



Ⅶ. 토목섬유에 의한 연약지반개량 (Plastic Board Drain공법)

1. 개요

토목섬유를 이용한 연약지반개량공법으로는 수직배수(연직배수; Vertical drain)공법과 수평배수(Horizontal drain) 공법으로 대별할 수 있으나, 본 고에서는 연약지반개량의 주종을 이루는 수직(연직)배수공법에 국한하여 기술하고자 한다.

수직(연직)배수공법으로는 일반적으로 플라스틱 보드 드레인(Plastic-board drain, PBD)재를 이용하고 있다. PBD공법은 1937년에 Kjellman에 의해 판상으로 된 마분지(Card board drain)가 개발된 것이 시초이다. PBD재의 유용성이 주목되어진 것은 1960년경이며(嘉門, 1985), 지금까지 전세계적으로 50여종의 PBD재가 개발되어 있다.(Holtz 등, 1991)

최근에는 시공기계의 발달과 함께 해상시공도 이루어지고 있으며(佐佐木, 1985), 타설심도도 점차적으로 증가하여 약 40m 깊이까지 타설하여 성공적으로 지반개량을 수행한 예도 있다(Hansbo, 1992). 아울러 PBD재의 배수성능에 관한 연구도 많이 수행되어 왔다.(박, 1997)

PBD재의 배수성능에 관하여 현재까지 많은 연

구가 수행되었음에도 불구하고 PBD재를 이용하여 지반개량을 실시하여 효과를 충분히 얻은 경우와 개량효과를 거의 얻지 못한 현상이 공존하는 등의 문제점이 남아 있는 실정이다. 효과를 얻지 못한 대표적인 요인으로는 대상지반조사의 불충분, 설계시 통수능력 검토의 부정확, PBD의 품질관리 불철저, 시공시 PBD제품의 잘못된 취급 등을 들 수 있다.

따라서, 본 고에서는 현장 실무자가 PBD재를 이용하여 연약지반을 개량하는 경우 설계, 시공시 유의사항을 비롯하여 합리적이고 과학적인 설계, 시공이 이루어져 효과적인 지반개량이 가능하게 하기 위한 참고사항을 기술하여 실무자에게 현장업무에 도움이 되게 하고자 한다.

2. PBD공법의 개요

2.1 공법의 목적 및 원리

PBD공법은 연직배수공법의 일종으로 연약한 점성토지반의 압밀에 요하는 시간이 배수거리의 제곱에 비례한다는 압밀이론과 지반퇴적특성에 기인하여 수평방향 투수계수(k_h)가 연직방향 투수계수(k_v)보다 큰 특징에 근거하여 지반중에 일정간격으로 연직방향의 PBD재를 설치하여 연직배수기둥을 형성함으로써 지중 간극수의 이동거리를 단축시켜, 연약한 점토지반을 압밀촉진시켜 단기간에 지반의 지지력을 증가시키는 공법이다. PBD공법의 배수원리는 그림 1에 나타내는 바와 같다.

* 정희원, 영남대학교 공과대학 토목공학과 부교수

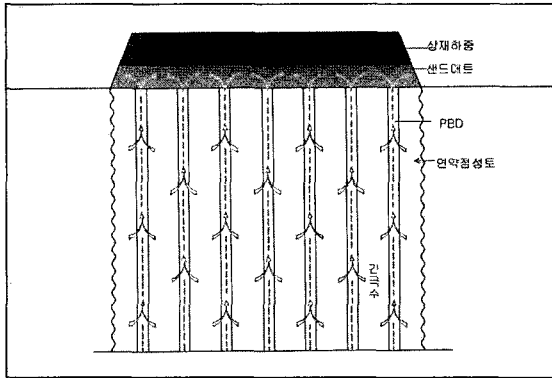


그림 1. 배수원리 개략도

2.2 공법 특징

PBD공법은 공장생산제품이기 때문에 필요시 안정적 공급이 가능할 뿐만 아니라 다음과 같은 특징을 가지고 있다. (佐佐木, 1985)

- ① 제품이 공장생산이므로 품질 관리가 용이하며, 배수효과가 일정하다.
- ② 경량이므로 운반 및 취급이 용이하다.
- ③ 경량의 타설장비 이용으로 초연약지반상에서의 시공도 가능하다.
- ④ 드레인 단면이 일정하여 불균일한 초연약지반에서도 드레인이 형성된다.
- ⑤ 샌드드레인보다 시공관리가 용이하다.
- ⑥ 시공속도가 빠르다.
- ⑦ 타설간격을 줄일 수 있어 압밀 시간의 대폭 단축이 가능하다.
- ⑧ 공사비가 저렴하다.

또한, 카몬(嘉門, 1985)은 PBD재료 자체의 이점으로서 다음과 같은 사항을 열거하고 있다.

- ① 드레인재 자체의 투수성이 높다.
- ② 토압 및 변형후에도 손실수두가 적다.
- ③ 내산, 내알칼리성이므로 토중의 박테리아에 의해 부식되지 않는다.

3. 설계

3.1 검토사항

PBD 설계의 주요항목으로는 PBD재의 타설배열, 타설간격, 타설심도, 대상지반의 발생침하량 및 점착력의 필요증가량과 상재성토고, 재하단계수 등이다. PBD공법의 설계시 유의사항으로는 지반개량공사의 조건설정 및 개량대상지구내의 토질조건설정을 정확히 하고 PBD재의 특성을 정확히 인식하는 것이다.

PBD공법의 설계순서 및 각 순서별 검토항목은 일반적으로 다음과 같다.

- ① 지반개량 목적 파악과 설계순서 설정

- ② 설계 조건

지반 조건, 하중재하 조건 및 시공 여건

- ③ 설계 계산

PBD재 선정, PBD의 환산직경(d_w) 산정, 타설배열(정삼각형 또는 정방형 설정), 타설 간격 및 타설심도(H) 결정, 상재하중 결정, 재하기간 산정, 압밀침하량 산정, PBD타설시 수평, 연직양방향의 배수에 관한 검토, 웰 레지스턴스, 매트 레지스턴스 및 스미어 존의 영향 등을 고려한 압밀도 산정, 단계 성토에 대한 압밀도, 상재 성토체의 안전성 검토, 대상지반의 개량효과 판정 및 상재하중 제거시기 판단 등이다.

3.2 설계조건

PBD의 설계조건으로서 대상 지반의 토질에 관한 사항, 하중재하에 관한 사항, 공기와 공사비에 관한 사항 및 시공성과 안정성에 관한 사항 등이 있으나 여기서는 토질 및 지반검토와 상재하중 및 시공의 조건에 관하여 약술한다.

1) 토질 조건

설계를 수행하기 전에 토질조사 및 시험을 통하여 설계 계산에 필요한 기본 자료를 준비하여야 한다.

2) 지반조사 및 검토 (한국도로공사, 1992)

연약지반처리 공사를 수행할 경우 지반조사, 제체의 안정, 침하에 대한 검토는 일반적으로 예비조사, 개략조사, 개략검토, 상세조사 및 상세검토의 순서로 효율적이고 경제적인 설계가 되도록 수행할 필요가 있다.

3) 상재하중 및 시공조건

상재하중 재하에 따른 지반의 활동 파괴가 발생하여 타설된 PBD의 절단, 성토체 붕괴 등의 문제를 유발되지 않도록 소정의 기간동안 단계 성토를 하여야 한다. 또한, 사용 예정 타설장비의 능력 등으로부터 PBD타설심도 등에 제한이 발생하는 경우 그 시공기에 능력이 맞춘 설계를 수행하여야 한다. 아울러, 공기 및 공사비에 대해서도 현장 여건, 지반 개량 목적 등에 부합되는 합리적인 검토를 실시하여 시공중 설계 변경이 발생하지 않도록 조치할 필요가 있다.

3.3 설계계산

3.3.1 PBD 선정조건

PBD재는 대상 지반내에서 받는 압력 및 변형이 발생한 경우에도 유로를 확보하고 배수성능을 충분히 가져야만 한다. 또한, 타설시 파손방지를 위하여 충분한 인장강도와 신도를 가진 제품이어야 한다. PBD의 품질은 지반개량효과의 성패를 결정하는 중요한 요인이므로 선정시험에 만전을 기하여야 한다.

3.3.2 PBD의 환산직경

PBD는 일반적으로 폭 10cm, 두께 3mm 정도의 판형 제품이 많다. 이와 같은 판형의 PBD를 설계할 경우에는 등가원형단면으로 환산한다. 환산직경(d_w)은 Hansbo(1979)가 유한요소해석을 실시하여 제안한 식 1과 Rixner 등(1986)이 제안한 식 2를 이용한다.

$$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi} \tag{1}$$

$$d_w = \frac{(a+b)}{2} \tag{2}$$

여기서, a, b는 각각 PBD재의 폭과 두께이다.

현재까지 설계에서는 폭 10cm, 두께 3mm의 PBD를 등가환산직경으로 5cm를 채택하는 경우가 많았다. 이 결과에 의하면 식 1은 안전율 $F_s \approx 1$ 을 나타내는 것으로 된다.朴(1994)은 대형압밀시험장치(직경: 45cm, 높이: 90cm)를 이용하여 실험적인 검증을 실시하여 PBD의 등가환산직경 d_w 는 $2(a+b)/\pi \geq d_w(a+b)/2$ 의 관계를 얻었다. 또한, 오이카와 등(及川 등, 1989)은 현장시험에서 PBD의 등가환산직경을 60mm ($2(a+b)/\pi$ 의 94%)를 취한 경우 예측에 가까운 거동을 나타낸다고 보고하고 있다. 이들의 결과를 종합할 때 PBD의 환산직경(d_w)은 Hansbo(1979)가 제안한 값의 90%인 $d_w=1.8(a+b)/\pi$ 취하는 것이 합리적인 것으로 판단된다.

