

판상 연직배수재의 유효 등가경 결정 방법에 관한 연구

Study on the Method of Determining Equivalent Circle of Band-shaped Prefabricated Vertical Drains

유 승 경¹ You, Seung-Kyong

小田 和廣² Oda, Kazuhiro

Abstract

In the design of ground improvement using band-shaped prefabricated vertical drains (PVD), it is required to determine a reasonable equivalent circle of PVDs. In this paper, a series of numerical analyses on soft clay ground improved by PVD were carried out in order to investigate the reasonable equivalent circle of PVD considering consolidation behavior of improved soft clay ground by PVD. The applicability of numerical analyses, in which an elasto-viscoplastic three-dimensional consolidation finite element method was applied, could be confirmed comparing with consolidation behavior simulated at the laboratory. And, through the results of the numerical analyses, consolidation behaviors of soft clay ground with elapsed time were elucidated, together with the equivalent circle of PVD considering consolidation behaviors.

요 지

판상의 연직배수재를 이용한 연약지반개량공법에 대한 설계를 보다 정확하게 수행하기 위해서는 판상 배수재의 유효 등가경 결정이 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 연약지반의 압밀거동을 고려한 합리적인 판상 배수재의 유효 등가경 결정방법에 대한 고찰을 위하여 일련의 수치해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용한 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석 방법은 동일한 조건의 실내모형실험 결과와의 비교를 통하여 검증하였다. 또한, 수치해석 결과로부터 판상 연직배수재로 개량된 연약지반의 압밀거동을 재현하였으며, 이를 반영한 판상 연직배수재의 유효 등가경을 산정하였다.

Keywords : Consolidation, Equivalent circle, Numerical analysis, PVD method, Soft clay

1. 서 론

연약점토지반에 대한 압밀축진공법으로써 모래말뚝과 같은 원형의 배수재를 적용한 경우와 마찬가지로 판상의 연직배수재(PVD) 공법을 적용한 경우에도 실무에서는 압밀축진효과를 예측하는데 Barron의 이론해를 일반적으로 사용하고 있다. 그러나 PVD공법의 경우 시공 실적이나 연구 성과가 비교적 충분히 축적되어 있지 않기 때문에 Barron의 이론해에 대한 적용성에는 아직 규명되지 않은 점들이 다수 존재한다. 특히, PVD공법

에 의한 연약지반의 압밀축진효과를 Barron의 이론해를 이용하여 보다 정확히 예측하기 위해서는 PVD에 의한 판상의 배수경계면을 적절한 원형의 배수경계면으로 환산 즉, 판상배수재의 적절한 유효 등가경 결정이 중요하다고 할 수 있다. 참고문헌에 의하면 다수의 연구자들이 유효 등가경의 결정방법에 대한 연구를 진행해 오고 있다. Hansbo(1981)는 FEM 해석결과에 근거하여 판상드레인의 등가경은 드레인 둘레길이와 같은 원주를 갖는 원의 직경과 같다는 제안을 하였고, Sotoura 등(1993)은 소정의 압밀도에 도달하기까지 필요한 시간은

1 정회원, 명지전문대학 토목과 부교수 (Member, Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Myongji College, yousk@mjc.ac.kr, 교신저자)

2 오사카대학 사회기반공학과 부교수 (Associate Prof., Dept. of Civil Engrg., Osaka Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

배수거리의 제공에 비례한다는 가정을 근거로 도해적인 방법으로부터 드레인의 폭과 유효 등가경의 비선형 관계식을 유도하였다. 또한 일본의 해상프라스틱드레인(MPD)공법 연구회(1998)와 Pradhan 등(1996)은 모형실험 및 실내요소시험의 결과로부터 Hansbo가 제안한 유효 등가경을 평가하였다. 그러나 이러한 유효 등가경의 결정 방법들을 이용한 실무 사례들을 살펴보면 PVD에 의한 연약지반의 압밀촉진효과를 적절히 평가하고 있다고 생각하기 힘들다.

