

준설점토의 지지력에 대한 모래혼합효과
SAND MIXING EFFECT FOR THE SUPPORT CAPACITY OF DREDGED SLURRIES

유 건 선, KUN-SUN YOO

(주)동명기술공단 상무이사, Executive Director, Dong Myeong Engineering Consultant, Seoul

SYNOPSIS : When marine clay is hydraulically dredged from seabed and pumped into the pond enclosed by containment dykes, marine clay is mixed and flocculated with water and then settled. At this time, the fines will interact with the water to form a Bingham plastic slurry which has non-Newtonian characteristics. The dredged slurry has different physical properties depending on settling locations and settling depths in the pond and has few hundred percent of water content and almost nil of shear strength. In order to make this condition of the dredged slurry the final formation for public use within a short period, sand spreading method to enhance the support capacity of the dredged slurry is developed. In this paper, the effect of sand mixing into the dredged slurry of this method is analyzed based on reference study, laboratory tests and actual construction results.

1. 서론

범프준설선으로 해상점토를 준설하여, 준설파이프를 통해 Dyke로 둘러싸인 매립장에 준설파이프를 통하여 매립을 실시할 때, 높은 함수비를 갖는 준설슬러리는 응집과정을 거쳐 침강이 일어난다. 이때 준설슬러리의 물성은 non-Newtonian 특성을 지닌 Bingham material의 상태로써 매립장내의 침전위치, 침전깊이 등에 따라 변화하며 전단강도는 거의 없는 상태이다.

이는 해상점토가 토출구에서 배출된 직후, 현탁액 상태에서 여수토설치방향으로 유속의 흐름을 따라 감소되면서 침강이 발생되며, 계속적으로 부하되는 floc에 의해 침강이 가속되어 floc 사이의 간극의 조밀화가 이루어진 상태이다. 이러한 상태는 현탁액 상태에서 준설슬러리로 변화하는 과정으로서 토립자의 자중에 의한 압밀이 발생하게 되며, 시간경과에 따른 간극비의 감소에 의해 전단강도가 증가하게 된다.

현장에서 발생하는 이러한 침강과정은 실내 Column 실험을 통해 실내에서 재현하여, 준설슬러리의 침강 및 자중압밀과정을 깊이에 따른 밀도변화를 측정함으로써 정량적으로 해석할 수 있다. Been(1981)은 10.7kN/m²의 낮은 초기밀도를 갖는 현탁액을 사용하여 시간경과에 따른 침강과 압밀과정에 대한 연구를 실시하였다. 실험결과 현탁액에서 상대적으로 큰 입자가 먼저 침강이 유발되며, 그 위에 지속적으로 작은 입자의 침강이 발생하여 침강이 이미 완료된 하부층은 자중압밀이 진행되었다. 약 6 ~ 8 시간의 경과후에는 현탁상태가 존재하지 않아 전체 침전물이 자중압밀상태임을 알 수 있었다. 한편 Watari(1984)는 실제 준설매립현장에서 자중압밀이 완료된 상태의 단위중량의 변화에 대한 연구를 실시하였다.

침전이 완료되고 자중압밀이 진행중인 이와같은 상태의 준설슬러리 위에 부지를 조성하기 위하여, 최소 2.5m 두께의 모래층을 단기간내에 형성시키기 위한 준설슬러리의 지지력제고 방법으로서 모래살포공법이 개발되었다.

따라서 본논문에서는, 모래살포공법의 핵심개념인 모래혼합효과 즉, 모래가 준설슬러리 속으로 침투하여 혼합되는 효과가 준설슬러리의 지지력에 미치는 영향을 문헌고찰, 실내실험 및 현장시공을 통하여 분석하였다.

2. 이론적 배경

역상 또는 소성상태의 준설슬러리에 모래살포공법을 실시할 때, 공법의 효율성을 확보하기 위하여 모래입자의 준설슬러리 내부에서의 역학적 거동에 관한 메카니즘을 조명해 볼 필요가 있다.

Non-Newtonian slurry 위에 모래입자를 살포하면, 모래입자는 이 슬러리의 물성에 따라 슬러리 내부에서 침강 또는 정지한다. 이와 같은 슬러리 내의 모래입자의 거동은 준설슬러리의 점도(viscosity)와 항복응력(yield stress)과 같은 유동학적 요소(rheological factors)에 의해 결정된다.

Ansley(1967)는 준설슬러리와 같은 Bingham plastic fluid(Tanner, 1985) 내에서 중력에 의하여 침강하는 구의 거동에 대하여 연구하였다. 여기에서 Ansley는 항력계수(Drag Coefficient)와 유동학적 성질과 침강속도 사이의 관계식을 유도하기 위하여, Bingham 소성유체를 통하여 침강하는 입자에 대한 flow model을 제안하였으며, 차원해석과 응력해석으로부터 그 관계식을 다음과 같이 결론지었다.

$$C_D = \phi \left[\frac{Du\rho}{\eta}, \frac{D\tau_y}{u\eta} \right] \quad (1)$$

- 여기서, C_D : 항력계수,
- D : 침강하는 입자의 직경,
- u : 입자의 침강속도,
- ρ : 유체의 밀도,
- η : 유체의 점도,
- τ_y : 유체의 항복응력.

Ansley는 식(1)의 오른쪽의 두항을 한가지 동력학적 파라미터로 결합시킴으로써 항력계수의 관계식을 간단히 할 수 있었다. Ansley에 의해 가해진 flow pattern은 Fig.1.에 도식적으로 예시되었다.