3.3.3 타설배열

PBD의 타설시 배열은 정삼각형과 정방형으로 배열된다. 양자의 우열은 거의 없으며, 타설 PBD 1본에 대한 집수범위를 원형으로 환산한 등치영향원(d_e)은 타설종류에 따라 식 3, 4로 산정한다.

① 정삼각형 배열의 경우, $d_e=1.05D$ (3)

② 정방형 배열의 경우, $d_e=1.128D$ (4)

여기서, d_e : 집수범위를 원으로 환산한 등치영향원
D: PBD의 타설간격

3.3.4 타설간격

PBD의 타설간격은 소요의 공기내에 소정의 압밀도(U_e)가 얻어질 수 있도록 각종의 토질조건, PBD 조건 등으로부터 시행착오법에 의해 계산을 실시하여 구한다.

PBD의 타설간격은 다음과 같이 결정한다.

- ① 공기에 적절한 경과일수에 대한 압밀도(U)의

값을 정한다.

- ② 타설간격을 1.0 ~ 2.0m 범위에서 가정한다.
- ③ 타설배열을 결정하여 등치영향원의 직경(d_e)을 산정한다.
- ④ 예상 사용 PBD재의 규격에 맞추어 배수재의 등가환산직경(d_w)을 구한다.
- ⑤ 산출한 d_e 와 d_w 의 비(n)를 식 5에 의하여 소수점 2위까지 산출한다.

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (5)$$

- ⑥ 토질 조건 중에서 대상토층의 수평방향 압밀계수(C_h)를 정한다. 수평방향의 압밀계수(C_h)가 없는 경우, 연직방향 압밀계수(C_v)를 취한다.
- ⑦ 현장 및 실내시험을 통하여 멘드렐 관입에 따른 주위 지반의 교란 범위(스미어 존: smear zone, 직경: d_s)의 설정과 스미어 존에 있어서 투수계수 k_s 를 취한다. 현장에서 스미어 존의 범위 및 교란투수계수를 직접 구하지 않은 소규모의 현장인 경우에는 d_s 를 멘드렐 직경의 2~3배, k_s 는 불교란 점토 투수계수의 1/3~1/5의 범위에서 적용하면 합리적일 것이다.
- ⑧ 소요압밀도 (U)에 이르는 시간(t)은 식 6에 의해 산정한다.

$$t = (d_e)^2 \times \frac{T_h}{C_h} \quad (6)$$

여기서, t : 소요압밀도에 달하는 필요 시간 (일), T_h : 수평 방향의 압밀 시간 계수(T_h 값 산정은 후술하는 압밀도 계산방법 항 참조), C_h : 수평 방향의 압밀계수 (cm^2/day)

- ⑨ 식 6에 의해 산정된 시간(t)가 필요로 하는 공기압에 맞도록 타설간격(D)의 값을 바꿔 수회 반복계산하여 소요의 t 를 얻을 수 있는 경제적인 타설간격을 결정한다.

3.3.5 타설심도

PBD를 타설하는 심도는 개량대상 연약점성토층의 하단부로부터 1m 위에 까지 타입하는 것이 기본이다.

3.4 성토체 안정계산

3.4.1 재하성토고

- ① 재하를 위한 1단의 성토고는 대상지반의 지지력을 산정하여 소요의 성토고(재하성토고)를 식 7, 8에 의해 산정한다.

$$H_c = \frac{N_s \cdot c}{r} \quad (7)$$

$$F_s = \frac{N_s \cdot c}{H \cdot r} = \frac{H_c}{H} \quad (8)$$

여기서, H_c, H : 성토사면의 한계성토고(m) 및 1단계의 성토고(m), c, γ : 대상 토층의 점착력 (tf/m^2) 및 흙의 단위 체적중량(tf/m^3), F_s : 안전율, n_d : 깊이계수, N_s : 안정계수(성토사면의 경사각 β 와 성토체가 가진 내부마찰각으로 부터 정하는 계수로 $N_s = \gamma H_c / c$ 이다.

- ② 각 단계의 재하에 요하는 기간은 대상토층이 80% 정도 압밀될 때까지로 한다. 이 재하 조건을 기준으로 침하계산과 재하성토의 안정계산을 하여 소요의 재하 성토의 적재여부를 검토한다.

3.4.2 상재하중

상재하중의 검토시 연약지반의 침하에 기인하여 성토층의 일부가 지표면의 아래로 관입하여 지하수 위 아래에 위치하는 경우에는 이 부분의 흙의 단위체적중량을 습윤단위중량에서 수중단위체적중량으로 바꾸어 검토하는데 유의해야 한다.

3.4.3 안정계산

연약층의 토층구분에 있어서 배수층(sand seam 층 등)의 판정은 지반의 압밀도 계산결과에 큰 영향을 주기 때문에 매우 중요하다. 그러나, 어떠한 층이 배수층으로서 역할을 할 것인가에 대해서는 판단하

기가 어렵기 때문에 주의가 필요하다. 안정계산에 있어서 유의할 점은 연약층 아래의 기반이 경사져 있거나 예민비가 커서 강도저하가 현저하고 강도회복이 늦은 지반이다. 또한, 체재재료의 전단강도 및 단위 체적중량은 안정도에 크게 영향을 미치기 때문에 충분히 검토하여 적당한 값을 사용하여야 한다.

3.5 압밀침하량 계산

압밀침하량 및 침하속도의 계산은 기본적으로 각 각 따로 산정하여 최종적으로 합성하는 과정이 취해진다.

1) 압밀 침하량 구하는 계산식

점성토의 압밀침하량을 구하는 데는 다음의 3가지 식을 이용한다.

① c_c 법

$$S_f = \frac{c_c}{1+e_0} \cdot H \cdot \log \left[\frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma'}{\sigma'_0} \right] \quad (9)$$

② m_v 법

$$S_f = m_v \cdot H \cdot \Delta\sigma' \quad (10)$$

③ e법

$$S_f = \frac{e_0 - e_f}{1 + e_0} \cdot H \quad (11)$$

여기서, S_f : 최종 침하량(m), H: 압밀층의 두께(m), σ'_0 : 재하전의 유효토포압(tf/m²), $\Delta\sigma'$: 증가응력(tf/m²), e_0, e_f : 재하전, 후의 간극비, C_c : 압축 지수, m_v : 체적 압축계수(m²/tf)이다.

계산시 m_v 값은 p_c 값보다 작은 하중에 대응하는 m_v 와 p_c 값보다 큰 하중에 대응하는 m_v 값 2개를 설정한다.

일반적으로 항만공사에서는 m_v 법을 적용하고, 도로 등의 지반개량공사에서는 C_c 법에 의한 계산식이

사용된다. 매립지의 초연약지반 개량공사에서 압밀 시험을 실시하지 않은 경우는 e_0 법을 이용하여 침하량을 산정한다. 또한, 토질주상도를 참고하여 연약층을 토성이 상이한 지점을 기준으로 3~4 층으로 분할하고 계산용 모델적 층두께를 설정한다. 한편, 침하량 계산시에는 각층의 침하량을 산정하여 합산하는 방법을 취한다.

3.6 압밀침하시간 계산

일반적으로 설계에서 간편하게 압밀시간을 계산하는 경우 다음에 나타내는 식 12~15을 이용한다. 이 관계식은 PBD의 투수성이 무한하고, PBD 타설시 발생하는 스미어 효과(smear effect)는 무시한 간편법이다. 그러나, 이 일반식을 사용하는 경우 수평방향의 압밀계수 c_h 대신에 연직방향 압밀계수 c_v 를 적용하는 것이 더욱 합리적일 것이다. 왜냐하면, 현장시공시 PBD의 타설에 의해 멘드렐 주변 점토가 교란되어 투수계수가 저하되므로 c_h 가 c_v 에 거의 가까운 값을 나타낸다고 되어 있기 때문이다.

$$U_h = \frac{S(T_h)}{S_f} = 1 - \exp \left[- \frac{8T_h}{F(n)} \right] \quad (12)$$

$$F(n) = \frac{n^2}{n^2-1} \ln(n) - \frac{3n^2-1}{4n^2} \quad (13)$$

$$n = \frac{d_e}{d_w} \quad (14)$$

$$T_h = \frac{c_h [(\approx c_v)]}{d_e^2} \cdot t \quad (15)$$

여기서, U_h : 임의의 시간 계수에 대한 압밀도(%), T_h : 임의의 압밀도에 대한 시간계수이다.

