



연약지반상에 축조된 농업용저수지의 과잉공극수압 예측과 압밀계수의 비교

Comparison of Coefficient of Consolidation and Prediction of Excess Pore Water Pressure of Agricultural Reservoir under Embankment on Soft Ground

이달원^{*,†} · 김은호^{**}

Lee, Dal Won^{*,†} · Kim, Eun Ho^{**}

ABSTRACT

This study was carried out to comparison of coefficient of consolidation and the prediction of excess pore water pressure in agricultural reservoir on soft clay ground. For the purpose of verification of the proposed equation, laboratory model tests and field tests were performed and excess pore water pressure was compared to those predicted with the Terzaghi's method. The predicted excess pore water pressure according to ponding was very applicable to practice because it was close to the observed data. Also, for the comparison of coefficient of consolidation, the oedometer, constant rate of strain (CRS), and Rowe cell tests were performed. The coefficient of consolidation at the Rowe cell and CRS tests showed a greater increase than in the oedometer test. The ratio of the vertical and horizontal coefficient of consolidation showed a large difference according to various tests method and mixing ratio. Therefore, it is recommended that careful attention should be paid to predicting the required consolidation period in agricultural reservoir.

Keywords: Excess pore water pressure; Agricultural reservoir; Coefficient of consolidation; Constant rate of strain; Rowe cell

1. 서 론

연약지반상에 설치되는 농업용 저수지는 기초지반의 압밀침하, 활동, 측방유동 등의 현상이 발생할 수 있으며, 성토체 자체의 압축침하, 활동파괴, 침투 등이 예상된다.

농업용 저수지는 저수량 확보가 목적이므로 담수시 침투현상으로 인하여 도로성토와는 다른 거동을 하기 때문에 성토완료 후 수위변화에 따른 과잉공극수압소산을 예측하여야 하고, 기초지반 내로 유출되는 piping 현상 방지를 위하여 연직배수공법의 사용에 대해서는 신중한 검토가 필요하다. 이와 같은 연약지반에 침하와 안정문제를 고려하면서 경제적이고 효율적인 설계 및 시공을 위해서 정확한 압밀계수 산정은 필수적이고, 압밀도 예측은 압밀완료시점과 최종 성토고를 결정하는데 현장에서 가장 중요하게 고려할 사항이다.

연약지반을 구성하고 있는 점토광물은 판상구조로 이루어져

있어 수평방향의 압밀계수는 연직방향의 압밀계수보다 큰 것으로 보고 있다. 일반적으로 연약지반의 압밀특성을 산정하기 위해서는 표준압밀시험이 가장 널리 사용되고 있으나 압밀정수를 얻기 위해서는 비교적 긴 시간이 소요되며, 도해법을 이용하므로 개인적인 오차가 발생할 수 있다.

Terzaghi의 1차원 압밀이론은 점토의 성질에 대하여 많은 가정 하에 성립하고 또한 문제의 적용범위도 상당히 제한되어 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 오랫동안 표준압밀시험을 개선하고 대신할 여러 가지 압밀시험법이 발전되어 왔다. 그 대표적인 시험으로는 Smith et al. (1969), Wissa et al. (1971)의 일정변형률 압밀시험 (CRS), Rowe et al. (1966)의 Rowe cell 시험 등이 있다.

그리고 연약지반의 공극수압을 구하기 위하여 Terzaghi 압밀이론을 시작으로 지속적으로 연구논문들이 발표되었고, 실내 시험과 현장계측을 통한 시험시공 등으로 실제지반거동을 정확하게 분석하여 조사, 설계 및 시공 단계에서 발생하는 오차를 줄이고 현장적용성을 높이려는 연구가 수행되어 왔다 (Leroueil et al., 1978; Duncan, 1993; Mesri et al., 1985; Indraratna et al., 1992; Zhu et al., 2001; Rowe et al., 2001).

연약지반에서 수평 및 연직배수를 비교할 때 침하속도는 압밀계수의 크기에 따라 달라지므로 압밀계수의 이방성은 압밀

* 충남대학교 지역환경토목학과

** 충남대학교 대학원

† Corresponding author. Tel.: +82-42-821-5793

Fax: +82-42-821-8877

E-mail address: dwlee@cnu.ac.kr

2009년 12월 31일 투고

2010년 2월 11일 심사완료

2010년 2월 11일 게재확정

속도에 대단히 중요한 영향을 미치고, 연약지반개량 현장에서 연직압밀계수보다 수평압밀계수의 중요성을 인식하고 있다.

그러나 수평압밀계수와 연직압밀계수와의 상관관계, 교란영향, 시험결과에 대한 신뢰성 여부 등으로 인하여 현장에 적용하기에는 아직 많은 문제점이 발생되고 있다. 따라서 경제적이고 효율적인 연약지반 설계정수를 결정하기 위해서는 정확한 압밀계수의 산정이 요구되고 있다.

또한 성토완료 후 담수시 기존의 성토 제체에 관한 압밀이론으로는 설명할 수 없는 침하 및 공극수압 변화 현상이 나타나고 있으며 이에 대한 해석이 명확하지 않다. 따라서 일차원 압밀이론에서 과잉공극수압을 성토하중으로 인한 과잉공극수압과 정수압으로 인한 과잉공극수압의 합으로 나타내면, 압밀도의 예측뿐만 아니라 침하거동에 대한 해석과 경과시간에 따른 잔류침하량의 예측도 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 연약지반상에 축조된 농업용 저수지의 담수 후 성토하중과 수위변화에 따른 과잉공극수압을 예측하기 위하여 실내모형실험과 현장시험을 수행하고, 표준압밀시험과 일정변형률 (CRS) 시험 및 Rowe cell 시험으로 구한 연직 및 수평압밀계수와와의 상관관계를 비교분석하여 연약지반 설계시 합리적인 압밀계수 범위를 제시하고자 한다.

II. 이론해석

1. 성토하중과 수위변화를 고려한 과잉공극수압

Terzaghi (1943)는 유효응력-체적변형률의 관계가 압밀배수에 따른 과잉공극수압의 소산속도에 의존하는 선형탄성관계로 압밀현상을 설명하고 공극비의 변화가 유효응력의 증가와 과잉공극수압의 감소에 기인된다고 보고, 압밀 기본방정식을 유도하였다.

