

성토하중과 수위변화를 고려한 저수지의 과잉공극수압 예측

Prediction of Excess Pore Water Pressure of Reservoir Embankment Considering Fill and Ponding

이달원¹⁾, Dal-Won Lee, 민학규²⁾, Hag-Gyou Min

¹⁾ 충남대학교 지역환경토목학과 교수, Professor, Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam Univ.

²⁾ 농어촌공사 충남지역본부, Korea Rural Community Corporation, Chungnam-do Office.

SYNOPSIS : A theoretical equation was proposed to consider the effect of fill and ponding for the 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 degree of consolidation according to ponding predicted by applying the proposed equation was close to the observed degree of consolidation on the double drainage condition(at DP-3) but it was less than the observed degree of consolidation on the single drainage condition(at DP-5). The predicted excess pore water pressure according to fill and ponding was very applicable to practice because it was close to the observed data.

Keywords : Excess pore water pressure, Ponding, Reservoir, Degree of consolidation

1. 서 론

간척·매립을 통한 해안지역의 개발로 인하여 새로 조성된 간척지 내부에 조성된 농지는 용수원의 신설을 위한 시설이 필요하여 방수제를 설치하고 양수장을 계획하거나 저류지를 설치하여 왔다. 방조제 내부에 설치될 담수호 조성을 위한 방수제나 저수지 제체는 대부분 토공구조물로 연약한 점성토 지반 위에 축조되는데 기초지반의 압밀침하, 활동, 측방유동 등의 현상이 발생할 수 있으며, 성토체 자체의 압축침하, 활동과괴, 침투 등이 예상된다. 연약지반상에 축조된 농업용 저수지는 저수가 목적이므로 제체 축조 후 바로 담수를 시작하게 되며 담수된 물은 제체의 침투문제로 인하여 일반 성토체와는 전혀 다른 거동을 하기 때문에 성토 완료 후 담수시 수위변화에 따른 과잉공극수압소산을 예측하여야 한다.

그 동안 연약지반의 공극수압을 구하기 위하여 Terzaghi 압밀이론을 시작으로 지속적으로 발표되었고, 실내시험과 현장계측을 통한 시험시공 등으로 실제지반거동을 정확하게 분석하여 조사, 설계 및 시공 단계에서 발생하는 오차를 줄이고 현장적용성을 높이려는 연구가 수행되어 왔다 (Terzaghi, 1943; Skempton, 1954; Leroueil et al., 1978a; Duncan, 1993; Balasubramaniam et al., 1997; Mesri et al., 1985; Indraratna et al., 1992; Crawford et al., 1995; Zhang, 1999; Rowe et al., 2001).

그러나 연약지반상에 축조된 저수지 제체에서는 성토완료 후 담수전의 공극수압 변화와 침하거동에 대한 해석은 기존의 압밀이론에 의하여 가능하나, 담수 후에는 기존의 성토 제체에 관한 압밀이론으로는 설명할 수 없는 팽창(swelling)현상과 잔류침하현상이 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 서해안 간척지 내의 연약지반상에 축조된 농업용 저수지의 성토하중과 수위변화를 고려한 과잉공극수압을 예측하기 위하여 실내모형실험과 현장시험을 수행하고, 제안식을 실측치 및 유한차분법과 비교분석 하여 그 결과를 제체의 압밀도 평가에 적용하고자 한다.

2. 성토하중과 수위변화를 고려한 과잉공극수압

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

연약지반상에 축조된 저수지 제체는 일반도로 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.

그림 1은 연약지반상에 축조된 저수지 제체가 성토완료후에 담수를 시작하면서 발생하는 공극수압을 도식적으로 나타낸 것이다. 일차원 압밀에서 정수압과 성토하중에 의하여 산출된 과잉공극수압(a)을 성토하중에 의한 과잉공극수압(b)과 정수압으로 인한 과잉공극수압(c)으로 구분하여 나타낸 것이다.

