

낙동강 하구점토의 압축특성에 관한 연구

Compressibility Characteristics of Estuarine Clays in the Nakdong River Plain

정 성 교* ¹	Chung, Sung-Gyo	곽 정 민* ²	Kwag, Jung-Min
장 우 영* ³	Jang, Woo-Young	김 덕 곤* ⁴	Kim, Doek-Gon

Abstract

In the Nakdong River plain a very thick clayey soils are covered widely. Since the early 1990's, some huge reclamation projects have been performed for the development of industrial and residential complexes and so on. Despite a large number of soil investigations have been carried out for the projects, the geotechnical properties have never been elucidated well, so that the settlements of the ground due to the mischaracterized properties were greatly underestimated. Therefore, it has been needed to evaluate definitely the characteristics of the clayey soils, particularly for the compressibility characteristics to help understand the settlement behavior. For the compressibility characteristics of the Pusan clays, physical index and consolidation tests were conducted on the reconstituted and undisturbed samples. Using the result of physical index, the Pusan clays could be divided into two different units, which have different depositional environments. According to the concepts of Burland (1990) and Nagaraj et. al. (1990), the intrinsic state line and field compression curve of the Pusan clays could be established. It could be found from their concepts that the Pusan clays are under the cemented and young normally consolidated state and largely consisted of two units. The cementation of the clays was as well identified by compression index ratio (Tsuchida et. al., 1991) and sensitivity (Leroueil et. al., 1983).

요 지

낙동강 하구 지역에는 두터운 점성토 퇴적지반이 넓게 분포되어 있다. 1990년대 초반부터 이러한 점성토 퇴적지반을 이용한 공업 및 주거단지 등의 확보를 위해 개발이 활발하게 진행되어 왔다. 이 과정에서 수많은 지반조사가 실시되었음에도 불구하고 이들 점성토 지반의 토질특성이 명확하게 규명되지 못했으며, 또한 잘못 결정된 토질정수로 인하여 지반침하 예측이 과소평가 되는 등의 문제점을 안고있다. 이러한 침하거동을 이해하기 위해서는 압축특성을 포함한 토질특성을 명확히 규명하는 것이 필요하다. 본 연구에서는, 부산점토의 압축특성을 규명하기 위하여 재구성된 시료와 불교란 시료를 이용하여 기본적인 물성시험과 압밀시험이 수행되었다. 물리적 특성으로부터 부산점토는 상부와 하부층의 구분이 뚜렷하게 나타나며, 퇴적환경이 서로 상이한 것을 알 수 있었다. Burland(1990)와 Nagaraj (2000)의 연구를 배경으로 부산점토의 고유상태선과 현장압축곡선을 구할 수 있었으며, 부산점토가 고결작용이 발달된 장년기(young) 정규압밀 점토라는 것과 대개 2개의 성질이 다른 지층으로 구성되어 있다는 사실을 알 수 있었다. 또한 압축지수비(Tsuchida et. al., 1991)와 예민비(Leroueil et. al., 1983)로부터 고결효과를 확인할 수 있었다.

Keywords : Clayey soil, Compressibility characteristics, Depositional state

*1 정회원, 동아대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Donga Univ.)

*2 정회원, 동아대학교 토목공학과 BK21 계약교수 (Member, Research Prof. of BK-21 Project, Dept. of Civil Engrg., Donga Univ., kwagjm@yahoo.co.kr)

*3 정회원, 일본 교토대학 대학원 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kyoto Univ., Japan)

*4 정회원, 동아대학교 토목공학과 대학원 석사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Donga Univ.)

1. 서론

우리나라에서 가장 긴 낙동강은 여러 도를 거쳐 부산광역시로 이어지고 있다. 낙동강 하구일대는 퇴적층이 100m 전후의 두께로 두텁게 분포하고 있으며, 이 층에서 연약 점토층은 약 12000년 이전부터 퇴적이 시작되었던 것으로 예측되고 있다(Chung et. al., 2002). 이 지역에서는 1990년대 초반부터 부족한 생활공간 확보와 산업단지 조성을 위하여 대단위 성토공사가 곳곳에서 수행되어 왔다. 대부분의 부지조성지역에서 연직배수공법과 성토를 이용한 강제침하공법이 시행되었지만, 지반의 예상침하량이 설계값보다 2-3배를 초과하여 발생함에 따라 공학적 및 사회적인 문제점으로 비화되기도 하였다. 따라서, 이러한 원인규명을 위하여 이 지역에 대한 지질 및 토질특성 등과 같은 기초적인 연구의 필요성이 크게 대두되었다.

최근까지 낙동강 하구유역의 점성토지반에 대한 공학적 특성을 규명하기 위한 연구(정 등, 1999a; 임 등, 2001; Chung & Giao, 2001a; Chung et. al., 2001; Locat & Tanaka, 1999; Giao et. al., 2001; Park et. al., 2000; Tanaka et. al., 2001; 등) 및 과대침하에 대한 원인규명을 위한 연구(정 등, 1999b; Chung, 1999; Chung et. al., 2000; Kim, 1999; 등)가 활발히 진행되어왔다. 그럼에도 불구하고 지반특성 및 과대침하의 원인규명에 대해서는 명쾌하게 밝혀지지 못하였으며, 또한 개량된 지반 위에 축조될 구조물을 위한 적절한 기초공법의 채택에 대해서도 어려움을 겪고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 지반조사기법의 개선과 아울러 여러 각도에서 심도 깊은 연구가 뒤따라야 할 것으로 사료된다(Chung & Giao, 2001b; Chung et. al., 2002b). 낙동강 하구평야에서 발생하였던 과대침하의 원인을 분석하기 위해서는 점토의 압축특성을 근본적으로 규명하는 것이 필수적인 사항이다. 예로서 연약점성토의 퇴적환경 및 연대효과(Bjerrum, 1967), 구역 및 깊이별 토질정수의 변화, 고유 및 현재 상태의 압축특성 등을 들 수 있다. 특히 자연퇴적점토의 압축특성을 명확히 규명할 수 있다면 이 지역에서 야기되었던 침하량 및 소요시간의 과소평가문제를 해결하는데 크게 도움이 될 것이다. 그러나 부산점토에 대한 이러한 연구는 거의 수행되지 못한 실정에 있다(정 등, 2000). 이러한 이유에서, 낙동강 하구유역에 분포하는 점토지반에 대한 압축특성을 규명하고자 하는 것이 본 연구의 목적이다.

낙동강하구에 분포하고 있는 자연점토의 압축특성을 규명하기 위하여 대표적으로 양산, 김해, 장유 및 신호 지역에서 연속적으로 시료를 채취하였으며, 재구성 시료와 불교란 시료에 대하여 표준압밀시험과 물리성 시험을 실시하였다. 특히 신호지역에서는 시료교란 효과를 알기 위해 한·일 공동샘플링을 실시하였으며, CRS 압밀시험을 병행하였다. 또한, 물리성 시험결과를 이용하여 지층구분을 하였으며, Nagaraj et. al.(1990)와 Burland(1990) 개념에 의한 고유 및 현장상태 압축특성, 압축지수비(Tsuchida, 1991) 그리고 예민비 등을 이용하여 분류된 지층에서의 퇴적환경에 따른 압축특성을 분석하였다.

2. 부산점토의 물리적 특성

2.1 연구대상지역

그림 1은 부산점토의 압축특성을 규명하기 위하여 대표적으로 선정된 지역으로 A(신호), B(김해), C(장유) 및 D(양산)지역을 나타내고 있다. 여기서 A(신호)지역은 산업과 주거단지조성을 위하여 오랜 기간동안 연안을 매립하여 개발 중에 있으며, D(양산)지역도 역시 새로운 주거단지를 위해 연약지반 개량공사가 진행되고 있다. 그리고 B(김해) 및 C(장유) 지역에서는 월드컵과 2002년 아시안게임에 대비하여 각각 김해국제공항을 확장하는 사업과 경마장을 신설하기 위하여 연약지반 개량사업이 진행 중에 있다.

