

새로운 침하예측기법 및 적용

A New Observational Method and Its Application

최호광¹⁾, Ho-Kwang Choi, 이대명²⁾, Dae-Myeong Lee, 백승훈³⁾, Seung-Hoon Baek, 정성교⁴⁾, Sung-Gyo Chung

¹⁾ 동명기술공단(전, 동아대학교 산업대학원 석사과정), Dong-Myeong Engineering Consultants

²⁾ 양산전문대학 토목과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Yang-San Junior College

³⁾ 동아대학교 토목공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

⁴⁾ 동아대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A University

SYNOPSIS : In order to predict the final consolidation settlement in clay soils, an observational method(the \sqrt{s} method) is newly suggested based on the Hyperbolic method(Tan, 1991). According to this method, a good linearity in the time:settlement plot is showed, and the predicted final settlement is independent on the reading frequency and the initialisation of the first readings of the settlement and the time. However, when applying to Terzaghi's and Barron's consolidation solutions, the settlements predicted by the \sqrt{s} method are slightly overestimated, but are less than those of the Hyperbolic method. As a result of applying different observational methods to field data, it is found out that an individual error is an important factor as well. The field settlement predicted by the new method seems to be not every probability that it is larger than that of the Asaoka's method. However, the settlements by the Hyperbolic and Hoshino's methods are usually overestimated compared to the previous two. Especially, from the Hoshino's method it is impossible to obtain the settlement for more than half of field data.

KEYWORDS : Observational method, Hyperbolic method, Asaoka method, Application

1. 서 론

근래에 이르러 국내는 물론 아시아 각국에서도 공단, 공항, 주거단지, 도로 등을 조성하기 위하여 해안 및 강변을 따라 대단위 매립 또는 성토사업이 활발히 추진되고 있다. 이 지역들은 대부분 연약점성토로 구성되어 있어서 매립공사시에 전단파괴 또는 과도한 압밀침하가 발생하고 있다. 이때 압밀침하는 최종 성토고 및 압밀완료시점을 결정해야 하므로 대단히 중요한 사항이다.

일반적으로 압밀 침하량과 시간은 각종 압밀이론을 도입하여 예측되고 있으나 흙의 불균질성, 토질시험 및 해석해의 결함 등으로 실제거동과는 잘 일치하지 않고 있다. 따라서, 이를 보완하기 위하여 현장에서는 실측침하량을 이용한 예측기법이 주로 사용되고 있다. 압밀침하 예측기법으로는 Asaoka(1978), 쌍곡선(1991), Hoshino(1962), 유추(simulation)법 등이 있으나, 실제 적용시에 관계곡선이 직선성을 나타내지 않거나 또는 개인오차를 유발할 수 있는 소지를 다분히 지니고 있는 등의 단점을 지니고 있다.

본 연구에서는 기존의 예측기법이 지니고 있는 결점을 보완하기 위하여 쌍곡선법을 개선한 새로운 침하예측기법을 제안하였다. 새로이 제안된 침하예측법은 기존 방법들과 함께 Terzaghi 및 Barron의 압밀해에 적용하여 오차의 정도를 평가하였으며, 압밀이 진행되고 있는 실제 현장에서의 실측침하량에 적용하여 실제의 적용성 여부를 살펴보았다.

2. 새로운 침하예측법

2.1 \sqrt{s} 침하예측법의 제안

\sqrt{s} 침하예측법은 기존의 침하예측법을 실제현장에 적용할 경우에 종종 문제가 되고 있는 직선성을 확보하기 위하여 아래 식 (1)과 같이 압밀 침하량의 제곱근(\sqrt{s})과 시간(t) 관계를 쌍곡선으로 가정한다.

$$\sqrt{s} = \frac{t}{\alpha + \beta t} \quad (1)$$

그러므로

$$\lim_{t \rightarrow \infty} s = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{\frac{1}{t^2} + \frac{2\beta}{t} + \beta^2} = \frac{1}{\beta^2} \quad (2)$$

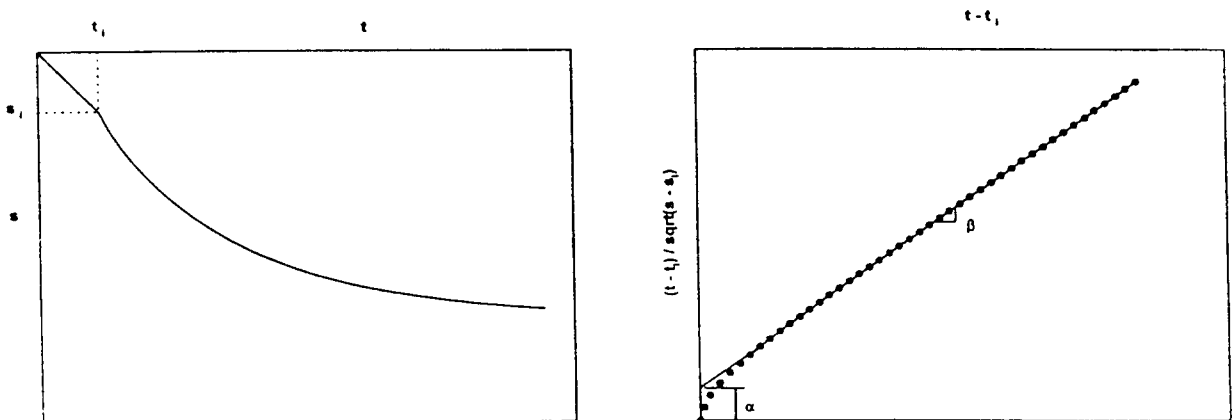
따라서, 식 (1)은 식 (3)과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{t}{\sqrt{s}} = \alpha + \beta t \quad (3)$$