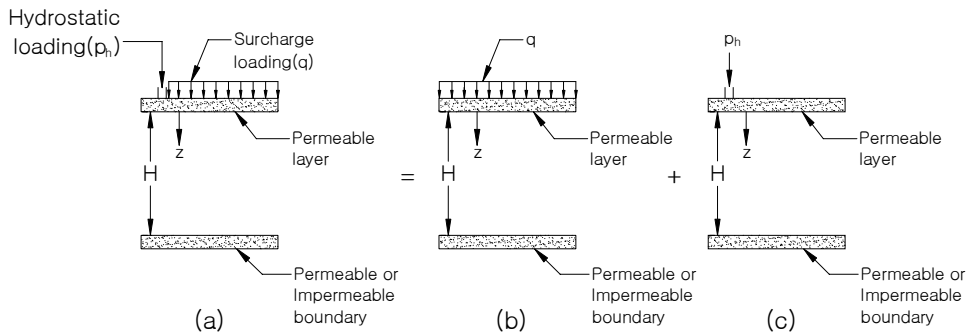


그림 1. 저수지 제체의 과잉공극수압의 예측 [(a) 전체적인 하중 조합 (b) 성토하중 (c) 정수압(담수)]

성토하중 q , 정수압 p_h 에 대한 과잉공극수압의 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vs} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (0 < z < H, t > 0) \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_{vh} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (0 < z < H, t > 0) \quad (2)$$

여기서, c_{vs} : 성토하중에 대한 압밀계수, c_{vh} : 정수압 상태에서의 압밀계수이다.

성토하중과 정수압상태에서 흙의 상층이 자유배수인 경우와 흙의 바닥이 불투수성인 경우에 따라서 초기 및 경계 조건은 임의의 깊이 z 와 시간 t 에서 각각 다르게 나타나고, 과잉공극수압은 (+)이고 최종적으로 작용하는 정수압에 근접한다.

성토하중의 경우는 기존에 일반적으로 사용해 왔던 Terzaghi 이론을 근거로 식(1)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_s(z, t) = q \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin \left[\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{z}{H} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{2n+1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{c_{vs}}{H^2} t \right] \right] \quad (3)$$

정수압 상태에서 압밀이론을 유도하기 위한 가정은 Terzaghi의 일차원 성토하중에 의한 압밀이론과 유

사하게 담수높이를 공극수압으로 바꾸어 나타낼 수 있다. 지정된 초기 및 경계 조건을 갖는 정수압의 경우 식(2)는 다음과 같다.

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

따라서 정수압과 성토하중을 조합한 경우의 과잉공극수압은 식(3)과 식(4)의 합이고, 정수압 상태에서는 압밀계수를 적용할 수 없으므로 등가압밀계수 c_{vc} 를 흙의 압밀계수와 동일하게 이용하면 식(5)로 나타낼 수 있다. 이 식은 제체의 성토하중으로 인한 과잉공극수압(u_s)과 성토완료 후 저수지 담수로 인한 과잉공극수압(u_h)를 조합하여 전체적인 과잉공극수압(u)을 예측하기 위해 유도된 식이다.

$$u(z, t) = u_h(z, t) + u_s(z, t) \\ = p_h + (q - p_h) \sum_{n=0}^{\infty} \frac{4}{(2n+1)\pi} \sin \left[\left(\frac{2n+1}{2} \pi \frac{z}{H} \right) \times \exp \left[- \left(\frac{2n+1}{2} \right)^2 \pi^2 \frac{c_{vc}}{H^2} t \right] \right] \quad (5)$$

여기서, u_h, u_s : 정수압과 성토하중에 의한 과잉공극수압,

p_h : 정수압, q : 성토하중, H : 연약층 두께, c_{vc} : 압밀계수

3. 재료 및 방법

3.1 분석대상 지반

연구 분석대상 지반은 00지구 농업용 저수지의 현장시험자료 (시추조사 및 시료채취, 표준관입시험, Piezocone 조사)를 이용하여 연약지반의 분포특성과 역학적 특성을 파악하였다.

지반조사결과 N치 6이하의 연약점성토층이 5.0~10.0m 정도 분포되어 있고, 계측기 배치는 조사 자료를 기초로 원지반의 압밀침하 및 사면안정검토를 실시하기 위하여 주계측단면(DP-3)과 부계측단면(DP-5)을 선정하였다. 실내시험은 대상현장에서 채취한 교란시료와 불교란 시료를 이용하여 물리적 성질, 역학적 성질, 압밀특성시험을 실시하였으며 시험결과는 표 1과 같다.

