

## 준설토의 침강형태에 관한 연구

### Settling Mode of the Dredged Soil

윤 상 목\* · 장 병 옥\*\* · 차 경 섭\*\*\*

Yun, Sang Muk · Chang, Pyoung Wuck · Cha, Kyung Seob

#### Abstract

The settling of the dredged soil may vary with mineral composition, grain size distribution, initial water content and salt concentration of suspension of the site. A series of settling column test was performed to investigate the behaviour of solid suspension material from dredging and reclamation.

Settling mode was divided into four types from the observation of interface and settling curves of clay minerals and marine clay samples, and the relationship charts of salt concentration and the initial water content were established to use in the dredging operation with any salt concentration.

The critical initial water content which was defined as a threshold of zone settling and the consolidation settling was varied with salt concentration of water and was proportional to the plasticity of soil in sea water.

*Keywords : Settling mode, Dredged soil, Salt concentration, Critical initial water content*

#### I. 서 론

준설 매립공사는 주로 펌프준설선에 의하여 해저 또는 하저바닥의 퇴적토를 물과 함께 흡입하고 함수비가 약 500~2,000%의 상태의 slurry를 배사관을 통해 낮은 곳에 투기하여 매립지를 조성한다. 투기 직후 고풍수비의 현탁액에서 느슨한 토립자는 침강하면서 토립자의 자중에 의하여 압밀이 진행된

다. 이러한 침강은 자중압밀에 비해 상대적으로 빠르게 종료된다. 준설매립공사에서 지금까지의 관심은 주로 침강종료 후의 압밀거동에 집중되어 왔고, 이와 관련한 연구는 국내에서도 활발히 진행되고 있다.

침강현상은 점착성 입자간 작용력에 매우 민감한 변화를 하므로 해석적 접근이 용이하지 않고, 현장에서도 상대적으로 짧은 시간에 발생하므로 소홀히 생각되어 왔다. 그러나, 준설매립공사를 위해서는 준설토의 유실 및 유보율 추정, 투기장 및 여수토 규모결정, 매립재료에 따른 준설계획, 부유된 토사에 의한 오염방지, 연약지반처리 등 지반이 형성되기 전의 침강거동에 대한 현상파악이 반드시 필요하다.

해성점토를 준설매립하는 경우와 같이 토립자의

\* (주)쏘일테크엔지니어링  
\*\* 서울대학교 농공학과  
\*\*\* 서울대학교 대학원  
\* Corresponding author. Tel.: +82-2-3462-0462  
fax: +82-2-3462-0463  
E-mail address: soilab@chollian.net

현탁액에 대하여 침강형태의 분류는 Imai(1980)가 기준을 제시한 이래, 1996년 Kondo 등이 일본의 해성점토 및 점토광물에 적용한 바 있으나, 국내의 해성점토에 대해서는 염분농도 및 함수비와의 관계로 침강형태를 구분하여 제시된 자료가 거의 없다. 이러한 해성점토의 준설매립시 계면의 침강속도는 Kynch(1952)가 제안한 간섭침강이론으로 해석이 가능하나, 이 이론의 기본 전제는 입도분리가 되지 않는 입경에 대한 것으로서 다양한 입경이 섞인 혼합토에서는 수정이 필요하다.

따라서, 본 연구의 목적은 해성점토를 준설매립할 경우 광물조성, 입도변화, 초기함수비, 염분농도 등 현장에서 변화될 수 있는 요인이 침강형태에 미치는 영향을 구명하는데 있다.

## II. 이론적 배경

정지된 수중에 구형(球形)의 토립자가 그 직경보다 매우 큰 간격으로 서로 떨어져 있는 상태로 자유침강하는 경우에는 Stokes의 침강법칙에 의해 해석할 수 있으나, 준설토와 같이 다양한 토립자로 구성된 농도가 높은 현탁액의 거동은 토립자의 입도분리가 발생되어 무겁고 큰 입자는 먼저 가라앉으며, 이와 동시에 입자들끼리 플록(Flocs)을 형성하고 상부의 물과 분리되어 침강을 시작한다. Imai(1980)는 일반적으로 점토질 흙에서 나타나는 침강형태(Settling mode)를 Type I ~ IV의 4가지로 구분하여 그들의 특징을 제시하였다.

준설토의 염분농도가 매우 낮거나, 혹은 함수비가 매우 높을 때에는 현탁액속의 토립자는 응집되지 않고 분산된다. 가는 입자들의 분산된 사이로 굵은 입자가 먼저 침강하는데, 가는 입자는 물에서 아주 오랫동안 분산되어 있으려는 경향을 띠므로 투명한 물을 얻기가 힘들다. 이 때의 토립자는 Stokes의 법칙에 지배를 받으면서 침강(분산자유침강, Type I)하고 미세입자의 현탁상태에 따라 Type II(응집자유침강)와 구별된다.

그러나 염분농도가 높고 또한 함수비가 큰 경우에는 아주 짧은 시간에 다양한 크기의 플록이 형성된다. 보다 큰 플록이 작은 플록보다 더 빨리 침강한다. 그러므로 대류운동이 전체에 걸쳐서 급격히 발생하고, 결과적으로 어떤 뚜렷한 계면도 형성되지 않는다. 응집자유침강(Type II)은 토립자가 응집하여 서로 다른 크기의 플록을 형성하고 플록자체가 자유침강하는 것으로서 명료한 계면은 형성되지 않지만 상등액은 시간이 지나면 맑아진다. Type II와 III의 구분은 명확한 계면형성의 유무에 따라 구분한다.

