

준설토의 간극비 변화 관찰을 위한 물리탐사기법의 적용

Application of Geophysical Techniques for Observing the Void Ratio Changes of Dredged Soils

홍 영 호¹ Hong, Young-Ho
이 중 섭² Lee, Jong-Sub
이 창 호³ Lee, Changho

Abstract

It is necessary to understand the behavior of the soils for the dredging constructions. The objective of this study is to estimate void ratio and density changes of the dredged soils by using the geophysical testing methods. A series of laboratory tests is performed to obtain geotechnical index properties of the specimen, retrieved from the west coastal of Korea. The sedimentation and self-weight consolidation tests are carried out with observing changes of the interfacial height and the elastic wave velocities. The same amounts of the soils are poured into the testing column at intervals of 12 hours until the interheight reaches to a certain level. After the completion of the sedimentation and self-weight consolidation tests, downward permeability test is performed to assess a tidal influence in the nearshore. The mini resistance cone is penetrated into the specimen to measure the electrical resistivity with depth. All tests are completely finished, the weight of specimens are measured to calculate the void ratio with the depth. Experimental results show that the aspects of the self-weight consolidation are invisible during dredging process because of rapid sedimentation characteristics of ML. However, the elastic wave velocities increase with increasing in the effective stresses. During permeability test, measured permeability and the elastic wave velocities maintain almost identical values. Void ratio based on the elastic wave velocities changes linearly with time during the step dumpings. Void ratio estimated by the electrical resistivity represents the repeatedly layered depositions according to the step-by-step dumpings. Void ratio determined by soil sampling is similar to those of elastic waves and electrical resistivity profiles. This experimental study demonstrates that the geophysical testing methods may be an effective method for evaluating the behavior of dredged soils.

요 지

해성점토를 활용한 준설매립공사에서는 준설토의 거동분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 침강압밀하는 준설토의 밀도와 간극비 변화를 관찰하기 위해 물리탐사기법을 적용하였다. 서해안에서 채취한 흙에 대한 기본물성시험을 실시하였고, 침강압밀시험기에 시료를 단계적으로 투기하여 시간에 따른 계면고와 탄성파의 변화를 관찰하였다. 흙의 침강압밀이 완료된 후 하방향의 투수시험을 실시하여 조간대의 영향이 준설토의 물리적 특성에 미치는 영향을 관찰하

1 비회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 박사과정 (Ph.D. Student, School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

2 정회원, 고려대학교 건축사회환경공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil, Environmental and Architectural Engrg., Korea Univ.)

3 정회원, 전남대학교 해양토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Department of Marine and Civil Engrg., Chonnam National Univ., Tel: +82-61-659-7322, Fax: +82-61-659-7329, changho@jnu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 3월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

였다. 또한 초소형 전기저항탐침을 관입하여 깊이에 따른 시료의 전기비저항을 측정하였다. 모든 실험이 완료된 후, 시료를 채취하여 간극비를 계산하였다. 실험결과, ML 시료의 특성상 급격한 침강을 보여 침강압밀특성을 육안으로 관찰하기 어려웠으나, 단계투기가 계속될수록 탄성파의 속도는 증가하는 경향을 보였다. 하방향 투수에 따른 조건대 영향은 매우 적어 관찰할 수 없었다. 한편 탄성파 속도로 추정된 시료의 간극비는 단계투기에 따라 선형적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 전기비저항으로부터 계산된 간극비는 깊이에 따라 반복적으로 증가, 감소하는 형태를 나타내었으며 이는 단계투기에 따라 층을 이루고 있는 시료의 영향으로 파악된다. 시료채취, 탄성파 속도, 그리고 전기비저항으로부터 구한 간극비를 비교한 결과, 서로 유사한 관계를 나타내었다. 본 연구는 물리탐사기법이 준설토의 간극비 관찰에 효과적으로 활용될 수 있음을 보여준다.

Keywords : Dredged Soils, Elastic wave, Electrical resistivity, Geophysical testing method, Self-weight consolidation, Void ratio

1. 서론

준설토의 거동은 건설 부지 내 수토용량 적정성 평가 및 투기이후 지반개량, 구조물 축조 등 설계공정 전반에 영향을 끼치므로, 효율적인 준설패립공사를 위해서는 준설토의 정확한 거동예측이 이루어져야 한다. 현재까지 수행된 준설토 거동 예측 및 분석 연구는 이론적 접근과 실험적 접근으로 크게 구분할 수 있다: 1) 이론적 접근은 유효응력을 기초로 한 Terzaghi의 1차원 압밀이론(Terzaghi and Peck, 1943)으로부터 발전되었다. Terzaghi 1차원 압밀이론은 압밀현상의 이론적 계산을 위해 압밀과정동안 투수계수의 불변동, 간극비와 유효응력의 선형적 관계, 그리고 미소변형 등 몇 가지 가정을 기반으로 한다. 그러나 실제 준설토는 압밀이 진행됨에 따라 체적압축지수, 투수계수 및 압밀계수가 변화하여 비선형적인 압밀거동을 보인다(Gibson et al., 1967). 초기 매립상태의 준설토는 고함수비의 액성상태이며, 시간에 따라 흙의 자중에 의해 큰 침하가 발생하게 되어 대변형 압밀을 고려한 비선형 유한변형 압밀이론에 대한 연구(Mikasa, 1963; Gibson et al., 1967; Pane, 1985; Morris, 2002)가 수행되어왔다; 2) 실험적 연구의 경우, 준설토의 침강을 시간에 따라 측정하여 준설토의 거동을 분석하여 압밀이론을 증명하고자 노력하였다(Been and Sills, 1981; Umehara and Zen, 1982; Yano, 1985; Kim and Oh, 1999; Choi et al., 2011). 한편 Stark et al. (2005a, 2005b)은 준설패립지반 수치해석 프로그램(PSDDF, Primary Consolidation Secondary Compression, and Desiccation of Dredged Fill)을 개발하였고, Choi et al.(2011)는 이를 이용하여 Craney Island 인공섬의 사례

를 분석하여 수치해석결과와 실측값을 상호 비교, 분석하였다.

