

1차와 2차 침하를 고려한 압밀침하량 계산식의 제안

Calculation of Consolidation Settlement considering Primary and Secondary Settlement

이 달 원* · 정 성 규(충남대)
Lee, Dal-Won · Jeong, Seong-Gyu

Abstract

In this study, it was proposed that a modified equation for estimating consolidation settlement on soft clay ground, which separate total settlement into primary and secondary settlement equation. The settlement by the proposed equation and by the measured settlements from laboratory model test was compared and verified for its application. It was appeared that the proposed equation from the laboratory model test approached to be more realistic comparing to the result of Terzaghi's equation.

From the above application, it was concluded that the final settlement prediction by the Hyperbolic, Asaoka methods is needed to measure the initial period of settlement but the proposed equation could be much applicable in the lacking condition of measured data of the initial period.

I. 서 론

우리나라의 경제규모 확대에 따라 증가하는 공단, 항만, 공항, 주거단지 등 토지수요에 부응하기 위하여 지리적 입지조건 및 공학적 성질면에서 열악한 지반조건을 가진 해안지역의 개발이 요구되고 있다. 지반조사나 토질시험결과를 이용한 압밀침하량은 현장에서 발생한 실제침하량과 큰 차이를 나타내는 경우가 많다. 예측법에 의한 예측침하의 해석결과도 실제침하량과는 일치하지 않고, 어떤 예측법도 현장의 압밀과정에서 어느 시점, 어떤 자료를 어떻게 이용하였는가에 따라서 그 결과가 달라진다. 압밀침하량 산정방법에 포함된 문제점과 함께 이론적으로는 총침하량을 즉시침하량, 1차 압밀침하량, 2차 압밀침하량으로 구분하였으나, 실제침하량을 산정할때는 이를 구분하는 것이 곤란하므로 정확한 침하량의 산정이 어렵다. 본 연구에서는 연약지반의 압밀침하를 예측하기 위하여 기존에 적용하였던 Terzaghi 1차원 압밀이론식을 표준압밀시험방법으로부터 1차 압밀과 2차 압밀로 구분하여 침하량 예측을 위한 새로운 이론식을 유도하고 실내모형시험에 의하여 적용성을 검증하였다.

II. 압밀침하량 산정식의 제안

표준압밀시험에서 일정하중을 재하하는 경우 점토의 압밀량은 공극수압의 변화에만 관계되는 Terzaghi의 1차원 압밀에 해당되는 유효응력에 관한 부분과 시간의 영향만을 받고 공극수압과는 무관한 2차 압밀에 관한 부분으로 구분된다. 1차 압밀 후 2차 압밀이 발생한다면 1차 압밀에 의한 공극비의 변화량은 1차압밀비(r)로부터 계산되고, 2차 압밀에 대한 공극비의 변화량을 계산 할 수 있다. 그러나 상기와 같은 현상은 재하 초기부터 동시에 발생하게 된다. 따라서 1차 압밀과 2차 압밀을 분리하기 위하여 표준압밀시험에 의해 하중을 분할재하 하고 각 하중에서 재하시간을 24시간 재하할 경우의 공극비-압밀하중 곡선으로부터 압밀정수를 구하여야 한다.

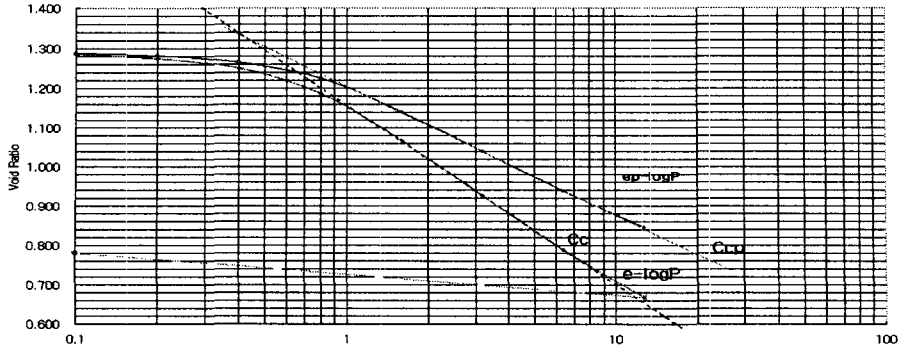


Fig. 1 $e - \log P$ and $e_p - \log P$ curve

Fig. 1은 표준압밀시험으로부터 24시간 재하하였을 경우 $e - \log P$ 곡선과 1차 압밀종료시의 공극비를 구한 다음 하중 P 에 대하여 플로트한 $e_p - \log P$ 곡선을 나타낸 것이다.

