

내진보강 단면형상에 따른 국내 저수지 제방의 안전율에 대한 검토

임성훈¹ · 김대현^{2*}

¹조선대학교 토목공학과 박사과정, ²조선대학교 토목공학과 교수

A Study on the Safety Ratio of Reservoir Embankment by Seismic Reinforcement Section Shape

Seonghun Lim¹ · Daehyeon Kim^{2*}

¹Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chosun University

²Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

Agricultural reservoirs seek human convenience by supplying agricultural water and providing flood damage effects and rest areas at the same time, but preventing them from aging reservoirs and earthquakes is important. The safety of levees is influenced by field material properties such as soil parameter values of the granular materials that make up the levees, but since precision safety diagnosis or general literature values are diverted, the final safety factors are limited to material properties alone. Since safety factors are determined by physical characteristic values and embankment shapes and have a significant impact on safety factors, accurate contemplation is required when examining reinforced cross sections. Therefore, this study analyzed the case of reasonable and economical reinforcement intersections when designing ‘○○reservoir’ in Goheung-geun, Jeollanam-do using the GEP-SLOPE program to enable rational economic design of reinforcement intersections through repeated reviews. As a result of reducing and analyzing the first, second, and third seismic reinforcement of the levees, it was confirmed that the safety ratio was secured even with a significantly smaller amount of reinforcement than the first, second, and lower slopes by obtaining design standards of 1.20. In addition, when determining all seismic reinforcement cross-sectional shapes, it was confirmed that the shape that reinforces only the lower side rather than the upper side of the slope and the entire slope was economical with minimized cross-sectional reinforcement.

Keywords: safety rate, reservoir, seismic reinforcement, slope, numerical analysis

OPEN ACCESS

*Corresponding author: Daehyeon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 23 August, 2021

Accepted: 31 August, 2021

© 2021 The Korean Society of Engineering Geology



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록

농업용저수지는 농업용수를 공급함과 동시에 수해효과 및 휴식터를 제공함으로써 인간의 편의성을 추구하지만 노후 저수지 및 지진으로 인한 피해가 발생할 수 있으며 이에 따른 예방이 중요하다. 제방의 안전성은 제방을 구성하는 세분화된 재료의 토양 매개변수 값과 같은 현장재료 특성에 의해 영향을 받지만 정밀안전진단이나 일반 문헌값이 전용되기 때문에 최종제방의 안전인자를 물질적 특성만으로 판단하기에는 한계가 있다. 안전요인은 물리적 특성값과 제방 형태에 의의 결정되며 안전 요인에 상당한 영향을 미치기 때문에 보강된 횡단면을 검토할 때 정확한 사색이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 GEP-SLOPE

프로그램을 활용하여 전남 고흥군 ‘○○저수지’ 내진설계 시 합리적이고 경제적인 보강교차로 사례를 분석함으로써 반복적인 검토를 통해 보강교차로에 대한 합리적 경제적 설계가 가능하도록 분석하였다. 제방의 1, 2, 3차 내진보강을 감소하여 분석한 결과, 3차 보강단면에서도 상류, 하류사면 모두 설계기준 1.20 이상을 얻음으로써 1.2차에 비해 현저히 적은 보강물 보강물량으로도 안전을 확보가 되는 것을 확인하였다. 또한 제방의 내진보강 단면 형상을 결정할 때 사면의 상부측, 사면전체에 사석을 보강하는 것 보다 하부측에만 보강하는 형상이 단면보강을 최소화 시키며 경제적인 것을 확인하였다.

주요어: 안전율, 저수지, 내진보강, 사면, 수치해석

서론

연구의 배경 및 목적

농업용 저수지는 거대한 토목 구조물로서 홍수피해 절감효과와 농업용수 공급및휴식공간을 제공하는등 인류에게 이로운 역할을 하고 있다. 하지만 저수지 노후화나 지진동에 의한 붕괴가 발생하였을 경우 엄청난 재산, 인적 피해를 주는 것은 물론 높은 복구비용이 요구되므로 사전 예방이 중요하다.

2013년 4월 경주시에 위치한 신대 저수지가 붕괴되어 차량 13대가 침수되고 약 1.2 ha의 농경지가 매몰되는 등 많은 재산 피해가 발생하였다. 신대 저수지의 붕괴 이유는 정밀안전진단에서 D등급을 받은 노후화된 저수지임에도 보수보강을 사전에 실시하지 않았기 때문이다.

2016년 9월 12일 경상북도 경주시 남서쪽 8~9 km에서 두 차례 지진이 발생하였는데 이는 1978년 충북 속리산에서 규모 5.2, 충남 홍성에서 규모 5.0의 지진이 일어난 뒤 38년 만에 발생한 대형 지진이며 한반도에서는 36년 만에 일어난 대형 육상지진이었다. 이후 잦은 육상 지진이 발생 하였고 각종 시설물의 내진 보강이 중요시 되어가고 있는 실정이다. 만일, 신대 저수지 붕괴사고 발생 시 경주 지진과 같은 규모의 지진이 발생하였다면 그 피해는 더욱 컸으리라 생각한다.

이에 따라 지진발생시에 대비한 저수지 내진설계가 중요시 되어가고 있으며, 기존 노후화된 저수지의 보수 보강이 시급하다. 하지만 전국에 있는 정밀안전진단 D등급 기준 저수지를 모두 개보수를 시행하기에는 천문학적인 비용이 들 것임으로 비용적인 측면에서 경제적인 시공이 필요할 것이다.