이 가정의 중심적인 생각은 구체에 작용하는 중력에 의해서 소성체에 부과되는 응력분포가 소성체로 하여금 구체를 둘러싸고 있는 포락선내에서 유체가 되도록 한다는 것이다. 이 포락선 안에서 구체와 유체의 움직임은 구체-포락선 시스템이 Bingham 소성체 (순간적, 국부적으로 소성상태와 액성상태 사이를 오가는)를 통하여 움직임에 따라 안정된다.

유체 포락선의 기하학적 형상은 등방소성체내부의 공동에 부과되는 응력에 의해서 생기는 slip-line fields의 중첩으로부터 Ansley에 의해 정성적으로 제안되었다. 여기서 제안된 항복포락선(yield envelope)은 그 중심이 구체의 표면에 있으며 직경이 $\sqrt{2} D$ 인 단면을 갖는 일종의 truncated toroid 이다. Slip-line fields에 대한 일반적인 논의는 Hill(1950)의 연구를 참조바란다.

구체에 작용하는 중력은 수직압력장(normal pressure field)과 유체포락

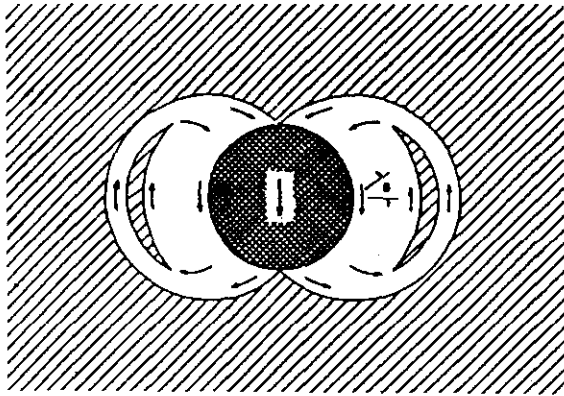


Fig.1. Postulated flow pattern of plastic fluid about solid sphere (After Ansley, 1967)

선(fluid envelope)의 유지와 관련있는 전단응력장(shear stress field)의 합력과 맞서고 있으며, 또한 구체와 포박선 안에 있는 유체의 상대적인 움직임으로부터 야기되는 항력과도 맞서게 된다.

한가지 파라미터로 이 시스템의 동력학적 상태를 설명할 수 있는 방법은 다음과 같다. 구체 주변의 유체는 ρu^2 에 비례하는 관성응력(inertial stresses)에 의해 움직이며, 그 응력은 반드시 점성응력 $\eta u/D$ 와 항복응력 τ_y 에 비례하는 구속응력을 극복해야 한다. 이때 유체의 동력학적 상태는 $(\rho u^2)/(\eta u/D + K\tau_y)$ 의 비에 비례한다. 여기서 K는 비례상수이다. 이 비를 상관관계 파라미터로서 적용시키기 위하여, 비례상수 K 값을 가정하는 것이 필요하다. 이를 위하여 제안된 모델을 고려하여, 항력을 항복응력과 점성응력으로 나타낸다.

Ansley는 항복응력($7\pi^2 D^2 \tau_y/8$)과 점성응력항($3\pi D\eta u$)의 기여도를 계산하여 (분리계산하여), K값을 $7\pi/24$ 로 구하였다. 따라서, Bingham 소성유체에 대해서 제안한 동력학적 상관관계 파라미터는 $(\rho u^2)/(\eta u/D + 7\pi/24 \tau_y)$ 이다. 항력계수를 이 파라미터의 함수로서 Fig.2와 같이 잘못하면, 한개의 곡선 위에 모든 data 점들이 놓인다. Ansley는 이러한 동력학적 파라미터를 사용함으로써 two parameter fluid model (Bingham plastic)의 입자 동력학을 한가지 관계식으로 표현하였다.

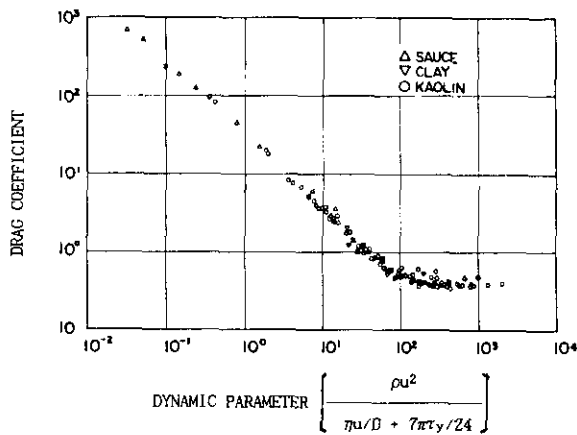


Fig.2. Drag coefficients of spheres in plastic fluids as function of proposed dynamic parameter (After Ansley, 1967)

이러한 항력계수는 $(\rho u^2)/(\eta u/D + 7\pi/24 \tau_y)$ 에 영향을 받으므로, 소성유체의 항복응력, τ_y 의 존재는 주어진 입자의 항력계수에 절대적으로 영향을 준다. 즉, 준설슬러리 내에 약간의 항복응력이라도 존재하게 되면, 이 항력계수의 급격한 증가를 초래한다. 한편 이러한 항력계수의 증가는 모래입자의 침강속도를 낮추어 결국 모래입자를 준설슬러리 내에 멈추게

하며, 이때 모래입자의 무게는 $5\pi^2 D^2 \tau_y/8 \sim 7\pi^2 D^2 \tau_y/8$ 사이의 준설슬러리의 지지력에 의해 지지된다고 한다.

Newtonian 유체에서의 입자침강에 Reynolds수가 항력계수와 관련있듯이, non-Newtonian 유체에서의 입자침강에서는 동력학적 파라미터가 관련있을 수 있다. 동력학적 파라미터에서 항복응력이 영인 경우, 이 파라미터는 Reynolds수가 된다.

