

부산점토에 대한 시료채취 기술에 따른 시료교란과 시험방법에 따른 압밀정수의 비교

Sample Disturbance due to Sampling Techniques and Comparison of Consolidation Parameters Between Testing Methods on Pusan Clays

곽 정 민*¹ Kwag, Jung-Min 정 성 교*² Chung, Sung-Gyo
백 승 훈*³ Baek, Seung-Hoon 이 영 남*⁴ Lee, Young-Nam
조 기 영*⁵ Jo, Ki-Young

Abstract

To get improved soil parameters in the laboratory tests, the effects of sample disturbance should be excluded as much as possible. A collaborative research between Dong-A University and PHRI (Japan) was conducted to investigate the effects of sample disturbance due to sampling techniques and samplers on Pusan clays. The results of unconfined compression and consolidation tests performed on the clay samples taken by them have been compared in terms of soil parameters and sample disturbance. As the result of the study, it was found that when the Korean sampler was used with a different technique of cleaning the borehole bottom and removing slime before inserting and penetrating the sampler tube, similar to the one commonly used in Japanese practice, the quality of samples could be greatly improved. Furthermore, the CRS test with the rate of 0.02%/min yielded larger values of consolidation parameters and better degree of sample disturbance than those of oedometer test, due to the difference in testing method.

요 지

연약점토에 대한 실내시험으로부터 양호한 토질정수를 구하기 위해서는 시료교란의 영향을 최소화하여야만 한다. 본 연구에서는 시료채취기술 및 시료채취관에 따른 시료교란의 영향을 조사하기 위한 목적으로 낙동강 하구유역에 분포하고 있는 연약점성토를 대상으로 한·일 공동연구를 실시하였다. 양국의 시료채취기술에 의하여 채취된 시료에 대하여 일축압축시험과 압밀시험을 실시하여 토질정수 및 시료교란도를 비교하였다. 결과적으로, 한국에서 사용되고 있는 수압식 피스톤 샘플러를 사용하더라도 시료채취 전에 일본에서 실시하고 있는 방법대로 슬라임의 제거작업을 면밀히 수행할 경우에 시료의 품질이 명백하게 개선됨을 알 수 있었다. 그리고 0.02%/min의 속도로 수행된 일정변형률(CRS) 압밀시험은 표준압밀시험에 비하여 시험방법의 차이 때문에 압밀정수의 증대 및 낮은 교란도를 나타내었다.

Keywords : Laboratory test, Pusan clay, Sample disturbance, Sampling techniques

*1 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 계약교수 (Member, Research Fellow, Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ.)
*2 정회원, 동아대학교 공과대학 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Dong-A Univ., sgchung@mail.donga.ac.kr)
*3 정회원, (주)가야ENG. 이사 (Member, Director, GAYA ENG. Co.)
*4 정회원, 현대건설(주) 건설기술연구소장 (Member, Director of Hyundai Institute of Construction Technology)
*5 정회원, 부산시 도시개발공사 (Member, Marine Development Team, Busan Urban Development Corporation)

1. 서론

자연 상태의 연약점토지반은 그 구성광물이 동일하다 할지라도 응력이력, 퇴적조건 및 퇴적 후의 환경 그리고 연대효과 등에 의해 토질특성이 다르게 나타난다. 이러한 연약지반의 개발에서는 그 지반의 토질특성을 면밀히 파악하는 것이 선행되어야 할 중요한 작업이다.

부산은 우리나라 제1의 항구도시로서 인구증가에 따른 효율적 토지 이용을 위해 90년대 초반부터 낙동강 하구유역에서 대규모의 개발사업을 활발하게 진행하여 왔다. 하지만 오랜 동안의 개발과정에서 수많은 지반조사가 이루어졌음에도 불구하고 이들 지반의 토질특성이 명확하게 규명되지 못한 실정이며, 이지역 연약지반의 특성에 대하여 많은 연구자들의 관심이 집중되고 있다. 특히 부산지역 연약지반(부산점토)에 대해 수행된 수많은 표준압밀시험 결과로부터 과압밀비(OCR)가 매우 낮게 나타난다는 것이 특징적이다(Chung, 1999; Chung et al., 2002d). 낮은 과압밀비의 원인에 대해서는 많은 견해가 있지만 (Chung, 1999; Giao et al., 2000; Tanaka et al., 2001; Chung and Giao, 2001), 그 중에서 실내시험을 수행하기 위해 채취된 시료의 교란이 주된 영향인자일 것으로 부각되고 있다.

현장으로부터 시료를 채취하는 과정으로부터 실내시험에 이르기까지 수반되는 다양한 원인에 의해 시료교란이 발생한다. 그 중에서 원위치의 응력해방에 의해 발생하는 시료교란은 피하기 어려운 교란이지만 시료채취, 취급 및 실내시험 과정에서 발생할 수 있는 부주의 등에 의한 시료교란은 줄여야 할 당면한 과제이다(권기호, 1997;곽정민 외, 2002).

본 연구에서는 시료교란을 평가하기 위한 방법의 일환으로 불교란 시료의 품질이 비교적 양호하다고 알려진 일본의 시료채취기 및 시료채취 기술과 우리나라의 시료채취기의 사양과 채취기술과의 차이를 비교하였다. 이를 위하여 일본의 PHRI와 동아대학교 BK21팀이 공동으로 시료채취 및 실내시험에 이르는 공동연구를 낙동강 하구의 신호지역에서 실시하였다. 두 나라의 방법으로 채취된 불교란 시료에 대하여 일축압축시험과 압밀시험을 실시하여 토질정수와 시료의 교란도를 평가하였다. 또한 압밀시험법에 따른 압밀정수의 차이를 평가하기 위하여 일정변형률(CRS)과 표준압밀(IL) 시험을 수행하여 결과를 비교 및 분석하였다.

2. 한일 공동연구

2.1 연구배경

부산점토(낙동강 하구유역의 점성토)에 대하여 한일 양국의 시료채취관으로 채취된 시료에 대한 실험결과와의 비교는 1998년 동아시아지질에 의하여 가장 먼저 수행되었다. 그러나 이들의 연구는 단지 양국의 채취관에 따른 실험결과와의 차이를 규명하는 데에 불과하였다(정경환 외, 2001). 그 외에도 시료교란의 발생 원인을 규명하기 위하여 시료 채취관의 크기(Chung et al., 2000), 거시구조에 따른 영향(Chung et al., 2001), 시료추출 방향 및 시료 채취 속도에 대한 영향(Chung et al., 2002b) 등에 대하여 다양한 연구가 시도되었지만 좀처럼 시료교란의 원인을 규명하기가 쉽지 않았다. 한 예로 그림 1은 장유지역 부산점토에 대한 표준압밀시험 결과를 이용하여 Lunne et al.(1997)의 평가법에 의하여 시료의 교란도를 평가한 결과이다. 채취된 시료의 운반, 취급과정 및 실내시험에 이르기까지 세심한 주의를 기울였음에도 불구하고 이들 시료의 교란은 전체적으로 크게 나타남(poor to very poor)을 알 수 있다.

