한국광물학회지 제 18 권 제 2 호 (2005년 6월)
J. Miner. Soc. Korea, 18(2), 93-107 (June, 2005)

낙동강 하구지역 점토퇴적물의 광물조성과 토질물성과의 상관관계

Correlation Between Engineering Properties and Mineralogy of Clay Sediments in the Estuary of the Nakdong River

이 선 갑 (Sonkap Lee)[1] · 황 진 연 (Jin-Yeon Hwang)[1,*] · 김 진 섭 (Jin-Seop Kim)[1] · 엄 정 기 (Um, Jeong-Gi)[2]

[1]부산대학교 지질학과
(Department of Geology, Pusan National University, Busan 609-735, Korea)
[2]부경대학교 환경탐사공학과
(Department of Environmental Exploration Engineering, Pukyong National University)

요약 : 부산 신항만 및 녹산공단 지역을 포함하는 낙동강 하구 유역에는 두꺼운 점토질퇴적물이 퇴적되어 연약지반을 구성하고 있다. 이곳의 4개의 시추공에서 채취한 점토퇴적물에 대해 광물성분과 공학적 토질물성을 분석하여, 깊이에 따른 변화를 검토하고 그들의 상관관계를 검토하였다. 그 결과 점토퇴적물 속에 함유된 일부 광물조성은 토질물성과 약간의 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 석영의 함량은 습윤단위중량과 정의 관계이고, 액성한계와는 부의 상관관계를 보였다. 함수량은 장석의 함량과는 부의 관계이고, 점토광물의 함량과는 정의 관계를 나타냈다. 습윤단위중량은 점토광물의 함량과는 부의 관계를 나타냈다. 그리고 복합적 인자에 의한 상관분석 결과에서 소성지수는 점토광물, 스멕타이트, 점토입도의 함량과 일정의 관계식을 가지는 것으로 나타났다.

주요어 : 점토, 점토광물, 연약지반, 광물성분, 토질물성

ABSTRACT : The estuary of Nakdong River area including Noksan industrial complex and Busan New Port is composed of thick unconsolidified sediments containing abundant clay, and thus is a potential hazardous area of ground subsidence. We analyzed mineral compositions and geotechnical properties of the clay sediments that sampled from 4 boreholes of the area, and examined vertical variations and their correlations. The results showed correlations between some mineral constituents and geotechnical properties of clay sediments. A positive correlation showed between quartz content and wet unit weight, whereas a negative correlation showed between quartz content and liquid limit. Feldspar content and water content showed a negative correlation, whereas content of clay minerals and liquid limit showed a positive correlation. And also, there is a negative correlation between content of clay minerals and wet unit weight. Correlation equations are obtained from the multiple regression analyses among plastic index, content of clay mineral, smectite and clay fraction.

Key words : clay, clay mineral, unconsolidified sediments, mineral composition, geotechical properties

*교신저자: hwangjy@pusan.ac.kr

서 언

급속한 산업발달과 도시화에 의해 해안지역의 매립과 개발이 활발히 이루어져 왔다. 특히 낙동강 하구의 해안지역에는 녹산공단 및 부산 신항만 등의 대규모 개발사업이 진행되고 있다. 그러나 이 지역은 미립의 점토퇴적물이 지반을 구성하는 연약지반에 해당된다. 즉, 녹산공단 및 부산 신항만 지역의 지층은 표층으로부터 최대 70 m까지 쇄설성의 미고결 퇴적물이 분포하며, 이 퇴적물 중 점토입자의 구성비가 대단히 높아 구조물의 안전성에 많은 문제점을 야기할 수 있는 연약지반에 해당한다. 연약지반은 일반적으로 압축성이 크고 지지력이 작아서 상부구조물을 지지할 수 없는 상태의 지반을 지칭한다.

이 곳 낙동강 하구 퇴적층은 육지로부터 공급되는 담수의 영향과 함께 지난 수천 년에 걸쳐 상승한 해수의 영향(조화룡, 1987)을 동시에 기록된 지층이다. 지금까지 낙동강 하구 미고결 퇴적층에 대한 연구는 주로 토질공학적인 특성을 파악하기 위해 수행되어 왔다(김길수 외, 2001; 정성교 외, 2001). 그러나 토질물성의 근본이 되는 광물학적인 연구, 즉 연약점토층을 구성하는 광물성분에 대한 연구는 매우 미진하며, 이에 대한 보다 심도 있는 연구가 필요한 것으로 생각되어 왔다. 최근 점토퇴적물의 광물학적이고 지화학적인 요소와 결부된 연구가 일부 이루어지고 있지만(Ohtsubo *et al.*, 1991; Ohtsubo *et al.*, 1995; 이연규 외, 1996; 이선갑 외, 2003), 아직 연약점토에 대한 자세한 광물학적 특성에 대한 연구는 일반 토질공학적인 연구에 비해 매우 미흡한 실정이다.

연약지반의 토질공학적 특성은 연약지반을 구성하는 광물 및 공극수와 같은 구성물질에 기인하는 것이므로, 구성물질인 광물성분에 대한 자세한 연구는 토질의 근본 원인을 이해하고 연약지반의 안정화 대책을 세우는데 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다. 따라서 이번 연구는 낙동강 하구지역의 일부 시추코어 시료에 대해 광물성분과 공극수의 화학성분을 분석하였고, 또한 토질공학적 토질시험을 실시하여 이들 결과를 상호 비교 분석하여 그 상관관계를 검토하였다. 이러한 연구는 광물학과 토목공학과의 상호 이해를 높이며, 연약지반의 문제점을 해결하는데 중요한 기초 자료가 될 것으로 사료된다. 또한 점토퇴적물의 수직적인 성분 및 물성의 변화는 시대에 따른 퇴적환경 변화를 이해하는데 도움을 줄 수 있다.

연구방법

낙동강 하구인 녹산공단 지역과 부산 신항만 지역에서 각각 2개공의 시추를 실시하였으며, 총 4개공에 대한 퇴적물 시료를 채취하였다(그림 1). 녹산공단지역에서 2개의 시추코아(SP-23, SP-39)에서 2 m 간격으로 29개의 시료를 채취하였고, 부산 신항만 지역에서 2개의 시추코아(BH-26, BH-28)에서 2 m 간격으로 52개의 시료를 채취하였다. 주 구성광물과 점토광물의 조성과 함량비를 파악하기 위해 X-선 회절분석을 실시하였으며, 간극수의 지화학적 특징을 알아보기 위해 현탁액의 pH와 전기전도도를 측정하였다. 토질시험은 비중, 입도, 함수비, 연경도, 압밀지수, 압축강도 등 물성 및 역학시험을 실시하였다. 이와 같이 수행된 실험 결과의 상관성 분석은 지구통계학적인 방법을 이용하여 분석하였다.

X-선 회절분석법에 의한 구성광물의 정량은 내부표준물질인 산화아연(ZnO)을 사용한 Chung의 정량방법(Matrix flushing method, Chung, 1974)으로 정량하였다. 모든 측정에서 같은 시료에 대해서는 2번 이상의 X-선회절을 실시하였고, 그 평균값을 결과치로 사용하였다. X-선회절분석에 의한 퇴적물의 광물성분은 대부분이 점토광물이며, 그 외에 석영과 장석, 그리고 약간의 방해석을 함유하고 있으므로, 석영, 장석, 방해석을 정량한 후 그 여분을 점토광물의 함량으로 계산하였다. 점토광물은 과산화수소 처리에 의해 유기물을 분해 후 수중침강법에 의해 2 μm 이하의 점토분을 분리하여 정방위시편을 만들어 분석하였다. 점토광물의 상대적 반정량분석은 해양퇴적물의 정량분석에 많이 이용되는 Biscaye (1965)의 방법을 사용하였다. X-선회절분석은 Rigaku사제 Geigerflex 2301을 사용하였으며, CuKα 선으로 Ni-filter를 사용하였다. 통상의 측정조건은 전압 30 kv, 15 mA, scan speed는 2° ~1° 2θ/min, 시정수 1 sec, slit 1° (diverging slit)~0.3 mm (receiving slit)~1° (scatter slit)로 하였다.

