

초연약지반의 매립 및 지반개량 사례 연구 (II) - 지반개량

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

나영묵* · 김희홍** · 권덕우***

Na, Yung-Mook · Kim, Hee-Hong · Kwon, Duk-Woo

Abstract

The 'Silt Pond' is 180 hectares in size and contained ultra soft slurry-like soil varying between 3 to 20 meters in thickness. Soil improvement work in the Silt Pond commenced by installing vertical drains in the mid of 1996, following completion of sand spreading up to +4.0m CD. Prior to soil improvement work in the main area of Silt Pond, experimental tests including laboratory tests with a large diameter consolidation cell and pilot tests were carried out to investigate the deformation behavior of an extremely soft soil. Due to its high compressibility, large strain usually occurred in the initial stage of deformation does not comply with Terzaghi's one dimensional consolidation theory. Taking into consideration experimental test results, the soil improvement works were carried out in main area of Silt Pond containing ultra soft soil. This paper presents the case study on improvement of ultra-soft soil.

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

요 지

본 연구에서 실트폰드는 크기가 55만평의 인공연못 안에 두께가 3~20m의 초연약점토가 침전되어 있었다. 수중모래포설공법을 이용하여 +4.0m 까지 매립을 완료한 1996년에 PBD재를 타설하면서 지반개량을 시작하였다. 지반개량전 대형토조시험과 시험시공을 포함하는 대규모 사전실험을 통하여 초연약지반의 침하특성을 분석하였다. 재하초기에 대변형이 발생하는 초연약지반은 Terzaghi의 1차원 압밀과 달리 탄소성 거동을 보였다. 이러한 사전실험에 얻은 결과를 토대로 초연약지반의 지반개량을 성공적으로 수행하였다. 본 연구에서는 초연약지반에서의 지반개량의 성공사례를 제시한다.

주요어 : 초연약지반, 전단파괴, 토목섬유, 수중모래포설

* 정회원 · 현대건설(주) 기술개발원, 부장

** 비회원 · 현대건설(주) 대만 230 현장, 과장

***비회원 · 현대건설(주) 광양 컨테이너터미널 3-2단계 공사현장, 대리

1. 서론

일반적으로 압축성이 큰 연약한 점성토 지반을 매립하여 주택단지나 공항부지로 조성할 때, 매립에 따른 하중증가로 인해 큰 압밀침하가 예상된다. 이때 압밀침하를 단기간에 완료시켜 시공후의 잔류침하를 최소화하고 지반의 전단강도를 증가시키기 위하여 다양한 연직배수재를 이용한 선행재하공법이 널리 적용되고 있다. 통상 사용되는 연직배수재의 종류로는 샌드드레인, PBD(Prefabricated Board Drain)와 팩드레인 등이 있다. 당 현장 실트폰드의 초연약지반 개량에는 싱가포르에서 연약지반 처리방법으로 주로 사용되고 있는 PBD를 이용한 선행재하공법을 적용하였다.

본 시공을 하기 전, 대형토조를 제작하여 모형 시험을 통해 일반 점성토 지반에 사용되는 PBD재가 본 사례 연구 지역의 슬러리 형태의 지반에 적합한지 여부를 판단하였고 또한 모형시험에서 선정된 PBD재를 이용하여 실제 현장에서 시험시공을 수행하였다. 시험시공 중에 얻은 계측자료를 분석하고 그 결과를 토대로 본 시공을 계획하여 실트폰드 내의 초연약지반 개량을 성공리에 수행할 수 있었다.

본 연구에서는 『초연약지반의 매립 및 지반개량(I)-매립』에 이어 연약지반 개량작업, 계측작업 및 토질시험결과를 이용한 지반개량효과 평가에 대하여 정리하였다.

2. 실내모형시험

본 시험의 주요목적은 압밀에 따른 변형률이 40~45% 정도 되는 대단히 연약한 슬러리 상태의 지반에 일반 점토 지반에 사용되는 PBD재 코어의 배수능력, 필터의 투수성 등의 성능이 시간에 따라 지속적으로 발휘할 수 있는지를 평가하기 위한 것이다. 본 시험을 수행하기 위하여 그림 1과 같은 대형토조를 제작하여 모형시험을 수행하였다.

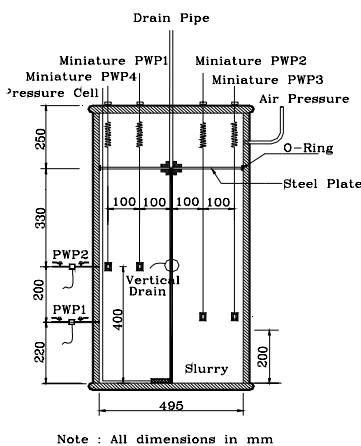


그림 1. 소형 간극수압계 및 지중계를 장착한 대형 압밀시험기

2.1 시험방법

그림 1에서와 같이 대형토조의 가운데 PBD(Colbondrain : CX-1000)를 설치하고 실트폰드에서 채취한 슬러리에 바닷물을 섞어 함수비를 130%로 맞춘 후 압밀시험기 안에 붓는다. 그런 다음 슬러리 안에 존재하는 공기 방울을 제거하기 위하여 잘 짓는다. 하중 재하는 압축공기를 이용하여 100kPa~200kPa의 하중을 단계적으로 가하고 이때 대형 토조 안에 소형 간극수압계, 하중측정장치 및 침하측정장치 등의 계측장치를 설치하여 시간에 따른 간극수압 및 변형률을 연속적으로 자동 측정할 수 있도록 하였다.

또한 시험 종료 후 압밀된 슬러리 시료에 대해 압밀시험, 함수비 측정, Fall cone 및 Lab vane을 이용한 전단강도 시험을 실시하여 PBD로부터 떨어진 거리에 따른 역학적 성질의 변화를 고찰하였다.

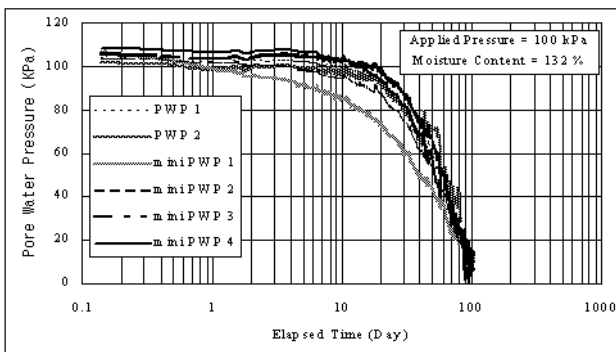
2.2 시험결과 및 분석

2.2.1 침하 및 간극수압 측정

하중 재하 기간 중 측정된 침하 및 간극수압(그림 2 참조)을 살펴보면 하중 재하 후 초기 10일 동안 침하량은 변형률 20%에 해당되는 150mm가 발생된 반면 간극수압의 소산은 변화가 없거나 매우 적은 것으로 측정되었고 따라서 유효응력의 증가가 발생하지 않았다. 이는 높은 함수비의 슬러리

와 같은 흙의 경우 거의 액체상태와 같은 매우 느슨한 구조로 결합되어 있어 외부하중으로부터 발생한 과잉간극수압을 재하 초기에는 점토입자로 전달할 수 없기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 이런 경우 침하가 어느 정도 발생한 후 입자 상호간의 결합이 점차 밀착되면서 점토입자를 통한 응력 전달이 발생하는 것으로 판단되었다. 또한 침하량 및 간극수압으로부터 산정된 압밀도 비교 결과, 침하량으로부터 산정된 압밀도가 상대적으로 매우 높게 나타났으며 이러한 현상은 자연상태의 점토에 대한 Hansbo 등(1981)의 연구 결과와도 잘 일치하는 것으로 판단된다.

