한국지반공학회논문집 제30권 4호 2014년 4월 pp. 81 ~ 92
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.30, No.4, April 2014 pp. 81 ~ 92

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
http://dx.doi.org/10.7843/kgs.2014.30.4.81

조립토 하천제방의 수위파형결정에 관한 수치해석적 연구

Numerical Analysis of Hydrograph Determination for Cohesive Soil Levee

김 진 만[1] Kim, Jin-Man　　김 지 성[2] Kim, Ji-Sung
오 은 호[3] Oh, Eun-Ho　　조 원 범[4] Cho, Won-Beom

Abstract

The integrity evaluation of river levee includes slope stability evaluation of riverside land and protected low-land, and safety of piping with respect to critical gradient and critical velocity based on related regulations, such as Design Criteria Rivers Commentary (2009), Structural Design Criteria Based Commentary (2009). The design hydro-graph is the most important design input factor for the integrity evaluation; it can be inaccurate due to the absence of its decision methods suggested by the national level. The authors in this paper evaluated numerical analytic levee integrity for piping and slope stability by changing each design hydro-graph, including rising ordinary water level, lasting flood water level, falling water level, and flood frequency for Mun-san-jae on Nak-dong River. Finally, the authors suggested that the levee integrity of piping and slope stability are very sensitive to the changes of increasing time of ordinary water level by 57 hours and lasting time of the flood water level by 53 hours, respectively, for Mun-san-jae.

요 지

하천제방 건전도 평가는 하천설계기준·해설(2009), 구조물기초 설계기준 해설(2009) 등 관련 기준을 토대로 한계동수경사법, 한계유속법 등에 의한 파이핑 안전성과 제내지 및 제외지의 활동안전성 평가에 의하여 수행된다. 이때 수위파형은 건전도 평가 시 가장 중요한 설계입력자료이나 관련 국가기준에서 그 결정방법을 제시하지 못함으로서 부정확한 설계가 이루어지고 있다. 본 논문에서는 낙동강 문산제를 대상으로 평수위 상승, 홍수위 지속, 수위하강, 홍수빈도 등 개별 수위파형을 변화시켜가면서 제방 안정성에 미치는 영향 정도와 합리적인 수위파형특성을 제안하였다. 평가결과, 문산제 조립토 제방의 설계수위파형은 최대 57시간 이상의 평수위상승시간 및 53시간 이상의 홍수위지속시간 등을 반영할 것을 제안하였다.

Keywords : River embankment, Integrity evaluation, Piping, Slope stability, Design Hydrograph, Flood Event

1 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 선임연구위원 (Member, Researcher, Geotechnical Disaster & Environment research Division, KICT)
2 비회원, 한국건설기술연구원 하천해안연구실 수석연구원 (Researcher, Geotechnical Disaster & Environment research Division, KICT)
3 비회원, 한국건설기술연구원 건설관리·경제연구실 수석연구원 (Researcher, Geotechnical Disaster & Environment research Division, KICT)
4 정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 박사후연구원 (Member, Researcher, Geotechnical Disaster & Environment research Division, KICT, Tel: +82-31-995-0835, Fax: +82-31-910-0235, wbcho@kict.re.kr, Corresponding author, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2014 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

국내 수자원 현황은 연평균 강수량의 경우 세계 평균의 약 1.4배, 1인당 연 강수량의 경우 세계평균의 약 1/8 수준, 수자원 이용량의 경우 수자원 총량의 27% 정도로서, 물 부족 국가에 속하고 있다. 또한, 2010년 재해연보에 의하면, 국내 재해는 태풍 27.6%, 호우 72.3% 등으로 수재해가 주재해이며, 재해 구조물의 경우 제방, 호안, 수문 등 하천분야 28.7%, 사면, 교량 등 10.3%, 사방 12.6%, 수리시설 7.5% 등인 것으로 보고되었다 (KICTEP, 2012).

특히, 1987년~2003년까지의 통계자료에 의하면, 하천제방은 Fig. 1에서 보듯이 노후화 및 이상홍수로 인하여 조사건수 758건 중 침식 300건(39.6%), 월류 295건(38.9%), 제체 불안정 87건(11.5%), 구조물에 의한 파괴 76건(10.0%) 등으로 심각한 것으로 보고되었다(한국건설기술연구원, 2004). 하천제방 붕괴원인은 수공학적 원인뿐만 아니라 1) 제체 및 기초지반의 침하, 2) 침투, 3) 사면안정, 4) 하상토 사용 등 지반공학적 원인과 직·간접적으로 관련되어 있다.

하천설계기준·해설(2009) 및 구조물 기초 설계기준·해설(2009)에 의하면, 하천제방 설계는 지반공학분야의 경우 파이핑 및 활동해석을 수행하게 되어 있으나, 해석에 필요한 수위파형의 결정방법을 제시하지 못하고 있다.

수위파형은 Fig. 2에서 보듯이 홍수에 의한 설계지점의 수위변화특성을 시간경과에 따라 1) 평수위 상승구간, 2) 홍수위 지속구간, 3) 수위하강구간 등으로 구분하여 해석에 필요한 수위특성을 제시한다. 하천제방의 수위특성은 하천유역특성 등에 따라 동일 하천일 경우에도 상·하류 등 위치에 따라 다른 특성을 나타낸다. 또한, 수위파형은 앞서 언급되었듯이 관련 국가기준에서 그 결정방법을 제시하지 못함으로서 실무 설계에서 계측수위를 고려한 가정 수위파형을 이용하여 부정확한 설계가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 강정·고령보 상류의 문산제를 대상으로 평수위 상승, 홍수위 지속, 수위하강, 강우빈도 등 개별 수위파형을 변화시켜가면서 안정해석을 수행하여 수위변화에 따른 파이핑 및 활동에 대한 제방의 건전도를 평가하고자 한다.

2. 하천제방 건전도 평가 방법 및 해석 개요

2.1 국내 하천제방 현황 및 설계

4대강 살리기 마스터플랜(Ministry of Land, Transport and Marine Affairs, 2009)에 의하면, 국내 하천제방은 4대강 사업 후 노후제방보강을 통한 치수안전도 증대를 목적으로, 홍수위 저하에 따른 1.0~3.0배 제방안전도 향상을 제시하였다. 4대강사업은 낙동강의 경우 사업 전·후 전체 사업구간 334.48km 중 173.46km에서 다기능보 건설에 따른 평수위 상승이 이루어졌으나, Fig. 3에서 보듯이 제방 비탈면에 평수위가 도달하지 않아 제방 안정성에 영향이 없는 것으로 나타났다.

실무 제방설계는 Table 1 및 Fig. 4에서 보듯이 하천설계기준·해설(2009), 구조물기초 설계기준 해설(2009), 하천공사 설계실무 요령(2006) 등의 관련기준을 참조하여 파이핑에 대한 검토는 한계동수경사법, 한계유속법 등으로, 활동에 대한 안정해석은 Bishop의 원호활동법을 적용하여 제내지(최대 침윤 조건) 및 제외지(수위급강하 조건) 활동 등을 적용하여 수행한다.