제체의 붕괴 유형은 침식, 활동붕괴, 침투, 월류 등으로 구분할 수 있다. 저수지 제방 설계 시 다양한 가능성을 두고 검토하여 안정성을 확보하는데 최초 형성된 제체의 안정성은 안전율 산정 기준에 따라 토질 상태나 단면이 변하지 않는 한 변화하지 않기 때문에 초기 설계가 매우 중요하다(Noh et al., 2013).

제체의 안정성은 제체를 이루고 있는 성토재의 토질정수 값 등 현장 물성치에 따라 영향을 받지만 제체의 물성치 만으로는 최종 제체의 안전율을 결정하기에는 한계가 있다. 현장의 물성치 값과 제체의 형상에 따라 안전율이 결정된 후자인 제체의 형상이 안전율에 미치는 영향이 더욱 중요하기 때문에 보강단면 검토 시 정확한 고찰이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 저수지 사면의 내진 보강 설계 시 합리적이고 경제적인 보강단면에 관한 사례를 연구하기 위해 전남 고흥군 “○○저수지”에 대하여사면안정해석 프로그램인 GEO-SLOPE를 이용하여 한계평형해석을 수행하였다. 반복적 수치해석을 통하여 사석, 성토재의 물량, 단면의 형상에 따른 허용안전율의 결괏값을 도출하고자 하였다.

선행연구 분석

저수지 제방의 안정성 평가는 보강공법의 적용 여부, 사면의 안정성 및 경계성, 지형조건, 토질 및 암반의 공학적 특성, 지층의 구성 상태 등을 검토하여 결정되므로 제방의 안정성을 장기적으로 유지하기 위해서는 체계적이고 합리적인 분석

과정을 거쳐야 한다. 최근 국내에 지진에 대한 위험도가 높아지는 가운데 저수지 제방에 대한 지진에 대한 보강 기준이 강화되는 실정에 따라 사면 안정성을 평가 및 검토하는 과정이 중요시 되고 있다.

절성토 사면의 안정해석에 널리 이용되고 있는 한계평형방법은 사면안정 해석에 많이 사용되고 있고 이 방법의 신뢰성은 지금까지 축적된 경험을 통하여 알려져 있다.

근본적으로 사면안정해석은 시행착오법에 의하므로 많은 노력과 시간이 소용되었고, 이를 타개하기 위한 방편으로 Taylor(1937)가 안정해석도표를 발표한 이래 한계평형방법을 이용한 사면안정 해석 방법 중 가장 널리 이용되고 있는 Bishop(1955)방법, Spencer(1967), Fellenius(1927)방법, Morgenstern and Price(1965)법, 일반한계평형 등 방법들이 많이 사용되고 있다.

내진설계를 하기 시작한 것은 100년이 채 되지도 않지만 그 시초는 Mononobe(1925)의 지진계수(진도법)을 도입한 것이 댐의 내진 설계부터 시작하였다.

국제적인 댐 내진 해석에 대한 연구동향은 2012년 국제 지진공학 컨퍼런스에서 소개되었는데 필립의 수치해석을 이용한 내진평가에 대해서 내진해석 기법이 정교화 되고 고도화 되어 가고 있음을 알려주었다. 그러나 지속적인 댐 내진 안정성 연구개발이 필요한 것은 최근 주요 지진들이 과거와 다르게 많은 면에서 댐에 영향을 미치는 복합적인 위험을 보여주고 있기 때문이다.

일본이나 중국에 비해 지진에 의한 댐 피해사례의 경험이 없는 국내에서는 현재로서는 지진 안정성을 검토하는 것이 수치 해석적 모델링이 유일한 대안이고 해석과정의 복잡성과 구성모델의 다양성, 불확실한 물성치 입력 등으로 해석결과에 대한 안정성 평가가 모호한 실정이므로 댐의 내진보강에 대한 연구가 이루어지고 있다. 또한 연구와 아울러 국내의 댐 내진 설계기준은 1979년 댐에 대한 시설 기준이 제정되어 다목적댐 중심으로 내진설계 개념이 반영되었으며 2001년 댐 설계기준이 제정되고, 개정작업을 거쳐 2011년 댐 설계 기준에 이르렀다(Jo and Kim, 2018).

저수지 내진보강 대책공법

저수지 보강현황

국내 저수지는 토사면(식생), 사석, 돌붙임, 돌쌓기, 콘크리트 라이닝 등으로 보강되어 있으며 이중 토사면이 전체의 57.6%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 저수지의 내제와 외제에 사석 쌓기와 성토를 통한 보강을 시행하고자 한다. 사석은 깎돌 중에서 유수에 견딜 수 있는 중량을 가지고 지반이나 사면의 보강을 위해 시공하는 대형 사석을 뜻한다. 사석은

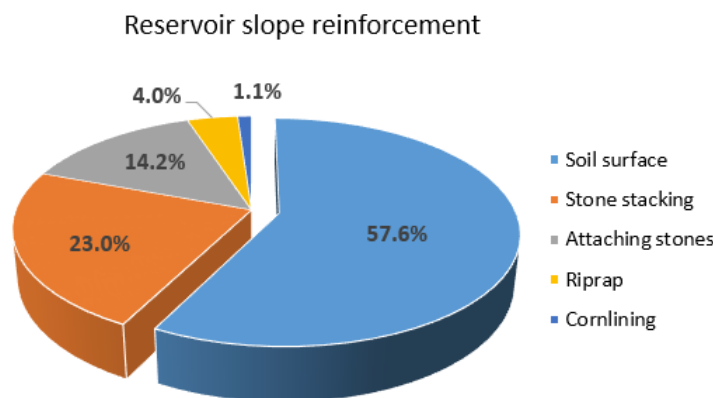


Fig. 1. Composition ratio of reservoir slope reinforcement method (Joo, 2011).