부산점토의 시료교란이 크게 나타나는 근본적인 원인을 알아보기 위해 시료채취기 사양과 시료채취 과정을 면밀히 점검해야 할 필요성이 대두되었다. 일본의 시료채취기를 이용하여 채취한 점성토 시료는 세계적으로 우수한 품질로 인정받고 있기 때문에(Tanaka et al.,

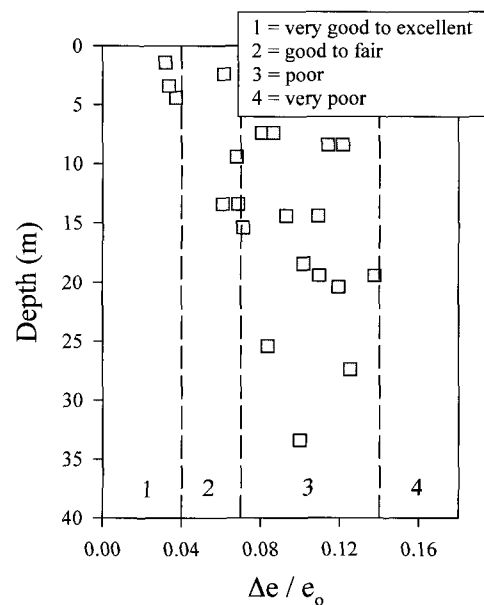


그림 1. Lunne et al. (1997) 방법에 의한 부산점토의 교란도 평가

1996) 부산점토를 대상으로 일본의 운륜성(PHRI)과 공동연구를 계획하게 되었다. 공동연구는 양쪽 기술자가 적극 참여하여 공동으로 시료채취, 지반조사 및 실내시험을 통하여 양국 시료채취기와 시료채취 기술 및 실내시험방법에 대한 비교 등으로 다양하게 진행되었다.

2.2 시료채취기 및 시료채취 방법의 차이

불교란 시료 채취를 위한 시료채취기는 양국 공히 박벽관(thin-walled tube)을 이용한 고정식 피스톤 샘플러(fixed piston sampler)로서 일본의 경우는 연결로드식(extension rod type) 시료채취기를 사용하고, 우리의 경우는 수압식(hydraulic type) 시료채취기를 주로 사용하고 있다. 이 두 종류의 시료채취기에 의한 시료채취방법과 사용되는 박벽관의 사양이 약간 다르다. 시료채취기의 사양과 시료 채취기술의 차이는 표 1에 비교·정리되어 있으며 사용되는 박벽관 튜브의 사양, 시추과정, 슬라임 제거 과정 및 시료 채취 과정으로 구분하였다.

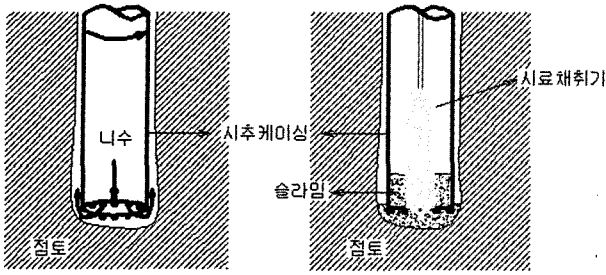
표 1에서 보면, 양국에서 사용되고 있는 샘플러(시료채취기) 뿐만 아니라 시료채취기술에서도 큰 차이를 나

타내고 있다. 그 중에서 특히 슬라임(slimes)의 제거과정에서 많은 차이점을 발견할 수 있었다. 시추 시에 니수의 순환에 의해 시추공 내부의 점토가 슬러리로 풀려서 빠져나와야 하는데, 점성이 높은 흙의 경우는 슬러리로 풀리지 않고 남아있는 것을 슬라임이라고 한다. 이 슬라임은 심도가 깊어질수록 많이 잔존하기 때문에 충분히 슬라임을 제거하지 못하였을 경우, 시료 채취기를 소정의 위치까지 내림과 동시에 압축되어 박벽관 속에 포함되기도 한다.

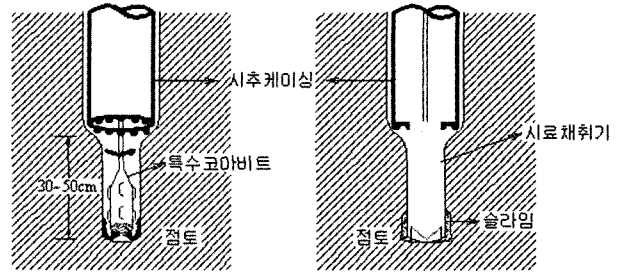
양국의 시료채취기술에 대해 모식도로 나타내면 그림 2와 같다. 그림 2(a)에서 보는 바와 같이, 우리나라에서는 먼저 케이싱으로 시료채취 위치까지 천공을 할 때 비교적 높은 수압을 사용하므로 하부지반을 교란시키기 쉽다. 또한 특별한 슬라임 제거과정을 충분히 거치지 않고 시료채취를 수행하므로 케이싱 내부에 슬라임이 남아있게 되며, 케이싱에 의해 측면이 구속되어 있기 때문에 시료 채취기를 관입할 때 하부지반에 작용하는 압축력이 더욱 커질 우려가 있다. 그러나 일본의 경우는 케이싱으로 천공을 한 후 케이싱 하부에서 그림 2(b)에서 보는 바와 같이 특수 코아비트를 사용하여 낮은 수압

