

연약지반 개량을 위한 신배수재의 적용성에 관한 비교 실험

The Application to the New Drain Materials for Soft Ground Improvement

김병일¹⁾, Byung-Il Kim, 이동현²⁾, Dong-Hyun Lee, 양상호³⁾, Sang-Ho Yang, 김수삼⁴⁾, Soo-Sam Kim

¹⁾ 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 박사과정, Doctor Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

²⁾ 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

³⁾ 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 석사과정, Master Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

⁴⁾ 한양대학교 공학대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Hanyang University

개요(SYNOPSIS) : In environmental and economical views Plastic Board Drain(PBD) has many problems which is generally used in improving soft grounds. In order to improve these, Rags drain and Sponge drain are developed in this study, and the application to drains is presented though comparing with PDB and Sand drain in consolidation effects. Test results show that the consolidation effects, including consolidation rate and strength, increase in order of Sand and Rags, PDB and Sponge drain.

주요어(Key words) : PBD, Soft ground, Rags drain, Sponge drain, Sand drain, Consolidation effect

1. 서론

압축성이 크고 지지력이 작아 공학적으로 불안정한 상태인 연약지반은 강제적인 압밀침하로 인해 개량이 이루어진다. 이 때 연직배수재를 이용하여 배수거리를 단축하여 압밀을 촉진시키는 공법인 연직배수공법(Vertical Drain Method)은 대규모 연약지반의 조기침하와 강도증진을 위하여 사용되고 있는 지반개량공법의 하나로써 1970년대 이후 국내 연약지반 개량공사의 주요수단으로 자리를 확고히 하고 있다. 그 종류로는 배수재의 종류에 따라 Sand Drain공법, PBD(Plastic Board Drain)공법, 그물 주머니에 모래를 채워 배수로를 형성, 압밀을 촉진시키는 Pack Drain공법, 종이 섬유를 이용한 Paper Drain공법 등이 있다. 이러한 공법에 사용되는 배수재는 배수재의 재료 자체 성질인 통수능이 연약층의 두께에 비례하여 영향을 받기도 하고, 배수재 타입시 사용되는 멘드럴과 타입기 및 방식에 의한 주변지반의 교란효과(smear effect)로 배수성능이 저하되며 또한 시간의 경과에 따른 필터의 공극보다 작은 크기의 토립자가 필터재를 통과하여 그 내부에 쌓이거나 큰 크기의 토립자로 인해 공극이 막힘(clogging)으로서 배수재의 기능이 저하되는 등의 문제점을 안고 있기 때문에 시공시에는 현장의 조건과 각 배수재의 종류와 특징을 비교하여 적용하고자 하는 현장에 가장 적합한 제품을 선택하여야 한다. 한편 연직배수공

법에 대한 수요가 증가함에 따라 기존의 배수재가 지닌 한계를 극복할 수 있는 새로운 배수재의 개발에 대한 필요성이 증대되고 있는 지금, 단가가 비싸고 시공이 어려운 모래나 환경적으로 부담이 되는 PBD 보다 단가가 싼 새로운 배수재로서의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 일반적으로 사용되고 있는 배수재인 Sand, PBD와 새로 제안된 배수재인 형겼과 스펀지를 연직배수재로서 사용하여 압밀시험을 수행하고, 기존배수재와의 비교를 통해 새로운 배수재의 압밀효과와 배수재로서의 적용성을 파악하고자 하였다.

2. 본론

2.1 이론적 배경 -등가경 산정-

배수재의 등가경을 구하기 위해서는 보통 두가지 개념이 사용되고 있다. 즉, 원형이 아닌 배수재의 면적과 원형 배수재의 면적이 같다는 개념(동일 면적 개념)과 배수재의 외곽표면 즉, 외주면이 같다는 개념(동일 외주면 개념)이다.

그러나, 대부분의 연구가 배수재의 기능을 지배하는 인자는 배수재의 외주면이므로 동일 외주면에 대한 가정이 옳다는 것에 동의하고 있고, 지금까지도 이러한 가정을 기본으로 제시한 방법이 많이 사용하고 있다.

