

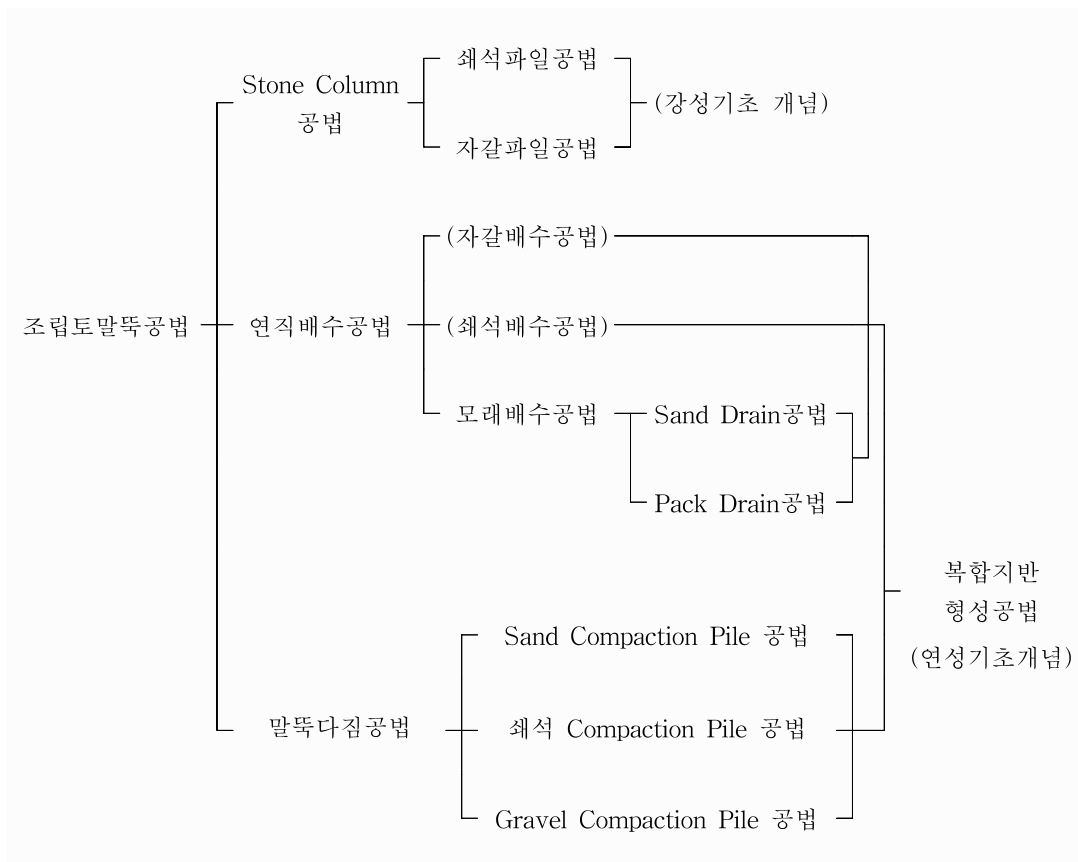
pile공법의 대체 공법으로서 역할이 국내에서는 기대에 미치지 못하고 있는 실정이다.

연약지반상에서 압밀·배수를 촉진하기 위한 공법을 총칭하여 연성기초개념의 복합지반(composite soil) 형성공법이라 하고, 이를 포함한 조립토말뚝공법(Hu. W., Wood, D.M. and Steward, W., 1997)을 분류하면 표. 1 과 같다.

이러한 공법들중 특히, 배수성을 확보해야하는 경우는 일반적으로 연약지반 자체에서 세립분의 토립자가 배수재의 간극을 막아 배수저항 현상이 발생하는 등, 공법의 효용성을 의심케하는 경우가 많지만 clogging 현상에 대한 연구 특히, clogging 현상에 대한 실험연구는 국내에서 거의 전무한 실정이다.

본 연구에서는 복합지반(composite soil) 형성공법과 이와 병용되는 sand mat공법에서 사용되는 조립토들을 대상으로, 본 연구자가 직접 제작한 배수저항 실험기(clogging tester)에 의하여 clogging 현상을 확인하였다.

표 1. 조립토말뚝공법의 분류



2. 복합지반형성공법에서의 압밀·배수 촉진 원리

복합지반형성공법에서의 배수재의 배수성 확보는 필수적이다.

