

# Pack-Drain으로 개량된 점토지반의 거동해석

## A Behavior Analysis of Clayey Foundation Improved with Pack Drain

오 재 화\* · 남 기 현\*\* · 이 문 수\*\*\*  
Oh, Jae Hwa · Nam, Ki Heon · Lee, Moon Soo  
허 재 은\*\*\* · 김 영 남\*\*\*\*  
Heo, Jae Eun · Kim, Yeong Nam

### Summary

This paper dealt with FEM analysis of foundation improved with pack drain. The theory on pack drain was scrutinized and observed values in the field were compared with numerical results. Work site of Kwangyang container pier was selected as a case study in which measurement of settlement and pore water pressure was accurately carried out. Biot's consolidation equation was selected as governing one, coupled with modified Cam-clay model as constitutive one. Christian and Boehmer's numerical technique was adopted. Behavior of foundation with pack drain is not simple but very complicated. Discontinuity resulted from rigidity difference between adjacent materials, smear effect and complicated boundary conditions should be considered in the behavior analysis of foundation behavior.

The results of numerical analysis were influenced by smear zone. In relevant to this effect, finite element analysis was carried out using the reduced horizontal coefficient of permeability in the smear zone. The numerical results were compared with observed values in surface settlement including pore water pressure. However only lateral displacement by numerical analysis was shown since its measurement was not performed in the field. The predication of settlement to be developed later can be effectively employed for the obtimization of construction. The predication of residual settlement using the data measured in the field was made by Hoshino, Asaoka and hyperbolic method. Among them, the hyperbolic method proved best one. Settlements accorded well between nume-

\* 조선대학교 공과대학

\*\* 농어촌진흥공사 영산강사업단

\*\*\* 전남대학교 농과대학

\*\*\*\* 동원토질(주)

키워드 : FEM, 수정 Cam-clay모델, Pack-Drain,  
Smear effect, 침하, 측방변위, 간극수압

rical and observed values while pore pressure showed a slight difference. Lateral displacement showed largest values at constant distance from ground surface. The validation of foundation analysis improved with pack drain by computer program employed in this study selecting modified Cam-clay model was satisfactorily secured.

## I. 서 론

1930년대에 Vertical Drain이 Poter<sup>1)</sup>에 의하여 미국의 San-Francisco에서 시공되고 Barron (1948)<sup>2)</sup>이 축대칭 다차원 압밀이론인 Sand Drain을 해석한 이래 이 분야의 연구가 계속되었다. 또한 김<sup>2)</sup>은 압밀 Potential이론을 제안하여 Drain재료의 투수성 및 Sand Mat의 투수성을 유한하다고 가정할 경우까지 확장하여 Vertical Drain을 해석하고 있다. 우리나라에서는 1950년대 말에 이 공법이 소개되고 1969년에 처음으로 경인간 고속도로에 이용된 바 있다. 계속하여 1980년대에는 광양제철소 공장부지 조성을 위하여 Sand Drain 및 Sand Compaction Pile공법이 채택되었다.<sup>4)</sup> 그 이외에도 서남해안 근방의 연약 점성토지반 처리는 대부분이 Vertical Drain 공법에 의존하고 있는 실정이며 이에 관한 연구로서 이<sup>5,6)</sup>가 수행한 바 있다. 이들 공법과 원리는 같으나 재료에 모래와 함성섬유망을 사용하고 있는 Pack Drain이 최근에 광양콘테이너 부두조성공사를 위시하여 낙동강 하구 근방의 양산 인터체인지 공사 등에서 볼 수 있듯이 그 시공사태가 증가추세에 있다.<sup>5,8)</sup>

그러나 Pack Drain 설치지반의 변형거동은 단순하지 않으며 흙과 Drain재 사이의 인접재료간의 剛性 차이에서 오는 불연속성, Smear 영향과 복잡한 경계조건을 고려해야 한다.<sup>9,10)</sup> 그럼에도 지반내부의 환경오염 방지 및 경제성 등의 이유로 Pack Drain 공법이 주목을 받게 되었다.

이외관련, 본 고에서도 Pack Drain에 의한

지반개량공사에 있어서 설계당시부터 수치해석에 의하여 지반변형거동을 정확하게 예측하여 이들 결과를 이용, 정보화 시공에 의한 최적시공을 꾀하고자 하였다. 연구방법으로써 Biot<sup>11)</sup>의 압밀방정식에 수정 Cam-Clay 모델을<sup>12,13)</sup> 결합시키고, Christian-Boehmer의 해석기법<sup>14)</sup>을 도입한 유한요소해석을 하고, 그 결과를 현장계측치와 비교하여 해석기법의 타당성 및 실용성을 검증하고자 하였다.

이를 위하여는 모형시험 또는 현장관측자료를 이용, FEM에 의한 이론치와 관측치를 비교하여 구성식의 적용성 및 수치해석기법의 적용성의 확인이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 전남대 지반공학연구실에서 개발, 사용하고 있는 압밀해석프로그램을 이용, 정교하게 현장계측이 이루어지고 있는 광양제철소 콘테이너 부두조성공사 시험시공 현장을 선택하여 이들 토질 시험자료를 분석하고 지반거동의 수치해석결과와 현장계측치를 직접 비교하였다.

## II. 지배방정식과 구성모델

### 1. 변형해석을 위한 지배방정식<sup>6)</sup>

Pack Drain공법은 압밀현상이므로 유한요소법으로 해석이 가능하고 현상을 정교하게 설명하고 있는 Biot(1941)의 압밀이론을 지배방정식으로 택하였다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v = \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \dots\dots\dots (1)$$

Biot는 전용력으로서 평형방정식을 다음과

같이 표현했다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0 \dots\dots\dots (2) \end{aligned}$$

그리고 변형률과 변위의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{\partial U_x}{\partial x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial U_z}{\partial y} + \frac{\partial U_y}{\partial z} \\ \epsilon_y &= \frac{\partial U_y}{\partial y} \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial U_x}{\partial z} + \frac{\partial U_z}{\partial x} \\ \epsilon_z &= \frac{\partial U_z}{\partial z} \quad \gamma_{xy} = \frac{\partial U_y}{\partial x} + \frac{\partial U_x}{\partial y} \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

일반화된 Hook의 법칙은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - (\sigma_y + \sigma_z) + (2\nu - 1)\mu] \\ \epsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - (\sigma_x + \sigma_z) + (2\nu - 1)\mu] \\ \epsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - (\sigma_x + \sigma_y) + (2\nu - 1)\mu] \dots\dots (4) \end{aligned}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{\mu}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{\mu}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{\mu} \dots\dots\dots (5)$$

식 (4)와 (5)의 관계를 식 (2)와 (3)에 대입하면 변형률 적합조건을 만족하고 응력-변형률관계를 고려한 평형방정식이 구해진다.