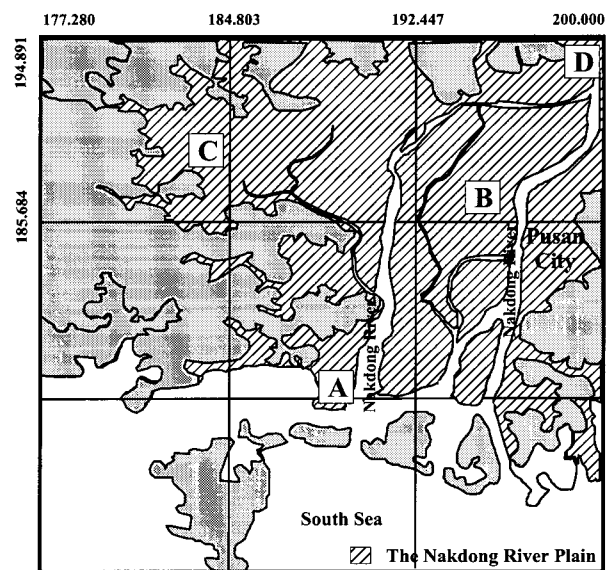


그림 1. 연구대상지역

2.2 지층구조 및 광물학

낙동강 삼각주평야의 점토는 김해, 낙동, 양산 및 부산점토 등으로 불리어지고 있지만 본 논문에서는 부산점토라고 표기한다. 일반적으로 낙동강 삼각주 퇴적평야에서는 실트질 충적토 또는 사질토층이 상부에 존재하고 아래로 연약한 실트질 점토층, 모래층 및 자갈층의 순서로 존재하고 있다. 이 퇴적토층은 제 4기 퇴적토로서 풍화암층 위에 분포되어 있으며, 그 아래에 편마암, 유문암 및 안산암으로 이루어진 백악기의 기반암이 나타나고 있다. 하지만 양산 및 장유지역에서는 지표면에 모래층이 존재하지 않고 점토층이 바로 발견되기도 한다. 부산점토의 두께는 보통 20m에서 40m까지 다양하다. 그런데 일부지역, 특히 강어귀에서는 그 두께가 70m를 초과하기도 한다. 한반도 및 다른 나라의 퇴적점토와 비교하여 보면, 부산점토는 비교적 두텁게 분포하고 있으며 또한 상이한 퇴적 및 퇴적 후의 환경, 지각변동에 밀접하게 관련되어진 지역적인 특성을 나타내고 있다 (Chung et al., 2002).

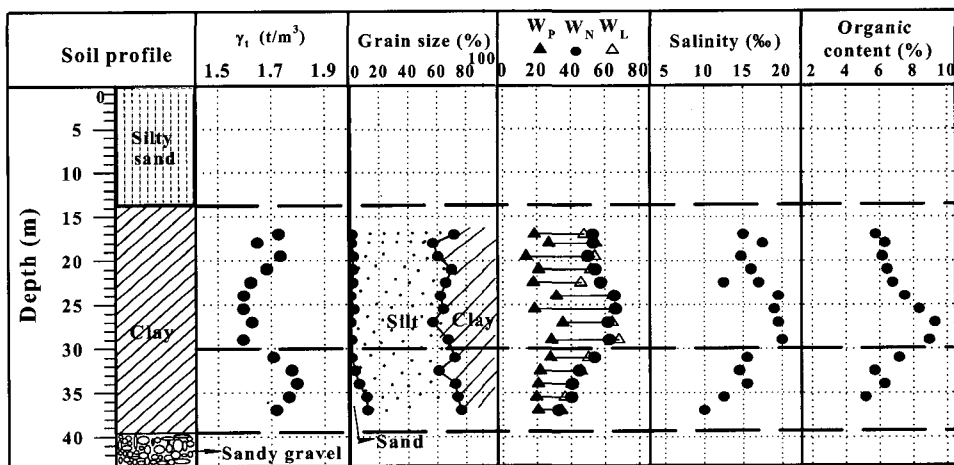
부산점토의 광물학은 양산지역의 점토에 대하여 체계적으로 수행된 Locat & Tanaka (1999)의 연구결과에서 볼 수 있다. 그들은 5.4m로부터 21.4m 사이의 여러 심도에서 채취된 시료에 대하여 X선 회절시험과 EDAS system을 이용하여 조사하였다. 그 결과에 의하면 조사되어진 전체 깊이에 대하여 광물학적 특성은 비교적 일관된 것으로 나타난다. 부산점토는 소량의 chlorite와 vermiculite를 포함하지만 주로 illite로 구성되어 있으며, 그밖에 kaolinite, quartz 및 horblende가 약간 포함되어

있다. 광물학적으로 부산점토는 화산암으로부터 유래되는 팽창성 점토광물인 smectite가 아니라 화강암질의 풍화에서 유래된 illite와 kaolinite의 형태라는 것을 명백하게 나타내었다. 이러한 결과는 국내에서 수행된 여러 연구결과에서도 유사하게 나타났다.

2.3 물리적 특성에 의한 지층구분

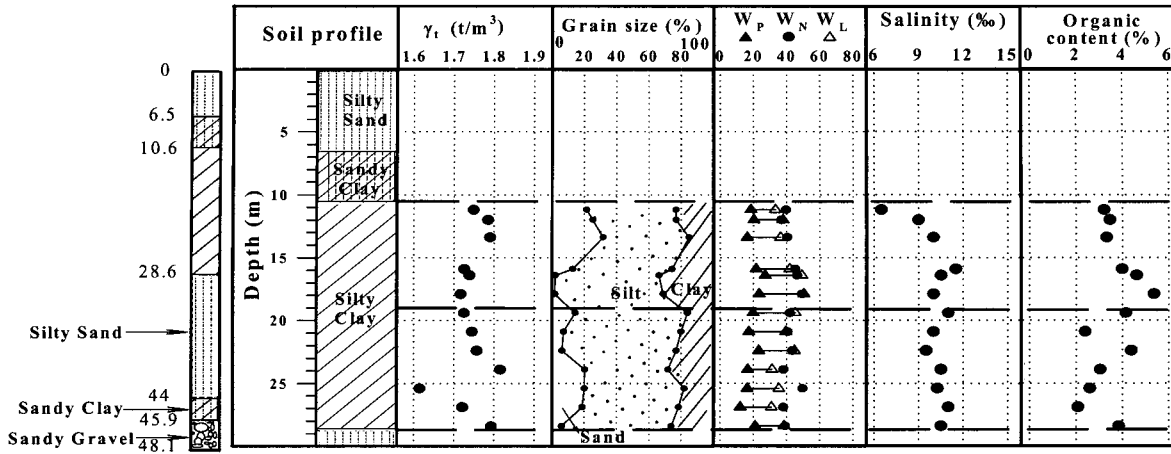
그림 2 (a)~(d)는 신호, 김해, 장유 및 양산지역의 부산점토에 대한 대표적인 물리적 특성을 나타낸 것이다. 낙동강 하구 연안인 신호와 김해는 점토층 위에 사질토층이 각각 15m 및 10m 두께로 퇴적되어 있음을 알 수 있으며, 강의 상류 쪽인 장유와 양산지역은 지표면으로부터 점성토가 바로 나타난다. 4개지역 모두 해당되는 부산점토의 특성을 정리하면 다음과 같다: ① 2 μ m 이하의 크기인 점토 함유량이 20~45%로서 점토질 실트로 구성되어 있다. ② 소성한계가 15~40%, 액성한계는 30~70%, 자연함수비가 35~80%인 점토로서 대부분의 심도에서 자연함수비가 액성한계와 같거나 약간 큰 연약점토이다. ③ 단위중량은 1.5~1.8 t/m³에 해당되며 심도에 따라 약간씩 변하는 경향을 보인다. ④ 염분도는 신호지역이 비교적 높은 10~20%이며, 김해지역 9~12%, 상류지역인 장유와 양산지역에서 각각 0~12% 및 2~8%로서 낙동강의 상류쪽으로 갈수록 염분도는 낮아진다. ⑤ 유기물의 함량은 지역적으로 그리고 심도에 따라 약간씩 차이는 있지만 2~8% 사이에 분포한다.

부산점토는 퇴적환경에 따라 토질특성이 현저히 다른 두 지층으로 대별될 수 있다(Chung and Giao, 2001;

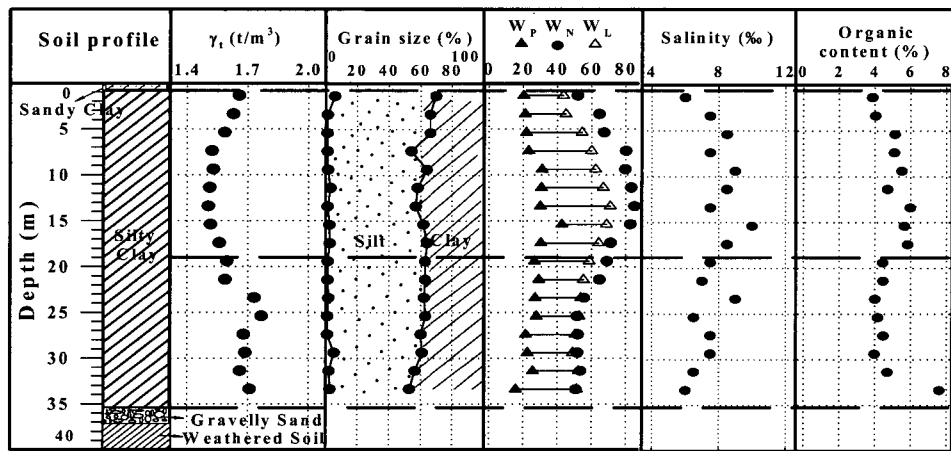


(a) 신호지역의 점토에 대한 물리적 특성

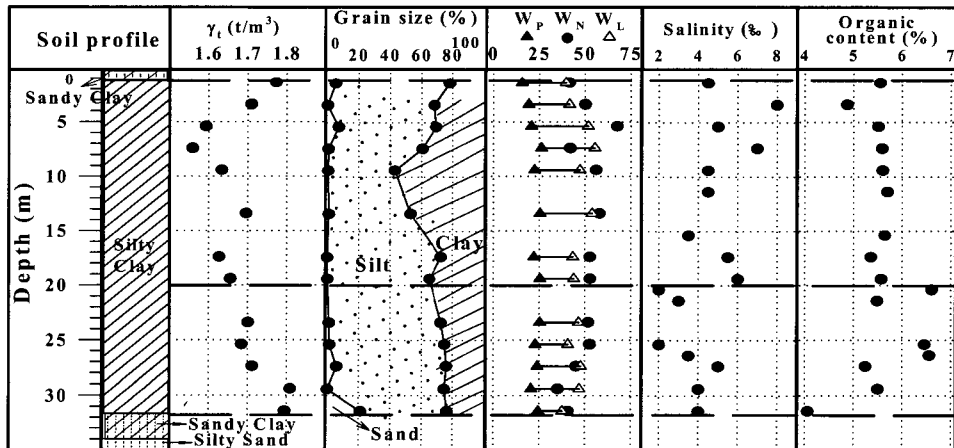
그림 2. 부산점토의 물리적 특성 (계속)



