

준설매립지반의 압밀침하에 대한 쌍곡선 침하예측기법의 적용성 연구

A Study on the Applicability of Hyperbolic Settlement Prediction Method to Consolidation Settlement in the Dredged and Reclaimed Ground

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

Abstract

Applicability of hyperbolic settlement prediction method to consolidation settlement in the dredged and reclaimed ground was assessed by analyzing results of centrifuge tests modelling self-weight consolidation of soft marine clay. From 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 analyzing centrifuge model experiments. For the condition of surcharge loading, exact solution of consolidation settlement curve obtained by using Terzaghi's consolidation theory was compared with results predicted by the hyperbolic method. It was found to have its own inherent error to predict final consolidation settlement. From results of analyzing the self-weight consolidation with time by using this method, it predicted relatively well in error range of 0.04~18% for the case of showing the linearity in the relationship between T vs T/S in the stage of consolidation degree of 60~90 %. However, it overestimated the final settlement with large errors if those relation curves were nonlinear.

키워드 : 쌍곡선 침하예측기법, 자중압밀, 원심모형실험

Keywords : *Hyperbolic Settlement Prediction Method, Self-weight Consolidation, 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 해상점토를 준설하여 매립재로 대체하고 있는 실정이며, 이로 인해 형성된 고풍수비의 매립지반은 큰 변형률과 지지력을 거의 확보하지 못하는 초 연약지반으로 조성된다. 따라서 압축이 크게 유발되는 준설

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 토목공학과, 박사과정
*** 강원대학교 대학원 토목공학과, 석사과정

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 예측기법인 쌍곡선법(1991)이 주로 사용되고 있으며, 이는 자중압밀이 완료된 원지반에서 상재 성토하중이 작용하는 경우 최종압밀 침하량과 압밀도달시간을 성토기간에 확인하기 위해 많이 사용되고 있다.

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

따라서 본 논문에서는 Terzaghi의 1차원 압밀이론에 의해 시간에 따른 침하량을 산정하고 쌍곡선법을 사용하여 예측 비교함으로써 그의 정확성을 조사하고, 국내 남해안지역의 준설 매립토의 자중압밀특성에 관한 자료를 수집하여 쌍곡선법에 의하여 예측하고 결과를 비교분석하여 본 방법이 자중압밀이 진행 중인 지반에 적용하였을 때 타당한지를 조사하였다.

2. 이론적 배경

2.1 침하예측 방법

2.1.1 개요

설계 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

쌍곡선법은 “침하의 평균속도는 쌍곡선을 따라 감소한다.”라는 가정아래 초기의 실측 침하량으로부터 장래침하량을 예측하는 방법으로써 Tan(1991)은 Terzaghi 압밀이론을 포함한 T_v 와 U_v 가 그림 1과 같이 T_v/U_v 와 T_v 로 도시되었을 때 초기에는 곡선이다가 T_v 가 0.25에서 0.9의 범위에서는 직선에 가까워진다. 이는 압밀도 60%~90% 구간을 말하며, 이 선의 평균 기울기는 0.824라고 하였다.

T_v/U_v 와 T_v 의 관계 곡선에서 직선부분을 다음 식과 같이 표시할 수 있다.

$$\frac{T_v}{U} = \alpha T_v + \beta \quad (1)$$

이식을 전개하면, 다음 식들로 표현할 수 있다.

$$\alpha T_v U + \beta U - T_v = 0 \quad (2)$$

$$\left(U - \frac{1}{\alpha}\right) \left(T_v + \frac{\beta}{\alpha}\right) = \frac{-\beta}{\alpha^2} \quad (3)$$

그러므로 식 1은 식 3과 같이 직각쌍곡선(rectangular hyperbola)의 식으로 표현된다.

최종침하량은 $1/\alpha$ 로 나타낼 수 있고, 이것은 식 1의 기울기의 역수이다. 각 T_v 마다의 침하량은 식 1로부터 쉽게 구할 수 있고, 많은 데이터가 있다면 쌍곡선과 비슷한 거동을 하는 것을 알 수 있다. 이때 α, β 를 쉽게 측정할 수 있다.

