

준설토의 표층처리에 관한 연구

A study on Surface Treatment of Dredged fill Ground

정 규 향* · 이 문 수 · 이 광 찬 · 윤 식 군 (전남대) · 오 재 화(조선대)

Cheong, Gyu Hyang · Lee, Moon Su · Lee, Kwang Chan · Oh, Jae Hwa · youn, sug gun

Abstract

In Soft ground of south-western coast of our country necessity of marine industrial complex and container facility has been remarkable. Site construction for harbor facility is one of the most urgent problems. Consolidation of dredged fill has become important task. In addition, volume change of dredged fill should be examined carefully. This study dealt with consolidation of dredged fill by PCDDF and in order to secure trafficability of heavy equipment for surface treatment should be studied.

1. 서론

간척초기의 매립은 주로 쇄석을 많이 사용하였지만 지금은 매립기술 및 장비가 발달하여 해상점토를 그대로 준설하여 사용하고 있다. 매립에 사용되는 이상적인 재료는 투수성이 양호하고 압축성이 작은 골재이지만, 주위에서 손쉽게 구할 수 없고 산을 훼손해야 하기 때문에 환경문제가 대두된다. 이러한 경제성과 환경문제를 고려해 현재 활발히 연구되고 있는 매립방법이 준설점토를 이용하는 것이다. 이러한 준설점토는 고함수비, 고압축성 등으로 인하여 압밀에 도달하는 시간이 많이 걸린다. 따라서 준설토의 거동을 예측하는 연구가 이루어져야 한다.

따라서 본 연구는 침전이 완료되고 자중압밀이 진행중인 이와같은 상태의 준설슬러리 위에 부지를 조성하기 위하여 모래층을 단기간내에 형성시키기 위한 준설슬러리의 지지력제고 방법으로 모래살포공법의 핵심개념인 모래혼합효과 즉, 모래가 준설슬러리 속으로 침투하여 혼합되는 효과가 준설슬러리의 지지력에 미치는 영향을 실내실험 및 현장조사를 통하여 분석하였다.

2. PCDDF program 개요

PCDDF Program은 원래 미육군 공병단의 Cargrill에 의해 준설토의 침강, 자중압밀 및 자연증발에 의한 고결 효과를 예측하고 준설매립지 지반의 거동을 파악하기 위해서 개발된 것이며 특히 유한변형 압밀이론에 입각한 준설매립공사에서 준설직후부터 침강, 압밀, 자연증발건조에 의한 준설토의 변위량을 예측하는 현장 Simulation 전문 Program으로 알려져 있다. 이 Program은 준설토의 비중, 초기 간극비, 고결 특성, 기상 및 환경조건, 준설계획과 용량, 지하

수위의 높이, Containment Area의 배수특성 등이 고려되고 필연적으로 입력정수로 사용된다. 이 프로그램에서 사용되는 구성 방정식은 크게 4가지로 분류되는데 즉,

- 1) 지배방정식
- 2) 초기 및 경계조건
- 3) 좌표전환 및 침하관계
- 4) 지중응력 및 간극수압 등이 계산되도록 구성되어 있다. 다시 말하면 (1)은 Gibson, England, Hussey 등의 연구에 의해 다음의 압밀 방정식이 제안되었다.

$$\left(\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1\right) \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right] \left(\frac{\partial e}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{de}{dz} \right] \right) + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \text{----(1)}$$

여기서,

- γ_s : 토립자의 단위중량
- γ_w : 물의 단위중량
- e : 간극비
- $k(e)$: 간극비 함수로서 토립자의 투수계수
- z : 연직재료의 좌표
- σ' : 유효응력
- t : 경과시간

위에서 설명한 (1)식은 준설토 또는 매우 연약한 점성토의 압밀현상을 예측하는데 적합하며 또한 자중압밀 효과, 간극비의 변화에 따른 투수계수, 비선형 간극비와 유효응력의 관계, 큰 변형 등의 효과를 고려할 수 있는 장점이 있다. 또한 임의의 시간에 대한 압밀층 간극비의 변화와 유한 차분법에 의한 계산과정은 다음 (2)식과 같이 주어진다.