(b) 김해지역의 점토에 대한 물리적 특성



(c) 장유지역의 점토에 대한 물리적 특성



(d) 양산지역의 점토에 대한 물리적 특성

그림 2. 부산점토의 물리적 특성

Chung et. al., 2002). 이러한 경향은 양산지역의 점토에 대하여 Tanaka et. al.(2000)의 연구에서도 볼 수 있다. 그림 2에서 보면, 신호지역에서는 30m를 기준으로 물리적 특성이 다르게 나타나는 상하 점토층으로 구분할 수 있

으며, 장유와 양산에 대해서는 약 20m로 나타난다. 그러나, 불행하게도 김해공항 지역에서는 그림 2 (b)에서 볼 수 있는 바와 같이 하부 점토가 아주 단단하여 불교란 시료채취가 어려워져 실내토질시험이 이루어지지

못하였다. 이 지역에서는 상부 점성토가 연약한데 반하여 하부 점성토가 단단한 것으로 미루어 보아 중간 모래층을 기준으로 상하 점성토층을 구분할 수 있을 것이다.

그림 3 (a)~(c)는 김해공항을 제외한 3지역에 대하여 소성도표를 나타낸 것이다. 모든 지역에서 점토는 상부 지층에서 CH, 하부지층에서는 CL에 가깝게 나타나고 있다는 것을 알 수 있다. 그림 4는 소성지수 PI와 점토분($2\mu\text{m}$ 보다 작은 입경)의 비로서 정의되는 부산점토의 활성도를 나타내고 있다. 이들 점토의 활성도가 0.4에서 1.25 이상까지 분포하고 있으므로 주된 구성광물은 카올리나이트와 일라이트로 구성되어 있음을 알 수 있으며, 이는 위에서 언급한 Locat & Tanaka(1999)의 결과와도 일치한다. 이 그림에서 보면, 양산지역에서는 상하부층의 점토가 비슷한 성질을 나타내고 있지만, 신호와 장유지역 점토의 활성도는 상부층이 하부층보다 크게 나타나며, 하부층의 점토광물은 카올리나이트가 우세하고

상부층은 일라이트가 우세함을 알 수 있다.

3. 재구성된 부산점토의 압축특성

Burland(1990)는 자연점토의 함수비를 초과하여 재구성된 시료의 선형적인 압축특성을 고유상태(intrinsic state)로 정의하였으며, 자연점토의 압축특성과 비교하기 위하여 사용하였다. Nagaraj et al.(1990)도 자연점토의 압축특성은 퇴적환경, 경과시간 및 응력이력 때문에 재구성점토의 것(고유상태)과 다르다는 사실을 역시 언급하였다.

3.1 Burland(1990)방법에 의한 고유상태선

Burland(1990)는 점토의 고유압축거동을 설명하기 위하여 간극비지수 I_v 를 도입하였다. 이 간극비지수는 액

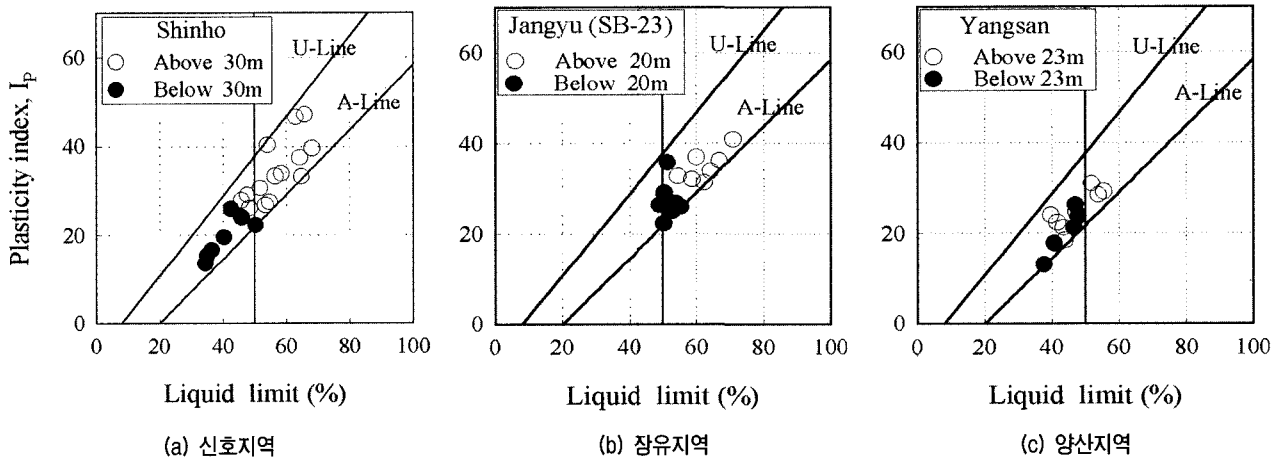


그림 3. 부산점토에 대한 소성도표

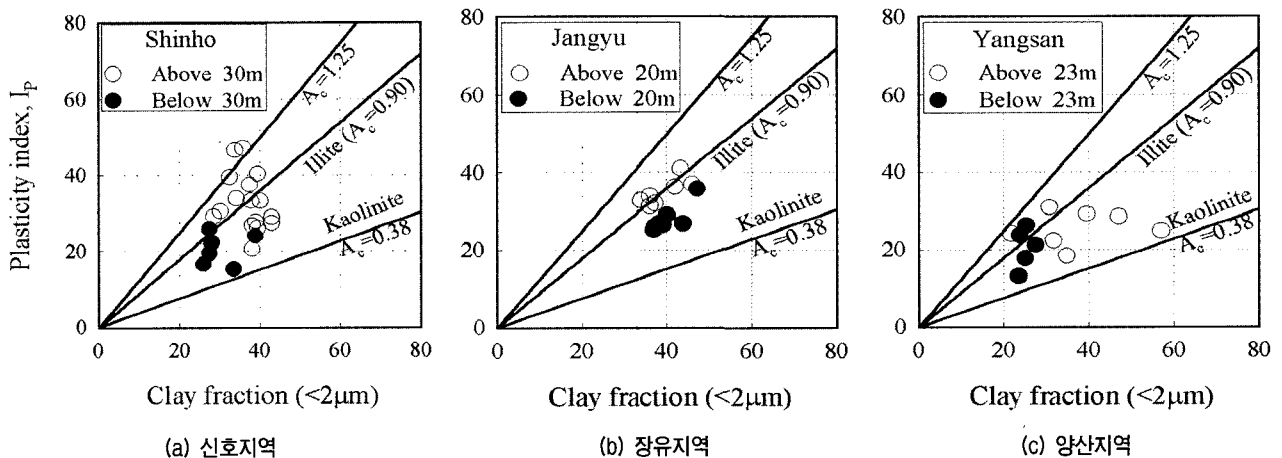


그림 4. 부산점토의 활성도와 함유광물

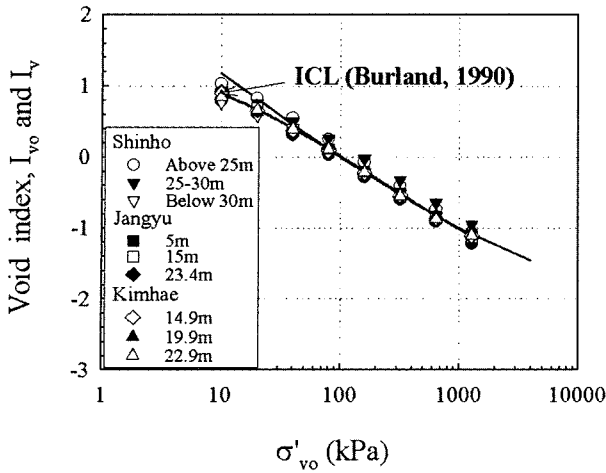


그림 5. Burland (1990)의 방법에 의한 고유상태선

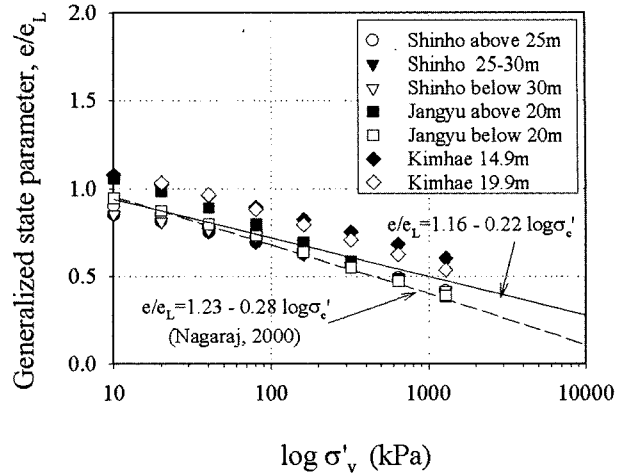


그림 6. Nagaraj et al. (1990)의 방법에 의한 고유상태선

성한계의 1.25배정도의 상태에서 재구성시킨 점토에 대한 정규화된 간극비이며 다음의 식 (1)로서 정의된다.

