

농업용 저수지 뚝 높이기에 따른 제체의 침투류 해석

이달원^{1*} · 이광솔² · 이영학³

¹충남대학교 지역환경토목학과, ²한국농어촌공사 충남본부, ³충남대학교 대학원

Seepage analysis of agricultural reservoir due to raising embankment

Dal-Won Lee^{1*}, Kwang-Sol Lee², Young-Hak Lee³

¹Dept. of Agricultural and Rural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

²KRC(Korea Rural Community Corporation), Daejeon 302-122, Korea

³Dept. of Agricultural Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

Received on 8 August 2011, revised on 19 August 2011, accepted on 19 September 2011

Abstract : This study was carried out to safety evaluation, the practical application and improvement of design method of the agricultural reservoir due to raising embankments. Also, it was to compare and analyze the pore water pressure (PWP), seepage (leakage) quantity and piping phenomenon according to high water table and rapid drawdown. The seepage analysis by finite element analysis was used for steady state and transient condition. The pore water pressure distribution for steady state and transient condition showed positive(+) PWP on the upstream slope, it was gradually changed negative(-) PWP on the downstream slope. The PWP in the core ranged from 100 ~ -33 kPa, the seepage line in the incline-type core suddenly decreased towards the lower levels from the higher levels. The PWP according to rapid drawdown is remained in the vicinity of the upstream slope, therefore, it is investigated to be in an unstable state by the slope stability analysis. The PWP after raising embankments showed smaller than in the before raising embankments. It was likely to be the piping phenomenon because the gradients in the before raising embankments showed largely at downstream slope, and the stability for piping in the after raising embankments increased stable state. The seepage quantity per 1 day and the leakage per 100m for the steady state and transient condition appeared to be safe against the piping. It reduced slightly regardless of the transient condition before the raising embankments and it decreased largely about 2.4 times in the early days after the raising embankments.

Key words : Agricultural reservoir, Raising embankments, Seepage analysis, Piping, Transient

I. 서론

최근 지구온난화와 이상 기후로 10년간 집중호우 발생빈도가 '70~'80년대에 비해 1.4배 증가하였고, 급격한 기후 변화로 강수량의 편차가 심해져 홍수와 가뭄에 대비한 재해 대비능력을 강화할 필요성이 증가되고 있다. 농업기반 시설물의 대부분을 차지하고 있는 저수지는 대부분 필댐으로 이루어져 있고, 콘크리트댐에 비하여 재료자체의 공학적 성질이 다양하며 불균질 하여 그 거동을 예측하기가 어렵다.

농업기반시설물은 현재 전국에 저수지 17,679개소, 양

배수장 7,178개소, 방조제 1,593개소 등이 산재해 있고, 1945년 이전에 9,380개소(53%), '46~'71년은 6,203개소(35.1%)가 설치되어 30년 이상된 저수지가 80%이상에 달하고 있다(KRC, 2005).

농림수산식품부와 한국농어촌공사는 2조 7천억원을 들여 전국 4대강 유역 110개(4대강 유역 내 93개, 유역 외 17개) 농업용 저수지를 대상으로 기존제당 덧쌓기 등 뚝 높이기와 여수토 확장, 전동식 수문 및 소수력발전시설 등의 설치사업을 통해 2.8억^m³(4대강 유역 내 2.4, 유역 외 0.4)의 추가용수를 확보하여 2016년 10억^m³의 물 부족 전망에 대비할 계획이다. 추가 확보된 수자원을 활용하여 우선 부족한 농업용수를 보충 공급하고, 남은 물을 갈수기에 하천으로 흘려보내 농어촌 소하천의 수생태계 보존 및 4대

*Corresponding author: Tel: +82-42-821-5793

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

강의 수질개선에 기여 할 것으로 기대하는 등 거시적 차원에서 수자원의 효율적 이용과 관리, 토지이용률 제고 및 환경개선을 통하여 주민들의 삶의 질을 향상시킬 수 있다. 특히, 저수지 둑 높이기 사업은 기존 저수시설을 보강하는 사업으로 신규 댐 개발로 인한 개발적지 부족과 환경적 영향을 최소화하면서 경제적으로도 유리한 것으로 나타났다 (KRC, 2003-2005; MLTM, 2005; MLTM, 2011).

둑 높이기 대상(110개소)중 30년 이상 노후된 저수지가 72개소(64%)이고, 안전진단 결과 보수·보강이 필요한 C등급이상 저수지 85개소(75%)에 달하고 있어, 축조 후 장기간이 지나 노후화된 저수지의 리모델링을 통한 기능 회복이 필요한 실정이다. 10년 빈도 가뭄에 안전한 눈은 전체의 48%로 여전히 영농급수에 한계가 있고, 둑 높이기 대상(110지구)중 한발 대응이 미흡한 99개소(88%)에 대해 저수용량 확장을 통해 부족한 농업용수를 공급하여야 한다 (KRC, 2005).

지역별로 구분해 보면 경북 22개소, 전남 21개소, 충남 15개소, 전북 15개소, 충북 14개소, 경남 11개소, 강원 7개소, 경기 5개소로 진행되고 있다. 제체유형별로는 제체 덧쌓기 66개소로 가장 많고, 후면 덧쌓기 28개소, 이설 쌓기 16개소이고, 높이별로는 5 m 이하가 72개소로 가장 많고, 5-10m 20개소, 10-15m 5개소, 15-20m 6개소, 20m이상 7개소이다(MLTM, 2011).

저수지 둑 높이기 사업도 설계 당시에는 양호한 상태로 평가되었더라도, 시공 이후에는 유지관리 상태 및 외적 요인 등에 의해 잔존하는 위험요소가 노출되어 제체의 안전에 영향을 미칠 수 있다. 재해 영향 검토는 사전재해영향성 검토서를 기준으로 기존에 발생했던 재해를 중심으로 개발로 인해 발생 가능한 재해영향요인을 개발사업 시행이전에

예측, 분석하고 적절한 저감방안을 수립·시행하여야 한다.

그동안 농업용 저수지에 관련된 연구는 제체의 안정성 검토를 위한 실험과 침투류 해석 등의 수치해석 연구, 시설물의 보수보강에 관련된 연구, 계측기를 이용한 안전진단 공법 연구 등이 수행되었다(Squier, 1970; Budhu, 2000; Foster 등, 2001; Lee 등, 2003; Min 등, 2008; Kim 등, 2009).

그러나 저수지 둑 높이기 사업지역 대부분은 성토에 따른 사면안정문제가 발생되고, 기존 중심코어를 확장하여 축조하기 때문에 코어 설치에 따른 침투류의 해석이 중요하다. 기존 코어의 상층부와 측면으로 코어를 확장 시공할 경우 침윤선의 변화는 안정상에 영향을 미치고, 코어를 수평방향으로 확장하기 때문에 기존 성토재와의 부등 침하의 발생 가능성이 있을 것으로 판단된다. 또한, 신설 및 확장되는 여수토는 구조물로 되어 있기 때문에 이상 홍수시에는 흙과 접촉부에 안정성 문제가 발생할 가능성이 높다.

