

한국에서의 PBD공법의 현황 및 문제점과 발전방향

김영남⁽¹⁾, Young-Nam Kim, 권성진⁽²⁾, Sung-Jin Kwon

⁽¹⁾(주)동아기술공사 전무, 토질 및 기초 기술사

⁽²⁾(주)동아기술공사 부장, 토질 및 기초 기술사

SYNOPSIS : The use of PBD(prefabricated band drain)for ground improvement is rapidly increased due to the merit of construction period and cost, environmental preservation compared with other vertical drain method, and the development of material. This paper presents the historical review, theoretical background, design procedure and method, and typical construction example for the PBD. Also, the direction of further technical development and study is recommended.

Key word : PBD, vertical drain, equal strain consolidation, smear zone

1. 서 론

최근 산업의 발달로 국토의 효율적인 이용이 대두됨에 따라 종래 개발이 제한되었던 지역을 절토 및 성토하여 국가 기반시설인 도로 및 항만시설 산업단지등을 건설하고 있다. 특히 지반이 연약하여 개발 대상에서 제외되었던 지역의 지반개량을 시행하여 활용할 경우에도 지반안정화 비용을 포함한 개발비용이 기초지반이 양호한 경우의 지가(地價) 및 보상비용등을 포함한 개발비용과 큰 차이가 없게되고 또한 효율적인 기반시설을 건설하기 위하여 연약한 지반의 이용의 필요성이 요구되어 지반개량의 시공이 증가하고 있다. 댐 건설등으로 인해 토사공급원이 단절되어 모래자원이 한정적인 상태이며 환경훼손의 최소화와 친환경적인 건설공사가 요구되고 있으며 이에 따라 모래의 사용이 작은 밴드드레인(PBD, prefabricated band drain)공법이 주목을 받고 있다. 모래값은 해마다 증가하는 반면 밴드드레인은 상대적으로 저렴한 재료의 개발이 가능하고 또 시공장비 개발이 빠르게 발전하여 1일 타입량이 10,000m(8시간 작업기준)이상 시공이 가능하기 때문에 이 공법은 경제성이 단연 앞서고 있다. 한국에는 1975년 마산 적현단지 연약지반 개량공사에서 최초로 사용된 이래 울산항저탄장 지반개량공사와 광양제철소 인입철도공사 등 여러 현장에서 사용되었으나 개량효과를 의문시하여 그 사용을 기피하였다. 그 후 최근인 1990년 초부터 수입자유화에 따라 국제적으로 인정받고 있는 외국산이 국내에 도입되고 있을 뿐만 아니라 기술협력으로 생산되는 제품이 동남아등 외국에 수출되고 있으며 자체적으로 개발된 국산품의 질적인 향상으로 기술자들의 주목을 받고 있다.

본고에서는 PBD공법이 국내에 도입되어 시공된 초기과정과 사용을 기피하게 된 원인 및 정착되는 과정과 현재 적용되고 있는 현장의 문제점들을 분석하여 향후 발전되어야 할 부분들을 기술하였다.

2. PBD공법의 발달과 한국의 도입

두꺼운 점성토 지반위에 Sand Mat를 깔고 배수재료(모래 또는 인공배수재)를 지중에 수직하게 일정 간격으로 삽입한 후 지반의 파괴가 발생하지 않도록 다단계의 재하성토를 시행하여 배수재료간의 수평 방향의 과잉간극수를 배수하프로서 침하를 촉진시켜 지반의 압밀침하를 조기에 일으키고 지반의 전단강도향상을 도모하는 것이 연직배수공법(VD, vertical drain method)이다. 이 공법에는 연직배수재로 직경 30~40cm의 모래기둥을 사용하는 샌드드레인(SD, sand drain)공법과 직경 12cm의 모래기둥을 그물망에 넣어 사용하는 팩드레인(PD, Pack drain)공법 및 띠모양의 밴드를 사용하는 밴드드레인(PBD, prefabricated board drain)이 대표적인 공법이다. 이들 연직배수공법은 그 이론적 배경이 Terzaghi의 압밀이론에서 출발한 것인 만큼 Terzaghi가 압밀을 발표한 시기(1925년)만큼 오래되었다. 미국의 D.E Moran이 점성토층의 압밀소요시간은 최대배수거리(H)의 제곱(즉, H^2)에 비례하는 것을 이용하여 수직방향으로 모래기둥을 박아 배수거리를 단축하는 특허를 받았으나 실제 시공은 Porter가 1934년에 캘리포니아주 도로에서 최초로 시공을 시행하여 이것이 보급되었다. 1930년대 중반에 스웨덴 지반연구소(SGI, Swedish Geotechnical Institute)소장인 Kjellman이 인공배수재인 띠모양의 마분지(card board)를 이용하여 지반개량에 대한 연구를 시행하여 실험과 경험을 바탕으로 1948년에 드레인재의 환산직경 및 계산식을 제안하여 유럽과 일본등에서 사용하였다(이러한 이유로 오늘날까지도 paper drain공법 이라고 불리워지고 있음). 이 두 공법의 실제 시공은 타입식 폐관 맨드렐(drive closed-end mandrel)공법이 개발되므로 시공이 가능해진 것이다(박, 2000).

이중 PBD공법은 낮은 투수성, 부식에 대한 저항성 결여 및 통수능력 부족등으로 주목을 받지 못하였다. 1971년에 Wager가 마분지 대신 골모양의 플라스틱 코아를 사용하는 것으로 개량하여 폴리머(polymer)를 이용한 PBD가 생산되기 시작했다(김, 1995). 이웃나라 일본에는 1965년경에 도입되어 임해공업단지의 지반개량에 많이 사용되었으며 한국에는 1975년 마산적현단지에서 최초로 이 공법이 일본인 기술자(일본개발 컨설턴트)의 지원아래 삼부토건 주식회사에 의해 설계 및 시공이 시행되었다.

지반조건은 연약한 해성퇴적토층위에 준설매립(hydraulic till)을 한 상태로 전체적으로 연약층이 10m정도 었으며 고소성질 점성토인데 준설매립두께는 1~6m정도 이다. 지표면하 2~3m까지는 함수비가 90~120%정도이고 5~6m 부분은 100%내외이고 그 이상은 50~60%였다. 압밀계수 (C_v)는 2~3가 $4.5 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$, 5~6m는 $9.9 \times 10^{-4} \text{cm}^2/\text{sec}$ 및 그 이상은 $3.82 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$ 정도이고 초기간극비(e_0)는 2~3m는 2.4~3.0이고 5~6m는 2.4였으며 9~10m는 1.5정도였다. 또 비배수 전단강도는 지표면 부근이 $0.1 \text{kg}/\text{cm}^2$ 이하였으며 모두 $0.2 \text{kg}/\text{cm}^2$ 이하로 측정되었다. PBD설치 간격은 Smear Effect 및 Well Resistance에 대한 고려항목이 없는 Kjellman이 제안한 해석방법을 적용하였으며 정사각형 배치 1.0m간격을 사용하였다. PBD타입장비는 통행성의 어려움을 극복하기 위하여 장비의 경량화 및 낮은 접지압의 시도를 도모하였는데 일본에서 기 사용중인 타입기를 응용하여 타입가능 깊이가 13m인 1000kg의 중량을 갖는 기어식 나타입기를 고안하여 사용하였으며 궤도를 사용하여 접지압을 낮추고 이동이 가능하도록 하였다(그림 1참조). 이 장비는 2000m/day 정도의 작업능률이 있었다.

사용된 PBD는 초기에는 일본 긴조고무(주)에서 생산된 제품인 캐슬드레인보드(castle drain board)를 사용하였으며(그림 2참조) 그 후 산업기지 개발공사에서 국산 드레인보드(럭키사 제품, 상품명:럭키드레인보드)에 대한 성능시험등을 시행하여 국산화를 실현시켰다(그림 3참조).

장비의 통행성 확보 및 샌드매트의 포설과 재하성토시 안정성확보를 위하여 폴리프로필렌 토목섬유를 포설하였으며(그림 4참조) 그 위에 PBD에서 배출된 간극수를 원활하게 배수시키기 위하여 두께 0.5m 샌드매트(sand mat)를 포설하였는데 1차적으로 두께 0.1~0.2m의 샌드매트를 포설하고 PBD를 나타입한 후에 나머지 2차로 0.3~0.4m의 샌드매트를 손수레로 포설하였다(그림 5참조). 이러한 방법을 사용한 주된 이유는 로드(rod)의 관입과 빼어내는 작업이 용이하고 직사광선에 의한 토목섬유의 열화를 예방하기 위한 것이었다.

샌드매트내에 경질 PVC유공관(그림 6참조)에 직포형 토목섬유를 감싼 맹암거를 설치하고 이를 집수정에 연결하여 자동펌프에 의해 집수정에 고인물을 배수시켰다(그림 7참조).

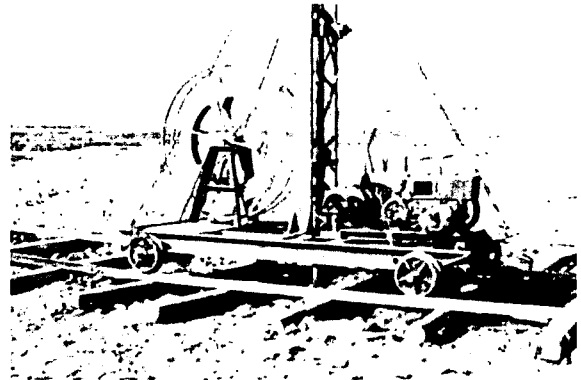
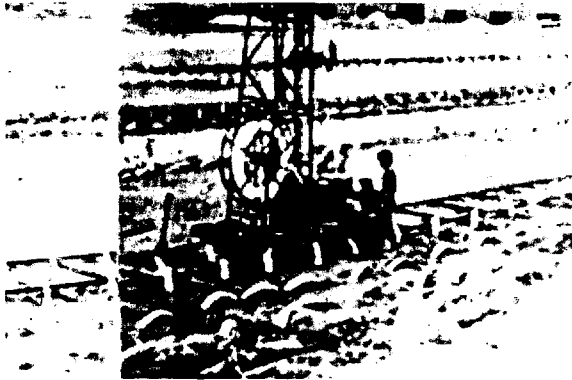


그림 1. 적현단지의 PBD타입장비(1975)



그림 2. 적현단지 PBD공법에 사용된 접착식 drain board(Kinjo Rubber사 제품)

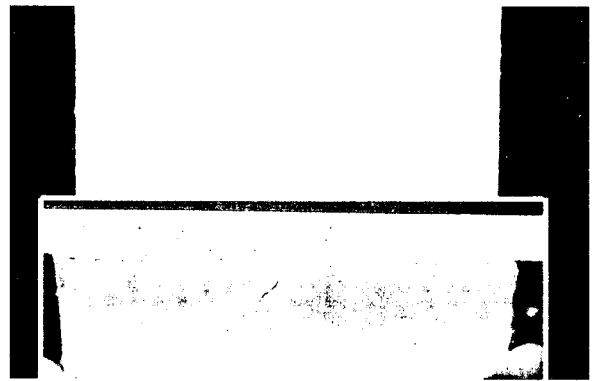


그림 3. 국산 PBD(접착식, 적현단지개량 공사이후 1990년 초까지 주로 사용된 제품)

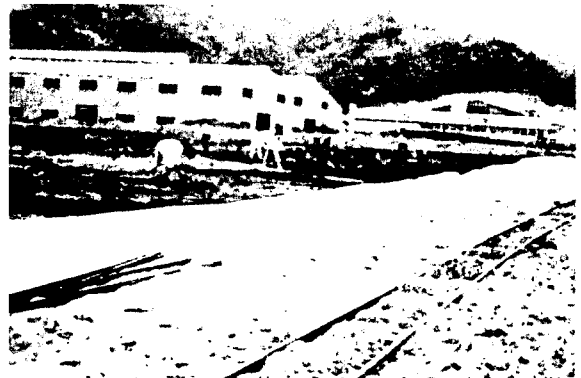


그림 4. 적현단지 연약지반위에 포설된 토목섬유(PP)

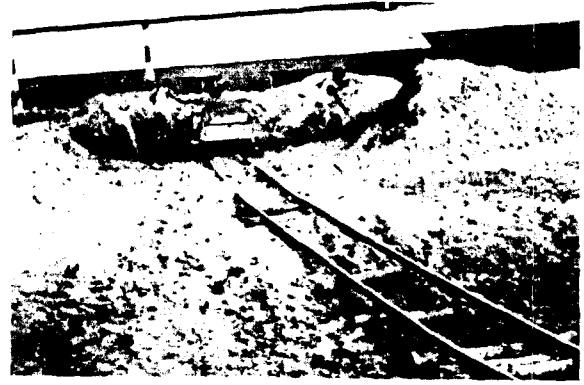
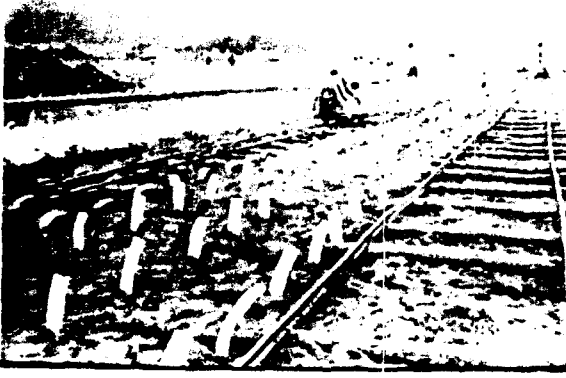