이것을 Vector식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{1-2\nu} \text{grad } e + \mu \nabla^2 U + \text{grad } u = 0 \dots\dots (6)$$

한편 Darcy의 법칙을 고려한 연속조건식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = -\frac{k}{\gamma_w} \nabla^2 u \dots\dots\dots (7)$$

식 (6)의 발산을 취하여 다음과 같이 표현하였다.

$$\frac{2\mu(1-\nu)}{(1-2\nu)} \nabla^2 e = -\nabla^2 u \dots\dots\dots (8)$$

이를 식 (7)에 대입하면 다음 식 (9)를 유도하고, 흙의 체적변형률은 Terzaghi방정식을 만족하고 있음을 보였다.

$$\frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k}{\gamma_w} \frac{2\mu(1-\nu)}{(1-2\nu)} \nabla^2 e \dots\dots\dots (9)$$

## 2. 수정 Cam-Clay Model<sup>6)</sup>

1에서 논의한 지배방정식에 결합(Coupling)될 흙의 구성식에 관해서 기술하기로 한다.

Roscoe, Schofield(1963)등은 Rendulic, Henkel과 Drucker등의 이론적인 개념을 수용하는 한편 이를 수정하여 흙의 거동을 매우 명확하게 표현할 수 있는 구성식을 세웠다.

즉, 한계상태개념. 그리고 등방삼축시험을 토대로 하여 설립된 원형 Cam-clay model은 다음의 기본 가정사항을 갖고 있다.

- 1) 체적변형률 증분( $d\epsilon^v$ )은 일부 회복가능하고 전단변형률 증분은 회복불가능하다.
  - 2) 전단중에 소요되는 에너지는 모두 마찰로서 소비된다.
  - 3) 항복곡면은 소성 Potential면으로 된다. 즉 Associated Flow Rule이 적용된다.
- 이것을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d\epsilon_v = d\epsilon_v^p + d\epsilon_v^e, \quad d\epsilon = d\epsilon^p$$

$$p d\epsilon_v^p + p d\epsilon^p = M d\epsilon^p$$

$$d\epsilon^p / d\epsilon_v^p = -dp/dp$$

그러나 Roscoe와 Burland는 Cam-clay

model을 제안한뒤 위 가정사항외에 원형 Cam-clay model과는 소비에너지 추정에 있어서 다른 관점을 갖고 수정한 수정 Cam-clay model을 제안 하였다.

항복함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = q^2 - M^2 p_0 p + M^2 p^2 \dots\dots\dots(9)$$

여기서,

$$q = \{3/2 S_{ij} S_{ij}\}^{1/2}, \quad p = 1/3 \sigma_{ij}$$

$$J_{2D} = 1/2 S_{ij} S_{ij}$$

이 모델은 탄소성 등방재료의 성질을 갖는 연약한 점토에 대한 배수 및 비배수 거동을 설명할 수 있다. 재료의 변형거동에 있어서 과압밀된 점토와 같이 강성이 큰 토질재료의 연화변형을 거동은 표현이 불가하고 경화변형을 거동에 대해서 설명할 수 있다.

### III. Pack Drain 공법

#### 1. 개요

본 공법은 연약지반개량공법중 Vertical Drain 공법의 일종이며 Sand Drain 공법과 같은 원리로 일본의 Chiyoda 화공, 건설기술자가 중심이 되어 개발한 공법으로 Sand Drain 공법을 개량, 보완하기 위하여 1950년대 후반부터 연구가 진행되었으며 1968년 초부터 현장시험을 거쳐 본격적으로 개발되어 왔다. Sand Drain 공법은 Drain효과가 매우 우수하나 타입시 지반교란 범위가 커서 Sand Pile 형성을 확인하기 어려우며 압밀이 진행됨에 따라 Sand Pile의 심한 굴곡 및 단면의 절단현상이 발생되어 압밀완료시까지 Sand Pile의 연속성 유지가 어려운 단점을 가지고 있다.

이에 대하여 Sand Drain 공법의 단점을 보완한 것이 Pack Drain 공법이며 본 공법의 원리는 투수성이 양호한 모래를 화학합성 섬유로 된 망(Net)에 넣어 연약지반에 타입하고 재하성토 하중에 의하여 압밀배수를 진행시켜 지반을 개량하는 것이다. 그러나 12cm 직경의 Pack을 동시에 4본을 타설하므로 지반교란의 문제점은 피할 수 없는 실정이다.

Pack Drain의 설계는 Sand Drain 설계에 사용된 Barron의 압밀이론을 실용적으로 적용할 수 있으며 임해매립지, 내륙부의 저지 및 연약지반, 도로 및 택지 등 광범위한 지반 개량 등에 적용된다.

#### 2. Pack Drain 공법의 특징 및 시공 방법

Sand Drain의 압밀촉진효과는 Sand Drain의 직경과 배치간격에 의해 좌우되며, 동일한 배수 압밀효과를 기대하도록 설계된 경우 모래의 소요량에 있어서 간격이 작아서 타설 본수가 증가하여도 직경을 작게 하는 쪽이 훨씬 유리하다. Sand Drain에서 어느 한도의 직경으로는 중간부위가 잘록해 지거나 절단되기도 하여 연속적인 배수기둥을 형성하는 것은 사실상 불가능하며 현재 사용하고 있는 직경 40-50cm의 Sand Drain마저도 확실한 시공성을 인정받지 못하고 있는 경우가 종종 지적되어 왔다. 이러한 Sand Drain 공법의 단점을 보완한 것이 Pack Drain 공법으로서 다음과 같은 특징을 갖는다.