연약지반상에 축조된 저수지 제체는 일반적으로 성토와는 다르게 성토완료후에 담수를 시작한다. 따라서 일차원 압밀에서 발생하는 공극수압은 성토하중에 의한 과잉공극수압 (u_s)과 정수압 (담수)으로 인한 과잉공극수압 (u_h)으로 구분하여야만 정확한 공극수압을 예측할 수 있다.

성토하중의 경우는 기존에 일반적으로 사용해 왔던 Terzaghi 이론을 근거로 나타낼 수 있고, 정수압 상태에서 압밀이론을 유도하기 위한 가정은 Terzaghi의 일차원 성토하중에 의한 압밀이론과 유사하게 담수높이를 공극수압으로 바꾸어 나타낼 수 있다. 또한 흙의 상층이 자유배수인 경우와 흙의 바닥이 불투수성인 경우에 초기 및 경계 조건은 임의의 깊이 z 와 시간 t 에서 각각 다르게 나타날 수 있다.

따라서 Min and Lee (2008)는 제체의 성토하중으로 인한

과잉공극수압 (u_s)과 성토완료 후 저수지 담수로 인한 과잉공극수압 (u_h)를 조합하여 전체적인 과잉공극수압 (u)을 예측하기 위해 다음과 같은 식을 유도하였다.

$$u(z, t) = u_h(z, t) + u_s(z, t) = p_h + (q - p_h) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin\left[\left(\frac{2n+1}{2}\pi\frac{z}{H}\right) \times \exp\left[-\left(\frac{2n+1}{2}\right)^2 \pi^2 \frac{C_{vc}}{H^2} t\right]\right] \quad (1)$$

여기서, u_h , u_s : 정수압과 성토하중에 의한 과잉공극수압, p_h : 정수압, q : 성토하중, H : 연약층 두께, C_{vc} : 압밀계수

2. 일정변형률 압밀이론

Wissa et al. (1971)은 일정변형률 압밀시험 (CRS)을 정상상태와 전이 상태로 나누어 평균유효응력과 압밀계수 등을 구하였는데, 정상상태에서는 또 다시 흙의 변위와 하중이 선형인 경우와 비선형인 경우로 나누어 계산을 하였다.

정상상태에서 흙이 선형적인 거동을 할 때의 압밀계수는 다음식과 같다.

$$C_v = \frac{H^2}{2u_b} \left(\frac{\Delta\sigma_v}{\Delta t} \right) \quad (2)$$

여기서, u_b : 시료하부에서의 과잉공극수압 ($=\Delta\bar{\sigma}_v$), $\Delta\sigma_v$: 시간증가 Δt 에서의 전응력 차이

이 식은 Smith and Wahls (1969)의 식과 같은 형태이고 선형적인 거동에서 평균유효응력은 다음 식과 같다.

$$\bar{\sigma}_{v_{ave}} = \frac{1}{3} [2\bar{\sigma}_v(H, t) + \bar{\sigma}_v(0, t)] = \sigma_v - \frac{2}{3} u_b \quad (3)$$

흙이 비선형적인 거동을 할 때의 연직압밀계수와 평균유효응력은 다음 식과 같다.

$$C_v = - \frac{H^2 \log\left(\frac{\sigma_{v2}}{\sigma_{v1}}\right)}{2\Delta t \log\left(1 - \frac{u_b}{\sigma_v}\right)} \quad (4)$$

$$\bar{\sigma}_{v_{ave}} = (\sigma_v^3 - 2\sigma_v^2 u_b + \sigma_v u_b^2)^{\frac{1}{3}} \quad (5)$$

여기서, σ_{v1} : 시간 t_1 일 때 연직전응력,
 σ_{v2} : 시간 t_2 일 때 연직전응력,
 H : 시료의 높이, Δt : $t_2 - t_1$, $\Delta \overline{\sigma_{vave}}$: 평균유효응력,
 σ_v : 임의시간 t 일 때 연직전응력

3. Rowe 압밀이론

Rowe cell 시험 (Rowe et al., 1966, 2001)에서 연직 (C_v) 및 수평압밀계수 (C_h)를 구하기 위하여 내경 75 mm 몰드를 사용하여 등변형 (Equal-strain)조건으로 압밀시험을 수행하였으며, 수직하중은 50~400 kPa까지로 $\Delta P/P=1$ 의 관계를 유지하였고, 연직 및 수평압밀계수는 다음과 같이 산정하였다.

① 연직압밀계수 (C_v)의 경우

$$C_v = \frac{T_v H^2}{t} \quad (6)$$

여기서, T_v : t_{90} 일 때 시간계수, H : 시료의 높이,
 t : 과잉공극수압소산시간

② 수평압밀계수 (C_h)의 경우

$$C_h = \frac{T_{ro} D^2}{t} \quad (7)$$

여기서, T_{ro} : t_{90} 일 때 시간계수, D : 시료의 직경,
 t : 과잉공극수압소산시간

III. 재료 및 방법

1. 사용시료

본 실험에서 사용한 시료는 농업용저수지 현장의 연약지반에서 채취하였으며, 통일분류법상 실트질 점토 (CL)로 분류된다.

Table 1 Geotechnical properties of used soils

Sample	W _n (%)	G _s	Atterberg Limits		Consolidation test				U.S.C.S
			LL (%)	PI (%)	P _c (kPa)	C _c	e _o	C _v (cm ² /s)	
Undisturbed (clay)	37.0	2.72	26.0	11	101	0.43	1.286	1.072E-3	CL
Disturbed (Clay)	45.9	2.76	26.4	8.6	20	0.206	0.980	1.21E-3	CL
Clay: sand=1:1	25.7	2.75	16.6	4.2	28	0.093	0.701	1.75E-2	ML-CL
Clay: sand=2:1	36.7	2.73	18.8	13.3	37	0.138	0.896	1.36E-2	ML-CL

