

초연약지반의 매립 및 지반개량 사례 연구 (I) - 매립

Reclamation and Soil Improvement on Ultra Soft Soil (I) - Reclamation

나영목* · 홍 의** · 한정수***

Na, Yung-Mook · Hong, Eui · Han, Jung-Soo

Abstract

The "Silt Pond" is 180 hectares in size and contained ultra soft slurry-like soil varying between 3 to 20 meters in thickness. Reclamation works in the Silt Pond commenced in the mid of 1990s. A considerable amount of subsurface investigation inclusive of sampling, field vane and density logging tests were carried out prior to the reclamation of the Silt Pond. Since material in the Silt Pond is extremely soft, filling was done by spreading sand with high water content in thin and equal thickness lifts, allowing the stability of the slurry-like foundation. Despite the extreme care taken, failures occurred during the sand spreading phase. A large piece of high strength geotextile measuring 900m x 700m was placed to strengthen the slurry like soil foundation at locations where the ultra-soft soil was found to be exposed. Following the remedial works, the Silt Pond was again reclaimed by sand spreading up to +4.0m CD. The success of the reclamation was confirmed by marine CPT profiling.

Keywords : Ultra soft soil, Shear failure, Geotextile, Marine sand spreading method

요 지

실트폰드는 크기가 55만평의 인공연못 안에 두께가 3~20m의 초연약점토가 침전되어 있었다. 1990년대 중반에 매립이 시작되었다. 매립 전 시료채취 및 다양한 종류의 원위치시험을 수행하였다. 실트폰드에 침전되어 있는 흙은 극도로 연약하기 때문에 모래 포설장비를 이용하여 모래를 전 지역에 균등하게 살포하였다. 대단히 주의 깊은 시공에도 불구하고 모래 포설시 대규모 전단파괴가 발생하였다. 따라서 파괴지역에 보강을 위하여 가로가 900m이고 세로가 700m인 고강도 보강매트를 포설한 후 재차 모래를 포설하여 매립을 완료하였다. 매립의 성공은 수중 콘관입시험으로 확인하였다.

주요어 : 초연약지반, 전단파괴, 토목섬유, 수중모래포설공법

* 정회원 · 현대건설(주) 기술개발원, 부장

** 비회원 · 현대건설(주) 대만 230 현장, 차장

*** 비회원 · 현대건설(주) 광양 컨테이너터미널 3-1단계 공사현장, 과장

1. 서론

도시국가인 싱가포르에서는 1964년 이후 대규모 매립공사를 계속적으로 수행하여 현재 전국토의 15%가 매립으로 확보되었고, 이러한 매립지역은 주택단지, 항만시설 및 공항부지 등으로 사용하고 있다. 현대건설은 1981년 이후 싱가포르 매립공사에 참여하여 현재 싱가포르 국토의 5%에 해당하는 면적을 매립 완료하거나 수행 중에 있다. 1993년 현대건설에서 수주한 창이 동부지역 매립공사는 기존 싱가포르 창이 국제공항의 2개의 활주로에 연하여 제 3의 활주로를 건설하기 위한 부지조성공사로서, 그림 1에 보이는 바와 같이, 공항에 인접한 동부해안 약 150만평을 매립하고 매립부지 전역에 분포하고 있는 연약지반 개량작업, 즉 압밀축진을 위한 연직배수재의 타설과 여성토, 그리고 매립된 모래층을 다지기 위한 동다짐 등이 주요 공정으로 구성되었다. 계획부지의 지반조건은 동북쪽 50%의 면적(A2 area)은 약 30m의 두께를 갖은 점토층이 분포하고 있고, 남서쪽 15%(A1 area)는 비교적 매립조건이 양호한 모래층이 분포하며, 나머지 약 35%는 실트폰드(Silt Pond)로 구성되어 있었다. 본 공사의 공정 중 가장 중요하고 어려운 부분은 실트폰드 지역의 매립으로서, 함수비가 150% 이상이고 전단강도가 거의 0인 상당한 두께의 초연약 점토질 흙이 투기되어 있는 이 실트폰드를 어떻게 경제적이고 성공적으로 매립하느냐 하는 것이었다.

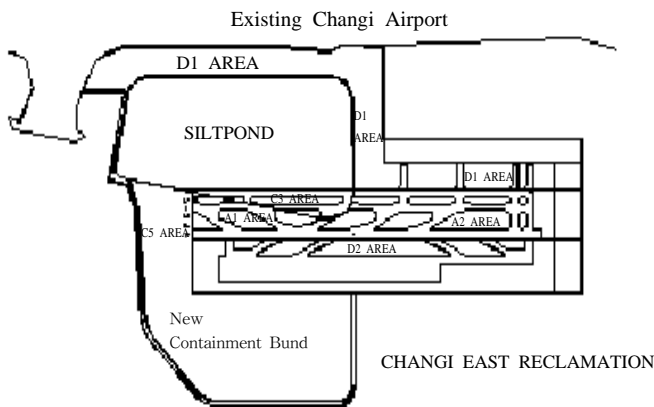


그림 1. 실트폰드 위치도

실트폰드 매립은 그 규모와 지반조건 그리고 시공방법의 특수성으로 인하여 싱가폴은 물론이고 국내외 토질관련업계 및 학계에 비상한 관심의 대상이었다. 실트폰드는 96년에 매립을 성공적으로 끝마친 후 연직배수재를 전 지역에 2~3차에 걸쳐 타설하여 현재는 지반개량이 거의 완료된 상태이다.