표 1. 한일 양국의 시료채취기 및 시료채취 방법의 비교

		JPN	KOR
샘플러	재료	Stainless steel	Brass
	내경 (mm)	75.0	73.8
	외경 (mm)	78.0	76.2
	길이 (mm)	1000	854
	관의 두께 (mm)	1.5	1.2
	관입부의 예각	6°	6°
	면적비	8.16	6.61
시추	작업수	니수 또는 청수	니수
	시추공 안전화	Casing	Casing
	비트회전속도	-	30 ~ 50rpm
	관입속도	2.5 ~ 5cm/sec	2.5 ~ 5cm/sec
	니수순환압	1.75 ~ 2.81kg/cm ²	1.5 ~ 3.5kg/cm ²
슬라임 제거	사용 비트	특수크라운	-
	니수압	0.2 ~ 1kg/cm ²	고압 (2 ~ 3.8kg/cm ²)
	위치	케이싱 하부 50cm	케이싱 내부
	슬라임 확인	추를 내려 확인	-
	소요시간	25 ~ 30 min	약 5 ~ 10분
샘플링	관입 속도	비교적 고속	고속
	위치 확인	추와 줄자사용	안함
	관입량	확인 가능	부정확 (작업수 분출로 확인)
	들어올릴 때	2회 회전	-
	수위변화	수위계로 체크	-



(a) 기존의 한국식 천공 및 시료채취기 관입모식도 (Type-II)



(b) 일본의 천공 및 시료채취기 관입모식도 (Type-I)

그림 2

으로 30분가량 동안에 20~50cm의 깊이를 추가 굴착하면서 슬라임을 제거한다. 또한 시료 채취과정에서는 줄자와 추를 이용하여 소정의 심도까지 정확히 도달되었는지, 그리고 슬라임이 어느 정도 남아 있는지를 확인한 후 시료를 채취하고 있다. 일본의 방법은 세밀히 슬라임의 제거작업 과정을 거치기 때문에 많은 시간을 필요로 하고 작업이 번거롭다는 단점이 있다. 그러나 이와 같은 방법을 통해서 원지반의 교란을 최소화시키는데 최선을 다한다는 것을 알 수 있다.

2.3 대상지반의 위치 및 지반특성

그림 3은 공동 지반조사를 실시한 신호지역의 개략도이다. 신호지역은 낙동강의 남서쪽 해안에 바로 접해 있는 곳으로 인근 산업단지를 위한 배후주거단지를 조성 중에 있는 곳이다. 이 조사지역 내에서 시추공 A와 B에

서는 일본식 방법(Type-I)으로 시료를 채취하였고 C공은 한국식 방법(Type-II)으로 불교란 시료를 채취하였다. 그리고 그림 4에서는 두 방법에 의한 시료채취 심도 및 채취기 종류에 대해 나타내었다.

부산점토는 제 4기 퇴적토로서 풍화암층 위에 분포되어 있으며, 그 아래에 편마암, 유문암 및 안산암으로 이루어진 백악기의 기반암이 위치하고 있다. 광물학적으로 부산점토는 소량의 chlorite와 vermiculite를 포함하지만 주로 illite와 kaolinite로 구성되어 있으며, 그 밖에 quartz 및 hornblende가 약간 포함되어 있다. 광물학적으로 부산점토는 화산암으로부터 유래되는 팽창성 점토 광물인 smectite가 아니라 화강암질의 풍화에서 유래된 illite와 kaolinite의 형태이다(Locat & Tanaka, 1999; Chung et al., 2002c).

그림 5는 신호지역의 부산점토에 대한 대표적인 물리적 특성을 나타낸 것이다. 점토층 위에 사질토 층이 약

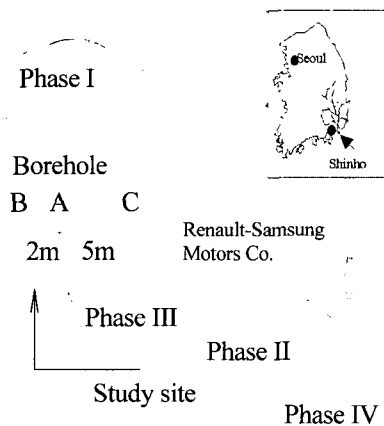


그림 3. 연구대상지역 조사 위치도

Depth	Drilling technique		
	Type-I		Type-II
	Borehole B	Borehole A	Borehole C
15m	■		□
20m		■ □	□
25m	□	■	□
30m		■	□
35m	□ □ □		□ □

Legend: ■ Japanese sampler □ Korean sampler

그림 4. 각 시료채취기에 따른 시료 채취심도

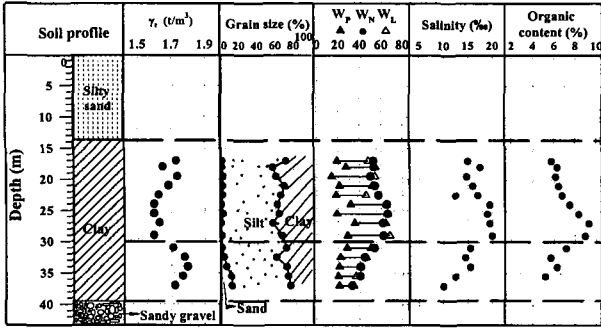


그림 5. 신호지역 주상도와 물리적특성

15m 두께로 퇴적되어 있음을 알 수 있으며, 점성토는 그 아래로 약 37m의 깊이까지 분포되어 있는 것을 알 수 있다. 점토($2\mu m$ 이하) 함유량은 25~40%로서 점토질 실트로 구성되어 있으며, 소성한계는 15~40%, 액성한계는 35~65%, 자연함수비가 32~65%인 점토로서 대부분의 심도에서 자연함수비가 액성한계와 같거나 약간 큰 연약점토이다.

신호지역 부산점토는 그림 5에서 알 수 있듯이 30m 깊이를 기준으로 물리적 특성이 현저하게 구별되는 두 층으로 나눌 수 있다. 상·하부로 층이 구분되는 것은 상이한 퇴적환경으로 볼 수 있으며, 각각의 층에서는 역학적 특성도 상이하게 나타나는 경향이 있다(Chung and Giao, 2001; Chung et al., 2002c). 이러한 경향은 양산지역의 점토에 대하여 Tanaka et al.(2001)의 연구에서도 볼 수 있다.

3. 시료채취기술에 따른 시료교란

일본(JPN)과 한국(KOR)의 시료채취기에 대한 채취관의 사양은 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 약간 다르며, 그에 대한 상세한 내용은 Tanaka et al.(1996)와 Chung et al.(2002a)의 연구에서 알 수 있다. 그러나 이들의 연구에서 보면 시료채취기에 의한 시료교란의 영향은 비교적 미소한 것으로 나타났으므로(Chung et al., 2002a), 본 논문에서는 시료채취 기술에 대한 비교를 중점적으로 다루기로 한다. 일본에서 시행되고 있는 낮은 수압에 의한 슬라임의 제거기술(이하 Type-I)과 기존의 우리나라에서 시행되어왔던 바와 같이 특별한 방법으로 슬라임을 제거하는 과정을 동원하지 않는 경우(이하 Type-II)로 구분하여 비교 및 분석하였다. 또한 실내 역학적 실험에 사용되는 시료는 샘플러 내에서 시료의 위치에 따른 교란영향(Chung et al., 2002b; 광정민 외,

2002)을 줄이기 위해 모두 샘플러 중간 부분의 시료를 사용하였다.