(a) 간극수압 측정 결과



(b) 침하량 측정 결과

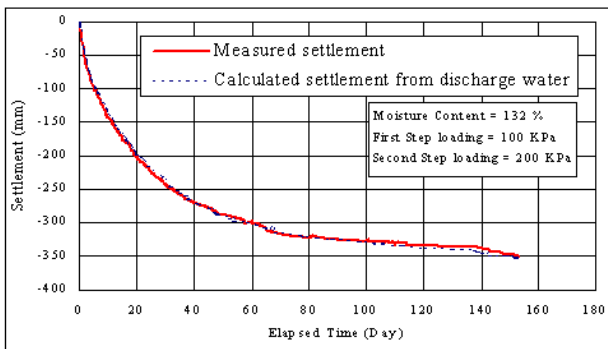


그림 2. 간극수압 및 침하량 측정 결과

2.2.2 육안관찰

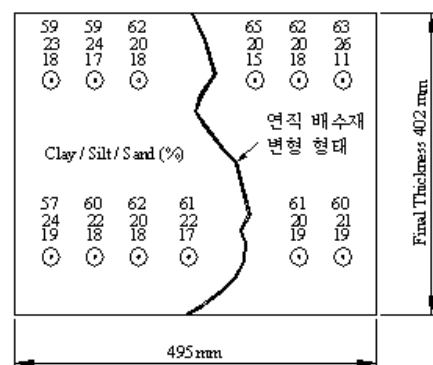
압밀시험 종료 후 시험기를 해체하여 배수재의 변형 형태 및 배수재 내부의 육안관찰을 실시하였다. 그림 4에서와 같이 약 46%의 수직 변형이 발생했음에도 불구하고 연직배수재는 비교적 완만한 굴절형태를 보여주었으며 배수재의 필터 및 코어는 전반적으로 깨끗한 상태를 유지하고 있었다(그림 3 참조). 또한 시험기간 동안 배출수의 관찰결과 압밀초

기에는 현탁액이 배출되었으나 시간이 지나면서 맑은 물이 배출되었다. 이는 압밀 초기에는 배수재 주변에 있던 미세 입자들이 필터를 통과하여 빠른 속도로 흐르는 물과 함께 배출 되었지만 이와 동시에 필터 주변으로 이동된 입자들이 Soil filter cake을 형성함으로써 이후 미세 입자들의 필터 통과를 방지한 것으로 판단된다. 이후 회수된 연직 배수재를 이용하여 통수량 시험을 실시한 결과, 배수재의 필터 및 코어가 여전히 깨끗한 상태로 유지되고 있음에도 불구하고 압밀시험 이전에 비해 통수량이 약 30%로 급격히 감소되었으며 이는 횡압력에 의한 코어의 Creep 변형에 기인한 것으로 판단된다(Y. M. Na et al., 1998).



그림 3. 압밀시험 이후 분리된 시료 및 연직배수재

(a) 입도분포시험 결과



(b) 전단강도 시험결과

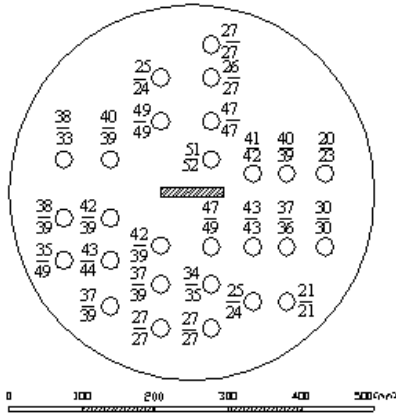


그림 4. 압밀종료 후 시료의 위치별 입도분포 및 전단시험 결과

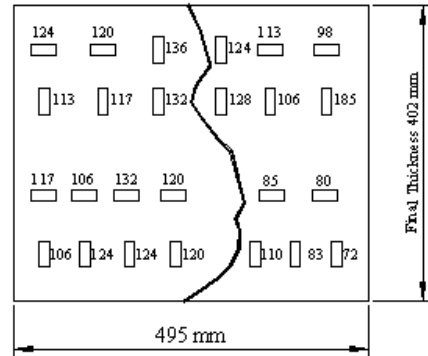
2.2.3 압밀에 대한 물성시험

압밀된 슬러리의 다양한 위치에서 73개의 시료를 채취하여 입도분석시험, 압밀시험, 함수비시험, Fall cone 및 Lab vane 시험에 의한 전단강도시험이 실시되었다. 입도분석시험의 결과 그림 4와 같이 배수재 인근에 상대적으로 높은 점토 함유량을 볼 수 있으며 이는 2.2.2절에서 언급한 바와 같이 바깥쪽에서 배수재 쪽으로 물과 함께 입자의 이동이 이루어졌음을 알 수 있다. 또한 슬러리 시료의 중간부 단면에 대한 Fall cone 및 Lab Vane 시험에 의한 전단강도 분포는 배수재로부터 바깥쪽으로 갈수록 상대적으로 낮아지는 것으로 나타났다.

압밀시험으로부터 측정된 선형압밀하중의 경우 그림 5와 같이 대체적으로 배수재와 가까울수록 상대적으로 높은 값을 얻을 수 있었던 반면 함수비의 경우 배수재로부터 바깥쪽으로 갈수록 높은 함수비를 보이는 것으로 나타났다. 즉, 배수재에서 거리가 가까울수록 선형압밀응력과 전단강도는 증가하고 함수비는 감소하였으며, 그 정량적인 결과가 일반 점토의 범위에 해당하여 기존의 PBD가 슬러리 상태의 지반에서도 무리없이 적용될 수 있다는 결론을 얻었다.

여기서 특이할 만한 점은 선형압밀하중의 경우 시료의 하부 부분이 상부보다 낮은 값을 보이는 것으로, 이는 하부의 경우 대형토조의 벽면마찰에 의해 하중 전달이 제한되었기 때문으로 판단된다. 상기 역학시험의 결과로부터 시험시 압밀이 슬러리 전 지역에 걸쳐 균등하게 발생된 것이 아니라 배수재 인근에서 상대적으로 높은 개량이 이루어짐을 알 수 있었다.