그림 5. 손수레에 의한 샌드매트 포설(적현단지)

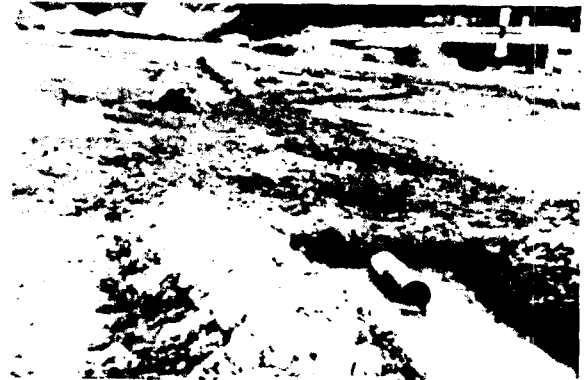
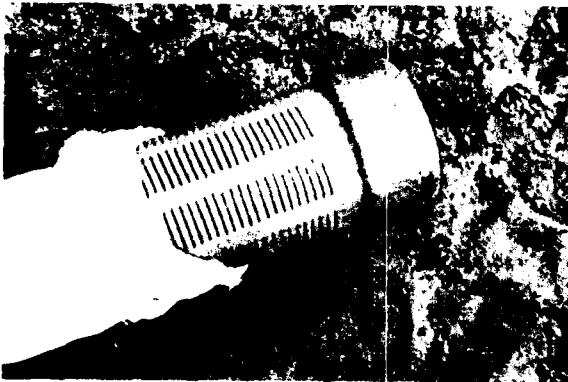


그림 6. 샌드매트내에 설치된 유공판(적현단지)



그림 7. 집수정 설치 및 집수정내의 물의 양수작업(적현단지)

이때 특기할 사항은 집수정을 약 1m 정도를 매설하여 설치하였으며(그림 8 참조) 또 샌드매트의 투수 성능에 대한 품질관리를 위해 KSF2322(흙의 투수시험법)에 의해 모래의 상대밀도별로 투수시험을 시행하였다는 점이다(표 1. 참조).

지반개량 효과확인을 위한 계측관리는 침하판 및 간극수압계를 이용하여 시행하였다(그림 9. 및 그림 10. 참조).

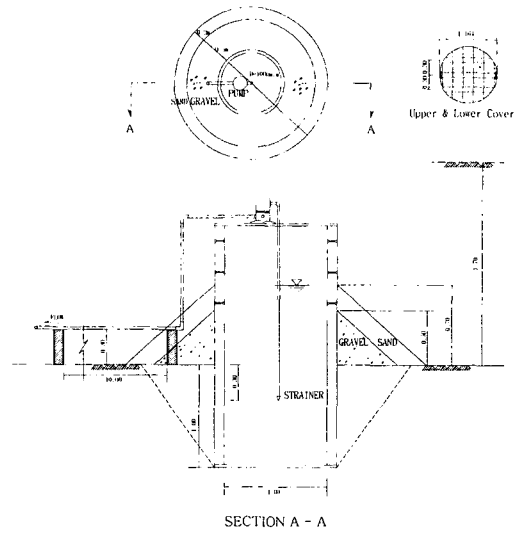


그림 8. 집수정 설치 상세도(적현단지)

표 1. 샌드매트에 사용된 모래의 투수시험 결과

상대밀도(%)	투수계수(cm/sec)
19.9	3.4×10^{-2}
48.4	2.3×10^{-2}
83.7	1.6×10^{-2}
특기사항	시험방법은 KS F 2322, $\gamma_{dmax} = 1.482t/m^3$, $\gamma_{dmin} = 1.276t/m^3$



그림 9. 적현단지 연약지반개량 공사에 설치된 침하판



그림 10. 간극수압계 매설 및 측정(적현단지)

3. 한국내에서 PBD공법의 확산 및 침체와 정착

마산 적현단지에서 PBD공법에 의한 연약지반 개량을 성공적으로 시행한 후 PBD를 국산화하여 울산항 저탄장, 원풍산업(주)의 울산타이어 공장, 광양제철소 인입철도공사, 아산항 진입도로공사 등 많은공사에서 PBD공법에 의한 지반개량을 실시하였다.

주식회사 럭키에서 PBD를 국산화 하였는데 (그림3. 및 그림 11.참조) 폴리에틸렌(Polyethylen)으로된 코아(core)에 비스코스(viscos) 70%와 에치렌(ethylene) 30%를 조합한 부직포형 필터를 사용하여 이를 코아에 부착하여 만든 접착식 PBD이다.

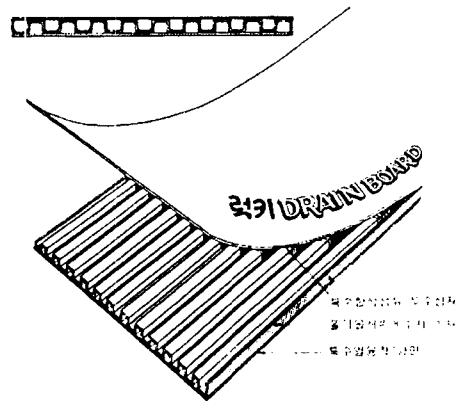


그림 11. 최초 국산 PBD(제품 카다로그에서 인용, 현재는 생산되고 있지 않음)

이 제품에 대하여 산업기지 개발공사에서 1977년에 1차, 2차 및 3차 시제품 대체 성능시험을 시행하면서 발전을 도모하였다. 이때 부직포의 통수능력은 타입전(그림 12. 참조) 및 타입후 횡압을 받을 경우(그림 13. 및 그림 14. 참조)에 대하여 시험을 시행하였다. 이중 그림 13의 시험장치는 싱가포르의 난양대학에서 시험한 장치와 아주 유사하다(Broms, 1994).

보고서 상에 상세한 시험장치 및 방법에 대한 기술이 없어서 자세히 파악을 할 수는 없는 상태이나 현재의 연구노력과 시험장치와 비교할 때 어려운 조건하에서 이러한 시험을 시행한것에 대해 많은 것을 느끼게 하여준다. 표 2는 이때 시험한 성과이다.

초기에는 이렇게 개발된 럭키드레인 보드를, 그 후에는 이와 유사한 제품을 사용하여 1990년 초까지

맨드릴을 이용하지 않고 PBD를 타입하는 나타입 장비를 사용하여 PBD설치공사를 시행하였는데 적현단지에서 사용하였던 장비의 대형화를 시킨 것이었다(그림 14 및 그림 15참조).

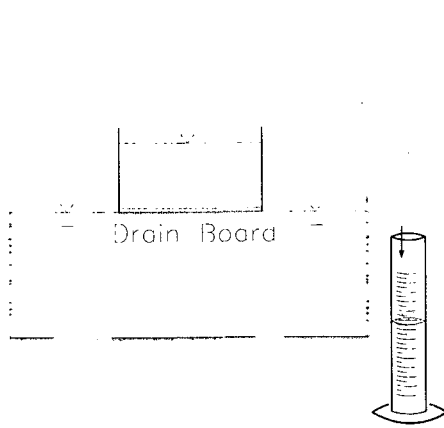


그림 12. PBD 타입전 부직포의 투수성 시험(산업기지 개발공사, 1977)

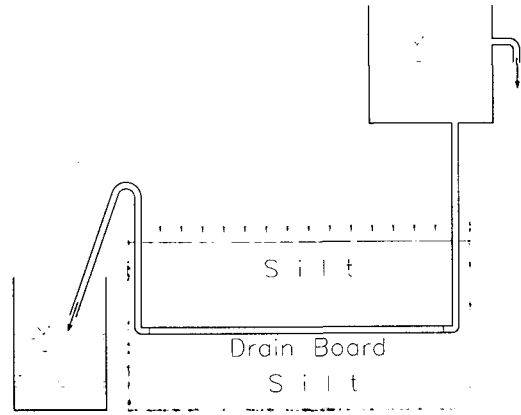


그림 13. PBD타입후 압밀하중에 따른 종방향 투수도 시험(산업기지 개발공사, 1977)

표 2. Drain Board의 화학적 물리적특성의 비교표(산업기지 개발공사, 1977)

구 분		캐슬 드레인보드 (일본) 킨조 고무제	럭키 드레인보드			비 고
			1차 시제품	2차 시제품	3차 시제품	
재 질	내부골격 (Core)	Polyethylene	Polyethylene	Polyethylene	Polyethylene	
	외부 부직포 (Filter)	Viscose50~60% ethylene 40~50%	Viscose55% Polyster Nylone45%	Viscose80% ethylene 20%	Viscose70% ethylene 30%	
화 학 적 시 험	중량(g/m)	122.5	97	112.1	124.1	
	황산30%수용액	-0.96	-1.45	-1.02	-0.93	
	염산20%수용액	-0.78	-1.23	-0.86	-0.76	
	수산화나트륨 40%수용액	1.41	-9.42	-1.83	-0.10	
	염화나트륨 10%수용액	-0.27	-0.54	-0.30	-0.42	
물 리 적 시 험	드레인보드 인장강도(kg/95mm)	177.8	185.4	165.6	175.2	
	부직포인장강도 (kg/25.4mm)	5.0	4.7	3.8	4.0	
	부직포 신장율(%)	21.7	33.2	17.4	15.1	

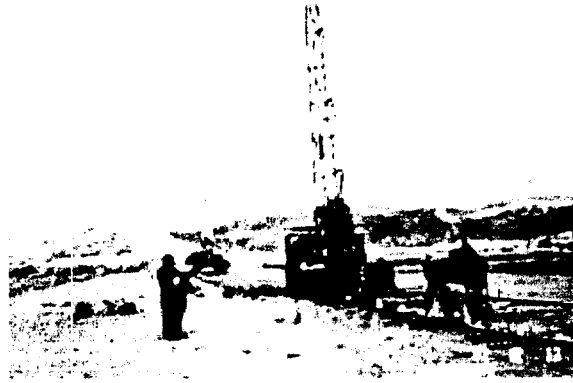


그림 14. 울산항 저탄장 지반개량공사에 사용된 장비(1982)

이러한 나타입 방법의 시공에 따라 타입과정에서 PBD 가 꼬이거나(그림 15의 좌측그림 참조) 절단되거나(그림 16. 참조) 또는 필터가 벗겨지고 찢어지는 현상이 잦았다(그림 17참조).

1980년대 말 부터는 맨드렐(Mandrel)을 이용한 타입기를 제작하여 시공하기 시작을 하였는데 중량이 무거웁고(약 13ton 내외) 크레인에 장착을한 특성상 장비의 통행성 확보상에 문제가 많았다. 특히 나타입에 비해 시공비가 증가되는 것으로 인해 계획을 담당하는 기술자들이 이를 회피하는 경향이 잦았다(그림 18참조).



그림 15. 나타입 장비에 의한 PBD타입(울산항 저탄장,1982)

또 타입장비의 효율성이 작거나 동력이 부족하여 계획된 타입깊이까지 타입을 하지 않는 경우가 많았으며 PBD재질에 대한 통수능력과 인장강도 및 필터의 요구조건 등에 대한 구체적인 시방사항이 명시되지 못한채 공사관리를 시행하여서 품질관리에 대한 제한이 있었다. 다른 한편으로는 비스코스와 같이 박테리아에 의해 취약한 재질을 사용하여 지하수위 근처에서 필터가 부식되어 그 기능을 다하지 못하고 수명이 1~1.5년 정도밖에 되지 못하여 장기재하가 곤란한 상태가 있었다(Hansbo와 Torstensson, 1977). 이렇게 타입장비의 문제, 나타입으로 인한 문제 및 PBD재질로 인한 문제점으로 인해 PBD공법에 의한 연약지반 개량공사에 문제가 있다는 것을 알게되어 이 공법의 사용을 기피해 왔다.

1990년 중반에 PBD 타입장비가 자체개발되거나 외국의 기술지원을 받아 국내에서 생산되고(그림 19. 및 그림 20. 참조) 국산품 PBD의 질의 개선과 더불어 국제적으로 인정을 받고 있는 외국산이 도입되므로 다시 활기를 되찾게 되었다.



