

초연약지반 매립에서 토목섬유 시공사례

Use of Geosynthetics for Land Reclamation on Ultra Soft Soil

나영목¹⁾, Yung-Mook Na, 심동현²⁾, Dong-Hyun Shim, 홍의³⁾, Eui Hong, 한정수⁴⁾, Jeong-Su Han

- 1) 현대건설(주) 창이매립공사 과장, Senior Geotechnical Engineer, Reclamation at Changi East
Hyundai Engineering & Construction Co., Ltd.(HDEC)
- 2) 현대건설(주)토목설계실 차장, Head of Geotechnical Engineering Div. in Civil Design Dep.(HDEC)
- 3) 현대건설(주) 창이매립공사 대리, Geotechnical Engineer, Reclamation at Changi East,(HDEC)
- 4) 현대건설(주) 창이매립공사 사원, Jr. Geotechnical Engineer, Reclamation at Changi East,(HDEC)

SYNOPSIS : The need of geosynthetics are rapidly growing in many applications to solve a wide range of soil relating problems. In authors' project, about 20 millions linear meters of prefabricated vertical drains and 1 million square meters of high strength polyester woven textile were used for the stabilization and the reinforcement respectively of the reclamation in the silt pond containing ultra soft slurry-like soil. The successful execution of the reclamation in the silt pond by placement of the largest single piece of high strength polyester woven textile is described in this paper. A geotextile which is believed to be the largest sewn single sheet ever placed in the world, of total area 1,060,000 m² and of tensile strength of 150 x 150 kN/m² was laid in the silt pond to strengthen the foundation soil. This geotextile consisted of the overlapping of 2 large sewn sheets measuring 630,000 m² and 434,000 m² respectively. The design concept and the method of placement of geotextile is also described in this paper.

KEYWORDS : Geotextile, Reclamation, 직포, 부직포

1. 서론

최근 국내외적으로 대단위 항만 및 매립공사가 활발히 진행되면서 연약지반처리 및 보강용으로 토목섬유가 광범위하게 사용되고 있다. 1993년 현대건설에서 수주한 싱가포르 창이 동부지역 매립공사에서 토목섬유가 배수용, 분리용, 여과용 및 보강용 등으로 사용되어 공사를 성공적으로 수행하는데 그 일익을 담당하였다. 본 공사에서 토목섬유의 사용은 연약지반 개량을 위해 수직드레인 20,000,000m를 타설하였고, 방파제 축조시 분리용 및 여과용으로 부직포(nonwoven geotextile)를 25,000m'를 설치하였으며, 해상에 인공적으로 조성된 연못(이하 silt pond로 칭함)내 전당강도가 거의 0에서 3인 초연약지반 매립시 지반보강용으로 직포(woven geotextile)가 1,000,000m' 사용되었다. 여기서는 실트폰드에 지반 보강용으로 사용된 Geotextile에 관해 주로 서술하고자 한다.

실트폰드는 그림 1에서 볼 수 있는 것과 같이 길이가 2,000m이고, 폭이 750m에서 1,050m인 55만평 넓이의 해상에 조성된 연못의 일종이었다. 이 실트폰드는 기존 창이공항 매립시(1972-1978) 이 지역의

모래를 EL(-)22.0mACD까지 준설하여 매립재로서 사용하였고, 그 후 1986년 이 주위에 제방을 축조하고 30km 떨어진 육상의 골재 채취장에서 세척시 분리된 점토와 실트질의 세립분을 환경오염 방지차원에서 송수관을 통하여 이 곳으로 운반하여 생성되었다. 매립전 당시에 이 곳의 수심은 일정하지 않았으며 대략 5m에서 8m정도이고, 침전물은 평균두께는 17m 정도인 아직 자중압밀이 진행중인 대단히 연약한 슬러리 상태이었으며, 특히 상부 5m는 전단강도가 거의 零에 가까운 초연약 점토로서 일반 매립방법으로는 시공이 불가능하므로 특수한 시공법이 요구되었다. 여러 가지 공법이 논의되었으나 그 중 당사에 의해 처음 시도되어 성공한 모래포설공법^{1),2)}을 보강재와 함께 현장에 적용하여 초연약지반을 강제치환 없이 성공적으로 매립할 수 있었다. 본고에서는 실트폰드에 사용된 토목섬유의 설계 및 포설방법을 수록하였다