또한, PBD 타설간격에 의한 영향(F_n)만을 고려하여 압밀침하시간을 산정하면 된다. 그러나, 실제 지반개량현장에서 있어서 과학적이고 합리적인 압밀기간산정을 위해서는 타설간격, 스미어 효과, 샌드매트

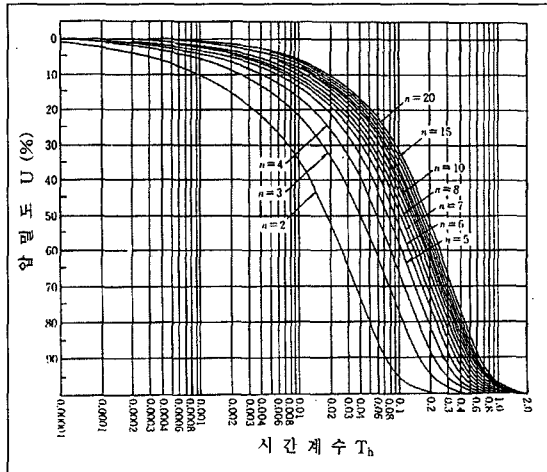


그림 2. 간편법에 의한 시간계수와 압밀도의 관계

레지스턴스 및 웰 레지스턴스 등의 압밀속도에 영향을 미치는 요인을 종합적으로 고려한 엄밀해석을 실시하는 것이 바람직하다. 압밀침하시간의 계산은 식 16에 의해 산정된다.

$$t = d_e^2 \cdot \frac{T_h}{c_h \{[\approx c_v]\}} \quad (16)$$

그림 2에는 간편법의 시간계수 T_h 와 압밀도의 관계를 $n=2\sim 50$ 의 범위에서 나타낸다.

3.6.1 압밀속도에 영향을 미치는 요인

연약지반속의 간극수를 배제하여 압밀개량하는데 소요되는 시간 t 및 배제속도에 영향을 주는 요소 μ_s 는 Hansbo(1979)가 연직배수재에서 제안한 이론과 같은 개념으로 생각할 수 있다.

$$rm \mu_s = F(n) + F(s) + F(r) \quad (17)$$

$$t = d_e^2 \cdot \frac{T_h}{c_h} \quad (18)$$

$$T_h = U_s \cdot \ln \frac{1}{1 - U_h} \quad (19)$$

$$U_h = 1 - \exp \frac{-8T_h}{\mu_s} \quad (20)$$

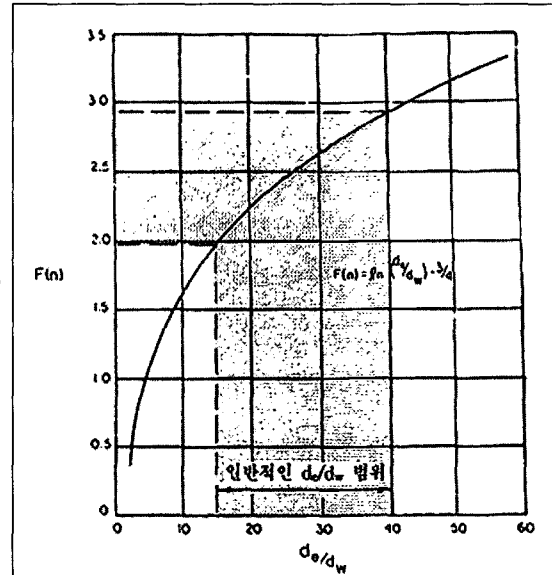


그림 3. 이상형 조건에서의 d_e/d_w 와 $F(n)$ 의 관계

여기서, $F(n)$, $F(s)$, $F(r)$ 는 각각 PBD재의 타설 간격, 스미어 존(smear zone) 및 웰 레지스턴스(well resistance)에 의한 영향이다. d_e : PBD재의 등가 영향원의 직경, c_h : 수평방향압밀계수, U_h : 수평배수에 의한 압밀도, T_h : 시간계수이다.

3.6.2 PBD 타설간격이 미치는 영향

현장설계에 있어서 간극수 배제속도에 영향을 주는 요소로서 PBD재의 간격만의 영향을 고려하는 경우가 많다. Hansbo(1979)는 드레인 간격의 영향을 식 14와 같이 제안하고 있다. 이는 간편설계에서 적용하는 값과 같다. 전술한 식 13을 제안하였다. 그러나, d_e 는 d_w 의 20배 이상이 일반적이므로 $1/4n^2$ 을 무시하면 식 21와 같은 근사식을 얻을 수 있다.

$$F(n) = \ln n - \frac{3}{4} \quad (21)$$

그림 3은 PBD재에 스미어 존 및 웰 레지스턴스의 영향을 무시한 이상적인 조건에 있어서 $n(=d_e/d_w)=15\sim 40$ 의 범위에서 PBD재의 타설간격의 영향 $F(n)$ 의 값을 나타낸 것이고 이 때 $F(n)$ 은

2.0~2.9의 범위를 나타낸다.(Rixner 등, 1986)

3.6.3 스미어 존이 미치는 영향

Hansbo(1979)는 스미어 존이 간극수 배제속도에 미치는 영향을 다음 식과 같이 제안하고 있다.

$$F(s) = ((k_h / k_s) - 1) \ln(d_s / d_w) \quad (22)$$

Rixner 등(1986)은 스미어 존이 간극수 배제속도에 미치는 영향을 타설간격의 영향과 같은 정도 또는 그 이상이며, 대표적인 범위의 $F(n)$ 에 대하여 $F(s)$ 의 값을 이론적으로 구하여 $F(s)/F(n)=1\sim 3$ 임을 보고하고 있다. Jamiolkowski 등(1983)은 압밀속도에 미치는 스미어 존의 영향을 그림 4와 같이 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는바와 같이 스미어 존의 영향은 매우 크므로 설계 및 시공시 반드시 고려할 필요가 있다.

Madhav, Park and Miura(1993)는 스미어 존의 실측결과에 근거하여 현장조건을 고려한 2층 스미어 존 모델을 제안했다. 그림 5에는 이 모델을 근거로 스미어 존이 발생 않는다는 조건(no smear zone), 기존의 가정조건(1 smear zone) 및 제안조건(2 smear zone)의 해석결과를 비교하여 나타냈다. 2층

스미어 존의 경우 실측결과에 근거하여 불교란 존의 k_c 에 대하여 외부 스미어 존의 k_{s0} 는 0.5, 내부 스미어 존의 k_{s1} 는 0.2로 하였다. 그림에서 알 수 있듯이 2층 스미어 존의 경우는 50% 압밀도에 상당하는 시간계수 T_{h50} 은 스미어 존이 발생하지 않는다는 조건의 3.3배를 나타낸다. 이상의 해석결과를 참고할 때 압밀시간 계산시 스미어 존의 영향을 무시해서는 안되며, 개량대상 지반에서 실측한 스미어 존의 범위와 투수계수의 변화를 적용하여 $F(s)$ 를 산정함이 바람직하나, 소규모공사 또는 개략적으로 검토하는 경우에는 식 22에 의한 1층 스미어 존에 대한 $F(s)$ 를 구하고 그림5를 참조하여 각 압밀도에 대한 1층 스미어 존과 2층 스미어 존의 비를 곱하여 보정해서 이용하면 될 것으로 판단된다.

3.6.4 웰 레지스턴스의 영향

현장에서 지반의 압밀이 진행됨에 따라 PBD의 종방향 통수능력 (Q_w)에 영향을 미치는 요인이 발생한다. 이들은 PBD재의 굴곡(bending and folding), PBD재 필터의 크리프 변형 및 동수구배 I의 변화 등이며 이들에 의해 Q_w 가 저하되는 것이 이해된다. PBD의 요구통수능력 (Q_{req})의 계산은 Pradhan 등(1991)이 나타낸 식 23을 일반적으로 이용한다.

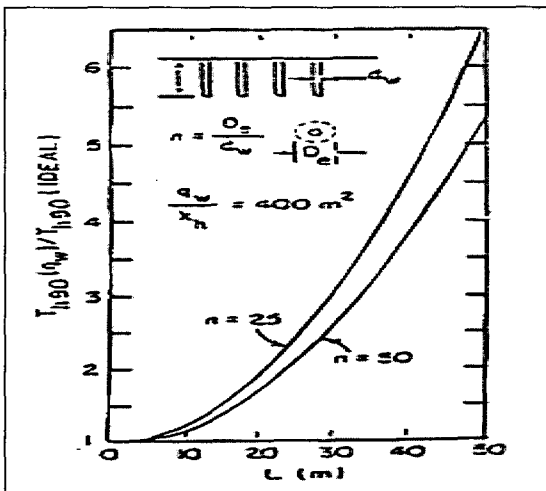


그림 4. 압밀속도에 미치는 스미어 존의 영향

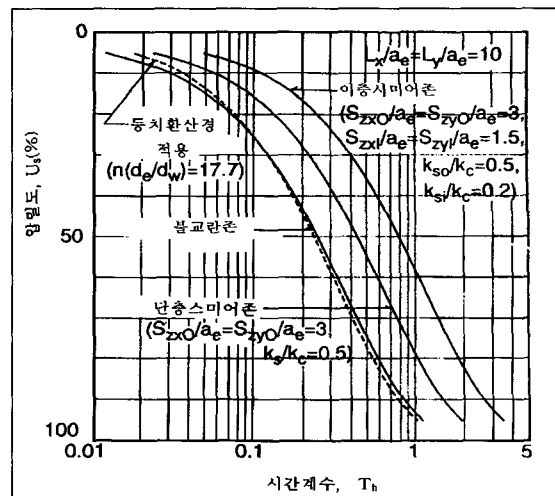


그림 5. 스미어 존이 압밀속도에 미치는 영향

$$Q_{req} = \frac{q_f \cdot U_f \cdot F_s \cdot L \cdot \pi \cdot c_h}{(4 \cdot T_h \cdot 86,400)} \quad (23)$$

여기서,

$$T_h = -(F(n) + F(s) + F(r)) \ln\left(\frac{1}{U_h}\right) / 8$$

을 이용하면 된다. 또한, ϵ_f : 최종침하량(0.25H), U_h : 수평배수에 의한 압밀도, F_s : 안전율(=2), L : PBD의 길이 및 c_h : 지반의 수평방향 압밀계수 (cm^2/day)이다.