한편, 파이핑에 의한 하천제방붕괴는 1) 국부동수경사 또는 침투유속의 한계치 이상 발생, 2) 그에 따른 기초지반 함몰이나 제방 뒷비탈기슭 용수발생 및 토사

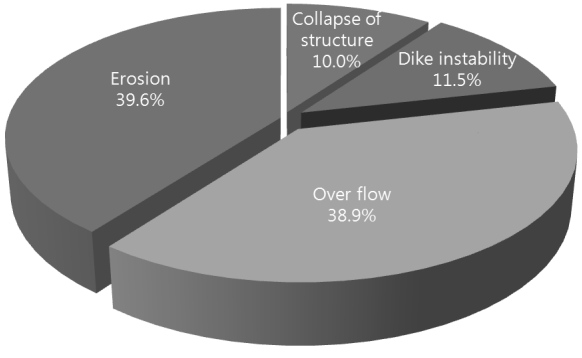


Fig. 1. Levee failure examples type distribution (KICT, 2004)

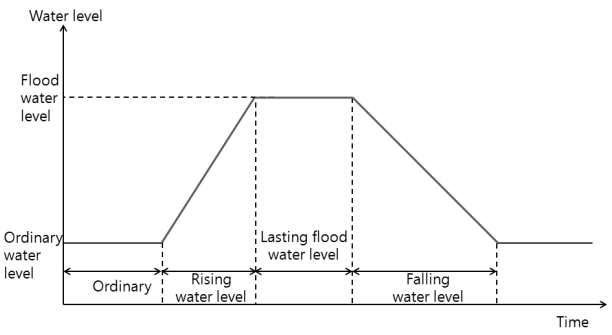


Fig. 2. Hydrograph Curve for Levee Design

(a) Before 4 river project

(b) After 4 river project (NakDong river, 2013)

Fig. 3. Rising Level Cases of the Levee and Sluice Gate

Table 1. Design Standards of Levee Piping and Slope Stability

Item / Evaluation	Piping design[1)]	Slide design[2)]
F.S	2.0	1.3 (Consider the tensile cracks and pore pressure)
Interaction Formular	• $i_c = \frac{h}{d} = (1-n)(G_s - 1)$ • $V = \sqrt{\frac{Wg}{A\gamma_w}}$	$Fs = \frac{d + (W - ub)\cos\alpha\tan\phi}{W\sin\alpha}$

1) Design criteria rivers Commentary (2009), 2) Structural design criteria based commentary (2009)

유출 등으로 발생된다. 파이핑 평가에 관한 연구를 살펴보면, Terzaghi(1943)가 균질한 사질토의 분사현상을 전제로 파이핑에 대한 한계동수경사법을 제안하였고, Kalin(1977)이 비균질 지반의 파이핑 평가를 통하여 현장 한계동수경사의 경우 이론치에 비해 20～40% 작게 나타나는 경향을 보이며, Schmert -mann(2000)은 실제 현장 세립모래지반에서 평균 $(i_v)_{exit}$ = 0.3～0.61 수준에서 보일링(boiling)이 발생하는 것을 확인 하였다.

또한, Kovacs(1982), Richardson(1961) 등 다양한 연구자들이 다양한 한계유속법을 제안하였으며, Bilgh(1927)는 $CR = L/\Delta H$ 형태의 크리프 비(Creep Ratio) 방법을 처음 제안하였다.

中島秀雄(2003)은 활동에 의한 제방붕괴의 경우 1) 강우에 의한 비탈면 및 둑마루 우수 침투, 2) 침투 우수에 의한 수위 상승, 3) 하부 제방 포화도 상승에 의한 전단강도 저하로 발생되며, 누적 강우량이 200mm 이상, 시간당 강우량 30mm 이상에서 토사유출 및 활동 발생이 심각한 것으로 보고하고 있다. 또한, 일본 하천설계지침(안)(Ministry of Construction, 2000)은 Fig. 5와 같은 복수의 홍수파형으로부터 수위파형을 산출하는 방법을 제시하였다.

일본 하천제방설계지침(안)은 Fig. 5에서 보듯이 파이핑 및 활동 해석을 위한 수위파형결정 방법을 다음과 같이 제시하고 있다.

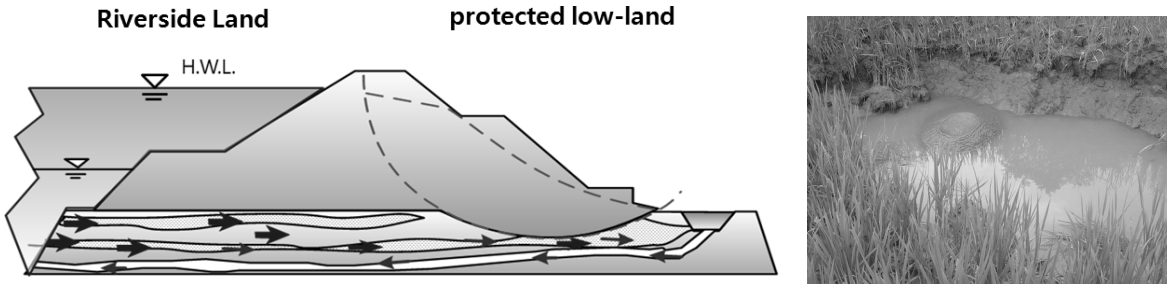
- ○ 다양한 홍수사상(A홍수, B홍수, C홍수)을 첨두수위 발생시점을 중심으로 정리함(Fig. 5(a) 참조).
- ○ 홍수사상에 따른 하천수위별 지속시간을 결정하여 점 형태로 표기된 외곽선, 1시간 지속시간의 제방고 최대홍수위를 포함하는 선 등으로 이루어진 최대외곽면적(빗금면적)을 결정(Fig. 5(b) 참조)
- ○ 수위하강 기울기가 가장 급한 홍수사상(A홍수)를 홍수위에서 수위하강을 시작하는 수위하강 기울기로 하여 Fig. 5(b)의 빗금면적과 동일한 수위파형곡선, 즉 수위상승곡선의 기울기 및 지속시간을 결정(Fig. 5(c) 참조)