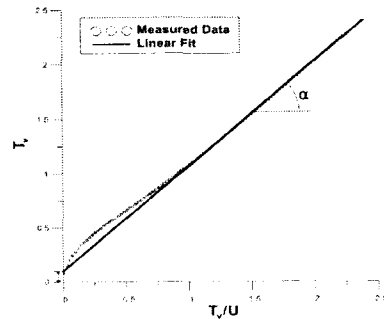


그림 1 T_v/U_v 와 T_v 의 관계곡선

2.2 압밀이론

이종호(2000)는 간극비와 유효응력의 선형적 관계, 압밀이 진행되는 동안 일정한 투수계수, 그리고 미소변형(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(1967)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 연속정리, 간극비와 유효응력의 구성식, 간극비와 투수계수의 구성식을 이용하여 다음과 같은 비선형 유한변형률 압밀지배방정식을 유도하였다.

$$\left[\frac{\gamma_s}{\gamma_w} - 1 \right] \frac{d}{de} \left[\frac{k(e)}{e+1} \right] \frac{\partial(e)}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{k(e)}{\gamma_w(1+e)} \frac{d\sigma'}{de} \frac{\partial e}{\partial z} \right] + \frac{\partial e}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

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 압밀시험이나 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. 자중압밀시험 자료 분석

3.1 개요

본 논문에서는 준설토 투기장 실계를 위해 연구되었던 국내의 남해안 지역의 준설토 킵하 및 특성에 대한 자료 중 기본물성실험과 압밀실험 및 구성관계식의 자료들을 수집하여 분석하였다. (마산 해양신도시 건설공사 침강 및 자중압밀 특성연구, 2005; 부산신항만 민자사업 1단계 토목부분 실시실계를 위한 “준설토의 침강 및 체적변화 특성연구”, 1998; '98 여천확장단지사업 연약지반 시공에 따른 토질특성 연구용역(1차), 1999; 감천항 준설패립지반의 압밀특성과 연약지반 처리공법에 관한 연구, 2000)

3.2 기본 물성실험

각지역에서 채취한 시료의 기본물성 실험결과과는 표 1에 나타내었다.

표 1 기본물성실험 결과

지역명	비중	LL(%)	PL(%)	PI(%)	분류
마산	2.71	59.2	29.4	29.8	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

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 2~3에서와 같이 일관성 있게 연결되고 있음을 알 수 있다.

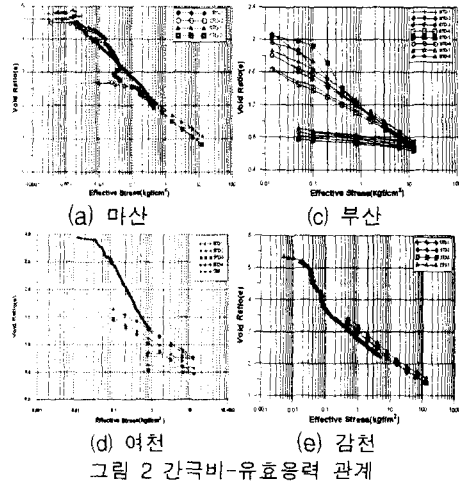


그림 2 간극비-유효응력 관계

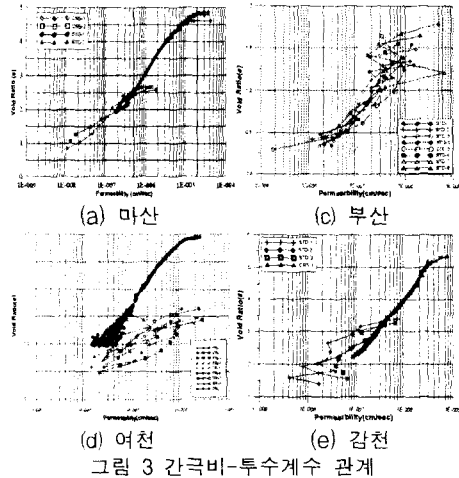


그림 3 간극비-투수계수 관계

하중재하>Loading)시 정규압밀 부분의 곡선 기울기를 나타내는 압축지수(C_c), 하중증가에 따른 체적변화계수(m_v), 하중단계별로 \sqrt{t} 방법을 이용하여 산정한 압밀계수(c_v)의 평균값 및 압밀계수와 $k = c_v m_v \gamma_w$ 관계식을 이용하여 투수계수를 산정한 결과를 표 2에 나타내었다.