3. 실내실험

준설 매립 직후 자중압밀완료 이전의 준설슬러리 상태에서 모래를 살포하였을 때, 모래의 침강특성 및 모래혼합효과를 조사하기 위하여 모래살포 실험, 점토슬러리의 유동학적 실험, 점토와 모래 혼합물의 유동학적 거동에 관한 실내실험을 National University of Singapore 과 Nanyang Technological Institute 에서 수행하였다.

한편 본공사와 실내실험에 사용된 준설 매립토사의 물성은 다음과 같다. 해상 토취장 및 육상 토취장에서 채취한 모래의 체분석 결과 #200체 통과량은 2% 이하이며 조개껍질과 자갈이 약간 섞인 조립질의 모래로서 동일 분류법에 의하면 'SP'로 분류되며, 시공현장 근처의 해저에서 채취한 해상점토의 자연시료의 실내실험결과의 평균값은 Table 1.과 같으며 동일분류법에 의하면 'CH'로 분류된다. 준설 매립에 사용된 모래와 해상점토의 입도분포는 Fig.3.과 같다.

Table 1. Average values of material properties of marine clay.

Water content = 70%	Liquid limit = 84%
Plastic limit = 28%	Plasticity index = 56%
Specific gravity = 2.67	Unit weight = 16kN/m ³
Undrained shear strength = 20kPa	

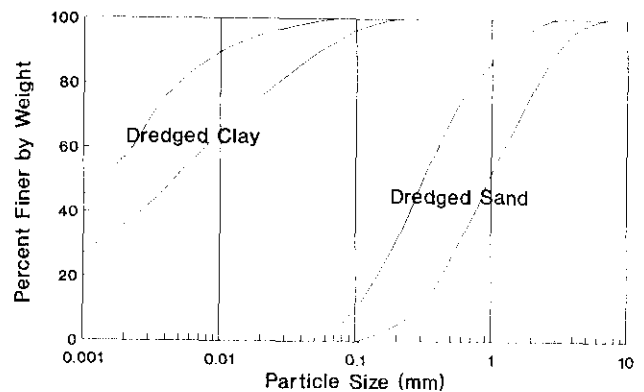


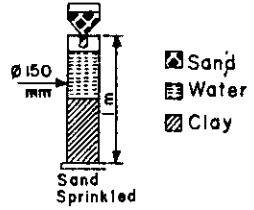
Fig.3. Particle size distribution of dredged clay and sand

3.1 모래살포실험

Lee(1987)는 다른 함수비를 갖는 점토슬러리가 담긴 각각의 실린더 속에, 표면으로부터 모래를 살포하는 실험을 실시하였으며, 실험방법과 그 결과는 Fig.4.와 같다. 이 실험으로부터, 점토슬러리의 함수비가 270%를 초과하게 되면, 살포된 모래입자는 준설슬러리를 통과하여 실린더 바닥으로 침강해버리며, 이 보다 낮은 함수비를 갖는 점토슬러리에서는 함수비에 따라 어느 정도 침강하다 슬러리 내에 멈추고 이후 쌓이는 것을 볼 수 있다. 이러한 사실은, 점토슬러리가 점성저항(viscous drag) 외에 어떤 다른 형태의 강도를 갖고 있음을 보여주고 있다.

3.2 점토슬러리의 유동학적 실험

이러한 강도를 측정하기 위하여, Lee(1987)는 서로 다른 고함수비를 갖는 여러 점토슬러리에 대하여 전단응력 대 변형률관계를 viscometer를 이용



LEGEND
 □ Before Sand Sprinkled
 ○ 5 cm Sand Sprinkled
 △ 10 cm Sand Sprinkled
 + 15 cm Sand Sprinkled

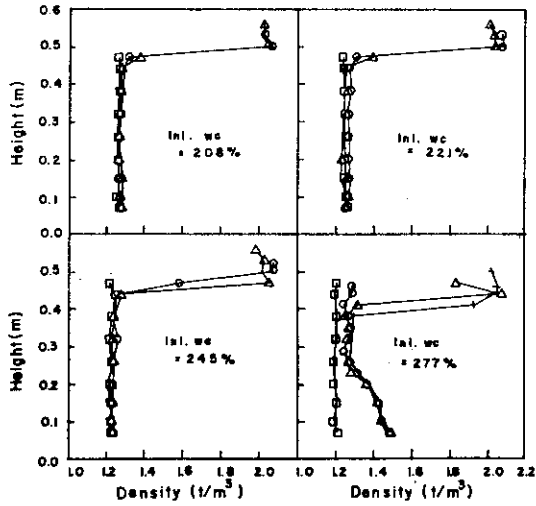


Fig. 4. Density profiles from sand spreading experiment (After Lee, 1987)

하여 측정하였으며, 그 결과는 Fig. 5.와 같다. 이 결과에 의하면, 점토슬러리는 Bingham plastic fluid 또는 yield-power-law material과 같은 거동을 보이고 있다. 이러한 거동을 보이는 점토슬러리 안에서, 직경 2mm 모래입자의 침강특성을 식(2)(Lee, 1987)를 사용하여 분석한 결과는 Fig. 6.와 같다.