2.2 건전도 평가방법

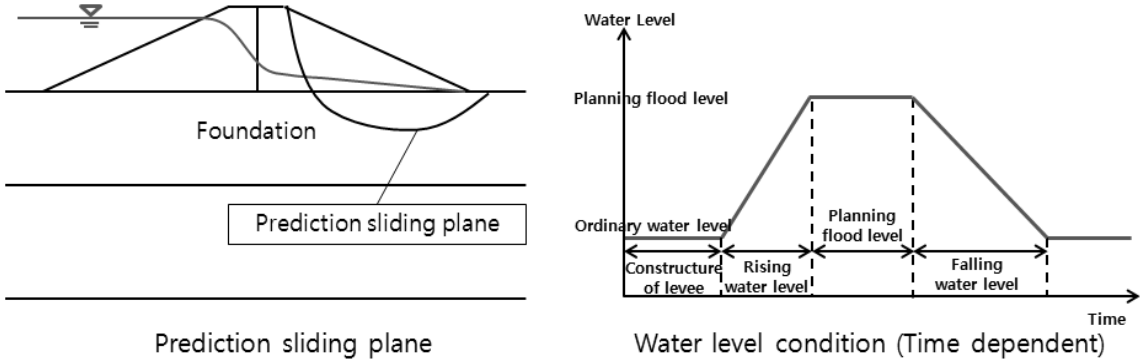
2.2.1 침투해석 및 활동 적용 모델

하천제방 건전도 평가는 설정된 제방 모델 및 설계외력을 고려한 침투해석을 토대로 파이핑 및 활동에 대한 항목별 평가수치를 산출하는 방식으로 수행한다.

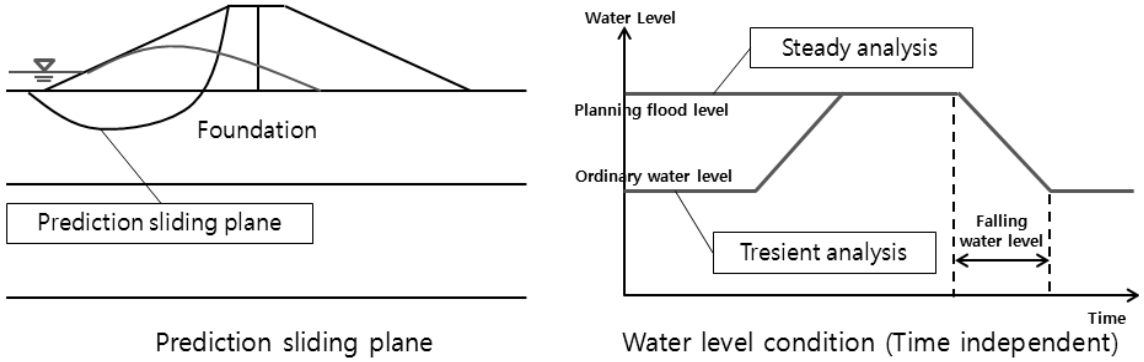
침투해석 방법은 홍수기간이 긴 미국, 유럽 등의 경우 고수위를 정상수위조건으로 하여, 정상 침투해석을 수



(a) Conceptual diagram/occurrence scene of piping (KICT, 2004)



<Unsteady seepage stability analysis (consider design hydrograph)>



<Unsteady seepage stability analysis (falling water level)>

(b) Landslide

Fig. 4. Conceptual Diagram of River Facility Stability Analysis (Levee, Sluice Gate, Multi-Functional Weirs Piping) (Structural design criteria based commentary, 2009)

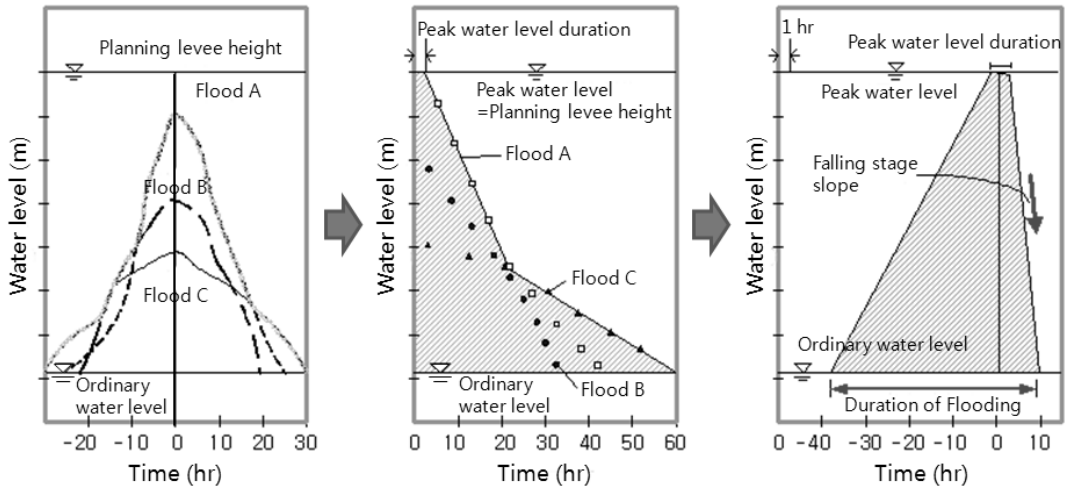


Fig. 5. River Water Level Hydrograph (base level model) How to Set Up (Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism, 2000)

행하고 있으며, 홍수 지속기간이 짧은 한국 및 일본의 경우 집중호우와 같은 강우특성을 고려하여 시간에 따라 수위가 변화하는 수위파형 모델을 사용하는 비정상 수위 조건의 비정상 침투 해석을 적용하여 경제적 설계를 유도하고 있다(Ministry of Construction, 2000).

본 논문에서는 식 (1)과 같이 "한 요소체적에 유입흐름율과 유출흐름율과의 차이가 일정 시간 동안의 체적함수량의 변화와 같다"는 것을 가정한 비정상 포화해석 모델을 이용하여 침투해석을 수행하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(K_x\frac{\partial^2 H}{\partial x^2})+\frac{\partial}{\partial y}(K_y\frac{\partial^2 H}{\partial y^2})+Q=\frac{\partial \Theta}{\partial t} \qquad (1)$$

여기서, H : 전수두

K_x : x방향 투수계수

K_y : y방향 투수계수

Q : 적용된 경계유량

Θ : 체적함수량

t : 시간

수치해석은 캐나다 GEO-SLOPE(2007) 사에서 개발한 프로그램으로서 흙과 암반, 흙-구조물 상호 작용, 지하수의 흐름 등과 관련된 국내 하천제방 시뮬레이션에 가장 널리 적용되는 SEEP/W 및 SLOPE/W 프로그램을 사용하였다.

제방의 침투해석을 위하여 작성된 유한요소망은 다음 Fig. 6(a)에서 보듯이 해석의 정밀도를 위하여 약 10439개의 치밀한 3절점 및 4절점 평면요소로 구성되어 있다. 이때, 제체 및 기초 지반의 요소망 크기는 구조물 기초 설계기준·해설(2009)에서 최적 침투해석 요소망 크기로 제안하고 있는 제방 높이의 1/10 또는 0.5m 이하 기준을 적용하였다.