$$e_{i,j-1} = e_{i,j} - \frac{\tau}{\gamma_w} \left[\gamma_c \beta(e_{i,j}) + \left[\frac{a(e_{i+1,j}) - a(e_{i-1,j})}{2\delta} \right] \right] \times \text{-----(2)}$$

$$\left[\frac{e_{i+1,j} - e_{i-1,j}}{2\delta} \right] + a(e_{i,j}) \left[\frac{e_{i-1,j} - 2e_{i,j} + e_{i+1,j}}{\delta^2} \right]$$

여기서 τ 는 유한차분요소에서 시간 간격, γ_c 는 토립자의 유효단위중량을 의미하며 $\beta(e)$ 와 $a(e)$ 는 각각 다음 식으로 계산된다. 즉 $\beta(e) = \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{1+e} \right]$, $a(e) = \frac{k(e)}{1+e} \frac{d\sigma'}{de}$ 와 같다. 그리고 (2)의 포화 준설토의 초기조건과 경계조건은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다. 즉 $e(z, t) = e_\infty$ for $t=0$ 이며 또한 준설토는 표면건조와 상단부 경계조건에 지배를 받지 않는다는 가정하에서 다음 식이 성립된다. 즉 $e(l, t) = e_\infty$ for $t > 0$ 예컨대 최하단부 불투수층의 경계조건(원지반상단)은 $\frac{\partial e}{\partial z} = (\gamma_x - \gamma_s) \frac{de}{d\sigma'}$ for $t > 0$, and $z = 0$ 인데 이 식은 준

실토를 비교적 불투수층이나 비압축성 재료로 피복할 때 사용되는 반면에 반불투수(semipermeable) 최하단층은 압축성 재료나 준설토층으로 배수가 허용될 때 다음식이 사용된다.

$$\frac{\partial e}{\partial z} = (\gamma_w - \gamma_s - \frac{\partial u}{\partial \sigma'}) \frac{de'}{d\sigma'} \quad \text{for } t > 0, \text{ and } z=0, \quad (3)$$

연식좌표와 침하 관계는 압밀이 진행되는 동안에 일정한 준설토층 내의 어떤 한점의 높이를 측정하는 좌표 진환으로 사용된다. 즉 임의의 시간 t_1 과 t_2 의 관계에서 침하는 다음 식으로 계산된다. 즉

$$\xi(z_1, t) = \int_{z_1}^0 1 + e(z, t) dz \quad \text{인데 } \xi \text{는 변환좌표이고 } z_1 \text{은 준설토층 내부의 좌표점이다. 또한}$$

투기 후 일정한 시간 경과에 따른 준설토층으로부터 침하는 다음 식으로 추정할 수 있다. 즉,

$$\delta = \xi(h_1, t_1) - \xi(h_1, t_2) = \int_{h_1}^0 [e(z, t_1) - e(z, t_2)] dz \quad \text{이고 } \delta(t) = e_{\infty} l - \int_{h_1}^0 e(z, t) dz \quad \text{이며 높이는}$$

$h = l(1 + e_{\infty})$ 이다. 그리고 준설토 내부의 자중응력의 변화와 간극수압 계산은 다음 식이 이용되며 어떤 점에서의 전응력은 준설토의 단위면적에서 전체의 중량과 같다고 본다. 즉 다시 말하면 다음 식에서 h_1 은 준설토 표면에서 자유배수의 높이를 의미하며 정수압은 (3)식으로 계산되어 전응력 (4)식 계산에 이용된다.

$$\text{정수압 : } u_0(z, t) = \gamma_w [h_2 - \xi(z, t)] \quad \text{-----} (3)$$

$$\text{전응력 : } \sigma(z, t) = \gamma_w [h_1 + \int_{z_1}^z e(z, t) dz] + \gamma_s \int_{z_1}^z dz \quad \text{-----} (4)$$

또한 기준면 $z=0$ 인 면 위의 자유 표면수의 높이는 h_2 로 나타내고, 전체 간극수압은 (5)식으로 계산되며 그리고 준설토층 내부의 과잉 간극수압은 (6)식으로 계산된다.

$$u_w(z, t) = \sigma(z, t) - \sigma'(z, t) \quad \text{-----} (5)$$

$$u(z, t) = u_w(z, t) - u_o(z, t) \quad \text{-----} (6)$$

3. 표층처리공법

3.1 식재에 의한 방법

이 방법은 준설토에서 생존할 수 있는 적절한 식재를 파종하여 있을 통한 증산작용으로 인한 토양내 수분배출의 결과로서 사면의 수리역학적인 효과와 역학적 강도 증가를 기대할 수 있는 방법으로써 국내에서의 연구는 미비한 실정이나 유럽, 캐나다, 미국 등에서 연구가 활발히 진행중에 있다.

