, Unconfined strength, Liquefaction, Chemical density

요 지 : 약액으로 개량된 지반의 액상화 저항은 약액의 농도에 따라 달라지며 현재는 일축압축강도를 기준으로 농도가 결정되는 것이 일반적이다. 하지만 액상화에 대한 저항력을 나타내는 강성저하율을 적극적으로 평가하여 합리적이고 경제적인 설계를 확립해야 할 필요성이 몇몇 연구자들에 의해 지적되어 왔다. 이에 본 논문에서는 반복전단 삼축압축시험을 이용하여 개량토의 강성저하율을 평가하였으며 이를 바탕으로 약액 농도 산정의 합리성을 검토하였다. 실험결과, 개량토는 유효응력의 감소, 강성의 저하 측면에서 모두 액상화에 대한 저항력을 갖고 있었으며, 설계에서 사용하는 5~6%의 약액 농도보다 적은 2%의 약액 농도에서도 액상화 저항이 향상되었다. 이러한 점을 바탕으로 생각하면, 기존의 일축압축강도를 기준으로 한 약액농도의 설정은 과다설계의 가능성이 있는 것으로 판단되었으며, 결국 과도하게 일축압축강도를 증가 시키지 않고도 강성저하가 방지되며 이를 반영한다면 약액 농도를 보다 합리적으로 줄여 갈 수 있을 것으로 기대한다.

주요어 : 강성저하율, 일축압축강도, 액상화, 약액 농도

1. 개 요

2005년 3월 20일 진도 7 규모의 지진이 일본 후쿠오카를 비롯한 큐슈 북부지방을 중심으로 발생하여 이후 최근까지도 규모의 차이는 있지만 지진이 자주 발생하고 있다. 이 지역은 지금까지 지진에 대해 비교적 안전한 지역으로 알려져 있었으며 이 지진으로 많은 충격과 더불어 대비를 서두르고 있기도 하다. 한가지 심각하게 받아들여야 할 사실은 이곳에서 발생하는 지진은 우리 나라에 직접적인 영향을 줄 수 있다는 가능성이 있다는 것이다. 실제로 2005년 6월 30일 리히터 규모 4.0의 지진이 부산과 순천일대에서 관측되는 등의 사실에 비취볼 때 내진의 개념을 도입하기 이전의 구조물이나 지진 발생시 큰 피해를 줄 수 있는 위험 시설물

에 대한 여러 가지 대책과 보강 등이 요구된다.

그러나, 우리 나라에서는 지진에 대한 인식이 미흡하며 특히 기초지반의 내진설계의 개념이 도입되기 이전의 기존 구조물은 내진성능 향상이 필수적이다. 이러한 현실적인 문제점을 해결하기 위해서 다짐을 통해 밀도를 향상시키거나 지하수위를 저하시키는 등 다양한 대책공법을 강구할 수 있으나 이러한 기존의 대책공법은 상부 구조물의 철거가 필요하거나 유해 침하를 유발하는 등의 단점이 지적되고 있다. 따라서 상부 구조물의 공용성을 유지해가면서 내진성능을 향상시킬 수 있는 방안으로써 용액형태의 약액을 주입하여 치환하여 액상화의 원인이 되는 간극수를 제거하여 항구적으로 내진성능을 확보하는 등의 처리공법이 개발되고 있다(Yamazaki 등, 2005). 이 공법은 내

† 정회원, 충주대학교 토목공학부 연구교수(E-mail : yckhen@cju.ac.kr)

1) 정회원, 충주대학교 토목공학부 부교수

2) 정회원, 청주대학교 토목환경공학과 전임강사

진설계가 이루어지지 않은 취약 구조물의 하부 지반을 개량하여 성능 향상을 도모할 수 있으며, 특히, 이 공법은 시공시 기존의 시설을 철거할 필요가 없기 때문에 보다 경제적이며 대규모 시공이 가능하기 때문에 액상화의 가능성이 있는 옥외 탱크의 기초지반 개량에도 유효하다. 우리나라에서도 소방기술기준에 관한 규칙 제 179조를 통해 탱크나 옥외 시설물의 내진설계 및 보강에 대한 포괄적인 기준을 두고 있으나 이 분야에 대한 관심과 더불어 관계법령의 정비 및 기존 시설물의 보강기술 개발에 대한 적극적인 연구 검토가 필요하다는 지적이 있다.

본 논문은 약액으로 고화처리 된 모래 지반에 반복전단이 외력으로 작용할 경우의 거동이 보강 전후에 어떻게 달라지는가를 실험적으로 구명하고자 한다. 이를 위해 본 논문에서는 세립분 함유량이 조절된 시료 A와 B를 사용하였으며 특수 실리카의 농도를 2, 3, 4, 5, 6%로 조정하였다. 이다. 최종적으로는 액상화 저항의 지표로써의 강도 저하율의 변화와 설계에 직접적으로 사용되고 있는 일축압축강도와 상관성에 대해 고찰하는데 있다.

