한국지반공학회논문집 제22권 12호 2006년 12월 pp. 5 ~ 14

분리퇴적특성을 고려한 조립준설토의 자중압밀 침하량 평가

Estimate on the Self-Weight Consolidation of Dredging Coarse Soil with Segregating Sedimentation Properties

김 형 주[1] Kim, Hyeong-Joo　　이 민 선[2] Lee, Min-Sun
백 필 순[3] Paek, Pil-Soon　　전 혜 선[4] Jeon, Hye-Sun

Abstract

In general, the dredged ground was composed of a big difference of sediment shape through segregating sedimentary of finer soil in case of reclaiming by dredged coarse soils. Therefore, this study was performed to evaluate the change of settling velocity of flow, and the density of sedimentary which is based on settling tests and self-weight consolidation tests, and consolidation test by seepage force according to the percentage of coarse of Kunsan dredge soils. The Yano's method has been applied to estimate the settlement of self-weight consolidation in finer soils at design but it only considers pouring water content and elevation of interface, therefore the other method needs to be introduced for the exact prediction of the settlement of coarse soil in which the segregation sedimentation is occurring. In this study, the settlement of self-weight consolidation was calculated by the change of the density of segregating sedimentary of coarse and finer soils which was analyzed by Yano's method to extend a serious of researches. The self-weight consolidation by Yano's method will not reflect the segregated settling in dredging coarse soil under 40% of #200 passing percentage. As a result, the evaluation technique of settlement of self-weight consolidation considering a change of the density of segregating sedimentary is suggested as a reasonable method that considers the sediment shape of coarse soil.

요 지

일반적으로 조립준설토에 의해 매립되는 경우 매립지반은 세립토의 분리퇴적침강에 의해 퇴적성상이 크게 다르게 형성되고 있다. 본 연구는 군산 준설토에 대한 침강 및 자중압밀, 침투압밀시험 등을 실시하여 조립토 함유율에 따른 침강속도 변화와 배수속도, 퇴적층의 밀도 등이 평가되었다. 세립토의 자중압밀 침하량 예측에 적용되는 Yano방법은 투입함수비와 계면고 관계만을 고려하여 침하량을 구하고 있다. 그러므로 조립토의 분리퇴적에 의한 침하량을 정확하게 평가할 수 있는 다른 방법이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 조립토와 세립토의 분리퇴적 밀도 변화율에 의해 현장의 자중압밀침하량을 산정하였고 일련의 연구를 확장하기 위해 Yano방법에 의해 분석되었다. Yano방법에 의한 자중압밀침하량은 200번체 통과율 40%이하의 조립 준설토에서 분리퇴적 침강 영향을 반영할 수가 없었다. 따라서 조립토의 분리퇴적 밀도 변화율에 의해 자중압밀침하량을 평가하는 합리적인 방법이 제안되었다.

Keywords : Dredged ground, Dredging coarse soil, Settlement by self-weight consolidation, Density of segregating sedimentary

1 정회원, 군산대학교 토목환경공학부 교수 (Member, Prof., School. of Civil & Environmental Engrg., Kunsan National Univ., kimhj@kunsan.ac.kr, 교신저자)
2 정회원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kunsan National Univ.)
3 정회원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kunsan National Univ.)
4 정회원, 군산대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kunsan National Univ.)
* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서 론

국내의 해안매립은 항만 및 공장용지의 확보를 위해 해저 펌프준설과 선박의 입출항을 위한 정온지역의 박지준설에 의해 준설토를 활용하고 있다. 더 나아가 육상에서 토취장의 확보여건이 점점 어려워지면서 압밀 재하 성토재를 양질의 해저 조립준설토에 의해 대처하려는 노력이 진행되고 있다. 이러한 준설매립이 지속적으로 이루어지면서 해안 매립과 준설 지역도 점점 해상으로 확장되고 준설과 매립수심도 크게 증가되고 있는 실정이다. 따라서 준설구역은 조수간만과 유역변화, 해저수심의 변화에 의한 유속 등이 준설구역 주변의 토사의 퇴적형상 및 퇴적이력을 변화시켜 해저 준설토는 입경이 큰 미고결 조립 실트층과 세립실트가 혼재되어 비소성 상태로 퇴적층을 구성하고 있다(Been 등, 1981; 矢野 등, 1985).

현재 준설매립에 대한 연구와 시험기술은 소성지수가 큰 고소성 준설점토를 대상으로 침강 및 압밀특성에 의해 체적변화량를 예측하고, 주로 Imai(1984)와 矢野(이하 Yano표기)등(1985)의 연구결과를 적용하고 있다. 더 나아가 준설점성토의 연속투입까지 확장하여 침강특성, 자중압밀침하량과 압밀시간, 퇴적고 등의 변화 등을 시험에 의해 예측하는 연구가 이루어지고 있고 설계시에 널리 활용되고 있다(김형주 등, 2003; 유남재 등, 1998; 이송 등, 2002).

준설매립환경의 변화에 따라 조립토가 세립토보다 많은 비율로 혼합된 조립 준설토는 조립토 함유량 및 수두변화에 따라 침강특성이 크게 다르다. 그러므로 조립토의 분리퇴적에 의한 매립지반 성상예측을 통한 체적변화, 침전지의 규모, 양질의 재하토를 분리할 수 있는 준설매립기술이 필요하다. 따라서 본 연구는 군산 신항만 준설구역이 위치에 따라 200번체 통과량이 20%에서 90%까지 폭넓게 분포되고 있어 합리적인 매립용량 설계를 위해 조립토 함유량에 따른 일련의 침강 및 압밀, 밀도시험 등을 실시하였다. 시험결과를 이용하여 준설토의 분리퇴적특성을 고려한 일차원 체적변화 예측기술을 제안하였다.

2. 세립 준설토의 체적변화 특성

그림 1은 Yano등(1984)이 제시한 계면고와 실질토량관계를 투입함수비에 따라 자중압밀 개시시간(t_0)과 완료시간(t_{100})으로 제시한 것이다. 그림에서 투입함수비에 관계없이 계면고가 증가되고 있는 것은 함수비 변화에 따른 floc형성시간 보다 입자배열 영향이 계면고에 변화에 크게 영향을 미치기 때문이다. 투입과 동시에 자중압밀이 하부에서 진행되는 것을 가정하여 자중 압밀개시시간 t'_0와 계면고 H'_{t0}를 실질 토량고 Hs=1에 의해 보정하였다. 그림 1의 구배계수 C_k=1의 H'_{t0} 좌표 및 계면고 H에 의해 자중압밀 개시시간(t_0)의 계면고 H_{t0}, 자중압밀 완료시간(t_{100})에서의 계면고를 H_{t100}으로 정의한다. 따라서 입자의 자중에 의한 계면 침강시 일차원 체적변화량(수축침하량)은 $S_s=H_{t0}-H_{t100}$에 의해 구할 수 있다.

