



연약지반처리를 성공하려면



(주)경동기술공사 전문
박헌영

1. 서론

자연상태의 지반이란 흙 입자로 구성되어 있는 토질지반과 암석광물로 구성되어 있는 암반으로 구분되고, 토질지반은 토입자의 크기에 따라 자갈, 모래, 실트, 점토 등으로 나누어진다. 자연에 존재하는 지반은 어떤 한 종류의 흙 입자로 구성되어 있는 것은 없고, 크기가 다른 흙 입자가 혼재되어 있는 것이 보통이다.

일반적으로 흙은 크게 점성토와 사질토로 분류한다. 흙의 공학적 성질을 파악하기 위하여 흙의 투수성이 중요한데, 점성토는 세립자가 많으므로 투수성이 나쁘고, 사질토는 반대로 투수성이 좋다. 또한 흙덩어리는 흙 입자가 모여서 만들어진 흙 입자 골격과 그 간극을 채우는 유체, 즉 간극유체로 구성되고 간극유체는 물과 공기로 나누어진다.

흙덩어리에 외력을 가할 때의 유효응력의 변화는 간극유체의 배출에 의한 간극압의 변화와 같을 수 있는데, 간극유체가 배출되면 그 만큼 흙의 체적이 감소된다.

연약지반이란 흙덩어리가 흙 입자의 골격에 비해서 간극의 체적이 큰 경우, 즉 간극비가 큰 지반을 일컫는 것으로 단위밀도가 작으므로 단위체적중량이 작고, 함수비가 높아서 지반강도가 약하고 압축되기 쉬운 특징이 있다.

일반적으로 점성토의 경우에는 간극유체의 배출에 장시간이 소요되므로 체적감소가 장시간에 걸쳐서 일어나게 되고, 정적인 재하에 대해서는 약하나 지진의 경우에는 그다지 문제가 되지 않는다. 한편 사질토 지반은 투수성이 좋으므로 간극유체의 배출이 단시간에 일어나고, 정적인 재하에는 강하나 느슨한 사질토의 경우 지진 시에 액상화 현상이 발생해서 지반전체가 파괴되는 사례가 있다.

지반의 연약성에 대한 평가는 연약지반 위에 축조되는 시설물의 규모라든지 하중강도에 따라 다르기 때문에 상대적인 의미로 해석 및 평가하는 것이 바람직하다.

2. 연약지반처리공법 사례

2.1 치환공법

치환공법의 대표적인 굴착제거 치환공법은 매우 확실한 공법이고 실패하는 사례가 거의 없다. 그러나 수중공사 시의 경우 다음과 같은 주의를 하여야한다.

굴착완료하고 치환재료를 투입하기까지의 기간이 길은 경우 굴착저면에 Colloid 입자가 유입 퇴적해서 얇은 연약층을 형성하여 활동하기 쉬운 층으로 될 수가 있다. 또한 저면개방 바지로 일방향으로 치환토사를 투입해가면 저면에 퇴적해 있던 Colloid 입자는 압출되어 치환토사 사이에 혼입되어서 상당히 두꺼운 연약층이 되기도 하고, 인접구조물에 악 영향을 미칠 수가 있으므로 주의하여야 한다. 이 같은 우려가 있을 때는 굴착저면에 사석을 투하하여 그 간극 내에 Colloid 입자가 혼입하도록 처리하기도 하고, 보다 더 완전한 방법은 소형 펌프선으로 준설하여 제거하는 등의 조치가 필요하다.

부분 강제제거 치환공법에서는 압입율을 아주 크게 하여 강제적으로 연약토를 제거하는 공법으로 연약토를 압출하고, 성토해가면서 충분한 대책을 고려하여야한다. 특히 기설구조물이 개량구역 내에 아주 근접해 있는 경우 기설구조물에 악영향을 미치지 않는 말뚝타설 방법, 예를 들면 기설구조물로부터 먼 방향으로 말뚝시공을 진행해 가는 등의 배려가 필요하다. 또한 강제적으로 제거하여 치환한 지반주변의 연약토는 강도가 저하되므로 특히 개량구역 외에 대해서는 강도회복 속도가 지연되는 것을 고려하여 말뚝타설 완료시로부터 구조물 건설까지의 충분한 방치기간을 두든지 또는 중요구조물의 경우에는 건설 전에 토질조사를 실시하여 강도회복정도를 파악해 둘 필요가 있다.

