

자중압밀지반에 대한 침하예측기법의 적용성

Applicability of Settlement Prediction Methods to Selfweight Consolidated Ground

전 상 현^{*} 전 진 용^{**} 유 남 재^{***}
Jun, Sang-Hyun Jeon, Jin-Yong Yoo, Nam-Jae

Abstract

Applicability of existing methods of predicting consolidation settlement was assessed by analyzing results of centrifuge tests modelling self-weight consolidation of soft marine clay. From extensive literature review about self-weight consolidation of soft marine clays located in southern coast in Korea, constitutive relationships of void ratio-effective stress-permeability and typical self-weight consolidation curves with time were obtained by centrifuge model experiments. For the condition of surcharge loading, exact solution of consolidation settlement curve was obtained by Terzaghi's consolidation theory and was compared with the results predicted by currently available methods such as Hyperbolic method, Asaoka's method, Hoshino's method and \sqrt{S} method. All methods were found to have their own inherent error to predict final consolidation settlement. From results of analyzing the self-weight consolidation with time by using those methods, Asaoka's method predicted the best. Hyperbolic method predicted relatively well in error range of 2~24% for the case of showing the linearity in the relationship between T vs T/S in the stage of consolidation degree of 60~90 %. For the case of relation curve of T vs T/S^2 showing the linearity after the middle stage, error range from Hoshino method was close to those from Hyperbolic method. However, Hoshino method is not able to predict the final settlement in the case of relation curve of T vs T/S^2 being horizontal. For the given data about self-weight consolidation after the middle stage, relation curve of T vs T/S from \sqrt{S} method shows the better linearity than that of T vs T/\sqrt{S} from Hyperbolic method.

키워드 : 침하예측기법, 자중압밀, 수치해석, 원심모형실험

Keywords : *Settlement Prediction Methods, Self-weight Consolidation, Numerical Analysis, Centrifuge Model Experiment*

1. 서론

최근 국토의 유용한 활용을 위하여 상대적으로 지반상태가 불량한 연약지반을 개량 사용하거나

준설매립에 의해 부지를 확장 조성하여 이용하려는 사업들이 활발히 추진되고 있다. 그렇기 때문에 매립재로 활용할 토사의 물량확보 등의 어려움으로 공사에 필요한 방대한 매립토량을 인근 해성점토를 준설하여 매립재로 대체하고 있는 실정이며, 이로 인해 형성된 고풍수비의 매립지반은 큰 변형률과 지지력을 거의 확보하지 못하는 초 연약지반으로 조성된다. 따라서 압축이 크게 유발되는 준설

* 세경대학 건설환경과 전임강사
** (주)일신하이텍 토질부 사원
*** 강원대학교 토목공학과 교수, 교신저자

매립지반의 합리적인 설계와 경제적인 시공을 위해서는 자중에 의한 압밀 침하량 예측이 중요한 사안으로 인식되고 있다.

또한, 압밀침하량과 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. Hoshino법[1], Asaoka법[2], 쌍곡선법[3], \sqrt{s} 법[4] 등의 압밀침하예측 기법은 자중압밀이 완료된 원지반에서 상해 성토하중이 작용하는 경우 최종압밀 침하량과 압밀도달시간을 성토하는 동안에 확인하기 위해 많이 사용되고 있다.

반면에 자중압밀이 진행 중인 지반에서의 최종 압밀침하량과 압밀도달시간을 예측할 필요가 있음에도 그 연구가 미비하기 때문에 자중압밀이 진행 중인 지반에서의 침하예측 기법의 적용성에 관한 연구가 요구된다.

따라서 본 논문에서는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의해 시간에 따른 침하량을 산정하여 기존 침하기법의 정확성을 알아보고, 준실토 자중압밀특성에 관한 자료를 수집하여 현재 사용하고 있는 침하예측 기법이 자중압밀이 진행 중인 지반에 적용하였을 때 그 중 어떠한 기법이 가장 적합한지 비교·분석하였다.

2. 이론적 배경

2.1 침하예측 방법

2.1.1 개요

실제 단계에서 정확한 장래 침하량을 산정하기란 매우 어렵기 때문에 실제 시공에서는 초기에 발생하는 침하 계측치를 이용하여 장래에 발생할 침하량을 예측하여 기본설계를 수정, 보완하게 된다.

2.1.2 침하예측기법

Hoshion법[1]은 침하전단변형에 의한 침하도 포함한 전침하가 시간의 평방근에 비례한다는 기본 원리에서 장래 침하량을 예측하는 방법이고, Asaoka법[2]은 Mikasa[6]의 1차원 미분방정식을 이용하여 현장 침하자료로 부터 임의의 시점에서 침하량을 구할 수 있는 도식적 방법이다. 또한, 쌍곡선법(1991)은 “침하의 평균속도는 쌍곡선을 따라 감소한다.”라는 가정아래 초기의 실측 침하량으로부터 장래침하량을 예측하는 방법이고, \sqrt{s} 법[4]은 압밀 침하량의 제곱근(\sqrt{s})과 시간(t)관계로 쌍곡선으로 가정한 방법이다.