$$I_v = (e - e_{100}^*) / (e_{100}^* - e_{1000}^*) = (e - e_{100}^*) / C_c^* \quad (1)$$

여기서 e 는 간극비, e_{100}^* 과 e_{1000}^* 은 σ'_v 가 각각 100과 1000kPa일 때의 간극비이며, C_c^* 는 재구성 점토의 압축지수(고유압축지수)이다. e_{100}^* 과 C_c^* 는 액성한계 때의 간극비 e_L 에 대한 함수로 나타내기도 하였다(Burland, 1990). 또한 재구성된 각종 점토에 대한 I_v 를 정의하기 위하여 다음의 식 (2)와 같은 하나의 경험식이 제안되었다.

$$I_v = 2.45 - 1.285 \log \sigma'_v + 0.015 (\log \sigma'_v)^3 \quad (2)$$

그림 5는 3지점에 대한 부산점토의 고유상태선(intrinsic compression line, ICL)과 식 (2)를 비교하여 나타낸 것이다. 부산점토의 w_N/w_L 은 대부분 1.0~1.4사이에 분포하고 있기 때문에 함수비의 변화 없이 재구성이 가능하였다. 이 그림에서 보면, 재구성 시료에 대한 $I_v : \log \sigma'_v$ 관계는 Burland(1990)가 제안한 ICL, 즉 식 (2)와 거의 일치함을 알 수 있다. 다시 말해서 부산점토의 고유상태는 세계각국의 점토에 대하여 얻어진 결과와 비슷하다고 할 수 있다.

3.2 Nagaraj et al.(1990)의 방법에 의한 고유상태선

액성한계는 여러 각도에서 점토의 고유상태를 분석하는 공학적인 지표로 널리 사용될 수 있다. Nagaraj et al.(1990)는 자연함수비를 액성한계로 정규화시킨 함수비지수 $w^*(w_N/w_L)$ 를 이용하여 세계 도처의 점토에 대

한 고유상태선(Intrinsic State Line, ISL)을 경험적으로 다음의 식 (3)과 같이 제안하고 있다.

$$e/e_L = w_N/w_L = 1.23 - 0.28 \log \sigma'_v \quad (3)$$

여기서 e_L 과 w_L 는 액성한계 상태에서의 간극비와 함수비이며, w_N 은 자연함수비이다. Nagaraj(2000)는 이러한 고유상태선을 이용하여 현상상태의 점토가 가진 구조적 특성과 퇴적상태를 추정하는데 적용하여 왔다. 현상상태의 점토가 ISL 위쪽에 존재하면 자연고결점토, ISL 선상에 있을 때 정규압밀 미고결점토, 그리고 ISL 아래쪽에 위치하면 과압밀점토로 추정할 수 있다고 언급하였다.

그림 6은 3지역에서 상·하층의 점토에 대한 고유상태선을 나타내고 있다. 실험에 의한 부산점토의 ISL은 평균적으로 다음 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$e/e_L = 1.16 - 0.22 \log \sigma'_v \quad (4)$$

이 그림에서 보면, 부산점토의 ISL은 Nagaraj et al. (1990) 및 Nagaraj(2000)가 제안한 ISL보다 대체로 위에 위치하고 있으며 기울기도 약간의 차이를 나타내고 있다. 그리고 부산점토의 ISL은 지역에 따라 약간씩 다르게 나타나지만 상하부 지층에 대한 차이는 무시할 정도이다.

3.3 Hong & Onitsuka(1998) 방법에 의한 고유상태선

Hong & Onitsuka(1998)은 전자의 두 개념과 유사하게 고유상태선을 정의하고 있다. 그림 7에서는 Hong &

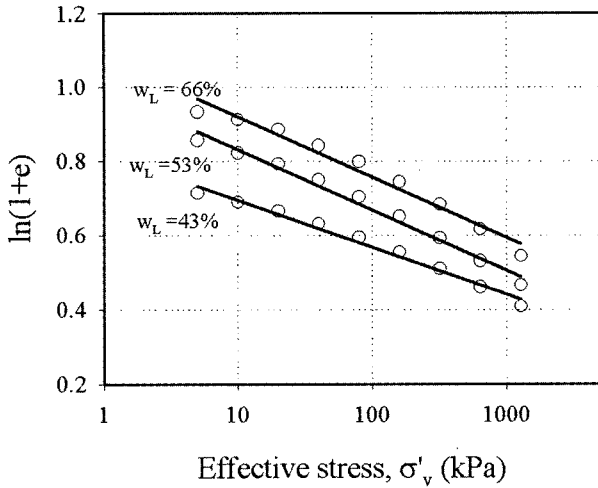


그림 7. 액성한계의 차이에 따른 재구성된 부산점토의 압축곡선

Onitsuka(1998)의 방법을 이용하여 재구성된 부산점토의 압축곡선을 $\ln(1+e) - \log \sigma'_v$ 관계로 나타내었으며, 이 결과 기울기가 다른 여러 직선을 얻을 수 있었다. 이들은 압축선의 기울기를 재구성시료의 압축지수 C_{CR} 이라고 정의하였다.

그림 8에서는 액성한계와 재구성된 부산점토의 압축지수 C_{CR} 의 관계를 나타낸 것이다. 부산점토에 대한 C_{CR} 값은 Hong & Onitsuka(1998)이 Ariake점토에 대하여 제안하였던 실험식 (5)와도 잘 일치함을 볼 수 있다.

$$C_{CR} = -0.390 + 0.332 \log w_L \quad (5)$$

한편 C_{CR} 은 점토의 압축곡선에서 직선구간의 의미하므로 100kPa의 응력에 해당되는 간극비 e^*_{100} 과 임의의

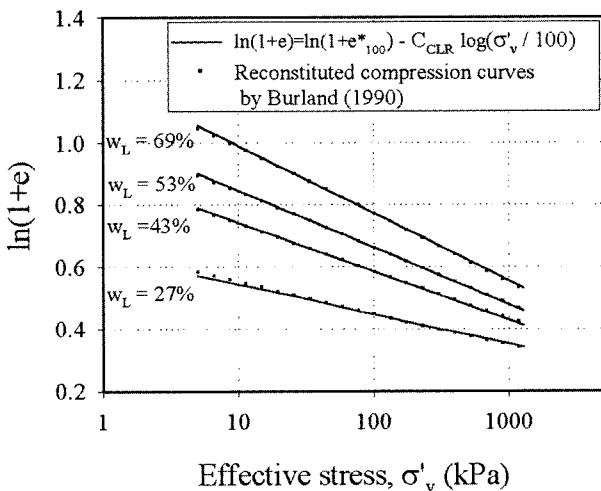


그림 9. 액성한계, 재구성된 압축곡선 및 Burland(1990)의 압축곡선 식 사이의 비교

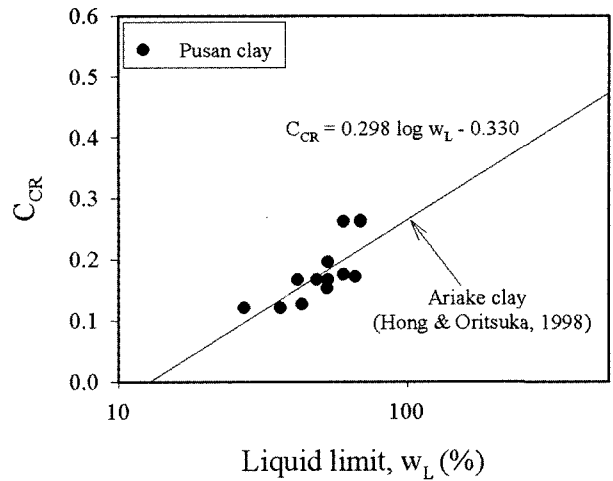


그림 8. 액성한계와 재구성 시료의 압축곡선 C_{CR} 사이의 관계

절점(σ'_v, e) 사이의 기울기이므로 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_{CR} = \frac{e^*_{100} - e}{\log\left(\frac{\sigma'_v}{100}\right)} \quad (6)$$

식 (4)에서 e 를 $\ln(1+e)$ 로 표시하면 식 (7)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln(1+e) = \ln(1+e^*_{100}) - C_{CR} \log\left(\frac{\sigma'_v}{100}\right) \quad (7)$$

재구성된 부산 점토의 압축곡선을 Burland(1990)의 제안식 (2)와 식 (7)를 이용하여 그리면 그림 9에서와 같이 얻어진다. 그림 9에서는 C_{CR} 을 이용하여 나타낸 압축곡선과 Burland(1990)의 압축곡선이 아주 잘 일치함을 알 수 있다.