2.2 선행 재하중공법 (Pre-loading 공법)

선행 재하중공법에서 가장 위험한 것은 성토의 급속시공이다. 즉 급격히 지반지지력 이상의 재하토를 성토하는 것이다. 특히 타입식 Sand Drain과 병용할 때는 타설에 의해 약화된 지반의 강도회복이 불충분한 상태로 성토를 실시하여 실패한 사례가 많다. 그래서 Drain에 의한 압밀의 진행, 즉 강도증가 속도에 대응하는 속도로 성토하여야 한다. 연약지반에서 침하가 일어나는 것이 반드시 압밀침하라고 할 수 없고, 때로는 지반을 전단파괴하면서 성토지반을 매몰하는 경우가 있으므로 다음과 같은 주의가 필요하다.

1) 재하중의 제거시기의 결정

침하의 추정은 이론계산으로 구한 침하량과 특히 침하의 시간적 변화의 추정치와 실측치는 큰 차이가 있는 경우가 많다. 그러므로 재하중의 제거시기의 결정은 재하시의 실측침하량을 기준으로 충분한 검토가 필요하다.

실측치에 의한 재하중의 제거시기 결정은 주로 침하동태를 관측하는 지표침하계에 의한다. 그러나 지표 침하계는 지반의 전침하량을 표시하므로 연약층이 심도가 두꺼운 경우에는 깊은 층에서의 압밀상태가 판별되지 않으므로 지표 침하계만으로 판단하는 것은 문제가 있다. 재하중 제거시기 판단을 잘못하면 선행 재하중을 재하했다고 해도 문제가 남게되므로, 층별침하계, 간극수압계, 지중변위계 및 이론 침하량 등을 고려하여 종합적으로 각층의 압밀도를 체크할 필요가 있다.

이 같이 재하중의 제거시기는 각종의 지표로부터 종합적으로 결정할 필요가 있지만 가장 확실한 것은 침하의 실측치를 기준으로 하여 잔류침하량을 추정하는 것이다. 어느 시간까지의 실측 침하량의 실측 자료로부터 장래의 침하량을 예측하는 방법으로는 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka지수합수법 등이 있다.

2) 지반의 리바운드

재하중 제거에 수반하여 지반이 융기하는 현상(rebound)이 일어난다. 리바운드에 영향을 미치는 인자로서는 선행 하중 및 재하중, 각층의 층후, 토성, 재하중 방치기간, 압밀도 등이 고려되는데, 리바운드량의 측정은 지표 침하계로 실시한다.

실측한 시간경과에 따른 리바운드 곡선에서 보면 굴착 후 그대로 방치하면 리바운드가 점점 증가하는 경향을 나타내므로 가능한 빨리 구조물을 축조하는 것이 바람직하다. 리바운드량은 구조물 축조 후 되메우기를 완료한 시점에서 침하하여 종료된다. 따라서 리바운드량 만큼 계획 지반고를 반드시 더 높게 시공하여야 한다.

3) 암거의 지반 계획고 인상 및 단면 여유

선행 재하중 공법에 의한 시공에서 암거 구조물은 장래 침하가 예상되므로 잔류침하에 따라서 적절한 계획고 인상 또는 단면 여유를 두어야 한다.

암거 계획고의 인상 및 단면 여유에 대해서는 설계단계에서 사전에 검토해 두어야 하는데, 최종적으로는 시공단계에서 재하시의 실측 침하량으로부터 추정된 잔류침하량을 고려해서 결정한다.

그러나 수로 또는 도로·수로 병설 암거는 암거 전·후의 기존 수로와 접속 연결되어야 하므로 과도한 계획고 인상은 수로의 흐름에 장애를 일으킬 우려가 있으므로 계획고 인상은 리바운드량 +5cm정도로 하고 나머지는 내공단면 여유로 대처하는 것이 바람직 하다.

잔류침하에 대해서 실측한 결과에 의하면 일반적으로 성토부에서는 성토 중심선상에서 침하를 S라 하면 노건부에서 0.8S, 비탈면 선단에서는 0.2S 정도로 침하한다. 그러므로 파이프 컬버트(pipe culvert)와 같이 암거보다 깊은 위치에 설치하고, 연장이 길고, 또한 토피가 두꺼운

경우가 많은 경우에는 중앙부의 침하가 크게 되므로 침하형상에 대응하는 계획고 인상을 하는 것이 바람직하다. 그러나 선행 재하중 공법을 실시한 구간의 암거는 암거중단방향의 침하형상은 반드시 중앙부의 침하가 최대로 되는 것이 아니므로 시공상의 편의를 고려하여 중단방향으로 일정한 계획고 인상을 적용한다.