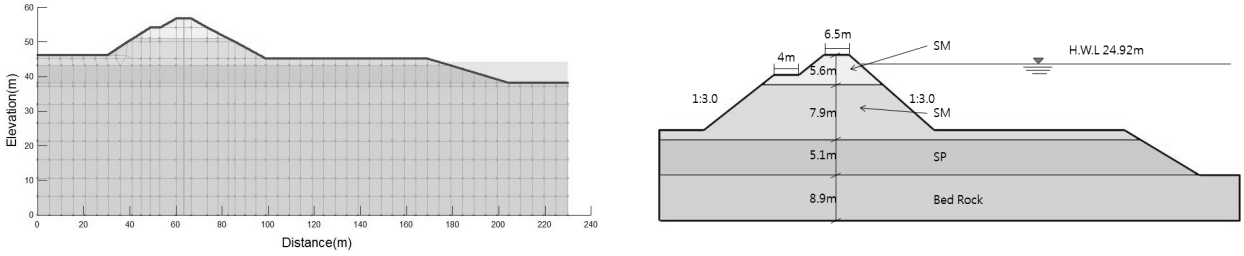
Fig. 6(b) 및 Table 2는 해석에 사용된 각 지반의 지층구성 및 물성치를 보여주며, 적용 지반 물성치의 경우 낙동강 본류 문산제(낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서, 2009)를 대상으로 대표적인 값을 선정하였다.

2.2.2 해석 범위 및 내용

Fig. 7(a)는 문산제 근처 성주수위관측소에서 관측된 2002～2012년까지의 홍수사상 및 수위파형을 보여준다. 이 그림에서 보듯이 문산제 근처의 서례홍수사상은 매미, 루사 등 최근 10년 동안의 모든 홍수유형을 포함하고 있으나, 2006년 태풍 에위니아와 같이 홍수지속시간이 긴 경우에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다.

Table 3에서는 국내 설계실무에서 활용하는 수위파형 결정방식에 의하여 개별 홍수사상별 수위상승시간, 수위급강하시간, 최대수위지속시간 등을 분석한 결과를 나타내었다. 이 표에서 살펴보면 문산제 주변 홍수는 6.1～17.6시간의 수위상승, 13.3～34.8시간의 수위급하강, 8.4～39.5시간의 최대수위지속 특성을 보여준다.

또한, 국내 설계실무 적용 수위파형은 Fig. 7(b)에 나타내었으며, 이는 Fig. 7(a)에서 제시된 설계홍수사상을

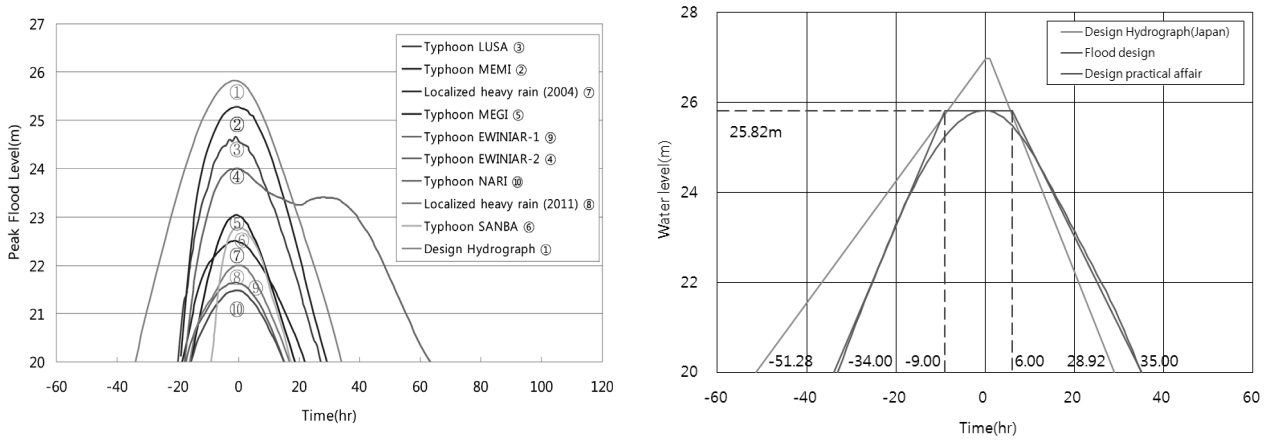


(a) The finite element mesh used for the analysis (b) Geological configuration

Fig. 6. The finite element mesh and geological configuration used for the analysis

Table 2. The Characteristics of Soil for the Analysis

Material	Unit weight (γt, kN/m^3)	Poisson's ratio (ν)	Permeability (cm/sec)	Cohesive (c, kPa)	Internal friction angle (ϕ, °)
Building materials	18	0.33	8.00E−04	10	28
Sedimentary layer (SM)	17	0.30	2.00E−03	5	25
Sedimentary layer (SP)	19	0.33	8.00E−03	0	30
Bed rock	24	0.30	5.00E−06	300	33



(a) Flood water level curve (Sung-ju gauging station)

(b) Analysis using the design Hydrograph

Fig. 7. Flood water level curve and analysis hydrograph (Sung-ju gauging station)

Table 3. Analysis result of design hydrograph

Typhoon	Water level rise time (hr)	Lasting flood water level (hr)	Water level falling time (hr)
LUSA	17.6	10.7	25.3
MEMI	16.0	16.3	22.7
Heavy rains 2004	11.9	12.3	22.9
MEGI	12.9	8.4	16.4
EWINIAR-1	15.3	10.3	13.7
EWINIAR-2	12.3	39.5	34.8
NARI	11.5	10.0	13.3
Heavy rains 2011	14.2	10.0	14.9
SANBA	6.1	8.4	14.9

토대로 최대설계홍수위(H.W.L) 및 수위상승/하강 기울기를 고려한 임의로 작성된 수위파형이 사용되었다.

이 그림에서 보듯이 평수위에서 23시간 동안 수위가 상승하여 최고수위에 도달한 후 홍수위 지속시간이 15시간 동안 지속되다가 29시간 동안의 수위하강으로 평수위에 도달하는 수위변화특성을 보여준다. 이때 지하수위는 평수위 레벨로 고려하여 보수적인 설계로 유도되었다.

본 연구에서는 다양한 수위파형변화에 따른 제방 건전도를 평가하고자 Table 4에 수록된 것과 같이 1) 수위상승 시간을 6, 16, 23, 42, 57시간, 2) 수위급강하 시간을 11, 23, 29, 58, 70시간, 3) 최대 홍수 지속시간을 8, 15, 27, 40, 53시간, 4) 홍수빈도를 50년, 100년, 200년 등으로 변화시켜가면서 파이핑 및 활동에 대한 안정성을 평가하였다. 이때 수위급강하효과는 투수성(k, cm/sec)과 t시간 동안 수위하강높이(h)를 고려한 수위하강속도(h/t, cm/sec)를 비교하여 발생잔류수 간극수압에 의한 활동영향을 고려하였다.

