

부산 해성 점토의 일축압축강도 특성 및 교란도에 관한 연구

Unconfined Compression Strength Characteristics and Degree of Disturbance of Busan Marine Clay

김 병 일* / 이 승 원** / 이 승 현*** / 조 성 민****

Kim, Byoung Il / Lee, Seung Won / Lee, Seung Hyun / Cho, Sung Min

Abstract

In this study, relations among unconfined compressive strength, strain at maximum strength and depth were compared with each other. Test specimen is marine clay originated from the place near Ga-duck island in Busan city. In addition, influence of impure material contained in specimen and that of total core recovery(TCR) on unconfined compressive strength and degree of disturbance were investigated. As a result of tests, unconfined compressive strength decreases as strain corresponding to maximum strength increases. Also, the deeper the sampling depth and the bigger the TCR, the unconfined compressive strength increases. Especially, as the TCR increases, the unconfined compressive strength increases and quality of specimen is enhanced.

key words : Unconfined compressive strength, strain at maximum strength, degree of disturbance, total core recovery

요 지

본 연구는 부산 가덕도 부근 해성점토에 대하여 일축압축시험을 실시하여 일축압축강도, 최대강도에서의 변형률, 심도와의 관계를 비교 및 분석하였으며 시료에 포함되어 있는 불순물과 시료채취시 충진율이 흙의 일축압축강도와 교란도에 미치는 영향을 파악하였다. 시험결과 시료의 일축압축강도는 최대강도에서의 변형률이 증가함에 따라 감소하는 결과를 보였으며 채취 심도가 깊을수록, 시료채취시의 충진율이 좋을수록 증가하는 추세를 보였다. 특히 시료 충진율의 증가는 일축압축강도 증가를 가져왔고 시료의 등급 또한 높여주었다.

핵심용어 : 일축압축강도, 최대강도에서의 변형률, 교란도, 충진율

1. 서 론

연약지반을 개량하여 부지를 조성하거나 구조물을 축조하기 위한 대규모 토목공사들이 많은 현장에서 진행되고 있다. 그러나 연약지반에서의 공사는 약한 지반 강도로 인한 지반파괴와 큰 압축성으로 인한 문제가

발생할 수 있다. 이러한 문제에 적절한 대처를 하기 위해서는 원지반의 응력, 강도특성, 응력변형특성 및 지역적 특성 등을 고려하여 합리적인 토질 정수를 적용하여야 한다. 흙의 특성들을 파악하는 방법에는 각종 현장 시험법이 있지만 제한적이기 때문에 현장에서 시료를 채취하여 실내시험으로부터 토질정수를 산출하는

* 정희원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (e-mail : bikim@mju.ac.kr)

** 현대건설(주) 기술개발원 설계실 차장

*** 정희원 · 선문대학교 토목공학과 조교수

**** 한국도로공사 인천대교 건설사업소 부장

방법을 병행해야 한다. 따라서 채취된 시료의 교란정도를 파악하는 것은 매우 중요한 작업이며 시료의 교란도 파악을 통해 교란영향을 고려한 합리적인 토질정수를 산출하여 지반해석, 설계 등에 적용시켜야 한다. 외국에서는 이러한 문제에 효과적으로 대처하기 위하여 샘플링 방법 등 시료의 교란정도를 파악하기 위한 연구가 많이 진행되어 많은 자료가 축적되어 있고 시료의 샘플링 과정 또한 매우 철저하게 관리되고 있다. 그러나 국내에서는 시료교란 정도에 따라 비배수 전단강도를 보정하는 연구(박 등, 2003) 등이 수행된 적이 있으나 전반적으로 이와 관련된 연구는 매우 미비한 실정이며 외국의 자료를 국내 지반에 그대로 적용시키는 것은 지반특성상 커다란 문제점을 내포하고 있다.

본 연구에서는 부산 가덕도 부근 해성점토지반에서 채취한 불교란 시료의 교란 정도를 파악하기 위하여 일축압축 시험결과를 실시하였으며 이 결과를 시료의 충진율 및 불순물의 포함도와 비교 분석하였다.

2. 시료의 교란 원인과 교란도 평가 방법

2.1 시료의 교란원인

시료채취 과정에서는 교란이 필연적으로 발생하게 되는데, Jamiolkowski et al.(1985)은 표 1과 같이 시료 교란에 대한 원인을 분류하였다.