$e - \log P$ 곡선에서 구한 압축지수(C_c)값은 $e_p - \log P$ 곡선에서 구한 압축지수(C_{cp})보다 크기 때문에 압밀침하량이 크게 예측되는 원인이 된다. 따라서, 정규압밀상태에서 Terzaghi 1차 압밀침하량공식 중 압축지수는 $e_p - \log P$ 곡선으로부터 다음과 같이 수정할 수 있다.

$$c_{cp} = \Delta e / \log (p_2 / p_1) \dots \dots \dots (1)$$

2차 압축지수(C_{α})는 Mesri 등의 제안방법에 따라 표준압밀시험 자료로부터 구하였다. 이상과 같은 식들을 고려하여 표준압밀시험방법으로부터 1차 압밀과 2차 압밀을 구분하여 각각 압밀정수를 구하고, 2차 압밀을 고려한 새로운 압밀침하량 이론식을 유도한 결과 다음과 같다.

$$S = \frac{C_{cp}}{1 + e_0} \cdot H \cdot \log \left(\frac{P_0 + \Delta P}{P_0} \right) \cdot U(t) + \frac{C_{\alpha}}{1 + e_p} \cdot H \cdot \log \left(\frac{t}{t_p} \right) \quad (2)$$

III. 재료 및 방법

1. 실험 대상 시료

실험에 사용된 재료는 연약지반 현장에서 채취한 교란시료와 불교란시료를 이용하여 물리적성질, 역학적성질, 압밀특성시험을 실시하였으며 시험결과는 Table 1과 같다.

Table 1 Geotechnical properties of soil used in laboratory test

Depth (m)	W_n (%)	G_s	Atterberg Limits		Shear Parameters UU	Consolidation Test						U.S.C.S	
			LL	PI	C (kgf/cm ²)	P_c (kgf/cm ²)	C_c	e_0	C_v (cm/s)	C_{cp}	C_{α}		e_p
2.0~4.0	44.8	2.720	32.89	17.14	0.310	0.70	0.419	1.184	2.33E-3	0.365	0.0164	1.087	CL

2. 실내 모형실험 및 방법

모형실험장치는 200cm×100cm×76cm 크기의 아크릴로 제작하여 현장에서 채취된 교란 시료를 균질하게 하고 패류, 유기물질, 사력분을 제거하기 위하여 No.4체에서 통과시켜 수중에서 약 20cm 두께로 자중압밀시킨 후, 약 3개월 후에 같은 방법으로 40cm를 추가로 수중에서 자중압밀시켜 총 75cm의 실내모형을 축조하였다. 모형지반을 축조한후 간극수압계 9개와 침하계(LVDT)를 설치하였다. 하중재하장치는 유압식실린더, 유압펌프, 로드셀로 구성되고 자동조절장치에 의하여 인위적으로 하중을 제어할 수 있도록 제작하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 압밀침하량 예측

Fig. 2는 실내모형실험에 의하여 각 하중단계별 재하하중을 변화시키면서 측정한 시간-침하량곡선을 나타낸 것이다. 재하하중은 현장시공과정을 고려하여 재하하여야 하지만 실내모형의 한계로 인하여 작은 하중단계부터 재하를 시작하여 160kg, 200kg, 250kg, 300kg, 350kg, 400kg, 450kg, 500kg의 8단계로 변화시켰고, 그 이후는 하중을 점차로 350kg 까지 감소하면서 침하량을 측정하였다.

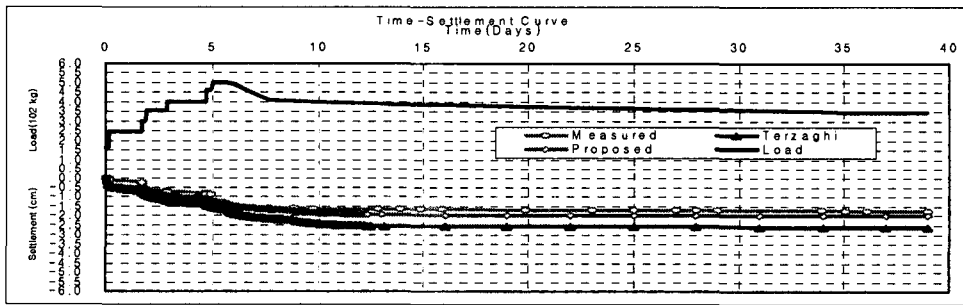


Fig. 2 Time-settlement curve by Terzaghi and proposed methods with gradual step load at laboratory test

최종침하량의 예측은 각 방법마다 가정조건들이 다르기 때문에 신뢰성 평가에 어려움이 있지만, 그 중에서 Hyperbolic, Asaoka, Terzaghi방법으로 최종침하량을 예측하고 실측값을 제안식과 비교·분석하였다. Table 2는 최종침하량 예측치, 경과일수에 따른 실측치와 예측치 및 신뢰도를 각각의 압밀침하량 예측방법별로 비교한 것이다. 1차와 2차 압밀침하량을 분리하고 점중하중을 고려한 제안식은 성토가 진행됨에 따라 침하량의 증가폭이 점점 작아지고 실측침하량에 근접하게 나타났다. 최종침하량의 정확성을 검토하기 위하여 각 최종침하량 예측방법별 신뢰성해석을 상대오차개념으로 분석하였다.