1) 강인한 합성섬유 망(Net)에 모래를 채워서 Drain재를 형성하기 때문에 직경이 작은 Sand Drain의 설계직경을 유지한 그대로 시공되므로 연속적인 배수기둥이 형성된다.

2) 타설후 Drain이 지표상으로 나오기 때문에 설계와 동일한 시공성 여부를 간단하게 판별하며 시공관리가 용이하다.

3) 직경(12cm)이 작기 때문에 본수가 종래

의 Sand Drain(직경 40cm)의 약 2배가 필요하지만 이때 4분중 하나라도 장애물을 만나면 나머지 3개도 더이상 시공이 불가능한 문제점이 있을 수 있다. 그러나 4분을 동시에 시공하므로 시공기간은 단축된다.

4) 직경이 작은 Sand Bag이 시공되기 때문에 종래의 Sand Drain과 비교할 때 모래량 사용이 적감하므로 경제적이다(직경 40cm의 Sand Drain에 비해 20-30% 소요됨).

Pack Drain 공법의 시공방법은 다음과 같다.

1) 기계를 소정의 위치에 고정하고 Casing의 밑뚜껑을 폐쇄하여 수직을 유지한 채로 바이브로 햄머의 진동력에 의해 Casing의 타입을 개시한다.

2) Casing의 타입을 마치면 미리 소정의 길이로 절단된 포대의 상단을 Hopper의 모래 투입구에 물림쇠로 고정시킨다.

3) 포대의 삽입을 마치면 바로 모래 투입구의 Shutter를 열고 Hopper에 가득찬 모래를 바이브로 햄머(Vibro Hammer)의 진동에 의하여 각 Casing에 모래를 동시에 충전한다.

4) 모래가 포대의 상단까지 충전되면 Casing의 윗 뚜껑을 닫고 Compressor에서 보내진 공기로써 Casing내의 Pack Drain을 누르면서 다시 진동을 가하여 Casing을 인발한다.

5) Casing의 인발을 마치면 Pack Drain의 형성이 완료된다. Pack Drain은 Sand Mat에 노출되기 때문에 계획대로 타설되었는지를 꼭 확인할 수 있다.

6) 완성된 Pack Drain은 Sand Mat의 중량과 과재성토의 중량에 의해 지중의 과잉공극수압을 감소시켜 압밀축진 및 지반의 강도를 증진시킨다. 이 Pack Drain을 Sand Drain 및 Paper Drain과 비교하여 나타낸 것이 Table-1이다.

**Table-1. Comparision between Sand Drain, Paper Drain and Pack Drain**

구 분	Pack Drain (직경 cm)	Sand Drain (직경 40cm)	Paper Drain (S. D직경 5cm상당)
1. 개량면적당의 시공필요본수의 비율	1.0	약 0.55	약 1.6
2. 동일 면적개량에 필요한 모래량의 비율	1.0	4.0	(Drain Board)
3. 횡력에 대한 Drain의 절단유무	거의 없음	있 음	급거나 파손의 가능성이 있음
4. 동일한 면적의 시공에 요하는 시간의 비율	1.0	약 1.3	약 1.0
5. 동일한 면적에 대한 공사비의 비율	1.0	약 1.5	약 1.0-0.7
6. 시공관리	용 이	곤 란	용 이
7. Drain 효과	양 호	완전하게 모래기둥의 시공이 가능하면 양호하지만 중간이 절단되면 효과가 없음	일반적으로 설계 계산치보다도 효과가 낮은 감이 있음.

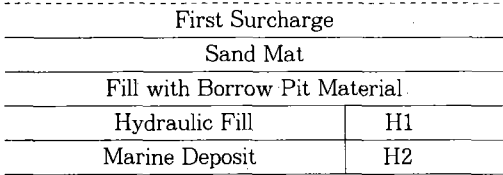
#### IV. 지반의 특성 및 해석결과

##### 1. 지반의 특성

콘테이너 부지조성 시험성토구간의 지반특성은 연약한 해성퇴적토층에 준설매립(Hydraulic Fill)을 시행하고 장비의 통행성을 확보하기 위하여 일정기간 동안 방치한 다음 산토로 복토와 Sand mat 포설후 Pack drain을 설치하였다. 지반개량의 대상토층은 Fig. 1과 같이 준설매립(Hydraulic Fill)층, 원지반 해성퇴적 점성토층은 그 특성이 균질하다.

**Table-2. Test Summary**

Zone Type	$W_n$ (%)	$G_s$	LL (%)	PI (%)	$q_u$ kg/cm <sup>2</sup>	C kg/cm <sup>2</sup>	$\theta^\circ$
I zone	56.9	2.72	65.5	92	0.1	0.08	0.0
V zone	59.5	2.69	63	94	0.26	0.16	0.0



**Fig. 1. Section of soil layer**

**2. 해석조건 및 토질상수**

광양만 콘테이너 부두 조성단지 시험성토구간의 변형 및 응력을 해석하기 위하여 각종 토질시험자료 및 재원을 요약하면 다음과 같다. 실내시험성과표는 “광양항 1단계 터미널 축조공사 계측관리보고서(1995)”를 참조하였으며 다음 Table-2로 나타났다. Table-3은 각 구간의 입도분포를 나타낸 것으로서 USCS분류법에서 알 수 있듯이 소성이 상당히 큰 고압축성 점토이다.

I 구간 및 V 구간 지반층의 대표적인 토질

**Table-3. Grain Size Distribution**

Zone Type	No.10 (%)	No.40 (%)	No.200 (%)	0.005mm (%)	USCS
I Zone	100	96	92	16	CH
V Zone	100	98	94	17	CH

**Table-4. Test Summary**

Parameters	M	$\nu$	k	$K_{x0}$	$K_{y0}$
I Zone	1.2	0.057	0.057	$1.67 \times 10^{-7}$	$4.68 \times 10^{-2}$
V Zone	1.82	0.414	0.063	$1.51 \times 10^{-2}$	$3.78 \times 10^{-2}$

상수는 Table-4와 같다.