2.2 압밀이론

이종호[7]는 간극비와 유효응력의 선형적 관계, 압밀이 진행되는 동안 일정한 투수계수, 그리고 미

소변형(Infinitesimal Strain)등의 가정을 중심으로 유도된 Terzaghi의 압밀이론식은 커다란 침하량을 보이는 연약지반의 압밀거동을 해석하는 것은 현장조건과 기본가정의 불일치로 인해 적절하지 않다고 판단되기 때문에 커다란 압밀침하량이 예상되는 연약점토의 일차원 압밀거동 해석에는 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계의 비선형 거동과 압밀에 따른 변형률의 영향이 고려된 유한변형 압밀이론의 사용이 요구된다고 하였다.

Gibson, England와 Hussey[8]는 간극의 완전포화, 유효응력법칙과 Darcy 법칙의 유효, 토립자와 간극수의 비압축성 등의 기본가정 하에 간극수와 토립자로 구성된 혼합체의 힘의 평형, 토립자와 간극수의 시간변화에 대한 질량보존을 고려한 연속 정리, 간극비와 유효응력의 구성식, 간극비와 투수계수의 구성식을 이용하여 다음과 같은 비선형 유한변형률 압밀지배방정식을 유도하였다.

$$\left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{c+1} \right] \frac{\partial(c)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w (1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

여기서, γ_s : 흙의 단위중량

γ_w : 물의 단위중량, c : 간극비

k : 투수계수, σ' : 유효응력

z : 축소 좌표, t : 시간

상기의 지배방정식의 특징은 자중에 의한 압밀 효과를 나타낸 첫 번째항(Convective Term)과 상재하중에 의한 압밀효과를 나타낸 두 번째항(Conduction Term)으로 구성되어 있으며, 시료의 두께가 적은 실내 압밀실험이나 현장조건에서 상재하중의 크기가 점토층의 자중의 크기보다 상당히 클 경우에는 두 번째항을 무시할 수 있다. 또한 축소 좌표를 사용함으로써 이동하는 경계조건 문제에서 수치해석을 보다 간단히 할 수 있는 편리함이 있다.

3. 자중압밀실험 자료 분석

3.1 개요

본 논문에서는 준실토 투기장 설계를 위해 연구되었던 국내의 남해안 지역의 준실토 침하 및 특성에 대한 자료 중 기본불성실험과 압밀실험 및 구성관계식의 자료들을 수집하여 분석하였다. (마산 해양신도시 건설공사 침하 및 자중압밀 특성연구[9]; 마산항 진입도로(1단계) 건설공사 대안설계용역 준실토 침하 및 강도특성 분석연구[10]; 부

산신항만 민자사업 1단계 토목부분 실시설계를 위한 "준설토의 침강 및 체적변화 특성연구", [11]; '98 여천확장단지사업 연약지반 시공에 따른 토질 특성 연구용역(1차)[12]; 감천항 준설매립지반의 압밀특성과 연약지반 처리공법에 관한 연구[13], 광양항 서측배후단지(1공구) 조성공사 개별조사 보고서[14]; 여수 국가산단 확장단지 1공구 3BL 조기조성 실시설계 연약지반 개량공법 설계를 위한 원심모형시험이 적용된 준설토 압밀특성 산정 연구보고서[15])

3.2 기본 물성실험

각지역에서 채취한 시료의 기본물성 실험결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 기본물성실험 결과

지역명	비중	LL(%)	PL(%)	PI(%)	분류
마산-1	2.71	59.2	29.4	29.8	CH
마산-2	2.72	94.3	39.3	55	CH
부산	2.72	47.05	26.77	20.28	CL
여천	2.78	47.88	25.45	22.43	CL
감천	2.71	55.1	27.5	27.6	CH
광양	2.7	33.8	14.8	19	CL
여수	2.72	63.86	28.91	36.65	CH

3.3 압밀실험

일정변형률 압밀실험결과와 표준압밀 시험결과를 비교한 결과 $\sigma'_c = 0.1\text{tf/cm}^2$ 이하의 낮은 응력상태에서도 비선형적인 거동을 보이고 있으며, 표준압밀시험 결과와도 간극비-유효응력-투수계수 곡선이 그림 1~2에서와 같이 일관성 있게 연결되고 있음을 알 수 있다.