2.3 Sand Drain 공법

연직배수공법의 대표적인 실용적으로 많이 적용되고 있는 Sand Drain공법의 설계 및 시공 시 고려해야할 사항을 사례를 통해서 고찰하면 다음과 같다.

1) Sand Mat 및 Sand Drain의 투수성

Sand Drain의 모래말뚝은 지반으로부터 압밀탈수한 간극수를 배출시키는 것이 목적이고 Sand Mat는 모래말뚝으로부터 배출된 물 및 지반으로부터 직접탈수한 물을 성토 외측으로 배제시키는 역할을 한다. 그러므로 이들 투수성은 배수가 신속히 되기에 충분히 큰 것을 선택하지 않으면 Sand Drain 또는 Sand Mat 중에서 수두손실에 의해서 Drain효과가 감소된다.

보통 사용되는 타입식 Sand Drain의 경우 타설 직후에 지반 중에서 상승하는 물은 지반의 교란으로 오염되고, 이 때문에 Sand Mat 및 Drain이 오염되어 막힘이 일어날 수 있음을 고려하여야 한다. 그 외에 이탄층 중의 가스 발생도 투수성 저하의 요인으로 된다. 이와 같은 것이 원위치에서 투수계수의 저하를 일으키는 것으로 고려된다.

이러한 경험을 토대로 Sand Mat 중에 일정간격(약 4m)으로 맹암거를 설치하여 Sand Mat 및 Sand Drain 중에 간극수가 정체하는 현상을 방지하여야 한다.

Sand Mat로 부터 배수에 대해서 침하의 진행과 함께 성토 중앙부가 침하함에 따라 중앙부는 침하가 크고 재하

성토 비탈면 선단은 침하가 작아서 비탈면 선단에 물이 정체하여 횡단방향으로 배수를 저해하는 경우가 발생한다. 그러므로 성토 비탈면 선단부에 종단방향으로 배수측구 또는 맹암거를 설치하여 적당한 간격으로 성토 외측의 측구로 배출해주어야 한다.

Sand Mat, 투수층 등과의 불연속성에 대한 대책으로는 해수 중에서 Sand Drain 시공 시에 먼저 Drain을 타설하고 다음에 Sand Mat를 부설할 때 Drain 두부를 점토분이 덮고 있는 경우가 있다. 이런 경우에는 Sand Mat를 2단계로 나누어서 1단계 Sand Mat를 먼저 부설하고, 다음에 Sand Drain을 타설하고 다시 한번 Sand Mat를 부설하는 것이다. Sand Mat 및 모래말뚝에 사용되는 재료기준은 다음과 같다.

표1. Sand Mat 및 모래말뚝에 사용되는 재료기준

구 분	Sand Mat 재료	모래말뚝 재료
Dis	0.075~0.9mm	0.1~0.9mm
Des	0.4~8.0mm	1.0~8.0mm
0.075mm(#200)통과량	15% 이하	3% 이하
투수계수	1.0×10^{-3} cm/sec 이상	1.0×10^{-3} cm/sec 이상

주) Dis 및 Des는 입경가적곡선에서 통과중량백분율이 15% 및 85에 해당하는 재료의 입경

2) Sand Drain의 조성

Sand Drain의 시공 상 가장 중요한 것은 지반 중에 필요한 규모의 Drain을 확실하게 조성하는 것이다. Drain의 조성에 문제점으로는 ① 모래말뚝의 불연속성, ② 모래말뚝의 오염과 단면부정형, ③ 주변토층의 교란 등이다.

① 모래말뚝의 불연속성

모래말뚝의 불연속성은 타입식의 경우가 많다. 이것은 만드렐을 인발할 때에 부압과 주변지반의 압력, 거기에 모래와 만드렐의 마찰 등으로 모래가 만드렐에 부착하여 인발 될 수가 있는데, 이 경우 그 틈새를 점토가 혼입되어

모래말뚝의 연속성에 장애가 되는 경우가 있다. 이것을 방지하기 위해서는 만드렐과 모래의 마찰을 경감시키는 건조한 모래를 사용하고, 물이 많은 곳에서 건조상태로 시공이 곤란한 경우는 완전 포화상태의 모래를 사용하기도 한다. 또는 Drain 직경은 약간 크게 하는 것이 좋다. 더욱이 만드렐의 인발은 모래의 충전과 송기의 속도를 연관시켜서 충분히 속도에 여유를 두고, 모래말뚝이 절단되지 않도록 주의하여 시공하여야 한다.

