교란효과를 고려한 샌드 드레인의 약식설계

Simple Design of Sand Drains Considering Smear Effect

유 영 삼*1 김 병 일*2
You, Young Sam Kim, Byung Il
정 충 기*3 김 명 모*4
Chung, Choong Ki Kim, Myoung Mo

Abstract

The effects of smear and well resistance should be taken into account for the design of sand drains. Practically, simple design, which employs the method using 1/2 reduced diameter of drains or assuming the coefficient of consolidation in horizontal direction equals to that in vertical direction, based on the theory neglecting these effects, has been used. In this study, the reliability of existing simple design methods as well as the influences of smear and well resistance was investigated with the equations proposed by Hansbo and Onoue. It is shown that the consolidation time is chiefly governed by the effect of smear for drains with highly permeable sands. For general soil condition and placing type of sand drain, consolidation time is underestimated for simple design with 1/2 reduced diameter of drains, and it is overestimated for that with the assumption that the coefficient of consolidation in horizontal direction equals to that in vertical direction. Through the investigations on different reduced diameter, it was shown that simple design with 1/4 reduced diameter of drains yielded the reliable results with errors less than 6%.

요 지

샌드 드레인 설계시 필요한 압밀소요시간은 지반의 교란과 샌드 드레인 내에서의 배수저항의 효과를 감안하여 산정되어야 한다. 국내의 샌드 드레인은 설계시 이러한 영향을 무시한 채 드레인의 직경을 반으로 줄이거나, 수평방향 압밀계수를 수직방향 압밀계수와 같다고 가정하여 설계되고 있다. 이 연구에서는 지반의 교란과 배수저항이 샌드 드레인의 설계에 미치는 영향과, 기존의 약식설계법의 신뢰성을 Hansbo와 Onoue의 제안식과 비교를 통하여 검토하였다. 연구 결과 양질의 모래로 이루어진 샌드 드레인에 있어서 압밀소요시간은 배수 저항 보다는 교란효과에 의하여 크게 영향을 받으며, 일반적인 지반과 샌드 드레인 타설 조건에 대하여 기존의 약식 설계법들인 1/2 감소직경을 사용하는 경우와 수평방향 압밀계수와 수직방향 압밀계수를 같다고 가정

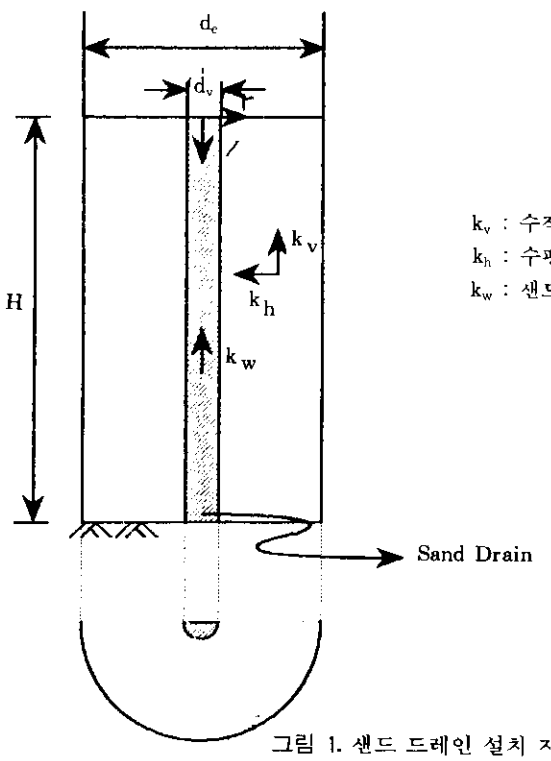
*1 정회원, 서울대학교 토목공학과 석사졸업
*2 정회원, 서울대학교 토목공학과 박사졸업
*3 정회원, 서울대학교 토목공학과 조교수
*4 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수

하는 경우는 각각 압밀소요시간을 과소 또는 과대평가하며, 이 연구에서 제안하는 1/4의 감소직경을 사용한 경우 오차가 6% 이내인 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있었다.