3.2 자연건조방식

이 방법은 토제를 소분할하여 준설토층이나 종료시 철거한 배수관리가 이루어질 경우와 많은 소요공기가 주어질 때만이 가능한 공법이다.

일반적으로 미국의 여러 준설토연구자들이 추천한 준설토층의 시간경과에 따른 고결층의 두께를 참고로 소개하면 다음 표-1과 같다. 준설토층에 따라 다소 차이를 보이지만 대략 최소 10cm에서 최대 100cm까지 형성되고 있다. 이것은 다만 현장에서 준설토의 배수관리가 잘 이루어지고

Containment Area가 여러 형태로 분할이 이루어진 경우의 예를 나타낸 것이다.

표-1. 준설토의 증발로 인한 고결 최대 두께

제안자	추천한최대두께(m)	특기사항
Johnson(1977)	1.0	적용할 수 없음
Brown, Thompson	0.3	증발이나 배수관리가 이루어질 때 값임
d' Angremond	1.0	2년 이상 소요 예상됨
U.S Army Engineer District(1974)	0.3	일시적으로 1차 준설과 2차 준설이 병행되고 시험실에서 재현된 값임
Bishop, Vaughn(1972)	0.1	다소 불합리한 고결 두께임

3.3 Sand Spreading 방법

이 방법은 인근 싱가포르의 매립현장에서 주로 활용되는 방법인데 준설매립지 내에 준설 Spreading Pipe를 설치하여 일정한 두께의 모래층을 형성시키므로 전단강도 증진을 기대할 수 있는 유효한 공법이다. 이 공법은 준설 후 상당시간이 경과된 후에도 여러 가지 여건으로 배수 관리가 잘 이루어지지 않은 채 현재 물이 고여있고 또한 오랜 시간이 경과되었으므로 슬러리 입자가 block을 형성하는 침강과정을 지나 현재 자중압밀과정에 있거나 일부 1차원 압밀이 진행되고 있을 것으로 추정되는 지반에서는 고려해 볼 가치가 있다.

3.4 기계적인 방법(Progressive Trench Method : PTM)

이 방법은 수륙양용의 Trench Machine을 이용하는 일종의 Trench 공법으로서 표면배수를 효율적으로 유도하며 트렌치 시공에 따라 지하수위 저하 및 건조층 두께의 가속화를 이루거나 또한 준설토 표면의 안정화를 가속화시킬 수 있는 공법이며 현재 인근 율촌 현장에서 적용, 보급되고 있다. 특히 이 방법은 준설토 투기시 효율적인 투기방법과 투기위치, 배출구의 위치 등을 고려하여 건조시 노출표면이 일정한 구배를 유지하여 표면에 잔류수 없이 효율적으로 자연 배수가 되도록 시공계획 및 관리를 최우선으로 해야만이 효과를 기대할 수 있다고 하나 다른 방법에서도 이점은 동일하다.

3.5 제강슬래그를 포설하는 방법

이 방법은 일본을 비롯한 선진국에서 Sand mat 대응으로 활용되고 있으며, 국내에서도 해안 매립과 같은 대규모 연약지반 처리 공사가 이루어지면서 개량공사에 사용되는 샌드매트용 모래의 대체재료로서의 사용성 가능여부를 놓고 투수성 파악에 주력하고 있다.

4. 사례연구

본 연구는 광양항 2단계 2차 컨테이너 터미널 축조공사 구간 준설현장으로 Containment Area(투기장)는 가로 1.9km, 세로 0.9km이지만 이 가운데 일부 가로 700m, 세로 450m를 분리