크기가 증가함에 따라 세굴 방호에 적용되는 유속의 범위도 증가한다. 그러므로 특정한 범위의 흐름조건에서 요구되는 세굴 방호 능력을 충분히 만족시킬 만한 사석재료의 크기를 산정하는 것이 중요하다(Lauchlan and Melville, 2001).

또한, 포설두께, 사석재료의 입경 및 하상 재료와의 비, 접근유속 등이 사석 세굴보호공의 여러 형태의 이탈 및 붕괴에 있어서 직접적인 영향을 미친다. 특히, 사석의 이탈 및 붕괴 형태가 포설두께에 따라 현저하게 달라질 수 있다(Lee et al., 2007). Fig. 1은 저수지 사면 보강공법의 구성비이다.

국내 저수지 내진설계기준

필댐 설계시 적용하는 설계진도는 지진구역계수에 내진 등급별 설계지진의 평균 재현 재현주기에 따른 위험도 계수, 지반계수 및 댐 형식별 할증계수를 곱한 값에 중력가속도를 곱하여 구한다. 그러나 위의 방법으로 산출된 설계진도가 0.2 g 이상이어서 우리나라보다 지진규모나 발생빈도가 훨씬 높은 나라에서 적용하는 진도보다 과다하다고 판단되는 경우 설계진도를 0.2 g 이하로 조정할 수 있다(농업생산기반정비사업 계획설계기준(필댐편) 및 국토해양부 댐 설계기준).

Tables 1~3은 댐의 내진등급과 재현주기에 따른 위험도 계수를 나타낸 것이다.

Table 1. The risk factor according to the seismic rating of the dam and the recurrence period (MLTM, 2011)

Earthquake-resistant grade	Dam classification	Reproduction cycle	Risk coefficient
Earthquake-resistant Special grade dam	Dam designated by the ordering company as a special dam in terms of social, security and economy	1,000 year	1.4
	Dams with a height of 45 m or more and a total storage capacity of 50 million m ³ or more		
Earthquake-resistant I grade dam	All dams other than earthquake-resistant special grade dams	500 year	1.0

Table 2. Seismic zone classification and zone coefficient (MPSS, 2017)

Earthquake zone	An administrative district		Zone coefficient
I Zone	City	Seoul, Incheon, Daejeon, Busan, Daegu, Ulsan, Gwangju	0.11
	-do	Gyeonggi-do, Gangwon-do, Chungcheongbuk-do, Chungcheongnam-do, Gyeongsangbuk-do, Jeollabuk-do, Jeollanam-do	
II Zone	-do	Northern Gangwon Province (Hongcheon, Cheorwon, Hwacheon, Hoengseong, Pyeongchang, Yanggu, Inje, Goseong, Yangyang, Chunchun, Sokcho), Jeju Island	0.07

Table 3. Ground coefficient according to basic ground classification (MOLIT, 2011)

Ground type	Average ground characteristics for 30 m below the surface			Ground coefficient
	Shear wave velocity (m/s)	Standard penetration test (N value)	Non-drain shear strength (kPa)	
Hard rock ground, normal rock ground	More than 460	-	-	1.0
Yeomam ground, a very dense soil	360~760	>50	>100	1.2
Hard soil and sand	180~360	15~50	50~100	1.5

- 1) 댐형식에 따른 할증계수
 - 필댐의 경우 설계진도에 20% 할증, 아치댐의 경우 설계진도의 2배를 적용
- 2) 설계지진계수의 산정
 - 구역계수 × 위험도계수 × 지반계수 × 할증계수
- 3) 제체 작용 수직지진계수(K_H) 결정
 - 제체에 작용하는 평균수평지진계수(K_V)의 50% 적용

지반정수 산정방법

토사 및 암반의 지반정수는 실내시험 및 현장시험으로부터 구하는 것을 원칙으로 하나 현지 상황 등에 의해 시험을 할 수 없는 경우나 개략적인 지반 정수의 경우에는 다음 Tables 4~5를 참고하여 추정할 수 있다.

Table 4. Approximate soil quality of earthwork materials - stacking soil (Kang, 2010)

Sand type	State of material	Unit weight (t/m ²)	Internal friction angle (ϕ)	Adhesiveness (t/m ²)	U.S.C.S	
Gravel and sand mixed with gravel	Compaction	2.0	40	0	GW, GP	
Sand	Compaction	Good particle size	2.0	35	0	SW, SP
		Bad grain	1.6	30	0	
Sandy soil	Compaction	1.9	25	Less than 3	SM, SC	
Clay	Compaction	1.8	15	Less than 5	ML, CL, MH, CH	

Table 5. Rough soil constant of earthwork materials - natural ground (Kang, 2010)

Sand type	Unit weight (t/m ²)	Internal friction angle (ϕ)	Adhesiveness (t/m ²)	U.S.C.S
Gravel	2.0	40	0	GW, GP
	1.8	35	0	
Sand mixed with gravel	2.1	40	0	GW, GP
	1.9	35	0	
Sand	2.0	35	0	SW, SP
	1.8	30	0	
Sandy soil	1.9	30	Less than 3	SM, SC
	1.7	25	0	
Clay soil	1.8	25	Less than 5	ML, CL
	1.7	20	Less than 3	
	1.7	20	Less than 1.5	
Clay and silt	1.7	20	Less than 5	CH, MH, ML
	1.6	15	Less than 3	
	1.4	10	Less than 1.5	

저수지 설계시 허용안전율

안전율(FS) 여러 가지 불확실성을 보상 하는 계수이며 주어진 활동면에 대하여 전단강도(S)를 현 제방에 작용하는 전단응력(τ)으로 나눈 값($FS = \frac{S}{\tau}$)이다. 이론적으로는 안전율 $FS > 1.0$ 일 경우에 안전한 것으로 해석할 수 있으나 설계시 제방의 불확실성으로 인한 여건을 감안하여 허용 안전율을 설계에 적용한다. 저수지 제방 설계에 대한 기준 안전율은 한국농어촌공사 농업생산기반계획설계기준에서 만수위시 지진시 1.2, 일부저수위시 지진시에는 1.15를 적용하고 있다.