표 2 표준압밀실험 결과

구분	체적변화계수, m_v (cm^2/kgf)	압밀계수, c_v (cm^2/sec)	투수계수, k_v (cm/sec)	압축지수, c_c
마산	0.52	6.31×10^{-5}	6.86×10^{-9} ~ 1.02×10^{-7}	0.77
부산	9.35	2.0×10^{-3}	2.04×10^{-8} ~ 2.1×10^{-6}	0.41
여천	0.51	2.0×10^{-3}	2.0×10^{-8} ~ 2.5×10^{-6}	0.47
감천	0.70	1.7×10^{-2}	4.30×10^{-8} ~ 6.83×10^{-6}	0.26

3.4 구성관계식 산정

연약지반의 자중압밀침하예측을 하기위한 본 수치해석 모델링은 Gibson, England와 Hussey(1967)에 의해 유도된 유효변형률 압밀지배방정식을 적용한 것으로써 우선 유효한 간극비-유효응력, 간극비-투수계수의 구성관계식을 표준압밀시험과 일경변형률 압밀실험 등을 통하여 비교적 작은 간극비에 대하여 획득한 자료를 기지점으로 하여 다음의 지수함수 형태의 구성관계를 지닌 것으로 가정한다.

$$\begin{cases} e = A(\sigma)^{-B} \\ k = C(e)^D \end{cases} \quad (5)$$

식 5에서 사용한 구성식 관계를 기본식으로 하여 개략적인 구성식을 조성한 다음, 식 6과 같은 정교한 지수함수를 사용하여 구성식을 나타낼 수 있다.

$$e = \frac{AA + BB \times \ln(\sigma)}{1 + CC \times \ln(\sigma) + DD \times (\ln \sigma)^2} \quad (6)$$

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

3.3절의 결과를 바탕으로 식 5을 이용하여 여러 개의 구성식을 추정한 다음, 식 6로부터 각각의 구성식의 상수(AA~HH)값들을 유도하여 원심모형 실험에서 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	부산	여천	감천
AA	-0.1963	-0.2159	-0.3456	-0.1419
BB	0.1182	0.1324	0.1421	0.12147
CC	0.00437	0.00516	0.00568	0.00443
DD	2.642	1.998	2.483	0.01456
EE	11216	0.4826	0.8544	0.19179
FF	-0.1439	-0.1377	-0.1965	-0.1066
GG	0.03897	0.00564	0.01356	0.00421
HH	20.54	8.417	11.24	4.1273

그림 4는 구성관계식을 가지고 수치해석과 원심모형실험 결과와 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 초기에는 실험값과 수치해석 값이 다소 차이를 보이지만 시간이 지날수록 상당히 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

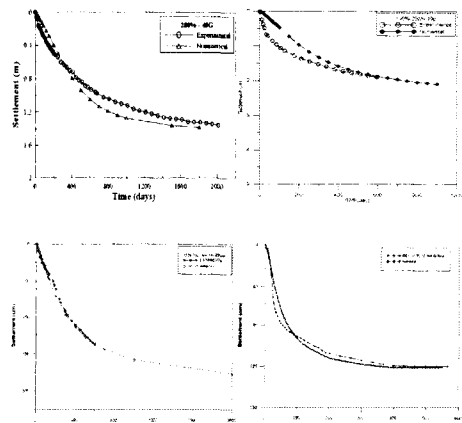


그림 4. 원심모형 실험결과와 수치해석

4. 침하예측기법 적용 분석

4.1 Terzaghi 1차원 압밀방정식에서의 쌍곡선법 적용

시간경과에 따른 압밀침하량의 해를 알고 있는 상태에서 현재 많이 사용되고 있는 쌍곡선법의 최종침하량 예측경향을 알아보기 위하여 표 4와 같은 조건에서 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 침하량을 산정하였다. 산정결과 그림 5과 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 tf/m	c_v (cm ² /sec)	S_r (m)
해입력치	2.69	1	0.845	20	20	0.28	10	7.0×10^{-7}	0.95