식 (3)은 $t / \sqrt{s} : t$ 관계를 직선식으로 나타낸 것이다. 즉, α 는 절편이며, β 는 이 직선의 기울기를 나타내고 있다. 따라서 최종 침하량(s_f)은 식 (2)에서와 같이 기울기의 제곱에 대한 역수인 $1/\beta^2$ 로 부터 얻을 수 있다. 실제적으로 압밀초기에 침하계측을 수행할 수 없었던 경우에는, 그림 1과 같이 $(t - t_i) / \sqrt{s - s_i} : (t - t_i)$ 관계를 사용하는 것이 현실적이다. 여기서 s_i 는 임의시간 t_i 후의 측정된 침하량이다. 이러한 방법은 기존의 침하예측법에서와 같이 필요한 시기에 침하량을 초기화할 수 있는 것으로 매우 유용할 것이다.

따라서 임의시간 이후로부터 도시하였을 때에 식 (3)은 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$s_f = s_i + \frac{1}{\beta^2} \quad (4)$$



(a) $s : t$ 곡선

(b) $(t - t_i) / \sqrt{s - s_i} : (t - t_i)$ 곡선

그림 1. \sqrt{s} 침하예측법을 위한 도형

2.2 압밀해에의 적용

2.2.1 Terzaghi 1차원 압밀방정식에의 적용

Terzaghi 1차원 압밀방정식의 해는 식 (5)와 같이 표현된다.

$$U = 1 - \sum_{m=0}^{\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (5)$$

여기서 U 는 평균압밀도, T_v 는 시간계수, $M = \pi(2m+1)/2$, 그리고 m 은 정수이다. 이 압밀해를 이용하여 $(T_v - T_i) / \sqrt{U - U_i} : (T_v - T_i)$ 관계로 도시하면 그림 2와 같다. 1차원 압밀방정식의 해를 이용하여 그려진 그림 2에서 보면, 약간의 시간을 초과한 후에는 T_i 의 크기에 무관하게 이 관계곡선이 거의 직선으로 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 식 (1)의 관계가 성립함을 알 수 있다.

2.2.2 수평배수이론식에의 적용

Barron(1948)에 의한 수평배수압밀이론식의 해는 식 (6)와 같다.

$$U = 1 - \exp\left[\frac{-8T_h}{F(n)}\right] \quad (6)$$

$$\text{여기서, } F(n) = \frac{n^2}{n^2 - 1} \ln(n) - \frac{3n^2 - 1}{4n^2}$$

$$n = \frac{d_e}{d_w}$$

d_e = 영향원의직경

d_w = 연직배수공의직경

이 압밀해를 이용하여 $(T_v - T_i) / \sqrt{U - U_i} : (T_v - T_i)$ 관계를 도시하면 그림 3과 같다. 그림 3에서도 그림 2에서와 같이 T_i 에 무관하게 이들 곡선은 직선적으로 얻어져서 식 (1)의 관계가 성립함을 알 수 있다.

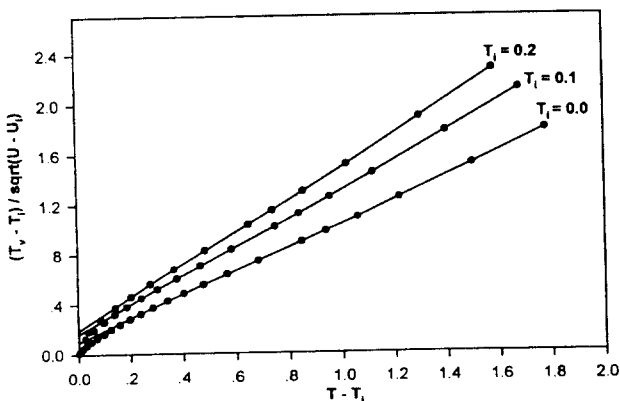


그림 2. Terzaghi 1차원 압밀방정식의 해를 이용한 $(T_v - T_i) / \sqrt{U - U_i} : (T_v - T_i)$ 곡선

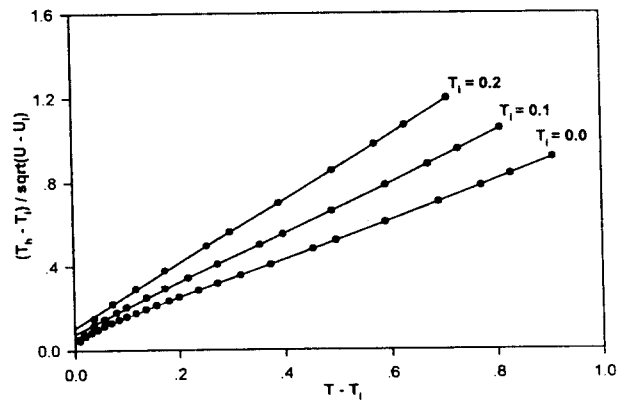


그림 3. Barron 수평 배수이론식의 해를 이용한 $(T_h - T_i) / \sqrt{U - U_i} : (T_h - T_i)$ 곡선

3. 기존 침하예측법들과의 이론적인 비교

3.1 초기압밀단계로부터 도시되었을 경우

Terzaghi의 1차원(1-D)압밀이론과 Barron의 수평배수(2-D)이론에 의한 해석해를 이용하여 기존의 침하예측법인 Asaoka법(1978) 및 쌍곡선법(Tan et al, 1991)과 새로이 제안된 \sqrt{s} 침하예측법에 의한 결과를 상호비교하고자 한다.