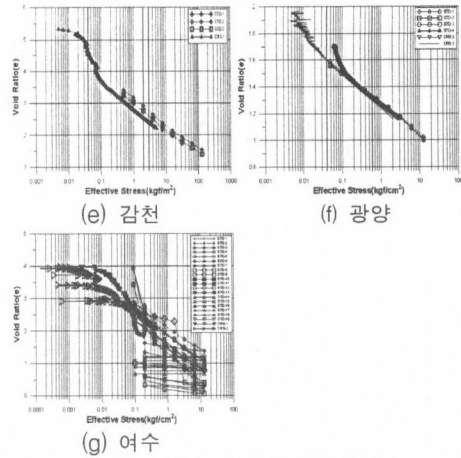
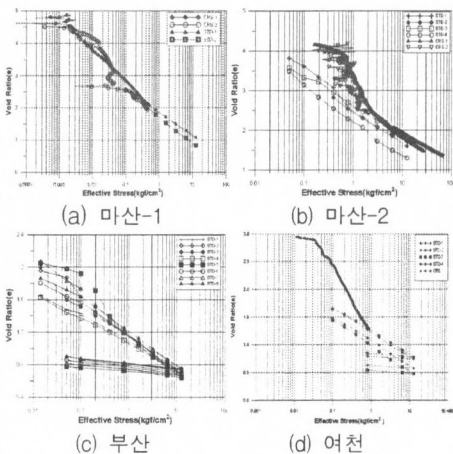


그림 1. 간극비-유효응력 관계

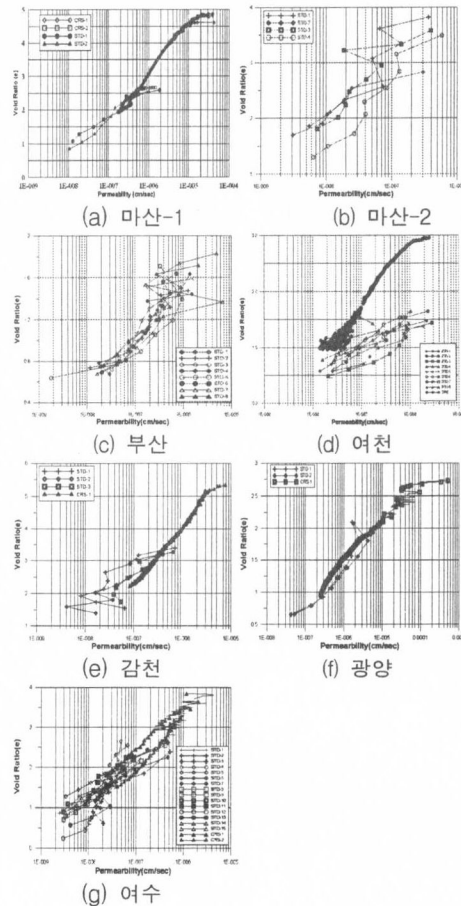


그림 2. 간극비-투수계수 관계

하중재하(Loading)시 정규압밀 부분의 곡선 기울기를 나타내는 압축지수(C_c), 하중증가에 따른 체적변화계수(m_v), 하중단계별로 \sqrt{t} 방법을 이용하

여 산정함 압밀계수(c_v)의 평균값 및 압밀계수와 $k = c_v m_v \gamma_w$ 관계식을 이용하여 투수계수를 산정한 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2. 표준압밀시험 결과

구분	체적변화계수, m_v (cm ³ /kgf)	압밀계수, c_v (cm ² /sec)	투수계수, k_v (cm/sec)	압축지수, c_c
마산-1	0.52	6.31×10^{-5}	6.86×10^{-9} $\sim 1.02 \times 10^{-7}$	0.77
마산-2	1.0×10^{-2} ~ 2.59	6.71×10^{-4} $\sim 7.62 \times 10^{-5}$	3.08×10^{-9} $\sim 5.84 \times 10^{-7}$	1.275
부산	9.35	2.0×10^{-3}	2.04×10^{-8} $\sim 2.10 \times 10^{-6}$	0.41
여천	0.51	2.0×10^{-3}	2.00×10^{-8} $\sim 2.50 \times 10^{-6}$	0.47
감천	0.70	1.7×10^{-2}	4.30×10^{-8} $\sim 6.83 \times 10^{-6}$	0.26
광양	6.17×10^{-3} $\sim 1.23 \times 10^{-1}$	4.33×10^{-4} $\sim 2.64 \times 10^{-2}$	4.53×10^{-8} $\sim 1.05 \times 10^{-6}$	0.231
여수	$3.35 \sim 0.011$	9.65×10^{-5} $\sim 9.64 \times 10^{-1}$	4.55×10^{-9} $\sim 3.05 \times 10^{-7}$	0.786

3.4 구성관계식 산정

연약지반의 자중압밀침하예측을 하기위한 본 수치해석 모델링은 Gibson, England와 Hussey[8]에 의해 유도된 유한변형률 압밀지배방정식을 적용한 것으로서 우선 유효한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계식을 표준압밀시험과 일정변형률 압밀시험 등을 통하여 비교적 작은 간극비에 대하여 획득한 자료를 기지점으로 하여 다음의 지수함수 형태의 구성관계를 지닌 것으로 가정한다.

