

연약지반 최근 기술동향

글 | 최재호 | 토목기술부 과장 || 전화 : 02-3433-7756 || E-mail : soilplug@ssyenc.com

1 | 머리말

연약지반은 주로 점토나 실트와 같이 미세한 입자의 흙이나 간극이 큰 유기질토 또는 이탄, 느슨한 모래 등으로 이루어져 있으며, 지하수위가 높아 제체 및 구조물 시공 시 안정과 침하에 문제가 발생하는 지반이다.

따라서 단순히 지반조건만으로 결정되는 것은 아니고, 토질의 성상 및 시공 상황 등에 따라 다르기 때문에 제체나 구조물의 종류, 형식, 규모, 지반 특성을 충분히 검토한 뒤에 연약지반으로 취급하여 안정대책을 고려하여야 한다.

국내 · 외에서 적용되고 있는 연약지반 처리공법은 도로, 단지, 항만, 건축 등 활용분야에 따라 압밀배수, 지반개량 등 목적에 따라 공법이 매우 다양하다.

본고에서는 연약지반 처리공법으로 주로 활용되는 연직배수공법과 최근 활발히 연구가 진행 중인 진공압밀공법에 대하여 소개하였다.

2 | 연약지반 처리공법

2-1. 연약지반 처리공법의 변천

국내의 연약지반 개량공사는 1980년대 Sand Drain공법의 적용이 주를 이루었으며, 1990년대부터 남해고속도로 지선 건설 및 남해고속도로 확장공사, 서해안 고속도로 건설공사 등에서 Pack Drain공법과 SCP 등의 다양한 공법이 적용되었다.

특히, Sand Drain공법의 천연재료인 모래의 고갈과 시공심도의 한계, Drain재의 절단 등의 문제점에 의해 Pack Drain과 PBD공법

〈표 1〉 국내 고속도로에 적용된 지반개량 공법 적용 예

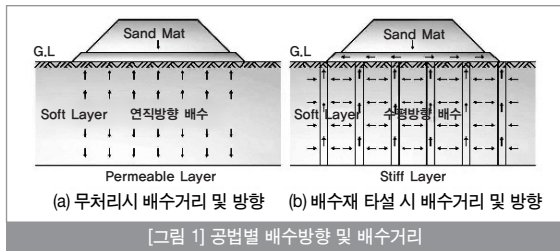
	구분	표층처리	침하대책	활동방지	비고
1980년 이전	남해고속도로(냉정-부산)	• 샌드매트	• Sand Drain • Preloading	• 단계성토	• 투수성이 큰 재료에 의한 지반개량이 주를 이룸
1980년~2000년	남해고속도로 확장(4차로)	• 샌드매트 • 쇄석매트	• PVC Drain • Preloading	• 단계성토	• 대체공법에 대한 적정성 평가를 위하여 여러 공법적용이 시도되었으며, 토목섬유 적용이 확대됨
	중앙고속도로 지선	• 샌드매트 • 쇄석매트	• Preloading • Sand Drain • Pack drain	• 단계성토 • PET Mat • SCP	
	서해안고속도로	• 샌드매트	• Preloading • Sand Drain • Pack drain	• 단계성토 • PET Mat • SCP	
2000년 이후	남해고속도로 확장(6차로)	• 쇄석매트 • 수평 drain	• Preloading • PBD	• PET Mat • SCP	• 품질과 경제성, 시공속도 등을 고려한 공법 선정
	부산항 신항 동동지구 1단계	• 대나무매트	• 개별진공압밀	• 개별진공압밀	• 성토재료 수급문제 해결

의 순으로 적용이 확대되었으나 Pack Drain의 경우 팩 망의 꼬임 현상, PBD의 경우 통수능력 저하 등의 문제가 지적되었다. 최근에는 토목섬유의 품질 향상과 시공 장비 개량이 힘입어 경제성이 양호한 PBD공법의 적용이 대부분을 차지하고 있으며, 성토재료의 수급문제로 인하여 성토하중 대신 진공압을 사용하는 진공압 밀공법에 대한 연구가 활발히 진행 중이다.