토립자의 농도가 높을 때는 보통 간섭침강이라 불리는 유형이 관찰된다. 입경이 큰 입자는 더 낮은 속도로 떨어지는 작은 입자와의 충돌에 의하여 방해 받는다. 결과적으로 토립자의 플록이 형성되는데, 이렇게 형성된 플록은 상대적으로 낮은 농도의 경우에는 자유로이 침강하며, 상대적으로 높은 농도의 경우에는 플록들 사이의 상호 작용력이 그들의 자유 낙하를 제한하고 플록이 분산된 부분과 맑은 물 사이에 뚜렷한 접촉면을 형성하며 동일한 속도를 가지는 집합체로 침강하게 된다. 이러한 침강의 형태가 구간침강(Type III)이다. 이 단계의 침강시 형성된 계면을 관찰하면 Fig. 1에서와 같이 세 개의 다른 단계가 침강곡선에서 구별된다. 첫 단계(응집단계) 동안에는 접촉면의 움직임이 거의

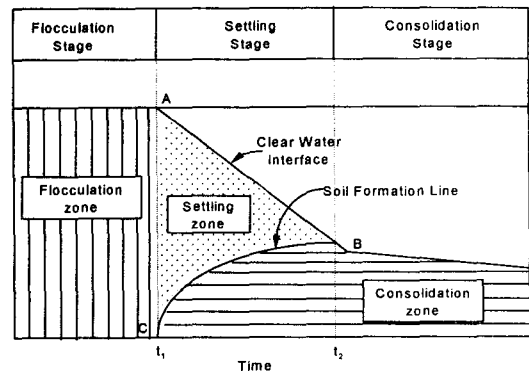


Fig. 1 Typical settling curve for zone settling (Imai, 1980)

보이지 않고 모든 혼합물의 영역에서 거의 동시에 응집이 일어나면서 플록이 형성된다. 두 번째 단계(침강단계)는 이렇게 형성된 플록이 침강하기 시작하면서 플록의 집합체와 맑은 물 사이의 뚜렷한 계면이 형성되고 그것은 일정한 속도로 아래로 이동한다. 따라서 침강곡선은 직선의 형태를 나타내고 대부분의 플록은 계면과 같은 속도로 침강되는 것으로 간주된다. 이 직선적인 침강단계가 갑자기 멈추고 계속되는 다른 단계로 이어지는데 그 세 번째 단계(압밀단계)에서는 계면의 침강속도가 훨씬 느려지며 모든 플록은 퇴적되고 그들의 집합체는 자중압밀과정에 놓이게 된다.

초기함수비가 구간침강의 경우보다 더 작으면, 눈에 보이는 플록은 더 이상 형성되지 않고 개개의 토립자가 서로 접촉하여 자중에 의해 압밀되므로 속도가 매우 완만하다(압밀침강, Type IV). Kondo 등(1996a)은 Type III과 IV의 구분에는 결보기상의 플록의 유무에 따라 구분하였고, Imai(1980)는 함수비변화에 따른 침강속도와 응집시간의 변화를 보고 불연속변화를 하는 곳을 편의적으로 그 경계로 보았으나, 침하는 기본적으로 Type III과 IV의 모두에게 공통적이므로 이들의 구분은 명확하지 않다고 하였다. Type III 침강과 Type IV 침강을 구분하는 경계를 임계초기함수비( $w_c$ )로 정의하면, 임계초기함수비는 그 이하로는 오직 Type IV 만 일어날 수 있는 최대의 초기함수비가 된다.

### III. 재료 및 시험방법

#### 1. 재 료

해성퇴적토인 S점토, 일반적인 점토광물이 포함된 4가지의 점토시료에 대하여 기초물성시험 및 양이온 교환용량측정을 실시한 결과 Table 1과 같으며 입도분석 결과는 Fig. 2에 나타내었다. S점토는 삼교방조제에서 서남쪽으로 1 km 정도 떨어진 해안에서 채취하였고, 패각류 제거 및 균일한 상태

Table 1 Physical properties of samples used

Sample	Specific gravity Gs	Liquit limit LL(%)	Plasticity index PI(%)	Finer than #200 (%)	Finer than 2 $\mu$ m (%)	CEC (meq/100g)
S clay	2.702	37.7(39.6)	20.4(22.2)	100	27.1	20.6
K clay	2.559	57.5(45.7)	30.1(17.9)	100	88.6	6.7
I clay	2.711	30.3(30.8)	10.6(10.0)	100	22.8	7.6
M clay	2.558	415.1(142.1)	369.3(104.1)	100	95.0	78.0
P clay	2.685	42.1(41.1)	16.3(15.1)	100	37.1	5.2

Cf. ( ) is the test results performed with sea water

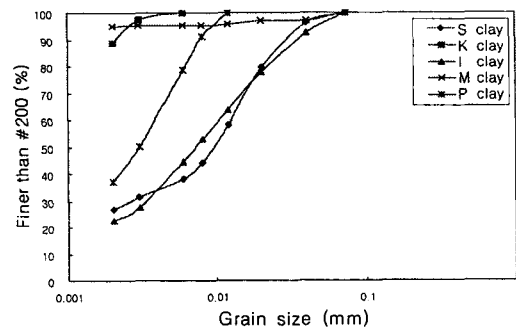


Fig. 2 Grain size distribution curve of soil tested

를 유지토록 #200체를 통과시켜 포화상태로 유지하였다. S점토는 통일분류법(USCS)에 의하면 CL로 분류되고, 유기물함량시험(KSF2104) 결과 유기물함량은 5.14% 정도로 나타났다.