최근에는 탄성파와 전기비저항 등의 비파괴탐사를 이용하여 준설토의 거동을 분석하는 연구, 그리고 이온화, 구조형성 등이 준설토의 강도발현에 미치는 영향 분석 등에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다(McDermott, 1997; Blewett et al., 2001; Klein and Santamarina, 2005; Wang and Dong, 2008). 그러나, 기존의 비파괴탐사를 이용한 실험적 연구에서는 단순 자중압밀 현상을 관찰하고 이론과 비교하는데에 눈점이 집중되었으며, 여러 가지 비파괴탐사 시험의 결과와 공학적 변수의 상관관계 분석 및 설계정수 산정에 관한 연구는 부족하였다.

본 연구에서는 다양한 비파괴탐사를 활용하여 준설토의 침하량과 체적변화를 예측, 모니터링하고 각각의 결과를 비교, 분석하여 그 타당성을 검증하고자 한다. 준설토에 대한 기본물성시험을 수행한 후, 준설토를 단계적으로 투기하여 시간에 따른 탄성파의 변화를 관찰하였다. 또한, 서해안 지역의 조건대 영향을 관찰하기 위해 자중압밀이 끝난 시료에 대하여 투수시험을 실시하였으며, 투수 완료 후에는 콘관입을 실시하여 깊이에 따른 선단 저항력과 전기비저항을 측정하였다. 실험완료 후 깊이별로 시료를 채취하여 간극비를 계산하였으며, 이를 탄성파 속도와 전기비저항으로부터 예측한 간극비값과 비교, 분석하여 그 적용 가능성을 평가하였다.

2. 기본물성시험

시료의 조성비 결정을 위해 인천 송도 지역에서 채취된 원지반토에 대하여 기본물성시험을 실시하였으며,

그 결과는 Table 1 및 Fig. 1과 같다. 함수비(Oven-dry, ASTM D4442)와 염분비(Oven-dry, ASTM D1141)는 각각 35.88%, 3.26%로 나타났다. 비중은 2.68, 그리고 액

성한계(Fall cone, BS 1377)는 7.89%로 측정되었다. 또한, 시료의 체분석 결과(ASTM C136; KSF 2302), 세립 토 비율($d < 74\mu\text{m}$)은 약 65.55%로 측정되었으며, 통일 분류법(USCS)에 의해 ML로 분류되었다.

Table 1. Geotechnical index properties

Items	Value
Water content [%]	35.88
Salinity [%]	3.26
Specific gravity	2.68
Liquid limit [%]	7.89
Void ratio	0.49–1.50
Passing percentage of sieve #200	65.55
USCS	ML

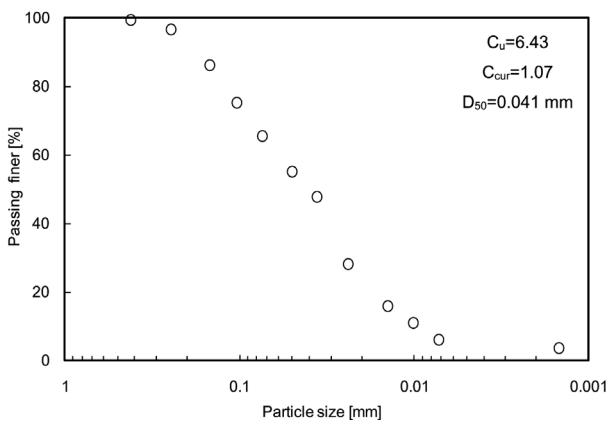


Fig. 1. Grain size distribution

3. 실험 구성

3.1 침강압밀시험

본 연구에서 사용한 침강압밀시험기는 Fig. 2와 같다. 고함수비 시료의 침강에 따른 계면고 관찰을 위하여 투명한 아크릴 재질로 제작하였다. 시료의 단계투기높이를 고려하여 높이 1600mm로 제작하였고, 시험기의 하부 600mm 부분을 100mm 단위로 분리가능하게 제작하여 실험 완료 후 시료 채취를 용이하게 하였으며, 투수 시험시 원활한 수두조절을 위해 상부 셀에 100mm 간격으로 밸브를 설치하였다. 또한 시험기 내경은 150mm로 제작하여 벽면효과의 영향을 최소화하였다(Elder, 1985).

노건조 시료와 증류수, 소금을 교반하여 함수비 1000%의 시료를 조성하였다. 시료의 염분비(3.26%)를 자연시료와 동일하게 조성하여 자중침강압밀에 미치는 염분비의 영향을 제거하였다(Tan et al., 1990; Kondo and Torrance, 2005).