2-2. 연직배수공법 소개

(1) 연직배수공법 개요

연직배수공법의 원리는 Terzaghi 1차원 압밀이론(점토층의 압밀 침하시간은 배수거리 H제곱에 비례, $t=T_v \cdot H^2/c_v$)에 착안하여 연약지반에 배수재를 타설하여 배수시간을 단축하는 공법이다. 연직배수공법은 연약층 사이에 주상의 투수층을 촘촘하게 땅속에 배치하여 연약한 점성토층의 배수 거리를 짧게 하여 압밀침하를 촉진시켜 단기간 내에 지반을 안정화 시키는 방법이다.



(2) 연직배수공법 종류

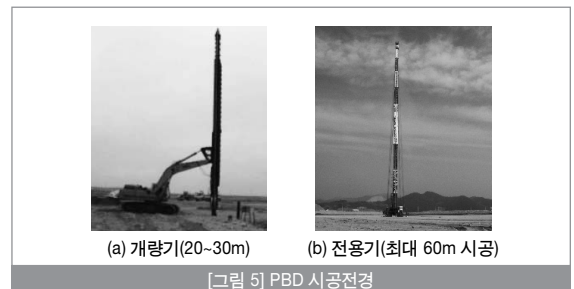
연직배수공법에는 샌드 드레인(Sand Drain), 팩 드레인(Pack Drain), 플라스틱 보드 드레인(Plastic Board Drain) 등이 있다. Sand Drain공법은 1979년 인천 삼광유리 지반개량공사에서 Drop Hammer를 타입장비로 사용한 이후 1982년 광양제철소 지반개량에 일본의 자문을 받아 타입장비를 도입하였고, 2001년 이후에는 SCP(Sand Compaction Pile), GCP(Gravel Compaction Pile) 검용 장비를 사용하고 있다.



Pack Drain공법은 1992년 양산-구포간 고속도로 건설공사 지반 개량공사를 위해 단축 타입장비를 제작한 이후로 2004년 6축 정삼각형 Pack Drain 타입장비가 개발되었다. Pack Drain공법은 연약층 심도가 불규칙한 경우 심도조절이 곤란하며, 최근에는 팩망 생산업체가 거의 없어 적용하지 않는 추세이다.



PBD공법은 1975년 국내 최초로 마산의 적헌공업단지의 연약지반 개량공사에 적용이 되었으며, 근래에는 다축 PBD장비, 자주식 맨드릴 타입기(진동식, 유압식), 장비 경량화, 스미어존을 최소화 하기 위한 앵커 슈타입, 자동타입기록장치, 수직도 관리장치 장착, 다양한 형태의 PBD 도입, 복합 통수능 시험장치 등의 품질시험방법 향상 등으로 PBD공법에 대한 신뢰도가 증가되고 있다. 또한 우물저항(Well Resistance), 통수능력, 필터막힘(AOS, EOS), 필터 인장강도, 교란영역(Smear Zone) 등에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다.



〈표 2〉 연직배수공법 비교

구분	Sand Drain	Pack Drain	Plastic Board Drain	Cylinder Drain
개요도				
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> • 지중에 모래기둥 설치 	<ul style="list-style-type: none"> • 섬유망 + 모래 충전 • 4축 동시 시공 	<ul style="list-style-type: none"> • 지중에 드레인보드 설치 	<ul style="list-style-type: none"> • 지중에 원형배수재 설치
직경	400mm	120mm	50mm	32mm, 50mm
재료	모래	섬유망 + 모래	PE, PP, PVC, 천연섬유	PVC 원형 주름관
적용 지층	N < 20	N < 10	N < 8	N < 8
적용 심도	25m(최대 50m)	25m(최대 50m)	25m(최대 50m)	50m
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> • PBD 보다 배수효과 양호 • 자재수급 문제해결 필요 • 배수재 절단 우려 	<ul style="list-style-type: none"> • 불규칙 지층 적용 곤란 • 팽창 생산업체 없음 • 배수재 절단 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 깊은 심도 통수능 저하 • 재료 수급 용이 • 배수재 절단 거의 없음 	<ul style="list-style-type: none"> • 20m이상 깊은 심도 유리 • 재료 수급 용이 • 배수재 절단 거의 없음
사례	매우 많음	근래 미적용	매우 많음	적음
개략 공사비	5,000원/m	-	1,600원/m	2,000원/m