본 연구에서는 판상의 PVD공법의 합리적인 설계법 확립의 일환으로, 일련의 수치해석을 통하여 PVD의 유효 등가경 산정법에 대하여 검토하고자 한다. 우선, 필자는 PVD의 하나인 플라스틱보드드레인에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유승경, 2003)에서 일련의 실내모형실험과 그에 관한 수치해석을 실시하여 본 연구에서 사용하는 수치해석방법의 타당성을 정량적으로 검증한 바 있다. 본 논문에서는 PVD에 의한 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 Barron의 이론해를 활용한 역계산 방법을 통해 PVD의 합리적 유효 등가경 산정방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 수치해석의 개요

2.1 수치해석 방법 및 해석 모델

본 연구에서의 수치해석은 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석법(小田 등, 2000)을 적용하였다. 본 해석방법에는 리턴매핑기법(Return mapping procedure)을 적용하여 지반재료가 파괴상태에 도달한 후에도 안정적인 해석이 가능하다(Ortiz, et al, 1986). 한편, 본 해석방법의 신뢰성은 PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구를 통하여 실시한 모형실험 결과를 재현함으로써 검증한 바 있다(유승경, 2003).

그림 1은 본 연구에서 수행한 수치해석의 모델을 나타내고 있다. 수치해석영역은 배수재 주변의 간극수 흐름에 대한 대칭성을 고려하여 개량지반의 4분의 1 부분으로 결정하였고, 배수재는 배수만을 담당하고 웰레지스텐스는 무시할 수 있다고 상정하였다. 따라서 배수재와 접하는 부분을 배수조건으로 하여 배수재에 의한 배수효과를 표현하였으며 모형지반의 상면과 저면은 비배수조건으로 설정하였다. 한편 모형지반의 변위에 대

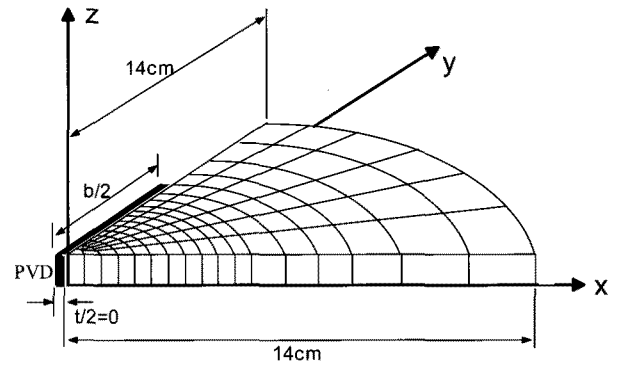


그림 1. 수치해석 모델

한 경계조건은 연직변위에 대하여 상면을 등침하 조건으로 설정하였고 그 외 경계 부분의 변위는 각각 변위에 대한 대칭성을 고려하여 각각 x, y, z방향으로 구속하였다.

2.2 연약점토지반의 탄점소성 모델화

일반적으로 고함수비의 연약점토지반은 저응력 상태이며 이차압밀을 포함하는 비교적 압축성이 큰 복잡한 거동을 나타내리라 생각된다. 따라서, 본 수치해석에서의 연약점토지반의 역학거동은 Matsui-Abe(1986)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현하였다. 본 구성식에서는 시간에 의존하지 않는 탄소성변형과 시간의존 특성을 갖는 점성변형특성을 구분하여 표현함으로써 점성토의 시간 의존적 변형특성을 고려하고 있다. 즉, 소성 체적 변형률과 점성 체적 변형률의 합으로 얻어지는 점소성 체적 변형률을 산정하여, 이것을 변형률 경화 파라미터로 이용한다. 본 모델의 유동곡면(f)은 식 (1)에 의해 표현된다.

$$f = \mu \ln \left| \frac{1}{\delta} \left[\left\{ 1 - \exp \left(- \frac{\delta \dot{\nu}_r^v}{\mu} t \right) \right\} \exp \left(\frac{\nu^p}{\mu} \right) + \delta \exp \left(- \frac{\delta \dot{\nu}_r^v}{\mu} t \right) \right] \right| \quad (1)$$

| - $\nu^p = 0$ }

여기서, ν^p , μ , $\dot{\nu}_r^v$, δ 및 t 는 각각 점소성체적변형률, 이차압밀계수, 기준점성체적변형률속도, 내부구속변형률 및 시간을 나타내고 있다. 또한, ν^p 는 소성체적변형률이고 식 (2)와 (3)에 의해 정의된다.

$$(주동측) \quad \eta \geq \eta_{\kappa}$$

$$\nu^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{yo}} \right) + \left(\frac{\alpha_a}{\alpha_a - 1} \right) \ln \left(\frac{M_a + (\alpha_a - 1)\eta}{M_a + (\alpha_a - 1)\eta_{\kappa}} \right) \right] \quad (2)$$

