

軟弱地盤上에 築造된 農業用貯水池 堤体の 壓密舉動

오범환 · 이달원* · 임성훈

Consolidation Behavior of Agricultural Reservoir under Embankment on Soft Ground

Beom-Hwan Oh · Dal-Won Lee* · Sung-Hoon Eam

ABSTRACT

This study was performed to evaluation the consolidation behavior of agricultural reservoir in the very soft ground.

The final settlement prediction methods by Terzaghi, Hyperbolic and Asaoka methods were used to compare with the degree of consolidation estimated by excess pore water pressure. The dissipated excess pore water pressure during embankment construction and peak excess pore water pressure on the completed embankment were suggested for the estimation of the degree of consolidation. It was concluded that the degree of consolidation estimated from dissipated excess pore water pressure was more reliable than that from the peak excess pore water pressure.

The stability methods for agricultural reservoir was used to compare and analyze with various condition by limit equilibrium method.

이 논문은 2001년도 충남대학교 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

충남대학교 농업생명과학대학 농공학과(Dept. of Agricultural Engineering, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Nat'l Univ., Daejeon 305-764, Korea)

*교신저자(E-mail: dwlee@cnu.ac.kr, Tel: 042-821-5793)

서 론

경제성장과 더불어 공업용지 및 주거용지의 수요가 날로 증가됨에 따라 매년 약 20,000ha 정도의 농경지 면적이 잠식되어 가고 있어 식량의 자급자족 측면에서 심각한 문제점이 대두되고 있는 추세이다. 그 동안 내륙의 지반 조건이 양호한 지역에서 개발이 고갈됨에 따라 개발여건이 열악한 해안 연약지반에 방조제를 축조하여 농경지를 확대하는 간척사업이 진행되어 왔으나 생태계 보전등 여러 가지 환경문제 때문에 앞으로 대규모 간척사업은 어렵고 소규모 간척사업이 주로 시행될 것으로 예상된다.

이와 같이 소규모 간척사업지구내에서 농업용수의 원활한 공급과 농촌지역 주민들의 농업기반정비 사업의 개선요구 증가로 인하여 기존에 해안지역에 축조되지 않았던 농업용저수지, 용배수로등의 수리시설물을 축조하여 농촌지역 개발을 촉진시킬 수 있는 방안이 요구되고 있다. 특히, 해안지역의 연약지반상에 축조되는 농업용 저수지는 점토 및 실트등의 지반 공학적 성질이 복잡한 특성을 가지고 있으며, 지반의 강도가 작고 침하등의 변형이 크기 때문에 여러 가지 문제가 발생되고 있다.

농업용 저수지를 이와 같은 연약지반 위에 성토하는 것은 일반도로 구조물과는 다르게 축조후 저수량을 확보하여야 하기 때문에 침하 뿐만 아니라 안정관리에도 신중한 검토가 이루어져야 하고, 안정관리 검토결과에 따라 성토시공속도 및 후속공사의 착수시기를 결정하여 시공관리방안을 제시하여야 한다. 그러나, 실제 시공현장에서 시행중인 안정관리는 이론적인 근거와 경험이 빈약함에도 불구하고 시공상의 필요에 따라 조기성토를 실시하고 있어 많은 문제점이 발생하고 있다.(Bergado 등, 1991; 藤田, 1995)

이러한 문제점을 해결하기 위한 가장 합리적인 방법은 침하계와 간극수압계, 경사계등의 현장계측기를 매설하여 실제 지반의 거동을 파악하고 설계에 직접 반영하므로서 현장시공의 최적화를 도모하는 계측관리이다.

연약지반의 복잡한 물리·역학적 특성으로 인하여 이론적 해석방법과 실측치 사이에 차이가 있고, 지역별 및 토질별 조건에 따른 압밀거동 분석의 선정기준을 표준화 할 수는 없지만, 실제현장의 실측자료를 이용하여 될수 있는대로 충실히 반영하고 비교분석하여 예측의 정도를 높이는 연구를 바탕으로 해결하여야 한다.

따라서, 본 연구는 연약지반상에 축조되는 농업용 저수지의 압밀거동을 현장계측결과를 기초로 기존의 예측방법등과 비교분석하고, 시공중 또는 완공후에 측방유동, 용기등으로 인하여 국부적인 전단파괴 가능성을 현장계측치로부터 정량적으로 파악하여 농업용저수지의 설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 분석대상 지반

본 연구에 적용된 자료는 충남 태안군에 위치한 농촌용수개발 사업지구에서 시공중인 농업용 저수지의 현장시험자료 (시추조사 및 시료채취, 표준관 입시험, Piezocone 조사)를 이용하여 연약지반의 분포특성과 역학적 특성을 파악하였고, 실내시험은 대상 현장에서 채취된 교란시료와 불교란 시료를 이용하여 물리적 성질, 역학적 성질, 압밀 특성시험을 실시하여 현장시험자료와 비교 분석하였다.

지반조사 결과 Fig. 1과 같이 N치 6이하의 연약 점성토층이 5.0~10.0m 정도로 분포되어 있고, 점

성토층 하부에 모래질 자갈 및 실트질 모래, 점토질 실트로 구성되어 있으며, DP-3 지점은 양면배수조건을 충족할 수 있는 지반이나 DP-5 지점은 하부층이 점토질 실트로 일면배수 조건의 지반으로 조사되었다.

또한, Piezocone 조사결과(Campanella 등, 1983) 연약층 심도가 가장 큰 DP-3지점의 하부층은 간극수압이 급격히 떨어지는 사질토의 특성을 보이며 비배수 전단강도가 평균 0.21kgf/cm²의 값을 보이고 있다.

실내시험은 시추조사시 수행된 표준관입시험에 의해 채취된 호트러진 시료 및 자연시료를 대상으로 물리적·역학적 특성 파악을 위해 한국공업규격(KS F)의 시험방법에 따라 시험을 수행하였다. 또한, 조사지역의 연약 점성토층에서 채취된 불교란 시료를 대상으로 안정해석에 필요한 강도정수를 구하기 위하여 삼축압축시험 및 압밀시험을 실시하였으며 시험결과는 Table 1과 같다.

현장지반조사 결과 지층은 CL~CH로 구성되어 있고, 연약층의 두께는 5~10m범위이며, N치는 연약층의 두께가 가장 큰 지역에서는 1~5범위로 분포하고 있다.

