

## PBD공법의 품질 및 계측관리

### Quality and Measure Controls for Plastic Board Drains Method

박영목, Yeong-Mog Park

영남대학교 공과대학 토목공학과 부교수, Associate Professor, Dept. of Civil Engineering, Yeungnam University

**SYNOPSIS** : This paper presents quality and measure controls of Plastic Board Drains(PBD) for improvement of soft ground. Laboratory and field tests has been carried out to evaluate the quality of PBD focussing on : discharge capacity of flow area; permeability of filter sleeve; migration of fine particles; deformed shape of PBD; consolidation of clay in the close vicinity of PBD; tensile strength of PBD; long-term consolidation behavior of clay-PBD. Test results show that the quality of PBD is sufficient to perform the improvement of soft silty and clayey ground. But, geotechnical engineer must make efforts minimizing of PBD damage and ground disturbance, continuity of drainage system during construction.

Adequate monitoring system should apply at ground focussing on : number, location, and accuracy of geotechnical instrumentation, measurement and evaluation of data for ground behaviour.

**Key words** : PBD, Quality, Monitoring, Discharge capacity, Filter sleeve, Strength

## 1. 서론

해안지역을 개발하여 국토확장 및 기간시설물 설치 등을 목적으로 해성 연약 점성토 지반을 상부구조물의 하중조건에 적합하도록 개량하는 공사가 활성화되어, 이 경우 일반적으로 연직배수공법(Vertical drain method)을 많이 적용하며 이 중에서 Plastic Board Drain(PBD)재의 적용이 전세계적으로 증가되는 추세이다. 朴永穆(1994)은 PBD재를 이용하여 연약한 지반을 개량할 경우 발생하는 제반 문제점을 실험실에서 기초적으로 검토하고 현장에서 PBD를 적용하여 거시적 및 미시적인 검토를 실시하여 실무자에게 유익한 대책공법을 제시하였다. 그 외 많은 학자들과 현장실무자들에 의하여 제품, 시공성 및 효용성을 높이기 위한 노력들이 지속적으로 이루어져 PBD제품의 활용성이 증대되었다.

PBD공법을 적용하여 연약지반 개량을 합리적으로 수행하기 위하여서는 1)요구되는 품질을 구비하여야 하며, 2)현장보관시 열화방지를 하고, 3)타설시 PBD재의 손상발생을 방지하고, 4)타설시 지반교란을 최소화하며, 5)계측에 의한 개량과정을 상세히 검토할 필요가 있다.

본고에서는 이중에서 PBD공법을 적용하는 경우 품질관리 및 계측관리에 관련되는 사항을 검토하여 PBD관련 현장 실무자에게 참고가 되는 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 품질관리

### 2.1 PBD가 갖추어야 할 사양

일반적으로 PBD재에 기본적으로 요구되는 사항으로는 일정 통수능력 및 인장력을 가진 제품을 이용하여 타설시 손상이 발생되지 않게 하고, 타설심도에 상응한 측압과 압밀진행에 따른 꺾임 및 굴곡 등의 상태하에서도 PBD재 자체의 통수능력을 유지해야 하며, 세립토 등의 이동특성에 의한 악영향에 대해서도 필터 슬리브(filter sleeve)의 투수계수가 유지되어야 하는 것이다. 또한, 지반의 압밀도 증진에 따라 간극수의 동수구배가 낮아지는 특성과 압밀이 진행됨에 따라 PBD재의 꺾임부근에 지반내에 용존되어 있는 공기(기포)가 누적되어 통수능력 저하에 끼치는 영향도 고려해야 한다(朴, 1994). PBD재는 상기 사항을 충족하면서 원활한 배수기능을 수행하여 대상 연약지반에 대하여 소요의 압밀촉진 효과를 달성할 수 있어야 할 것이다.

국내에서는 현재 16개의 회사에서 PBD를 공급하고 있으며 이들 중 일부는 배수성능이 확인된 외국제품을 수입 판매하고 있는 반면 그 외는 국내에서 직접 생산 공급하고 있다. 국내에서 생산되는 PBD제품에 대한 배수성능시험에 관한 연구결과는 거의 찾아볼 수 없는 실정이다(김 상규, 1995). 따라서 이를 사용하는 현장 실무자들이 배수성능에 관하여 확고한 신뢰감을 갖고 있지 못하는 현실이다. 또한 PBD재의 배수성능에 관하여 상기와 같이 많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 PBD재를 이용하여 원활한 지반개량을 수행한 현장과 개량효과를 거의 얻지 못한 현장이 공존하는 등 아직까지 미해결된 문제점도 남아있는 실정이다. 특히 현장 실무자들이 우려하는 것은 PBD재의 두께가 3mm정도이기 때문에 간극수의 원활한 배출을 도모할 수 있는 유로의 형성에 대한 의문을 가지는 등의 배수성능에 관하여 명확히 해명해야 할 과제가 남아 있다.

### 2.2 PBD의 선정

PBD는 연약지반내의 과잉간극수 배수시 미세토립자의 통과를 방지하면서 장기간에 걸쳐서 구멍막힘 등에 의한 필터의 기능이 손상되지 않으며 토압에 의한 유로단면의 축소가 없고 압밀침하에 대한 순응성이 좋아서 배수의 단절과 탁힘이 없어야 하고 미생물에 의하여 표층의 필터재가 손상당하지 않아야 한다.

PBD의 선정기준은 다음에 따른다.

- 1) PBD Filter의 인장강도는  $F_f \geq 0.5kN(51 \text{ kgf/단위폭})$
- 2) PBD의 수리적 특성을 나타내는 Filter의 투수계수( $k$ )는  $1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$ 보다 커야하며 PBD의 통수능력은  $3.5kgf/cm^2$ 의 측압하에 1주일 후의 통수능력이 직립조건(straight) 및 25% 변형조건(25% free bending)인 경우  $Q_w$ 가 각각  $25cm^3/sec$ ,  $10cm^3/sec$  이상을 유지하여야 한다.
- 3) 흙의 상태에 따른 Filter의 구멍크기(AOS)는 식 (2.1)조건을 만족하여야 한다.

$$O_{90} < 100 \mu m \text{ -----(2.1)}$$

#### 4) 외관 및 일반 사항

PBD는 판형이므로 지반의 압밀에 따른 변형이 발생할 경우 면방향 및 측방향을 통한 지반토와 접촉 면적이 커서 배수성이 뛰어난 Core와 Filter가 분리된 Pocket Type이 유리하다. PBD는 타설시 손상이 발생하지 않은 강도를 가지고, 압밀침하에 대한 순응성이 양호하며 절곡시 배수로의 절단이 발생하지 않아야 한다. 또한, Filter재는 압밀간극수의 배수에 충분한 투수계수를 가지고 PBD재 내부로 미세토립자의 혼입을 방지하며 구멍막힘(clogging)이 발생하여도 수리적 특성을 유지하여야 한다. 또한, 산, 알카리, 박테리아에 대한 저항성이 커야 한다.

#### 5) 품질 표시 제품

PBD재는 정부의 공산품 품질검사 면제대상 등에 관한 규정 제 2조의 규정에 의한 품질검사기관의 품질검인 표시가 있는 제품 이상이어야 한다. (KS 마크, 품 마크 또는 Q 마크 제품)

#### 6) 시험 및 검사

PBD의 시방서에 따른 품질보증 및 시공관리를 위하여 납품한 물품을 감독원 입회하에 임의의 부분에서 시료 채취하여 공정성이 인정되는 연구소 및 시험기관에 의뢰하여 합격여부를 판정하며, 시험

빈도는 100,000m 당 1회씩 실시한다. 품질시험 의뢰기관으로서는 국립공업기술원, 한국 원사직물 시험검사소, 계량 및 검증에 관한 법률에 의한 공인검사시험기관, 건설기술관리법에 의한 품질시험대행자 및 국·공·사립대학연구소 등이다.