점토층 압밀의 소요시간은 배수거리 H_{dr} 의 제곱에 비례한다. 즉, 압밀소요시간을 줄일 수 있는 최적의 방법은 배수거리를 줄이는 것이다. 이러한 효과를 극대화 하고자 연직 배수재를 지반에 촘촘히 설치하여 배수방향을 연직방향 뿐만 아니라 방사방향(수평방향)으로도 발생하도록 하고 있다.(김홍택, 1992)

한편, 방사방향 배수를 지배하는 중요한 요소는 다음과 같다.

- 1) C_v : 연직방향 압밀계수
- 2) C_h : 수평방향 압밀계수
- 3) r_d : 연직 배수재의 반경

4) R : 연직 배수재로 인하여 수평방향 배수가 발생하는 유효반경

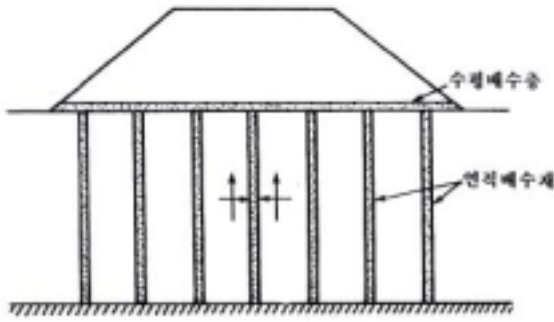


그림. 1 복합지반형성공법에서의 배수재에 의한 배수

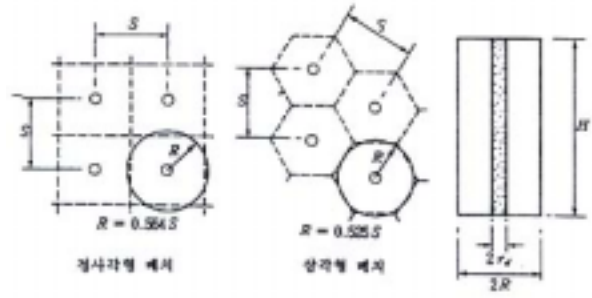


그림. 2 연직배수재 설치 간격

방사방향 배수와 연직방향 배수를 동시에 고려할 수 있는 압밀 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \Delta u}{\partial t} = C_h \left(\frac{\partial^2 \Delta u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \Delta u}{\partial r} \right) + C_v \frac{\partial^2 \Delta u}{\partial z^2} \quad (1)$$

식(1)의 해는 연직방향 배수에 대한 해와 방사방향 배수에 대한 해를 따로 구하여 이를 조합하여 구한다.

(1) 연직방향 배수에 관한 해

연직방향 평균압밀도는 다음과 같다.

$$U_{avg(v)} = f(T_v) \quad (2)$$

$$\text{여기서, 연직방향 시간계수 } T_v = \frac{C_v \cdot t}{H^2} \quad (3)$$

(2) 방사방향 배수에 관한 해

방사방향 배수에 의한 평균압밀도는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$U_{avg(r)} = f(T_r) \quad (4)$$

$$\text{여기서, 방사방향 시간계수 } T_r = \frac{C_h \cdot t}{4R^2} \quad (5)$$

$n = \frac{R}{r_d}$ 에 대하여 $\frac{U_{avg(r)}}{T_r}$ 의 그래프가 그림, 3에 나타나 있다.

(3) 평균 압밀도

연직방향 압밀도와 방사방향 압밀도를 조합한 평균 압밀도는 다음 식으로 표시할 수 있다.