Hansbo(1979)는 PBD재의 둘레길이와 원형의 둘레가 같다는 기하학적 원리를 이용함으로써 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

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

여기서 ; a, b : PBD의 폭과 두께

이에 대하여 Jansen과 den Hoedt(1986)은 PBD내 물의 흐름에 대한 유효성에 의문을 제시하면서 다음과 같이 수정하여 사용할 것을 권장하였고 이 방법은 현재 PBD의 현장적용 설계시 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다.

$$d_w = \frac{\pi}{4} \frac{2(a+b)}{\pi} \quad (2)$$

이에 대하여 Fellenius와 Castonguay(1985)는 실험과 현장에서 구한 C_h 값의 불명확성, 침하량과 간극수압측정에 의한 압밀도의 차이 등에 대해 실제 PBD의 등가경은 Jansen과 den Hoedt가 제시한 식의 d_w 보다 오히려 1.5~3.0배 정도 클 것으로 예상하고 있다.

또한 Hansbo(1983)와 Rixnet 등(1986)은 실제로 적용할 때의 d_w 는 유한요소해석 결과 다음과 같이 사용할 수 있다고 제안한 바 있다.

$$d_w = \frac{(a+b)}{\pi} \quad (3)$$

박(1994)은 대형압밀시험장치(적경 : 45cm, 높이 : 50cm)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(1989)은 현장시험을 통하여 PBD의 등가환산직경을 $60\text{mm}(2(a+b)/\pi$ 의 94%)를 취한 경우 예측에 가까운 거동을 나타낸다고 보고하고 있다.

이상과 같은 등가경 산정식을 요약하면 표 1과 같고, 본 연구에서는 Hansbo(1979)의 제안식을 사용하여 등가경을 산정하였다.

Table 1 Equivalent diameter of vertical drain

Researchers	Proposed d_w
Hansbo(1979)	$d_w = \frac{2(a+b)}{\pi}$
Jansen and den Hoedt(1983)	$d_w = \frac{\pi}{4} \frac{2(a+b)}{\pi}$
Fellenius and Castonguay(1985)	$d_w = (1.5 \sim 3.0) \times \frac{2(a+b)}{\pi}$
Suits et al.(1986)	38 ~ 64 mm
Rixner et al.(1986), Hansbo(1983)	$d_w = \frac{(a+b)}{\pi}$

2.2 새로운 재료의 배수재 제안

본 논문에서는 좀더 경제적이고 높은 개량효과를 얻을 수 있는 배수재를 개발하기 위해 스폰지와 형겔 등의 새로운 재료의 배수재를 제안하고 배수재로서의 적용성을 검토해 보고자 하였다.

스폰지드레인은 다른 배수재들에 비해 수분 흡수 능력이 뛰어나고 구입이 용이하기 때문에 신형 배수재로 제안하였다. 또한, 일상생활에서 흔히 접할 수 있는 장점 때문에 이용가능성이 높다고 판단된다.

스폰지는 배수재로서의 가공성이 다른 배수재들에 비해 용이하며, 중량이 다른 배수재들에 비해 가볍고 흡수성이 크다는 장점을 가지고 있다. 그러나 스폰지드레인은 다른 배수재들에 비해 인장응력, 압축응력 및 전단응력이 취약한 점이 있다.

형겔드레인은 그 재료인 형겔의 특성에 따라 서로 다른 흡수 능력을 가지고 있다. 또한 이러한 형겔을 이용하여 Pack Drain 형식으로 형겔 주머니를 만들고 그 안에 오염성이 적은 재활용 형겔을 채워 넣어 이용한다면 환경적인 측면도 고려한 배수재가 될 것으로 판단된다.

본 실험에서는 버려진 옷과 천조각 등을 이용하여 형겔주머니를 만들어 실험을 실시하였다.

3. 실험

3.1 시료 특성

본 논문에서는 광양만 연안에서 채취한 교란시료를 #100체로 체가름하여 사용하였으며, 시료의 물성은 표 2와 같다.