그림 16. PBD 나타입으로 타입시 PBD에 인장력이 발생하여 PBD가 절단된 상태(1982)

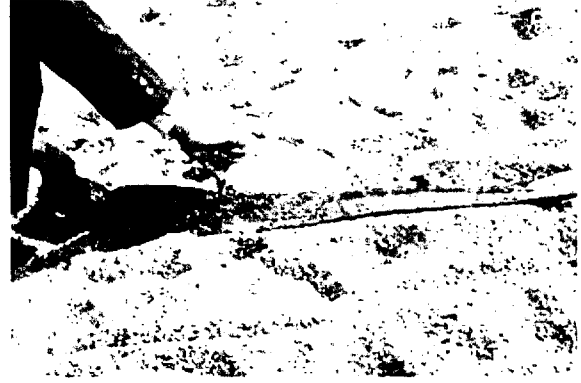


그림 17. PBD 나타입으로 타입시 샌드매트 및 연약층 중간에 있는 단단한층에 의해 필터가 벗겨진 상태(1982)

특히 공사를 발주하는 관청에서 실제로 현장에서 시험시공을 통하여 그 효과의 확인 및 경제성 등을 비교 분석하였다. 그 대표적인 것으로는 한국 컨테이너 부두 공단이 1994년에 “광양항 1단계 컨테이너 터미널 축조공사”에서 광양에 시행한 것과, 1995년에 한국도로공사에서 “서해안 고속도로(서천~군산간 구간) 건설공사”에서 시행한 것, 한국토지공사가 1995년에 “양산 물금지구 택지개발사업”에서 2단계 사업지구내에서 시행한 것 등이 있다. 이러한 시험시공 결과들은 모두 학회에서 세미나 등을 통하여 보고되었거나 보고서로 작성되어 알려졌으며 엄격한 품질관리를 한다면 PBD공법이 경제성 및 시공성 등에서 효율적이라는 것이 인식되어 다시 그 적용성이 증가되고 기술자들의 관심이 집중되어 있는 상태이다.

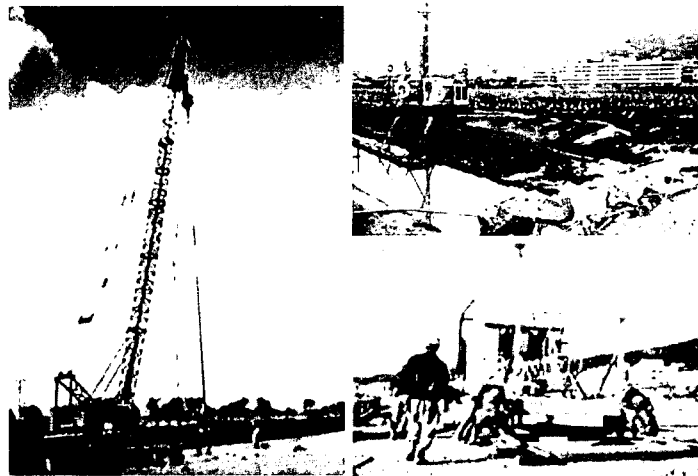


그림 18. 크레인을 이용한 맨드릴식 PBD 타입기(삼우개발, 1988)

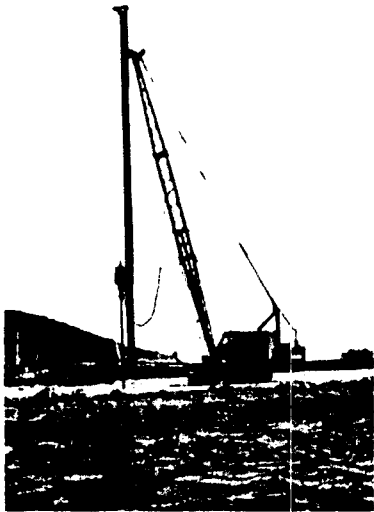


그림 19. 진동햄머식 맨드렐 타입기(크레인을 사용)

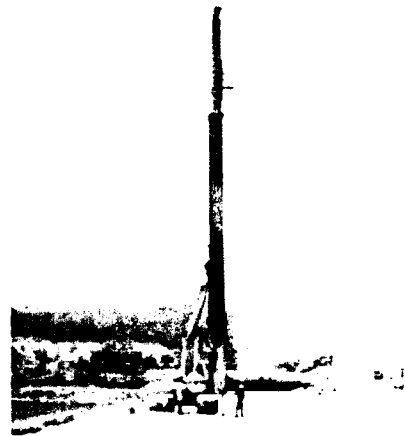


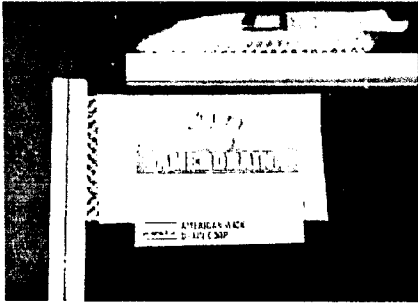
그림 20. 유압식 맨드렐 타입기(굴착기 사용)

4. PBD공법의 설계와 시공

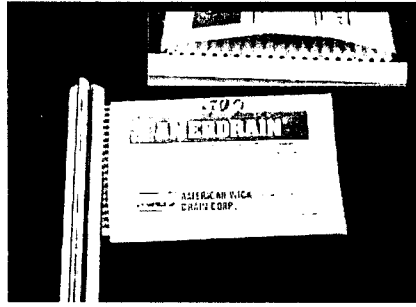
4.1 PBD공법의 다양한 명칭 및 종류

PBD공법은 인위적으로 그 재료를 개발한 특성상 개발자 또는 각 나라마다 혼란스러울 정도로 다양한 호칭을 가지고 있다. 프랑스에서 개발된 원통형 모양의 메나드드레인(cylindrical drain), 마 등의 자연섬유로 만든 NFD(natural fiber drain), 특히 띠 모양의 밴드드레인(prefabricated band drain, PBD), 띠 드레인(strip drain), 인공 수직배수재(prefabricated vertical drain) 및 최초로 종이를 사용하면서 연유된 페이퍼드레인(paper drain)등이 있다(김, 1998). 그림 21은 국내에서 유통되고 있는 PBD로 일부는 외국과 기술제휴를 하여 국내에서 생산한 후에 동남아 등으로 수출을 하는 제품도 있으며 국산품이 외국공사에 사용된 사례도 있다.

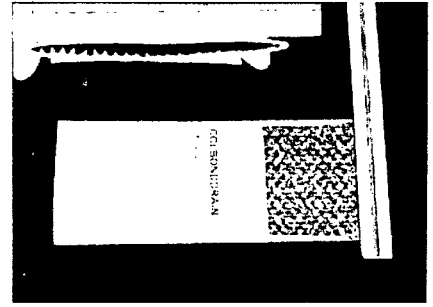
PBD의 종류는 크게 둘로 나눌 수 있다. 첫째는 부직포 배수재(non-woven drain)이고 두 번째는 복합 배수재 또는 토시형(포켓형) 배수재(composite drain, sleeve drain)이다. 전자는 두께가 약 5mm인 니들 펀치 부직포(needle punched non-woven geotextile)의 판을 약 100mm의 폭으로 잘라 만든 것이며(Zanten, 1986), 후자의 밴드 드레인은 코어(core)와 필터(filter)로 구성되고 접착식은 코어에 필터인 부직포를 열융착으로 붙인 것이며 토시형(포켓형)은 토시처럼 끼워 있어서 분리할 수 있다. 코어의 재료는 주로 폴리에틸렌(polyethylene)과 폴리프로필렌(polypropylene)을 사용한다. 코어는 제품에 따라 여러모양이 있는데, 이들을 대별하면 (1)돌기모양(studded core, Alidrain, Flodrain 등), (2)골 모양(grooved core, Mebradrain, Geodrain 등), (3)필라멘트 모양(filament core, Colbond CX 1000 등)으로 나누인다(김, 1995).



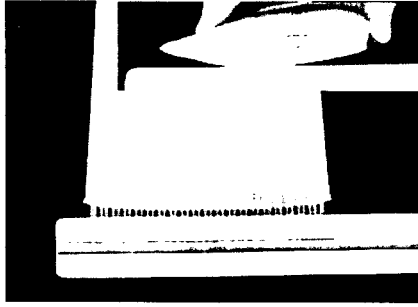
A. AMERDRAIN 417



B. AMERDRAIN 407



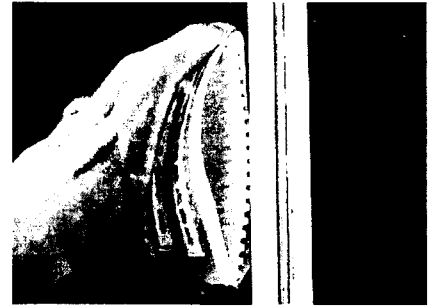
C. CX 1000(COLBONDDRAIN)



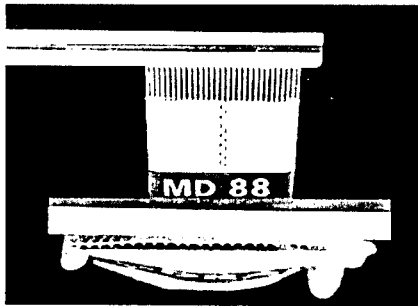
D. FD767(FLEXI-DRAIN)



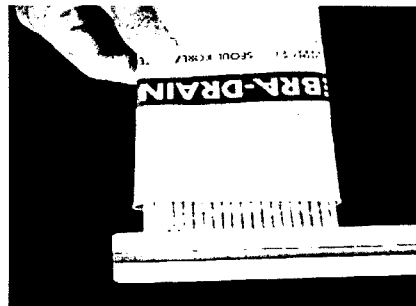
E. DBD2000(세원 지오신테크)



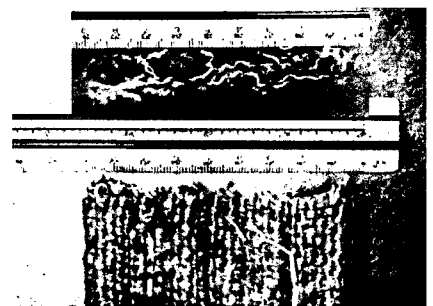
F. Civialon 77(길한산업)



G. MD88(MEBRA-DRAIN)



H. MD7007(MEBRA-DRAIN)



I. Fiber Drain(후켄조사설계)



J. Menard Cylindrical Drain(상지메나드)

그림 21. 여러 가지 형태의 인공수직배수재(E,F,G,H는 국내생산품인데 이중 G,H는 외국과 기술제휴하여 국내에서 생산되고 있는 제품임)

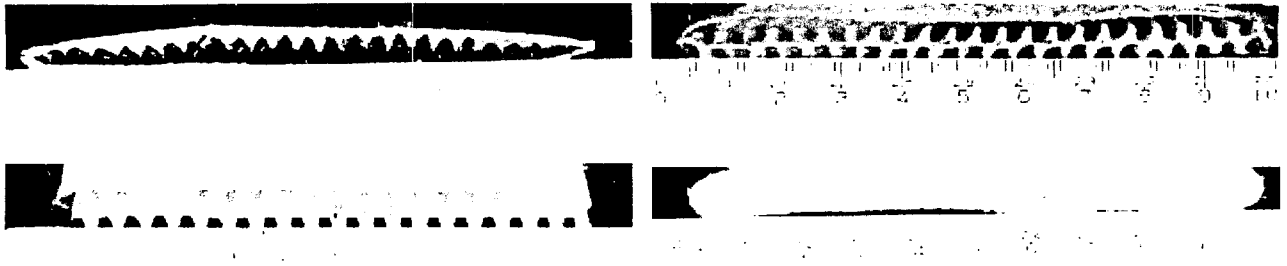


그림 22. 밴드드레인중 여러가지 형태의 코아 모양

4.2 PBD공법의 이론

Barron(1948)은 Terzaghi의 압밀이론을 기본으로 해서 연직배수재가 설치되어 있을 경우 압밀층 전층에 대한 평균압밀도는 등변위압밀(Equal Strain Consolidation)조건(이론적으로는 부정확하나 실제적으로 적용 가능함)에서 다음 식(1)과 같이 계산된다고 하였다.

$$\bar{U}_h(T_h) = 1 - \exp[-8T_h / F(n)] \quad \text{..... (1)}$$

$$\text{여기서, } F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2}$$

$$T_h = \frac{C_h \cdot t}{d_e^2} \quad (\text{시간계수, Time Factor})$$

$$n = \frac{r_e}{r_w} \quad (\text{간격비, Spacing Ratio})$$

C_h : 수평방향 압밀계수(cm^2/sec)

t : 압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간(sec)

d_e : 영향원의 직경(cm)

r_e : 영향원의 반경 ($r_e = \frac{d_e}{2}$, cm)

r_w : 연직배수재의 반경($d_w = 2r_w$, cm)

또 연직방향의 압밀도와 수평방향의 압밀도를 고려한 전압밀층에 대한 평균압밀도는 식(2)와 같이 계산된다고 하였다.