3.1 일축압축시험 결과

일반적으로 시료가 교란될수록 일축압축강도(q_u)와 50%변형시의 탄성계수(E_{50})가 감소하고 극한강도 시의 변형률(ϵ_p)은 증가한다. 일축압축 시험에서 교란도의 평가는 정성적이기는 하지만 ϵ_p 값의 범위를 이용하는 경우가 많으며, Horiuchi et al.(1987)은 E_{50}/q_u 를 사용하여 교란도를 정의하고 있다. 즉, 이 값이 50이하에서는 교란시료, 50 이상이면 불교란 시료로 평가하고 있다.

그림 6은 두 방법에 의하여 얻어진 시료에 대한 일축압축강도(q_u)와 최대강도일 때의 변형률(ϵ_p)을 나타낸 것이다. Type-I 시료의 경우는 대부분 ϵ_p 가 작고 q_u 는 크게 나타나는 반면, Type-II 시료는 그와 반대로 대부분 ϵ_p 가 크고 q_u 는 작게 나타나는 것을 알 수 있다. 즉, Type-II의 시료는 적용된 수압의 크기와 슬라임의 제거 정도에 의존하여 교란도의 변화가 아주 심하게 나타나는 특징을 반영하고 있다.

그림 7은 E_{50} 을 심도별로 나타낸 것이다. 이 값은 특히 30m 위의 상부 점토층에서 Type-II의 경우가 Type-I에 비해 전체적으로 아주 작게 나타나고 있다. 즉, Type-II의 시료는 점토구조가 상당히 파괴되어 교란시료에 가까운 것으로 생각된다. 이는 시추공 내에 적용된 수압과 잔류하고 있는 슬라임의 영향으로 역시 생각된

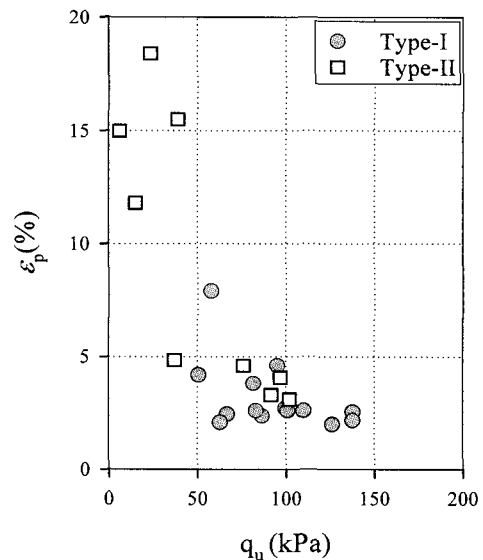


그림 6. 일축압축강도와 변형률과의 관계

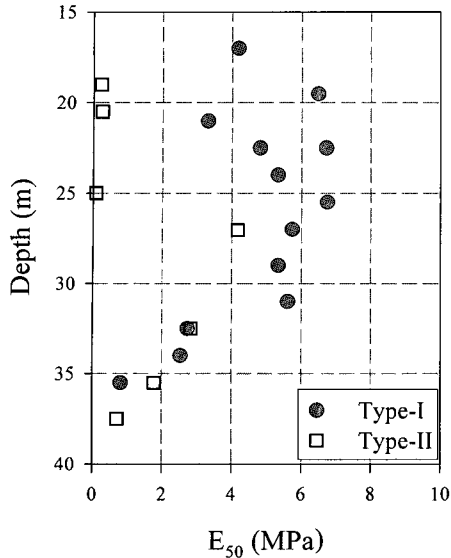


그림 7. 시료채취 방법에 따른 심도별 탄성계수 비교

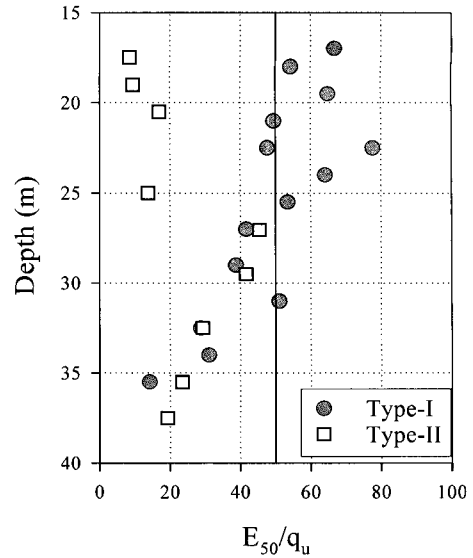


그림 8. 시료채취 방법에 따른 심도별 E_{50} / q_u 의 비교

다. 이와는 달리 30m 아래의 하부 점토층에서는 두 방식에 의한 결과가 거의 동일하며, 깊이가 증가할수록 E_{50} 이 감소하는 경향을 보여주고 있다. 다시 말해서, 시료의 채취방법과는 무관하게 깊이가 증가할수록 시료 교란이 증가한다는 의미이다. 이에 대한 원인은 향후 심도있게 규명되어야 할 필요가 있다.

그림 8은 일축압축강도와 탄성계수를 이용하여 시료 채취기술에 따른 교란도를 Horiuchi et al.(1987)이 제안한 방법으로 비교하여 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 상부 점토층에서는 Type-I의 경우가 거의 불교란 영역에 속하는 반면에 Type-II는 교란영역에 속하고 있다. 그러나 30m 아래의 하부점토에서는 그림 7에서와 같이 두 방법에 따른 교란특성이 확연하게 나타나지 않고 두 방법에 의한 결과가 모두 교란영역에 속해 있다. 이는 퇴적 및 환경특성의 차이에 의해 상부점토와 약간 다른 성질을 보이기 때문으로 사료되지만 향후 심도 있는 연구가 더 요구된다(정성교 외, 2002).

결과적으로, 일축압축시험의 결과를 보면 날개 달린 특수 코어비트를 회전하며 약한 수압으로 세심하게 슬라임을 제거한 Type-I의 경우가 특별한 슬라임의 제거 과정을 거치지 않은 Type-II의 방법보다 교란의 영향이 상당히 적음을 알 수 있다.