7) 제작 및 보관

PBD 1롤의 길이는 200m 이상으로 하고 상, 하차시 및 소운반시 손상되지 않고 비에 젖지 않도록 안전하게 납품하여야 하고, 보관시 대기중에 장기간 노출시키지 않는다. 현장보관장소는 건조하고 통풍이 잘 되는 창고가 좋고, 부득이 한 경우는 지표면에서 10cm이상 틈을 두고 시트(sheet)를 깔 후 PBD를 쌓고 측면 및 상면은 시트로 덮어둔다. 또한, 기타 감독관이 필요하다고 인정되는 조치에 대하여 도급자는 응해야 한다.

2.3 국내 PBD재의 물리적 특성

PBD재를 연직배수재로 사용할 경우, 지반에 타설하는 과정에서 발생할 수 있는 변형 및 파열과 압밀 진행중에 발생하는 굴곡(bending), 꺾임(folding), 필터슬리브의 구멍막힘(clogging) 및 유로단면적 감소 등에 따라 통수능력(discharge capacity)이 저하하여 지반개량효과를 지연시키는 요인이 되고 있다. 이들의 영향을 최소화하기 위하여 시험을 통한 PBD재의 물리적 성질을 정확히 규명하여 두는 것이 중요하다. PBD재의 기본적인 물리적 성질에 포함되는 항목으로는 재질, 표준중량, 규격, 인장강도, 인장신도 및 투수계수 등이 있다.

연약지반 개량재로 PBD제품을 선정할 경우 여러 특성을 고려해야 하나 그 중 가장 중요한 요건은 배수 성능 및 인장강도의 확보이다. 배수성능에 관해서는 후술하기로 하고 여기서는 인장강도에 관해서 기술하고자 한다. PBD재의 인장강도는 타설 및 압밀과정에서 발생하는 파손과 직접적인 관련이 있으므로 매우 중요한 특성이다. 차(1994)에 의하면 3년간의 장기간에 걸쳐 연약지반의 변형률이 약 40%에 달할 때까지 압밀시킨 후에 PBD재의 형상을 육안 관찰한 결과 여러 개소에 파손현상이 나타나 있음을 지적하고 있으며, 新舍 등(1987)에 의해서도 유사한 결과가 보고되어 있다. Kremer 등(1983)은 PBD 전체에 대하여 인장강도가 어떠한 경우에도 0.5kN이상이어야 하며, 파괴시의 변형율은 2%이상 10%이하를 권장하고 있다. 표 2.1에서는 PBD재의 인장기준에 대해서 나타내고 있고, 국내외의 대표적인 PBD재에 대한 인장시험 결과는 표 2.2에 나타낸다. 표 2.2에서 알 수 있는 바와 같이 대부분의 국내외 생산 PBD재는 충분한 인장강도와 변형율을 나타내어 지반개량재로서 문제가 없는 것으로 판단된다.

표 2.1 Current recommended values for tensile strength of prefabricated vertical drain (삼성중공업, 1998)

| 제안기준                   | 재료성질       | 단위   | 인장강도(변형률)           | 비고                      |             |
|------------------------|------------|------|---------------------|-------------------------|-------------|
| Kremer (1982)          | 드레인(코어+필터) | kN   | > 0.5 (2-10%)       | 10℃, 24hr 포화            |             |
|                        | 필터         | kN/m | water sensitive     |                         | 1.2 (2-10%) |
|                        |            |      | non-water sensitive |                         | 0.75 (2%)   |
|                        |            |      |                     |                         | 0.375 (10%) |
| Van Santvoot (1994)    | 드레인(코어+필터) | kN   | > 0.5 (2-10%)       | 4주간의 통수능력 시험후 손상되지 않을 것 |             |
| 필터                     |            |      |                     |                         |             |
| 한국 영종도 신공항 시험시공 (1995) | 드레인(코어+필터) | kN   | > 0.98 (2-10%)      | 건조, 습윤시                 |             |
|                        | 필터         | kN/m | >3 (<10%)           |                         |             |
| Sung (1994)            | 드레인(코어+필터) | kN   | 1 (2%-10%)          | 건조, 습윤시                 |             |
| 싱가폴 창이 공항 (Choa, 1994) | 필터         | kN/m | >3 (<10%)           |                         |             |

표 2.2 Results of tension test(박, 1997)

| Product  | Product name | Size           |                   | $\sigma_t$<br>(kgf/cm <sup>2</sup> ) | Ductility       |                          | R. M. |
|----------|--------------|----------------|-------------------|--------------------------------------|-----------------|--------------------------|-------|
|          |              | Length<br>(cm) | Thickness<br>(mm) |                                      | $\Delta l$ (cm) | Percent<br>elongation(%) |       |
| Domestic | HK           | 30             | 2.5               | 101.5                                | 2.5             | 31.3                     |       |
|          | SW           | 30             | 2.6               | 64.8                                 | 38.5            | 48.1                     |       |
|          | SH           | 30             | 2.6               | 45.2                                 | 4.0             | 62.5                     |       |
|          | DS           | 30             | 2.8               | 41.9                                 | 1.2             | 15.4                     |       |
|          | KL           | 30             | 2.6               | 37.0                                 | 18.0            | 22.5                     |       |
|          | DH           | 30             | 3.10              | 36.2                                 | 49.7            | 62.1                     |       |
| Foreign  | MB           | 30             | 3.50              | 130.0                                | 5.0             | 65.8                     |       |
|          | GL           | 30             | 2.60              | 200.0                                | 3.0             | 36.4                     |       |

## 2.4 통수능력

### 2.4.1 공기의 영향

압밀 초기 단계에 있어서는 성토하중에 상당하는 높은 과잉 간극 수압이 작용하기 때문에 PBD내부에 소량으로 누적되는 기포는 수압에 밀려 배출된다. 그러나 압밀이 진행되어 점토 지반내부의 과잉간극 수압이 저하하고, 이와 더불어 PBD의 변형이 크게 되면 기포의 영향은 무시할 수 없게 될 것이다. 지반 개량이 1차성토, 2차성토로 단계적으로 실시 될 때, 1차 시공시 타설한 PBD가 2차성토에 대하여 유효한지의 여부를 검토하는 경우에도 이 문제가 관여 될 것이다. 그림 2.1의 실험 사실은 실제 지반에 있어서도 PBD의 배수성능이 기포에 영향받을 가능성이 있음을 시사하는 것이다. 상기의 검토로부터 현지반에 있어서 간극수 중에 용해되어 있던 공기가 배수과정에서 토압이 상대적으로 낮은 상부쪽을 향하여 느린 유속으로 진행되는 동안 PBD재의 격임 부근에 도달하여 환원되는 현상이 발생하고 이에 의해 PBD재의 통수기능에 장애를 유발하게 되는 것으로 생각되어진다. 먼저 PBD에 의한 압밀축진의 초기 단계에 있어서는 간극수 중에 성토하중에 필적하는 높은 과잉간극수압이 작용하기 때문에 PBD재의 내부에 공기의 축적이 방지되어 압밀에 의한 영향은 작다고 판단된다. 그러나 압밀이 진행되어 지반내부의 간극수압이 저하하고 PBD재의 변형이 증대되면 공기(기포)의 영향은 PBD재의 배수성능에 큰 영향을 끼치게 될 것이다.

그림 2.2에 나타난 실험결과와 같이 이에 대하여 박(1997)은 일정주기로 진공펌프를稼재하여 공기를 배출시킴으로서 PBD재의 통수능력을 향상시켜 충분한 지반개량재로서의 역할을 하게 하였다.