여기서,

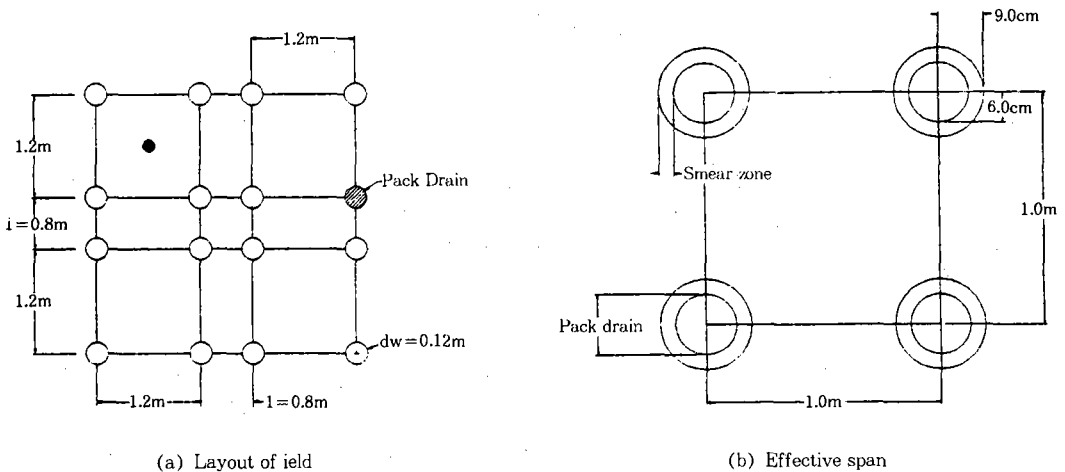
M : p-q 평면에서 한계상태선의 기울기

$\lambda$  : e-lnp 곡선상에서 정규압밀부분의 기울기

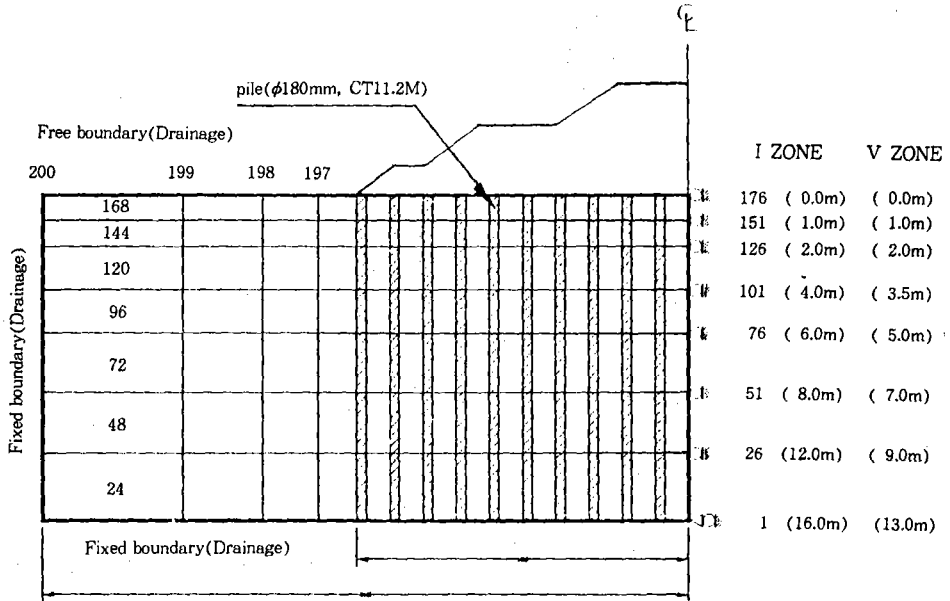
k : e-lnp 곡선상에서 팽윤선의 기울기

$K_{x0}$ ,  $K_{y0}$  : 초기 수평 및 연직방향의 투수계수

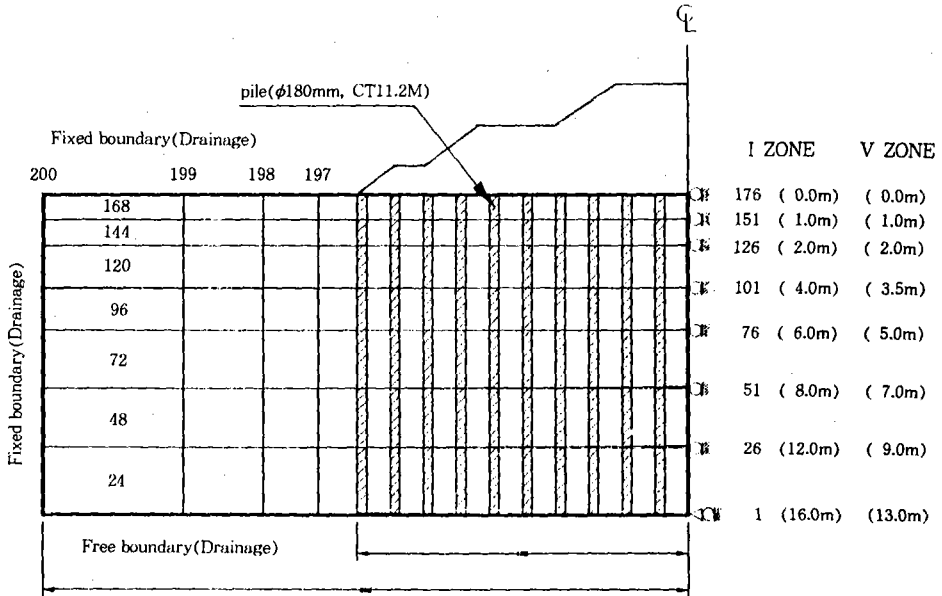
I 구간과 V 구간을 해석하기 위해 이상화한 지반의 재원 및 경계조건을 나타낸 것으로서,