Table 2 Properties of sample

Specific gravity	Liquid limit(%)	Plastic limit(%)	Plastic index
2.63	47.3	26.6	20.7

3.2 시험조건

본 연구에서는 초기 조건을 동일하게 하기 위해서 점토의 초기함수비는 100%로 하였으며, 시료의 초기 높이 역시 모두 동일한 40cm로 실험을 수행하였다.

또한, 배수재의 등가경을 동일하게 하기 위해 배수재의 차원(Dimension)을 표 3과 같이 정의하였으며,

제작된 형겅드레인과 스폰지드레인을 그림 1과 2에 제시하였다.

Table 3 Dimension of Drains used this study

	Diameter(cm)	Width(cm)	Thickness(cm)	Equivalent diameter(cm)
PBD		4.2	0.3	2.2
Sand	2.2			2.2
Sponge		4.2	0.3	2.2
Rags	2.2			2.2

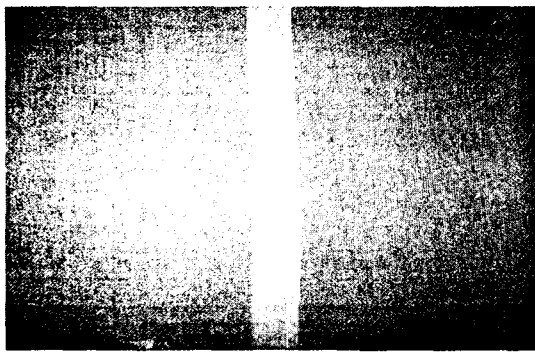


Fig. 1 Sponge drain

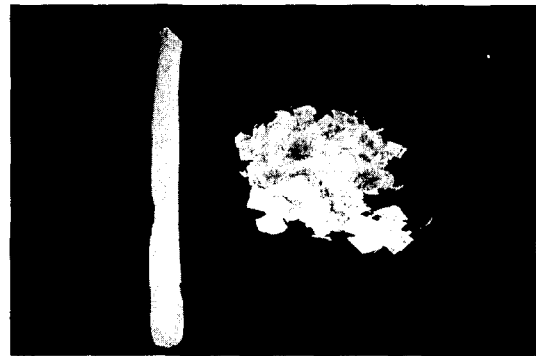


Fig. 2 Rags drain

4. 결과 및 분석

본 논문에서 제안한 형겅드레인과 스폰지드레인은 Sand Drain과 PBD와 같은 배수재와 비교했을 때 우수한 배수 능력이 있음이 나타났다. 스폰지의 경우 타입후 초기 압밀배수 효과는 탁월한 반면 시간이 경과할수록, 그리고 재하되는 하중이 커질수록 단면수축으로 인하여 연직배수재로서의 성능이 감소하는 경향을 보인 것으로 판단된다. 반면 형겅드레인의 경우 압밀배수효과 및 변형에 있어서 기존 배수재들에 비해 성능이 더 우수한 것으로 나타났다. 이하에서는 이와 같은 특징들을 제시하였다.

4.1 침하특성

각 배수재별 간극비-유효응력 관계를 나타내는 그림 3의 경우, Sand Drain이 설치된 시료의 압축성이 가장 크며, 이와 유사한 압축성이 형겅드레인으로 나타났으며, 스폰지드레인과 PBD가 설치된 시료가 유사한 압축성을 보였다. 그림 4는 압밀침하 속도를 제시한 것으로, 초기 하중부분에서는 스폰지드레인의 경우가 가장 큰 침하속도를 보였지만, 일정 하중 이후에는 샌드드레인과 형겅드레인이 설치된 시료가 큰 침하속도를 나타내었다. 전체적으로는 압축성과 유사하게 샌드드레인과 형겅드레인이, PBD와 스폰지드레인이 설치된 시료가 유사한 침하속도 양상을 보였다. 따라서 형겅드레인은 배수재로서의 적용성이 클 것으로 판단된다.