자연함수비와 액성한계는 각각 41~53%와 44~65%의 범위이고, 압밀침하량을 결정하는데 중요한 상수인 압축지수는 0.37~0.45의 범위로 분포되어 있다.(Schmertmann, 1975)

2. 성토시공 및 현장계측

연약지반에 있어서의 현장 계측에는 침하, 변형, 수압 및 토압이 주요 계측대상이 되므로 계측기 종류는 경사계, 지하수위계, 층별침하계, 간극수압계, 지표면 침하판을 설치하였다

계측기의 매설 위치는 최소 수량으로 최대 효과를 얻을 수 있도록 제반 여건을 감안하여 Fig. 2와 같이 배치하였으며, 계측방식은 자동계측방식을 채택하였다.

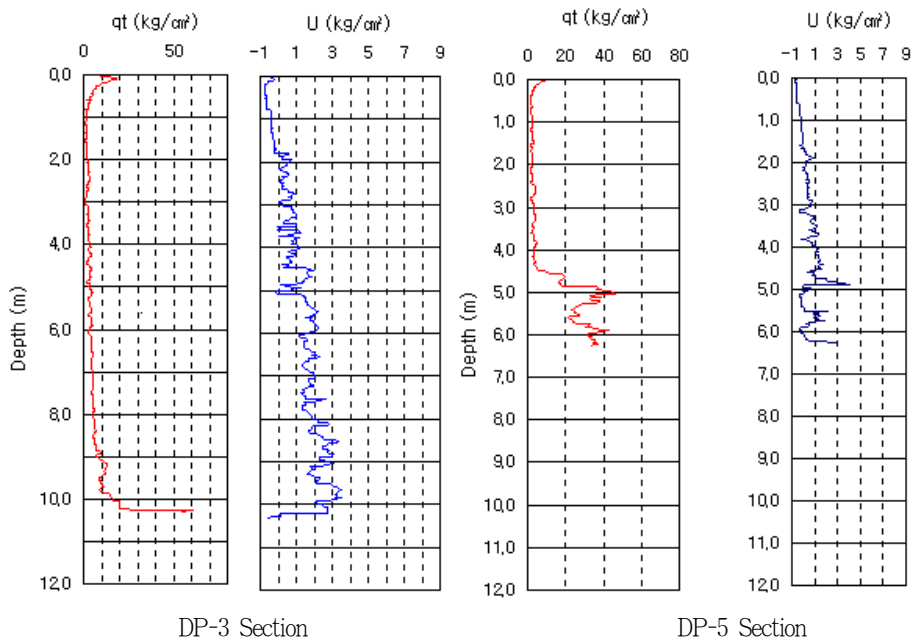


Fig. 1. Result of the piezocone test

Table 1. Geotechnical properties at various site

No.	Depth (m)	Wn (%)	Gs	Atterberg limits (%)		Shear parameters UU c kgf/cm ²	Consolidation test				Grain size distribution % finer than			U.S.C.S
				LL	PI		Pc kgf/cm ²	Cc	eo	Cv cm ² /s	No. 40	No. 200	0.005 mm	
BH-1	2.0	41.9	2.633	44.3	21.9	0.408	0.94	0.41	1.25	1.03E-3	99.96	99.19	37.0	CL
BH-1	4.0	46.7	2.636	58.7	26.1	0.31	1.02	0.42	1.205	1.841E-3	99.74	97.51	34.0	MH
BH-2	6.0	43.3	2.675	51.3	22.2	0.31	1.01	0.37	1.180	3.020E-4	99.85	94.00	28.5	MH
BH-2	8.0	42.9	2.624	63.9	38.3	0.191	0.94	0.41	1.25	1.03E-3	99.41	53.96	22.5	CH
BH-3	3.0	41.1	2.651	45.9	30.9	0.332	0.94	0.41	1.25	1.03E-3	99.91	98.41	25.0	CL
BH-3	7.0	52.6	2.659	65.0	38.0	0.31	0.80	0.45	1.367	9.611E-4	99.68	94.66	37.0	CH
Avg	-	44.8	2.64	54.9	29.6	0.31	0.94	0.41	1.25	1.03E-3				

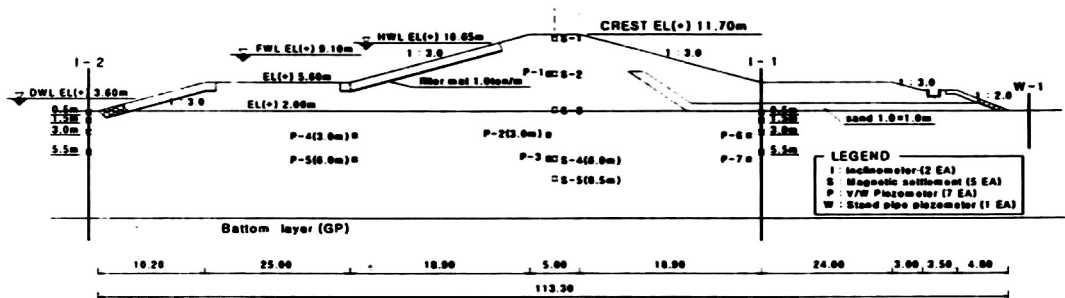


Fig. 2. Reservoir section and monitoring location (DP-3)

계측기 배치는 지반조사 자료를 이용하여 압밀 침하 및 사면안정검토를 실시하고 주계측단면 (DP-3)과 부계측단면(DP-5)를 선정하였으며, 그 기준은 연약점성토층 두께가 가장 깊은 위치, 성토 고가 가장 높은 위치, 침하량이 가장 큰 위치, 부등침하의 우려가 있는 위치, 성토 시공중 사면 파괴가 예상되는 위치, 침투류에 의해 제체의 안정에 위협 가능성이 있는 위치 등을 고려하였다.

저수지 제당의 성토시공은 2000. 8~2000. 10월 까지 약 68일 동안 1차 성토고 2.4m를 완료하고 약 5개월 동안 방치한 후, 2001. 4~2001. 5월까지 약 30일 동안 성토고 1.8m를 완료하여 2차 성토고 4.2m를 완료하였다.

그 후 10~30cm의 높이로 성토시공을 계속하여 2002. 1월까지 515일 동안 총성토고 10.8m까지 완료한 상태이고 192일간의 방치기간을 포함하여 총 707일 동안 현장계측을 실시하였다.

성토 시공속도는 침하관리와 안전관리를 병행하면서 조절하였고, 침하량 측정은 지표면 침하관 및 층별 침하계를 이용하였으며, 간극수압계는 진동현식을 이용하여 측정하였다.