3.2 표준압밀 시험 결과

그림 9와 10은 시료채취 기술에 따른 표준압밀시험의 결과로 심도별 선행압밀응력(σ_p')와 압축지수(C_c)의

변화를 나타내고 있다. 동일한 심도에서 Type-I에 의한 σ_p' 와 C_c 가 Type-II보다 전반적으로 크게 나타나고 있음을 알 수 있는데, 이는 역시 시료채취 방법에 따른 교란의 영향을 잘 반영해 주고 있다.

그림 9에서 보면, Type-II에 의한 시료는 대부분 σ_p' 가 유효상재응력(σ_{vo}')에 비하여 0.8배 이하로 낮게 산정되었다. 그러나 심도 30m 위의 상부점토에서 Type-I의 시료에 대해서도 σ_p' 가 σ_{vo}' 에 비하여 거의 같거나 약간 작게 나타나며, 하부 점토에서는 두 방법의 구별 없이 σ_p' 가 σ_{vo}' 에 비하여 깊이에 따라 점차 작게 나타난다는 것이 흥미로운 사실이다. 즉, Type-I를 사용한다

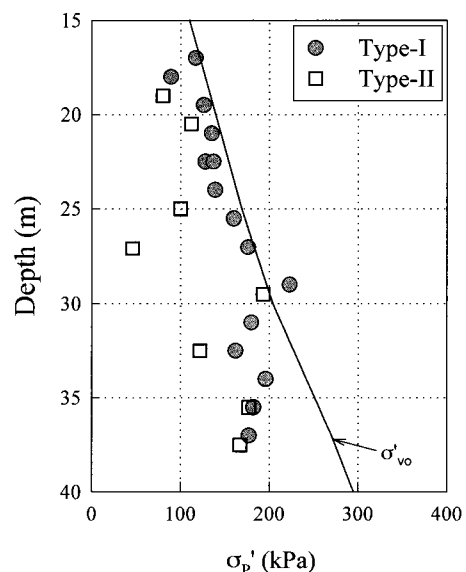


그림 9. 시료채취 방법에 따른 심도별 선행압밀응력 비교

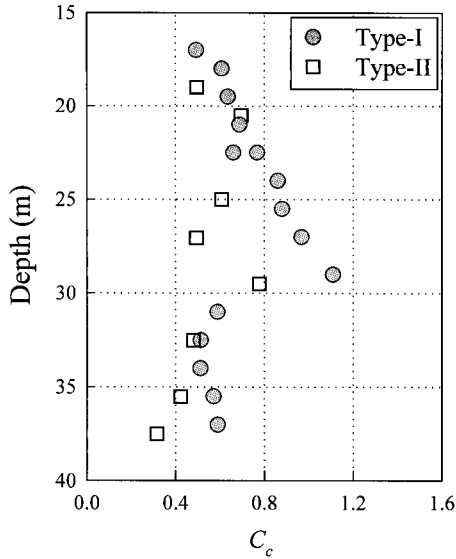


그림 10. 시료채취 방법에 따른 심도별 압축지수 비교

고 해도 오랫동안 논란의 여지가 되어왔던 부산점토의 미압밀($OCR < 1.0$)에 대하여 명확히 규명할 수 없다는 사실이다. 여기서 OCR 은 과압밀비이다. 그림 9와 10에서와 같이 30m 아래의 하부점토에서 Type-I시료일지라도 σ_p' 와 C_c 가 급격히 줄어드는 이유는 아직 명백하게 밝혀지진 않았지만, 앞 절에서 언급하였던 바와 같은 이유에서 비롯된 것으로 생각된다.

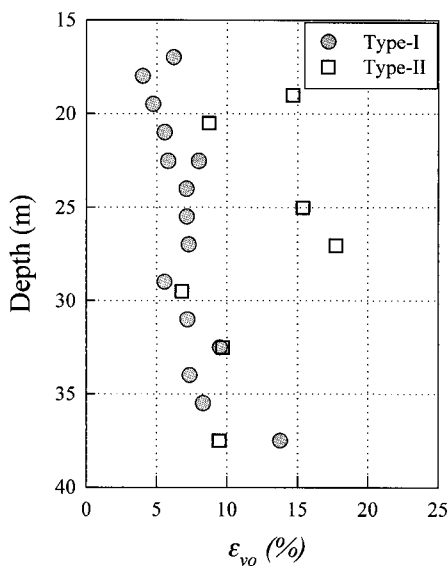
일반적으로 시료가 교란될수록 압축곡선의 기울기가 완만해지고 σ_p' 와 C_c 가 작아진다. σ_p' 와 C_c 는 연약지반공사에서 중요한 설계정수로서, 이 값들이 시료교란

으로 인하여 작게 산정되면 설계 침하량이 실제 침하량보다 과소평가하게 된다. 이처럼 실내시험 결과는 현장 압밀거동을 예측하는 중요한 자료로 활용되기 때문에 될 수 있으면 교란의 영향이 작은 시료를 이용한 실내시험을 수행하는 것이 필수조건이다. 압밀시험 결과에 대한 시료교란 정도의 평가에 대해서는 많은 연구결과들이 발표되어 있으며, 그 중에서 시료교란의 정량적 평가에 자주 이용되고 있는 방법으로 Andresen & Kolstad (1979)가 제안한 SQD(Specimen Quality Designation)가 있다. 이 방법은 시료가 교란될수록 원위치 응력과 동일한 응력에 도달할 때까지의 변형이 커진다는 원리이며, 과압밀비가 3~5 이하일 때의 점성토에 적합하며 다음 식 (1)과 같이 정의된다.

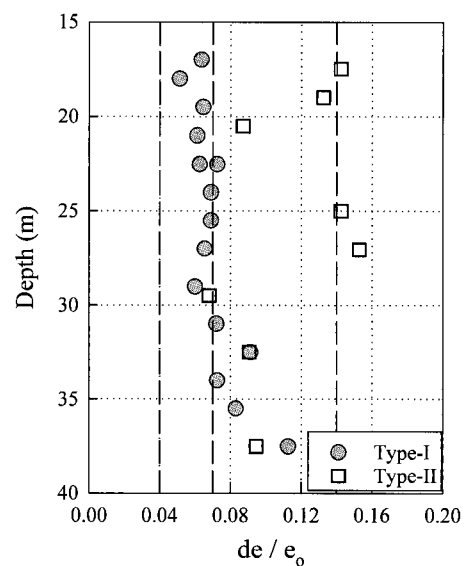
$$\epsilon_{vo} = \frac{e_o - e_1}{1 + e_o} \times 100 \quad (1)$$

여기서 e_o 는 초기간극비이며, e_1 은 유효상재응력에 해당하는 간극비이다. SQD와 비슷한 개념으로 그림 1에서 나타내었던 바와 같이 Lunne et al. (1997)이 제안한 방법으로, 초기간극비 (e_o)와 초기간극비에서 항복 시까지의 간극비 변화량 Δe 의 비로서 정의되는 시료교란 평가방법이 있다.

