

# 준설매립지의 압밀축진과 투기량 증대를 위한 지하수위 저하공법과 PDF공법의 적용

김재영\*1, 김동현\*2, 소충섭\*3, 오세준\*4, 大島昭彦\*5

## 1. 머리말

선박지나 항로, 수중구조물의 건설 등 항만토목공사에 있어서 준설은 빼놓을 수 없는 중요한 역할을 하고 있다. 또한 준설과 매립은 해양·항만토목분야가 연계된 공사로써 다뤄지는 경우가 많으며, 항만공사의 근본이라고도 할 수 있다. 또한 준설은 목적대상이 되는 공사나 그 용도가 다양하며, 선박지나 항로를 위한 준설의 경우는 매립을 위한 토사채취, 환경대체를 위한 오폐수처리준설 등이 있다. 신규 준설뿐만 아니라 기존 시설물의 확장이나 심도증가를 위한 개랑준설, 수심유지를 위한 유지준설, 방파제 등 수중구조물을 구축시 기초의 바닥정비도 준설의 중요한 역할이라고 할 수 있다.

최근 국내의 경우는 항만의 대형화에 따른 확장, 항로·선박지의 정비나 유지를 위한 준설이 활발하게 이루어지고 있다. 그러나 환경보전의 측면이 중요시되면서 해상매립을 규제함에 따라 처분지의 부족이 문제화 되고 있는 실정이다. 따라서 매립지 조

성 중에 있는 준설점토를 압밀축진시켜 침하시킬 수 있다면, 기존 처분지의 수명을 연장시킬 수 있으므로 유용하게 활용이 가능하다. 이에 Osaka Port 북부에서 재하중을 사용하지 않고 지하수위 저하공법과 PDF공법(Plastic board Drain by Floating system)을 병행하여 매립지 조성중에 압밀침하를 촉진시킨 시험시공사례를 간략하게 소개하고, 김재영·大島에 의한 압밀해석결과와의 비교를 통해 적용성을 확인하고자 한다. 아울러 PDF공법은 초연약지반위에 Floater를 띄워 PBD를 직접 타설하는 공법으로, 매립직후나 매립도중에 연직드레인을 직접 타설할 수 있으므로 전체 매립공사 공기를 단축시킬 수 있으며, 투기 준설토량을 경제적으로 증대시킬수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 압밀축진공법의 원리

Osaka City South Port에서 과거 적용해 온 지하수위 저하공법의 원리를 그림 1에 나타냈다. 우선, 해저 축적점토위에 Sand Mat를 포설한 후, SD(Sand Drain)을 타설하고, 그 위에 배수용 배수정을 설치하였다. 이후 준설점토를 투입하면서 배수정을 이동시켜 Sand Mat의 수위를 저하시켰다. 이

\*1 정회원, 공학박사, (주)삼보기술단 지반사업부 과장  
(geokimjy@korea.com)

\*2 정회원, 공학박사, (주)삼보기술단 이사

\*3 정회원, (주)삼보기술단 전무

\*4 정회원, (주)삼보기술단 부사장

\*5 비회원, 大阪市立大学 工学部 助教授



과정을 통해 준설점토의 자중과 수위저하에 의한 유효응력이 증가되어 충전점토층이 압밀되는 것이다 (그림 1 참조). 그러나 준설점토는 배수거리가 길기 때문에 이 단계에서의 압밀은 그다지 진행되지 않는다. 따라서 기존의 공법에서는 상기와 같은 방법을 제1기로 공사한 후 준설점토위에 모래층을 포설하고, 준설점토내에 PBD(Plastic Board Drain)를 타설한 이후 성토 시공을 하였다. 이후 수위저하에 의해 준설점토층을 압밀시키는 제2기 공사를 수행하였다. 이 때, 양수를 정지시키고 수위를 원상태로 복원시키면 점토지반은 과압밀상태가 된다.

상술한 압밀촉진공법의 원리를 그림 2에 나타냈다. 준설점토를 배출하면서 배수정을 이동시켜서 Sand Mat의 수위를 낮춰 충전점토층을 압밀시키는 과정은 과거의 지하수위 저하공법과 동일하다. 소정의 층후까지 준설점토의 투입이 종료된 시점에서 준설점토 표층수면에 부유선을 띄워, 준설점토내에 PBD를 타설한다. 이 부유선은 Trafficability를 확보할 수 없는 표층수면에서도 타설이 가능한 장비를 사용하였다(이와 같은 공법을 PDF공법이라고 한다). 다음으로는 배수정을 이동시켜 Sand Mat의 수위를 저하시키면 PBD에 의해 배수거리가 짧아지

게 되므로 상재하중이 없이도 준설점토의 압밀촉진이 가능하게 된다.