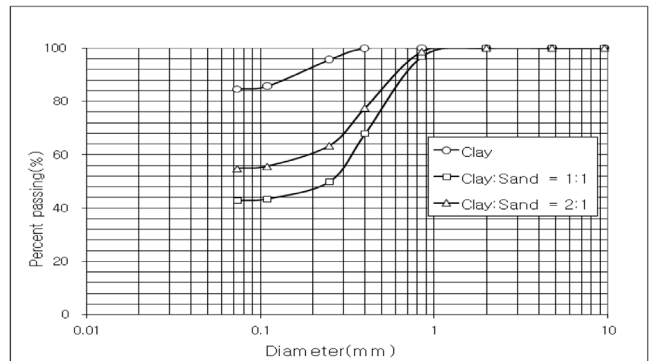


Fig. 1 Particle size distribution curve

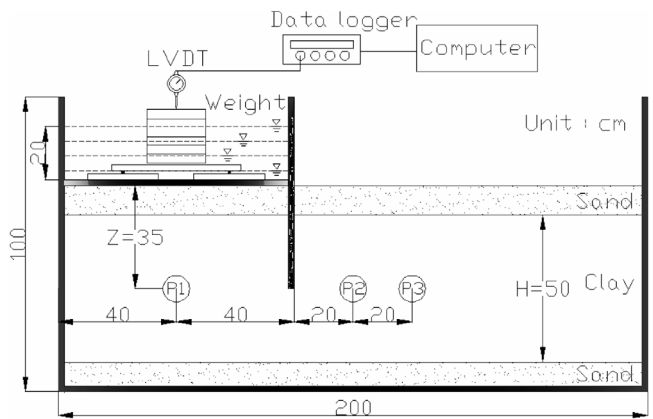


Fig. 2 Laboratory model test apparatus

현장 성토시공 단면과 현장계측 자료는 00지구 농업용 저수지 현장 자료를 이용하여 분석하였다 (Min and Lee, 2008).

또한 시험조건은 재성형 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료를 가지고 표준압밀시험, 일정변형률 (CRS) 압밀시험 및 Rowe cell 시험을 실시하였다.

시료의 물리적 성질 및 입도분포곡선은 Table 1 및 Fig. 1과 같다.

2. 실내모형실험

연약지반상에 축조된 저수지가 성토완료 후 담수를 시작하면서 발생하는 공극수압과 침하량의 변화를 측정하기 위해 Fig. 2와 같이 실내모형실험을 수행하였다.

모형실험장치는 200 (가로)×100 (세로)×76 (폭) cm 크기로 아크릴을 사용하여 제작하였고, 현장에서 채취한 교란시료를 No. 4체를 통과시켜 자중 압밀시킨 후 약 300 kg의 추를 사용하여 일정기간동안 재하 하였다.

모형지반의 상부와 하부에 모래를 부설하여 양면배수조건으로 하였고, 수위조절은 중앙에 아크릴을 설치하여 상류에서 수

위를 5, 10, 15, 20, 10, 0, 20 cm로 일정하게 조절하면서 수위상승과 하강시에 공극수압과 침하를 측정하였다.

공극수압은 전기식 공극수압계 (일본 Kyowa사 50 kPa)를 상류 (P1), 중앙 (P2), 하류부 (P3)에 설치하였고, 침하계 (LVDT)를 부착한 후 Data Logger에 연결하여 컴퓨터에 자동 저장 되도록 하였다.

3. 표준압밀시험

표준압밀시험 시료는 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합하고, 하중재하는 $\Delta P/P=1$ 이 되도록 하여 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1280 kPa의 총 8단계로 재하하고, 연직압밀계수 (C_v)를 구하기 위하여 \sqrt{t} 법을 사용하였다.

4. 일정변형률(CRS) 압밀 시험

표준압밀시험이 압밀과정에서 투수성과 압축성이 변화되어 압밀계수가 일정하지 않고, 압축지수, 압밀계수 등을 구하는데 장시간을 요하며, 각 하중단계에서 하중재하 후 수 시간 내에 일차압밀이 완료되는 문제점이 있다. 따라서 이러한 단점을 보완한 일정변형률 시험은 하중재하시 발생하는 과잉공극수압이 시료의 압밀에 영향을 주지 않는 범위 이내에서 하중재하속도를 일정수준까지 높여서 빠른 시간 내에 압밀시험을 완료시킬 수 있다.

재성형된 시료는 낮은 점성을 주기 위하여 증류수로 액성한계의 약 2배의 함수비를 가진 slurry상태로 만든 후 완전포화가 되도록 하고, 시료의 포화도를 위해 압력셀의 압력과 같은 크기의 백프레셔를 24시간 가한 후 시료저면에서 공극수압을 측정하여 공극수압계수 (B)가 0.97 이상인 경우에 시험을 실시하였다.

시험시료는 표준압밀시험 및 Rowe cell 시험과 동일한 조건에서 재성형 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 변화시켰다.

변형률 속도의 산정은 시료의 투수와 압축성에 따라 다르지만 최저공극수압비 (u_b/σ_v)가 제한치를 초과하지 않는 범위에서 보수적인 방법이지만 ASTM에서 제시한 액성한계와 변형률 관계를 참고하여 (0.04 %/min 범위 내) 0.04 %/min, 0.22 %/min, 0.4 %/min의 3단계로 변화시켰다. 시료저면에서 측정된 과잉공극수압과 시료에 가해진 전응력 비 ($u_b/\Delta\sigma$)가 30 %를 넘지 않는 범위에서 시험하였다.

일정변형률 압밀시험은 Fig. 3과 같이 압축시험장치, 변위장치, 하중 로드셀, 공극수압 측정 장치, pressure system, back pressure system으로 구성되어 있고, 모든 측정자료는 컴퓨터로 자동 저장 되도록 하였다.

