

준설토의 침강속도 추정모델의 개발

A Model for Settling Rate of the Dredged Soil

윤 상 목* · 장 병 옥** · 원 정 윤*** · 김 성 필***

Yun, Sang Muk · Chang, Pyoung Wuck · Won, Jung Yun · Kim, Sung Pil

Abstract

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

The settling rate of soil mixed with various size of particles depended on clay fraction which showed a inherent flux. A model was developed to predict the particle flux of mixed soil from the clay flux and its applicability was verified.

Keywords : dredged soil, settling model, particle flux

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 투기하여 매립지를 조성한다. 투기직후 고함수비의 현탁액에서 느슨한 토립자는 침강하면서 토립자의 자중에 의하여 압밀이 진행된다. 준설매립에 대한 지금까지의 관심은 주로 침강종료 후의 압밀거동에 집중되어 왔으며, 이와 관련한 연구

도 국내에서 활발히 진행되고 있다.

침강현상은 점착성 입자간 작용력에 매우 민감하게 변화하므로 해석적 접근이 용이하지 않고, 현장에서 상대적으로 짧은 시간에 발생하므로 소홀히 생각되어 왔다. 그러나, 준설매립공사를 위해서는 준설토의 유실 및 유보율 추정, 투기장 및 여수로 규모결정, 매립재료에 따른 준설계획, 부유된 토사에 의한 오염방지, 연약지반처리 등 지반이 형성되기 전의 침강거동 및 속도에 대한 고찰이 반드시 필요하다.

1851년 Stokes에 의해 점성을 갖는 액체속을 통과하는 단립자의 침강속도(settling velocity)에 관한 식이 소개된 후 많은 수정이 가해지면서 이용되어 왔고 특히, 미세입자의 침전현상이 중요하게 취급되는 화학공학 분야에서는 이 식의 문제점이

* (주)쏘일테크 엔지니어링 대표
** 서울대학교 지역시스템공학과
*** 서울대학교 대학원
* Corresponding author. Tel.: +82-31-420-4400
Fax: +82-31-420-4401
E-mail address: soiltecheng@hanmail.net

제기되었고 수정된 이론이 발표되어 왔다. Terzaghi (1925)는 물과 혼합된 토립자의 경우 침강하는 현탁액의 거동은 Stokes의 법칙에 지배받았다고 보았다. 점토와 같은 흙에 대해서는 복잡한 형상과 상호작용력 때문에 다양하게 나타나는데, Migniot (1968), Chase(1979), 송 등(1992)은 실험적 연구를 통하여 점토질 흙입자의 실제 침강속도는 Stokes법칙에 의한 것과는 다소의 차이가 있다고 하였다.

낮은 농도의 현탁액의 침강속도는 Stokes식에 의하여 추정이 가능하나, 고농도의 경우에는 입자간 간섭으로 상당히 다르게 나타난다. 이러한 고농도의 현탁액에 대한 최초의 간섭침강이론은 Kynch (1952)에 의해 발표되었는데, 계면의 침강속도는 경계면에서의 국부적인 농도만의 함수로서 정의되며 침강과정은 고체상(solid phase)의 연속방정식에 의해 결정할 수 있다고 하였고, 농도와 Particle flux의 관계로 간섭침강이론을 설명하였다. 그의 이론은 Talmage 등(1955), Dick 등(1969)에 의하여 침전조의 설계에 적용되기도 하는 등, 화학공학 및 환경공학분야에서는 폭넓게 사용되어 왔다.