필댐 사면의 활동에 대한 안전율은 불확정한 요소가 포함되기 쉬운 경우 또는 재료시험이나 안정계산의 정밀도가 충분하지 않은 경우에 1.5를 표준으로 하고 있고 충분한 경우라도 Table 6에서의 값 이상의 안전율을 적용하여야 한다.

안전율을 얼마로 하느냐 하는 것은 그 상태가 일어날 확률과 파괴된 경우의 위험도에 따라 정해지는 것이다. Table 6에서 구분란 1, 2의 안전율이 1.3으로 최대인 것은 어느 댐에서도 반드시 있을 수 있는 상태이기 때문이다. 이에 대해서는 구분 4, 5의 경우는 극히 드물게 발생하는 상태이고 특히 5의 경우는 파괴된 경우라도 물이 흘러 넘쳐 피해가 생길 염려가 없으므로 안전율을 작게 취해도 된다. 활동파괴를 고려하는 경우는 Table 7에 의거하여 실시하도록 한다(농업생산기반 계획 설계기준-필댐편).

Table 6. Fill dam safety factor (Design Criteria for Agricultural Production Base Plan - Pildam Edition)

Classification	Formulation conditions	Low water level	Earthquake	Safety factor	
				Upstream	Downstream
1	Immediately after completion	Ground state	×	1.3	1.3
2	Gap pressure max	Some reservoir	×	1.3	-
3		Nosedive	×	1.2	1.2
4	Normally	Full	○	1.2	1.2
5		Some reservoir	○	1.15	-

Table 7. When reviewing activity destruction (Design Criteria for Agricultural Production Base Plan - Pildam Edition)

Classification	Water storage level (hydrostatic pressure)	State of penetration (pore pressure)	Design progress	Application of circular active surface division method	
				Stress display	Calculation slope
1	Design flood level	Penetration is normal on the design flood	-	Effective stress	Up and downstream side
2	Surcharge water level	Penetration at the surcharge water level is normal	50 %	Effective stress	Up and downstream side
3	Permanent water level	Penetration at permanent water level is normal	100 %	Effective stress	Up and downstream side
4	Medium water level	Penetration at permanent water level is normal	100 %	Effective stress	Up and downstream side
5	Empty case (right after completion)	Clearance pressure remains during the festival	50 %	Pre-stress effective stress	Up and downstream side
6(a)	Water level drop	Lowest water level after a fall	100 %	Effective stress	Upstream side
6(b)	Water level drop		50 %	Effective stress	

현황조사 및 데이터분석

제체의 공학적인 토성을 분석하고 침투류 및 사면안정 해석을 실시하여 제체의 안전성 여부를 검토하기 위하여 대표적인 단면을 선정, 성토재 및 점토재에 대한 불교란 시료를 채취 후 채취된 불교란 시료를 이용하여 실내 토질시험을 실시하였다.

대상지반 시료의 물리·역학적 특성

본 연구에서는 대상지반 시료에 대하여 실내시험을 통한 물리·역학적 특성을 확인하였다. Tables 8, 9는 물리적 실험인 입도분포, 액·소성한계, 비중시험을 수행하여 통일분류법에 의한 흙의 특성을 분류하였다. 역학적 특성은 자연상태인 시료에 대해 삼축압축시험을 진행하여 흙의 전단강도인 점착력과 내부마찰각을 확인하였고, 투수시험을 추가로 수행하였다.

Table 8. Indoor soil test result table by drilling location (physical properties)

Sample name	Depth (m)	Particle size distribution (%)				Atterberg limit (%)			Specific gravity (Gs)	U.S.C.S
		Clay	Silt	Sand	Gravel	Liquid limit	Plastic limit	Plasticity index		
BH-1	0.3~1.1	15.0	32.2	52.0	0.8	28.4	15.2	13.2	2.635	SC
BH-1	18.0~18.8	15.0	23.6	51.1	10.3	27.4	16.4	11.0	2.639	SC
BH-2	0.5~1.3	19.0	15.1	62.1	3.7	30.2	19.7	10.5	2.617	SC
BH-2	13.0~13.8	12.5	23.7	60.4	3.4	29.9	18.7	11.3	2.626	SC

Table 9. Table of results of indoor soil test by drilling location (mechanical characteristics)

Sample name	Depth (m)	Natural state		Triaxial compression test (\overline{CU})		Pitcher coefficient (cm/s)
		Water ratio (%)	Unit weight (t/m^3)	Adhesiveness (t/m^2)	Internal friction angle (ϕ)	
BH-1	0.3~1.1	21.7	2.039	0.03	33	8.29×10^{-7}
BH-1	18.0~18.8	22.4	2.029	0.02	31	8.45×10^{-7}
BH-2	0.5~1.3	22.3	2.021	0.04	29	9.16×10^{-7}
BH-2	13.0~13.8	21.2	2.044	0.03	30	5.23×10^{-7}

대상지반 시료의 물리·역학적 특성

대상저수지의 지진계수는 국내 저수지 내진설계기준의 따라 산정하였다. 본 연구의 대상저수지는 내진 1등급 댐에 속하므로 재현주기 500년, 위험도 계수 1.0을 적용하였고, 행정구역상 전라남도 고흥군에 해당하여 I구역의 구역계수 0.11을 사용하였다. 또한 지반은 현장조사에 의해서 지반종류를 경암지반, 보통암지반으로 보고 지반계수 1.0을 적용하여 지진계수를 산정하였다.