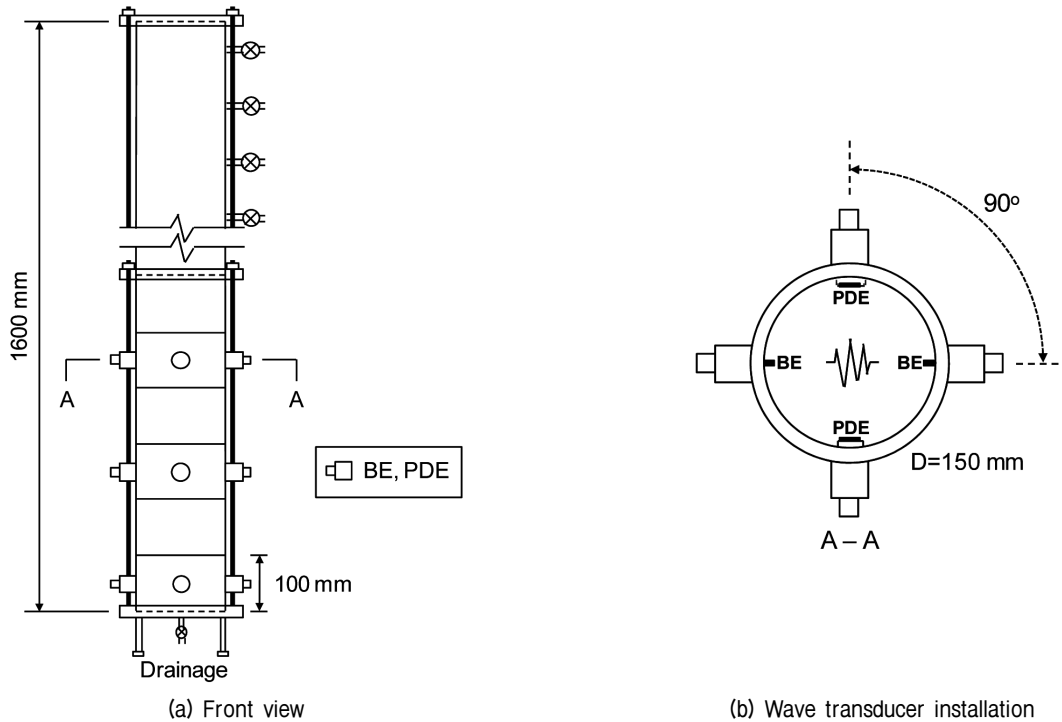


Fig. 2. Schematic drawing of column

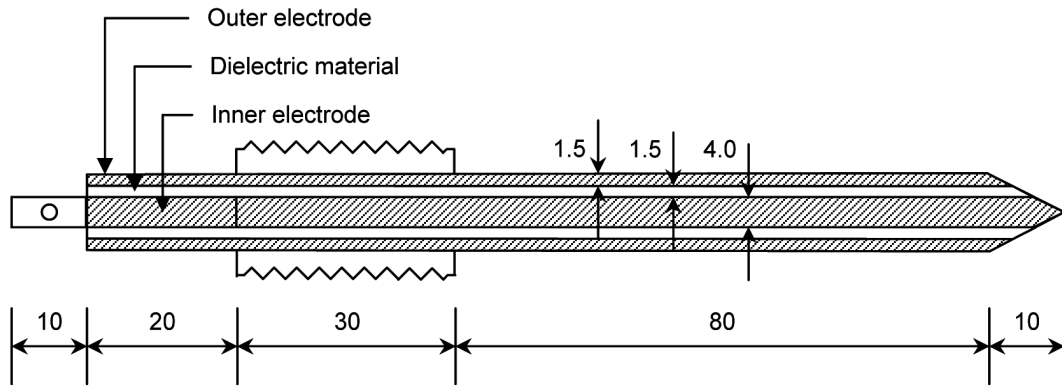


Fig. 3. Schematic drawing of ERCP (modified from Kim et al., 2011). Unit of the numbers is mm

일반적인 현장의 단계적 투기를 고려하여, 본 연구에서는 일정한 시간간격으로 총 8번의 단계투기(투기속도 90cm/0.5day)를 실시하였다. 투기 이후 양면배수조건에서 12시간동안 침강압밀을 허용하고, 12시간 후 계면고 위 150mm까지의 간극수를 제거한 뒤 다시 투기를 진행하는 연속적인 과정을 반복하였다.

3.2 탄성과 측정

깊이에 따른 압축파(종파, P wave)와 전단파(횡파, S wave)의 측정을 위해 피에조 디스크 엘리먼트(Piezo Disk Element, PDE)와 벤더 엘리먼트(Bender Element, BE)를 침강압밀 시험기의 바닥에서부터 각각 50mm, 250mm, 450mm의 높이에 각기 한 쌍씩 서로 마주보게 설치하였다(Fig. 2). 탄성파의 측정 시 셀을 통한 직접파의 영향을 제거하기 위해 감쇄가 큰 실리콘을 셀과 센서의 사이에 충진하였다(Martinez et al., 2013).

신호발생기를 이용하여 탄성파를 발생시켰으며 신호 증폭 및 잡음 제거를 위해 필터-증폭기를 이용하였다. 원 신호에 영향을 주지 않는 범위에서 고주파 통과(500Hz)와 저주파 통과(압축파: 2MHz; 전단파: 50kHz)를 설정하여 잡음제거 필터링을 실시하였다(Lee and Santamarina, 2005). 또한, 불규칙 잡음(random noise)를 제거하기 위해 staking을 실시하였고(1024 signals), 신호가 충분히 안정된 후 오실로스코프에 표시된 입·출력 신호의 분석을 위하여 저장하였다.

3.3 전기저항 탐침 관입시험

투수시험을 실시한 후 전기저항 탐침을 관입하여 깊이에 따른 시료의 전기비저항을 측정하였다. 일반적인

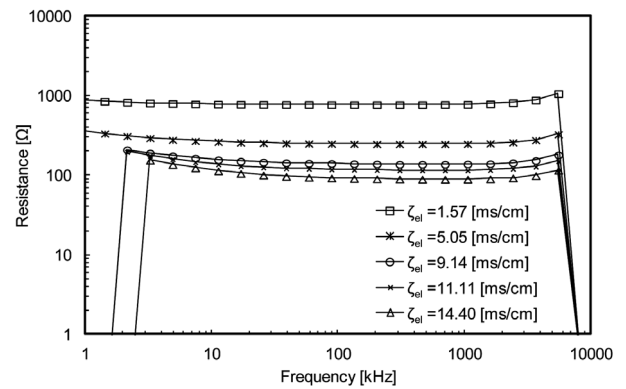


Fig. 4. Frequency sweeping result of ERCP (HP 4192A low frequency impedance analyzer: input signal =1.0 V, 20°C. ζ_{el} denotes the electrical conductivity of electrolyte)

로 관입시험은 깊이에 따라 연속적이면서도 높은 해상도의 지반 특성을 측정할 수 있으나 관입으로 인한 주변 지반이 교란될 수도 있다(Lee et al., 2009). 따라서, 본 연구에서는 관입에 따른 주변 지반의 교란을 최소화 할 수 있도록 10mm 직경의 소형 전기저항 탐침(Kim et al., 2011)를 사용하였다(Fig. 3). 관입 시 비배수 상태를 유지하기 위하여 탐침의 단면적과 관입속도의 영향을 고려하여, 1mm/sec의 속도로 콘을 관입하였다(Titi et al., 2000; Bembem and Myers, 1974).

임피던스 애널라이저(HP-4192A)를 이용하여 전해질 용액에서 전기저항 탐침의 작동주파수를 조사하였다. 입력파형은 1V의 단일정현파를 이용하였다. Fig. 4는 다양한 전기전도도를 가지는 전해질 용액에서 얻은 전기저항 탐침의 저항 스펙트럼을 보여준다. 측정된 저항은 전해질 용액의 전기전도도에 관계없이 50kHz~2000kHz에서 안정적인 값을 보여, 100kHz를 입력주파수로 결정하였다.