$$\bar{U} = 1 - (1 - \bar{U}_h)(1 - \bar{U}_v) \quad \text{..... (2)}$$

여기서, \bar{U}_h : 수평방향 평균압밀도, \bar{U}_v : 연직방향 평균압밀도

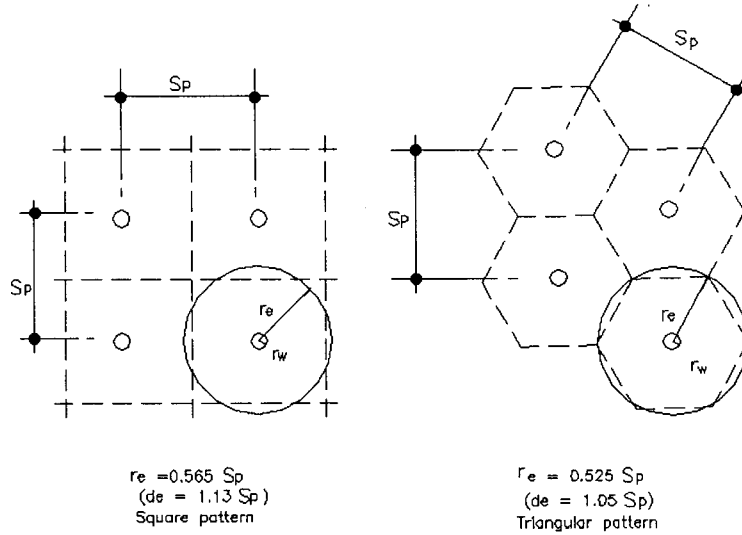


그림 21. Cylindrical Blocks

Hansbo(1981)는 연직배수재의 설치시 지반이 교란되는 영향(Smearing Effect) 및 배수재의 흐름저항(Well Resistance)을 고려하여 임의의 깊이에서의 평균압밀도는 식(3)과 같이 계산된다고 하였다.

$$U_h(z, T_h) = 1 - \exp(-8T_h / \mu_{sw}) \quad \text{----- (3)}$$

여기서,

$$\mu_{sw} = \mu_s + \mu_w \quad \text{----- (4)}$$

$$\mu_s = \frac{n^2}{n^2-1} \left(\ln \frac{n}{S} + \eta \ln S - \frac{3}{4} \right) + \frac{S^2}{n^2-1} \left(1 - \frac{S^2}{4n^2} \right) + \eta \frac{S^2-1}{n^2-1} \left(\frac{S^2+1}{4n^2} - 1 \right) \quad \text{--- (5)}$$

$$\mu_w = \pi \cdot z(2H-z) \frac{K_h}{q_w} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) = \frac{\pi}{R} \left(\frac{z}{H} \right) \left(2 - \frac{z}{H} \right) \left(1 - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{----- (6)}$$

$\eta = K_h / K_s$ (Permeability Reduction Ratio Due to Disturbance)

$q_w = \pi r_w^2 K_w$ (Discharge Capacity of a Drain Well)

$R = q_w / (K_h H^2)$ (Well Resistance Factor)

$S = r_s / r_w$ (Radius Ratio of the Smear Zone)

식(5) 및 식(6)을 미소한 값을 나타내는 항들을 생략하여 식(4)와 같은 형태로 표현된 것이 식(7)인데 이 식에서 첫번째항은 연직배수재의 설치간격배치에 대한 것으로 설계와 관련되고, 두번째항은 지반교란에 관한 것으로 시공과 관련되며, 세번째항(마지막 항)은 배수재의 통수능력과 지반개량깊이 및 연약지반의 투수계수와 관련된다. 두번째항과 세번째항이 없는 경우는 이상적인 경우이다.

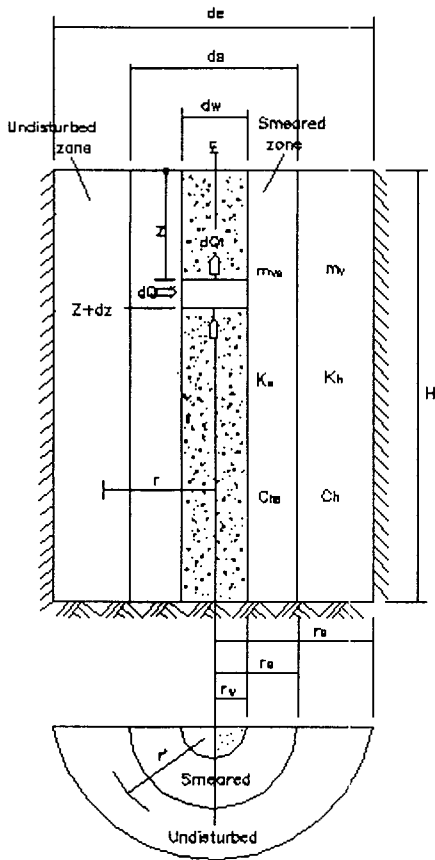
$$\mu_{sw} = \left[\ln \left(\frac{d_e}{S} \right) - 0.75 \right] + \left[\left(\frac{K_h}{K_s} \right) \times \ln \left(\frac{S}{d_w} \right) \right] + \left[\pi z(2H-z) \frac{K_h}{q_w} \right] \quad \text{----- (7)}$$

= 연직배수재의 간격항 + 지반교란의 영향(Smear)항 + 배수재의 흐름저항(Well Resistance)항

여기서, $U_h(z, T_h)$: 깊이 z에서의 평균압밀도

$$T_h = \frac{C_h \cdot t}{d_e^2} \text{ (시간계수, Time Factor)}$$

t : 압밀시간(압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간, sec)
 C_h : 수평방향 압밀계수(cm^2/sec)
 d_e : 영향원의 직경(cm)
 $d_e = 1.13S_p$ (정사각형 배치), S_p : Drain 간격(cm)
 $d_e = 1.05S_p$ (삼각형 배치)
 H : 배수길이, d_w : 배수재의 직경 S : Smear Zone의 직경
 K_h : 수평방향 투수계수(cm/sec)
 K_s : Smear Zone의 투수계수(cm/sec)
 q_w : 배수재의 통수능력(Discharge Capacity, m^3/sec)



K_h : 교란되지 않은 지반의 수평방향 투수계수(cm/sec)

K_s : 교란된 지반의 수평방향 투수계수(cm/sec)

K_w : 연직배수재의 투수계수(cm/sec)

z : 임의의 깊이(cm)

H : 압축층의 두께(cm)

$$T_h = \frac{C_h t}{d_e^2} \text{ (시간계수, Time Factor)}$$

$$n = \frac{r_e}{r_w} \text{ (간격비, Spacing Ratio)}$$

C_h : 수평방향 압밀계수(cm^2/sec)

t : 압밀도를 구하고자 하는 임의의 시간(sec)

d_e : 영향원의 직경(cm)

$$r_e : \text{영향원의 반경}(r_e = \frac{d_e}{2}, \text{ cm})$$

$$r_w : \text{연직배수재의 반경}(d_w = 2r_w, \text{ cm})$$

그림 22. Schematic Picture of Soil Cylinder With Vertical Drain

4.3 설계와 시공

4.3.1 PBD의 품질

(1) PBD의 통수능력

식 (7)과 관련해서 이미 서술한 것과 같이 세 번째 항은 배수재의 통수능력과 관련되는 항이다. PBD를 맨드렐을 통하여 지중에 설치하고 이를 제거하면 곧 배수재인 PBD는 횡압을 받게 된다. 횡압은 토압, 수압 및 과재하중으로 인한 증가된 압력으로 이루어지며 길이에 따라 증가한다. 그림 23에서와 같이

코아에 의해서 필터인 부직포가 지지되나 이것이 신장되어 배수통로를 좁힐 경우 배수단면을 축소시키게 된다. 또한 지반이 과재하중등에 의해 침하하거나 측방변형등이 발생될 경우에는 초기에 직선상으로 있던 PBD가 휘어지거나(bending), 뒤틀리거나(twisting), 접히거나(folding), 밧줄처럼 꼬이기(kniking)도 한다(그림 24참조). 이로 인하여 배수재의 기능이 저하되리라는 것을 충분히 예상할 수 있다(김, 1995). 배수재의 통수능력에 대한 시험에 대하여는 국내에 충분히 소개된 바 있는데(김, 1995 및 1998) 델프트(delft)방법이 횡압을 고려할 수 있을 뿐만 아니라 배수재가 휘어졌을 경우에도 시험이 가능하며 또한 재하기간의 효과도 고려할 수 있으므로 품질관리시 고려할 수 있는 방법이 될 수 있을 것이다. 이 시험은 “한국원사직물연구원”에서 시험이 가능하여 국내에서도 비교적 쉽게 품질관리에 활용할 수 있다.

설계시에는 제품을 생산하는 회사의 카다로그등에 수록된 시험성적서를 의존할 수밖에 없는 형편이지만 공공기관에서 발행한 도서등에 수록된 자료등으로 이를 확인할 필요가 있으며 이때 반드시 그 방법등을 확인하여야 된다. 또 실제 시공전에 자재검수과정에서 직접 그 품질을 반드시 확인하는 것이 요구된다. 또 지반개량 공사 과정에서 과재성토시에 지반변형이 심하게 발생되었을 경우에는 박(1994)이 시험한 방법등으로 시험을 시행할 필요가 있다.

(2) 필터의 막힘(clogging)

배수과정에서 필터의 구멍이 적절하지 않다면 개량예상이 되는 미세한 입자를 갖는 지반에 있는 토립자에 의해 구멍이 부분적으로 막혀 통수능력을 저하시키게 되며 이로 인해 소요의 계획된 공기내에 지반개량이 이루어지지 못하고 압밀지연을 유발시키게 될 것이다. 이 시험방법에 대하여도 국내에 충분히 소개된바 있으며(김, 1995 및 1998) ASTM D5101에서 규정하는 방법으로 시행한다. 필터의 막힘은 필터의 유효구멍크기(EOS, effective opening size)와 관련되어 규정한다. AOS(apparent opening size, 또는 EOS)를 결정하는 시험법은 직포를 평가하기 위해서 미군 공병대에서 개발되었다. 그 이후 부직포를 포함한 모든 재료로 확장되어 시행되고 있다. 겉보기 유효직경(AOS)또는 등가 입경(EOS)은 CW-02215에 대하여 재료의 개구부에 크기가 가장 가까운 개구부를 갖는 표준체 번호로서 정의되고 있다.

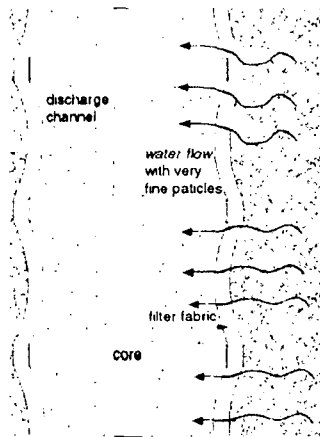


그림 23. PBD의 지반내에서의 횡압에 의한 변형



그림 24. 지중에 PBD의 변형(Mebradrain의 기술 자료, Cortlever)

ASTM에서는 D4751로 규정하고 있다. 이 시험은 크기를 알고 있는 체의 숫자로 지정된 유리구슬(glass bead)를 사용하고 체질을 해서 AOS를 결정한다. 체질은 5%이하가 재료를 통과할 때까지 연속적으로 보다 작은 크기의 유리구슬을 사용해서 수행한다. 재료시편의 AOS 혹은 EOS는 동일 크기의 US표준체 No.위에 잔류하고 있는 것이다. 이 시험법은 많은 문제점을 지니고 있지만 더 좋은 간편한 시험법이 없어서 현재 널리 사용되고 있는 상태이다.

이러한 문제점 때문에 Chen(1986)등은 정밀도가 좋은 수은법(Mercury Intrusion Method)을 사용하여

O_{90} 을 이용할 것을 제안하고 있으며 또 O_{90} 부근에서 커브(curve)의 경사가 변하는 특징을 이용하도록 제안하고 있다. AOS는 PBD의 필터를 규정하는데 사용되어지며 필터는 토립자의 손실을 최소로 하면서 자유로운 물의 흐름을 허용하여야 되는 특성상 다음과 같은 상반되는 2개의 특성을 갖는다.

- ① 흡 보존성 : Geotextile을 통한 세립토의 유실을 최소로 할 수 있도록 Geotextile의 구멍 크기는 충분히 작아야 함. 이 기준은 Geotextile의 설계 구멍크기의 상한(upper limit)을 나타냄.
- ② 투수성 : 인접한 지반내에 과잉간극수압이 발생되지 않도록 Geotextile 설계 구멍크기의 하한(lower limit)을 나타냄.

실제 현장에서는 이러한 상·하한선을 고려하여 개량대상지반의 입도와 관련지어 검토를 하여야 된다. 표 3은 필터의 AOS와 관련된 필터의 기준이다.

표 3 AOS와 관련된 필터의 기준

제안자	제안년도	기준안
Chen & Chen	1986	$O_{90}/D_{85} < 1.3 \text{ to } 1.8$
Bergado et al.	1992	$O_{90}/D_{85} < 2 \text{ to } 3$
Ogink	1975	$O_{90}/D_{90} < 1.8$

ASTM D4751로 규정된 시험방법에 의한 EOS의 측정 역시 “한국원사직물연구소”에서 시험이 가능하여 국내에서도 비교적 쉽게 품질관리에 활용할 수 있다.