분말상태의 시료에 대하여 X 선 회절분석법(X-ray diffractometry method, XRD) 및 리트벨트법(Rietveld method)을 이용하여 광물조성을 정량적으로 분석하였으며, 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

S점토중 점토광물이 차지하는 양은 약 22.4%이며, 그 중에는 Kaolinite, Chlorite, Illite 및 Montmorillonite가 함유되어 있고 Montmorillonite를 제외한 나머지 세가지 점토광물의 함유량은 비슷하다. K점토는 Kaolinite가 대부분인 점토광물로서 순도(purity)가 매우 높고, 그 다음으로 Montmorillonite가 많이 섞인 M점토가 점토광물함량이

Table 2 Mineral composition of materials (in percentage)

Clay/Mineral Material	Kaolinite	Illite	Mont- morillonite	Chlorite	Pyro- phyllite	Quartz	Feldspar, etc.	Total (%)
S clay	7.2 (32)	6.0 (27)	2.4 (11)	6.8 (30)	-	43.5	34.1	100
K clay	94.1 (94)	5.4 (5)	0.2 (1)	-	-	-	0.3	100
I clay	-	39.9 (100)	-	-	-	49.9	10.2	100
M clay	-	8.1 (12)	58.2 (88)	-	-	10.3	23.4	100
P clay	0.7 (2)	-	-	-	39.3 (98)	56.3	3.7	100

Table 3 Settling tests by change in salt concentration

Initial water content ( $w_i$ , %)	Salt concentration, $S_c$ (g/l)						
	0.0	0.1	0.35	1.0	3.5	10.0	32.0
100	◇						◇△
200	◇☆		□		△		□◇△☆
300	◇☆		□				□◇△☆
400	○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆
500	◇☆	□					□◇△☆
700	○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆
1,000	◇△☆	□					□◇△☆
1,500	◇△☆	□◇△☆	□◇△☆	□◇△☆	□◇△☆	□◇△☆	□○◇△☆
2,000	◇△☆	□					□◇△☆
3,000	○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆
4,000	◇△☆	□					□◇△☆
5,000	○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆	□○◇△☆
10,000	△☆	◇△	△		△	△	◇△☆
20,000	☆	◇					

Cf. □ S clay, ○ K clay, ◇ I clay, △ M clay, ☆ P clay

66.3%로서 높은 편이다. I점토 및 P점토는 석영 및 장석등이 60% 정도 섞여 있고, 점토광물은 각각 Illite와 Pyrophyllite가 약 40% 정도로서 함유되어 있어 순도가 낮은 편이다. 염분농도는 해수 1 l에 용해되어 있는 염류의 총 질량으로 나타내고, 실험에서 사용한 염분농도는 약 32 g/l이다. 해성 점토속에는 염분을 함유하고 있어서 함수비가 실제 값보다 작게 나오므로, 염분농도를 측정해서 진함수비로 보정해주었다.

## 2. 시험방법

본 연구의 침강시험에는 1,000 cm<sup>3</sup>의 유리재질의 메스실린더를 이용하였으며, 내경은 6 cm, 높이는 50 cm이다. 본 실험에서는 인력에 의해 전도(inverting)시키는 방법을 이용하였다. 침강시험은 준비된 시료와 간극수를 넣고 인력으로 30회 정도 전도시켜 교반 후 충분히 포화되도록 12시간 정도 방치하였다. 계면고를 측정하기 전에 다시 2번에 나누어 교반시키고 정치 후 침강계면과 응집상태를 관측하였다. 염분농도에 따른 침강거동의 변화시험

에서는 염분이 보정된 초기함수비 ( $w_i$ )를 최저 100%에서 최고 약 20,000%까지 14단계로, 그리고 염분농도범위를  $S_e=0.0\text{ g/l}$  (중류수)에서  $S_e=32.0\text{ g/l}$  (삽교지역 해수)까지 6단계로 조절하였고, 침강형태를 잘 표현할 수 있도록 대수농금상에서 변화간격을 결정하였다. 각 시료에 대한 시험조건은 Table 3과 같다.

#### IV. 결과 및 고찰

##### 1. 침강곡선의 분석

K점토, I점토, M점토 및 S점토의 현탁액을 침강시켰을 때 상등액과 분리되는 계면의 높이 ( $h$ )를 경과시간( $t$ )에 따라 측정하였으며, 계면고 측정과 더불어 계면형성 과정과 현탁액의 부유상태를 관찰