2. 공법의 개요 및 관련 연구

1995년 한신-아와지 대지진(Hanshin-Awaji Earthquake)을 계기로 일본에서는 내진 기준에 대한 검토를 전면적으 실시하였으며 이후 신설된 구조물 지반의 상당 부분은 샌드 컴팩션 파일 등으로 보강이 이루어 지고 있으나, 문제가 되는 부분은 기존 구조물의 하부 지반의 개량이나 보강 부분이다. 결과적으로 기존 구조물의 보강은 그 사례도 매우 적으며 적절한 공법이 제안되는 경우도 많지 않았다. 기존 구조물의 보강에 있어서 전제가 되는 것은 구조물의 철거가 없이 넓은 지역의 보강이 가능하도록 하는 것이다. 이에 침투고화처리공법이 개발되어, 일본 내에서는 1998년 동경 국제 공항 시험공사를 시작으로 약 20여건의 시공 사례가 있는 것으로 보고되고 있다(Hayashi 등, 1996; 河村 등, 2001).

침투고화처리공법은 강도가 영구적으로 발휘되는 특수 실리카계 약액을 사용하여 그 약액이 모래 입자간의 물과 치환되며 침투해 지반을 고결시키는 공법이다. 그림 1에 나타난 바와 같이 약액을 모래지반에 주입하면 간극수가 이 약액으로 치환되며 약액은 겔상 물질로 변화하기 때문에 간극은 겔상 물질로 충전되는 상태가 된다. 따라서 이러한 개량지반에서는 액상화의 요인이 되는 간극수가 자유롭게 움직일 수 없는 것이 특징이다. 결국 간극수의 특성을 개량함으로써 간극수압의 상승을 억제하는 원리에

기초한 액상화 대책공법이다. 또한 동시에 점착력도 추가되어 정적인 전단강도가 약액의 농도에 비례하여 커지게 된다. 침투고화처리공법은 종래의 약액 주입 공법과 같이 지반 내에 보링을 수행하여 주입관을 삽입한 후 개량이 필요한 곳에 직접 약액을 주입하는 것이 가능하므로 구조물의 직하 지반에의 적용이 가능하다(Hayashi 등, 2000; 2002; 河村 등, 2003).

Kusakabe 등(1998)은 약액으로 개량된 모래의 동적 거동을 파악하기 위하여 저장도의 개량 모래를 이용하여 온라인 지진응답실험을 수행하였으며, 개량토에서는 일축압축강도가 16kPa정도에서도 지진에 의한 전단 변형률 이력에 대해 내진성능이 저하되지 않고 있다는 것을 보였다. 또한, Yamazaki 등(2005)은 실리카계 약액 개량토의 액상화 특성에 있어서 세립분 함유율의 영향에 대해 고찰하였다. 이에 의하면, 실리카 농도가 같은 경우에는 지반의 세립분 함유율이 증가할수록 일축압축강도가 증가하고 있음을 제안하였다. 이 상승 경향은 세립분 함유량이 25%에 이를 때까지 계속되고 있었으며, 재하 회수 20회에 있어서 반복 응력 진폭비는 세립분 함유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보이고 있어 액상화를 일으키기 어려운 재료로 변화하고 있음을 밝혔다.

천병식 등(1988)은 물유리계 약액을 사용한 고결토의 진동감쇄특성에 관련된 연구에서 약액을 이용하여 처리한 다양한 모래시료에서 차수효과와 강도증가뿐만 아니라 감쇠비 증가에도 큰 효과를 발휘하고 있음을 확인하여 약액으로 처리된 지반이 내진 성능 향상측면에서도 효과가 있

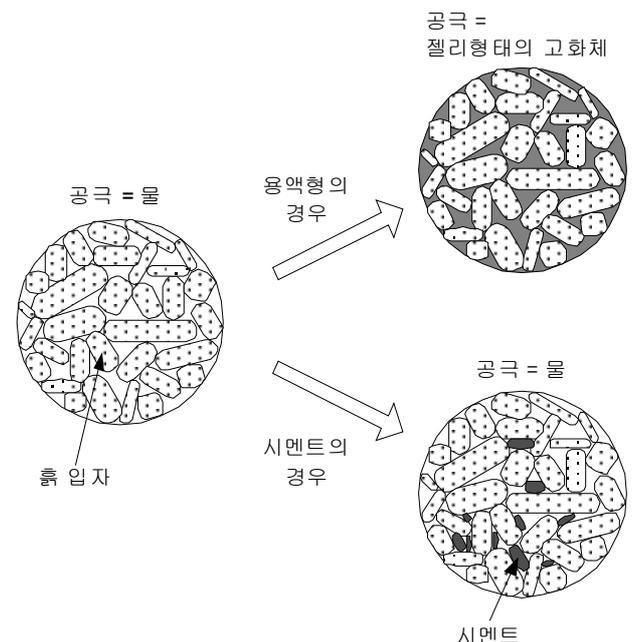


그림 1. 침투고화처리공법의 개량 원리(Yamazaki 등, 2005)

음을 보였다.

