

PBD의 유효등가경 평가에 관한 연구

Study on Estimation of Equivalent Circle of Plastic Board Drain

유승경¹⁾, Seung-Kyong You, 이충호²⁾, Choong-Ho Lee, 윤길림³⁾, Gil-Lim Yoon, 김병탁⁴⁾, Byung-Tak Kim

¹⁾ 명지전문대학 토목과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Myongji College

²⁾ (주)알지오이엔씨 대표이사, President, R-geo Engineering & Construction Co. Ltd

³⁾ 한국해양연구원 연안항만공학본부 책임연구원, Researcher, Coastal & Harbor Engineering Division, Korea Ocean Research & Development Institute

⁴⁾ GS건설주식회사 과장, Manager, GS Engineering & Construction

SYNOPSIS : In order to design accurately plastic board drain (PBD) method, it is important to determine the equivalent circle of PBD. In this paper, a series of numerical analyses on soft ground improved by PBD were carried out, in order to investigate the reasonable equivalent circle of PBD considering consolidation behavior of improved soft ground by PBD. The applicability of numerical analyses, in which an elasto-viscoplastic three-dimensional consolidation finite element method was applied, could be confirmed comparing with results of a series of model tests on consolidation behaviors of soft ground improved by PBD. And, through the results of the numerical analyses, consolidation behaviors of soft ground during consolidation was elucidated, together with the equivalent circle of PBD considering consolidation behaviors.

Keywords : plastic board drain, equivalent circle, soft ground, numerical analysis, consolidation

1. 서 론

연약지반에 대한 압밀축진공법으로써 모래말뚝과 같은 원형의 배수재를 적용한 경우와 마찬가지로 플라스틱보드드레인(PBD)공법을 적용한 경우에도 실무에서는 압밀축진효과를 예측하는데 Barron의 이론해를 가장 일반적으로 사용하고 있다. 그러나, PBD공법의 경우 시공 실적이나 연구 성과가 비교적 충분히 축적되어 있지 않기 때문에 Barron의 이론해에 대한 적용성에는 아직 규명되지 않은 점들이 다수 존재한다. PBD공법에 의한 연약지반의 압밀축진효과를 Barron의 이론해를 이용하여 보다 정확히 예측하기 위해서는 PBD에 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 들레길리와 같은 원주를 갖는 원의 직경과 같다는 제안을 하였고, Sotoura 등(1993)은 소정의 압밀도에 도달하기까지 필요한 시간은 배수거리의 제곱에 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 결정방법들을 이용한 설계 실적들을 살펴

보면 PBD에 의한 연약지반의 압밀축진효과를 적절히 평가하고 있다고 생각하기 힘들다.

본 논문에서는 PBD공법의 합리적인 설계법 확립의 일환으로, 일련의 수치해석을 통하여 PBD의 유효 등가경 산정법에 대하여 검토하고자 한다. 우선, 필자는 PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유 승경, 2003)에서 일련의 실내모형실험과 그에 관한 수치해석을 실시하여 본 연구에서 사용하는 수치해석방법의 타당성을 정량적으로 검증한 바 있다. 본 논문에서는 PBD에 의한 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 Barron의 이론해를 활용한 역계산 방법을 통하여 PBD의 합리적 유효 등가경 산정방법에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 수치해석의 개요

수치해석에서는 탄점소성 3차원압밀 유한요소해석법(Oda 등, 2000)을 적용하였다. 그림 1은 본 연구에서 수행한 수치해석의 모델을 나타내고 있다. 수치해석영역은 PBD 주변의 간극수 흐름에 대한 대칭성을 고려하여 개량지반의 4분의 1부분으로 결정하였고, PBD는 배수만을 담당하고 웰레지스턴스는 무시할 수 있다고 상정하였다. 따라서 PBD와 접하는 부분을 배수조건으로 하여 PBD에 의한 배수효과를 표현하였으며 모형지반의 상면과 저면은 비배수조건으로 설정하였다. 한편 모형지반의 변위에 대한 경계조건은 연직변위에 대하여 상면을 등침하 조건으로 설정하였고 그 외 경계 부분의 변위는 각각 변위에 대한 대칭성을 고려하여 각각 x, y, z방향으로 구속하였다. 한편, 점토지반에 대한 역학모델은 Matsui-Abe(1986)에 의하여 제안된 탄점소성 구성모델에 의해 표현 하였으며, 수치해석에 사용한 점토의 역학 파라미터는 PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구(유 승경, 2003)에서 설명한 값을 적용하였다(표 1). 표 2는 본 수치해석의 실험조건을 나타내고 있다. 수치해석은 PBD의 폭을 20mm에서 150mm까지 변화시켰고 재하압력증분은 29.4kPa에서 117.6kPa까지 변화시켰다.

