

초기 변동수위를 고려한 제방 월류에 따른 안정성 분석

Stability Analysis of Embankment Overtopping by Initial Fluctuating Water Level

김진영¹ Kim, Jin-Young

김태현² Kim, Tae-Heon

김유성³ Kim, You-Seong

김재홍⁴ Kim, Jae-Hong

Abstract

It is not possible to provide reasonable evidence for embankment (or dam) overtopping in geotechnical engineering, and conventional analysis by hydrologic design has not provided the evidence for the overflow. However, hydrologic design analysis using Copula function demonstrates the possibility that dam overflow occurs when estimating rainfall probability with rainfall data for 40 years based on fluctuating water level of a dam. Hydrologic dam risk analysis depends on complex hydrologic analyses in that probabilistic relationship needs to be established to quantify various uncertainties associated with modeling process and inputs. The systematic approaches to uncertainty analysis for hydrologic risk analysis have not been addressed yet. In this paper, the initial level of a dam for stability of a dam is generally determined by normal pool level or limiting the level of the flood, but overflow of probability and instability of a dam depend on the sensitivity analysis of the initial level of a dam. In order to estimate the initial level, Copula function and HEC-5 rainfall-runoff model are used to estimate posterior distributions of the model parameters. For geotechnical engineering, slope stability analysis was performed to investigate the difference between rapid drawdown and overtopping of a dam. As a result, the slope instability in overtopping of a dam was more dangerous than that of rapid drawdown condition.

요 지

지반공학적으로 제방(또는 댐) 월류에 대한 근거를 제시하기 어렵다. 수문학적인 안정성 평가에서 댐의 초기수위(만수위)를 고정시키고 강우량을 계산하기 때문에 월류 가능성은 매우 희박하다. 그러나 Copula 함수를 사용하여 초기수위가 고정된 댐의 만수위가 아닌 변동성 있는 확률수위를 적용해서 국내 40년간의 빈도를 고려할 때, 월류 가능성을 확인할 수 있었다. 수문학적 댐의 위험성 분석은 다양한 불확실성 인자 중 댐 초기수위에 대한 모의기법 개발이 필요한 복잡한 수문학적 해석을 요구한다. 본 연구에서는 기존 댐 위험도 분석 시 초기수위는 상시만수위 또는 홍수기 제한수위로 가정하지만, 이러한 보수적인 가정에 의한 연구는 기상변동성 및 기후변화의 영향을 고려하지 못하며, 댐의 월류확률 및 이에 따른 붕괴확률을 추정하는데 있어서 지반공학적인 접근이 필요하다. Copula 함수를 이용하여

1 비회원, 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

2 정회원, 전북대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

3 정회원, 전북대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Chonbuk National Univ.)

4 정회원, 동신대학교 토목공학과 조교수 (Member, Assistant Prof., Dept. of Civil Engrg., Dongshin Univ., Tel: +82-61-330-3139, woghd@dsu.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 29일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

댐 특성에 맞는 초기수위를 결정하였으며, HEC-5 모형을 활용하여 강우-유출 모형 매개변수의 사후분포를 정량적으로 추정하여 댐 월류확률을 산정하였다. 지반공학적인 측면에서 댐 안정성 해석은 상류사면(upstream)의 수위급강하(drawdown)에 대한 안전율과 하류사면(downstream) 월류상태에서의 불안정성을 비교하여 지반공학적 위험도를 비교·분석하였다.

Keywords : Dam risk analysis, Hydrologic analysis, Overtopping, Drawdown, Slope stability

1. 서론

제방이나 또는 댐과 같은 지반구조물들은 우리 사회에 많은 편익을 제공하지만 건설된 댐의 파괴로 인한 홍수는 지난 수년간 가장 심각한 재해 중의 하나로 인식되어 왔으며 대규모의 댐을 저류, 방류하는 구조물의 예기치 못한 붕괴로 인해 막대한 피해가 발생하고 있다. 국외의 대표적인 댐 붕괴사례로서 이탈리아 Vaiont 댐 붕괴(1963년), 미국 펜실바니아주 Johnstown 댐 붕괴(1889년), 인도 Machhu II 댐 붕괴(1974년) 등 각 붕괴에서 2000여명이 넘는 사망자를 발생하였다. 붕괴의 원인으로서는 계획했던 댐의 수위보다 높은 강우로 인한 제방 또는 댐의 월류로 나타났다. 국외 여러 곳에서 발생했던 댐 붕괴의 원인을 조사할 때, 불충분한 여수로 용량에 기인한 월류가 34%, 기초부 결함이 30%, 파이핑 및 누수에 의한 부분이 28% 등 Table 1과 같이 전 세계의 여러 학자들에 의해 조사된 댐 붕괴 원인에 대한 결과를 집계한 것이다(Lou, 1981). 추가적으로도 국제대담회의 년차별 보고에 의하면 기후변화에 의한 댐의 위험성을 언급하며 모니터링 및 예측기술의 개발이 필요하다고 강조하고 있다(www.icold-cigb.org).

월류 현상은 중력식 콘크리트 댐으로 하여금 활동 현상을 야기하거나 흙댐이나 록필댐으로 하여금 총체적 또는 부분적인 파괴를 야기할 수 있다. 이러한 월류의 주된 요인은 불충분한 수문자료나 수문학적 설계오류 등을 들 수 있다.

국내의 사례에서도 강우 변화로 인한 극심한 수위의

변동으로 최근 발생한 경북 경주시 산대저수지 붕괴와 전북 고창군 조산저수지 옹벽 붕괴를 예로 들 수 있다. 산대저수지는 노후되어 활용성이 없어지면서 국지성 집중호우의 빈번한 발생으로 월류에 가까운 저장용량의 변화가 주된 원인으로 파악된다. 조산저수지 역시 300mm가 넘는 강우량을 기록한 전날 폭우로 저수지 독 높이기 사업을 하던 중 20m 옹벽이 집중호우를 이겨내지 못하고 유실 났다고 밝혀졌다.

최근 기후변화의 영향으로 인해 예상치 못한 이상홍수 및 댐 여유고 부족 등 댐 붕괴를 위협하는 다양한 위험인자가 도출되고 있다. 또한 댐 붕괴 시 하류부에 막대한 피해 결과를 초래하고 있는 실정이므로 국내·외에서는 댐 붕괴를 위협하는 다양한 수리·수문학적 변량을 도출하여 댐 위험도 분석에 이용되고 있다(Predergast, J. D. 1979; Dekay and Clelland 1993; Kwon and Moon 2006; Hsu et al., 2011). 국내외에서 시행되고 있는 댐 위험도 분석의 초기수위 결정은 상시만수위 혹은 홍수기 제한수위고로 가정하여 수행하고 있기 때문에, 예기치 못한 집중호우에 관련된 효과적인 댐 운영모의가 이루어지지 않고 있는 실정이다(Kwon et al., 2007).