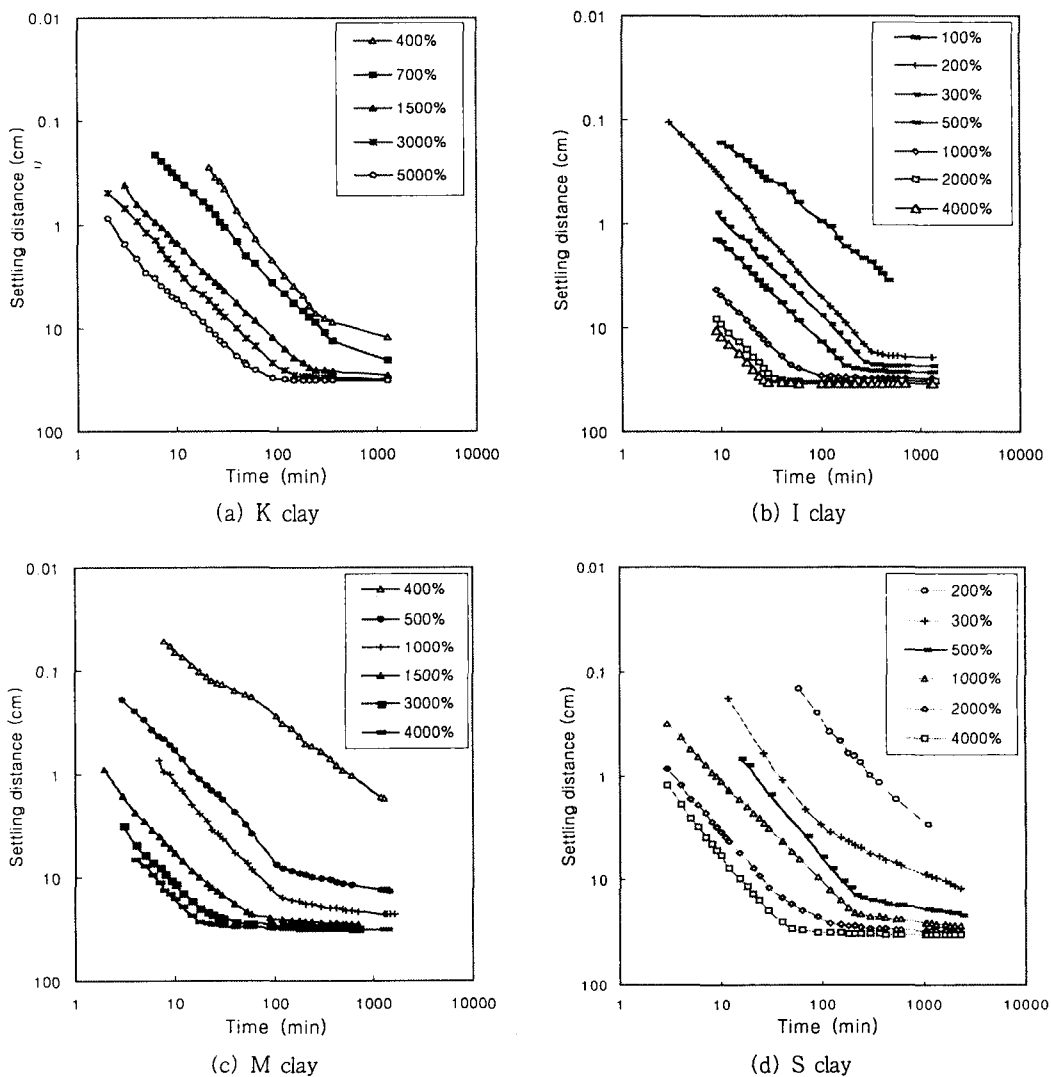


Fig. 3 Settling curves with different initial water contents ( $S_e=32\text{ g/l}$ )

하였다. Fig. 3에 각 점토의 침강곡선을 나타내었다.

K점토의 경우는  $w_i=400\sim 3,000\%$ 의 경우 측정 기간중에 압밀이 진행중에 있으며, 임계초기함수비는 400%보다는 더 작다. I점토의 경우는 초기함수비가 100%와 200%의 사이에서 침강속도가 크게 변화되며,  $w_i=100\%$ 에서 침강없이 압밀이 되는 것으로 보이므로, 구간침강(Type III)과 압밀침강(Type IV)의 경계가 되는 임계초기함수비 ( $w_0^*$ )는 100%와 200%의 사이에 있음을 알 수 있다. M점토의 경우로서 임계초기함수비는 400%와 500%의 사이에 있고,  $w_i=400\sim 1,000\%$ 는 측정기간중 압밀이 진행중인 것으로 보인다. 임계초기함수비는 I, K, M점토의 순으로 커지며, 이는 액성한계, 소성지수 및  $2\ \mu\text{m}$  이하입자의 양과 같은 순서로서(Table 1), 임계초기함수비는 소성이 클수록 커진다고 할 수 있다. 여러 가지 점토광물이 혼합되어 있는 S 점토의 현탁액은 계면이 형성되기까지의 응집시간은  $w_i=700\%$ 의 경우 약 2분 내외로 매우 짧았으며, 응집 후 곧바로 일정속도로 침강하는 것이 관측되었다. 침강과 압밀의 천이구간에서 침강종료점을 뚜렷하게 볼 수 있고, 임계초기함수비는 200%와 300%의 사이에 있음을 알 수 있다. S점토와 같이 여러 점토가 섞인 해성점토의 침강곡선은 각 점토시료의 곡선과 유사하며, 그 형태는 초기함수비에 따라 크게 변화된다. 임계초기함수비 및 응집 시간도 소성에 의존하는 점토시료의 경우와 같은 경향을 보인다.