(a) 선형압밀하중 분포



(b) 함수비/간극비 분포

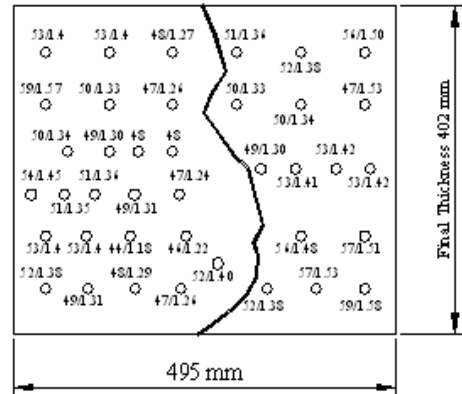


그림 5. 압밀종료 후 시료의 위치별 선형압밀하중 및 함수비/간극비 시험 결과

2.2.4 대형토조시험 결과의 이용

모형시험에 사용된 PBD재를 실트폰드 지반개량을 위해 사용하려면 침하 및 간극수압 관측결과와 육안으로 관찰된 사항을 실제 본 공사에 반영하여야 된다. 즉, PBD 타설 직후인 과잉간극수압이 소산되기 전 짧은 시간에 많은 양의 물이 배출되는 동시에 그에 상응하는 변형이 PBD에 발생하게 되므로 변형으로 인한 PBD의 통수능력 감소를 본 공사에 충분히 고려하여야만 하는 것으로 판단되었다.

3. 시험시공

3.1 시험계획

실트폰드 내 슬러리 상태의 지반은 평균 두께가 약 10~

15m 정도로 함수비가 매우 높으며 전단강도가 거의 0에 가깝고 자중압밀 상태에 있었다. 실트폰드 내 시험시공은 50m x 70m의 크기로 수행하였으며 비교적 단기간에 시험시공을 완료하기 위하여 슬러리 두께가 상대적으로 얇은(약 8m 두께) 곳에서 실시하였다.

먼저, 지반의 안정을 위하여 모래포설방법으로 해저면인 -5.0m CD~+2.0m CD까지 6개월에 걸쳐 완속 매립을 하고 그런 다음 약 1개월 정도 방치시킨 후 +4m CD까지 펌프준설선으로 직매립을 한 다음 PBD(Colbondrain : CX-1000)를 2m x 2m 간격으로 1차 타설 하였다. 2개월 후 +6m CD까지 재차 성토한 후 1차로 타설한 2m x 2m 사각형 배치 가운데에 2차 PBD를 시공함으로써 1차, 2차에 걸친 PBD 실제 타설 간격은 약 1.4m x 1.4m가 되었다.

슬러리 형태의 지반 변형 및 간극수압 거동을 알아보기 위하여 평균 해수면 위 +4m CD까지 매립한 후 그림 6과 같이 각종 침하계 및 간극수압계를 설치하여 그 결과를 분석하였다.

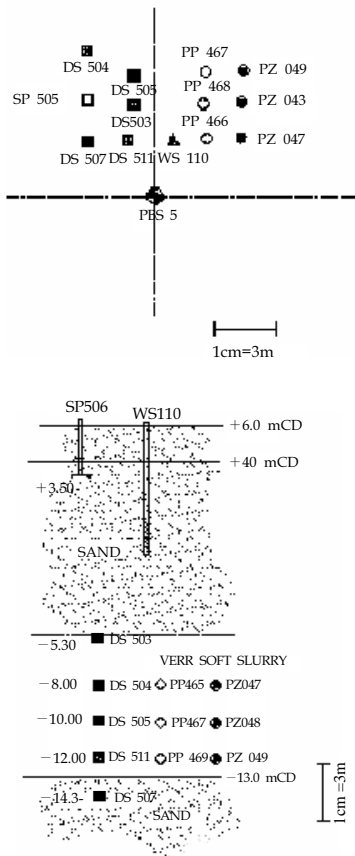


그림 6. 통상의 연약 점오함수비를 가진 슬러리 지반에서의 압밀 특성 비교 (From Bo, 2002)

3.2 계측결과 및 분석

시험시공시 계측된 침하량과 간극수압 등의 결과 및 분석은 다른 논문(Bo et. al, 1999)에 보고된 적이 있으며 그 분석 결과는 다음과 같다.

- (1) 시험시공 후 11개월까지 지반에 2.1m 침하가 발생하였는데 피에조미터에서는 간극수압의 소산이 계측되지 않았다. 11개월이 지나면서 간극수압이 소산되고 지반의 강도 및 유효응력이 증가하기 시작하였는데 이는 슬러리 같은 지반이 이때부터 입자 상호간에 접촉이 물리적으로 이루어져, 응력이 흙 입자를 통해 전달될 수 있었기 때문인 것으로 사료된다
- (2) 계측 중에 과잉간극수압의 일부 감소가 발생했는데 이는 간극수압의 소산 때문이 아니라 상재하중의 일부가 지하수위 아래로의 침하로 인하여 유효상재하중이 감소되었기 때문인 것으로 판단되었다.
- (3) 대변형률이 발생하기 때문에 PBD의 변형에 따라 통수능력이 저하된다. 따라서 2차 또는 3차에 걸쳐 PBD를 시공하여 간극수압을 소산시켜, 배수재의 과도한 변형으로 인한 통수능력 저하로 야기될 수 있는 지반개량의 불확실성을 제거할 필요가 있었다.
- (4) 실트폰드 내 고함수비를 갖는 슬러리는 시공 초기 간극수압의 소산에 따른 유효응력의 증가 없이 대변형이 발생하여 통상의 연약지반과는 다른 압밀특성을 보인다. 따라서 최종침하량을 예측하는데 전통적인 Terzaghi 식이 적용될 수 없어 계측의 중요성이 대두되었다.

3.3 초연약지반에서의 압밀특성 분석

통상 일반 해성점토 지역에서는 지반개량 전에 지반조사 및 실내시험 결과를 이용하여 Terzaghi의 일차압밀이론을 근거로 하여 최종압밀침하량 및 침하속도를 예측한다. 그러나 이와 같은 이론적인 최종침하량 및 침하속도 추정은 실제 지반의 불균질성, 지반정수들의 불확실성, 다차원적인 압밀 특성 등으로 실제 관측되는 침하량과 일치하지 않는 경우가 있다. 따라서 지반개량 중에 실측된 침하와 예측침하를 비교하여 이론과 실제의 차이를 유발하는 원인을 파악하여 이를 실제 과업에 반영한다. 실제 현장에서는 지반개량 후반부에 그 동안 실측된 침하계측자료를 근거로 해서 장차 발생되는 시간에 따른 침하량을 추적해 가는 방법을 많이 쓴다. 이 방법은 압밀침하곡선이 수학적으로 표시할 수 있는 쌍곡선, 평

방근의 곡선을 따라 변한다는데 근거를 두고 있다. 현재 주로 사용되는 방법은 쌍곡선법과 Asaoka법으로 이들 방법을 사용하여 압밀침하량과 압밀속도를 산정하고, 지반개량전 예측된 이론적 해석결과와 비교 분석하여 실제와 부합되는 지반정수를 역해석으로 결정할 수 있다.