수문학적 댐 위험도 분석시 사전강수특성에 따른 댐 초기수위를 산정하기 위해 Copula 함수를 이용한 댐 초기수위 모의기법을 수행하여 수문학적인 제방 비탈면의 불안정성을 제안해 왔다. 연구내용의 시작은 월류에 대한 가능성을 수문학적으로 확인하고 이러한 배경으로 발생하는 비탈면의 불안정성을 지반공학적으로 연계하여 불포화 침투해석과 강우를 발생시켜 월류의 위

Table 1. Cause of dam collapse

Cause	Middlebrooks (1953)	Gruner (1967)	Takase (1967)	Babb and Mermel (1968)	Biswas and Chatterjee (1971)	USCOLD (1975)
Overtopping	30	23	28	36	35	38
Piping and Seepage	38	40	44	30	25	44
Foundation defects	15	2	10	15	-	9
Others	17	35	18	19	40	9

협성을 조사하고자 한다. 보편적으로 제방 비탈면의 안정성에서 가장 위험한 상황은 수위급강하시 발생되지만 월류에 대한 해석과 비교하여 집중호우나 극우강우시에 발생할 수 있는 확률적인 가능성을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 최근에 파괴가 빈번한 제방을 대상으로 지반공학적인 해석을 하였으나, 수문학적 홍수위 안전을 해석은 주로 댐을 대상으로 해석하기 때문에 수문학적인 검토와 지반공학적인 검토의 지반구조물 댐과 제방의 용어가 혼재되어 있음을 양해를 구합니다.

2. 댐 비탈면의 수문학적인 안정성 검토

2.1 Copula 함수를 활용한 댐 초기수위 모의기법

첫 번째 단계로써 월류에 대한 확률적인 가능성을 확인하고자 수문학적인 근거로 제방 또는 댐 비탈면의 안정성을 확인하고자 수행하였다. 사전강수특성과 과거 댐 수위의 통계학적 관계를 기반으로 Copula 함수를 적용하여 댐 위험도 분석 시 주요 불확실성 변량으로 작용하는 댐 초기수위를 산정하고자 한다. 두 개 이상의 변량간의 관계성을 파악하는데 있어 일반적으로는 상관계수를 활용하지만 변량간의 분포를 다루는 경우에는

Copula 함수를 사용하여 그 의존성 구조를 파악하는 것이 타당하다고 알려진 바 있다. 즉, Copula 함수는 Sklar (1959)에 의해 처음으로 제시되었으며 수자원 분야에서 고정수위로 가정했던 댐 위험도 분석 시 예측하지 못한 월류의 발생을 평가하기 위해서 시도된 연구이다. Copula 함수는 임의의 확률변수 X, Y에 대한 결합누가분포함수 $F_{X,Y}(x,y)$ 의 주변 누가분포함수 $F_X(x)$, $F_Y(y)$ 가 존재하고 서로 독립적인 경우 Copula 함수 C가 존재하게 된다. 여기서, 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 는 확률변수 X, Y의 확률분포함수로부터 결정되며, 주변 누가분포함수 $F_X(x)$ 와 $F_Y(y)$ 의 결합 누가분포함수는 Copula 함수를 통해 식 (1)과 같이 정의된다. 식 (1)에서 x 는 사전강수특성, y 는 관측된 에 따른 댐 수위를 나타낸다.

$$F_{X,Y}(x,y) = C[F_X(x), F_Y(y)] \quad (1)$$

따라서 본 연구에서는 사전강수특성과 수위의 관계를 Copula 함수로 이용하여 댐 위험도 분석시 이용되는 초기수위를 결정하였으며, Table 2는 일반적으로 알려진 Copula 함수의 결합확률분포 식을 나타낸다.

Table 3은 월류에 대한 확률강우의 모의시뮬을 하기 위해 댐 주변의 강우관측소 12곳에서 측정된 강우데이



(a) San-Dae reservoir (Gyeong Ju)



(b) Cho-San reservoir (Go Chang)

Fig. 1. Dam collapse due to localized heavy rain in South Korea

Table 2. Bivariate copula functions (Nelsen, 2006)

Name	Bivariate Copula Function $C_b(u,v)$
Gaussian	$C^G(u_1, \dots, u_n; \Sigma) = \frac{\partial}{\partial u} C^G(u_1, \dots, u_n; \Sigma) = \frac{1}{ \Sigma ^{\frac{1}{2}}} \exp\left(-\frac{1}{2} y^T (\Sigma^{-1} - I) y\right)$
Gumbel	$\exp\left(-\left(-\log(u)\right)^\theta + \left(-\log(v)\right)^\theta\right)^{1/\theta}$
Student-t	$C(u; v; \Sigma) = \frac{\Gamma((v+d)/2) [\Gamma(v/2)]^{d-1}}{[\Gamma((v+1)/2)]^{\frac{1}{2}}} \left[\prod_{i=1}^d (1 + y_i^2/v)^{(v+1)/2} \right] (1 + y^T \Sigma^{-1} y/v)^{-(v+d)/2}$

Table 3. Basic statistics of 48hours annual maximum rainfall in 12 stations for probability rainfall analysis

Station	Mean (mm)	Stan. Dev. (mm)	Skewness	Kurtosis	Minimum (mm)	Maximum (mm)
1	177.94	86.63	0.73	2.96	44.00	403.00
2	196.76	109.97	1.05	3.31	46.50	492.00
3	180.46	98.29	1.16	3.90	55.00	464.30
4	182.69	85.38	1.02	3.45	50.50	409.00
5	186.84	91.03	0.91	2.83	82.00	408.00
6	177.59	92.19	1.50	6.25	44.90	529.00
7	190.15	86.50	1.39	6.59	57.00	534.00
8	190.65	83.04	0.85	3.05	74.20	427.00
9	194.82	86.42	1.28	4.39	91.00	470.00
10	187.80	90.31	1.35	4.51	79.00	475.00
11	184.06	83.76	1.05	4.06	63.50	450.70
12	185.21	92.21	0.73	2.53	66.50	402.00

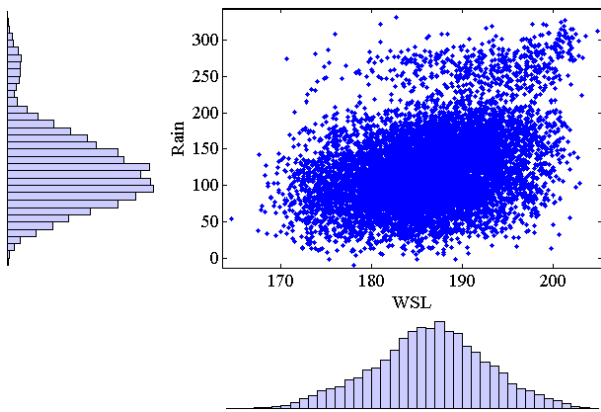


Fig. 2. Initial water surface level by copula function

터를 48시간 최대 강우량을 기준으로 최대, 최소 그리고 평균 강우량을 계산한 결과이다. 확률강우량 해석을 위해 표준편차와 해석에 필요한 상수들을 보여주고 있다. Fig. 2는 Copula 함수를 활용하여 관측된 사전강수특성 및 수위 자료 기반으로 수위를 모의한 결과이다. 이러한 결과는 기존 강수특성 및 수위특성의 확률분포를 잘 묘사하고 있음을 확인할 수 있었으며, 모의된 수위결과를 이용하여 댐 위험도 분석시 초기수위 값으로 부여되어 위험도 분석을 수행하게 된다. 따라서 초기수위의 변동성을 고려하여 보다 신뢰성 있는 댐 위험도 분석을 수행할 수 있을 것이라 사료된다.

2.2 수문학적 댐 위험도 해석기법을 활용한 월류확률 산정

전통적으로 국내 수문학적 댐 안정성 평가는 3단계로

이루어진다. 첫째, 유역내 강우관측소를 대상으로 확률 강우량 추정 후 면적강우량으로 환산, 둘째, 추정된 면적강우량과 유역특성인자를 고려하여 강우-유출 분석을 수행한다. 마지막으로 강우-유출 분석에서 도출된 유출량을 댐의 유입량으로 간주하고, 댐 운영모의를 수행한 결과를 이용하여 최종적으로 댐 안전여부를 판단한다. 즉, 이러한 절차는 국내에서 일반적으로 이루어지고 있는 절차이며, 자세한 내용은 Na et al.(2014)에 상세히 수록되어 있다. Fig. 3은 댐 위험도 해석 절차를 개념적으로 도시한 결과이다.