$$\begin{cases} e = A(\sigma)^{-B} \\ k = C(e)^D \end{cases} \quad (2)$$

식 2에서 사용한 구성식 관계를 기본식으로 하여 개략적인 구성식을 조정한 다음, 식 (3)과 같은 정교한 지수함수를 사용하여 구성식을 나타낼 수 있다.

$$e = \frac{AA + BB \times \ln(\sigma)}{1 + CC \times \ln(\sigma) + DD \times (\ln \sigma)^2} \quad (3)$$

$$e = \frac{EE + FF \times \ln(K)}{1 + GG \times \ln(K) + HH \times (\ln K)^2}$$

3.3절의 결과를 바탕으로 식 (2)을 이용하여 여러 개의 구성식을 추정함 다음, 식 (3)로부터 각각의 구성식의 상수(AA~HH)값들을 유도하여 원심모형시험에서 획득한 시간경과에 따른 계면고의

변화에 관한 자료와, 유도된 상수 값을 이용하여 수치해석을 실시하여 얻은 결과를 비교하여 가장 근접한 분석결과에 대응하는 유효응력-간극비-투수계수의 구성관계를 확정할 수 있고, 지역별 구성관계식의 상수 값은 표 3에 나타내었다.

표 3. 지역별 구성관계식 상수

구성상수	마산-1	마산-2	부산	여천	감천	광양	여수
AA	-0.1963	4.12	-0.2159	-0.3456	-0.1419	2.089	2.46
BB	0.1182	-0.2614	0.1324	0.1421	0.12147	-0.0842	-0.156
CC	0.00437	0.1305	0.00516	0.00568	0.00443	0.06418	0.116
DD	2.642	-0.0058	1.998	2.483	0.01456	-0.0013	44.8
EE	11216	20.54	0.4826	0.8544	0.19179	5.2861	16.22
FF	-0.1439	1.216	-0.1377	-0.1965	-0.1066	0.2099	0.900
GG	0.03897	-0.1439	0.00564	0.01356	0.00421	-0.1025	-0.0603
HH	20.54	0.03897	8.417	11.24	4.1273	0.00436	0.0386

4. 침하예측기법 적용 분석

4.1 Terzaghi 1차원 압밀방정식에서의 침하예측기법 적용

시간경과에 따른 압밀침하량의 해를 알고 있는 상태에서 기존 침하예측기법의 최종침하량 예측경향을 알아보기 위하여 표 4와 같은 조건에서 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 침하량을 산정하였다. 산정결과 그림 3과 같은 시간에 따른 침하량 및 압밀도를 획득하였다.

표 4. 압밀이론에서의 분석을 위한 물성치

구분	G_s	e_0	$\gamma'_{(t/m^3)}$	H_0 (m)	지하수위(m)	c_c	q (t/m)	c_v (cm ² /sec)	S_f (m)
해입력치	2.69	1	0.845	20	20	0.28	10	7.0×10^{-4}	0.95

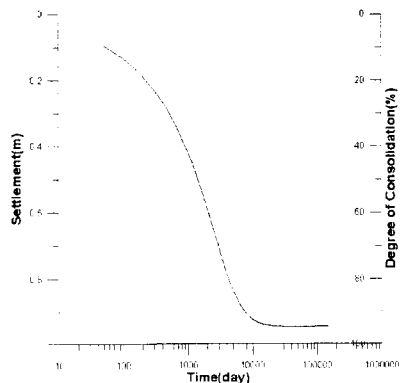


그림 3. 압밀이론에 의한 시간-침하-압밀도

표 5에서와 같이 계측자료 확보시점 즉, 분석 시작점을 압밀도 60%에서부터 10%증가했을 때의 자료로 Hoshino법의 계수 A와 k를 결정하여 최종 침하량을 예측한 결과 50%이상 과대평가하였으며, 압밀도 80%이상의 자료를 사용해도 32%정도의 상대오차로 과대평가함을 알 수 있었다.

표 5. 압밀이론에서의 Hoshino법 분석 시점에 따른 예측결과

회귀분석 적용범위	60~70%	60~80%	60~90%	80~90%
최종 침하량(m)	2.05	1.73	1.43	1.25
상대 오차(%)	116	82	50	32

회귀분석 범위를 표 6과 같이 하여 Asaoka법의 계수 k_0 와 k_1 를 결정하여 이론 최종침하량과 예측 최종침하량을 비교한 결과 8~31%의 상대오차범위로 과소평가하였지만, 다른 예측기법과는 달리 압밀도가 증가할 수 록 최종침하량을 예측하는데 있어 정확도가 증가함을 알 수 있었다.