교란이 일어나는 원인은 시료 채취전, 채취중 및 채취후로 나눌 수 있는데 채취전의 교란 원인으로는 응력 해방, 팽창, 다짐, 치환, 바다히빙, 파이핑, 공벽붕괴가 있고 채취중의 교란 원인으로는 응력 해방, 재성형,

치환, 파쇄, 슈 부분에 있는 돌, 토립자의 혼합 또는 분리, 회수실패가 있다. 또한 채취후의 교란의 원인은 응력 해방, 시료중의 간극수 이동, 수분증발, 동결, 과열, 진동, 화학변화, 추출시 교란을 들 수가 있다 (Clayton et al, 1995). 또한 교란은 기계적인 교란의 원인을 들 수가 있는데 Baligh(1985), Hopper(1992) 등은 튜브내로 시료가 관입될 때 발생하는 변형을 연구하여 그림 1과 같은 관계를 밝혔다. 그림 1에서 시료는 시료 채취기에 접근함에 따라 압축변형이 발생하였다가 시료채취기 내로 들어가면 다시 인장변형이 발생하고, 최대 변형이 발생하였다가 다시 감소하게 된다. 변형의 크기는 샘플러 두께비(B/t)에 따라 결정된다.

2.2 교란도 평가 방법

교란도 평가 방법으로는 전단 및 압밀시험 결과에서 체적변형율을 이용하여 시료 교란도를 판단하는 Anderson & Kolstad(1979) 방법, 일축압축시험결과와 교란도를 판정하기 위한 Horiuchi et al.(1987)의 제안법이 일반적으로 많이 사용되는 방법이다. 그밖에 흡수력 시험에 의한 현장 평균응력의 비교법, 현장지반 및 시료에 대한 전단파의 비교법, 튜브시료에 대한 조직의 변화를 관찰하는 정성적인 방법, 압밀시험결과를 이용하여 항복응력에 이르는 변형률을 비교하는 Lunne et al.(1997)의 방법 등 매우 다양한 방법이 있다. 이 연구에서는 일축압축강도와 최대강도에서의 변형률(ϵ_p)에 의한 방법으로 분석을 실시하였다.

표 1. 시료 교란의 원인(Jamiolkowski et al, 1985)

조 건	항 목	비 고
응력해방	천공에 의한 응력변화	· 천공수로 인한 σ_v 의 과도한 인장변형 유발 · 큰 천공압력이 과잉 압축변형 유발
	현장 초기전단응력의 제거	· 결과로 발생하는 전단변형률은 일반적으로 작음
	구속응력의 제거	· 조립토의 존재로 인한 부의 간극수압 손실 · 기포나 용해된 가스의 팽창
시 료 채취기술	시료의 기하학	· 회수율 저조, 시료벽면의 부착력 증가, 내부벽면을 따라 교란된 영역의 증대
	샘플러 추진방법	· 타격법보다 연속적인 압입방법이 좋음
	시료 회수방법	· 시료의 바닥에서 suction효과를 제거하기 위해 진공제거 필요
핸들링 방 법	운반	· 충격, 기온변화 등을 피할 것
	저장	· 박테리아 성장을 최소화하기 위해 현장 온도로 저장 · 샘플링 튜브와의 화학적 반응을 피할 것 · 저장 시간이 장기화하면 간극수의 이동증가
	시료추출과 성형 등	· 추가적인 변형이 없도록 주의