재료의 비저항 (ρ)는 탐침의 기하학적 형상과 재질에

따라 탐침에서 측정되는 저항 (R)과 다음 식 (1)과 같은 관계를 보인다.

$$R = \alpha \cdot \rho \quad (1)$$

입력주파수의 선택 후 LCR meter(INTEC LCR-819)를 이용하여 전기저항탐침의 저항과 비저항의 관계를 Fig. 5와 같이 구하였다. 본 연구에 사용된 전기저항탐침의 α 는 1675.4m^{-1} 의 값을 보였다.

4. 실험결과

4.1 단계투기시 계면고 및 탄성과 속도 변화

준설토는 투기 후 즉시 침강하는 것이 아니라 시간에

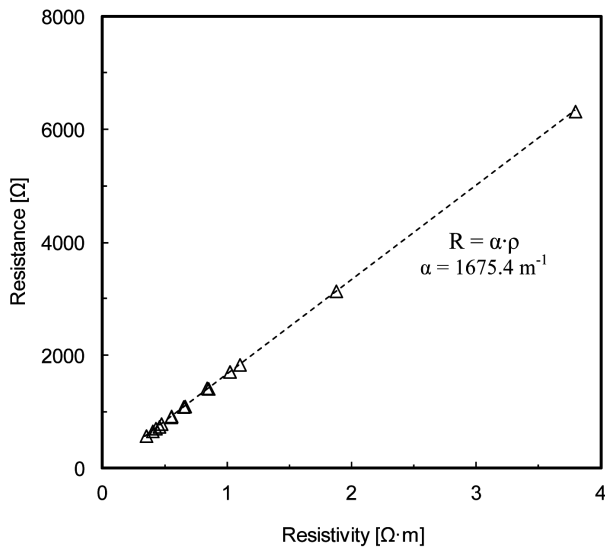


Fig. 5. Relationship between the resistivity and resistance (INTEC LCR-819, input=1.0 V, frequency=100 kHz)

따라 확산되어 침강, 퇴적되기 시작한다. 침강단계와 자중압밀과정에 대한 연구는 준설토 매립 부지의 최종 계획고를 얻기 위한 초기 준설토매립량과 토체의 높이를 결정하고 자중압밀에 소요되는 시간을 예측하기 위해 중요하다(Been and Sills, 1981). 고풍수비의 준설토는 투기 후에 침강단계를 지나 압밀단계로 진행되며, 일반적으로 침강속도의 변화를 침강압밀곡선으로부터 간접적으로 판단한다(McRoberts and Nixon, 1976; Imai, 1981).

Fig. 6은 단계투기시 시간에 따른 계면고를 보여준다. 단계투기마다 약 6cm의 계면고 증가를 보였으며 총 8회의 단계투기 후 49.0cm의 최종 계면고를 나타냈다. 단계투기 및 시간에 따른 최종 계면고의 상승은 멱함수의 형태로 다음 식 (2)과 같이 나타났다.

$$H = 0.0033 \cdot t^{1.11} \quad (2)$$

여기서, H는 최종계면고 [cm], t는 시간 [min]이다.

ML 시료의 특성상 투기 이후 급격한 침강을 보였으며, 침강압밀곡선으로부터 단계별로 산정한 시료의 압밀계수는 Fig. 7과 같다. 압밀계수는 투기 초기에는 투기에 따라 증가하는 경향을 보이나 4번째 투기 이후 약간의 변화를 보이나 일정한 값으로 수렴하는 경향을 보인다. 4단계 투기 이후 평균 압밀계수는 $11.38\text{cm}^2/\text{min}$ 으로 계산되었다.

단계투기과정에서 압축과와 전단파를 측정하여 센서 간격과 탄성과 초동으로부터 탄성과 속도를 계산하여 (Lee and Santamarina, 2005), 그 결과를 측정 센서의 위치별로 Fig. 8에 나타내었다. 단계투기에 따라 압축과 속도는 약 1400m/s에서 약 1450m/s로 서서히 증가하였으며 최종 투기 후 측정된 압축과 속도는 1450m/s로 순수한 물의 압축과 속도 1480m/s에 가깝게 측정되었다

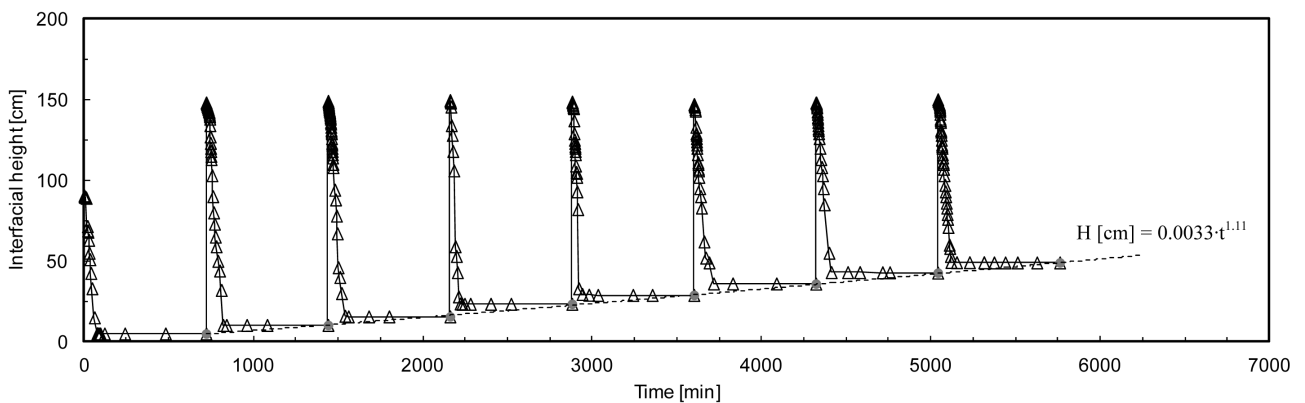


Fig. 6. Clear water interfacial height with time

(Lide, 2007). 전단파 속도의 경우, 단계투기에 따른 계면고의 상승과 센서 설치위치에 따라 50mm에 설치된 센서는 두 번째 단계투기 이후, 250mm 및 450mm에 설치된 센서는 각각 6번째 및 8번째 투기 이후 전단파 속도를 감지하였다. 단계투기에 따라 센서의 위치에 상관없이 전단파 속도는 유효응력의 증가로 점차 증가하는 현상을 보였다. 각 투기단계시 12시간의 침강에 의해 입

자구조의 형성 및 압밀로 전단파 속도는 시간에 따라 증가하는 경향을 보였다. 또한 매 회 단계투기 시 단계투기 최종 계면고에서 약 150mm의 유효수심을 두었으나 투기에 따른 상부시료의 교란으로 투기 직후 압축파 및 전단파 속도가 감소되었다가 다시 증가하는 현상을 나타내었다. 50mm에서 측정된 탄성과 속도는 6단계 이후는 최종 계면고의 상승으로 인해 센서 위치에서의 평균 유효응력의 변화가 적어짐에 따라 탄성과 속도의 초기 감소가 관찰되지 않았다.