(3) PBD공법 배수재 종류 비교

PBD공법은 초기에는 두께 3mm, 폭 100mm 정도의 장방향 종이를 사용하여 페이퍼 드레인(Paper drain)공법으로 불리기도 하였으나, 현재는 종이 대신에 폴리프로필렌과 폴리에스테르로 이루어진 드레인 제품을 사용하여 국제적으로 PBD(Plastic Board Drain)공법 또는 PVD(Prefabricated Vertical Drain)공법으로 불린다.

국내에서는 최근 모래수급 문제로 Sand Drain공법 대신 수급이 용이하고 자재비가 저렴한 PBD공법이 주로 사용되고 있는 추세이며, 드레인 재료에 따라 매우 다양한 제품이 개발되고 있다. 최근에는 천연섬유를 활용한 Fiber Drain, 친환경 토목재료를 사용한 생분해성 PBD, 원형코아 형상의 실린더형 PBD 등 많은 종류의 드레인이 사용되고 있다.

〈표 3〉 PBD공법 배수재 비교

구분	일반 PBD	X형 PBD	생분해형 PBD	실린더형 PBD
개요도				
공법 개요	<ul style="list-style-type: none"> • 하모니카형 코아 형상 	<ul style="list-style-type: none"> • X형 코아 형상 	<ul style="list-style-type: none"> • 친환경 토목재료 사용 	<ul style="list-style-type: none"> • 원형코아+십자형지대
폭×두께	100±5×3.0mm 이상	95±5×6.5mm 이상	100±5×3.0mm 이상	100±5×5.0±0.5mm
배수성능	30cm³/s 이상	65cm³/s 이상	30cm³/s 이상	25cm³/s 이상
적용심도	20m	50m	20m	50m
휨강성	보통	우수	보통	우수
장·단점	<ul style="list-style-type: none"> • 부직포 막힘 현상 큼 • 배수재 절곡 우려 	<ul style="list-style-type: none"> • 부직포 막힘 현상 적음 • 장심도 적용 가능 	<ul style="list-style-type: none"> • 타설 3~5년 후 자연 분해 • 통수능 일반형과 동일 	<ul style="list-style-type: none"> • 부직포 막힘 현상 적음 • 장기적 배수성능 우수
재료비	550원/m	676원/m	716원/m	550원/m

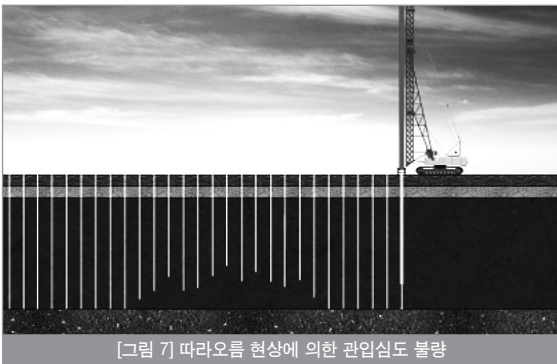
(4) PBD 공법의 문제점 및 개선 동향

1) PBD공법 시공 시 문제점

PBD공법은 시공자재의 조달이 쉽고 시공속도가 빠르며 공사비가 저렴하여 연약지반 처리공법에 널리 활용되고 있다. PBD공법의 품질시공 관점은 정확한 수직도 유지와 시공심도 관리에 있다. 현재 국내에서 일반적으로 사용하는 PBD타입 장비는 장비에 부착된 각도계나 와이어에 매달린 추의 지시 각도를 운전자가 육안으로 식별하도록 되어 있어 정확한 수직도 관리가 사실상 곤란하다. 또한, 리더의 수직도 조절은 앞뒤로만 가능하고 좌우방향으로는 고정식으로 되어있기 때문에 좌우경사가 시방값을 초과하더라도 운전자가 조작할 방법이 없는 실정이다. 또한, 관입심도는 자동기록장치를 부착하여 관리하나, 수직도 불량시 및 인발시 드레인 따라오름 현상 발생 등으로 인하여 정확한 심도관리는 곤란한 실정이다.