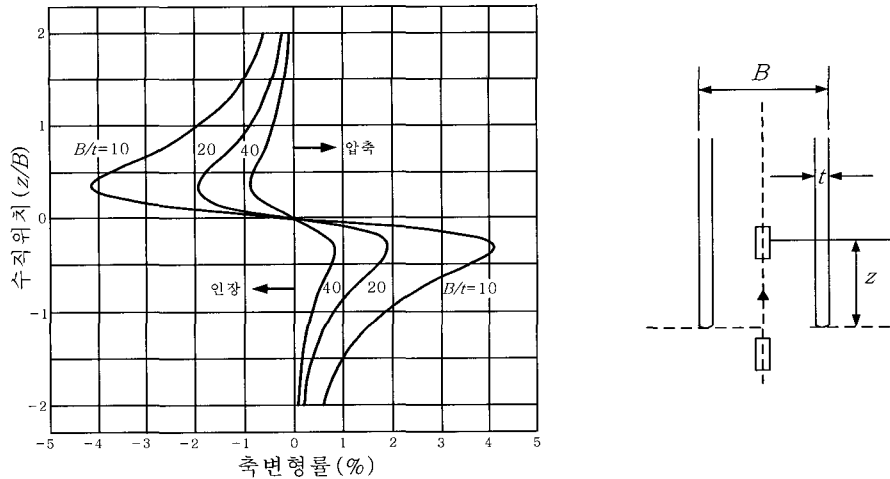


그림 1. 시료가 튜브내로 관입하기 전후의 변형(Baligh, 1985)

일축압축시험은 시험과정이 간단하고 비용이 저렴할 뿐만 아니라 $q_u/2$ 의 평균값이 전 파괴지역의 파괴면에 대한 비배수 전단강도를 잘 대변하기 때문에 (Nakase, 1967; Matsuo & Asaoka, 1976) 교란도 평가에 많이 이용되고 있다. 일반적으로 시료가 교란될수록 일축압축강도(q_u)와 50% 변형시의 탄성계수(E_{50})가 감소하고 최대강도에서의 변형률(ϵ_p)은 증가한다. 일축압축시험에서 교란도의 평가는 정성적이기는 하지만 ϵ_p 값의 범위를 이용하는 경우가 많다(곽 등, 2003). 일축압축시험시 ϵ_p 값에 따라 시료의 교란여부를 판단할 수 있는데 자연시료의 경우, 최대강도에서의 변형률(ϵ_p)은 6% 이내이다. 양호한 자연시료의 경우 일반적 최대강도에서의 변형률 범위는 2~4% 범위에 있으며, 보통 ϵ_p 값이 6% 이상인 시료를 교란시료로 판단하게 되는데, 표 2와 같이 최대강도에서의 변형률에 따라 시료를 5개의 등급으로 분류한다.

표 2. 최대강도에서의 변형률에 따른 시료등급(Horiuchi et al. 1987)

최대강도에서의 변형률 (ϵ_p , %)	시료 등급
< 2	1(매우 양호)
2 ~ 4	2(양 호)
4 ~ 6	3(보 통)
6 ~ 8	4(불 량)
> 8	5(매우 불량)

3. 일축압축시험

3.1 지반조사 현장 위치 및 지층구조

연구대상지역은 부산광역시 가덕도 부근 부두 시공

예정이다. 상부층은 실트질 점토가 차지하고 있으며 두께는 약 22m에 이르고 그 밑으로 실트질 모래층이 1m 정도 분포하고, 다시 실트질 점토층이 약 5m 정도 분포하고 있다. 지표아래 28m 지점부터는 점토질 모래층, 풍화암, 풍화암, 연암층 순으로 분포하고 있다.

3.2 시험 내용

이 연구에서는 중점시추공 한 지점(NBH-21)과 일반 시추공 10 지점(NBH-9, 11, 15, 17, 19, 23, 25, 27, 29, 31)에서 시료를 채취하여 일축압축시험을 실시하였다. 중점시추공(NBH-21)의 경우에는 동일지점에서 4공의 시추를 통해 NX(76mm)와 HX(100mm)크기의 시료 채취관을 이용하여 불교란 시료를 채취하였고 일반 시추공의 경우에는 10곳에서 지점마다 미리 정해진 심도에서 각각 2회 이상 NX 크기의 시료를 채취하였다. 채취한 시료에 대해 각각 현장 실험실과 서울 실험실에서 일축압축시험을 실시하였다. 표 3은 중점시추공과 일반시추공에서 채취한 시료를 가지고 실시한 시험 내용 및 채취한 시료 개수를 정리한 것이다.