### 3. Yumeshima 시험시공 개요

일본 大阪市の 夢島(Yumeshima) 제2공구에서 본 공법의 유효성을 확인하기 위한 시험시공으로 1999년 2월부터 PBD가 시공되었다. 현장의 평면도와 단면개요를 그림 3에 나타냈다. 호안은 표고 DL+15m정도이며, 1999년 3월의 지반조사결과 준설점토는 DL-15.4m~DL+8.5m에 있으며, 층후는 23.9m였다. PBD에 의한 개량범위는 60m×60m(면적 3,600m<sup>2</sup>)이며, 삼각형 배치의 간격 1.3m로, 총 2,484개가 타설되었다. PBD타설 후 즉시 배수정을 이동시키면서 Sand Mat의 수위를 저하시키면서 1999년 3월 10일부터는 그림 3(1)에 나타낸 위치에서 침하량(T-2, T-4는 미개량 지역의 침하량)과 간극수압을 측정하였다. 간극수압의 계측결과로부터, 배수정에 의한 수위저하는 10.5m(DL±0m)로 나타났으며, 침하량은 계측 중 거의 일정하게 나타났다.

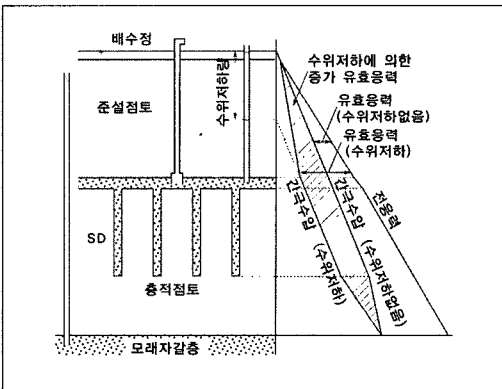


그림 1. 기존 지하수위 저하공법의 원리

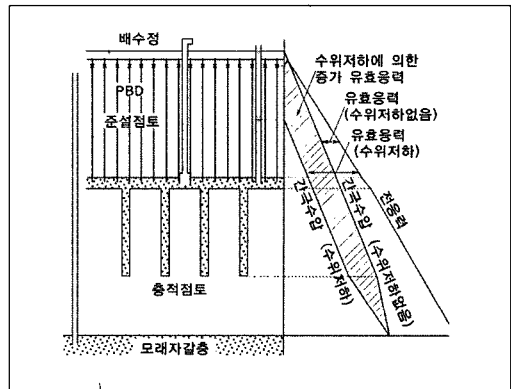
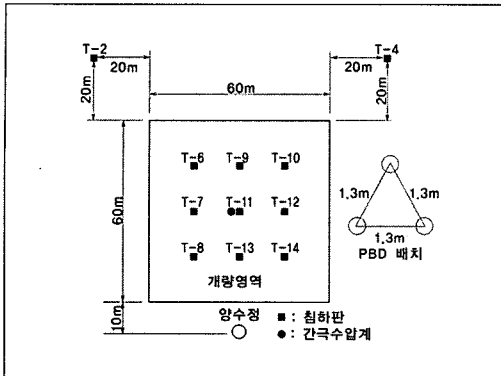
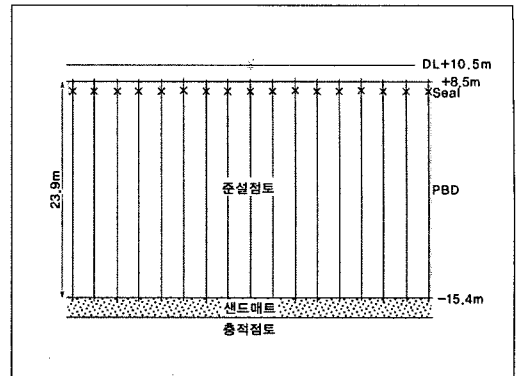