**Fig. 2. Layout of pack drain and smear zone**



(a) With smear meshes used for finite element method analysis



(b) Without smear meshes used for finite element method analysis

**Fig. 3. Meshes used for finite element method analysis**

Fig. 2는 Smear영역을 고려하지 않은 경우이고 Fig. 3은 고려한 경우이다. 횡단면에 대한

요소분할은 Fig. 2, Fig. 3에서와 같이 성토중심에서 20m까지 반단면에 대하여 절점수

200, 요소수는 168로 분할하였다. 그리고 상단은 고정, 하단은 자유단으로 하였으며, 센터라인 부분은 로울러, 우측단은 한지로 하였다. 그리고 간단은 배수조건으로 고려하여 해석하였다. 유한요소해석시 미소시간 증분  $\Delta t$ 는 1일로 하였다. 두 지반에 적용된 해석모델은 점토지반에 탄소성모델(수정Cam-Clay모델)이, 그리고 모래층에 대해서는 탄성모델이 사용되었다. Pack drain은 장방향으로 설치되며 중심간의 거리는 각각 0.8m 및 1.2m이고 직경은 120mm이다. 이때 유효간격은 1.0m의 전방향으로 환산한다. Smear영역의 크기는 Pack Drain의 반경  $\gamma_w=6\text{cm}$ 와 Smear 영역까지의 반경  $\gamma_s=9\text{cm}$ 로 가정하여  $\gamma_w$ 에 대한  $\gamma_s$ 의 비  $s=1.5$ 로 Fig. 2(b) 같다. 이를 Plane Strain조건으로 환산하면 점토층의 분할폭 1.08m 마다 0.02m의 Pack Drain이 설치되며 Smear영역도 한본의 Pack Drain에 대하여 점토의 분할폭 0.97m마다 0.04m로 환산할 수 있다. 따라서 Smear영역은 Pack Drain 양면이 0.02m 간격으로 배치된다.

Table-4는 Smear 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 나타낸 것이다.

Smear 정도를 Smear 영역의 투수계수의 변화로 보고 Pack Drain의 경우 원지반의 투수계수  $K_{x0}$ 의 값을 Table-5와 같이 1/8, 1/12로 변화시켜 해석하였다.<sup>15)</sup>

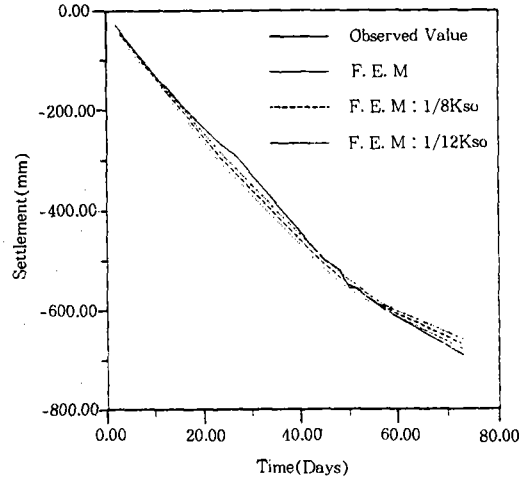
Table-5. List of K Various Cases

Zone Type	Without Smear	With Smear
I Zone	$K_{x0}=K_{s0}$	$K_{x0}=K_{s0}=K_{x0}/8$
V Zone	$K_{y0}=K_{y0}$	$K_{x0}=K_{s0}=K_{x0}/12$ $K_{y0}=K_{y0}$

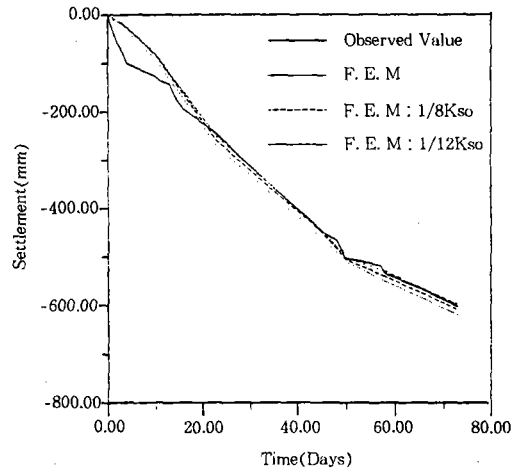
## V. 실측 및 해석결과의 고찰

### 1. 침하

침하의 수치해석결과는 Fig. 4에서 보는 바



(a) I Zone



(b) V Zone

Fig. 4. Settlement-time curve

와 같이 실측치와 매우 좋은 일치율을 보이고 있다.

이들 간의 관계를 살펴보면 해석결과가 실측치에 비해 초기에는 작게 나타나지만 점차 정도가 좋아짐을 알 수 있다. 이는 Pack Drain과 점토사이의 강성차이로 인한 두재료의 불연속성이 원인으로 분석된다. 그리고 Smear 영향을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우는 침하에 있어서는 큰 차이가 없음을 알 수 있다.



## 2. 간극수압

간극수압의 해석결과는 Fig. 5에서와 같이 실측치와 해석치간에 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 본 해석에 적용된 지반의 경우 압밀 경과시간 5일 정도의 시간차이에서 압밀지연 등의 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 이는 토질조사에서 발견되지 아니한 Sand Seam이 존재하여 이론보다 압밀이 촉진되기 때문일 것이라고 판단된다. 실제 지반의 변형거동 해

석이 Smear 영향을 받는다고 할 때 최종압밀 량에 도달하는 시간이 지연되므로 성토시기의 조정에 있어서 Smear 영향의 평가가 요구되어 진다.