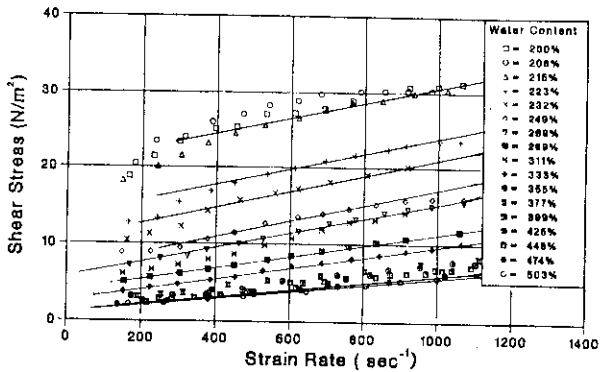


Fig. 5. Shear stress vs. strain rate relations (After Lee, 1987)

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = (\gamma_{sa} - \gamma_{sl})V - f(\eta) \frac{dx}{dt} - g(\tau_0) \quad (2)$$

여기서, m : 모래입자의 질량,
 γ_{sa} : 모래입자의 단위중량,
 γ_{sl} : 점토슬러리의 단위중량,
 V : 모래입자의 부피,
 f : 점토슬러리의 점성도로서, Fig. 5.에서 직선의 기울기,
 τ_0 : 점토슬러리의 전단강도로서, Fig. 5.에서 직선의 절편.

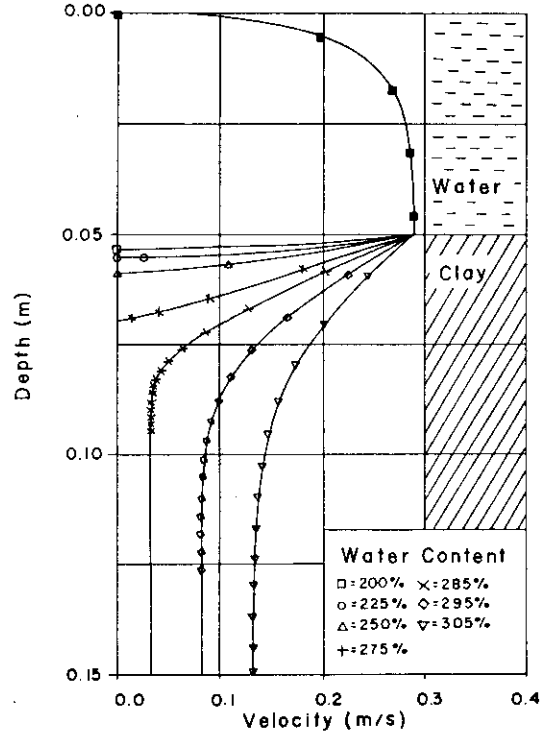


Fig. 6. Predictions from a single particle analysis (After Lee, 1987)

그러나 식(2)는 점토슬러리 내부에서 하나의 모래입자 만의 침강거동을 예측한 식이기 때문에, 여러개의 입자가 동시에 살포되는 일반적인 경우, 모래입자의 상호작용이 고려된 새로운 flow pattern의 일반식에 대한 연구가 계속되어야 할 것이다.

한편 Chew(1989)는 저함수비에서 고태수비에 이르기 까지 폭 넓은 범위의 함수비를 갖는 점토슬러리에 대하여, 150% 미만의 저함수비를 갖는 경우에는 Swedish fall cone test로, 150% 이상의 고태수비를 갖는 경우에는 Brookfield RVT viscometer를 사용하여 점토슬러리의 전단강도를 구하였으며, 그 결과는 Fig. 7.와 같다. 여기서 특기할 만한 사항은 함수비 180%를 전후하여 함수비가 감소함에 따라 전단강도는 급격히 증가하는 것이다. 이러한 현상은 제한한 점토입자 표면에 붙어있는 결합수층의 상호관입이론에 의해 설명될 수 있다. 이 이론에 의하면, 함수비가 감소함에 따라 점토입자(결합수층 포함)를 분리시키는 자유수의 양은 차츰 감소하여, 함수비가 어느 이하로 감소하게 되면 자유수는 더 이상 존재하지 않게 된다. 더 이상의 함수비의 감소는 점토입자 표면에 붙어있는 결합수층의 상호관입을 초래하게 되며, 따라서 double layer를 당기는 인력이 증가하여, 항복응력은 급격히 증가하게 된다.

3.3 점토와 모래 혼합물의 유동학적 실험

Chew(1989)는 점토슬러리에 대한 모래입자의 혼합효과를 조사하기 위하여, 특정함수비(289%와 300%)의 점토슬러리에 모래입자를 건조단위중량의 10, 20, 30, 40%로 각각 완전히 혼합시킨 후, viscometer를 사용하여 항복응력과 점성도를 측정하였으며 그 결과는 Fig. 8.과 Fig. 9.와 같다. 이 결과에 의하면, 모래를 첨가함에 따라 항복응력은 선형적으로 점성도는 지수적으로 모두 증가하는데, 이러한 증가는 최종적으로 점토와 모래 혼

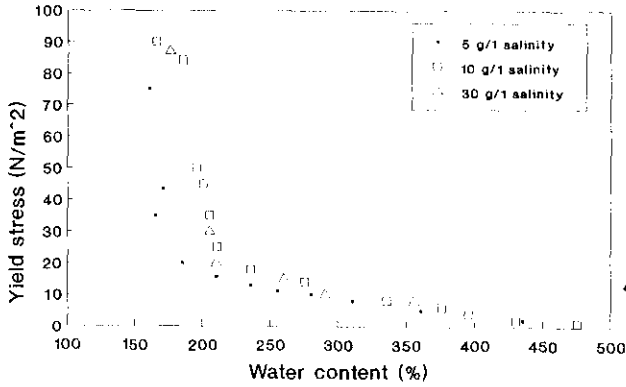


Fig. 7. Relationship between yield stress and water content (After Chew, 1989)

합물의 함수비 감소에 의한 것으로 보인다. 따라서 지속적인 모래입자의 추가혼합은 함수비를 180% 이하로 감소시킬 것이며, 약 150%에서 180% 사이의 함수비에서 혼합물의 강도가 급격히 증가되어, 결국 모래입자는 점토슬러리와 더 이상 혼합(관입)되지 않고 쌓이게 될 것이다. 예를 들면, 초기함수비가 각각 289%와 320%인 점토슬러리에 모래를 건조중량의 50%를 혼합하였을 경우, 항복응력은 각각 Table 2.와 같이 증가한다.