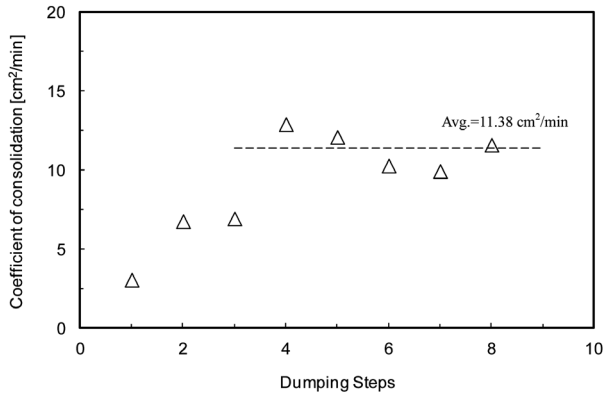
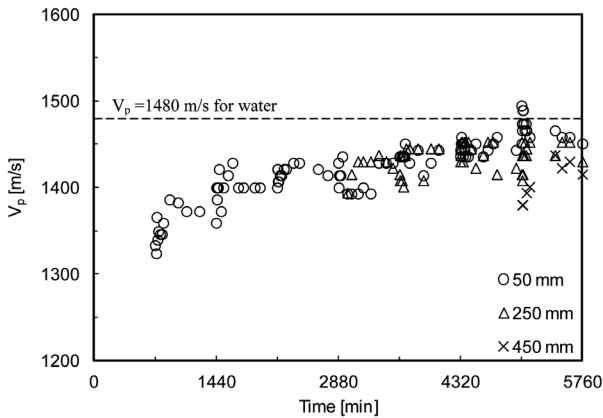
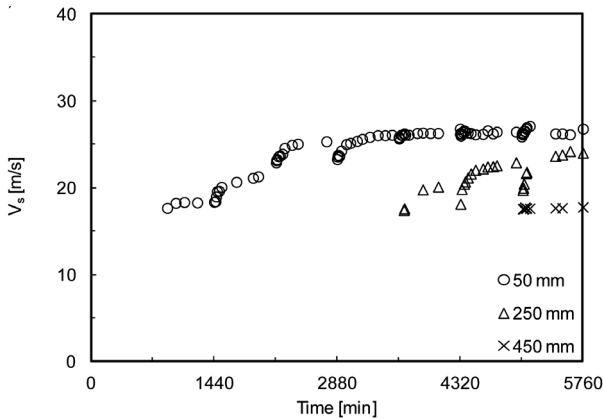


Fig. 7. Coefficient of consolidation with the dumping steps



(a) Compressional wave velocity, V_p

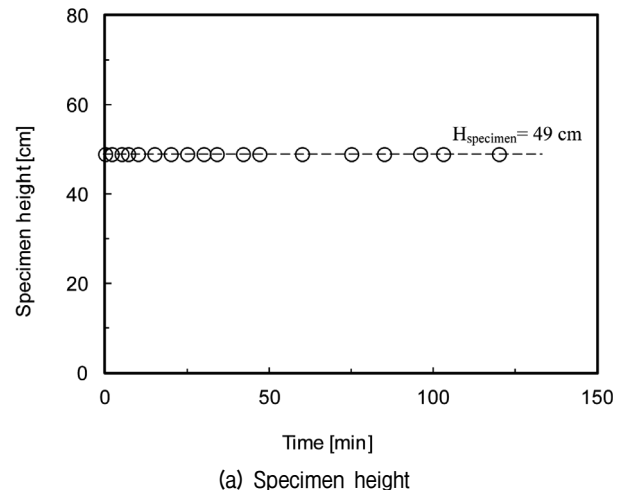


(b) Shear wave velocity, V_s

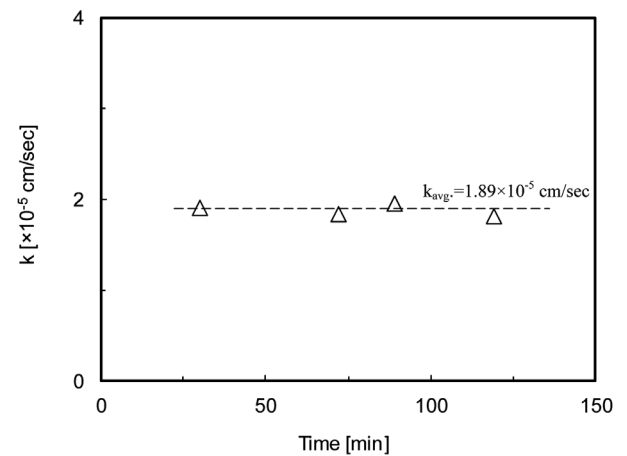
Fig. 8. Elastic wave velocity during sedimentation process

4.2 투기 완료 후 침투실험

시료를 채취한 서해안은 지역적 특성에 의해 약 9m의 조수간만 차가 발생하여, 현장 조건대 구간의 준설토의 경우 매일 상방향 및 하방향 침투에 따른 영향을 반복적으로 받는다. 따라서 조건대 영향의 관찰을 위해 단계투기한 시료의 자중압밀이 완료된 시점에 1m의 정수



(a) Specimen height



(b) Permeability coefficient, k

Fig. 9. Seepage test results

두를 유지하면서 하방향 투수시험을 실시하였다(Imai, 1979). 하방향 투수 시 시간에 따른 시료높이의 변화를 관찰하였고 유출량으로부터 투수계수를 산정하여 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 하방향 투수에 의하여 시료 높이는 Fig. 9(a)와 같이 단계투기 후 최종 계면고 49.0cm에서 변화가 없었으며, 투수계수 역시 약간의 변동을 보이지만, 약 $1.89 \times 10^{-5} \text{cm/sec}$ 로 거의 일정한 값을 보였다(Fig. 9(b)). 하방향 투수 시 시간에 따른 탄성파의 속도는 약간의 변화를 보였으나, Fig. 8의 단계 투기 후 최종 탄성파 속도와 거의 일정한 값을 나타내었다.