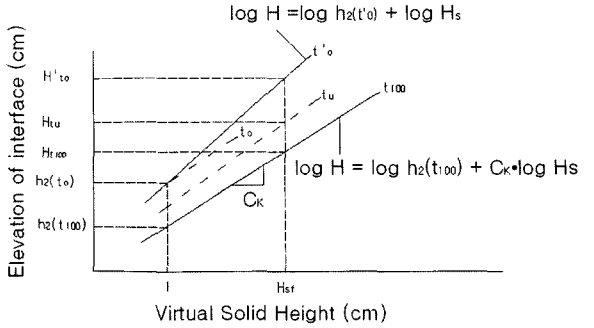

그림 1. 침강시간-계면고-실질토량관계(Yano 등, 1984)

표 1. 준설토의 물리적 성질

준설매립 함 수 비 (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	비중	200번체 통과율 (%)	USCS	비고
600~1200	19.4	NP	2.670	20	SM	입도 조정
			2.670	40		
	19.8	NP	2.650	88	ML	

3. 조립 준설토의 침강 시험 및 고찰

3.1 준설토의 물리적 성질

본 연구에서 이용된 준설토의 물리 및 시험재료 특성을 표 1 및 그림 2에 각각 표시하였다. 군산 신항만 준설토는 200번체 통과량이 과거 준설영향 및 퇴적성상 변화에 의해 90% 이상에서 최근 20% 이하까지 감소되면서 입경이 큰 입자의 퇴적이 지역에 따라 증가되고 있다. 본 연구에서 시험된 침강시험의 재료는 군산 신항만 지역의 준설토를 인위적으로 중량배합에 의해 200번체 통과량이 20%, 40% 제작시료와 준설현장에서 채취된 88%시료를 이용하였다(김형주 등, 2003). 각각의 시험재료의 입도분포는 그림 2와 같다.

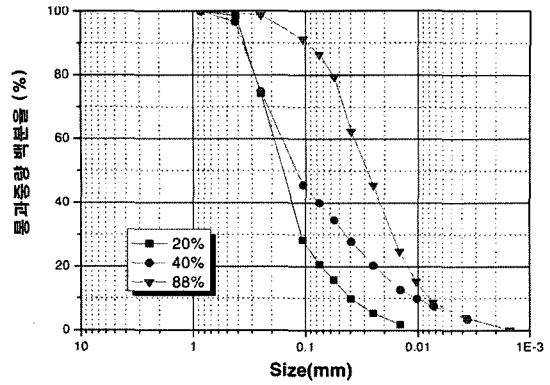

그림 2. 준설토의 입도분포

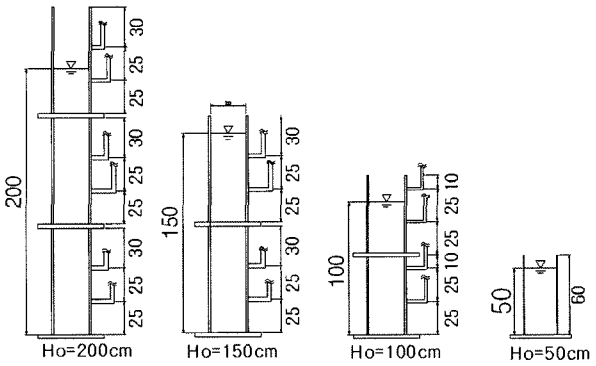

그림 3. 침강실험 장치(D=20cm, t=1cm)

3.2 실험방법

침강실험방법은 그림 3과 같이 높이 200cm, 150cm, 100cm, 50cm이고 내경이 20cm, 두께(t=1cm) 인 아크릴 용기를 이용하였다. 시험 시료는 채취된 시료에 200번체 통과시료를 첨가시키면서 중량비율이 20%와 40%가 되도록 조정하고 해수를 가하여 염분 조정함수비가 700%인 액상시료를 제작하였다. 그리고 각각의 시료를 충분하게 교반하여 수중펌프에 의해 시료높이가 200cm, 150cm, 100cm, 50cm가 되도록 용기에 투입하여 침강 자중압밀 침하량을 측정하였다. 또한 준설 직후 해수면의 변화에 따른 침강특성을 파악하기 위하여 일정수두 저하시험을 투입고 200cm에 대하여 실시하였다. 수위 저하고는 투입고(H)의 상단에서 0.4H지점, 즉 80cm에서 하단배수에 의해 일정수두를 유지하였다. 각 시험 유형을 표 2에 표시하였다.

3.3 침강특성

그림 4, 5는 투입함수비 700%를 기준으로 투입고 200 cm, 150cm, 100cm, 50cm의 경우에 대한 계면의 침강-시

표 2. 침강실험 조건

투입시료 높이 H_0(cm)	200번체 통과 세립분 함유량(%)			
	20	40	20	40
			수위저하시험($0.4H_0$)	
200	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4
150	Case 2-1	Case 2-2		
100	Case 3-1	Case 3-2		
50	Case 4-1	Case 4-2		

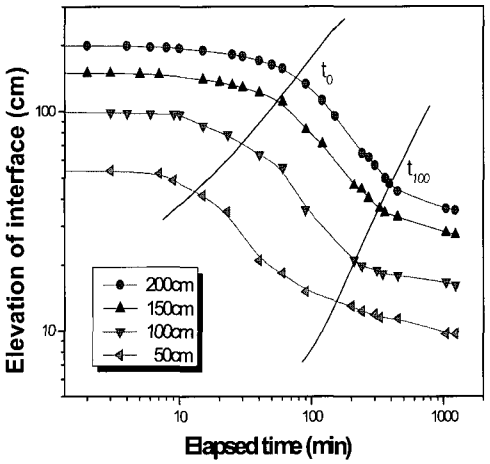

그림 4. 200번체 통과율 20% 침강곡선(w=700%)

