



바텀 애쉬와 준설 혼합토 적용 제체의 사면 안전율에 대한 토질 정수 민감도 분석

Sensitivity Analysis of Soil Properties for the Slope Safety Factor in Embankments utilized Bottom Ash and Dredged Soil Mixture

노수각* · 손영환**,† · 박재성*** · 봉태호****

Noh, Soo-Kack · Son, Young-Hwan · Park, Jae-Sung · Bong, Tae-Ho

Abstract

In the construction industry, the interest for recycling aggregates is rising as more people demand for alternatives due to lack of supply of natural aggregates and environmental problems. However, in order for recycled aggregates to be used in infrastructures, stability and other factors need to be verified. Therefore, the objective of this study is to analyze the sensitivity of soil properties to secure slope safety according to various heights of embankment when bottom ash and dredged soil mixture is applied in the embankment. In most cases, all heights were safe for the slide for the embankment whether the water level is full or sudden draw down. The result of the sensitivity analysis revealed that the unit weight of embankments is highest among all factors to be considered. However, the sensitivity of the unit weight became smaller and the sensitivity of the friction angle of embankments increased with the height of embankments. The sensitivity of factors of core materials is very small because the core has weaker physical properties than those of the embankment. The effect of the height for each factor is different for each slope and water levels. The sensitivity of the unit weight of embankments is most affected when the height is 60m in the upstream slope. To conclude, bottom ash and dredged soil mixture can be applied in the embankment and different factors must be considered in different scale because the sensitivity depends highly on the height of embankments.

Keywords: Bottom ash; Dredged soil; Safety factor; Embankment; Sensitivity

1. 서 론

농업생산기반시설 중 농업용 저수지는 농촌에서 농업용수의 공급, 홍수 조절 뿐 아니라 넓게는 농촌 경관의 조성, 하천 유지 수량 보존 등의 중요한 역할을 수행하고 있다. 하지만 현재 우리나라 농업용 저수지의 약 50% 이상이 사용 연한인 60년을 넘어 노후화로 인한 불안정성이 증가하고 있다 (Kim, 2005; Noh et al., 2013). 농업용 저수지는 인간이 조성한 거대한 구조물 중 하나로 붕괴시 엄청난 인적, 재산 피해를 발생시키기 때문에 높은 안정성이 요구된다 (Chang et al., 1997;

Noh et al., 2013). 따라서 홍수와 같은 자연재해뿐 아니라 제체 노후화의 가속화로 인한 저수지의 기능 저하의 방지 및 관리 소홀로 인한 인재로부터 재산피해를 예방하고 농업경쟁력을 향상시키기 위하여 적절한 개보수 계획 수립이 필요하다 (Kim, 2005; Lee et al., 2009; Noh, 2014). 이러한 배경으로 현재 한국농어촌공사에서는 정기적인 점검을 통하여 기능이 저하되고 불안정성이 높아진 저수지 제체를 대상으로 개보수 사업이 실시되고 있다. 하지만 대규모 보수 사업에는 많은 비용 뿐 아니라 대량의 자원이 소모된다. 특히 농업용 저수지의 대부분을 이루고 있는 필댐의 경우 시공과 주요 정비 사업에 수많은 자연 골재들이 사용된다. 하지만 자연 골재 채취로 인한 자연 훼손, 토취장 확보의 어려움 등으로 인하여 대체 재료에 대한 요구가 확대되었다 (Lee et al., 2009). 이러한 요구로 인하여 일반 토사의 특성을 띠고 있는 석탄화력발전소 부산물인 바텀 애쉬와 저수지 준설토에 대한 관심이 증가하고 있다 (Kumar et al., 2004; Kuk et al., 2010). 현재 바텀 애쉬와 준설토는 대부분 단순 매립 및 투기되고 있기 때문에 적절한 재활용 대책이 마련될 경우, 야적장 및 회사장 확보 문제뿐 아니라 그로 인해 발생하는 환경적 문제를 해결할 수 있다. (Choi et al., 2013; Kim et al., 2013). 특히 저수지 준설토의 경우 발생처가 한 곳에 집중되어 있지 않으므로 대규모 일괄 처리에는 어려움이 발생할 수 있어 저수지 인근에서 바로 재

* Researcher, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

** Associate professor, Department of Rural Systems Engineering and Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

*** Graduate student, Department of Rural Systems Engineering, Seoul National University

**** Researcher, Research Institute for Agriculture & Life Sciences, Seoul National University

† Corresponding author

Tel.: +82-2-880-4585 Fax: +82-2-873-2087

E-mail: syh86@snu.ac.kr

Received: October 20, 2014

Revised: January 12, 2015

Accepted: January 12, 2015

활용 하는 것이 유리하다.