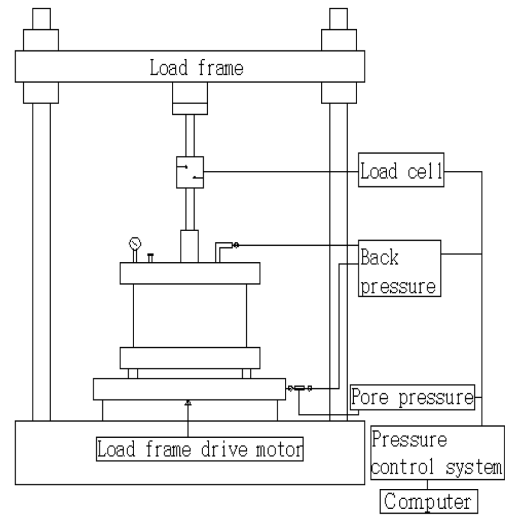


Fig. 3 Apparatus of CRS test

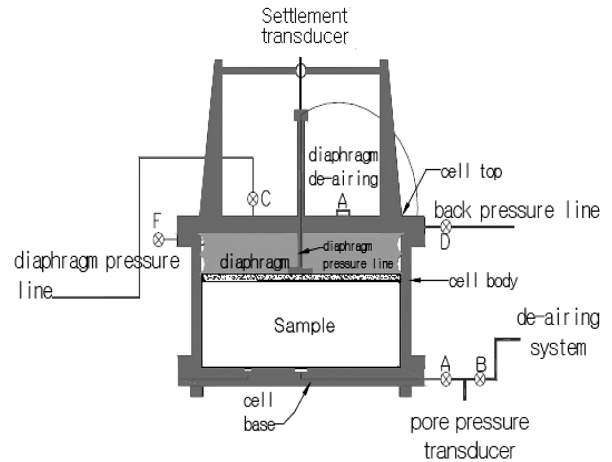


Fig. 4 Apparatus of Rowe cell test

5. Rowe cell 압밀시험

시험시료는 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합하고, 액성한계의 약 2배의 함수비를 가진 슬러리상태로 만든 후 교반하여, 포화를 위해 약 일주일 동안 밀폐된 용기에 저장하였다. 시료를 셀 안에 넣은 후 포화상태를 확인하기 위하여 구속압과 배압을 조절하여 B계수가 약 0.97이상 일 때 포화된 것으로 간주하였다. 하중재하는 50, 100, 200, 400 kPa로 총 4단계로 재하하고, 압력 재하 방법으로는 diaphragm pressure system과 back pressure system을 이용하였다.

Rowe cell 시험은 내경 75 mm이고 등변형 (Equal-strain) 조건으로 수행하며, 수직하중은 50~400 kPa까지로 $\Delta P/P=1$ 의 관계를 유지하였다. 연직압밀계수 (C_v)의 경우 표준압밀시험과 같은 변형률-시간곡선을 이용하고, 수평압밀계수 (C_h)의

경우에는 체적변화곡선을 이용하여 값을 결정하였다. 연직 및 수평압밀계수와의 상관관계를 알아보기 위해서 일정한 유효응력 범위에서 분석하였다.

Rowe cell 압밀시험의 구조는 Fig. 4와 같이 셀, 가압장치, 체적변화, 공극수압 및 침하 측정장치 등이 있으며 측정된 데이터는 자동적으로 컴퓨터에 저장되도록 하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 제안식에 의한 과잉공극수압의 예측

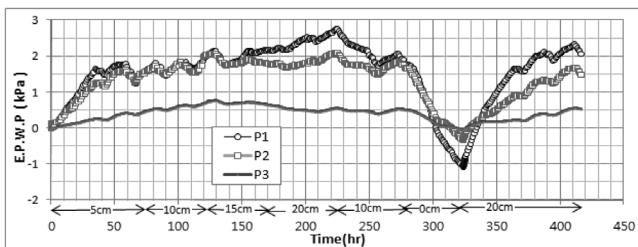
공극수압의 거동은 지반의 투수성과 포화정도, 재하이력에 의하여 영향을 받는데, 실제 지반에서는 이들 요소들을 제대로 평가하기 어렵기 때문에 재하시 유발되는 공극수압의 크기와 소산시간 등을 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 일이다.

실내모형실험에서 수위상승은 저수지 성토 후 담수와 같은 형태로 현장을 모사할 수 있기 때문에 제안식이 실측치와 유사한지 여부를 우선적으로 검증할 수 있다.

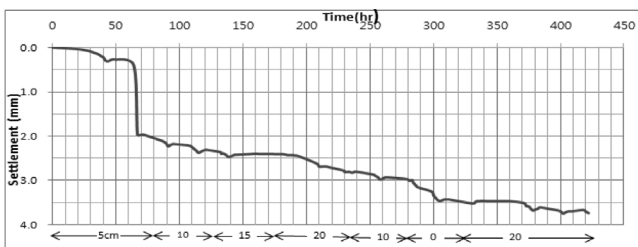
Fig. 5 (a)는 실내모형실험에서 수위 변화에 따른 과잉공극수압을 나타낸 것이다.

모형지반은 양면배수조건이고, 수위는 상류에서 5, 10, 15, 20, 10, 0, 20 cm로 일정하게 조절하면서 수위상승과 하강시에 공극수압과 침하량을 측정하였다.

수위변화에 따른 과잉공극수압은 상류 (P1)와 중앙 (P2)에서 상승과 하강에 따라 민감하게 나타났으나 하류 (P3)에서는 큰



(a) Time-excess pore water pressure



(b) Time-settlement

Fig. 5 Variations of E.P.W.P and settlement with a rising of water level

변화 없이 일정한 분포형태를 나타냈다.

하중재하 후 수위변화에 따른 침하량은 Fig. 5(b)와 같이 수위 5 cm에서 10 cm로 상승할 때 급격한 침하를 나타냈고, 그 이후에는 수위상승과 하강에 관계없이 일정한 침하형태를 나타냈다.

실내모형실험은 일반 저수지 시공현장과는 다르게 과잉공극수압 크기도 작고, 규모제한으로 성토과정을 현장과 같은 형태로 모식화 할 수 없기 하중재하에 따른 공극수압과 침하량이 시공현장과는 다르게 나타났다.

Fig. 6은 수위를 0, 5, 10, 15, 20 cm로 상승하였을 경우, 상류 (P1), 중앙 (P2), 하류 (P3)에서 측정된 과잉공극수압을 제안식 및 Terzaghi 방법으로 구한 과잉공극수압과 비교한 것이다. 제안식 (식 1)은 성토하중에 의한 과잉공극수압 (u_v)과 정수압 (담수)으로 인한 과잉공극수압 (u_h)을 조합하여 과잉공극수압을 예측한 식이다.