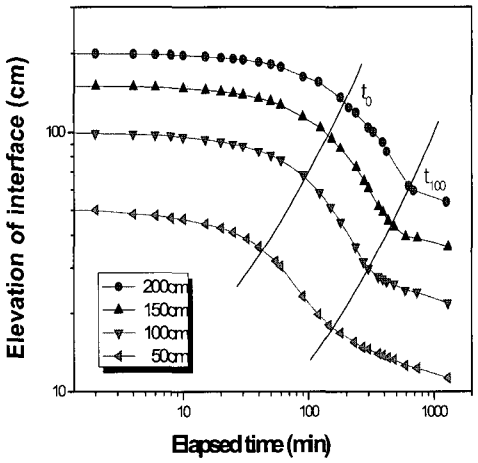

그림 5. 200번체 통과율 40% 침강곡선(w=700%)

간곡선을 대수시간 좌표로 변환하여 표시한 것으로 그림 4는 200번체 통과율 20%, 그림 5는 200번체 통과율 40%이다. 침강과정의 종료점은 정규좌표곡선에 의해 접선과의 교점을 구해 그 교점으로부터 그은 2등분선이 침강곡선의 절점으로 하여, 침강개시부터 종료점까지의 평균 침강속도를 구하였다. 또한 자중압밀 종료점은 그림 4, 5와 같이 1차 감속도 침강곡선 직선부의 연장선과 2차 감속도(creep, 2차 자중압밀) 침강곡선의 종료부분의 접선과의 교점을 구해 그 점으로부터 그은 교각의

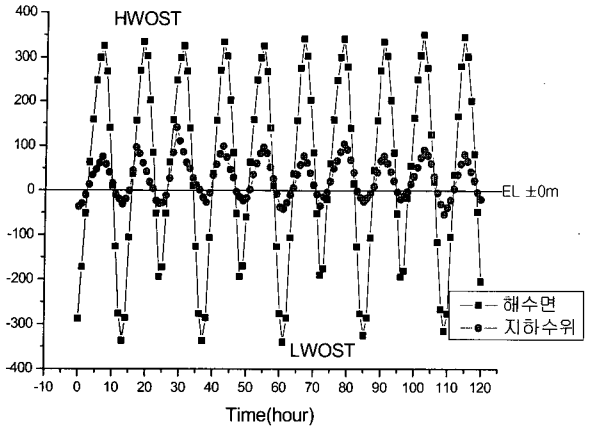

그림 6. 해수면 변화에 의한 지하수위변화

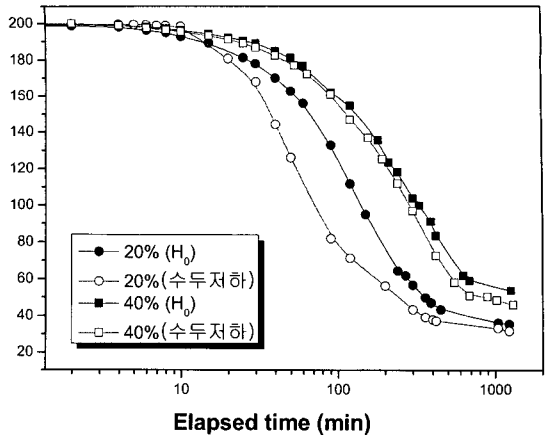

그림 7. 수위저하에 의한 침강특성

2등분선을 종료점으로 하였다(Imai, 1981; 김형주 등, 1999).

본 시험시료에 대한 침강형태를 고찰하면 정규좌표로 표시한 경우에는 처음부터 등속도 침강과정이 공통으로 나타나지만 대수시간 좌표로 표시한 경우 초기에는 입자 상호간의 간섭침강에 의해 경계면이 명확하지 않는 응집형성기간이 장시간 나타나고 있다. 그리고 시간이 경과하면서 급격하게 침강하는 침강과정, 침강속도가 감소하면서 입자가 안정되는 자중압밀 과정으로 대별되고 있다. 본 연구의 시험시료는 준설토 투입두께 및 초기 함수비에 관계없이 상기 3가지 과정이 공통으로 나타내고 있다.

그러나 초기 침강과정을 상세하게 고찰하면 응집형성과정에서 하부 조립토가 먼저 분리침강되는 현상이 관찰된다. 그러므로 상부에서는 세립토의 응집침강이 하부에서는 조립토가 빠르게 침강되어 퇴적되고 있다. 이러한 분리퇴적 영역이 명확하게 구분되므로 상부의 세립토는 분리퇴적에 의한 자중압밀 침강영역으로 분류할 수 있다.

3.4 수위저하에 따른 침강특성

일반적으로 해상준설매립은 호안을 축조한 다음 해상에서 투기되므로 해수면의 수위변화에 의한 침투류가 침강특성을 변화시키고 있다. 따라서 군산 신항만 배후지역의 군장국가 산업단지에서 매립 호안 외측과 내측 지역의 침투류에 의한 지하수위 변화를 5일 동안 시간별로 측정하여 그림 6과 같이 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 주기적으로 대조 평균 고조면에 따라 호안 내측의 배면토의 지하수위가 크게 변화되고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 고조면과 저조면의 수위변화에 의해 호안 배면의 지하수위도 크게 변동되고 있는 것은 배면토가 습윤상태이고 상대밀도가 느슨한 조립모래층으로 형성되어 투수계수가 크기 때문이다. 따라서 해수위 변화에 따른 지하수위 변화는 그림 6과 같이 평균해수면의 변화고 6m, 최대 지하수위 변화고 2.4m로 약 40%의 수위변화를 보이므로 침강시험시 투입고 2m에 대하여 40% 수위인 80cm까지 수위 저하고를 설정하여 하향 배수에 의한 수두저하시험의 기준을 설정하였다. 그림 7은 투입고 200cm, 투입함수비 700%에 대한 수두저하시 침강특성을 나타내고 있다. 그림 7에서와 같이 수두저하시 조립토의 함유량이 많은 20%의 경우 침강 초기부터 침강속도가 크고 자중압밀과정에서도 그 차이가 크지만 자중압밀 종료시점에서는 그 차이가 적다. 또한 조립토의 함유량이 적은 40%의 경우 수두에 관계없이 침강량이 유사하나 자중압밀이 완료 부근에서 침투수압에 의해 상부세립토가 압축되어 침하량이 크게 나타나고 정상상태에 도달할 때까지 일정한 크기로 침하되고 있다.