하여 분리호안을 축조한 후 준설토 표층을 처리하고 차후 공정으로 연약지반 처리를 계획하고 있다. 본 현장은 준설투기 후 1년 6개월(약500일)이 경과되었어도 표층 고결은 커녕 여러 가지 현장여건상 배수처리가 되지 않고 물이 충전되어 있어 Slurry 상태로 남아있는 상태이다. 설계에서는 준설토 표층의 배수장도가 0.133t/m²에 도달될 것으로 보고 이를 설계에 채택하였으나 현재의 현장상황(0.053t/m²)과는 2.5배의 차이를 보이고 있다. 이때 자연건조방식을 적용할 경우 PCDDF 해석결과, 현재부터 대략 400일 후이나 준설토 상부의 고결층이 형성될 것으로 예상하고 있어 소요 공기내에 해당 공종공사를 이루지 못할 것으로 판단된다. 따라서 준설토 상단표층에 배수층을 형성하여 Surchage로 이용할 경우 인위적인 표층처리를 위해 투수성이 좋은 모래를 준설토 표층 위에 포설하여 수평 배수층을 형성하므로 준설토는 모래와 혼합되고 그후 차츰 표층에 일정한 모래층이 형성될 수 있고 또한 이는 Surchage 하중으로 작용되어 지지력의 증가, 간극수압 상승방지, 유효응력 증가 등이 복합적으로 기대되어 지반공학적 측면에서 판단해 볼 때 결국 PBD 타입장비의 진입 등이 가능할 것으로 판단된다.

4.1 중장비의 주행성 검토

모래 부설로 인한 시공장비의 주행성 여부는 모래 및 준설점토지반1)과 순수모래지반2)로 구분하여 지지력을 검토한 결과가 표-2와 같다.

표-2. 모래부설로 인한 시공장비의 접지압과 허용 지지력 비교

구 분	설계 접지압 (t/m ²)	예상 허용 지지력 (t/m ²)	판 단
모래부설(H=3m) + 소형Dozer	2.6	11.78	OK
모래부설(H=3m) + 소형PDB	10.4	11.99	OK
모래부설(H=4m) + 중형Dozer	3.3	13.04	OK
모래부설(H=4m) + 중형PDB	12.04	12.06	OK
특 기 사 항	주1) 예상 허용지지력은 점토지반과 허용지지력은 점토지반과 모래지반을 구분하여 검토한 결과 낮은 값을 지지력으로 결정하고 전단파괴와 난기안정을 고려하여 안전율 1.5로 나눈 값임에 주의. 주2) 설계 접지압은 충격계수 30%를 고려한 값임.		

4.2 실내실험에 의한 준설토 표층에 모래를 투하할 때 혼합층의 두께 추정

실험실에서 직경 200mm, 높이 300mm인 원형 아크릴판에 슬러리 상태(함수비:150~218%)로 혼합하고 자중 압밀이 완료되었다고 판정한 후 아크릴판 30cm 상단에서 표준사 500g, 800g, 1200g을 시험투하 하여 표준사가 관입된 깊이를 관찰한 결과는 최소 20mm에서 60mm로 측정되었다. 이상의 결과로부터 추측컨데 실제 준설선의 압력이나 배사판의 토출 위치에 따라 많은 차이를 보일 수 있으므로 송출판의 위치를 결정하는 것은 중요한 것으로 판단된다.

4.3 압밀결과로부터 강도증가 산출

정규압밀된 점토층에서 Skempton(1959)은 점성토의 소성지수와 비배수 전단강도의 관계를 다음식과 같이 제안했다.

$$\frac{\Delta c}{\Delta p} = [0.11 + 0.0037 PI]U \text{-----}(7)$$

여기서,

Δc : 강도증가

Δp : 상재하중

PI : 소성지수

U : 압밀도

또한 함수비 감소로써 압밀도를 추정하는 방법은 다음 식과 같다.

$$\Delta W_h = [W_h + \frac{1}{G}] \frac{\Delta h}{h} = -[W_h + \frac{1}{G}] \frac{\delta}{h} \text{-----}(8)$$

여기서, ΔW_h : 함수비 감소량

G : 비중

Δh : 어느 측정된 시점에서 압밀침하량

5. 결론

- 1) PCDDF Program을 이용하여 자중에 의한 침하량과 Desiccation에 의한 체적변화량을 산출할 수 있다.
- 2) 중장비의 주행성(trafficability)을 위한 합리적인 표층처리 두께를 산정할 수 있다.
- 3) 압밀결과로부터 강도의 증가를 추정할 수 있다.
- 4) 위의 결과로부터 가장 합리적인 표층처리 공법을 제시할 수 있다.

참 고 문 헌

- (1) 이 문 수(1999.8) 준설토의 합리적인 시공관리 방안에 관한 연구. pp2~59
- (2) TIMOTHY D. STARK.(1991), "PCDDF", US Army Corps of Engineers
- (3) Soil Mechanics, NAVFAC DM - 7