표 1. 지반조사 결과

No.	Depth (m)	Wn (%)	Gs	Atterberg Limits		Triaxial test (UU)	Consolidation Test				U.S.C.S
				LL (%)	PI (%)	c_u kPa	Pc kPa	Cc	eo	c_v cm/s	
DP-3	2.0~4.0	44.8	2.720	32.9	17.1	31.0	70	0.42	1.180	2.330E-3	CL
DP-3	6.0	43.3	2.675	51.3	22.2	31.0	101	0.37	1.180	3.020E-4	MH
DP-3	8.0	42.9	2.624	63.9	38.3	19.1	94	0.41	1.250	1.030E-3	CH
DP-5	3.0	41.1	2.651	45.9	30.9	33.2	94	0.41	1.250	1.030E-3	CL
DP-5	7.0	52.6	2.659	65.0	38.0	31.0	80	0.45	1.367	9.611E-4	CH

3.2 실내모형실험

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

모형실험장치는 200 (가로)×100 (세로)×76 (폭) cm 크기로 아크릴을 사용하여 제작하였고, 현장에서 채취한 교란시료를 N0. 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 수위를 5, 10, 15, 20, 10, 0, 20 cm 로 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.

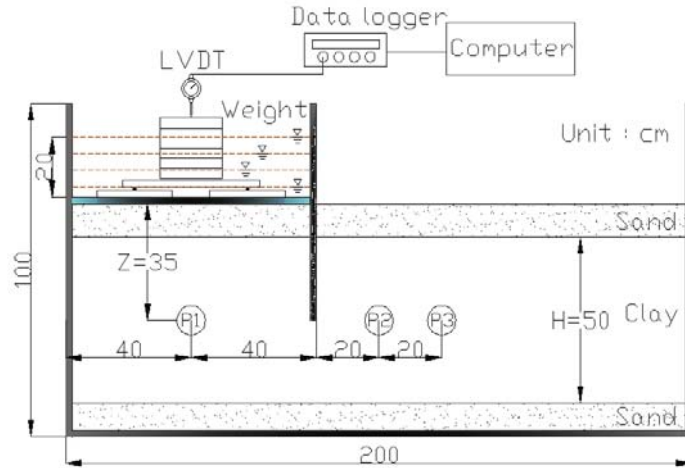


그림 2. 실내모형실험 장치

3.3 성토시공 및 현장계측

계측기의 매설위치는 그림 3과 같이 배치하였으며, 계측방식은 자동계측방식을 채택하였다. 저수지 제체의 성토는 515일 동안 총 성토높이 10.8m까지 시공 완료하고, 방치기간을 포함하여 총 1,054일 동안 현장계측을 실시하였다. 담수는 11개월동안 담수하여 E.L.(+)8.00m의 수위를 유지하였다. 성토시공속도는 침하관리와 안정관리를 병행하면서 조절하였고, 침하량은 지표면 침하관 및 층별침하계를 이용하였으며, 공극수압계는 진동현식을 사용하였다.