4. 시험 결과 및 분석

4.1 일축압축강도와 최대강도에서의 변형률

일축압축시험 결과로부터 얻어진 최대강도에서의 변형률을 그림 2에 나타내었는데 채취한 시료의 대부분은 최대일축압축강도 $0.2 \sim 0.8 \text{ kgf/cm}^2$, 최대강도에서의 변형률 2~6% 사이에 분포하고 있다. 그림 2에서 확인할 수 있는 바와 같이 최대강도일 때의 변형률이 8%가 넘는 교란정도가 매우 심한 시료들의 경우 일축압축강도 역시 다른 시료들에 비해 상대적으로 작게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

표 3. 중점시추공 및 일반시추공의 교란도 분석을 위한 시험 내용

시추공	중점시추공(NBH-21)				일반시추공	
시료직경(mm)	100	100	76	76	76	76
시험장소/조건	현장	실내	현장	실내	현장	실내
시험항목	함수비	함수비	함수비	함수비	함수비	함수비
	일축압축	일축압축	일축압축	일축압축	일축압축	일축압축
시료 수	11	6	12	6	29	22

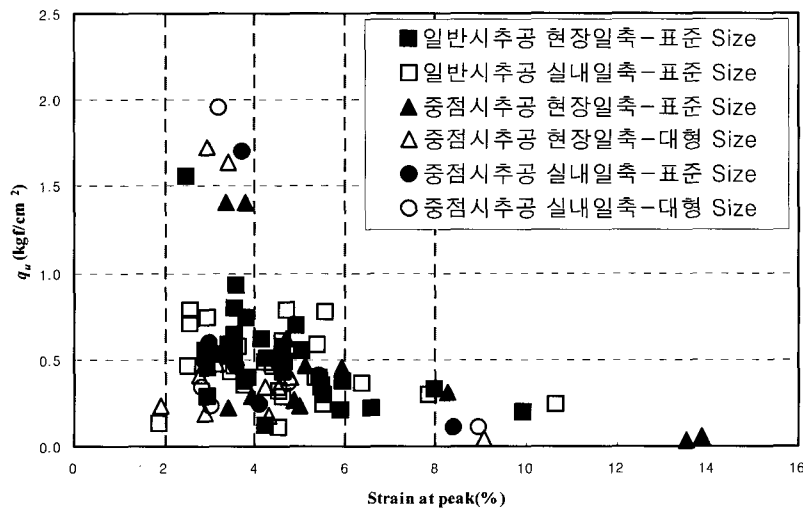


그림 2. 최대 비배수 전단강도 및 최대강도에서의 변형률

표 4. 최대강도에서의 변형률에 의한 교란도 분석결과

ϵ_p (%)	개 수	백분율(%)	등 급
< 2	3	3.1	1등급
2~4	41	41.8	2등급
4~6	43	43.9	3등급
6~8	3	3.1	4등급
> 8	8	8.2	5등급
총 계	98	100	-

일축압축시험 결과로부터 얻어진 최대강도에서의 변형률에 의해 시료의 교란도를 평가하여 등급별 분포율을 나타내면 표 4와 같다. 표 4에서 보는 바와 같이 일축압축시험을 이용한 교란도 분석결과 전체시료의 약 45% 정도가 2등급(양호) 이상인 것으로 나타나 전반적으로 시료 등급이 양호한 것으로 나타났다. 그러나 3등급 시료가 차지하는 비율이 43.9%로 가장 높은 것으로 나타나 시료채취방법에 문제가 있는 것으로 파악되었는데, 이것은 국내에서는 일반적으로 시료채취시 높은 수압을 사용하여 시추가 진행되는 앞부분에서 지반교란을 일으키기 때문인 것으로 추정된다. 또한 교란된 시료라 할 수 있는 4등급 이하의 시료는 전체 시료의 약 11% 정도이며 매우 교란된 시료인 5등급 시료의 비율도 부분적으로 찾아볼 수 있었다.

4.2 일축압축강도와 심도

그림 3은 심도에 따른 일축압축강도를 나타내고 있다. 그림 3에서 보는 바와 같이 일축압축강도는 심도 26m 정도까지는 깊이에 따라 거의 선형적으로 증가하는 양상을 보이다가 그 아래 심도에서는 약간 감소하는 양상을 보이고 있다. 또한 심도 26m 부근에서 일축압축강도가 약 2배 정도 증가하는 일부 시료들을 확인할 수 있는데 이 심도는 모래성분이 많이 섞여있는 층으로 이러한 모래질의 영향으로 인해 일축강도가 다소 증가한 것으로 생각된다. 이런 흙의 최대강도에서의 변형률 역시 2~4% 범위에 포함되는 것으로 나타나 시료의 교란등급 또한 다른 시료에 비해 우수한 것으로 나타났다.