실제 설계에 있어서는 현장조건 및 사용예정 PBD의 사양 등을 참고하여 요구통수능력, 실제통수능력 등을 비교 검토하는 작업이 요망된다. PBD재의 종방향 통수능력 Q_w 가 유한한 경우, Hansbo(1979)는 Darcy법칙을 이용하여 웰 레지스턴스의 영향($F(r)$)을 산정하기 위해 식 24를 제시했다.

$$F(r) = \pi z(L - z)(k_h / Q_w) \quad (24)$$

여기서, z : 임의 지점 PBD의 배수거리, L : 일면 배수인 경우 길이, 양면배수일 경우 $L/2$, k_h : 수평방향 투수계수이다.

한편, 요시쿠니(吉國, 1979)는 Barron의 식을 근거로 웰 레지스턴스를 고려한 압밀도 U_h 의 근사해를 식 25과 같이 제시했다.

$$U_h = 1 - \exp \frac{8 T_h}{F(n) + 0.8 L_{CWR}} \quad (25)$$

여기서, L_{CWR} 은 웰 레지스턴스 계수이며 식 26과 같이 산정한다.

$$L_{CWR} = \frac{3L}{\pi^2} \frac{k_c}{k_w} \left(\frac{L^2}{dw}\right)^2 \quad (26)$$

일반적인 상황에서 PBD의 웰레지스턴스를 산정하면, PBD 재의 타설간격 $n=10\sim30$ 의 경우 $F(n)$ 의 계산치(Rixner 등, 1986)의 $1/6\sim1/9$ 로 되어 실용상 무시할 수 있다고 판단된다. 그러나, 연약지반

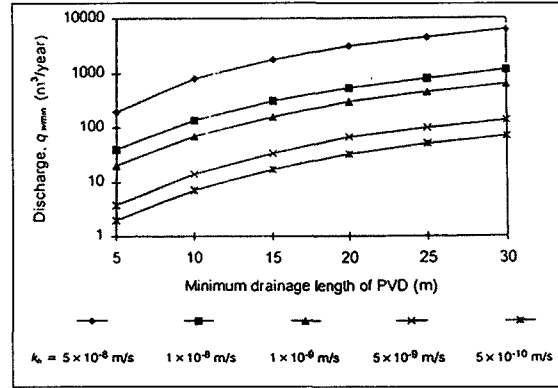


그림 6. 웰 레지스턴스가 무시될 수 있는 최소 배수능력(Akagi, 1994)

의 간극수 중에 용존공기가 많을 경우, 대상지반이 투수성이 큰 실트질이 주종을 이루는 경우, PBD재 길이가 긴 경우, 또한 PBD를 타설하여 1차 압밀 종료 후 2차, 3차의 성토 시공이 필요한 경우 등에는 웰 레지스턴스의 영향이 상대적으로 클 것으로 판단된다. 따라서 연약지반 설계시에는 철저한 사전현장조사 수행에 근거하여 현장여건 등을 충분히 고려한 상태에서 설계할 필요가 있으며, 공기(기포) 등에 의한 웰 레지스턴스의 영향이 큰 경우 진공압밀병행 등의 대책을 세울 필요가 있다고 판단된다. Akagi(1994)는 PBD의 길이와 개량대상지반의 수평방향 투수계수를 파악하면 웰 레지스턴스를 무시할 수 있는 최소 통수능력의 한도를 결정할 수 있는 실용적인 도표를 그림 6과 같이 제시하고 있다.

3.6.5 샌드매트 레지스턴스

개량대상 지반의 표면에 일반적으로 샌드매트를 포설하여 수평방향 배수를 한다. 샌드매트용 모래는 Terzaghi의 필터구조에 적합한 재질을 사용해야 한다. 그러나, 최근에 양질의 모래가 부족하고 공사비가 비싸므로 현장에서 부득이 인근지역에서 취토 가능한 조립질의 일반토사를 쓰는 등 수평 매트층을 경시하는 경향이 나타나고 있다. 이 경우 샌드매트 레지스턴스의 영향이 중요한 요인으로 작용한다. 매트 레지스턴스의 영향 평가에는 요시쿠니(吉國, 1979)

강 좌

가 제안한 식 27과 같은 근사식을 이용할 수 있다.

$$L_{CMR} = \frac{32}{\pi^2} \frac{Lk_c}{n^2 H_m k_m} (B/d_w) \quad (27)$$

여기서, L_{CMR} : 매트 레지스턴스 계수, H_m, K_m : 샌드 매트 두께 및 투수계수, B : 중앙의 PBD로부터 측구까지 거리 등이다.

3.7 설계계산 예

3.7.1 개설

PBD를 이용하여 지반개량을 실시하는 경우 PBD의 타설간격결정과 압밀침하량 및 압밀기간산정에 관한 간편법에 의한 설계계산 예를 제시하여 실무자에게 설계 및 시공시 참고가 되게 한다.

3.7.2 PBD 타설간격 결정을 위한 예

1) 조건

개량대상지반의 연직방향압밀계수 $c_v = 0.75 \text{m}^2/\text{년}$, 투수계수 $k = 1 \times 10^{-9} \text{m/sec}$ 의 연약지반을 PBD를 이용하여 개량한다. 압밀도(U)가 80%로 되게 개량하기 위한 소요시간 (t)은 1.7년(620일)이며, 타설배열은 정방형으로 한다. 사용 PBD의 단면은 폭 10.7cm, 두께 3.0mm이며, 타설장은 30m이며, 통수능력 $Q_w = 1,000 \text{m}^3/\text{year}$ 이다.

2) 타설간격 결정을 위한 검토

전술된 그림 6에서 제시된 바와 같이 타설길이 30m인 경우 본 PBD는 요구되는 통수능력 Q_{req} 를 초과하므로 웰 레지스턴스는 무시할 수 있으며, 간편법의 계산이기 때문에 수평방향의 압밀계수(c_h)대신에 연직방향압밀계수(c_v)를 적용하므로 스미어 존의 영향은 무시할 수 있다. 따라서 타설간격의 영향만을 고려한 계산으로 충분하다.

3) 계산

전술된 PBD재의 환산직경 $d_w = 1.8(a+b)/\pi$ 에 의해,

$$d_w = \frac{1.8(0.107 + 0.003)}{\pi} = 0.063 \text{m}$$

타설간격은 임의로 가정하여 $d = 1.5 \text{m}$ 로 하면,
 $d_e = 1.50 \times 1.128 \text{(식4)} = 1.692 \text{m}$

$$n \text{(식5)} = \frac{1.692}{0.063} = 26.86$$

$$F(n) = \frac{(26.86)^2}{(26.86)^2 - 1} \ln 26.86 - \frac{3 \times (26.86)^2 - 1}{4 \times (26.86)^2} \approx 2.546$$

식 20에서 T_h 를 환산하면,

$$T_h = \frac{\mu_s}{8} \ln \left(\frac{1}{1 - u_h} \right) = \frac{2.546}{8} \ln \left(\frac{1}{1 - 0.80} \right) = 0.5122$$

따라서 U_h 80%에 대응하는 시간(t)는

$$t = \frac{(1.692)^2 \times 0.5122}{0.75} = 1.955 \text{년} > 1.7 \text{년}$$

N.G로 되어 d 를 약간 축소할 필요가 있다. 따라서, t 가 1.7년에 가장 가까운 타설간격(d)의 값인 1.40m로 하면,

$$d_e = 1.40 \times 1.128 = 1.5792 = 157.92 \text{cm}$$

$$n = \frac{1.5792}{0.063} = 25.067$$

$$F(n) = \frac{(25.07)^2}{(25.07)^2 - 1} \ln 25.07 - \frac{3 \times (25.07)^2 - 1}{4 \times (25.07)^2} = 2.4775$$

$$T_h = \frac{2.4775}{8} \times 1.6094 = 0.4984$$

$$t = \frac{(1.5792)^2 \times 0.4984}{0.75} = 1.657$$

$$\approx 1.66 \text{년} < 1.7 \text{년}$$

로 되기 때문에 타설간격을 1.40m로 하면 된다.

3.8.3 압밀침하량 및 압밀시간 산정 계산 예

1) 조건

그림 7에 나타내는 바와 같은 개량 대상지구에 대하여 지반상황은 그림 8에 나타내는 바와 같은 연약 지반이다. 지반고는 매립전의 수심이 -8.00m이고 지반은 거의 평탄하다.

매립조성지반고는 준설토 투입종료직후에 +4.50m이고, 지반개량종료후에는 +6.00m 이상이 되게 한다.