아래 식은 본 사례저수지의 지진계수를 산정하는 식을 나타내었고, Table 10은 지진계수 산정값을 표로 나타내었다.

1) 설계지진계수의 산정

$$\begin{aligned}
 & \text{- 구역계수} \times \text{위험도계수} \times \text{지반계수} \times \text{할증계수} \\
 & = 0.11 \times 1.0 \times 1.0 \times 1.2 \\
 & = 0.132
 \end{aligned}$$

- 2) 제체 작용 수직지진계수(K_V) 결정
 - 제체에 작용하는 평균수평지진계수(K_H)의 50% 적용
 - = $0.132 \times 50\%$
 - = 0.066

Table 10. Table of results of indoor soil test by drilling location (mechanical characteristics)

Area coefficient	Risk coefficient	Ground coefficient	Surcharge coefficient	Earthquake coefficient	
				Horizontal (Kh)	Verticality (Kv)
0.11	1.0	1.0	1.2	0.132	0.066

사면안정성 해석결과

사레저수지 내진 보강 후 사면안정 분석은 GEO-SLOPE을 이용하여 Spencer법, Bishop법, Morgenstern-Price법 총 3가지 해석을 실시하였다. 해석 단면은 사레저수지의 제체 표준단면의 상류사면(만수위 EL.64.36 m, 일부수위 EL.53.60 m)과 하류사면(만수위 EL.64.36 m)에 대한 조건을 적용하여 사면안정 해석을 한 결과를 본 사레저수지 제방 내진 보강 전과 후를 비교 분석하였다. 제방 보강단면 형상을 달리하여 반복 검토 하였고 아래의 내용은 검토 결과 중 안전율을 만족하는 경우를 선정하였다.

대상지반 시료의 물리·역학적 특성

고흥군 ○○저수지의 제방 제원은 다음 설명과 같다. 상류사면의 기울기는 1:2.3으로 사석면으로 형성되어 있고, 하류사면의 기울기는 상단부 1:1.8, 하단부 1:2.0으로서 떼 식재면으로 이루어져 있다. 제방의 높이는 24.8 m, 제방의 길이는 216.m, 제방 상단 폭은 5 m로 설치된 제방이다. Fig. 2와 같이 보강 전 제방의 표준단면도를 GEO-SLOPE 프로그램에 모델링 하였다.

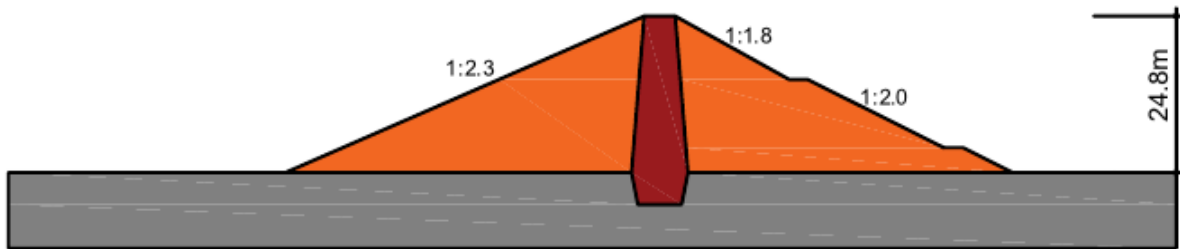


Fig. 2. Pre-reinforcement embankment modeling diagram.

본 사례 저수지의 지진계수는 앞절에 말한 내용 따라 수평(Kh) 지진계수 0.132와 수직(Kh) 지진계수 0.066을 적용하여 Bishop법, Mongenstern-Price법, Spencer법으로 사면안정성 검토를 실시하였다.

Fig. 3은 보강 전 제방의 만수위와 일부수위의 모델링도이고, Table 11은 보강전 제방의 사면안정분석 결과표이다.

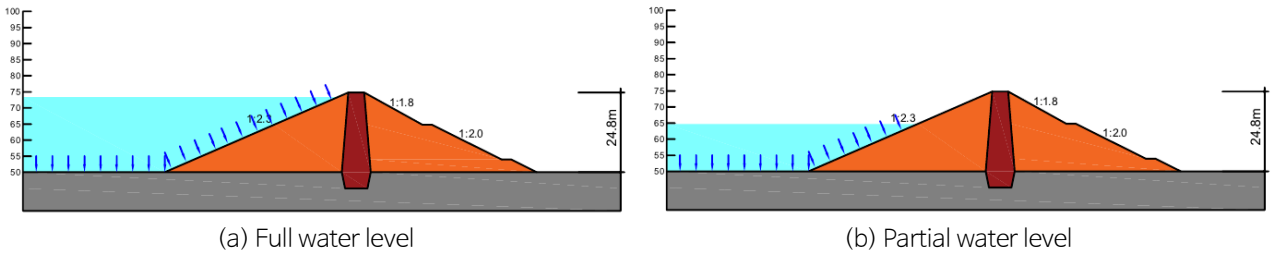


Fig. 3. Dike modelling diagram according to water level.

Table 11. Slope stability analysis result table before reinforcement

Classification		Spencer's method	Morgenstern-Price's method	Bishop's method
		Review results	Review results	Review results
Upscale pardon	Full water level	1.003	1.000	0.996
	Partial storage	1.007	1.005	0.999
Downstream amnesty	Full water level	0.997	0.997	0.994

1차 제방 내진보강 모델링

1차 제방 내진보강은 상류사면의 기울기를 1:2.3에서 1:3.2로 변경하고 사석 A = 257 m²를 보강하였다. 하류사면의 기울기는 상단부 1:1.8, 하단부 1:2.0에서 1:2.3으로 변경하고 사석 A = 118 m²를 보강하여 아래 Fig. 4와 같이 보강 전 제방의 표준단면도를 GEO-SLOPE 프로그램에 모델링 하였다.