3. 분석방법

가. 최종침하량의 추정방법

연약지반에 축조되는 저수지의 최종침하량을 예측하는 방법들은 각각의 제안식마다 가정조건들이

다르기 때문에 신뢰성 평가에 어려움이 있으나, 본 연구 대상 지구는 무처리 지반이기 때문에 Terzaghi 방법에 의한 시간-침하량곡선을 이용하여 실측치와 예측치를 분석하였다. 또한, 현장 계측결과로부터 최종침하량을 예측하는 방법은 쌍곡선방법(Tan 등, 1996), Asaoka 방법(Asaoka, 1978) 등을 이용하여 비교분석 하였으며, 계측된 과잉간극수압의 소산을 이용하여 압밀도를 분석 하였다.

나. 과잉간극수압에 의한 압밀도 분석방법

연약지반상에 성토하중이 작용할때 Terzaghi에 의한 1차원 압밀방정식으로부터 경계조건과 초기조건을 적용하여 구한 과잉간극수압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.(Das, 1990)

$$u = \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2u_i}{M} \sin \frac{Mz}{H} \exp(-M^2 T_v) \quad (1)$$

여기서, U_d =초기과잉간극수압, $M = \frac{(2m+1)\pi}{2}$,

m = 정수, $T_v = \frac{C_v t}{H^2}$, H =배수거리, z =점

토층 상면으로부터의 연직거리이다. 따라서 임의시간에 임의 깊이에서의 과잉간극수압의 소산을 이용한 압밀도는 다음과 같다.

$$U_p(U_d) = 1 - (u_t/u_i) = 1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} \exp(-M^2 T_v) \quad (2)$$

여기서, U_p = 최대과잉간극수압으로 구한 압밀도, U_d =소산된 과잉간극수압으로 구한 압밀도, u_t =임의의 시간에서의 과잉간극수압, u_i =초기 과잉간극수압이다.

(u_i) 초기 과잉간극수압을 고려하여 압밀도를 추정할 경우에는 Fig.3과 같이 두 가지로 구분할 수 있다. 첫번째는 성토완료시의 최대과잉간극수압(peak)을 그대로 이용하는 경우이고 (U_p), 두 번째는 성토초기부터 성토완료시까지 점증하중의 형태로 시공되므로 각 성토단계별로 성토전후의 간극수압을 측정하여 성토중에 발생된 과잉간극수압의 소산(dissipation)과정을 이용하는 경우이다. (U_d)

일반적으로 압밀도를 구할 경우 성토완료후에 최대과잉간극수압 이후의 결과만을 이용하고 있다.

이와같은 방법은 비교적 간단하게 압밀도를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 성토초기부터 성토완료시까지 소산된 과잉간극수압을 합리적으로 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 특히 과압밀점토에서는 부의 과잉간극수압이 나타날 경우도 있고, 실트분이 많은 지반은 과잉간극수압이 빠르게 소산되기 때문에 표준적인 거동과는 다르게 나타나므로 압밀도에도 큰 차이가 발생하게 된다.

본 연구에서는 위와 같이 소산된 과잉간극수압에 의하여 압밀도를 추정하는 방법이 최대과잉간극수압을 이용하는 것보다 더 타당함에도 불구하고, 계측자료의 신뢰성 여부등으로 고가장비인 간극수압계의 자료가 제대로 활용되지 못하고 매설 목적과는 다르게 비효율적이고 비경제적인 경우가 많아 이들의 효율적 활용방안의 하나로 연약지반에서 가장 중요하게 다루어지고 있는 압밀도 추정 방법에 이용하고자 하였다.

다. 한계평형법에 의한 안정성 분석

사면안정의 해석시 사용하는 해석법은 유한요소법과 같은 수치해석법과 한계평형해석법으로 구분된다. 한계평형법은 유효응력 해석도 가능하지만 주로 파괴가 발생하는 임계면에서의 역학적인 평형관계만을 해석하는 비배수 단기안정해석($\Phi=0$)해

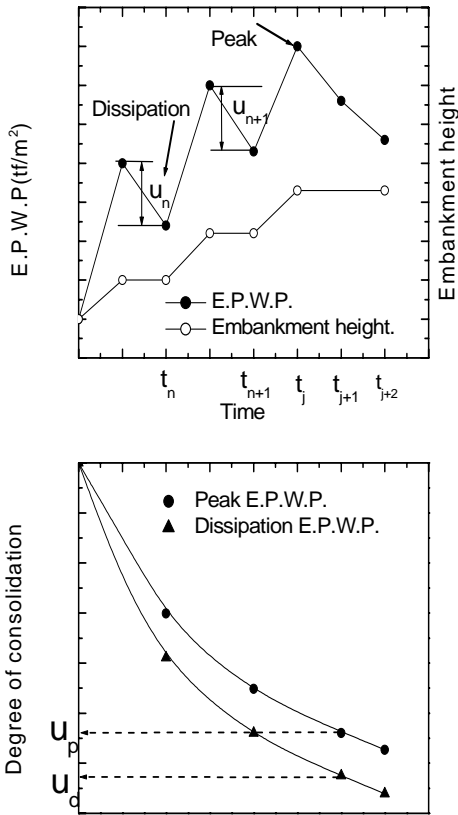


Fig. 3. Variation of degree of consolidation using peak and dissipated excess pore water pressure.

석)을 실시하는 것이 일반적이다. 그러나 안정해석 결과는 연약지반상의 성토에 따른 하부지반의 변위상태를 예측할 수 없고, 많은 가정을 내포하여 정량적인 수치로 안전율을 나타내기 때문에 성토 시공시 안전관리에 주의를 기울여야 하고 신뢰도상의 문제점을 내포하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 극복하기 위하여 단계성토시 안전율과 성토고의 상호관계를 계측자료와 비교분석하여야 한다. 본 연구대상 지구는 연약점토상에 저수지 제체를 시공하므로 시공중 전단파괴의 우려가 높아 단계

성토에 따른 사면 안정성을 제체 시공직후, 만수위, 수위급강하시의 조건으로 분석하였다

결과 및 고찰

1. 최종침하량 추정방법에 의한 압밀도

가. 시간에 따른 침하량과 압밀도 분석

최종침하량의 예측은 주로 현장에서 계측한 실측침하량을 이용하여 예측하고 있지만, 현장적용결과 예측된 침하량이 과대 및 과소평가되는 경향이 있어 현장기술자들이 후속공사 착수시기를 결정하기 위한 시공관리방안을 마련하는데 많은 어려움이 있다.