## 3. 측방변위

측방변위는 Fig. 6에서 아는 바와 같이 지표면에 근접한 깊이에서는 작게 나타나며 일정한 깊이에서는 다소 크게 나타나며 깊이가 더

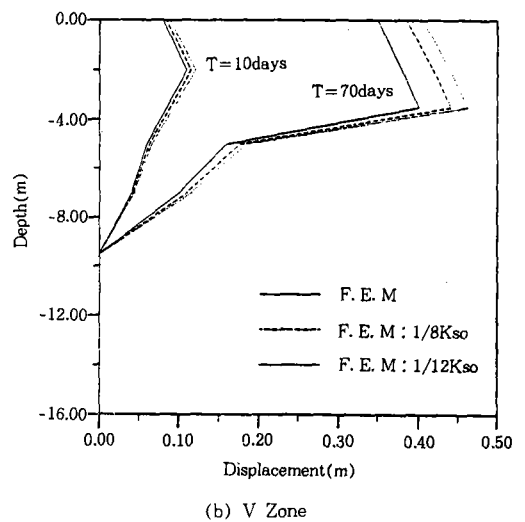
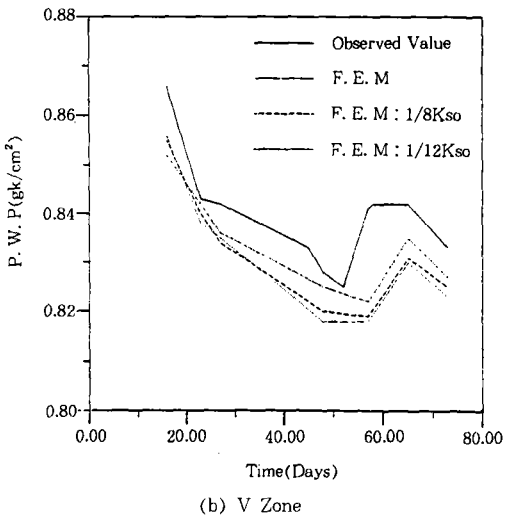
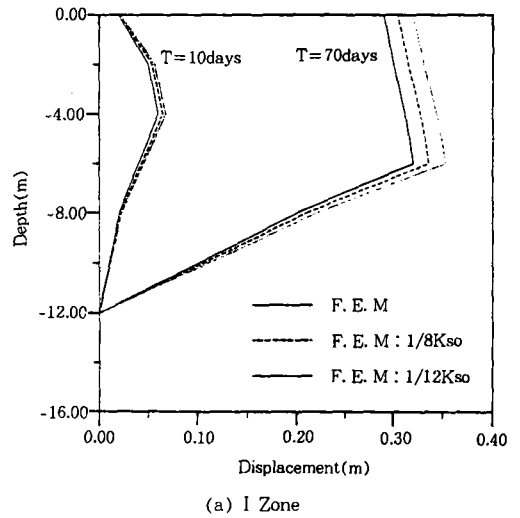
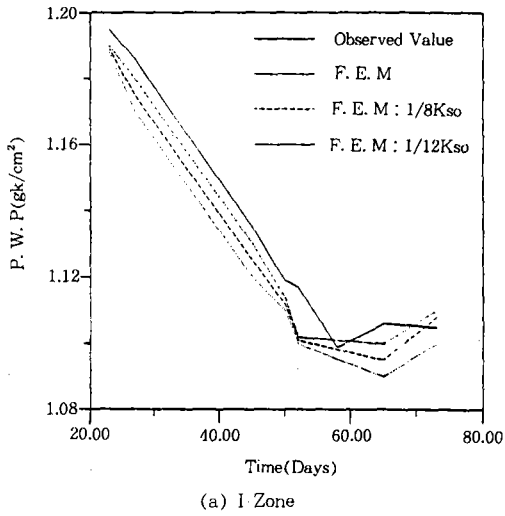


Fig. 5. Excess pore water pressure

Fig. 6. Lateral displacement

깊어짐에 따라 측방변위가 작아짐을 알 수 있다. Smear 영향을 고려한 경우는 Smear 영향을 고려하지않는 경우에 비해 약간 크게 나타나지만 깊이가 깊어짐에 따라 비슷한 경향을 나타낸다.

#### 4. 잔류압밀침하량의 추정

실측침하 계측결과로 수치해석을 실시하여

최종침하량을 추정하고자 한다. 이러한 방법이 현장토질조건 등이 고려된 추정이라 판단되어 I 구간과 V 구간에 대해 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법을 이용하여 잔류압밀침하량을 추정하였다. 이 때 이들을 이용한 계수를 각각 Fig. 7, Fig. 8 및 Fig. 9로 나타내었다.

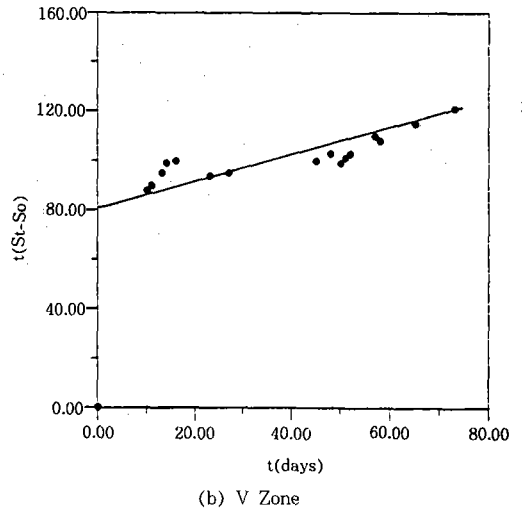
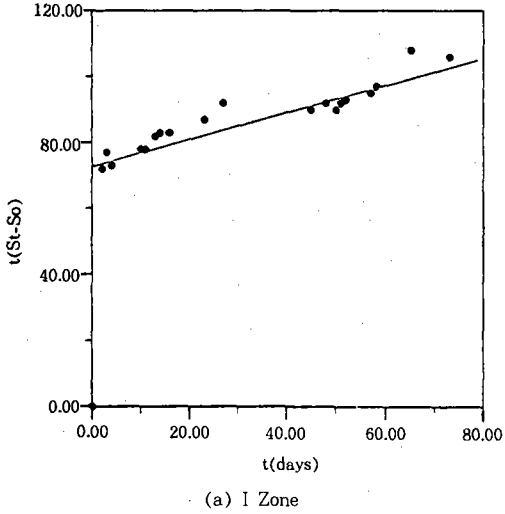