1. 서 론

현재 국내의 샌드 드레인(sand drain)의 설계는 대부분 샌드 드레인 타설에 따른 주변 지반의 교란효과를 무시한 채 이상적인 경우의 해석 방법을 토대로 하여, 수평방향 압밀계수(c_h)를 수직방향 압밀계수(c_v)와 같다고 가정하거나, 샌드 드레인의 유효 직경을 반으로 줄여서(Leonard, 1962)[1] 지반의 교란효과를 고려하는 약식 방법 등으로 이루어지고 있다. 그러나 이러한 약식 설계법에 의해 산정된 압밀소요시간 및 압밀침하율 등은 현장에서의 실측치와 상당한 차이가 있음을 많은 사람들이 여러 현장에서 경험하였다. 그 주요 원인은 샌드 드레인 시공시의 현장조건[샌드 드레인 타설에 따른 주변 지반의 교란효과(smear effect), 샌드 드레인 및 샌드매트(sand mat)에 의한 수두손실, 샌드 드레인 내부에서의 응력집중 등]을 적절히 반영하지 못한 데 있으며, 이 밖에도 하상퇴적층의 수평방향 압밀계수(c_h)의 특성, 지반 내에 존재할 수 있는 얇은 모래층, 타설 방법, 타설 초기에 발생하는 과잉 간극수압 등 설계시 결정하기 어려운 여러 변수가 존재하는 데 있다.

이 논문에서는 샌드 드레인 설계시에 고려되어야 할 교란효과와, 샌드 드레인의 투수성 및 세장비와 밀접한 관계가 있는 샌드 드레인 내부에서의 물의 흐름에 대한 저항의 영향을 조



k_v : 수직방향 투수계수
k_h : 수평방향 투수계수
k_w : 샌드 드레인의 투수계수

그림 1. 샌드 드레인 설치 지반단면

사하고, Hansbo(1979, 1981)[2, 3]가 지반의 교란효과를 고려하여 제안한 식을 이용하여, 기존의 제안된 약식 설계법들에 대한 신뢰성을 분석하고, 아울러 실제 설계에 적합하며 간단하게 사용할 수 있는 약식 설계법을 제안하고자 한다.

2. 샌드 드레인의 해석이론

샌드 드레인이 설치된 지반의 압밀은 수직배수와 방사배수를 고려한 축대칭 다차원 압밀이론에 의하여, Terzaghi의 1차원 압밀방정식을 3차원으로 확장한 다음 식으로 나타낼 수 있다(그림 1 참조).

$$\frac{\partial u}{\partial t}=c_v\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}+c_h\left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2}+\frac{1}{r}\frac{\partial u}{\partial r}\right) \qquad (1)$$

여기서 u : 과잉간극수압

r : 샌드 드레인 중심으로부터의 거리

z : 지표면으로부터의 거리

c_v : 수직방향 압밀계수

c_h : 수평방향 압밀계수

t : 압밀소요시간

샌드 드레인 설치 지반의 정확한 해석을 위해서는 위 식(1)을 토대로 하여 재하하중으로 인한 지반 내의 하중 분포와 각 위치에서의 압밀속도를 고려하여 해석하여야 한다. 그러나 이러한 방법을 통한 해석은 지반의 비등방성과 비균질성, 그리고 지나치게 복잡한 해석 과정 때문에 실제 문제에 대한 적용이 매우 어렵다.