특히, 고화처리공법에 있어서 약액농도의 결정은 보강 성능향상 측면 그리고 경제성 측면에서 공법의 유효성을 결정하는 매우 중요한 인자이다. 현재까지는 개량강도가 일축압축강도 기준 80~100kN/m² 정도를 확보하도록 하는 제안(山崎 등, 2002)에 기초하여 약액농도를 5~6% 정도로 일률적으로 적용하고 있으나, 본 논문에서는 반복전단 삼축압축시험 결과로 얻어지는 전단강성의 저하 측면에서 현재의 약액 농도 설정의 문제점을 분석한다.

3. 실험 방법

3.1 공시체의 작성방법

본 논문에서 사용한 흙 시료는 기본적으로 세립분을 포함하지 않은 모래(시료 A)이며, 세립분이 미치는 영향을 검토하기 위해서 규사를 이용하여 세립분 함유량이 10%가 되도록 조절한 모래(시료 B)를 이용하여 실험을 수행하

표 1. 사용된 시료의 물성 특성

항목	시료 A	시료 B
세립분 함유율(%)	0	10
비중	2.620	2.620
최대건조밀도(g/cm ³)	1.585	1.700
최소건조밀도(g/cm ³)	1.236	1.321
최대간극비	1.120	0.983
최소간극비	0.653	0.541
간극비	0.840	0.718

였다. 두 모래 시료의 물성 특성은 표 1에 정리하였다.

침투고화처리공법에서 사용하는 약액은 특수실리카, 반응제 A와 B, 조제 등 총 4가지의 재료의 배합으로 제작된다. 특수실리카는 물 유리로부터 전기 투석에 의해 Na⁺를 제거 시킨 것으로 약액의 주성분을 이루게 된다. 특히 이 안에 포함된 실리카(SiO₂)의 농도가 개량토의 강도를 결정하게 된다. 반응제 A와 B는 pH를 조정하여 겔타임을 조절하는 역할을 하며 조제는 염화 나트륨으로 고화의 안정성을 위해 사용하였다. 약액 원액과 반응제와 물을 투입하여 최종적으로 약액의 pH가 3.15~3.18정도의 값을 갖도록 약액을 제작하였다. 마지막으로 조제를 투입하고 탈기조에서 1시간 정도 탈기를 시켜 약액을 완성한다.

공시체의 제작을 위하여 상기 제작된 약액과 서미트 몰드(직경 5cm, 높이 10cm), 공시체 분리용 필름 및 소정량의 시료를 준비한다. 먼저 몰드 안에 분리용 필름을 두른 후, 시료를 투입한다. 시료는 총 3회에 나누어 투입되고 가볍게 진동을 가한 후 다음 층을 투입하는 방법으로 제작한다. 시료의 제작이 완료될 때의 공시체 높이가 11cm가 되도록 진동을 가하고 밀도를 조절한다. 최종적으로는 20°C의 일정한 온도 조건에서 28일간 양생시킨다. 이렇게 만들어진 공시체를 이용하여 일축압축시험과 삼축압축시험을 실시한다.