본 연구에서는 저수지 둑 높이기 사업 지구를 대상으로 둑 높이기 전후에 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강시 시간에 따른 제체의 공극수압, 침투량(누수량), 침윤선, 동수경사 및 파이핑 현상 등을 침투류 해석에 의해 비교분석하여 설계방법 개선 및 현장실용화 방안을 제시하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 분석대상지구

분석에 적용된 저수지 둑 높이기 현장은 제체 덧쌓기로 시공 중인 충남 공주시 계룡면 00저수지를 선정하였다. 저

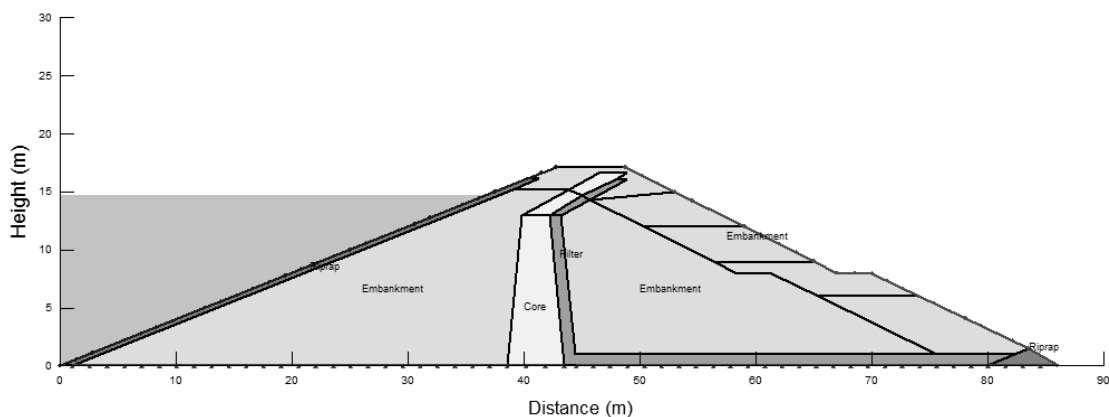


Fig. 1. A cross sections of the reservoir.

수지 제원은 필댐 형식으로 총저수량 471만 m³(중고전: 341,2만 m³), 유역면적 1,574 ha, 길이 288 m, 높이 EL 61.6 m(14.3 m)에서 EL 64.4 m(17.1 m)로 2.8 m 제정고를 높여 시공하였다.

여수토 방수로는 200년 빈도 홍수량에 20%를 가산한 설계홍수량을 배제할 수 있는 규모로 언제길이 111 m 측수로 형식으로 계획하였고, 수문은 전도게이트로 월류수심을 2.2 m로 높여 방류량을 증대시켰다. 증고후의 중심코어의 상단폭은 농업기반조성사업 설계기준에 의해 L=1.5-3.5 m (댐높이 H<30 m)이므로 2.0 m로 결정하였고, 상단표고는 EL 63.9 m(EL 64.4-0.5 m)로 결정하였다.

제당의 중심코어는 점토로 구성되어 있고, 둑 높이를 시공하면서 차수는 제당의 상태, 경제성 및 안정성을 고려하여 기존점토를 0.7 m 걷어낸 후 신설점토를 중심코어에서 하류사면 방향으로 경사지게 연장 성토하는 것으로 계획하였다. 둑 높이기 전·후의 제체 단면은 Fig. 1과 같다.

2. 사용재료

사용된 성토재와 점토는 저수지 현장의 토취장에서 채취하였고, 코어와 성토재의 투수계수는 압밀시험에 의해 구하였으며, 전체적인 물리적 및 역학적 특성을 분석한 결과는 Table 1과 같다.

3. 분석방법

둑 높이기전에 이미 제체는 포화상태에 있으므로 기존에 포화된 성토층과 새로 시공된 불포화층 사이에서의 침투류 해석에 의해 포화조건과 불포화조건을 고려한 파이핑 현상을 SEEP/W 2007 프로그램 이용하여 검토하였다(GEO-SLOPE, 2007).

파이핑 현상은 포화조건에 따른 코어 확장시 수압파쇄 현상과 성토시공 중에 발생할 수 있는데, 검토방법으로는 Emerson's 분류등급, 분산비 시험(Percent dispersion test), 핀홀 분산등급(Pinhole test), 화학분석 시험, 한계 동수경사와 한계유속에 의한 방법, 허용침투수량에 의한 방법 등이 있으나 여기서는 한계동수경사와 허용침투수량에 의한 방법으로 파이핑을 검토하였다. 또한 둑 높이기 전후에 홍수위시 및 수위급강하시로 구분하여 포화시와 불포화시에 침투류 해석을 하였다.

SEEP/W 2007은 Darcy 법칙과 Laplace 방정식을 이용하여 포화 및 불포화 흐름을 해석하는 유한요소 프로그램이다. 이 프로그램은 정상상태 흐름(steady state flow)과 비정상 상태 흐름(transient flow)에 대하여 모두 적용가능하고, 불포화토에 대한 체적함수비-공극수압곡선 (SWCC: Soil Water Characteristic Curve)을 이용하여 토질에 따른 정(+) 공극수압과 부(-) 공극수압의 변화특성을 나타낼 수 있다(Fredlund와 Xing, 1994).

완전 포화토에서의 물은 연속적인 통로를 통하여 흐르지만, 함수비가 감소하면 물의 흐름도 감소하게 되어 투수계수가 감소한다. 따라서 투수계수도 matric suction (U_a-U_w)의 함수로서 표현되고 이로부터 불포화토의 투수계수 변화특성을 나타낼 수 있다. 분석에 적용된 토질 정수는 Table 1과 같다.

III. 결과 및 고찰

1. 포화 및 불포화토에서 투수계수와 체적함수비 변화

저수지 둑 높임을 하면서 차수를 하는 방법에는 여러 가지가 있으나, 현재 제당의 상태, 경제성 및 환경성 등을 감

Table 1. Material properties used soils.

Division	Unit weight (γ_{sat} , KN/m ³)	Permeability coefficient (m/s)	Cohesion (kPa)	Angle of Internal friction (phi)	Young's modulus (kPa)	Poisson's ratio	USCS
Bedrock	22.00	5.00E-11	31.85	35	200,000	0.30	GP
Core	19.57	3.11E-08	34.3	9	20,000	0.45	CL
Embankment	19.42	5.75E-07	16.66	24	25,000	0.35	SC
Filter	19.63	5.40E-05	0	33	30,000	0.33	SP
Riprap	22.56	1.00E-04	0	45	100,000	0.23	GP

안하여 계획하여야 한다. 저수지 독 높이기 사업지역 대부분은 성토에 따른 사면안정문제가 발생되고, 기존 중심코어를 확장하여 축조하기 때문에 코어 설치에 따른 침투류의 해석이 중요하다.

독 높임 후에는 저수량의 급증에 따라 침투수압이 몇 배로 증가하고, 제체를 통한 침투수는 제체 하류부를 포화시켜 과잉공극수압(양압력)의 증가함에 따라 파이핑 현상이 급진전되어 제체 붕괴를 유발시키게 된다.

댐에서 코어의 역할은 안정성에 큰 영향을 미치게 되는데, 저수지 독 높임 시 기존 코어에서 상단부로 바로 연장하여 독을 높이는 방법이 아니라 상류측 사면 경사를 그대로 이용하고 상단으로 코어를 연장함으로써 침투류 문제가 발생된다. 기존 코어의 상층부와 측면으로 코어를 확장 시공할 경우 침윤선의 변화는 파이핑 현상 등으로 인하여 제체의 안정성에 큰 영향을 미치고, 기존 성토재와 부등 침하로 균열의 발생 가능성을 검토하여야 한다.

코어는 시공시 엄격하게 관리되지 않으면 코어의 많은 부분이 건조측과 습윤측으로 교차되어 다져짐으로서 많은 균열과 국부적인 아칭현상이 발생되고, 코어존과 축조재료의 강성차이로 응력전이 현상이 발생되어 코어부의 수압과 쉐가 일어나 댐체의 손상이 유발되고 유로 확대로 파이핑 현상이 가속화 된다. 또한, 각 존에서 강성차이로 인한 부등침하는 코어의 작은 균열을 발생시키고, 공극의 증가로 인해 물이 미소균열을 통과하면서 유로를 형성하게 되어 붕괴위험성을 높이게 된다(Eisenstein 등, 1972; Foster 등, 2000).