토질조건은 매립토층과 자연퇴적토층의 2개층으로 되어 있다. 자연퇴적층(-8.00m 이하)과 매립연약토층(+4.50m~-8.00m)에서 각각 압밀계수

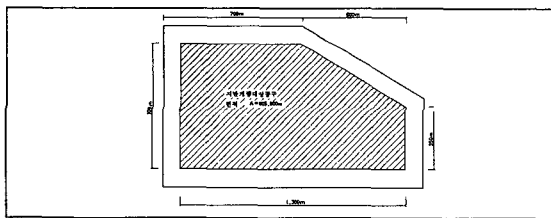


그림 7. 지반개량대상공구

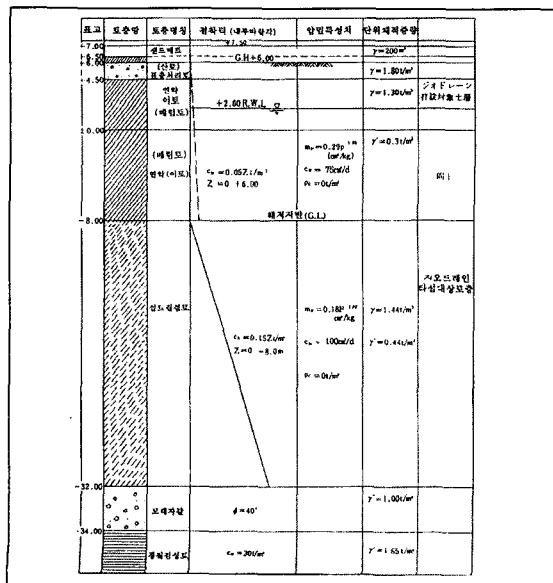


그림 8. 지반상황

$c_v = 100 \text{ cm}^2/\text{day}$ 와 $75 \text{ cm}^2/\text{day}$ 이다. 양층의 토질특성은 다음과 같다. 자연토층(-8.00m~-32.00m)의 함수비 $w = 82 \sim 115\%$, 단위체적중량 $\gamma = 1.44 \text{ tf/m}^3$, 토립자의 비중 $G_s = 2.63$, 초기간극비 $e_0 = 2.156 \sim 3.025$, 투수계수 $k = 3.3 \times 10^{-8} \text{ cm/sec}$ 이다.

샌드매트재, 피복토재 및 재하용 토사류의 성질은 각각 다음과 같다. 샌드매트의 단위체적중량 $\gamma = 2.00 \text{ tf/m}^3$, 내부마찰각 $= 33^\circ$ 이다.

피복토재의 단위체적중량 $\gamma = 1.80 \text{ tf/m}^3$, 함수비 $w = 15\%$, 내부마찰각 $= 30^\circ$ 이며 하중용 성토재의 단위체적중량 $\gamma = 1.85 \text{ tf/m}^3$ 이다.

2) 침하계산을 위한 설정조건

- ① 준설연약이토는 +4.50m 높이까지 투입하여 매립종료하고 6개월간 방치한다. 이 중량은 자연퇴적토층에 대하여 압밀하중으로 작용한다.
- ② PBD의 타설을 위하여 준설토층상부에 두께 2m의 피복토를 부설한다. 피복토의 부설공기는 6개월로 하고, 부설 개시로부터 3개월이 경과한 시점에서 두께 0.5m의 샌드매트를 부설하고 PBD를 타설한다. 피복토부설에 따른 침하량은 미소하므로 무시하기로 한다.
- ③ PBD의 타설공기는 10개월로 하며, 압밀개시 시간($t=0$)은 PBD타설 개시후 0.5개월로 한다. 매립토층에서의 단위체적중량은 하중재하 1단계마다 0.05 tf/m^2 씩 증가한다.
- ④ 조성지반상의 구조물은 +6m에 설치하고, 작용하중은 5 tf/m^2 의 등분포로 한다.

3) 지반개량을 하지 않은 경우의 압밀도와 압밀 침하량, 압밀시간의 산정

침하대상토층으로 자연퇴적토층과 매립토층이 각각 $H = 24.0 \text{ m} (-8.0 \text{ m} \sim -32.0 \text{ m})$, $H = 12.5 \text{ m} (+4.50 \text{ m} \sim -8.0 \text{ m})$ 이다.

(1) 자연퇴적토층에 대한검토

① 작용하중의 산정

강 좌

매립연약토층(-8.00m~+4.50m간)의 잔류수 위 상, 하부 작용 하중과 표면 피복토(+4.5m~+6.50m간), 샌드매트(+6.50m~+7.00m간)와 적재하중(설정조건)을 합한 작용하중의 합계 $\Sigma \Delta P = 3.0+3.25+3.60+1.00+5.0=15.85\text{tf/m}^3$

② 침하계산에 대응하는 m_v 산정
대상토층의 중앙부까지의 토피압과 작용하중의 1/2을 고려하는 것으로 하여,

$$P' = \gamma \cdot H/2 \Sigma \Delta P / 2,$$

$$m_v = 0.18 \times P'^{-1.02}$$

$$P' = 0.44 \times 24/2 + 15.85/2 = 13.205\text{tf/m}^3$$

$$m_v = 0.18 \times 13.205^{-1.02} = 0.1356\text{cm}^2/\text{kgf}$$

③ 최종침하량의 산정
 $\Delta S = m_v \cdot H \cdot \Delta P \cdot U$
 $U = 100\%(t=\infty)$ 에서는,
 $\Delta S = 0.1356 \times 2400 \times 1.585 = 515.82\text{cm}$

(2) 매립토층에 대한 검토

① 작용하중의 산정
피복토층의 하중(+4.50m~6.50m), 샌드매트의 하중(+6.50m~+7.00m) 및 적재하중(설정조건)을 합한 작용하중의 합계 $\Sigma \Delta P = 3.60+1.00+5.0=9.60\text{tf/m}^3$
② 침하계산에 이용하는 m_v 의 산정
 $P' = \gamma \cdot H/2 + \Sigma \Delta P / 2$

표 1. 압밀도와 시간계수의 관계

압밀도(U)	시간계수 (T_v)	압밀도(U)	시간계수 (T_v)
0	0.0000	50	0.197
5	0.0017	55	0.238
10	0.0077	60	0.286
15	0.0177	65	0.342
20	0.0314	70	0.403
25	0.0491	75	0.477
30	0.0707	80	0.567
35	0.0962	85	0.684
40	0.1260	90	0.848
45	0.1590	95	1.129

$$m_v = 0.2 \times P'^{-1.25}$$

$$P' = 1.30 \times (4.5-2.0)/2 + 0.3 \times (2.0+8.0)/2 + 9.60/2 + 1.625 + 1.50 + 4.80 = 7.925\text{tf/m}^3 = 0.7925\text{kgf/cm}^2$$

$$m_v = 0.2 \times 0.7925^{-1.25} = 0.2675\text{cm}^2/\text{kgf}$$

③ 최종침하량의 산정
 $\Delta S = m_v \cdot H \cdot \Delta P \cdot U$
 $U = 100\%(T = \infty),$
 $\Delta S = 0.2675 \times 1250 \times 0.960 = 321.0\text{cm}$

(3) 각 토층의 압밀도와 대응일수, 침하량의 관계
압밀도(U)에 대응하는 일수(t)는, 양면배수의 조건으로 하고 침하량과의 관계를 구하면 표 2.(a), (b)처럼 된다.

① 자연퇴적토층(-8.00m~-32.00m)
 $t = (H/2)^2 \cdot T_v / c_v, H = 2400\text{cm},$
 $c_v = 100\text{cm}^2/\text{일}$
 T_v 는 표 1을 참조하여 계산하면,
 $U = 90\%$ 는, 12,211.2일 = 33.46년, 침하량은 4.46m
 $U = 80\%$ 는, 8,164.8일 = 22.37년, 침하량은 4.13m
로 매우 긴 압밀기간과 큰 침하량이 예측된다.
② 매립토층(+4.40m~-8.00m)
 $H = 1250\text{cm}, c_v = 75\text{cm}^2/\text{일}$
매립토층의 압밀일수는 자연퇴적토층의 압밀소요일수 속에 포함되기 때문에 침하량만의 단순한 중복계산을 실시한다.

$U = 90\%$ 일 경우
 $\Delta S = 464.24 + 288.90 = 735.14\text{cm}$
 $t = 12,211.2\text{일} = 33.46\text{년}$
 $U = 80\%$ 일 경우
 $\Delta S = 412.66 + 256.80 = 669.46\text{cm}$
 $t = 8,164.8\text{일} = 22.37\text{년}$
위에서와 같이 장기간에 걸쳐 생기는 것을 예측할 수 있다. 따라서, 이 매립지의 조기이용을 위해서는 침하축진을 도모하는 PBD공법을 적용하는 것이 바람직하다.

4) PBD공법을 적용한 경우의 압밀도와 침하량, 압밀시간의 산정

① 부력작용이 변화하는 매립지 등에 있어서 침하량의 계산방법, 토지조성을 위한 매립토 및 성토재는 침하의 진행과 함께 지하수위(잔류수위) 아래에 위치하여 수중부분으로된 토층은 부력이 작용하기 때문에 이 부분의 하중에 대하여 부력을 조정할 필요가 생긴다. 부력조정계산을 실시하는 경우의 별도의 m_v 를 설정할 필요가 있다. 부력조정계산을 실시하는 시기는 토층의 압밀도가 상당히 진행된 시기로 되는 경우가 많다. 침하량(압밀도 100%)의 산정은 조정계산에 의하여 설정된 m_v 를 이용하고 조정하중을 이

용하는 것으로 하여 다음과 같이 산정한다.

a. m_v 설정용의 P' 의 산정식

$$P' = \gamma \cdot H_1/2 + \Delta P_1 \times U_1 + \{ \Delta P_1 (1-U_1) + (\Delta P_2 - \Delta P_1) - \alpha \} / 2$$

b. $\Delta S(U=100\%)$ 의 산정식

$$\Delta S = m_v(H_1 - \Delta S_1) \times \{ \Delta P_1(1 - U_1) + (\Delta P_2 - \Delta P_1) - \alpha \}$$

여기서, γ , H_1 , ΔP_1 , U_1 : 각각 부력조정계산 실시 한단계 전에 있어서 대상분할토층의 단위체적중량(4tf/m³), 층두께(m), 작용하는 전체하중(tf/m³)(부력조정계산 실시 한단계전까지의 전체하중에 대응하는 지중응력도를 취한다), 압밀도(%)(ΔP_1 에 대응하는 압밀도)이다.