$$(1 - U_{avg}) = (1 - U_{avg(v)}) (1 - U_{avg(r)}) \quad (6)$$

(4) 연직배수재의 배치간격 S

- 1) 총 압밀침하량 S_i 를 계산한다
- 2) $U_{avg} = \frac{S_i - \text{잔류침하량}}{S_i}$ 로 부터 U_{avg} 를 구한다.
- 3) $T_v = \frac{C_v \cdot t}{H_{dr}^2}$ 에서 T_v 를 구하면 $U_{avg(v)}$ 를 구한다
- 4) 이제 식(6)으로부터 $U_{avg(r)}$ 가 구해진다.
- 5) 그림. 3에서 4)항에서 구한 $U_{avg(r)}$ 인 경우에 대해, $n = \frac{R}{r_d}$ 인 n 의 값을 가정하고 그에 따른 T_r 값을 구해낸다.
- 6) 5)항에서 구해진 T_r 은 확정된 값이 아니고 n 값에 따라 달라진다. 한편, $T_r = \frac{C_r \cdot t}{4R^2}$ 에서 R 대신 $R = r_d \cdot n$ (r_d 는 연직배수재의 반경으로 알고 있는 값 임)을 넣어 정리하면 $n = \sqrt{\frac{C_r \cdot t}{4 \cdot r_d^2 \cdot T_r}}$ 가 되어, 여기서 구해지는 n 과 5)항에서 가정한 n 이 일치하도록 최종 n 을 결정한다. 참고로, 최종 n 을 결정하는 이 과정은 다음과 같은 편리한 방법을 이용할 수 있다. 가정한 n 값은 횡좌표 값으로, 이렇게 가정한 n 값에 따라 5)항에서 처럼 구한 T_r 값을 $n = \sqrt{\frac{C_r \cdot t}{4 \cdot r_d^2 \cdot T_r}}$ 에 대입하여 구한 n 값은 종좌표 값으로 하여 그런 곡선과 이 좌표계에서 1:1 직선이 만나는 점의 좌표가 최종 n 값이 되는 것이다.(그림. 4 참조)
- 7) 결정된 n 값과 연직배수재의 반경 r_d 를 $n = \frac{R}{r_d}$ 에 대입하면 연직 배수재로 인하여 수평방향 배수가 발생하는 유효반경 R 가 구해진다.

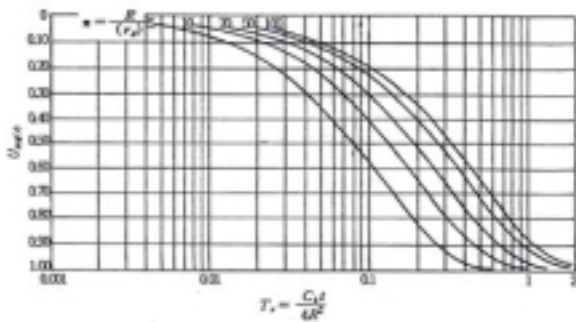


그림. 3 방사방향 배수의 압밀도

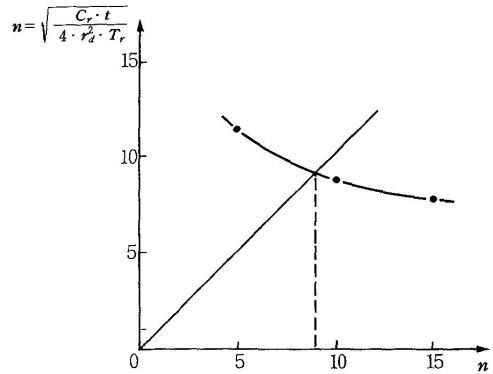


그림. 4 도해법을 응용한 시행착오법에 의한 n값의 결정

- 8) 유효반경 R 을 구하게 되면,
 - 삼각형 배열인 경우 : $R = 0.525 \cdot S$
 - 정사각형 배열인 경우 : $R = 0.565 \cdot S$
 에 의하여 연직배수재의 배치간격 S 가 결정된다.

3. 배수저항 실험(Clogging Test)

3.1 해성점토와 모래 및 골재의 지반공학적 성질

연약지반에 해당하는 해성점토, 표준사와 연약지반개량공법으로의 복합지반(composite soil) 형성공법에서 사용되는 해사, 그리고 석산에서 생산되는 13mm 골재, 25mm 골재, 40mm 골재 등, 총 1종류의 해성점토와 5종류의 조립토들을 대상으로 물리적 성질과 투수성을 파악하기 위한 지반공학적 실험을 실시하였다.

입도시험(KS F 2302)은 비중계 실험 및 체가름 실험에 의하여 실시하였고, 투수계수는 흙의 투수시험 방법(KS F 2322)에 의하여 결정하였다.

표 2. 해성점토와 모래 및 골재의 입도시험과 물리실험 및 투수시험 결과

구분	비중 Gs	Atterberg Limit	흙의 입도분석		흙의 분류법		투수계수 (cm/sec)	
			No. 4체 통과백분율(%)	No. 200체 통과백분율(%)	통일분류	AASHTO 분류	시험값	평균값
해성점토	2.636	액성: 48% 소성: 20.04% 소성지수: 27.96%	100	56.72	CL	A-7-6	5.681×10^{-6}	5.640×10^{-6}
							5.599×10^{-6}	
표준사	2.648	N.P.	100	0.03	SP	A-1-b	1.036×10^{-1}	1.037×10^{-1}
							1.038×10^{-1}	
해사	2.612	N.P.	96.44	0.09	SP	A-1-a	8.998×10^{-2}	8.995×10^{-2}
							8.992×10^{-2}	
13mm 골재	-	N.P.	10.54	0.01	GP	A-1-a	-	> 8.294
							-	
25mm 골재	-	N.P.	4.98	0.02	GP	A-1-a	-	> 8.294
							-	
40mm 골재	-	N.P.	0.58	0.02	GP	A-1-a	-	> 8.294
							-	