그림 2. 지하수위 저하공법과 PDF공법의 원리



(1) 평면개요



(2) 단면개요

그림 3. 시험시공현장의 평면과 단면개요

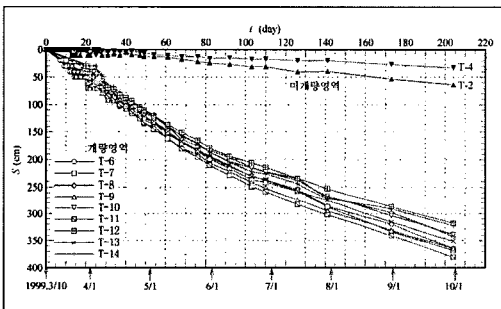


그림 4. 실측 시간-침하량 관계

그림 4에 현장에서 실측한 1999년 3월 10일~9월 30일까지의 약 204일간에 걸친 시간-침하량관계를 나타냈다(측점위치는 그림 3(1) 참조). 204일간에 미개량지역의 침하량이 50cm 정도로 나타나는 것에 비해, 개량지역은 평균 350cm의 침하량이 발생하고 있으며, 개량효과가 확실하게 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었다. 개량지역의 침하량이 넓은 범위로 나타나고 있는 이유는 측점위치에 따른 영향으로 사료된다. 그 이유는 개량지역의 중심위치 T-11측점의 침하량이 가장 큰 것에 비해 이외의 8개 측점에서는 T-11을 포함한 개량지역의 단부에 위치하고 있기 때문에 침하량이 약간 작게 나타나고 있

는 것으로 생각할 수 있다.

## 4. 압밀해석방법

### 4.1 준설택토층의 모델화

층 두께 23.9m의 준설택토층은 상부층일수록 압축성이 크고,  $c_v$ 는 작으며, 층에 따른 압밀특성이 서로 다른 불균질한 상태에 있었다. 따라서 그림 5와 같이 8층으로 이루어진 층상지반으로 모델화하였다. 각 층의 구분은 샘플링시료를 기준으로 하였으며, 층 경계는 중앙위치를 설정하였다. 또한 실측결과로부터 준설택토층의 상부수위는 DL+10.5m, Sand Mat의 수위는 DL±0m로 설정하였다.

### 4.2 준설택토층의 압밀특성

그림 6에 대표적인 층②(TW-2)의  $f=(1+e)-\log p$ ,  $f-\log c_v$ 관계를 나타냈다. 각 층 모두 동일한 방법으로 정리한 후  $f-\log p$ 관계( $p$  단위는  $tf/m^2$ ),  $c_v$ 는

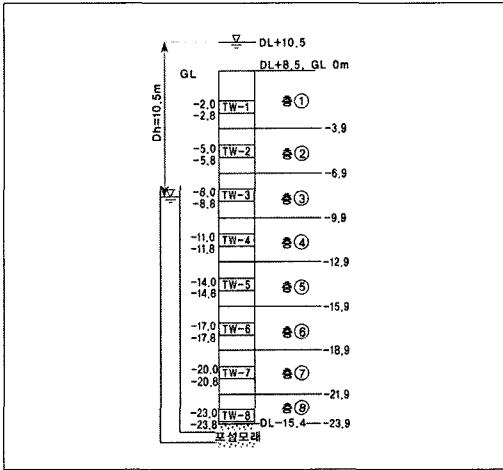


그림 5. 준설택토층의 모델링

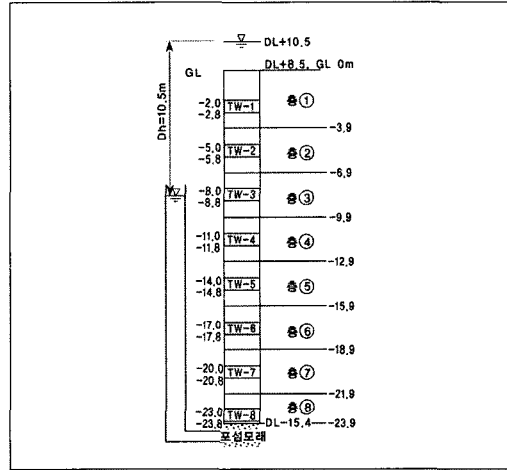


그림 6. 층②(TW-2)의 압밀특성

다음의 값을 이용하였다. 단,  $c_v$ 는 압밀중 일정한 것으로 가정하였으며, 각 층의 초기, 최종 체적비( $f_i, f_f$ )의 평균(압밀압력  $p_i, p_f$ 에 관한 평균)에 대응하는 값을 선정하였다.