4.2 함수비 특성

그림 5는 시료의 깊이별 함수비 분포를 제시한 것으로, 형짚드레인이 전 깊이에 대하여 다른 배수재보다 함수비 감소효과가 큰 것으로 나타났다. 또한, 모든 배수재에서 중간 부분의 함수비가 크게 나타난 것은 양면배수 압밀실험에 의한 결과라 판단된다.

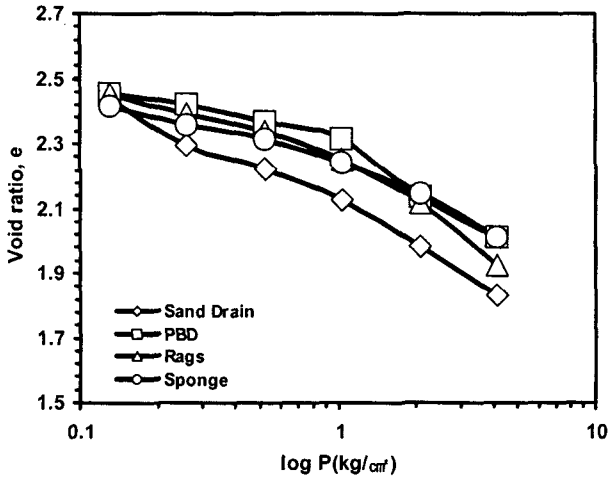


그림 3 e-log p curve

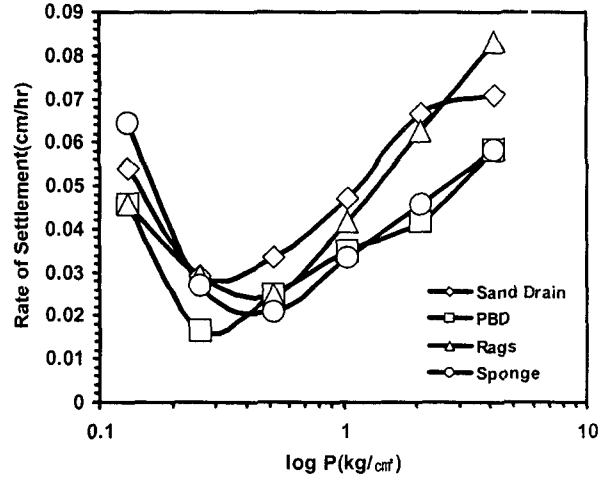


Fig. 4 Rat of settlement with drain

4.3 전단강도 특성

그림 6은 압밀 시험이 완료된 후 콘 관입시험을 통한 높이별 전단강도를 나타내는 것이다. 각 배수재가 설치된 시료 모두 공통적으로 양면배수에 따른 중간층의 전단강도가 작은 경향을 보인다. 이는 함수비 결과와 동일하다. 그림에 제시된 바와 같이 형짚(Rag) 배수재 시료가 가장 큰 전단강도를 보여주고 있다. 이는 본 시험의 다른 배수재들보다 개량효과에 있어서 형짚(Rag) 배수재의 우수성을 입증하는 결과라 판단된다. 반면 Sponge 배수재가 설치된 시료는 개량효과가 다소 떨어지는 경향을 보여준다. 따라서 새로운 배수재로서 Sponge보다는 형짚(Rag) 배수재가 활용가능성이 있다고 판단된다.