표 1. 점토의 역학 파라미터

Parameters		Value
Compression index	λ	0.410
Swelling index	κ	0.035
Stress ratio at critical state	M^*	1.150
Stress ratio at K_o state	η_{k_o}	0.710
Poisson ratio	ν	0.341
Coefficient of secondary compression (1/min)	μ	2.2×10^{-3}
Reference viscous volumetric (1/min)	$\dot{\nu}_r^v$	2.2×10^{-7}
Internal confining strain	δ	0.001

표 2. 수치해석 조건

배수재 폭 b(mm)	재하압력증분(kPa)			
	29.4	58.8	88.2	117.6
20	W-02-03	W-02-06	W-02-09	W-02-12
30	W-03-03	W-03-06	W-03-09	W-03-12
40	W-04-03	W-04-06	W-04-09	W-04-12
50	W-05-03	W-05-06	W-05-09	W-05-12
70	W-07-03	W-07-06	W-07-09	W-07-12
100	W-10-03	W-10-06	W-10-09	W-10-12
150	W-15-03	W-15-06	W-15-09	W-15-12

* 초기연직응력 9.8kPa

(수동측) $\eta \leq \eta_{K_o}$

$$\nu^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{yo}} \right) + \left(\frac{\alpha_p}{1 - \alpha_p} \right) \ln \left(\frac{M_p + (\alpha_p - 1)\eta_{K_o}}{M_p + (\alpha_p - 1)\eta} \right) \right] \quad (3)$$

여기서 λ , κ , e 및 η 는 각각 압축지수, 팽창지수, 간극비 및 응력비를 나타내고 있으며, 첨자의 K_o 는 K_o 상태에 대한 값을 나타내고 있다. 한편, M 및 α 는 각각 한계상태에 대한 응력비 및 소성증분비 파라메타이며 또한 첨자의 a 및 p 는 각각 주동상태 및 수동상태의 값을 나타내고 있다. 수치해석에 사용한 점토의 역학 파라미터는 표 1에 나타난 바와 같이 PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유 승경, 2003)에서 설명한 값을 적용하였다.

2.3 수치해석 조건

표 2는 본 연구에서의 수치해석 조건을 나타내고 있다. 수치해석에서는 배수재의 폭을 20mm에서 150mm까지 변화시켰으며, 모델지반에 적용되는 재하압력증분은 29.4kPa에서 117.6kPa까지 변화시켰다.

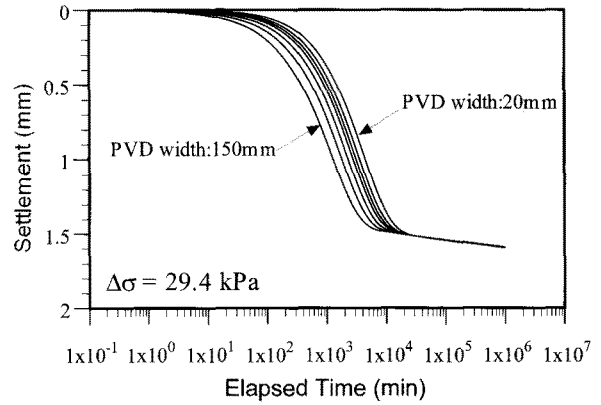


그림 2. 배수재의 폭에 따른 압밀 침하 거동

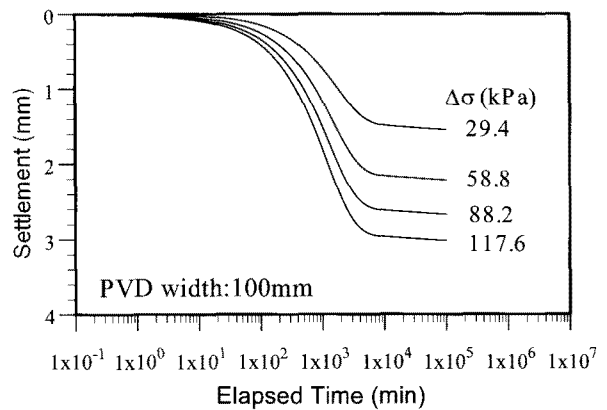


그림 3. 재하압력 증분에 따른 압밀 침하 거동

3. 수치해석 결과

3.1 모델지반의 압밀 침하 거동

그림 2와 3은 각각 배수재의 폭과 재하압력증분에 따른 모형지반의 침하량의 변화를 나타내고 있다. 그림 2로부터 배수재의 폭이 넓은 경우일수록 압밀침하의 속도는 빠르게 나타나고 있지만 모든 경우의 최종 침하량은 동일함을 알 수 있다. 또한 그림 3으로부터 재하압력증분이 클수록 모형지반의 침하량은 크고 일차압밀이 종료되는 시간이 짧음을 알 수 있다.