포화토와 불포화토에서의 물의 흐름은 투수계수함수에 의해 달라진다. 포화토에서 입자사이의 공극은 물로 포화되어 있지만, 공기함입치(air entry value)를 초과하면 공기가 공극사이로 침투하여 공극수압이 더 감소하고 물의 흐름이 감소하면서 투수계수는 더 감소하게 된다. 흠속에서 물이 얼마나 많은가는 체적함수비 함수로서 나타낼 수 있다(Fredlund 등, 1994).

불포화토에서의 흐름도 Darcy의 법칙을 따르고, 그 흐름은 동수경사와 투수계수에 비례한다. 포화영역 흐름과 불포화영역 흐름의 주된 차이는 포화토의 투수계수는 공극수압의 영향을 거의 받지 않으나, 불포화토에서는 공극수압 변화에 따라 투수계수가 크게 변화한다. 따라서 포화-불포화토 해석의 경우 투수계수함수는 반드시 각각의 흠 형태에 따라서 설정되어야 한다. 정상류의 해석에서는 흠

으로 유입되는 총 유량과 총 유출 유량이 같기 때문에 흠-공극수압 함수식을 고려하지 않으나, 비정상류에서는 유입되는 총 유량과 총 유출유량이 변하게 되므로 흠-공극수압 함수식을 고려하여야 한다.

SEEP/W 2007은 비정상류 해석시에 초기 지하수위는 정상류 해석 결과치를 적용하고, 계산 결과에 대응하는 경계조건을 수정하여야 한다. 상류측 수위를 고정시킨 정상상태 흐름으로 침투해석을 할 경우 저수지 제체의 투수계수가 매우 낮기 때문에 침윤선이 과다 예측되는 경향이 있었으므로 시간에 따른 수위변동을 고려하여 침투해석을 실시하였다.

정상류해석에서는 투수계수함수 곡선이 필요하고, 비정상류 해석에서는 투수계수함수 곡선 외에 체적함수 곡선이 필요하다. SEEP/W 2007에서 불포화토의 투수계수 측정은 추정된 체적함수비 함수를 이용하는 방법(Fredlund 등, 1994), 포화투수계수를 이용하는 방법(Green와 Corey, 1971), 흡인력(matric suction) 함수를 이용하는 방법(Van Genuchten, 1980) 등으로 예측하고 있는데, 여기서는 흡인력 함수를 이용하는 방법을 적용하였다.

포화토에서는 모든 공극이 물로 포화되어 있으므로 체적함수비는 흠의 공극률(n)과 같다. 불포화토에서는 공극속의 물의 양은 공극수내에서 흡인력에 따라 달라진다. 체적함수비 함수는 흡인력의 변화에 따른 흠속에 축적된 보수력으로 표시되고, 체적함수비 함수는 공기함입치, 정(+) 공극수압과 부(-)공극수압에 대한 기울기, 잔여함수비 또는 포화도에 따라 다르게 나타난다.

체적함수비의 추정은 입도곡선을 기초로 예측된 data point function 추정방법(Modified Kovacs, 1981), software에서 각각의 토질에 따라 미리 작성된 sample function를 이용하는 방법, curve fit parameters를 기초로 한 closed form equation에 의한 추정방법 (Fredlund와 Xing, 1994; Van Genuchten, 1980) 등이 사용되고 있는데, 여기서는 data point function 방법을 이용하였다.

수위변동에 따른 침투해석을 하기 위해서는 수리전도도 곡선과 체적함수비 곡선이 필요하지만 이러한 값을 얻기 위한 실내시험은 어렵고 많은 시간이 소비되므로, SEEP/W 2007에서는 Fig. 2-3과 같이 투수계수가 가장 근접한 값들에 대한 수리전도도 곡선과 체적함수비곡선을 사용하였다.

Fig. 5는 균등한 모래, 실트 및 점토에서 Ho(1979)에 의해 공극수압변화에 따른 체적함수비를 나타낸 곡선으로, 점토

는 체적함수비가 크고 불포화영역에서도 거의 직선에 가까우나 모래는 입자가 비교적 크기 때문에 물은 비교적 작은 부(-)공극수압에서 쉽게 빠져나가게 된다. 따라서 불포화상태가 되면 체적함수비는 갑자기 감소하고 실트는 입자 분포가 넓기 때문에 점토와 모래의 중간인 특성곡선을 나타낸다.

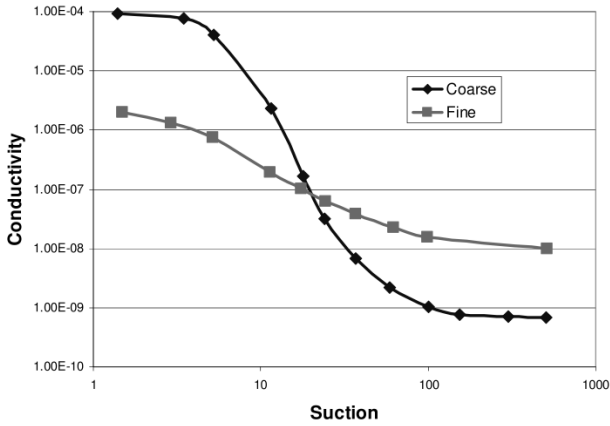


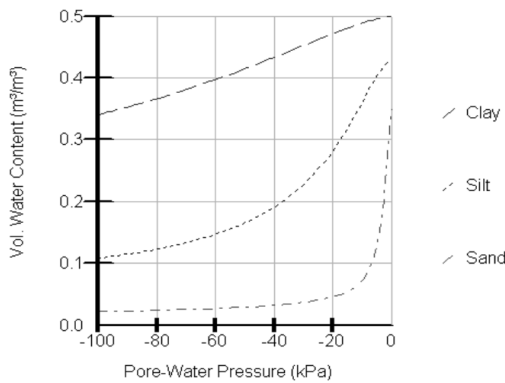
Fig. 2. Hydraulic conductivity function in typical sample.

2. 둑 높이기 전·후의 공극수압 변화

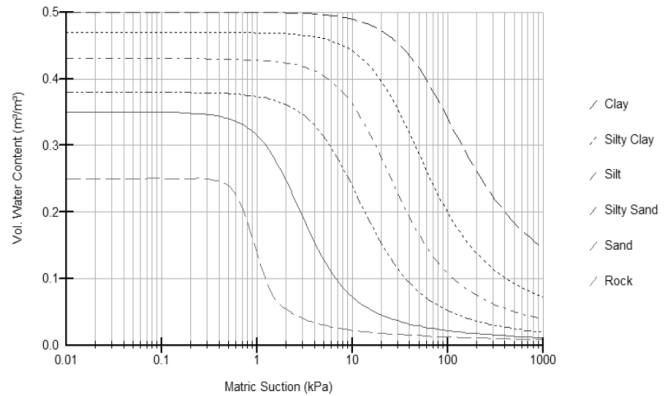
침투류 해석시 수위조건은 둑 높이기 전·후의 홍수위에서 사수위로 수위급강하 하였을 경우로 적용하였고, 포화 및 불포화토에서 정상류와 비정상류 조건으로 구분하여 적용하였다. 홍수위로 유지되는 지속시간은 특별한 기준이 없어 고려하지 않았고, 저수지의 총 저수량과 여수토의 방류량을 고려하여 홍수위가 지속시간별로 유지된 후 수위가 사수위(2 m)로 급격히 강하하였을 경우의 시간을 4단계(1일, 3일, 5일, 7일)로 나누어 침투류 해석을 실시하였다.