McRoberts 등(1976)은 Kynch의 간섭침강이론에서 동일한 입경이라는 가정에 대해 토립자 현탁액의 침강에 대한 해석을 시도하면서 Richardson 등이 제안한 관계식을 이용하였다. Tan 등(1990)은 Kynch 이론이 토립자 현탁액의 침강을 설명하는데 유효함을 보이고, 점토질 흙에 있어서 일련의 현탁액에 대한 침강실험을 통해 침강속도는 농도뿐만 아니라 초기조건에도 예민한 관계가 있음을 알아냈다. 그리하여 초기조건에 대한 의존도를 설명하기 위해 경험적인 변수 α 를 도입해서 수정 Kynch 이론을 제안하고 초기조건의 효과를 측정하는데 이용하였다. 김(1983)(1987)은 Kynch 이론의 Particle Flux를 도입하여 반월지역의 해성점토의 침강형태를 분석하였고, 이(2000)는 부산의 가덕시료와 여천시료에 대하여 침강형태를 해석하였다. Been(1980), Pane 등(1985), Toorman(1996)

등과 같이 침강과 자중압밀을 통합하여 해석하려는 연구도 있다. Toorman(1999)는 질량평형관계로부터 침강과 압밀을 동시에 고려할 수 있는 구성방정식을 발표하였으며, 점착성 및 비점착성 흙에 대해 별도의 접근을 하였는데, 다양한 크기와 형태가 혼합된 자연퇴적물을 해석하지 못하였다.

여러 연구자들이 Kynch 이론의 기본 전제인 입도분리가 되지 않는 흙에 대한 연구를 한 바 있으나 입도분리가 발생하는 흙에 대해서는 연구가 이루어지지 못하였다.

본 연구에서는 해성점토를 준설패립할 경우 입도분리가 발생하는 혼합토에 대하여 적용가능한 침강속도 추정모델을 개발하기 위하여 일반적인 점토시료와 이들이 혼합된 해성점토를 사용하여 침강실험을 실시하고 점토의 Flux 개념을 도입한 경험적 모델을 개발하고 그 적합성을 검증하고자 한다.

II. 재료 및 시험방법

1. 재 료

가. 점 토

해성퇴적토인 S점토와 일반적인 점토광물이 포함된 4가지의 점토시료에 대하여 기초물성시험 및 양이온 교환용량측정을 실시하여 Table 1에 나타내었고, 입도분석 결과를 Fig. 1에 나타내었다. S점토는 사교 방조제에서 서남쪽으로 1 km 떨어진 해안에서 채취하였고, 패각류 제거 및 균일한 상태를 유지토록 #200체를 통과시켜 포화상태로 유지하였다. S점토는 통일분류법(USCS)에 의하면 CL로 분류되고, 유기물함량시험(KS F 2104)결과 유기물함량은 5.14%정도로 나타났다.

Table 1 및 Fig. 1과 같이 K, I, M 및 P점토는 #200체를 모두 통과하는 입자로 구성되었으며, M점토의 액성한계, 소성지수 및 양이온 교환용량의 값은 다른 점토에 비해 월등히 큰 값을 나타냈다. 규사는 혼합토의 입도조정을 위하여 사용한 첨가시

Table 1 Physical properties of samples used

Sample	Specific gravity Gs	Liquid limit LL (%)	Plasticity index PI (%)	Finer than #200 (%)	Finer than 2 μm (%)	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
SD/SS/ST	2.662	NP	NP	5.0/49.8/92.0	0.0/7.3/13.1	-

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

료로서, SD(sand) 규사는 95.0%가 모래, SS(sand+silt) 규사는 모래 50.2%와 실트 49.8%가 섞인 것, ST(silt) 규사는 실트가 92.0%인 것을 선정하였다.

Table 2는 분말상태의 시료에 대하여 X-선 회절분석법(XRD) 및 리트벨트법(Rietveld method)을 이용하여 광물조성을 정량적으로 분석한 결과이다. S점토는 점토광물이 약 22.4%이며, 그 중에는 Kaolinite, Chlorite, Illite 및 Montmorillonite가 함유되어 있고 Montmorillonite를 제외한 나머지 세 가지 점토광물의 함유량은 비슷하다. K점토는 Kaolinite가 대부분인 점토광물로서 순도(Purity)가 매우 높고, 그 다음으로 Montmorillonite가 많이 섞인 M점토가 점토광물함량이 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.