4. 현장압축특성

4.1 현장압축상태의 평가

점성토의 현장상태는 3절에서 언급한 Burland(1990)의 고유압축곡선(ICL)과 퇴적압축선(SCL) 및 Nagaraj et. al.(1990)의 고유상태선(ISL)의 개념으로부터 추정 가능하다.

그림 10 (a)~(c)는 Burland(1990)가 제안한 ICL과 SCL(sedimentation compression line)과 함께 나타낸 신호, 장유 및 양산지역 점토에 대한 현장상태의 간극비지수이다. 3지역의 부산점토는 대부분 SCL 위에 존재하

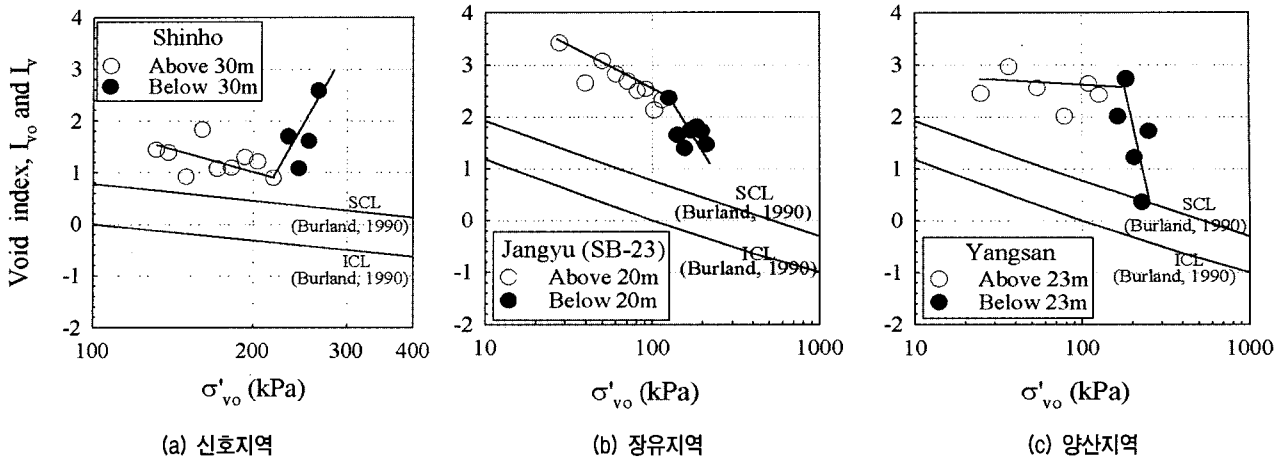


그림 10. 간극비지수와 Burland(1990)의 압축곡선 사이의 비교

고 있다. Burland(1990)가 SCL을 결정할 때 주로 유럽지역 각종 점토들의 현장상태 $I_v : \log \sigma'_v$ 관계자료를 수집하여 통계화 하였다는 사실을 감안하면, 부산점토는 다른 여러지역의 점토들보다 고결작용이 아주 발달되어 있음을 알 수 있다. 여기서 특이한 사항은 각 지역별로 상하 점토층에서 각각 다른 기울기를 나타내고 있으며, 또한 지역에 따라 하부 점토층에서 기울기가 유효상재 응력의 증가에 따라 상향 또는 하향으로 나타나고 있다는 것이다. 즉, 상부 점토층에서는 깊이가 증가함에 따라 모든 지역에서 감소하는 경향을 나타내지만, 하부 점토층에서는 기울기가 신호지역에서 상향 그리고 장유 및 양산지역에서 하향으로 나타나고 있다. 여기서 상향의 기울기가 주는 의미는, 만약 점토가 균질하다면 깊이가 깊어질수록 점토의 고결효과(cementation)가 증가한다는 뜻이다.

Nagaraj et al.(1990)의 고유상태 개념은 Burland(1990)

의 것과 유사하기 때문에 그림 11 (a)~(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 각 지역에서 그림 10과 동일한 경향을 보이고 있다. 부산점토는 세 지역에서 모두 고결된 정규 압밀 자연점토의 퇴적상태를 보이고 있다.

상기에서 언급된 바와 같이 낙동강의 하류인 신호지역과 상류인 장유 및 양산지역의 하부 점성토에서 나타난 상반된 기울기에 대한 원인은 낙동강 상하류 지역에서의 퇴적환경이 크게 상이하었던 이유로부터 비롯되었다고 볼 수 있다. 장유 및 양산지역의 상부점토에서는 $w^*(w_N/w_L)$ 이 1보다 상당히 크게 나타나고 하부 점토층에서는 w^* 가 1에 가까이 분포하기 때문이라고 설명할 수 있다. 반면에 신호지역의 하부점토에서는 심도가 깊어질수록 액성한계의 감소율이 자연함수비의 감소율보다 커지기 때문에 w^* 가 증가하는 것으로 나타난다. Hong & Tsuchida(1999)는 자연점토의 상태가 SCL에서 멀어지는 이유중의 하나로 점성토로부터 염분이 빠져

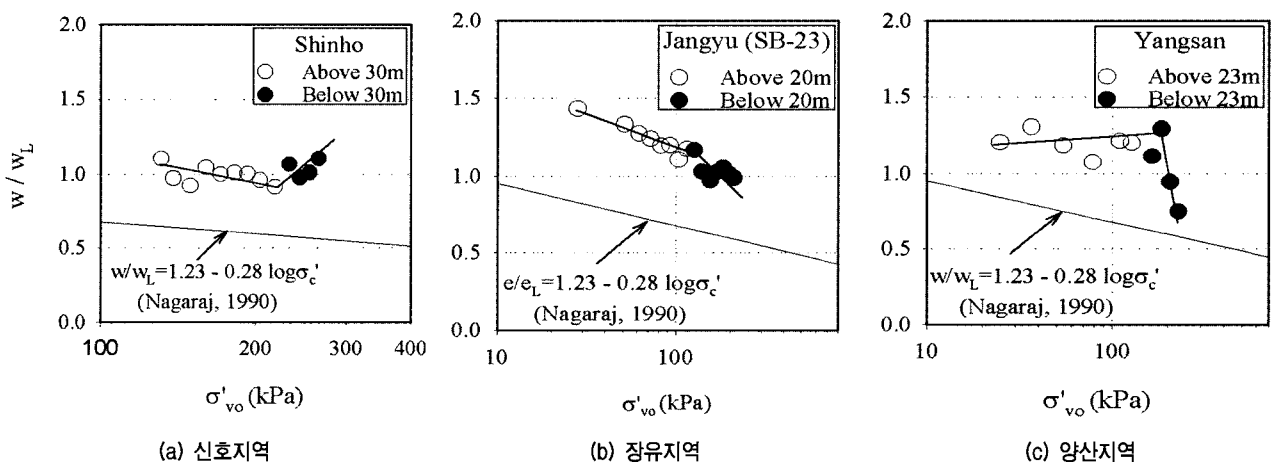


그림 11. 함수비 지수와 Nagaraj et. al.(1990)의 고유상태선

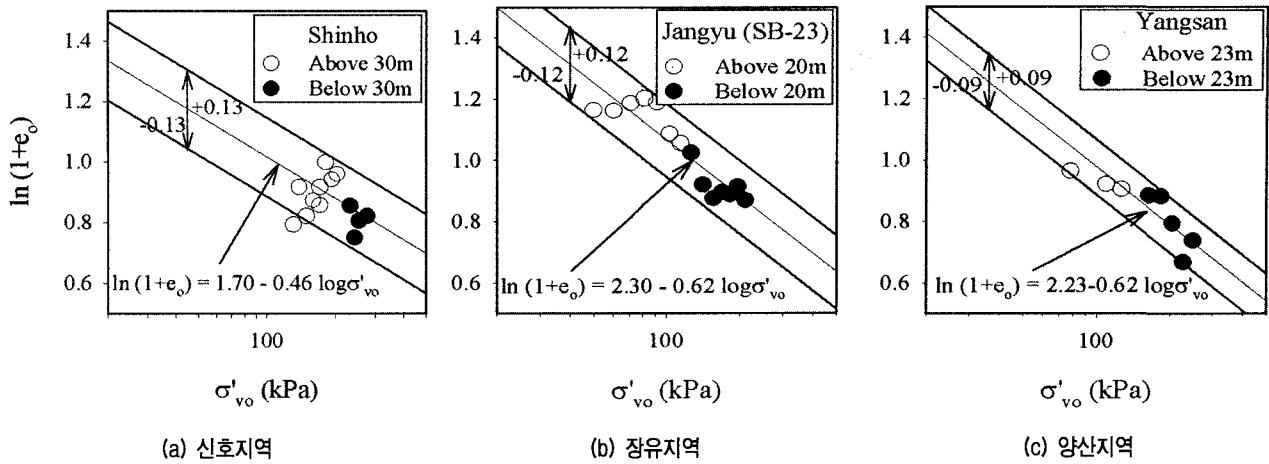


그림 12. 부산점토의 현장 압축곡선

나가는 용탈(leaching) 현상을 들었다. 신호지역에서는 하부점토 아래의 모래층 내에서 피압이 약간 작용하여 어느 정도의 용탈현상이 발생하였을 것으로 생각되지만, 그림 11 (a)와 같은 경향은 주로 입도분포가 상이한 이유에서 비롯되었다고 판단된다. 즉, 하부 점성토층에서는 모래함량이 3%에서 12%까지 깊이에 따라 증가하고 있기 때문이다.