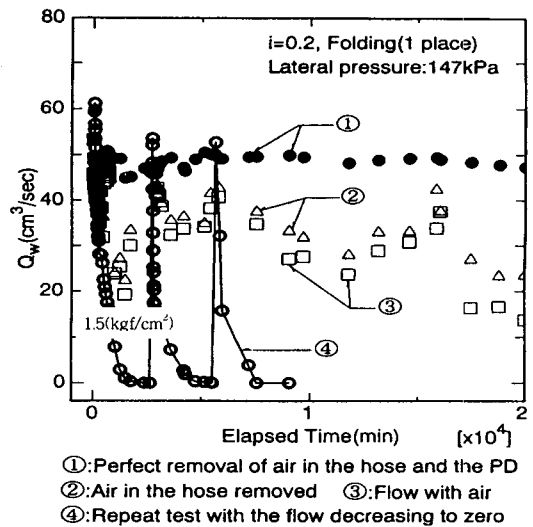


그림 2.1 공기(기포)에 의한 통수능력의 변화(朴, 1994)

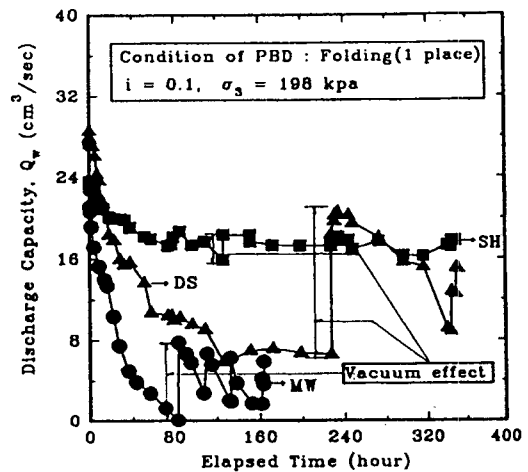


그림 2.2 진공펌프를 이용한 통수능력의 증가 (박, 1997)

## 2.4.2 길이의 영향

PBD의 통수능력측정을 위한 실내시험시 시료의 길이는 연구자에 따라서 다양하며, 현장에서 타설되는 실물길이의 1/50~1/100의 범위가 많다. 시료의 길이는 가능한 실물과 동일한 것을 이용하는 것이 바람직하나 여건상 용이하지 않는게 현실이다.

그림 2.3에는 실무대형 드레인재 통수능력시험장치(직경:120cm, 높이:200cm)를 이용한 시험결과를 나타내고 있다. 여기서 주목되는 사항은 길이 증가에 대하여 직선적으로  $Q_w$ 가 저하되지 않음을 알 수 있다. 따라서, 지금까지 배수재 내부의 마찰 특성에 기인되는 손실수두는 배수재의 길이와 직선적인 반비례관계가 있다고 알려져 있으나, 본 실

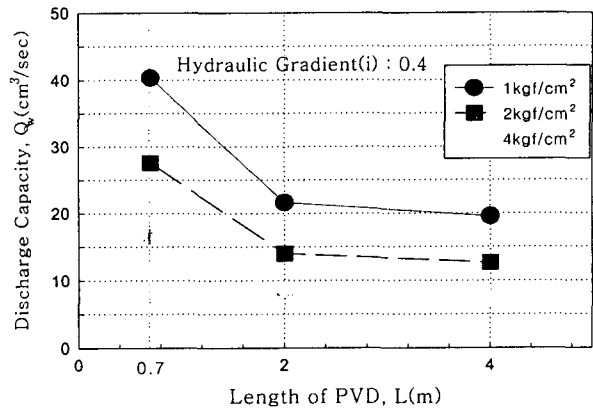


그림 2.3 길이에 따른  $Q_w$ 의 차이

물대형시험 결과 길이가 긴 실물대형의 드레인에서는  $Q_w$ 의 저하특성이 직선적인 변화경향을 나타내지 않기 때문에 현장에서 PBD재의 타설길이는 크게 우려할 사항이 되지 않음을 알 수 있다. 또한, 천연배수재를 대상으로 길이 20m, 30m의 실물대형의 드레인재를 대상으로 통수시험을 실시한 결과와 PBD에 대한 단편적인 시험을 실시한 결과를 종합할 때 실내통수능력시험시 PBD시료의 길이는 약 2m 이상인 경우 길이에 대한 영향은 크게 나타나지 않으며, 시료의 길이가 2m인 경우 충분히 실물대형의 값을 유추해낼 수 있을 것으로 판단된다.

## 2.4.3 축압의 영향

국내 생산 PBD재의 타설심도에 따른 통수능력( $Q_w$ )의 변화를 검토하기 위하여 대표적인 6종의 국내 생산제품의 축압 증가에 따른 통수능력의 저하특성은 국외제품과 유사한 경향을 나타내고, 높은 축압, 즉 타설심도 약 80m에 상당하는  $\sigma_3 = 4.0\text{kgf/cm}^2$ 에서도 최소 통수능력  $Q_{w\min} = 13\text{cm}^3/\text{sec}$ 을 나타낸다. 이는 동수구배( $i$ )가 1.0, 직립조건인 상태에서 여러학자(Jamiolkowski et al., 1983; 嘉門·伊藤, 1984; Hansbo, 1986; Holtz et al., 1989; 朴, 1994)들에 의해 수행된 품질이 우수한 PBD재와 유사한 배수성능을 나타낸다. 따라서, 지반개량 대상지반의 토질특성을 정확히 파악하고 시공을 합리적으로 실시할 경우 투수계수가 낮은 점토질로 구성된 연약지반개량 현장에 적용하면 효과적으로 기능을 수행할 것으로 판단된다.

## 2.4.4 PBD재 변형의 영향

점토의 압축변형( $\epsilon_1$ )이 20%이상에 달하면 PBD도 크게 변형한다.(Holts 등, 1989) 압밀에 의한 점토지반의 압축변형은 일반적으로 얇은 곳일수록 크다. 이는 일본의 아리아케(有明)점토지반중의 시험성토에서 PBD를 이용하여 지반 개량을 실시한 경우, 재하후 300일 경과 후 연직방향의 변형율이( $\epsilon_1$ ) 8.7%에 달한 경우 층별침하량을 측정된 결과 압밀된 두께 약 1m의 표층Top을 제외하면  $A_{c1}$ 층의 변위는  $\epsilon_1 = 13\%$ 이다. 주된 압밀층인 16m두께의  $A_{c2}$ 에 주목하면 그 하층 8m의 변위는  $\epsilon_1 = 7.6\%$ 여서 상층8m의 변위  $\epsilon_1 = 12.3\%$ 에 대하여 61%로 된다. 지표로부터 20m 아래 깊이에 퇴적되어 있는  $A_{c3}$ 층의  $\epsilon_1 = 3\%$ 에 불과하다. 이와 같이 깊은 점토층의 압밀량은 작기 때문에 그곳의 PBD의 변형량도 작다고 생각해도 좋다. 따라서, 현장에서 PBD의 타설이 적절히 실시되었다고 가정하면 20m이상의 대심도로 PBD를 타설하여도 지반의 하부에 위치하는 PBD재의 변형은 미소할 것으로 판단되므로 그에 따른 문제는 없을 것으로 판단된다.

### 2.4.5 웰 레지스턴스의 영향

지반내에 삽입된 PBD재는 압밀이 진행되면서 PBD재의 통수능력에 영향을 주는 요인이 발생하게 된다. 이러한 PBD재의 통수능력의 지하요인들을 통칭하여 well resistance라고 하며 그 영향요인을 표 2.3에 나타냈다(朴, 1994).