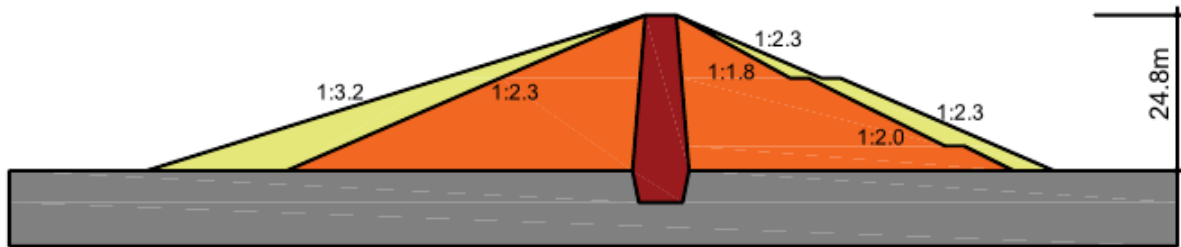


Fig. 4. Primary embankment modeling diagram.

Fig. 5는 보강 전 제방의 만수위와 일부수위의 모델링도이고, Table 12는 1차 제방의 사면안정분석 결과표이다.

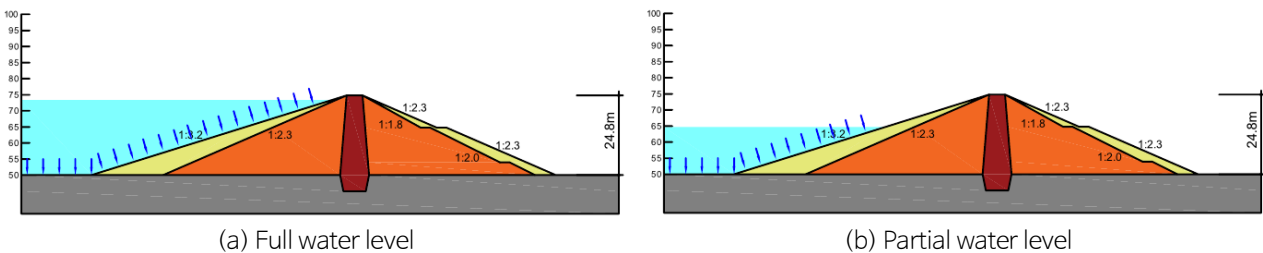


Fig. 5. Modelling diagram of the water level of the primary embankment according to the water level.

Table 12. Slope stability analysis result table of the 1st embankment

Classification		Spencer's method	Morgenstern-Price's method	Bishop's method
		Review results	Review results	Review results
Upscale pardon	Full water level	1.253	1.255	1.225
	Partial storage	1.245	1.247	1.219
Downstream amnesty	Full water level	1.230	1.227	1.221

2차 제방 내진보강 모델링

2차 제방 내진보강은 상류사면의 기울기를 1:2.3에서 1:2.0로 변경하고 사석 A = 163 m²를 보강하였다. 하류사면의 기울기는 상단부 1:1.8, 하단부 1:2.0에서 1:2.2로 변경하고 사석 A = 81 m²를 보강하여 아래 Fig. 6과 같이 보강 전 제방의 표준단면도를 GEO-SLOPE 프로그램에 모델링 하였다.

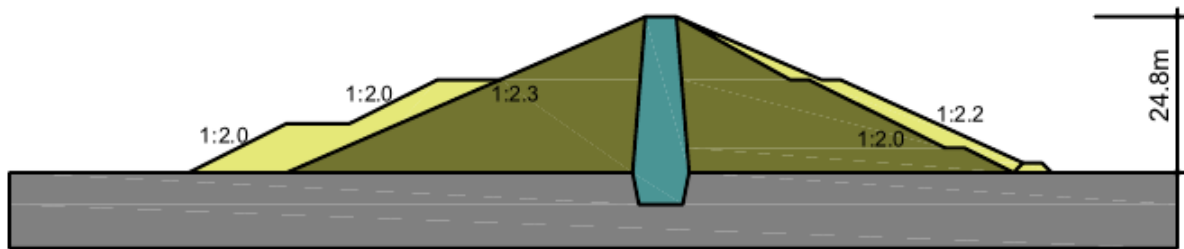


Fig. 6. Secondary embankment modeling diagram.

Fig. 7은 보강 전 제방의 만수위와 일부수위의 모델링도이고, Table 13은 2차 제방의 사면안정분석 결과표이다.

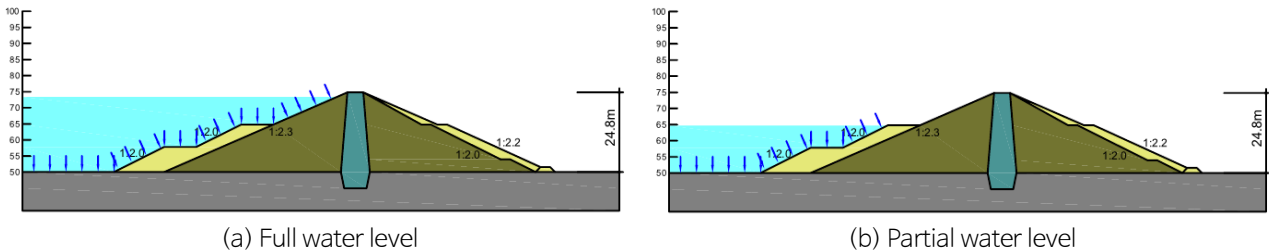


Fig. 7. Modeling diagram of secondary embankment by water level according to water level.