(3) PBD의 인장강도

(가) PBD에 작용되는 인장력

릴(reel)에 두루말이로 감겨져 있는 PBD는 맨드렐의 유도를 받아 소요깊이까지 지중으로 삼입된다. 이 과정에서 PBD는 두루말이를 잡아당기는데 필요한 충분한 인장력을 가져야 한다. PBD가 토시형일 때에는 코아와 필터가 인장력에 동등하게 저항하여야 하며, 물과 접촉했을 때 인장강도가 저하되어서는 안된다. PBD가 과도한 인장력을 받아 과도하게 늘어나거나 찢겨지면 배수능력을 현저히 감소시킬 수 있다(김, 1998). 그림 24에서 보는것과 같이 압축성이 대단히 큰 지반에서는 과도한 변형이 발생할 것이며 이에 따라 PBD에 큰 인장력이 발생하게 된다. 또한 굳은 지층과 연약한 지층에 교대로 있을 때에는 변형의 상이로 인한 인장력이 발생할 것이다. 연약지반에 적합한 습지식 전용타입기가 없이 통행성 확보를 시행하는 우리나라의 실정에서는 연약지반과 산토복토의 토층경계부에서 인장력이 발생할 수 있는 점에 주의를 기울일 필요가 있다. 특히 필자가 조사한 바에 의하면 “광양항 1단계 컨테이너 터미널 축조공사”에서 시험시공을 위한 PBD타입시 진동식 햄머를 사용하였는데 통행성 확보를 위해 설치된 산토복토층과 샌드매트층을 맨드렐이 관통한 후 자유낙하 할 때 발생하는 큰 가속도가 드레인 롤(roll)에 전달되어 PBD에 인장강도가 크게 발생되어 절단되는 사례가 많이 발생하였다.

(나) 필터의 소요인장력

Christopher와 Holtz(1985)는 일반적으로 사용되는 토목섬유가 시공중에 손상에서 견디어낼 수 있도록 ASTM D4632방법에 의한 grab strength가 최소한 350N(약 35.7kg)이상이 되어야 한다고 제시하였으며 Holtz(1991)등은 이를 바탕으로 PBD에서는 이 보다 큰 값이 필요할 것임을 제안하였다. Kremer(1982)등은 필터의 인장강도가 물에 민감한 것(필터가 종이인 경우 등)과 그렇지 않은 것으로 나누어서 그 값을 다음과 같이 제안하였다(이때 시료는 시험전에 충분히 포화시켜야 됨).

① 물에 민감한 필터

- 최대 인장강도 1.2KN/m(122.4kg/m)이상
- 파괴시 변형율은 2%이상 10%이하

② 물에 민감하지 않은 필터

- 최대 인장강도는 변형율 2%에서 0.75KN/m(76kg/m)이상
- 또는 10%변형율에서 0.375KN/m(38kg/m)이상

이를 도식화하면 그림 25와 같은데 시험결과 최대 인장강도가 이 그림의 굵은선 이내에 존재할 경우에는 부적합함을 의미한다. 이 제안은 변형율에 대한 제한이 있으므로 단순히 최대 인장강도를 규정한 것이 아님에 유의할 필요가 있다.

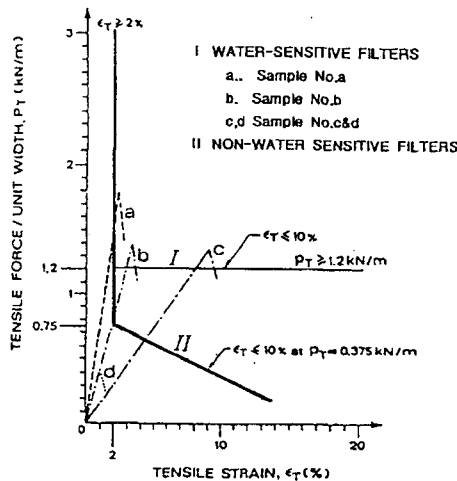


그림 25 Kremer(1982)등이 제안한 PBD의 필터 인장강도

전술한 바와 같이 1997년등에 한국토지공사에서 양산물금지구에서 PBD의 시험시공을 실시한바 있으며 이 시험시공에 사용된 필터재의 인장강도는 KS K 0520 Grab법(ASTM D4632와 비교할 때 clamp가 1"가 작음)으로 시험시 51~81kg이었으며, 배수성능 시험결과 직선상태에서 21~40cm³/sec이었다. 이러한 점을 고려하여 한국토지공사 토지연구원에서는 필터재의 인장강도와 드레인보드의 배수성능에는 상관관계가 있는 점을 감안하고 필터재의 인장강도는 grab법으로 50kg이상인 되어야만 소요배수성능을 발휘할 수 있을 것으로 판단한 시방규정(안)을 제안한 사례도 있다.

필터의 인장강도를 크게 규정할 경우 제품값이 고가로 될 수 있으나 국내의 열악한 시공장비와 복토 등을 사용하여 통행성을 확보하는 실정 등을 고려할 때 필터의 인장강도를 grab법으로 시험할 때 50kg 이상으로 규정할 필요성이 있다. 지금까지는 토목섬유에 대한 시험을 KS K규정에 의해 시행하였으나 KS F 2124(지반용 섬유)의 인장강도 시험방법)에 의해 시행할 필요가 있다.

(㉔) PBD(필터 및 코아)의 인장강도

PBD의 인장강도를 시험하는 방법의 KS K 0520(grab법)과 ASTM D4632 방법 등을 사용하고 있었으나 이 방법은 실제 타입시 PBD에 작용되는 인장력을 대표하지 못하므로 전술한 KS K 2124(또는 ASTM D4595)에 의해 시험을 시행할 필요가 있다. 싱가포르 창이공항의 경우 변형율이 2~10%의 내에 있을 때 100kg/10cm폭의 강도를 규정하고 있다. 국내에서는 복토등을 시행하는 특성을 고려할 때 전술한 필자의 조사결과등의 절단현상등이 예견될 수 있다. 따라서 이 보다는 큰 값의 적용이 요구되며 200kg/10cm폭 이상을 규정할 필요가 있다.

(라) PBD의 열화

PBD의 성분인 폴리머(polymer)는 자외선을 받으면 쉽게 열화된다. 이것이 지중에 삽입되었을 때에는 산소의 결핍으로 열화 정도가 낮지만 생산직후부터 타입시까지의 보관시간이 길어질수록 열화는 더 커진다. 국내에서 조사된 바에 의하면 인천 신국제공항 공사의 경우 약 22개월이 경과한 후에도 배수능력의 감소는 심각하지 않았으나 한국도로공사에서 서천군산간 고속도로 현장에서 시험시공한 구간에서는 23개월 후에 배수능력의 감소가 있었다는 발표가 있었다(김, 1998). 이러한 열화에 대하여 전문적인 바와 같이 PBD공법의 정착 초기에 실패를 경험한 예가 있으므로 보다 지속적인 연구가 필요하다.

(5) PBD의 품질관리 문제점과 개선방향

PBD는 여러 가지 상품명으로 세계적으로 50여종 이상이 생산된다고 하며, 동일한 제품이라 하더라도 화학성분의 약간의 변경으로 현저히 다른 특성을 보일 수 있다. 따라서 성공적인 지반개량을 위해서는 무엇보다 배수재의 품질관리가 중요하다. 배수재의 품질관리는 설계단계와 시공단계의 둘로 나누어 생각할 수 있다. 전자의 경우에는 기술자가 주어진 현장에 가장 적절한 시방서를 작성하여 그 기준을 만족하는가 하는 것이므로 시방서에서 정하는 모든 시험을 수행하여 그 시험결과가 그 기준을 충분히 만족시켜야 한다. 후자의 경우에는 현장에 계속적으로 공급되는 배수재가 시방서에 만족하는 일정한 품질을 보장하는가 하는 시험이다. 따라서 PBD는 시공중에도 임의로 시료를 채취하여 품질시험을 간헐적으로 수행할 필요가 있다.

PBD에 대한 품질시방서를 작성할 때에는 설계자는 현장조건을 충분히 이해하여 어떤 시험방법을 적용하여 어느 수치이상의 값을 요구할 것인가를 분명히 제시해야 한다(김, 1998). 대부분 설계자가 PBD를 생산하거나 시공하는 전문건설업체로부터 공사용 특별시방서를 제공받아 이를 그대로 첨부하거나 부분적으로 편집하여 작성하고 있는데 이러한 관행은 빨리 시정되어야 된다. 이러한 방법에 의존할 경우 영세한 PBD제작사로부터 민원을 받게 되는 표적이 되며 또한 과다 내지 과소 설계가 되어 경제성이 작아지거나 공사를 실패하는 원인을 제공할 수 있다.

동일 회사에서 만든 제품이라도 제품의 고유번호에 따라 통수능력(q_w)과 필터나 코아의 인장강도등이 다르게 생산되어 지반조건에 따라 선정하여 사용할 수 있도록 되어 있는 점을 주의 깊게 파악하여 품질에 대한 시방서를 작성하여야 될 것이다.

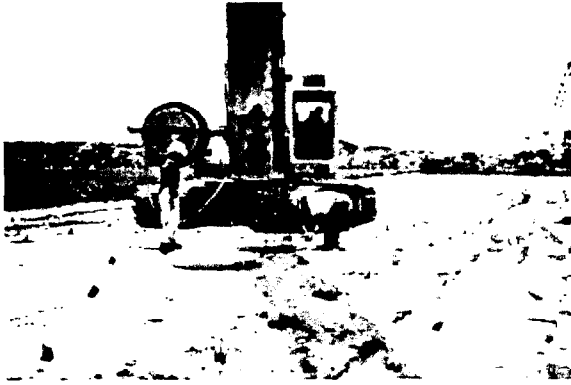
3.3.2 PBD의 시공

(1) PBD의 시공시 지반의 교란

PBD를 설치하는 공사는 샌드매트가 포설되고 통행성이 확보된 상태에서 ①타입위치로 이동, ②맨드렐선단부에 슈(Shoe, Anchor plate)를 PBD에 장착, ③맨드렐을 관입하여 맨드렐내에 있는 PBD를 지중에 삽입, ④슈가 지중에서 PBD를 정착시켜주는 상태에서 맨드렐을 인양후 PBD를 샌드매트위에서 절단하는 일견 단순한 반복 작업이다(그림 26참조). 따라서 작업효율이 높고 장비의 중량이 작아서 접지압이 작고 이에 따라 연약지반에서 장비의 통행성 확보가 용이하여 연약지반내에 있는 얇은 모래층(sand seam)을 단절시키지 않아 그 효과를 유지할 수 있도록 하는 장점이 있다. 그러나 이러한 작업과정에도 몇가지 개선되거나 주의할 사항이 있다.

(가) PBD의 타입장비

국내에서 주로 사용되고 있는 타입기는 모두 자주식으로 진동햄머(Vibro hammer)를 크레인에 장착하여 사용하는 경우와 굴착기등의 유압을 이용하여 정적하중에 의해 타입을 하는 경우의 2가지이다(그림 27참조). Hansbo(1979)는 진동햄머식 타입기는 타입시 과잉간극수압이 유발되어 지반이 불안정해지기 때문에 사면 선단부 등 안정성에 문제가 있는 위치에서는 사용하지 말 것을 권하고 있다. 연약한 점성토 지반은 교란되면 전단강도가 저하되고 흙의 투수성 역시 저하된다.



① 타입위치로 이동



② 맨드릴 선단부내 슈를 PBD에 장착

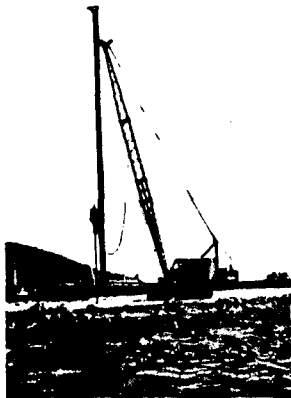


③ 맨드릴관입 및 인양

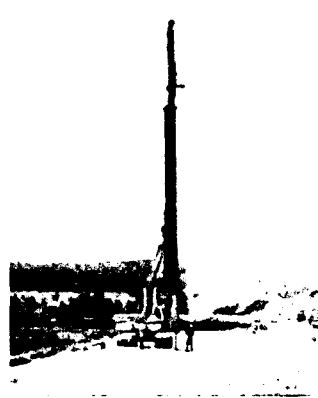


④ PBD 상부 절단

그림 26. PBD를 설치하는 공사의 시공순서



a. 진동햄머식 타입기



b. 유압을 이용한 정적하중에 의한 타입기

그림 27. 국내에서 사용되고 있는 PBD 타입장비

이러한 이유를 현재 시공중에 있는 싱가포르의 창이공항 공사에는 모든 타입장비를 정적하중에 의한 타입기로 제한하고 있다. 한국의 여건상 진동햄머식 타입기의 사용을 제한 할 수는 없으나 향후 점진적으로 정적 하중에 의한 타입기의 사용만으로 제한할 필요가 있다.

(나) 맨드렐의 크기나 교란영역(smear zone)

맨드렐은 원형(팩 드레인용 맨드렐과 대동소이한 크기), 다이아몬드형 및 직사각형의 모양이 사용되고 있다(그림 28참조).