하지만 바텀 애쉬와 준설토와 같은 대체 재료를 기반시설에 활용하기 위해서는 재료에 대한 적합성 검증과 안정성의 확보가 중요하다. 따라서 기존 연구에서는 바텀 애쉬와 준설토의 환경적 안정성과 공학적 특성 분석이나 건설 재료로 적합한지에 대한 연구가 주로 이루어 졌다 (Chun et al., 1990; Huang, 1990; Rogbeck and Knutz, 1996; Lee, 2008; Kuk et al., 2010; Marto et al., 2010; Park et al., 2012; Choi et al., 2013; Kim et al., 2013; Kim et al., 2014). 하지만 특정 대상에 적용할 경우 일반적 특성 뿐 아니라 그에 따른 안정성 분석이 필요하다. 특히 저수지 제체의 경우 응력 문제뿐 아니라 침투에 대한 문제가 복합적으로 작용하기 때문에 대체 재료가 적용되었을 때의 안정성이 검증되어야 한다 (Noh et al., 2013). 또한 제체 안정성은 제체 구성 물질의 물리적 특성에 영향을 받기 때문에 대체 재료 활용시 각각의 요소가 사면 안전율에 정량적으로 미치는 영향에 대한 분석이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 바텀 애쉬와 준설토 혼합토의 일반적 제체 적용시 사면 안전율을 검토하였으며 각각의 토질정수에 대한 민감도를 분석하였다. 또한 다양한 제체 규모에 대한 검증 을 위하여 제체 높이별로 분석을 실시하였다.

II. 사면안정해석 이론

사면의 원호파괴를 가정하였을 때, 초기 원호 파괴 이론에서 토체를 하나로 보아 발생할 수 있는 오류를 줄이기 위하여

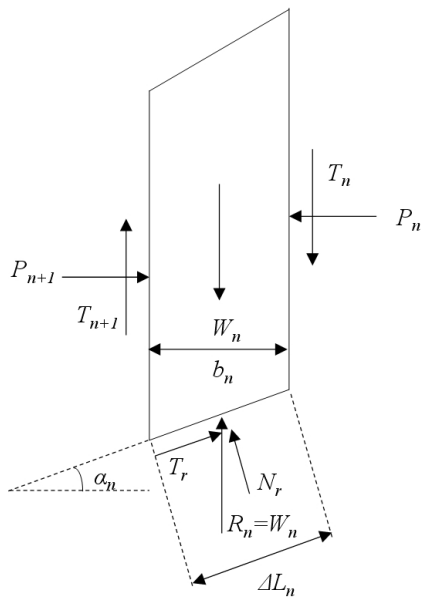


Fig. 1 Forces affecting a soil slide (Bishop, 1955)

절편법이 제안되었다. Bishop (1955)은 절편법을 개선하여 절편 양쪽 방향에 작용하는 힘의 영향을 임의의 각도까지 고려할 수 있는 방법을 제안하였다. Fig. 1은 토체의 n번째 절편에 작용하는 힘을 나타낸다.

Fig. 1에 나타난 힘의 관계를 이용하여 한계 평형법을 적용하면 안전율 (F_s)는 다음과 같다.

$$F_s = \frac{\sum_{n=1}^{n=p} (c' b_n + W_n \tan \phi' + \Delta T \tan \phi')}{\sum_{n=1}^{n=p} W_n \sin \alpha_n} \frac{1}{\cos \alpha_n + \tan \phi' \sin \alpha_n / F_s} \quad (1)$$

여기서, W_n : n번째 토체의 중량 (kN)

c' : 점착력 (kPa)

ϕ' : 내부마찰각 ($^\circ$)

이 식은 양쪽변에 F_s 가 있으므로 시행착오법을 사용하여 최소 안전율을 산출한다.