그림 11(a)와 (b)는 위의 두 방법에 의하여 표준압밀시험 결과에 대하여 각각 시료교란도를 평가한 결과이다. 그림 11(a)에서 보면, Type-I의 경우는 SQD가 대부분



(a) 시료채취 방법에 따른 심도별 SQD의 비교



(b) 시료채취 방법에 따른 심도별 Lunne의 시료교란도 비교

그림 11

4-8%로 '불량(D등급)' 한 시료로 구분되며, Type-II의 경우는 8%이상으로서 '매우 불량(E등급)' 한 시료로 분류된다. 즉, 비교적 만족할만한 시료의 수준인 4% 이하의 시료는 찾아볼 수 없다. 그러나 Lunne et al.(1997)의 교란도 평가법에 의한 그림 11(b)를 보면, 상부점토층(30m이내)에서는 Type-II의 결과가 대부분 '불량' 내지는 '매우 불량'으로 분류되지만, Type-I의 결과는 비교적 '양호(good to fair)' 하게 나타났다. 그리고 하부점토층에서는 두 시료 모두가 '불량(poor)'으로 평가되었다. 결과적으로 일본식 시료채취법(Type-I)에 의한 시료가 양호하다고 인정받고 있다는 것을 감안하면, 후자에 의한 시료평가방법이 합리적일 것으로 판단된다. 그러나 압밀시험에 의한 그림 11 뿐만 아니라 일축압축시험에 의한 그림 8에서 볼 수 있는 바와 같이 심도가 깊어질수록, 특히 하부점토층에서 교란도가 증가하고 있는데, 이 원인은 전술하였던 이유와 함께 응력해방(stress release)에 의한 원인도 무시할 수 없을 것으로 생각된다.

4. 시험방법에 따른 압밀정수의 비교

연약지반에서의 침하량이나 침하시간을 계산하기 위하여 대부분 표준압밀시험을 실시하고 있다. 그러나 표준압밀시험의 경우는 시험방법이 간단하고 결과의 정리가 쉽고 시험법 및 해석방법이 정립되어 있다는 장점이 있지만, 작용응력이 하중재하 방식에 의존하기 때문에 많은 시간이 걸리고 연속적인 데이터를 얻을 수가 없다는 단점이 있다. 또한 부산점토와 같이 압축성이 비교적 큰 시료의 경우는 하중의 단계별 하중증가비 ($\frac{\Delta p}{p}$)가 크기 때문에 이에 따른 교란의 영향을 무시할 수 없다. 특히 그림 11(a)에서 나타난 바와 같이 시료채취기술이 양호한 Type-I 시료에 대한 표준압밀시험 결과로부터 SQD가 4% 이내에 들어오는 시료를 거의 볼 수 없었다. 일본의 경우, 주로 CRS 압밀시험에 의해 압밀정수를 구하고 있으므로 본 절에서는 CRS시험을 병행하여 그 압밀정수의 차이를 비교하였다. CRS시험은 일정변형률재하 방식이기 때문에 변형률의 조절로써 시험시간을 단축시킬 수 있고 연속적인 데이터를 얻을 수 있어서 표준압밀시험에서의 단점을 보완할 수 있다.

4.1 표준압밀시험과 CRS시험의 압축곡선

그림 12는 동일 심도에서 채취된 시료에 대해 실시한

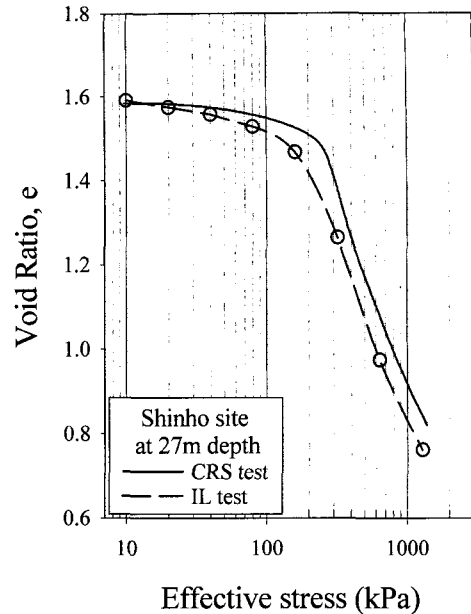


그림 12. IL시험과 CRS시험의 압축곡선

표준압밀(IL)시험과 CRS시험의 압축곡선을 나타낸 것이다. 점선으로 표시된 표준압밀시험에 의한 압축곡선은 실선으로 표기된 CRS시험의 결과보다 완만한 경사를 가지고 있으며, 표준압밀시험에 의한 선형압밀응력이 CRS시험에 의한 값보다 상당히 작음을 알 수 있다. 일본과의 비교 실험을 위해 본 논문에서는 CRS시험의 변형률을 0.02%/min으로 적용하여 실험하였다. CRS시험의 경우는 지반의 특성에 따라 변형률이 달라지며, 변형률 속도가 빨라질수록 선형압밀응력이나 압축지수가 약간 증가할 수 있다. 본 연구에서는 일본의 아리아케 점토와 오사카만 점토에 적용된 변형률 속도를 적용하였으며, 부산 점토에 적합한 변형률 속도에 대해서는 본 연구의 범위를 벗어난다.

4.2 압밀 시험방법에 따라 나타난 교란도의 차이

그림 13은 Type-I의 시료만을 이용하여 표준압밀(IL)과 CRS시험을 실시하여 얻어진 σ'_b 를 나타내고 있다. 표준압밀시험에 의해 구해진 σ'_b 는 CRS시험에 의한 값보다 약 1.6배 정도 작게 얻어졌다. 또한 그림 9에서 볼 수 있었던 IL시험의 경우는 σ'_b 가 σ'_{vo} 보다 작게 나타났지만, 여기에서 보여주는 CRS시험의 경우에는 대부분 σ'_b 가 σ'_{vo} 보다 크게 나타나고 있다.