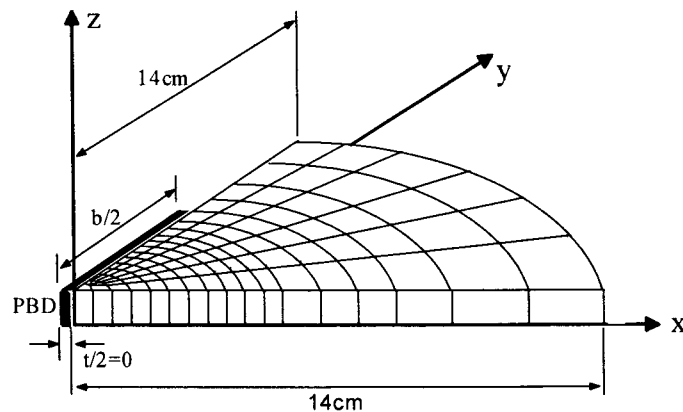


그림 1 수치해석 모델

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

* 초기연직응력 9.8kPa

PBD 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

3. 수치해석 결과에 의한 모형지반의 압밀거동

그림 2와 3은 각각 PBD 폭과 재하압력증분에 따른 모형지반의 침하량의 변화를 나타내고 있다. 그림 2로부터 PBD의 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.

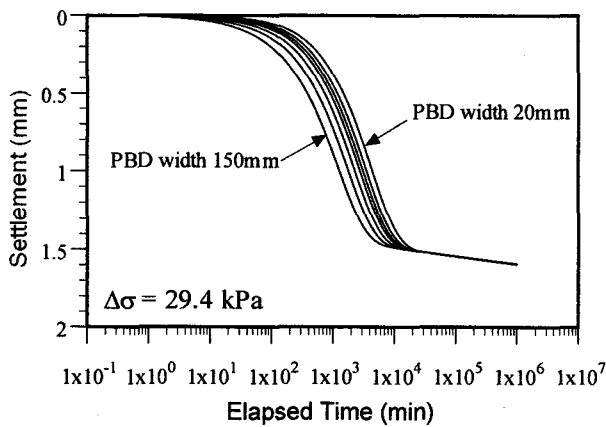


그림 2 PBD 폭에 따른 압밀침하 거동

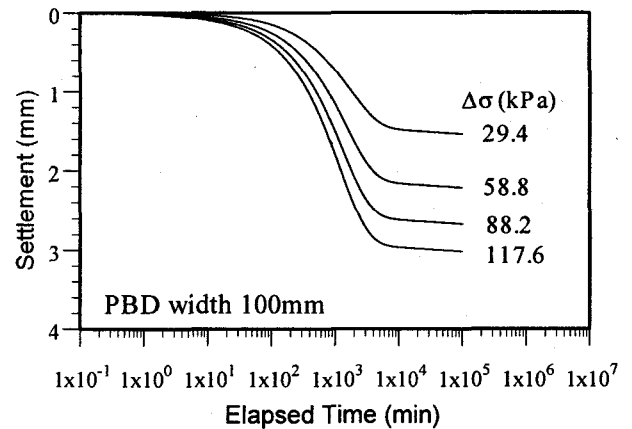


그림 3 재하압력증분에 따른 압밀침하 거동

그림 4와 5는 각각 PBD 폭과 재하압력증분에 따른 모형지반의 평균 과잉간극수압의 소산 거동의 변화를 나타내고 있다. 그림 4로부터 모형지반에 대한 재하 직후에는 재하압력증분과 거의 같은 과잉간극수압이 발생하고 있으나 PBD의 폭이 넓은 경우일수록 과잉간극수압이 빠르게 소산되고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5로부터 재하압력증분이 클수록 모형지반의 과잉간극수압은 빠르게 소산됨을 알 수 있다.