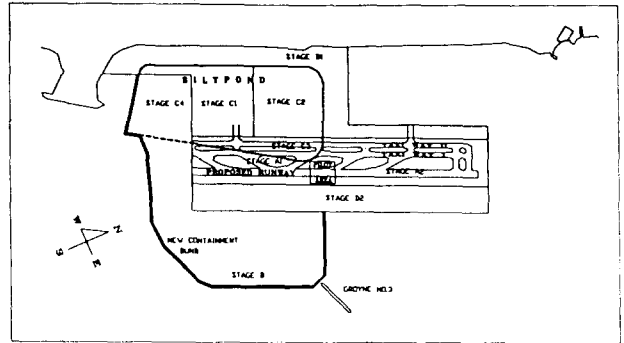


그림 1 장이동부지역 매립공사 계획도

여러 가지 공법이 논의되었으나 그 중 당사에 의해 처음 시도되어 성공한 모래포설공법^{1),2)}을 보강재와 함께 현장에 적용하여 초연약지반을 강제치환 없이 성공적으로 매립할 수 있었다. 본고에서는 실트폰드에 사용된 토목섬유의 설계 및 포설방법을 수록하였다

2. Geotextile

광의의 토목섬유(Geosynthetics)는 협의의 토목섬유인 Geotextile, Geogrid 그리고 Geomembrane 등으로 나눌 수 있다. 이중 Geotextile은 분리재 기능, 보강재 기능과 여과재 기능 등으로 그 우수성이 입증된 토목용 합성재의 대표적인 자재이다. 격자형의 큰 구멍이 뚫린 Geogrid는 비교적 견고하여 사면 및 옹벽 등의 지반 보강재로 많이 사용되며, Geomembrane는 댐, 연못 가까이 터널 등의 지하 구조물의 건설시 차수 및 쓰레기 매립장의 침출수에 의한 지하수 오염방지를 위한 환경오염물질의 격리를 위한 소재로 사용되고 있다. Geotextile의 소재로는 폴리프로필렌(polypropylene)과 폴리에스터(polyester) 두 종류가 통상 사용되며, 제작방식에 따라 직포(woven geotextile)와 부직포(nonwoven geotextile)로 나눌 수 있다. 직포는 고강도이고 항복응력에서의 변형이 작아 보강재에 적합한 반면, 부직포는 저강도이고 항복응력에서 변형이 커 분리재나 여과재로서 적합하다. 폴리에스터를 소재로한 geotextile은 물보다 비중이 크고, 폴리프로필렌을 소재로한 geotextile보다 항복응력에서의 변형이 작다. geotextile에는 다양한 크기의 인장강도를 갖는 제품이 있으며 고강도인 경우 700kPa까지도 상품화되어 있다. 따라서 geotextile을 보강재로 사용할 때는 설계강도에 적합한 인장강도를 갖는 제품을 선택해야 한다. 일반적으로 시제품 한롤(roll)의 크기는 폭이 5m 길이가 90m이므로 거대한 한 장의 매트로 만들기 위해서는 수많은 롤의 이러한 작은 조각을 서로 바느질하여 결합하여야 한다. 바느질 부위의 인장강도 즉 seam strength는 원자재의 인장강도보다 작으며, 그 크기는 통상 원자재 인장강도의 40~50%정도이다. 당현에서는 설계기준과 시공성을 고려하여 폴리에스터를 소재로한 직포를 사용하였다.

3. 실트폰드에서의 고강도 보강재의 적용

시방서에 실트폰드의 매립비용은 Lump-Sum의 일종으로 매립방법은 일반적인 사항만 규정되어 있었다. 따라서 세부적인 시공방법은 시공자가 자유로이 선정할 수 있으나 (+)4.0mACD까지 매립 직후 기존 슬러리의 상부 표면이 (-)1.0mACD 이하에 존재하여야 하며 만약 이보다 높게 존재하는 경우 시공자 부담으로 제거하도록 하는 조항이 있어 상부 매립층에 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 (-)3.0mACD 또는 그 이하로 준설 제거토록 규정하여 실트폰드 매립시 유동성이 큰 초연약층이 이곳을 통하여 새로 조성된 연못으로 빠져나가도록 규정하고 있으며, 매립 중 압력을 받은 슬러리가 새로운 연못으로 이동하면서, 부분적으로 이곳에 쌓여 슬러리의 원활한 흐름에 방해가 될 경우, 이를 제거하여 적절한 수심을 유지토록 규정하고 있다. 이 규

정은 조립 및 해체 할 수 있는 준설선을 사방이 막혀있는 새로이 축조한 제방 안으로 투입 상주시킬 것과, 기존 실트폰드내 슬러리를 새로 조성한 언뚫으로 흘러가게 함으로써 실트폰드 매립시 그에 상응하는 부피만큼의 매립 모래량의 추가 투입을 의미한다.