4.2 현장 압축곡선

상기 3지역의 조사위치에 대하여 현장상태의 간극비 e_0 와 유효상재응력 σ'_{v_0} 를 $\ln(1+e_0)$ 와 $\ln \sigma'_{v_0}$ 관계로서 표현하면 그림 12 (a)~(c)와 같다. 이 그림에서 보면, 이들 값들을 회귀분석하여 얻어진 직선식은 다음의 일반식 (8)로서 표현된다.

$$\ln(1+e_0) = A - B \ln \sigma'_{v_0} \quad (8)$$

식 (8)로서 나타나는 직선을 부산점토의 현장상태선(Field State Line)이라 정의할 수 있으며, 대부분의 값들은 현장압축선 FSL을 기준으로 $\ln(1+e_0) \pm 0.13$ 범위에 있다. 이 그림에서 값들이 분산되어 나타나는 것은 주로 지역별 및 심도별로 상이한 퇴적 환경에 의하여 비롯되었다고 판단된다. 그림 12에서 흥미로운 점은, 식 (8)에서 B로 정의된 현장상태선의 기울기가 낙동강의 상류인 장유와 양산 지역에서 $B=0.62$ 로 거의 동일하게 나타나고 하류지역인 신호 지역에서는 $B=0.46$ 로 상류의 2지역보다 작게 나타난다. 이것은 신호지역의 퇴적환경이 다른 2지역과 상이하다는 것을 반영하는 결과이며, 상부에 존재하는 두터운 사질토층의 영향으로 심도가 깊어짐에

따라 초기 간극비가 심하게 변화하지 않기 때문이다.

5. 불교란 시료의 압축특성

5.1 압축지수와 압축지수비

그림 13에서는 연속적인 압밀곡선으로부터 압축지수의 변화를 용이하게 볼 수 있도록 같은 심도의 신호지역 점성토에 대한 CRS시험과 IL시험에 의한 압축곡선을 대표적으로 나타내었다. 예민비가 큰 점토는 구조적 특성 때문에 그림 13에 나타난 바와 같이 선행압밀응력을 넘어서면서 곡선이 급하게 변하며, 이에 따라 압축지수

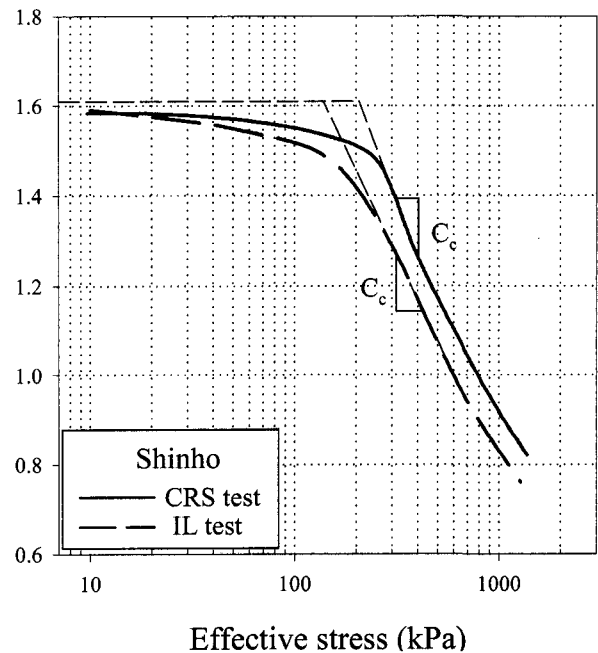


그림 13. CRS시험에 의한 압축곡선

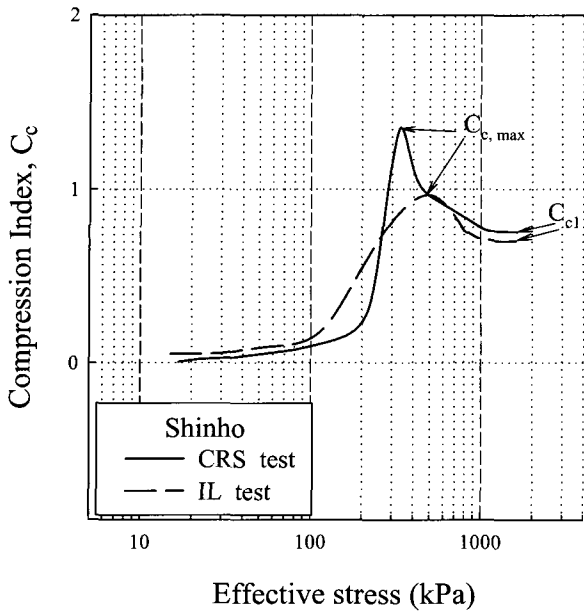


그림 14. CRS 압밀 과정에서 나타난 압축지수의 변화

C_c 도 역시 크게 변하는 것이 일반적이다. 이 압축곡선을 이용하여 C_c 를 구하면 그림 14와 같이 얻어진다. 그림 14에서와 같이 선행압밀응력 부근에서의 최대압축지수를 $C_{c,max}$ 라고 하며, 압축지수의 변화가 거의 둔화되는 20%의 변형률(사용된 시험기의 극한변형률)에서의 압축지수를 C_{c1} 이라고 정의하였다. 그림 14에서 보면 C_{c1} 에서의 응력수준은 $C_{c,max}$ 에 비하여 약 5배보다 큰 지점에 해당한다. IL시험의 결과에서도 $C_{c,max}$ 와 C_{c1} 은 이와 유사하게 나타나며, 본 논문에서는 기존의 연구와 정량적인 비교분석을 위하여 IL시험의 결과로 제안사항을 검토하였음을 밝힌다.

압축지수와 액성한계 사이의 경험적인 관계는 많은

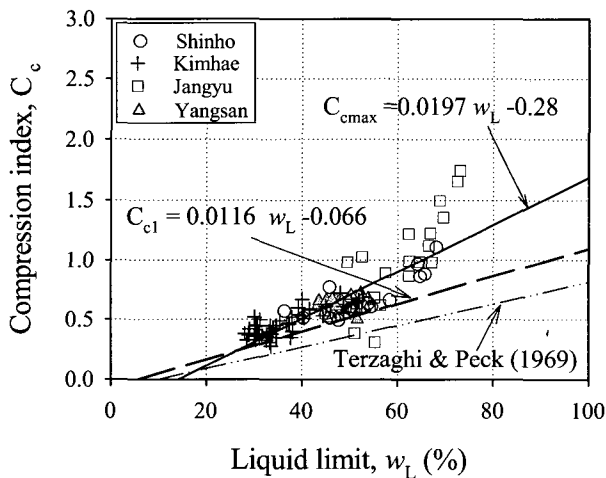


그림 15. 압축지수와 액성한계 사이의 관계

연구자들에 의하여 제안되어 있다. 중간정도 이하의 예민 점토에 대하여 Terzaghi & Peck(1969)은 $C_c=0.009(w_L-10)$ 와 같은 경험식을 제안하고 있다. 그러나 일본 해성점토에 대하여 $C_c=0.015(w_L-19)$, Ariake에 대해서는 $C_c=0.013 w_L$ 와 같이 제안되어 있다(Ogawa, 1978).

그림 15에서는 불교란 부산점토에 대하여 C_c 값과 액성한계의 관계를 나타내고 있다. 부산점토는 Terzaghi & Peck(1969)의 경험식보다 동일 액성한계에서 C_c 값이 크게 얻어진다는 것을 알 수 있으며, $C_{c,max}$ 는 평균적으로 다음 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_c = 0.0197(w_L - 0.28) \quad (9)$$

그림 16은 압축지수와 자연간극비(e_o) 사이의 관계를 나타낸 것이다. 장유지역의 일부 점토는 높은 압축지수를 가지고 있지만 대체로 다음 관계식으로 나타내어진다.

$$C_c = 0.678e_o - 0.363 \quad (10)$$

그림 16에서는 Leroueil et al.(1983)의 경험식을 이용하여 $C_c - e_o$ 관계로부터 예민비를 찾을 수 있다. 이 그림으로부터 부산지역의 점토는 예민비가 10정도로 나타난다는 것을 알 수 있으며, 시료교란 효과를 고려한다면 약간 더 커질 것으로 예상되어 중간 내지 예민한 점토라고 할 수 있다.