가. 정상류 조건

Fig. 4 (a) 정상류 조건하에서 둑 높이기 전의 공극수압 분포는 상류사면에서 정(+의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 코어 중앙에서 심도별 공극수압은 93(하부) ~ -33(상부) kPa로 상부는 부(-)공

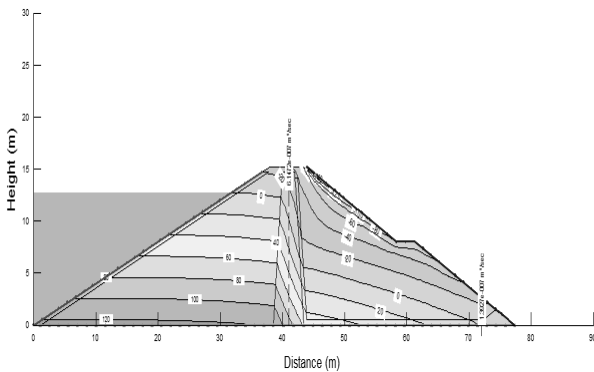


(a) PWP - Vol. water content

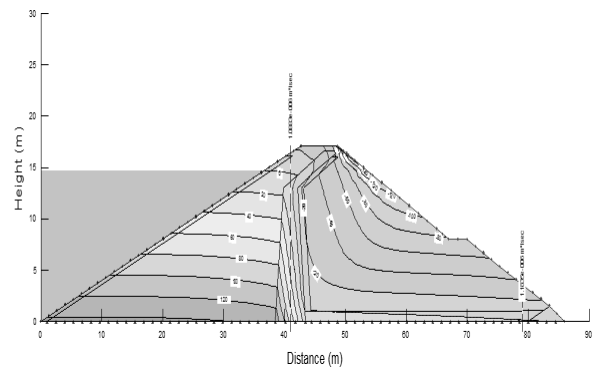


(b) Matric suction - Vol. water content

Fig. 3. Typical volumetric water content functions for sand, silt and clay.



(a) Before



(b) After

Fig. 4. Comparison of pore water pressure under steady state condition.

극수압을 나타냈다.

홍수위시(12.76 m) 침투수량은 제체중앙에서 $6.15E-07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 이고 하류사면 선단에서는 $1.39E-07 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 나타났으며 동수경사는 전 사면에서 거의 0으로 나타났다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 $15.30 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 총저수량(341.2만 m^3)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 $1,706 \text{ m}^3/\text{d}$ 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 $6.15E-02 \text{ l}/\text{sec}$ 로 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다. 또한 침투류 해석 결과 한계동수경사는 0.821, 안전율은 8.212로 파이핑에 대한 안전관리기준인 2.0이상으로 안전한 것으로 나타났다.

Fig. 4 (b)는 독 높이시 코어를 경사형으로 하였을 경우 홍수위시 정상류 조건하에서 공극수압변화를 나타낸 것이다.

공극수압분포는 상류사면은 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 코어 중앙에서 심도별 공극수압은 100(하부) ~ -20(상부) kPa로 상부는 부(-)공극수압을 나타냈고, 침윤선은 경사형 코어에서 하류부로 급격하게 감소하면서 하부 기초지반의 필터를 통과하고 있다.

정상류 조건하에서 홍수위시(14.70 m) 침투수량은 제체 중앙에서 $1.09E-06 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 이고 하류사면 선단에서는 $1.18E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 큰 차이가 나타나지 않았다. 동수경사는 하류사면 상단에서 1~5정도로 나타나고 그 이외 사면에서는 거의 0으로 나타나서 파이핑에 대해서는 안전한 것으로 나타났다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 27.12

m^3/day 로 총저수량(471만 m^3)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 $2,355 \text{ m}^3/\text{d}$ 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 $1.09E-01 \text{ l}/\text{sec}$ 로 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

나. 비정상류 조건

(1) 1일 동안 수위급강하시

Fig. 5 (a)는 독 높이기 전의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(1일) 공극수압 분포를 나타낸 것이다. 공극수압은 상류사면에서 정(+)의 공극수압을 나타내면서 시간에 따라 점차로 작아지고, 하류사면에서는 큰 변화를 나타내지 않았는데, 이는 수위 조건을 빠르게 감소시켰기 때문으로 판단된다.

Fig. 5 (b)는 독 높이기 후의 수위급강하시 공극수압은 독 높이기 전과 마찬가지로 상류사면에서 정(+)의 공극수압, 하류사면에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 수위강하에 따라 공극수압은 급격히 줄어들지 않고 계속해서 상류사면 부근에 남아 있는 것으로 나타났는데, 이는 상류사면이 불안정한 상태에 있다고 판단되므로 사면안정해석으로 안정성을 분석하여야 한다.

Fig. 6 (a)는 독 높이기 전에 시간에 따른 침윤선(공극수압=0)을 나타낸 것으로, 상류사면과 코어에서 약간씩 감소하지만 필터를 통과하지 않고 하류사면을 통과하고 있다. 수위급강하에 따라서 침윤선도 급격히 줄어들지 않고 계속해서 상류사면부근에 남아 있는 것으로 나타났다.

비정상류 조건하에서 홍수위시(12.76 m)에서 사수위(2.0 m)로 급강하 하였을 경우, 침투수량은 제체중앙에서 $5.47E-07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 시간에 따라 점차로 감소하였고, 하

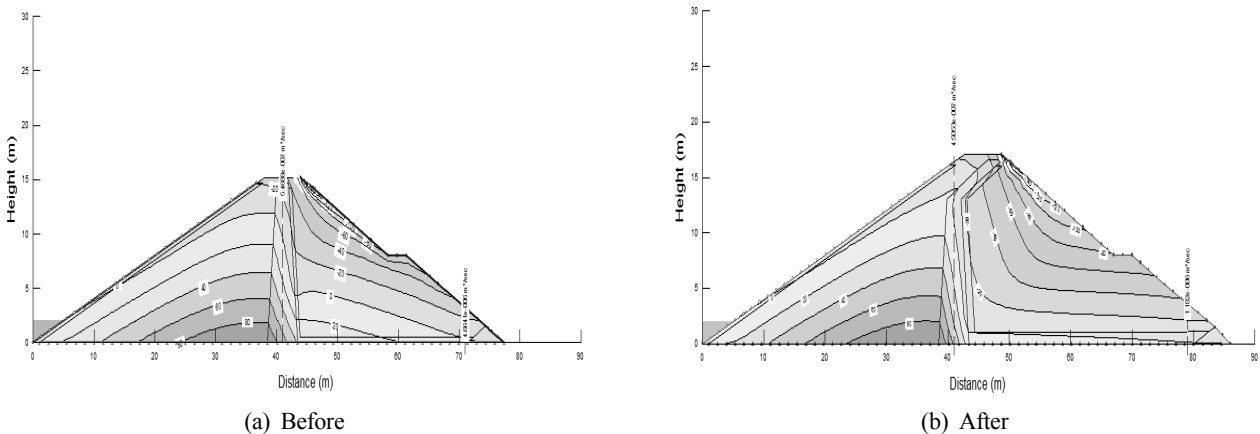
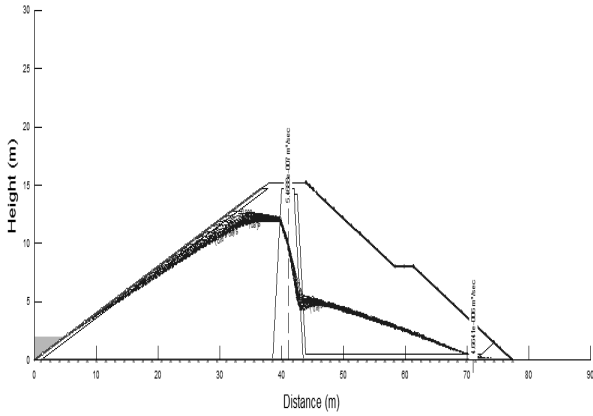
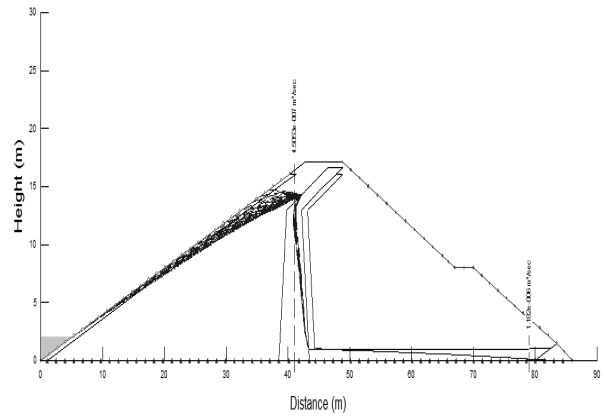


Fig. 5. Comparison of pore water pressure at rapid drawdown (1 day).