그림 4, 5 및 6은 \sqrt{s} 침하예측법, 쌍곡선법 및 Asaoka법을 이용하여 최종 침하량을 예측한 결과이다. 그림 6을 보면, Asaoka법에 의한 결과는 1-D 및 2-D 모두에서 직선성을 잘 나타내고 있으며, 최종값 U_{ult} 는 거의 정확히 1.0에 접근하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 전자의 두 경우는 평균압밀도가 60%(U_{60})에서 90%(U_{90}) 사이에서 직선적으로 나타나며, 직선부분인 U_{60} 과 U_{90} 사이의 기울기를 사용하여 최종압밀도 U_{ult} 를 예측할 경우에는 U_{ult} 가 과대평가될 것임을 알 수 있다.

표 1. 각종 예측법에 의한 최종압밀도

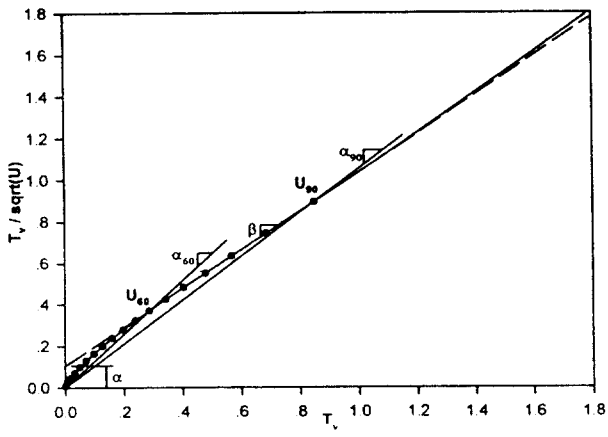
	\sqrt{s} 법	쌍곡선법	Asaoka법	비고
1 - D	1.147	1.207	1.0	Terzaghi이론
2 - D	1.242	1.344	1.0	Barron이론
3 - D	1.221	1.314	1.0	$U=1-(1-U_v)(1-U_h)$

상기의 예측법들에 의한 최종압밀침하량을 요약하면 표 1과 같다. 여기서 2-D의 경우는 $n(=R/r_w = \text{영향반경/배수재의 반경})$ 을 10으로 적용하였다. 이 표를 보면, Asaoka법에 의한 경우는 정확히 $U_{ult}=1.0$ 으로 수렴하지만, \sqrt{s} 법 및 쌍곡선법에 의한 결과는 1-D에서 15% 및 21% 그리고 2-D에서 24% 및 34%로 각각 과대평가되고 있다. \sqrt{s} 법에 의한 결과가 쌍곡선법에 의한 것보다 다소 작게 산출되며, 이론값에 더 접근하지만 연직배수공이 설치될 경우에 대략 20% 이상 과대평가된다는 것을 알 수 있다. 그리고 연직배수공이 설치되는 현장에서 연직 및 수평방향의 압밀을 모두 고려할 경우(3-D)에 \sqrt{s} 법 및 쌍곡선법에 의한 오차는 각각 약 22%와 31%이지만, Asaoka법에 의한 결과는 오차가 발생하지 않고 있다. 쌍곡선법에서도 이러한 단점을 보완하기 위하여 Tan(1995, 1996)은 수정쌍곡선법을 제안하고 있다. 그러나 이 방법은 압밀초기부터 계측이 이루어져야 하며 n , H/R 및 C_h/C_v 의 영향을 고려하여야 하는 번거로움이 있다. 여기서 H 는 점토층의 두께, R 은 영향원의 반경, C_h 및 C_v 는 각각 점토층의 수평 및 연직방향의 압밀계수이다.

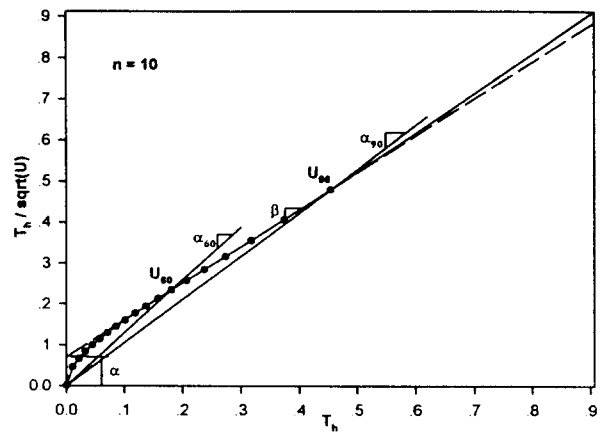
3.2 임의 시점에서 계측이 수행되었을 경우

실제 현장에서는 지반이 연약하여 초기단계에서부터 계측기를 매설하지 못하거나 또는 다른 사정으로 압밀이 진행중에 있을 때 계측이 수반되는 경우가 종종 발생하고 있다. 이러한 경우에 발생될 수 있는 오차를 살펴보기 위하여 앞의 3.1절에서와 같이 Terzaghi 압밀해(1-D), Barron 압밀해(2-D) 및 두 해를 합성한 압밀도(3-D; $U=1-(1-U_v)(1-U_h)$)에 대하여 임의의 시점으로부터 계측되었을 경우를 가정하여 3가지 예측기법을 적용하기로 한다. 그림 7 및 8은 각각 \sqrt{s} 법 및 쌍곡선법을 적용한 결과를 나타내고 있다.