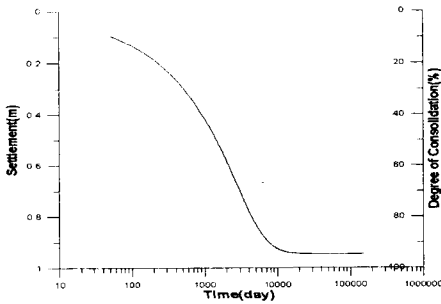


그림 5 압밀이론에 의한 시간-침하-압밀도

분석시작점을 압밀도 60%부터 압밀도 70%, 80%, 90% 도달했을 때 쌍곡선법 계수 α , β 를 결정하여 예측한 최종침하량과 이론최종침하량을 비교한 결과 표 5에서 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(1993)이 설명하였다. 그렇지만 실제 현장에서는 불확실한 2차압밀량을 적용하기에는 문제가 있을 것으로 판단된다.

Tan (1995)은 연직배수제가 설치된 지반에서는 U_{60} 과 직선기울기 β 가 배수제의 간격 비, 압밀계수 비(c_h/c_v), 연직-횡 방향 배수거리 비(일면 배수 시)등 세 가지의 무차원 변수에 영향을 받는다고 하고, 이를 고려하여 구한 계수 α 와 초기 직선기울기를 이용하여 총 침하량을 산정할 수 있는 수정쌍곡선법을 제안하였지만 국내에서는 적용성에 관한 연구가 미비한 실정이다.

표 5 압밀이론에서의 쌍곡선법 분석 시점에 따른 예측결과

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

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

4.2 자중압밀에서 침하예측기법 비교

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

4.2.1 가상의 자료에 의한 침하예측기법 비교

3.4절에서 구한 구성관계식에 표 6과 같이 가상의 초기 입력정수를 적용해 그림 6과 같은 가상의 자중압밀 시간-침하-압밀도의 관계를 산정한 후 쌍곡선법을 사용하여 최종침하량을 예측한 후 수치해석 최종침하량과 비교·분석하였다.

표 6 초기 입력 상수

지역명	H_0 (m)	e_0	G_s
마산	10	5.42	2.71
부산	20	5.42	2.71
여천	20	5.42	2.71
감천	20	5.42	2.71

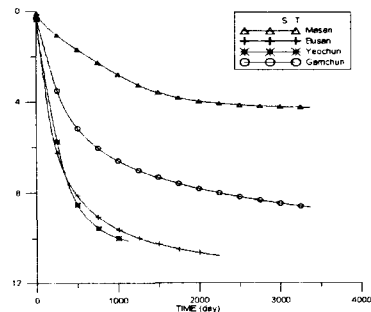


그림 6 시간-침하곡선

그림 7은 위의 수치해석을 통해 구한 가상의 자중압밀 시간-침하의 관계를 가지고 침하예측기법인 쌍곡선법을 통해 최종침하량을 구하기 위해 나타낸 그림이다.

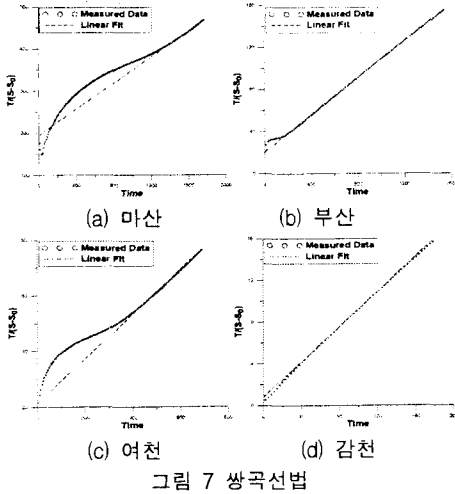


그림 8과 표 7은 가상의 자중압밀 시간-침하 자료를 이용해 소정의 도달 압밀도마다 쌍곡선법을 이용해 예측한 최종침하량과 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교한 결과이다.