## 2. 침강형태(Settling mode)의 분류

본 실험에서는 토립자끼리 응집하는 경우와 응집하지 않는 경우의 미세한 입자의 침강속도는 차이가 크기 때문에, 현탁액을 침강시켰을 때 약 8시간 이상이 경과한 후 상부현탁액의 탁도에 의하여 Type I (분산자유침강)과 Type II (응집자유침강)를 구분하였으며, 본 연구결과와, 타 연구자의 결과를 함께 도시하여 비교하였다.

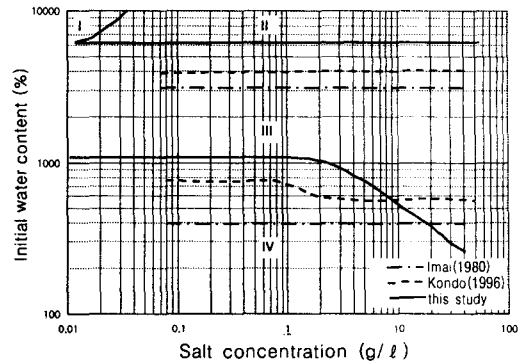


Fig. 4 Comparison of settling modes for K clay

K점토는 Fig. 4에서와 같이 염분농도에 의한 영향이 약간 있는 것으로 나타났고,  $w_i=10,000\%$ 의 현탁액에서 Type I의 침강형태가 관찰되었고, 염분농도 ( $S_c$ )가 높아지면 임계초기함수비(Type III과 IV의 경계)가 감소했다. 그림에서 횡축의 염분농도 0.01의 위치에는 증류수를 사용한 실험결과를 표시하였다. K점토가 염분농도의 영향을 받아 침강형태가 변화되는 이유는 점토에 함유된 Illite와 Montmorillonite의 영향일 것으로 추측된다.

Imai(1980)의 Kaolinite는  $2\ \mu\text{m}$  이하가 50%로서 상당량의 비점토분이 섞인 것으로 Type I의 침강범위를 확인하지 못했고, 함수비가 더욱 높다면 존재할 것이라고 추측하였는데, 본 실험의 K점토는 점토가 99.7%인 순수 점토이었으며 고함수비의 낮은 염분도에서 Type I의 형태가 나타났다. 비교연구의 결과, Kaolinite는 염분농도의 영향을 크게 받는다고는 할 수는 없으며 각 침강형태의 경계에서의 함수비가 서로 차이가 나는 것은 천이구간을 보는 시각적인 차이와, 시료에 포함된 점토광물의 함량, 즉 순도(純度)가 크게 영향을 미친 것으로 판단된다.

P점토는 Fig. 5에서처럼 염분농도에 의한 영향을 전혀 받지 않았다. P점토는 동형치환을 하지 않는 안정된 구조의 점토광물인 Pyrophyllite가 주성분이며, 소성지수도 K점토보다 작기 때문이며 이러한 경향은 낮은 소성지수를 가지는 광물로 구성된 혼

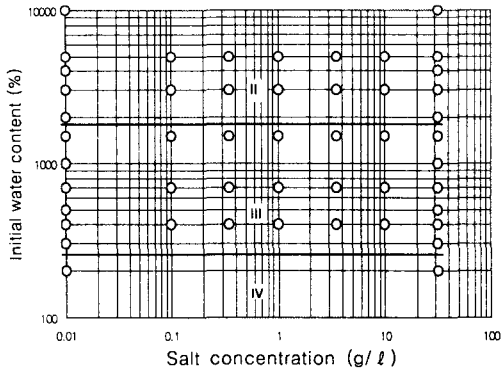
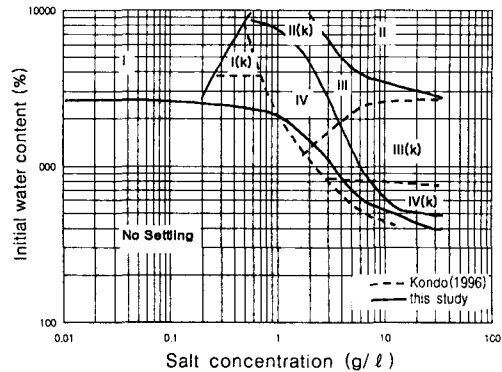


Fig. 5 Settling mode for P clay



(a) This study vs. Kondo(1996)

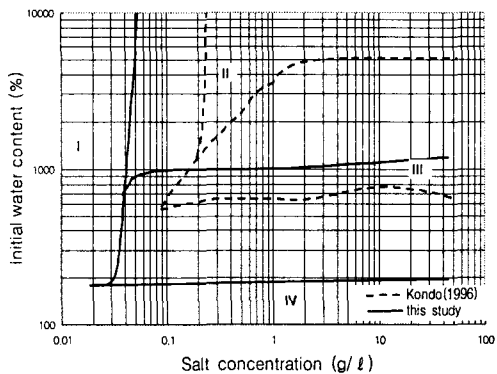
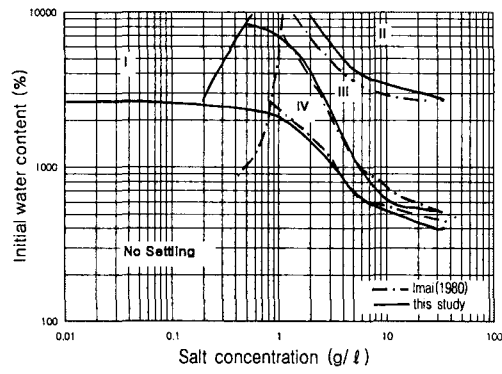


Fig. 6 Comparison of settling modes for I clay



(b) This study vs. Imai(1980)

Fig. 7 Comparison of settling modes for M clay

합물에서 지배적으로 나타났다.