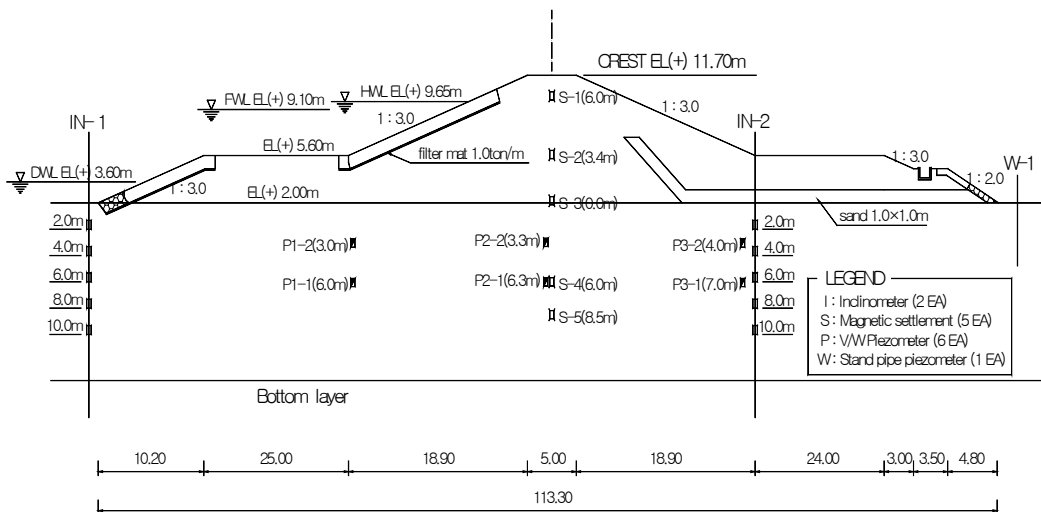


그림 3. DP-3 지점에서 계측기 매설 현황

4. 결과 및 고찰

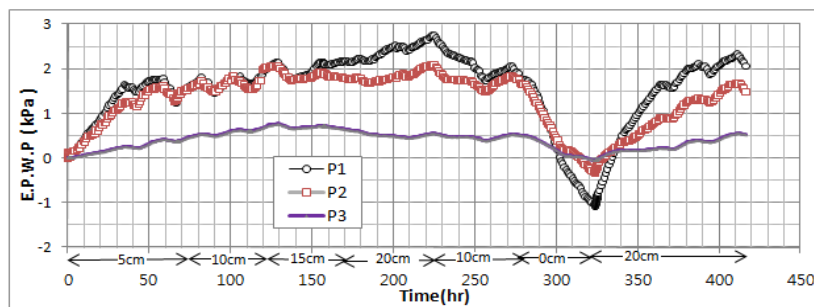
4.1 실내모형실험에 의한 과잉공극수압의 예측

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.

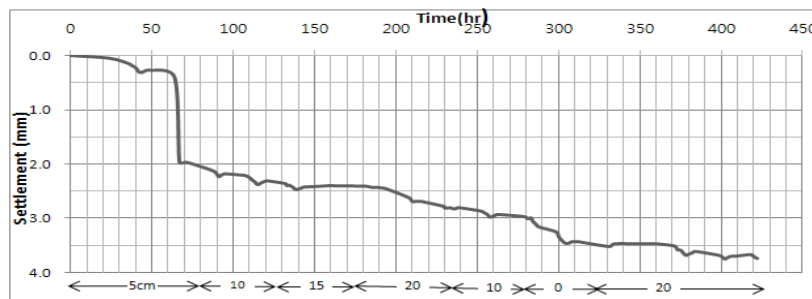
실내모형실험에서 수위상승은 저수지 성토 후 담수와 같은 형태로 현장을 모사할 수 있기 때문에 제안식이 실측치와 유사한지 여부를 우선적으로 검증할 수 있다.

그림 4 (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.



(a) 시간-과잉공극수압



(b) 시간-침하량

그림 4. 수위변화에 따른 침하량과 과잉공극수압의 변화

수위변화에 따른 과잉공극수압은 상류 (P1)와 중앙 (P2)에서 상승과 하강에 따라 민감하게 나타났으나 하류 (P3)에서는 큰 변화 없이 일정한 분포형태를 나타냈다.

하중재하 후 수위변화에 따른 침하량은 그림 4(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.

그림 5는 수위를 0, 5, 10, 15, 20 cm로 상승하였을 경우, 상류 (P1), 중앙 (P2), 하류 (P3)에서 측정한 과잉공극수압을 제안식 및 Terzaghi 방법으로 구한 과잉공극수압과 비교한 것이다. 제안식 (식 5)은 성토하중에 의한 과잉공극수압 (u_s)과 정수압 (담수)으로 인한 과잉공극수압 (u_h)을 조합하여 과잉공극수

압을 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.

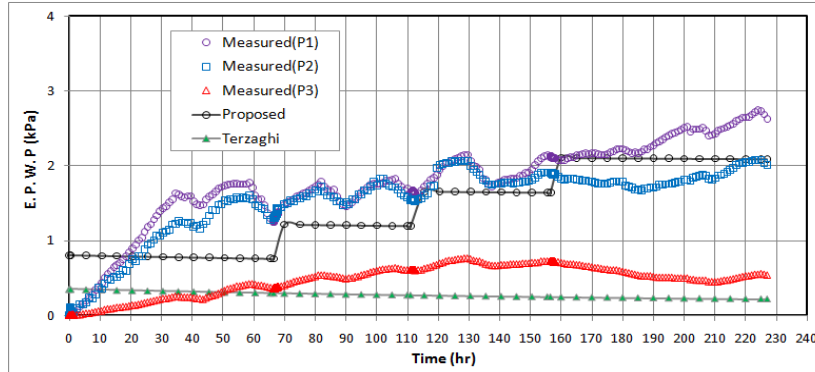


그림 5. 측정치와 제안식 및 Terzaghi 방법에 의한 과잉공극수압 변화

그림 6은 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.