일반적으로 투수계수가 작은 점토층이 하중을 받을 때 가해진 하중은 처음에는 전적으로 간극수압이 부담하고, 서서히 물이 간극으로부터 빠져나가면서 흙입자가 하중을 분담하게 되는 경우와 같이, 오랜 시간에 걸쳐 흙 속에서 물이 흘러나가면서 흙이 천천히 압축되는 현상을 전통적인 압밀침하라고하며, Terzaghi의 1차압밀이론을 근거로 하여 압밀침하량과 침하속도를 계산할 수 있다.

통상의 연약지반에서는 압밀침하량의 계산에 있어서는 점토지반이 과압밀인지 정규압밀 점토인지의 판단이 중요하다. 이 판단은 압밀시험을 하여 선행압밀하중을 구하고 유효상재하중과 비교함으로써 결정할 수 있다. 그림 7(a)에서 보여주듯이 과압밀에 대해서는 작용응력이 선행압밀하중에 이르기까지는 재압축지수 C_r 를 적용하고, 그 이상의 하중에 대하여서는 C_c 를 적용해야 한다.

그러나 실트폰드의 경우, 시험시공에서 하중재하 초기에 간극수압은 소산되지 않으면서 간극수를 배출하며 상당한 양의 침하가 발생하는 것이 관측되었다. 이러한 고함수비를 가진 슬러리의 경우, 그림 7(b)에서 보듯이 재하 초기에 대변형이 발생하여 일반점토에서와는 다른 압밀거동을 보인다. 따라서 슬러리의 압밀특성이 Terzaghi의 1차압밀이론과 달리 탄소성 거동을 보이므로 Terzaghi의 압밀방정식으로는 압밀침하량을 구할 수가 없다. 이러한 대변형이 발생하는 초연약지반의 압밀침하량을 구하는 이론은 Gibson(1982)과 Bo(2002) 등에 의해 제안되었으며, 그 이론 및 해석기법에 대한 논의는 본 연구의 범위를 넘어서므로 필요한 경우 Bo(2002)의 논문을 참고하기 바란다.

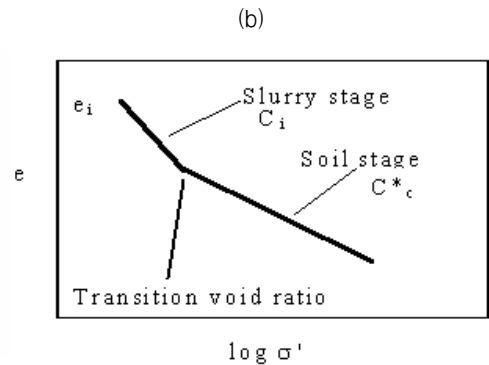
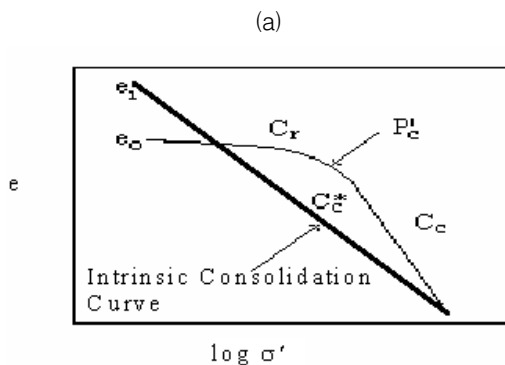


그림 7. 통상의 연약점토와 고함수비를 가진 슬러리 지반에서의 압밀 특성 비교(From Bo, 2002)

4. 초연약지반개량

4.1 지반개량 시공절차

모래포설작업이 완료된 후 실트폰드의 수위를 강하하여 육상으로 만든 후 배수를 원활하게 함과 동시에 높은 지역부터 연직배수재 타설장비가 다닐 수 있도록 불도저로 지반을 편평하게 고른 다음 실내모형시험과 시험시공으로부터 확인된 연직배수재를 2m x 2m 간격으로 타설하였다. 이와 병행하여 각종 계측기의 설치심도, 모래뚜게 및 지반의 변화를 측정하기 위해서 육상 피에조콘 관입시험을 실시하였다. 배수작업과 거의 동시에 시작된 연직배수재의 타설이 수위강하 후 약 4개월여 만에 C4 지역을 제외한 전 지역에 걸쳐 완료되었을 때, 최초 +4.8m CD로 보강된 CH 2750 지역은 이미 약 2m의 침하가 발생하면서 가장 낮은 지역으로 변화하였다. 실내모형시험 및 시험시공 결과에서 알 수 있듯이, 지반개량 초기에는 침하가 급격히 발생한다 하더라도 지반의 강도증가율이 그다지 크지 않으므로 여성토 작업시에는 단계별로 성토하여 안정성을 유지하였다.

실트폰드는 1단계 여성토 후 대부분의 지역에서 2차에 걸쳐 연직배수재를 타설함으로써, 배수재의 과도한 변형으로 인한 통수능력 저하로 야기될 수 있는 지반개량의 불확실성을 제거하였다. 그러나 2차에 걸쳐 연직배수재를 타설하여 침하가 정상적으로 발생하는 듯이 보이더라도, 개량 중에 실시한 현장시험에서 얻은 전단강도 값과 개량 중에 채취한 시료에 대한 실내시험에서 얻은 선행압밀하중 값이 예정된 값보다 많이 작은 경우에 한해 한정된 지역에서 3차에 걸쳐 연직배수재를 타설하였다.

4.2 지반거동의 계측

4.2.1 계측기 설치

연약지반의 매립 및 성토의 시공관리와 매립지반의 침하 예측 및 지반의 개량 정도를 평가하기 위해 여러 종류의 계측기를 설치하였다. 실트폰드에서는 매립방법의 특수성(모래포설바지가 전 지역을 항상 움직이므로)으로 인해 매립전의 계측기 설치는 불가능하였다. 따라서 본 시공 전에 슬러리 층이 비교적 얇은 지역을 시험시공지역으로 선정하여 매립을 단기에 완료한 후 계측기를 설치하여 매립초기의 지반 거동을 계측하였다. 실트폰드에서의 대부분의 계측기는 여성토가 시작되기 전 연직배수재 타입 전·후에 설치하였다. 계측기는 크게 (1) 침하관련 계측기, (2) 간극수압관련 계측기, (3) 경사관련 계측기, (4) 지중관련 계측기로 대별할 수 있다. 침하관련 계측기는 측량에 의해 계측되는 지표면 침하계, 층별침하계와 계측장비로 계측되는 Magnetic Extensometer, V. S. Liquid Settlement 등이 있으나 연직배수재 타설 전·후에 지반이 너무 연약하여 층별침하계와 V. S. Liquid Settlement는 자중으로 가라앉기 때문에 원하는 깊이에 설치할 수가 없었다. 또한 Magnetic Extensometer는 수평 변위가 큰 초연약지반에서 적합하지 못하여 거의 사용하지 않았다. 따라서 실트폰드에서 사용한 침하량 계측은 지반개량초기에는 주로 지표면 침하판에 의존하였고 지반개량이 어느 정도 되었을 때 층별침하계를 설치할 수 있었다. 간극수압관련 계측기는 Pneumatic Piezometer, Open Type Piezometer, Water Stand Pipe 및 V. S. Piezometer 등을 설치 운용하였다. 경사관련 계측기중 경사계는 여성토 작업 전에 설치하여 여성토 작업시 지반의 수평방향 변위를 측정하여 매립성토의 속도를 제어하였다. 또한 여성토의 하중을 측정하기 위하여 토압계를 설치하였다. 튜브 안으로 질소가스를 흐르게 하여 계측하는 Pneumatic Piezometer는 과도한 압밀침하와 수평변위가 동시에 발생하게 되면 튜브가 헐착되어 파손되는 경우가 많다. 따라서 현장에서는 그림 8에서 보이는 특별히 고안된 보호구와 함께 사용하였다.