② 모래말뚝의 오염과 단면 부정형

모래말뚝이 연속해 있어도 오염과 단면부정형에 의해서 배수효과가 저하하는 경우가 있다. 실내 시험에서 10^{-3} cm/sec의 투수계수가 원위치에서는 10^{-4} cm/sec의 투수계수로 저하되는 사례가 확인되고 있는데, 이 것은 모래말뚝의 간극이 점토입자로 채워져서 투수체로서 기능을 상실하는 경우 이다. 또한 콜로이드분과 미생물 등에 의한 간극의 막힘도 고려된다. 이와 같은 현상은 Sand Drain의 입도가 부적절한 경우에 생기기 쉬운 현상이다.

단면부정형은 말래말뚝이 중간에 절단되거나 축소되어 통수단면을 감소시켜서 배수능력을 저감시키는 것이다. 이와 같은 단점을 보완하기 위해서 섬유 팩을 사용하여 모래말뚝의 단면크기를 일정하게 유지시켜 주는 공법으로 Sand Pack Drain 공법과 GEC공법(Geotextile Encased Column) 등이 개발되었다.

③ 주변토층의 교란

모래말뚝을 타설하면 모래말뚝 주위의 점성토가 교란되는데 이는 지반의 강도와 투수성을 저하시키고 압밀효과를 저해한다. 점성토가 교란되어 반죽이 다시 되면 불교란 상태의 점성토에 비해서 강도가 저하한다.

점성토는 다시 반죽하여도 재 압밀하면 강도가 회복된다. 즉 완전히 다시 반죽한 점성토를 교란되지 않을 때에 받고 있던 선행압력과 같은 압밀압력을 취하여 재 압밀하

게 되면 시간이 경과하면서 그의 점착강도는 교란되지 않은 자연지반 상태의 점성토의 점착강도와 동일하게 회복된다. 시공방법상 주변토층의 교란은 타입식이 가장 크고, 어스 오거식은 타입식 보다는 작고, 교란이 가장 작은 방법은 Water Jet 식이다.

3) 성토속도의 제어

연직배수공법은 지반중의 간극수를 탈수 배제시키는 공법으로 일반적으로 재하중 공법과 병용하게 되는데, 이때에는 특히 초기에는 원지반의 강도가 저하한다. 원지반 강도의 회복을 기다려 성토를 시작함과 동시에 이전에 나타난 압밀의 진행과 강도증가의 관계를 계산하고 또한 계측관리를 충분히 실시하여 성토속도를 정하지 않으면 실패하는 경우가 많다.

성토에 의한 침하관리는 압밀에 의한 것 외에 측방유동에 대해서도 경사계, 지표면위측정기 등을 설치하여 관리하여야 한다.

4) Sand Drain타설시 주변지반의 변형

연직배수공법 시공 시 주변지반의 변형은 Sand Drain 및 Sand Compaction Pile (SCP) 타설시 가장 크다. 이 같은 주변지반의 변형은 성토 비탈면 선단으로부터 약 20~30m에 미친다. 이 같은 변형이 공사용지 외측으로 미치는 경우는 주변시설물의 안정성 및 보상 등의 문제로 야기되는 경우가 많으므로 이에 대한 대책은 매우 중요하다.

성토 비탈면 선단 부근에 측구(폭 2m, 깊이 1.5m)를 설치한 경우와 측구를 설치하지 않은 경우에 대해서 측구 좌·우에 동일한 위치에 변위말뚝을 설치하여 비교 한 실험결과에서 Sand Drain의 경우에는 1/2, SCP의 경우에는 1/4로 주변지반의 변형이 감소하였다고 한다. 이것은 변형이 측구로 흡수되기 때문이고, 공사 중에는 측구를 계

속해서 준설정비 하여야 한다. 그러니까 공사 중에 배수 및 변형방지를 위하여 구형 측구를 설치하는 것이 좋다.