그림 14는 시험방법에 따른 심도별 압축지수를 나타내고 있다. 상부점토층에서는 CRS시험에 의한 C_c 가

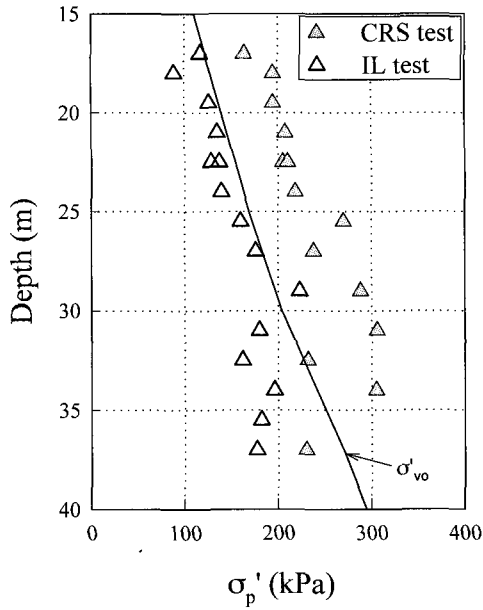


그림 13. IL시험과 CRS시험의 선행압밀응력 비교

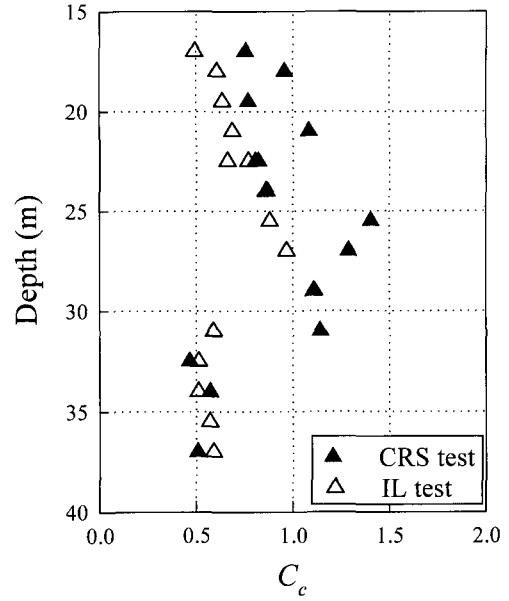
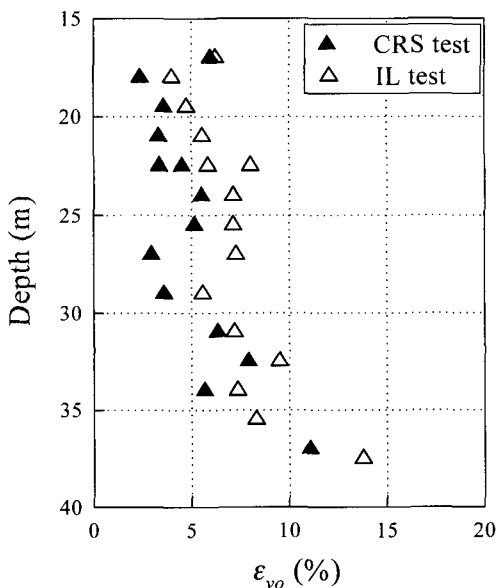


그림 14. 압밀시험방법에 따른 심도별 압축지수의 비교

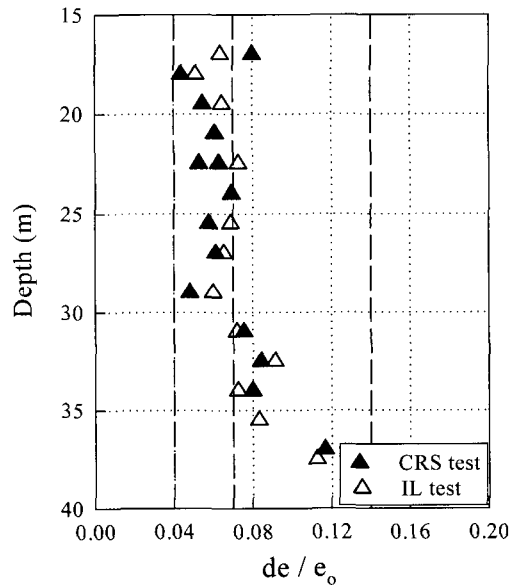
IL시험의 것보다 대부분 크게 산출되었으나 하부점성토층에서는 거의 차이를 보이지 않고 있다. 이와 같은 결과는 전술하였던 바와 같이, Type-I의 방법이 상부 점성토에서 시료교란을 작게 발생시켰던 것과는 달리 하부 점성토에서는 Type-II와 유사한 수준으로 시료교란이 발생하였기 때문으로 판단된다. 즉, 점토구조가 상당히 손상된 교란시료에 대한 두 실험법으로 구해진 압축지수의 차이는 무시할 수 있다는 것을 의미한다.

그림 15(a)와 (b)는 압밀시험 방법에 따른 교란의 영

향을 알아보기 위하여 심도별로 각각 시료 품질을 나타내는 SQD와 de/e_0 값으로 나타내었다. 그림 15(a)를 보면, CRS시험으로 구한 시료의 SQD값은 30m이전의 상부점토에 대해 대부분 4% 이내 (C등급-양호)에 존재하고 시료의 품질이 비교적 양호한 것으로 판명되지만, 하부점토의 경우는 시료품질이 약간 불량한 것으로 나타난다. 전체적으로 CRS시험으로 구한 SQD값보다 IL시험에 의한 SQD가 2~4%씩 크게 나타나며, IL시험이 CRS시험보다 교란의 영향이 크게 나타나는 것으로 보



(a) 압밀시험방법에 따른 심도별 SQD의 비교



(b) 압밀시험방법에 따른 심도별 Lunne 방법의 교란도 비교

그림 15

여준다. 그러나 그림 15(b)에서 보면 상부점토층에서 CRS시험의 결과가 IL시험에 비하여 약간 더 좋게 평가 되고 두 시험법 모두가 '양호' 한 결과로 나타났지만, 하부점토층에서는 두 경우가 모두 '불량' 하게 얻어졌다.

결과적으로, 두 실험법에 따른 교란도의 차이는 IL시험과 CRS시험에 적용된 하중증가비와 하중증가 방식이 상이함에 따라 항복응력에 이를 때까지의 압축량이 달라진 이유에서 비롯되었다. 이러한 요인은 시료교란도의 평가뿐만 아니라 선행압밀응력의 크기에도 상당한 영향을 미쳤다. 특히 IL시험은 선행압밀응력 근처에서의 응력상태에서 연속적인 자료를 얻을 수 없음에 따라 CRS시험에 비하여 압축지수의 감소를 초래하였다고 볼 수 있다. 그러나 시료채취 과정에서 상당히 교란되었던 시료에 대해서는 선행압밀응력에 대해서는 영향을 미쳤지만 교란도 및 압축지수에 미치는 영향은 미소하였다.