4.3 간극비

최근 탄성파를 이용하여 지반의 거동을 분석하는 연구가 활발히 수행되고 있다(McDermott, 1997; Klein and Simon, 2006; Wang and Dong, 2008; Yoon and Lee 2010). 특히 Yoon and Lee(2010)은 포화된 지반에서 탄성파 속도를 이용하여 아래의 식 (3)과 같이 간극률을 산정하였다.

$$n = \frac{B_g^2 B_f - B_{sk} B_f B_g - B_f B_g B_{mix} + B_{sk} B_f B_{mix}}{B_g^2 B_{mix} - B_f B_g B_{mix} - B_{sk} B_g^2 + B_f B_g B_{sk}} \quad (3)$$

여기서 n 은 흙의 간극률, B_g , B_f , B_{sk} 는 각각 흙 입자, 간극수, 흙 구조의 체적탄성계수를 나타낸다. 본 연구에서는 Yoon and Lee(2010)의 연구결과에 따라 B_g 는 $20 \times 10^7 \text{kPa}$, B_{sk} 는 $7.778 \times 10^7 \text{kPa}$, B_f 는 $2.18 \times 10^9 \text{kPa}$ 로 가정하였다. B_{mix} 는 흙의 밀도와 탄성파 속도로부터 아래의 식 (4)와 같이 결정된다.

$$B_{mix} = \rho \left[(V_{P-mix})^2 - \frac{4}{3} (V_{S-mix})^2 \right] \quad (4)$$

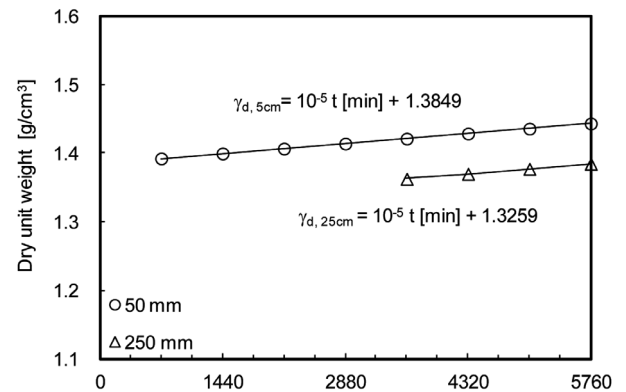
여기서, V_p , V_s 는 압축파, 전단파 속도를 나타낸다. 위 식 (3)은 Biot(1956)의 선형 poroelasticity 이론을 토대로 유도 되었으며, 입자 사이에 존재하는 간극수의 소산 영향을 최소화하기 위하여 저주파수 영역으로 가정하였다(Miura et al., 2001).

또한, 전기비저항 콘 프로브로부터 간극비를 산정하기 위해 아래의 식 (5)을 이용하였다(Archie, 1942).

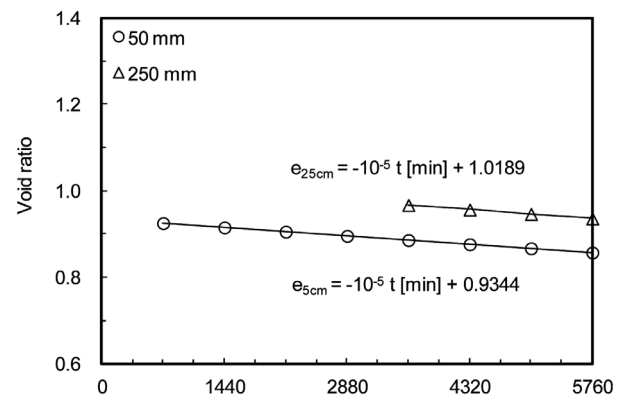
$$F = \rho_b / \rho_f = a \cdot n^{-m} \quad (5)$$

여기서, F 는 흙의 비저항과 간극수의 비저항간의 관계를 나타내는 변수이며, ρ_b 와 ρ_f 는 각각 흙과 간극수의 전기비저항을 나타내며, n 은 흙의 간극률을 나타내며, a 와 m 은 흙에 따라 주어지는 상수로써 a 값은 비압밀 지반의 경우 1에 가까운 값을 갖고, m 값은 모래에서 약 1.5, 점토에서 1.8에서 3, 불균질한 침전물에서 1.5에서 2.3사이의 값을 갖는다(Jackson et al., 1978; Salem and Chilingarian, 1999). 본 논문에서는 a 와 m 을 각각 1과 1.5로 가정하였다. 측정된 간극수와 흙의 전기비저항을 식 (5)에 대입하여 간극률을 산정하였으며, 간극률과 간극비의 관계를 이용하여 간극비를 계산하였다.

단계투기에 따른 건조단위중량 (γ_d)과 식 (3), (4)를 이용하여 탄성파 속도로부터 추정된 간극비의 변화를 Fig. 10에 도시하였다. 시료하부로 갈수록 큰 밀도와 작은 간극비를 보였으며, 단계투기동안 준설토의 밀도는 시간에 따라 증가하고 흙의 간극비는 감소하는 경향을



(a) Dry unit weight



(b) Void ratio

Fig. 10. Density changes with depth obtained by elastic waves during sedimentation process

나타내었다. 시간에 따른 밀도 및 간극비가 선형거동을 보이는데, 이는 각 단계투기마다 일정한 양의 준설토가 투기되며 즉, 각 단계투기별로 거의 일정한 크기의 유효응력의 증가가 이루어지는 것으로 판단된다.