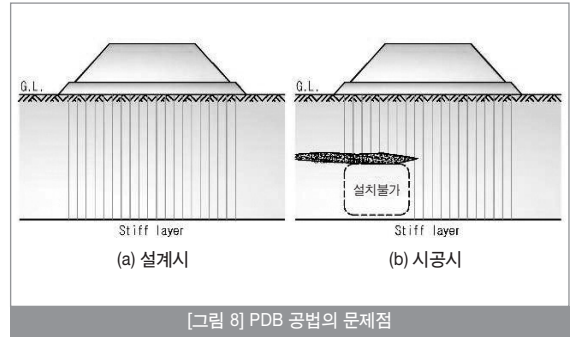


[그림 6] 연직배수공의 수직도 불량



[그림 7] 따라오름 현상에 의한 관입심도 불량

또한, 연약층 중간에 두꺼운 Sand Seam, 자갈층 등이 분포할 경우에는 PBD 타입이 곤란하며, 이 경우 Sand Seam 및 자갈층을 선 천공 후 연직배수재(PBD, SD, SCP)를 시공하게 되어 시공성이 불량하다.



[그림 8] PBD 공법의 문제점

2) 시공 문제점 개선을 위한 최근 동향

가. 수직도 및 관입심도 관리

정밀한 수직도 및 관입심도 관리를 위하여 HQ PBD(High Quality PBD)공법 및 New PBD공법이 개발되었다. 이 공법들은 자동경사계, 따라오름 감지장치, 경사조절 실린더 등의 개선된 장치를 사용하여 수직도 및 관입심도를 실시간 모니터링하고 자동으로 관리하여 고품질 PBD를 시공할 수 있도록 개선한 공법이다.

<표 4> HQ PBD공법 주요 특수장치

주요장치	기능
자동경사 측정센서	리더에 부착되어 X-Y축 양방향 경사각 자동 측정
따라오름 감지장치	멘드렐 인발시 드레인이 실제 따라 올라온 길이 자동 측정
경사조절 실린더	소요 경사각을 초과할 경우 실린더를 작동시켜 경사각 조정
경광등 경고부저	경사각이나 드레인 따라오름량이 시방값 초과시 알림
DATA 장치	각종 센서에 입력된 신호 실시간 모니터링하여 시공집계자료 산출



[그림 9] HQ PBD공법 시공관리 프로그램

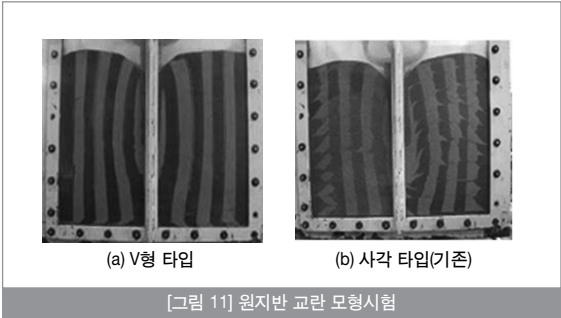
나. PBD 시공 속도 향상

V형 2축 PBDE타입공법은 PBDE타입 시 주변교란을 최소화하고 지반저항을 감소시켜 관입이 용이하도록 개발한 공법이다. 이 공법은 케이싱 저부를 V형으로 변경하여 Anchor Plate의 접촉단면을 축소함으로써 교란영역(Smear Zone)을 감소시켰다.