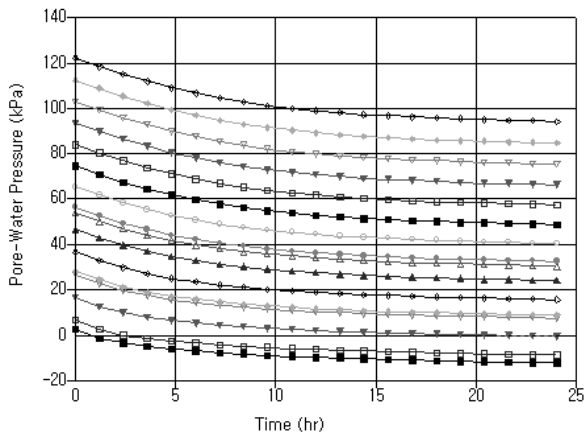


(a) Before

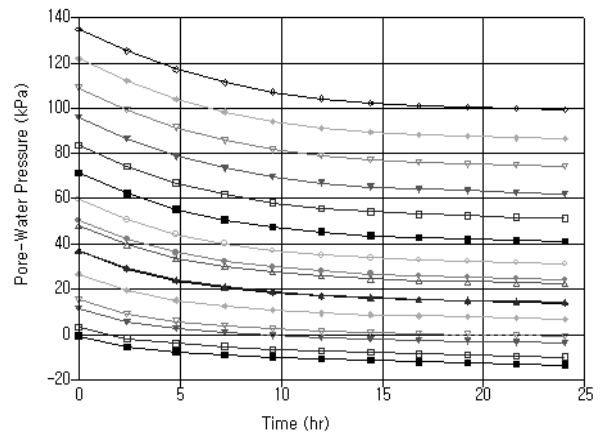


(b) After

Fig. 6. Comparison of seepage line with time at rapid drawdown (1 day).



(a) Before



(b) After

Fig. 7. Comparison of PWP with depth in the upstream slope (1 day).

류사면에서는 $4.66E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 시간에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 $13.61 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 총저수량(341.2 만 m^3)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 $1,706 \text{ m}^3/\text{d}$ 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 $5.47E-02 \text{ l}/\text{sec}$ 로 안전관리기준 (100 m당 $1 \text{ l}/\text{sec}$) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

Fig. 6 (b)는 뚝 높이기 후에 시간에 따른 침윤선은 상류 사면에서 약간씩 감소하지만 급격히 줄어들지 않고 불안정한 상태로 남아 있으며 코어부에서 급격하게 감소하였다. 뚝 높이기 전에는 코어와 하류사면 일부분으로 침윤선이 통과하지만, 뚝 높이기 후에는 이러한 현상이 발생되지 않아 큰 차이점을 보여주고 있다.

홍수위시(14.70 m)에서 사수위(2.0 m)로 급강하 하였을 경우, 침투수량은 제체중앙에서 $4.51E-07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 점차

로 감소하고, 하류사면 선단에서는 $1.18E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 시간에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 $11.22 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 총저수량(471 만 m^3)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 $2,355 \text{ m}^3/\text{d}$ 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 $4.51E-02 \text{ l}/\text{sec}$ 로 안전관리기준 (100 m당 $1 \text{ l}/\text{sec}$) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

Fig. 7 (a), (b)는 수위급강하시 상류사면에서 심도별 시간에 따른 공극수압 변화를 나타낸 것으로 초기에는 약간씩 감소하고 시간이 경과함에 따라 일정하지만, 뚝 높이기 후에 약간 더 큰 감소폭을 나타냈다. 코어중앙에서는 Fig. 8 (a), (b)와 같이 심도별로 하부에서는 약간씩 감소하고 상부에서는 거의 변화를 나타내지 않았다. 뚝 높이기 전은 공극수압은 90(하부) ~ -35(상부) kPa, 뚝 높이기 후는 60(하부) ~ -15(상부) kPa 로 작게 나타나 침투수량의 흐

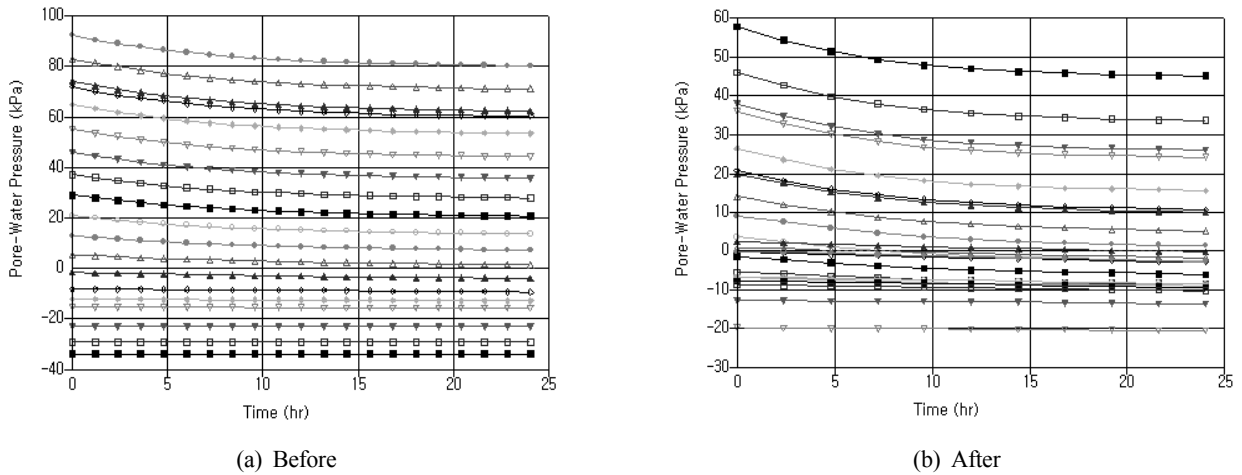


Fig. 8. Comparison of PWP with depth in the core (1 day).

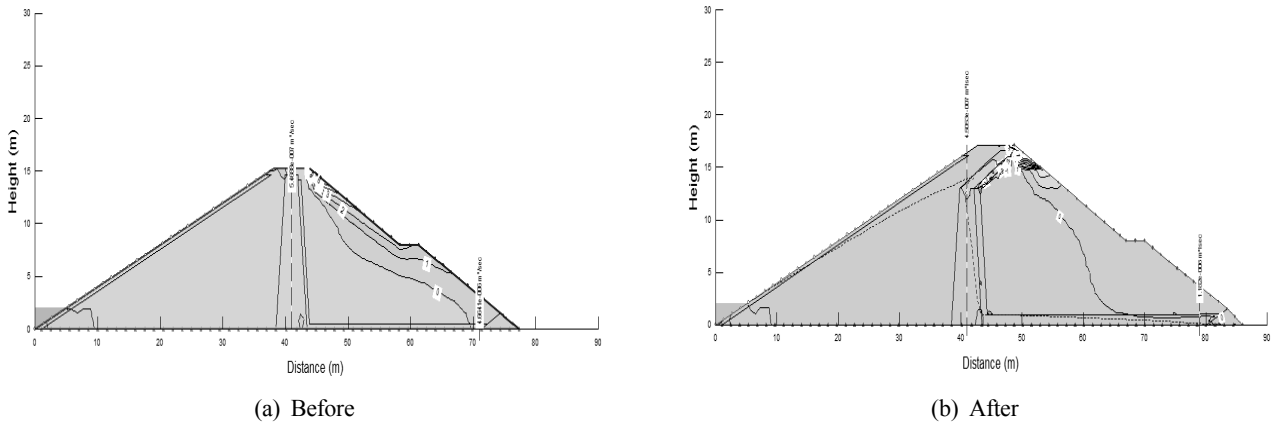


Fig. 9. Comparison of gradients at rapid drawdown (1 day).