Barron(1948)[4]은 샌드 드레인의 간편한 설계를 위하여 수직압밀 효과를 무시하고 지반내의 수직 변형률이 일정하여 부등침하가 발생하지 않는 등변형을 조건을 이용하여 설계 이론을 제안하였다. 즉, 식(1)의 첫번째 항으로 표시되는 수직압밀에 의한 효과는 무시하고 방사배수의 효과만 고려하여 등변형률 조건의 약식해로 수평방향에 대한 평균압밀도($U_{h(ave)}$)를 다음과같이 제안하였다.

$$U_{h(ave)}(T_h)=1-\exp(-8T_h/F(N)) \qquad (2)$$

여기서

$$F(N)=\frac{N^2}{N^2-1}\ln(N)-\frac{3N^2-1}{4N^2} \qquad (3)$$

$T_h(=c_h t/d_e^2)$: 수평방향 시간계수

$N(=d_e/d)$: 샌드 드레인의 간격비

d_w : 샌드 드레인의 지름

d_e : 등가유효원의 지름

t : 압밀소요시간

위에서 정의된 등가유효원은 각 샌드 드레인이 영향을 미치는 범위를 말하며 실제적으로는 그림 2에서와 같이 각 샌드 드레인의 등거리를 잇는 육각형이나 사각형으로 이루어지나 해석적 취급을 용이하게 하기 위해서 사용하는 등면적의 원을 말한다. 등가유효원의 지름과 샌드 드레인의 타설간격(d)은 다음과 같은 관계가 있다.

육각형(삼각형 배치)의 경우 : $d_e=1.05d$

사각형(정방형 배치)의 경우 : $d_e=1.13d$

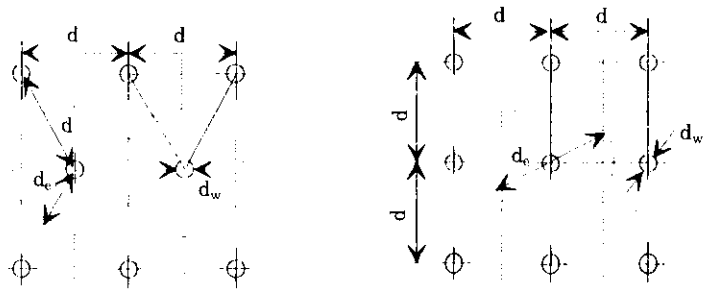


그림 2. 타설간격과 등가유효원의 관계

식 (2)로 나타나는 Barron의 약식설계에 의한 샌드 드레인의 해석은 샌드 드레인 설치에 따른 지반의 교란효과(smear effect)와 샌드드레인 내에서의 배수저항(well resistance) 때문에 압밀도를 과대평가한다. Hansbo(1979)[2]는 교란효과와 배수저항을 고려할 수 있도록 식 (2)를 수정하여 제안하였다. 즉 샌드 드레인 설치지반을 그림 3과 같이 교란지역과 비교란지역으로 구분하고 샌드 드레인의 배수능력을 해석에 반영할 수 있도록 임의의 깊이, z에서의 수평평균압밀도를 아래 식과 같이 나타내었다.