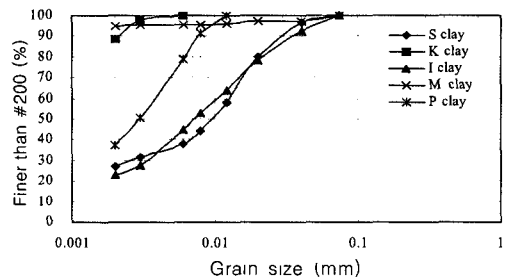


Fig. 1 Grain size distribution curve of soil tested

나. 해 수

염분농도는 해수 1ℓ에 용해되어 있는 염류의 총 질량으로 나타내고, 실험에서 사용한 염분농도는 약 32 g/ℓ이다. 해성점토속에는 염분을 함유하고 있고 함수비가 실제 값보다 작게 나오므로, 염분농도를 측정해서 Imai 등(1979)이 사용한 방법을 이용하여 진함수비로 보정하였다.

Table 2 Mineral composition of materials (in percentage)

Clay / Material	Kaolinite	Illite	Montmorillonite	Chlorite	Pyrophyllite	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

2. 시험방법

침강시험에는 1,000 cm³의 유리재질의 메스실린더와 침강 후의 심도별 시료분리가 가능하도록 고안하여 제작한 1 m 컬럼의 2가지를 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 육안으로 관측하였다. Fig. 2는 침강시험장치를 보여준다.

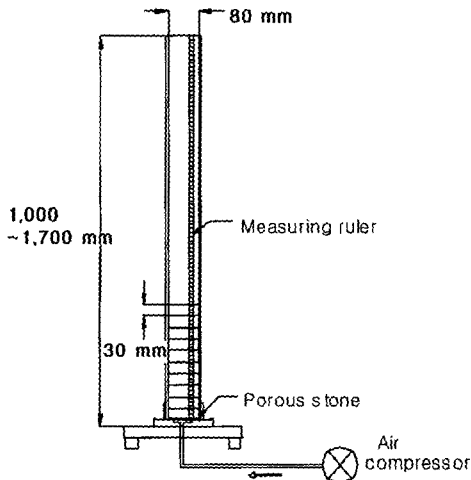


Fig. 2 Schematic view and photo of settling test apparatus (1 m column)

III. 결과 및 고찰

1. 혼합토의 침강속도와 점토의 영향

해수와 동일한 염분농도에서 S점토 및 I점토를 원시료로 하여 비점토인 규사(SD, SS 및 ST)를 섞어 혼합토를 만들었으며 이때 원시료의 양을 고정한 경우(비점토분을 추가하여 혼합토의 양이 증가됨)와 원시료의 양이 변화되는 경우(혼합토의 양이 고정되어 비점토분도 증가됨)로 나누어 혼합토의 침강속도를 고찰하였다. S점토를 해수와 혼합하여 $w_i=400, 700, 1,500, 3,000$ 및 5,000%의 현탁액을 만들고 여기에 규사(SD, SS 및 ST)를 원시료 중량대비 20, 40, 60, 80, 100%를 추가하여 계면의 침강속도를 측정하였다.

Fig. 3은 그 결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 계면의 침강속도는 추가된 규사의 양과 종류에는 영향이 없는 것으로 나타났으며, 원시료의 농도 변화에 따라 크게 변하는 것으로 나타났다.