Fig. 7. Coefficients calculated by hyperbolic curve method

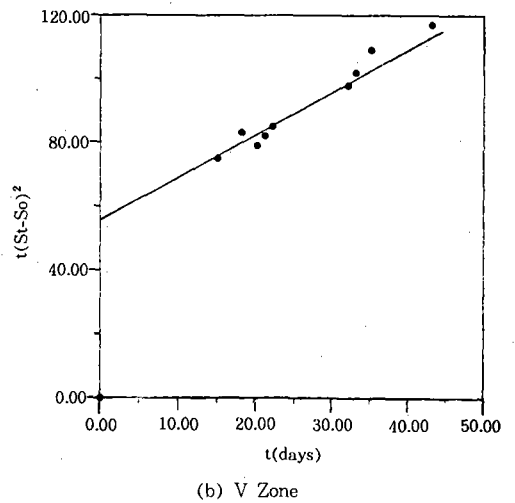
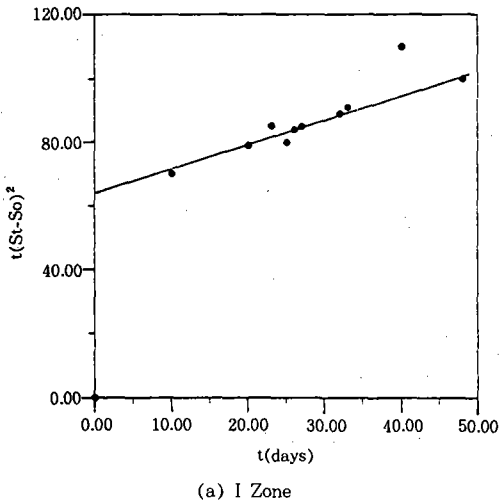


Fig. 8. Coefficient calculated by hoshino method

$$S_t = S_o + \frac{t}{\alpha + \beta t}$$

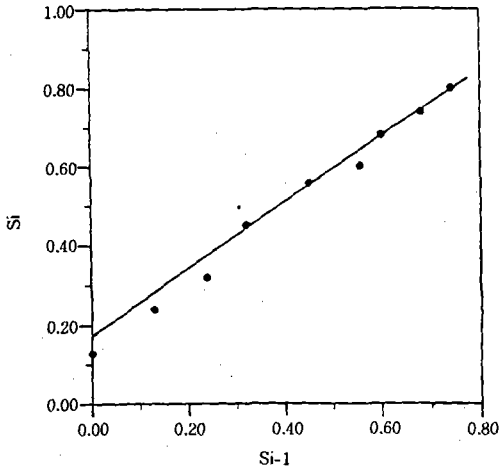
여기서,

$S_t$ : 성토종료 결과시간  $t$ 에서의 침하량

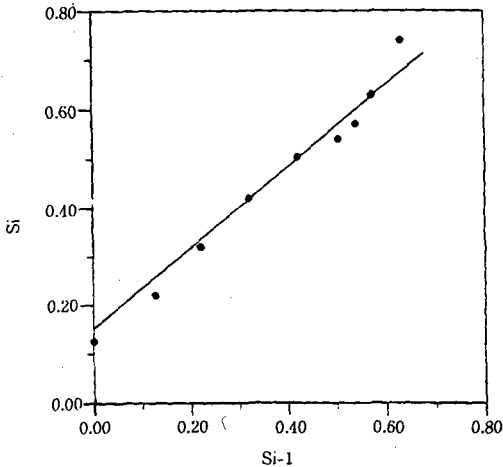
$S_o$ : 성토종료시점으로부터의 결과시간

$\alpha, \beta$ : 실측침하량값으로부터의 계수

해석결과는 Fig. 10에 나타내었으며 I Zone에서는 재하결과를 72일에 실측치 683mm,

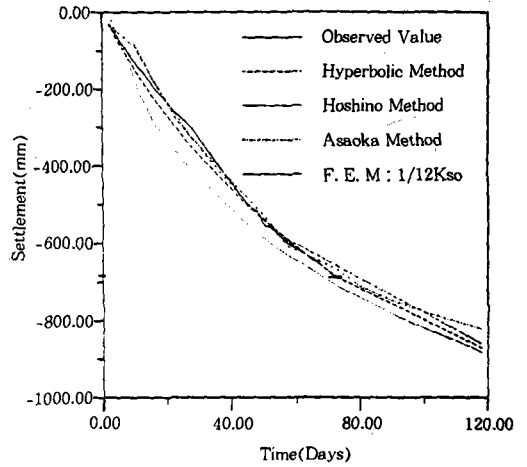


(a) I Zone

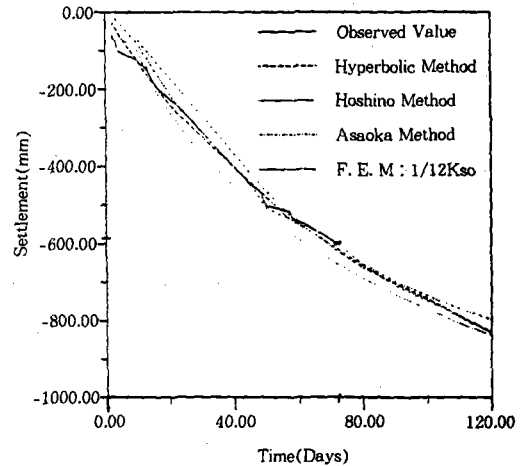


(b) V Zone

Fig. 9. Coefficient calculated by asaoka method



(a) I Zone



(b) V Zone

Fig. 10. Comparison between observed and calculated settlement

예측치는 이 값에 근사하여 870mm로 나타나며 V Zone에서는 72일 경과후 실측치가 586mm이며 최종침하량은 825mm에 이르고 있다. Hoshino법은 현장에서 전단유동변형을 포함하는 침하는 시간의 평방근에 비례한다는 기본원리에서 장래침하량을 예측하는 방법으로 침하예측의 관계식은 다음과 같다.

$$S_t = S_i + S_d = S_i + \frac{A \cdot K \cdot \sqrt{t}}{\sqrt{1 + K^2 \cdot t}}$$

여기서,

$S_t$ : 성토종료 경과시간  $t$ 에서의 침하량

$S_i$ : 성토종료 직후의 침하량

$S_d$ : 시간의 경과와 더불어 증가하는 침하량

$t$ : 성토종료 지점으로 부터의 경과시간

$A, K$ : 실측침하량 값으로부터 구한 계수

Asaoka는 1차원 압밀방정식에 의거 하중이 일정할 때의 침하량을 나타내는 간편식으로 다음과 같은 관계식을 사용한다.

$$S_t = \beta_0 + \beta_1 \cdot S_{t-1}$$

여기서,

$S_i$ : 시간  $t$ 를 이산화하여  $t_i = t * i (i=1, 2, 3, 4, \dots)$ 로 할 때 시간  $t_i$ 에서의 침하량

$S_{i-1}$ : 시간  $t_{i-1} = \Delta t * (i-1)$ 에서의 침하량

$\beta_0, \beta_1$ : 실측침하량에서 구한 계수

Table-6은 쌍곡선법, Hoshino법 및 Asaoka법을 이용하여 구한 계수를 나타낸다.