표 6. 압밀이론에서의 Asaoka법 분석 시점에 따른 예측결과

회귀분석 적용범위	0~60%	0~70%	0~80%	0~90%
최종 침하량(m)	0.65	0.73	0.81	0.87
상대 오차(%)	31	23	15	8

분석시작점을 압밀도 60%부터 압밀도 70%, 80%, 90%도달 했을 때 쌍곡선법 계수 α , β 를 결정하여 예측한 최종침하량과 이론최종침하량을 비교한 결과 표 7에서 보는 바와 같이 전반적으로 쌍곡선법에 의한 예측 최종침하량이 압밀이론에 의해 산정한 최종침하량 0.95m에 비하여 19~23% 정도 크게 산정되었다. 이것은 쌍곡선법이 최종침하량을 예측하는데 있어 2차 압밀량을 포함하고 있어 1차압밀의 최종침하량보다 과대평가하는 경향이 있다고 Tan[16]이 설명하였다. 그렇지만 실제 현장에서는 불확실한 2차압밀량을 적용하기에는 문제가 있을 것으로 판단된다. 그래서 Tan[17]은 수정쌍곡선법을 제안 하였지만 국내에서는 적용성에 관한 연구가 미비한 실정이다.

쌍곡선법과 같은 방법으로 \sqrt{S} 법 계수 α , β 를 결정하여 최종침하량을 예측한 후 이론 최종침하량과 비교한 결과를 표 8에서와 같이 \sqrt{S} 법은 11.6~17.6%의 상대오차로 과대하게 평가하였다.

이것은 \sqrt{S} 법 또한 쌍곡선법을 응용한 방법이기에 때문에 쌍곡선법과 같은 이유에서 과대평가 되어지는 것으로 판단된다.

표 7. 압밀이론에서의 쌍곡선법 분석 시점에 따른 예측결과

회귀분석 적용범위	60~70%	60~80%	60~90%
최종 침하량(m)	1.13	1.17	1.16
상대 오차(%)	19	23	22

표 8. 압밀이론에서의 \sqrt{S} 법 분석 시점에 따른 예측결과

회귀분석 적용범위	60~70%	60~80%	60~90%
최종 침하량(m)	1.06	1.104	1.117
상대 오차(%)	11.61	16.2	17.6

위에서와 같이 기존의 침하예측기법 모두 높은 압밀도에 도달했음에도 불구하고 이론최종침하량과의 상대오차가 발생하는 것으로 보아 침하예측기법들 모두 자체의 오차가 반영된 결과라 할 수 있다.

4.4 자중압밀에서 침하예측기법 비교

구성관계식에 의한 가상의 자중압밀 시간-침하자료와 실제 원심모형실험을 통해 계측한 시간-침하 자료를 이용해 침하예측기법으로 예측한 최종침하량과 수치해석으로 산정한 최종침하량을 비교·분석 하였다.

4.4.1 가상의 자료에 의한 침하예측기법 비교

3.4절에서 구한 구성관계식에 표 9와 같이 가상의 초기 입력정수를 적용해 그림 4와 같은 가상의 자중압밀 시간-침하-압밀도의 관계를 산정한 후 쌍곡선법, Asaoka법, Hoshino법, \sqrt{S} 법으로 최종침하량을 예측하여 수치해석 최종침하량과 비교·분석하였다.

표 9. 초기 입력 상수

지역명	H_0 (m)	c_0	G_s
마산-1	10	5.42	2.71
부산	20	5.42	2.71
여천	20	5.42	2.71
감천	20	5.42	2.71

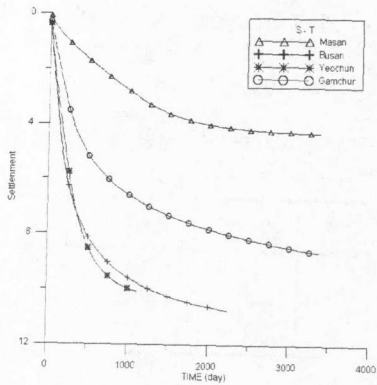


그림 4. 시간-침하곡선

그림 5~8은 위의 수치해석을 통해 구한 시간-침하의 관계를 가지고 침하예측기법인 Hoshino법, Asaoka법, 쌍곡선법, \sqrt{s} 법을 통해 최종침하량을 구하기 위해 나타낸 그림이다.