그러나 국내에서 널리 이용되고 있는 댐 위험도 해석 절차시 초기수위의 경우 계획홍수위 또는 홍수기제한 수위로 가정한 분석이 진행되고 있다. 이러한 현상은 사전강수특성에 의한 수위는 고려하지 않으므로 댐 운영모의 분석시 실제상황을 효과적으로 반영하지 못하는 단점이 존재한다. 따라서 본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 Copula 함수를 활용한 댐 위험도 해석 기법을 개발하였으며, 특정댐을 대상으로 적용해 보았다.

먼저 Fig. 4의 경우 댐 운영모의시 초기수위는 계획홍수위로 가정하여 분석을 수행하여 도시한 결과이다. Fig. 4에서 빨간선의 경우 댐 제방고(crest)이며, 10,000번 모의한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 계획홍수위로 가정한 댐 운영모의의 경우 월류를 하는 사상이 한번도 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었으며, 연초과확률(annual exceedance probability)의 경우 10,000년 빈도에도 안정하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 본 연구에서 개발한 Copula 함수를 이용하여 사전강수특성에 따라 도출된 수위를 초기수위로 가

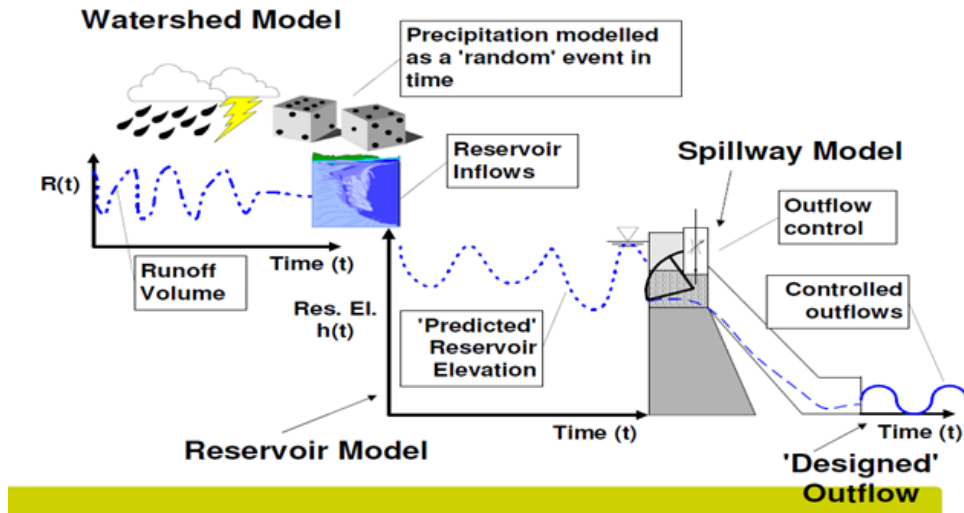


Fig. 3. A conceptual diagram for Hydrologic Dam risk analysis

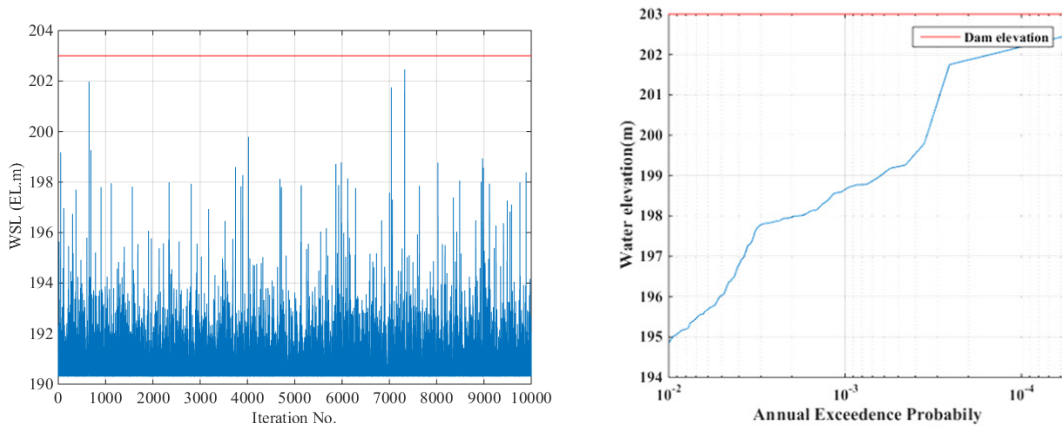


Fig. 4. Ensemble scenarios of dam water surface level given the design flood level at dam

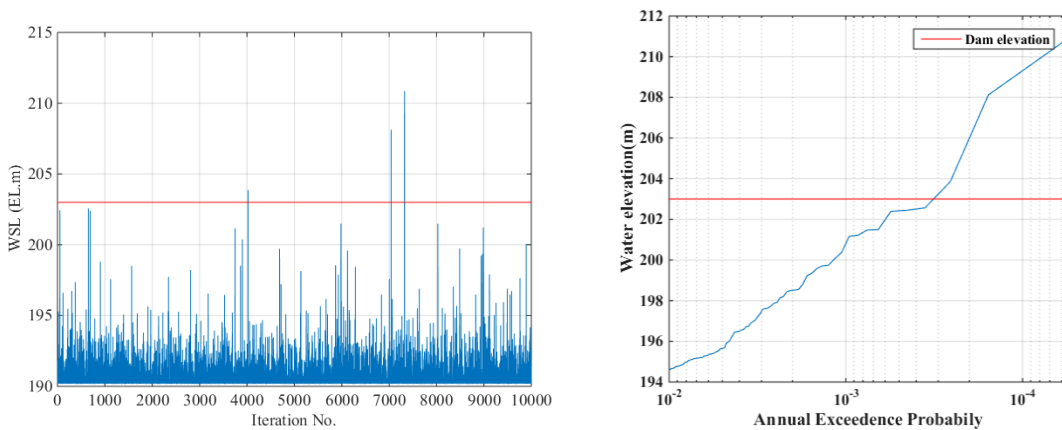


Fig. 5. Ensemble scenarios of dam water surface level given the water surface level of result of copula analysis at dam

정한 연구를 도시한 결과이다. 그 결과 기존 계획홍수위로 가정한 단일 수위값에서는 댐 운영모의시 월류하는 사상이 발생하지 않았지만, 수위의 변동성을 고려한 결과 월류 사상이 발생하고 있는 것을 확인 할 수

있었다. 또한 약 6,000년 빈도에서 댐 월류를 할 가능성이 있는 것으로 도출되었다. 이러한 결과는 댐 운영모의시 사전강우특성을 효과적으로 고려한 결과라고 사료된다.