4.2.2 계측결과

계측빈도는 계측기의 종류, 설치시기 및 공사시기 등에 따라 그 빈도를 달리하였으나 통상 일주일에 2번씩 정기적으로 실시하였다. 그러나 주위에 여성토작업이 이루어지고 있는 동안은 하루에도 3~4번씩 계측하여 지반의 급격한 변화

를 세밀하게 계측하였고, 여성토 직후에는 1~2일 간격으로 계측하여 지반변화를 가능한 한 정밀하게 계측하려 노력하였다.

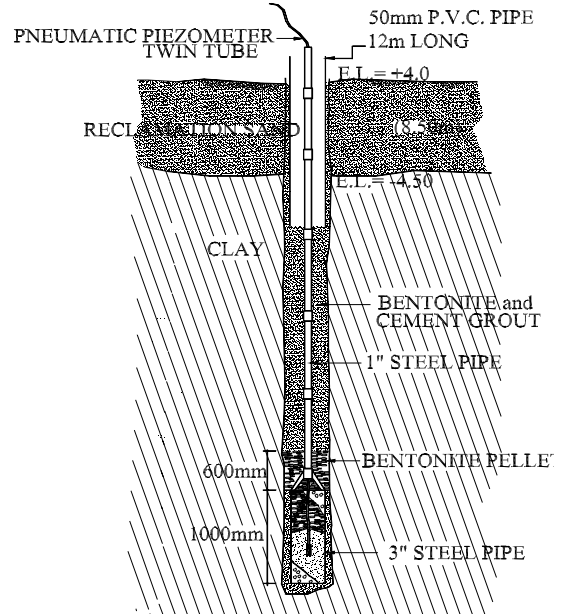
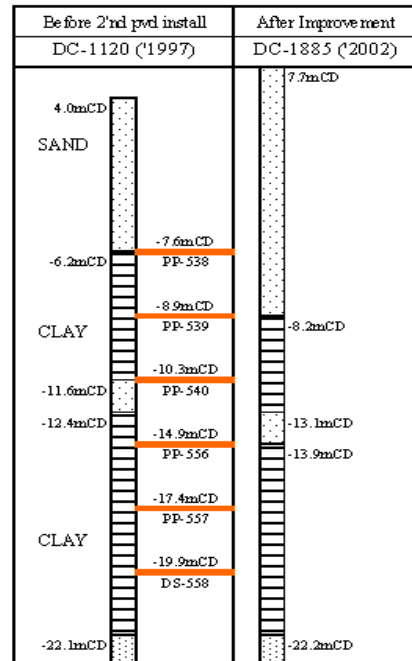
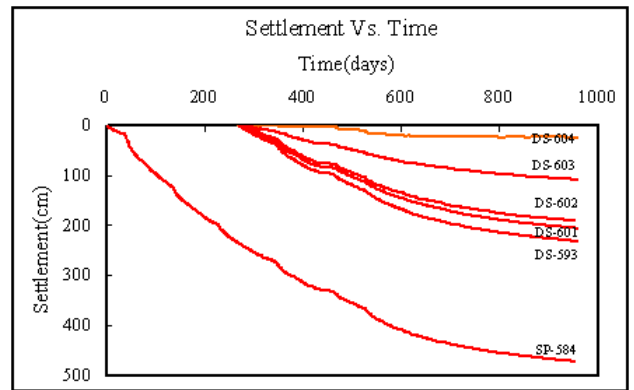
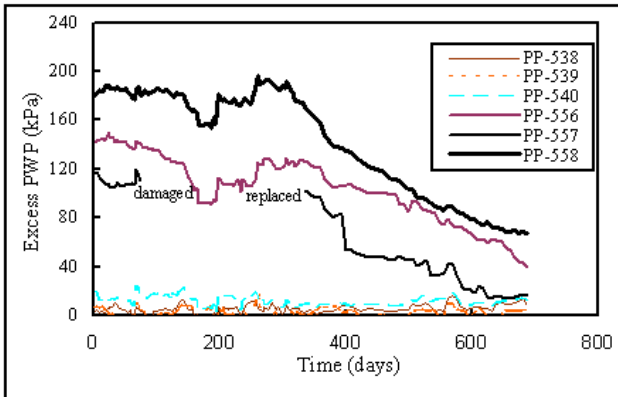
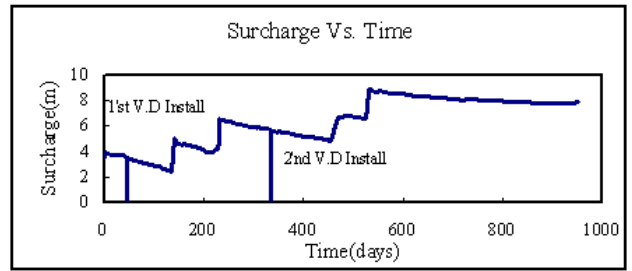
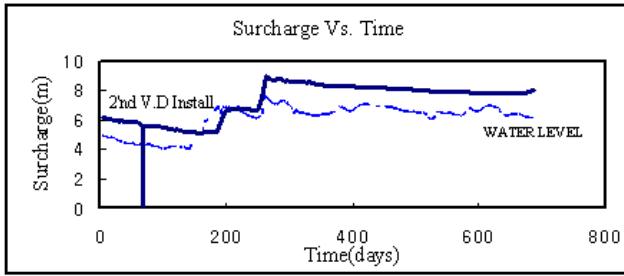


그림 8. 간극수압계 보호구

현장계측에 의하여 얻어진 침하량과 간극수압의 전형적인 결과는 그림 9와 같다. 여기에서 지반이 어느 정도 강도를 가졌을 때인 2차 연직배수재 타설 직전에 층별침하계와 간극수압계가 설치되었음을 알 수 있다.