름이 원활하게 통과하고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 9 (a)와 같이 둑 높이기 전의 동수경사는 수위가 감소함에 따라 상류사면에서는 분포영역이 점차로 감소하였고, 하류사면에서도 큰 변화를 나타내지 않았으며, 하류사면의 상부에서는 안전율이 1이하로 나타나 파이핑에 대해서 불안정한 것으로 나타났다. 그러나 둑 높이기 후의 동수경사는 Fig. 9 (b)와 같이 하류사면에서 거의 0으로 나타나서 둑 높이기 전 보다는 파이핑에 대한 안정성이 증가한 것으로 나타났다.

(2) 5일 동안 수위급강하시

Fig. 10 (a)는 둑 높이기 전의 비정상류 조건에서 수위 급강하시(5일) 공극수압 분포를 나타낸 것이다. 공극수압은 상류사면에서 정(+)의 공극수압을 나타내면서 시간에 따라 점차로 작아지고, 하류사면에서는 큰 변화를 나타내

지 않았다.

Fig. 10 (b)는 둑 높이기 후의 수위급강하시 공극수압은 둑 높이기 전과 마찬가지로 상류사면에서 정(+)의 공극수압, 하류사면에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 수위강하에 따라 공극수압은 1일 동안 경우와 마찬가지로 급격히 줄어들지 않고 계속해서 상류사면 부근에 불안정한 상태로 남아 있는 것으로 나타났다.

Fig. 11 (a)는 둑 높이기 전의 침윤선을 나타낸 것으로, 상류사면과 코어에서 약간씩 감소하며 하부 필터를 통과하지 않고 하류사면을 통과하고 있다.

비정상류 조건하에서 홍수위에서 사수위로 급강하 하였을 경우, 침투수량은 제체중앙에서 $5.21E-07 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ 로 시간에 따라 점차로 감소하였고, 하류사면에서는 $3.95E-06 \text{ m}^3/\text{s}$ 로 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 $12.94 \text{ m}^3/\text{day}$ 로 총저수량(341.2만

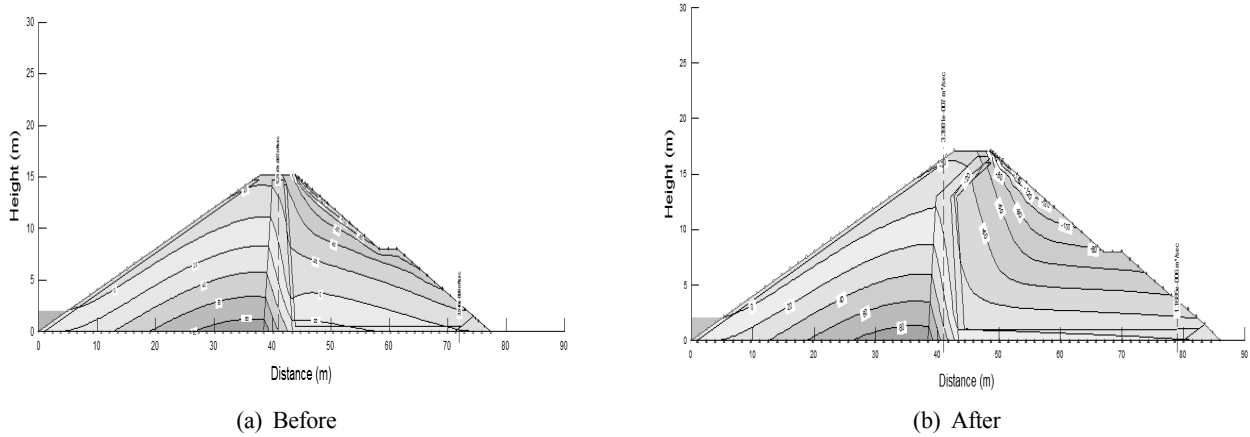


Fig. 10. Comparison of pore water pressure at rapid drawdown (5 days).

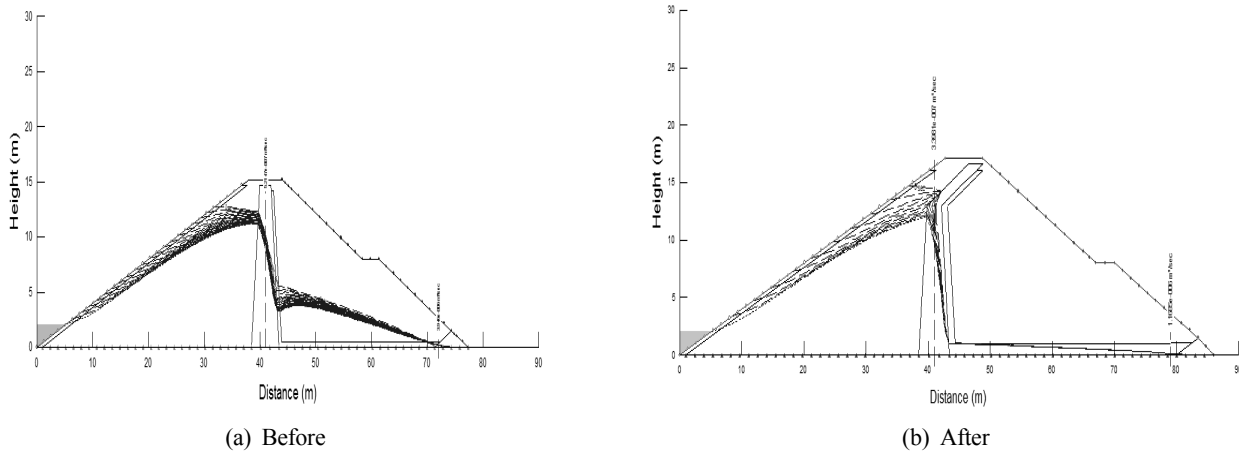


Fig. 11. Comparison of seepage line with time (5 days).

m³)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 1,706 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 5.21E-02 l/sec로 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

Fig. 11 (b)는 뚝 높이기 후의 시간에 따른 침윤선은 상류사면에서 약간씩 감소하지만 계속해서 코어와 하류사면에서는 큰 변화를 나타내지 않았고, 수위급강하에 따라서 침윤선은 급격히 줄어들지 않고 계속해서 상류사면부근에 남아 있어 불안정한 상태로 유지되고 있다. 뚝 높이기 전의 침윤선 분포는 코어와 하류사면에도 일정한 감소현상을 나타냈고, 하류사면 일부분으로 침윤선이 통과하지만, 뚝 높이기 후에는 이러한 현상이 발생되지 않아 큰 차이점을 보여주고 있다.

비정상류 조건하에서 홍수위에서 사수위로 5일 동안 급강하 하였을 경우, 침투수량은 제체중앙에서 3.40E-07

m³/s/m 로 시간에 따라 점차로 감소하였고, 하류사면에서는 1.17E-06 m³/s로 시간에 따라 큰 변화를 나타내지 않았다. 전체 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량은 8.46 m³/day로 총저수량(471만 m³)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 2,355 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 3.40E-02 l/sec로 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족하여 안전한 것으로 판단되었다.