III. 재료 및 연구방법

본 연구에서는 제체 성토재료 바텀 애쉬와 준설토의 1:1 혼합토의 사용을 가정하였으며 중심 코어 재료로는 점토의 성질을 가진 준설토로 시공한다 가정하였다. 바텀 애쉬와 준설토 혼합토와 준설토의 제체 적용성을 확인하기 위하여 제체 사면 안전율을 검토하였다. 사면 안전율을 분석하기 위한 바텀 애쉬와 준설토 혼합토 및 저수지 준설토에 대한 기본 물성은 시험값을 사용하였다. 또한 일반 토사 구성성분과의 비교를 위하여 X선을 이용해서 원소의 정성·정량 분석을 하는 XRF (X-ray fluorescence) 시험을 실시하였으며 건설재료로서의 활용 가능한지 여부를 판단하기 위하여 토양오염도 분석을 함께 실시하였다. 바텀 애쉬는 영흥도 화력 발전소 시료를 저수지 준설토는 물왕 저수지 준설토를 사용하였다. 본 연구에서 사용한 시료에 대하여 기본 물성 시험과 강도시험, XRF 시험, 토양오염시험에 대한 결과는 각각 Table 1~3과 같다.

바텀 애쉬는 사질토와 유사한 특성을 가지고 있으나 일반적인 사질토에 비하여 점착력이 높으며 준설토는 실트질 흙과 유사한 특성을 가진다. 두 시료의 XRF 시험 결과를 통하여 산출된 각 시료의 산화물 함유량은 흙의 주요 구성 물질인 SiO_2 와 Al_2O_3 가 주를 이루었다. 본 연구에서 사용한 시료의 토양오염실험 결과 토양오염 우려기준에 비해 크게 낮은 것으로 나타나 준설토 및 바텀 애쉬 사용 시 중금속으로 인한 환경성 문제는 없을 것으로 판단된다.

Table 1 Physical properties of materials used in embankments

Properties	γ_t (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	k (cm/sec)	Gs	USCS
BA	10.90	49.33	30.45	4.50E-04	2.21	SW-SM
DS	19.73	19.25	27.53	1.00E-07	2.60	ML
Mixture	15.94	47.14	27.63	1.41E-07	2.40	SP-SC

BA : bottom sh
DS : dredged soil

Table 2 The result of XRF test

Unit(%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	MgO	TiO ₂	CaO	Na ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	MnO	BaO
BA	53.27	21.91	8.21	7.82	2.16	1.47	1.45	1.21	0.97	0.61	0.36	0.34
DS	54.57	26.44	9.60	3.89	2.16	1.18	0.95	0.50	0.19	0.14	0.11	0.09

Table 3 The result of soil contamination tests

Unit(mg/kg)	Cr ⁶⁺	Cu	Pb	Ni	As	Hg	Zn
BA	ND	8.33	0.83	9.07	2.03	ND	8.23
DS	ND	18.97	47.20	19.07	5.97	0.23	93.30

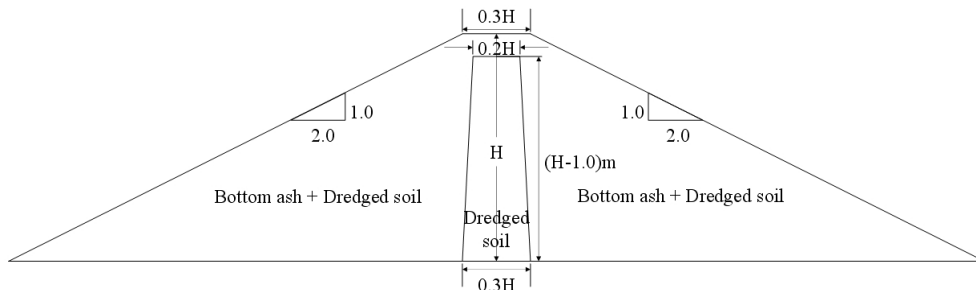


Fig. 2 Cross section of embankments

Table 4 The analysis conditions

Parameter	Condition	Remarks
Height (m)	10, 20, 30, 40, 50, 60	-
Crest width of embankments	30% of the height of embankments	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2002
Water level	Full level	80% of the height of embankments
	Sudden down	-
The base width of cores	30% of the height of embankments	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2002
The height of cores (m)	H-1.0	Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2002
Slope (n:1)	Upstream	2.0
	Down stream	2.0