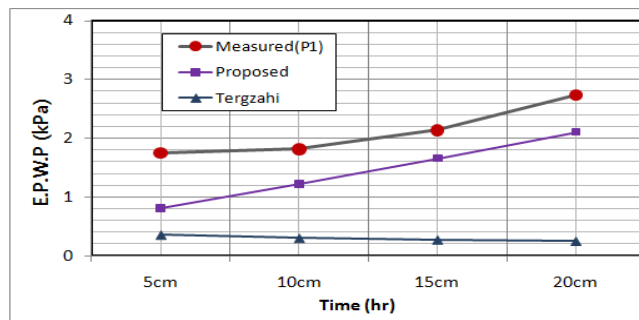


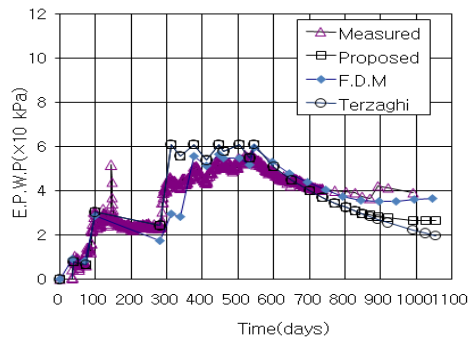
그림 6. 수위변화에 따른 과잉공극수압 예측 (P1)

4.2 현장시험에 의한 과잉공극수압의 예측

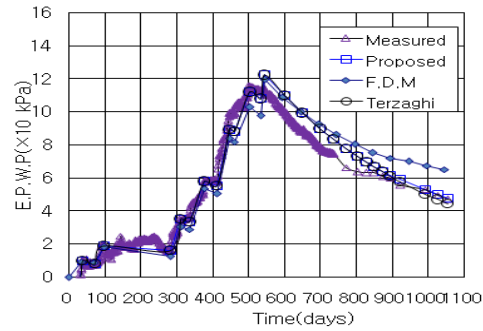
공극수압의 거동은 지반의 투수성과 포화정도, 재하이력에 의하여 영향을 받는데, 실제지반에서는 이들 요소들을 제대로 평가하기 어렵기 때문에 재하시 유발되는 공극수압의 크기와 소산시간 등을 정확하게 예측하는 것은 매우 어려운 일이다. 저수지 체체의 재하과정은 시간 의존적이기 때문에 임의의 성토하중에서 시간과 깊이에 따른 과잉공극수압 거동을 예측하기 위해서 유한차분법(FDM)을 이용하였다 (Budhu, 2000).

제안식 (5)으로 과잉공극수압을 예측하기 위해서는 첫 번째로 성토하중(q) 증가에 따른 지중응력 분포를 고려해야 하는데, 본 현장의 저수지 제체는 압성토 공법으로 시공되었고 성토 사면선에서 성토고가 10.8m까지 성토되었다. 만일 특정심도에서 지중응력이 성토고가 증가함에 따라 비선형으로 변화한다면 주어진 성토조건에서 압밀침하곡선의 형태가 변하게 되므로 최종침하량도 다르게 나타난다. 따라서 성토하중(q)가 증가하는 동안 심도 GL-5m 지점에서의 지중응력을 2:1 분포법으로 계산하면 성토고의 증가에 따라서 심도도 증가하고 재하폭은 감소하기 때문에 지중응력은 비선형적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 경우는 지반의 토질정수가 동일한 경우에도 토층을 여러 층으로 분리하여 지중응력을 다르게 적용하였다. 두 번째로 성토완료 후 저수지의 수위가 상승하게 되면 경과시간에 따라 제체내부는 침투수에 의해 침윤선의 변동이 발생한다. 따라서 저수지 담수에 따른 정수압(p_h)의 증가를 고려해야 하는데 동일조건에서 예측치와 실측치를 비교하기 위해서 계측된 지하수위 자료를 이용하여 분석하였다. 분석대상지점은 제체의 중앙에 위치한 양면배수지점(DP-3지점)과 제체 우안쪽 가까이 연약지반심도가 얇은 일면배수지점(DP-5지점)에 대하여 분석하였다.

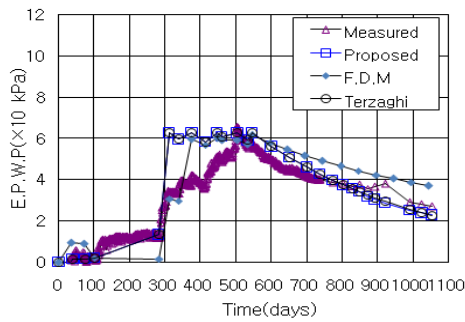
그림 7은 제체의 상류측, 중앙, 하류측에서 Terzaghi 방법과 유한차분법 및 제안식에 의해 과잉공극수압을 예측하고 실측치와 비교한 것이다.