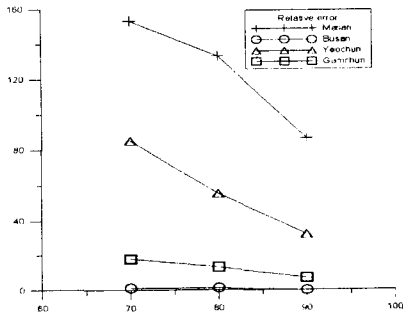


그림 8 도달 압밀도별 쌍곡선법의 최종침하량 상대오차

표 7 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
감천	12.8	10.52	17.83	11.12	13.16	11.90	7.02	-	-

쌍곡선법의 경우 압밀도 60~90%일 때 T와 T/S의 관계 곡선에서 후반부 직선의 직선성이 가장 좋다(Tan, 1996)고 하였으므로 압밀도 60%를 기점으로 압밀도 70%, 80%, 90%까지 도달한 자료를 이용해 최종침하량을 예측하여 구성관계식을 이용해 산정한 최종침하량과 비교한 결과 후반부 직선의 기울기가 압밀 초기부터 일정하게 나타난 부산과 감천은 각각 0.04~1.32%, 7.02~17.83%의 비교적 적은 상대오차 범위로 분석되었지만, 후반부 직선의 기울기가 일정하지 않고 압밀이 진행될수록 기울기가 변하는 마산-1과 여천지역은 각각 86.67~153.4%, 32.77~85.2%의 상대오차 범위로 다른 지역에 비해 최종침하량의 상대오차가 매우 크게 분석되었으며, 압밀도 80%이상의 자료를 적용하였음에도 불구하고 23%이상의 상대오차로 분석되었다.

5. 결론

본 논문에서는 준설패립지반에서 자중압밀 침하량을 예측하기 위하여 일반 성토하중 압밀침하량 예측에서 많이 사용되고 있는 쌍곡선의 예측기법을 사용하여 그의 적용성을 연구하였다. 본 예측기법의 이론적 타당성을 확인하기 위하여 Terzaghi 1차원 압밀이론에 의한 성토하중조건에서의 최종침하량을 이론적으로 산정하고 본 기법을 사용하여 예측결과와 비교 분석하였고, 자중압밀침하에 있어 현장조건을 고려한 가상의 자료를 이용하여 최종침하량을 산정하고 쌍곡선법을 사용하여 압밀도별 최종침하량 예측결과를 상호 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

쌍곡선법에 의한 예측최종침하량이 Terzaghi 압밀이론에 의해 산정된 최종침하량의 정해에 비해 회귀분석을 하는 시점에 따라 오차를 나타내는 것으로 보아 쌍곡선법이 기본적으로 오차를 가지고 있는 것을 확인하였으며 쌍곡선법은 자중압밀에서 T와 T/S의 관계 곡선에서 압밀도 60~90% 사이에서 직선이 잘 나타나는 경우 예측최종침하량과 수치해석에 의한 최종침하량과의 상대오차가 약 0.04~18% 정도로 적은 경우도 있었지만 압밀도 60~90% 사이에 직선의 기울기가 변하는 경우 상대오차가 약 33~153% 정도로 과대 예측하는 경우도 발생하여 계측된 자료에 따라 오차 분포 범위가 매우 커서 신뢰성이 감소함을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] 강원대학교, "부산신항만 민자사업 1단계 토목부분 실시설계를 위한 준설토의 침강 및 체

- 적변화 특성연구보고서”, 강원대학교 산업기술연구소, 1998.
- [2] 강원대학교, “98 여천확장단지사업 연약지반 시공에 따른 토질특성 연구보고서”, 대한토목학회, 1999.
 - [3] 강원대학교, “감천항 준설매립지반의 압밀특성과 연약지반 처리공법에 관한 연구보고서”, 강원대학교 산업기술연구소, 2000.
 - [4] 강원대학교, “마산 해양신도시 건설공사 침강 및 자중압밀 특성 연구보고서”, 대한토목학회, 2005.
 - [5] 이종호, “준설매립지반의 압밀거동에 관한 수치해석 및 실험적 연구”, 강원대학교 대학원, 2000.
 - [6] 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.
 - [7] Terzaghi, K., *Theoretical Soil Mechanics*, Willy, New York, 1943.
 - [8] Tan. T. S., Inoue, T. and Suematsu, N., “Hyperbolic Method for Consolidation Analysis”, *J. Geotech. Engrg., ASCE*, Vol. 117, No. 11, pp 1723-1737, 1941.
 - [9] Tan, S. A., “Ultimate Settlement by Hyperbolic Plot for Clays with Vertical Drains”, *ASCE*, Vol. 119, No. 5, pp. 950-957, 1943.
 - [10] 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, 1945.