3. 댐 비탈면의 지반공학적인 안정성 검토

3.1 흙 댐의 수위급강하(Drawdown)에 대한 안정성 검토

앞장에서는 확률강우를 통하여 댐 월류에 대한 수리학적 위험성을 확인하였다. 기후변화로 인한 극우강우로 인하여 초기수위를 변동성 있게 조건을 가정한다면 충분히 월류에 대한 가능성을 확인할 수 있었다. 댐 월류에 대한 위험성이 구체적으로 비탈면 안전율에 어떠한 영향을 미치는지 파악하고자 지반공학적인 측면에서 수치해석을 통하여 일반적인 댐 구조를 가정하여 불포화지반의 침투해석을 연계하여 사면안정해석을 수행하였다. 일반적인 댐의 실제 규모로 해석하는 경우와 거의 유사한 사면의 안전율을 얻기 때문에 안정성에 대한 경향을 유추할 수 있다. 제방 활동에 대한 안전 기준은 하천설계기준(River Design Standard, 2009)에서 제시하고 있다. 안정해석을 위해 침윤면과 활동파괴면을 고려하여 경사면 파괴에 대한 최소안전율을 계획홍수

위 및 수위급강하를 고려한 침투해석으로부터 얻어진다. 이러한 침윤면을 고려하여 상류사면(upstream) 및 하류사면(downstream) 활동에 대한 안전율을 구하고 Table 4에 제시된 안전율 이하로 나타날 경우 대책공법을 강구한다.

사면안정 해석에 있어 대상사면의 원지반에 대한 강도특성을 나타낼 수 있는 토질정수(단위중량, 점착력, 내부마찰각 등)의 선정은 Table 5에서 제시한 것과 같이 지층구성에 따라 평균적인 값들을 문헌에서 참고하였다. 수위의 급강하 조건에 맞는 침투해석을 위해서 각 지층의 포화투수계수와 불포화 투수계수를 계산하기 위한 함수특성곡선의 실험정수들도 Table 5에 제시하였다.

Fig. 6에서와 같이 댐을 가정하여 제내지와 제외지 성토부와 댐의 중심에는 점토로 구성된 코어 그리고 배수 부분(Drain)으로 일반적인 댐 구조 형태로 가정하였으며, 댐 바닥 경계조건으로 bedrock은 불투수층이다. 댐 사면의 가장 불안정한 조건은 수위급강하(drawdown)이

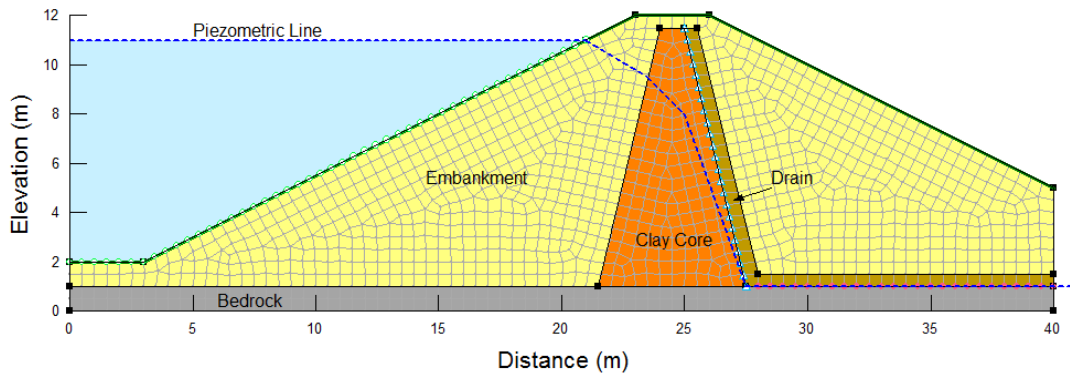


Fig. 6. Initial condition of an embankment

Table 4. Factor of safety in embankment

Instable factor	Condition of pore water pressure	Factor of safety
Regardless of tension crack	Regardless of pore water pressure	above 2.0
	Regard of pore water pressure	above 1.4
Regard of tension crack	Regardless of pore water pressure	above 1.8
	Regard of pore water pressure	above 1.3

Table 5. Physical and Hydraulic parameters of materials

Soil type	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kN/m ²)	Friction angle (°)	Permeability (m/s)	SWCC parameters a (kPa), n	Sat./Res. WC (m ³ /m ³)
Fill-up ground	19	5	30	5×10 ⁻⁶	17.54, 3.9	0.38/0.01
Clay core	18	15	15	1×10 ⁻⁹	50, 2.06	0.45/0.08
Drain	19	0	32	1×10 ⁻⁴	1.5, 2.1	0.3/0.0
Bedrock	-	-	-	Impenetrable	-	-

기 때문에, 사면 안정성 검토는 5시간 수위급강하 할 때, 상류사면에서 지반 내에 간극수압의 분포로 인한 사면 안전율을 검토하였다. 초기 댐 수위는 Fig. 6과 같이 침윤선(파랑색 점선)으로 표시하였으며, 수위저하로 인한 간극수압의 분포는 불포화지반의 침투해석으로 시간에 따라 van Genuchten(1980) 모델을 적용하여 수치해석이 수행되었다(GeoStudio, 2012).

비탈면의 경사는 일반적인 댐의 기울기 1:2(V:H)를 상류사면과 하류사면 모두 동일하게 형성되었고, 초기 댐의 상류사면 수위는 90%까지 저류된 상태(Fig. 6)에서 5시간동안 10% 수위(Fig. 9)까지 떨어지는 수위급강하를 가정하였다. Fig. 7은 초기 90% 댐 수위에서 흙댐 내부의 간극수압 분포를 보여주고 있으며 Fig. 8에서는 초기 만수위에서 상류사면의 안정성을 검토한 결과를 보여준다. Fig. 7의 간극수압의 분포는 수위에 따른 높이별 수압이 결정되고 있으며, 배수가 유도되는 Drain이 위치한 부분에서는 간극수압이 '0'으로 설정되기 때문에 투수계수 크기에 따라 수압분포가 배열된다. Fig.

9의 간극수압의 분포는 급하강된 상류사면의 수위로 인해 비탈면 쪽으로 배수가 대부분이 발생되기 때문에 시간에 따른 투수계수에 맞게 간극수압의 높이가 점차적으로 낮아지고 있음을 알 수 있다. 수압으로 작용하고 있는 상류사면의 수위 때문에 사면 파괴의 위험성은 크지 않다는 것을 보여주고 있다. 초기의 안정성과 비교하기 위해서 수위급강하로 야기되는 상류사면의 비탈면 불안정성을 Fig. 10에서 보여주고 있다.

수위급강하로 인한 상류사면의 지반 내 간극수압은 여전히 높게 분포하고 있다. 급강하로 인해 간극수압 소산을 발생시키는 시간이 짧기 때문에 지반의 유효응력은 현저히 낮아 사면 파괴를 발생시킬 수 있는 중요한 요인으로 작용한다. 초기 수위로 지반에 작용하는 수압마저 없어졌기 때문에 댐 사면의 가장 불안정한 시기이기도 하다. 초기 조건과 수위급강하로 계산된 사면의 안전율은 1.969에서 1.087로 매우 낮아졌다. 사면 안정성 검토는 10일 동안의 수위변화와 지반내의 간극수압 소산이 발생할 수 있는 충분한 시간 중에서 Fig. 10은 가