Fig. 6의 I점토의 침강형태는 염분이 조금이라도 있으면 침강의 형태가 크게 바뀌는 것을 볼 수 있고, 그 이상 염분이 추가되어도 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 이는 응집에 필요한 이온의 양이 적어서 낮은 염분농도에서 이미 충족되었기 때문으로 판단된다.

본 연구결과와 Kondo 등(1996b)이 시험한 두 결과가 매우 유사한 형태를 보이며, 침강형태 구분의 경계가 함수비 및 염분농도가 커지는 방향으로 수평이동된 것으로 나타났다. 이는 카올리나이트와 마찬가지로 시료내에 포함된 비점토분 입자들 때문이며, 본 연구의 I점토에 비점토분이 많이 섞여 순도가 떨어지기 때문에 나타나는 결과로 판단된다.

Fig. 7의 M점토의 침강형태는 다른 점토와는 다르게 나타났는데 높은 염분농도( $Sc=32 \text{ g/l}$ )의  $w_i=300\%$  이하, 낮은 염분농도( $Sc=0 \text{ g/l}$ )의  $w_i=2,000\%$  이하 및 그 사이에서 침강이 전혀 발생하지 않는 구간이 있다. 이는 Montmorillonite가 물을 흡수하여 팽창하는 성질이 있기 때문이다. 또한, Type II와 III, III와 IV 사이의 경계구간의 함수비는 염분농도가 증가함에 따라 크게 감소한다.

본 연구에서 사용한 시료는 칼슘몬토릴로나이트인 반면 Kondo 등(1996b)이 사용한 시료는 나트륨몬토릴로나이트로서, 약간 다른 흙으로 추측되며 이러한 차이로 인하여 침강형태의 구분이 크게 달라진 것으로 추측된다. 그러나 본 연구와 Imai (1980)의 결과와는 거의 유사하게 나타났는데, 두

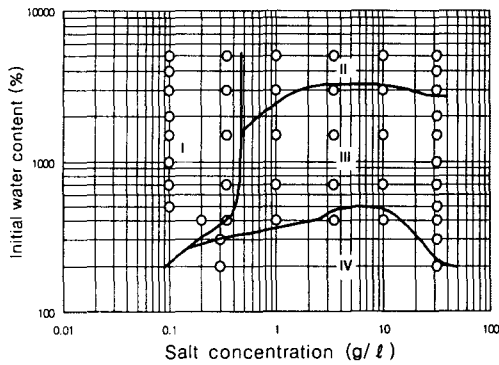


Fig. 8 Settling mode for S clay

시료의 입도조성 및 액소성한계의 값도 유사하기 때문이다.

이상의 침강형태에서 보면 침강형태의 차이는 확실히 흙을 구성하는 점토광물의 차이에 의하여 발생되고, 침강의 4가지 형태가 대부분 점토시료에서 함수비 및 염분농도의 변화에 따라 다르게 나타남을 알 수 있다.

몇 가지의 점토광물이 섞여 있는 S점토의 침강형태를 분류하면 그 경계는 Fig. 8와 같이 저농도 및 저함수비를 중심으로 하는 부챗살 모양으로 나타난다. 이는 Fig. 6의 I점토의 형태와 매우 유사하다. 이러한 형상은 일반적으로 해성점토가 갖는 유형과 비슷하다. S점토 중 점토광물은 Table 3과 같이 Kaolinite, Illite 및 Chlorite가 비슷한 양으로 함유되어 있고 그 보다 작은 양의 Montmorillonite가 섞여 있다. 높은 염분도에서 임계초기함수비가 작아지는 것은 Montmorillonite의 함량 때문으로 판단된다. 여러 점토광물이 혼합된 해성퇴적점토는 각 점토광물의 침강형태가 집합되어 나타난다고 볼 수 있다.

각 점토의 침강형태를 분석한 결과 Kaolinite와 Pyrophyllite는 염분농도의 영향을 받지 않으나 Montmorillonite, Illite와 이를 함유한 S점토의 경우 염분농도에 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서, 준설패립토의 경우 Montmorillonite 또는 Illite를 함유하고 있다면 투기시( $w_i=500\sim 2,000\%$ )에

염분농도가 낮은 상태에서는 준설토가 안정이 되지 않으므로 함수비를 낮추거나, 응집제를 사용하거나 준설퇴도를 조절해야 하는 등 이에 대한 대책이 필요함을 알 수 있다.

### 3. 임계초기함수비(Critical initial water content)와 소성의 관계

#### 가. 염분농도에 따른 액·소성과 임계초기함수비

중류수와 해수를 사용한 시료의 액성한계 및 소성지수는 Table 4와 같으며, K점토와 M점토의 경우는 중류수의 시험치에 비하여 해수의 시험치가 크게 감소됨을 알 수 있다. 이러한 액성한계 및 소성지수의 값은 임계초기함수비( $w_0$ )와 같은 경향으로 변화한다.

P점토와 I점토의 임계초기함수비는 염분농도에 대한 변화가 거의 없었고, K점토는 염분농도가 낮은 상태에서는 일정하다가 해수와 같은 염분농도가 가까울수록 임계초기함수비가 작아지는 것으로 나타났다. M점토에서는 변화가 더욱 심하여 염분농도가 커지면서 임계초기함수비의 값이 매우 크게 감소하였다.