해석을 위한 제체는 중심 코어형 제체로 설계하였다. 제체 높이 변화에 따른 안전율 및 토질 정수 민감도의 변화를 분석하기 위하여 단면 형상을 단순사면으로 설계하였으며 높이별 단면은 기본 단면에 높이에 따른 동등 비율을 반영하여 설계하였다. 댐마루 폭은 단면의 확대만을 고려하기 위하여 농림축산식품부에서 제공하는 설계 기준에 따라 제체 높이의 30%로 설계하였으며 만수위 조건은 제체 높이의 80%로 고정하였다. 극한 조건의 범위를 분석하기 위하여 상하류 사면의 경사도 n 값은 농업용 저수지 제체 일반적인 사면경사도인 2.0을 적용하였다. 침투류 해석과 사면 안정 해석에는 GEOSLOPE사의 지반공학 해석 프로그램 패키지 GeoStudio 2007을 사용하였다. 각 토질정수의 변화 폭은 각각의 값 변화에 따른 안전율 변화의 경향을 정확히 평가하기 위하여 프로그램에서 제공하는 최대한의 폭을 분석하여 80~120% 값을 활용하였다. 본 연구에서 적용된 대표 단면은 Fig. 2와 같으며 해석 조건은 Table 4에 기술하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 적용 제체 안전율 분석

바텀 애쉬와 준설향합토 및 준설향토의 제체 성토재 및 코어 재료로의 활용 가능성을 분석하기 위하여 각 단면에 이를 적용하였을 때의 사면 안전율을 분석하였다. 사면 안전율 해석

Table 5 Safety factor for each case

Height (m)	Full level		Sudden draw down	
	Upstream	Downstream	Upstream	Downstream
10	5.778	3.255	4.022	3.780
20	4.034	2.111	3.188	3.013
30	3.428	2.000	2.654	2.54
40	2.872	1.876	2.374	2.356
50	2.443	1.474	2.101	2.030
60	2.248	1.187	1.881	1.826

시 수위는 만수위와 수위 급강하시를 고려하였으며 상하류 사면을 구분하여 해석을 실시하였다. 또한 모든 사면 안정 해석은 침투류 해석 후 작성된 침윤선을 적용하여 실시하였다. 각 경우에 대한 사면 안전율 해석 결과는 Table 5와 같다. 또한 Fig. 3은 10 m 대표 단면의 침윤선 및 사면안정 해석 결과를 예시로 표기하였다.

만수위시와 수위 급강하시 상하류 사면 안전율을 분석한 결과, 본 연구에서 고려한 대부분의 경우에서 적합한 것으로 나타났으나 제체 높이가 60 m일 때 만수위시 하류사면 안전율이 1.187로 안전율 기준에 적합하지 못하였다. 따라서 준설향토와 바텀 애쉬를 제체 재료로 활용할 경우, 일정 규모 이상의 제체에서는 재료에 대한 검토가 필요하며 보강에 대한 대안이 필요할 것이라 판단된다. 하지만 일반적 농업용 저수지의 규모는 제체 높이 30 m 이하로 형성되기 때문에 국내 존재하는 농업용 저수지 제체 성토재로 활용하는데 충분할 것이라 사료된다.