퇴적물 간극수의 pH 및 전기전도도의 측정은

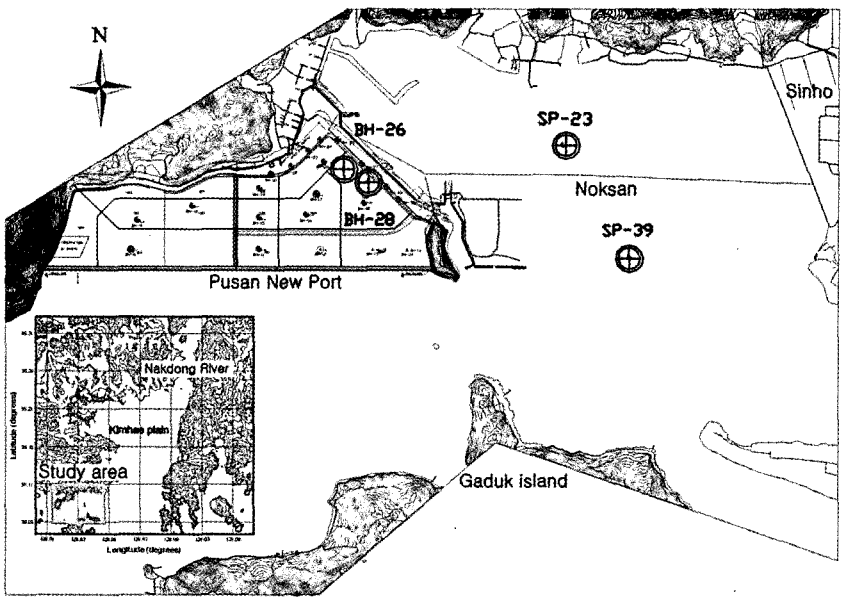

Fig. 1. Map showing the locations of bore holes.

퇴적물 2 g을 채취하여 증류수 20 mL에 혼합 후 약 2시간을 상온에 방치하였다가 원심분리 후 그 여액에 대해 Orion Research사제 model 135의 기기를 이용하였다.

입도분석은 자갈 및 모래는 표준체를 이용하여 습식체질로 분리하였고, 실트 및 점토 입자는 비중계를 이용하여 구하였다. 함수량은 시료 약 20 g을 110℃에서 48시간 동안 건조시킨 후 데시케이트 속에 약 8시간 동안 넣어 실온에 도달한 후 무게를 재어 구했다. 비중은 피크노미터를 이용한 비중시험방법에 따라 구했다. 응력에어형 기기를 사용하여 압축응력과 변형율, 내부마찰각, 점착력을 구하였다. 압밀상자를 이용하여 간극비 및 포화도, 압축지수를 구하였고, 연경도(consistency)를 알아보기 위하여 액성한계시험 및 소성한계시험을 수행하였다. 모든 시험은 한국산업규준 토질시험법(KSF)에 의거 실시하였다.

자료의 통계분석은 가장 대표적인 통계패키지인 윈드우용 SAS를 이용하여 단순회귀분석과 다중회귀분석을 행하였다. 단순회귀분석은 지질함수(광물함량과 간극수의 지화학적 특성)와 토질함수를 각각 1대 1로 상관관계를 알아보는 방법이며, 함수간의 회귀식과 상관계수를 구하였다. 다중회귀분석은 토질공학함수를 하나의 독립변수로 두고 지질함수를 종속변수로 하여 하나의 토질공학함수와 연관되는 여러 개의 지질함수와의 상관관계를 알아보는 방법이며, 함수들 간의 상관식과 F-value를 구하였다. 다중회귀분석은 여러 개의 종속변수에 대한 독립변수와 연관성을 찾는 방법으로 실험의 오차나 실험기자재의 오차와 같이 정확성이 떨어지는 자료를 추출하기가 쉽지 않다(정홍, 1987). 그래서 자료의 정확성을 검토하기 위해 먼저 여러 가지의 검증절차를 밟아 자료의 신뢰성을 높였다. 사용된 회귀모형이 가정들을 충족시키는지의 여부를 검토하기 위한 척도로서 표준화 잔차(Studentized residual)를 이용하였다. 독립성 여부는 Durbin-Watson 통계량을 이용하였고, 정규성은 잔차에 대한 정규확률산점도(Normal probability plot)를 이용해서 시각적으로 판단하였다. 등분산성은 잔차에 대한 이분산성(Heteroscedasticity) 여부를 파악하기 위해 잔차와 예측치들을 산점도로 표시하여 분산의 동일성을 시각적으로 판단하였다. 다중공선성 여부는 분산확장인자(Variance inflation factor)와 분산분할(Variance proportion)로 검정하였다. 추출된 자료에 대해 최적회귀모형의 선택을 수행하였다. 선택방법은 단계별선택(Stepwise selection)을 수행하였다. 단계별선택방법(장지인 외, 1993)에서 제거와 선택의 기

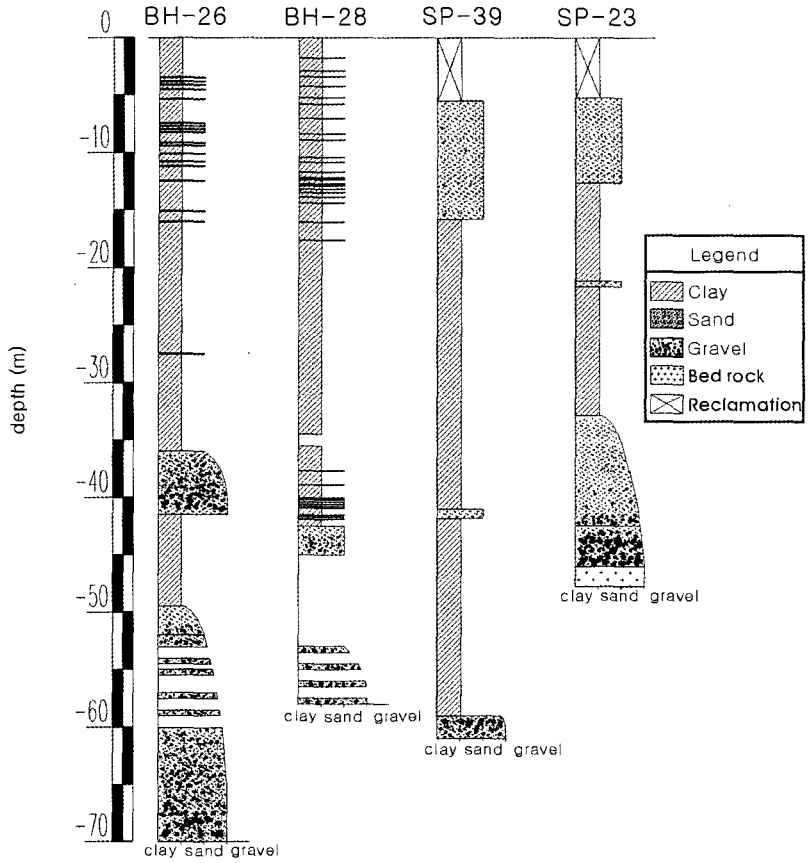

Fig. 2. Stratigraphic profiles of 4 bore holes.

준은 F-test를 실시하였으며 제거의 유의수준은 5%로 하여 비교 · 검토하였다. 먼저 종속변수들 중 F값이 가장 큰 변수를 선택하여 F-test를 하여 유의수준 5% 내에서 기각되면 선택하여 다음 단계로 넘어간다. 그 다음으로 높은 F값을 가진 종속변수를 선택하여 F-test를 실시하여 기각되면 선택한다. 다시 같은 방법으로 종속변수를 선택하여 기각되지 않으면 그 변수는 버리고 회귀분석을 종료하는 방법으로 자료에 대한 단계별선택을 실시하였다.

연구결과 및 고찰

시추코어의 퇴적상

녹산공단 지역에 위치한 SP-39와 SP-23 시추공은 최상부에 매립층이 약 5 m 두께로 분포하며, 그 하부에 약 10 m의 사질층이 분포하고 있다(그림 2). 통일분류법(Casagrande, 1948)상 액성한계가 50%보다 높은 점토군(High Plastic Clay-CH)에 속하는 점토퇴적층이 사질층 하부에 분포하며, 육지에 가까운 SP-23은 약 20 m 층후를 보이며, 육지에서 먼 SP-39는 약 40 m 층후를 보인다. 그 하부에는 기반암 위에 피복한 자갈, 모래와 점토가 혼재된 층이 분포하며, SP-23 시추공은 정입도의 모래자갈층으로 분포한다. 점토층 내에 사질층이 층간에 협재되어 있는 특징을 나타낸다.