5. 결론

한·일 양국의 시료채취법으로 채취된 시료에 대해 일축압축시험과 압밀시험을 수행하여 얻어진 토질정수와 시료 교란도를 분석 및 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시추 케이싱 하부를 추가로 50cm 굴착하고 100kPa 이하의 낮은 수압을 가하면서 특수 코어비트를 이용하여 30분 가량 슬라임을 제거한 경우(Type-I)가 별다른 슬라임 제거 작업을 거치지 않은 경우(Type-II)에 비하여 일축압축 강도가 1.5~2.0배 크게 나타나며, 전단강도 때의 변형률이 매우 작게 나타났다.
- (2) Type-I의 시료에 대해 표준압밀시험을 수행하여 얻어진 압밀정수는 깊이에 따라 일정한 경향을 나타낸 반면에 Type-II에 의한 결과는 상대적으로 작게 산정되었으며, 또한 대단히 산만하게 얻어졌다. 비록 Type-I의 시료채취법을 적용하였지만 선행압밀응력이 유효상재응력을 초과하지는 못하였으며, 특히 하부점토층에서는 이러한 차이가 심각하여서 향후 심도 있는 연구가 요구된다.
- (3) 일축압축시험 결과로부터 E_{50}/q_u 에 의한 시료교란 평가에서 Type-I의 경우가 대부분 양호하게 나타나지만, Type-II 경우는 대부분의 시료가 불량한 품질로 나타났다. 표준압밀시험 결과로부터 평가된 시료 교란은 SQD(Andresen & Kolstad, 1979)법 보다는

Lunne et al.(1997)에 의한 평가법이 합리적일 것으로 판단되었다. 후자에 의하면, 표준압밀시험 결과로부터 상부점토층에서 Type-I이 양호하게 나타난 반면에 Type-II는 몹시 교란되어 있었다. 그러나 하부점토층에서는 두 시료채취법에 의한 차이를 보이지 않았다.

- (4) Type-I의 시료에 대해 적용된 두 압밀시험법에서 시험원리가 상이함에 따라 압밀정수는 상당한 차이를 나타내었으며, IL시험에 의한 교란도가 CRS시험보다 크게 산출되었다.

상기의 결과로부터 얻어진 중요한 사항 중의 하나는 한국의 샘플러도 시료채취 전에 일본에서 실시하고 있는 방법대로 슬라임제거 작업을 세밀히 수행한다면 시료의 품질이 명백하게 개선됨을 알 수 있었다. 그러나 보다 나은 개선을 위해서는 향후 지속적인 연구가 수반되어야 할 것이다.

참고 문헌

- 1.곽정민, 정성교, 서영교, 백승훈, 김덕근, 강영재 (2002), "불교란 점성토시료 채취법의 표준화에 관하여", ISSMGE, ATC-7 Symposium, 부산, pp.105-114.
2. 권기호 (1997), "시료 채취관의 크기에 따라 비배수 전단강도 및 압축 특성에 미치는 교란의 영향", 동아대학교 석사학위논문.
3. 정경환, 박성재, 박재환, 김창홍, 오원택, Suwa S., Fukuda M., Tanaka H., Mishima M., Tanaka M. (2001), "양산지역의 한일 공동조사 결과", ISSMGE ATC-7 Symposium, pp.165-183.
4. 정성교, 곽정민, 김덕근, 장우영 (2002), "낙동강 하구 점성토의 압축특성에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제18권, 제4호 pp.295-307.
5. Andresen, 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.
6. Chung, S.G. (1999), "Engineering properties and consolidation characteristics of Kimhae estuarine clayey soil", *Thick Deltaic Deposits, ATC-7 Workshop*, Special Publication at the 11th ARC on SMGE, Seoul, pp.93-108.
7. Chung, S.G., Kwag, J.M. Giao, P.H. and Chang, M.C. (2000), "Study on the effects of soil disturbance on the results of geotechnical testing of the Pusan clays", *Proc. Intl. Symp. on Lowland Technology*, Saga University, Japan, pp.135-142.
8. Chung, S.G., Kwag, J.M., Giao, P.H. and Nagaraj, T.S. (2001), "Effects of sample disturbance on the geotechnical properties of Pusan clays", *Proc. International Conference on Civil Engineering*, ICCE 01, Indian Institute of Science, Bangalore, pp.814-822.
9. Chung, S.G. and P.H. Giao (2001), "Examination of Pusan clays at a reference testing site", *Lowland Technology International*, Vol.3, No.2, pp.1-14.

10. Chung S.G., Giao, P.H., Kwag, J.M. and Tanaka, H. (2002a), "Comparative study on Korean and Japanese samplers in investigation of Pusan soft clays", *Intl. Workshop on Foundation Design Codes and Soil Investigation in view of International Harmonization and Performance Based Design*, IWS Kamakura 2002, pp.183-189.
11. Chung S.G., Kwag, J.M., Giao, P.H. and Baek, S.H. (2002b), "A study on soil disturbance of Pusan clays with reference to drilling, sampling, extruding and micro-structural non-homogeneity", *Geotechnique* (submitted).
12. Chung, S.G., Giao, P.H., and Tanaka, H. (2002c), "Geotechnical characteristics and engineering problems of Pusan clays", *Invited Paper, International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils*, Vol.1, Singapore, pp.505-541.
13. Chung, S.G., P.H. Giao, G.J. Kim and S. Leroueil (2002d), "Geotechnical properties of Pusan clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.1050-1060.
14. Giao P.H., Chung S.G. and Yoon D.D. (2000), "Settlement Analysis of the Pusan Clays with reference to Reclamation Projects", *Proc. Intl. Symp. on Lowland Technology*, Saga University, pp. 143-152.
15. 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.
16. Lunne, T., Berre, T. & 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.
17. Locat, J. and Tanaka, H. (1999), "Microstructure, mineralogy and physical properties: techniques and application to the Pusan clays", *KGS '99 Dredging an Geoenvironmental Conferenc*, Seoul, pp. 15-31.
18. Tanaka, H., Sharma P., Tsuchida T. & Tanaka M. (1996), "Comparative Study on Saple Quality Using Several Type", *Soils & Foundations*, Vol.36, No.2, pp.57-68.
19. Tanaka, H., Mishima, O., Tanaka, M., Park, S. Z., Jeoung, G.H. and Locat, J. (2001), "Charcterization of Yangsan clay, Pusan, Korea", *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.89-104.

(접수일자 2002. 11. 11, 심사완료일 2003. 5. 19)