따라서 실트폰드의 서쪽 제방을 제거하지 않고 고장도 토목섬유를 사용한 모래살포공법이 성공함으로써 새로 조성된 폰드로 빠져나갈 초연약층을 기존의 실트폰드 내에서 개량할 수 있고, 또한 그에 상응하는 부피만큼의 매립 모래량을 줄임으로써 막대한 비용 절감효과를 얻을 수 있었다.

3.1 1차 모래포설

실트폰드 매립은 모래를 얇게 전지역에 고르게 포설하여 모래 두께가 6m 정도에 도달하면 직매립할 것으로 당초 계획되었다. 그러나 전지역을 6m로 동일하게 포설하는 경우 많은 시간이 소요될 것으로 판단하여 최초 2m 두께는 전지역에 고르게 모래를 포설하고 그 후 아래 표 1과 같이 CH 2000 에서는 더 이상의 모래를 포설하지 않고 CH 3000으로 가면서 모래 두께가 점차 증가토록 포설하여 이 사이 구간을 완만한 경사가 유지하도록 하였다.

표 1. 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

모래 포설장비는 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 포설 모래층의 두께가 6m에 도달하였을 때 CH 3200에서 매립고 3m의 직매립을 시작하여 실트폰드내 모래포설작업과 병행하였다. CH 3100에 직매립을 하는 도중 CH 2900과 CH 2600 사이에서 대규모의 전단파괴가 일어나고 있음이 관측되었다. 그 직후 전단파괴규모를 단시간에 확인하기 위하여 소형 Pontoon을 이용, 전구역을 100 m 간격으로 wash boring하여 포설모래층의 두께를 조사하였으며 그 조사결과가 그림 2와 그림 3에서 보여 주고 있다.

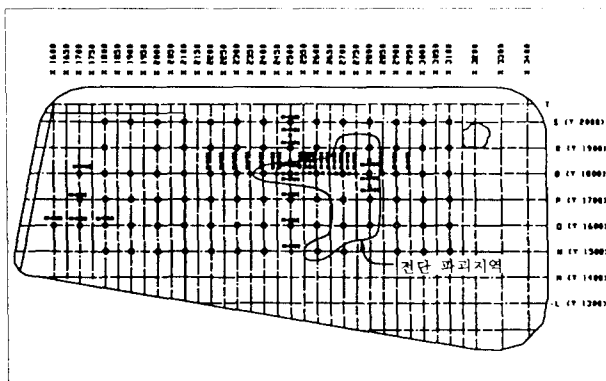


그림 2. Wash boring에 의한 조사 위치와 파괴지역

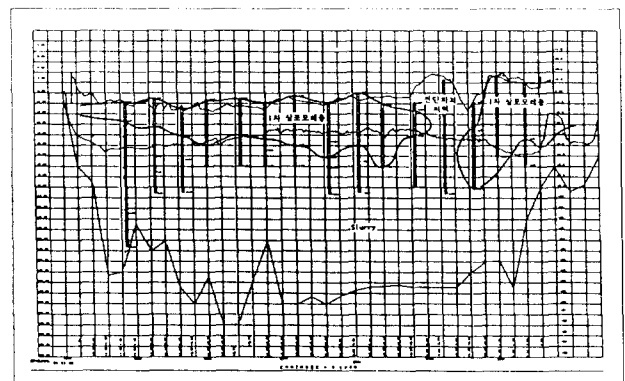


그림 3. Wash boring에 의한 파괴지역 조사 결과

3.2 대규모 전단파괴 원인

대규모의 전단파괴는 여러 가지의 원인이 복합적으로 발생하여 일어난 것으로 판단된다. 특히 해저면의 높이가 일정하지 않아 계획된 균등한 두께로 모래를 포설하는데 어려움이 있었다. 즉 모래포설 작업