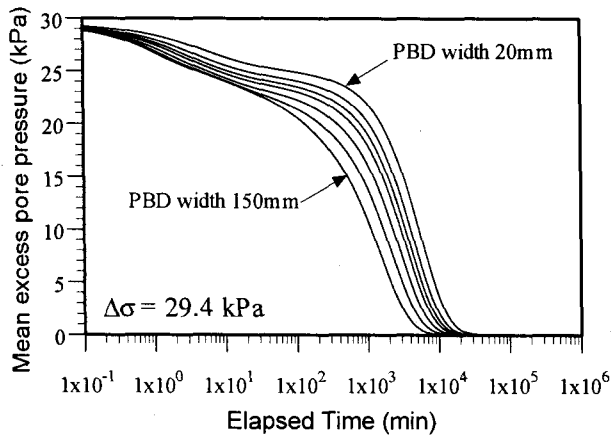


그림 4 PBD 폭에 따른 간극수압 소산 거동

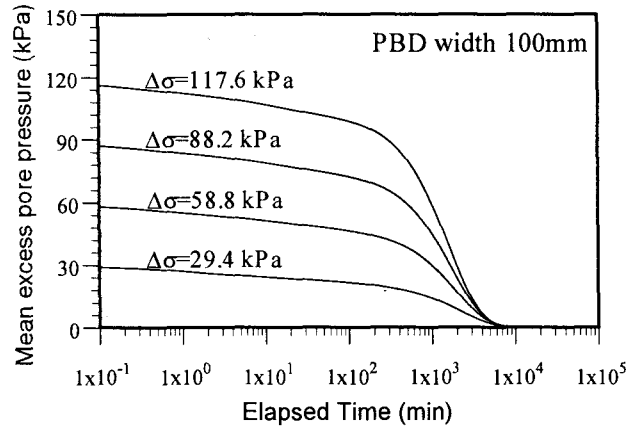


그림 5 재하압력증분에 따른 간극수압 소산 거동

4. Barron의 이론해를 이용한 유효 등가경의 역계산

PBD공법에 의한 연약지반의 압밀축진효과를 Barron의 이론해를 이용하여 보다 정확히 예측하기 위해서는 PBD의 적절한 유효 등가경 결정이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 PBD에 의한 연약점토지반의 압밀거동에 대한 수치해석의 결과를 이용하여 다음과 같이 Barron의 이론해를 활용한 역계산 방법을 통해 PBD의 유효 등가경 산정하였다.

- (1) PBD에 의한 연약지반의 압밀거동에 대한 수치해석 결과로부터 소정의 압밀도 U 에 상응하는 압밀시간 t 를 결정한다.
- (2) 압밀시간 t 를 식 (1)에 대입하여 시간계수 T_h 를 결정한다.

$$T_h = \frac{k}{m_v \gamma_w} \frac{t}{d_e^2} \quad (1)$$

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

- (3) 식 (2)에 압밀도 U 와 시간계수 T_h 를 대입하여 $F(n)$ 을 결정한다.

$$F(n) = \frac{\ln(1-U)}{-8T_h} \quad (2)$$

- (4) 식 (3)을 이용하여 n 값을 수치 해석적 방법으로 결정한다.

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

- (5) 결정된 n 값을 식 (4)에 대입하여 유효등가경 d_w 를 결정한다.

$$d_w = \frac{d_e}{n} \quad (4)$$

그림 4는 PBD의 폭이 30mm인 경우에 대하여 상기의 과정으로 계산한 PBD의 유효 등가경과 압밀도의 관계를 나타내고 있다. 압밀 초기에는 유효 등가경이 압밀 진행에 따라 감소하며 재하압력증분이 작을수록 유효 등가경이 크게 평가되고 있으나 압밀도 약 50%를 지나면서 재하압력증분의 크기에 관계없이 모든 경우의 유효 등가경은 일정한 값에 수렴되고 있음을 알 수 있다.