Table 2 Comparison of measured and estimated settlement by various methods

Method		Measured	Terzaghi	Hyperbolic	Asaoka	Proposed
Settlement	S_f (cm)	-	4.35	4.01	3.88	3.61
	$S_f(39day)$ (cm)	1.73	2.59	2.21	2.14	1.99
Reliability	S_f (%)	-	+25	+11	+8	0
	$S_f(39day)$ (%)	0	+50	+28	+24	+15

최종침하량은 실측치가 없기 때문에 제안식을 기준으로 평가하였고, 경과시간에 따른 신뢰도는 실측치를 기준으로 평가하였다.

Terzaghi방법은 실제 현장에서 시공하고 있는 것과 같은 점증하중형태로 하중이 재하되면 침하량 값이 점점 크게 예측되는 반면에 제안식은 침하량이 상대적으로 작게 증가된다. 이것은 Terzaghi방법에서는 압축지수(C_c)를 적용하고, 제안식에서는 1차 압밀종료시의 압축지수(C_{cp})를 산출하여 적용함에 기인한 것으로 판단된다.

전체적으로 Terzaghi방법으로 예측한 최종침하량은 침하량이 크게 나타나 적용하는데 무리가 있고, Hyperbolic방법, Asaoka방법, 제안식에 의한 방법 등은 유사하게 나타나 이 방법을 기준으로 최종침하량을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다. 특히, Hyperbolic방법이나 Asaoka방법은 공사가 진행되면서 측정한 실측치를 이용해서 최종침하량을 예측하는데 비하여, 제안식은 계측자료가 없는 상태에서 최종침하량을 예측하므로 적용성이 높은 것으로 평가되었다.

2. 압밀도의 분석

Table 3은 경과시간에 따른 실측치를 기준으로 한 압밀도와 제안식을 기준으로 압밀도를 평가한 것이다.

Table 3 Comparison of degree of consolidation by various method

Method		Terzaghi	Hyperbolic	Asaoka	Proposed
Degree of consolidation	U_f (%)	83	90	96	100
	$U_f(39day)$ (%)	40	43	45	48

압밀도에 의해 제안식의 신뢰도를 평가하여 보면 제안식은 실측치를 적용하여 예측된 Hyperbolic방법과 Asaoka방법으로 예측된 압밀도에 근접하는 것으로 나타났다.

제안식과 근접한 예측치를 나타내는 Hyperbolic방법, Asaoka방법은 성토를 시공한 후 장기간 방치한 시점의 침하량을 사용하는 경우 예측침하량의 신뢰도가 높은 것으로 알려져 있어, 방조제와 같이 초기계측자료의 오차가 많은 상태에서는 제안식으로 추정된 압밀도는 높은 신뢰성을 입증하고 있다.

VI. 결 론

본 연구에서는 연약지반상에 축조된 방조제의 압밀침하량을 예측하는데 1차 압밀과 2차 압밀을 구분한 새로운 압밀침하량 계산식을 유도하고, 실내모형실험의 실측 침하량과 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 연약지반의 압밀침하량을 산정하기 위하여 Terzaghi의 1차 압밀이론식을 1차압밀과 2차압밀로 구분한 새로운 압밀침하량 계산식을 제안하였다.
2. 실내모형시험으로 실측한 결과와 Terzaghi 및 제안식으로 예측한 침하량 계산결과 Terzaghi방법에 의한 것보다 제안식이 실측치에 더 근접하는 것으로 나타났다.
3. 제안식과 실측치에 의해 산정한 압밀침하량은 Terzaghi방법에서 가장 컸으며, Hyperbolic 및 Asaoka방법과는 유사하게 예측되었고, 상대오차개념에 의한 분석결과 그 신뢰도는 높은 것으로 평가되었다.
4. Hyperbolic 및 Asaoka방법의 최종침하량예측은 압밀초기의 실측자료를 필요로 하지만 본 제안식은 초기 실측자료가 없는 상태에서 최종침하량을 예측하는데 적용성이 더욱 높을 것으로 판단된다.