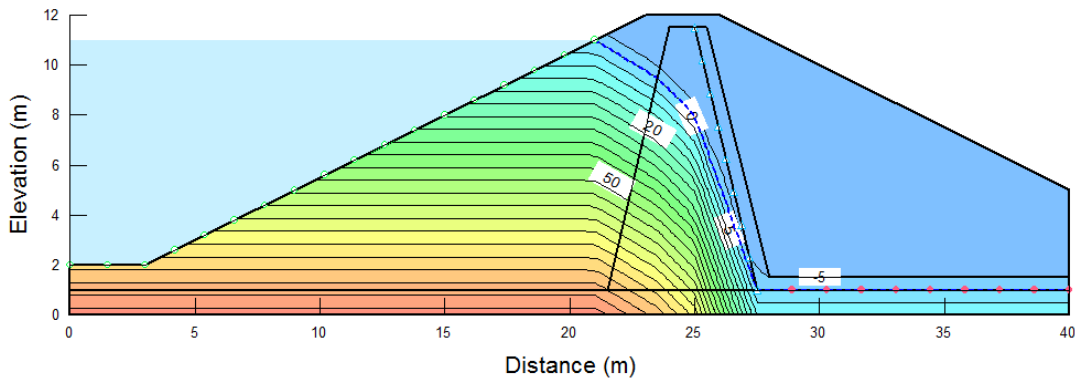


Fig. 7. Pore water pressure of an embankment at initial condition

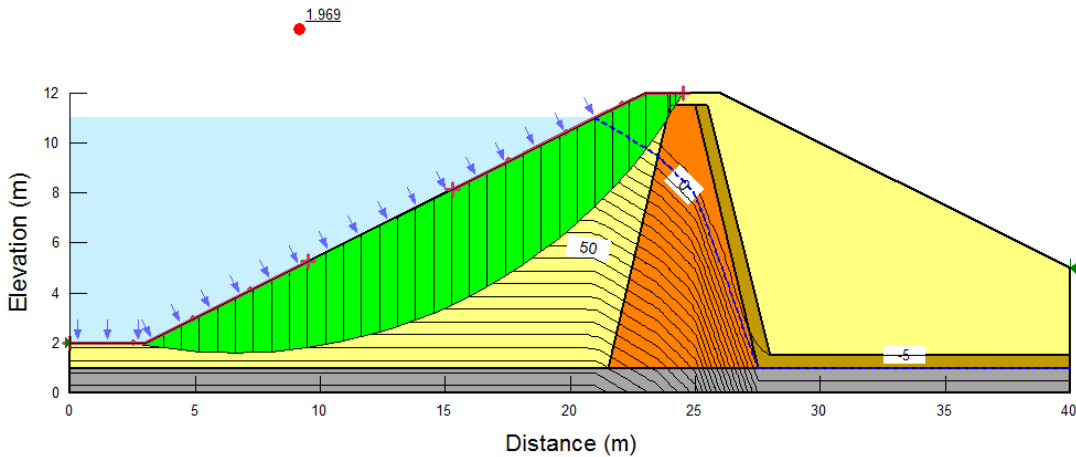


Fig. 8. The stability of an embankment before rapid drawdown at initial condition ($F_s=1.969$)

장 사면이 불안한 수위급강하 직후 최저 안전율을 보여주고 있다. 지반 내 간극수압이 소산되면서 유효응력의 회복을 확인하기 위하여 1-day 후 상류사면의 사면안전율을 확인하였다.

Fig. 11은 수위급강하 이후 1-day 경과 후 사면내의 간극수압 분포를 보여주고 있다. 간극수압의 소산이 이루어져 유효응력이 약간 증가하였지만 상류사면 지반내의 불안정성은 여전히 보여주고 있다. Fig. 12에서 알 수 있듯이 사면의 안전율 역시 1.164로 여전히 불안정한 상태이다. 수치해석을 수행하는 조건은 댐을 구성하고 있는 지반이 일체형이고 균질한 재료로 가정하여 사면 안전율이 수위급강하에 의해 제일 불안정한 상태를 보여주고 있지만, 실질적인 댐의 균열이나 변형은 지반내에 남아 있는 간극수가 빠져나갈 때 흔히 발생하기도 한다. 수치해석의 특성 상, 본 연구는 사면의 안정성에 초점이 맞춰져 있기 때문에 균열과 변형에 관한 사항은 무시한다.

지반 내의 간극수압은 지속적으로 소산되기 때문에 사면의 안전율은 초기 상태에서 10-day 경과되는 시점

까지 계산하여 안전율 변화를 확인하였다.

10-day 경과되는 시간에 따른 상류사면의 안전율 변화는 Fig. 13에서처럼 나타낼 수 있다. 초기수위에 갓았던 안전율은 10-day 경과 후에 회복되었으며, 수위급강하 되었던 5시간에는 제일 위험한 사면의 안전율을 보여주고 있다. 가장 낮은 안전율의 이유는 지반 내에 가장 높은 간극수압을 갖고 있던 시기이었으며, 지반의 유효응력이 크게 감소되었던 조건이었음을 알 수 있었다.

국내에서 댐, 제방 등 저수지와 같은 지반구조물들은 비상시 단기간 수위저하를 통한 운영관리가 필요하다. 이러한 조치를 취할 경우 비상방류시설을 설치하여 수위급강하 조건에 대한 대비를 해야 하며 지반 구조물의 안정성을 여러 가지 방향으로 충분한 사전조사가 필요하다. 비상방류시설 조건하에서 유입량 조건별 지반구조물 수위배제기간 산정에도 안전율의 차이를 확인하고 다양한 각도에서 구조물의 안정성에 대한 방향을 제시할 필요가 있다.

Fig. 13은 총 10일 동안 수위급강하에 의한 상류사면의 안정성을 비교한 결과이다. 안전율 변화에서 알 수

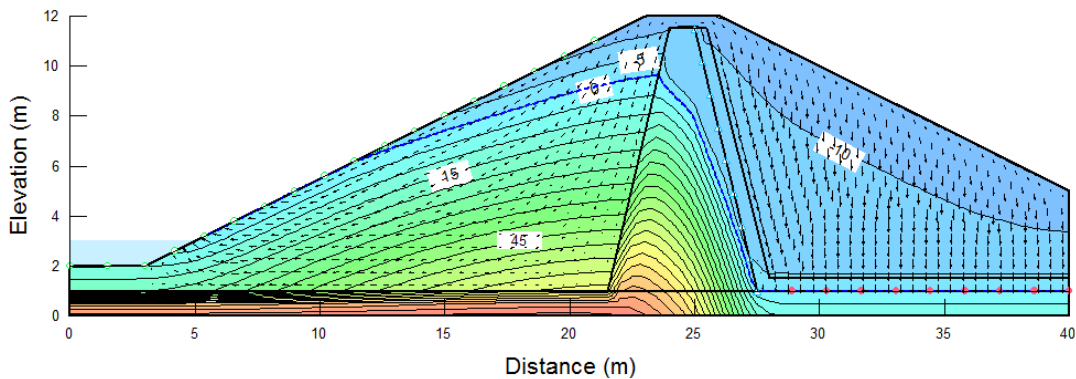


Fig. 9. Drawdown pore-water pressures of an embankment after 5-hours

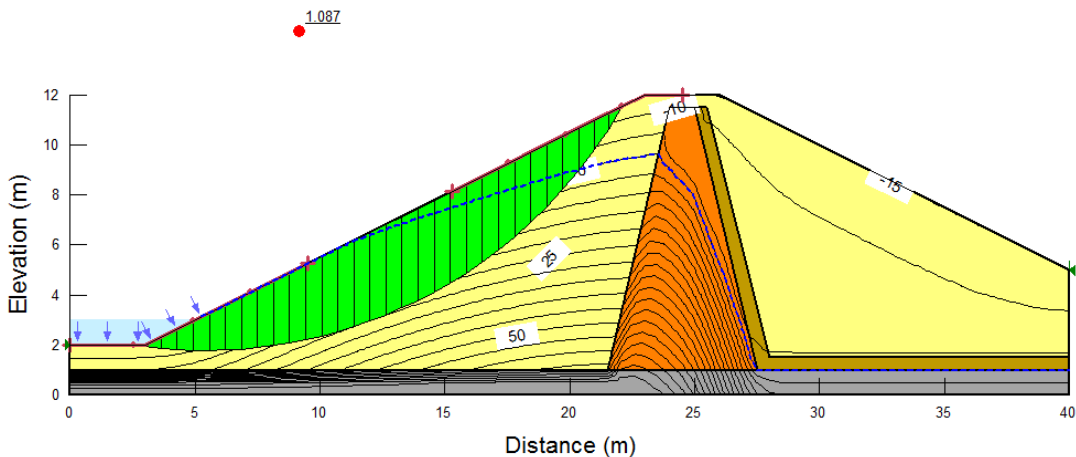


Fig. 10. The stability of an embankment with rapid drawdown after 5-hours ($F_s=1.087$)