- 층①(TW-1) :  $f=4.30-1.28\log p, c_v=11.4\text{cm}^2/\text{day}$
- 층②(TW-2) :  $f=4.48-1.16\log p, c_v=13.0\text{cm}^2/\text{day}$
- 층③(TW-3) :  $f=4.48-1.16\log p, c_v=15.3\text{cm}^2/\text{day}$
- 층④(TW-4) :  $f=4.16-1.18\log p, c_v=17.1\text{cm}^2/\text{day}$
- 층⑤(TW-5) :  $f=3.76-1.12\log p, c_v=28.7\text{cm}^2/\text{day}$
- 층⑥(TW-6) :  $f=2.87-0.64\log p, c_v=34.7\text{cm}^2/\text{day}$
- 층⑦(TW-7) :  $f=3.06-0.56\log p, c_v=40.8\text{cm}^2/\text{day}$
- 층⑧(TW-8) :  $f=3.38-0.71\log p, c_v=64.7\text{cm}^2/\text{day}$

### 4.3 초기조건, 하중조건과 최종침하량

그림 7에 초기함수비  $w_i$ 의 분포를 나타냈다. 그림 7에는 함수비 시험결과와 함께 압밀시험, 일축압축시험시에 측정된 값도 나타냈다.  $w_i$ 가 상부층일수록 크며, 하부층으로 갈수록 작아지는 것은 이미 자중 압밀이 진행되고 있는 것을 나타내고 있으며, 과거

Sand Mat에 의해 수위가 크게 내려간 점, 하부층일수록 압축성이 작은 점토이기 때문으로 사료된다. 그림 중에 나타낸 값과 종방향 연결 직선은 압밀계산에서 이용한 각 층  $w_i$ 의 평균값을 나타냈다. 실제  $w_i$ 는 심도방향에 대해 연속적으로 변화하지만 각 층의  $w_i$ 는 일정한 것으로 가정하였다.

점토층내의 응력분포를 그림 8에 나타냈다. 점토층내의 PBD를 Sand Mat층까지 타설하였으며, GL-2m부근에서 PBD를 Seal하였기 때문에 하부면의 수위를 저하시키면 큰 응력증가를 기대할 수 있었다. 본래는 하부면의 수위 GL-8.5m보다 상부 점토층에는 부압도 기대할 수 있지만, 상부면은 대기압에 개방되어 있는 점과 기포가 발생할 가능성이 높기 때문에, 수압은 0으로 설정하였다.

상기  $f=(1+e)-\log p$ 관계식으로부터 구한 전 층의 총 침하량은 751cm로 산출되었으며, 그림 8에는 준설택토층내의 응력분포를 나타내었다. 그림 8에 나타낸 최종압밀압력에는 점토자중응력에 하부면 수위저하에 의한 응력증가분을 가산하였다.