Montmorillonite가 포함된 시료의 경우 염분농도가 높으면 염면모화(Salt flocculated)구조를 갖고, 낮은 염도에서는 비염면모화(Non-salt floccula

Table 4 Consistency of clays using distilled water and sea water

Sample	Liquid limit(LL, %)		Plasticity index(PI, %)		Remarks
	Distilled water	Sea water	Distilled water	Sea water	
K clay	57.5	45.7	30.1	17.9	PI, about 40% decreased
I clay	30.3	30.8	10.6	10.0	
M clay	415.1	142.1	369.3	104.1	PI, about 70% decreased
P clay	42.1	41.1	16.3	15.1	
S clay	37.7	39.6	20.4	22.2	



ted)구조를 갖는다. 따라서 낮은 염분에서는 플록의 부피가 증가하여 플록간 접촉이 상대적으로 높은 함수비에서 시작되므로, 이것이 임계초기함수비의 증가를 가져온다고 판단된다.

S점도는 염분농도가 증가함에 따라 임계초기함수비가 증가하다가 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 증류수 및 해수에서의 액성한계와 소성지수는 큰 변화가 없었다.

나. 임계초기함수비와 소성도

본 연구에 사용된 시료는 M점도를 제외하고는 저소성의 시료이며, Table 5와 같이 시료별 임계초기함수비 ( $w_0^*$ )와 액성한계(LL) 및 소성지수(PI)의 관계를 대비하여 비교하였다. 소성도의 변화에 따른 임계초기함수비의 관계를 분석하기 위해 본 연구의 시료외에 소성도가 다른 몇가지의 시험결과를 추가하여 Table 5에 비교하였으며, 이를 Fig. 9, 10에 도시하였다. Fig. 9, 10에서 소성도에 따른 임계초기함수비는 액성한계 및 소성지수와 직선 비례의 상관성이 나타난다. 소성이 큰 시료일수록

이중층이 두껍고 토립자이동에 더 많은 공간이 필요하게 되어 임계초기함수비도 커지게 되므로 이들 간의 상관성분석이 필요하고, 고소성의 해성점토를 사용한 실험에서는 이러한 경향이 확인되었다.

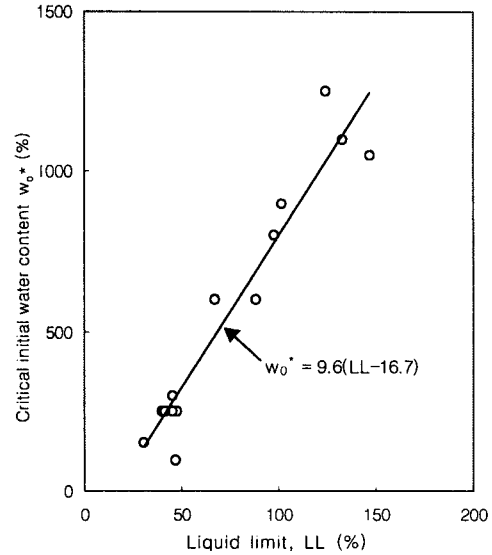


Fig. 9 Relationship between critical initial water content and liquid limit of various clays

Table 5 Comparison of critical initial water content ( $w_0^*$ ) versus plasticity of various clays

Sample	$w_0^*$ (%)	LL(%)	PI(%)	$w_0^*/LL$	$w_0^*/PI$	Remarks
K clay	300	45.7	17.9	6.6	16.8	this study
Kaolin	250	45.0	15.5	5.6	16.1	Imai(1980)
Kaolinite	600	88.4	57.1	6.8	10.5	Kondo et al. (1996b)
P clay	250	41.1	15.1	6.1	16.6	this study
I clay	150	30.8	10.0	4.9	15.0	"
Illite	600	67.4	46.2	8.9	13.0	Kondo et al.(1996b)
S clay	250	39.6	22.2	6.3	11.3	this study
Busan	250	39.6	18.3	6.3	13.7	Lee(2000)
Yeocheon	250	47.88	22.43	5.2	11.1	"
Busan	100	47.05	20.28	2.1	4.9	Yu et al.(1999)
Sendai	1250	124.2	91.8	10.1	13.6	Imai(1980)
Tokyo	800	97.5	65.3	8.2	12.3	"
Ohsaka	900	101.7	70.9	8.8	12.7	"
Ariake	1100	133.2	86.6	8.3	12.7	Kondo et al. (1996a)
Isahaya	1050	146.8	97.9	7.2	10.7	"

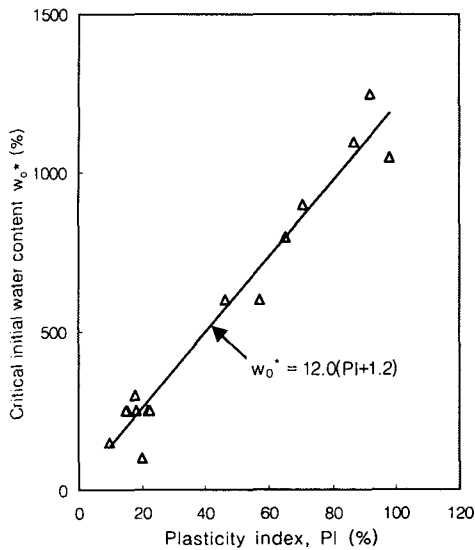


Fig. 10 Relationship between critical initial water content and plasticity index of various clays