Fig. 4에서는 세립분 및 점토의 함량을 구하여 그들만의 농도로 환산하여 침강속도와 비교하였다. 규사에는 점토가 없으므로 점토만의 농도로 환산하

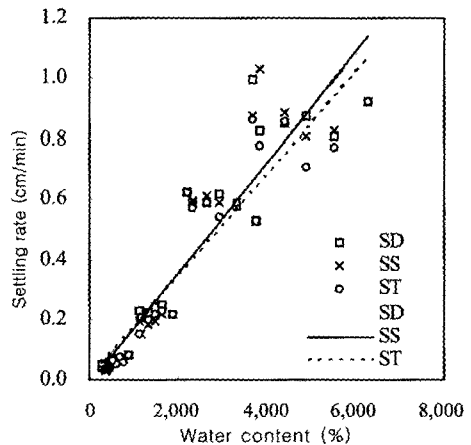


Fig. 3 Settling rate with addition of SD, SS, and ST (S clay)

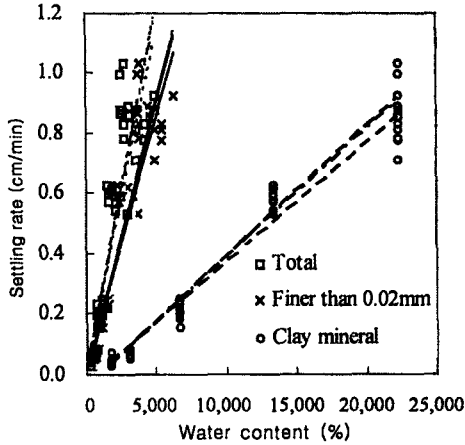


Fig. 4 Relationship between settling rate and water content(S clay, constant amount of clay)

면 규사가 추가되어도 농도의 변화가 없게 되므로 침강속도에도 변화가 없었다고 판단된다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 S점토는 현탁액 계면의 침강속도가 점토만의 농도로 잘 표현됨을 알 수 있다.

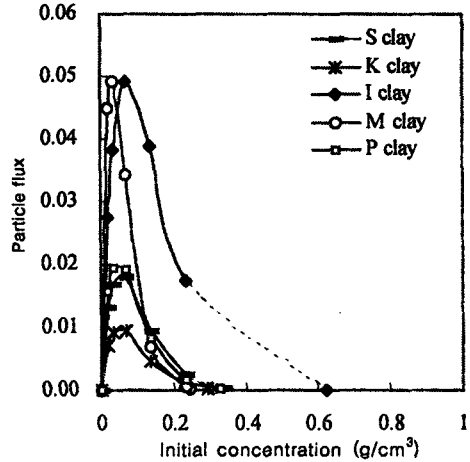
이상의 결과에서 나타난 경향은 I점토에서도 같은 결과를 보였다.

2. 혼합토의 Flux와 점토의 Flux

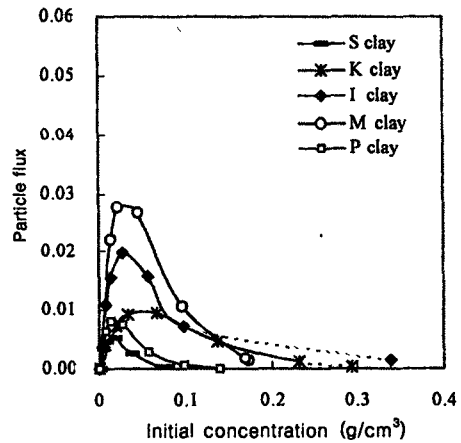
Particle Flux는 각 단면을 단위시간당 통과하는 토립자의 중량을 의미하며, 이는 농도에 따른 입자의 침강속도에 좌우되고, 현탁액에 따라 고유곡선(inherent curve)을 나타내게 된다.

Fig. 5(a)에서 보면 K점토의 Flux가 가장 작게 나타났으며, P점토, S점토의 순서로 나타났다. M점토는 속도의 급격한 변화로 인하여 고농도로 갈수록 급격히 감소하는 곡선을 보였고, I점토는 전반적으로 속도가 크기 때문에 Flux도 크게 산정되었다.