3.2 모델지반의 과잉간극수압 소산 거동

그림 4와 5는 각각 배수재의 폭과 재하압력증분에 따른 모형지반의 평균 과잉간극수압의 소산 거동의 변화를 나타내고 있다. 그림 4로부터 모형지반에 대한 재하 직후에는 재하압력증분과 거의 같은 과잉간극수압이

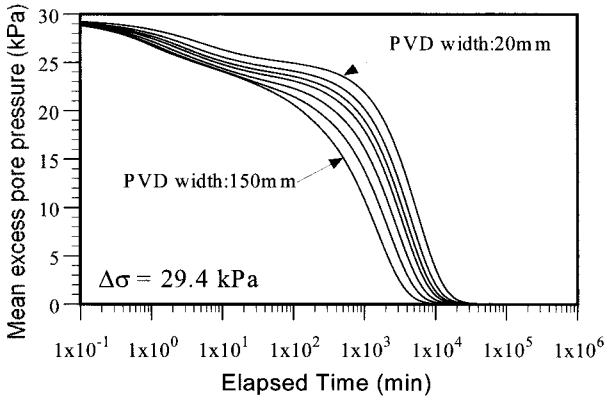


그림 4. 배수재의 폭에 따른 과잉간극수압의 소산

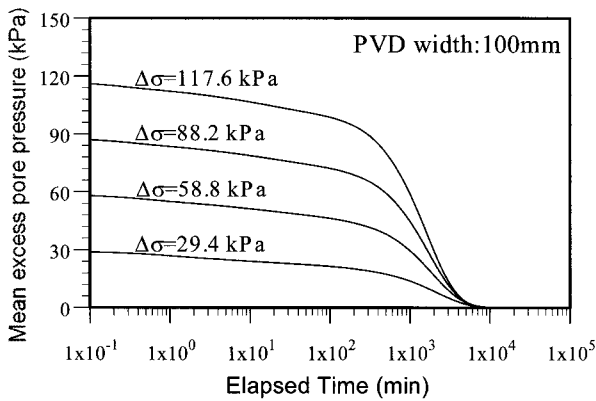


그림 5. 재하압력 증분에 따른 과잉간극수압의 소산

발생하고 있으나 배수재의 폭이 넓은 경우일수록 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5로부터 재하압력증분이 클수록 모형지반의 과잉간극수압은 빠르게 소산됨을 알 수 있다.

4. 압밀거동을 반영한 유효 등가경 산정

4.1 유효등가경 산정 방법

판상 배수재를 이용한 연직배수공법에 의한 연약점토지반의 압밀촉진효과를 Barron의 이론해를 이용하여 보다 정확히 예측하기 위해서는 배수재의 적절한 유효 등가경 결정이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 판상 배수재에 의한 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 다음과 같이 Barron의 이론해를 활용한 역계산 방법을 통해 판상 배수재의 유효 등가경을 산정하였다.

(1) 판상 배수재에 의한 연약지반의 압밀거동에 대한 수

치해석 결과로부터 소정의 압밀도 U 에 상응하는 압밀시간 t 를 결정한다.

(2) 압밀시간 t 를 식 (4)에 대입하여 시간계수 T_h 를 결정한다.

$$T_h = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{t}{d_e^2} \quad (4)$$

여기서, k 는 투수계수, m_v 는 체적압축계수, d_e 는 유효집수원의 직경

(3) 식 (5)에 압밀도 U 와 시간계수 T_h 를 대입하여 $F(n)$ 을 결정한다.

$$F(n) = \frac{\ln(1-U)}{-8T_h} \quad (5)$$

(4) 식 (6)을 이용하여 n 값을 수치 해석적 방법으로 결정한다.

$$\frac{n^2}{n^2-1} \ln n - \frac{3n^2-1}{4n^2} - F(n) = 0 \quad (6)$$

(5) 결정된 n 값을 식 (7)에 대입하여 유효등가경 d_w 를 결정한다.