부산 신항만 지역에 위치하는 BH-26과 BH-28 시추공의 최상부에는 수십 매의 얇은 모래층을 협재한 점토층이 약 15 m 층후로 분포한다. 그 하부에 약 20 m 층후의 점토층이 분포하며 통일분류법상 녹산지역과 유사한 점토군(CH)에 속하는 점토퇴적층으로 층간에 사질층이 많이 협재되어 있다. 그 하부에 약간의 자갈을 포함한 사질층이 약 5 m 두께로 분포하며, 정입도

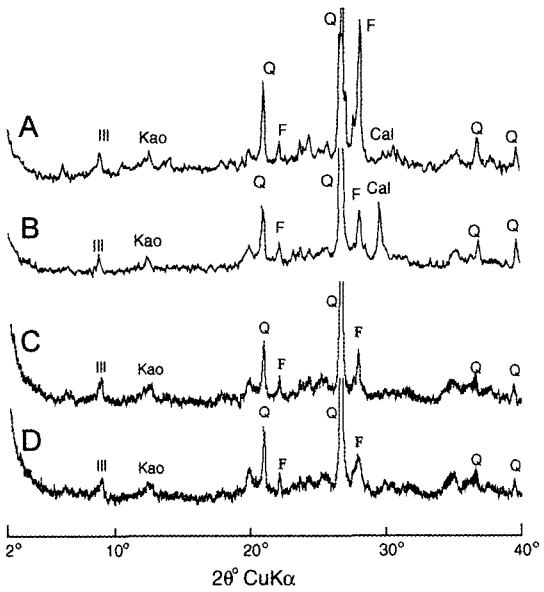

Fig. 3. X-ray diffraction patterns of bulk samples collected from clay sediments. Ill: Illite, Kao: Kaolinite, Q: Quartz, F: Feldspar, Cal: Calcite A: SP-39 (13.8 m), B: SP-39 (31.8 m), C: BH-26 (13.5 m), D: BH-26 (31.5 m).

분포를 나타낸다. 그 하부에 5~7 m 두께의 점토층이 얇은 층후로 분포한다. 그 하부에는 정입도의 분포를 보이는 점토질모래층이 약 10 m 두께로 나타나며, 최하부에는 녹산지역과 유사한 기반암 상부 피복층인 자갈층이 분포한다. 육지에 가까운 BH-26 시추공의 하부 모래층 및 자갈층은 층후가 매우 두꺼우며, 육지에서 보다 먼 BH-28의 하부층은 모래층으로 판단되는 시료 손실대가 나타나는 특징을 보인다.

녹산공단 지역과 부산 신항만 지역에 분포하는 미고결퇴적층의 공통된 특성은 최상부 약 15 m 층후에 분포하는 퇴적층이 모래층을 협재하고 있다는 것이다. 또한 그 하부에 분포하는 점토층은 BH-28 시추공을 제외하고는 모두 층 중간에 모래층 및 자갈층이 협재되어 있다. 그 층을 경계로 상부 점토층과 하부 점토층은 색도와 물성의 차이가 난다. 최하부에는 모든 시추공에서 기저역층이 분포하며, 기저역층 상부의 모래층은 전반적으로 정입도의 입도분포를 나타낸다. 공간적으로 SP-39 시추공이 육지로부터 가장 먼 위치에 있으며, 점토퇴적층의 두께도 가장 두껍다. BH-26 시추공은 비교적 육지에 가까

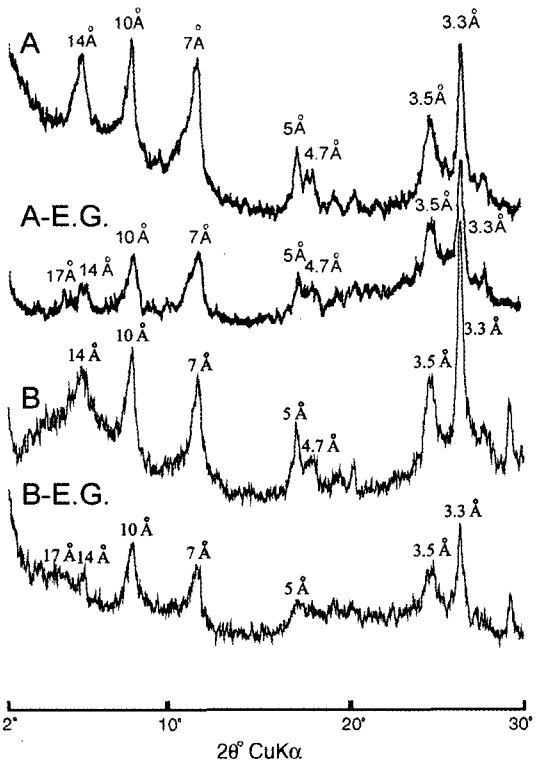

Fig. 4. X-ray diffraction patterns of oriented samples prepared from clay sediments. A: SP-39 (13.8 m, non-treated); A-E.G.:Sp-39 (13.8 m, ethylene-glycol treated); B:BH-26 (29.5 m, non-treated); B-E.G.: BH-26 (29.5 m, ethylene-glycol treated).

운 위치에 있으나, 상당히 두꺼운 퇴적 층후를 보이며, 이것은 BH-26 시추공의 하부 기저층이 침식곡에 의한 영향에 의해 깊어진 것으로 판단된다.

구성광물 분석

점토 퇴적물에 대한 X-선 회절분석 결과, 전체적인 분말시료에서는 주로 석영과 장석 및 방해석이 나타나고, 그 외에 일라이트와 카올리나이트 등의 점토광물로 구성된다(그림 3). 2 μm 이하의 점토분으로 분리한 시료의 X-선회절분석 결과, 모든 시료에서 14 Å, 10 Å, 7 Å의 회절선이 검출되었다(그림 4). 이들 시료를 에칠렌글리콜 처리한 결과, 14 Å의 회절선의 일부가 17~18 Å의 회절선으로 이동하는 것이 나타나서, 스멕타이트가 포함되는 것으로 확인되

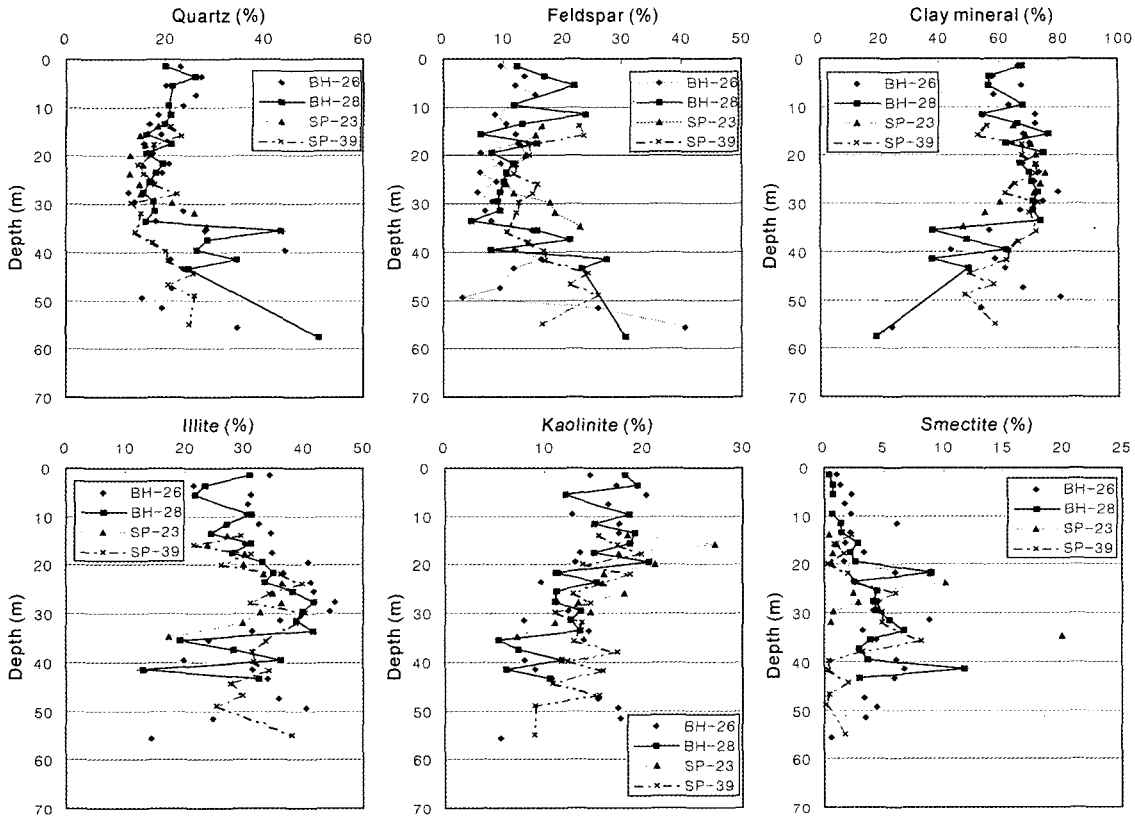

Fig. 5. Variations of mineral contents with depth.