Fig. 12 (a) (b) 은 코어중앙에서 심도별 공극수압을 나타낸 것으로 하부에서는 약간씩 감소하고 상부에서는 거의 변화를 나타내지 않았으며, 뚝 높이기 전은 공극수압은 90(하부)~ -30(상부) kPa, 뚝 높이기 후는 75(하부)~ -20(상부) kPa 로 작게 나타나 침투수량의 흐름이 원활하게 통과하고 있는 것으로 판단된다.

뚝 높이기 전의 동수경사는 하류사면 상부에서 1~3정도로 약간 커서 안전율이 1이하로 나타나므로 파이핑에 대해

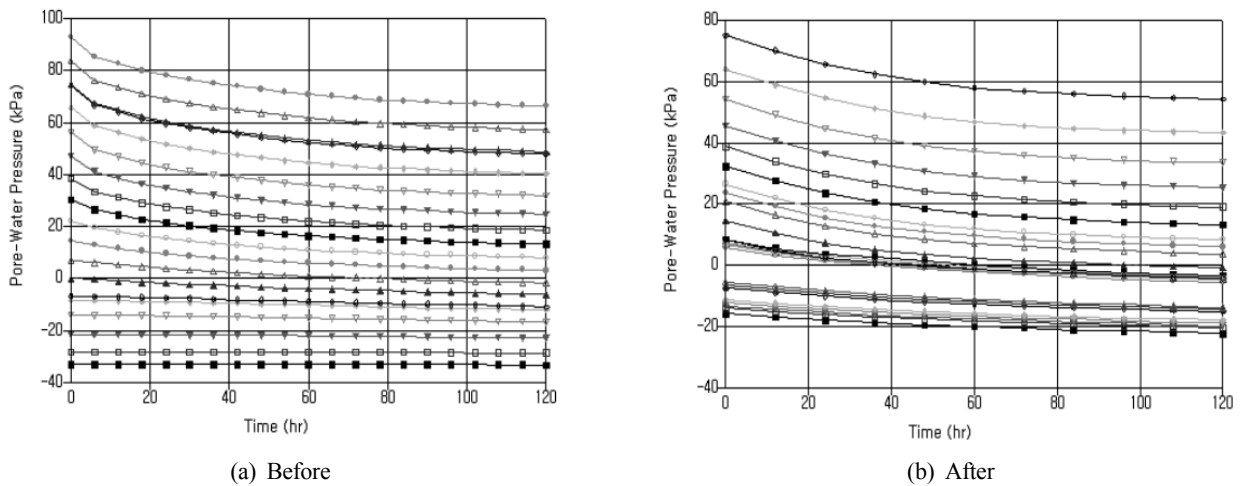


Fig. 12. Comparison of PWP with depth in the core (5 days).

서 불안정한 것으로 나타났다. 그러나 독 높이기 후의 동수경사는 독 높이기 전 보다는 하류사면에서 거의 0으로 나타나서 파이핑에 대한 안정성이 증가한 것으로 나타났다.

3. 허용누수량에 의한 파이핑 현상

저수지 독 높임시 발생하는 문제는 기존 중심코어의 확장 방법에 따른 침윤선 변화, 기존 성토재와 부등 침하로 균열의 발생 가능성 검토, 독 높이기전 이미 포화되어 있는 성토체와 새로 시공된 불포화토 사이의 침투류 해석에 의해 포화조건과 불포화조건을 고려한 파이핑 현상을 검토하여야 한다.

필膜的 붕괴원인은 월류에 의한 붕괴가 가장 많은 비율을 나타내고, 수위급강하시 상부사면의 국부적인 붕괴현상과 하류사면의 활동파괴, 댐체 내부의 침투거동에 의한 파이핑 현상 등으로 나타나고 있다. 그중에서 파이핑에 영향을 미치는 요소는 월터와 코어재료간의 입도분포와 다짐도, 동수경사 및 월터층의 두께 등이다 (Fell 등, 2003).

일반적으로 입도분포가 양호한 흙을 사용하면 파이핑의 위험 정도를 줄일 수 있으며, 입도분포가 불량하면 댐체 내부에서 흐름의 변화양상이 매우 불규칙하고, 침식되는 흙의 양도 상대적으로 커서 파이핑 현상 가능성이 크게 나타난다.

동수경사가 급격히 증가하면 침식량이 증가하고 한계동수경사가 급격히 감소하여 낮은 동수경사에서도 파이핑이 발생된다. 따라서 수위가 급격하게 증가하면 파이핑 위험성이 증가하게 되고 빠른 주기로 수위상승과 하강이 반복

되면 위험성이 커지게 된다. 또한 다짐도가 크면 상대적으로 공극비가 작아져 파이핑에 대한 안정성이 커지게 된다.

파이핑 현상은 여러 가지 검토방법이 있는데 여기서는 허용누수량에 의한 방법으로 검토하였고, 독 높이기 전후에 대하여 홍수위시와 수위급강하시 구분하여 정상류와 비정상류 조건으로 침투류 해석을 하였다.

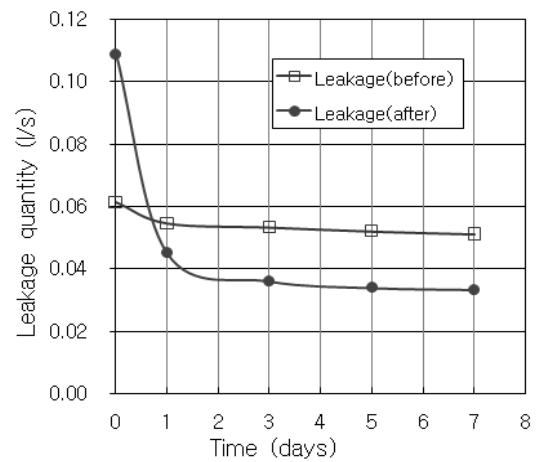
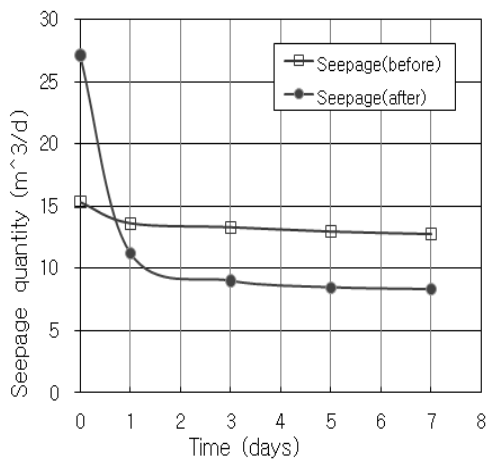
독 높이기 전의 정상류 조건하에서 홍수위시(12.76 m)에서 침투수량은 코어 중앙에서 계산한 수치를 사용하였고, 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량의 기준은 총저수량(341.2만 m³)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 1,706 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 안전관리기준(100 m당 1 l/sec) 이내로 만족할 경우 안전한 것으로 판단하였다(KRC, 2005).

비정상류 조건하에서는 홍수위시에서 사수위로 급강하하였을 경우, 1일, 3일, 5일, 7일 동안의 허용누수량을 안전관리기준치에 의해 분석하였다.

독 높이기 후의 정상류 조건하에서 홍수위시(14.70 m)에서 침투수량은 코어 중앙에서 계산한 수치를 사용하였고, 제체길이를 통과하는 1일당 침투수량의 기준은 총저수량(471만 m³)에 대한 허용누수량 안전관리기준(총저수량의 0.05%)인 2,355 m³/d 이내이며, 제체 100 m당 누수량은 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 만족할 경우 안전한 것으로 판단하였다. 비정상류 조건하에서는 홍수위시에서 사수위로 급강하 하였을 경우, 1일, 3일, 5일, 7일 동안의 허용누수량을 정상류의 조건과 동일하게 안전관리기준치에 의해 분석하였다. Table 2는 정상류와 비정상류 조건하에서 침투류 해석 결과를 나타낸 것이다.