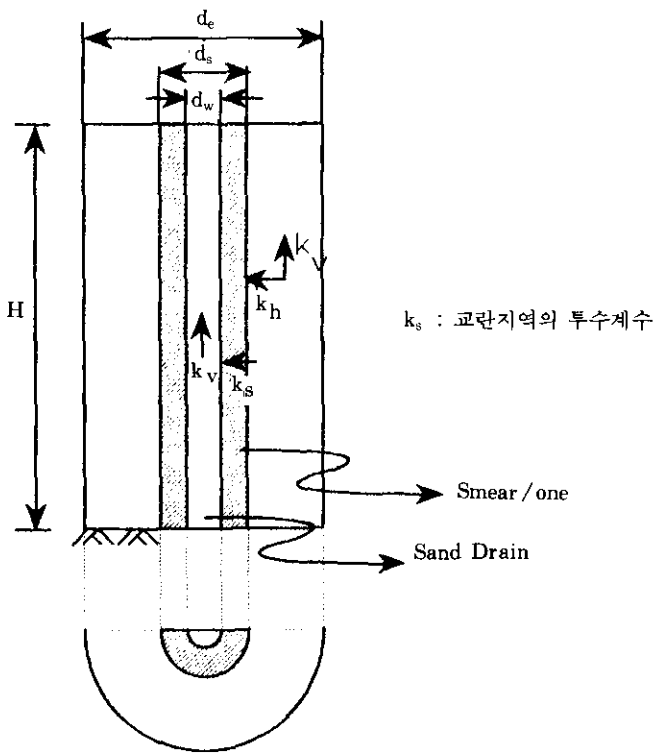


그림 3. 샌드 드레인 설치 지반단면(교란과 배수저항을 고려한 경우)

$$U_{h(ave)}(T_h)=1-\exp(-8T_h/\mu_{sw}) \quad (4)$$

여기서

$$\mu_{sw}=\mu_s+\mu_w$$

$$\mu_s=\frac{N^2}{N^2-1}\left(\ln\left(\frac{N}{S}\right)+\eta\ln S-\frac{3}{4}\right)+\frac{S^2}{N^2-1}\left(1-\frac{S^2}{4N^2}\right)+\eta\frac{1}{N^2-1}\left(\frac{S^4-1}{4N^2}-S^2+1\right) \quad (6)$$

$$\mu_w=\pi z(2H-z)\frac{k_h}{q_w}\left(1-\frac{1}{N^2}\right) \quad (7)$$

$S=d_s/d_w$

$\eta=k_h/k_s$

k_h : 비교란지역의 수평방향 투수계수

k_s : 교란지역의 투수계수

d_s : 교란지역(smear zone)의 지름

z : 지표면으로 부터의 깊이

q_w : 배수용량($=\pi k_w d_w^2/4$)

H : 연약지반의 두께

k_w : 샌드 드레인의 투수계수

그러나 Hansbo가 제안한 식은 샌드 드레인

의 투수성이 매우 커서 배수저항의 효과가 무시할 수 있을 만큼 작은 경우에는 정해를 구하기가 어렵다. Onoue(1988)[5]는 샌드 드레인의 투수성에 상관없이 배수저항을 교란효과와 함께 고려할 수 있는 간편한 식을 Yoshikuni와 Nakanodo(1974)[6]가 제안한 배수저항 계수, L을 사용하여 다음과 같이 제안하였다.

$$U_{h(ave)}(T_h)=1-\exp\left(\frac{-8T_h}{F(N')+0.8L}\right) \quad (8)$$

여기서

$$F(N')=\frac{(N')^2}{(N')^2-1}\ln(N')-\frac{3(N')^2-1}{4(N')^2} \quad (9)$$

$$N'=NS^{n-1} \quad (10)$$

$$L=\frac{32}{\pi^2}\frac{k_h}{k_w}\left(\frac{H}{d_w}\right)^2 \quad (11)$$

3. 해석방법

일반적으로 샌드 드레인은 설계의 간편성 때문에 식(2)와 (3)에 의한 Barron의 설계이론을 토대로 타설시의 교란효과를 고려하기 위하여 설계에 사용되는 샌드 드레인의 직경을 실제 직경의 반으로 줄여서 적용하거나, 수평방향 압밀계수(c_h)대신에 수직방향 압밀계수(c_v) 값을 적용하는 방법을 통해 설계되고 있다. 이 연구에서는 직경이 30cm 이상이고 투수계수(k_w)가 10^{-2}cm/sec 이상인 양질의 모래로 이루어진 샌드 드레인과 10^{-3}cm²/sec의 수직방향 압밀계수를 갖는 지반조건을 가정하여 Hansbo의 제안식과 Onoue의 제안식을 이용하여 상기의 약식설계법의 신뢰성을 검토하고 개선된 약식설계법을 제안하고자 한다.