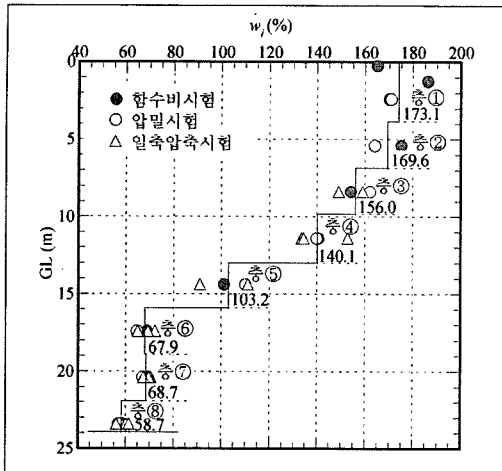


그림 7. 초기함수비  $w_i$  분포

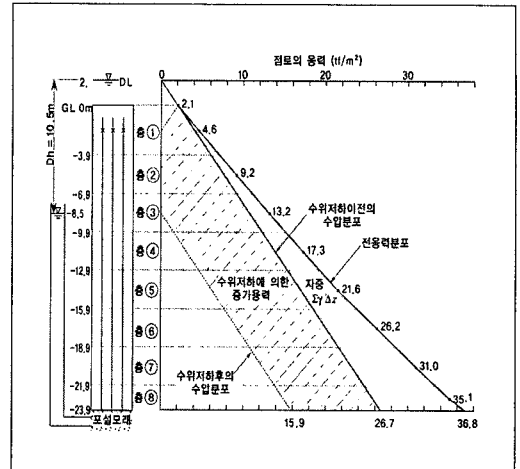


그림 8. 준설점토층내의 응력분포

#### 4.4 PBD개랑지반의 압밀해석방법

PBD에 의한 수평배수 압밀과정을 각 층 별의 압밀특성과 Barron의 식을 사용하였다. PBD의 배치는 타설간격  $d=1.3m$ 의 정삼각형 배치이며, 등가유효원의 직경  $d_e$ 와 압밀도  $U$ 는 다음과 같은 방법으로 산출하였다.

$$d_e = 1.05 \cdot d = 1.365m \quad (1)$$

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

$$n = \frac{d_e}{d_w}, \quad T_h = \frac{c_h}{d_e^2} t$$

으로 나타낼 수 있으며,  $T_h$ 는 시간계수,  $c_h$ 는 수평방향 압밀계수,  $t$ 는 실시시간이다.

$$\text{따라서, } n = \frac{1.365}{0.05} = 27.3, \quad F(27.3) = \frac{27.3^2}{27.3^2-1}$$

$$\ln(27.3) - \frac{3 \times 27.3^2 - 1}{4 \times 27.3^2} = 2.561$$

$$\therefore = 1 - \exp\left(\frac{-8}{2.561} \times \frac{c_h}{1.365^2} t\right)$$

$$= 1 - \exp(-1.667 \times c_h \times t)$$

#### 4.5 실측값과 해석값의 비교

그림 9에는 현장에서 실측된 시간-침하곡선을 각 층의 침하량을 전부 가산하여 전 층의 계산침하곡선으로 나타냈다. 계산값은 실측값의 평균 또는 이보다 약간 큰 쪽에 일치하고 있으며, 계산값은 실측값을 잘 재현하고 있다. 또한 T-11측점은 개랑영역의 중심위치에 있으며, 이 외의 8측점은 T-11을 포함하는 개랑영역의 단부에 위치하고 있다. 이 영향으로 인해 T-11측점의 침하량이 가장 크게 나타나고 있다(침하량이 작은 T-12측점과 비교했을 때 약 60cm의 차이를 나타냄). 그러나 T-11측점의 침하량이 PBD에 의한 개랑을 가장 잘 나타내고 있는 것으로 판단되기 때문에 계산값이 실측값보다 약간 크게 일치하고 있는 점으로부터 계산값의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