그림 7은 \sqrt{s} 법을 적용한 경우로서, 임의 시간이 지난 후에 초기화하여 얻어진 압밀도는 초기시점이 늦어질수록, 즉 계측시점이 늦을수록 1-D, 2-D 및 3-D에서 모두 오차가 감소되고 있음을 볼 수 있다. 다시 말해서, 1-D의 경우에는 초기시점을 기준으로 했을 때 오차가 약 15%이었으나, 50% 압밀시점을

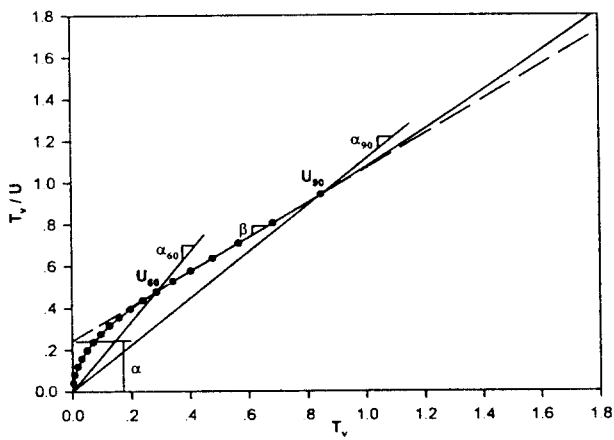


(a) 1 - D

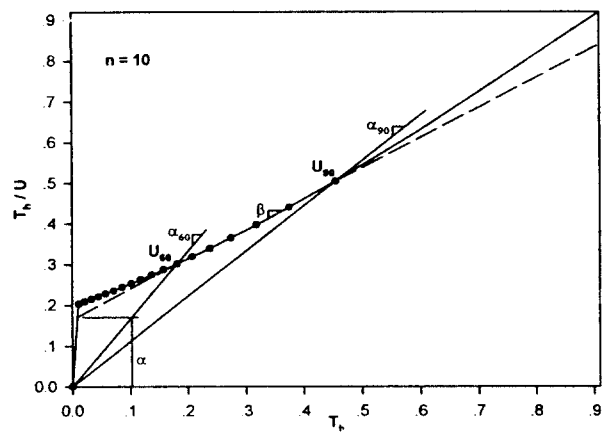


(b) 2 - D

그림 4. \sqrt{s} 침하예측법을 이용한 도시

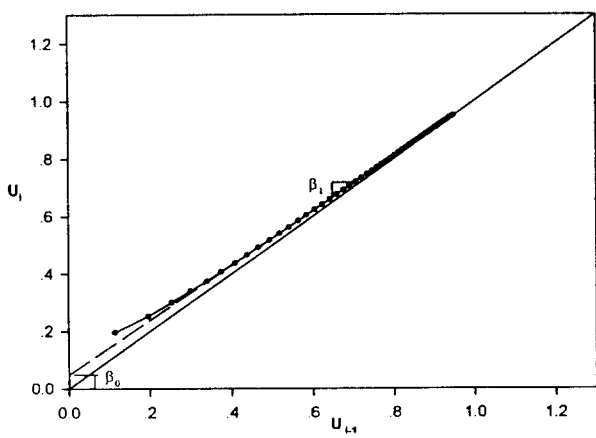


(a) 1 - D

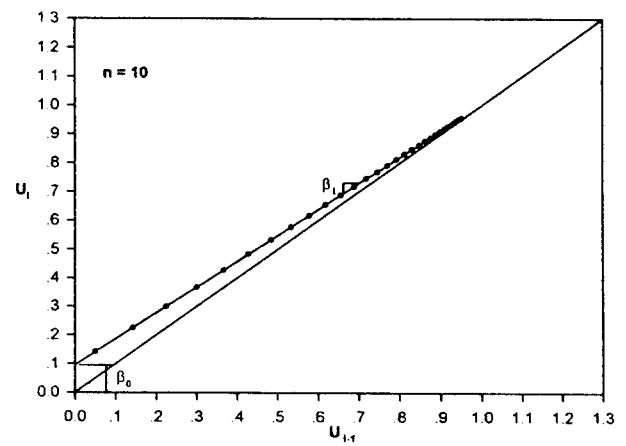


(b) 2 - D

그림 5. 쌍곡선법을 이용한 도시

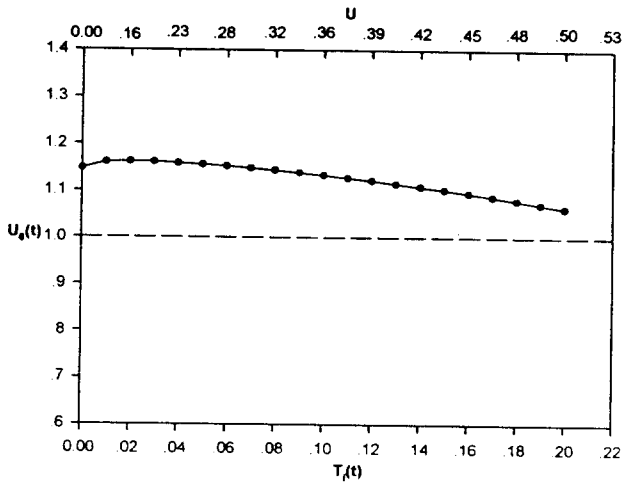


(a) 1 - D