표 2.3 PBD의 웰 저항에 영향을 미치는 내·외적인 요인(朴, 1994)

| 요 소  |               | 메커니즘  | 웰저항 영향치  |
|------|---------------|---|--|
| 외적요소 | 측압 $\sigma_3$ | PBD가 지반중에 타설후 단기간에 $\sigma_3$ 에 의한 통수단면적 $A_r$ 의 감소                               | $\sigma_3 : 50\text{kPa} \rightarrow 400\text{kPa}$ 증가시;<br>$Q_w \rightarrow (0.3 \sim 0.85)Q_w$ |
|      | PBD재의 변형      | 주위지반의 압밀에 기인하여 PBD재에 굴곡 등의 변형발생으로 $A_r$ 의 감소 및 공기(기포)누적 가능                        | PBD 직립상태 $\rightarrow$ 2개소 강제질곡;<br>$Q_w \rightarrow (0.25 \sim 0.6)Q_w$                         |
|      | 지중온도 T        | 물의 동점성계수차이에 따른 통수능력 변화  | T : $20^\circ\text{C} \rightarrow 15^\circ\text{C}$ ;<br>$Q_w \rightarrow (0.9)Q_w$              |
|      | 세립자의 이동       | PBD재 내부에 주위지반의 세립자 침입에 따른 영향  | 영향치 무시가능   |
|      | 공기(기포)        | 물의 상방향 이동에 따라 구속압의 해방에 기인하여 간극수속의 용존 공기(기포)의 환원                                   | PBD재의 굴곡부에 누적될 경우 그 영향이 심각함. 극단적으로 $Q_w$ 가 제로(0)까지 저하  |
|      | 동수구배 i        | PBD재속의 물의 흐름이 동수구배가 커지면 난류화 되어 통수능력의 저하유발   | i : $0.2 \rightarrow 0.9$ ;<br>$Q_w \rightarrow (0.6 \sim 0.85)Q_w$                              |
| 내적요소 | 재질            | 장기간 PBD 필터의 흡수에 기인된 크리프 변형으로 통수단면적 감소   | $Q_w$ 의 초기치 $\rightarrow$ 2~60일 경과시;<br>$Q_w \rightarrow (0.55 \sim 0.7)Q_w$                     |
|      | 통수단면적 $A_r$   | PBD재 내부의 결보기 단면과 통수가 가능한 순단면적의 차이   | $A_r \rightarrow (0.35 \sim 0.75)A_t$ ;<br>$L_{CWR} \rightarrow (1.5 \sim 2.5)L_{CWR}$           |
|      | PBD재의 길이 L    | 길이증가에 따라 웰저항(마찰손실수두)의 증가<br>$h_L = f(H/d)(v^2/2g)$ ,<br>여기서, $f=124.5n^2/d^{1/2}$ | H : $5\text{m} \rightarrow 50\text{m}$ ;<br>$L_{CWR} \rightarrow (95)L_{CWR}$                    |

점토지반의 경우 압밀 전 과정에 있어서 대표적인 PBD재의  $Q_w \geq Q_{req}$ 로 되어, 웰 레지스턴스의 영향은 무시하여도 무방하나 실트지반의 경우 압밀도가 50%를 넘어서면  $Q_{req} > Q_w$ 로 되어 웰 레지스턴스의 영향을 무시할 수 없게 되고 PBD의 종방향 통수능력이 배수능력 평가에 주요항목으로 되는 것을 알 수 있다.

실제 설계에 있어서는 현장조건 및 사용예정 PBD의 사양 등을 참고하여 요구통수능력, 실제통수능력 등을 비교 검토하는 작업이 요망된다. 표 2.4에는 여러조건에 대한  $L_{CWR}$ (웰 레지스턴스 계수)을 계산한 결과를 나타낸다.

표 2.4 웰 레지스턴스계수의 산정예(朴, 1994)

| PBD재의 길이, L (m) | $k_w(\text{cm}/\text{sec})$ |     |      | $k_c(\text{cm}/\text{sec})$ | $d_w(\text{cm})$ | 웰 레지스턴스 계수, $L_{CWR}$ |        |        | 비 고                             |
|-----------------|-----------------------------|-----|------|-----------------------------|------------------|-----------------------|--------|--------|---------------------------------|
|                 | Max                         | Min | TF   |                             |                  | Min                   | Max    | TF     |                                 |
| 5               | 27.6                        | 1.1 | 0.08 | $1 \times 10^{-7}$          | 5                | 0.0001                | 0.0030 | 0.0405 | 일본의 경우 PD재의 길이(L)는 10~20m를 사용한다 |
| 10              | 27.6                        | 1.1 | 0.08 | $1 \times 10^{-7}$          | 5                | 0.0005                | 0.0118 | 0.1621 |                                 |
| 20              | 27.6                        | 1.1 | 0.08 | $1 \times 10^{-7}$          | 5                | 0.0019                | 0.0471 | 0.6483 |                                 |
| 30              | 27.6                        | 1.1 | 0.08 | $1 \times 10^{-7}$          | 5                | 0.0042                | 0.1061 | 1.4590 |                                 |
| 50              | 27.6                        | 1.1 | 0.08 | $1 \times 10^{-7}$          | 5                | 0.0118                | 0.2948 | 4.0529 |                                 |

Akagi(1994)는 그림 2.4에 나타내는 바와 같이 PBD를 대상으로 최소배수길이와 개량 대상지반토의 수평방향 투수계수를 고려하여 최소 통수능력을 결정할 수 있는 도표를 발표하고 있다. PBD재의 통수능력(Discharge capacity,  $Q_w$ )은 지반개량심도가 깊은 연약지반 또는 수평투수계수가 큰 실트지반을 대상으로 하는 경우 압밀촉진에 큰 영향을 미치는 요인이 되므로 지금까지 많은 학자들에 의해서 최소 통수능력 결정에 관한 연구가 수행되어 있다. Holtz 등(1991)은 동수구배를 1로한 경우 요구되는  $Q_w$ 은 3~5cm/sec 이상이어야 하며, 개량대상지반의 수평방향 투수계수  $k_h$ 를 고려하는 경우  $Q_w/k_h > 1,000 \sim 1,500m^2$  이상이어야 한다고 주장하고 있다.

Van Santvoort(1994)는 연약지반의 두께가 10m 이상이고 3kgf/cm<sup>2</sup>의 축압이 걸리는 상태에서 1.5년 이내에 드레인재 길이의 15% 이상 침하가 발생하는 경우 10~50cm/sec의 통수능력을 가지고 있어야 한다고 권장하고 있다. Kramer 등(1982)은 1kgf/cm<sup>2</sup>의 구속압 아래 40cm 길이의 드레인재를 사용하고 동수구배를 0.65로 적용한 경우 최소  $Q_w$ 이 160 m<sup>2</sup>/년(5.09cm/sec)을 주장하고 있으며, Jamiolkowski 등(1983)은 실내시험결과 20m 길이의 드레인재에 대하여 축압이 3~5kgf/cm<sup>2</sup> 걸리는 조건에  $Q_w$ 이 적어도 10~15m<sup>2</sup>/year (0.317~0.476cm/sec)이 되어야 한다는 결론을 얻고 있다.

그러나朴(1994)은 다양한 통수시험을 실시하여 표 2.3에서 제시한 PBD의 통수능력저하요인 분석을 하고 시험에 이용된 최상 및 최하의 통수능력을 나타내는 PBD재에 대한 투수계수를 지반개량 대상점토의 투수계수와 비교하여 그림 2.5에 나타냈다. 이 결과에 PBD재는 개량대상 점토의 투수계수에 비해 10<sup>6</sup>~10<sup>7</sup>배 높은 값을 나타냄을 알 수 있다. 기존에 생산되는 PBD재의 통수능력에 대한 품질문제는 거의 없다고 인정해도 될 것으로 판단된다.