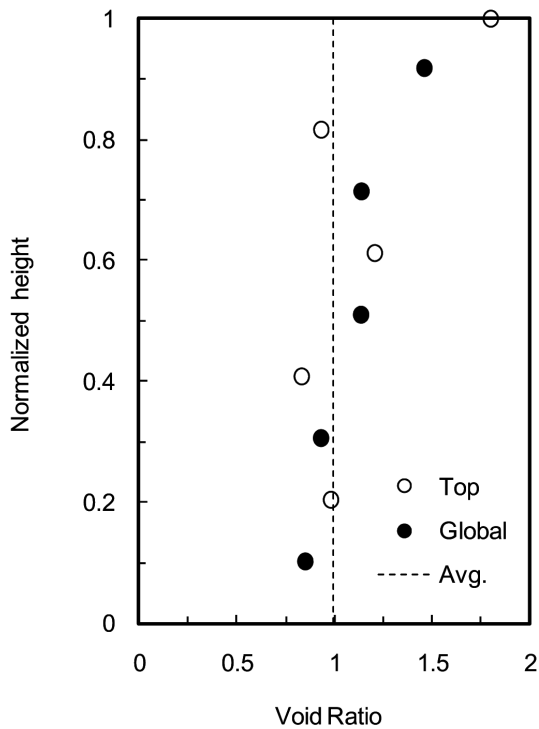
모든 실험이 완료된 후 깊이별로 시료를 채취하여 건조시킴으로써 간극비를 계산하였다. 시료채취를 통한 간극비는 두 가지 방법으로 이루어졌다. 먼저 시료표면 채취법(Znidarcic, 1999)을 통해 각 층의 최상부에서 즉, 특정 깊이에서의 간극비를 구했고, 깊이별 100mm 간격으로 총 5개층으로 나누어 절취하여 각 층의 대표 간극비값을 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 11(a)에 도시하였다. 시료표면 채취법으로 구한 간극비(Top)는 국지적인 값으로 불연속적으로 조성된 시료의 영향으로 약간의 분산을 보였으나, 분리 가능한 두께 100mm의 셀 내부에 있는 모든 시료의 양으로 계산한 간극비(Global)는 두께 100mm를 대표하는 값으로 깊이에 따라 꾸준히 감소하는 것으로 나타났다. 세 가지 방법으로 구한 간극비 간의 상호 비교를 위해 하나의 그래프로 나타내었다 (Fig. 11(b)). 전기비저항으로 구한 간극비의 경우는 깊이에 따라 연속적인 결과값을 보여주며 단계투기로 인한 시료의 분리현상 역시 관찰할 수 있었다. 탄성과 속

도로부터 산정된 간극비는 측정수가 3개로 적으나 전기비저항 결과로 계산한 간극비와 깊이별로 비교적 일치하였다. 그러나, 시료 채취법의 경우, 시료 채취 시 간극수의 급격한 배수로 인해 약간의 시료 손실이 발생하여, 탄성과 및 전기비저항 결과를 바탕으로 계산한 간극비와 다소 차이를 보이며, 두 방법과 비교하여 간극비를 과대 평가하였다.

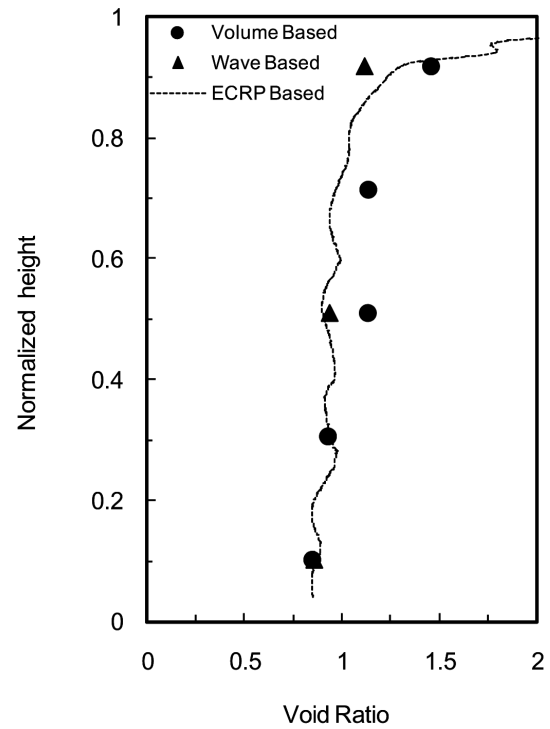
5. 요약 및 결론

본 연구에서는 서해안 지역에서 획득한 시료를 사용하여 일련의 침강압밀실험을 수행하여 계면고와 탄성과 속도 변화를 관찰하였다. 침강압밀을 완료한 시료에 대해 투수실험 및 전기저항 탐침 관입실험을 실시하였으며, 모든 실험이 완료된 후 시료채취를 통해 깊이에 따른 간극비를 산정하였다.

- (1) 단계투기시 ML 시료의 입자 특성상 투기 이후 급격한 침강을 보였으며, 압축과와 전단파 속도는 투기에 따른 유효응력의 증가로 인해 시간에 따라 점점



(a) Calculated by water content



(b) Void ratio comparison obtained by volume-based, elastic wave-based, and electrical resistivity-based methods

Fig. 11. Estimated void ratio

증가하는 경향을 나타내었다.