Tsuchida(2000)는 $C_{c,max}/C_{c1}$ 로 정의되는 압축지수비 r_c 를 이용하여 고결효과를 평가하는데 사용하였다. 그림 17 (a)~(c)에서 나타난 바와 같이 부산점토의 압축지수비는 심도가 깊어질수록 감소하는 경향을 보이며 대략 1.03에서 2.30 사이에 존재한다. 이러한 압축지수

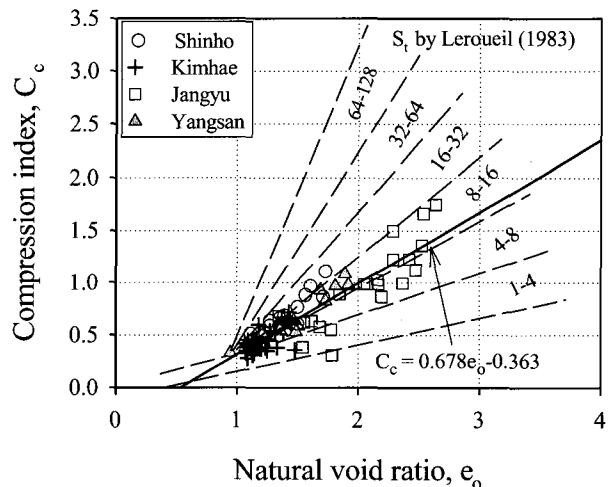


그림 16. 압축지수와 자연간극비 사이의 관계

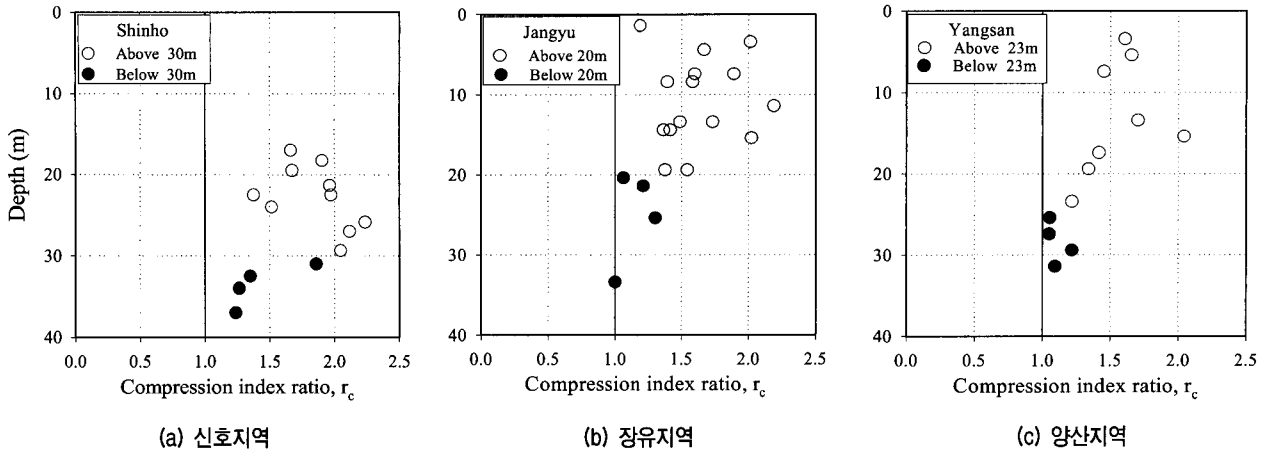


그림 17. 심도에 따른 압축지수비

비의 관계가 전체적으로 1보다 큰 것으로 보아 부산점토는 자연 고결점토임을 알 수 있지만 상부층과 하부층의 압축지수가 상이하게 나타난다. 즉, 3지역 모두 하부 점토의 압축지수비가 대부분이 1.5이하인 반면에 상부에서는 이 보다 크게 나타나고 있다. 그 원인으로는 심도가 깊어짐에 따라 응력이완의 증가로 기인되는 시료 교란의 영향과 아울러 퇴적환경의 차이에 따라 점토특성이 약간 상이하게 나타나기 때문이라 판단된다.

그림 18은 부산점토의 소성지수와 압축지수비(r_c)의 관계를 나타낸 것이다. 압축지수비는 소성지수가 커질수록 선형적으로 증가하는 경향을 보이는 것이 일반적이다(Tsuchida, 2000). 그러나, 부산점토는 소성지수가 비교적 좁은 범위에 분포되어 있는 이유에서 비롯된 것인지가 불명확하지만, 소성지수의 증가에 따라 압축지수비가 뚜렷하게 증가하는 경향을 나타내지 않는다.

그림 19 (a)~(c)는 신호, 장유 및 양산지역 점토의 액성한계와 압축지수비를 나타낸 그래프이다. 이 그림에

서 보면, r_c 는 액성한계가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있다. 3지역 모두 하부지역 점토에서 압축지수와 액성한계가 모두 작게 나타나고 있으며, 그 경향은

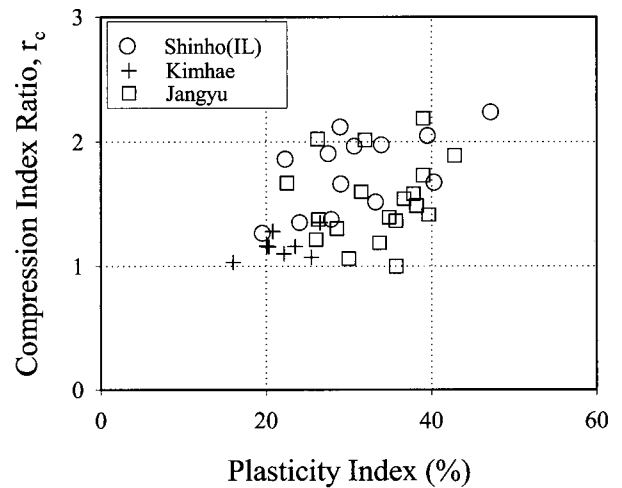


그림 18. 부산점토의 압축지수비와 소성지수

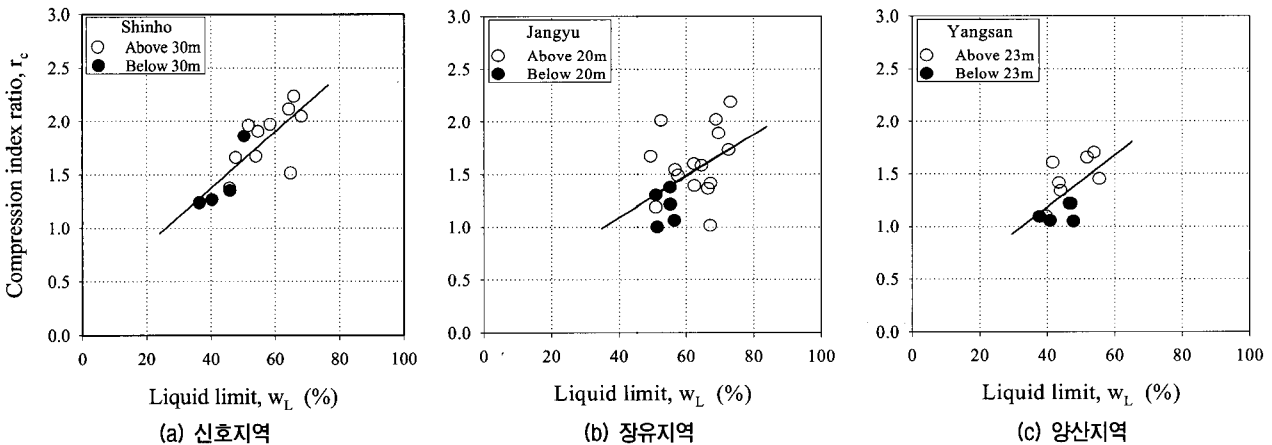


그림 19. 부산점토의 액성한계에 따른 압축지수비

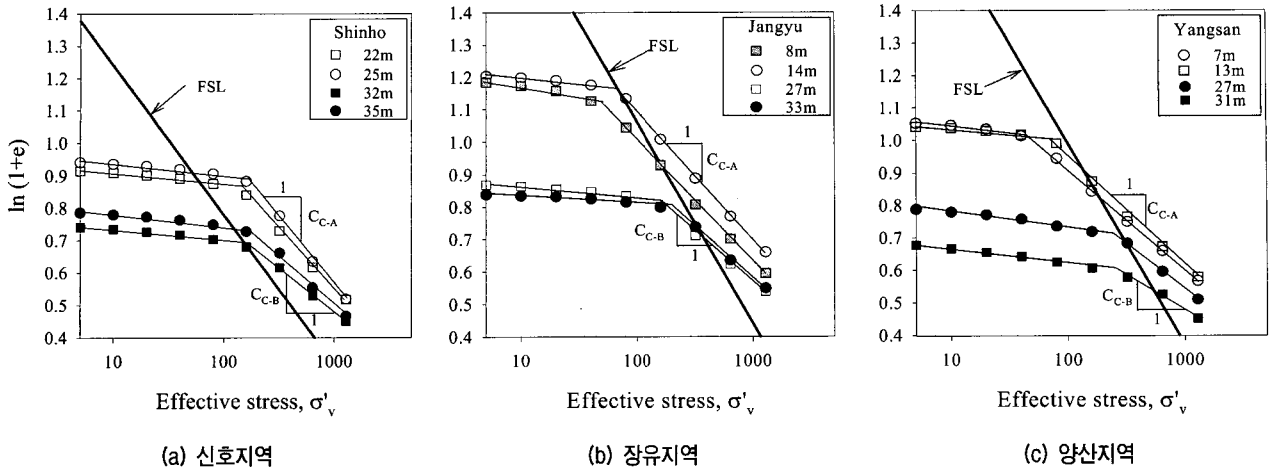


그림 20. 불교란 점토의 압축곡선과 현장압축선

신호와 양산지역에서 뚜렷하다. 신호와 양산지역은 동일 시추공에서 연속적으로 채취된 시료를 이용한 시험 결과이기 때문에 경향이 뚜렷하지만, 장유지역에서는 많은 시추공에서 얻은 결과를 수집하였기 때문에 분산되어 나타나는 것으로 사료된다.