## 2.5 장기적 기능성

朴(1994)은 대형강제압밀시험장치(D×H=1m×3m) 2대를 이용하여 2종의 PBD재(CS<sub>2</sub>:배수성능 뛰어난, TF:배수성능이 나쁨)에 교란된 아리아케 점토의 개량효과를 검토하였다. 그림 2.5에는 CS<sub>2</sub>와 TF의 침하곡선을 나타낸다. 그림 2.6에서 알 수 있듯이 2종류의 드레인재는 거의 같은 배수특성을 나타내고 있다. CS<sub>2</sub>의 침하량이 TF의 값보다 2cm 많은 것은 CS<sub>2</sub>의 주변에 간극수압계와 층별침하계를 매설했기 때문에 점토투입시 공극이 많았던 것이 그 하나의 원인이라 판단된다. 경과일수 1,030일 후의 침하량은 양

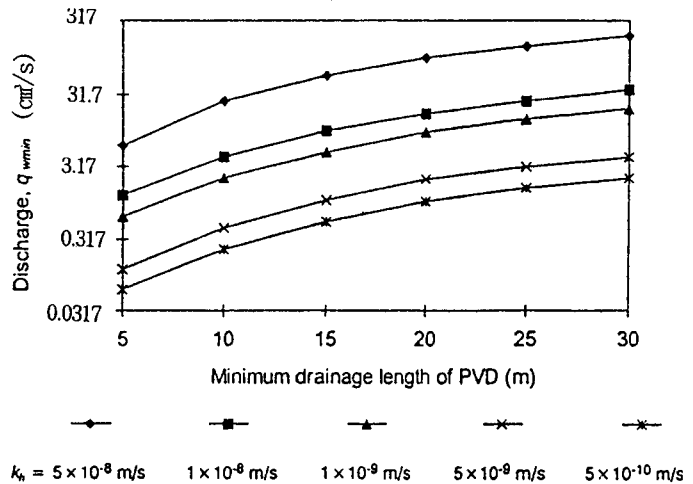


그림 2.4 웰저항이 무시 가능한 PBD재의 최소통수능력 및 지반토의 수평방향 투수계수(Akagi, 1994)

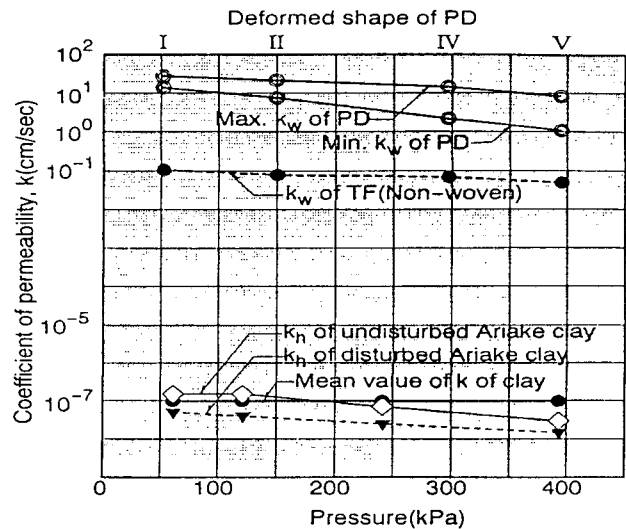


Fig. 6.7 Coefficient of permeability of clay and PD

그림 2.5 Coefficient of permeability of clay and PBD (朴, 1994)

쪽 모두 최종침하량 추정치의 97% 이상을 나타내고 있다. 또한 침하곡선으로부터 역계산으로 구한 수평방향 압밀계수  $c_h$ 는 제1단계의 하중에 있어서는  $CS_2$ 는  $37.1\text{cm}^2/\text{d}$ , TF에서는  $34.3\text{cm}^2/\text{d}$ 이고, 제2단계의 하중에서는  $CS_2$ 에서는  $60.2\text{cm}^2/\text{d}$ , TF에서는  $71.2\text{cm}^2/\text{d}$ 이다. 제2단계하중에서의  $c_h$ 는 제1단계의 값의 약 2배로 증가했다. 연직압밀압력  $294\text{kPa}$ 에서 연직변형이 약 40%에 달하였지만 이와 같은 대변형의 조건과 3년간에 걸친 장기간에 대해서도 PBD재의 투수기능은 유지하고 있음이 판명되었다.

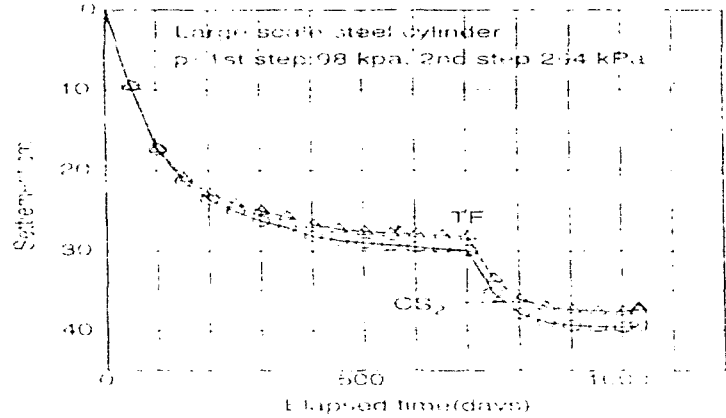


그림 2.6 Settlement curves of  $CS_2$  and TF (朴, 1994)

또한 1,030일간 압밀된 시료를 채취하여 표준압밀시험을 실시한 결과, 압밀압력  $p=294\text{kPa}$ 에 있어서  $c_h$ 는  $530\text{cm}^2/\text{d}$ 이고, 이 값은 연직방향의 압밀계수  $c_v=313\text{cm}^2/\text{d}$ 의 1.7배로 되어 있다. 아울러 같은 점토의 불교란시료에 대해서 조사한  $p=294\text{kPa}$ 인 때의  $c_h=162\text{cm}^2/\text{d}$ 와 비교하면 3.3배를 나타내고 있다. 이것은 고압으로 장기간 압밀함에 의해 체적압축계수가 감소한 것과 점토입자의 배향도가 증가했기 때문이라 판단된다.

Lawson(1982)은 흙-필터(soil-filter)의 장기 흐름 거동에 대해서 초기의 흐름 거동은 필터와 접하는 흙의 수리적 특성에 지배를 받다가, 일정시간 이 흐른 후에 필터의 역할이 시작된다고 보고했다.

Rao 등(1991)은 부직포 필터를 이용하여 최대다짐밀도로 다져진 다양한 세립토 함유율을 가진 흙의 long-term filtration test와 gradient ratio test를 실시했다. Filtration test 초기에는 흐름율이 점차적으로 감소하거나 일정한 흐름율을 유지하는 것이 관찰되며, 이는 필터 쪽으로 미립자의 이동과 필터 간극의 구멍 막힘을 나타내는 것이다. 흐름율의 감소는 세립토 함유율이 낮은 흙에서 더욱 확연히 관찰되는데, 그 이유는 세립토 함유율이 높은 흙보다 미립자가 필터 쪽으로 쉽게 이동할 수 있는 흙 구조특성에 기인한다. 필터에 접촉하고 있는 미립자는 투수과정에서 손실되고, 흐름율의 증가는 더 이상의 미립자 이동이 발생되지 않을 때까지 지속된다.

박(1985) 및 朴(1994)은 이 특성을 배수량측정, 유색안료흡입, 세립분유실량측정, 개량재료 장기간 경과후의 필터 채취에 의한 투수계수 비교 등을 통하여 장기간 거동 후에도 Filter Sleeve의 투수성 저하는 심각하지 않다고 하였으며, 압밀진행에 따른 다소간의 투수성능저하는 지반중의 간극수의 저하와 합치되므로 큰 문제가 없음을 주장하고 있다.

### 3. 계측관리

#### 3.1 현장계측

현장계측에는 지표면 침하, 층별침하, 수평변위, 간극수압측정 등이 있으며 각종 계측시 유의사항은 다음과 같다.