한편, 파이핑 및 활동해석시점은 시점별 결과 분석 후 안전율이 최소가 되는 시점을 대상으로 선정하였다. 분석결과, 파이핑 및 활동해석시점은 1) 파이핑 및 제내지 활동안전율의 경우 홍수위지속시간의 최종시점(끝단)을, 2) 제외지 수위급강하에 의한 활동안전율의 경우 수위급강하시간의 최종시점(끝단)으로 하였다.

3. 해석결과 및 분석

3.1 평수위상승효과

앞서 언급되었듯이 파이핑 및 활동 발생 메카니즘은 파이핑의 경우 국부동수경사 또는 침투유속의 한계치 이상 발생에 따른 토사유출 및 용수발생 등이고, 활동의 경우 강우에 의한 비탈면 및 둑마루 우수 및 강우 침투에 따른 전단강도 저하로 발생된다(中島秀雄, 2003).

Fig. 8은 평수위상승시간 6시간 및 57시간 경과를 반영한 수위파형에 의한 침윤특성을 보여준다. 이 그림에서

Table 4. Using hydrograph seepage/landslide analysis scope and content

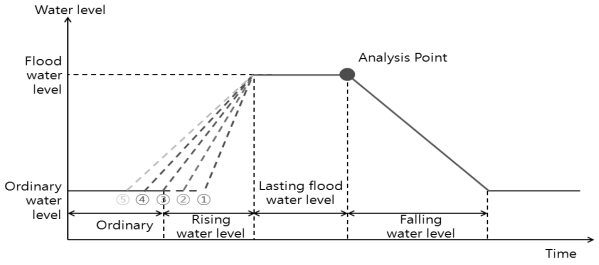
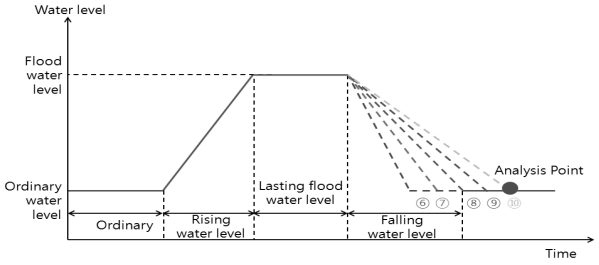
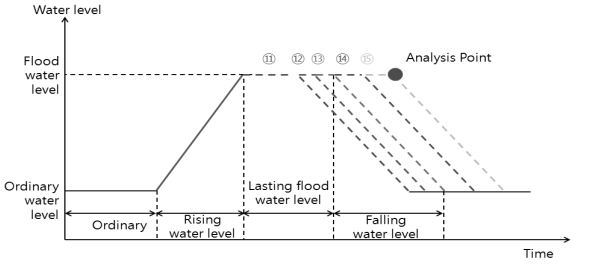
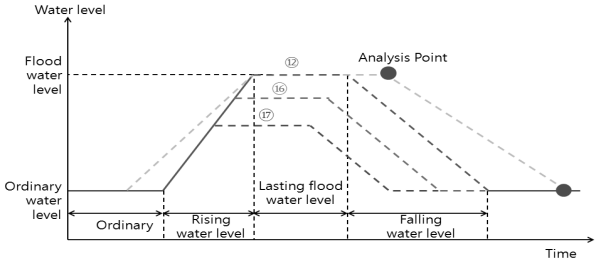
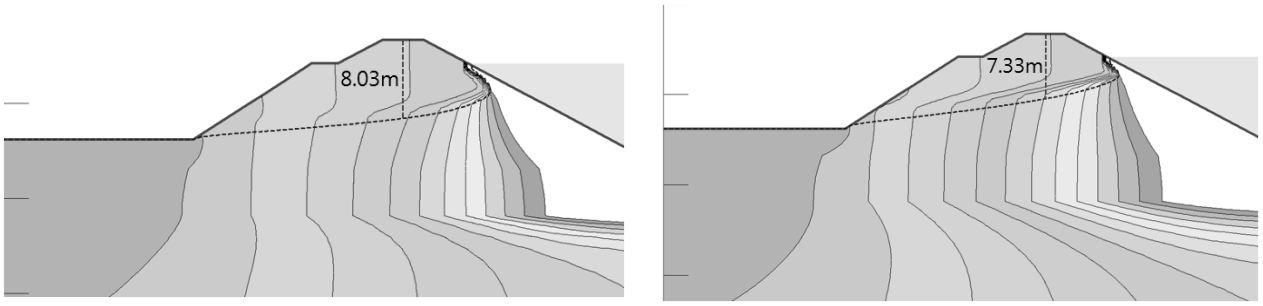
Rate item	Variation factor	Variation value	Legend
Rising ordinary water level	Time	6, 16, 23, 42, 57 hr	①, ②, ③, ④, ⑤
			
	Combination of Hydrograph : ①+⑫+⑧, ②+⑫+⑧, ③+⑫+⑧ ④+⑫+⑧, ⑤+⑫+⑧		
Falling water level	Time	11, 23, 29, 58, 70 hr	⑥, ⑦, ⑧, ⑨, ⑩
			
	Combination of Hydrograph : ③+⑫+⑥, ③+⑫+⑦, ③+⑫+⑧, ③+⑫+⑨, ③+⑫+⑩		
Lasting flood water level	Time	8, 15, 27, 40, 53 hr	⑪, ⑫, ⑬, ⑭, ⑮
			
	Combination of Hydrograph : ③+⑪+⑧, ③+⑫+⑧, ③+⑬+⑧, ③+⑭+⑧, ③+⑮+⑧		
Flood frequency	Frequency	200 (24.93 m), 100 (24.28 m), 50 (23.56 m) year	⑫, ⑯, ⑰
			
	Combination of Hydrograph : ③+⑫+⑧, ③+⑯+⑧, ③+⑰+⑧, ⑤+⑮+⑩		

Table 5. Seepage/Landslide analysis (Rising ordinary water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide
		I	II	III
Rising ordinary water level	①+⑫+⑧	4.05	1.54E+04	1.51
	②+⑫+⑧	3.69	1.41E+04	1.50
	③+⑫+⑧	3.45	1.31E+04	1.49
	④+⑫+⑧	2.95	1.10E+04	1.47
	⑤+⑫+⑧	2.68	9.98E+03	1.45

I : Critical Gradient ($FS = i_c/i_n$), II : Critical Velocity ($FS = v_c/v_n$), III : Protected low-landslide (FS)



(a) 6 hr (falling water level) (b) 57 hr (falling water level)

Fig. 8. Seepage analysis for the rising ordinary water level (Total pressure)

보듯이 경과시간 증가에 따라 침윤선이 소단부근에서 지하수위상승이 0.7m 정도 발생되는 것으로 나타났다.