Table 5에서 소성이 클수록  $w_0^*/LL$ 의 값은 커지는 경향이 있고, 임계초기함수비( $w_0^*$ )와 액성한계(LL) 및 소성지수(PI)의 관계는 식 (1), (2)와 같이 직선비례의 관계에 있다.

$$w_0^* = 9.6(LL-16.7) \dots\dots\dots (1)$$

$$w_0^* = 12.0(PI+1.2) \dots\dots\dots (2)$$

### V. 결 론

본 연구에서는 일반적인 점토시료와 이들이 혼합된 국내 서해안의 해성점토를 사용하여 광물조성, 초기함수비, 염분농도 등 현장에서 변화될 수 있는 요인이 침강형태에 미치는 영향을 살펴보았다.

1. 침강의 형태는 함수비, 염분농도, 광물조성에 영향을 받으며, 특히 광물조성의 영향에서는 비점토분을 제외한 점토광물의 함량이 큰 영향을 차지하고 있다.

2. Kaolinite와 Pyrophyllite는 염분농도의 영향

을 받지 않으나 Montmorillonite, Illite와 이를 함유한 S점토의 경우 염분농도에 영향을 받는 것으로 나타났다.

3. Montmorillonite 또는 Illite를 함유하고 있는 흙을 준설토하여 투기시에 간극수의 염분농도가 낮다면 준설토가 안정되지 않으므로 함수비 저하, 응집제 사용 또는 준설토 속도 조절 등의 대책이 필요하다.

4. S점토의 침강형태에서 Type I은 0.35 g/l 이하의 극히 낮은 염도에서만 발생하였다. Type II와 Type III는 염분농도가 순수한 물처럼 낮은 경우 발생하지 않았으며, 이 두 유형의 침하는 0.5 g/l 보다 큰 염분농도에서부터 발생하였다. Type IV은 초기함수비가 임계초기함수비보다 작다면 염분농도와 무관하게 항상 발생하는데, S점토의 임계초기함수비는 약 250% 정도로 나타났다.

5. 구간침강과 압밀침강의 경계에 있는 임계초기함수비( $w_0^*$ )는 흙의 소성, 점토함량 및 염분농도에 따라 변하며, 해수에서의 임계초기함수비는 액성한계 및 소성지수에 비례하고 그 관계식은  $w_0^* = 9.6(LL-16.7)$ ,  $w_0^* = 12.0(PI+1.3)$ 와 같다.

### References

1. Fujii, K., Ohtsuka, K., and Takahashi, Y., 1987, Settling Characteristics of Clay Particles in a Bentonite suspension, *Trans. of JSIDRE*, No.132, pp.43~49. (in Japanese)
2. Fujiwara, T., Suzuki, A., and Kitazono, Y., 1994, The Effect of Initial Water Content on Sedimentation of Cohesive Soils, *The 29th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.231~232. (in Japanese)
3. Ikegami, S., Yoshikuni, H., Moriwaki, T., Minamoto, A., and Arimoto, K., 1994, The Influence of Salinity on the Precipitation and Self-weight Consolidation Characteristics of Very Soft Clay, *The 29th Japan National*

- Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.233~234. (in Japanese)
4. Imai, G., 1980, Settling Behavior of Clay Suspension, *Soils and Foundations, JSSMFE*, Vol. 20, No. 2, pp. 61~77
  5. Imai, G., 1981, Experimental Studies on Sedimentation Mechanism and Sediment Formation of Clay Materials, *Soils and Foundations*, Vol.21, No.1, pp. 17~20.
  6. Imai, G., Tsuruya, K., and Yano, K., 1979, A Treatment of Salinity in Water content Determination of Very Soft Clay, *Soil & Foundation*, Vol. 19, No. 3, pp. 84~99
  7. Kondo, F., Kunitake, M., Takayama, M., and Nogi, Y., 1996b, Settling Patterns and Settling Rates of Kaolinite, Montmorillonite and Illite - Effects of initial water content and salt concentration on the settling characteristics -, *Trans. of JSIDRE*, No.185, pp.73~80. (in Japanese)
  8. Kondo, F., Takayama, M., Ohtsubo, M., Higashi, T., and Kunitake, M., 1996a, Settling Patterns of Ariake Clay and Factors Affecting the Settling Rate, *Trans. of JSIDRE*, No.182, pp.49~56. (in Japanese)
  9. Kynch, G.J., 1952, A Theory of Sedimentation, *Transaction Faraday Society*, Vol. 48, pp. 166~176.
  10. McRoberts, E.C., and Nixon, J.F., 1976, A Theory of Soil Sedimentation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, pp. 294~310.
  11. Park, J. H., Seguchi, M., and Kato, O. 1994, Interfacial Settling Properties of Fluid Muds in Quiescent Sea Water, *Trans. of JSIDRE*, No.172, pp.113~121. (in Japanese)
  12. Yoshikuni, H., Moriwaki, T., Ikegami, S., Minamoto, A., and Arimoto, K., 1993, The Influence of Salinity on Mechanical Behaviour of Clays, *The 28th Japan National Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, pp.359~360. (in Japanese)
  13. Yun, S.M., 2002, Settling mode and segregating sedimentation of the dredged soil, *Ph.D. thesis*, Seoul Natl. Univ. Korea (in Korean)