$$d_w = \frac{d_e}{n} \quad (7)$$

4.2 압밀 진행에 따른 유효등가경의 변화

그림 6은 판상 배수재의 폭이 30mm인 경우에 대하여 상기의 과정으로 계산한 배수재의 유효 등가경과 압밀도의 관계를 나타내고 있다. 압밀 초기에는 재하압력증분이 작을수록 유효 등가경이 크게 나타나고 있으나 모든 경우에 대해서 압밀 진행에 따라 유효 등가경이 감소하고 있으며 압밀도 약 50%를 지나면서 재하압력증분의 크기에 관계없이 유효 등가경은 일정한 값에 수렴되고 있음을 알 수 있다.

5. 유효 등가경의 평가

그림 7은 배수재의 폭과 본 연구에서 계산한 유효 등가경의 관계를 나타내고 있다. 그림에서의 유효 등가경은 그림 6에서 압밀도 80%일 경우의 값을 선택하였다. 한편 그림에는 기존의 유효 등가경 산정법에 의한 유효 등가경과 배수재 폭의 관계를 함께 도시하였다. 계산된 유효 등가경은 재하압력증분의 크기에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 또한 배수재 폭이 20mm에서 40mm의 범위에서는 Sotoura의 산정식에 의한 관계

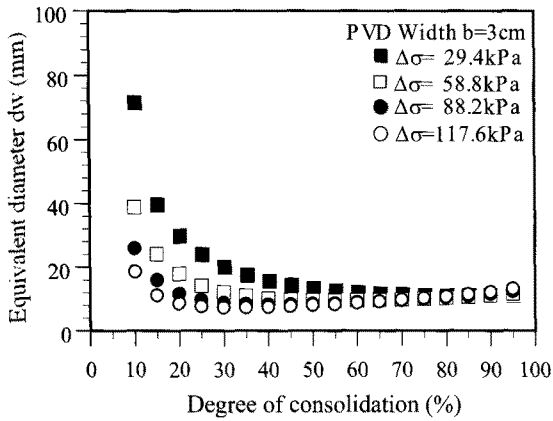


그림 6. 압밀 진행에 따른 유효 등가경의 변화

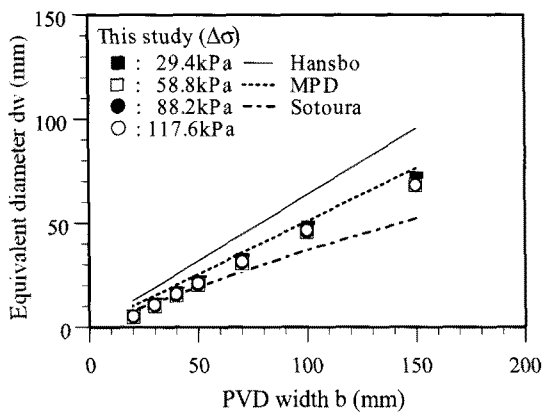


그림 7. 배수재 폭과 유효 등가경의 관계

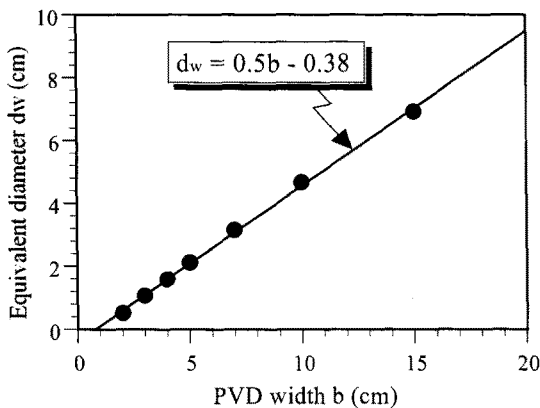


그림 8. 배수재 폭에 따른 유효 등가경의 결정

와 일치하고 있지만 50mm에서 150mm의 범위에서는 MPD연구회의 산정식에 의한 관계와 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 8은 본 연구에서 결정한 배수재 폭과 유효 등가경의 관계를 나타내고 있다. 각각의 관계들은 전술한 바와 같이 재하압력증분의 크기에 의한 영향을 받지 않으므로 그림 7의 평균적 값들로 결정하였다. 그림에서 보

는 바와 같이 배수재 폭과 유효 등가경의 관계는 거의 선형적 관계를 나타내고 있으며 이를 선형근사식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_w = \frac{1}{2}b - 0.38 \quad (8)$$

여기서, d_w 와 b 는 각각 유효 등가경(cm)과 판상 배수재의 폭(cm)을 나타낸다.