##### (1) 지표면침하 측정

- ① 성토후 침하판을 연결할 때 침하판의 위치가 이동되지 않도록 한다.
- ② 침하판 설치시 바닥 고르기를 하여 침하판이 기울지 않도록 해야한다.
- ③ 침하판이 외부의 영향으로 인하여 파손되지 않도록 보호 파이프를 설치하고 주변 작업시 각별히 주의하여야 한다.
- ④ 침하판의 크기는  $A \times B \times t = 90\text{cm} \times 90\text{cm} \times 1\text{cm}$  이상의 규격의 강재로 제작하고, 이중판 로드(rod)



를 사용하여 재하중 성토시 영향을 받지않도록 하여야 하며, 중기 등에 의한 변위가 발생하지 않도록 유의하여야 한다.

(2) 지중층별 침하측정

- ① 측정 앵커(anchor)가 정해진 위치에 설치 될 수 있도록 한다.
- ② 설치된 앵커가 주변지반과 함께 거동할수 있도록 주위에 그라우팅을 한다.
- ③ 측정시 오차를 최대한 줄이기 위하여 측정을 여러번 반복한다.

(3) 지중 수평변위측정

- ① 파이프(pipe) 설치시 소켓(socket)부분의 방수처리를 확실히 한다.
- ② 소켓에 의한 접속부가 손상되지 않도록 NX규격 이상의 시추기로 보링한다.
- ③ 부력에 의해 파이프의 삽입이 어려울 경우 파이프 내에 깨끗한 물로 채운 다음 파이프를 설치하고 그라우팅 후 물을 빼낸다.
- ④ 파이프 삽입시 측정하고자 하는 방향에 유의하여 설치한다.
- ⑤ 파이프 삽입 완료후 지반과 함께 거동할 수 있도록 시멘트, 벤토나이트 등의 그라우트재로 충분히 그라우팅한다.
- ⑥ 본 측정은 상대변위를 측정하는 것이므로 초기치 관리에 유의한다.
- ⑦ 프루브(Probe) 삽입시 측정하고자 하는 방향에 유의하여 삽입한다.
- ⑧ 파이프 설치후 보호 상자를 설치하여 외부의 충격으로부터 파이프를 보호하고 주변 작업시 각별히 유의하여야 한다.

(4) 간극수압 측정

- ① 출력 케이블(cable)은 가능한 구불구불하게 하여 빼내서 향후 지반변위에 따른 케이블의 단선을 방지하여야 한다. 또한, 케이블의 접속부위는 방수 처리를 확실히 한다.
- ② 보오링공 내의 되메움은 모래와 점토질을 사용하되 공극을 최대한 줄인다.
- ③ 수압계에 필터를 설치할 때는 증류수 속에 담귀 30분 이상 경과 후 설치하여 공기유입을 배제하고 초기 측정치를 기록해 놓는다.
- ④ 공기압축식 형상(Pneumatic Type)일 경우, 측정시 측정호스에서 개스가 새지 않도록 밸브의 연결에 주의한다.

현장계측요원은 설계도면, 시방서와 추가사항들에 완전히 익숙해 있어야 한다. 즉, 현장계측 요원은 계측준비와 토질계측장비, 성토위치, 또는 PBD재에 영향을 미치는 모든 사항을 파악할 수 있을 필요가 있다. 또한, 현장요원은 설계도면과 시방서를 알고 있어야 할 뿐만 아니라 설계와 현장타설 순서가 상이할 경우 발생할 문제성여부도 숙지하여야 한다. 설계자의 의도대로 PBD재를 타설하며, 계측하는 동안 현장계측관리는 연약지반처리 설계시 복잡한 자연현상(토질 및 토질특성 등)을 대상으로 단순화 시켜 시행되었으므로 설계시 예측된 사항을 확인하고 그 결과를 피드백(feed back)시켜 현장관리를 위한 자료로 이용하여야 한다.

연약지반처리를 정량적으로 확인하여 설계 및 시공에 피드백하므로써 공사의 안정성, 경제성, 신속성 및 개량효과를 판단하기 위하여 침하관리와 안정관리를 설계에서 제시한 방법으로 실시하여야 한다.

계측항목으로서는

- (1) 침 하 : 지표면 침하판, 층별 침하계
- (2) 수평변위 : 경 사 계
- (3) 압 밀 도 : 간극수압계
- (4) 정 수 위 : 지하수위계

도급자는 침하안정관리를 효과적이고 능률적으로 수행하기 위하여 필요한 조사 및 계측기기는 KS 규격 또는 동등 이상의 제품을 사용하여야 한다. 또한, 도급자는 지반개량 착공전에 지반조사 결과를 검토 분석하여 계측기 설치계획서 (설치위치, 수량, 시공시기 등)를 감독원에게 제출하고 사전 승인을 받은 후 다음 공정에 임하여야 한다. 현장 계측은 PBD재를 타설한 후 성토를 실시하는데 이 때 주된 현장계측 항목은 침하량, 수평변위량, 지하수위 위치와 간극수압이고 필요에 따라 토압을 측정한다. 그림 3.1는 연약 지반상 성토시 계측 항목의 예이며, 필요

한 계측장비는 침하계, 지중경사계, 지하수위계, 간극수압계, 토압계 등이다. 그림 3.2에서는 일본 Saga공항 건설부 지에서의 연약지반개량 성토시 적용한 계측기 설치 단면을 나타내고 있다.

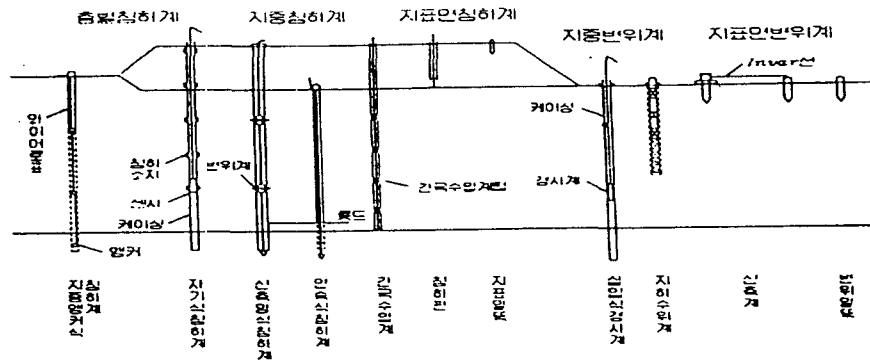


그림 3.1 연약지반상 성토시 계측항목 예(인천국제공항공사, 2001)

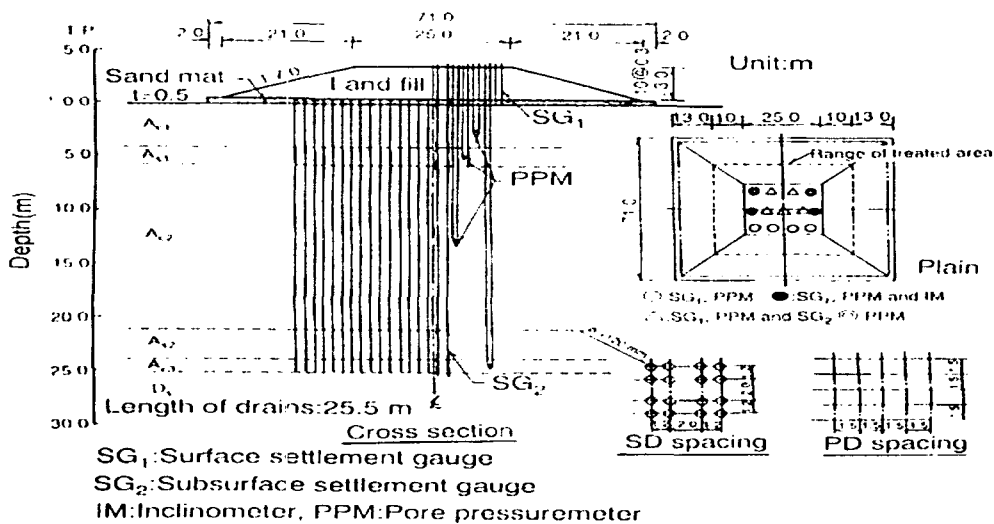


그림 3.2 Cross-section of including of instrumentations and drain spacing(朴, 1994)