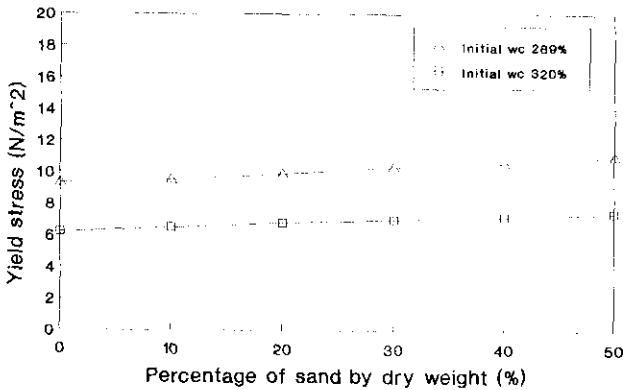


Fig. 8. Effect of sand addition on yield stress (After Chew, 1989)

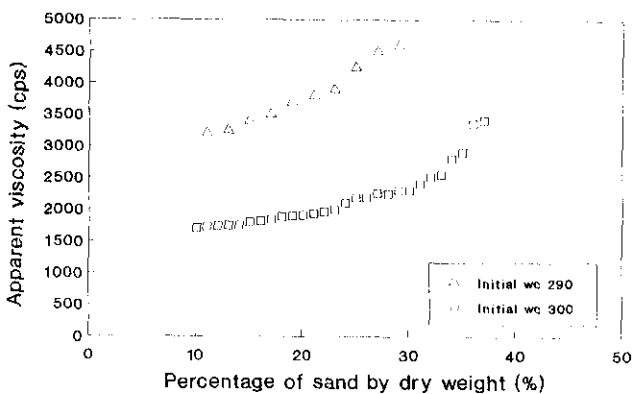


Fig. 9. Change of viscosity with sand addition (After Chew, 1989)

Table 2. Comparison between water contents of clay at yield strength equivalent to clay-sand mixtures

Water content of clay (%)	Yield strength of clay 0% sand (Pa)	50% sand (Pa)	Water content of clay with yield strength equivalent to 50% mix
289 %	9.2 Pa	11.0 Pa	255 %
320 %	6.2 Pa	7.2 Pa	305 %

한편 점토와 모래 혼합물의 함수비를 일정하게 유지하면서 모래의 양을 증가시키면, 모래양의 증가는 혼합물 전체강도의 감소를 초래한다. 그 실험결과와 Fig.10.과 같으며, 이와 같은 감소는 입자표면에 결합수층을 갖는 점토입자의 양이 상대적으로 감소하여, 입자 사이의 결합력이 감소하기 때문인 것으로 보인다.

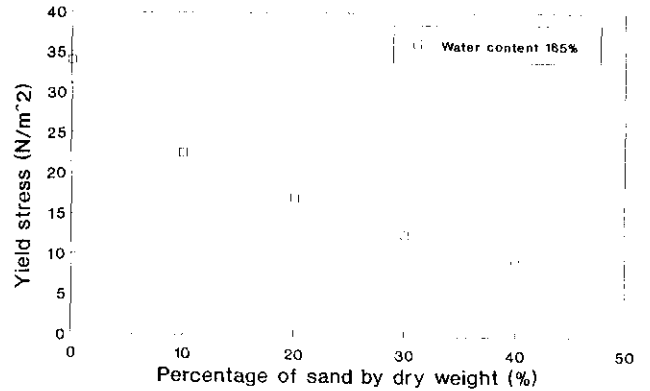


Fig.10. Sand addition with constant water content (After Chew, 1989)

4. 현장시공

본 논문에서는 준설점토의 지지력제고를 위한 모래혼합공법을 실시한 현장에 대한 간략한 시공방법 및 결과를 요약하였다(Yoo, 1990).

매립재를 준설 및 매립하기 위한 장비의 조합은 Fig.11.과 같다. 모래와 해상점토의 준설은 4,000 마력의 펌프준설선으로 하였으며, 준설된 흙은 직경 710 mm, 길이 1,600 m (해상관 350m + 칩실관 350m + 육상관 500m + pond 내의 해상관 400m)의 준설파이프를 통해 ponds 속으로 운반, 매립되었다.



Fig.11. Set-up used for dredging and pumping fill materials

준설, 매립 공정중에서 준설슬러리의 매립과정과 모래살포과정은 다음과 같다.

4.1 준설슬러리의 매립

Ferry Terminal 현장으로부터 그라브준설선으로 준설하여 운반된 해상점토를, 펌프준설선으로 재준설하여 준설파이프를 통해서, Pond 'A'와 Pond

'C'에 고대로 매립하였다. 준설파이프의 토출구(discharge point)는 남측 제방에 가까운 곳으로, Fig.12.와 같이 Pond 'A'에서는 A-1지역에, Pond 'C'에서는 C-1지역에 'Y'관을 사용하여 설치하였다. 또한 토출되는 준설슬러리에 의해 제방 안쪽의 경사면이 유실되는 것을 방지하기 위하여, 토출파이프는 중앙제방으로부터 24m 정도 pond 쪽으로 내밀어 설치하였다. 준설 매립된 슬러리는, Pond 'C'의 경우 토출구로부터 배수구를 향하여 C-1지역에서 C-6지역 및 A-6지역을 통하여 흘러가고, Pond 'A'의 경우 A-1지역에서 A-6지역을 통하여 흘러간다.