3.5 조립토 함유율에 따른 침강특성 고찰

본 준설토의 침강특성을 세립토의 함유율에 의해 파악하고자 200번체 통과율과 침강속도 관계를 그림 8에 표시하였다. 그림은 200번체 통과율 88%에 대한 투입함수비의 변화와 투입함수비 700%를 기준으로 200번체 통과율을 20%와 40%로 변화시킨 시험결과이다. 그림에서와 같이 침강속도는 투입함수비와 200번체 통과율에 의해 크게 변화되고 있다. 따라서 조립토가 다량으로 함유된 준설토의 경우 매립지의 퇴적성상이 분리

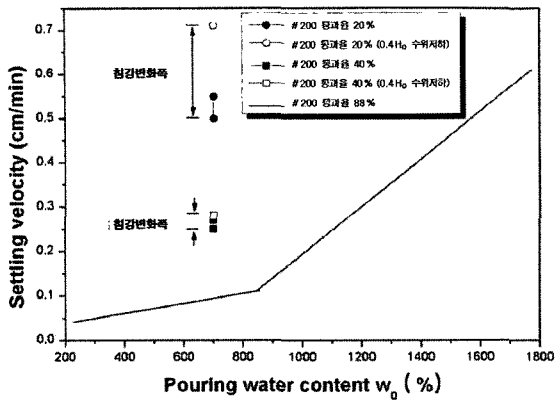

그림 8. 수위저하에 따른 침강속도 관계

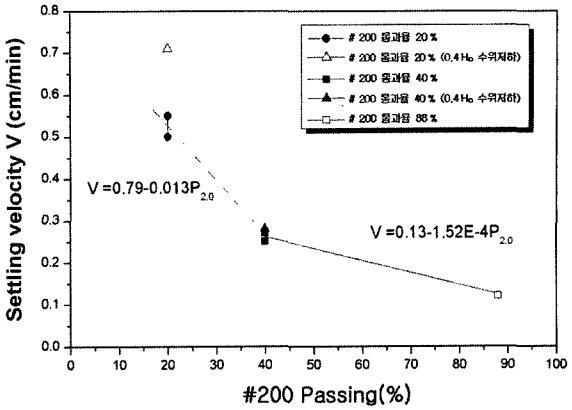

그림 9. 침강속도와 200번체 통과율 관계

퇴적에 의해 크게 다르게 퇴적되고 있음을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 조립토의 함유율을 중심으로 검토한 결과 200번체 통과율 20%에서 침강속도 v=0.50~0.55cm/min이고 40%에서는 v=0.25~0.27cm/min로 동일 함수비 대비 세립토 함유량이 많을수록 침강속도는 감소하고 있다. 또한 수위고 $0.4H_0$(40%) 정도 저하시, 200번체 통과율 20%에서는 v=0.71cm/min, 40%에서 v=0.28cm/min로 약 세립토 함유량이 많을수록 침강속도는 크게 감소되고 있어 전반적으로 조립토가 많이 함유될수록 침강속도는 증가되고 변화폭은 조립토 함유량이 감소할수록 작다. 이러한 침강속도의 변화는 준설 투입시 조립토가 먼저 순간적으로 분리퇴적 되므로 입자중력에 의해 침강속도가 증가되고 분산상태의 세립토는 서서히 응집침강을 시작한다. 그리고 수위변화에 의한 침투수압은 분리퇴적속도를 더욱 크게 증가시키고 있다. 따라서 조립토가 다량으로 함유된 준설지반의 경우 침강속도를 투입함수비에 의해 일률적으로 구하는 것은 분리퇴적 영향과 침투수압을 고려 할 수 없어 정확한 준설토의 수축침하율을 평가할 수 없다. 그림 9는 200번체 통과율과 침강속도 관계를 표시한 것으로 침강속도는 200번체 통과율 40%까지는 크게 감소하고 그 이상부터는 서서히 감소하는 비선형 형태를 나타내고 있다. 조립토 함유량이 증가할 수록 침강속도가 크게 증가하는 것은 조립토의 중력에 의한 분리퇴적이 침강속도에 지배적으로 영향을 미치기 때문이다. 또한 200번체 통과율 40%에서 수두저하시 침강속도가 감소하는 것은 하부에 퇴적된 세립토가 자중압밀에 의해 투수계수가 감소되어 침투류의 유속이 저하되기 때문이다.

그림 10은 그림 4, 5의 200번체 통과율 20%, 40%의 침강곡선에 의해 구한 자중압밀 침강계수를 표시한 것

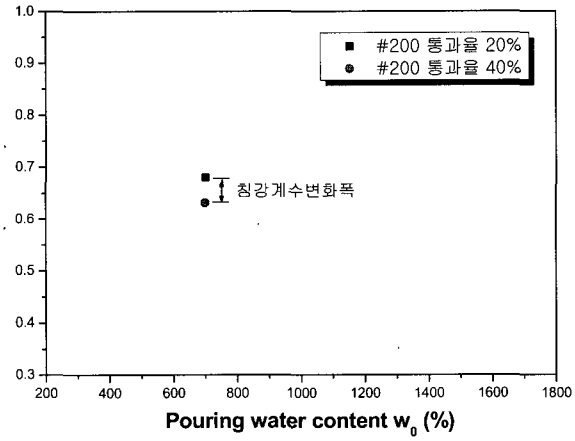

그림 10. 압밀침강계수(Cs)와 투입함수비 관계

으로 동일한 함수비에서 0.63~0.69까지 변화되고 있다. 동일한 함수비에서 자중압밀침강계수는 200번체 통과율에 따라 미소하게 변화가 되고 있으며 조립토가 많을수록 분리퇴적에 의한 침강속도가 증가되어 역으로 자중압밀계수가 증가되고 있다. 이러한 경향은 투입함수비가 클수록 분리퇴적영향이 영향이 크기 때문에 자중압밀계수의 변화폭도 증가 될 것으로 예상 된다.