해석 수행을 위하여 교란지역의 직경은 맨드렐(mandrel)타입식으로 샌드 드레인을 설치하는 경우의 현장시험 결과에 따라서 샌드 드레인 직경의 두 배[3]로 가정하였고, 수평방향 투수계수(k_h) 및 압밀계수(c_h)는 각각 수직방향 투수계수(k_v)와 압밀계수(c_v)의 3배로, 그리고 교란된 지역의 투수계수(k_s)는 수직방향 투수계수와 같다고 가정하였다. 또한, 샌드 드레인의 직경이 30cm 이상인 투수성이 좋은 양질의 모래로 구성된다고 가정하여 Onoue 제안식에 필요한 배수저항계수(L)를 0.2로 하여 해석에 사용하였다.

4. 해석 결과의 비교 및 분석

이 연구에서 가정한 지반과 샌드 드레인의 조건에 대한 교란 및 배수저항의 효과를 고찰하기 위하여 Hansbo의 제안식에서 배수저항의 효과를 무시한 해석 결과와 Onoue의 제안식에 의한 해석 결과를 이상적인 경우의 Barron의 약식 설계에 의한 해석 결과와 함께 샌드 드레인 간격비(N)의 변화에 대한 90% 압밀소요시간으로 표 1에 나타내었다. 교란효과만에 의한 압밀소요시간은 이상적인 경우의 약 두 배 정도로 나타나고 있으나, 배수저항을 교란효과와 같이 고려한 경우와 비교할 때 그 차이는 N이 5일 때에는 약 12%의 차이를 보이며, N이 10이상인 경우에는 5% 미만이다. 따라서 직경이 30cm 이상이고 양질의 모래로 구성 된 샌드 드레인은 타입시 지반의 교란효과에 의해 주로 영향을 받으며 배수저항의 압밀지연 효과는 매우 작다. 그리고 지반의 교란효과는 교란지역의 지름이 샌드 드레인지름의 2배로 제한되기 때문에 샌드 드레인 간격비의 증가에 따라 급속히 감소됨을 알 수 있다. 표 1에 나타난 바와 같이 N이 5일 때 교란에 의한 압밀소요시간이 이상적인 경우의 2.3배에서 N이 20일 때 1.6배로 급격히 떨어지고 있다.

표 1. 교란과 배수저항(well resistance)의 영향 (d_w=40cm)

N	소요시간(일)		
	Hansbo (smear)	Barron (이상적인 경우)	Onoue (smear+well resis. L=0.2)
5	95	41	107
10	518	280	551
15	1334	788	1401
20	2578	1601	2695

지반의 교란효과를 무시한 Barron의 약식설계의 문제점을 보완한 간편한 설계를 위하여 Barron의 약식설계에 계산되는 샌드 드레인의 직경을 실제 직경보다 줄여서 사용하는 설계법이 많이 사용되고 있다. 이 때 사용되는 감소직경(d_w^*)은 지반의 교란에 따른 압밀지연효과를 대변할 수 있도록 선택되어야 한다. 그러한 감소직경을 이용한 Barron의 약식설계에 의한 해석 결과를 이상적인 경우와 Hansbo의 제안식에 의한 해석 결과와 함께 표 2에 나타내었다. Leonard[1]가 제안한 샌드 드레인의 직경을 반으로 줄여서 설계하는 경우 대략 30% 정도 압밀소요시간을 과소평가함으로써 위험한 설계가 될 문제점이 있으며, 샌드 드레인의 직경을 1/4로 줄여서 설계할 때에 Hansbo의 제안식에 의한 결과와 오차가 6% 이내인 근사한 결과를 도출할 수 있다.