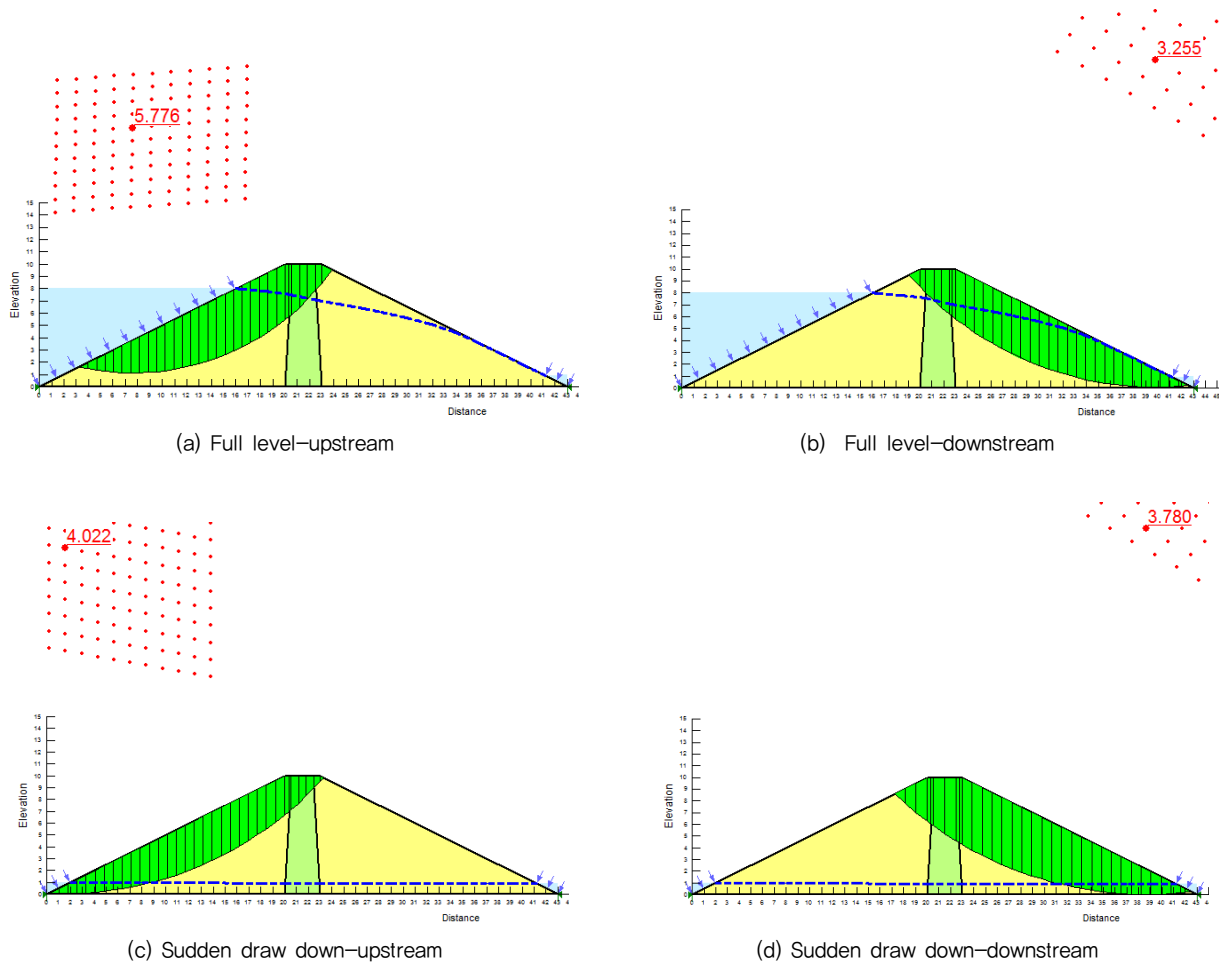


Fig. 3 The result of slope stability (10 m)

2. 제체 높이별 토질 정수 민감도 분석

제체 높이에 따른 사면 안전율에 대한 토질 정수의 민감도 분석은 상류 및 하류사면을 구분하여 분석하였다. 또한 수위 조건은 만수위와 수위 급강하시를 고려하였다. 각 제체 높이별 만수위시 상류 사면 안전율에 대한 성토재와 중심 코어재의 토질 정수의 민감도 분석 결과는 Fig. 4와 같다.

만수위시 상류 사면의 안전율에 대한 각 토질정수의 민감도 분석 결과, 본 연구에서 고려한 제체의 모든 규모에서 사면 안전율은 제체 성토부의 단위 중량과 내부마찰각에 가장 민감하게 반응하였다. 또한 단위 중량은 성토부 제체의 규모가

커짐에 따라 단위 중량에 대한 민감도는 줄어들었으며 성토부의 점착력의 민감도는 상대적으로 다소 증가하였다. 단위 중량의 영향은 증가에 대한 영향보다 감소로 인한 안전율 상승효과가 매우 높았으며 점착력의 영향은 현재 상태에서의 증감에 따른 영향이 선형적인 것으로 나타났다. 이는 제체의 규모가 작을 시 제체의 성토재가 전될 수 있는 반력은 고정되어 있으나 단위중량의 증감으로 인하여 하중이 크게 변화하여 이에 대한 영향이 크게 나타나나 규모가 큰 제체에서는 이미 전체 하중이 높아 안전율이 낮게 산출되기 때문에 이에 대한 영향이 상대적으로 작은 것으로 판단된다. 또한 제체의 높