3.6 Yano방법에 의한 체적변화 고찰

국내에서 준설토의 체적변화량을 산정시 Yano방법에 일반적으로 구하고 있으며, 이 방법은 세립토층이 자중압밀침강에 의해 형성시 하부퇴적 토량고를 최소 실질토량고 H_s=1로 가정하여 자중압밀침강두께를 산정하고 있다. 본 방법에 의해 구한 준설토의 200번체 통과율에 따라 가상 자중압밀 개시시간 (t'_0)와 자중압밀 종료시(t_{100})를 구해 각각의 투입고에 따른 실질토량고와 계면고로 표시하면 그림 11과 같다. 그림에서 실질토량고

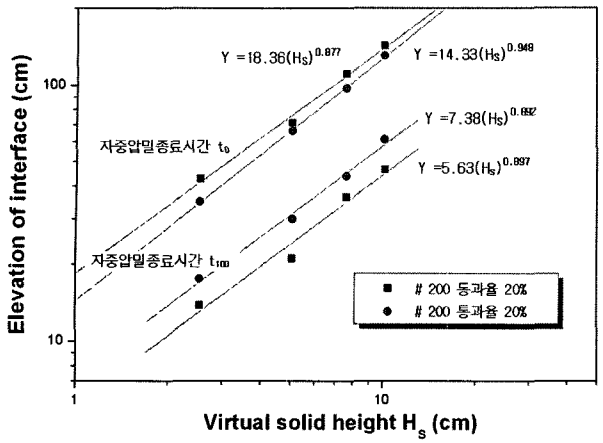

그림 11. 실질토량고와 계면고 관계

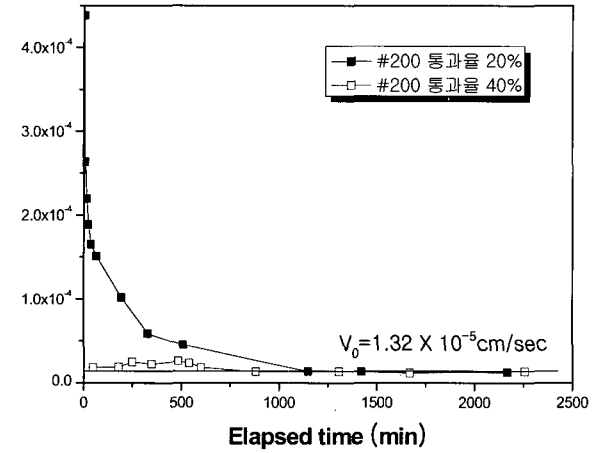

그림 12. 침투압밀시 배수속도(v)와 경과시간 관계

가 증가할수록 200번체 통과율에 관계없이 자중압밀 개시시간(t_0)의 계면고의 변화는 일정한 선형관계를 유지해야 한다. 그러나 200번체 통과율이 많을수록 자중압밀 개시시 형성된 계면고가 감소되는 것은 분리퇴적시 발생하는 현탁액의 분산 영향을 적게 받고 입자응집에 의해 명확한 계면을 형성하여 침강되기 때문이다.

3.7 조립준설토의 압밀특성

전 절에서 실시한 침강시험 중, 200번체 통과율 20%와 40%로 조정시료 초기함수비 700%로 투입고 200cm에 투입하여 방치 후 자중압밀 종료시 과잉간극수압이 소산되었다고 판단되어 상등수를 제거하고 퇴적층별로 함수비를 측정하여 수중단위중량에 의해 유효응력과 간극비 관계를 구하는 시험을 자중압밀시험(SWC)으로 정의하였다(Mikasa 1963; Peynircioglu 1973). 또한 표준압밀 응력보다 작은 범위에서는 200번체 통과율 20%와 40%에 대한 침투압밀시험(HCT) 종료 후, 공시체 함수

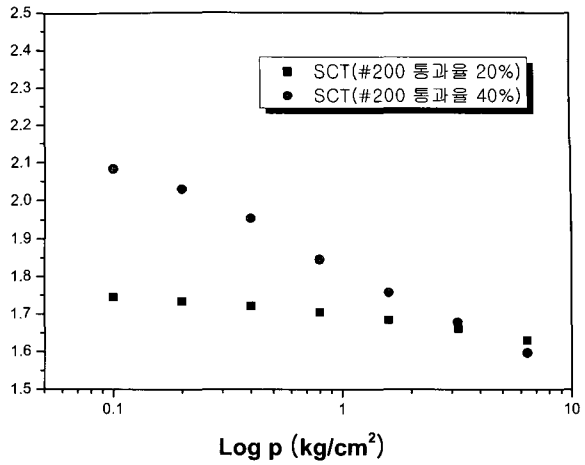

그림 13. 간극비-유효응력 관계

비와 수두를 측정하여 유효응력을 구하였다. 표준압밀시험(SCT)은 예압밀 시험장치를 이용하여 투입된 준설토를 Belloframe Cylinder에 의해 서서히 하중을 증가시키면서 2차압밀영향이 미소하다고 판단되는 시점에서 하중을 제거하였다. 이렇게 제작된 재성형 시료를 이용하여 표준압밀시험을 실시하였다.

Imai(1984)가 제안한 침투압밀시험에 의한 배수속도와 경과시간 관계는 그림 12와 같이 200번체 통과율에 관계없이 압밀이 진행되면서 배수속도(v)가 일정하다. 그림 13의 표준압밀시험결과 간극비-유효응력 관계는 200번체 통과율이 클수록 미소하중에서는 느슨한 상태로 퇴적되어 상대밀도가 작아 압밀하중이 지배적이고 압밀하중이 313kPa 이상에서는 상대밀도가 증가되면서 200번체 통과율과 관계없이 하중에 일의적(unique)으로 압밀침하가 발생된다. 일련의 군산 신항만 준설토의 자중압밀시험(SWC), 침투압밀시험(HCT), 표준압밀시험(SCT)에 의해 각각 구한 간극비-유효응력-투수계수 관계는 그림 14, 15와 같다. 전반적으로 체적비의 변화가 그림 14와 같이 액성한계 부근에서 변곡점이 발생하고 있는 것은 입자의 배열에 의한 조립토의 상대밀도가 크게 변화되기 때문이다. 그리고 그림 12와 같이 압밀종료후 정상상태에서는 배수속도가 일정하므로 체적비가 감소하면서 그림 15와 같이 투수계수도 감소하고 있다. 일련의 시험에 조립 준설토의 체적비-유효응력-투수계수 관계를 요약하여 제시하면 다음 식과 같다.