표 2. 감소 직경(d_w^*)을 사용한 해석 결과

d_w(cm)	N	약식설계법 (이상적인경우)	약식설계법 ($d_w^*=(1/2)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/3)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/4)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/5)d_w$)	Hansbo (smear)
30	5	23	39	49	56	61	53
30	10	157	225	265	293	316	291
40	5	41	70	87	100	109	95
40	10	280	400	471	522	562	518
50	5	64	109	136	156	171	148
50	10	438	625	737	816	878	810

샌드 드레인의 간편한 설계를 위하여 제안된 $c_v=c_h$로 가정한 경우, 샌드 드레인 직경의 1/2의 감소직경을 사용하는 경우와 샌드 드레인 직경의 1/4의 감소직경을 사용하는 경우를 이상적인 경우와 Hansbo 제안식의 결과와 함께 다양한 샌드 드레인 간격비에 대하여 표 3에 나타내었다. 이 연구에서 가정한 지반과 샌드 드레인의 조건에 대하여 1/4의 감소직경을 사용하는 경우가 교란효과를 가장 잘 나타내며, 1/2 감소직경의 경우 압밀소요시간을 과소평가하여 위험한 설계가 되고, $c_v=c_h$의 경우 압밀소요시간을 과대평가하며 샌드 드레인 간격비가 증가할수록 그 오차는 더욱 증가하여 과다설계를 하게 된다. 이러한 결과는 샌드 드레인의 직경 변화의 영향을 보여 주는 표 4에서도 마찬가지로 나타나고 있다. 따라서 샌드 드레인 공법이 적용되는 연약지반에 대하여 투수성이 좋은 양질의 모래가 사용되는 샌드 드레인의 설계시 1/4의 감소직경을 사용한 약식설계법이 샌드 드레인 간격비와 샌드 드레인의 직경에 상관 없이 교란효과를 고려한 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있다.

이 연구에서 가정한 교란지역의 직경비(S=2)는 일반적인 경우에 대한 값이며 샌드 드레인의 타설방법이나 지반의 특성에 따라 변화할 수 있다. 교란지역 직경비의 변화에 따른 제안된 간편설계법들의 신뢰성을 고찰해 보기 위하여 표 5와 같이 교란지역 직경비(S=d_s/d_w)의 변화에 대한 각 해석법의 90% 압밀도에 필요한 소요시간을 나타내었다. 교란지역 직경비(S)가 1.2에서 2.5로 증가함에 따라서 Hansbo의 해석결과에 따르면 압밀소요시간이 2배 정도 증가한다. 그러나 간편설계법으로는 교란지역의 변화를 고려할 수 없으므로 이 연구에서 제안하는 1/4의 감소직경을 사용하는 경우 교란지역 직경비 0.5의 변화에 대하여 대략 25%이하의 오차가 발생한다. 따라서 샌드 드레인 설치방법의 영향을 받는 교란지역 직경

표 3. 샌드 드레인 약식설계법의 비교(d_w=40cm, S=2.0)

N	소 요 시 간(일)				
	Hansbo (smear)	약식설계법 ($c_h=c_v$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/2)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/4)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=d_w$)
5	95	124	70	100	41
7	220	324	165	225	108
8	304	466	231	309	155
10	518	841	400	522	280
12	795	1346	622	798	448
14	1137	1988	900	1141	662
16	1547	2775	1236	1550	925
18	2027	3713	1632	2030	1237
20	2578	4805	2090	2581	1601

표 4. 샌드 드레인 직경(d_w)의 영향(N=5, $c_h=3c_v$, $S(=d_s/d_w)=2$, $k_s/k_h=k_v/k_h$)

d_w(cm)	소 요 시 간(일)				
	Hansbo (smear)	약식설계법 ($c_h=c_v$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/2)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/4)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=d_w$)
30	53	70	39	56	23
35	72	95	53	76	31
40	95	124	70	100	41
45	120	157	88	126	52
50	148	194	109	156	64

비가 이 연구에서 제안한 값(S=2)과 다를 경우, 1/4 감소직경에 의한 설계법은 직경 변화에 따른 결과의 오차를 감안하여 설계할 필요가 있다.