특히, 매우 큰 함수비와 공극비를 갖고 있는 지반, 1차 압밀기간이 비교적 짧고 시공완료후에 곧바로 2차 압밀이 시작되는 연약지반에서의 소요압밀시간과 최종침하량의 예측은 대상지반의 압밀완료시점과 최종성토고를 결정하는데 현장에서 가장 중요하게 고려할 사항이다. 그러므로 이와같은 지반에서는 종래의 Terzaghi의 일차압밀침하만을 고려하는 것보다는 2차압밀도 고려하여 침하해석을 해야만 정확한 압밀침하량을 산정할 수 있다.(Mesri 등, 1997)

또한, 설계침하량이 잘못 산정되었을 경우 이를 수정하기 위한 공사기간의 연장이 불가피하므로 성토종료시점에서 최종침하량을 예측할 수 있다면 압밀완료시점과 최종성토고를 정확하게 결정할 수 있다.

Fig. 4 및 Fig. 5는 연약지반상에 점증하중에 의하여 축조된 농업용 저수지의 침하량을 707일 동안 측정된 것이다. 침하량 측정은 주계측단면(DP-3)과 부계측단면(DP-5)에 설치된 지표면 침하판을 이용하였다.

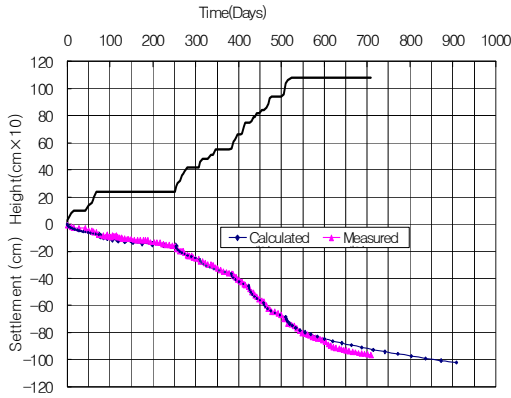


Fig. 4. Time-settlement curve with gradual step load at field test, (DP-3)

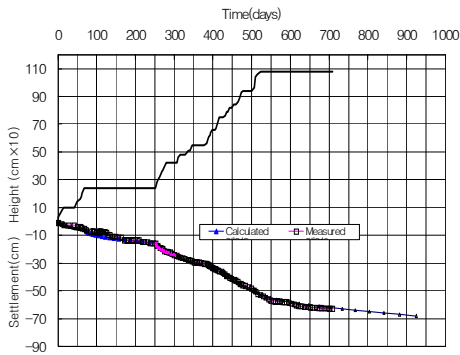


Fig. 5. Time-settlement curve with gradual step load at field test, (DP-5)

시간이 경과함에 따라 가장 연약층의 깊이가 깊은 DP-3에서는 점증하중에 의하여 완만하게 침하가 진행되고 있다. DP-3에서 Terzaghi에 의한 일차원 압밀침하량은 160.5cm이고, 현재까지의 실측침하량은 96.1cm으로 예상침하량(92.6cm)보다 약간 크게 나타났으며, 압밀도는 63.1%으로 나타났다.

부등침하의 발생가능성이 있는 DP-5단면에서는 일차원 압밀침하량은 96.4cm이고, 현재까지의 실측침하량은 62.7cm으로 예상침하량(62.1cm)과 거의 유사하였으며, 압밀도는 65.2%으로 나타났다.

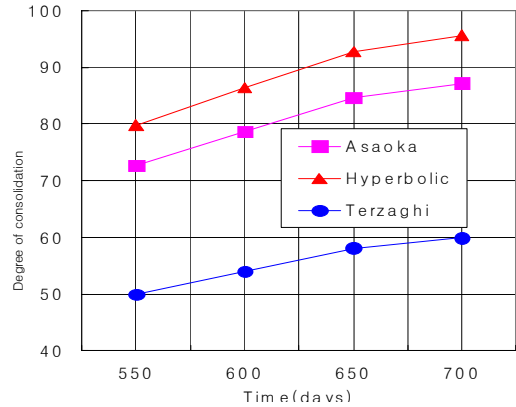


Fig. 6. Variation of degree of consolidation with various methods (DP-3)

Fig.6은 DP-3에서 현재까지의 실측침하량을 기준으로 각 방법으로 추정된 최종예상침하량으로서 Asaoka방법 110.2cm, Hyperbolic 방법 100.4cm, Terzaghi방법 160.5cm이고, 현재 압밀도는 87%, 96%, 60%로 Hyperbolic>Asaoka>Terzaghi 크기순으로 압밀도를 나타내고 있다. Hyperbolic와 Asaoka 방법은 오차범위가 약 9%이내이나 Hyperbolic와 Terzaghi 방법은 36%의 차이를 보이고 있다.

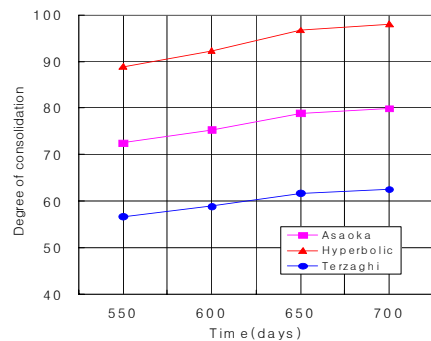


Fig. 7. Variation of degree of consolidation with various methods (DP-5)

Fig.7은 연약층 심도가 낮은 DP-5에서의 최종예

상침하량으로서 Asaoka방법이 78.5cm, Hyperbolic 방법 64.0cm, Terzaghi방법 100.4cm이고, 현재 압밀도는 80%, 98%, 63%로 DP-3와 같은 순으로 압밀도를 나타내고 있으며 Hyperbolic와 Asaoka 방법은 오차범위가 약 18%이내이나 Hyperbolic와 Terzaghi 방법은 35%의 차이를 보이고 있다.