3.2 비배수 반복전단 삼축압축시험

반복전단 삼축압축시험은 일정한 변형률 속도로 재하되는 변형률 제어방법을 사용하였으며 시료의 세팅이 완료

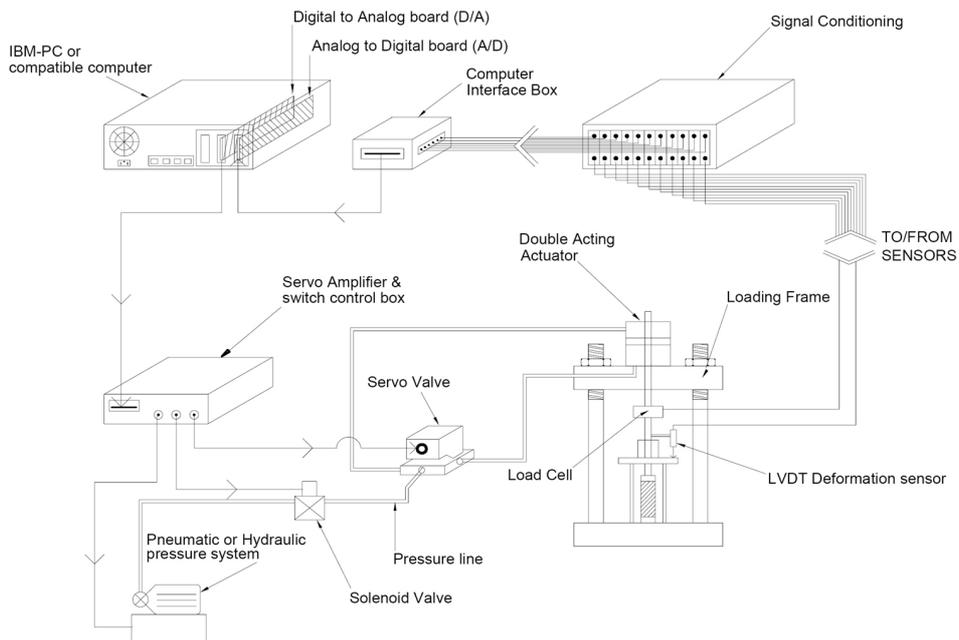


그림 2. 반복전단 삼축압축시험장치의 개요도

되면 포화도를 향상시키기 위하여 CO₂를 약 40분간 공시체가 연결되는 모든 배관에 흐르게 한 후 탈기수를 이용하여 배관을 채우게 된다. 그 후 200kPa의 배압을 재하하여 약 1시간 정도 방치한 후 간극수압계수 B치를 측정하여 0.95 이상이면 실험을 실시한다. 시료는 등방 압밀 조건으로 100kPa에 이를 때까지 10kPa의 단위로 압밀된다. 입력

파형은 사인파로 하였으며 비배수 상태에서 정해진 축변형률을 재하속도가 0.1Hz가 되도록 일정하게 유지하여 실험을 실시하였다. 재하 횟수는 총 100회로 하여 축차응력과 간극수압을 측정하게 된다. 비배수 반복전단 삼축압축시험은 그림 2와 사진 1에 나타난 반복전단 삼축압축시험장치를 이용하였다.

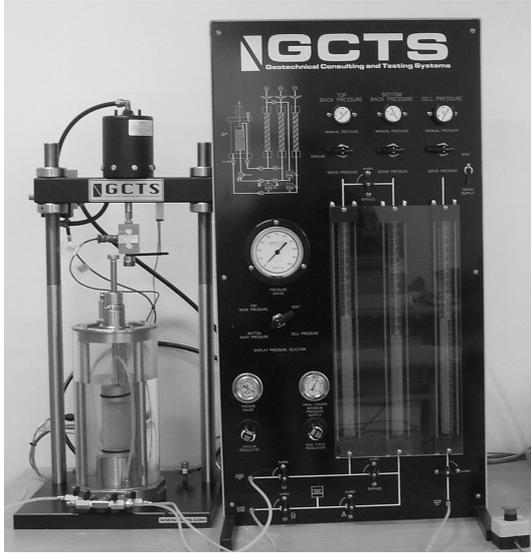
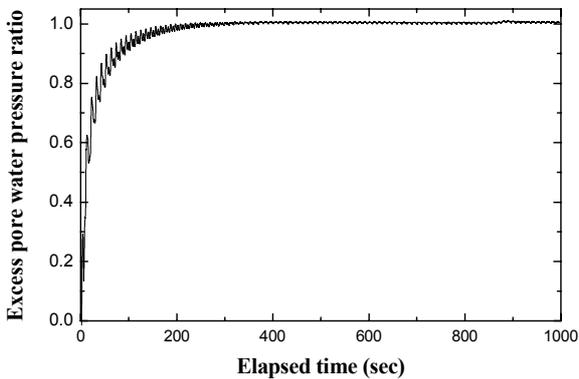


사진 1. 시험장치

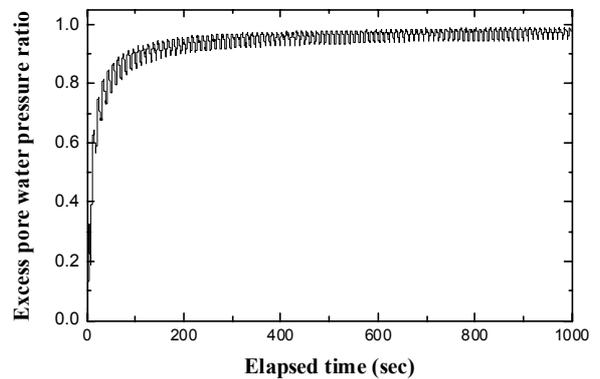
4. 실험 결과 및 고찰

4.1 개량 여부에 따른 대상 시료의 거동 비교

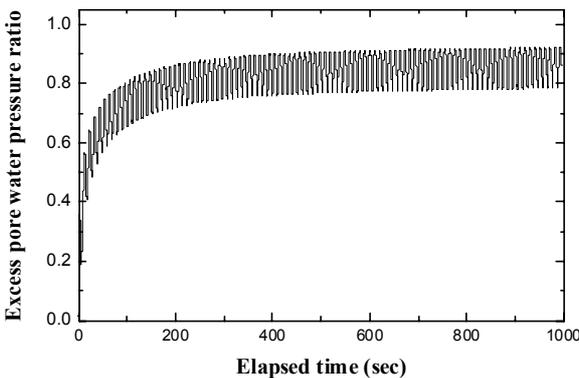
그림 3에서는 미개량토와 개량토(약액농도 2%, 4%, 6%)의 일정 축변형률 SA(single amplitude)=0.2%에 있어서의 과잉간극수압 상승 특성을 보이고 있다. 미개량토에서는 재하가 반복됨과 함께 과잉간극수압비가 축적되어 1.0까지 상승하여 액상화에 이르고 있음을 알 수 있다(그림 3(a)). 개량토의 경우에도 미개량토와 마찬가지로 반복회수가 작은 경우에는 과잉간극수압비가 축적되어가지만 최대치가 0.9정도까지만 상승하고 그 후 수압상승이 억제 되고 있다. 더불어, 과잉간극수압의 상승 정도는 약액농도가 높아질수록 줄어들고 있음을 알 수 있었다. 과잉간극수압비는 최대치까지 상승 이후 정상적인 상태가 되어 일정한 진폭을 갖