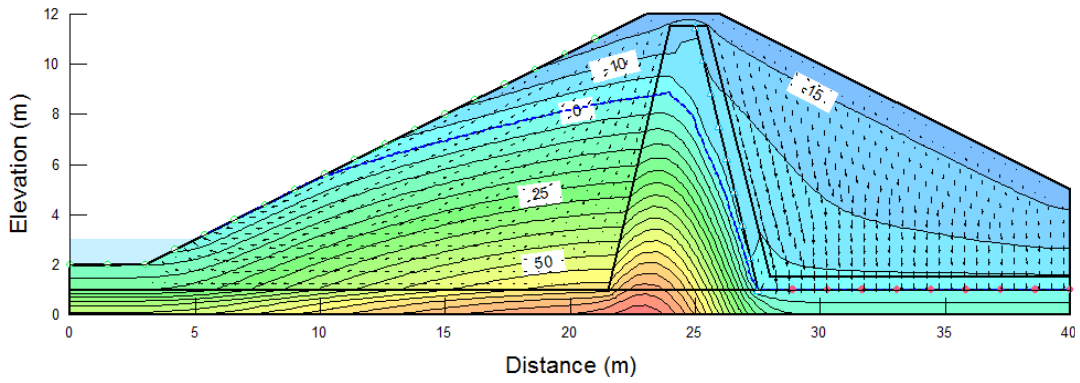


Fig. 11. Drawdown pore-water pressures of an embankment after 1-day

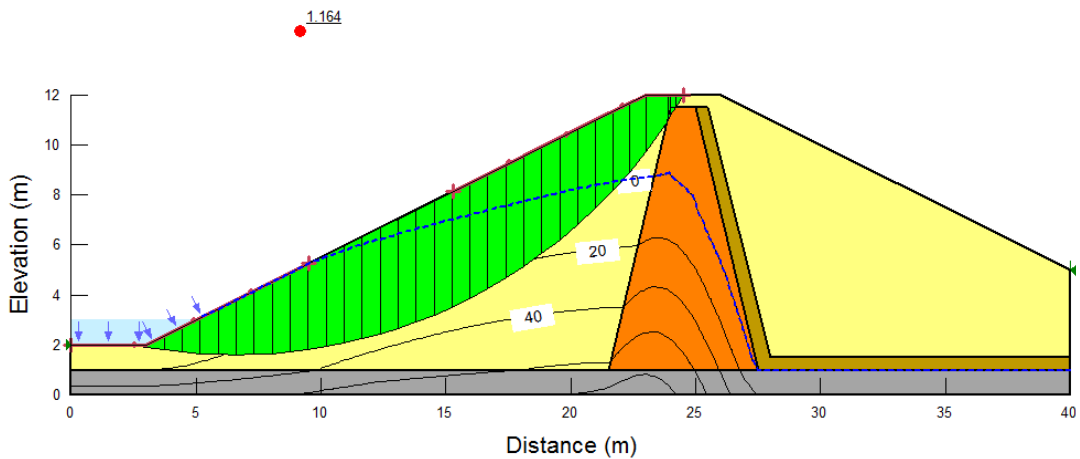


Fig. 12. The stability of an embankment with rapid drawdown after 1-day ($F_s=1.164$)

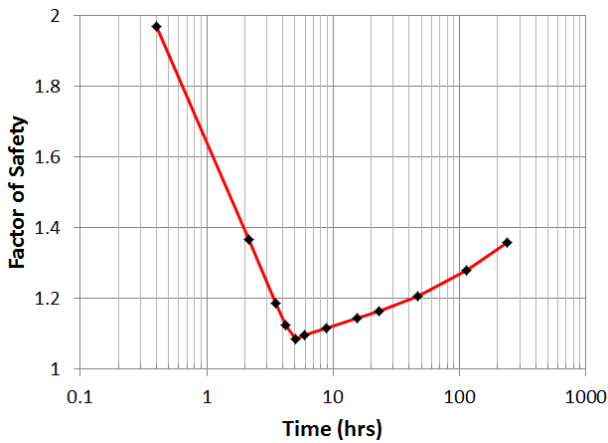


Fig. 13. Variation of safety factor in an embankment during rapid drawdown

있듯이 5시간에 수위급강하(drawdown)가 되자마자 최소 안전율 1.087을 보여주고 있으며 높은 수위의 압력이 작아지는 급강하 전에는 최고 안전율인 1.969에서 점차적으로 감소하고 있고, 간극수압의 소산이 진행되고 있는 급강하 후에 사면 안전율은 1.36까지 증가하고 있다.

3.2 흙 댐의 월류강우에 대한 안정성 검토

수문학적 댐 위험도 분석의 경우 일반적으로 확률강우량모의, 강우-유출 분석(확률홍수량), 댐 운영모의로 이루어진다. 분석 대상 유역 내 강우관측소를 대상으로 확률강우량 추정하고 프로그램을 통해 댐 제방고를 월류하는 사상을 계산하면 확률적으로 구조물의 높은 위험성을 확인할 수 있다. 이에 대한 안정성을 수위급강하(drawdown)시와 비교하여 분석하고자 한다.

Fig. 6과 같이 댐에 대한 지형구조와 재료에 대한 물리적·역학적 특성을 같다고 가정하고 월류에 대한 댐의 안정성을 수치해석을 통하여 예측하였다. 댐의 비탈면은 수위에 대한 수압이 제거되었을 때 가장 불안정한 조건으로 분석되고 있지만, 월류에 대한 가정은 지반구조물에 강우가 지속적으로 이루어지기 때문에 하류사면 안정성에 초점을 맞춰야 한다. 만수위부터 월류상태까지의 지속적인 강우와 침윤선의 상승으로 하류사면에 습윤대가 깊어지고 넓어진다. 강우로 침투하는 물의

흐름은 빨라지기 때문에 불포화 투수계수 역시 빠른 시간 안에 포화투수계수로 접근하게 된다. 수문학적으로 변동성 있는 초기수위(만수위)에서 월류가 되기까지는 집중호우나 극우강우가 발생한 경우에 확률적으로 가능한 월류조건이다. 따라서 월류에 따른 시간경과는 하류사면이 충분히 포화되기 위한 시간과 강우강도를 갖기 때문에 하류사면의 초기조건으로 포화된 지반으로 가정하였다. 비탈면의 경사는 상류사면과 마찬가지로 1:2(V:H) 기울기를 갖으며, 지속적인 극우강우보다는 일반적인 강우강도인 20mm/hr($\approx 5.56 \times 10^{-6}$ mm/sec)를 적용하였다.