시 평균수위가 (+)4.0m이었고 포설장비의 홀수(draft)가 1m 정도임을 고려할 때 이런 지역에서 최대로 모래를 포설할 수 있는 높이는 (+)3.0m 이었다. CH2800 지역에서 국부적으로 원지반 해저면의 높이가 (+)1.0m인 지역이 존재하여 이곳에는 모래포설이 (+)3.0m까지 밖에 할 수 없어 계획두께인 4.5m 보다 작은 2.0m 정도이었다. 직매립에 의한 하중의 증가는 유동성이 큰 점토에 횡압으로 작용하여 모래포설로 안정되어 있던 지역으로 전파되어 간다. 이렇게 전파된 유동횡압은 상당히 먼 지역까지 유동성이 큰 점토 상부에 포설되어진 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 영향권내에서 포설모래층의 두께가 상대적으로 얇은 지역이나, 원호파괴면의 끝단에서 많이 발생한다. 일단 점토 분출이 시작되면, 이 주변에서는 전단강도가 거의 0인 유동성이 큰 점토의 경우에는 지지력 계산식 중 qNq 가 제거되므로 인하여 지지력을 상실하게 되며, 지지력을 상실한 점토 위의 모래층은 점토 자체의 지지력으로 지지가 가능한 깊이까지 깊숙이 침강한다. 동시에 분출된 초연약 점토는 침강하는 모래층위에 쌓인다. 이러한 현상이 발생하게 되면 원인을 제공하였던 직매립부근 지역은 사면 파괴로 부분적으로 강제치환되며, 이 영향권내에서는 국부적으로 포설모래층과 점토층이 역전된 지역이 존재한다.

따라서 직매립이나 계속적인 모래포설은 전단파괴지역의 유동성이 큰 점토를 더 부풀어 오르게 하는 것으로 판단되어 고강도 보강매트를 파괴지역에 그림 4와 같이 두 겹으로 포설한후 재차 모래를 포설하기로 결정하였다.

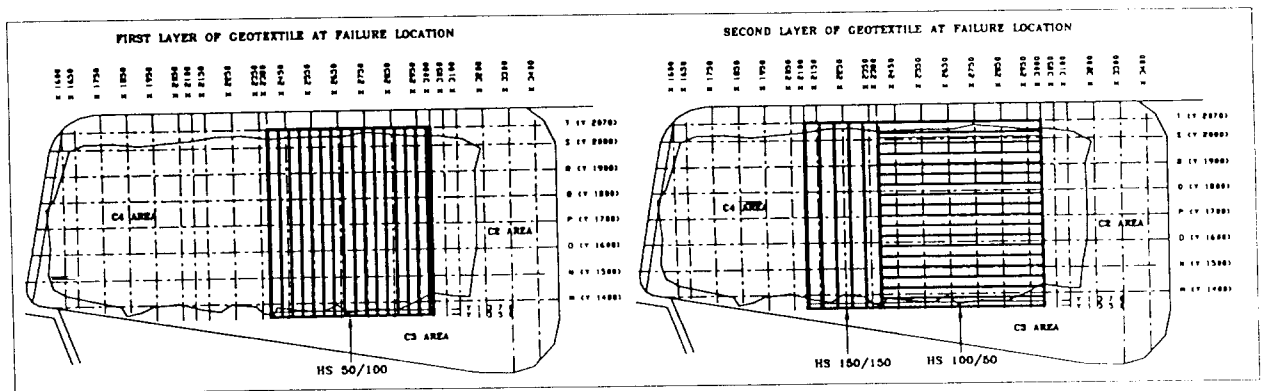


그림 4. Geotextile 포설도

3.3 보강매트 설계

보강매트의 설계에서는 흙과 보강매트 사이의 마찰력, 보강매트의 인장강도, 항복응력에서의 변형을 및 크리이프 등이 고려되어야 한다. 성토제방의 저면에 보강매트를 사용하는 경우 성토하중의 횡압으로 인한 제방저면의 활동을 방지하기 위하여 흙과 보강매트 사이에 충분한 마찰력이 필요하다. 흙과 보강매트 사이에 마찰력이 충분하여 보강매트 표면에서 활동이 방지되면, 기초지반의 지지력부족으로 인한 전단파괴, 사면의 활동파괴 등에 저항할 수 있는 적절한 인장강도가 필요하다. 적절한 인장강도를 갖고 있다 하더라도 항복응력에서 변형률이 너무 크면 소기의 목적을 달성할 수 없는 경우가 있다. 즉 실트폰드에서 변형이 큰 보강매트를 사용하는 경우 전단파괴는 방지할 수 있다 하더라도 유동성 점토의 부분적인 과잉 침하나 융기를 방지할 수는 없다. 이러한 이유들로 인하여 설계 시에는 반드시 상기 사항이 검토되어야 한다.