$$f = -24.0 - 14.5\log P \quad (f \geq 2.0 \text{ 자중압밀}) \tag{1}$$

$$f = 1.76 - 0.17\log P \quad (f \leq 2.0 \text{ 침투압밀}) \tag{2}$$

$$f = 4.23 + 0.31\log k \tag{3}$$

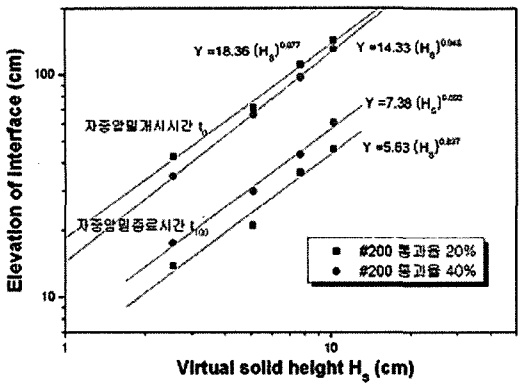

그림 14. 체적비-유효응력 관계

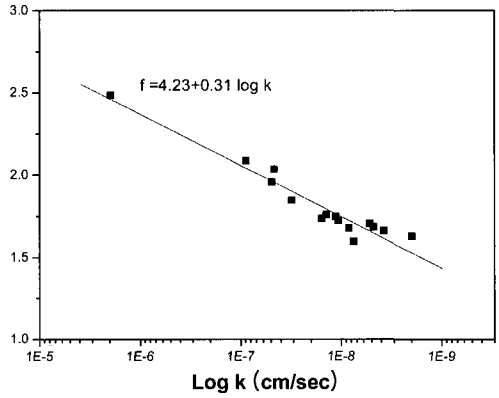

그림 15. 체적비-투수계수 관계(#200 통과율 40%)

4. 분리퇴적 퇴적특성 및 침하량 평가

4.1 분리퇴적층 밀도변화

그림 16, 17은 200번체 통과율과 수두저하시를 고려하여 투입고 200cm에 대한 침강시험결과이다. 시험은 침강-자중압밀이 종료한 후 상등수를 제거하고 최종 퇴적층의 함수비와 밀도를 측정하였다. 밀도는 소형 scale 받침대에 침강시험장치를 올려놓고 세립과 조립토를 제거하면서 무게를 측정하였다. 측정된 무게와 제거된 시료 체적에 의해 습윤 단위중량을 측정해 측정 함수비에 의해 건조단위중량을 구하였다. 측정결과 그림에서와 같이 분리 퇴적된 상부층은 200번체 통과율이 클수록 건조단위중량이 감소하나 하부 퇴적 조립모래는 200번체 통과율에 관계없이 일정한 밀도를 나타내고 있다. 이는 투입과 동시에 조립 모래가 퇴적되고 그 상단에 세립 실트가 순서적으로 시간경과에 따라 침강되고 있다. 수두저하시($0.4H_0$)에는 분리 퇴적된 하부 모래층 상단의 경계부에서 세립 실트층 건조단위중량이 다소 크게 나타나고 있는 것은 침투력이 입경이 큰 세립모래의 퇴적배열을 가속화시키기 때문이다. 이러한 시험결과를

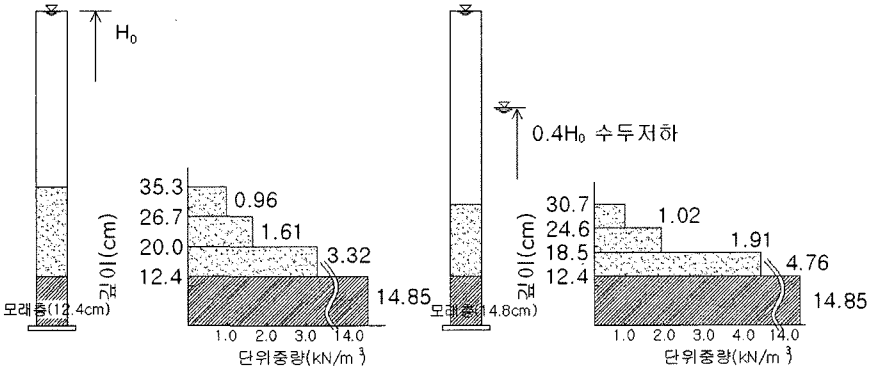

그림 16. 분리퇴적에 의한 준설토의 밀도(#200 통과율 20%)

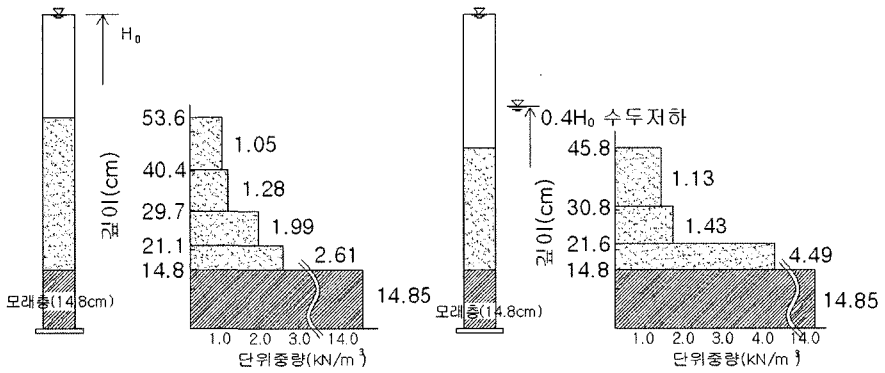

그림 17. 분리퇴적에 의한 준설토의 밀도(#200 통과율 40%)

토대로 분리 퇴적된 조립층의 건조단위중량(γ_d)은 하부 모래층이 14.85kN/㎥이고 상부 세립층은 0.96~4.49kN/㎥범위까지 퇴적층 상단부터 순서대로 분포하고 있어 급격한 밀도 변화가 나타나고 있다. 그림 18은 실제 퇴적고에서 측정된 조립모래층을 전체 퇴적층의 비율로 표시한 것으로 침강 및 수두저하에 의한 분리퇴적층의 조립모래 비율은 200번체 통과율이 증가 할수록 직선적으로 감소하고 있다. 따라서 조립 준설토는 분리퇴적 영향을 고려한 매립용량 설계가 필요하다.

그림 11에서 신항만 입도조정 준설토의 일련의 침강시험에 의해 구한 실질토량고(H_s)와 침강자중압밀침하량(수축침하율) 곡선의 logH-logH_s 관계가 제시되었다. 여기서 Yano방법에 의한 자중압밀(수축침하) 침하량(S_s)는 식 (4)와 같이 제시된다.

$$S_s = H_{t0} - H_{t100} \quad (4)$$

본 연구에 사용된 신항만 준설토는 투입함수비 900%까지 침강속도가 증가하는 경향을 나타내고 있고 그 이후로는 일정한 경향이므로 안전측을 고려하여 초기함수비 w_0=900%로 설정하였다(김형주 등, 2003). 현장 투기장 매립심도를 9.3m로 하면 Yano방법에 의한 침강자중압밀침하량은 표 3과 같다. 여기서 실질토량고(H_s)는 비중과 투입함수비에 의해 구해지므로 그림 11에서 실질토량고와 계면고 관계 그래프에서 침강자중압밀침하량을 구하였다. 그 결과 표 3의 Yano방법에 의한 준설토의 침강자중압밀침하량은 200번체 통과율이 적은 조립토 일수록 분리퇴적 영향이 크므로 분리퇴적을 반영 할 수 있는 밀도 변화에 의해 평가하는 것도 하나의 방법으로 제시할 수 있다.