성토하중과 정수압의 영향을 고려하여 제안식으로 구한 과잉공극수압은 수위가 5 cm일 경우에는 측정치보다 약간 작게 나타났지만, 수위가 상승함에 따라 점차로 측정치에 근접하게 나타났다. 그러나 일반적으로 과잉공극수압 추정시에 이용되고 있는 기존의 Terzaghi 방법은 정수압의 영향을 고려하지 않았기 때문에 측정치와는 매우 큰 차이를 나타냈다.

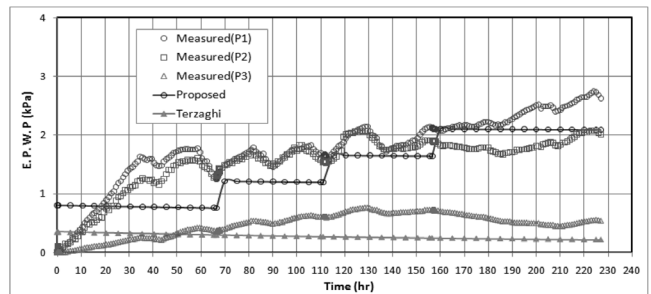


Fig. 6 Variations of E.P.W.P by measured, proposed and Terzaghi methods

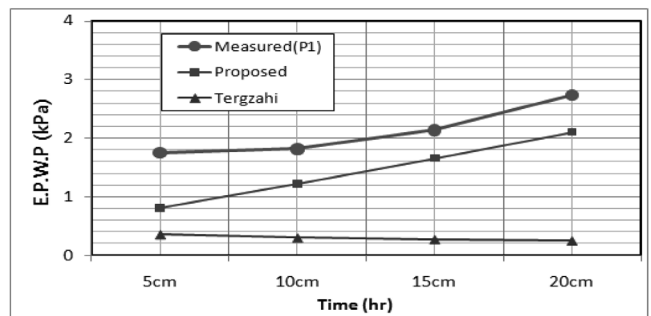


Fig. 7 Variations of E.P.W.P with a rising of water level at P1

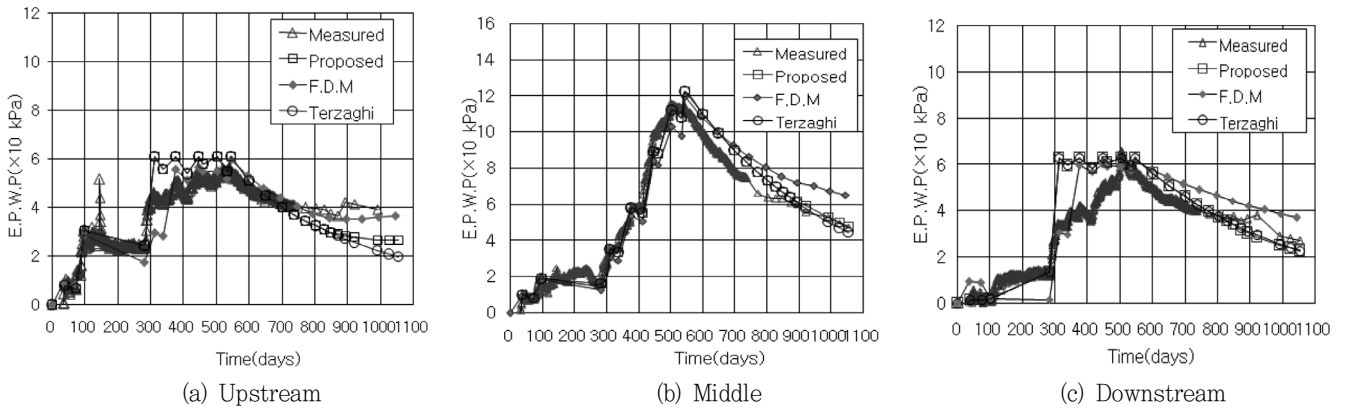


Fig. 8 Variations of E.P.W.P by Terzaghi, F.D.M and proposed methods

Fig. 7은 제체 상류 (P1)지점에서 수위변화에 따른 과잉공극수압을 제안식 및 Terzaghi 방법으로 구한 과잉공극수압과 비교한 것이다. 수위가 상승함에 따라 과잉공극수압 측정치는 약간씩 증가하였고, 정수압의 영향을 고려한 제안식은 측정치에 근접하게 나타났으나 Terzaghi 방법은 일정하게 나타나 실측치와 매우 큰 차이를 나타냈다.

위와 같은 결과로부터 수위상승, 즉 저수지 담수로 인한 과잉공극수압은 기존의 Terzaghi 방법 보다는 제안식을 이용하여 추정하는 것이 실측치에 근접하다는 것을 실내모형실험을 통하여 검증하였다. 또한 정수압의 영향을 고려한 제안식과 고려하지 않은 Terzaghi 식의 비교를 통하여 현장 저수지에서도 적용가능 할 것으로 판단되었다.

Fig. 8은 현장 농업용 저수지 제체의 상류측 (GL.-3.0m), 제체중앙 (GL.-3.3m) 및 제체하류 (GL.-4.0m)에서 Terzaghi 방법, 유한차분법 및 제안식에 의해 과잉공극수압을 예측하고 실측치와 비교한 것이다.

농업용 저수지 제체는 지반조사결과 N지 6이하의 연약점성토층이 10.0 m 정도 분포되어 있고, 성토높이 10.8 m까지 시공 완료 후에 방치기간을 포함하여 1,054일 동안 현장계측을 실시한 자료를 이용하였다 (Min and Lee, 2008).

임의의 성토하중에서 시간과 깊이에 따른 과잉공극수압 거동을 예측하기 위해서 유한차분법 (FDM)을 이용하였고 (Budhu, 2000), 성토하중에 의한 과잉공극수압은 Terzaghi 압밀이론을 이용하였다. 제안식 (식 1)은 성토하중으로 인한 과잉공극수압과 정수압 하중으로 인한 과잉공극수압의 합으로 나타내어 분석하였다.