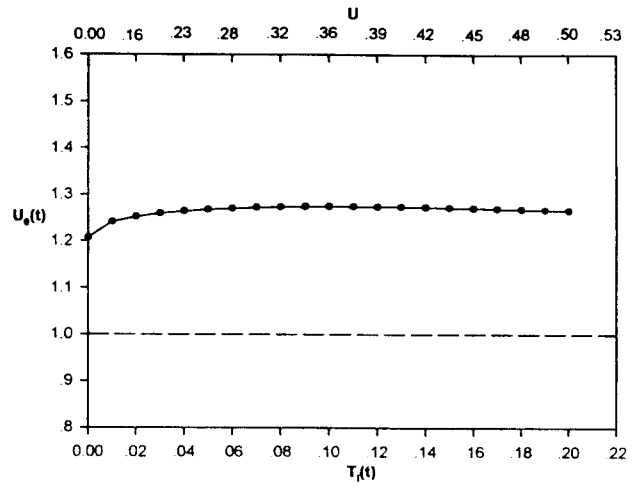


(b) 2 - D

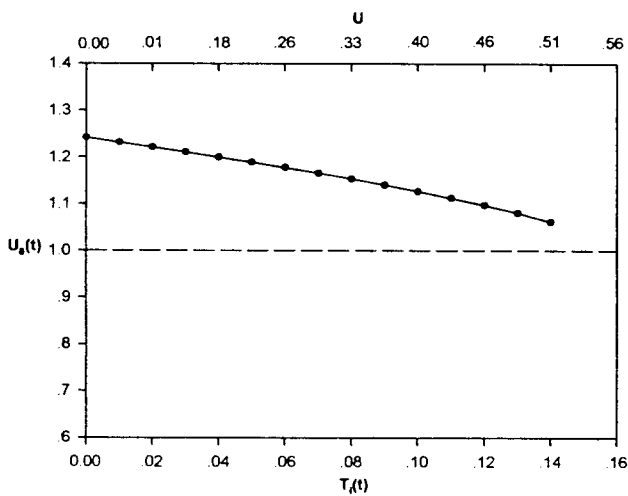
그림 6. Asaoka법을 이용한 도시



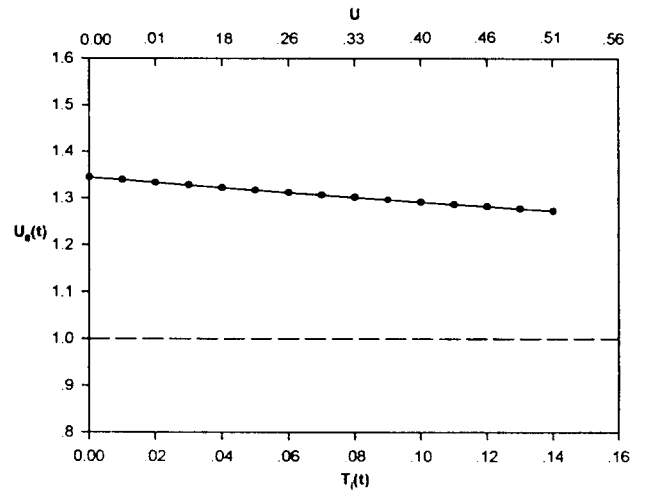
(a) 1 - D



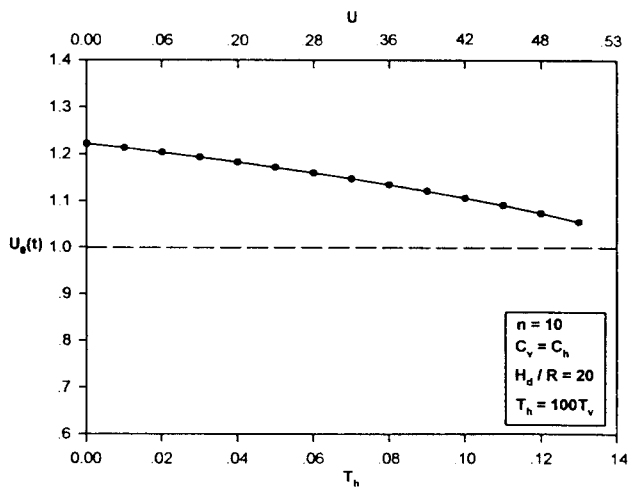
(a) 1 - D



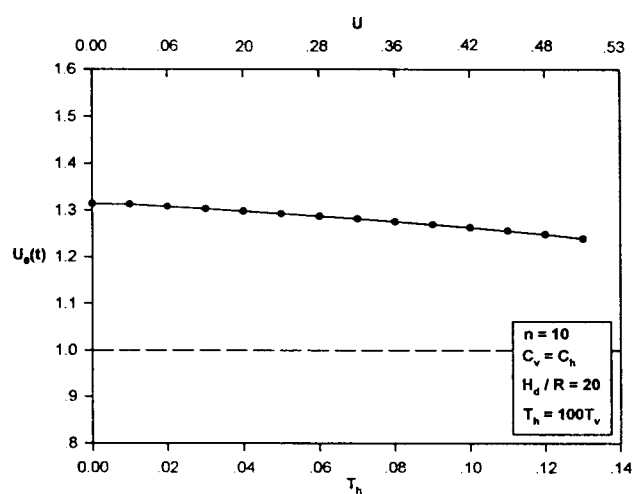
(b) 2 - D



(b) 2 - D



(c) 3 - D



(c) 3 - D

그림 7. \sqrt{s} 법을 임의시점으로부터 적용함에 따른 오차

그림 8. 쌍곡선법을 임의시점으로부터 적용함에 따른 오차

초기화하였을 때는 약 6%의 오차가 발생되어 오차의 감소추이를 나타내고 있다. 그리고 3-D의 경우에는 초기계측일 경우 약 22%이던 것이 50% 압밀 이후를 기준으로 할 경우에는 약 6%로 점차 감소하고 있다.