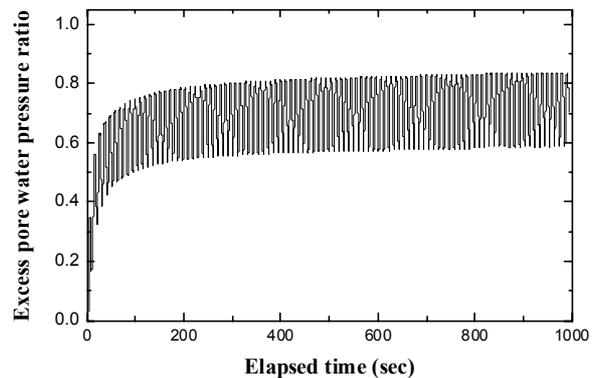
(a) 미개량토



(b) 약액농도=2%



(c) 약액농도=4%



(d) 약액농도=6%

그림 3. 과잉간극수압비의 시간적 변화

는 변동 추이를 보이며, 약액농도가 높아지면 그 진폭도 커지는 특징이 있었다. 또한, 약액 농도가 높아지게 되면 액상화 저항 특성도 좋아지게 되며 효과적으로 외력에 저항할 수 있게 된다. 그러나 중요한 점은 약액의 농도가 증가하게 되면 이에 상반하여 경제성이 저하되는 문제점을 갖고 있다는 것이다. 따라서, 합리적인 농도 결정 측면에서 액상화에 대한 저항특성을 고려해야 할 것으로 판단한다.

미개량토와 개량토의 전단응력-전단변형률의 관계는 그림 4에 도시하였다. 전술한 바와 같이 미개량토는 과잉간극수압의 상승에 따른 유효응력의 감소에 의해 반복회수가 증가될수록 강성의 저하가 큰 폭으로 일어나고 있으며 최종적으로는 전단저항을 완전히 잃어버리게 된다. 개량토는 과잉간극수압의 상승과 함께 반복회수가 적은 경우에 강성의 저하가 보이기는 하지만 그 후 어느 특정 값에 수렴하여 일정한 강성이 유지되게 된다.

또한, 유효응력경로를 통해 유효응력의 손실의 측면에서도 완전 액상화에 이르지 않고 지속적으로 액상화 저항을 갖고 있는 경향을 볼 수 있으며, 구체적으로는 그림 5에 도시한 바와 같이 미개량토는 원점에 도달하여 유효응력이 0이 되지만 개량토에서는 어느 값 이하로는 유효응력이 감소하지 않는 한계점이 존재하고 있었다. 그림 5(b),

(c) 및 (d)를 비교해보면 약액의 농도가 높아지면 그 유효응력의 한계점이 조금 상승하고 있음을 확인해 볼 수 있다. 이러한 한계점에서는 결국 과잉간극수압이 더 이상 상승하지 않는 것을 나타낸다. 초기 구속압을 100kPa로 설정했으므로 그림 3의 과잉간극수압이 약 90kPa 이상으로는 상승하지 않고 정상적인 변동진폭에 이르고 있는 것과 그림 5(c) 및 (d)의 평균유효응력이 약 10kPa 이하로는 내려가지 않고 정상적인 궤적을 그리고 있어 강성저하와 유효응력의 상실 측면에서 개량된 흙이 지속적인 액상화 저항을 나타내고 있다고 판단된다.

4.2 반복재하에 따른 강성저하의 관계

강성저하율은 첫 번째 사이클의 압축 재하측에서의 활선 전단강성(G_0)과 후속사이클의 활선 전단강성(G)과의 비율로 정의한다. 각 변형률 레벨에 있어서 반복회수의 증가에 따른 강성저하율의 관계를 그림 6에 나타내었다. 0.2%의 동일한 축변형률 진폭으로 실험을 한 그림 6(a)와 (b)를 비교하면 전체적으로 세립분을 함유한 모래의 개량토 쪽이 강성저하가 둔하게 나타나고 있음을 확인해 볼 수 있었다. 따라서 반복삼축압축시험의 결과를 놓고 보았을 때는 전체적으로 시료 B의 개량토 쪽이 강성 저하가 작았으며