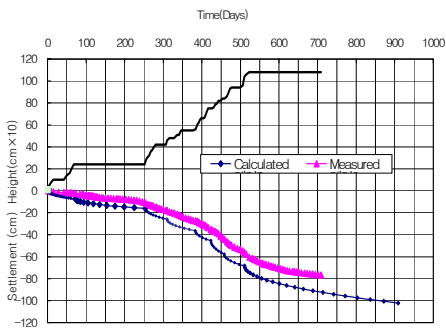


Fig. 8. Time-settlement curve by magnetic extensometer (DP-3, G.L.-6.0m)

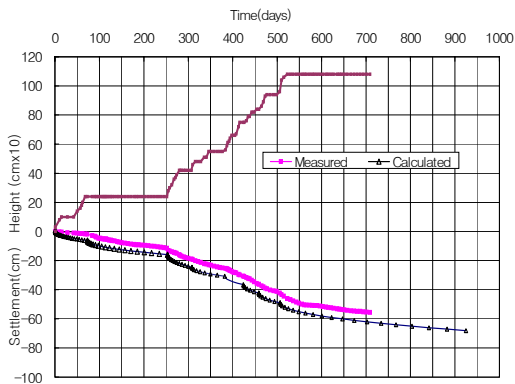


Fig. 9. Time-settlement curve by magnetic extensometer (DP-5, G.L.-2.5m)

전체침하량으로 압밀도를 분석한 결과, Terzaghi 방법으로 추정된 압밀도는 점증재하의 영향으로 과소 평가된 것으로 나타나서, 편차가 작은 Asaoka

와 Hyperbolic 방법을 기준으로 압밀도를 적용하는 것이 합리적이라 판단된다.

나. 층별 침하량에 의한 압밀도 분석

Fig. 8과 Fig. 9는 층별침하량에 의한 압밀도 분석을 위하여 DP-3에서는 G.L.-6.0m 심도, DP-5에서는 G.L.-2.5m 심도에 설치된 층별침하계 측정치를 나타낸 것이다.

DP-3단면에서 현재까지의 침하량은 점증하중에 따라서 완만하게 진행되고 있고, Terzaghi 방법에 의하여 추정된 일차원 압밀침하량은 118.8cm이고, 현재까지의 실측침하량은 76.4cm로 예상침하량(91.23cm)보다 작게 나타났으며, 압밀도는 64.3%로 나타났다.

부등침하의 발생가능성이 있는 DP-5단면에서도 일차원 압밀침하량은 61.74cm이고, 현재까지의 실측침하량은 55.5cm으로 예상침하량(62.1cm)보다 작게 나타났으며, 압밀도는 90%로 나타났다.

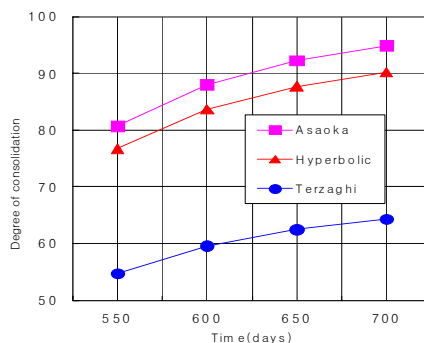


Fig. 10. Variation of degree of consolidation with various methods(DP-3, G.L.-6.0m)

Fig. 10은 DP-3에서 현재까지의 실측침하량을 기준으로 각 방법별로 추정한 최종예상 침하량으로서 Asaoka방법이 80.5cm, Hyperbolic 방법 84.7cm, Terzaghi방법 118.8cm이고, 현재압밀도는 95%,

90%, 64%로 Asaoka>Hyperbolic>Terzaghi 크기순으로 압밀도를 나타내고 있다. Hyperbolic과 Asaoka 방법은 오차범위가 약 5%이내이나 Hyperbolic와 Terzaghi 방법은 34%의 차이를 보이고 있다.

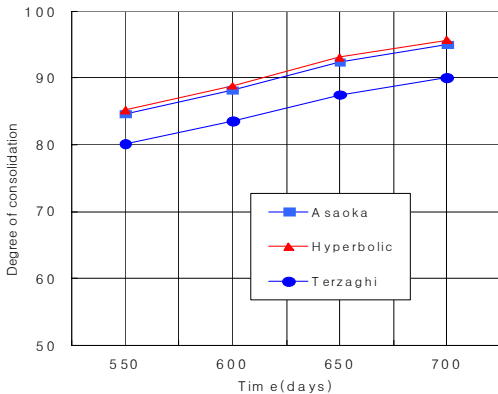


Fig. 11. Variation of degree of consolidation with various methods(DP-5, G.L-2.5m)

Fig. 11은 연약층 심도가 낮은 DP-5에서의 최종예상침하량으로서 Asaoka방법이 58.4cm, Hyperbolic 방법 58.0cm, Terzaghi방법 61.7cm이고, 현재 압밀도는 95%, 96%, 90%로 DP-3와 같은 순으로 압밀도를 나타내고 있으며 Hyperbolic, Asaoka, Terzaghi방법 모두 오차범위가 5% 이내에서 유사하게 나타났다.

층별침하량에 의한 시간-침하량 곡선은 심도가 낮은 부분에서 측정되었기 때문에 침하량도 작고 완만한 분포를 나타냈으며 압밀도를 분석한 결과, DP-3에서는 Terzaghi 방법이 과소 평가되었고, DP-5에서는 거의 유사하게 나타나서 Asaoka와 Hyperbolic방법 중에서 압밀도를 산정하는 것이 합리적이라 판단된다.

2. 과잉간극수압으로 추정된 압밀도

가. 시간에 따른 과잉간극수압과 압밀도 분석

일반적으로 실제 현장에서 압밀도의 예측은 현

장계측으로 얻어진 침하량 자료로부터 최종침하량을 예측하여 이용하는 경우가 많았고 간극수압의 계측결과는 침하계측자료만으로도 압밀도 예측이 가능하기 때문에 소홀히 다루어져 왔다. 그러나, 계측초기에는 침하량이 작기 때문에 압밀도도 낮고, 계측자료도 충분하지 않기 때문에 침하계측자료에 의하여 압밀도를 예측하는 것보다 압밀초기에 계측자료가 충분한 간극수압을 이용하여 압밀도를 예측하는 것이 신뢰성이 클 것으로 판단된다. 일반적으로 압밀도를 구할 경우 소산된 과잉간극수압에 의하여 압밀도를 추정하는 방법이 최대과잉간극수압을 이용하는 것보다 더 타당함에도 불구하고, 성토완료 후에 최대 과잉간극수압 이후의 결과만을 이용하고 있다. 이와같은 방법은 비교적 간단하게 압밀도를 구할 수 있다는 장점을 가지고 있으나, 성토초기부터 성토완료시까지 소산된 과잉간극수압을 합리적으로 반영할 수 없다는 단점을 가지고 있다.