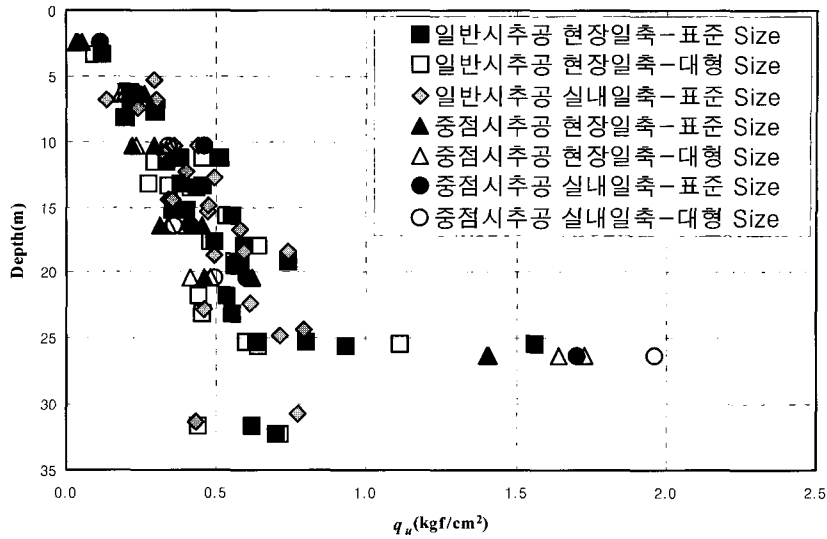


그림 3. 심도별 일축압축강도의 변화

4.3 최대강도에서의 변형률과 심도

그림 4는 채취심도에 따른 최대강도에서의 변형률 (ϵ_p , %)을 나타내고 있다. 최대강도에서의 변형률은 심도에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있으며, 대부분의 심도에서 최대강도에서의 변형률은 2~6% 사이에 존재하였으나 0~10m 사이의 비교적 얕은 심도에서는 8%를 넘는 매우 교란된 시료들을 일부 확인할 수 있었다. 얕은 심도에서 교란된 시료가 발견된 이유는 이 부분에 조개껍질 등 불순물이 많이 포함되어 있거나 충전율이 낮았기 때문으로 추정된다. 또한 심도 16.4m에서의 ϵ_p 값이 채취심도 10.4m나 20.4m에서의 ϵ_p 값보다 전반적으로 좀더 큰 값을 나타내는데 이는

심도 16.0~16.9m 지점의 시료에 포함된 많은 양의 조개껍질이 시료교란에 영향을 준 것으로 판단된다.

4.4 불순물 함량의 영향

중점시추공의 경우 심도 10.4m에서 채취된 시료를 제외한 다른 심도의 지반상태는 조개껍질이나 샌드심 등으로 인하여 비균질하였다. 특히 사진 1에서 보는 바와 같이 각 시험의 시료추출에서부터 성형까지의 과정에서 조개껍질이 매우 많이 포함되어 있는 심도 6.4m, 16.4m 시료의 경우 시험결과에 따른 시료등급 역시 각각 4개 및 2개의 4등급 이상인 시료를 포함하여 교란등급이 불량한 결과를 나타내었다.