α : 과압밀응력도(P_c 값을취하며, tf/m²)

ΔP_2 : 부력조정계산 실시 시점의전체하중(tf/m³)

② 제1차 상재하중(매립토)에 의한 자연퇴적토층의 침하량 산정

제1차 상재하중은 -8.00m부터 +4.50m까지의 연약이토에 의한 매립토로써, 잔류수위(+2.00m) 이하의 매립토에는 부력이 작용한다. 이 매립토는 표면수의 분리와 안정화를 위하여 12개월간의 방치기간을 둔다. 이 기간 중에는 PBD의 타설을 하지 않으며, 매립토자신의 자중 압밀침하도 없는 것으로 가정한다.

표 2. PBD를 타설하지 않은 경우의 대상토층의 압밀도와 대응일수 산정표

(a) 자연퇴적토층(-8.0m~32.0m), H=2,400cm

U (%)	T_v	(H/2) (cm)	(H/2) ² (cm ²)	$t = (H/2)^2 T_v$	$t = (H/2)^2 T_v / C_v$	ΔS (cm)
0	0	1200	1,440,000	0	0(일)	0
10	0.008	"	"	11,520	115.20	51.58
20	0.031	"	"	44,640	446.40	103.16
30	0.071	"	"	102,204	1,022.40	154.75
40	0.126	"	"	181,440	1,814.40	206.33
50	0.196	"	"	283,680	2,836.80	257.91
60	0.287	"	"	413,280	4,132.80	309.49
70	0.403	"	"	580,320	5,803.20	361.07
80	0.567	"	"	816,480	8,164.80	412.66
90	0.848	"	"	1,221,120	12,211.20	464.24
100	∞	"	"	∞	∞	515.82

(b) 매립토층(+4.50m~-8.00m), H=1,250cm

U (%)	T_v	(H/2) (cm)	(H/2) ² (cm ²)	$t = (H/2)^2 T_v$	$t = (H/2)^2 T_v / C_v$	ΔS (cm)
0	0	1250	390,625	0	0	0
10	0.008	"	"	3,125.0	41.67	32.10
20	0.031	"	"	12,109.4	161.45	64.20
30	0.071	"	"	27,734.4	369.80	96.30
40	0.126	"	"	49,218.8	563.30	128.40
50	0.196	"	"	76,953.1	1,026.00	160.50
60	0.287	"	"	112,109.4	1,494.800	192.60
70	0.403	"	"	157,421.9	2,099.00	224.70
80	0.567	"	"	221,484.4	2,953.10	256.80
90	0.848	"	"	331,250.0	4,416.70	288.90
100	∞	"	"	∞	∞	321.00

a. 작용하중의 산정

• +4.50m~+2.00m간,

$$H=2.50m, \gamma=1.30f/m^3$$

$$\Delta P_1=1.30 \times 2.50=3.25tf/m^2$$

• +2.00m~-8.00m간,

$$H=10.0m, \gamma=0.30tf/m^3$$

$$\Delta P_2=0.30 \times 10.0=3.00tf/m^2$$

• 작용하중의 합계

$$\Sigma \Delta P=3.25+3.00=6.25tf/m^2=0.625kgf/cm^2$$

b. 침하량계산을 위한 토층의 분할

제1층 -8.00m~-14.00m, $H_1=6.00m$

강 좌

제2층 -14.00m ~ -20.00m, H₂=6.00m

제3층 -20.00m ~ -26.00m, H₃=6.00m

제4층 -26.00m ~ -32.00m, H₄=6.00m

c. 각 분할토층의 중앙부에 발생하는 응력도의 산정

매립토의 하중은 등분포하중으로 하고, 각 토층내에 분산되어 이것에 대응하여 발생하는 응력도는 다음과 같이 수정 케글러(Kogglar)법을 이용하여 산정한다.

$\sigma_{z_1} = P / \{1 + (Z_1/B) \tan \beta\}$, $\beta = 55^\circ$, B = 525.0m
 여기서, σ_{z_1} , Z₁ : 각각 분할토층의 중앙부에 발생하는 응력도 및 분할토층중앙부까지의 깊이(기준면은 -8.00m), B : 하중의 작용폭, 여기서는 매립지의 단면 방향의 평균폭으로 다음과 같이 산정한다. B = (700 + 350)/2 = 525m, β : 기준설정치(수정 케글러 계수)로서 55°를 이용한다.

P : 작용하중, 여기서는 $\Sigma \Delta P = 6.25 \text{tf/m}^2$

· 제1층 Z₁ = 6.00/2 = 3.00m

$$\sigma_{z_1} = 6.25 / \{1 + (3.00/525) \tan 55^\circ\} = 0.620 \text{kgf/cm}^2$$

· 제2층 Z₂ = 6.00/2 + 6.00 = 9.00m

$$\sigma_{z_2} = 6.25 / \{1 + (9.00/525) \tan 55^\circ\} = 0.610 \text{kgf/cm}^2$$

· 제3층 Z₃ = 6.00/2 + 6.00 × 2 = 15.00m

$$\sigma_{z_3} = 6.25 / \{1 + (15.00/525) \tan 55^\circ\} = 0.601 \text{kgf/cm}^2$$

· 제4층 Z₄ = 6.00/2 + 6.00 × 3 = 21.00m

$$\sigma_{z_4} = 6.25 / \{1 + (21.00/525) \tan 55^\circ\} = 0.591 \text{kgf/cm}^2$$

d. 계산에 이용하는 m_v값의 산정

분할토층의 중앙부에 작용하는 하중강도(P')와 대응하는 m_v의 산정은 다음식에 의한다.

$$P'_i = \gamma'_i \cdot H_i/2 + \gamma'_{i-n} \cdot H_{i-n} + \Delta P/2,$$

ΔP 는 σ_{z_i} 로 한다.

$$m_{v_i} = 1.08 \cdot P'_i^{-1.02}$$

· 제1층

$$P'_1 = 0.44 \times 6.00/2 + 6.20/2 =$$

$$4.42 \text{tf/m}^2 = 0.442 \text{kgf/cm}^2$$

$$m_{v_1} = 0.18 \times (0.442)^{-1.02} = 0.414 \text{cm}^2/\text{kgf}$$

· 제2층

$$P'_2 = 0.44 \times 6.00/2 + 0.44 \times 6.00 + 6.101/2 = 7.011 \text{tf/m}^2$$

$$= 0.701 \text{kgf/cm}^2$$

$$m_{v_2} = 0.18 \times (0.701)^{-1.02} = 0.259 \text{cm}^2/\text{kgf}$$

· 제3층

$$P'_3 = 0.44 \times 6.00 + 0.44 \times (6.00 + 6.00) + 6.005/2 = 9.603 \text{tf/m}^2 = 0.9603 \text{kgf/cm}^2$$

$$m_{v_3} = 0.18 \times (0.9603)^{-1.02} = 0.188 \text{cm}^2/\text{kgf}$$

· 제4층

$$P'_4 = 0.44 \times 6.00/2 + 0.44 \times 6.00 \times 3 + 5.912/2 = 12.196 \text{tf/m}^2 = 1.220 \text{kgf/cm}^2$$

$$m_{v_4} = 0.18 \times (1.220)^{-1.02} = 0.147 \text{cm}^2/\text{kgf}$$

e. 최종침하량의 산정

분할토층에 대한 침하량은 다음식과 같이 산정한다.

$$\Delta S_i = m_{v_i} \times H_i \times \Delta P \times U,$$

$$\Delta P = \sigma_{z_i}$$

$$\cdot \text{제1층 } \Delta S_1 = 0.414 \times 600 \times 0.620 = 154.00 \text{cm}$$

$$\cdot \text{제2층 } \Delta S_2 = 0.259 \times 600 \times 0.610 = 94.79 \text{cm}$$

$$\cdot \text{제3층 } \Delta S_3 = 0.188 \times 600 \times 0.601 = 67.79 \text{cm}$$

$$\cdot \text{제4층 } \Delta S_4 = 0.147 \times 600 \times 0.591 = 52.13 \text{cm}$$

· 침하량(U = 100%)의 합계

$$\Sigma \Delta S = 154.00 + 94.79 + 67.79 + 52.13 = 368.71 \text{cm}$$

f. 재하일수와 압밀도와 침하량과의 관계

재하중(매립토)은 +4.5m까지 매립종료후 12개월간(360일) 방치하고, 이 기간에 일어나는 압밀도를 구하면 다음과 같다.

$$t = (h/2)^2 \cdot \{T_v/c_v\},$$

$$H = 2400/2 \text{ (상하양면배수)}$$

$$c_v = 100 \text{ cm}^2/\text{日 (설정조건)}$$

$$(H/2)^2 = (2400/2)^2 = (1200)^2$$

$$= 1,440,000 \text{ cm}^2$$

$$360 = 1,440,000 \times T_v / 100 = 14,400 \cdot T_h$$

$$T_h = 360 / 14,400 = 0.025$$

표 1.에서 $T_h = 0.025$ 에 대응하는 U를 구하면
 $U \approx 0.055 \approx 5\%$
 따라서, t=360일째의 침하량은,
 $\Delta S = 368.71 \times 0.05 = 18.44 \text{ cm} = 0.184 \text{ m}$ 가 된다

g. 매립후 360일째의 각 지반면의 높이와 잔존 토층 두께

매립 지표면의 높이는 +4.5m에서부터 18.44cm 침하해서 +4.32가 된다.