그림 8은 쌍곡선법을 적용한 경우를 나타내고 있다. 이 법을 적용한 1-D의 경우에는 초기시점에 대해 약 21%의 오차를 나타내었으나, 초기화시점 T_i 가 0.01이후에는 오차가 24%까지 증가하였다가 계속 일정한 값을 유지하게 된다. 반면에, 2-D의 경우는 34%로부터 초기화시점이 늦어짐에 따라 점차 감소하게 얻어진다. 그리고 3-D의 경우는 초기에 오차가 31%이었으나, U_{50} 에서 24%의 오차에 이를때까지 직선적으로 감소함을 보여주고 있다.

그러나 Asaoka법을 적용한 경우에는 초기화시점의 영향에 무관하게 모든 경우에 오차가 발생하지 않았다.

4. 현장적용 예

4.1 현장개요

4.1.1 대상현장

연구대상 위치는 부산시 강서구 녹산동 공유수면 일원에 시공되고 있는 녹산국가공단 6공구 현장이다. 이 공구는 전체 개발면적 320만평 중에서 15%에 해당하는 49만평의 규모이다.

이 현장에서 이루어지고 있는 연약지반개량공법은 지표면 위에 PET매트(5t/m²강도)와 0.5m의 두께의 모래를 포설하고 PBD(Perfabricated Board Drain)를 1.3~1.6m 간격으로 정삼각형의 배치로 약 30m 깊이까지 매입하였다. 장비진입이 곤란한 곳에서는 모래층 위에 추가로 쇠석(40mm이하)을 0.5~1.0m 두께로 성토하였다. 성토는 연암 내지는 보통암을 발파한 후 최대길이 30cm 이하로 소할된 발파암을 사용하였으며, 평균 3.0m 두께로 단계별 성토를 하여 지역에 따라 3~8m 까지 축조하였다.

4.1.2 지층개요 및 토질특성

이 현장은 대부분 수심이 평균 0.5m인 해면부에 위치하며, 퇴적층의 두께는 70m 정도로 해안에서 멀어질수록, 낙동강 하구에 가깝게 갈수록 두께는 증가한다. 이 층적층의 구조는 표 2와 같이 구성되어 있다.

표 2. 층적층의 구성

구 분	심 도(m)	두께(m)	흙의 종류	통일 분류법	비 고
1	0~16	2~16	상부 사질층	SW, SM, SC, SP	
2	14~55	10~35	점성토층	CL, CH, ML	
3	44~70	2~26	하부사질 및 자갈층	GW, GM, SM, SW, SP	

이 지역의 점성토층에 대한 토질특성은 대표적으로 표 3과 같으며, 해안점토가 갖는 특성과 같이 변화가 아주 심하다.

표 3. 점성토의 공학적 특성

	구 분	범 위	비 고
물 리 적 특 성	200번체 통과율(%)	50 ~ 100 (96)	
	함수비, w(%)	35 ~ 70 (55)	
	간극비, e_0	1.0 ~ 2.0 (1.46)	
	비 중, G_s	2.58 ~ 2.75 (2.70)	
	액성한계, LL(%)	25 ~ 80 (50)	
	소성지수, PI(%)	5 ~ 58 (25)	
	액성지수, LI	0.6 ~ 0.8	
역 특 학 적 성	일축압축강도, $q_u(\text{kg/cm}^2)$	0.03 ~ 1.12 (0.52)	깊이에 따라 증가
	예 민 비, S_t	2.0 ~ 13.22	
	점 착 력, $S_u(\text{kg/cm}^2)$	0.15 ~ 0.52 (0.25)	
압 특 축 성	선형압밀응력, $p_c(\text{kg/cm}^2)$	0.2 ~ 2.5 (0.9)	
	압 축 지 수, C_c	0.3 ~ 0.75 (0.6)	
	압 밀 계 수, $C_v(\text{cm}^2/\text{sec})$	$6.0 \times 10^{-3} \sim 3.0 \times 10^{-4}$	

4.1.3 현장계측

녹산공단 내의 6공구 현장에 설치된 현장계측기는 층별침하계, 간극수압계 및 지하수위계가 각각 13개씩, 경사계가 2개소, 또한 지표침하판이 76개소(그림 9)에 매설되었다. 매설시기는 모래를 포설하기 전후로 설치가 가능한 시점이다. 그리고 계측빈도는 1주일 단위로 하였다.

4.2 각종 침하계측기법에 의한 최종침하량의 비교

4.2.1 침하계측기법의 적용 및 비교

본 대상현장에 매설된 76개의 지표면 침하판 중에서 파손된 부분을 제외한 58개로부터 얻어진 계측침하량을 이용하여 쌍곡선법, Hoshino법(1962), Asaoka법 및 \sqrt{s} 법에 적용한 결과 그림 10과 같은 최종침하량을 구할 수 있었다. 그러나 아직까지 침하가 완료되지 못하여 최종 실측침하량과는 직접 비교할 수 없었다.