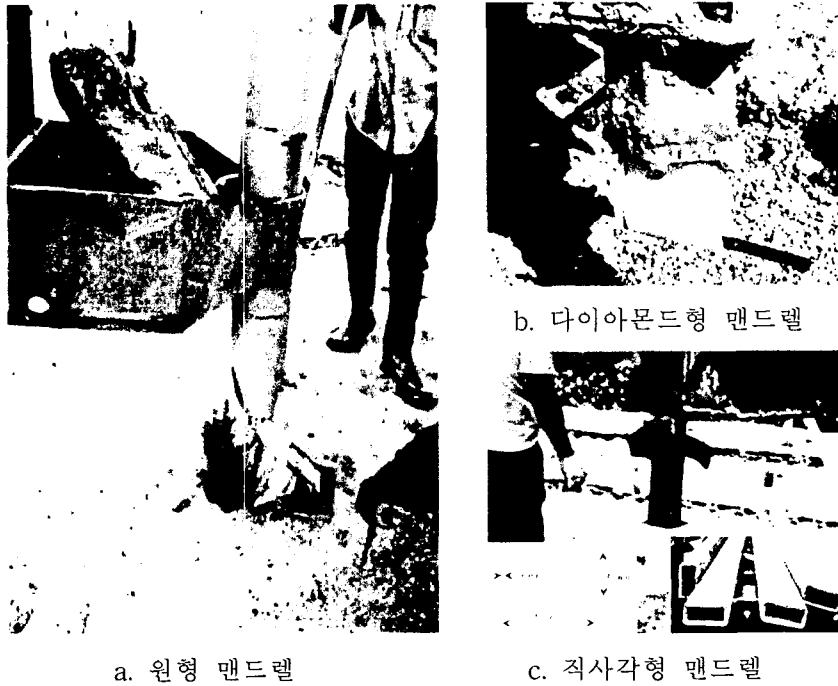


그림 28. 맨드렐의 크기와 모양

미국(1970년 Havard 대학) 및 일본(1972년 및 1982년 지반공학회)에서 연직배수공법의 유효·무효론의 토론이 있었으나 이 두 나라의 논쟁 저변에는 수직배수공법이 압밀침하를 촉진하는데 Terzaghi-Barron 계열의 이론이 잘못되어 있거나 또는 공법자체가 무효라는 논의는 없으며 무효론의 초점은 ①연직배수공법을 이용한 처리구간과 무처리구간에서의 침하현상이 전자는 거의 해석결과를 따르는데 비해 후자인 자연상태의 침하는 더 빨리 진행되고 침하량에 있어서 차이가 없다는 점과 ②타입식 연직배수공법은 지반을 교란시켜 투수성이나 침하속도를 늦추는 현상과 함께 침하량을 증가시키고 있으며 이 침하량 증대가 연직배수공법의 침하촉진 효과를 나타내고 있다는 점이 있다(박, 2000).

연직배수재 타입시 지반교란의 영향을 지금까지 많은 말뚝공사에서 확인된 바와 같이 타입에 의한 교란의 범위는 꽤 크지만 완전교란된 범위는 말뚝에 의해 배제되는 용적의 범위라는 것이 거의 실용적으로 확인되어 있기 때문에 말뚝주변에서 말뚝반경의 1.4배 정도의 범위가 완전교란대이다(박, 2000). PBD 공법은 모래기둥에 의해서 완전히 배제되는 경우가 아니기 때문에 장기적으로 교란도가 작다고 할 수 있으나 전술한 사항들로부터 PBD타입시 지반내에 교란영역이 발생한다는 것을 명확하게 인지할 수 있다. 따라서 가급적 작은 맨드렐을 사용하는 것이 필요하다. 그림 28의 C와 같이 PBD타입에 요구되는 최소단면을 사용하는 것이 가장 이상적이겠으나 타입깊이가 클 때는 맨드렐이 좌굴되기도 한다. 그림 29는 싱가포르창이공항 공사에서 사용하고 있는 맨드렐의 실제크기인데 타입깊이가 40~60m정도이기 때문이다.

그림 31은 국내에서 사용되고 있는 슈(앵커 플레이트)의 다양한 크기를 보여준 것이다. 대체적으로 가로×세로가 (145~220mm)×(90~120mm)인 슈를 사용하고 있으나 공상현상(맨드렐 인발시 PBD가 함께 떨어져오는 현상)이 자주 발생할 경우 슈의 폭을 늘려서 사용하는 경우가 많다. 이러한 경우 공상방지등에는 효과적일지 모르지만 지반교란에 의해 압밀지연을 초래할 수 있다. 그림 32는 국내에서 PBD공상방지를 위해 고안한 장치이며 그림 33은 일본에서 사용한 슈의 예이다.



그림 29. 타입깊이가 깊은 상사폴 창이공항공사에서 사용하고 있는 맨드렐(2000)



그림 30. PBD타입시 맨드렐 및 슈에 의해 지반이 배제된 상태

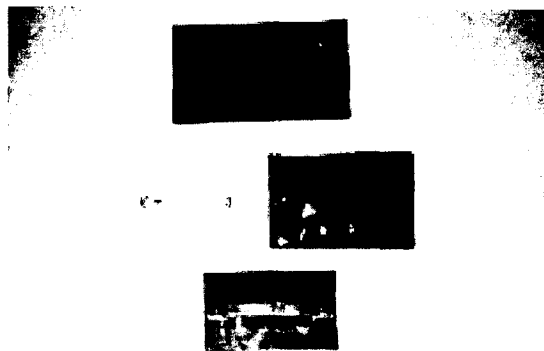


그림 31 한국내에서 사용되고 있는 슈의 여러 가지 크기

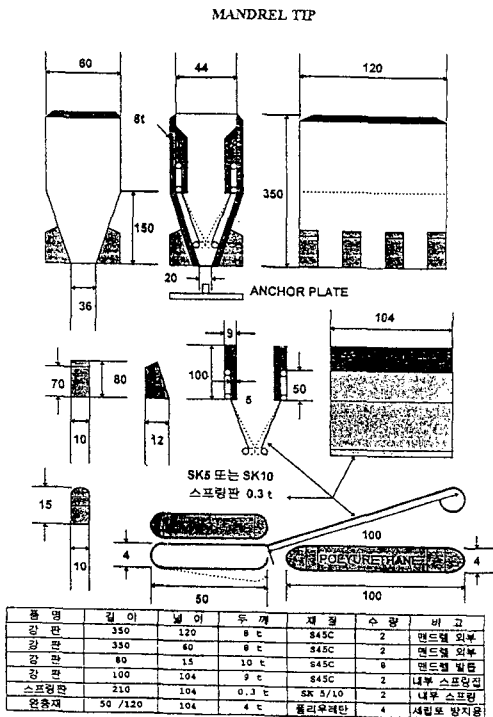


그림 32. PBD공상방지장치(국내사례, 대한산자공업주식회사)

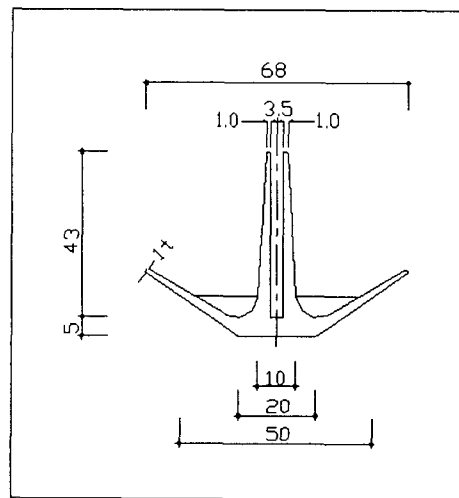


그림 33. PBD공상방지를 위한 선단앵커 플레이트(일본사례)

(타) PBD장비의 접지압

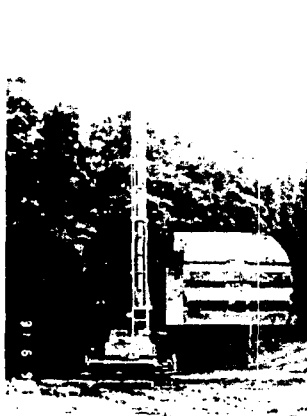


그림 34. 무한궤도에 철판을 부착 하여 접지압 감소를 도모한사례 (1999,광양컨테이너 부두현장)

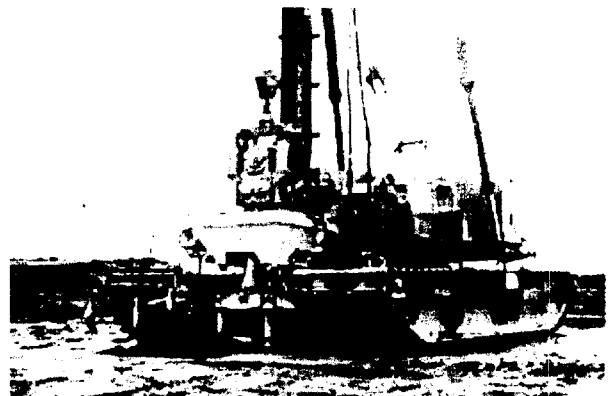
한국에 PBD공법의 도입단계에서는 장비의 접지압을 최소화 하기 위하여 장비의 경량화를 시도하고 궤도를 부설하여 접지압의 최소화를 도모하였다. 그러나 현재는 공사의 효율성을 증대시키기 위해 PBD타입장치의 개발을 주로 시행하는 상태이며 그림 27에서와 같이 습지용 장비가 아닌 양호한 지반에서 작업을 하는 크레인 및 굴착기를 이용하고 있다. 이에 따라 접지압에 대한 문제점을 해결하기 위하여 무한궤도에 폭 20~35cm정도의 철판을 추가로 부착하여 접지압 감소를 도모하고 있는 실정이다. 이 경우 장비 접지압의 감소는 있을 수 있으나 전체적으로 장비의 중량이 커서 접지압이 아직도 7~12t/m²으로 아직까지 큰 상태이며 또한 덧붙인 철판이 휘어지는 등의 문제점이 있고 이로 인하여 지표면 부근의 지반 교란과 국부적인 파괴등이 유발되고 있는 실정이다.

일본의 경우에는 그림 35와 같은 낮은 접지압을 갖는 장비를 연약지반개량에 사용하고 있으며 이를 주목할 필요가 있다.

국내에서는 연약지반위에 분리 및 보강효과를 위해 5~15t/m²의 인장강도를 갖는 토목섬유를 포설하고 그 위에 산토복토를 두께 1~2m 정도를 포설하고 다시 그 위에 수평배수재인 샌드매트를 포설하여 “토목섬유+산토복토+샌드매트”의 보강효과를 이용하여 통행성을 확보하고 있다(그림 36참조). 이렇게 산토복토등으로 연약지반상에 재하를 할 경우에 연약지반내에서 과잉 간극수압이 발생되어 지반이 불안정한 상태가 된다. 그림 37에서 연직배수재를 타입한 직후에 PBD 및 PD에서 과잉간극수가 배출된 것을 확인할 수 있는데 이것이 이러한 상황을 확인시켜 주는 것이다.



PBD 습지전용 타입기



PD 습지전용 타입기

그림 35. 습지용 연직배수재 전용타입기(일본)

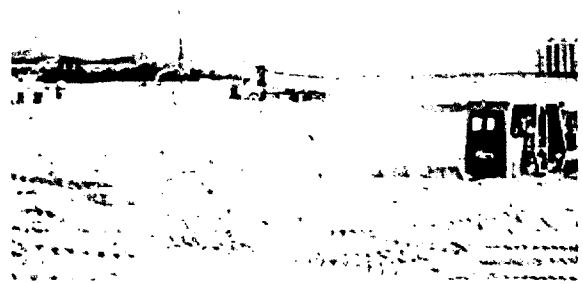


그림 36. 장비의 통행성 확보를 위한 토목섬유, 산토복토 및 샌드매트 포설(1998, 과양항 중마매립지)



그림 37. 연직배수재 설치직후 배출된 과잉간극수

이처럼 주로 산토복토에 의존하여 통행성확보를 할 경우 산토복토 성토중에 지반의 변형이 극심하게 되거나(그림 38참조) 연직배수재의 타입장비의 작업하중이나 진동등에 의해 지반의 과도한 변형이 발생된다(그림 39참조). 이러한 변형으로 기인된 지반교란은 개량시 지반침하를 더 크게 하는 요인이 될 뿐만 아니라 설치된 연직배수재인 PBD에도 꼬이거나 뒤틀리거나 과도한 인장력이 작용되는등 위해한 영향을 미치게 되어 지반교란으로 인한 압밀지연과 함께 배수기능저하로 인한 압밀지연을 초래하게 될 것이다.