었다. 무처리에서 10 Å의 회절선은 여러 처리에서도 변화가 없는 것으로 보아 일라이트에 해당되는 것으로 볼 수 있다. 모든 7 Å의 회절선은 550℃의 가열에서 소멸하는 것으로 보아 카올리나이트의 존재를 나타내었다. 그리고 550℃의 가열에서 14 Å의 일부 회절선이 그대로 잔존하는 것으로 보아 녹니석도 존재하는 것으로 나타났다. 그러나 550℃ 가열에서 14 Å의 회절선의 일부분은 11-12 Å 부근으로 이동하는 것으로 보아 14 Å 회절선의 일부분은 버미큘라이트에 해당되는 것으로 판단된다. 즉, 무처리에서 14 Å 회절선은 녹니석과 함께 버미큘라이트도 같이 포함되는 것으로 나타났다. 이상과 같은 검토 결과, 이들 점토시료에는 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트, 버미큘라이트의 점토광물이 포함되는 것으로 나타났다. 해양퇴적물 중에 점토광물의 정량분석에 사용되는 Biscaye (1965)에 의한 방법으로는 녹니석과 버미큘라이트를 구분하여 정량하기는 어렵다. 따라서 에칠렌글리콜 처리 후의 모든 14 Å 회절선을 모두 녹니석으로 간주하여 정량하였다. 그러나 실제적으로는 이 광물은 상당량 버미큘라이트를 포함한다.

점토 퇴적물 광물함량의 분석 결과, 녹산공단 지역의 퇴적물은 석영 12～28%, 장석 7～25%, 점토광물 48～76%, 방해석 3% 이하의 범위이며, 부산 신항만 지역의 퇴적물은 석영 12～51%, 장석 3～40%, 점토광물 18～80%, 방해석 6% 이하의 범위를 보인다. 수직적 분포변화는 석영과 장석은 상부에서 30 m까지 하부로 갈수록 대략 감소하며, 그 이하에서는 함량이 증가한다. 반면에 점토광물의 함량은 상부로부터 30 m까지 약간 증가하며, 그 이하에서는 함량이 감소한다(그림 5). 두 지역의 광물함량은 비슷한 함량분포를 보이며, 층간에 협재된 모래층과 최하부 자갈층 및 모래층에서 추출된 자료에서는 점토광물의 함량이 매우 적고 석영 및 장석의 함량이 많은 특징을 나타낸다. 약 30 m를 전후

로 한 20~40 m의 중간층에서 점토광물이 많고 석영 및 장석의 함량이 적다. 이러한 특성은 해수면 상승에 따른 퇴적환경변화와 일치하는 것으로 생각된다. 즉, 빙하기 후기 해수면 상승 초기(조간대), 해수면 상승에 따른 해양환경(내만성 천해), 낙동강 하구 퇴적 환경(조하대)의 변화로 크게 3단계로 나누어 볼 수 있을 것으로 보인다(류춘길, 2003).

녹산공단 지역과 부산 신항만 지역의 점토광물 함량비는 거의 유사한 값을 보이며, 녹산지역은 일라이트 17~40%, 카올리나이트 7~27%, 녹니석(버미큘라이트) 3~27%, 스멕타이트 0.1~20%의 범위를 보이며, 부산 신항만 지역은 일라이트 13~45%, 카올리나이트 5~21%, 녹니석(버미큘라이트) 3~24%, 스멕타이트 0.5~12%의 범위를 보인다. 심도별 분포는 일라이트 및 스멕타이트는 상부로부터 30 m를 전후하여 증가 경향을 나타내며, 그 하부로 갈수록 그 함량이 감소하며, 카올리나이트의 함량은 하부로 갈수록 감소하는 특징을 잘 보인다(그림 5). 한반도 근해 해저퇴적물에서 조사된 점토광물의 함량(Windom, 1976; Khim, 1988; 박수철, 1989; 박수철, 1993; Park and Khim, 1990; 박정기와 오재경, 1991; 박용안 외, 1992; 문지원 외, 1997)과 본 연구의 결과를 비교하면 동남해 일원의 자료와 유사한 점토광물 구성비를 나타낸다. 이들 논문에서는 일반적으로 국내 해양퇴적물 내의 카올리나이트와 녹니석은 육원성 물질로 보는 경우가 많다. 이러한 점토광물의 높은 함량은 낙동강에서 유입된 쇄설성 퇴적물임을 의미한다. 카올리나이트와 녹니석은 하부 점토층에 비해 상부로 갈수록 증가하는 특징을 보인다. 따라서 하부층 보다는 상부층이 낙동강의 영향에 의한 물질공급이 더욱 활발했음을 의미한다.

공극수의 지화학적 특성

녹산지역 점토퇴적물 공극수의 pH는 3~9의 범위로 넓게 분포하고 있으며, 주로 하부에서 산성의 산도를 나타낸다. 부산 신항만 지역은 6~9의 pH 범위를 나타낸다. 전기전도도는 0.6~4.2 ms/cm의 범위로 거의 유사한 값을 나타낸다(그림 6). 두 지역의 간극수의 지화학적 특성은 유사한 범위를 보이나, 녹산공단 지역은

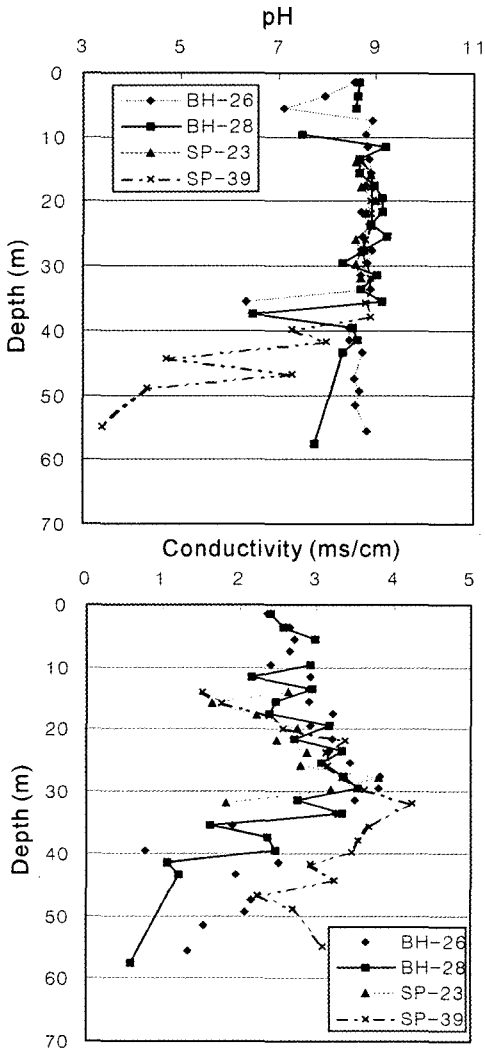

Fig. 6. Variations of pH and conductivity with depth.

SP-39 시추공의 하부 점토퇴적물에서 산성의 산도를 나타낸다. 해양퇴적물은 약염기성에 가까운 특성을 잘 나타내나, 산성의 산도를 보인다는 것은 해수면 상승 초기 육성환경의 영향을 많이 받았던 환경인 산성 환경에서 퇴적된 지층에 의한 것으로 생각된다.

점토퇴적물 공극수의 지화학 분석에서도 광물함량의 깊이에 따른 변화양상과 비슷하게 심도 30~40 m를 기준으로 그 상하에서 상이한 변화를 나타낸다. pH 및 전기전도도는 30 m 이하에서 하부로 갈수록 감소되어가는 특성을 나타낸다. 이러한 심도 30~40 m 사이 구간을 경

계로 그 값의 차이가 나고 다른 변화를 보이는 것은 최후 빙하기 이후 해수면의 상승과 관련된 퇴적환경변화에 의한 것으로 생각된다.