그림 10을 보면, 앞의 3장에서 언급한 바와같이 예측 최종침하량이 쌍곡선(또는 Hoshino)법, \sqrt{s} 법 그리고 Asaoka법에 의한 순서로 산출되어야 하는데, 이 결과는 일관성이 없이 비교적 비슷한 크기로 얻어졌었다. 이를 예측기법에 의한 예측 최종침하량에 대한 크기의 순서를 살펴보면 표 4와 같다.

표 4. 본 현장에서 예측된 최종침하량의 크기순서

등 위	쌍곡선법	Hoshino법	Asaoka법	\sqrt{s} 법	비 고
1	22	19	14	5	
2	28	4	13	15	
3	7	2	21	24	
4	1	3	10	14	
예측불가	-	30	-	-	

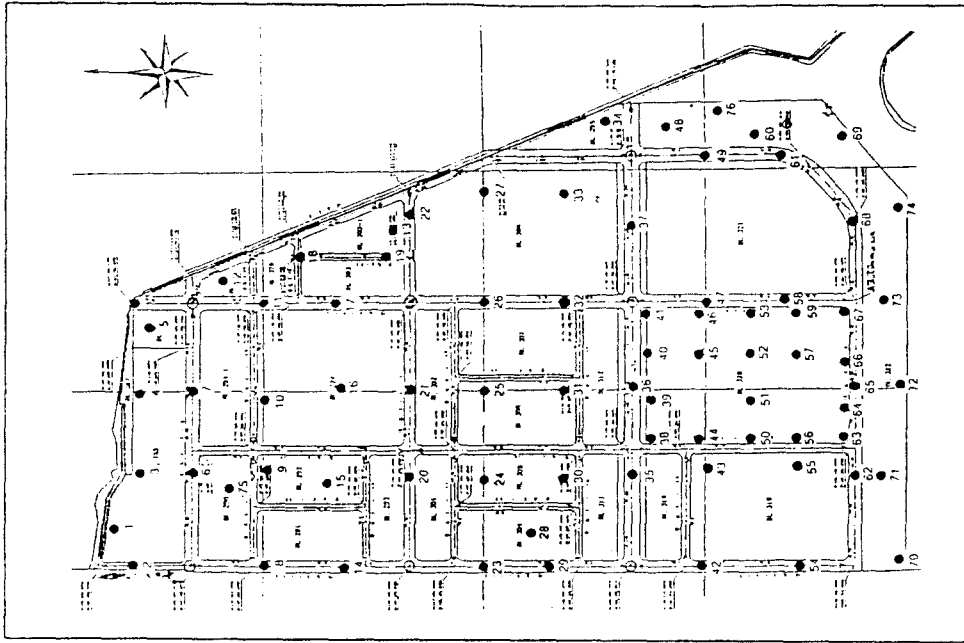


그림 9. 지표면 침하판의 매설위치

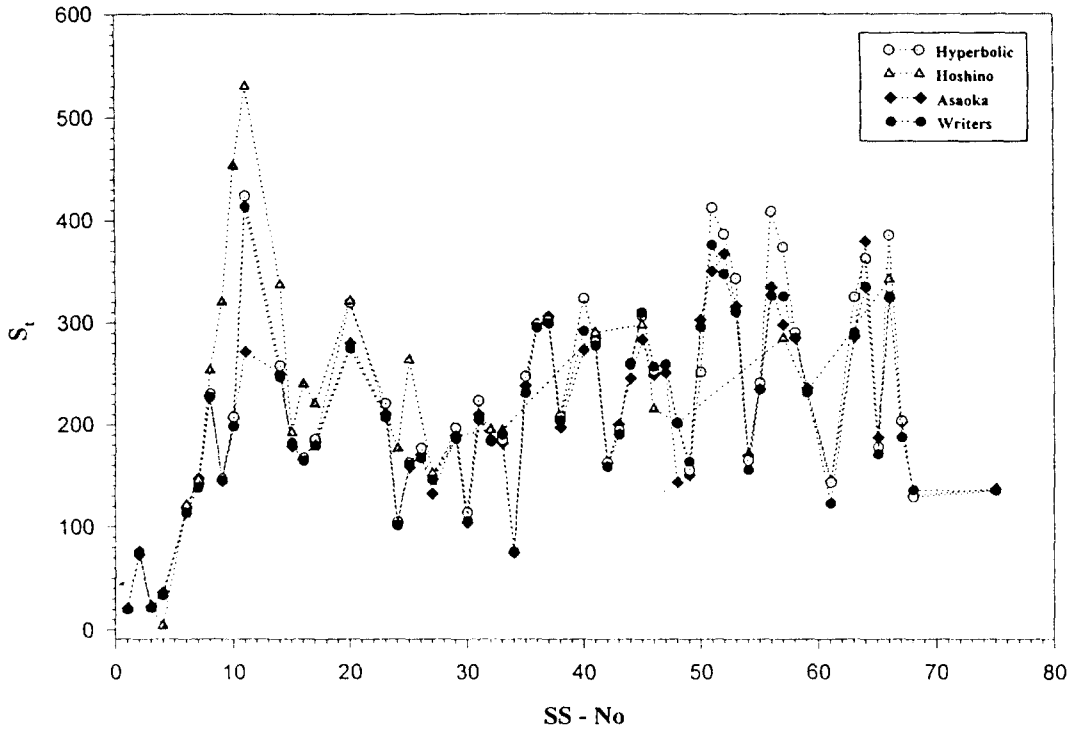


그림 10. 각종 침하예측기법에 의한 최종침하량

표 4를 관찰하면, 쌍곡선법과 Hoshino법에 의한 것이 대체로 크게 산출되고 있음을 알 수 있으나, \sqrt{s} 법에 의한 결과는 Asaoka에 의한 것과 거의 비슷한 분포양상을 나타내고 있다. 그러나, Hoshino법을 적용했을 때 58개중에서 30개를 얻을 수 없었는데, 그 이유는 Hoshino법이 지니고 있는 단점 때문이었다.