Fig. 14에서는 댐 월류가 시작할 때 지반 내에 분포하고 있는 간극수압을 나타내고 있으며, Fig. 15는 월류 초기상태에서 하류사면에서 계산된 사면의 안전율을

보여주고 있다. 월류가 시작되는 초기상태는 지속적인 많은 강우강도가 유지되고 있으며, 불포화 지반조건에서 포화조건으로 바뀌었기 때문에 5kPa 점착력과 30° 내부마찰각의 강도정수를 갖고 있더라도 사면 파괴가 발생할 수 있는 0.932 안전율을 보인다. 댐의 월류가 진행되면서 포화되었던 하류사면도 점토 코어 부분의 배수층 작용으로 간극수압이 감소하게 된다. 간극수압의 감소는 지반의 유효응력의 증가로 발생하기 때문에 초기상태보다 사면의 안전율을 다소 증가하게 된다.

Fig. 16은 댐 월류가 10일 경과된 후 지반 내의 간극수압 분포를 나타내고 있으며 Fig. 17은 10일 경과 후 하류사면의 사면안전율을 계산한 결과이다. 1.036으로 안전율이 약간 증가하였지만 여전히 보강이 필요한 사면 조건을 보여주고 있다. 비탈면의 안정성을 관찰하기 위해

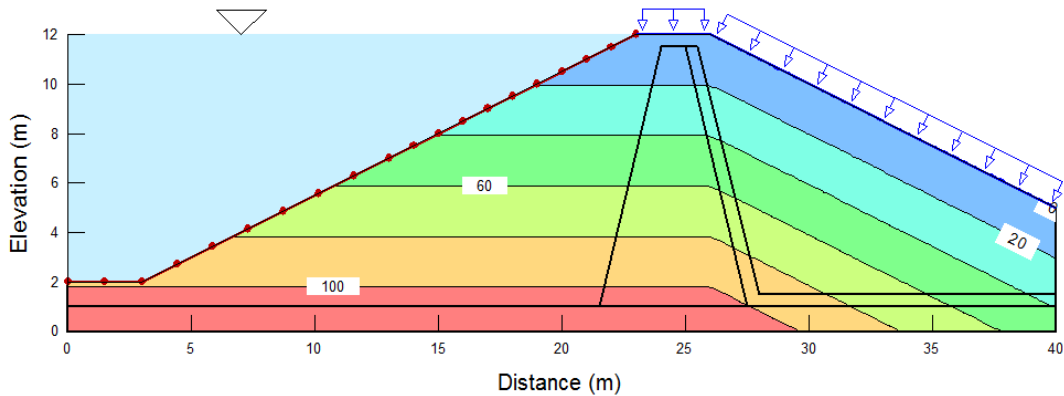


Fig. 14. Pore-water pressure of an embankment at initial condition after overtopping

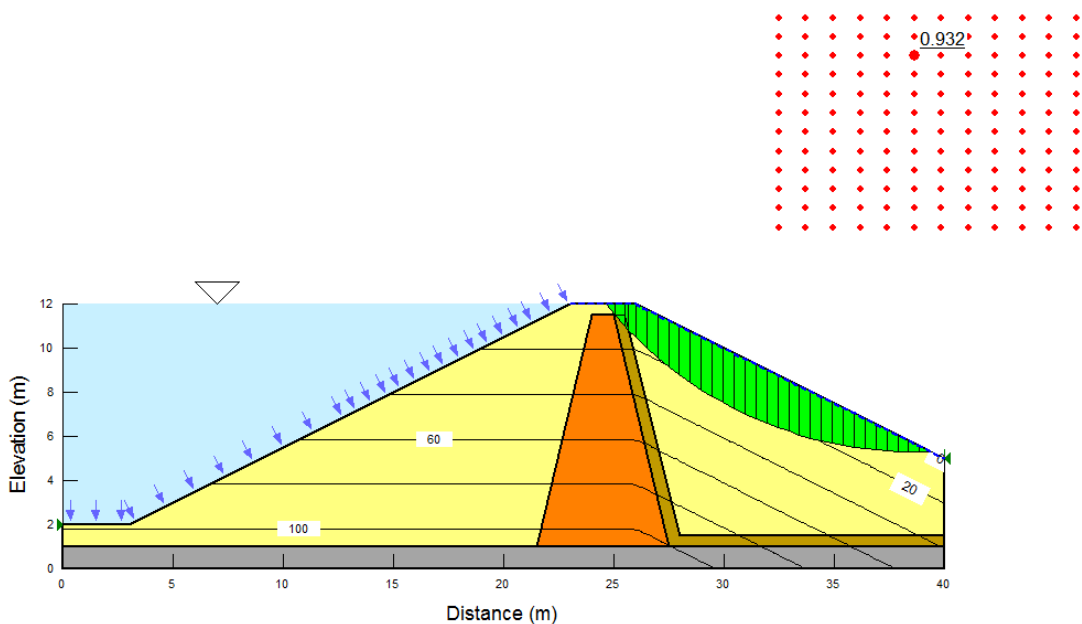


Fig. 15. The stability of an embankment at initial condition after overtopping ($F_s=0.932$)

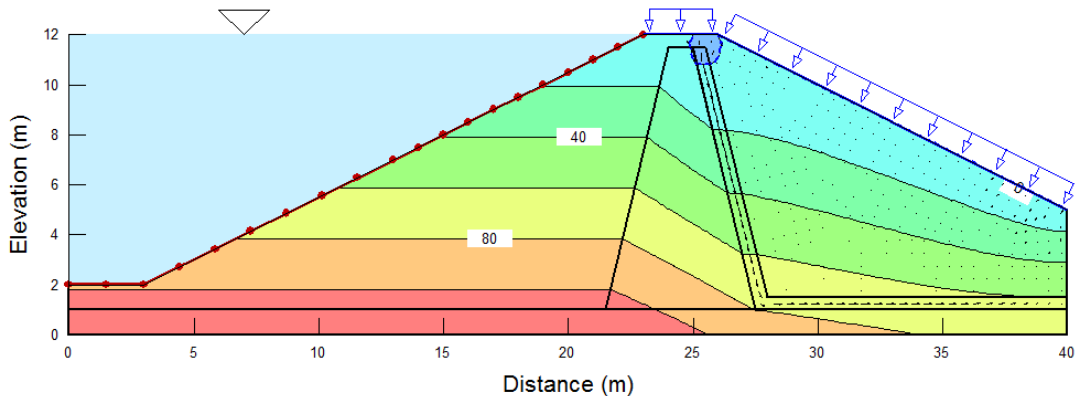


Fig. 16. Pore-water pressure of an embankment over 10-day after overtopping

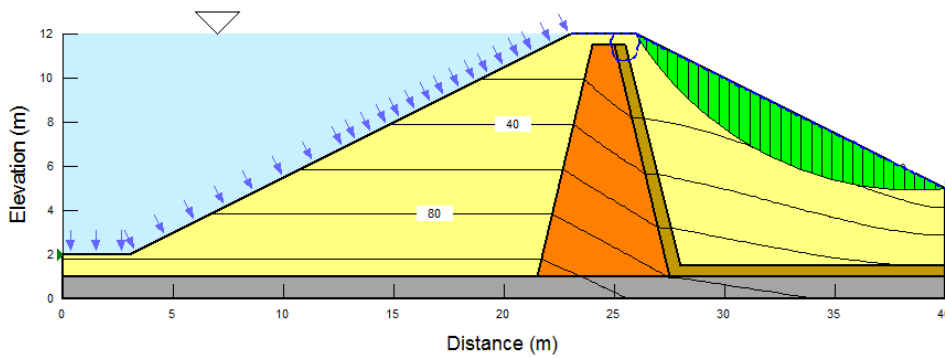
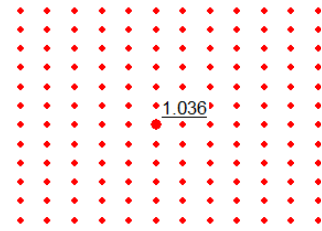