본 연구에서는 실트폰드의 매립을 위한 모래포설공법의 적용과 공법적용 중 발생된 문제와 그 해결방법을 중심으로 검토하고자 한다. 초연약지반 개량과 관련한 사례연구는 『초연약지반의 매립 및 지반개량 사례 연구(II) - 지반개량』에서 소개한다.

2. 지반조건

2.1 실트폰드

실트폰드는 그림 2에서 볼 수 있는 것과 같이 길이가 2000m이고, 폭이 750m에서 1050m인 55만평 넓이의 인공으로 조성된 연못의 일종이었다. 원래 실트폰드 지역은 모래지층으로서 기존 창이 공항 매립(1972~1978년)시 이 지역의 모래를 -22.0m CD까지 준설하여 매립재로서 사용하였고, 그 후 1986년 이 주위에 제방을 축조하여 30km 떨어진 육상의 골재 채취장에서 세척시 분리된 점토와 실트질의 세립분을 환경오염 방지차원에서 송수관을 통하여 이곳으로 운반하여 생성되었다. 실트폰드내 평균수위는 +2.5m CD이었고 침전물(슬러리 상태의 연약한 점토)의 해저면은 -1.0m CD에서 -5.0m CD으로 지역에 따라 달랐으며, 그 평균 해저면은 -3.5m CD 정도이었다. 또한 이곳의 침전물 평균두께는 15m 정도이고 아직 자중압밀이 진행 중인 대단히 연약한 슬러리 상태이었으며, 특히 상부 5m는 전단강도가 거의 0에 가까운 초연약점토로서 일반적인 매립방법인 single point discharge 또는 dump filling method 등으로 시공이 불가능하여 특수한 시공방법이 요청되었다.



그림 2. 항공사진으로 촬영한 매립 전 실트폰드

2.2 지방서 매립규정

지방서에 실트폰드의 매립비용은 Lump-Sum의 일종으로 매립방법은 일반적인 사항만 규정되어 있었다. 따라서 세

부적인 시공방법은 시공자가 자유로이 선정할 수 있으나 +4.0m CD 매립 직후 초연약 토질의 상부 표면이 -1.0m CD 이하에 존재하여야 하며 만약 이보다 높게 존재하는 경우 시공자 부담으로 제거하도록 하는 조항이 있어 상부 매립 층에 대한 품질관리를 하도록 하고 있었다. 또한 실트폰드 매립 전에 그림 1과 같이 새로운 제방을 축조하여 또 다른 연못을 인공으로 조성한 후 이 연못에 접하여 있는 점선으로 표시한 실트폰드의 서쪽지역 제방을 -3.0m CD 또는 그 이하로 준설 제거토록 규정하여 실트폰드 매립시 유동성이 큰 초연약층이 이곳을 통하여 새로 조성된 연못으로 빠져나가도록 규정하고 있다.

2.3 지반조사

매립공법의 선정 및 지반개량 계획의 수립을 위하여 광범위한 매립 전 지반조사를 실시하였다. 실트폰드 지역은 대단히 연약한 슬러리 형태의 토질이 상당한 깊이까지 분포하고 있어서, 보링 및 피스톤 샘플러를 이용한 샘플링, 그리고 현장베인시험 등과 같은 일반적인 토질조사와 병행하여 트위스트 샘플러, Nuclear Density Logging, 해상 피에조콘 관입시험 등과 같은 특수한 현장시험을 실시하였으며, 채취된 시료에 대한 실내시험 또한 주의 깊게 실시하였다.

2.3.1 조사장비

(1) 보링 및 피스톤 샘플러

구성토질이 매우 연약한 관계로 시추공의 유지가 일반적인 보링방법으로는 불가능하여 해저면까지 케이싱을 설치하고 피스톤 샘플러를 소정의 깊이까지 강제로 관입시켜 시료를 채취하였다. 보통 상부의 초연약점토는 함수비가 약 150~200%의 유동성이 큰 슬러리 형태이므로 피스톤 샘플러를 이용한 thin wall tube로는 시료채취가 불가능하였으나, 함수비가 100~150%인 하부의 연약한 점토에서는 부분적으로 시료채취가 가능하였다.

(2) 현장베인시험

현장에서 사용된 현장 베인시험기는 노르웨이의 Geonor사의 제품으로 점토의 비배수전단강도를 최대 100kPa까지 측정할 수 있다. 일반적으로 연약한 지반에 대한 조사를 수행할 때는 크기가 큰 blade를 사용한다. 따라서 시험의 정

도를 높이기 위해서 실트폰드에서는 65mm x 130mm의 큰 blade를 사용하였고, 전단강도가 대단히 작은 슬러리 형태의 토질에서는 각 기계부분의 마찰이 시험결과에 큰 영향을 미쳐 이 마찰을 제거하기 위한 별도의 베어링을 설치하고 시험 전 보정을 항상 실시하여 시험의 정확도를 유지하고자 하였다. 현장에서의 베인시험은 해저면까지 케이싱을 설치한 후 매 0.5m 또는 1.0m 간격으로 연속적으로 실시하였다.