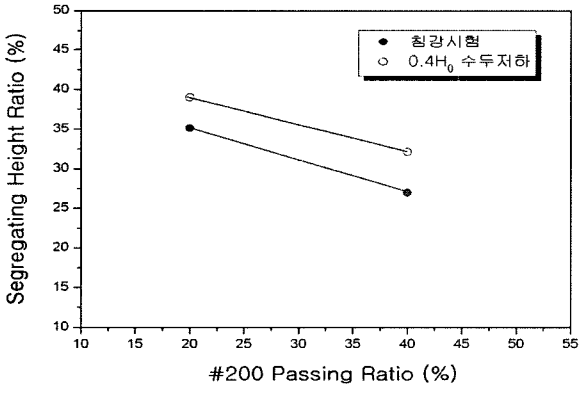

그림 18. #200체 통과율에 따른 조립토 퇴적고 비율

① 실질토량고 : $H_s = G_s\gamma_w/(1+e_o)$, $e_o = w \cdot G_s$

4.3 분리퇴적 밀도에 의한 자중압밀 침하량

그림 16, 17의 분리퇴적밀도 시험에서 건조단위중량을 습윤단위중량으로 표시하면 200번체 통과율 20%는 침강시험시 표면습윤단위중량 γ_t=11.83kN/㎥(w=1132%)에서 수두저하시에 γ_t=12.12kN/㎥(w=999%)변화하며 모래층 상부인 분리퇴적 상단에서는 γ_t=14.22kN/㎥(w=328%)에서 γ_t=14.51kN/㎥(w=205%)까지 함수비가 저하되고 있다. 이러한 함수비 저하는 습윤단위중량을 증가시키므로 분리퇴적하단 조립층의 밀도를 기준으로 상부세립토의 체적비 변화를 고려하여 자중압밀 침하량을 평가할 수 있다. 하부 조립토의 분리퇴적율은 침강자중 압밀시 200번체 통과율 20%에서는 35.1%, 0.4H_0 수두저하시는 40.4%, 200번체 통과율 40%에서는 27%, 0.4H_0 수두저하시는 32.3%이다. 표 4는 분리퇴적율과 밀도를 고려하여 체적비에 의해 산정된 침하량이다. 표 3과 표 4를 비교하면 Yano법의 계면고 변화에 의한 자중압밀침하량이 분리퇴적밀도를 고려한 밀도변화율에 의한 침하량보다 과도하게 평가되고 있다. 그러나 200번체 통과율이 88%의 경우에는 분리퇴적영향이 적어 적용성이 양호하다고 판단된다. 표 4에서 200번체 통과율 88%는 군산 신항만 준설토 H_{t0}=18.08$(H_s)^{0.868}$, H_{t100}=9.68 $(H_s)^{0.798}$을 적용하였다.

② 밀도변화율 $= \dfrac{\gamma_{t0} - \gamma_t}{\gamma_{t0}}$, e : 간극비

표 3. 매립심도를 고려한 침강시험에 의한 자중압밀 침하량

매립심도 H_0 (m)	#200체 통과율 (%)	비 중 G_s	체 적 비 f_0=1+e_o	실질토량고 H_s (cm)①	침강자중 압밀침하량 S_s (cm)	비 고
9.3 w_0=900%	20	2.670	25.03	37.2	293	분리퇴적으로 과다
	40	2.670	25.03	37.2	255	
	88	2.670	25.03	37.2	243	

표 4. 매립심도와 밀도 변화율에 의한 자중압밀 침하량

매립심도 H_0 (m)	#200체 통과율 (%)	조립토 퇴적율 (%)	세 립 퇴적층 H'_0(m)	조 립 토 습윤단위중량 γ_{t0} (kN/m³)	세 립 토 습윤단위중량 γ_t (kN/m³)	밀도 변화율②	침강자중 압밀침하량 S_s (cm)	비 고
9.3	20	35.1	6.04	11.83	14.22	0.20	121	
	20	40.4	5.54	11.21	14.51	0.29	161	0.4H0 수두저하시 (적용)
	40	32.3	6.30	10.80	14.47	0.34	214	0.4H0 수두저하시 (적용)
	88	Yano 방법					243	(적용)

표 5. 침하량-압밀도-소요시간-계면고 관계

투기장 매립심도 H_0 (m)	#200체 통과율 (%)	Yano법 침하량 S_s(cm)	밀도변화율 침하량 S_s(cm)	압밀도 U(%)	소요시간 (day)	계면고③ H(cm)	침하량고려 투입고 (m)
9.3	20	293	161	50	33	850	10.9
				100	38	770	
	40	255	214	50	33	823	11.4
				100	40	716	
	88	243		50	33	808	11.7
				100	35	687	

4.4 압밀도와 압밀소요시간 산정

준설매립기간에 따라 침강자중압밀 침하기간을 산정하고자 압밀침강계수(C_s)를 이용하여 계면고(H)와 침강시간(t)은 직선적으로 변화하므로 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\log H = \log H_0 + C_s \log \frac{t_{100}}{t_0} \tag{5}$$

본 연구에서는 C_s(자중압밀침강계수)를 200번체 통과율 20~40%에서는 평균 0.66, 40%이상에서는 최대치 0.69를 각각 적용하였다. 식 (5)에서 자중압밀개시시의 초기 투입고 H_0, 자중압밀개시시간(t_0)은 평균 매립심도를 H_0=9.3m를 적용하고 투기장내에 매립심도 H_0=9.3m를 준설하는데 소요 공기 t_0를 5개월로 각각 설정하면 식 (5)에 의해 준설매립 후, 침강자중압밀 소요시간 관계는 200번체 통과율에 의해 식 (6), (7)과 같다.