Table 13. Slope stability analysis result table of the secondary embankment

Classification		Spencer's method	Morgenstern-Price's method	Bishop's method
		Result	Result	Result
Upscale pardon	Full water level	1.305	1.296	1.265
	Partial storage	1.298	1.283	1.248
Downstream amnesty	Full water level	1.212	1.206	1.202

3차 제방 내진보강 모델링

2차 제방 내진보강은 상류사면의 기울기를 1:2.3에서 1:2.0로 변경하고 사석 A = 163 m²를 보강하였다. 하류사면의 기울기는 상단부 1:1.8, 하단부 1:2.0에서 1:2.2로 변경하고 사석 A = 81 m²를 보강하여 아래 Fig. 8과 같이 보강 전 제방의 표준단면도를 GEO-SLOPE 프로그램에 모델링 하였다.

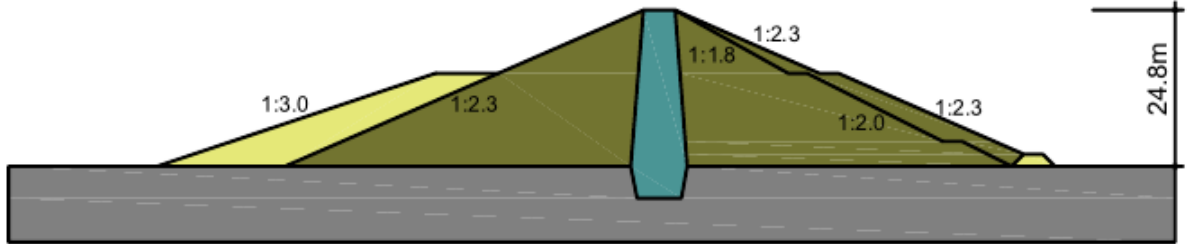


Fig. 8. Tertiary embankment modeling diagram.

Fig. 9는 보강 전 제방의 만수위와 일부수위의 모델링도이고, Table 14는 3차 제방의 사면안정분석 결과표이다.

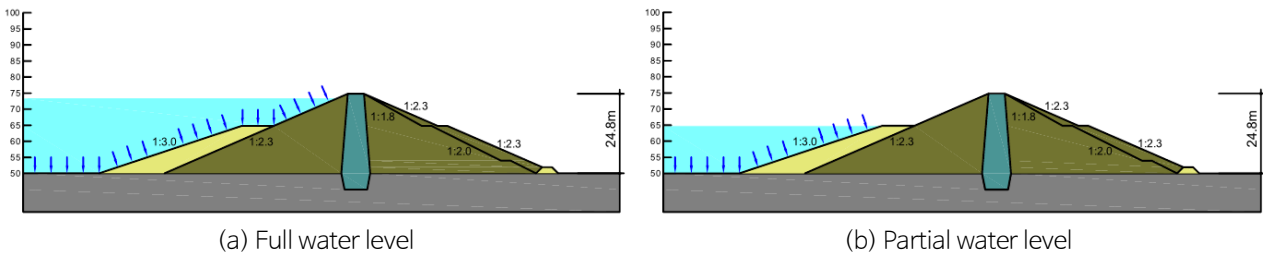


Fig. 9. Modelling diagram by water level of the tertiary embankment according to water level.

Table 14. Table of slope stability analysis of the 3rd embankment

Classification		Spencer's method	Morgenstern-Price's method	Bishop's method
		Result	Result	Result
Upscale pardon	Full water level	1.265	1.259	1.226
	Partial storage	1.241	1.235	1.203
Downstream amnesty	Full water level	1.222	1.222	1.222

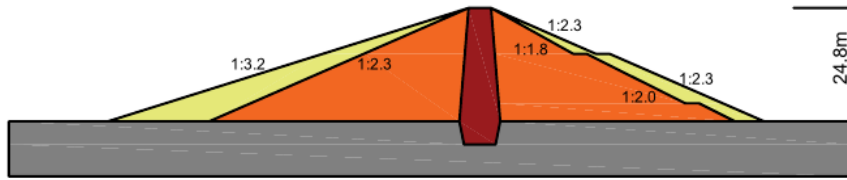
3차 제방 내진보강 모델링

Tables 15~17의 1차, 2차, 3차 사면보강 단면 비교표와 Table 18을 참고하여 사석 보강면이 감소하였음에도 불구하고 안전율이 허용 안전율을 충분히 만족한다는 점을 보았을 때 내진보강 시 사면에 대한 보강단면 형상이 안전율에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

본 연구에서 단면별로 산출한 예정 공사비는 현 건설공사 산출기준을 근거로 산정하였고 세부적으로 산출할 시 금액의 차이는 있을 수 있다.

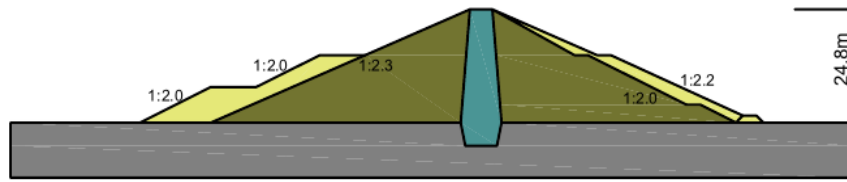
산출결과, 저수지 제방길이 274 m를 기준으로 1차 보강단면에서는 16억원, 2차 단면에서는 14억원, 3차 단면에서는 13억원으로 최고 3억원의 공사 절감이 되는 것으로 분석되었다.