(3) Nuclear Density Logging

슬러리 형태의 토질의 연속적인 현장밀도를 측정하기 위하여 Nuclear Density Probe가 사용되었다. 이 측정기는 감마선을 Source(방사선 원소 Cesium 137)로부터 측정하고자 하는 매체로 방사시킬 때, 그 매체의 밀도에 따라 'detector'에 도달하는 감마선의 강도가 변화한다는 원리를 이용한 것이다. 이 장비는 일본의 OYO사의 제품으로 시추공 검층(우물검층, well logging)용으로 개발된 제품을 현장 상황에 적합하게 일부 개조하여 사용하였으며, 매립 전 현장에서의 시험은 소형 폰톤 위에서 시추기를 이용하여 probe에 보링 룯드의 자중을 이용하여 일정한 속도로 관입시켜 매 5cm마다 연속적으로 현장밀도를 측정하였다. 이 현장시험은 probe 및 보링룯드가 더 이상 자중으로 관입이 불가능할 때까지 되었고, 이렇게 측정된 수치는 보정표를 이용하여 현장밀도로 환산되었다. 또한 이 시험은 매립 중에도 시추기를 이용하여 상부 모래층을 강제 압입한 후 모래층의 두께 및 하부 연약점토의 밀도 변화를 주기적으로 측정하는데 이용되었다.

(4) 트위스트 샘플러

토질이 매우 연약하고 함수비가 큰 슬러리 형태인 상부 층에서는 피스톤 샘플러를 이용해서는 자연시료의 채취가 불가능하였다. 따라서 샘플러 안에 고무튜브가 들어있어 소정의 토층에 관입한 후 이 고무튜브의 아래를 비틀어서 시료가 떨어지는 것을 방지하여 채취하는 트위스트 샘플러를 사용하였다. 이 샘플러는 OYO 제품으로 원래 느슨한 모래시료채취를 위해 고안된 샘플러인데, 이를 이용 슬러리 형태의 상부 점토시료를 채취하여 실내 물성시험을 실시할 수 있었다.

기타 매립이 진행되면서 해저면에 콘 관입장비를 내려 실시하는 해상 피에조콘 관입시험과 washing boring으로 현장에서 모래의 두께를 확인하는 등 가능한 모든 방법을 동원하여 광범위한 토질조사를 수행하였다.

2.3.2 지반의 공학적 특성

실트폰드 내에서 매립 전 그리고 후술할 모래포설작업의 초기에 실시한 토질조사 및 실내시험 내역은 다음 표 1과 같으며 그 실험결과를 그림 3과 그림 4에서 도시하였다.

표 1. 현장 및 실내시험 종류

	시험종류	수량
현장시험	1. Boring & Sampling	14 개소
	2. Density Logging	136 개소
	3. Field Vane Test	38 개소
실내시험	1. 단위중량 시험	
	2. 함수비 측정시험	
	3. 액·소성한계 시험	
	4. 비중시험	
	5. 압밀시험	

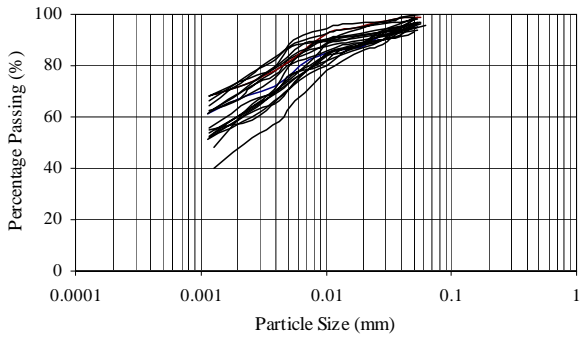
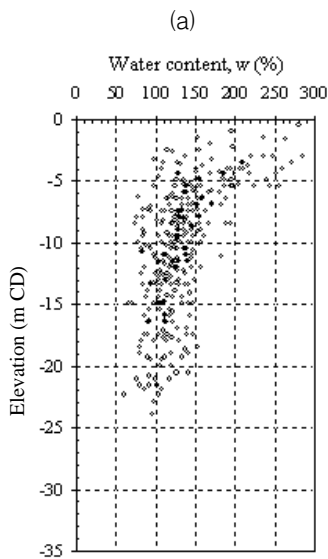
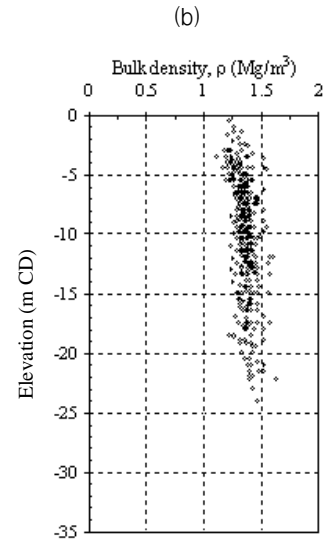