$$40\%\text{ 이하} : t_{100} = \left(\frac{H_0}{H}\right)^{0.66} \tag{6}$$

$$40\%\text{이상} : t_{100} = \left(\frac{H_0}{H}\right)^{0.69} \tag{7}$$

표 4에서 200번체 통과율 20%에서 수두저하의 경우 조립토 퇴적율은 40.4%이므로 H_0=9.3m의 세립토의 퇴적층은 554cm이다. 밀도변화율 0.29를 고려하면 자중압밀침하량은 S_s=161cm이고 자중압밀침하종료후의 계면고는 $H=H'_0-S_s$=393cm이다. 따라서 식 (6)에 의해 투입직후 자중압밀종료시간은 t_{100}은 식 (8)에 의해 1.25개월로 계산된다.

$$t_{100} = \left(\frac{H_0}{H}\right)^{0.66} = \left(\frac{554}{393}\right)^{0.66} = 1.25\text{ 개월} \tag{8}$$

따라서 표 5에서 압밀도 100%에 대한 소요시간은 1개월을 30일로 기준으로 하면 38일이 소요된다. 또한 표 5에서 압밀도(U) 50%의 소요시간과 계면고의 계산은 전과 동일하게 압밀도50%의 경우 계면고는 $H=H'_0-S_s\times U$=474cm이므로 식 (6)에 대입하면 표 5와 같이 소요시간은 33일이다. 그리고 계면고(H)는 투기장매립심도 9.3m에서 압밀도 50%의 침하량과의 차이다. 따라서 식 (5)~(8)에 의해 준설매립지반의 침하량-압밀도-소요시간-계면고에 대한 일련의 설계기법을 표 5와 같이 정리된다. 여기서 Yano방법은 200번체 통과율 40%이하는 조립토가 많이 함유될수록 자중압밀침하량이 매우 크게 평가되는 모순이 있다. 따라서 조립토 함유량을 정성적으로 고려한 분리 퇴적 밀도 변화율에 의한 자중압밀 참하량이 평가방법이 보다 정확한 산정 방법임을 제시할 수 있다.

③ 계면고 $H(cm)=H_0-S_s\times U$

6. 결 론

본 연구는 조립 준설토의 체적변화 및 분리퇴적특성을 분석하기 위해 200번체 통과율과 수두를 각각 변화시켜 침강시험과 압밀시험을 실시하였다. 시험결과에 의해 침강압밀특성이 분석되었으며, 또한 분리퇴적을 고려한 체적비에 의해 자중압밀 침하량 평가 기법이 제시되었다. 전체적인 연구수행에 의해 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 시험에 사용된 준설토의 물리적 특성은 비소성 실트 또는 실트질 모래로 비중(G_s) 2.670, 200번체 통과율 10~88%이고 통일분류법으로 SM과 ML로 분류된다.

(2) 조립토가 많이 함유될수록 준설토의 침강속도는 분리퇴적에 의해 증가되고 조립토가 적을수록 분리퇴적속도 영향은 작다. 따라서 조립토가 다량으로 함유된 준설지반은 투입함수비보다 조립토와 세립토의 밀도변화가 크게 변화됨으로 침강속도를 투입함수비에 의해 일률적으로 구하는 Yano 방법은 분리퇴적 영향이 무시되어 정확하게 수축침하율을 평가할 수 없다.

(3) 조립 준설토의 배수속도 및 투수계수는 정상상태에서 세립분의 함유량에 관계없이 일정한 값에 수렴되나 체적비 $f=2(w_n=w_L)$영역에서 분리퇴적에 의해 퇴적특성이 크게 변화하고 압밀응력 P=313kPa 이상에서 통과율에 관계없이 응력과 일의적인 곡선을 나타내고 있다.

(4) 200번체 통과율 20%와 40% 준설토의 침강퇴적층 밀도는 하부 조립모래층의 습윤단위중량 γ_t =18.58kN/㎥(w=25.1%)과 상부 세립층의 습윤단위중량은 최소 γ_t=11.06kN/㎥(w=1132%)에서 최대 γ_t =14.51kN/㎥(w=205%)로 변화하고 있어 조립토 함유량이 증가 할수록 분리퇴적에 의해 밀도 및 함수비가 크게 변화되고 있다.

(5) 세립 준설토의 침강시험에 의해 자중압밀을 산정하는 경우 널리 적용되는 Yano 방법이 일련의 연구차원에서 조립준설토의 침강시험과 비교 분석되었다. 200번체 통과율 40% 이하의 조립 준설토 에서는 분리퇴적영향을 고려한 밀도 변화율에 의해 자중압밀 침하량을 평가하는 것이 보다 합리적인 방법임을 제시하게 되었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부(한국과학재단) 특정기초연구 (과제번호 : R01-2005-000-11088-0) 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김형주, 오근엽(1999), "연약한 준설매립 점성토 지반의 자중압밀 과정에 관한 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제15권, 제2호, pp. 129-138.
2. 김형주, 이민선, 이용주, 김대우(2003), "준설토의 체적변화 및 2차원 퇴적특성에 관한 연구", *한국지반공학회 논문집*, 제19권, 제4호, pp.155-165.
3. 유남재, 안중선, 이종호, 유병상(1998), "준설매립토 지반의 체적변화량 예측", *대한토목학회 학술발표회 논문집(II)*, pp.307-310.
4. 이송, 전종구(2002), "조립토가 혼합된 준설토의 퇴적 및 압밀특성", *한국지반공학지*, 제18권, 제2호, pp.75-86.
6. 矢野弘一郎(1985), "浚渫泥土の分離堆積", *土と基礎*, Vol.32, No5, pp.23-28.
7. 矢野弘一郎, 鶴谷和夫, 山内豊聰(1984), "浚渫粘土による軟弱埋立地盤の性狀豫測", *日本土木學會 論文集*, No.364, pp.1-15.
9. Been, K. and Sills, G, C.(1981), "Self Weight Consoldidation of Soft Soils: an Experimental and Theoretical Study", *Geotechnique*, Vol.31, No.4, pp.519-535.
10. Imai, G.(1981), "Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials", *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp.7-20.
11. Imai, G.(1984), "Applicability of Hydraulic Consolidation Test for Very Soft Clayey Soils", *Soils and Foundations*, Vol.24, No.2, pp.29-42.
12. Mikasa, M.(1963), "The Consolidation of Soft Clay-A new consolidation theory and Its application", *Tokyo Kajima Shupan-kai*, pp.56-86.
13. Peynircioglu, A. H.(1973), "Performance of Very Soft Muds Under Very Light Loads and Consolidation of a Muddy Bottom Under a Wide Sand Fill", *Proc. 8th I.C.S.M.F.E.*, Vol.22, pp. 159-163.

(접수일자 2006. 2. 6, 심사완료일 2006. 12. 15)