토립자의 함유율이 10% 내지 20% 되는 준설슬러리를 매초 약 2m³ 씩 다량으로 pond 안에 준설 매립하기 때문에, 침전된 슬러리의 표면의 표고에 정된 표고까지 이르기 위해서는, 단 한번의 준설 매립에 의해서는 가능하지 않으므로 여러번에 나누어 준설 매립하였다. 즉, pond 안에 해상점토를 가둬서 준설 매립하고, 이 안에 있는 토립자가 침강되도록 하루동안 기다린 후에, 다시 준설 매립하는 등 제방내의 공간에 해상점토의 매립량이 극대화될 수 있도록 준설 매립작업을 계속 반복하였다.

PILOT SCHEME PROJECT

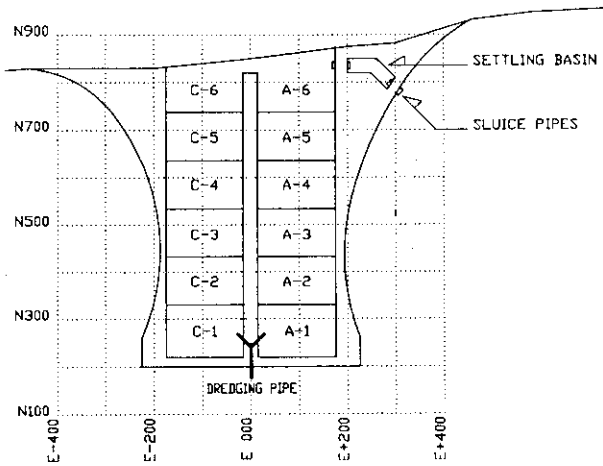


Fig. 12. Plan of segments divided by sand spreading sequence

4.2 모래살포

Pond 'C'에 펌프준설선으로 1차 준설슬러리(C1-C중)를 시공 완료한 후에, 약 2 주일 동안은 준설슬러리를 그대로 방치하여, 침전이 완료되고 자중에 의한 압밀침하가 부분적으로 발생하도록 유도하였다. 이후 펌프준설선으로 모래를 준설하여, 준설파이프를 통해서 Pond 'C'에 2차 모래배수층을 살포하였다.

모래살포는 현장에서 제작한 'Spreading Pipe'(직경 710mm의 준설파이프를 중간에 rubber sleeve로 연결하지 않고, 직접 파이프와 파이프를 약 100m 정도 연결하고, 파이프 상단에 설계된 간격과 크기로 구멍을 뚫어, 모래가 균일하게 분출되도록 하였으며, 또한 구멍이 뚫린 약 100m의 파이프 내에서 처음부터 끝까지 모래가 침전되지 않고 균일하게 운반되도록, 파이프 중간 중간에 Rifle 파이프를 설치하였음)를 현장제작한 유선형 형태의 pontoon (Fig. 13. 참조) 위에 고정시켜 pond 내에 띄운 다음 이 system을 전기winch로 8m/min의 이동속도로 한 지역(폭 100m, 길이 160m)에서 여러번 왕복 이동시킴으로써 모래를 균일하게 살포하였다 (Fig. 14.와 Fig. 15. 참조). 그러나 이 시공법에서는 직경 710mm의 한 개의 단면을 통해서가 아니라 여러개의 작은 구멍을 통하여 모래 섞인 해수가 분출되므로 많은 수두손실이 발생하게 되어서 펌프 내에 많은 압력이 걸린다. 이로 인하여 준설선의 펌프의 작업 RPM을 낮추어 작업하였기 때문에 준설 매립되는 모래양은 시간당 350 m³ 내지 450 m³ 정도로 작업능률은 매우 저하되었다. 이 때 해수와 혼합된 모래는 파이프 상단에 뚫린 구멍을 통해서 공중으로 분사되어 pond 내의 수면 위로 떨어지며 이 system이 1회 이동 시 준설슬러리 위에 뿌려지는 모래층의 두께는 이론적으로 약 1 cm 정도이었다.