Fig. 9 및 Table 5는 평수위 상승에 따른 파이핑/활동 해석 결과를 보여준다.

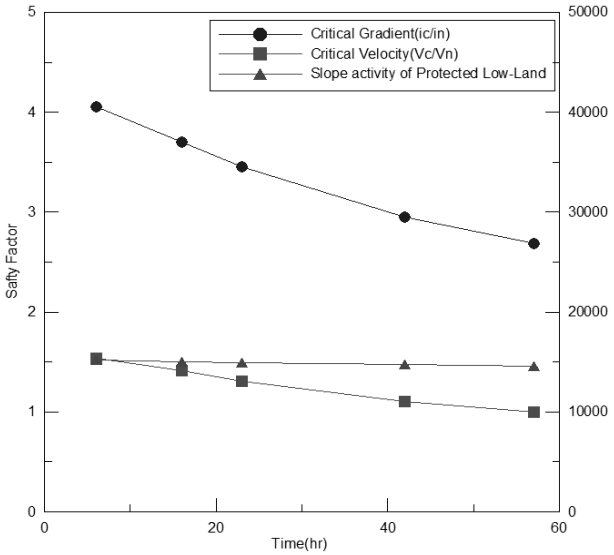


Fig. 9. Variation curve of piping/landslide safety factor for the rising ordinary water level

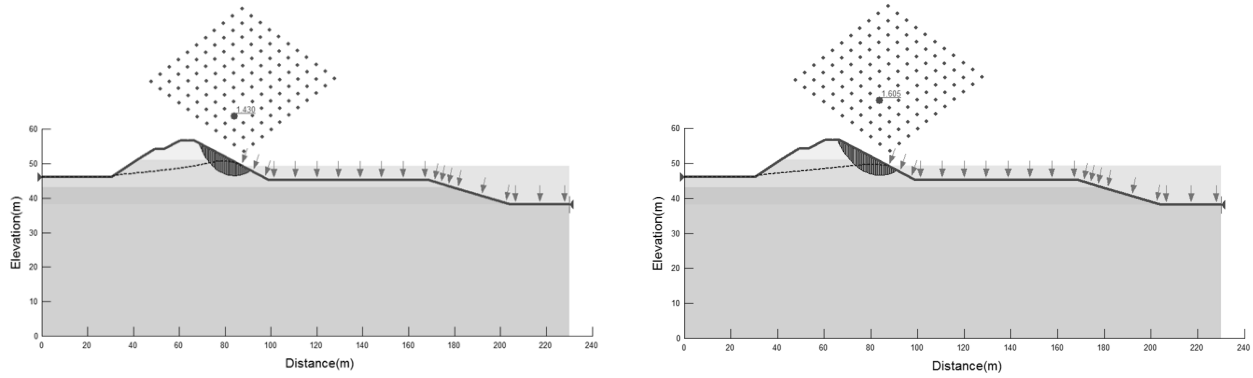
이 그림 및 표에서 보듯이 평수위 상승에 따른 파이핑 안전율 변화특성은 한계동수경사법의 경우 2.68～4.05, 한계유속법의 경우 9.98E+03～1.54E+04의 범위로서 평수위 상승에 따른 파이핑에 의한 제방 건전도는 다소 감소하였으나 하천설계기준 파이핑 안전율 2.0 및 100 이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

또한 평수위 상승에 따른 활동안전율 변화특성은 제내지의 경우 1.45～1.51의 범위로서 평수위 상승에 따른 활동에 의한 제방 건전도는 미소하게 감소하였으나 하천설계기준 활동 안전율 1.3이상을 만족하는 것으로 평가되었다.

따라서, 평수위 지속시간 증가에 따라 파이핑의 경우 동수경사가 크게 증가하여 안전율에 영향을 다소 미치나, 활동의 경우 활동 사면부에서의 침윤선에 의한 포화영역 확대가 작게 발생되어 안전율 변화는 미미하였다.

3.2 수위급강하효과

제방 건전도에서 수위급강하 평가는 제방에서 급격한 수위변화에 따른 포화된 제방 제체의 잔류수압에 의



(a) 11 hr (falling water level) (b) 70 hr (falling water level)

Fig. 10. Stability analysis for the falling water level

Table 6. Seepage/Landslide analysis (Falling water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide
		I	II	IV
Falling water level	③+⑫+⑥	3.20	1.20E+04	1.43
	③+⑫+⑦	3.09	1.16E+04	1.50
	③+⑫+⑧	3.08	1.15E+04	1.52
	③+⑫+⑨	3.10	1.15E+04	1.58
	③+⑫+⑩	3.13	1.16E+04	1.60

I : Critical Gradient ($FS= i_c/i_n$), II : Critical Velocity ($FS= v_c/v_n$), IV : Riverside landslide (FS)

한 급경한 활동안정성 저하를 평가하는 과정이다.

Fig. 11 및 Table 6은 수위 하강에 따른 파이핑/활동해석 결과를 보여준다.

이 그림 및 표에서 보듯이 수위급하강 시간이 70시간에서 11시간으로 감소 시 파이핑에 대한 안전율 변화는 한계동수경사법의 경우 3.08～3.20, 한계유속법의 경우 1.15E+04～1.20E+04로서 각각 3.7% 및 4.1% 정도의 차이를 나타내고 있다. 제외지 제방의 활동에 대한 안전율 변화는 1.43～1.60으로 10% 정도 감소하는 경향을 보였다.