(a) 간극수압 계측결과





(b) 침하계측결과

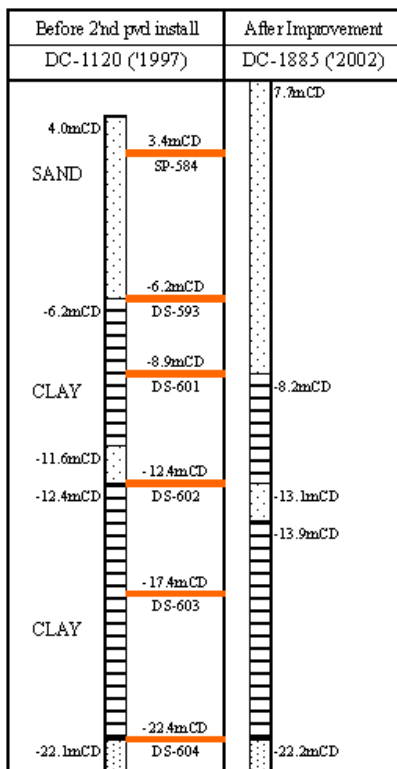


그림 9. 실트폰드의 전형적인 지표면 침하판, 층별침하계와 간극수압계의 계측결과

그림 9(a)에서 보이는 과잉간극수압은 간극수압 측정치에서 지하수위계에 의해 측정된 정수압을 감하여 계산되었고, 침하로 인한 간극수압계의 깊이 변동에 대한 보정도 하였다. 여기에서 상부 슬러리층에 매설된 간극수압계는 성토 하중 증가에 비해 과잉간극수압의 발생이 크지 않다. 이것은 상부층의 슬러리가 모래포설시 모래와 섞여서 투수계수가 늘어났거나 함몰된 모래층이 상부 슬러리층 주변에 존재함으로써 인하여, 이 구간에서의 간극수압이 예측치보다 작은 것으로 판단된다. 하부 슬러리층에 설치된 간극수압계는 정확하게 상재하중과 일치하지는 않는다 하더라도 성토시마다 과잉간극수압이 증가하고 시간이 경과함에 따라 소산되는 것을 알 수 있다.

그림 9(b)의 침하량 계측결과로부터 상부 슬러리는 1차 연직배수재를 타설한 이후 침하가 급격히 발생한 반면에 하부의 슬러리는 2차 연직배수재를 타설한 이후에 상대적으로 침하가 많이 발생한 것을 알 수 있다. 이는 모래포설시 상부 슬러리층에 모래가 섞여서 투수계수가 증가하여 압밀속도가 빨라졌던가, 연직배수재의 상부에서 과도한 변형으로 인한 병목현상으로 하부 슬러리의 압밀을 지연시켰던가 하는 원인 때문인 것으로 판단된다. 상기 원인 중 첫 번째 항목은 간극수압계의 계측결과 분석과도 일치한다. 통상적으로, 이상

적인 경우가 아니면 상기 원인 두 가지는 항상 동반되어 나타나게 될 것이다. 즉 상부층에서 빠른 속도로 압밀이 되면 연직배수재의 상단부에 변형이 많이 발생하게 되고 이는 연직배수재의 통수능력 감소를 야기시킨다. 대변형의 압밀거동을 보여주는 실트폰드 슬러리의 경우 재하초기의 배출되는 물의 양이 상당하다고 판단할 때 2차에 걸친 연직배수재 타설은 타당한 것으로 판단된다.

5. 지반개량 효과의 평가

지반개량 정도를 평가하는 방법은 계측결과로부터 나타난 압밀도에 의한 방법과 현장시험을 통한 지반의 강도증가를로 평가하는 방법 그리고 실내시험에서 압밀시험 결과로부터 얻은 선행압밀하중을 이용하는 방법 등이 있다.

5.1 실내시험 및 현장시험 결과분석

지반개량의 효과를 평가하기 위하여 지반개량 전후 보링 조사에서 채취한 시료를 이용한 실내시험과 현장 베인시험 및 피에조콘 관입시험을 수행하였다. 여기서 특이할 사항은 지반개량 직전 현장 베인시험을 수행하기 위하여 상부 모래층을 굴진하여 관통할 때 상부 모래 매립하중으로 인하여 압력을 받고 있는 하부의 초연약한 슬러리가 케이싱을 따라 분출하는 것이 매립 직후 관측되었다. 따라서 매립 직후 실트폰드에서 현장 베인시험은 그림 10에서 보여주는 특별한 방법을 고안하여 수행하였다.

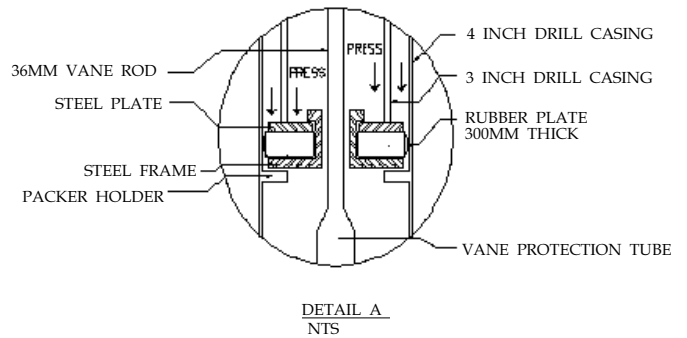
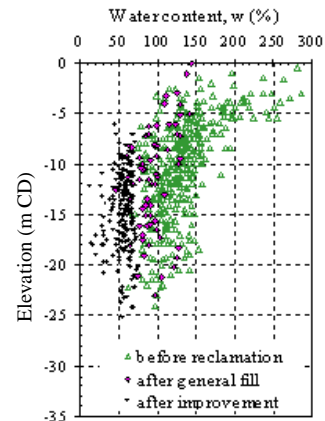


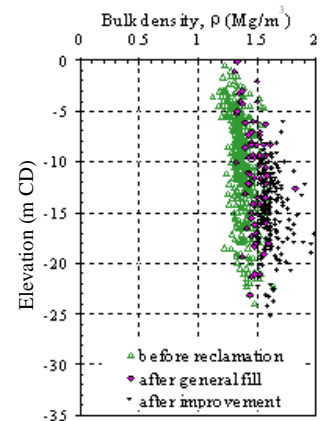
그림 10. 현장 베인시험시 슬러리 분출을 막기 위한 특수장치

위와 같은 이유로 매립 직후에는 자연시료 채취는 불가능하였으나 PBD를 타설하고 침하가 약 1m 정도 진행되었을 때 피스톤 및 트위스트 샘플러를 이용하여 시료를 채취할 수 있었으며 채취한 자연시료에 대해 기본 물성시험 및 압밀특성시험을 수행하였고, 이것은 그림 11에서 "일반매립 후" (after general fill)로 표현되었다.