토질물성 분석

녹산공단 지역과 부산 신항만 지역의 모든 점토퇴적물 시료에 대해 토질시험을 실시하였으며, 그 결과는 표 1과 같다. 입도분포에서 사질은 녹산공단 지역이 2～45%, 부산 신항만 지역이 6～41% 분포를 나타내며, 미사질은 녹산공단 지역이 30～61%, 부산 신항만 지역이 40～60% 분포를 나타내며, 점토질은 녹산공단 지역이 19～62%, 부산 신항만 지역이 13～45% 분포를 나타낸다. 사질의 비율은 녹산공단 지역(평균 9%)에 비해 부산 신항만 지역(평균 23%) 시료에서 높게 나타나며, 점토질의 비율은 녹산공단 지역(평균 46%)에 비해 부산 신항만 지역(평균 26%) 시료에서 낮은 특성을 보인다.

연구지역 점토퇴적물의 물성은 습윤단위중량, 간극비, 함수율, 비중 등의 실험을 통해 알아보았다. 녹산공단 지역의 습윤단위중량은 1.46～1.96 t/m^{3}으로 넓은 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 1.53～1.77 t/m^{3}로 좁은 범위의 분포를 나타내나 두 지역은 유사한 값(약 2.66～2.67 t/m^3)을 나타낸다. 녹산공단 지역의 간극비는 0.82～2.17로 넓은 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 1.15～1.94로 좁은 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 간극비(평균 1.40)가 부산 신항만 지역의 간극비(평균 1.51)에 비해 약간 낮은 값을 취하고 있다. 녹산공단 지역의 함수율은 30.3～60.7% 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 45.0～71.1% 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 함수율(평균 46.0%)이 부산 신항만 지역의 함수율(평균 56.7%)에 비해 낮다. 녹산공단 지역의 비중은 2.62～2.73 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 2.65～2.77 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 비중(평균 2.67)이 부산 신항만 지역의 비중(평균 2.72)에 비해 낮다.

연구지역 점토퇴적물 시료의 연경도는 액성한계, 소성한계, 소성지수 등을 통해 알아보았다. 녹산공단 지역의 액성한계는 42.4～99.2% 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 39.9～72.5% 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 액성한계(평균 74.9%)가 부산 신항만 지역의 액성한계(평균 55.7%)에 비해 높다. 전반적으로 모래질이 많은 부분을 제외하면 녹산공단 지역과 부산 신항만 지역의 점토퇴적층은 액성한계가 50%를 넘는 고소성 점토군(CH)에 속한다. 녹산공단 지역의 소성한계는 20.6～31.6% 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 20.9～45.6% 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 소성한계(평균 25.6%)가 부산 신항만 지역의 소성한계(평균 30.7%)에 비해 낮다. 녹산공단 지역의 소성지수는 20.8～68.7% 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 12.2～42.2% 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 소성지수(평균 49.3%)가 부산 신항만 지역의 소성지수(평균 25.1%)에 비해 높다.

연구지역 점토퇴적물 시료의 전단강도 특성은 일축압축강도, 변형계수, 포화도, 점착력, 내부마찰각, 압축지수 등을 통해 알아보았다. 녹산공단 지역의 일축압축강도는 0.40～1.61 kg/cm^2 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 0.12～1.03 kg/cm^2 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 일축압축강도(평균 0.91 kg/cm^2)가 부산 신항만 지역의 일축압축강도(평균 0.47 kg/cm^2)에 비해 높다. 녹산공단 지역의 변형계수는 3.1～74.2 kg/cm^2 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 4.8～24.2 kg/cm^{2}로 낮은 값의 좁은 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 변형계수(평균 31.6 kg/cm^2)가 부산 신항만 지역의 변형계수(평균 12.9 kg/cm^2)에 비해 높다. 녹산공단 지역의 포화도는 78～100% 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 93～98% 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 포화도(평균 93%)와 부산 신항만 지역의 포화도(평균 96%)는 거의 유사한 값을 보인다. 녹산공단 지역의 점착력은 0.1～0.5 kg/cm^2 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 0.2～0.4 kg/cm^2 범위의 값을 가지며, 녹산공단 지역의 점착력(평균 0.25 kg/cm^2)과 부산 신항만 지역의 점착력(평균 0.30 kg/cm^2)은 거의 유사한 값을 보인다. 녹산공단 지역의 마찰각은 7.9～45.8° 범위의 값을 가지며, 부산 신항만 지역은 8.1～22.6° 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 내부마찰각(평균 22.6°)이 부산 신항만 지역의 내부마찰각(평균 15.7°)에 비해 높다. 녹산공단 지역의 압축지수는 0.22～0.90 범위의 값을 가지며, 부산 신항만

Table 1. Engineering properties of core samples

Bore hole no.	Depth (m)	Particle size fractions (%)			Physical properties				Consistency			Shearing strength					
		Sand	Silt	Clay	rt	e	Wn	Gs	W_L	W_P	I_P	qu	E_{50}	Sr	C	ϕ	C_C
SP-23	13.8	20	36	44	1.76	1.08	38.3	2.63	58.7	21.7	37.0	0.63	12.5	95	0.1	32.7	0.23
	15.8	13	35	52	1.69	1.27	42.8	2.67	71.4	22.5	48.9	0.71	16.2	95	·	·	0.38
	17.8	2	46	52	1.68	1.33	47.7	2.67	82.8	26.7	56.1	1.07	29.2	95	0.3	22.8	0.39
	19.8	6	43	51	1.66	1.39	51.2	2.62	85.4	25.5	59.9	0.93	35.3	96	·	·	0.52
	21.8	3	42	55	1.58	1.60	55.1	2.65	90.1	26.8	63.3	0.64	24.8	97	0.3	7.9	0.54
	23.8	2	53	45	1.54	1.69	55.8	2.67	94.8	26.1	68.7	0.60	20.1	90	·	·	0.69
	25.8	2	36	62	1.64	1.50	54.6	2.66	91.4	27.3	64.1	1.43	69.0	99	0.3	22.6	0.90
	27.8	2	37	61	1.54	1.75	60.7	2.64	90.5	29.6	60.9	1.08	43.8	96	·	·	0.85
	29.8	7	46	47	1.66	1.38	47.3	2.69	75.2	23.0	52.2	0.98	58.3	91	0.3	13.3	0.53
	31.8	14	57	29	1.83	1.00	37.7	2.66	56.5	20.6	35.9	1.13	50.2	100	·	·	0.48
	34.8	51	30	19	·	·	31.7	2.65	·	·	·	·	·	·	0.5	45.8	0.22
SP-39	13.8	19	39	42	1.75	1.09	37.8	2.66	57.2	21.9	35.3	0.73	21.0	98	0.1	17.0	·
	15.8	45	24	31	1.96	0.82	30.3	2.72	42.4	21.6	20.8	0.66	14.3	100	·	·	0.27
	17.8	10	51	39	1.72	1.16	37.7	2.70	64.1	25.5	38.6	1.05	48.4	93	0.2	14.9	·
	19.8	3	40	57	1.67	1.34	46.6	2.66	80.0	24.6	55.4	0.84	24.7	96	·	·	0.63
	21.8	3	40	57	1.60	1.52	49.7	2.69	80.6	24.0	56.6	0.59	27.1	91	0.2	22.5	0.60
	23.8	7	45	48	1.65	1.40	49.6	2.73	82.8	23.2	59.6	0.63	21.1	92	·	·	0.74
	25.8	6	46	48	1.65	1.32	47.4	2.71	84.5	26.3	58.2	1.01	44.3	97	0.3	22.9	0.52
	27.8	7	45	48	1.67	1.39	47.5	2.69	68.3	25.0	43.3	1.08	33.1	93	·	·	0.78
	29.8	2	49	49	1.60	1.51	50.9	2.68	92.3	30.0	62.3	1.29	41.1	94	0.3	20.7	0.61
	31.8	6	39	55	1.57	1.75	60.4	2.69	99.2	31.6	67.6	1.23	50.8	94	·	·	0.83
	35.8	8	44	48	1.46	1.89	59.1	2.66	86.1	29.1	57.0	0.52	19.9	85	·	·	0.83