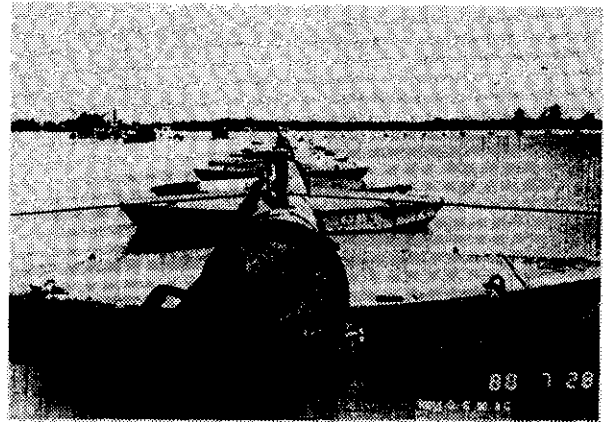


Fig. 13. Sand spreading pipe and pontoons

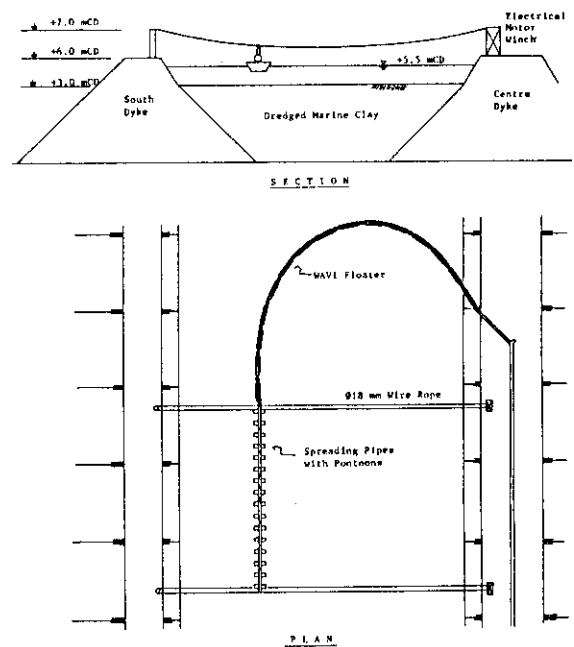


Fig. 14. Layout of sand spreading operation



Fig. 15. Sand spreading under operation

2차 모래배수층의 시공은 수심이 상대적으로 깊은 C-1지역, C-2지역, C-3지역의 세 지역에서만 수행되었으며, 각 지역에서 하루에 2 시간 내지 3 시간 정도 모래 살포작업을 하고 이 spreading system을 이웃 지역으로 옮겨 교대로 작업하였다. 따라서 한 지역에 매 3 일마다 약 5cm ~ 10cm/day 두께의 모래가 뿌려졌으며, 이러한 작업은 각 지역의 준설슬러리의 표면에 평균 약 60cm 두께의 모래층이 형성될 때까지 계속되었다.

이 단계에서 준설슬러리의 단위중량은, 모래를 뿌리기 전에는 표면 가까이에서 약 11 kN/m³, 바닥 근처에서 약 13 kN/m³로 깊이에 따라 단위중량이 증가하였다. 그러나 모래를 뿌린에 따라 준설슬러리의 단위중량은 변화하였으며 그 변화하는 양상은 다음과 같았다. 즉 준설슬러리의 윗 부분은 전단장도가 거의 영에 가까운 상태이므로 그 위에 뿌려진 모래 입자는 그대로 이 부분을 통과해 가라앉아 단위중량이 약 13 kN/m³ ~ 14 kN/m³ 정도되는 위치에 도달하게 되면 더 이상 가라앉지 않고 멈추는 것으로 계속되었다. 따라서 이 위치로부터 표면까지의 준설슬러리의 단위중량은 모래 입자가 섞임에 따라 계속 증가해서 마침내는 표면 근처의 단위중량이 약 13 kN/m³ ~ 14 kN/m³ 이상이 되면 그때부터는 표면에 모래입자가 쌓여서 순수한 모래층을 형성하게 되었다.

5. 현장밀도시험 및 준설슬러리 샘플링

Pond 내에서 해상점토와 모래의 준설·매립이 교대로 진행되는 도중에, 기 준설·매립된 준설슬러리의 현장밀도의 변화와 그 위에 쌓이는 모래층의 상태를 조사하기 위하여, Pond 'A'와 Pond 'C'의 각 지역에서 모래살포공정을 전후로 하여, pond의 각 지역의 정해진 위치에 floating pontoon을 고정시키고, pontoon 위에서 다음과 같은 현장밀도시험과 준설슬러리에 대한 샘플링을 실시하였다.

5.1 현장밀도시험

현장밀도는 'Sediment Density Gauge'를 이용하여 현장에서 직접 측정하였다. 이 측정기는 'Source'(방사성원소 Cesium 137)로부터 감마선을 방출시켜 측정하고자 하는 매체를 통과시킬 때, 그 매체의 밀도에 따라 'Detector'에 도달하는 광전자(Photoelectron)의 수가 변화하는 원리를 이용한 것이다.

현장에서의 시험은, pontoon 위에서 Gamma-ray density probe를 내려, 자중을 이용하여 준설슬러리에 10 cm 간격으로 관입시켜, 각 깊이에서의 준설슬러리를 통과한 광자의 수를 측정했으며, 이 작업을 probe가 더 이상 자중에 의해서 관입이 불가능할 때까지 계속하였다. 이렇게 측정된 수치는 calibration sheet를 통해서 현장밀도로 환산되었으며, 모래 살포공정이 진행됨에 따라 한 장소에서 여러번의 시험을 실시하여 현장밀도의 변화를 측정하였다(Fig.16. 참조).

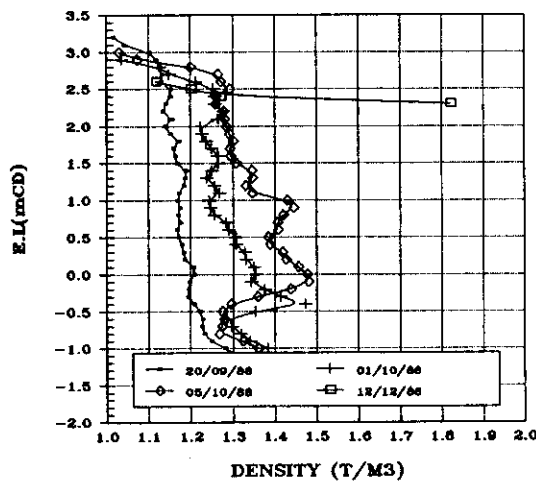
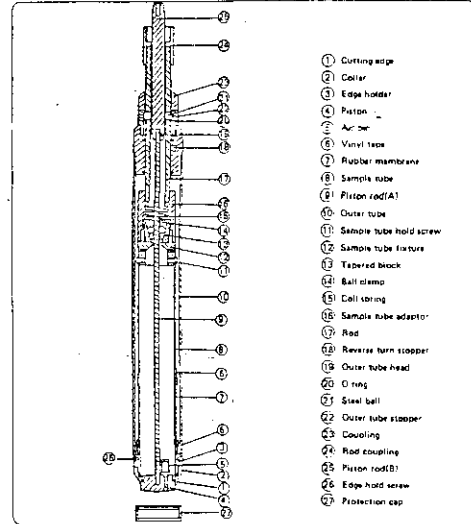