Fig. 12와 Fig. 13은 시공 현장에서 점증하중에 의해 측정된 시간-과잉간극수압의 변화를 나타낸 것이다.

측정단면인 DP-3와 DP-5에서 매설된 간극수압계로부터 보정된 과잉간극수압(E.P.W.P)은 성토초기에는 상재하중을 간극수가 받게 되고 흙의 투수성이 작아 과잉간극수압의 소산속도가 느리게 나타났다. 계속적인 단계성토에 의해서 간극수압은 점차적으로 증가하게 되어 성토완료시에 최대치를 나타내고 성토종료 후 방치기간에는 서서히 소산되는 현상을 나타냈다. 과잉간극수압은 방치기간이 짧아 성토초기에 정확한 압밀도의 분석이 어렵지만, 전체적인 간극수압의 소산은 성토시공중의 소산과 최대간극수압 이후의 소산이 합성되어 발생하는 복합적인 거동을 나타냈다.

DP-3 단면에서 과잉간극수압의 분포경향은

2.4m 성토후 180일 정도 방치기간이 장기화되어 G.L-3.0m와 G.L-6.0m에서 큰 차이를 나타내지 않았지만, 성토시공속도가 빠르고 방치기간이 짧아지면서 간극수압의 소산속도가 점점 차이가 발생되고 그 증가 경향은 유사하지만 심도가 낮은 경우가 더 느리게 소산되는 경향을 나타냈다. 이것은 하부층에서 배수저항이 증가하므로 상부층에 비하여 과잉간극수압의 소산속도가 약간 느린 경향이 있기 때문인 것으로 판단된다.

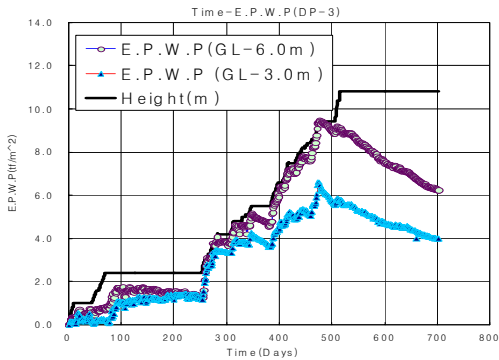


Fig. 12. Variation of the excess pore water pressure with gradual step load.(DP-3)

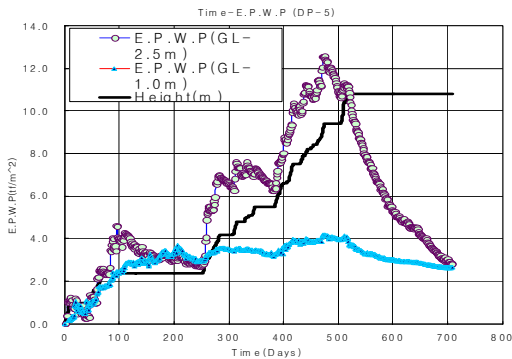


Fig. 13. Variation of the excess pore water pressure with gradual step load.(DP-5)

DP-5 단면에서 과잉간극수압의 분포경향은 매설심도 G.L-1.0m에서는 큰 변화를 나타내지 않았

고, G.L-2.5m에서는 단계성토기간에 따라서 발생과 소산이 뚜렷하게 나타났으며 방치후에는 급격하게 소산되는 현상을 나타냈다. 특히 과잉 간극수압의 변화량은 초기과잉간극수압을 어떻게 판단하는가에 따라 압밀도가 큰 차이가 나타나기 때문에 발생과 소산과정이 뚜렷한 G.L-2.5m에서의 분포 경향을 판단하면 성토중 소산된 과잉간극수압을 고려하여 압밀도를 판단하는 것이 실제와 근접한다고 생각된다.

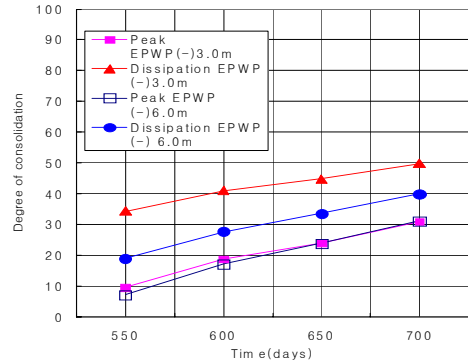


Fig. 14. Variation of degree of consolidation with peak and dissipation excess pore water pressure(DP-3)

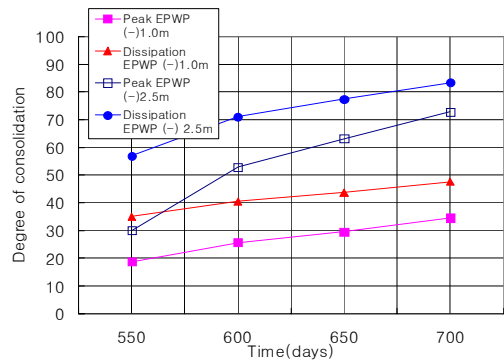


Fig. 15. Variation of degree of consolidation with peak and dissipation excess pore water pressure(DP-5)

Fig. 14 및 Fig. 15는 각 계측 단면에 대하여 심도별로 최대과잉간극수압과 성토중에 소산된 과잉간극수압을 이용하여 구한 압밀도의 변화를 나타낸 것이다

DP-3에서는 소산된 과잉간극수압 (U_d)을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압 (U_p)을 이용한 압밀도보다 심도 3.0m에서는 25~19%, 심도 6.0m에서는 12~9% 정도 더 크고 시간이 경과함에 따라 압밀도의 차이는 점점 작아지며, 전체적으로 압밀도가 작게 나타났다. 또한 심도에 따라서는 지표면에 가까운 심도에서 압밀도가 높은 것으로 나타났는데 이와같은 현상은 깊은심도에서 과잉간극수압의 소산속도가 느리기 때문인 것으로 판단된다.

DP-5에서도 소산된 과잉간극수압 (U_d)을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압 (U_p)을 이용한 압밀도보다 심도 1.0m에서는 16~13%, 심도 2.5m에서는 27~10% 정도 더 크게 나타났으며 시간이 경과함에 따라 압밀도의 차이는 점점 작아지는 경향을 보였다.