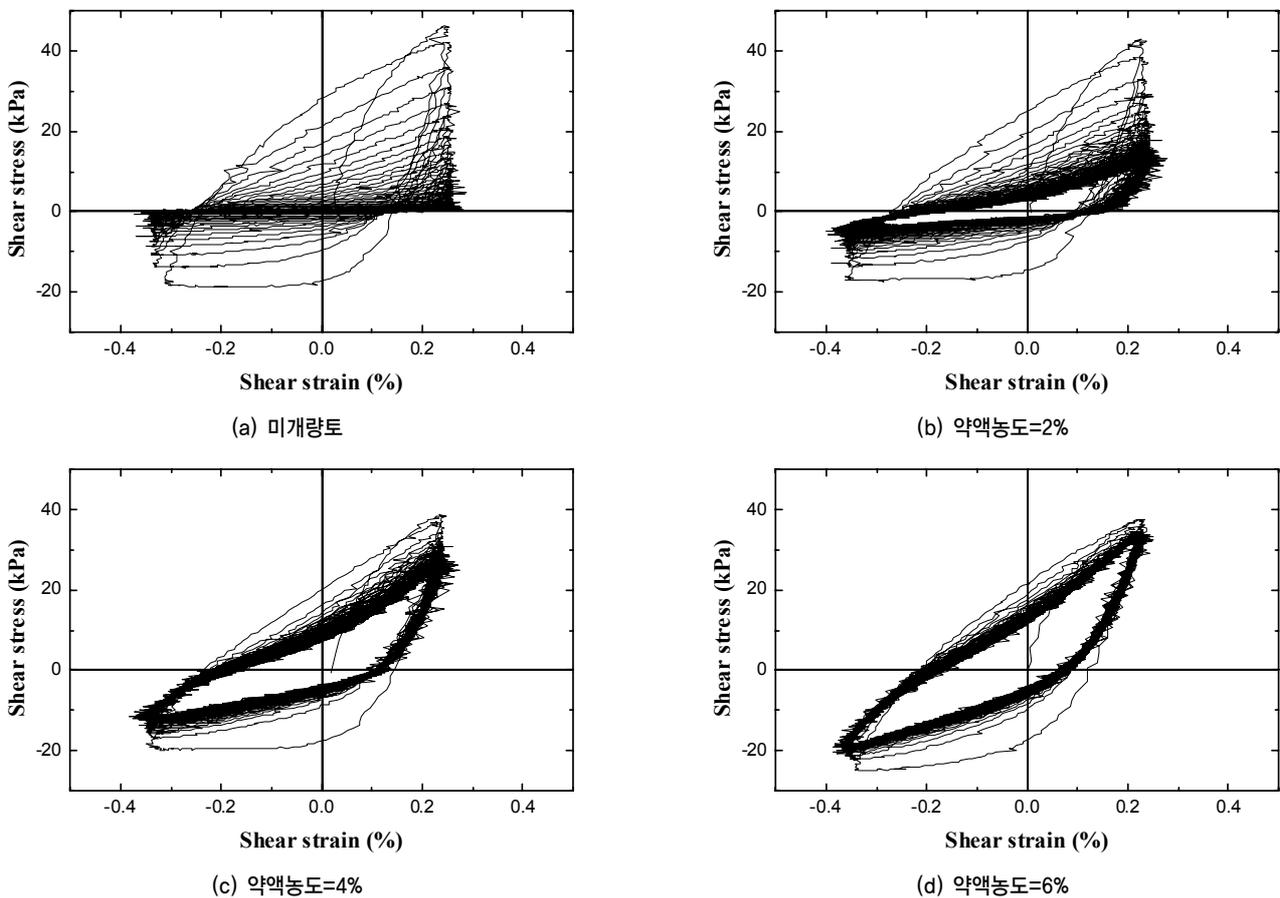
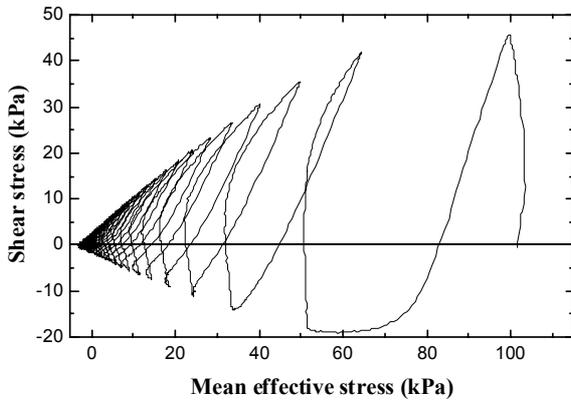
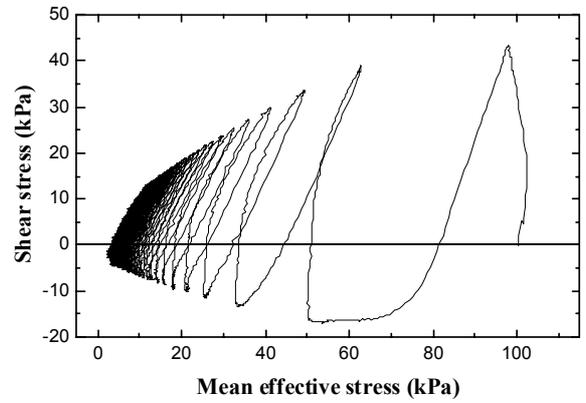