한편, 표 6에는 수평방향과 수직방향의 압밀계수비(c_h/c_v)의 변화에 대한 각 해석법의 90% 압밀도에 필요한 소요시간을 나타내었다. 1/4 감소직경에 의한 설계법은 압밀계수비가 1.0에서 5.0으로 증가함에 따라 과다설계에서 과소설계로 변화함을 알 수 있으며, 따라서 압밀계수비가 일반적인 경우($c_h=3c_v$)와 차이가 큰 경우에는 오차를 감안하여 설계해야 한다.

표 5. 교란지역 직경비($S=d_s/d_w$)의 영향(d_w=40cm, N=5)

$S=d_s/d_w$	소 요 시 간				
	Hansbo (smear)	약식설계법 ($c_h=c_v$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/2)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/4)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=d_w$)
1.2	56	124	70	100	41
1.5	74	124	70	100	41
2.0	95	124	70	100	41
2.5	108	124	70	100	41

표 6. 압밀계수비(c_h/c_v)의 영향(d_w=40cm, N=5, S=2.0)

c_h/c_v	소 요 시 간				
	Hansbo (smear)	약식설계법 ($c_h=c_v$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/2)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=(1/4)d_w$)	약식설계법 ($d_w^*=d_w$)
1.0	124	124	210	300	124
2.0	103	124	105	150	62
3.0	95	124	70	100	42
4.0	92	124	53	75	31
5.0	89	124	42	60	25

5. 결 론

지반의 교란과 샌드 드레인의 배수저항이 샌드 드레인의 설계에 미치는 영향을 조사하고 기존에 제안된 약식 설계법들의 신뢰성을 고찰하기 위하여, 해석에 필요한 지반 및 현장에 관한 변수들을 일반적인 경우($c_h=3c_v$ & $d_s=2d_s$)에 부합되게 가정하여 해석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 양질의 모래로 이루어진 샌드 드레인 설치지반에 있어서 압밀소요시간은 지반의 교란효과를 고려할 경우 이상적인 경우의 2배 이상이며, 배수저항에 의한 압밀 지연 효과는 작다.
2) 수직방향 압밀계수(c_v)와 수평방향 압밀계수(c_h)를 같다고 가정하는 약식설계법은 대체로 압밀소요시간을 과대평가하며, Leonard가 제안한 1/2의 감소직경을 사용한 약식설계법은 압밀소요시간을 과소평가한다.
3) 교란효과를 고려한 샌드 드레인의 설계는 1/4의 감소직경을 사용한 약식설계법에 의해 신뢰성 높은 결과를 얻을 수 있으며, 특히 수직방향 압밀계수(c_v)의 값만이 결정된 경우, 가장 일반적인 관계식 $c_h=3c_v$를 적용하고 1/4의 감소직경을 가정함으로써, 간편하면서도 합리적인 결과를 도출할 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 목적기초(KOSEF 91-07-00-07) 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Leonard, G. A.(1962), "Foundation Engineering", McGraw-Hlll, New York, pp. 171~176.
2. Hansbo, S.(1979), "Consolidation of Clay by band-shaped prefabricated drains", Ground Engineering, Vol. 12, No. 5, pp. 59~66.
3. Hansbo, S.(1981), "Consolidation of Fine-Grained Soils by Prefabricated Drains", Proceedings of the 10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, Vol. 3, pp. 677~682.
4. Barron, R. A.(1948), "Consoldaation of Fine-Grained Soils by Drain wells", Transactions, American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 113, Paper No.2346, pp.718~754.
5. Onoue, A.(1988), "Consolidation by Vertical Drains Taking Well Resistance and Smear into Consideration", Soils and Foundations. Vol. 28, No. 4, pp. 165~174
6. Yoshikuni, H. and Nakanodo, H.(1974), "Consolidation of Soils by Vertical Drain Wells with Finite Permeability", Soils and Foundations, Vol, 14, No. 2, pp. 35~46.

(접수일자 1994. 3. 5)