이상과 같이 성토완료후 초기에는 시공중 소산된 과잉간극수압 (U_d)을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도 (U_p)보다 12~27% 정도 더 크게 나타났고, U_d 와의 U_p 관계식은 주계측 단면에서는 $U_d=(1.3\sim3.6) U_p$, 부계측 단면에서는 $U_d=(1.2\sim1.9) U_p$ 로 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 더 크게 나타났다.

나. 과잉간극수압과 침하량으로 추정된 압밀도

최종침하량으로 추정된 압밀도는 각각의 방법마다 가정조건들이 다르기 때문에 신뢰성 평가에 어려움이 있고 성토시공중 소산되는 과잉간극수압 및 성토완료시의 최대과잉간극수압을 이용한 압밀

도도 다르게 나타나기 때문에 현장에서 압밀도를 판단하는데 어려움이 있다.

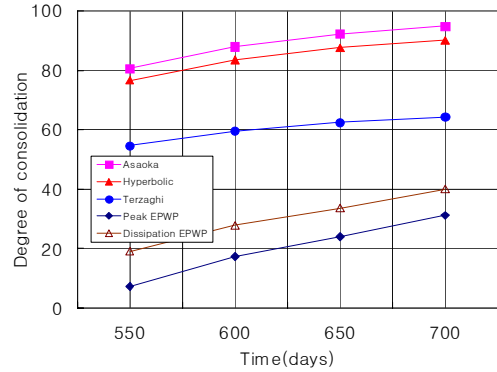


Fig. 16. Variation of degree of consolidation with various methods(DP-3)

Fig. 16은 DP-3단면 심도 6.0m에서 층별침하량을 이용한 압밀도와 최대과잉간극수압 및 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도를 비교 분석한 것이다.

층별침하량으로 추정된 압밀도는 Asaoka 방법과 쌍곡선 방법은 오차범위가 약 3% 정도로서 거의 같고, Terzaghi 방법은 오차범위가 약 22% 정도로 다소 큰 차이를 보이고 있다. 또한 성토시공중 소산되는 과잉간극수압을 이용한 경우가 성토완료시의 최대과잉간극수압을 이용한 경우보다 압밀도가 크게 추정되었고, 그 차이는 성토후 초기에는 크고 시간이 경과함에 따라 점차로 작아지는 경향을 나타냈다.

일반적으로 압밀도의 추정은 각 심도별 층별침하량을 이용하는 것보다는 지표면에서의 전체침하량을 이용하여 압밀도를 추정하지만 층별침하량으로 추정된 압밀도와 최대과잉간극수압 및 소산된 과잉간극수압으로 추정한 압밀도와도 매우 다르게 나타났다.

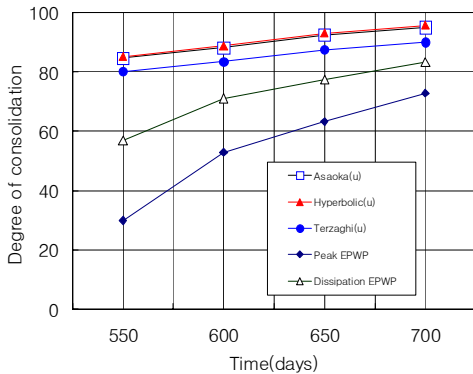


Fig. 17. Variation of degree of consolidation with various methods(DP-5)

Fig. 17은 DP-5단면 심도 2.5m에서 과잉간극수압으로 추정된 압밀도와 침하량을 이용하여 쌍곡선, Asaoka 및 Terzaghi 방법으로 분석한 압밀도의 관계를 나타낸 것이다.

층별침하량으로 추정된 압밀도는 쌍곡선, Asaoka 및 Terzaghi 방법이 거의 같은 압밀도를 보였으며 성토완료후 초기에는 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 침하량으로 추정된 압밀도와 차이가 있었으나 시간이 경과함에 따라 침하량으로 추정된 압밀도와 최대과잉간극수압 및 소산된 과잉간극수압을 이용한 압밀도가 같아지는 경향을 나타냈다.

3. 한계평형법에 의한 안정성 평가

농업용 저수지는 침하 뿐만 아니라 안정관리에 도 신중한 검토가 이루어져야 하지만, 안정관리는 지반의 변형과 파괴 모두에 관계된 문제이므로 현재로서는 설계에 적용할 수 있는 예측방법이 아직 확립되어 있지 않다.

이러한 연약지반 성토시 설계 및 시공상의 문제점을 해결하기 위하여 현장계측를 이용하여 장래 예측의 신뢰성을 높이고, 각 단계별로 성토시 계측

및 토질조사자료의 분석을 통하여 여러 연구자들이 제안한 방법(Duncan 등, 1970)과 현장실측치의 자료를 비교분석한 결과를 기초로 적절한 적용범위를 제시하는 것이 합리적이다.

본 연구대상 지구는 연약점토상에 저수지를 축조하기 때문에 시공중 전단파괴의 가능성이 높았으나 단계성토 및 현장계측관리를 통한 안정관리로 체체가 완성되었다. 완공후 저수지 사면안전성의 검토는 Table 2의 입력상수를 적용하였고, 완공 직후, 만수위시, 수위급강하시를 기준으로 Spencer, 간이 Bishop, 간이 Janbu 방법으로 분석하였으며 해석조건은 연약층 심도가 가장 깊고 체고가 가장 높은 DP-3단면을 선정하였다.

Table 2. Geotechnical properties at DP-3 section

Division	$\gamma_s(\text{tf/m}^3)$	$c(\text{tf/m}^2)$	$\phi(\text{deg})$
Embankment layer	1.95	3.7	15.0
Clay layer	1.7	2.4	0.0
Sand gravel layer	1.9	0.0	35.0

각 조건별로 사면안정 해석프로그램인 Seep/w 및 Slope/w을 이용하였고, 그 중에서 만수위시 조건에서의 해석결과는 Fig. 18과 같으며 분석방법별 안전율은 Table 3과 같다.

Table 3. Comparison of safety factor under various condition.