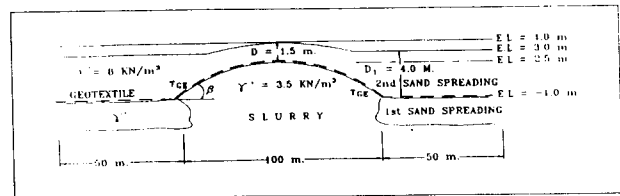


그림 5. 보강재 설계를 위한 기본 개념도

실트폰드에서 보강매트를 설치한 후 재차 모래를 포설할 것으로 결정하였으므로 성토층의 사면형성으로 인한 사면의 활동파괴는 없을 것으로 판단하였다. 따라서 보강매트의 주사용 목적은 포설모래층의 두께 차이로 인한, 즉 지지력 부족으로 인한 전단파괴를 방지함이었다. 보강매트의 지지력 보강효과를 판정하기 위해서 다음과 같이 Terzaghi의 수정 지지력공식³⁾을 이용하였다.

$$P - T_{ge} \cdot \sin\beta = C_u N_c + (\gamma' D + T_{gs} \cdot \sin\beta) \cdot N_q + \frac{1}{2} \gamma_2 N_\gamma \dots \dots \dots (1)$$

여기서,

- P : 모래 성토에 따른 작용하중
- γ' : 깊이 D에서 유효단위중량
- γ_2 : 하부 흙의 유효단위중량
- C_u : 기초 흙의 비배수전단강도
- N_c, N_q, N_γ : Terzaghi의 지지력 계수
- T_{ge} : 보강매트의 인장강도

β : 그림 5에서 정의된 것과 같이($\cong \tan^{-1}(3.5/50) = 4.0$)

For $\phi = 0$,

$$N_c = 5.7$$

$$N_q = 1.0$$

$$N_\gamma = 0.0$$

식(1)은 다음과 같이 표현될 수 있고 ;

$$T_{req} = (P - C_u N_c - \gamma D) / (1 + N_q) \sin\phi$$

$$= (8 \times 4 - 5.7 - (1.5 \times 8)) / (2 \times 0.07)$$

$$= 102 \text{ kN/m}^2$$

안전계수 = $150/102 = 1.47$

위의 계산에서 요구되어진 시방사항은 다음과 같았다.

보강매트의 인장강도 (warp과 welf 양방향)	: 150 kN/m ²
항복응력에서의 변형률	: 10-12%
흙/보강매트의 마찰각	: 최소 30°
EOS(O ₉₅ 값)	: 0.30 mm
연결부위 인장강도(seam strength)	: 100 kN/m ²

3.4 보강매트 시공방법

앞에서 언급했듯이 보강매트의 설계 인장강도는 날줄(warp)과 씨줄(weft) 양방향으로 150kN/m²이었으며 그 크기는 가로가 900m이고 세로가 700m이었다. 그러나 짧은 시간에 동일한 인장강도를 갖는 제품을 충분히 확보할 수 없어 인장강도가 다른 두 종류의 제품을 두 겹으로 그림 4와 같이 포설하기로 결정하였다. 한 장의 크기로는 지금까지 보고되어진 것 중에서 아마도 가장 큰 것인 63만 평방미터와 43만 평방미터 두 장의 보강매트를 바느질하고 포설 하는데 105일이 소요되었다. 완성된 보강매트 한 장 전체의 무게가 대략 320톤 정도이므로 이것을 실트폰드 내로 끌어들이는데는 엄청난 힘이 들고 보강매트 자체도 그 힘을 견딜 수 없으므로, 따라서 보강매트의 결합은 포설을 용의하게 하기 위하여 그림 6과 같이 10m 폭의 지그재그 식으로 쌓으면서 바느질을 수행하였다. 이렇게 보강매트를