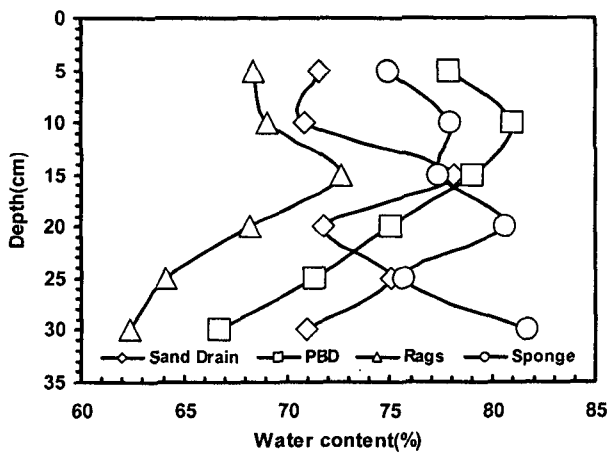


그림 5 W.C distribution with Height

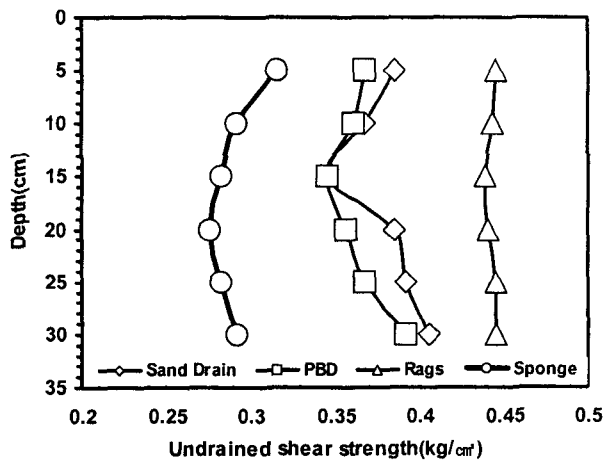


Fig. 6 Strength Distribution with Height

5. 결론

압축성이 크고 지지력이 작아 공학적으로 불안정한 상태인 연약지반은 강제적인 압밀 침하로 인해 그 개량이 이루어진다. 본 연구에서는 Sand Drain, PBD, Rags Drain, Sponge Drain을 사용한 일련의 압밀 시험을 통하여 Rags Drain과 Sponge Drain의 배수재로서의 적용성 및 압밀특성에 대하여 아래와 같은 결과를 얻었다.

1. 샌드드레인과 형겅드레인이 설치된 시료가 가장 큰 압축성을 나타내었으며, 하중 재하 초기에는 스폰지의 압밀속도가 가장 뛰어난 반면, 하중이 증가할수록 형겅 및 샌드드레인이 설치된 시료의 압밀속도가 큰 것으로 나타났다.
2. 형겅드레인이 설치된 시료의 함수비 감소가 가장 크게 나타났으며, 전단강도 역시 가장 크게 나타났다. 스폰지의 경우 가장 작은 전단강도를 보였다.
3. 본 연구에서 제안된 배수재들의 가장 큰 문제점은 시공성에 관한 사항으로써, 저 인장강도로 인한 배수재 타설에 관한 문제, 압밀 종료 후 타설되어 있는 형겅드레인의 유지 및 활용에 관한 문제 등 향후 이러한 문제점에 대한 보다 신중한 검토와 연구가 필요하리라 판단된다.

참고문헌

1. Bergado, D. T., Alfaro, M. C. and Balasubramaniam, A. S.(1993), Improvement of Soft Bangkok Clay Using Vertical Drains, *Geotextiles and Geomembranes*, pp.615~663.
2. Hansbo, S.(1979). Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains , *Ground Engineering*, Vol. 12, No. 5, pp.21~25.
3. Hansbo, S.(1986), Preconsolidation of Soft Compressible Soils by the Use of Prefabricated Vertical Drain, *Ann. Des Travaux Publ. de Belgique*, No. 6 pp. 553~562
4. Hansbo, S.(1983). How to Evaluate the Properties of Prefabricated Drains., *Proc. of the 8th ECSMFE*. pp.621~626.
5. Holtz et al. (1991). Prefabricated Vertical Drains:Design and Performance. *CIRIA Ground Engineering Report : Ground Improvement*.
6. Jansen, H. L. and Den Hoedt, G.(1986), Vertical drains : In-situ and laboratory performance and design Consolidation in Fine Soils, *Proc. of the 8th ECSMFE*, Vol.2, Helsinki, pp.647~651.
7. Rixner, J. J., Kremer, S. R. and Smith, A. D.(1986), Prefabricated Vertical Drains, Vol. II : Summary of Research Effort, FHWA, *Research Report No. FHWA/RD-86/169*, Washington.