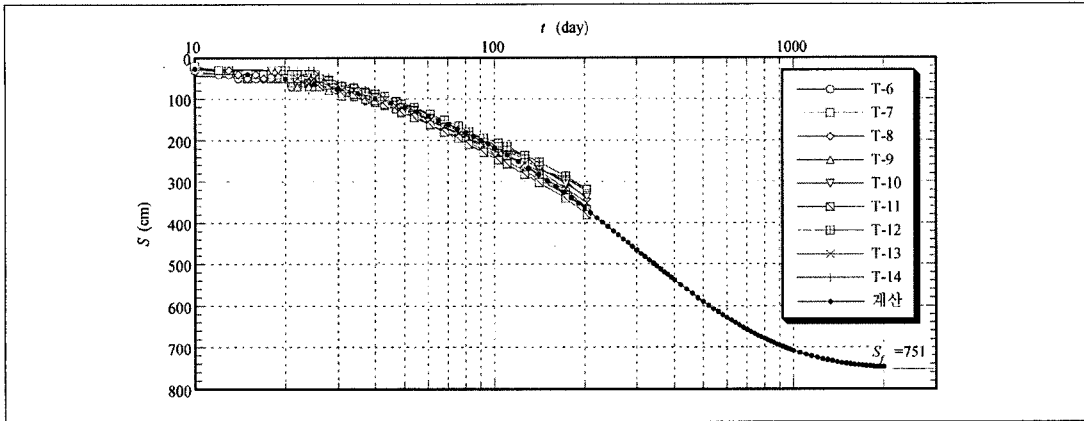


그림 9. 실측한 침하곡선과 계산침하곡선의 비교

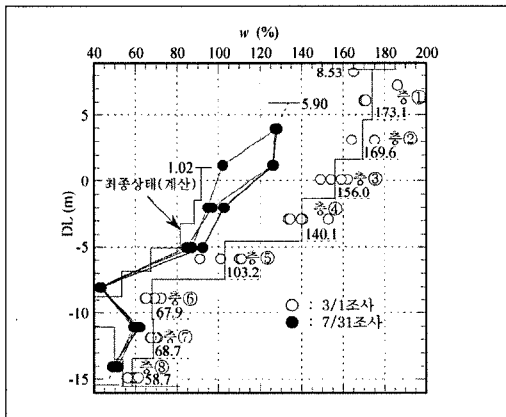


그림 10. 3/1과 7/31 조사시 함수비분포 비교

또한 시험시공 현장에서는 7월 31일에 추가 지반 조사를 실시하였으며(이 지점의 침하량은 2.6m), PBD의 중간지점에서 함수비를 측정하였다. 그림 10에 3월 1일과 7월 31일에 조사한 함수비분포를 비교하였다. 7월 31일 조사한 함수비는 3월 1일 조사결과에 비해 심도방향으로 크게 감소되어 있는 것을 알 수 있다. 그림에는 계산에 의한 최종 함수비분포도 나타내었으며, 7월 31일 조사한 함수비는 3월 1일 조사결과와 최종함수비분포의 사이에 있기 때

문에 압밀이 진행되고 있는 것을 확인할 수 있었다.

아울러 PBD에 의한 압밀은 수평방향으로 진행하기 때문에 PBD에 대한 조사위치에 함수비분포가 의존하는 점에 주의할 필요가 있다.

## 5. 맺음말

매립지 조성중에 있는 준설점토를 압밀축진시켜 조기 침하량이 증가됨에 따라, 전체 공기의 단축과 투기 준설토량의 증대가 가능한 방법으로 지하수위 저하공법과 PDF공법(Plastic board Drain by Floating system)을 병행하는 경우의 유효성을 일본 Yumeshima에서의 시험시공사례로써 소개하고, 압밀해석에 의해 적용성과 효과를 검토하였다. 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) PDF공법은 매립직후나 매립도중에 있는 초연 약점토상에서 연직드레인이 타설가능하므로 육상에서의 시공에 비해 전체 매립공기가 단축 가능할 것으로 사료된다.
- 2) Trafficability를 확보할 수 없는 표층위에서도

PBD타설이 가능하므로 압밀촉진에 따른 준설 토 처분용량을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다.

- 3) 따라서 처분지의 수명연장화를 꾀할 수 있으며, 향후 토지조성에 있어서도 침하량 저감이 가능할 것으로 판단된다.
- 4) 현장에서 실측한 시간-침하곡선은 Barron의 식에 의한 계산값이 실측값보다 약간 크게 일치하고 있는 점으로부터 계산값의 신뢰성을 확인할 수 있었다. 또한 심도별 함수비 측정을 통해 압밀진행상황을 확인하였다.
- 5) 지하수위 저하공법과 PDF공법을 병행한 압밀촉진공법을 일본 Yumeshima의 시험시공에서 얻은 실측값과 수치해석을 통해 적용성과 신뢰성을 검토하였다. 향후 실측 결과와 압밀해석에 의한 적용성을 면밀하게 검토한 후, 그 결과를 정리하여 보고하고자 한다.

## 참고문헌

1. 木山正明, 大島昭彦, 東 祥二, 田中克實(2000), 地下水位低下工法とPDF工法を併用した新しい壓密促進工法, 第35回地盤工學研究發表會, pp.1369~1470.
2. 大島, 森本, 野村, 井口(2003), 浚渫粘土の自重壓密におけるプラスチックボードドレーンの壓密促進效果, 地盤工學會, 第48回地盤工學シンポジウム, pp.441~448.
3. 大島, 藤元, 野村, 井口(2004), 浚渫粘土の自重壓密過程におけるPBDによる壓密促進效果, 日本材料學會, 第6回地盤改良シンポジウム, pp.11~16.
4. M. Kiyama, A. Oshima, S. Higashi, K. Harada(2000), The new 'Accelerated Consolidation Method' combining the dewatering and plastic-board-drain by floating system (PDF) methods, Proc. of 4th. Kansai International Geotechnical Forum, pp.221~226.