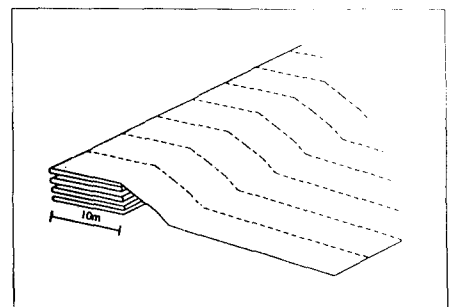


그림 6 보강매트의 준비

10m 폭으로 쌓은 경우 보강매트와 지반 및 보강매트와 보강매트사이의 마찰을 줄여 작은 힘으로 끌어당길 수 있다. 두 장의 보강매트 결합이 완성된 후 그림 7과 같이 해상관을 이용하고, 전면 육상에서 7대의 불도저를 이용하여 일정한 속도로 보강매트를 끌어당겼다. 사용된 보강매트의 소재가 폴리에스터 이어서 그 비중이 물보다 크므로 끌어당기는 동안 가라앉지 않고 浮游하도록 하기 위해서 약 7000개의 2 갤런 용량의 물통을 달았다(그림 8). 보강매트가 전면제방까지 완전히 끌어들이면 양쪽 끝단에 앵커를 만들고 물통을 제거하여 보강매트가 서서히 가라앉도록 하였다.

3.5 보강매트 포설후 2차 모래포설

보강매트를 바느질하고 포설하는 동안 실트폰드의 제방 높이를 (+)4.5mACD에서 (+)6.5mACD로 높였다. 보강매트 포설이 완료된 후 수위를 (+)6.0mACD까지 높여 모래살포장비를 이용, 50m 구간마다 모래두께가 20~40cm 정도 되면 다음구간으로 이동하면서 highspot 지역이 (+)3.5mACD에 도달 할 때까지 계속 살포하였다. highspot 지역에 살포된 모래의 높이가 (+)3.5mACD가 되면 주변의 낮은 지역에 모래를 살포하여 전지역이 (+)3.5mACD가 되도록 하였다. 폰툰이 중복이나 누락 없이 일정한 구간을 계획대로 가는지를 확인하기 위해서 모래를 살포하는 동안은 하루 24시간 DGPS를 계속 관측하였다. 또한 모래의 두께가 계획대로 살포되고 있는지를 확인하기 위해서 매일 음향탐사를 하였다. 그러나 음향탐사는 해저면 높이의 변화를 거의 정확히 측정할 수 있으나 매회마다 동일한 선을 따라 측정하는 것이 불가능하므로 이로 인한 오차가 발생하였다. 유동성이 큰 연약한 지반에 갑자기 전단파괴가 일어나 살포된 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 살포된 모래층의 두께를 매일 직접 측정하였다.