**Table-6. Calculated Coefficient by Observed Values**

Method	Hyperbolic	Hoshino	Asaoka
I Zone	$\alpha=63$	$\alpha=63$	$\beta_0=0.18$
	$\beta=0.2$	$\beta=0.17$	$\beta_1=0.15$
V Zone	$\alpha=81$	$\alpha=58$	$\beta_0=0.15$
	$\beta=0.15$	$\beta=0.3$	$\beta_1=0.6$

전술한 침하예측방법은 계획된 성토고가 완료된 임의의 시점에 대한 실측침하 Data로부터 향후에 발생 침하량을 추정하기 위해 제안된 것이다. 잔류침하량 추정에 Asaoka법은 전반적으로 침하량이 작게 나타나고, Hoshino법은 초기에 침하량이 작게 나타나지만 전반적으로 침하량이 크게 나타난다. 두 방법은 쌍곡선법에 비하여 예측정도가 낮은 경향을 보인다.

## VI. 결 론

현재 광양만 콘테이너부두 조성단지에서 진행중인 Pack Drain 성토구간을 대상으로 수치해석을 하고 그결과를 현장계측치와 비교하고, 아울러 향후에 발생할 잔류압밀침하량을 결정하기 위하여 쌍곡선법, Hoshino법, Asaoka법을 사용하여 그정도를 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 압밀침하는 실측치와 해석치 사이에 전반적으로 좋은 일치를 보이고 있어 침하예측이 가능함을 알았다. 그리고 투수계수  $K_{x0}$ 의 1/12값에서 압밀이 지연됨을 알 수 있다.<sup>15)</sup>

2) 간극수압 계측치와 해석결과에 있어서 다소 차이가 있음을 알 수 있었다. 본 해석에 적용된 지반의 경우, 압밀경과시간 5일 정도의 시간차이에서 압밀지연 등의 영향을 받고 있음을 알 수 있었다. 이는 토질조사에서 발견되지 아니한 Sand seam이 존재하여 압밀이 촉진되기 때문일 것이다.

3) 측방변위는 지표면에 근접한 깊이에서 작고 일정한 깊이(모형재하시험의 경우 최소 재하폭의 1/4배)에서는 크게 일어나지만 더 깊어짐에 따라 작아지는 경향을 나타낸다. 또한 Smear영향을 고려한 경우가 약간 크게 나타난다.

4) 잔류침하량 추정에 있어 최종침하량을 검토한 바, Asaoka법은 전반적으로 침하량이 크게 나타나고 Hoshino법은 초기에 침하량이 작게 나타나지만 전체적으로 보아 침하량이 크게 나타난다. 두 방법은 쌍곡선법에 비하여 예측정도가 낮은 경향을 보인다.

이 논문은 1994년도 조선대학교 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참 고 문 헌

1. Poter, O. J., 1936, Studies of Fill Construction over Mud Flats Including a Description of Experiential Construction Using Vertical Sand Drains to Hasten Stabilization, Proc. 1st I. C. S. M., Vol. 1, p. 229.
2. Barron, R. A., 1979, Consolidation of Fine Grained Soils by Drain Wells, Trans. A. S. C. E., Vol. 113. pp. 718~754.
3. 吉口 洋, 1979, 바-치칼드레-인工法の設計と施工管理, 技報堂.
4. 浦項綜合製鐵(株), 1988, 光陽工業團地造成에 관한 土木工學 심포지움, pp 181~206.
5. 李汶樹, 1985, 有限要素法에 의한 多次元壓密의 變形解析, 高麗大大學院 博士學位論文.
6. 李汶樹, 1992, 彈·粘塑性構成式을 사용한 粘性土地盤의 變形, 韓國農工學會誌, pp. 60~72.
7. 동신기술개발주식회사, 1995, 광양항 1단계 터미널축조(상부1차)공사 지반개량공사 계측관리분석 용역 계측관리보고서.
8. 전남대학교 공업기술연구소, 1995, 광양콘테이너부두조성공사 시험시공에 관한 분석 연구.
9. 남기현, 1995, 수정 Cam-Clay 모델에 의한 Pack-Drain 지반의 거동해석, 전남대학교 대학원 석사학위 논문.
10. 이문수, 남기현, 김영남, 오재화, 1995, 점토지반의 Pack-Drain 거동해석, 1995년 한국농공학회 학술 발표회 논문집, 한국농공학회, 95-10, pp. 231~235.
11. Biot, M. A., 1941, General Theory of Three-dimensional Consolidation, J. of Applied Physics, Vol. 12, pp. 155~164.
12. Roscoe, K. M., Schofield, A. N. and Wroth, C. P., 1965, On the Yielding of Soils, Geotechnique, Vol 8, No. 1, March., pp. 22~53.
13. Schofield, A. N., and Wroth, C. P., 1968, Critical State Soil Mechanics, Mcgraw-Hill Book Co. Ltd, London.
14. Christian, J. T. & J. W. Boehmer., 1970, Plane strain consolidation by finite elements. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. ASCE. No. 96. SM4. July. pp. 1435~1457.
15. 이문수. 박병기. 정진섭., 연약지반변형해석을 위한 다목적 프로그램 개발, 한국지반공학회 학술발표 논문집. pp. 362~375.