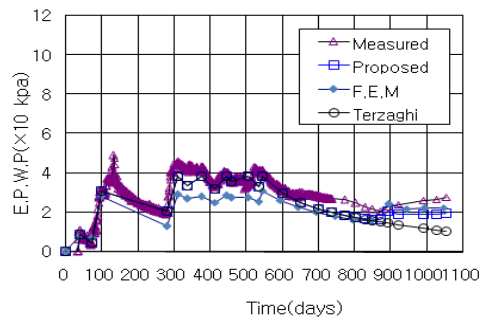
(a) DP-3 (P1-2:GL-3.0m, upstream)



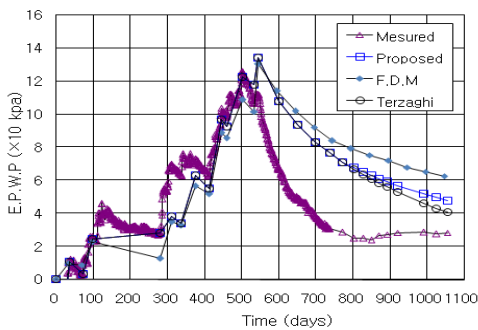
(b) DP-3 (P2-2:GL-3.3m, middle)



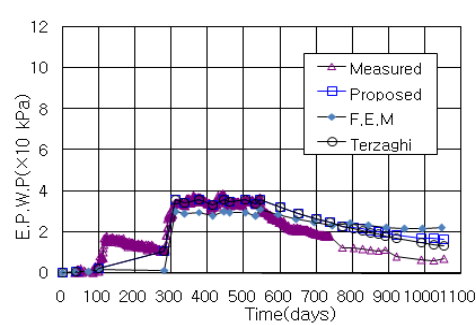
(c) DP-3 (P3-2:GL-4.0m, downstream)



(d) DP-5 (P4-1:GL-2.5m, upstream)



(e) DP-5 (P5-1:GL-2.8m, middle)



(f) DP-5 (P6-1:GL-3.5m, downstream)

그림 7. 측정치, 제안식, F.D.M 및 Terzaghi 방법에 의한 과잉공극수압의 변화

DP-3지점의 상류측(그림 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 완만하게 소산되고, 유한차분법과 제안식은 수위상승에 의한 정수압 영향을 고려하였기 때문에 과잉공극수압이 약간 상승 하였다.

중앙(그림 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(그림 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 하류측의 매설되어 정수압이 증가한 만큼 공극수압이 증가하지 않았기 때문에 시간에 따라 완만하게 소산되는 것으로 판단된다.

DP-5지점(그림 d)의 상류측에서 실측된 과잉공극수압은 낮은 성토하중으로 인하여 작고, 소산속도도 느리게 나타났다. 담수전까지 3가지 방법으로 예측된 과잉공극수압은 실측치와 유사하게 나타났지만, 담수 후(850일)에는 Terzaghi 방법은 계속해서 완만하게 소산되어 실측치와 차이를 나타냈고, FDM과 제안식은 정수압 증가의 영향으로 약간 상승(팽창)하면서 실측치와 유사하게 나타났다.

중앙(그림 e)에서 실측된 과잉공극수압은 성토 중에는 증가하다가, 성토가 중지되면 빠른 속도로 소산되고, 담수 후(850일)에서는 정수압증가로 인하여 과잉공극수압이 상승하는 현상을 나타내고 있다. 성토완료 후 예측된 과잉공극수압은 소산의 기울기로 보면 실측치와는 큰 차이를 나타내지만 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접하는 것으로 나타났다.

하류측(그림 f)에서 실측된 과잉공극수압은 낮은 성토하중으로 인하여 발생크기도 작고 소산속도도 느리게 나타났다. 예측된 과잉공극수압은 3가지 방법 모두 실측치와 약간의 차이를 나타냈고, 담수 후에는 소산속도가 완만하게 나타났다.

전체적으로 상류측에서 실측된 과잉공극수압은 담수로 인한 정수압 증가의 영향으로 약간 상승(팽창)하는 것으로 나타났고, 제안식에 의해 예측된 과잉공극수압거동과 유사한 경향을 나타냈다.

제체 중앙에서 제안식에 의해 예측된 과잉공극수압은 양면배수조건(DP-3)에서는 실측치와 유사한 경향을 나타냈고, 일면배수조건(DP-5)에서는 큰 차이를 나타냈지만 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접하는 것으로 나타났다. 하류측에서 실측된 과잉공극수압은 정수압의 영향을 거의 받지 않는 지점에 매설되었기 때문에 시간에 따라 완만하게 소산되는 현상을 나타냈고, 제안식에 의해 예측된 결과와 유사하게 나타났다.