평균 해저면이 (+)3.5mACD에 도달하였을 때 해상 피에조콘 관입 시험을 100m간격으로

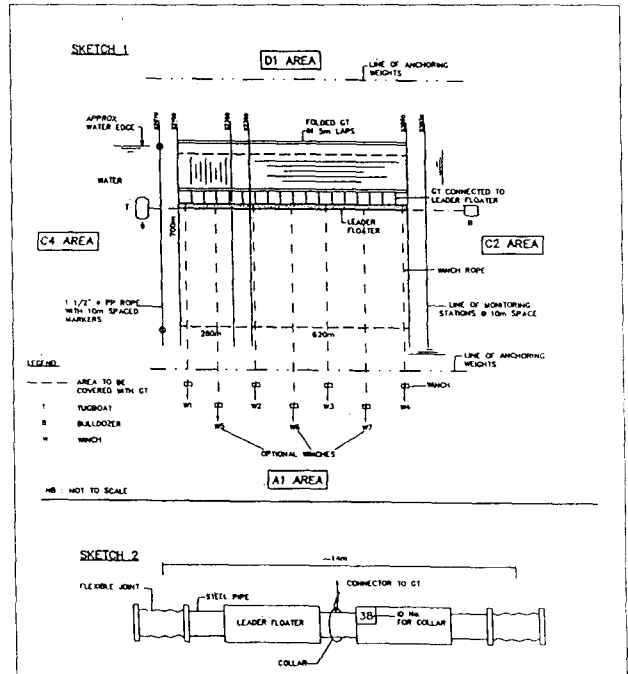


그림 7. 보강매트 시공방법

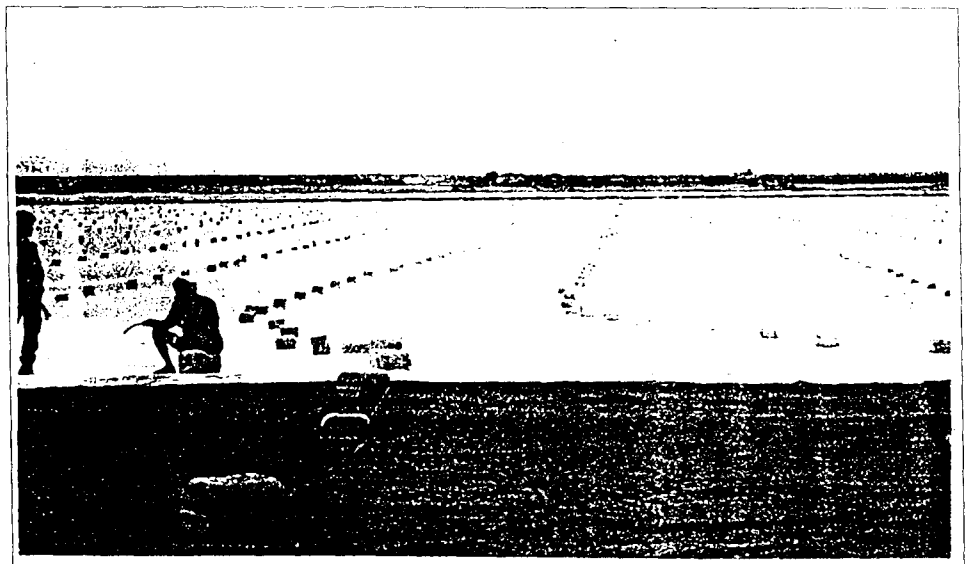


그림 8. 물통을 이용한 보강매트 설치과정

실시하여 전지역에 대한 모래두께를 재확인하였으며, 그 대표적인 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 CH 2750부분의 모래두께가 상대적으로 얇아 수위를 강하하였을 때 유효 상재하중의 증가로 인한 지역별 응력 차이로 슬러리의 유동이 예상되었으며, 이때 가장 취약한 분출 가능 지역이 CH2650~CH2800으로 판단되었다.

따라서 이 지역에 대한 모래살포를 약 (+)4.8mACD까지 실시하였고, 그 외 지역은(+4.0mACD까지 실시하였다. 이와 같이 취약부분 보강작업을 완료한 후 새로운 폰드 쪽에 연결되어 있는 서쪽 제방에 위치한 배수구를 열어 수위를 낮추었으며, 차츰 수위가 낮아지면서 약 55만평의 연못이 (+)4.8mACD로 살포된 지역부터 점진적으로 육상이 되어갔다. 이후 배수를 계속하면서 육상이 된 지역부터 수직배수재 타설장비를 투입하여 수직배수재의 타설을 실시하였으며, 원활한 배수를 위하여 배수로 작업을 병행하였다.

배수작업과 거의 동시에 시작된 수직배수재의 타설이 수위 강하 후 약 4개월여 만에 C4 지역을 제외한 전지역에 걸쳐 완료되었을 때, 최초 (+)4.8mACD로 보강된 CH 2750 지역은 이미 약 2m의 침하가 발생하면서 가장 낮은 지역으로 변화였다.