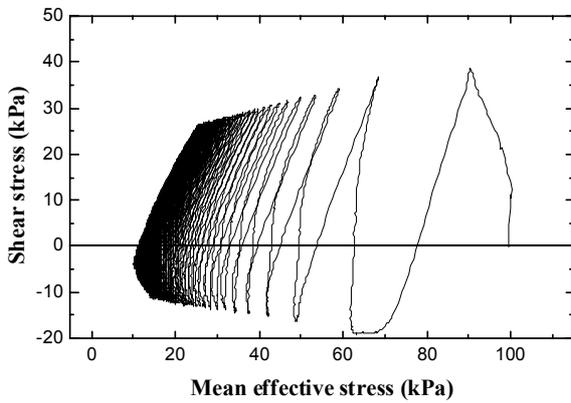
그림 4. 전단응력-전단변형률의 관계



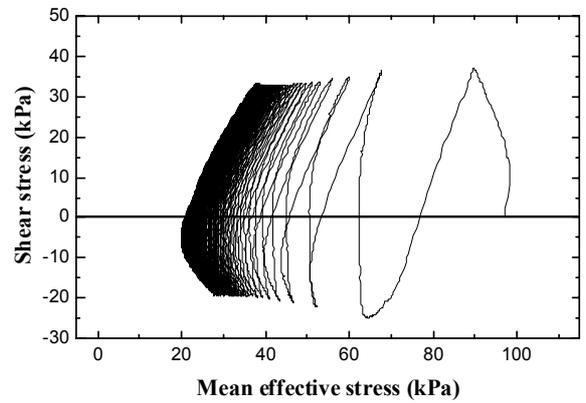
(a) 미개량토



(b) 약액농도=2%

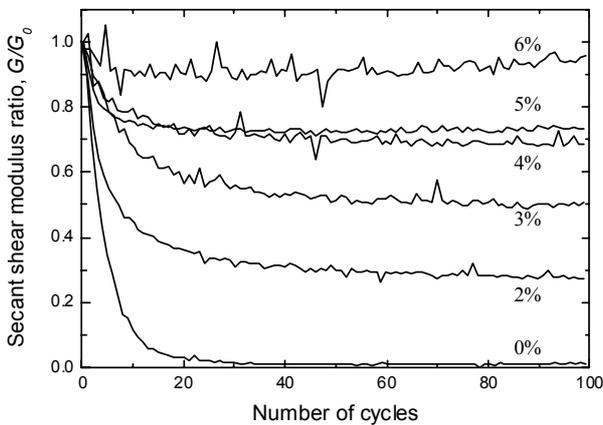


(c) 약액농도=4%

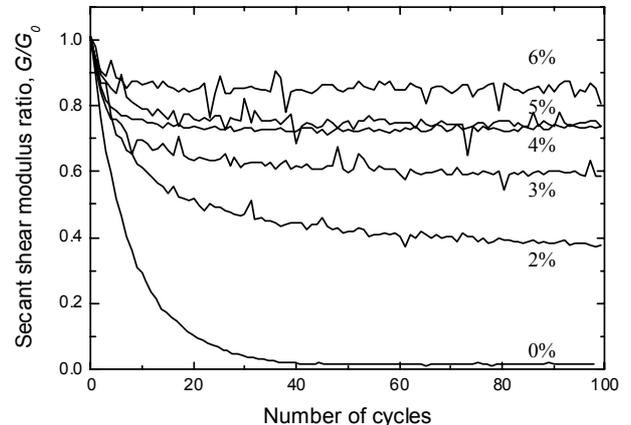


(d) 약액농도=6%

그림 5. 유효응력 경로



(a) 시료 A(세립분 함량=0%)의 강성저하



(b) 시료 B(세립분 함량=10%)의 강성저하

그림 6. 반복재하 회수에 따른 강성저하율

점성을 갖는 흙으로 변화하고 있다고 할 수 있다.

그러나 그림 7에 보인 결과를 보면 두 시료에 있어서 일축압축강도의 큰 변화에 비교하면 강성저하율의 변화는 아주 미미한 수준에 그치고 있다. 결과적으로 본 실험의 결과를 통해 유추하면 일축압축강도와 강성을 유지하려고 하는 강성 저하율 사이의 관계는 낮다고 할 수 있다. 또한, 고화처리공법의 경우에는 일축압축강도를 기준으로 설계

되고 있는 경우가 대부분이나 과다설계의 가능성을 유추해 볼 수 있다. 결국 과도하게 일축압축강도를 증가시키지 않고서도 어느 정도의 일축압축강도만 확보되면 초기강성의 30%~40% 이상의 강성이 확보되어 액상화에 대한 저항이 증가하므로 본 논문의 결과를 설계에 반영한다면 현행의 약액 농도를 보다 합리적으로 줄여갈 수 있을 것으로 기대한다.