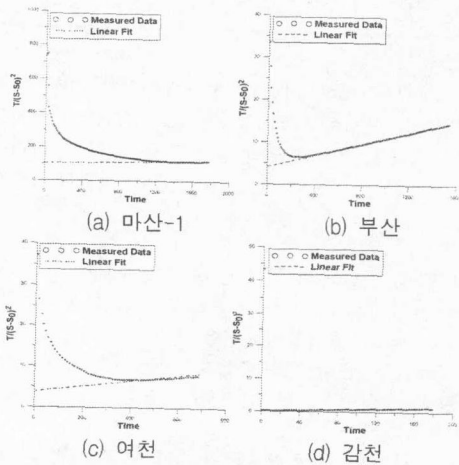


그림 5. Hoshino법

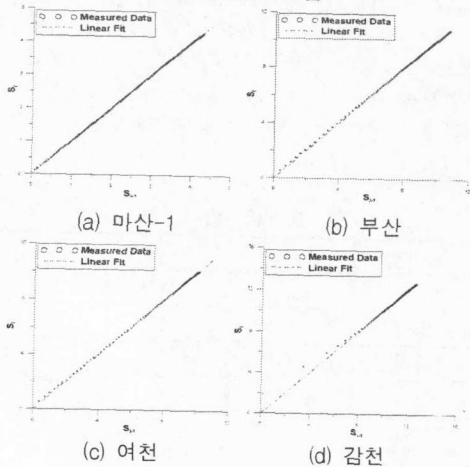


그림 6. Asaoka법

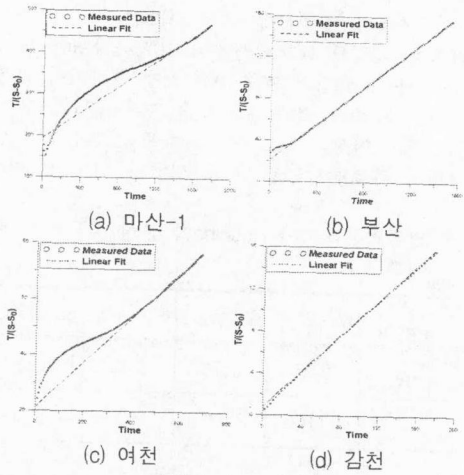


그림 7. 쌍곡선법

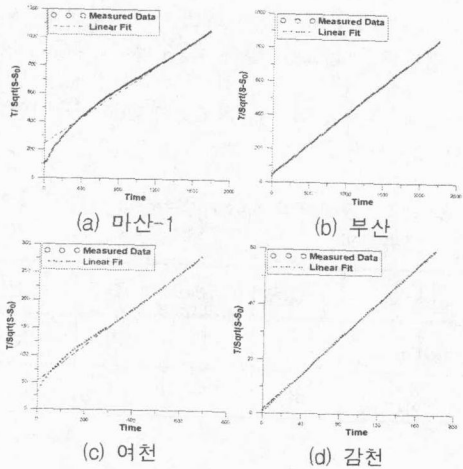


그림 8. \sqrt{s} 법

그림 9와 표 10은 가상의 자중압밀 시간-침하 자료를 이용해 소정의 도달 압밀도마다 각 침하예측기법으로 예측한 최종침하량과 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교한 결과이다.

쌍곡선법의 경우 압밀도 60~90%일 때 T와 T/S의 관계 곡선에서 후반부 직선의 직선성이 가장 좋다(Tan[17])고 하였으므로 압밀도 60%를 기점으로 압밀도 70%, 80%, 90%까지 도달한 자료를 이용해 최종침하량을 예측하여 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교 시 후반부 직선의 기울기가 일정하게 나타난 부산과 감천은 비교적 적은 상대오차 범위로 분석되었지만, 마산-1과 여천지역과 같이 후반부 직선의 기울기가 일정하지 않고 기울기가 변하는 경우에는 다른 지역에 비해 최종침하량의 상대오차가 매우 크게 분석되었다.

Asaoka법은 시간간격 5일을 적용해 예측한 최

중침하량과 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교한 결과 다른 예측기법에 비해 비교적 적은 상대오차 범위로 분석되었다.

Hoshino법에 의해 예측한 최종침하량과 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교한 결과 T와 T/S²의 관계곡선에서 후반부 직선의 기울기가 나타나지 않아 최종침하량을 예측할 수 없거나 80%이상의 높은 압밀도에서 직선의 기울기가 나타나 압밀 초기에는 최종침하량을 예측할 수 없는 경우가 발생하였다.

\sqrt{s} 법은 예측한 최종침하량과 구성관계식에 의해 산정된 최종침하량과 비교한 결과 그림 8과 같이 쌍곡선법보다 후반부 직선의 직선성이 향상된 마산-1과 여천의 경우 최종침하량의 상대오차범위가 쌍곡선법에 비해 비교적 적게 분석되었다.

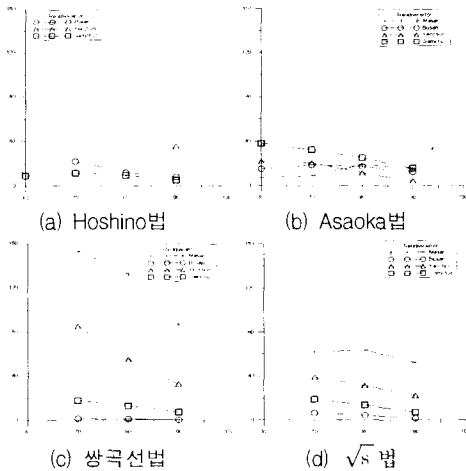


그림 9. 각압밀도별 최종침하량 상대오차

4.2.2 원심모형실험 계측자료 비교

4.4.1절과 같은 방법으로 원심모형 실험을 통해 계측한 자중압밀 시간-침하자료를 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 침하예측기법으로 예측한 최종침하량과 비교 분석 하여 표 11과 같은 결과를 도출하였다.