본 연구에서 수행한 수치해석 모델의 배수재의 타설 간격은 25cm이므로 이를 일반적인 실무의 시공범위인 1~2m로 생각한다면 그림 8의 배수재의 폭은 8~120cm의 범위에 해당된다. 따라서 식 (8)에 의한 관계는 배수재의 타설 간격 1~2m, 배수재의 폭 8~120cm의 경우에 적용할 수 있다고 생각할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 신뢰성을 검증한 수치해석의 결과를 이용하여 Barron의 이론해를 활용한 역계산 방법을 통해 판상 배수재의 합리적 유효 등가경 산정방법에 대하여 고찰하였다. 본 연구에 의해 얻은 결과를 다음과 같이 요약한다.

- (1) 배수재의 폭이 넓을수록 압밀침하의 속도는 빠르게 나타나지만 최종 침하량은 그 폭의 크기에 관계없이 동일하였다. 또한 재하압력증분이 클수록 모형지반의 침하량은 크고 일차압밀이 종료되는 시간은 짧게 나타났다.
- (2) 모델지반에 대한 재하 직후에는 재하압력증분과 거의 같은 과잉간극수압이 발생하지만 배수재의 폭이 넓을수록 과잉간극수압이 빠르게 소산되었으며 재하압력증분이 클수록 모델지반의 과잉간극수압은 빠르게 소산되었다.
- (3) 수치해석에 의한 모형지반의 압밀거동을 이용하여 Barron의 이론해를 활용한 역계산을 실시한 결과 압밀 초기에는 재하압력증분이 작을수록 유효 등가경이 크게 나타나고 있으나 모든 경우에 대해서 압밀 진행에 따라 유효 등가경이 감소하고 있으며 압밀도 약 50%를 지나면서 재하압력증분의 크기에 관계없이 유효 등가경은 일정한 값에 수렴하였다.
- (4) 본 연구에서 계산된 유효 등가경은 그 폭이 20mm에서 40mm의 범위에서는 Sotoura의 산정식에 의한 판

계와 일치하였고 50mm에서 150mm의 범위에서는 MPD연구회의 산정식에 의한 관계와 같은 경향을 나타내었다.

- (5) 본 연구의 결과로부터 배수재의 타설 간격 1~2m, 배수재의 폭 8~120cm의 경우에 적용할 수 있는 배수재 폭과 유효 등가경의 선형적 관계식을 제안하였다.

참 고 문 헌

1. 유승경 (2003), PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구, *대한토목학회 논문집*, 제23권 제6C호, pp.399-406.
2. 유승경, 홍원표, 윤길림 (2003), 실내모형실험에 의한 Plastic Board Drain이 적용된 연약지반의 압밀거동에 관한 연구, *한국지반환경 공학회 논문집*, 제4권 제4호, pp.17-23.
3. 小田和廣, 松井 保, 柳 承庚(2000) : PDを含む軟弱粘土地盤の壓密舉動と壓密度に關する解析的考察, *日本土木學會第55回年次學術*

講演會論文集, III-B197.

4. 外裏雅一, プラタンテ"-ジ, 今井五郎(1993), プラスチックボ"-ドドレ"-ンの等價徑の算定法, *土木學會第48回年次學術講演會*, pp.566-567.
5. 마린プラスチック드레"-ん工法研究會(1998), 마린プラスチック드레"-ん工法, *室内・現場實驗報告書*.
6. Barron, R.A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions, *American Society of Civil Engineers*, Vol.113, pp.718-742.
7. Hansbo, S. (1981), Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains. Paper 12/22, *Proceedings of the 10th ICSMFE*, Stockholm, Sweden, Vol.3, pp.677-682.
8. Matsui, T. and Abe, N.(1986), Flow Surface Model of Viscoplasticity for Normally Consolidated Clay, *Proc. 2nd Int. Symp. Num. Models Geotech.*, Ghent, pp.157-164.
9. Ortiz, M. and Simo, J. C. (1986), "An Analysis of a New Class of Integration Algorithms for Elastoplastic Constitutive Relations", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol.23, pp. 353-366.

(접수일자 2008. 5. 16, 심사완료일 2008. 6. 24)