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.

일반적으로 지반에 하중이 가해지면 그에 상응하는 과잉공극수압이 발생하는 것으로 알려져 있으나, 실제실험 및 계측에 의하면 초기에는 예상보다 더 작은 공극수압이 관찰된다고 하였다(Leroueil et al., 1986). 이는 지반의 불충분한 포화 또는 과압밀 상태에 있는 점토의 압밀에 의하여 압밀계수가 크게 된다. 지반이 침하를 일으키면 단면의 기하학적 형상이 많이 달라지는데, 경우에 따라서 성토체 일부가 지하수위 아래까지 침하하기도 한다. 이 경우 지하수위 아래 부분은 부력을 받게 되어 지반의 상재 하중이 감소되는 효과가 발생한다.

두개의 공극수압계가 같은 깊이에 설치되어 있더라도 중앙선 근처의 과잉공극수압은 중앙선 바깥쪽의 과잉공극수압보다 항상 약간 더 크다. 또한, 측정지점 깊이에 따라 아래에 위치한 공극수압계는 위쪽보다 약간 더 큰 과잉공극수압을 나타내고 있다고 하였다(Rowe et al., 2001; Dascal et al., 1975).

4.3 예측된 과잉공극수압에 의한 압밀도 평가

포화된 연약지반에 점증하중이 작용할 경우, 성토하중에 의하여 발생하는 과잉공극수압은 점차로 증가하고 최종 성토고에서 최대치를 나타내고 그 이후에는 소산하기 시작한다. 그러나 전체적인 과잉공극수압의 소산은 성토시공 중의 소산과 최대과잉공극수압 이후의 소산이 합성되어 발생하는 복합적인 거동을 나타내게 된다.

그림 8(a)는 제체중양에서 Terzaghi 방법과 FDM 그리고 제안식에 의해 예측된 압밀도를 실측치와 비교한 것이다. 압밀도는 성토재하시 점증하중형태로 시공되므로 과잉공극수압의 발생과 소산에 따른 영향을 고려하였다. 성토완료 후 초기에는 각 방법에 의한 예측치와 실측치가 약간 다르게 나타났지만, 담수 후(850일)에 Terzaghi 방법과 유한차분법 그리고 제안식에 의한 압밀도는 2.4%~5.0% 범위로 거의 같은 값을 나타내고 있다.

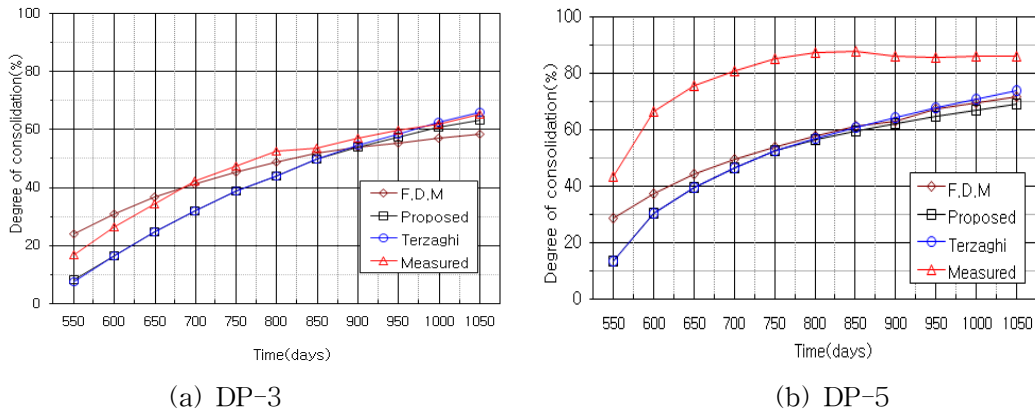


그림 8. 시간에 따른 압밀도의 변화

그림 (b)는 제체중양에서(DP-5) Terzaghi 방법과 유한차분법 그리고 소산된 과잉공극수압을 이용해서 제안식으로 구한 압밀도를 실측치와 비교한 것이다. 실측된 과잉공극수압은 성토완료 후 초기에 빠르게 소산됨에 따라 압밀도가 급격히 증가하고, 담수 후(850일)에는 정수압 증가의 영향으로 압밀도 변화가 거의 없이 일정하게 나타났다. 담수후에 Terzaghi 방법과 유한차분법 그리고 제안식에 의한 압밀도는 1.7%~4.6% 범위로 매우 유사하게 나타났다.