Fig. 5(b)는 각 시료에 포함된 점토만의 농도로서 각 시료의 Flux곡선을 구하고 이를 비교한 것이다. 그 결과, Flux는 S, P 및 K점토가 가장 작고, I, M점토 등으로 갈수록 큰 Flux를 나타내었



(a) Particle flux of mixture of clay and non-clay minerals

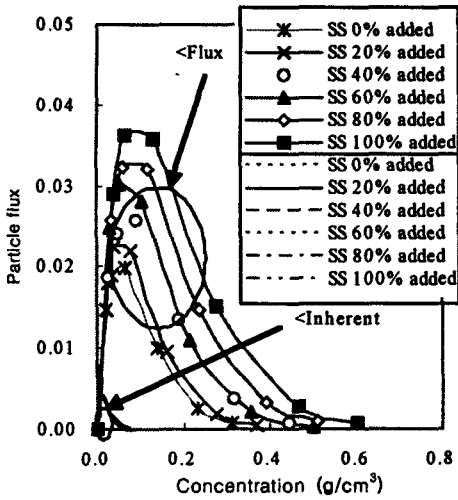


(b) Particle flux of clay mineral only

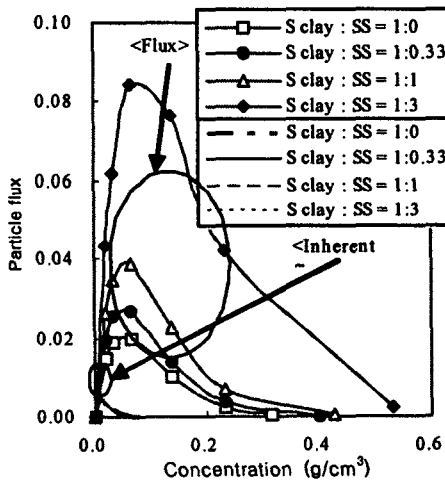
Fig. 5 Particle flux of clays

다. 즉, 같은 농도에서 순수점토의 침강속도는 M, I, K점토의 순으로 느려진다고 할 수 있다.

Fig. 6(a)는 원시료의 양을 고정하고 규사를 추가(0, 20, 40, 60, 80, 100%)하며 시험할 때, 규사가 추가될수록 Flux의 크기가 증가한다. 이는 전체적인 초기농도가 증가함에 따라 Flux가 우측상향으로 커지게 된다. 또한, Fig. 6(b)는 혼합토의 총량을 고정한 경우인데 동일한 전체중량에 대해서는 점토함량에 따라서 침강속도가 달라지므로, 동일한 농도에 대한 속도의 변화에 따라 Flux가 상



(a) Particle flux of constant clay mineral content (SS added, total weight increases)



(b) Particle flux of various clay mineral content (SS content changed, total weight constant)

Fig. 6 Particle flux with clay mineral content ratio (S clay, SS)

향으로만 커지게 된다.

Fig. 6(a)와 (b)의 혼합토에 대한 각각의 Flux로부터 점토만의 Flux를 구하여 비교하면 거의 동일한 하나의 Flux를 갖는다. Fig. 5(b)는 각 점토 시료가 갖는 점토광물조성에 따른 고유 Flux를 나타내며, 이로부터 비점토분과의 함량변화에 따른

Flux를 추정할 수 있다.

3. 혼합토의 Particle flux 추정모델 개발과 검증

가. 점토의 양은 일정하고 비점토의 양이 추가되는 경우

침강속도는 조립토에 영향을 받지 않는다면, 점토의 농도가 일정하므로 침강속도는 일정하다. 비점토를 추가하는 경우에 농도가 증가하고, 그 농도는 점토분에 대한 혼합토의 전체무게의 비만큼 농도가 증가하게 된다. 이 때 혼합토의 Flux는 아래와 같이 계산된다. 이 때, 속도는 점토분의 농도에 대한 침강속도이다.

$$S_{\text{mixed}} = C_{\text{mixed}} \times v_s \dots \dots \dots (1)$$

$$C_{\text{mixed}} = \frac{W_{\text{mixed}}}{W_{\text{clay}}} \times C_{\text{clay}} \dots \dots \dots (2)$$