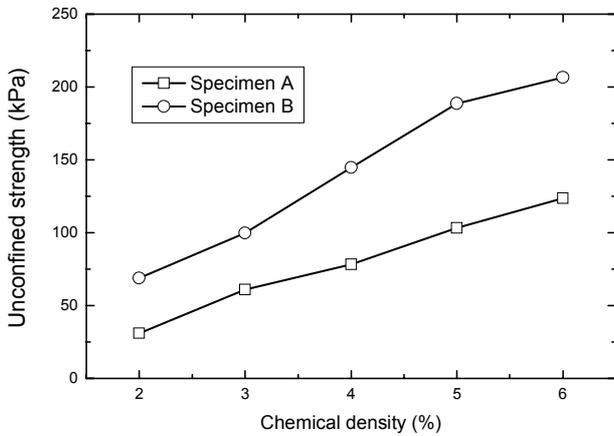


그림 7. 약액 농도에 따른 일축압축강도의 변화

5. 결 론

본 논문은 액상화 대책공법으로서 침투고화처리토의 합리적인 약액농도 결정을 위해 개량토를 이용한 정변형률 비배수 반복삼축압축시험을 수행하여 개량토의 강성저하율을 고려한 액상화 저항에 대해 고찰하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 개량토는 유효응력의 감소, 강성의 저하의 측면에서 모두 액상화에 대한 저항력을 갖고 있었으며 2%의 개량 강도에서도 충분한 개량효과를 갖고 있음을 알 수 있었다.
- (2) 실험 결과로 판단해보면, 지금까지 약액 농도의 설정 기준이 된 일축압축강도와 강성을 유지하려는 강성저하율 사이에는 높은 상관 관계를 갖고 있다고 할 수 없었으며 일축압축강도에 의한 결정은 과다설계의 가능성이 있었다. 결국 과도하게 일축압축강도를 증가시키지 않고도 강성저하가 방지되며 이를 반영한다면 약액 농도를 보다 합리적으로 줄여 갈 수 있을 것으로 기대한다.
- (3) 흙 시료에 세립분이 10% 정도 포함되어 있는 경우 같은 약액 농도에서 액상화에 대한 저항이 증가하였다.

이러한 점은 특히 2%의 약액 농도에서 두드러지게 나타났다으며 세립분이 포함된 경우가 그렇지 않은 경우에 비해 강성저하율 측면에서 0.1 정도 향상되었다.

감사의 글

이 논문은 2006년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(KRF-2006-351-D00036).

참 고 문 헌

1. 천병식, 권영인(1988), 물 유리계 약액을 사용한 고결토의 진동감쇠특성, *대한토목학회 논문집*, Vol. 8, No. 2, pp. 141~150.
2. 河村健輔, 鈴木善宣, 長谷川英勝, 三根範俊(2001), 浸透固化工法による既設矢板岸壁の地盤改良, *基礎工*, Vol. 29, No. 5, pp. 33~36.
3. 河村健輔, 善 功企, 山崎浩之, 林健太郎(2003), 既設構造物直下地盤の液状化対策－浸透固化工法－, *土と基礎*, Vol. 51, No. 3, pp. 13~15.
4. 山崎浩之, 善 功企, 河村健輔(2002), 溶液型薬液注入工法の液状化対策への適用, *港湾空港技術研究所報告*, 第41号, 第2号, pp. 119~151.
5. Kusakabe, S. and Morio, S.(1998), Liquefaction Resistance of Chemical Grouted Sand with Low Strength, *The 33th JGS National Conference*, Yamaguchi, Japan, pp. 88~89.
6. Hayashi, K. Miyoshi, Y. Zen, K. Yamazaki, H. and Yoneya, H.(1996), Fundamental Tests on Stabilized Sand using Acid Silica Sol, *Proc. of Sec. Int. Conf. on Ground Improvement Geosystems*, Tokyo, Japan, pp. 695~700.
7. Hayashi, K., Zen, K. Yamazaki, H., Yoshikawa, R. and Hayashi, N.(2000), A Field Test on a New Chemical Grouting Method to Improve The Liquefaction, Resistance of Sandy Layers beneath The Existing Structures, *Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Yokohama, Japan, pp. 291~297.
8. Hayashi, K. and Kusumoto, S.(2002), A Method to Countermeasure the Liquefaction beneath the Existing Structures, *WAVE NIPPON*, Tokyo, Japan, Vol. 16, pp. 12~15.
9. Yamazaki, H., Hayashi, K. and Zen, K.(2005), New Liquefaction Countermeasure based on Pore Water Replacement, *16th ICSMGE*, Osaka, Japan, pp. 2741~2744.

(접수일: 2007. 6. 25 심사일: 2007. 7. 20 심사완료일: 2007. 9. 14)