3.2 배수저항 실험기 자원 및 실험 개요

지반개량을 목적으로 광범위한 연약 점토지반의 압밀·배수를 촉진하기 위하여 하중재하공법과 병행하여 국내·외적으로 가장 많이 활용되고 있는 vertical drain공법인 sand drain공법, pack drain공법, sand compaction pile공법 등에 사용되는 모래와 gravel drain공법이나 gravel compaction pile공법 등에 사용되는 쇄석 및 자갈을 대상으로 연직배수/말뚝 체의 반경축소 현상의 원인인 배수저항(clogging)현상에 대하여 실험한 clogging 시험기는 그림. 5 및 그림. 6 과 같다.(Singh, G. and Hattab, T.N., 1979)

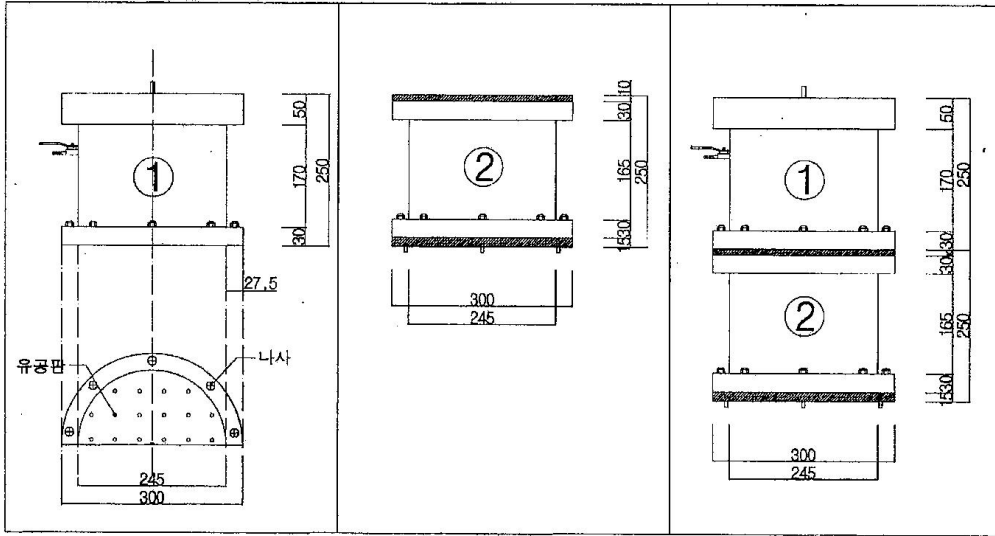
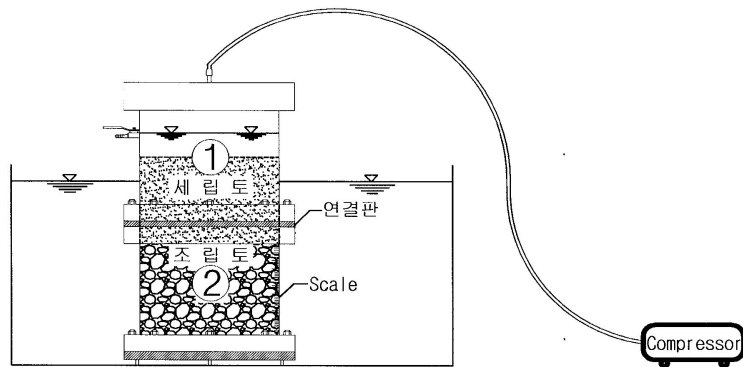


그림. 5 clogging 시험기 몰드의 상세도 및 재원



Clogging Test 의 개념도

그림. 6 clogging 시험의 개념도

4. 배수저항 실험(Clogging Test)의 결과 및 고찰

가압시간을 48시간로 하여 압력을 무압, 100kPa, 200kPa, 300kPa으로 변경하였을 때의 모래(해사, 표준사) 및 골재(13mm, 25mm, 40mm)에서 해성점토의 관입량(mm)을 측정하면 표. 3과 같다. 이때, 해사와 표준사에 대해서는 해성점토의 함수비 ω 를 72% 뿐 아니라 91%와 63%에 대하여도 같은 조건에서 실험을 실시하였다.