케이싱 형상에 따른 원지반 교란 모형 시험결과 기존의 사각타입은 원지반 교란 범위가 넓게 나타나는 반면 V형 타입은 교란 범위가 급격히 감소하는 경향을 보인다. 즉, V형 타입은 교란영역이 작고 지반저항을 최소화시켜 동일한 타입에너지로 복수의 케이싱 타입이 가능하여 시공속도를 향상할 수 있다.



[그림 10] Anchor Plate 형상



[그림 11] 원지반 교란 모형시험

2-3. 진공압밀공법 소개

(1) 진공압밀공법 개요

진공압밀공법은 압밀 시 필요한 하중을 기존 재하중 공법의 성토 하중 대신 지중을 진공으로 만들어 이에 작용하는 대기압을 재하중으로 활용함으로써 지중에 설치한 드레인을 통하여 간극수를 강제 탈수하여 침하를 촉진하는 공법이다.

진공압밀공법은 1950년대 초 W.Kjellman에 의해 제안된 후 20년 동안 부분적으로 연구가 진행되어 왔으나, 멤브레인 기술 부족, 진공상태 유지문제 및 경제성 등에서 성토하중을 이용하는 방법보다 우수하지 못하여 특별한 경우를 제외하고는 사실상 적용되지 못하였다.

그러나 최근 장비의 발달, 제반기술의 발전 등으로 진공압밀공법의 기술력 및 경제성이 크게 향상되어 성토하중 대체공법으로 가능성을 인정받게 되었다. 실제로 중국, 일본, 프랑스 등지에서 진공압밀공법 적용이 증가하고 있으며, 국내에서도 김해 쓰레기매립지와 광양항 연약지반처리 등에 시도되어 최근에는 그 적용성이 증가하는 추세이다.

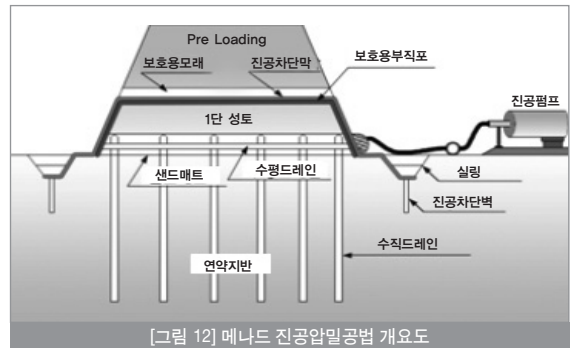
(2) 진공압밀공법 종류

국내에서 보편적으로 적용되고 있는 진공압밀공법은 진공차단막을 사용하는 메나드 진공압밀공법과 진공차단막이 필요 없이 연직배수재에 직접 진공압을 가하는 개별진공압밀공법이 주류를 이룬다.

1) 메나드 진공압밀공법

메나드 진공압밀공법은 등방의 대기압을 이용하는 공법으로 1980년대 후반 프랑스의 메나드사에 의하여 실용화되었다. 이 공법은 PVC 연성주름관에 부직포를 감싸 스트레이너 기능을 겸용한 드레인을 지중에 설치하고, 이들을 다시 수평배수층에 그물방식의 폐쇄회로 배관망을 구성한 후 펌프를 가동시켜 지중을 진공 상태로 만들어 대기압(약 10.13tf/m²)의 하중 효과를 지표 및 지중에 작용시키는 공법이다. 즉, 기존의 토사를 성토하여 재하하는 공정이 진공차단막을 이용한 대기압 하중으로 교체되었으며, 기존의 재하공법에서 사용하던 SD나 PBD는 부직포를 감싼 원형 PVC 연성주름관으로 대체되었다.

또한, 수평배수를 위해 사용되는 샌드매트 속에는 수평드레인이 추가로 매설된다. 최근 적용사례에 의하면 진공압밀공법은 기존의 성토공법보다 연약지반 처리기간을 단축시키며, 진공효율 75%일 경우 일반 성토고 4.5m의 효과를 나타내었다.