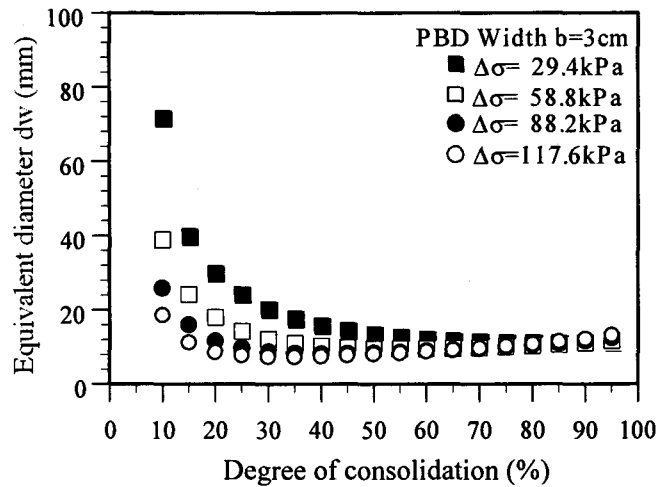


그림 6 압밀도와 유효 등가경의 비교

5. 유효 등가경의 평가

그림 5는 PBD 폭과 본 연구에서 계산한 유효 등가경의 관계를 나타내고 있다. 그림에서의 유효 등가경은 그림 4에서 압밀도 80%일 경우의 값을 선택하였다. 한편 그림에는 기존의 유효 등가경 산정법에 의한 유효 등가경과 PBD 폭의 관계를 함께 도시하였다. 계산된 유효 등가경은 재하압력증분의 크기에 관계없이 거의 비슷한 값을 나타내고 있다. 또한 PBD 폭이 20mm에서 40mm의 범위에서는 Sotoura의 산정식에 의한 관계와 일치하고 있지만 50mm에서 150mm의 범위에서는 MPD연구회의 산정식에 의한 관계와 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 본 연구에서 결정한 PBD 폭과 유효 등가경의 관계를 나타내고 있다. 각각의 관계들은 전술한 바와 같이 재하압력증분의 크기에 의한 영향을 받지 않으므로 그림 5의 평균적 값들로 결정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 PBD 폭과 유효 등가경의 관계는 거의 선형적 관계를 나타내고 있으며 이를 선형근사식으로 나타내면 다음과 같다.

$$d_w = \frac{1}{2}b - 0.38 \quad (5)$$

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

본 연구에서 수행한 수치해석 모델의 PBD의 타설 간격은 25cm이므로 이를 일반적인 실무의 시공범위인 1~2m로 생각한다면 그림 6의 PBD의 폭은 8~120cm의 범위에 해당된다. 따라서 식 (5)에 의한관계는 PBD의 타설 간격 1~2m, PBD의 폭 8~120cm의 경우에 적용할 수 있다고 생각할 수 있다.