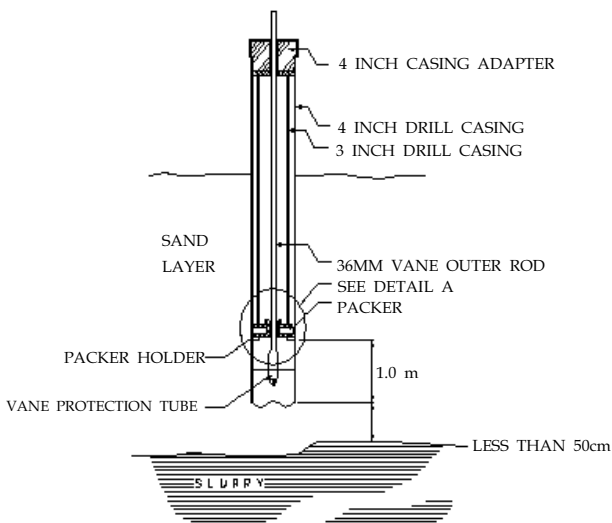
(a)

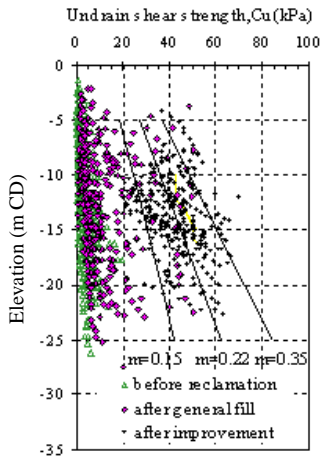


(b)

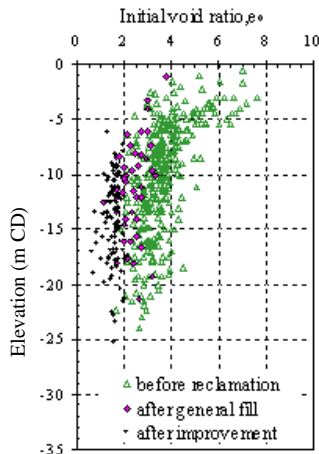


(c)





(d)



(e)

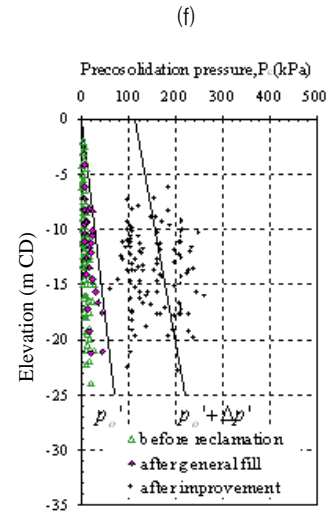
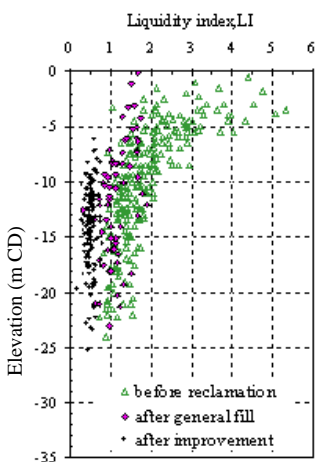


그림 11. 지반개량 전후 토질정수 비교

따라서 그림 11은 매립 전, 일반매립 직후 그리고 지반개량 후 실시한 지반조사 결과로서 지반특성의 변화를 보여준다. 이 그림에서 보듯이 지반개량 후에는 자연함수비가 개량 전에 비해 현저하게 감소되었고, 평균 함수비가 60% 내외에 있음을 알 수 있다. 중간 깊이에서 함수비가 40%보다 적은 곳이 여러 곳에서 발견되는데 이는 군데군데 함몰된 모래층 경계부근에서 채취된 시료에 약간의 모래가 섞인 경우이다. 현장밀도는 개량 전 $1.3 \sim 1.4 \text{ Mg/m}^3$ 에서 개량 후 평균 1.6 Mg/m^3 이상으로 증가했다. 함수비의 감소 및 현장밀도의 증가는 간극비의 감소와 연계됨을 보여주고 있다. 현장배인시험 결과에서도 비배수 전단강도가 개량 전에 비해 현저하게 증가했음을 알 수 있다. 그 증가 폭은 그림 11(c)에서 알 수 있듯이 유효상재하중의 15%~30% 정도 범위에 있으며 평균 22% 정도 이었다. 그림 11(e)에서 액성지수는 매립 전 상부 10m에서 2 이상으로 흡이 거의 액체 상태였으며, 지반개량 후 거의 전 깊이에서 액성한계는 0.5~0.7로 현저히 감소했음을 보여준다. 또한 그림 11(f)에서 지반개량 전·후의 압밀시험 결과를 비교했을 때, 매립 전 지반의 선행압밀하중은 상재하중보다 작아 아직 자중압밀 상태에 있었으나 지반개량으로 인해 선행압밀하중이 현저하게 증가하였고 그 편차가 크지만 유효상재하중 값의 전·후에 있음을 보여준다.

5.2 침하측정에 의한 지반개량효과의 평가

그림 9에서 보듯이, 하부 슬러리 층에서 계측된 과잉간극수압은 여성토하중의 증가에 상응하는 변화를 보였으나 여성토기간 동안 그 소산속도가 상당히 완만하여, 최종 여성토

후 대략 1년 이내에 침하속도가 3cm~4cm/30일 정도로 줄어들었는데 비해 과잉간극수압은 여전히 상당한 양이 잔류하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 현장계측을 통한 압밀도 산정 방법으로 침하량을 이용한 해석이 과잉간극수압의 소산을 이용하는 것보다 신뢰성이 있는 것으로 판단된다.

대변형이 발생하는 초연약지반이라 하더라도 커브피팅 해

석방법(쌍곡선법과 Asaoka법) 등으로 여성토기간 동안 실측된 침하계측자료를 이용하여 최종침하량과 침하속도를 산정할 수 있다. 따라서 실트폰드의 지반개량의 평가는 주로 실트폰드가 육상이 되면서 50m 간격으로 전 지역에 설치한 지표면 침하판에 의존하였다. 지표면 침하판의 계측결과를 이용하여 작성한 침하량 크기는 그림 12에서 보여준다.