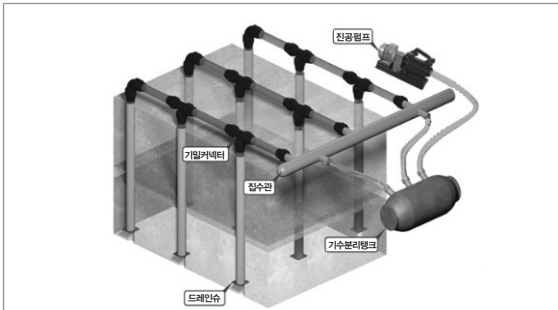


[그림 12] 메나드 진공압밀공법 개요도

2) 개별진공압밀공법

개별진공압밀공법은 배수재와 진공펌프를 직접 연결하여 배수재

에 개별적으로 진공압을 적용시켜 진공효율을 개선하였으며 Sealing을 통해 발생할 수 있는 문제를 최소화 시킬 수 있다. 개별 진공압밀은 진공압을 이용하여 원지반의 배수를 촉진시키는 방식은 기존의 진공압밀공법과 같으나, 진공압밀공법이 배수재 타설 구간과 대기의 압력차에 의한 대기압 재하방식을 취하고 있는 반면, 개별진공압밀공법은 지반 내 타설된 배수재를 진공펌프와 직접 연결하여, 진공압이 배수재 자체에 가해지게 되고 이로 인해 전응력이 일정한 상태에서 간극수가 배출되며 유효응력이 증가하고 압밀이 진행되는 공법이다.



[그림 13] 개별진공압밀공법 개요도

이는 기존의 성토재하공법 및 연직배수공법과는 다르게 성토하중을 필요로 하지 않으며, 진공압밀공법의 단점으로 지적되었던 펌프효율의 감소문제, 굴착 및 수평배수재 설치로 인한 경제적·시간적 손실, 기밀재료 및 유지관리의 문제를 개선할 수 있다. 그러나 지중에 Sand Seam이 존재할 경우 진공효율에 절대적 영향을 미칠 수 있기 때문에 연약지반구간의 지반조사를 철저히 해야 한다.

<표 5>진공압밀공법 비교

구분	메나드 진공압밀공법	개별진공압밀공법
개요도		
공법 개요	• 성토하중 대신 진공차단막을 이용한 대기압하중 재하	• 연직배수재에 진공압을 직접 적용하는 개별진공방식
장·단점	• 재하성토량 감소 • 진공차단막 파손 시 기능 곤란	• 진공차단막 불필요 • 재하성토량 감소 • Sand Seam 분포시 효율 저하
개략 공사비	14만원/m ²	12만원/m ²

연약지반 처리공법은 Sand Drain을 기초로 Pack Drain, Plastic Board Drain 등으로 다양하게 발전하여 적용되고 있다.

최근 국내 시장에서 환경적 측면에서 모래수급 문제가 대두되고 친환경 재료 및 다양한 토목섬유가 개발되고 있으며, 이는 많은 종류의 연직배수재에 적용되고 있다. 또한, 시공 장비의 발전으로 인하여 연직배수공법의 수직도 및 관입심도 문제를 해결하여 고품질 연약지반 처리가 가능해졌다. 이와 같이 연약지반 처리공법에 적용되는 재료, 장비, 공법기술은 크게 발전하였으나, 아직도 그 이론적 뒷받침은 미흡한 실정이다. 특히 연약지반이 갖고 있는 불확실성으로 인하여 아무리 정밀한 설계를 수행하였더라도 시공 시 관측되는 거동은 실제와 다른 경우가 종종 있다.

연약지반의 불확실성을 극복하고 최적의 연약지반처리를 수행하기 위해서는 먼저 충분한 지반조사가 선행되어야 하며, 시공 중 정밀한 계측관리를 통한 거동분석이 필요할 것으로 판단된다. S

참고문헌

1. 도로설계요령, 제2권 토공 및 배수편, 한국도로공사, 2009
2. 지반공학자를 위한 압밀의 이론과 실제, 구미서관, 김수삼 등 공저
3. 연약지반(지반공학 시리즈 6), 한국지반공학회, 2005
4. 연약지반 기술의 과거, 현재 그리고 미래, 한국지반공학회 학회지, 2009