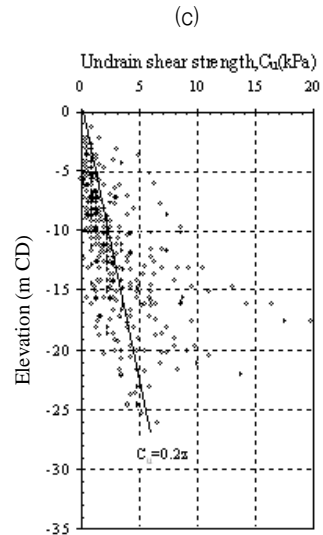
그림 3. 실트폰드 슬러리의 전형적인 입도분포곡선



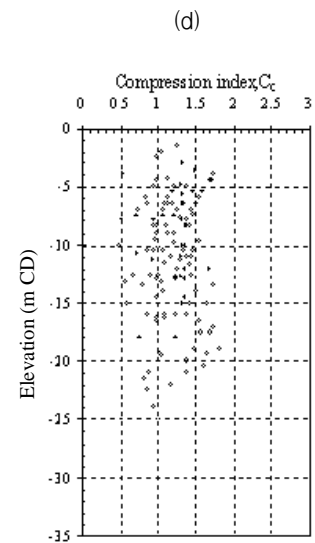
(a)



(b)



(c)



(d)

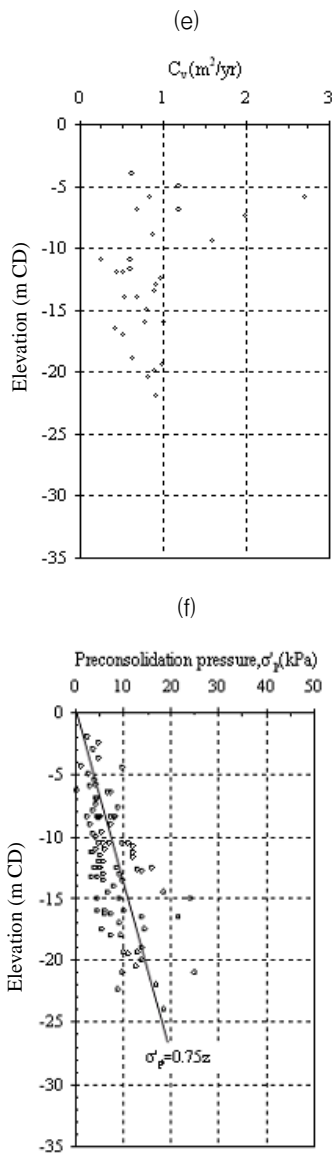


그림 4. 매립 전 토질정수

트위스트 및 피스톤 샘플러로 채취한 자연시료를 이용하여 기본물성 및 압밀특성에 대한 실내시험을 수행하였다. 실트폰트 내 슬러리는 매우 연약한 노란색을 띤 회색의 실트질 점토로 구성되어 있고 통일분류법에 의하면 액성한계와 소성지수가 큰 CH로 분류된다. 실트폰트 슬러리의 전형적인 입도분포곡선은 그림 3에 나타난 바와 같으며 2 마이크로보다 작은 점토분이 약 60% 정도임을 알 수 있다.

그림 4에서 보듯이 슬러리의 물리적 특성은 자연함수비가 상부 층에서 150%에서 250%로 분포되어 있었으며 하부로 갈수록 함수비가 서서히 감소하여 100%에서 150% 정도이었다. 실트폰트의 평균 자연함수비는 약 140%로서 액성한계보다 훨씬 큰 값을 보여준다. 슬러리의 현장밀도는 대략

상부에서 1.25t/m³로 시작하여 깊이에 따라 천천히 증가하거나 혹은 거의 전 깊이가 1.4t/m³ 이하의 낮은 현장밀도를 갖는 대단히 연약한 상태의 지반으로 존재하고 있음을 알 수 있다. 그림 4(c)의 현장 배인시험 결과에서 보듯이, 비배수 전단강도는 상부에서 대략 0.5kPa이며 하부로 내려갈수록 1m당 0.2kPa 증가하며 거의 전 깊이에서 5kPa 미만의 강도를 보인다. 또한 압밀특성을 살펴보면, 실트폰트 내 슬러리는 전 지반의 선행압밀하중은 상재하중보다 훨씬 작아 아직 자중압밀이 끝나지 않은 것으로 나타났으며 압축지수 및 압밀계수는 각각 1.2와 0.8 m²/yr 부근에 있음을 알 수 있다.