### 3.2 계측관리 분석방법

안전성관리를 위해 신속한 대처를 요구하는 현장에서는 유한요소법과 같은 수치해석기법은 입력자료의 작성 등에 따른 시간 및 경비상의 문제로 인해 이용하기가 그다지 용이하지 않는 경우가 많다. 따라서, 현장계측에서 구해지는 수평 변위량, 압밀침하량, 간극수압, 층별침하량의 경시변화를 관찰함으로써 지반의 안정성을 판단할 수 있는 방법이 많이 고안되고 있다. 본 절에서는 수치해석 기법이라기 보다는 현장계측결과 등으로 신속하고 간편하게 현장에서 안정성을 판단할 수 있는 기법들을 소개한다.

#### (1) 성토속도에 의한 방법

성토공사의 안정관리방법 중에서 성토속도에 의한 방법은 현재 국내의 토질조건에 따라서는 정립되어 있지 않으며, 실제로 현장에서 사용하는 것은 일본의 기준을 적용하고 있는 실정이다. 가령 일례로서 성토시공속도에 의한 기준을 세분하여 보면,

- ① 성토고 3m까지 : 1층의 높이를 30cm 살포하여 2일간 방치(10cm/day) 하는데 일본의 경우  $\Delta S_{1t} / \Delta t \leq 2\text{cm/day}$ 로 한다. 한편, 우리나라에서 2cm/day로한 결과 영남권에서 전단파괴를 일으킨 예가 있어 1cm/day 또는

0.8cm/day까지 낮춘 경우가 있으나, 현재 기준은 2cm/day로 하고 있다. 여기서,  $\Delta S_h$ 는 수평변위이다.

② 압성토 완성까지 : 30cm 살포하고 5일간 방치

③ 압성토 완성후 : 5cm/day를 기준으로 하는데  $\Delta S_h / \Delta t$ ,  $\Delta u$ 의 감소에 따라 빠르게 한다.

이러한 방법의 도입은 조사 및 시험결과를 토대로 실시한 수치해석결과와 비교하여 기준을 설정하는 것이 가장 바람직할 것이다.

(2) 수평 변형속도에 주목하는 방법

쿠리하라(栗原)등은 이탄지반상의 시험성토공사에서, 성토법면 선단부의 수평변형 속도  $\Delta S_h / \Delta t$ 가 어느 한계치를 넘지않도록 시공관리하는 방법을 제안했다. 이 방법에서는  $\Delta S_h / \Delta t$  한계치를 얼마로 설정하면 좋은가가 초점이 되지만, 栗原 등은 성토천단면에 균열을 발생시키는 시점에서의  $\Delta S_s / \Delta t$ 의 값이 2cm/day인 것을 발견했다. 그리고, 이 값을 넘지않도록 성토속도를 제어하는 것으로 소정의 성토를 축조할 수 있다고 서술하고 있다. 또한, 이네다(稲田)는 성토다짐중  $\Delta S_h / \Delta t$ 의 평균치가 24cm/day를 넘지 않도록 시공속도를 조절하면 좋다고 보고하고 있다. 성토법면 선단부의 수평변형 뿐만 아니라 그 변화의 비율에 주목하는 방법을 서술했지만 계산에 따라 그 의의를 고찰해 본다.

(3) 침하속도에 의한 방법

성토공사시 성토제체 중앙하부의 하루당 침하량을 관리기준치로 설정하는 방법으로써 통상은  $\Delta S_v / \text{day} < 5.0\text{cm}$ 이면 안정하다고 한다. 그러나 지반의 종류에 따라서 그 기준량도 달리할 필요가 있으며, 거시적인 관점에서 압밀현상도 전단의 범주로 간주하면 침하량만의 관리보다는 수평변형량과의 복합적인 판단이 더욱 의미가 있을 것이다.

(4) 토미나가(當永) · 하시모토(橋本)의 제1방법

$S_v - S_h$ 관계는 그림 3.2(a)와 같이  $S_v$ 축에 대해 임의의 기울기  $\theta$ 를 갖는 직선 E상에 있게 된다. 그렇지만 성토가 파괴에 근접하면  $S_v$ 의 증가에 비해  $S_h$ 의 증가가 현저해서 그림 3.3(b)의 I-II 영역으로 기울게 되면서 불안정하게 된다. 다시 말해서  $S_h / S_v$ 값의 증가치로 성토파괴가 가깝다는 것을 판단할 수 있다. 이것을 수치적으로 표현하기 위해 직선의 변곡점에서 수직선을 그려보면 각  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ 를 관찰할 수 있는데, 이 각들의 크기가  $\alpha_2 \geq 0.7$  혹은  $\alpha_2 \geq \alpha_1 + 0.5$ 이면 불안정으로 판단한다.

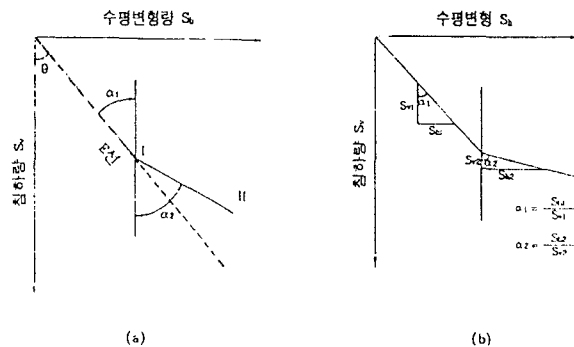


그림 3.3 침하와 측방변위량

(5) 토미나가(當永) · 하시모토(橋本)의 제2방법

현재까지 측정된 1/3시점에서  $S_v - S_h$ 의 기울기 E와 판단하고자 하는 시점의 기울기를 비교하여 1.2이하이면 불안정으로 판단한다.

**3.3 현장관리상의 예상문제 및 대책**

PBD 시공시 유의사항은 다음과 같다.