그림 38. 장비의 통행성확보를 위한 산토복토 시행중 발생된 지반파괴

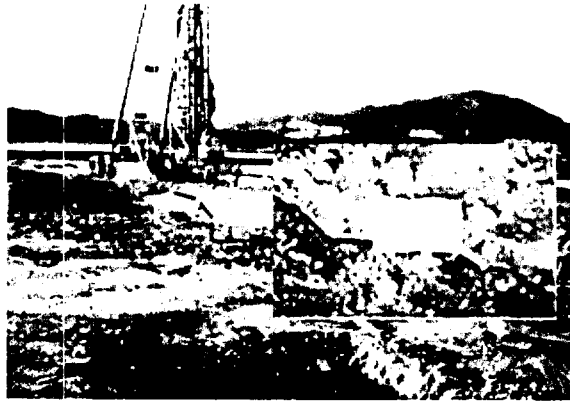


그림 39. 산토복토를 시행한 뒤 연직배수제 타입시 발생된 지반의 과대한 변형

또 이렇게 산토복토에 주로 의존할 경우 부주의나 지반의 횡방향 변위등에 기인된 장비의 함몰이나 전도등이 발생되어 안전사고를 유발하며 공사가 지연될 수 있다(그림 40참조).

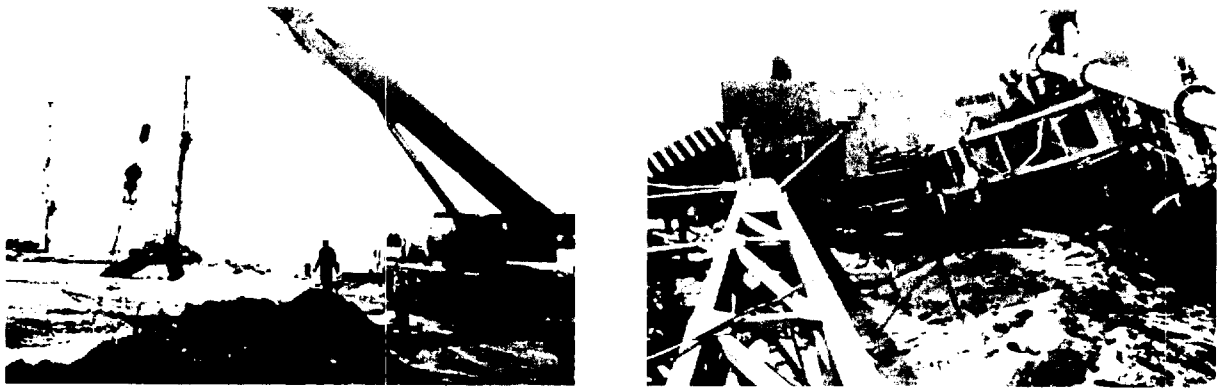


그림 40. 산토복토로 통행성 확보후 공사중에 장비의 함몰 및 전도

(2) PBD타입시 타입길이의 관리 및 수직도 관리

적현단지에서 PBD공법을 최초로 도입하여 시공한 후 국내에 정착되는 과정에서 침체된 큰 이유중의 하나가 PBD를 계획된 깊이까지 타입하지 못한 것이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 타입된 깊이를 관리할 수 있는 자동타입기록 장치가 활용되고 있다(그림 41참조).

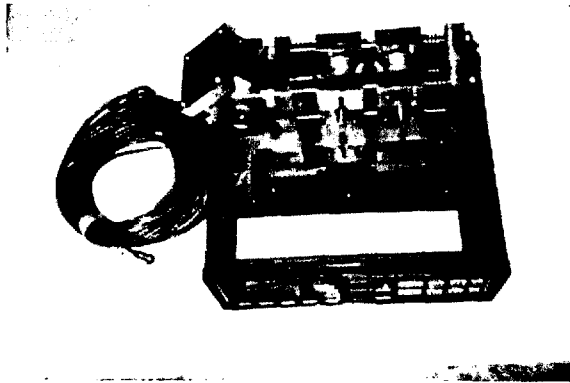
PBD는 그 타입간격이 촘촘하여 수직도 관리가 잘못될 경우 서로 교차되어 PBD를 손상시키거나 PBD의 변형이 과대하게 발생할 방향으로 설치되거나 방사방향의 유로길이가 다르게 되어 입밀지연이 발생할 수 있다. 현재 국내에서 타입시 수직도 관리는 대체적으로 육안에 의존하고 있는 실정이다. 그림 42에서와 같이 시도되어 정착을 도모하는 시공회사도 있다.

(3) PBD의 시공관리상의 문제점과 개선방향

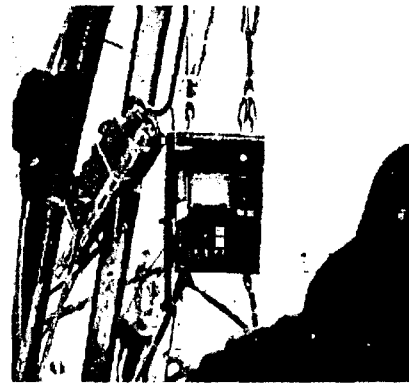
PBD시공이 단순하나 시공시 타입방법, 슈 및 맨드렐의 크기등에 의해 지반이 교란되는 상태를 유발하고 있는 실정다. 공법의 특성인 지반교란의 최소화와 연약지반내에 분포하는 자연배수층인 얇은 모래층의 절단을 최소화 하기 위한 장비의 개발이 지속적으로 이루어져야 될 것이다. 특히 최대 타입길이에 따라 맨드렐 단면을 최소화 시킬 수 있도록 하고 타입깊이 관리불가로 문제되었던 사항을 배제시키기 위해 자동타입 기록장치 부착 및 수직도 관리장치 부착의 의무화를 공사시방서에 제시할 필요가 있다.

특히 자동타입기록 장치에는 타입시 저항력등을 파악할 수 있도록 하여 철요시 하부에 미개량층을 들 수 있도록 기술발전을 시켜야 될 것이다.

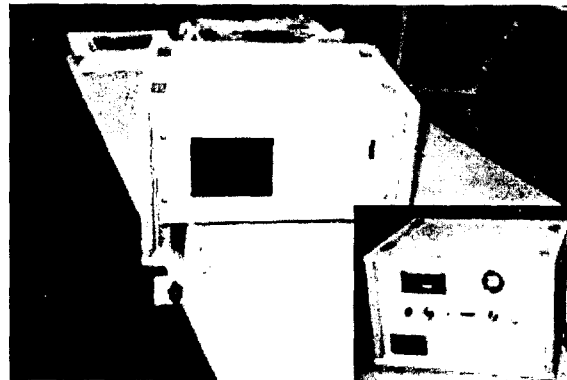
시공중에 통행성 확보의 문제를 배제시키기 위해 점진적으로 정적하중에 의한 타입방법으로 전환이 되어야 되며 습지전용 타입기의 개발 및 제작이 시행될 필요가 있다. 또 지반 기술자들이 현장에서 겪는 문제를 열린광장에서 논의하여 이를 개선하도록 하는 적극적인 노력이 필요하다.



a. 대한산자공법(주)



b. 석정건설(주)



c. 초석건설산업(주)

그림 41. 국내에서 개발되어 사용중인 PBD자동 타입기록 장치

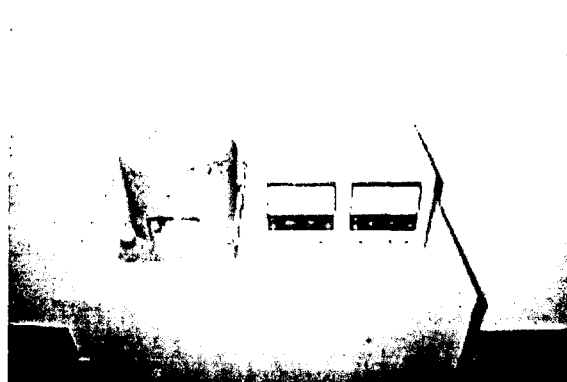


그림 42. PBD타입시 수직도 감지장치(석정건설)

5. PBD공법의 시공결과 사례를 통한 문제점과 발전방향

5.1 시험시공 사례분석의 목적

PBD공법의 경제성과 효율성으로 인해 다시 국내 기술자들의 관심이 집중된 상태에서 그 효과의 확인 및 시공관리 방안 등을 수립하기 위하여 전술한 바와 같이 공공기관에서 몇 개의 지역에 시험시공을 실시하였다. 여기에서는 1994년에 “광양항 1단계 컨테이너 터미널 축조공사”에서 시행된 시험시공 결과를 재정리하여 문제점과 개선방향 등을 찾아 보았다.

5.2 시험시공의 개요

(1) 위치 및 시행일시

시험은 광양항 1단계 컨테이너 터미널 1차공사 제3구역과 7구역의 일부에 3개소의 시험시공구간을 설정하여 PD, PBD 및 진공압밀(Vacuum)공법의 3종류가 시행되었다(그림 44참조).

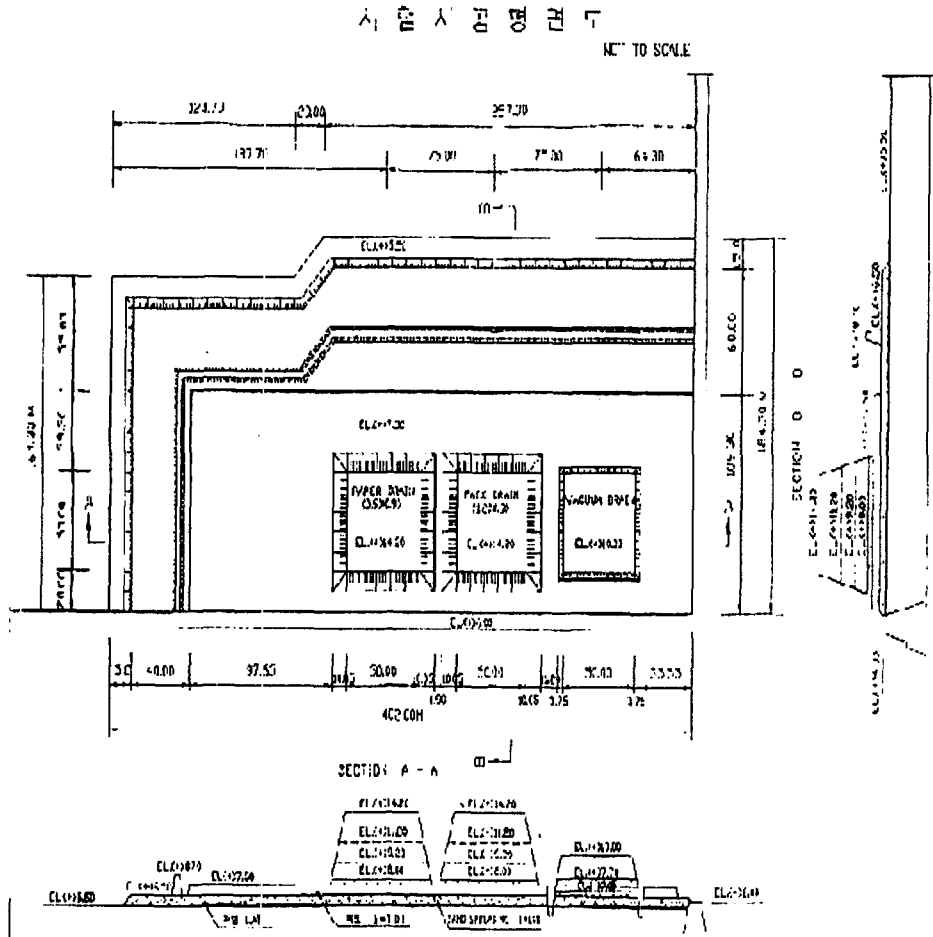


그림 44. 시험시공 위치 평면도 및 재하단면도

시험은 1993년 7월부터 시행되었는데 준설매립토위에 토목섬유 포설과 샌드매트(sand spread층)와 산토복토 등을 시행하여 PD는 1994년 5월2일에 타입을 하였으며(침하판 설치: 94. 4.14)PBD는 1994년 6월

21일에 타입을 완료하여 약 450일간 침하량 관측을 시행하였다.

(2) 계측관리

각 공법별로 5개의 침하판(총 15개)을 설치하여 침하량을 관측하였으며 간극수압계, 층별침하계, 경사계, 지하수위계, 변위 측정용 말뚝 등을 설치하여 계측관리를 시행하였는데 간극수압계와 층별 침하계는 계측관리중에 손상을 입었으며 경사계는 횡방향 변위가 커서 측정장치를 집어 넣을수 없는 상태여서 측정이 중단되었다. 최종까지 유효한 관측자료는 침하판 이었다.