3. 수중모래포설공법

3.1 개요

상기 지반조건에서 살펴본 바와 같이 실트폰트의 슬러리는 이제 침전이 완료되어 함수비와 연계된 간극비가 매우 크고, 전단강도가 거의 없으며, 자중압밀이 진행중인 초연약지반으로 판단할 수 있었다. 따라서 이런 초연약지반에서의 매립작업 수행시 심각한 문제가 발생할 수 있다. 즉, 매립 중 아주 약간의 매립 높이 차이가 지반의 파괴를 발생시킬 수 있다. 따라서 실트폰트를 지반파괴 없이 성공적으로 매립하기 위하여 여러 가지 매립방법이 논의되었으며 각 공법의 성공 가능성, 공기, 공비 그리고 현장 적용성 등이 고려되었다. 공사착수 전 여러 가지 매립 공법이 이론적·실용적 측면에서 검토되었고(나영목 등, 1997), 그 중에서 가장 경제적이고 성공 가능성이 높은 모래포설공법을 보강재와 함께 실트폰트 매립에 적용하여 초연약지반을 강제치환 없이 성공적으로 매립할 수 있었다.

3.2 모래포설공법의 현장 적용

모래포설공법이 싱가포르 정부가 본 매립공사 이전에 싱가포르 근해에 산재한 연약점토를 매립재료로 사용해 보자는 계획 아래 일종의 연구 및 시험목적으로 발주한 매립공사에서 당사가 처음으로 현장적용에 성공한 방법(유건선, 1886)으로서, 극도로 연약한 지반이 존재하는 지역에 모래를 얹고 고르게 포설하여 점차적으로 매립하는 방법이다.

모래를 포설하기 위해서 그림 5와 같이 조립식 모래포설바지를 기존 준설 자재인 폰툰(1.8m x 4.5m) 4조와 별도의 프레임을 이용하여 현장에서 직접 설계 제작하였다. 조립

식 폰톤 바지 위에 전동원치 250kw, 280kw를 좌우에 각각 1대와 조정실 등이 설치되었고, 좌우의 이동은 이들 전동원치를 이용하고, 전후의 움직임은 준설 파이프의 펌핑으로 인하여 생기는 반력을 이용하여 60mm 굵기의 PP 로프로

연결된 육상 전면에 있는 불도저에 의해 조절하였다. 조정실에는 DGPS(Differential Global Positioning System)를 설치하여 바지의 위치를 정확히 알 수 있어 중복 및 누락 없이 고르게 모래를 포설할 수 있게 하였다.

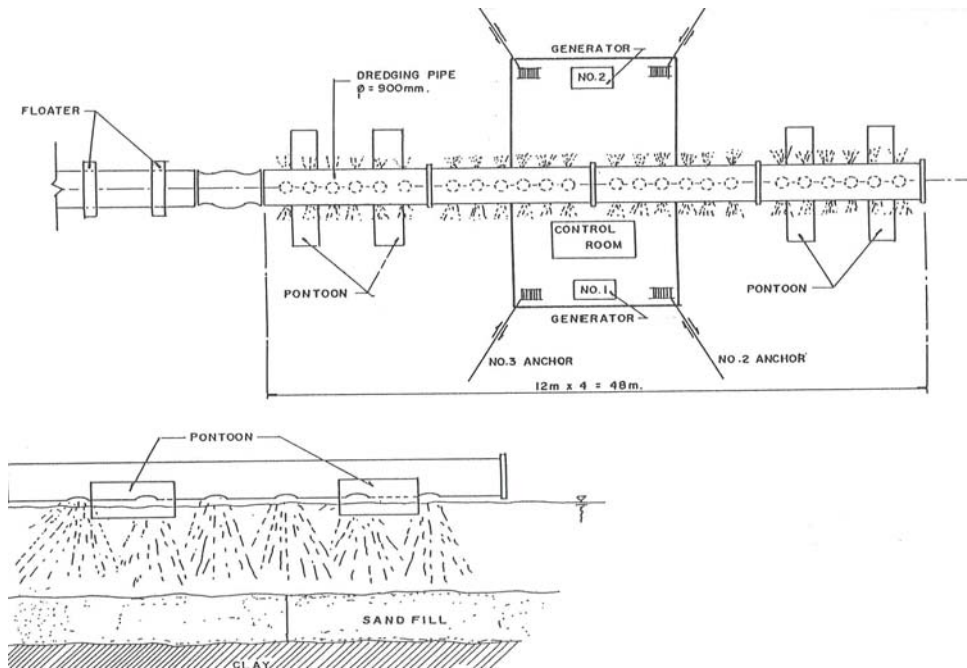


그림 5. 모래살포 바지의 구성도

모래포설작업의 현장적용에 있어서 가장 중요한 사항은 첫째, 전 지역에 걸쳐서 중복이나 누락 없이 골고루 모래를 포설하는 것이고, 둘째는 그 포설두께가 일정하게 유지되어야 한다는 점이다. 첫 번째 사항은 조정실에 장착된 DGPS 시스템을 이용하여 바지의 이동상황을 시간별로 자동 기록하여 조정실에서 바지의 현재 위치를 정확히 파악할 수 있도록 함과 동시에 컴퓨터 모니터를 통하여 이동 경로를 확인할 수 있도록 하였다. 그림 6은 일일 작업 보고서의 일부로써 DGPS 시스템에서 측정된 시간별 바지의 이동 경로를 보여 주고 있다. 두 번째 사항은 준설선에서 통보되는 시간당 모래 준설량을 고려하여 바지의 이동속도를 조절함으로써 그 포설두께를 일정하게 유지하였다. 이를 확인하기 위하여 실트폰드 내에 음향 탐사기(echo sounder)를 장착한 측량선을 상주시켜 주기적인 측량을 실시하였다. 그림 7에 그 결과의 한 단면을 나타내었다.