4.2.2 각종 침하예측기법에 대한 적용상의 장단점

이론상으로 연직배수공이 설치될 경우에는 예상 최종침하량이 Asaoka법에 의한 것이 제일 정확하게 예측될 수 있었으며, 다음으로 \sqrt{s} 법과 쌍곡선법의 순서이었다. 그러나, 본 대상에 직접 적용한 결과를 살펴보면 이론적인 접근과는 상이한 결과를 나타내었다. 따라서, 각종 침하예측기법에 대한 적용상의 장단점을 살펴볼 필요가 있을 것이다. 표 5는 각 방법의 장단점을 기술하고 있다.

최종침하량의 예측은 이론적인 차이 이외에 실제 적용상의 문제점에 의하여 상이한 결과를 얻을 수도 있다는 것을 알 수 있다. 따라서, 여기서 새로이 제안하고 있는 \sqrt{s} 법에 의하면 직선성이 아주 좋아서 적용상의 오차가 발생할 소지가 없으며, creep의 효과 등을 고려하면 실제 현장에 적용하는데 무리가 없을 것이고 Asaoka법과 함께 병행하여 사용하는 것이 필요하리라 사료된다.

표 5. 각종 침하예측법의 장단점

예 측 법	장 점	단 점	비 고
Asaoka법 (1978)	1차원, 3차원 압밀 및 creep효과를 고려할 수 있으며, 이론적으로 거의완벽한예측법이다(Tan, 1995, 1996).	침하계측의 단위시간이 일정해야 하는 번거로움이 있으며, 수렴지점의 위치를 결정하는데 개인오차가 발생할 수 있다.	
쌍 곡 선 법 (Tan et al, 1991)	비교적 객관성 있는 자료분석이 가능함.	경험적인 방법이며, 이론적으로 예측침하량이 20%이상으로 과대 평가됨. 가끔 직선성을 찾기가 어려움.	이론적인 보완은 Tan(1995)을 참조.
Hoshino 법 (1962)	쌍곡선법에 비하여 직선성이 향상된다.	직선의 기울기가 압밀시간이 증가함에 따라 수평으로 되어서 예측이 불가능할 경우가 종종 발생함.	
\sqrt{s} 법	직선성이 아주 좋으며 이론상의 오차도 무시할 수 있는 범위임.	경험적인 방법으로 이론적인 보완이 요구된다.	

5. 결 론

연약점토 위에 매립 또는 제방이 축조될 때 실측침하량을 이용하여 최종침하량을 예측하는 새로운 예측기법(\sqrt{s})을 제안하였으며, 이 방법을 다른 예측기법들과 함께 이론해 및 실제현장에 적용

하여 비교한 결과로부터 다음을 얻었다.

(1) \sqrt{s} 법은 쌍곡선법에서 직선성을 향상시키기 위하여 수정된 기법으로 새로이 제안되었으며, 계측빈도 및 계측시점에 무관하게 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 쌍곡선법에 비하여 이론상 작은 오차를 산출하였다.

(2) \sqrt{s} 법에 의한 최종침하량은 이론상 과대평가되고 있음에도 불구하고, 현장적용결과에서 이론상 오차를 유발하지 않는 Asaoka법에 비하여 과대평가된 경우가 많지 않으며, 비슷한 최종침하량이 산출되었다. 이러한 원인은 각종 방법이 갖는 적용상의 개인오차인 것으로 사료되었다.

(3) 현장적용결과에서 쌍곡선법과 Hoshino법에 의한 결과는 상당히 과대평가된 것으로 얻어졌으며, 특히 Hoshino법의 경우는 그 방법이 지니고 있는 문제점 때문에 과반수 이상의 침하자료에 대하여 예측이 불가하였다.

• 참고문헌

1. Asaoka, A. (1978). "Observational procedure of settlement prediction," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 18, No. 4, pp.87~101.
2. Barron, R. A (1948). "Consolidation of fine-grained soils by drain wells," Trans ASCE, Vol. 113, pp.718~754.
3. Tan T. S. et al (1991), "Hyperbolic method for consolidation analysis," JGE, ASCE, Vol. 117, No. 11, pp.1723~1737.
4. Tan, S. A. (1995). "Validation of hyperbolic method for settlement in clays with vertical drains," Soils and Foundations, JSSMFE, Vol. 35, No. 1, pp.101~113.
5. Tan, S. A. and Chew S. H. (1996). "Comparison of the hyperbolic and Asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains," Soils and Foundations, JGS, Vol. 36, No. 3, pp.31~42.
6. Hoshino(星野 和), "最新にあける基礎の諸問題", 土質學會第17回年次學術, 日本土木學會, 1962. 7. pp. 63~67.