*Abbreviation: Wn; Water content (%), Gs; Specific gravity, rt; Wet unit weight (t/m^3), e; Void ratio, W_L; Liquid limit (%), W_P; Plastic limit (%), I_p; Plastic index (%), qu; Unconfined compressive strength (kg/cm^2), E_{50}; Coefficient of strain (kg/cm^2), Sr; Degree of saturation, C; Cohesion (kg/cm^2), ϕ; Friction angle (°), Cc; Compressive index

(Continued)

Bore hole no.	Depth (m)	Particle size fractions (%)			Physical properties				Consistency			Shearing strength					
		Sand	Silt	Clay	rt	e	Wn	Gs	W_L	W_P	I_P	qu	E_{50}	Sr	C	ϕ	C_C
SP-39	37.8	8	43	49	1.57	1.67	53.8	2.73	91.1	30.9	60.2	1.61	74.2	94	0.3	23.1	0.77
	39.8	4	57	39	1.65	2.17	43.3	2.64	56.5	25.0	31.5	0.82	16.9	78	·	·	0.51
	41.8	9	52	39	1.70	1.19	40.1	2.66	58.0	23.6	34.4	1.02	24.3	94	0.2	13.4	0.55
	44.4	2	51	47	1.68	1.25	41.2	2.67	63.5	24.2	39.3	0.91	18.9	90	·	·	0.39
	46.8	1	54	45	1.68	1.20	37.8	2.67	59.7	24.1	35.6	0.40	3.1	91	0.1	16.2	0.34
	48.8	2	60	38	1.67	1.25	39.4	2.69	59.8	25.0	34.8	0.65	15.4	90	·	·	0.53
	54.8	1	61	38	1.69	1.19	39.8	2.65	74.2	30.6	43.6	1.11	26.9	89	0.2	43.5	0.44
BH-26	1.5	32	54	13	1.74	1.39	53.1	2.77	39.9	20.9	19.1	0.12	4.9	97		8.1	0.47
	3.5	29	52	18	1.60	1.73	62.9	2.74	49.3	24.1	25.2	0.13	4.8	94		14.9	0.65
	5.5	24	49	26	1.73	1.27	46.6	2.73	49.6	22.2	27.5	0.26	5.7	93	0.2		0.43
	7.5	35	45	19	1.71	1.41	54.5	2.71	48.7	36.4	12.2	0.38	13.4	96		21.8	0.59
	9.5	25	51	23	1.72	1.35	49.3	2.75	47.7	29.0	18.8	0.41	14.3	95	0.3		0.52
	11.5	21	53	25	1.70	1.38	50.7	2.74	53.4	24.3	29.1	0.35	11.0	94		14.9	0.72
	13.5	17	60	23	1.61	1.60	56.6	2.73	61.4	45.6	15.8	0.56	13.9	97	0.3		0.69
	15.5	30	52	18	1.69	1.47	55.3	2.74	56.9	38.4	18.5	0.60	16.1	97		18.4	0.69
	17.5	8	47	45	1.66	1.60	58.8	2.77	67.2	33.4	33.7	0.68	17.7	96		11.3	0.83
	19.5	16	47	37	1.66	1.55	57.5	2.74	69.3	39.9	29.3	0.51	15.4	98	0.3		0.78
	23.5	23	50	26	1.66	1.61	63.0	2.71	71.8	34.4	37.4	0.88	22.0	98		22.6	0.79
	25.5	23	51	26	1.58	1.75	63.3	2.72	72.5	30.3	42.2	0.78	21.7	95	0.4		0.84
	29.5	15	56	29	1.53	1.94	70.5	2.69	71.4	37.1	34.4	0.47	14.3	93	0.3		0.91
	33.5	41	40	19	1.69	1.42	56.1	2.69	62.7	36.0	26.7	1.03	24.2	97		11.3	0.49
	35.5	12	53	35	1.75	1.15	45.0	2.65	50.8	22.7	28.0	0.88	18.0	96		17.6	0.60
BH-28	1.5	30	50	19	1.61	1.80	71.1	2.68	46.2	30.6	15.6	0.12	5.0	98	0.4		0.47
	3.5	39	45	15	1.77	1.17	46.7	2.68	43.5	26.0	17.5	0.25	7.1	96	0.3		0.56
	5.5	10	56	34	1.65	1.46	52.0	2.73	48.3	24.3	24.0	0.25	5.4	95	0.2		0.68
	7.5	6	55	38	1.71	1.55	64.4	2.71	48.5	27.3	21.2	0.34	9.3	97	0.3		0.57

*Abbreviation: Wn; Water content (%), Gs; Specific gravity, rt; Wet unit weight (t/m^3), e; Void ratio, W_L; Liquid limit (%), W_P; Plastic limit (%), I_P; Plastic index (%), qu; Unconfined compressive strength (kg/cm^2), E_{50}; Coefficient of strain (kg/cm^2), Sr; Degree of saturation, C; Cohesion (kg/cm^2), ϕ; Friction angle (°), Cc; Compressive index

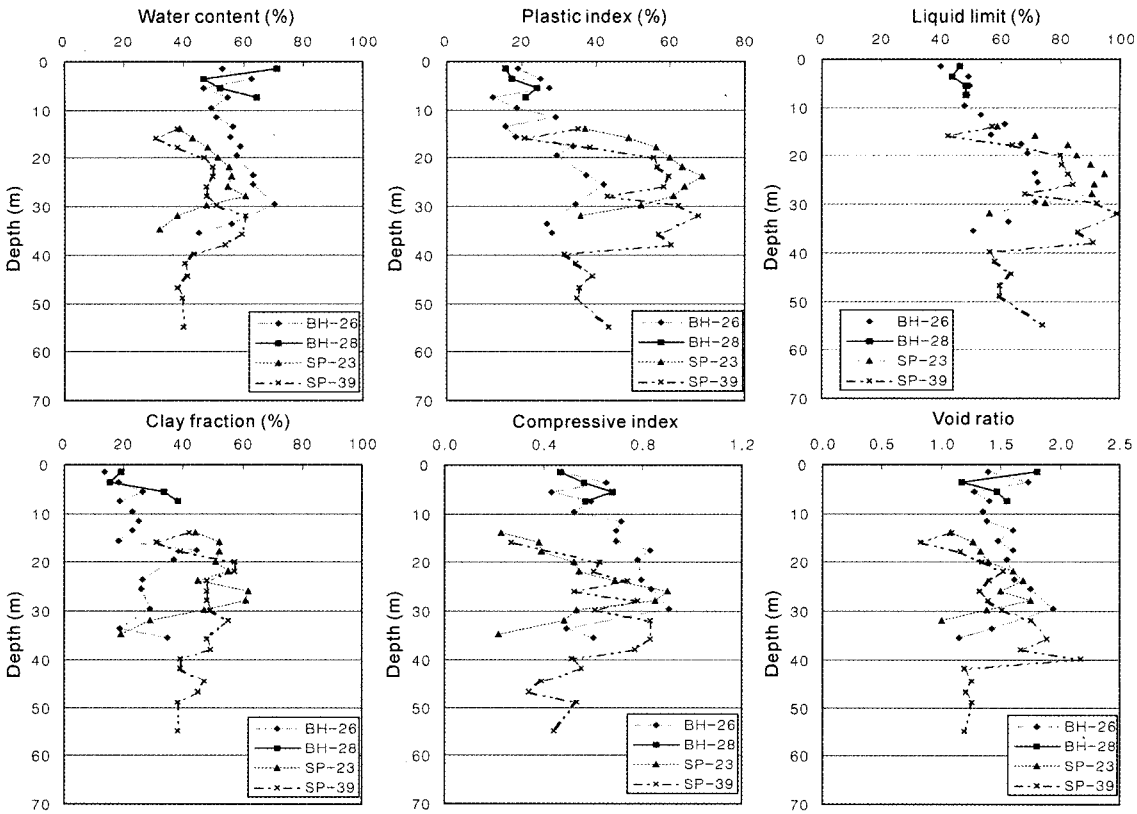

Fig. 7. Variations of engineering properties with depth.

지역은 0.43～0.91° 범위의 분포를 나타내며, 녹산공단 지역의 압축지수(평균 0.56)이 부산 신항만 지역의 압축지수(평균 0.65)에 비해 낮다.