(1) 본격적인 PBD를 타설하기 전에 시험 타설을 실시하여 당초 설계시 추정하였던 설계내용과 상이할

- 경우에는 감독원의 승인을 얻은 후 추가 지질조사를 실시하여 타설지점, 심도, 간격 등을 검토하여 실시하여야 한다.
- (2) 본 시공은 작성된 시공관리 기준과 조사된 지층상태를 비교 검토하면서 PBD 타입 장비 운전원에게 충분히 교육시킨 후 수행하여야 한다.
  - (3) 감리자는 시공전 시추조사에 의하여 타설지점, 심도, 간격, 공법 등의 변경이 불가피한 경우에는 감독원과 협의하여 설계변경 조치하여야 한다.
  - (4) PBD 타입은 본 지침의 타설기준을 원칙으로 하되 토질조건 및 주변조건을 고려하여 변경할 경우에는 반드시 감리자의 승인을 얻어야 한다.
  - (5) PBD를 타설하기 전에 감리자의 지시에 따라 기준점을 설치하고 이를 기준으로 타설간격에 맞도록 Taping하여 타설위치를 확인할 수 있도록 표시한다.
  - (6) 타설위치는 반드시 측량을 하여 선정하여야 하며, 타설위치를 표시한 표지 등이 시공도중 파손 또는 손상되었을 경우에는 즉시 재설치하여야 한다.
  - (7) PBD 장비는 Sand mat를 부설한 후 지반의 안전성을 검토하여 안전한 작업이 가능한 것으로 판단될 때에 타입장비를 진입시켜야 한다.
  - (8) 연약지반의 교란방지와 안전사고 방지를 위하여 접지압  $5.0\text{tf}/\text{m}^2$  이하인 장비를 사용하여야 한다.
  - (9) PBD가 손상되지 않도록 Mendrel을 부착한 타입장비를 사용하여야 한다.
  - (10) PBD 타입깊이 및 공수의 변조가 불가능하도록 memory 기능이 없고 타입깊이가 숫자로 작업 즉시 기록되는 자동기록장치를 사용하여야 한다.
  - (11) 감리자는 PBD 타입 깊이에 대한 자동기록장치의 현장 검사를 매주 2회이상 비정기적으로 실시하여야 한다.
  - (12) 감리자는 자동기록장치의 현장 검사 결과 실제와 10m이하의 깊이에서 1.5%이상, 10~20m 깊이에서 2.0%이상, 20m이상에서 2.5%이상의 오차가 있을 시에는 즉시 작업을 중단시키고 자동기록장치를 교체한다. 고의적인 조작으로 판단될 시에는 감리자는 재시공 등 엄중한 제재조치를 취할 수 있다.
  - (13) PBD타입은 지면에 대하여 연직으로 하여야 하며 PBD타입이  $2^\circ$  이상 기울지 않도록 관리방안을 수립하고 이행하여야 한다.
  - (14) PBD타입위치의 오차는  $\pm 10\text{cm}$ 이내로 하여 배수영역의 균등성을 확보 하여야 하며, 전반적으로 설계된 간격보다 (+)쪽으로 벗어나서 타입되지 않도록 하여야 한다. 허용 오차를 벗어난 개소는 추가로 정위치에 재 타입하여야 한다.
  - (15) PBD의 상부 절단 길이는 sand mat표면에서 30cm로 하여야 한다.
  - (16) PBD의 1roll의 길이는 200~300m로 되어 있으므로 시공중에 잔여길이 타입길이보다 짧게 되는 경우가 있다. 이때에는 잔여분을 버리는 것이 원칙이나 부득이 한 경우는 감리자 입회하에 자켓식으로 연결하여 배수가 단절되지 않도록 한다. PBD끼리 단순 겹쳐서 연결하여서는 안되며 자켓식 연결을 원칙으로 한다.
  - (17) PBD타입시 Smear Effect를 최소화하기 위하여 Anchoring은 지반의 교란을 최소화하는 방법을 적용하여야 한다.
  - (18) PBD타입시 Anchoring불량으로 인하여 연약지반개량 깊이의 2.5% 이상으로 공상(空上)이 발생할 때에는 즉시 작업을 중단하고 감리자에게 보고하여 공상 방지방안을 강구한 후에 재시공한다. 공상으로 인한 모든 문제는 도급자의 책임이며 도급자의 부담으로 대책을 강구하여야 한다.
  - (19) PBD타입을 위한 Water Jetting은 금지하며, 부득이한 경우 사용할 경우에는 감독원의 사전허가를 받아야 한다.
  - (20) 타입작업 진행에 따라 연약지반이동 및 침하가 발생되지 않도록 작업장의 정리 및 과대하중, 국부재하방지에 최선을 다하여 안전관리에 철저를 기하여야 한다.
  - (21) 도급자는 PBD 타입 전에 PBD의 타입 배치도(PBD 시공 상세도)를 감리자에게 제출하여야 하며 또 타입량, 타입길이, 구역 등에 대하여 감리자가 승인한 형식의 일일 시공보고서를 제출하여야 한다.
  - (22) PBD 타입시공의 전 공정을 통하여 연약지반에 국부적인 집중하중의 재하, 지반의 소성유동 및 교란을 발생시키는 모든 행위를 하여서는 안된다. 이로 인한 모든 책임은 도급자의 부담으로 대책을 강구하여야 한다.

## 4. 결론

PBD공법의 품질 및 계측관리에 관하여 검토를 수행하고 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 연약지반 개량을 효율적으로 수행하기 위하여 적용되는 기존의 PBD재는 초기의 배수성능, 여과기능 및 인장강도는 충분하며 역할수행에 따른 변형발생, 축압 및 동수구배의 변화 및 시간경과에 따른 문제점이 발생하여도 일반적인 현장에서 요구되는 조건을 충족할 수 있는 것으로 판단된다.
- 2) 시공과정 중 PBD재의 손상발생, PBD타설시 과대한 지반교란발생, 나타입에 의한 Filter Sleeve의 구멍막힘 발생 등의 품질관리 부주의에 기인하여 PBD재의 품질평가가 과소화되는 경향이 있으므로 유의할 필요가 있다.
- 3) 현장실무자는 지반중의 공기(기포)영향 배제, 샌드매트의 투수성의 향상, 지반교란 최소화 배수시스템의 연속화 등에 대한 노력이 요망된다.
- 4) 적정위치에 적정수량의 적정정도를 가진 계측기를 복수로 매설하여 자동 및 수동을 병행하여 계측하여 지반의 개량과정을 평가하고 합리적인 분석방법을 적용하여 효율적으로 계측관리를 수행할 필요가 있는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 김 상규(1995), 밴드 드레인의 품질과 연약지반 개량효과와의 관련, '95 가을학술발표회 논문집, 한국지반공학회, pp. 1~20.
3. 박 영목(1985), 堤塘의 Geotextile Filter에 關한 實驗的 研究, 영남대학교 석사학위논문.
3. 박 영목(1997), 국내 PBD재의 배수성능과 진공효과에 의한 통수능력 향상에 관한 연구, 한국지반공학회지 제13권 제2호, pp. 39~53.
4. 인천국제공항공사(2000), 인천국제공항 부지조성공사, pp. 882~896.
5. 삼성중공업(주)건설기술연구소·중앙대학교 생산공학연구소(1998), 수직배수재의 적정단면 산출 및 개발에 관한 연구, pp. 2-1~5-54.
6. 嘉門 雅史·伊藤 讓(1984), 플라스틱ボードデューンの機能に關する研究, 第19回土質工學會發表會.
7. 新舍 博ら(1987), 플라스틱ドレーン材の折れ曲がりと改良效果, 第22回土質工學研究發表會, pp. 1791~1792.
8. 朴 永穆 (1994), 低平地に堆積する海成粘土の土質特性と鉛直排水工法による地盤改良に關する研究, 日本 佐賀大學 博士學位論文, pp. 1~235.
9. Akagi, T. (1994), Hydraulic Applications of Geosynthetics to Filtration and Drainage Problems - with Special Reference to Prefabricated Band-shaped Drains Proc., 5th International Conference on Geotextiles, Geomembranes, and Related Products, Singapore, pp. 99~119.
10. Hansbo, S.(1986), Preconsolidation of soft compressible soils by the use of prefabricated vertical drains, Ann. des Travaux Publ. de Belgique, No. 6. pp. 553~562.
11. Holtz, R.D., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Pedroni, S.(1989), Behavior of bent prefabricated vertical drains, Proc. 12th ISSMFE, Rio De Janeiro, pp. 1657~1660.
12. Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Wolski, W.(1983), Precompression and speeding up consolidation, Proc. 8th ECSMFE, Vol. 3, Spec. Session, No. 6, General Report, pp. 1241~1245.
13. Kramer, R.H.J., Oostveen, J.P., van Weele, A.F., de Jager, W.F.J. and Meyvogel, I.J.(1983), The quality of vertical drainage, Proc. 12th ICSMFE, Rio De Janeiro, pp. 1377~1380.
14. Lawson, C. R.(1982) : "Filter Criteria for Geotextile: Relevance and Use", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, New York, pp. 1300~1317.
15. Van Santvoort, G. P. Y. M., (1994) "Geotextile and Geomembranes in Civil Engineering" Balkema, Rotterdam, pp. 595.