자연 퇴적 지반 면의 높이 -8.00m 에서부터 18.44cm 침하해서 -8.18m가 된다.

잔존 토층 두께

$$H = 24.00 - 0.184 = 23.816 = 23.82 \text{ m}$$

③ 제2차 재하중(피복토와 샌드매트) 및 3차 재하중에 의한 침하량의 산정

제2차 재하중은 매립면상(+4.32m)에 부설한 피복성토와 샌드매트하중을 대상으로 하고, 자연퇴적 토층과 매립토층으로 나누어서 침하량을 계산한다. 따라서 자연퇴적 토층에 작용한 하중은 매립토층, 피복성토, 샌드매트하중의 3종류로 하고, 매립토층에 작용하는 하중은 피복성토와 샌드매트하중의 2종류로 한다. 이때 1차 재하에 따른 지반두께 변화, 강도증가등을 고려할 필요가 있다. 3차 재하중도 반복으로 계산하면 되나 지면관계상 생략한다.

4. 시공

4.1 PBD의 품질

4.1.1 PBD재의 선정

PBD의 선정기준은 다음에 따른다.

① PBD제품에 있어서 전체의 인장강도는 ASTM D 4595시험규정에 의하여 산정하고 그 값은 $F_t \geq 0.5 \text{ kN} (51 \text{ kgf/단위폭})$ 로 한다.

② PBD재의 신도는 2~10%의 범위로 한다.

③ PBD의 수리적 특성

- 필터의 투수계수 : $k > 1 \times 10^{-3} \text{ cm/sec}$
- PBD의 통수능력시험은 Delft법에 의하는 것이 합리적이며, 측압을 가하는 경우 압력전달이 지중의 현상과 유사하도록 배수재 주위에 고무 멤브레인으로 밀봉하고 PBD재와 멤브레인 사이에 점토 등으로 채우는 것을 원칙으로 하며, 3.5 kgf/cm^2 의 측압하에 1주일 후의 통수능력이 직립조건(straight) 및 25% 변형조건(25% free bending)인 경우 Q_w 가 각각 $25 \text{ cm}^3/\text{sec}$, $10 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 이상을 유지하는 제품을 선정한다.

④ $O_{90} < 100 \mu\text{m}$

⑤ 외관 및 일반 사항

PBD재는 코어(Core)와 필터가 분리된 포켓형(Pocket Type)이 유리하다.

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.

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. 현장보관 장소는 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.

4.2 각 공정별 작업내용

4.2.1 준비공

육상공사인 경우에 시공측량, 시공기계의 검토와 수배, 성토재, 매트재 및 PBD재 등을 수배한다. 또

한 PBD 타설 작업을 위한 정지작업을 수행하며 PBD재의 적절한 타설에 도움이 되고 배수매트가 설계된 대로 기능을 발휘하는데 필요한 평평도를 유지할 필요가 있다.

일반적으로 사면이 2~5% 경사일 때도 PBD타설이 힘든 경우가 있다. 대부분의 PBD재 타설장비는 5% 경사면 이상에서는 100% 제거능을 발휘하지 못한다. 따라서 표면 평평도를 2%이하로 유지하는 것을 원칙으로 한다.

4.2.2 저면 매트(Mat) 부설(Working mat)

연약지반위에 부설하는 저면 매트는 연약지반상태와 상재하중에 견딜 수 있는 적합한 인장력을 가지는 것을 사용하여야 하며 매트끼리 겹침을 완전하게 하여 국부응기가 발생되지 않아야 하며, 자재 선정 및 부설시 다음 항목에 유의하여야 한다.

- ① 적합한 인장력을 가진 매트를 선정한다.
- ② 교란 방지를 위하여 인력으로 부설한다.
- ③ 매트끼리 연결을 완벽하게 하여 중기주행등에 의한 찢어짐이 발생하지 않아야 한다.

4.2.3 샌드 매트공

샌드매트공은 양호한 트래피카빌리티를 확보할 수 있으며, 지반내에서 PBD를 통해서 배출되는 간극수를 지체없이 배제할 수 있는 두께를 가져야 한다.

샌드매트 재료(한국도로공사, 1997을 참고하고 필요 부분을 수정함)의 품질기준은 다음과 같다.

- ① D15 : 0.075~0.9mm
- ② D85 : 0.4~8.0mm
- ③ No. 200체(0.075mm) 통과량 : 가능한 3%이하가 되게 하고, 15% 이하인 경우에는 사용 가능 하나 이때에는 적정 간격을 검토한 후 5~20m간격으로 간극수를 충분히 배출시킬 수 있는 단면의 격자형 배수구를 설치하는 것이 바람직하다.
- ④ 투수계수 : 1.0×10^{-3} cm/sec 이상

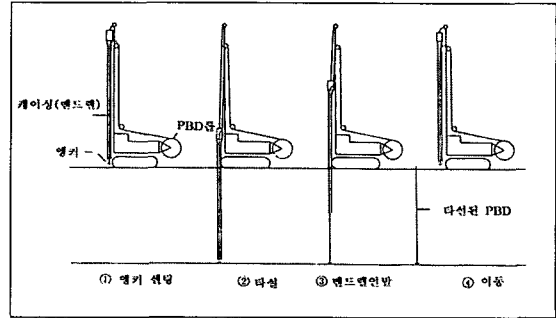


그림 9. PBD의 타설 순서

4.2.4 타설공

PBD의 타설시 멘드렐 관입에 따른 교란과 중기주행에 따른 지표면 교란이 발생하므로 이 영향을 최소화하는 조치가 필요하다. 또한, 초연약지반이거나 지표면교란이 심하여 연화된 경우 PBD 타설시 타설장비가 전도하는 안전사고가 발생할 우려가 있으므로 이점에 유의할 필요가 있으며, PBD가 타설중에 손상을 입지 않게 하고, 정확한 간격으로 소정의 깊이까지 타설이 되게 하는 것이 중요하다. 그림 9에는 PBD 타설 순서를 나타낸다.

PBD를 타설할 경우 멘드렐(케이싱, Mandrel)을 이용하는 방법과 PBD 자체만 타설하는 나타입의 2종류가 있으나, 타설시 PBD 표면 손상을 방지하고 연직으로 정확하게 타설하기 위해서는 멘드렐을 이용하는 타설법이 유리하다. 멘드렐 단면적은 작아질수록 지반교란영역(smear zone)을 줄일 수 있으므로 크게 유리하다. 따라서, 현장 여건이 허락하는 한 멘드렐의 단면적을 75cm²이하로 하는 것이 바람직할 것으로 판단된다. 또한, PBD의 타입방법은 정적(압입식) 또는 동적(타격식·진동식)으로 멘드렐을 이용하여 압밀대상토에 타설하나 가능한 정적으로 타입하여 스미어 존을 줄일 수 있도록 노력하여야 한다.

대형 프로젝트의 경우는 정적, 동적 양 방법 모두 장단점을 내포하므로 시험 시공을 실시하여 서로 다른 타입방법의 효과를 검토할 필요가 있다.

타입장비 무게는 기초지반의 지지력, 샌드매트의

두께 등을 고려하여 타설장비의 총 무게를 제한시켜야 한다. 그러나, 대심도의 PBD 타설 등 일정 중량 이상을 요구하는 경우는 접지압을 줄일 수 있도록 케도의 폭 및 길이를 크게 조정하거나, 매립토층의 두께증가, 표층고화처리법 등을 시공성, 경제성 및 안정성등을 고려하여 종합적으로 비교 검토한 후에 시공하여야 한다.

< PBD 타설 순서는 일반적으로 다음과 같다.>

- ① 앵커플레이트 부착
- ② 멘드렐 관입
- ③ 자동계측기에 의해 소정의 심도에 PBD가 타설된 것 확인후 멘드렐인발
- ④ PBD상단에 30cm의 여유를 두고 PBD절단
- ⑤ 타설장비이동

< PBD 타설시 다음과 같은 사항에 유의해야 한다.>

- ① PBD 타설시 지반의 교란을 적게 유발하위하여 정적(압입식) 멘드렐 방식의 타입기로 시공하는 것이 유리하다.
- ② 표층이 견고하거나 매립층에 호박돌 등이 혼재하여 PBD타입이 곤란한 경우는 오거보링을 실시한 후 타입하는 것이 유리하다.
- ③ PBD 시공상태를 확인할 수 있도록 시공전에 타입 위치도를 작성 하고 변조가 불가능한타입 자동 기록기를 장치하여 구역호별로 타입일시, 타입깊이 타입량을 기록지에 기록하여 감독관의 확인을 받아서 제출하여야 한다.

4.3 현장계측

4.3.1 계측항목 및 유의사항

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

① 지표면침하 측정

- 성토후 침하판을 연결할 때 침하판의 위치가 이동되지 않도록 한다.
- 침하판 설치시 바다 고르기를 하여 침하판이 기울지 않도록 해야 한다.

- 침하판이 외부의 영향으로 인하여 파손되지 않도록 보호 파이프를 설치하고 주변 작업시 각별히 주의하여야 한다.

- 침하판의 크기는 $A \times B \times t = 90\text{cm} \times 90\text{cm} \times 1\text{cm}$ 이상의 규격의 강재로 제작하고, 이중관 로드(rod)를 사용한다.