Fig. 17. The stability of an embankment over 10-day after overtopping ($F_s=1.036$)

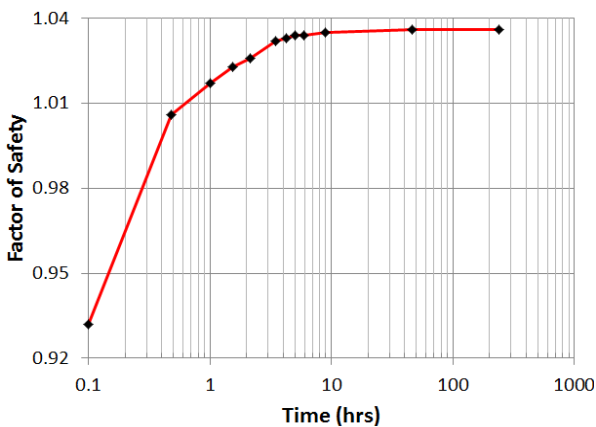


Fig. 18. Variation of safety factor during overtopping of a dam

댐 월류가 시작되고 10일이 경과되는 과정 중에 변화되는 안전율을 Fig. 18에서 알 수 있다. 댐의 안정성은 월류되는 초기에 가장 불안정하며 댐 중앙에 설치된 코아 배

수시설에 의해 지반 내의 간극수압이 약간 감소하면서 점차적으로 안전율이 증가하는 경향을 보여주고 있다.

4. 결론

본 연구에서는 댐 위험도 분석시 댐 운영 수위(상시 만수위, 홍수기 제한수위, 저수위 등)와 유입되는 유량에 따라 산정된 댐 고정수위 보다는 댐 위험성 평가를 위해서 월류에 대한 평가가 필요하다. 댐 제방고를 월류하는 강우사상을 확률값으로 제시할 때, 발생하는 지반 구조물의 불안정성을 수치해석으로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 수문학적 댐 안정성 평가 결과 기존 홍수기 제한수위로 가정한 댐 위험도 해석 연구와 비교하면 Copula

합수를 활용한 수위 변동성을 고려하였을 때, 월류 확률이 높았으며 이는 기후 변화 영향을 받는 댐 현상을 보다 효과적으로 고려할 수 있다고 판단된다.

- (2) 댐과 제방 그리고 저수지와 같은 지반구조물들의 안정성은 일반적으로 수위급강하(drawdown)시 상류사면(upstream) 비탈면이 가장 위험하지만, 월류 가능성을 확인한 확률강우에 의한 수치해석 예측결과는 하류사면(downstream) 비탈면의 파괴위험성이 더 높게 평가되었다. 이는 월류가 발생하는 초기에 제방 상단부까지 지반이 포화되어 수위가 없는 하류사면이 안전성에 더욱 취약한 것으로 판단된다.
- (3) 수문학적인 접근으로 댐 또는 제방과 같은 지반구조물의 안정성을 예측할 때, 월류에 대한 위험성을 추가적으로 고려해야하며, 기후변화로 인해 극우강우가 빈번히 발생하는 시기에는 하류사면의 1차적인 피해가 전체 지반구조물의 위험성에 더욱 영향을 끼칠 수 있다고 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(NRF-2013R1A1A2062218)이며, 국토교통부 국토교통기술지역특성화사업 연구개발사업의 연구비지원(14RDRP-B079706-01)에 감사드립니다.

참고문헌 (References)

1. Babb, A.O. and Mermel, T.W. (1968), Catalog of Dam Disasters, Failures and Accidents, PB179243; Washington, DC (Bureau of Reclamation).
2. Biswas, A.K. and Chatterjee, S. (1971), "Dam Disasters - an Assessment", *Eng. J.* (Canada), Vol.54, No.3, pp.3-8.
3. Dekay, M.L. and McClelland, G. (1993), Predicting loss of life in cases of dam failure and flash flood, *Risk Analysis*, Vol.13, No.2.
4. GeoStudio (2012), version 8.0.10, *Manual for SEEP/W and SLOPE/W modeling*, GEO-SLOPE International, Ltd., Calgary, Alberta, Canada.
5. Gruner, E. (1967), The Mechanism of Dam Failure; in 9th Congress of the International Commission on Large Dams, Istanbul, Turkey, Question, No.34, R.12, pp.197-206.
6. Hsu, Y.C., Tung, Y.K. and Kuo, J.T. (2011), Evaluation of dam overtopping probability induced by flood and wind, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Vol.25, No.1, pp. 35-49.
7. Kwon, H.H. and Moon, Y.I. (2006), Improvement of Overtopping Risk Evaluations Using Probabilistic Concepts for Existing Dams, *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, Springer-Verlag, Vol. 20, No.4, pp.223-237.
8. Kwon, H.H., Moon, Y.I., and Khalil, A.F. (2007), Nonparametric monte carlo simulation for flood frequency curve derivation: An application to a KOREAN watershed, *Journal of the AMERICAN water resources association*, Vol.43 No.5, pp.1316-1328.
9. Lou, W.C. (1981), *Mathematical Modeling of Earth Dam Breaches*, Unpublished Ph.D. Dissertation, Colorado State University, Fort Collins, CO.
10. Middlebrooks, T.A. (1953), Earth-Dam Practice in the United States. *Trans. Amer. Soc. Civil Eng.*, No.118, pp.679-722.
11. Na, B.-K., Kim, J.-Y., Lim, J.-Y., and Kwon, H.-H. (2014), "Improvement of Hydrologic Dam Risk Analysis Model Considering Uncertainty of Hydrologic Analysis Process", *Journal of Korea water resources association*, Vol.47, No.10, pp.853-865.
12. Nelsen, R.B. (2006): *An Introduction to Copula*, Springer, New York, pp.109-155.
13. Prendergast, J.D. (1979), *Probabilistic Concept for Gravity Dam Analysis*, Special Rep, M-265, Construction Engineering Research Lab, U.S. Army Corps of Engineers, Champaign.
14. River Design Standard (2009), Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2009-732.
15. Sklar, M. (1959), "Fonctions de Repartition a n Dimensions et Leurs Marges", *Publications de Institut de Statistique Universite de Paris*, Vol.8, pp.229-231.
16. Takase, K. (1967), Statistic Study on Failure, Damage and Deterioration of Earth Dams in Japan, *Proc. 9th Congress, Int. Commission on Large Dams*, Istanbul, Turkey, Question, No.34, R.1, pp.1-19.
17. van Genuchten (1980), "A Closed Form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils", *Soil Science Society of America Journal*, Vol.44, pp.892-898.
18. USCOLD (1975): *Lessons from Large Dams*, Report of the Committee on Failures and Accidents to Large Dams of USCOLD, published by American Society of Civil Engineers, New York.
19. www.icold-cigb.org, International Commission on Large Dams, Paris, France.
20. Yoo, C.S. and Kim, O.M. (1998), "A Study on Design of Geosynthetically Reinforced Slopes", *Proceeding of Korean Society of Civil Engineering*, pp.351-354.

Received : May 28th, 2015

Revised : June 26th, 2015

Accepted : August 4th, 2015