Condition	F_s (basis)	$F_s(\text{result})$		
		Spencer	Simplified Bishop	Simplified Janbu
After completion	1.3	1.423	1.426	1.342
Full	1.3	1.314	1.318	1.236
Sudden drawdown	1.2	1.465	1.466	1.469

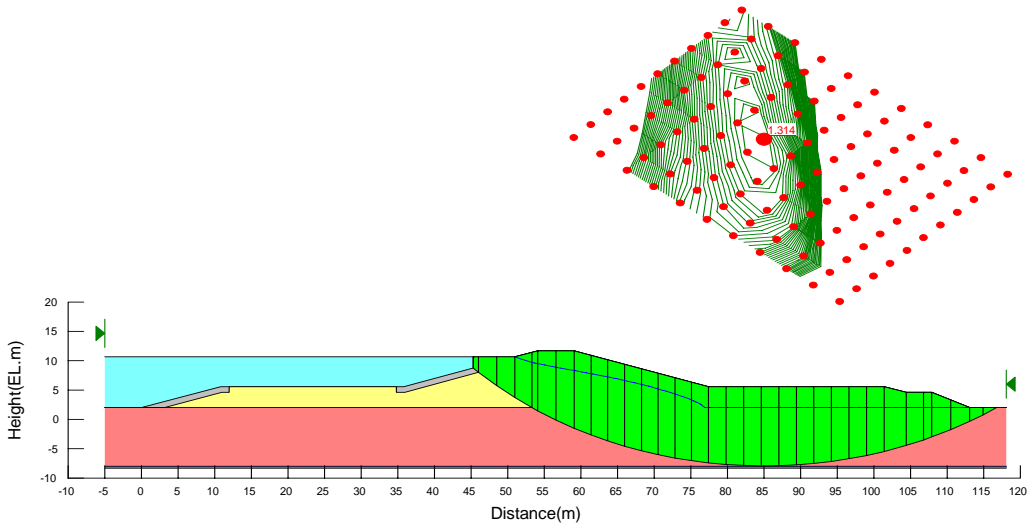


Fig. 18. The safety factor under full condition

각 방법별 안전율을 비교하면 Spencer와 간이 Bishop방법은 거의 유사하게 나타났고, 간이 Janbu 방법은 약간 작게 나타났다. 간이 Bishop 및 간이 Janbu 방법은 힘 또는 모멘트 조건중 한가지만을 만족시키는 반면에 Spencer의 방법은 흙의 활동부분에 대해 힘과 모멘트 두 평형방정식을 만족시키는 해석방법이므로 저수지의 안정성을 해석하는데는 Spencer방법이 합리적이라 판단된다. 따라서 Spencer 방법으로 분석한 결과, 각 조건 모두에서 기준 안전율 보다 커서 제방은 안정한 상태인 것으로 분석 되었다.

적 요

본 연구는 연약지반상에 축조되는 농업용 저수지의 압밀거동을 현장계측결과를 기초로 기존의 예측방법등과 비교분석하고, 시공중 또는 완공후에 축방유동등으로 인하여 국부적인 전단파괴 가능성

을 현장계측치로부터 정량적으로 파악하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 최종 예상침하량으로 추정된 압밀도는 Terzaghi 방법에서는 작게 추정되었고, 편차가 크게 나타나서 오차범위가 작은 Asaoka와 Hyperbolic 방법을 기준으로 압밀도를 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.
2. 성토에 의한 점증재하시 과잉간극수압의 소산은 성토시공중의 소산과 최대간극수압 이후의 소산이 합성되어 발생하는 복합적인 거동을 나타냈다. 또한 압밀초기에는 침하량으로 압밀도를 예측하는 것보다 계측자료가 충분한 과잉간극수압을 이용하여 압밀도를 예측하는 것이 신뢰성이 클 것으로 판단된다
3. 성토완료후 초기에는 시공중 소산된 과잉간극수압 (U_d)을 이용한 압밀도가 최대과잉간극수압을 이용한 압밀도 (U_b)보다 12~27% 정도 더 크게 나타났고, 침하량으로 추정된 압밀도에

근접하므로 소산된 과잉간극수압에 의하여 압밀도를 추정하는 것이 합리적이라 판단된다.

4. U_d 와 U_p 의 관계식은 주계측 단면에서는 $U_d = (1.3 \sim 3.6) U_p$, 부계측 단면에서는 $U_d = (1.2 \sim 1.9) U_p$ 로 소산된 과잉간극수압으로 추정된 압밀도가 더 크게 나타났다. 또한 저수지 제체의 안정성을 한계평형법에 의해 분석한 결과 모든 조건에서 기준 안전율보다 커서 안정한 상태로 나타났다.

인용문헌

1. Asaoka, A. 1978. Observational procedure of settlement prediction, Soils and Foundations, 18(4):87-101.
2. Baligh, M. M. and J. M. Leaved. 1980. Pore pressure dissipation after cone penetration, Research Report R80-11, Order No. 682, Dept. of Civil Eng, MIT, Cambridge, Mass.
3. Barron, R. A. 1948. Consolidation of fine-grained soils by drain wells, Trans. ASCE, 113:718-742.
4. Bergado, D. T., H. Asakami, M. C. Alfaro, and A.S. Balasubramanian, 1991. Smear effects of vertical drains on soft Bangkok clay, J. of Geotechnical Engineering, ASCE, 117(10): 1509-1530.
5. Campanella, R. G., P. K. Robertson, and D. Gillespi. 1983. Cone penetration testing in Deltaic soils, Canadian. Geotechnical Journal, 20(1):23-35.
6. Chang, C. Y. and J. M. Duncan. 1970. Analysis of soil movement around a deep excavation, J. of the Soil Mechanics and Foundations Division, 96(SM5):1655-1681.
7. Das, B. M. 1990. Principles of geotechnical engineering, Second Edition, PWS-KENT, Publishing, p.267-352.
8. Duncan, J. M. and C. Y. Chang. 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils, J. of the Soil Mechanics and Foundation Division, 96(SM5):1,629-1,653.
9. Hansbo, S. 1981. Consolidation of fine-grained soils by prefabricated drains, Proceedings of the 10th ICSMFE, Stockholm, Sweden, 3:677-682.
10. Mesri, G., T. D. Stark., M. A. Ajlouni, and C. S. Chen. 1997. Secondary compression of peat with or without surcharging, J. of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 123(5):411-421.
11. Onoue, A. 1988. Consolidation of multilayered anisotropic soils by vertical drains with well resistance, Soils and Foundations, 28(3): 75-90.
12. Schmertmann, J. H. 1975. Measurement of in-situ shear strength, Proceedings of the Specialty Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties, ASCE, 2:57-138.
13. Tan, S. A. and S. H. Chew. 1996. Comparison of the hyperbolic and asaoka observational method of monitoring consolidation with vertical drains, Soils and Foundations, 36(3):31-42.
14. 藤田圭一, 1995, 軟弱地盤對策工法總技術, 東和技術, p.388-392.