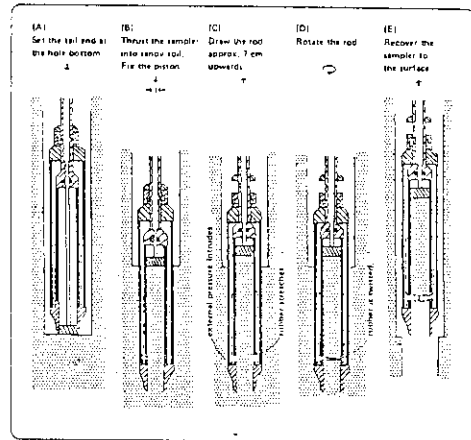
Fig.16. Density and moisture content of dredged slurry

5.2 준설슬러리 샘플링

현장밀도 시험을 실시할 때, 동시에 같은 pontoon 위에서 'Twist Slurry Sampler'(Fig.17. 참조)를 사용하여, 준설슬러리의 자연시료를 채취하였으며 실험실로 옮겨 자연함수비, 현장밀도, 입도분석시험 등을 실시하였으며, 모래살포 전후의 준설슬러리의 입도분포의 변화는 Fig.18.과 같다.



a) Construction and components identification



b) Schematic of the Operating Procedures

Fig.17. Details of Twist Slurry Sampler

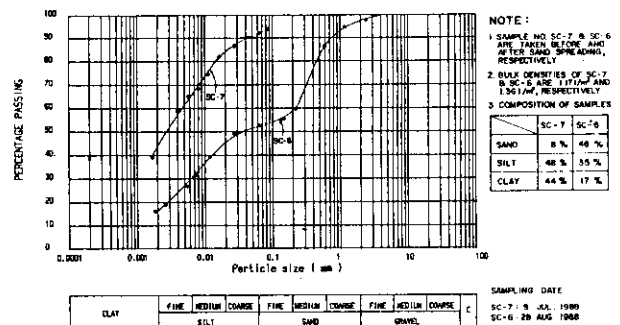


Fig.18. Gradation curves before/after sand spreading operation

6. 결 론

준설점토의 지지력계고를 위한 모래살포공법에 관하여 문헌고찰, 실내실험 및 현장시공을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 준설슬러리내의 모래입자의 동력학적인 거동은 Ansley(1967)가 제안한 모델에서 보인바와 같이, 준설슬러리의 항복응력 발생에 따른 항력계수증가에 의한 모래입자의 침강속도의 감소효과에 영향을 받는다.
- 2) 실내 모래살포 실험결과, 모래입자가 점토슬러리내에서 정지하기 위한 적정의 함수비는 270% 내외이다.
- 3) 점토슬러리의 유동학적 실험결과, 점토슬러리는 Bingham plastic fluid의 거동을 보이고, 항복응력은 함수비 150 ~ 180% 전후로 급격히 감소한다.
- 4) 점토와 모래 혼합물의 유동학적 실험결과에 의하면, 고함수비의 점토슬러리에서는 모래의 함유량이 증가할수록 항복응력과 점도는 증가하나, 점토와 모래 혼합물의 함수비를 일정하게 유지하면서 모래의 양을 증가시키면, 모래의 함유량이 증가할수록 혼합물 전체의 항복응력은 감소한다.
- 5) 현장시공계측결과, 준설슬러리의 윗 부분은 전단강도가 거의 영에 가까운 상태이므로 그 위에 뿌려진 모래 입자는 그대로 이 부분을 통과해 가라앉아 단위중량이 약 $13 \text{ kN/m}^3 \sim 14 \text{ kN/m}^3$ (130 ~ 180%의 함수비에 해당) 정도되는 위치에 도달하게 되면 더 이상 가라앉지 않고 멈추는 것으로 계속되었다.
- 6) 한편 모래입자가 준설슬러리내에 정지하는 함수비가 실내실험에 비해 매우 낮은 것은, 모래살포시 모래입자의 낙하속도가 실내실험에 비해 훨씬 빨랐으며, 살포방법이 실내실험과 같이 균일하지 못하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 실내 모래살포 실험결과 보다는 점토슬러리의 유동학적 실험결과가 현장시공결과와 잘 일치하였다.

References:

- Ansley, R.W. and Smith, T.N.(1967). Motion of Spherical Particles in a Bingham Plastic. *AIChE Journal*, Vol.13, No.6, pp.1193-1196.
- Been, K. and Sills, G.C.(1981). Self-weight consolidation of soft soils: an experimental and theoretical study. *Géotechnique*, 31, No.4, pp.519-535.
- Chew, Y.K. and Sheng, H.P.(1989). Land Reclamation with Soft Clay. A final year project report to Nanyang Technological Institute., Singapore, pp.61-91.
- Hill, R.(1950). *Plasticity*. Oxford Univ. Press, London.
- Lee, S.L., Karunaratne, G.P., Yong, K.Y., Tan, T.S., and Tan, S.A. (1987). Research and Development in Land Reclamation. Seminar on Engineering for Coastal Development, The Kozai Club, Singapore, pp.1-21.
- Fox, T.A.(1977). *An Introduction to Engineering Fluid Mechanics*. 2nd edition. The Macmillan Press. pp.167-168.
- Tanner, R.I.(1985). *Engineering Rheology*. Claredon Press, London. pp.10-16.
- Watari, Y.(1984). Reclamation with clayey soils and method of earth spreading on the surface. Seminar on Soil Improvement and Construction Techniques in Soft Ground., Singapore, pp.103-119.
- Yoo, K.S.(1990). Introduction to PILOT Reclamation Project (New construction method for rapid consolidation of dredged slurry). *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol.38, No.4, pp.1-7. and Vol.38, No.5, pp.30-42.