여기서, S_{mixed} : 혼합토의 Flux, $\text{g}/\text{cm}^2/\text{min}$
 C_{mixed} : 혼합토의 농도, g/cm^3
 W_{mixed} : 혼합토의 무게, g
 W_{clay} : 혼합토중의 점토 무게, g

나. 전체 중량은 일정하고 점토의 양이 증감하는 경우

침강속도는 점토의 농도의 함수라면, 혼합토의 Flux와 침강속도는 점토의 고유한(inherent) Flux로부터 구해진다. 따라서, 침강속도는 Richardson & Zaki 관계로부터 아래와 같이 계산한다.

$$v_{\text{mixed}} = v_0 \times n^r \dots \dots \dots (3)$$

여기서, v_{mixed} 은 점토만의 농도 C 를 갖는 현탁액의 침강속도이며, 침강속도 산정을 위한 v_0, r 은 매개변수이다. n 은 현탁액내 점토만의 간극률을 의미한다.

혼합토의 농도는 전체중량이 일정하므로, 혼합토 내 점토의 양이 달라지더라도 C_{mixed} 은 동일한 값이다. 위 혼합토의 속도로부터 Flux는 아래와 같이 계산한다.

$$S_{mixed} = C_{mixed} \times v_{mixed} \dots\dots\dots (4)$$

다. 점토의 양과 전체중량이 둘 다 증가하는 경우 원래 점토에 대하여 비점토분을 추가하고, 동시에 점토분의 양을 변화시키는 경우에는 농도와 속도를 위의 방법으로 각각 구하여 식(4)와 같이 Flux를 계산할 수 있다.

혼합토에 대한 침강시험으로부터 점토만의 함량에 대하여 Richardson & Zaki의 관계로부터 매개변수 v_0 , r 를 구하면 Table 3과 같다.

따라서, 점토성분에 대한 Flux를 알 경우 비점토분이 섞여 혼합토가 되어도 Flux를 추정할 수 있고, Flux와 농도의 관계로부터 침강속도를 추정할 수 있다. 즉, 혼합토의 Flux로부터 임의의 농도에서 원점과 Flux상의 점을 잇는 선의 기울기가 침강속도에 해당하므로 Flux곡선에 의하여 침강속도 추정이 가능하다. 또한, 점토의 Flux를 알고자 하는 경우는 실내에서 일련의 침강시험과 점토함량을 알기 위한 광물조성분석이 필요하다.

제시한 혼합토의 Flux 추정방법에 대하여, Fig. 7과 같이 S점토의 실험결과를 사용하여 적합성을 검증하였다. S점토에 대한 침강실험중에서 삼교점토의 양을 고정하고 규사(SS)를 100% 추가하여 혼합비를 1:1로 시험한 경우(전체중량은 2배증가)와 혼합토의 양은 고정하고 규사와 삼교점토의 혼합비를 1:1로 한 경우에 대하여 전체중량이 달라지더라도 Particle flux의 곡선은 동일하게 나타났다. 따라서, 제시한 모델은 혼합토의 Flux는 점토의 Flux로부터 구할 수 있는데, 혼합토와 그 속에 포함된 점토의 중량비에 따라 Flux 곡선이 정해지므로 그 비율이 일정하면 같은 Flux 곡선을 갖게 됨이 검증되었다.

Table 3 Settling rate parameter for Richardson & Zaki equation

Samples	v_0	r
S clay	1.1500	265.41
K clay	0.5143	50.184
I clay	1.7483	88.496
M clay	0.5143	50.184
P clay	1.2312	151.53