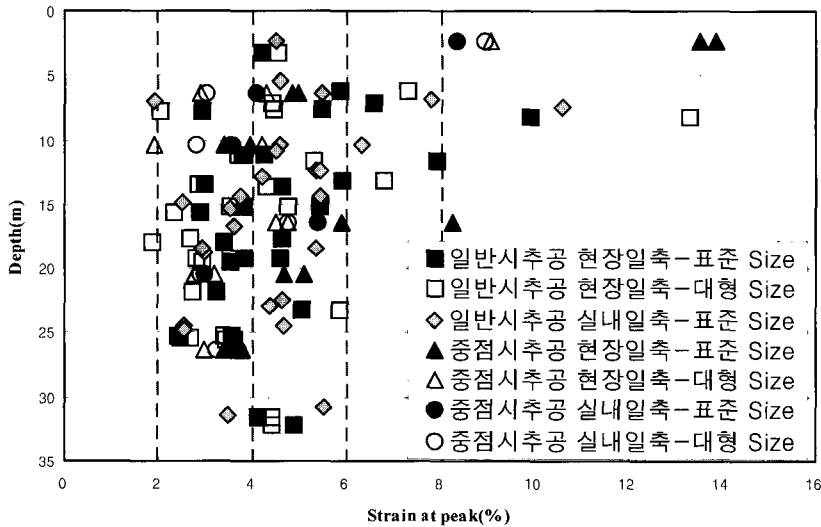


그림 4. 심도별 최대강도에서의 변형률의 변화

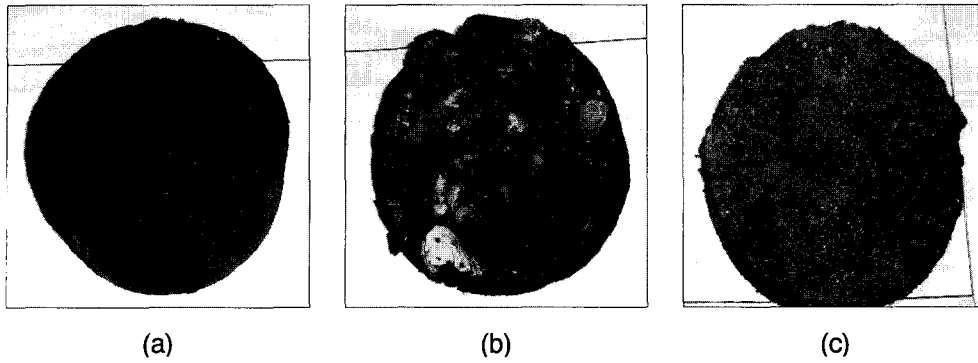


그림 5. 중점시추공에서 채취한 샘플의 시료상태 비교

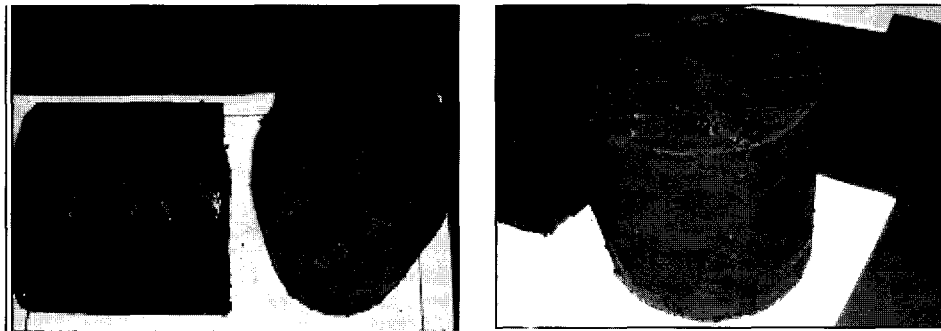


그림 6. 중점시추공에서 채취한 샘플의 연직방향 균열

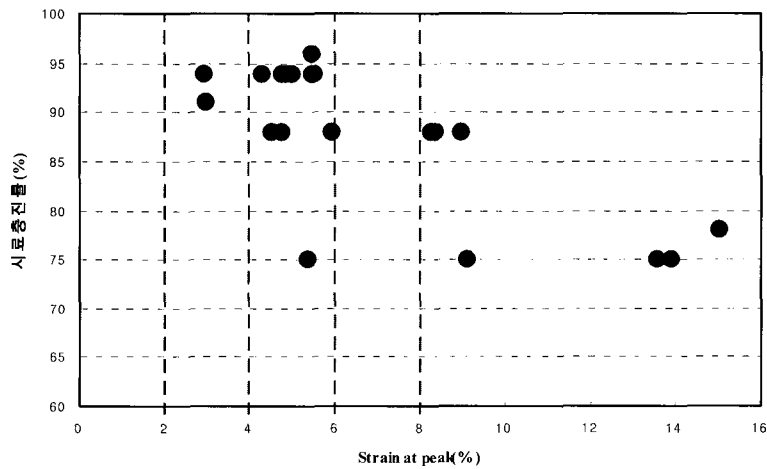


그림 7. 시료의 충진율에 따른 일축압축시험시 최대강도에서의 변형률(ϵ_p)