Table 2. Result of seepage analysis under steady state and transient condition.

Division		Before raising an embankment		After raising an embankment	
		Seepage quantity/1day (m ³ /d)	Leakage quantity/100m (l/sec)	Seepage quantity/1day (m ³ /d)	Leakage quantity/100m (l/sec)
Steady state		15.30	0.0615	27.12	0.109
Transient (days)	1	13.61	0.0547	11.22	0.0451
	3	13.29	0.0534	8.98	0.0361
	5	12.94	0.0521	8.46	0.0340
	7	12.74	0.0512	8.31	0.0334



(a) Seepage quantity

(b) Leakage quantity

Fig. 13. Comparison of the steady state and transient condition under rapid drawdown.

둑 높이기 전·후의 정상류 조건과 비정상류 조건하에서 1일당 침투수량의 기준으로 총저수량에 대한 허용누수량은 안전관리기준(총저수량의 0.05%)이내에 포함되어 안전하고, 제체 100 m당 누수량도 안전관리기준(100 m당 1 l/sec) 이내로 안전하게 나타났다.

Fig. 13 (a), (b)는 둑 높이기 전의 정상류조건에서(시간=0) 비정상류 조건(1일, 3일, 5일, 7일)으로 수위 급강하 시로 변화할 때 1일당 침투수량과 100 m당 누수량은 초기에 약간 감소하였지만 1일 이후에는 큰 차이 없이 일정하게 감소하였다.

그러나, 둑 높이기 후의 정상류조건에서 비정상류 조건(1일, 3일, 5일, 7일)으로 수위 급강하시에 1일당 침투수량과 100 m당 누수량은 초기에 약 2.4배 정도로 크게 감소하였고, 1일 이후에는 일정하게 감소현상을 나타냈다. 비정상류 조건에서 각각의 수위강하시에 큰 차이를 나타내지 않은 이유는 수위를 너무 빠르게 급강하여 공극수압이 소산할 시간적 여유가 없었기 때문으로 판단된다.

IV. 결론

본 연구에서는 저수지 둑 높이기 사업 지구를 대상으로 둑 높이기 전·후에 정상류와 비정상류 조건으로 홍수위시와 수위급강시 시간에 따른 제체의 공극수압, 침투량(누수량), 침윤선, 동수경사 및 파이핑 현상 등을 침투류 해석에 의해 비교분석한 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 정상류 조건하에서 둑 높이기 전·후의 공극수압 분포는 상류사면에서 정(+)의 공극수압을 나타내다가 코어를 통과하면서 급격히 감소하고 하류사면에서는 점차로 부(-)의 공극수압으로 변화하고 있다. 코어 중앙에서 심도별 공극수압은 100(하부) ~ -33(상부) kPa로 상부는 부(-)공극수압을 나타냈고, 침윤선은 경사형 코어에서 하류부로 급격하게 감소하면서 하부 지반의 필터를 통과하고 있다. 동수경사는 하류사면 상단에서 1~5 정도이고, 그 이외 사면에서는 거의 0으

- 로 나타나서 파이핑에 대해서는 안전하였다.
2. 둑 높이기 전·후의 비정상류 조건에서 공극수압은 상류사면에서 정(+의) 공극수압을 나타내면서 시간에 따라 점차로 작아지고, 하류사면에서는 큰 변화를 나타내지 않았다. 시간에 따른 침윤선은 둑 높이기 전에는 코어와 하류사면에도 일정한 감소현상을 나타냈고, 하류사면 일부분으로 침윤선이 통과하지만, 둑 높이기 후에는 이러한 현상이 발생되지 않았다. 수위급강하에 따라서 공극수압이 급격히 줄어들지 않고 계속해서 상류사면부근에 남아 있는 것으로 나타났는데, 이는 상류사면이 불안정한 상태에 있다고 판단되므로 사면안정해석으로 안정성을 분석하여야 한다.
 3. 코어중앙에서 심도별 공극수압 변화는 하부에서는 약간씩 감소하고 상부에서는 거의 변화를 나타내지 않았으며, 둑 높이기 후의 공극수압은 둑 높이기 전보다 작게 나타나 침투수량의 흐름이 원활한 것으로 나타났다. 둑 높이기 전의 동수경사는 하류사면에서 파이핑에 대해서 약간 불안정하게 나타났고, 둑 높이기 후에는 파이핑에 대한 안정성이 증가한 것으로 나타났다.
 4. 둑 높이기 전후의 정상류와 비정상류 조건하에서 총저수량에 대한 1일당 허용누수량은 안전관리기준(총저수량의 0.05%)이내 이고, 제체 100 m당 누수량도 안전관리기준 (100 m당 1 l/sec) 이내로 나타나서 파이핑에 대해서는 안전하였다.
 5. 둑 높이기 전의 정상류조건에서 비정상류 조건으로 변화할 경우에 1일당 침투수량과 100 m당 누수량은 초기에 약간 감소하였지만 이후에는 큰 차이 없이 일정하게 감소하였고, 둑 높이기 후에는 초기에 약 2.4 배 정도로 크게 감소하였다.

참 고 문 헌

- Budhu M. 2000. *Soil Mechanics and Foundations*. New York, John Wiley and Sons. pp. 166-168.
- Eisenstein, ZJ, Duncan M, Seed HB. 1972. An analysis of the cracking at Duncan dam, Proceedings of the ASCE Special Conference on Performance of Earth and Earth Supported Structures. Purdue Univ., 1(1): 765-778.
- Fell R, Wan CF, Cyganiewicz J, Foster M. 2003. Time for development of internal erosion and piping in embankment dams. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 129(4): 307-314.
- Foster MA, Fell R, Spannagle M. 2000. The statics of embankment dams failures and accidents. *Canadian Geotech. J.* 37: 1000-1024.
- Foster MA, Fell R. 2001. Assessing embankment dam filters that do not safety design criteria. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 127(5): 398-407.
- Fredlund DG, Xing A. 1994. Equations for the soil-water characteristic curve. *Canadian Geotechnical J.* 31: 521-532.
- Fredlund DG, Rahardjo H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons, Inc.
- GEO-SLOPE. 2007. *SEEP/W 2007*. GEO-SLOPE International Ltd.
- Green RE, Corey JC. 1971. Calculation of hydraulic conductivity: A further evaluation of some predictive methods. *Soil Science Society of America Proceedings* 35: 3-8.
- Ho PG. 1979. The prediction of hydraulic conductivity from soil moisture suction relationship. B.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada.
- Kim MH, Lee DW. 2009. Safety evaluations of reservoir embankment by instrument system. *J. of Korean Society of Agricultural Engineers* 50(2): 37-44. [in Korean]
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2003-2005. *Report of Monitoring System for Disaster Prevention of Agricultural Structure*. [in Korean]
- Korea Rural Community Corporation (KRC). 2005. *Guidelines for Precision Safety Inspections of Dam*. [in Korean]
- Korean Water Corporation (KOWACO). 2004. *A Study on Safety Management System of Dam*. [in Korean]
- Lee DW, Oh BH. 2003. Stability evaluation methods of agricultural reservoir by field monitoring. *J. of Agri. Sci. Chungnam Nat'l Univ.*, 30(2): 164-174. [in Korean]
- Min HG, Lee DW. 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]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). 2005. *Guidelines for Dam Design*. [in Korean]
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (MLTM). 2011. *The 4 Major Rivers Restoration*. Assessed in <http://4rivers.go.kr>. [in Korean]
- Squier LR. 1970. Load transfer in earth and rock fill dams. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division ASCE* 96(SM1): 213-233.
- Van Genuchten MTh. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America J.* 44: 892-898.