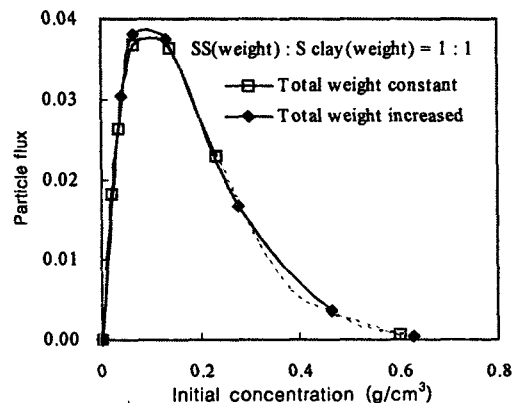


Fig. 7 Verification of estimation method of particle flux

4. 혼합토에서 침강속도 추정모델의 적용

개발한 혼합토의 침강속도 추정모델을 S점토와 I 점토에 대하여 적용하여 보았다. S점토는 점토함량이 22.4%이므로, S점토에 규사를 중량비로 40%를 추가한 경우 혼합토의 농도(C_{mixed})는 점토의 농도(C_{clay})에 비하여 $6.25(=140/22.4)$ 배 만큼 커지고, 속도(v_0)는 일정하므로 Flux(S_{mixed})도 같은 비율로 커진다. 이러한 방법에 의하여 추정된 혼합토의 Flux는 Fig. 8에 나타난 바와 같이 실험결과와 비교적 잘 일치하였다.

I점토에 규사를 추가한 경우, 본 연구에서 개발한 방법에 의해 추정된 Flux와 실내 침강시험으로부터 측정된 값을 비교하여 Fig. 9에 나타냈다. I점

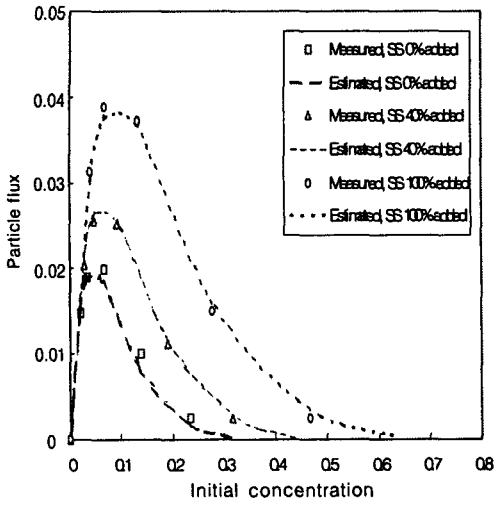


Fig. 8 Particle flux estimation of S clay with addition of SS (clay mineral ; constant)

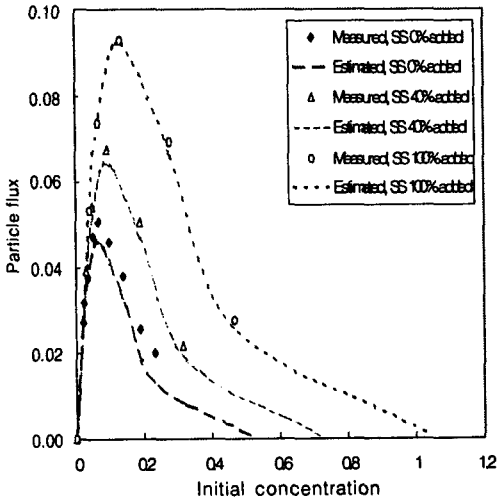


Fig. 9 Particle flux estimation of I clay with addition of SS (clay mineral ; constant)

토는 점토함량이 39.9%이므로, S점토에 규사를 중량비로 100%를 추가한 경우 혼합토 농도(C_{mixed})는 점토의 농도(C_{clay})에 비하여 $5.01(=200/39.9)$ 배 만큼 커지고, 속도(v_s)는 일정하므로 Flux(S_{mixed})도 같은 비율로 커진다. 이러한 방법에 의하여 추정된 혼합토의 Flux는 실험결과와 비교적 잘 일치

하였다.

IV. 결 론

해성점토를 펄프준설하여 매립하는 경우처럼 다양한 크기의 토립자가 섞인 혼합토의 침강속도를 추정하기 위하여 침강시험을 실시하고, 혼합토의 침강속도를 추정할 수 있는 방법을 연구한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 여러 종류의 점토와 규사를 혼합한 혼합토에 대하여 침강실험을 수행하였다. 혼합토의 점토함량을 구하여 그들만의 농도로 환산하여 비교한 결과 점토만의 농도로 침강속도가 잘 표현됨을 알 수 있었다.