연구지역인 녹산공단 지역과 부산 신항만 지역의 시료에 대한 토질 시험 결과, 녹산공단 지역이 부산 신항만 지역에 비해 점토질의 함량이 높고, 소성지수 및 변형계수, 압밀지수 등이 높은 특성을 나타낸다. 소성지수는 시료가 소성상태에 있는 함수비를 의미하며 값이 크면 소성이 풍부한 흙을 의미하며 점성이 큰 흙일수록 값이 크게 나타난다. 압밀지수는 압밀시험을 하였을 때 선행압밀하중을 지나 경사가 급해지는 구간의 경사도를 의미하며 그 값이 클수록 압축성이 크다는 것을 말한다. 그러므로 부산 신항만 지역의 지반에 비해 상대적으로 녹산공단 지역의 지반이 공학적으로 구조물의 시공시 안정성에 문제점을 안고 있다고 판단된다.

자연함수비, 액성한계 및 소성지수의 심도별 변화가 상기 조사된 광물, 화학적 자료와 잘 대비되는 변화를 보여준다. 또한 입도분포별 심도별 변화를 관찰하여 보면, 30～40 m를 경계로 하여 그 특성의 변화가 달라진다. 그 외 함수비, 소성지수, 액성한계, 압축지수 및 간극비의 경우도 역시 비슷한 양상을 보인다. 점토층 내에 포함된 점토입자 함량의 증가는 함수량 및 간극비의 증가를 의미하며, 이러한 함수가 증가된 퇴적층은 액성한계와 소성지수를 높여주는 결과를 야기한다. 특히 구조물의 안정성과 관련한 중요한 물리적인 특성 중 주 설계정수가 되는 압축지수의 증가를 가져온다. 토질시험값은 상부에서 30 m를 전후하여 증가하는 경향을 나타내며, 그 하부로 갈수록 감소하는 특성을 잘 나타낸다(그림 7). 그러므로 구조물의 안정성은 상부 및 하부 퇴적층에 비해 점토의 함량이 높고 고소성의 점토군(CH)이 가장 많이 분포하는 중앙부 퇴적층이 더 문제가 있을 것으로 판단된다. 토질공학적인 특성은 구성광물과 간극수의 지화학적인 특성과 잘 대비되며, 깊이에 따른 변화양

Table 2. Multiple regression equations calculating for soil geotechnical properties based on mineral contents and geochemical parameters of clay sediments

Multiple regression equation	F-value
Wet unit weight (γ_t) = 0.009 × Q − 0.06 × EC + 1.67	31.16
Void ratio (ε_o) = -0.01 × Q + 0.02 × S + EC + 0.93	41.81
Compressive index (C_c) = 0.03 × pH + EC - 0.2	44.68
Water content (W_n) = -0.6 × F + 1.1 × pH + 0.01 × EC + 27.50	59.73
Liquid limit (L_L) = 0.5 × CM + 1.3 × S + 5.5 × EC + 0.8 × CF − 20.48	59.95
Plastic index (I_P) = 0.36 × CM + 1.44 × S + 0.94 × CF − 22.88	71.60

* Abbreviation: Q; content of quartz (%), F; content of feldspar (%), S; content of smectite (%), CM; content of clay mineral (%), CF; content of clay fraction (%), EC; electronic conductivity (ms/cm), pH; potential of Hydrogen

상도 두 자료 간에 잘 일치된다. 그러므로 토질공학적인 특성과 구성광물 및 간극수의 지화학적인 특성 간에는 상당한 관련성을 가질 것으로 판단된다.

통계적 상관관계 분석

앞서 설명한 것과 같이 토질공학적인 특성의 변화는 구성광물과 지화학적인 특성에 따라 변화할 것으로 보인다. 따라서 지질함수(광물함량과 간극수의 지화학적 특성)와 토질함수간의 상관관계를 좀 더 자세히 살펴보기 위해 통계적 회귀분석을 실시하여 보았다. 이들 결과는 그림 8과 표 2에 나타냈다. 단순회귀분석 결과, 습윤단위중량과 석영과는 정의 상관관계를 보이며, 점토광물과는 부의 관계를 보인다(그림 8). 퇴적물 내에 점토의 증가는 석영과 같은 풍화에 강한 광물의 감소를 의미하며, 또한 단위부피당 무게가 큰 점토광물의 증가는 습윤단위중량의 감소를 야기하며, 상대적으로 단위부피당 무게가 작은 석영의 증가는 습윤단위중량의 증가를 야기할 것이다. 장석의 함량이 높을수록 함수량은 낮아지고, 점토광물의 함량이 높을수록 함수량은 높아지는 특성을 보여준다. 비표면적이 크고 층간을 가진 점토광물의 증가는 수분의 증가를 일으키기에 충분하며, 상대적으로 비표면적은 작고 층상광물이 아닌 장석의 증가는 수분이 적게 나타날 것이다. 전기전도도와 압축지수와는 정의 관계를 보인다. 이러한 전기전도도의 증가는 양이온의 흡착이 용이한 점토광물의 증가를 의미하며, 일반적으로 점토광물은 압축율이 크므로 점토광물의 증가는 압축지수의 증가를 가져오기 때문인 것으로 생각된다. 그리고 액성한계와 석영과는 부의 관계를 나타낸다. 이것은 점토광물과 석영의 함량비에 지배된 결과이다.

이상과 같이 여러 상관관계가 나타났으나, 실제적인 함수들 간의 상관도는 아주 뚜렷하지 않고 불분명한 것이 많다. 이것은 토질 물성에 관계하는 요인이 여러 가지로 복합되어 있으며, 토질 분석 및 광물 정량 등에서의 오차도 포함될 수 있기 때문으로 생각된다. 따라서 두 함수간의 관계로만 검토된 단순회귀분석을 통해서 알기 어려우며, 더 많은 함수들 간에 의한 좀 더 복합적인 관계라고 생각된다. 그래서 토질 공학적 변수를 하나의 독립변수로 두고 광물조성과 화학적인 변수를 종속변수로 두는 다중회귀분석을 통하여 그 상관관계를 검토하였다.

다중회귀분석 결과는 표 2에 요약하여 나타냈다. 이러한 관계식은 토질함수값이 단순한 값이 아니라, 보다 복합적인 지질함수값을 내포하고 있음을 보여준다. 이러한 관계식 중에는 Ohtsubo *et al.* (1995)에 의한 Ariake 만의 해양퇴적물에 대한 액성한계의 연구결과와 유사한 것도 있다. 습윤단위중량은 석영이 많아지고 전기전도도의 값이 낮을수록 높은 값을 보여준다. 즉, Wet unit weight (γ_t) = 0.009 × Q (content of quartz) - 0.06 × EC (electronic conductivity) + 1.67의 식이다. 이는 석영 및 장석이 많을수록 단위중량은 높아질 것이며, 점토광물의 양이 많아지면 이에 따라 점토광물표면에 음이온을 띠는 특성으로 인해 전기전도도 값이 높아지기 때문이다. 자연함수비 및 압축지수는 pH와 전기전도도가 높을수록 커진다는 것을 보여준다. 즉, Water