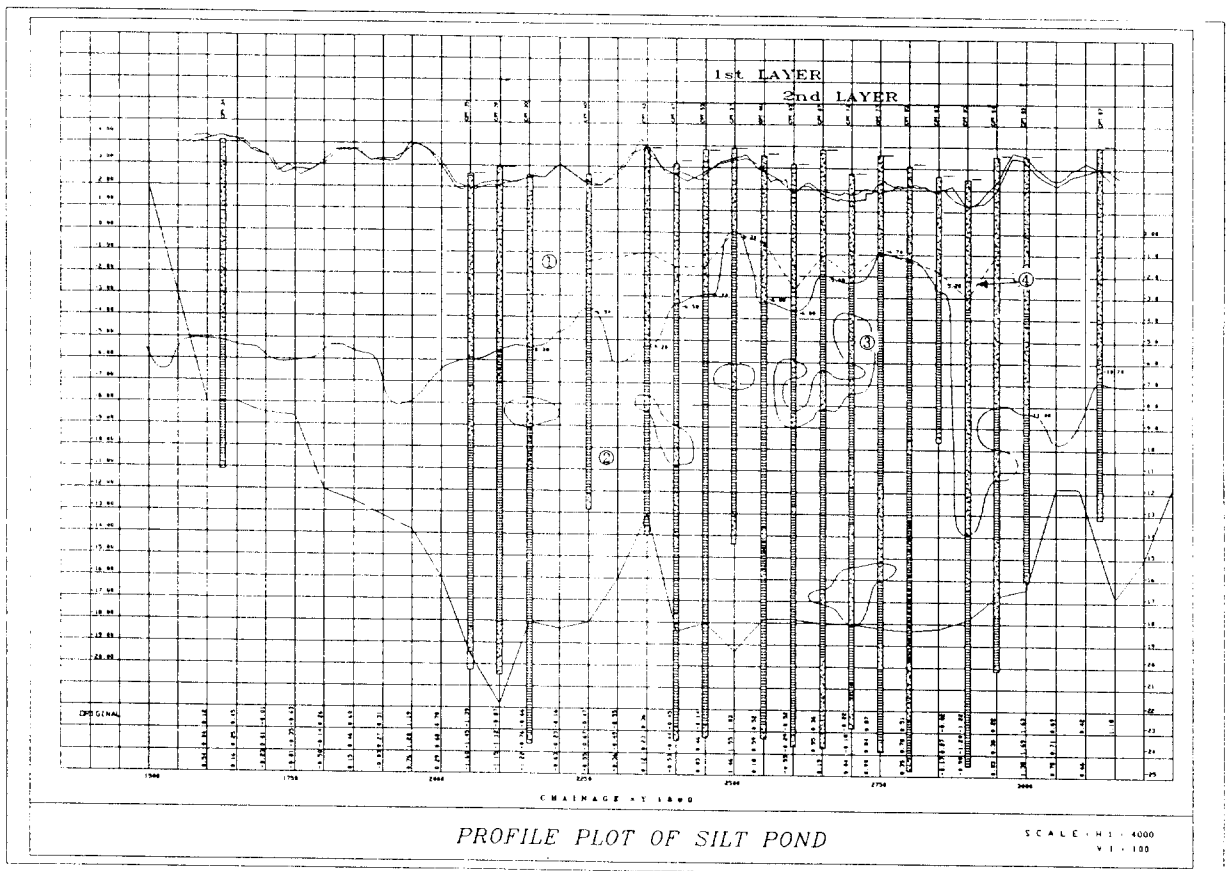


그림 9. 해상 피에조콘 관입시험 결과에 의한 지반 단면도
 주) ①살포된 모래층, ②슬러리 층, ③전단파괴로 침강된 모래층
 ④피에조콘 관입시험 결과에 나타난 토목섬유의 위치

4. 결론

당 현장에서 모래살포공법을 보강재와 함께 최초로 대규모 현장에 적용하여 실트폰드의 매립이 현재 (+)4.0 mACD까지 성공적으로 수행 완료하였으며, 현재 지반개량의 일환으로 수직배수재를 실트폰드 전 지역에 걸쳐 타설 완료하고 부분적으로 여성토 중에 있다.

이 공법의 성공은 아래와 같은 여러 가지 가능성을 시사하고 있다.

1. 현재 국내외에서 계획중이거나 진행중인 공업단지의 조성, 간척사업, 인공섬 축성 등의 대규모 매립 사업과 관련하여 기존의 매립재료인 모래의 비용이 점차 높아져 매립대체 재료로서 점토의 활용방안이 논의되고 있는 바, 이러한 목적을 위하여 모래살포공법을 보강재와 함께 적용함으로써 점토로 매립된 초연약지반에서도 강제치환 없이 매립할 수 있어 막대한 비용 절감효과를 기대할 수 있다.
2. 새로운 항로준설이나 기존항로를 유지하기 위한 준설 등으로 야기되는 준설토의 처리과정에서 당현장의 사례를 적용한다면, 준설토의 투기과정에서 발생할 수 있는 실트분 확산 등의 환경오염문제를 방지하고 준설토를 매립재료로서 사용하는 이중의 효과를 얻을 수 있다.

당 현장에서 보강재를 이용한 모래살포 공법이 성공함으로써 최근에 대두되는 점토의 준설 및 투기로 인한 해상 환경오염문제의 해결과 매립 대체 재료로서 점토의 활용에 대한 실제 적용 가능한 방안을 제시한 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 유건선(1996a), "Polot 매립현장 소개 1", 대한토목학회지, 제 38권, 제 4호, pp. 1~7.
2. 유건선(1996b), "Polot 매립현장 소개 2", 대한토목학회지, 제 38권, 제 5호, pp. 30~42.
3. 조삼덕(1985), "Geotextile(토목섬유)의 기능에 따른 설계", 건설기술 연구속보 10월호, pp. 46~51.