표 11에서와 같이 각 지역별로 수치해석에 의한 최종침하량과 예측 최종침하량을 비교한 결과 쌍곡선법은 0.2~86.2%, Hoshino법은 최종침하량을 예측할 수 없거나 0.3~146%의 상대오차 범위를 나타내었고, Asaoka법은 0.1~34.5%, \sqrt{s} 법은 0.1~41.6%의 상대오차 범위로 분석 되었다. 이로써 침하예측 기법중 Asaoka법이 가장 적은 상대오차 범위로 예측함을 알 수 있었다.

표 10. 각 압밀도별 침하예측법을 통한 최종침하량의 상대오차비교

	수치 해석 (S _f)	쌍곡선법							
		60~70%		60~80%		60~90%		80~90%	
		S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)
마산	4.29	10.87	153.4	9.99	132.9	8.01	86.67	6.49	51.21
부산	11.48	11.28	1.32	11.29	1.26	11.43	0.04	-	-
여천	10.39	19.24	85.2	16.15	55.47	13.8	32.77	12.82	23.4
강천	12.8	10.52	17.83	11.12	13.16	11.90	7.02	-	-

	수치 해석 (S _f)	Asaoka 법							
		0~60%		0~70%		0~80%		0~90%	
		S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)
마산	4.29	3.98	7.20	4.68	9.00	5.09	18.58	4.96	15.64
부산	11.48	9.70	15.10	9.28	18.80	9.48	17.06	10.03	12.21
여천	10.39	12.64	21.62	12.53	20.64	11.60	11.61	10.85	4.38
강천	12.8	7.94	37.94	8.67	32.31	9.63	24.76	10.81	15.56

	수치 해석 (S _f)	\sqrt{s} 법					
		60~70%		60~80%		60~90%	
		S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)
마산	4.29	6.954	62.098	7.024	63.73	6.546	52.587
부산	11.48	10.697	6.413	10.924	4.427	11.234	1.715
여천	10.39	14.46	39.172	13.649	31.367	12.707	22.3
강천	12.8	10.372	18.969	11.025	13.867	11.858	7.359

	수치 해석 (S _f)	Hoshino 법					
		60~70%		60~80%		60~90%	
		S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)	S	상대 오차 (%)
마산	4.29	-	-	-	-	-	-
부산	11.48	13.95	22.05	12.81	12.1	12.32	7.81
	10.39	-	-	-	-	14.08	35.49
여천	10.39	-	-	-	-	14.08	35.49
	12.8	11.61	9.27	11.31	11.63	11.55	9.77
강천	12.8	11.61	9.27	11.31	11.63	11.55	9.77

표 11. 원심모형시험을 통한 역해석 결과와 예측 최종침하량 비교

실험 조건	수치 해석 (S_r)	광양							
		쌍곡선법		Asaoka법		Hoshino법		\sqrt{s} 법	
		예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)
150%-18cm-50g	4.99	4.29	14.1	4.17	16.4	4.28	14.3	4.52	9.84
200%-22.5cm-40g	5.21	5.22	0.17	5.06	2.90	5.22	0.27	5.47	4.98
100%-20cm-50g	6.96	6.88	1.16	6.83	1.78	6.88	1.14	6.97	0.14

실험 조건	수치 해석 (S_r)	마산-2							
		쌍곡선법		Asaoka법		Hoshino법		\sqrt{s} 법	
		예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)
200%-20cm-50g	4.06	5.57	37.3	4.63	14.1	5.62	38.4	5.54	36.4
200%-10cm-30g	0.94	1.43	52.6	1.26	34.5	1.39	48.4	1.30	39.2
400%-20cm-50g	6.42	6.69	4.19	6.41	0.17	6.69	4.10	6.37	0.81

실험 조건	수치 해석 (S_r)	여수							
		쌍곡선법		Asaoka법		Hoshino법		\sqrt{s} 법	
		예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)	예측 S_r	상대 오차 (%)
142%-12.5cm-40g	1.297	2.07	59.5	1.31	0.85	-	-	1.47	13.3
206%-10cm-40g	1.599	1.90	18.6	1.6	0.06	1.98	23.7	2.01	25.9
122%-12.5cm-40g	0.995	1.24	24.4	0.96	3.32	1.50	50.4	1.07	7.94
198%-10cm-40g	1.536	2.86	86.2	1.57	2.21	3.78	145.96	2.18	41.6

5. 결론

본 논문에서는 기존의 침하량예측기법인 Hoshino법, Asaoka법, 쌍곡선법, \sqrt{s} 법의 자중압밀 침하량예측의 적용성을 연구하기 위하여 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 성토하중조건에서의 최종침하량을 예측하여 그 결과를 비교 분석하였고, 자중압밀에 있어 가상의 자료와 실제 원심모형 실험에 의한 결과를 이용해 최종침하량을 예측하고 기존의 침하량 예측기법을 사용하여 압밀도별 최종침하량 산정결과를 상호 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 기존의 침하예측기법들에 의한 예측침하량이 Terzaghi 압밀이론에 의해 산정된 최종침하량의 정해에 비해 회귀분석을 하는 시점에 따라 오차를 나타나는 것으로 보아 침하예측기법들이 기본적으로 오차를 가지고 있는 것을 확인하였다.