또한 Drain타설시 지반변형을 경감시키기 위해서는 타설순서에도 주의가 필요하다. 즉 바이브로식 또는 타입식에 의해서 Drain타설 시 성토 중심부로부터 성토 비탈면 선단측으로 실시하면 외측으로 지반을 압출시키는 형상이 되어 주변지반의 변형이 크게 된다. 그러니까 비탈면 선단으로부터 성토 중심부를 향해서 타설을 진행하는 것이 좋다. 또는 필요시에는 어스 오거식 같은 지반변형이 작은 시공방법을 채택하는 것이 좋다.

그리고 초연약지반상에서 Sand Drain타설시 Sand Mat의 일반적인 두께(50cm)만으로 충분한 장비주행성(Trafficability)을 확보하기는 어렵다. 이 때는 Sand Mat의 두께를 두껍게 하든지, Sand Mat 위에 철판을 설치하여 시공기계의 안정을 확보하여야 한다.

5) 점토 함유량이 개량효과에 미치는 영향

일반적으로 구조물 기초의 설계를 수행하는 경우 대상으로 되는 기초지반의 성층상태 및 그 층을 구성하는 흙의 입도조성 등의 조사결과로부터 사질토와 점성토로 대별하여 취급한다. 그러나 실제로 현장에서 조우하는 기초지반은 이 중에도 속하지 않는 중간 입도조성을 나타내는 흙이 많다는 것이다.

모래와 점토의 혼합토의 공학적 성질은 점성토의 함유량(실트 이하의 함유량)에 의하여 실용적으로 사질토 영역(점성토 함유율 20% 이하), 중간영역(점성토 함유율 20~40%), 점성토 영역(점성토 함유율 40% 이상)로 분류되고, 각각에 대응하여 취급하여야 한다. 특히 점성토 함유율이 20~40%인 중간영역의 흙은 모래와 점토의 성질을 공유하기 때문에 그의 취급방법이 어렵고, 각종의 시험을 실시하여 그의 성질을 결정하여야 하는데, 점성토 함유율

이 지반개량효과에 미치는 영향에 대해서도 토질전문가의 적절한 판단과 경험이 필요하다.

6) 이론 계산치와 실측치의 불일치

이론 계산치와 실측치간의 차이의 공통적인 요인으로서 Drain재(모래말뚝)의 조성에 의한 지반의 교란과 모래말뚝의 투수성의 문제로 지적되고 있다. 이 같은 연직배수공법의 유효성에 관한 문제점은 복잡하고 다양한 지층 구성으로 이루어져 있는 지반을 대표단면의 지반정수를 일괄적으로 설계에 적용하기에는 무리가 있으므로, 시공시 계측에 의해 침하 및 안정관리를 실시하여 그 결과를 설계에 Feed Back 하여야 한다.

또한 연약지반 처리결과와의 이론 계산치와 실측치간의 차이에 대한 공통적인 요인으로서 Drain재(모래말뚝)의 조성에 의한 지반의 교란과 모래말뚝의 투수성의 문제로 지적되고 있는데, 자연상태의 지반은 복잡하고 다양한 지층 구성으로 이루어져 있는 지반을 단순히 설계이론에 따라 기계적으로 실시하기 보다는 공법이 가지고 있는 문제점을 인식하고 적용지반의 조건과 시공방법 등에 대해서 신중한 고려가 필요하다. 그리고 설계 시 불확실한 요인에 대한 오차를 해소하기 위하여 시공시 계측에 의해 침하 및 안정관리를 실시하여 그 결과를 설계에 Feed Back 하여야 한다.

3. 결론 및 제언

연약지반이란 흙덩어리가 흙 입자의 골격에 비해서 간극의 체적이 큰 경우로 흙의 단위밀도가 작으므로 단위체적중량이 작고, 함수비가 높아서 지반강도가 약하고 압축되기 쉬운 특징이 있다.

일반적으로 지반은 모래와 점토가 혼합된 흙으로 구성되어 있어서 혼합토의 공학적 성질은 점성토의 함유량(실트 이하의 함유량)에 의하여 실용적으로 사질토 영역(점성토 함유율 20% 이하), 중간영역(점성토 함유율 20~40%), 점성토 영역(점성토 함유율 40% 이상)로 분류된다. 특히 점성토 함유율이 20~40%인 중간영역의 흙은 모래와 점토의 성질을 공유하기 때문에 그의 취급방법이 어렵고, 각종의 시험을 실시하여 그의 성질을 결정하여야 하고, 점성토 함유율이 지반개량효과에 미치는 영향에 대해서도 토질 전문가의 적절한 판단과 경험이 필요하고 이 분야의 계속적인 연구가 요망된다.