Table 15. Primary slope reinforced section comparison table



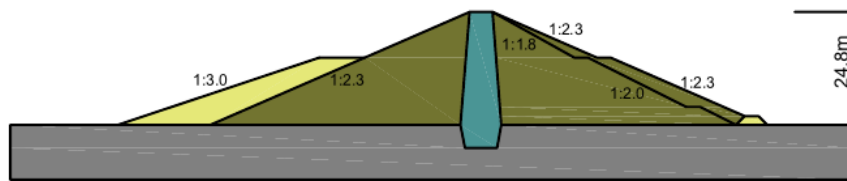
Primary reinforcement section	Quadratic reinforcement upstream	257 m ²	Quadratic reinforcement surfaces total : 375 m ²	Construction expenses : 1.6 billion
	Quadratic reinforcement plane downstream	118 m ²		

Table 16. Comparison table of the second round of reinforcing sides of the section



Secondary reinforcement section	Quadratic reinforcement upstream	163 m ²	Quadratic reinforcement surfaces total : 244 m ²	Construction expenses : 1.4 billion
	Quadratic reinforcement plane downstream	81 m ²		

Table 17. Tertiary lateral reinforced section comparison table



Tertiary reinforcement section	Quadratic reinforcement upstream	116 m ²	Quadratic reinforcement surfaces total : 134 m ²	Construction expenses : 1.3 billion
	Quadratic reinforcement plane downstream			
	Downstream side soil reinforcement plane	100 m ²		

Table 18. Slope stability analysis result table before reinforcement

Classification	Upstream slope		Downstream slope
	Full water level (1.20)	Some reservoirs (1.15)	Full water level (1.20)
Reinforcement battle	0.996	0.999	0.994
Primary reinforcement section	1.225	1.219	1.221
Secondary reinforcement section	1.265	1.248	1.202
Tertiary reinforcement section	1.226	1.203	1.222

결론

최근 지진에 대비한 저수지 내진설계 기준이 강화됨에 따라 저수지 사면에 대한 내진 보강을 실시하는 사례가 증가하고 있으나, 안정성 평가에 대한 명확한 해석 방법이 없을 뿐만 아니라 이에 따른 비용문제가 동반되는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 저수지 사면의 사석과 성토재를 이용한 내진보강 단면 결정시 경제적인 설계를 위한 기초 단계로써, GEO-SLOPE 프로그램을 이용하여 반복 검토를 수행하여 내진보강 단면 형상별 저수지 제방 안전율 변이 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 제방 단면 형상에 따른 지진시 수치 해석 결과, 상류 및 하류 사면 모두 만수위시 안전율(F_s)이 설계기준($F_s \geq 1.2$)에 만족하지 못하고 상류사면 일부수위시 안전율(F_s)도 설계기준($F_s > 1.15$)에 만족하지 못하는 것으로 분석되었다.
- (2) 제방의 1차, 2차, 3차 내진보강 단면을 감소하여 분석결과, 3차 보강단면이 1차와 2차 보강단면에 비해 적은 물량으로도 배치를 어떻게 하는지에 따라 안전율 확보가 되는 것으로 확인되었다.
- (3) 기존 제방의 단면 보강의 경우 사석의 배치가 하부에서 상부까지 전면 보강하는 형상이었으나, 본 연구에서는 하부에서 중심부까지만 사석을 배치하였고 최적의 보강단면을 찾기 위해 반복적인 수치해석을 수행하였다. 그 결과 최소한의 사석배치로 안전율 확보와 경제성을 확인 할 수 있었다.

References

- Bishop, A.W., 1955, The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, *Geotechnique*, 5(1), 7-17.
- Fellenius, W., 1927, *Erdstatische berechnungen*, Revised edition, W. Ernst u. Sons, Berlin.
- Jo, S.B., Kim, N.R., 2018, A review on seismic design criteria for dam, *KSCE Magazine*, 66(3), 48-52.
- Joo, Y.H., 2011, The experimental study of the reinforcement technique for the breach damage mitigation on the small scale reservoir, Master Thesis, Hongik University, 1-95 (in Korean with English abstract).
- Kang, J.W., 2010, A characteristic analysis on the program of slope stability analysis by Bishop's simplified method, Master Thesis, Chosun University, 1-112.
- Lauchlan, C.S., Melville, B.W., 2001, Riprap protection at bridge piers, *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(5), 412-418.
- Lee, W.M., Kim, C.S., Ji, W., Yeo, Y.G., 2007, Stability evaluation for riprap protections using experimental tests, *Proceedings of the 33rd Korean Society of Civil Engineers Regular Conference Civil Expo*, 2580-2583.
- MLTM (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Dam design standards.
- MOLIT (Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs), 2011, Dam design criteria.
- Mononobe, N., 1925, Relation between the destructive power of earthquakes and the percentage of collapse of wooden framed houses in Japan, *Japanese Journal of Astronomy and Geophysics*, 3, 7.
- Morgenstern, N.R., Price, V.E., 1965, The analysis of the stability of general slip surfaces, *Geotechnique*, 15(1), 79-93.
- MPSS (Ministry of Public Safety and Security), 2017, Common application of seismic design standards.
- Noh, S.K., Son, Y.H., Bong, T.H., Park, J.S., Choi, W.S., 2013, Analysis for the safety factor of slope and seepage according to change cross-section in the reservoir embankments, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 55(6), 37-46 (in Korean with English abstract).
- Spencer, E., 1967, A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel inter-slice forces, *Geotechnique*, 17(1), 11-26.
- Taylor, D.W., 1937, Stability of earth slopes, *Journal of Boston Society of Civil Engineers*, 24(3), 197-246.