또한, 사진 2에서 보는 바와 같이 몇몇 시료에서 연직방향 또는 수평방향의 균열 및 흰 띠가 있는 경우를 발견할 수 있었고, 이외에도 시료에 검은색 띠가 있거나 시료 추출시 시료가 저절로 부서져 버릴 만큼 상태가 불량한 몇몇 시료들을 볼 수 있었으며, 이러한 시료들의 등급은 3등급 또는 5등급(일축압축시험의 최대강도에서의 변형률에 의한 방법)으로 시료가 상당히 교란된 것으로 나타났다. 이러한 결과가 얻어진 가장 큰 이유는 중점시추공에서 시료의 교란정도가 지층의 구

성상태(즉, 불순물의 함유정도)에 큰 영향을 받았기 때문인 것으로 판단된다.

4.5 충진율의 영향

충진율은 시료채취기 관입길이에 대한 채취된 시료의 길이비를 나타낸다. 이번 연구에서 채취된 시료 중 상당수는 충진율이 불량하였다. 그림 5는 시료의 충진율이 불량한 시료에 대해서 시료의 충진율과 일축압축시험시 최대강도에서의 변형률 사이의 관계를 나타낸

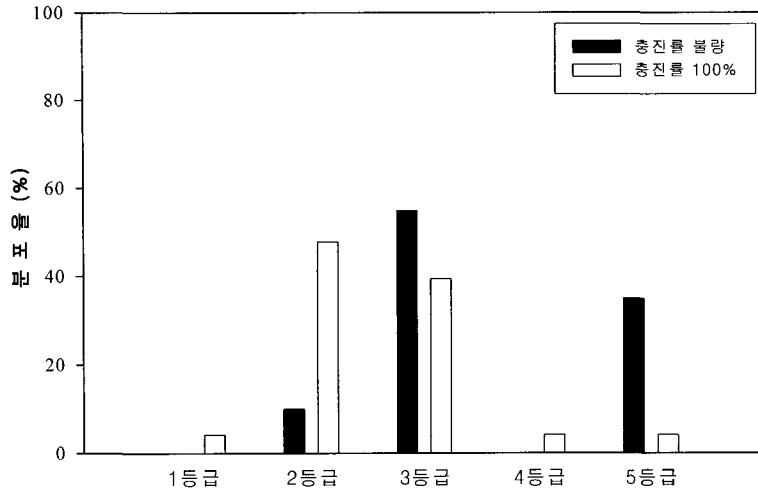


그림 8. 시료의 충진율에 따른 등급별 분포율(일축압축시험)

것이다. 그림 6에서 보는 바와 같이 값이 다소 흩어져 있기는 하나 충진율의 감소에 따라 최대강도에서의 변형률이 증가하는 추세를 보인다라는 것을 알 수 있었다. 이러한 결과는 그림 6에 나타낸 시료의 충진율이 100%인 시료와 불량한 시료의 교란등급별 분포도에서도 확인할 수 있으며 충진율이 100%인 시료의 경우 대부분의 시료가 2~3등급에 편재해 있어 비교적 교란을 덜 받은 상태고, 충진율이 불량한 시료의 경우 대부분의 시료가 3등급과 5등급에 편재해 충진율이 100%인 시료에 비해 교란이 비교적 많이 일어났음을 확인할 수 있었다. 한편, 시료의 충진율이 낮아지는 이유는 지하수위로 인한 시료의 연약, 자갈 및 불순물 등에 의한 시료채취관의 파괴 등을 들 수 있는 것으로 조사되었다.

5. 결 론

이 연구에서는 부산 가덕도 부근 해성점토지반에서 채취한 불교란 시료의 교란 원인을 파악하기 위하여 일축압축시험을 통한 최대일축압축강도와 최대강도에서의 변형률, 심도를 통하여 채취시료의 교란등급과 불순물 및 충진율에 관한 교란도 분석을 통한 상관성 연구를 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 일축압축강도와 최대강도에서의 변형률 관계에서 채취한 시료의 대부분은 일축압축강도 $0.2 \sim 0.8 \text{kgf/cm}^2$, 최대강도에서의 변형률 2~6% 사이에 분포하고 있으나 파괴시의 변형률이 8% 이상인 5등급 시료도 전체시료의 약 8% 정도인 것으로 나타났다. 파괴시의 변형률이 8%가 넘는 교란

정도가 매우 심한 시료들의 경우 일축압축강도 역시 다른 시료들에 비해 상대적으로 작게 나타났다.