배수저항 실험 결과에 의하면, 해사나 표준사에서 해성점토의 관입량은 압력의 크기나 함수비의 변화에도 불구하고 0mm 로 기록되었다. 따라서, 최대입경이 4.75mm 이하이면서 투수계수가 $1 \times 10^{-2} \text{cm/sec}$ 보다 큰 모래의 경우는 세립토의 관입에 의한 배수저항 현상은 전혀 없을 것으로 여겨지며, 배수재

로서의 투수성은 확보하면서 물다짐에 의한 모래기둥의 전단강도는 크게 증대한 것으로 관찰되었다.

표 3. 압력(가압시간 48시간)에 따른 해성점토의 모래 및 골재에서의 관입량(mm)

압력의 크기 \ 배수재 종류	무압 ($\omega=72\%$)	100kPa ($\omega=72\%$)	200kPa ($\omega=72\%$)	300kPa		
				$\omega=91\%$	$\omega=72\%$	$\omega=63\%$
해사	0	0	0	0	0	0
표준사	0	0	0	0	0	0
13mm골재	6	25	62	-	84	85
25mm골재	6	35	75	-	95	-
40mm골재	11	관통	관통	-	관통	-

(*해성점토의 함수비 : ω)

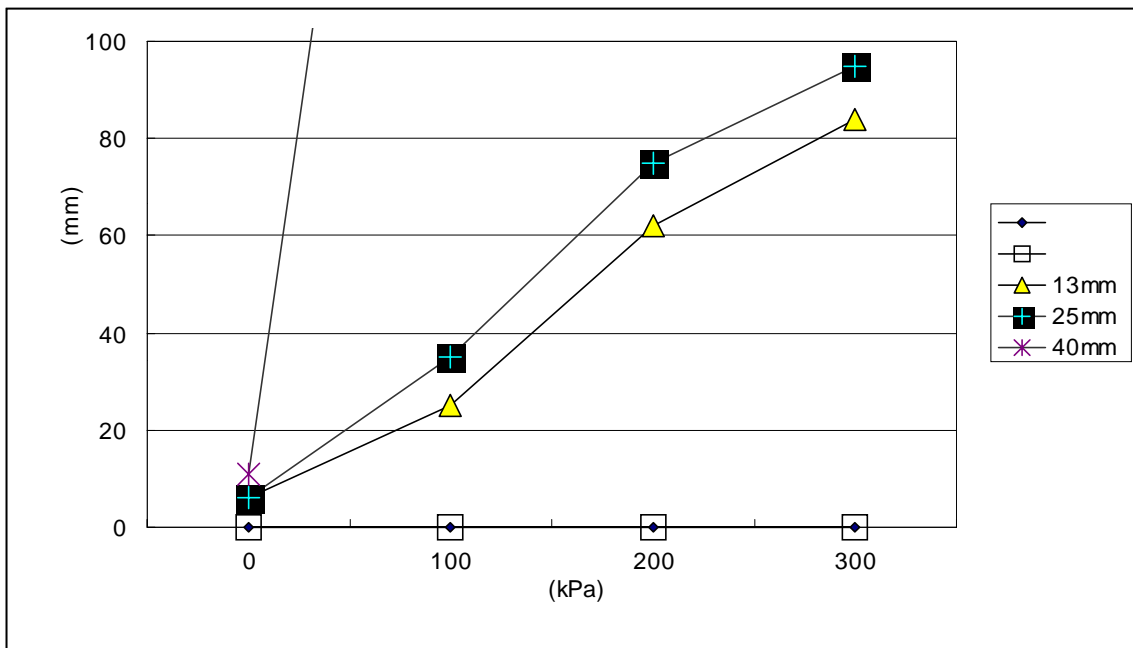


그림. 7 압력(가압시간 48시간) 및 배수재의 종류에 따른 관입량의 변화

골재의 경우에는, 골재의 최대 입경이 클수록 해성점토의 관입량은 증대하고, 같은 골재라도 압력이 클수록 해성점토의 관입량은 증대함을 알 수 있다. 특히, 40mm골재에서는 100kPa(약 $\text{kg}/10\text{cm}^2$)의 압력에서도 실험상의 40mm골재층 두께 200mm를 완전히 관통할 정도의 해성점토가 관입되어, 세립토 지반에서 40mm골재의 배수재 효과는 전혀 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.