2) 쌍곡선법은 자중압밀에서 T와 T/S의 관계 곡선에서 압밀도 60~90%사이에서 직선이 잘 나타나는 경우 예측최종침하량과 수치해석에 의한 최종침하량과의 상대오차가 약 2~24%정도로 적은 경우도 있었지만 압밀도 60~90% 사이에 직선의 기울기가 변하는 경우 상대오차가 약 86~153% 정도로 과대 예측하는 경우도 발생하여 예측된 자료에 따라 오차 분포 범위가 매우 커서 신뢰성이 감소함을 확인하였다.

3) Asaoka법은 침하예측 단위시간을 일정하게 보정하는 문제점이 있지만 다른 예측기법들에 비해 자중압밀에 있어서 최종침하량 예측 결과의 상대오차 범위가 약1~35%정도로 가장 신뢰성이 있음을 알 수 있었다.

4) Hoshino법에서 T와 T/S²관계 곡선에서 후반부가 선형적인 경우 상대오차 범위가 쌍곡선법의 결과와 유사함을 알 수 있었고, 직선의 기울기가 시간이 증가하면서 수평이 되는 경우는 최종침하량 예측이 불가능함을 확인하였다.

5) 동일한 압밀침하 자료에서 쌍곡선법의 T와 T/S와의 관계곡선보다 \sqrt{s} 법의 T와 T/ \sqrt{s} 와의 관계곡선이 후반부에서 선형성이 더 좋게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 星野 和, “最新にあける基礎の諸問題”, 土質學會誌, Vol. 47, No. 7. pp. 63~67, 1962.
- [2] Asaoka, A., “Observational Procedure of Settlement Prediction”, *Soils and Foundation*, Vol. 18, No. 4, pp. 87-101, 1978.
- [3] Tan, T. S., Inoue, T. and Suematsu, N., “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 117, No. 11, pp 1723-1737, 1991.
- [4] 최관희, “연약점토지반위의 성토시 적용된 침하예측법에 대한 비교 연구”, *동아대학교 산업대학원*, 1997.
- [5] Terzaghi, K., , *Theoretical Soil Mechanics*, Willy, New York, 1943.

- [6] Mikasa, M., "The Consolidation of Soft Clay - A Comparison between Two Theory and Its Application", *Reprint from Civil Engineering in Japan*, JSCE, pp. 21-26, 1963.
- [7] 이종호, "준설매립지반의 압밀거동에 관한 수치해석 및 실험적 연구", 강원대학교 대학원, 2000.
- [8] Gibson, R. E., England, G. L., and Hussey, M. J. L., "The Theory of One-Dimensional Consolidation of Saturated Clays, I. Finite Non-Linear Consolidation of Thin Homogeneous Layers", *Geotechnique*, Vol. 17, pp. 261-273, 1967.
- [9] 유남재 등, "마산 해양신도시 건설공사 침강 및 자중압밀 특성 연구보고서", 대한토목학회, 2005.
- [10] 유남재 등, "마산항 진입도로(1단계) 건설공사 대안설계용역 준설토 침하 및 강도특성 분석연구보고서", 대한토목학회, 2007.
- [11] 유남재 등, "부산신항만 민자사업 1단계 토목부분 실시설계를 위한 준설토의 침강 및 체적변화 특성연구보고서", 강원대학교 산업기술연구소, 1998.
- [12] 유남재 등, "'98 여천확장단지사업 연약지반 시공에 따른 토질특성 연구보고서", 대한토목학회, 1999.
- [13] 유남재 등, "감천항 준설매립지반의 압밀특성과 연약지반 처리공법에 관한 연구보고서", 강원대학교 산업기술연구소, 2000.
- [14] 유남재 등, "광양항 서측배후단지 (1공구) 조성공사 개별조사 보고서", 강원대학교 산학협력단, 2007.
- [15] 유남재 등, "여수 국가산단 확장단지 1공구 3BL 조기조성 실시설계 연약지반 개량공법 설계를 위한 원심모형시험이 적용된 준설토 압밀특성 산정 연구보고서", 한국수자원공사, 2006.
- [16] Tan, S. A., "Ultimate Settlement by Hyperbolic Plot for Clays with Vertical Drains", *ASCE*, Vol. 119, No. 5, pp. 950-957, 1993.
- [17] Tan, S. A., "Validation of Hyperbolic Method for Settlement in Clays with Vertical Drains", *Soils and Foundations*, *JSSMFE*, Vol. 35, No. 1, pp. 101-113, 1995.