상류측 (Fig. 8(a))은 성토높이가 낮아 성토하중 증가에 따른 과잉공극수압은 작고 소산속도도 느리게 나타났다. 성토완료 후 초기에 예측된 과잉공극수압은 실측치와 유사한 경향을 나타냈지만, 담수 후 (850일)에 Terzaghi 방법은 시간에 따라 완만하

게 소산되고, 유한차분법과 제안식은 수위상승에 의한 정수압 영향을 고려하였기 때문에 과잉공극수압이 약간 상승 하였다.

중앙 (Fig. 8(b))에서 과잉공극수압은 성토가 완료되면서 빠른 속도로 소산되었지만, 담수 후에는 소산속도가 완만하게 나타났다. 예측된 과잉공극수압은 유한차분법에서 약간 크고, Terzaghi 방법과 제안식에서 실측치와 유사하게 나타났다.

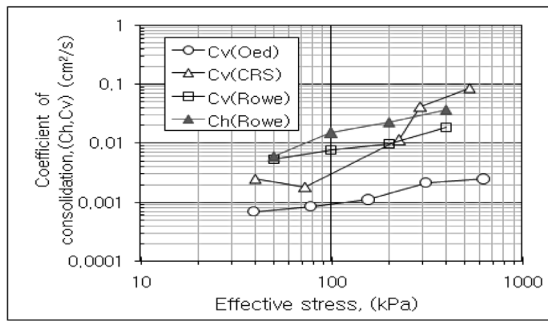
하류 (Fig. 8(c))에서 실측된 과잉공극수압은 낮은 성토하중으로 인하여 작게 나타났으나, 소산속도는 상류측보다 약간 빠르게 나타났다. 예측된 과잉공극수압은 Terzaghi 방법과 제안식에서는 실측치와 유사하고, 유한차분법에서는 실측치와 약간 크게 나타났다. 이는 측정지점이 담수에 따른 정수압의 영향을 받지 않는 하류측에 매설되어 정수압이 증가한 만큼 공극수압이 증가하지 않았기 때문에 시간에 따라 완만하게 소산되는 것으로 판단된다.

이와 같은 결과로부터 과잉공극수압 예측은 압밀도 예측과 같고 압밀도는 최종적으로 최종성토 높이와 압밀완료시기를 판단하는데 중요한 요소이므로, 앞으로 저수지 설계시 담수에 따른 과잉공극수압을 예측하여 정확한 압밀도를 산정하는데 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

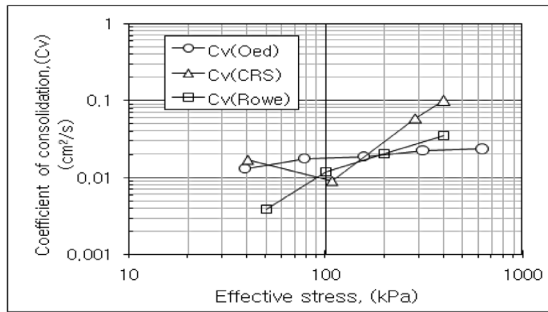
위의 3가지 방법으로 예측된 압밀도를 실측치와 비교한 결과, 성토완료 후 초기에는 실측치와 유한차분법에 의한 압밀도가 유사하게 나타났으며, 담수 후 (850일) 제안식에 의한 압밀도는 실측치의 2.4 % ~ 5.0 % 범위 이내로 거의 같은 값을 나타냈다.

2. 압밀계수의 비교

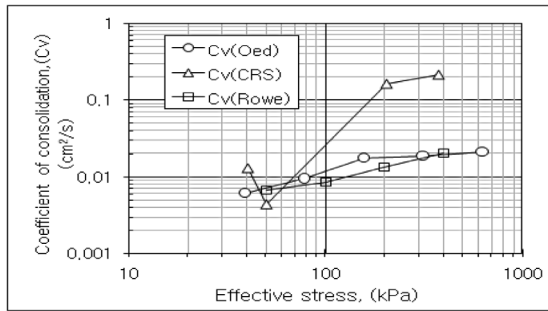
Fig. 9는 표준압밀시험, 일정변형률 (CRS)압밀시험 및 Rowe cell 시험에서 점토, 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료의 연직 및 수평압밀계수 (C_v , C_h)를 나타낸 것이다.



(a) clay



(b) clay:sand=1:1



(c) clay:sand=2:1

Fig. 9 Comparison of the Ch and Cv measured by the oedometer, CRS, and Rowe cell tests

표준압밀시험은 연직하중 10~1280 kPa까지 하중증분비 ($\Delta\sigma/\sigma$)를 1로 하여 압밀시험을 실시하고 연직압밀계수를 산정하였으며, Rowe cell 시험에서 압밀계수의 산정은 각 하중 단계 별로 측정된 침하량, 공극수압, 체적변화량 측정치를 이용하여 압밀계수를 산정하였다. 두 시험은 일정한 유효응력 범위 (50~400 kPa) 내에서 분석하였다.

일정변형률 압밀시험 (CRS)에서 유효응력은 시료하부에서 측정된 과잉공극수압을 고려하여 비선형 평균유효응력을 구해 이용하였고, 연직압밀계수 (C_v)의 경우는 시료저면에서의 공극수압비, 연직응력, 평균시료높이, 시간 등을 고려하여 비선형 상태에서의 압밀계수를 이용하였다.

점토 시료 (Fig. 9(a))의 경우, 표준압밀시험에서 구한 연직압

밀계수 (C_{v0})의 평균치는 $6.94 \times 10^{-4} \sim 2.44 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위이고, Rowe cell 시험에서 구한 연직압밀계수 (C_{vR})의 평균치는 $5.37 \times 10^{-3} \sim 1.87 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 유효응력 증가에 따라 일정한 증가현상을 나타냈다. 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수 (C_v)의 평균치는 $1.80 \times 10^{-3} \sim 8.52 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 다른 두 시험방법보다는 급격한 증가현상을 나타내었다.

Rowe cell 시험에서 체적변화량을 이용하여 구한 수평압밀계수 (C_{hr})의 평균치는 $5.98 \times 10^{-3} \sim 3.74 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 연직압밀계수보다 큰 값을 나타내었다.