3가지 방법으로 예측한 압밀도는 실측치와는 큰 차이를 나타냈지만 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접하는 것으로 나타났다. 실측치와 이론치의 차이에 있어서 현저하게 큰 값을 나타내는 것은 실트분이 많은 연약지반으로 과잉공극수압이 빠르게 소산되기 때문이며, 일면배수조건, 계산치에 적용된 토질 정수와 현장과의 불일치성 등의 원인으로 판단된다.

이상과 같이 예측된 과잉공극수압으로 압밀도를 평가하여 본 결과, 양면배수조건(DP-3)에서 제안식에 의해 예측된 압밀도는 실측치와 유사하게 나타났고, 일면배수조건(DP-5)에서 제안식에 의해 예측된 압밀도는 매우 작게 평가되었지만, 시간이 경과함에 따라 실측치에 근접하는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 서해안 간척지 내의 연약지반상에 축조된 농업용 저수지의 성토하중과 수위변화를 고려한 과잉공극수압을 예측하기 위하여 실내모형실험과 현장시험을 수행하고, 제안식을 실측치 및 유한차분법과 비교분석 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

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 나타났다.

2. 제안식을 검증하기 위하여 현장시험을 수행한 결과, 담수 후에는 제안식이 기존의 방법보다 실측치에 더 근접하게 나타났고, 제안식으로 구한 담수 후의 압밀도는 양면배수조건(DP-3)에서는 실측치와 유사하였으며, 일면배수조건(DP-5)에서는 실측치보다 다소 작게 나타났다.

3. 연약지반상에 축조된 농업용 저수지의 과잉공극수압은 담수의 영향을 고려하여야 하기 때문에 이를 예측하기 위한 계산식을 제안하여, 현장실측치와 비교 분석한 결과 실측치에 근접하게 나타나서 현장 적용성이 높은 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. 농림부(2002), “농업생산기반정비사업 계획 설계기준(필댐편)”, pp.332~334.
2. 농어촌공사(2002), “00지구 농촌용수개발사업 연약지반 침하안정관리 계측보고서”
3. Balasubramaniam, A. S., Bergado, D. T. Noppadol, P. Long, P. V. and Ahamad, M. (1997), “Performance of test embankments with prefabricated vertical drains in soft Bangkok clay”, *Proc. 14th ICSMFE, ISSMFE, Vol.3* : 1723~1726.
4. Budhu, M. (2000), *Soil Mechanics and Foundations*, New York, John Wiley and Sons, pp.166~168.
5. Crawford, C. B., Fannin R. J. and Kern, C. B.(1995), “Embankment failures at Vernon”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.32: 271~284.
6. Dascal, O., and Tournier, J. P.(1975), “Embankments on soft and sensitive clay foundation”, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 101(GT3): 297~314.
7. Duncan, J. M.(1993), “Limitations of conventional analysis of consolidation settlement”, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 119 (9):1331-1359.
8. Indraratna, B. and Balasubramaniam, A. S.(1992), “Performance of test embankment constructed to failure on soft marine clay”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 118(1): 12~33.
9. Lee, D.W., and Yoon, H. J. (2005), “Estimation of degree of consolidation in soft ground using field measurements and rheology model”, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers* Vol. 47(2): 87~96.
10. Leroueil, S., Tavenas, F. Trak, B. La Rochelle, P. and Roy, M.(1978a), “Construction pore pressures in clay foundations under embankments, Part I : The Saint-Alban test fills”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15(1): 54~65.
11. Leroueil, S. and Tavenas, F.(1986), “Discussion on effective stress paths and yielding in soft clays below embankments”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 23(3): 410~413.
12. Mesri, G. and Choi, Y. K.(1985), “Settlement analysis of embankments on soft clays”, *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, Vol. 111(4): 441~464.
13. Min, H.G., and Lee, D. W.(2008), “Prediction of excess pore water pressure of reservoir embankment on soft ground”, *J. of Korean Society of Agricultural Engineers* Vol. 50(2): 37-44.
14. Rowe, R. K., Gnanendran, C. T. Valsangkar, A. J. and Landva, A. O.(2001), “Performance of a test embankment constructed on an organic clayey silt deposit”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 38(6): 1283~1296.
15. Skempton, A. W.(1954), “The pore pressure coefficients A and B”, *Géotechnique*, Vol.4: 143~147.
16. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley&Sons, New York
17. Zhang, L.(1999), “Settlement patterns of soft soil foundations under embankments”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 36(4): 774~781.