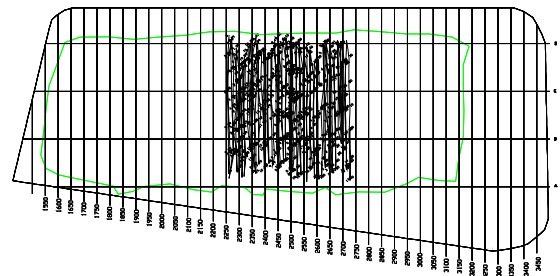


그림 6. DGPS 시스템을 이용한 바지의 軌跡圖

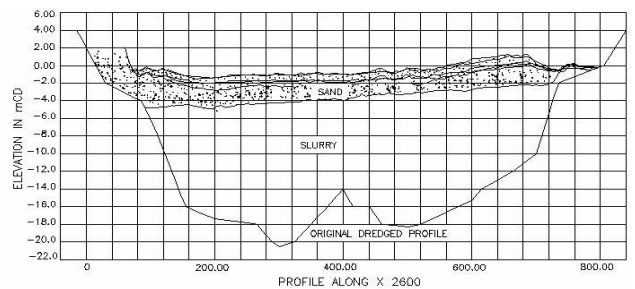


그림 7. 모래살포지역의 음향탐사 결과

3.3 1차 모래포설

실트폰드 매립은 모래포설장비를 이용, 모래를 얇게 전 지역에 고르게 포설하여 모래 두께가 6m 정도에 도달하면 직매립할 것으로 당초 계획되었다. 그러나 전 지역을 6m로 동일하게 포설하는 경우 많은 시간이 소요될 것으로 판단하여 최초 2m 두께를 전 지역에 고르게 모래를 포설하고 그 후 아래 표 2와 같이 CH 2000에서는 더 이상의 모래를 포설하지 않고 CH 3000으로 가면서 모래 두께가 점차 증가토록 포설하여 이 사이 구간에서 완만한 경사가 유지되도록 하였다.

표 2. 모래살포 계획 두께

Chainage	3200	3100	3000	2900	2800	2700	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000
계획모래두께 (m)	6.0	6.0	6.0	5.6	5.2	4.8	4.4	4.0	3.6	3.2	2.8	2.4	2.0

모래포설장비는 동일한 chainage를 따라 움직이며 50m 구간으로 모래를 포설하여 몇 회 이동해서 모래층의 두께가 20에서 40cm 정도에 도달하면 다음 chainage로 50m 이동하여 계속 포설작업을 수행하였다. CH 3000에서 CH 3200 구간의 포설모래층의 두께가 6m에 도달하였을 때 CH 3200에서 매립고 +3m CD의 직매립을 시작하여 실트폰드 내 모래포설작업과 병행하였다. CH 3100에 직매립을 하는 도중 CH 2900과 CH 2600 사이에서 대규모의 전단 파괴가 일어나고 있음이 관측되었다. 그 직후 전단파괴규모를 단시간에 확인하기 위하여 소형 폰툰을 이용, 전 구역을 100m 간격으로 wash boring하여 포설모래층의 두께를 조사하여 그 범위를 파악하였다.

3.4 대규모 전단파괴

대규모의 전단파괴는 여러 가지의 원인이 복합적으로 발생하여 일어난 것으로 판단된다. 특히 해저면의 높이가 일정하지 않아 계획된 균등한 두께로 모래를 포설하는데 어려움이 있었다. 즉 모래포설 작업시 평균수위가 +4.0m CD이었고 포설장비의 흡수(draft)가 1m 정도임을 고려할 때 이런 지역에서 최대 모래를 포설할 수 있는 높이는 +3.0m CD 이었다. CH 2800 지역에서 국부적으로 원지반 해저면의 높이가 +1.0m CD 인 지역이 존재하여 이곳에는 모래포설이 +3.0m CD까지 밖에 할 수 없어 계획두께인 4.5m

보다 작은 2.0m 정도였다. 직매립에 의한 하중의 증가는 유동성이 큰 점토에 횡압으로 작용하여 모래포설로 안정되어 있던 지역으로 전파되어 갔다. 이렇게 전파된 유동횡압은 상당히 먼 지역까지 유동성이 큰 점토 상부에 포설된 모래층을 부풀어 오르게 하는 힘으로 작용한다. 이 힘은 일종의 분출압이며, 이 압이 상재 포설모래층의 무게보다 크게 되면, 유동성이 큰 점토는 이 지점으로 분출하게 된다. 따라서 이러한 현상은 직매립의 영향권 내에서 포설모래층의 두께가 상대적으로 얇은 지역이나, 원호 파괴면의 끝단에서 많이 발생한다.