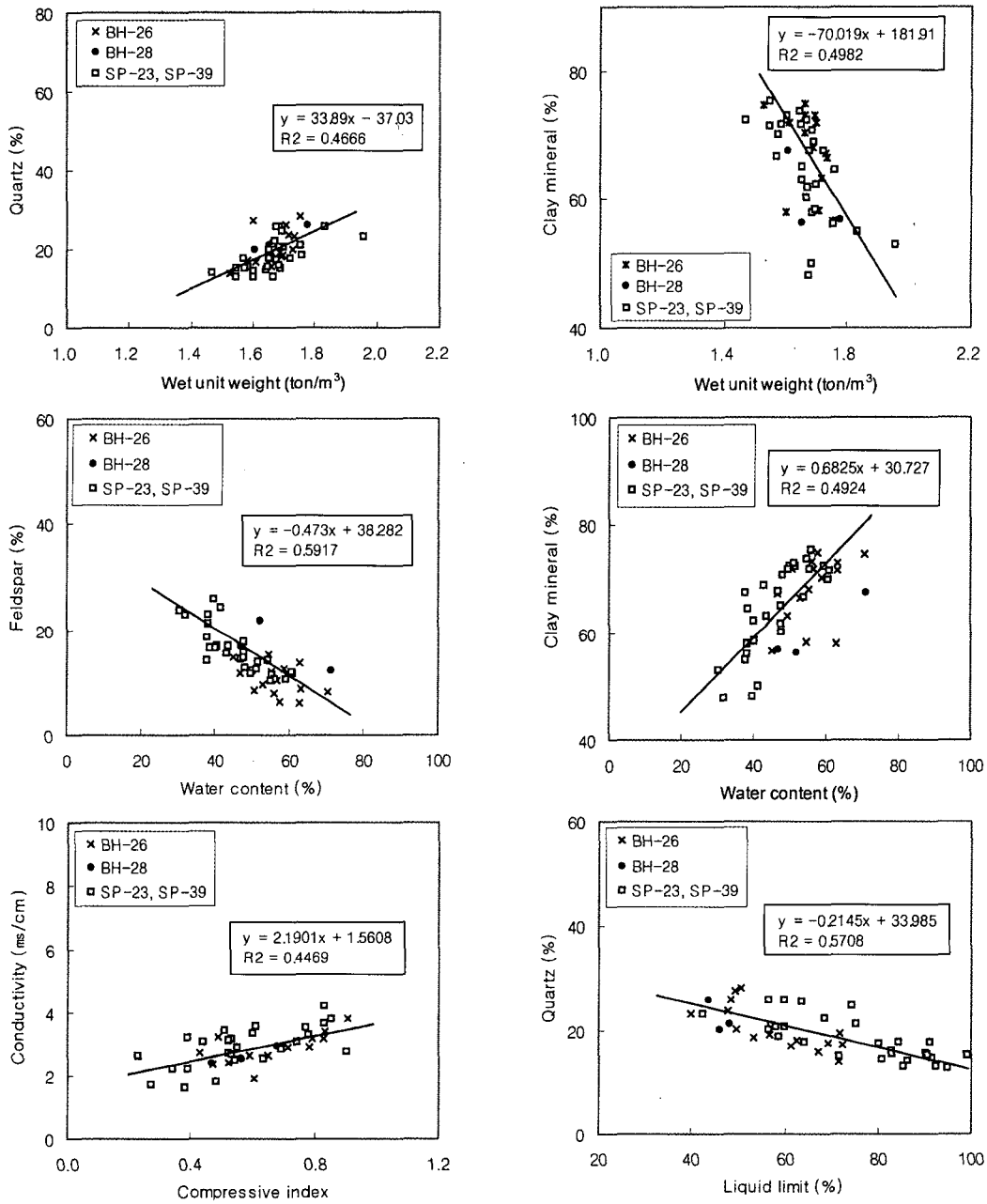

Fig. 8. Diagrams showing correlations between mineral contents and geothechnical properties of clay sediments.

content (W_n) = -0.6 × F (content of feldspar) + 1.1 × *pH* + 0.01 × *EC* (electronic conductivity) + 27.50과, Compressive index (C_c) = 0.03 × pH + EC (electronic conductivity) - 0.2의 식에 서 알 수 있다. 이와 같이 여러 토질정수 값들은 광물성분 및 간극수의 화학성과 비교적 좋은 상관관계를 나타내는 것으로 나타났다.

결 론

낙동강 하구인 녹산공단 지역과 부산 신항만 지역은 두께 약 20~70 m의 두꺼운 점토퇴적물로 지반을 이루고 있다. 이곳의 4개 시추공에서 채취한 점토퇴적물에 대해 광물성분과 공학적 토질물성을 분석하여, 깊이에 따른 변화를 검토하고 그들의 상관관계를 검토하였다.

이 곳 점토퇴적물의 주 구성광물은 석영, 장석, 방해석, 점토광물이며, 점토광물로는 일라이트, 카올린광물, 녹니석(버미큘라이트), 스멕타이트가 나타났다. 대부분의 점토퇴적층은 소성지수, 변형계수, 압밀지수 등이 높은 고소성점토층(CH)에 해당된다. 전체적으로 수직적인 성분 및 물성의 변화는 하부층, 중간층, 상부층으로 구분되는 특징을 나타냈다. 점토광물이 많고 점토질이 풍부한 중간층이 토질 물성으로 특히 연약한 연약지반에 해당하는 것으로 나타났다.

통계적인 상관관계의 분석 결과, 점토퇴적물 속에 함유된 일부 광물성분은 토질물성과 상관관계가 있는 것으로 나타났다. 즉, 석영의 함량은 습윤단위중량과 정의 관계이고, 액성한계와는 부의 상관관계를 보였다. 함수량은 장석의 함량과는 부의 관계이고, 점토광물의 함량과는 정의 관계를 나타냈다. 습윤단위중량은 점토광물의 함량과는 부의 관계를 나타냈다. 그리고 복합적 인자에 의한 상관분석 결과에서 소성지수는 점토광물, 스멕타이트, 점토입도의 함량과 일정의 관계식을 가지는 것으로 나타났다. 이러한 여러 결과들로 보아, 토질 특성은 광물성분, 입도분포특성, 전기전도도 및 pH 등과 복합적인 상관관계를 가지는 것으로 나타났다.

사 사

본 연구는 2004년 과학기술부 자연재해방재기술사업에 의해 수행되었으며, 이에 감사한다.

참 고 문 헌

김길수, 임형덕, 김대규, 이우진 (2001) 양산점토의 비배수 전단강도 특성. 한국지반공학회 논문집, 17(4), 259-267.

류춘길 (2003) 낙동강 하구 일원에 분포하는 홀로세 해성 점토질 퇴적층의 토목지질학적 특성. 부산대학교 박사논문, 230p.

문지원, 문희수, 송윤구, 이규호 (1997) 영종도 미고화 퇴적물의 점토광물 조성 및 기원에 관한 연구. 자원환경지질, 30(6), 531-541.

박수철 (1989) 한국 연근해역 퇴적속도 연구. 한국과학재단, 52p.

박수철 (1993) 한국 남해 진해만 현생퇴적층의 탄성파 특성 및 퇴적작용. 한국과학재단, 46p.

박용안, 조성권, 박수철, 이창복 (1992) 천해저(한국주변)의 광물자원과 심해저(태평양) 광물 자원에 관한 지질학적, 지화학적 및 탄성파 층서 연구. 한국과학재단, 377p.

박정기, 오재경 (1991) 한강하구 및 경기만에서의 점토광물에 대한 연구. 한국해양학회지, 26(4), 313-323.

이선갑, 김성욱, 황진연, 정성교 (2003) 녹산구가공단지역 점토 퇴적물의 광물조성과 토질공학적 특성. 한국지구과학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, 45-50.

이연규, 황진연, 정규귀, 최정민 (1996) 광양만 및 여수해만 퇴적환경 변화 - 퇴적물 특성과 점토광물 분포를 중심으로. Journal of Korea Earth Science Society, 17(5), 407-416.

장지인, 박상규, 이경주 (1993) SAS/PC를 이용한 통계자료분석. 법문사, 96-135.

정성교, 곽정민, 김규종, 백승훈 (2001) 부산점토의 지반공학적 특성. 2001년도 ISSMGE ATC-7 SYMPOSIUM, 27-41.

정 홍 (1987) SAS프로그래밍. 계명대학교출판사, 185-219.

조화룡 (1987) 한국의 충적평야. 교학연구사, 9-14, 31-39, 69-75, 102-105.

Biscaye, P.E. (1965) Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. Geological Society of America, Bulletin, 76, 803-832.

Casagrande, A. (1948) Classification and Indentification of Soils. Transactions, ASCE, 113, 901p.

Chung, F.H. (1974) Quatitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix flushing method for quantitative multicomponent analysis. Journal of Applied Crystallography, 7, 519-525.

Khim, B.K. (1988) Sedimentological study of the muddy deposits in the Yellow Sea. M.S. thesis, Seoul National University, 106p.

Ohtsubo, M., Yoshimura, A., Wada, S., and Young, R.N. (1991) Particle interaction and rheology of illite-iron oxide complex. Clays and Clay Minerals, 39, 347-354.

Ohtsubo, M., Egashira, K., and Kashima, K. (1995) Depositional and post-depositional geochemistry and its correlation with the geotechnical properties

of marine clays in Ariaka Bay. Japan, Geotechnique, 45(3), 509-423.

Park, Y.A. and Khim, B.K. (1990) Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. Continental Shelf Research, 10, 1179-1191.

Windom H.L. (1976) Lithogenous material in marine sediments. Chemical Oceanography, Academic press, 103-135.

2005년 5월 17일 원고접수, 2005년 6월 23일 게재승인.