점토와 모래를 1:1로 혼합한 시료 (Fig. 9(b))에서 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수 (C_{v0})값의 평균치는 $1.30 \times 10^{-2} \sim 2.33 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위이고, Rowe cell 시험에서 구한 연직압밀계수 (C_{vR})값의 평균치는 $3.88 \times 10^{-3} \sim 3.45 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 나타났다. 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수 (C_v)값의 평균치는 $9.13 \times 10^{-3} \sim 1.0 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 다른 두 시험방법보다는 급격한 증가현상을 나타내었다.

2:1로 혼합한 시료 (Fig. 9(c))에서 표준압밀시험에서 구한 연직압밀계수 (C_{v0})값의 평균치는 $6.09 \times 10^{-3} \sim 2.10 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위이고, Rowe cell 시험에서 구한 연직압밀계수 (C_{vR})값의 평균치는 $6.64 \times 10^{-3} \sim 2.01 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 나타났다. 일정변형률 압밀시험에서 구한 연직압밀계수 (C_v)값의 평균치는 $4.37 \times 10^{-3} \sim 2.15 \times 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위로 다른 시험방법보다는 급격한 증가현상을 나타내었다.

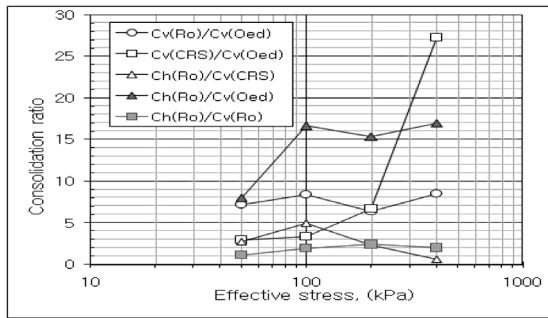
일반적으로 불교란 시료에서의 압밀계수는 유효응력이 증가하면서 압밀계수가 감소하다가 선형압밀응력 이후에서는 거의 일정한 값을 나타낸다. 그러나 재성형 시료에서는 선형압밀응력에 도달한 이후에도 계속해서 증가하는 현상을 나타냈다.

전체적으로 시료의 혼합비율에 따라 압밀계수의 범위는 큰 차이를 나타냈고, Rowe cell과 일정변형률시험에서의 압밀계수는 유효응력의 증가함에 따라 표준압밀시험보다는 급격한 증가현상을 나타냈으며 압밀계수의 범위도 큰 차이를 나타내었다.

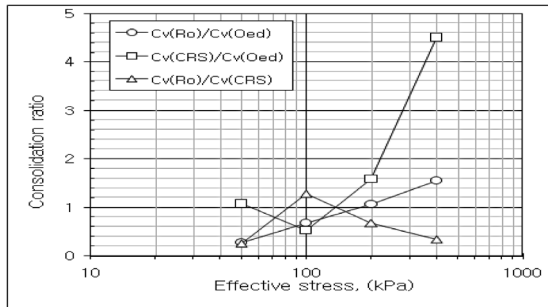
이와 같은 원인은 재성형에 따라 연직 및 수평압밀계수가 큰 차이가 나타났고, 투수성이 증가할수록 압밀시간이 단축되어 압밀계수의 변화를 가져오기 때문으로 판단되며, 이런 결과를 나타내는 편차의 큰 요인은 시료의 불균질성, 각 실험 방법 적용 시 발생 가능한 편차와 압밀계수 평가방법의 한계 등으로 판단된다.

Fig. 10은 표준압밀시험, 일정변형률 (CRS)압밀시험 및 Rowe cell 시험에서 점토와 모래를 각각 1:1, 2:1로 혼합한 시료의 연직 및 수평 압밀계수비를 나타낸 것이다.

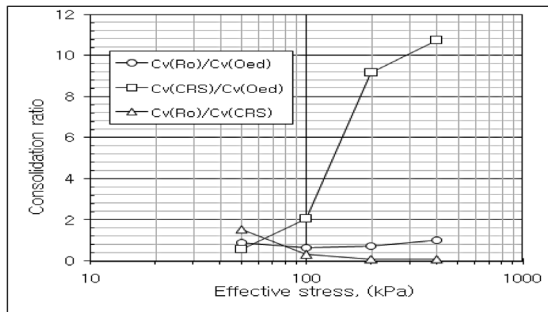
점토 시료 (Fig. 10(a))의 경우, 표준압밀시험과 Rowe 압밀시험과의 수평압밀계수비를 비교하면 (C_{hr}/C_{v0})는 약 8.0~17.0



(a) clay



(b) clay:sand=1:1



(c) clay:sand=2:1

Fig. 10 Comparison of the consolidation ratio measured by the oedometer, CRS, and Rowe cell tests

배 정도로 매우 크고, 연직압밀계수비 (C_{vR}/C_{vO})는 약 6.4~8.5 배 정도로 나타났다.

표준압밀시험과 일정변형률시험과의 압밀계수비 (C_{vO}/C_{vR})는 약 2.9~27.3배 정도로 200 kPa까지는 작다가 400 kPa에서 급격히 증가하는 현상을 나타냈다. 일정변형률시험과 Rowe 압밀시험과의 수평압밀계수비 (C_{hR}/C_{vO})는 약 0.6~5.0배 정도로 작은 차이를 나타내었다.

점토와 모래를 1:1로 혼합한 시료 (Fig. 10(b))에서 표준압밀시험과 Rowe 압밀시험과의 연직압밀계수비를 비교하면 (C_{vR}/C_{vO})는 약 0.3~1.6배 정도이고, 일정변형률 압밀시험과의 연직압밀계수비 (C_{vO}/C_{vR})는 약 0.5~4.5배 정도의 차이를 나타냈다. 또한 일정변형률 압밀시험과 Rowe 시험과의 연직압밀계

수비 (C_{vR}/C_{vO})는 약 0.3~1.3배 정도로 큰 차이를 나타내지 않았다.

2:1로 혼합한 시료 (Fig. 10(c))에서, 표준압밀시험과 Rowe 압밀시험과의 연직압밀계수비를 비교하면 (C_{vR}/C_{vO})는 약 0.7~1.0배 정도로 유사하게 나타났고, 일정변형률시험과는 (C_{vO}/C_{vR})는 약 0.6~10.8배 정도로 큰 차이를 나타냈다. 또한 일정변형률시험과 Rowe 시험과의 연직압밀계수비 (C_{vR}/C_{vO})는 약 0.08~1.5배 정도로 작게 나타났다.