한편, 13mm골재를 대상으로 해성점토의 함수비를 63%, 56.18%, 46.71% 등으로 변화시키면서 최대 압력 300kPa(약 $30\text{kg}/\text{cm}^2$)으로 48시간이상 가하면서 측정한 해성점토의 관입량은 표. 4와 같다.

표. 4 해성점토 함수비의 변화에 따른 13mm골재에서의 해성점토 관입량
(압력 300kPa, 가압시간 48시간 기준)

해성점토 함수비	72%	63%	46.71%	비고
관입량(mm)	84	85	30	해성점토 액성한계 : 48%

표. 4에 의하면, 13mm골재에 해성점토가 관입되는 현상은 해성점토의 액성한계(=48%)를 기준으로 현저하게 차이가 있다. 즉, 해성점토의 함수비가 액성한계보다 클 경우에는 함수비의 변화에 따른 해성점토의 골재에 관입되는 양은 비슷하게 측정되었으나, 해성점토의 함수비가 액성한계보다 작아지는 경우에는 해성점토의 골재에 관입되는 양은 1/3 정도로 감소함을 알 수 있다.

따라서, 자연함수비가 큰 연약한 세립토 지반에서 쇄석이나 자갈 골재를 사용하는 gravel drain공법 및 gravel compaction pile공법 등과 같은 연성기초개념의 공법의 사용은 좀 더 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료된다.

5. 결론

본 연구는 복합지반(composite soil) 형성공법과 이와 병용되는 sand mat공법에서 사용되는 조립토들을 대상으로, 배수저항 실험(clogging tester)을 실시하고 그 결과를 고찰·정리하였다.

- (1) 해사나 표준사에서 해성점토의 관입량은 압력의 크기나 함수비의 변화에도 불구하고 0mm 로, 배수저항 현상은 전혀 없는 것으로 여겨지며, 오히려 물다짐에 의한 모래 배수/말뚝 체의 진단강도가 크게 증대한 것으로 보인다.
- (2) 골재의 경우에는, 골재의 최대 입경이 클수록 해성점토의 관입량은 증대하고, 같은 골재라도 압력이 클수록 해성점토의 관입량은 증대함을 알 수 있다.
- (3) 특히, 40mm골재에서는 100kPa(약 kg/10cm²)의 압력에서도 실험상의 40mm골재층 두께 200mm를 완전히 관통할 정도의 해성점토가 관입되어, 세립토 지반에서 40mm 보다 큰 골재의 배수재 효과는 전혀 기대할 수 없을 것으로 여겨진다.
- (4) 액성한계를 기준으로, 점토의 함수비가 액성한계보다 클 경우에는 함수비의 변화에 따른 점토의 골재에 관입되는 양은 비슷하게 측정되었으나, 액성한계보다 작아지는 경우에는 점토의 골재에 관입되는 양은 1/3 정도로 크게 감소함을 알 수 있다.
- (5) 자연함수비가 큰 연약한 세립토 지반에서 쇄석이나 자갈 골재를 사용하는 gravel drain공법 및 gravel compaction pile공법 등과 같은 연성기초개념의 공법의 사용은 좀 더 신중을 기할 필요가 있을 것으로 사료된다.
- (6) 조립토에 대한 clogging 현상의 실험적 규명은 효과적인 조립토말뚝공법의 선정과 사용되는 조립토의 적합성 판정에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 김홍택(1992), “모래기둥의 설치간격에 관한 연구”, 한국지반공학회지, Vol.8, No.1, pp.67~79.
2. 유태성 외1(1987), “선형하중과 Wick Drain공법에 의한 연약해성점토의 개량” 대한토질공학회지, Vol.3, No.1, pp.7~23
3. Hansbo, S.(1994), "Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering", Elsevier Press, Vol.95, pp.450-455.
4. Hu, W., Wood, D.M. and Steward, W.(1997),“Groud Improvement Using Stone Column Foundation : Results of Model Test”, International Confernce on Ground Improvement Techniques, pp.246~256
5. Naoki Kumamoto et al.(1988), “Settlement Behavior of Improved Ground with a Vertical Drain System”, Soil and Foundations, Vol.28, No.1, pp77~88.
6. Singh, G. and Hattab, T.N.(1979), “A Laboratory Study of Efficiency of Sand Drains in Relation to Methods of Installation and Spacing”, Geotechnique 29, No.4, pp.395~422