일단 점토 분출이 시작되면, 이 주변에서는 전단강도가 거의 0인 유동성이 큰 점토의 경우에는 지지력 계산식 중 q_{Nq} 가 제거되므로 인하여 지지력을 상실하게 되며, 지지력을 상실한 점토 위의 모래층은 점토 자체의 지지력으로 지지가 가능한 깊이까지 깊숙이 침강한다. 동시에 분출된 초연약 점토는 침강하는 모래층 위에 쌓인다. 이러한 현상이 발생하게 되면 원인을 제공하였던 직매립 부근 지역은 사면 파괴로 부분적으로 강제치환되며, 이 영향권 내에서는 국부적으로 포설모래층과 점토층이 역전된 지역이 존재한다. 따라서 직매립이나 지속적인 모래포설은 전단파괴 지역의 유동성이 큰 점토를 더 부풀어 오르게 하는 것으로 판단되어 고강도 보강매트를 파괴지역에 포설한 후 재차 모래를 포설하기로 결정하였다.

3.5 보강매트 포설

보강매트의 설계 인장강도는 날줄(warp)과 씨줄(weft) 양방향으로 150kN/m^2 이었으며 그 크기는 가로가 900m 이고 세로가 700m이었다. 그러나 짧은 시간에 동일한 인장강도를 갖는 제품을 충분히 확보할 수 없어 인장강도가 다른 두 종류의 제품을 두 겹으로 그림 8과 같이 포설하기로 결정하였다. 단일 보강매트의 크기로는 지금까지 보고된 것 중에서 가장 크며, 63만 평방미터와 39만 평방미터 두장의 보강매트를 바느질하고 포설하는데 소요된 시간은 105일이었다. 완성된 보강매트 한 장 전체의 무게가 대략 320톤 정도이고 완전히 펼친 상태로 이것을 실트폰드 내로 끌어들이는데는 엄청난 힘이 들고 보강매트 자체도 그 힘을 견딜 수 없을 것이다. 따라서 보강매트의 결합은 포설을 용이하게 하기 위하여 10m 폭의 지그재그 식으로 쌓으면서 바느질을 수행하였다. 이렇게 보강매트를 10m 폭으로 쌓은 경우 보강매트와 지반 및 보강매트와 보강매트 사이의 마찰을 줄여 작은 힘으로 끌어당길 수 있다(나영목 등, 1997). 두장의 보강매

트 결합이 완성된 후 그림 8와 같이 해상관을 이용하고, 전면 육상에서 9대의 불도저를 이용하여 일정한 속도로 보강매트를 끌어당겼다. 사용된 보강매트의 소재가 비중이 물보다 큰 폴리에스테르이므로 끌어당기는 동안 가라앉지 않고 浮游토록 하기 위해서 약 7000개의 2꺽런 용량의 물통을 달았다(그림 9). 보강매트가 전면제방까지 완전히 끌어진 양쪽 끝단에 앵커를 만들고 물통을 제거하여 보강매트가 서서히 가라앉도록 하였다.

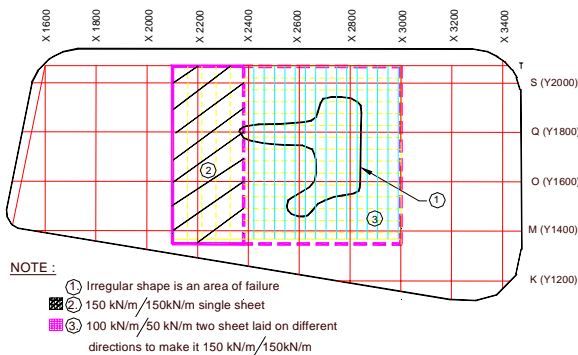


그림 8. 전단파괴지역의 보강재 포설도
(해상관을 이용한 보강매트를 포설)



그림 9. 물통을 이용하여 보강매트를 부유

3.6 2차 모래포설

보강매트를 바느질하고 설치하는 동안 실트폰드의 제방 높이를 +4.5m CD에서 +6.5m CD로 높였다. 보강매트 포설이 완료된 후 수위를 +6.0m CD까지 높여 모래포설장비를 이용, 매 50m 구간마다 모래두께가 20~40cm 정도 되면 다음 구간으로 이동하면서 high spot 지역이 +3.5m CD에 도달 할 때까지 계속 포설하였다. High spot 지역에 포설된 모래의 높이가 +3.5m CD가 되면 주변의 낮은 지

역에 모래를 포설하여 전 지역이 +3.5m CD가 되도록 하였다. 폰툰에서의 모래 포설이 중복이나 누락 없이 일정한 구간을 계획대로 가는지를 확인하기 위해서 모래를 포설하는 동안은 하루 24시간 DGPS를 이용하여 계속 관측하였다. 또한 모래의 두께가 계획대로 포설되고 있는지를 확인하기 위해서 매일 음향탐사를 하였다. 그러데 음향탐사는 해저면 높이의 변화를 거의 정확히 측정할 수 있으나 매회 마다 동일한 선을 따라 측정하는 것이 불가능하므로 그로 인한 오차가 발생하였다. 유동성이 큰 연약한 지반에 갑자기 전단파괴가 일어나 포설된 모래층이 가라앉는 경우는 해저면의 높이의 변화가 크지 않으므로 음향탐사로 그 결과를 판단하기는 쉽지 않다. 이러한 이유들로 인하여 잠수부 3명이 특별히 고안된 측정기구를 이용 전 구역을 50m 구간마다 포설된 모래층의 두께를 매일 직접 측정하였다.