2. 혼합토에 대한 각각의 Flux로부터 점토만의 Flux를 구하여 비교하면 거의 동일한 하나의 Flux를 가지며, 각 점토시료가 갖는 고유 Flux로부터 비점토분과의 함량변화에 따른 Flux를 추정할 수 있다.

3. 점토와 혼합토에 대하여 Particle flux 개념을 도입하고 점토의 Flux를 이용하여 혼합토의 Flux를 추정할 수 있는 경험적 모델을 개발하였다. Flux는 다음과 같다.

$$\text{점토의 Flux, } S_{clay} = C_{clay} \times v_s$$

$$\text{혼합토의 Flux, } S_{mixed} = C_{mixed} \times v_{mixed} \text{ 이다.}$$

4. 상기한 침강속도 추정모델을 이용하여 혼합토의 Particle flux를 추정한 결과 실험결과와 잘 일치하였다.

References

1. 김수삼, 1983, 한국서해안(반월지역) 해성토의 침강에 관한 실험적연구, 박사학위논문
2. 김수삼, 1987, 반월지역 해성토의 침강특성에 관한 실험적 연구, 대한토질공학회지, 제3권, 제3호, pp.49-61

3. 송정락, 백승훈, 여유현, 1992, 여천지역 준설·매립토의 침강압밀 특성, 준설·매립·인공섬, 한국지반공학회 92년도 가을학술발표회, pp.47-544
4. 윤상목, 2002, 준설매립토의 침강형태와 분리특성에 관한 연구, 박사학위논문, 서울대학교
5. 이종용, 2000, 준설토의 침강특성에 관한 실험적 연구, 석사학위논문, 강원대학교
6. Been, K., 1980, Stress Strain Behaviour of a Cohesive Soil Deposited, Ph.D. Thesis, Oxford University
7. Chase, R.R.P., 1979, Settling Behaviour of Natural Aquatic Particulates, *Limnology and Oceanography*, Vol. 24, No. 3. pp.417-426
8. 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
9. Kondo, F., Kunitake, M., Takayama, M., and Nogi, Y., 1996, 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)
10. Kynch, G.J., 1952, A Theory of Sedimentation, *Transaction Faraday Society*, Vol. 48, pp.166-176
11. McRoberts, E.C., and Nixon, J.F., 1976, A Theory of Soil Sedimentation, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 13, pp.294-310
12. Migniot, C., 1968, A Study of the Physical Properties of Different Very Fine Sediments and Their Behaviour under Hydrodynamic Action, *La Houille Blanche*, Vol. No.7. pp.591-620
13. Pane, V., and Schiffman, R.L., 1985, A Note on sedimentation and Consolidation, *Geotechnique*, Vol. 35, pp.69-72
14. Richardson, J.F., and Zaki, W.N., 1954, Sedimentation and Fluidsation(I), *Trans. Inst. Chem. Engrs.*, 32, pp.35-53
15. Terzaghi, K., 1925, Erdbaumechanik auf bodenphysikalischer Grundlage, *Franz Deuticke*, Wien, Austria
16. Tan, T.S., Yong, K.Y., Leong, E.C. and Lee, S.L., 1990, Sedimentation of Clayer Slurry, *Geotechnical Engineering*, Vol. 116, No. 6, pp.885-898
17. Toorman, E.A., 1996, Sedimentation and Self-Weight Consolidation : General Unifying Theory, *Geotechnique*, Vol. 46, No. 2, pp.103-113
18. Toorman, E.A., 1999, Sedimentation and Self-Weight Consolidation : Constitutive Equations and Numerical Modelling, *Geotechnique*, Vol. 49, No. 6, pp.709-726