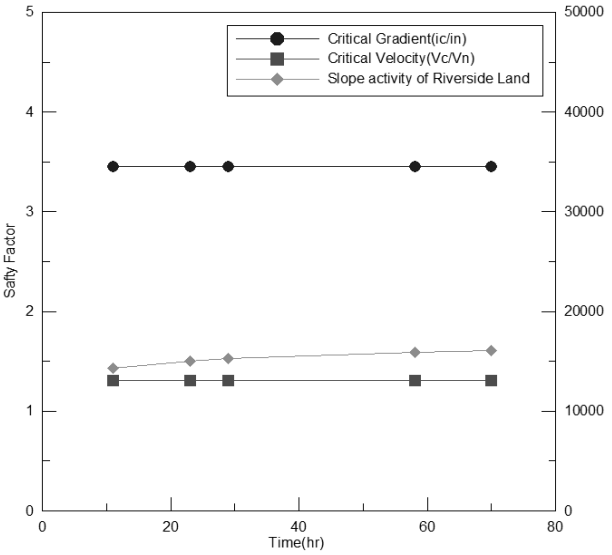


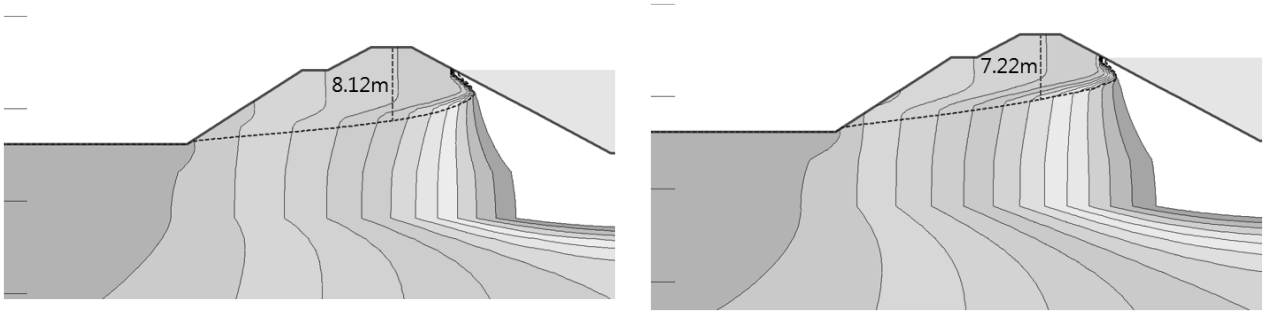
Fig. 11. Variation curve of piping/landslide safety factor for the falling water level

이러한 수위급강하에 의한 제방 건전도는 수위급강하로 인한 홍수사상별 수위하강속도, 침투압 및 포화영역이 소산되어 가는 과정에 기인하여 파이핑 및 활동안전율 등이 큰 영향을 받지 않는 것으로 평가 되었다. 이때 홍수사상에 근거한 수위급강하 11시간의 수위하강속도는 제방고 4.3m을 고려할 경우 1.09E-2cm/sec로서 제체 투수계수 8.0E-4 cm/sec에 비해 13배 큰 값이다.

3.3 홍수위지속시간 효과

한국건설기술연구원(2004)의 연구결과에 의하면, 제방포화는 균등한 모래(SP)일 경우 9일 이상, 투수성이 작은 점토질 모래(SC)인 경우 20일 이상 걸리는 것으로 보고하고 있다. 문산제에서 계측된 홍수위지속시간은 8.4～39.5시간으로 나타났으며, 이외에 27시간 및 53시간의 홍수위 지속시간을 반영하여 해석을 실시하였다. 이때 홍수위지속시간 53시간은 최 등(2007)의 연구에서 보고된 모래제방 최대 침윤면 발생소요시간 216시간의 25% 정도에 해당된다.

Fig. 12는 홍수위지속시간 8시간 및 53시간 경과 반영



(a) 8 hr (lasting flood water level)　　(b) 53 hr (lasting flood water level)

Fig. 12. Seepage analysis for the lasting flood water level (Total pressure)

Table 7. Seepage/Landslide analysis (Lasting flood water level)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide
		I	II	III
Lasting flood water level	③+⑪+⑧	3.68	1.40E+04	1.50
	③+⑫+⑧	3.45	1.31E+04	1.49
	③+⑬+⑧	3.09	1.17E+04	1.47
	③+⑭+⑧	2.80	1.05E+04	1.46
	③+⑮+⑧	2.58	9.66E+03	1.45

I : Critical Gradient ($FS= i_c/i_n$), II : Critical Velocity ($FS= v_c/v_n$), III : Protected low-landslide (FS)

수위파형에 의한 침윤특성을 보여준다. 이 그림에서 홍수위지속시간 증가에 따라 침윤선은 둑마루 중앙에서 지하수위증가가 0.9m 정도 발생되는 것으로 나타났다.

Fig. 13 및 Table 7은 홍수위지속시간에 따른 파이핑/활동에 대한 제방 건전도를 평사한 결과를 보여 준다.

홍수위지속시간에 따른 파이핑 안전율 변화특성은 Table 7에서 보듯이 한계동수경사법의 경우 2.58～3.68, 한계유속법의 경우 9.66E+03～1.40E+04로서 두 평가법 모두 31%의 안전율 감소가 발생되었다. 또한, 제내지 활동에 대한 안전율 변화는 1.45～1.50로서 평수위 상승으로 3.4% 정도 감소한 것으로 평가되었다.

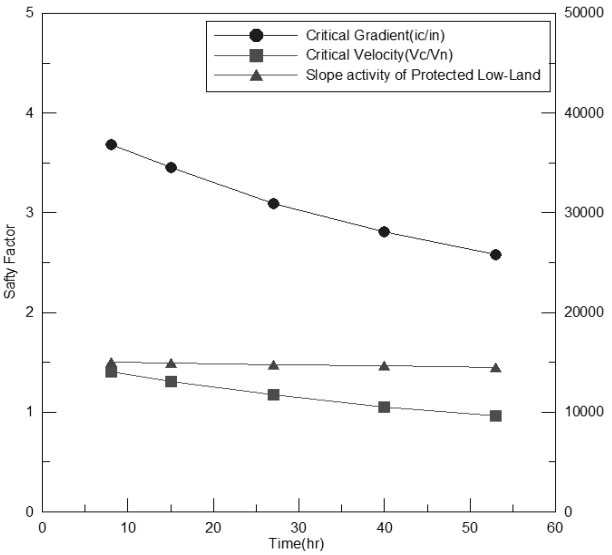


Fig. 13. Variation curve of piping/landslide safety factor for the lasting flood water level

따라서 파이핑 및 활동 안전율 저하의 차이는 상대적으로 평수위상승효과와 마찬가지로 파이핑의 경우 8시간～53시간으로 홍수위 지속시간변화에 따라 최대 31% 동수경사 증가가 발생하는 반면에 활동의 경우 침윤선에 의한 포화영역 확대가 작게 일어났기 때문인 것으로 사료된다.

3.4 홍수빈도 효과

문산제는 낙동강 수계 낙동강에 해당되는 국가하천 지역으로서 홍수빈도 200년으로 설계되어 있다. 일반적으로 하천제방은 홍수빈도를 고려하여 국가하천 200년 빈도, 지방하천 100년 빈도, 소하천 50년 빈도 및 홍수빈도를 고려한 제방여유고 등을 적용하여 설계된다. 문산제(제방고 7.39m)는 제방 여유고의 경우 2.0m 이상을, 홍수위의 경우 200년 빈도 4.93m, 100년 빈도 4.28m, 50년 빈도 3.56m 등 이다(낙동강수계 하천기본계획(변경) 보고서, 2009).

Fig. 14 및 Table 8은 홍수빈도별 파이핑/활동에 대한 제방 건전도를 평가한 결과를 보여준다.