(3) 지반조건

(가) 토층조건의 특성

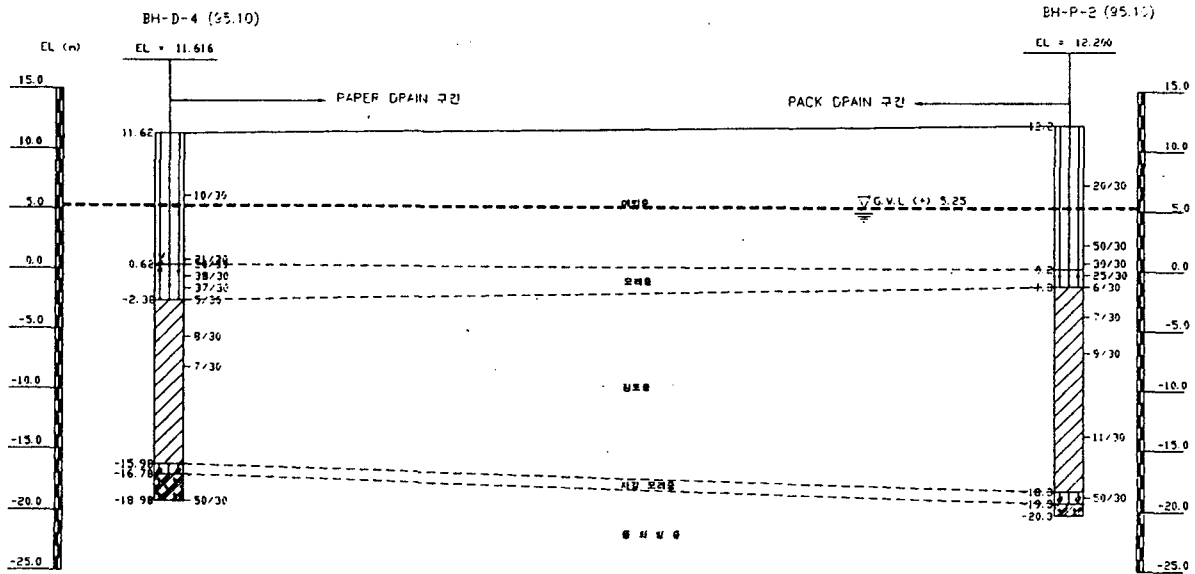


그림 45. 토층단면도

준설 매립층(Hydraulic fill) 및 원지반 해성퇴적층 모두가 대부분 고 소성질 고 압축성 점성토(통일분류 CH가 우세)이며 지반개량전의 함수비가 85%이상인 경우도 많은 상태였으며 비배수 전단강도는 0.1~0.2kg/cm² 인데 깊이에 따라 증가하는 경향이 크지는 않은 상태이다.

5.2 시험시공결과와의 비교

그림 46은 PD와 PBD의 침하량을 단순히 비교한 것이며 그림 47은 PD에서 발생된 단기간의 연직변위(비배수 변위)를 제외시켜 비교한 것이다.

만일 PD에서 발생된 침하가 지반교란 등으로 기인되는 추가로 발생된 침하 또는 비배수 변형으로 기인된 침하라면 그림 47.이 실제 지반의 시간에 따른 압밀침하 양상이 될 것이다.

필자는 PD가 시행된 지역에서 이와 유사한 약 0.3~0.5m의 비배수 변형이 발생된 사례를 여러번 접한 적이 있다. 지반개량전후에 시행된 지반조사 자료(그림 48. 및 그림 49. 참조)에서도 개량효과의 차이가 뚜렷하게 다르게 나타나지는 않는 것 같다. 따라서 연직배수공법중 어느것이 더 지반개량 효과가 크다는 것을 논하는 것은 큰 의미가 없을 것이며 지역적 특성(예로서 모래가 풍부한 지역에서는 PD적용)과 경제성(예로서 양산 물금지구에서 시험시공을 시행한 경우에는 PBD대 PD의 공사비가 1:1.85임) 및 시공성을 고려하여 지반 개량공법을 선정하여 시공하되 이미 기술한 지반교란의 최소화 및 통수능의 확보 등에 보다 많은 주의를 기울이는 것이 필요하다.

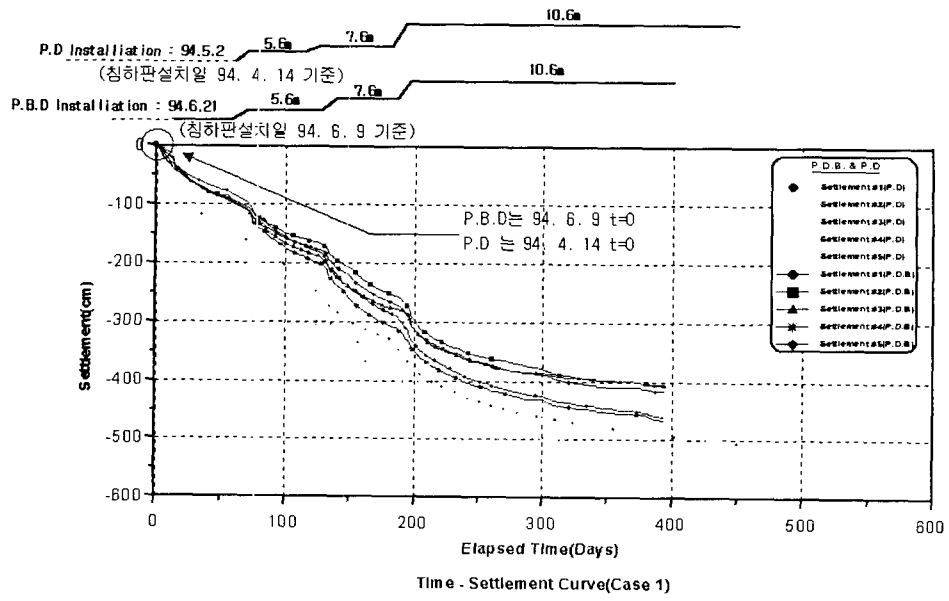


그림 46. PD와 PBD의 침하량을 단순히 비교한 Time-Settlement Curve(Case 1)

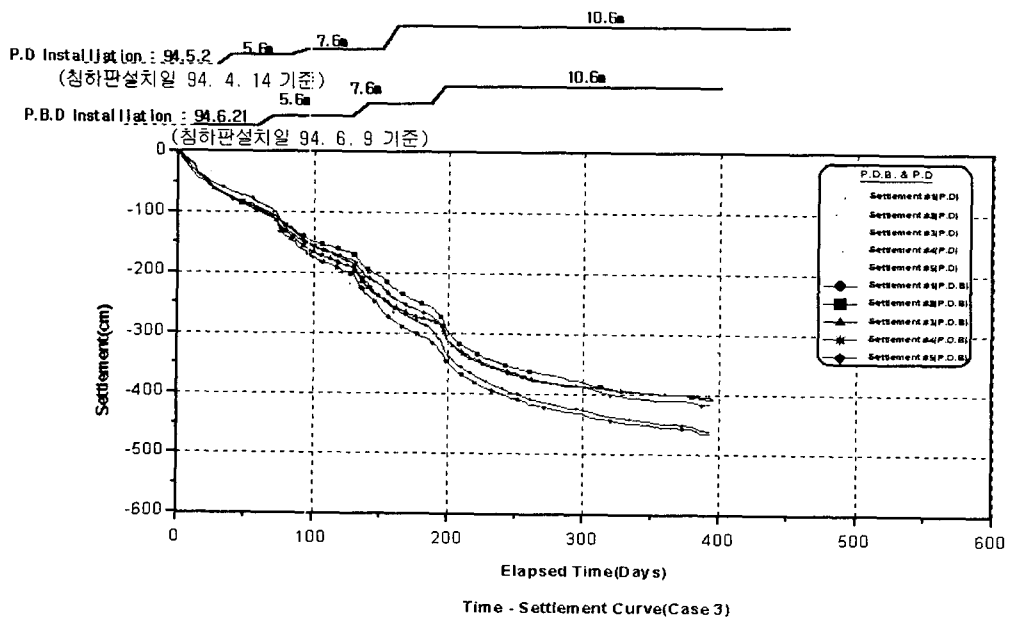


그림 47. PD의 즉시침하량을 제외하고 PD와 PBD의 침하량을 비교한 Time-Settlement Curve(Case 3)

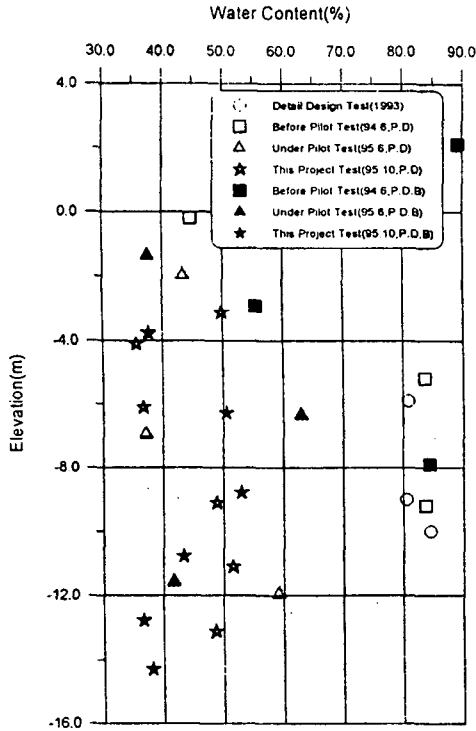


그림 48. Elevation Vs. Water Content
(광양 시험시공)

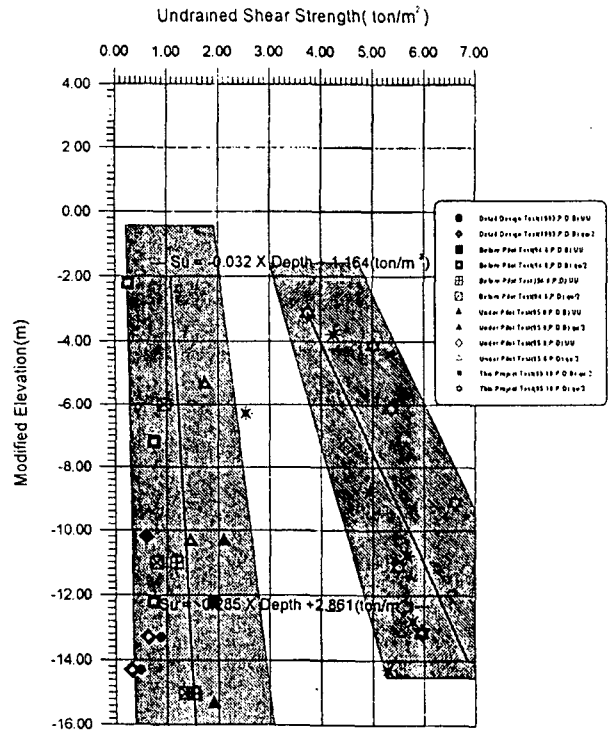


그림 49. Elevation Vs. Undrained Shear Strength
(광양 시험시공)

6. 결론 및 제언

1975년 마산적현단지 연약지반 개량공사에서 PBD공법을 최초로 사용한 이래 여러곳에서 이 공법을 적용하였지만 PBD의 품질, 타입장비의 문제 및 계획된 타입깊이까지의 미타입 등으로 개량효과를 의문시하여 이 공법을 기피하여 왔다.

그후 국제적으로 품질을 인정받는 PBD제품이 도입되고 또 품질이 양호한 국산제품이 생산되며 시공장비 또한 발달이 되어 경제적이고 친환경적인 이 공법이 다시 기술자들의 주목을 받게 되었다.

PBD공법의 도입과정과 확산 및 침체과정 등을 돌이켜보고 현재 시공되고 있는 설계 및 시공을 조사하여 문제점과 발전방향을 논하였다. 특히 습지 전용타입 장비의 개발과 PBD의 공사의 품질관리에 대한 중점관리사항 및 시방서 작성 등에 필요한 사항을 제언하였다.

참고문헌

1. 김상규(1995), "밴드드레인의 품질과 연약지반 개량효과와의 관련", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집
2. 김상규(1998), "A Short Course on Ground Improvement Using Prefabricated Vertical Drains", 동국대학교
3. 박병기(2000). "State of the Art", 서남권 해안지역의 연약지반 처리 Symposium 논문집
4. 박병기의 2인(1995), "광양항 1단계 컨테이너 터미널 축조(하부공) 공사 Plastic Drain재의 설치 간격 검토 연구보고서", 전남대학교 공업기술연구소
5. Yoshikuni(1979), "Vertical Drain 공법의 설계와 시공관리", 日本 技棋報堂

6. 岡林郁夫(1999) “버티컬드레인 공법의 문제점과 그 해결법”, 日本 総合土木研究所
7. Chen, C.N., et al(1986), “Permeability characteristics of Prefabricated Vertical Drains”, Third International Conference on Geotextiles.
8. D.T. Bergado et al(1996), “Soft Ground Improvement in Lowland and other Enviroments”
9. Hansbo, S(1979), “Consolidation of Clay Band-shaped Prefabricated Drains”, Ground Engineering, Vol. 2, No. 5
10. J.P.Oostveen et al(1990), “Discharge index tests on vertical drains”, Geotextile, Geomembranes and Related Products
11. Kremer, R. et al(1982), “Quality Standards of Vertical Drains”, Second International Conference on Geotextile
12. M. P. Moseley(1993), “Ground Improvement”
13. R. D. Holtz et al(1991), “Prefabricated Vertical Drains design and Performance”
14. U.S. Department of Transportation FHWA(1989)“Geotextile Engineering Manual”
15. Veldhuljzen Van Zanten, R.(1986), “The Guarantee of the quality of vertical Drainage System”, Third International Conference on Geotextile.