5.2 현장압축선과 압축지수의 관계

4.2절에서 3현장에서 조사된 자료를 근거로 현장압축선(FSL)이 식 (8)과 같은 형태로 제안되었다. 그림 20 (a)~(c)는 FSL과 압밀시험결과를 이용하여 Butterfield (1979)가 제안하였던 방법과 같은 양대수(bi-logarithmic) 그래프로 나타낸 것이다. 이 그림에서는 3지역의 표준 압밀 시험결과를 이용하여 상부와 하부층에 대하여 각각 두개 압축곡선을 나타내었다. 압축곡선은 양대수 그래프에서 두 개의 직선으로 표시되며, 두 직선의 교차점에 해당하는 응력은 대략 압밀항복응력 σ_y 에 대응하는 값이라 할 수 있다. 항복응력 σ_y 를 지난 직선부분의 기울기 C_{C-A} 와 C_{C-B} 는 처녀압축영역에서의 압축지수를 나타낸 것으로, 상부층의 압축지수 C_{C-A} 가 하부층의 압축지수인 C_{C-B} 보다 크게 나타나고 있다. 그림 20 (a)에서 볼 수 있는 신호지역의 σ_y 는 상부와 하부층에서 유효상재응력보다 크게 나타나는 반면, (b)장유와 (c)양산지역에서는 하부층의 σ_y 가 유효상재응력보다 약간 작은 값으로 나타나고 있다. 신호지역에서는 시료교란을 줄이기 위해 일본의 항만연구소와 공동연구를 실시하여 시료채취기술의 향상을 도모한 결과로 판단되며, 장유와 양산지역은 하부층의 OCR이 1보다 작아지는 결과로 초래되는 시료교란의 영향을 상당히 반영하고 있고 또

한 퇴적환경의 차이에 따른 현상이라 할 수 있다. 비교적 균질한 Ariake 점토의 경우 전 심도에서 압축지수가 거의 동일하게 얻어졌었다(Hong & Tsuchida, 1999). 하지만 그림 20에서 나타난 부산점토에서는 모두 하부층의 압축지수 C_{C-B} 가 상부층의 압축지수 C_{C-A} 보다 작은 값을 보이고 있으며, 상하부 층에서 각각 두 개의 압축곡선은 거의 동일한 압축지수를 나타내고 있다. 이러한 원인은 부산점토의 상하부 불연속면은 퇴적환경의 상이함을 반영하고 있다고 할 수 있다(Chung et. al., 2002).

6. 결론

낙동강 하구의 평야지역에서 선정된 대표적인 4지역에 대하여 점성토(부산점토)의 압축특성을 규명하기 위하여 물리적 및 압밀실험을 수행하였으며, 이를 통하여 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) 부산점토는 주로 상이한 퇴적환경으로 기인되어 물리적 및 화학적 특성이 다르게 나타나는 두 층으로 크게 구분될 수 있었다. 즉, 상부층에서는 점토광물의 구성이 일라이트가 우세하며 대부분 CH로 분류되지만, 하부층에는 카올리나이트가 우세하고 CL로 분류될 수 있다. 그리고 염분도 및 유기물 함량도 상부층이 하부층에서 보다 크게 나타났다.
- (2) 재구성 부산점토의 고유압축곡선은 Ariake점토와 마찬가지로 Burland(1990)의 경험식과 잘 일치하지만, Nagaraj et. al.(1990)의 경험식에 비하여 약간 상이하게 얻어졌다.
- (3) Nagaraj(2000)의 분류법에 따르면 4지역의 점성토

는 모두 자연고결된 정규압밀점토로 분류된다. 부산 점토의 현장압축상태는 모든 지역의 상부 점성토층에서 간극비지수 I_v 와 e/e_L 이 깊이에 따라 감소하지만, 하부층에서는 지역에 따라 증가 또는 감소하는 경향을 나타내는 특이한 현상을 보였다. 후자에서 간극비지수 및 e/e_L 가 증가하는 원인은 Ariake점토에서 보였던 용탈현상(leaching) 보다는 입도분포가 깊이에 따라 변화하고 점토광물이 상하층에서 상이함에 따라 기인된 것으로 판단되었다.

- (4) 점토의 고결상태를 예민비 및 압축지수비 $r_c(C_{c,max}/C_{c1})$ 에 의하여 관찰할 수 있었다. 예민비는 대략 10으로 얻어졌으며, r_c 는 액성한계가 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였고 상하 점성토층에서 아주 상이한 결과를 나타내었다.
- (5) 현장압축선과 압축곡선을 이용하여 상하 점성토에 대하여 상이하게 얻어지는 압축성과 시료교란 효과를 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 동아대학교 토목공학과 BK21 핵심과제연구의 일환이며, 2001년도 교내 학술연구조성비에 의하여 수행되었음을 밝히며 이에 감사한다.

참고 문헌

1. 임형덕, 김대규, 이우진 (2001), "현장 및 실내시험에 의한 양산 점토의 공학적 특성에 관한 연구", 대한토목학회 논문집, 제21권 제4-C호, pp.385-395.
2. 정성교, 장우영, P.H. Giao, 김규종 (2000), "부산점토의 압축특성", 가을 학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp.361-368.
3. Bjerrum, L. (1967), "Engineering geology of Norwegian normally consolidated marine clay as related to settlement of buildings", *Geotechnique*, Vol.17, pp.81-118.
4. Burland, J. G. (1990), "On compressibility and shear strength of natural clays", *Geotechnique*, Vol.40, No.3, pp.329-378.
5. Butterfield, R. (1979), "A natural compression law for soils (an advance on e -log p)", *Geotechnique*, Vol.29, No.4, pp.469-480.
6. Chung, S. G. (1999), "Engineering properties and consolidation

characteristics of Kimhae estuarine clayey soils", *Thick Deltaic Deposits, Special Publication, Proc. of the 11th ARC on SMGE*, pp.93-108.

7. Chung, S. G., Giao, P. H., Kim G. J. and Leroueil, S. (2002), "Geotechnical properties of Pusan clays", *Canadian Geotechnical Journal* (accepted).
8. Chung, S. G. and Giao, P. H. (2001), "Challenges in geotechnical investigation of Pusan clays", *Invited Paper, Indian Geotechnical Conference-2001, Vol. 2, Indore Chapter*, pp.23-28.
9. Chung, S. G., Giao, P. H., and Tanaka, H. (2002), "Geotechnical characteristics and engineering problems of Pusan clays", *Invited Paper, International Workshop on Characterization and Engineering Properties of Natural Soils, Singapore* (submitted).
10. Hong, Z. and Onitsuka, K. (1998), "A method of correcting yield stress and compression index of Ariake clays for sample disturbance", *Soils and Foundations*, Vol.38, No.2, pp.211-222.
11. Hong, Z. and Tsuchida, T. (1999), "On compression characteristics of Ariake clays", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.36, pp.807-814.
12. Kim, S. K. (1999), "Large consolidation settlement occurred during reclamation works in the Nakdong river mouth", *KGS 99 Dredging and Geoenvironmental Conference*, pp.35-48.
13. Leroueil, S., Tavenas, F. and Le Bihan, J. P. (1983), "Proprietes caracteristiques des argiles de lest du", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.20, No.4, pp.681-705.
14. Locat, J. and Tanaka, H. (1999), "Microstructure, mineralogy and physical properties: techniques and application to the Pusan clays", *KGS '99 Dredging an Geoenvironmental Conference*, pp.15-31.
15. Nagaraj, T. S. (2000), "Naturally and induced cemented soft clays - Analysis and assessment of their behaviour", *The BK21 Invitation Lecture, Dong-A University*, pp.1-130.
16. Nagaraj, T.S., B.R.S. Murthy, A. Vatsala and R.C. Joshi (1990), "Analysis of compressibility of sensitive soils", *Journal of Geotechnical Engrg., ASCE*, Vol.116, No.1, pp.105-119.
17. Ogawa, F. and Matsumoto, K. (1978), "Correlations of geotechnical parameters in port and harbor area", *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.17, No.3, pp.7-20. (in Japanese)
18. Park, S.Z., G.H. Jeong, J.H. Park, F.E. Bautista, S. Suwa, M. Fukuda, H. Tanaka, O. Mishima and M. Tanaka (2000), "The mysterious formation of Nakdong river estuary soft soil", *International Seminar on Geotechnics in Kochi*, pp.41-48.
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.
20. Tsuchida, T., Kobayashi, M. and Mizukami, J. (1991), "Effect of aging of marine clays and its duplication by high temperture consolidation", *Soils and Foundations*, Vol.31, No.4, pp.133-147.
21. Tsuchida, T. (2000), "Mechanical properties of Pleistocene clay and evaluation of structure due to aging", *IS-Yokohama 2000, Keynote Address*, pp.39-79.

(접수일자 2002. 5. 7, 심사완료일 2002. 6. 30)