이 그림 및 표에서 보듯이, 홍수빈도에 따른 파이핑에 대한 안전율 변화는 한계동수경사의 경우 3.45～3.73, 한계유속법의 경우 1.31E+04～1.41E+04로서 두 평가법

Table 8. Seepage/Landslide analysis (Flood frequency)

Rate item	Combination of Hydrograph	Piping		Landslide
		I	I	III
Flood frequency	③+⑫+⑧	3.457	1.31E+04	1.495
	③+⑯+⑧	3.589	1.36E+04	1.501
	③+⑰+⑧	3.731	1.41E+04	1.506
	⑤+⑮+⑩	2.190	8.04E+03	1.471

I : Critical Gradient ($FS= i_c/i_n$), II : Critical Velocity ($FS= v_c/v_n$), III : Protected low-landslide (FS)

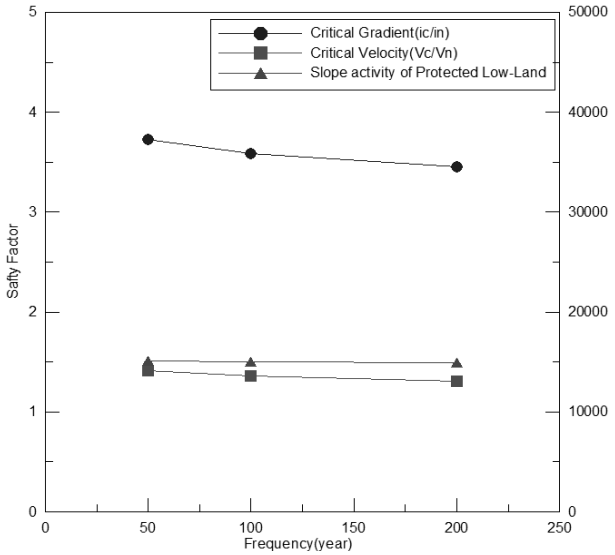


Fig. 14. Variation curve of piping/landslide safety factor for the flood frequency

모두 7% 정도 감소하는 특성을 보여주고 있다. 또한 제내지 활동에 대한 안전율 변화는 1.49~1.50으로 1% 미만의 감소가 발생 되는 것으로 평가되었다. 이러한 파이핑 및 활동 안전율 변화특성은 1) 문산제의 제방여유고 2.46m(200년 빈도 기준)와 2) 홍수빈도변화에 의한 작은 수위 차(1.37m)의 영향으로 판단된다.

한편, 문산제 조립토 제방의 200년 빈도 설계수위파형은 앞서 언급된 평수위상승시간 57시간, 홍수위지속시간 53시간, 문산제 홍수사상에 의해 결정된 수위급강하시간 70시간 등을 고려하여 파이핑 및 활동 안전율을 평가 하였다(Table 8 참조).

그 결과, 문산제 조립토 제방의 파이핑 안전율 변화는 한계동수경사의 경우 2.19, 한계유속법의 경우 8.04E+03, 제내지 활동에 대한 안전율의 변화는 1.471 등으로 평가되었다. 따라서 문산제 조립토 제방의 200년 빈도 설계수위파형은 파이핑 안전율 한계동수경사 2.0 및 한계유속법 100 이상, 활동안전율 1.3 이상 등 하천설계기준 관련 규정과 해석결과를 고려하여 1) 최대 57시간 이상의 평수위상승시간, 2) 홍수사상으로 구해진 지역별 수위급강하시간, 3) 최대 53시간 이상의 홍수위지속시간 등을 제안한다.

5. 결 론

본 논문에서는 낙동강 문산제를 대상으로 평수위 상승, 홍수위 지속, 수위하강, 홍수빈도 등 개별 수위파형을 변화시켜가면서 한계동수경사법, 한계유속법 등에 의한 파이핑 안전성과 제내지 및 제외지의 활동안전성에 대한 수치해석적 제방 건전도를 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 평수위 상승 및 홍수위지속 시 제방 건전도는 상승 및 지속시간이 길어질수록 파이핑 안전율이 평수위 상승효과의 경우 최대 35% 정도, 홍수위지속 효과의 경우 최대 31% 정도로 나타나, 파이핑 안전율에 영향이 큰 것으로 평가 되었다.

(2) 수위급강하 시 제방 건전도는 11~70시간으로 수위급강하 시간이 짧아질수록 파이핑 안전율의 경우 한계동수경사법 3.7% 및 한계유속법 4.1% 정도로, 제외지 활동 안전율의 경우 10% 정도가 감소하여 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

(3) 50년, 100년, 200년 홍수빈도별 제방 건전도는 문산제 제방여유고 및 최대 1.37m 정도의 작은 수위 차에 기인하여 파이핑의 경우 7% 정도, 제내지 활동의 경우 1% 미만으로 큰 영향이 없는 것으로 평가되었다.

(4) 문산제 조립토 제방 200년 빈도 설계수위파형은 제방 건전도에 미치는 영향을 고려하여 1) 최대 57 시간 이상의 평수위상승시간, 2) 홍수사상으로 구해진 지역별 수위급강하시간, 3) 최대 53 시간 이상의 홍수위지속시간 등을 반영할 것을 제안한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구S01)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌 (References)

1. Bilgh, W. G. (1927), “The practical design of irrigation works”, *A. Constable & Co.*
2. Choi, B. H. and Kim, J. M. (2007), “Geotechnical Approach for Improving the Stability of Levee”, Foundation and Technology, KAPE, Vol.4, No.4, pp.50-58.
3. John H. Schnertmann (2000), “The No-Filter Factor of Safety against Piping through Sand”, *ASCE*, Geotechnical Special Publication No.111, pp.65-133.
4. Kalin, M. (1977), “Hydraulic Piping-Theoretical and Experimental Findings”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.14, No.1, pp.107-124.
5. Kim, K. H. (2004), *Levee development of advanced technologies*

relevant, final report, Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement.
6. Korea Geotechnical Society (2009), *Structural design criteria based commentary*
7. Korea Water Resources Association (2009), *Design criteria rivers Commentary*
8. Kovacs, G. (1982), "Manual of Soil Laboratory Testing", Vol.2, *Pentect Press*, pp.458-464.
9. Land Transport and Maritime R&D Report (2012), *Network based SOC Management and Operations Planning.*
10. Ministry of Construction (2000), *Levee Design Guidelines*, pp. 221-245, Japan.
11. Ministry of Land, Transport and Marine Affairs (2009), *Master Plan of 4 Major Rivers Restoration.*
12. Ministry of Land, Transport and Marine Affairs (2006), *Practical design tips river construction.*
13. Nakajima, H. (2003), *River Levee*, Kibodang Press, japan.
14. Richardson, J. F. and Meikle, R. A. (1961), "Sedimentation and Rluidization III", *Trans. Int. Chem. Engrgs.*, Vol.39, No.5, pp.348.
15. Schmertmann, J. H. (2000), "The No-Filter Factor of Safety against Piping through Sand.", *ASCE*, Geotechnical Special Publication No. 111, pp.65-133.
16. Terzaghi, K. (1943), "Theoretical Soil Mechanics", *John Wiley and Sons*, pp.189-194.

Received : December 23rd, 2013
Revised : March 6th, 2014
Accepted : April 17th, 2014