전제적으로 성형시의 시료 교란을 무시하지는 못하나 일반적으로 점토구조는 판상구조로 이루어져 있어 수평방향의 압밀계수가 연직방향의 압밀계수보다 그 값이 크게 나타났다.

이와 같이 연직압밀계수는 일정변형률시험과 표준압밀시험과의 비 (C_{vO}/C_{vR})에서 가장 크고, Rowe cell 시험과 표준압밀시험과의 비 (C_{vR}/C_{vO})와 일정변형률시험과의 비 (C_{vR}/C_{vO})에서는 작은 차이를 나타냈다.

또한 수평압밀계수는 Rowe cell 시험과 표준압밀시험과의 비 (C_{hR}/C_{vO})에서는 가장 큰 차이를 나타냈다.

따라서 수평압밀계수비와 연직압밀계수비는 표준압밀시험, CRS 및 Rowe cell 시험방법과 시료의 혼합비율에 따라서 매우 큰 차이를 나타내므로 농업용 저수지의 압밀 소요시간을 예측시에 신중하게 선정하여야 할 것으로 판단된다.

Sheahan et al. (1997)이 일정변형률과 단계재하에 의한 연직방향 압밀계수만을 비교 평가하여 제시한 연구결과에 따르면 압밀계수의 최대편차는 10~100배에 이른다고 하였다. Chu et al. (2002)은 Singapore 해성 점토에 대한 표준압밀시험과 Rowe cell 시험 결과, 수평압밀계수 (Ch)는 연직압밀계수 (Cv)보다 2~4배 정도 크고, 심도가 깊어질수록 증가한다고 하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 연약지반상에 축조된 농업용 저수지의 담수 후 성토하중과 수위변화에 따른 과잉공극수압을 예측하기 위하여 실내모형실험과 현장시험을 수행하고, 표준압밀시험과 일정변형률 (CRS)시험 및 Rowe cell 시험으로 구한 연직 및 수평압밀계수와의 상관관계를 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 실내모형실험 결과 수위변화에 따른 과잉공극수압은 상류와 중앙에서 상승과 하강에 따라 민감하게 나타났으나 하류에서는 큰 변화가 없었고, 침하량은 수위상승과 하강에 관계없이 일정한 침하형태를 나타냈다. 저수지 담수로 인한 과잉공극수압은 기존의 Terzaghi 방법 보다는 제안식을 이용하여 추정하는 것이 실측치에 근접하게 나타났고, 이러한 결과는 현장 농업용저수지의 해석에서도 유사하게 나타났다.

2. 시료의 혼합비율에 따라 압밀계수의 범위는 큰 차이를 나타냈고, Rowe cell과 일정변형률시험에서의 압밀계수는 유효응력의 증가에 따라 표준압밀시험보다는 급격한 증가현상을 나타내었다.

3. 연직압밀계수는 일정변형률시험과 표준압밀시험과의 비 (C_{vc}/C_{vo})에서 가장 크고, 수평압밀계수는 Rowe cell 시험과 표준압밀시험과의 비 (C_{hr}/C_{vo})에서는 가장 큰 차이를 나타냈다. 연직 및 수평압밀계수비는 시료의 혼합비율과 시험방법에 따라서 매우 큰 차이를 나타내므로 농업용 저수지의 압밀소요 시간 예측시에 신중하게 선정하여야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2008-521-D00592).

REFERENCES

1. Budhu, M., 2000. *Soil Mechanics and Foundations*. New York. John Wiley and Sons. 166-168.
2. Chu, J., M. W. Bo, M. F. Chang, and V. Choa, 2002. Consolidation and permeability properties of Singapore marine clay. *J. of Geoenvironmental engineering* 128 (9): 724-732.
3. Duncan, J. M., 1993. Limitations of conventional analysis of consolidation settlement. *Journal of Geotechnical Engineering ASCE* 119(9): 1331-1359.
4. Indraratna, B., and A. S. Balasubramaniam, 1992. Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 118(1): 12-33.
5. Lee, D.W., and H. J. Yoon, 2005. Estimation of degree of consolidation in soft ground using field measurements and rheology model. *J. of Korean Society of Agricultural Engineers* 47(2): 87-96 (in Korean).
6. Leroueil, S., F. Tavenas, B. Trak, P. La. Rochelle, and M. Roy, 1978. Construction pore pressures in clay foundations under embankments. Part I : The Saint-Alban test fills. *Canadian Geotechnical Journal* 15(1): 54-65.
7. Leroueil, S., and F. Tavenas, 1986. Discussion on effective stress paths and yielding in soft clays below embankments. *Canadian Geotechnical Journal* 23(3): 410-413.
8. Mesri, G., and Y. K. Choi, 1985. Settlement analysis of embankments on soft clays. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 111(4): 441-464.
9. Min, H.G., and D. W. Lee, 2008. Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground. *J. of Korean Society of Agricultural Engineers* 50(2): 37-44 (in Korean).
10. Rowe, P. W., and L. Barden, 1966. A new consolidation cell. *Geotechnique* 16(2): 162-170.
11. Rowe, R. K., C. T. Gnanendran, A. J. Valsangkar, and A. O. Landva, 2001. Performance of a test embankment constructed on an organic clayey silt deposit. *Canadian Geotechnical Journal* 38(6): 1283-1296.
12. Sheahan, T. C., and P. J. Watters, 1996. Using an automated Rowe cell for Constant rate strain consolidation testing. *Geotec. Testing Journal* 19(4): 354-363.
13. Smith, R. E., and H. E. Wahls, 1969. Consolidation under constant rates of strain. *Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE* 95(2): 519-539.
14. Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, New York.
15. Wissa, A. E. Z., J. T. Christian, E. G. Davis, and S. Heiberg, 1971. Analysis of consolidation at constant strain rate. *J. of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 97(10): 1393-1413.
16. Zhu, G., J. H. Yin, and J. Graham, 2001. Consolidation modelling of soils under the test embankment at Chek Lap Kok International Airport in Hong Kong using a simplified finite element method. *Canadian Geotechnical Journal* 38(2): 349-363.