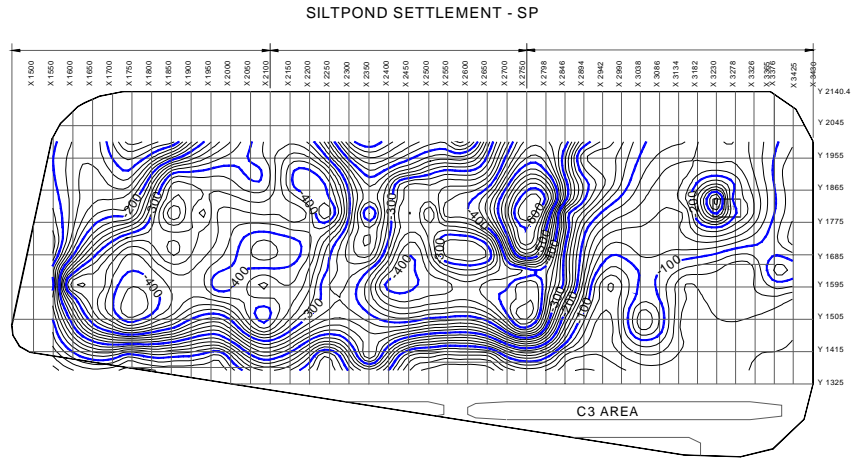


그림 12. 지표면 침하판의 계측 결과에 의한 침하량 등고선

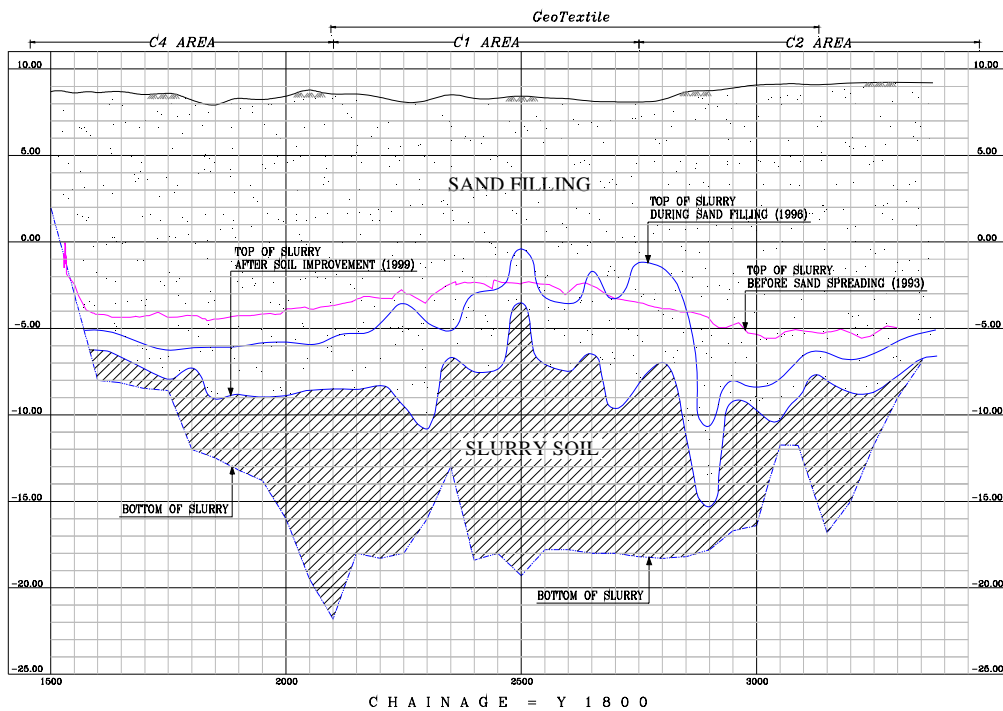


그림 13. 피에조콘 관입시험 조사결과를 이용한 슬러리 상부 위치 변화

그림 13에서는 피에조콘 관입시험을 실시하여 나타낸 슬러리 상부의 위치변화인데 이 그림에서 보여주는 침하량의 크기 역시 침하판에 의한 계측치와 유사하였다. 특히 매립 중에 수행된 해상 피에조콘 관입시험은 모래 두께를 확인하고 초기 지반의 변화를 확인하는데 매우 유용하였다. 그림 13에서 1996년에 해상에서 실시한 피에조콘 관입시험 결과로부터 보강재가 깔린 지역은 보강재가 포설되기 전에 슬러리 상단 표면이 전단파괴로 원래의 해저면보다 더 높이 솟아 올랐음을 보여준다. 따라서 보강재의 포설이 모래포설작업의 성공에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

당 현장에서는 여성토작업이 수회에 걸쳐서 단계적으로 이루어졌으며 거의 대부분의 경우 최종 여성토 후 대략 1년 이내에 압밀도가 90%에 도달 되었다. 실트폰드의 부지사용 계획이 촉박하지 않아 현재 아직 여성토가 제거되지 않은 상태로 그대로 있으나 만약 비교적 단기간에 초연약지반을 개량하고자 한다면 당 현장에서 행한 느슨한 단계 성토기간을 단축함으로써 가능할 것으로 판단된다.

6. 결론

당 현장에서는 모래포설공법을 최초로 대규모 현장에 보강재와 함께 적용하여 초연약지반인 실트폰드의 매립을 성공적으로 수행하였으며, 연약지반개량 역시 연직배수재(PBD)를 이용하여 현재 지반 개량이 거의 완료되었음을 계측을 통해 확인하였다. 본 공사를 수행하면서 얻은 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 시험시공을 통해 PBD의 과도한 변형으로 인한 통수능력 저하가 예상되어 본 시공에서는 2~3차에 걸쳐서 PBD를 시공하여 지반개량의 불확실성을 제거할 수 있었다.
- (2) 초연약지반에서의 계측은 매립 전·후 지반이 너무 약해서 지표면 침하판만이 효과적이었고, 층별침하계와 간극수압계 등은 지반개량이 어느 정도 진행된 다음에야 설치하여 계측할 수 있었다. 단, 매립 중간에 포설된 모래두께 및 슬러리 두께를 확인하는데 CPT가 매우 유용하였다.
- (3) 실트폰드는 고풍수비를 갖는 슬러리 지반으로 재하 초기에 대변형이 발생하였고 일반 점토에서와는 다른 탄소성 거동을 보였다. 따라서 Terzaghi의 압밀방정식을 이용한 간편 예측이 어려워 계측의 중요성이 더욱 강조되었다.
- (4) 실내시험 및 현장 베인시험을 통해 지반개량 효과를 확인한 결과, 자연함수비는 개량 전에 비해 현저하게 감소되었고, 이러한 개량효과는 선행압밀하중과 비배수 전단강도의 증가에서도 잘 나타났다.
- (5) 대변형이 발생한 초연약지반이라 하더라도 여성토기간 동안 실측된 침하계측자료를 이용하여 쌍곡선법과 Asaoka 법으로 최종 예상침하량과 침하속도를 산정할 수 있었다.

(접수일자 : 2004년 11월 17일)

참 고 문 헌

1. Asaoka, A.(1978), Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 18, No. 4, pp. 87~101.
2. Bo Myint Win, Arulrajah, A., Choa, V., and Na, Y. M.(1999), One-dimensional compression of slurry with radial drainage, Soils and Foundations, Japanese Geotechnical Society, Vol. 39, pp. 9~17.
3. Bo Myint Win(2002), Deformation of ultra-soft soil, Ph. D Thesis, Nanyang Technological University.
4. Gibson, R. E., Schiffman, R. L & Cargill, K. W.(1981), The theory of one-dimensional consolidation of saturated clay, II. Finite non-linear consolidation of thick homogeneous layers, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, pp. 280~293.
5. Hansbo, S. Jamiolkowski, M. & Kok L.(1981), Consolidation by vertical drains, Geotechnique, Vol. 31, No. 1, pp. 45~66.
6. Na, Y. M., Choa, V., Bo Myint Win & Arulrajah, A.(1998), Use of geosynthetics for reclamation on slurry like soil foundation, Proceedings of the Int'l Symposium on Problematic Soils, IS-TOHOKU'98, Sendai, Japan.