평균 해저면이 +3.5m CD에 도달하였을 때 해상 CPT를 100m 간격으로 실시하여 전 지역에 대한 모래두께를 재확인하였으며, 그 결과를 그림 10에 등고선으로 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 CH 2750 부분의 모래두께가 상대적으로 얇아 수위를 강하하였을 때 유효 상재하중의 증가로 인한 지역별 응력 차이로 슬러리의 유동이 예상되었으며, 이때 가장 취약한 분출 가능지역이 CH 2650~CH 2800으로 판단되었다. 따라서 이 지역에 대한 모래포설을 약 +4.8m CD까지 실시하였고 그 외 지역은 +4.0m CD까지 실시하였다. 이와 같은 취약부분 보강작업을 완료한 후 새로운 폰드 쪽에 연결되어 있는 서쪽 제방에 위치한 배수구를 열어 수위를 낮추었으며, 차츰 수위가 낮아지면서 약 55만평의 연못이 +4.8m CD로 포설된 지역부터 점진적으로 육상이 되어 갔다. 이후 배수를 계속하면서 육상이 된 지역부터 연직 배수재 타설장비를 투입하여 연직배수재의 타설을 실시하였으며, 원활한 배수를 위하여 배수로 작업을 병행하였다.

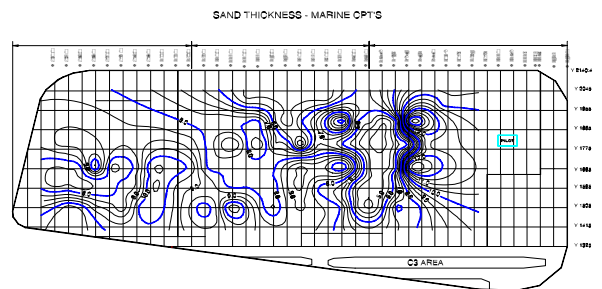


그림 10. 해상 피에조콘 관입시험 조사 결과를 이용 - 살포 모래층 두께 등고선

4. 결 론

실트폰드에 적용된 모래포설공법의 성공여부는 전 지역에 걸쳐서 균일하게 모래를 포설하는 것이었다. 따라서 매립과정 중의 지반조사는 포설된 모래의 두께를 측정하는 것이 그 목적이고, 이를 위하여 매립과정 중에 음향탐사, Nuclear Density Logging, Wash Boring, 잠수부에 의한 모래두께 측정 등을 지속적으로 수행함으로써 모래포설작업이 계획대로 수행되고 있는지를 확인 것이 무엇보다 중요하였다.

공사의 시방서에는 실트폰드와 새롭게 조성된 폰드 사이의 일정 구간을 -3.0m CD 또는 그 이하로 준설·제거토록 하여 실트폰드 매립시 유동성이 큰 초연약층이 이곳을 통하여 자연스럽게 흘러가도록 규정하고 있었다. 그러나 당사는 매립시작 전 이곳에 -3.0m CD 또는 그 이하로 준설·제거하

는 대신에 +2.5m CD에 개폐가 가능한 배수구만을 설치하여 실트폰드 내의 수위를 조절하였으며, 유동성이 큰 초연약층의 실트폰드 밖으로의 유출을 방지하였다. 따라서 기존의 실트폰드 내에서 매립을 성공적으로 수행함으로써 당사로서는 새 폰드로 빠져나가는 슬러리를 기존의 실트폰드 내에서 개량할 수 있어 그 부피만큼의 매립 모래양을 줄이는 경제적 효과가 있었으며, 발주처에 대해서는 새로운 실트폰드의 생성을 막아주므로 인하여 환경 문제를 방지할 수 있어 양자 모두 만족스러운 공사가 수행되었다.

당 현장에서 모래포설공법이 성공함으로써 최근에 대두되는 오염된 폰드, 점토의 준설 및 투기로 인한 해상 환경오염 문제의 해결과 매립 대체재료로서 점토의 활용에 대한 실제 적용 가능한 방안을 제시한 것으로 사료된다.

(접수일자 : 2004년 11월 17일)

참 고 문 헌

1. 나영목, 홍의(1997), 실트폰드 매립을 위한 모래포설공법의 개발 및 적용, 현대건설 창립 50주년 기념논문.
2. 나영목, 심동현, 홍의, 한정수(1997), 초연약지반 매립에서 토목섬유 시공사례, 지반공학회 가을학술발표회, pp. 333~340.
3. 유건선(1986a), Pilot 매립현장소개 1, 대한토목학회지, 제 38권, 제 4호, pp. 1~7.
4. 유건선(1986b), Pilot 매립현장소개 2, 대한토목학회지, 제 38권, 제 5호, pp. 30~42.