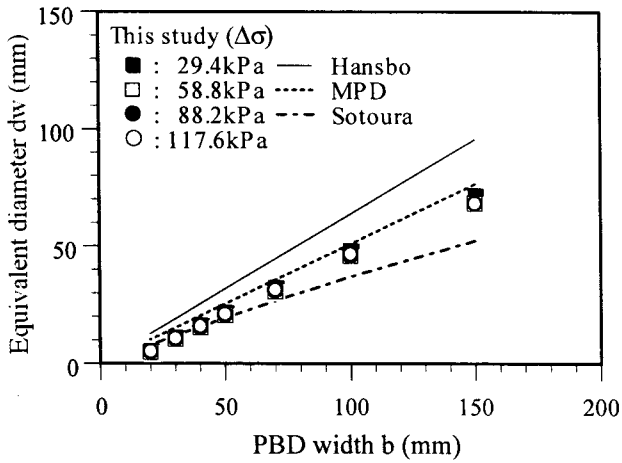


그림 7 PBD 폭과 유효등가경의 관계

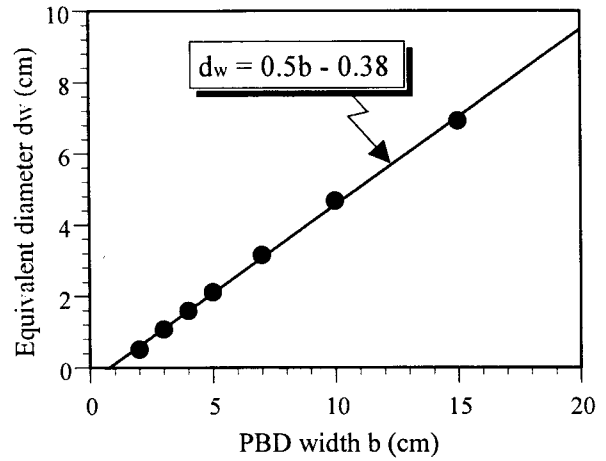


그림 8 PBD 폭에 따른 유효 등가경의 결정

6. 결 론

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

- (1) PBD의 폭이 넓을수록 압밀침하의 속도는 빠르게 나타나지만 최종 침하량은 그 폭의 크기에 관계 없이 동일하다. 또한 재하압력증분이 클수록 모형지반의 침하량은 크고 일차압밀이 종료되는 시간이 짧게 나타난다.
- (2) 모형지반에 대한 재하 직후에는 재하압력증분과 거의 같은 과잉간극수압이 발생하지만 PBD의 폭이 넓을수록 과잉간극수압이 빠르게 소산되며 재하압력증분이 클수록 모형지반의 과잉간극수압은 빠르게 소산된다.
- (3) 수치해석에 의한 모형지반의 압밀거동을 이용하여 Barron의 이론해를 활용한 역계산을 실시한 결과 압밀 초기에는 유효 등가경이 압밀 진행에 따라 감소하며 재하압력증분이 작을수록 유효 등가경이 크게 평가되었으나 압밀도 약 50%를 지나면서 재하압력증분의 크기에 관계없이 모든 경우의 유효 등가경은 일정한 값에 수렴하였다. 한편, 계산된 유효 등가경은 그 폭이 20mm에서 40mm의 범위에서는 Sotoura의 산정식에 의한 관계와 일치하였고 50mm에서 150mm의 범위에서는 MPD연구회의 산정식에 의한 관계와 같은 경향을 나타내었다.
- (4) 본 연구의 결과로부터 PBD의 타설 간격 1~2m, PBD의 폭 8~120cm의 경우에 적용할 수 있는 PBD 폭과 유효 등가경의 선형적 관계식을 제안하였다.

참고문헌

1. 유 승경 (2003), PBD에 의해 개량된 연약점토지반의 압밀거동에 관한 연구, 대한토목학회 논문집, 제 23권 제6C호, pp.399~406.
2. 유 승경, 홍 원표, 윤 길림 (2003), 실내모형실험에 의한 Plastic Board Drain이 적용된 연약지반의 압밀 거동에 관한 연구, 한국지반환경공학회 논문집, 제4권 제4호, pp.17~23.
3. 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.

4. マリンプラスチックドレ"-ン工法研究会(1998), マリンプラスチックドレ"-ン工法, 室内・現場実験報告書.
5. You, S.K.(2002), Study on Estimating Technique of Promotion Effects of Consolidation by Plastic Board Drain, Doctoral Thesis of Osaka University, pp.59-70.
6. You, S. K., Oda, K. and Matsui, T.(2001), Model Tests on Consolidation Behavior of Clay Ground Improved by Plastic Board Drain, Proceedings of ISOPE'2001, Vol.II, pp.687-693.
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. Barron, R.A. (1948), Consolidation of fine-grained soils by drain wells. Transactions, American Society of Civil Engineers, Vol. 113, pp. 718-742.