- (2) 침강압밀완료 후 조간대 영향에 따른 준설토의 거동변화를 관찰하기 위하여 하방향 투수실험을 실시하였다. 투수에 따른 시료높이 및 투수계수의 시간에 따른 변화는 관찰되지 않았으며, 탄성과 속도 역시 큰 변화를 보이지 않았다.
- (3) 단계투기 시 시간에 따른 탄성과 속도로 계산된 준설토의 밀도 및 간극비는 선형적 변화를 보였다.
- (4) 시료채취, 탄성과, 그리고 전기비저항 결과로부터 계산된 간극비는 서로 유사한 결과를 나타내었다. 이는 물리탐사기법이 준설토의 간극비 관찰에 유용한 방법이 될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의연구비지원(14RDRP-B076574-01-000000) 및 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2011-0018110)을 밝히며, 이에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Archie, G. E. (1942), "The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, Vol.146, No.1, pp.54-62.
2. Been, K. and Sills, G. C. (1981), "Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study", *Geotechnique*, Vol.31, No.4, pp.519-535.
3. Bembem, S. M. and Myers, H. J. (1974), "The influence of rate of penetration on static cone resistance in connecticut river valley varved clay", *Proceedings of the European Symposium on Penetration Testing, Stockholm*, Vol.2, No.2, pp.33-34.
4. Biot, M. (1956), "Theory of propagation of elastic waves in fluid-saturated porous solid. I. low frequency range", *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.28, No.2, pp.168-178.
5. Blewett, J., McCarter, W. J., Chrisp, T. M., and Starrs, G. (2001), "Monitoring sedimentation of a clay slurry", *Geotechnique*, Vol.51, No.8, pp.723-728.
6. Choi, H. S., Kwak, T. H., Lee, C. H., Lee, D. S., and Stark, T. D. (2011), "Analysis method for non-linear finite strain consolidation for soft dredged soil deposit Part II: analysis method and crane island case study", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol. 27, No.11, pp.5-15.
7. Elder, D. McG. (1985), "Stress-strain and strength behaviour of very soft soil sediment", Ph.D. Thesis, Oxford University.
8. Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L. (1967), "The theory of one-dimensional consolidation of saturated clay I: finite non-linear consolidation of thin homogeneous layers", *Geotechnique*, Vol.17, No.3, pp.261-273.
9. Imai, G. (1979), "Development of a new consolidation test procedure using seepage force", *Journal of soil and foundation*, Vol.19, No.3, pp.45-60.
10. Imai, G. (1981), "Experimental studies on sedimentation mechanism and sediment formation of clay materials", *Journal of Soil and Foundation*, Vol.21, No.1, pp.7-20.
11. Jackson, P. D., Smith, D. T., and Stanford, P. N. (1978), "Resistivity-porosity-particle shape relationships for marine sands", *Geophysics*, Vol.43, No.6, pp.1250-1268.
12. Kim, H. J. and Oh, G. Y. (1999), "A study on the self-weight consolidation procedure of very soft ground reclaimed by dredging clayey soil", *Journal of Korean Geotechnical Society*, Vol.15, No. 2, pp.129-138.
13. Kim, J. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2011), "Void ratio estimation of soft soils using electrical resistivity cone probe", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.137, No.1, pp.86-93.
14. Klein, K. and Santamarina, J. C. (2005), "Soft sediments: wave-based characterization", *International journal of geomechanics*, Vol. 5, No.2, pp.147-157.
15. Klein, K. and Simon, D. (2006), "Effect of specimen composition on the strength development in cemented paste backfill", *Canadian geotechnical journal*, Vol.43, No.3, pp.310-324.
16. Kondo, F. and Torrance, J. K. (2005), "Effects of smectite, salinity and water content on sedimentation and self-weight consolidation of thoroughly disturbed soft marine clay", *Paddy and Water Environment*, Vol.3, No.3, pp.155-164.
17. Lide, D. R. (2007), "CRC handbook of chemistry and physics", 88th edn, 2007-2008", CRC press, Talyor and Francis.
18. Lee, J. S. and Santamarina, J. C. (2005), "Bender elements: performance and signal interpretation", *Journal of Geotechnical and geoenvironmental engineering*, Vol.131, No.9, pp.1063-1070.
19. Lee, W. J., Shin, D. H., Yoon, H. K., and Lee, J. S. (2009), "Micro-cone penetrometer for more concise subsurface layer detection", *Geotechnical Testing Journal*, Vol.32, No.4, pp.358-364.
20. Martinez, B. C., DeJong, J. T., Ginn, T. R., Montoya, B. M., Barkouki, T. H., Hunt, C., Tanyu, B., and Major, D. (2013), "Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.139, No.4, pp.587-598.
21. McDermott, I. R. (1997), "The use of shear wave transmission as a non-destructive tool to assess soft soil stiffness in dredging applications", *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications*, Vol.12, No.1, pp.347-353.
22. McRoberts, E. C. and Nixon, J. F. (1976), "A theory of soil sedimentation", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.13, No.3, pp. 294-310.
23. Mikasa, M. (1963), "The consolidation of soft clay-a new consolidation theory and its application", *Tokyo Kajima Shupan-kai*, pp.56-86.
24. Miura, K., Yoshida, N., and Kim, Y. S. (2001), "Frequency dependent property of waves in saturated soil", *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.1-19.
25. Morris, P. H. (2002), "Analytical solutions of linear finite-strain one-dimensional consolidation", *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, ASCE*, Vol.128, No.4, pp.319-326.

26. Pane, V. (1985), "Sedimentation and consolidation of clays", Ph.D. Thesis, boulder, University of Colorado.
27. Salem, H. S. and Chilingarian, G. V. (1999), "The cementation factor of Archie's equation for shaly sandstone reservoirs", *Journal of Petroleum Science and Engineering*, Vol.23, No.2, pp.83-93.
28. Stark, T. D., Choi, H., and Schroeder, P. R. (2005a), "Settlement of dredged and contaminated material placement areas, I: theory and use of primary consolidation, secondary compression, and desiccation of dredged fill", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.43-51.
29. Stark, T. D., Choi, H., and Schroeder, P. R. (2005b), "Settlement of dredged and contaminated material placement areas, II: primary consolidation, secondary compression, and desiccation of dredged fill input parameters", *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering*, ASCE, Vol.131, No.2, pp.52-61.
30. Tan, T. S., Yong, K. Y., Leong, E. C., and Lee, S. L. (1990), "Behavior of clay slurry", *Soils and Foundations*, Vol.30, No.4, pp.105-118.
31. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1943), "Soil mechanics in engineering practices", John Wiley and Sons, New York.
32. Titi, H. H., Mohammad, L. N., and Tumay, M.T. (2000), "Miniature cone penetration tests in soft and stiff clays", *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.23, No.4, pp.432-443.
33. Umehara, Y. and Zen, K. (1982), "Consolidation characteristics of dredged marine bottom sediments with high water contents", *Journal of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.22, No.2, pp.40-54.
34. Wang, Y. H. and Dong, X. (2008), "Complementary wave-based characterizations of sedimentation processes", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol.134, No.1, pp.47-56.
35. Yano, K. (1985), "Properties of very soft ground reclaimed by dredged marine clay and their prediction", *Journal of Japan Society of Civil Engineering*, Vol.364, No.III-4, pp.1-4.
36. Yoon, H. K. and Lee, J. S. (2010), "Field velocity resistivity probe for estimation stiffness and void ratio", *Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.30, No.12, pp.1540-1549.
37. Znidarcic, D. (1999), "Predicting the behavior of disposed dredging soils", *Geotechnical Engineering for Transportation Infrastructure, Proceedings of the 12th European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Vol.2, pp.877-886.

Received : May 7th, 2014

Revised : July 10th, 2014

Accepted : July 18th, 2014