- 2) 대부분의 시료는 최대강도에서의 변형률이 2~6%에 존재하였으나 심도 16.0~16.9m 지점의 시료에 포함된 많은 수의 조개껍질은 시료교란에 영향을 주어 최대강도에서의 변형률을 크게 한다든지 일축압축강도를 낮추는 요인으로 판명되었다.
- 3) 일축압축강도와 심도별 관계에서 일축압축강도는 채취심도의 깊이에 따라서 일정하게 증가하는 양상을 보이며 채취심도에 따른 최대강도에서의 변형률(ϵ_p , %)은 심도에 따라 조금씩 감소하는 경향을 보이고 있다.
- 4) 시료 충진율에 대한 분석 결과에서는 충진율의 감소에 따라 최대강도에서의 변형률이 증가하는 추세를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 시료채취 관찰결과 충진율의 감소원인은 지하수위로 인하여 시료가 연약하기 때문이기도 하며 자갈 및 불순물에 의하여 시료채취관 끝이 구부러지면서 충진율을 감소시켰기 때문이었다. 시료의 교란 등급별 분포에서도 충진율이 불량한 시료가 그렇지 않은 시료에 비해 교란이 비교적 많이 발생한 것을 확인할 수 있었다.

시료의 교란도 평가는 시료의 교란정도가 지층의 구

정상태에 큰 영향을 받아 시료의 교란도를 비교하기 위한 연구에 있어 시추위치선정이 매우 중요함을 알 수 있었다. 그밖에 정량적 분석을 통한 연구 자료가 불충분하며 교란도 평가에 사용된 비교 조건간 data수가 매우 부족하였다. 나아가 꾸준한 연구가 진행되어 교란도 분석에 관한 많은 자료가 축적되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

곽정민, 정성교, 백승훈, 이영남, 조기영 (2003) “부산점토에 대한 시료채취 기술에 따른 시료교란과 시험방법에 따른 압밀정수의 비교”, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제4호 pp. 43~53.

박성재, 오원택, 정경환, 여주태 (2003) “시료 교란에 대한 비배수 전단강도 보정방법에 대한 연구”, 대한토목학회 논문집, 제 23권, 제 1C호, pp. 35~46.

Anderson, A. and Kolstad, P. (1979) “The NGI 54-mm Samplers for Undisturbed Sampling of Clays and Representative Sampling of Coarser Materials.”, Proc. Int. Symp. on Soil Sampling, Singapore, pp. 1~9.

Baligh, M. M. (1985) “Strain path method”, J. Geotech. Div., Am. Soc. Civ. Engrs., 111(GT9), pp. 1108~1136.

Clayton, C. R. I., Matthews, M. C. and Simons N. E. (1995) “Site Investigation”, Department of Civil Engineering, University of Surrey.

Hopper, R. J. (1992) “The Effects and implications of sampling clay soils”, PhD thesis, University of

surrey.

Horiuchi, T., Eiki, A. and Funahashi, M. (1987) “Evaluation of Sample Quality by thin-wall Sampling Tube”, Proceeding of the 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 1.

Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine J. T. and Lancellotta, R. (1985) “New developments in field and laboratory testing of soils”, Proceedings of 11th ICSMFE, San-Francisci, Vol 1, pp. 57~153.

Lunne, T., Berre, T. and Strandvik, S. (1997) “Sample Disturbance Effects in Soft Low Plastic Norwegian Clay”, Symp. on Recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, pp. 81~102.

Matsuo, M. and Asaoka, A. (1976) A stactical study on a conventional Safety Factor Method, Journal of the Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 16, No. 1, pp. 75~90

Nakase, A. (1967) The analysis of stability and unconfined compression strength, Soils and Foundations, Vol. 7, No. 2, pp. 35~50

◎ 논문접수일 : 2005년 09월 05일

◎ 심사의뢰일 : 2005년 09월 06일

◎ 심사완료일 : 2005년 12월 01일