② 지중층별 침하측정

- 측정 앵커(anchor)가 정해진 위치에 설치될 수 있도록 한다.
- 설치된 앵커가 주변 지반과 함께 거동할 수 있도록 주위에 그라우팅을 한다.

③ 지중 수평변위측정

- 파이프(pipe) 설치시 소켓(socket)부분의 방수처리를 확실히 한다.
- 소켓에 의한 접속부가 손상되지 않도록 NX규격이상의 시추기로 보링한다.
- 부력에 의해 파이프의 삽입이 어려울 경우 파이프내에 깨끗한 물로 채운 다음 파이프를 설치하고 그라우팅후 물을 빼낸다.
- 파이프 삽입시 측정하고자하는 방향에 유의하여 설치한다.
- 파이프 삽입 완료 후 지반과 함께 거동할 수 있도록 시멘트, 벤토나이트 등의 그라우트재로 충분히 그라우팅한다.
- 본 측정은 상대변위를 측정하는 것이므로 초기치 관리에 유의한다.

④ 간극수압 측정

- 출력케이블(cable)은 가능한 구불구불하게 하여 빼내서 향후 지반반변위에 따른 케이블의 단선을 방지하여야한다. 또한, 케이블의 접속부위는 방수처리를 확실히 한다.
- 보오링공 내의 되메움은 모래와 점토질을 사용하되 공극을 최대한 줄인다.
- 수압계에 필터를 설치할 때는 증류수 속에 담귀 30분 이상 경과후 설치하여 공기유입을 배제하고 초기측정치들 기록해 놓는다.

현장계측요원은 설계도면, 시방서와 추가 사항들

에 완전히 익숙해 있어야 한다. 즉, 현장계측 요원은 계측준비와 토질계측장비, 성도위치, 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 문제성 여부도 숙지하여야 한다. 설계자의 의도대로 PBD재를 타설하며, 계측하는 동안 현장계측관리는 연약지반처리 설계시 복잡한 자연현상(토질 및 토질특성 등)을 대상으로 단순화시켜 시행되었으므로 설계시 예측된 사항을 확인하고 그 결과를 피드백(feed back)시켜 현장관리를 위한 자료로 이용하여야 한다.

계측항목으로서는

- a. 침 하 : 지표면 침하판, 층별 침하계
- b. 수평변위 : 경사계
- c. 압 밀 도 : 간극수압계
- d. 정 수 위 : 지하수위계 등이 있다.

2) 계측빈도

계측빈도는 공사진행 상황이나 측정체계(수동 또는 자동)에 따라 다르다. 자동으로 측정하는 경우는 측정빈도가 그다지 문제가 되지 않지만 수동측정으로 현장을 관리할 때는 현장 경험이 많은 전문기술자를 상주시켜서 1일 1회의 빈도로 측정함을 원칙으로 하며 성토후 장시간이 경과하여 변위가 적을 경우라도 최소한 주 2회의 측정을 실시해야 한다.

4.4 시공관리

4.4.1 PBD 시공시 유의사항

- ① 본격적인 PBD를 타설하기 전에 시추조사 및 시험 타설을 실시하여 당초 설계시 추정하였던 설계내용과 상이할 경우에는 감독원의 승인을 얻은 후 추가 지질조사를 실시하여 타설지점, 심도, 간격 등을 검토하여 실시한다.
- ② 시공은 작성된 시공관리 기준과 조사된 지층상태를 비교 검토하면서 PBD 타입 장비 운전원에게 충분히 교육시킨 후 수행하여야 한다.

- ③ PBD를 타설하기 전에 감리자의 지시에 따라 기준점을 설치하고 이를 기준으로 타설간격에 맞도록 타설위치를 확인할 수 있게한다.
- ④ PBD 장비는 샌드매트를 포설한 후 지반의 안전성을 검토하여 안전한 작업이 가능한 것으로 판단될 때에 타입장비를 진입시켜야 한다.
- ⑤ 연약지반의 교란방지와 안전사고 방지를 위하여 접지압 5.0tf/m² 이하인 장비를 사용 한다.
- ⑥ PBD 타입깊이 및 공수의 변조가 불가능하도록 타입깊이가 숫자로 작업 즉시 기록되는 자동기록장치를 사용하여야 한다.
- ⑦ 감리자는 자동기록장치의 현장 검사 결과 실체와 10m이하의 깊이에서 1.5%이상, 10~20m 깊이에서 2.0%이상, 20m이상에서 2.5%이상의 오차가 있을 시에는 즉시 작업을 중단시키고 자동기록장치를 교체한다.
- ⑧ PBD타입은 지면에 대하여 연직으로 하여야 하며, PBD타입이 2° 이상 기울지 않도록 관리방안을 수립하고 이행하여야 한다.
- ⑨ PBD타입위치의 오차는 ±10cm이내로 하여 배수영역의 균등성을 확보하여야 한다.
- ⑩ PBD의 상부는 샌드매트의 표면에서 30cm로 되게 절단하고, 감독원의 검사 후 PBD의 상단부는 샌드매트의 중앙부에 수평으로 묻어야한다.
- ⑪ PBD타입시 지반교란의 영향을 최소화하기 위하여 앵커는 지반의 교란이 최소화될 수 있는 형상으로 하여야 한다.
- ⑫ PBD타입시 앵커링의 불량으로 인하여 연약지반개량 깊이의 2.5%이상으로 공상(空上)이 발생할 때에는 대책을 강구하여야 한다.
- ⑬ PBD 타입시공의 전 공정을 통하여 연약지반에 국부적인 집중하중의 재하, 지반의 소성유동 및 교란을 발생시키는 모든 행위를 하여서는 안된다.

참고문헌

- 1) 박영목(1997), 국내 PBD재의 배수 성능과 진공효과에 의

- 한 통수능력 향상에 관한 연구, 한국지반공학회지 제 13권 2호, pp. 39~53.
- 2) 한국도로공사(1992), 도로설계요령.
- 3) Hansbo, S.(1979), Consolidation of clay by band-shaped prefabricated drains, *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp. 21~25.
- 4) Hansbo, S.(1992), Preconsolidation of soft compressible subsoils by the use of prefabricated vertical drains, Workshop on Applied Ground Improvement Technique, Southeast Asian Geotechnical Society.
- 5) Holtz, R.D., Jamiolkowisk, M. Lancellotte, R., and Pedroni, S.(1991), Laboratory testing of prefabricated 'wick' drains, ICCECD, GEO-COAST '91, Yokohama, pp. 311~316.
- 6) Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Wolski, W.(1983), Precompression and speeding up consolidation, General Report, Special Session 6, Proc. 8th Europe Conf., Soil Mech. and Found. Engineering, Helsinki, 3, pp. 1206~1226.
- 7) Madhav, M.R., Park, Y.M., and Miura, N.(1993), Modelling and study of smear zones around band shaped drains, *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 4, pp. 135~147.
- 8) Pradhan, T.B.S., Kamon, M. and Suwa, S.(1991), Design method for the evaluation of discharge capacity of prefabricated band-shaped drains, 9th Asian Reg Conf., Bangkok, Vol. 1, pp. 523~526.
- 9) Rixner, J.J., Kraemer, S.R. and Smith, A.D. (1986), Prefabricated vertical drain, FHWA/RD-86/168, Federal Highway Administration, Washington, D.C., Vol.1.
- 10) 嘉門 雅史(1985), 플라스틱보드드옴材料的性質とその特性, 基礎工, pp. 11~16.
- 11) 及川 研, 中岡青貴, 神保 信雄, 河田壓司(1989), 關西國際空港建設におけるプラスチックボード드옴工法による地盤改良, 第24回土質工學會發表會, pp. 1903~1904.
- 12) 吉國 洋(1979), バーチカルドレーンの設計と施工管理, 技報堂出版.
- 13) 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関する 研究, 日本 佐賀大學 博士學位論文, pp. 1~235.
- 14) 佐佐木 伸(1985), 플라스틱보드드옴工法の現況と展望, 基礎工, pp. 2~10.

도서 판매 안내

- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1. '94 봄 학술발표회 논문집 / 5,000원 | 11. 강관말뚝의 설계와 시공가이드 / 5,000원 |
| 2. '94 가을 학술발표회 논문집 / 10,000원 | 12. '99 봄 학술발표회 논문집 / 15,000원 |
| 3. 지반공학시리즈 2 - 얇은 기초(구) / 5,000원 | 13. '99 지반조사(위) 학술발표회 논문집 / 5,000원 |
| 4. '94 발포 폴리스티렌(EPS) 이용 성토공법 / 10,000원 | 14. 김상규 교수 퇴임기념 심포지엄 논문집 / 10,000원 |
| 5. 한 일 합동 세미나 논문집 / 5,000원 | 15. '99 토목섬유(위) 학술발표회 논문집 / 10,000원 |
| 6. '97 가을 학술발표회 논문집 / 10,000원 | 16. '99 준설매립(위) 학술세미나 / 10,000원 |
| 7. 제11차 ARC 개최전 초청강연 논문집 :
Dr. R.H.G Parry, Prof. A.S. Bala / 10,000원 | 17. '00 연약지반(위) 학술세미나 / 10,000원 |
| 8. 단기강좌Ⅱ : Ground Improvement Using
Prefabricated Vertical Drains / 10,000원 | |
| 9. '98 가을 학술발표회 논문집 / 15,000원 | |
| 10. '98 토목섬유(위) 학술발표회 논문집 / 10,000원 | |

** 무료로 드립니다. **

● 지반공학 관련업체 소개서

● '98가을학술발표회Ⅱ

※ 우편 발송시 우송료는 별도 부담입니다.