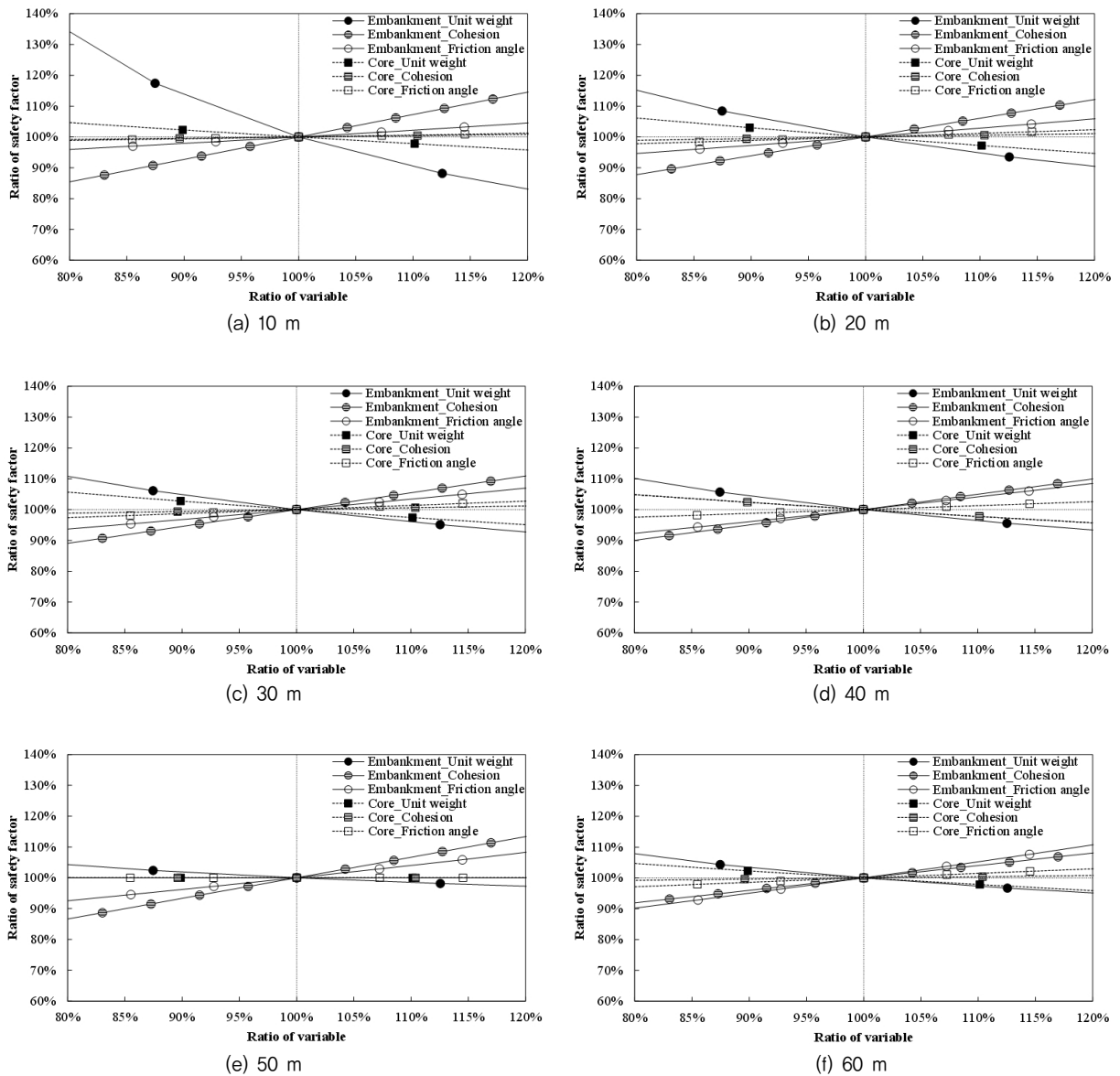


Fig. 4 Sensitivity of soil properties for the safety factor (Full level-Upsteam)

이가 높아지게 되면 제체 규모가 작을 때의 변동폭을 확대하는 효과가 나타나게 된다. 따라서 제체 규모가 클 때의 전체 변동폭은 제체가 낮을 때의 낮은 변동폭 내에서 변동하기 민감도가 작아지는 것으로 판단된다. 강도 정소의 경우, 낮은 높이에서는 성토재의 점착력에 민감하게 반응하지만 30 m 이상의 높이에서는 점착력과 마찰각에 대한 민감도가 유사하게 나타났다. 반면 중심 코어재의 물성은 상대적으로 제체 전체의 안전율에는 크게 영향을 미치지 못하는 것으로 분석되었다. 제체의 중심 코어는 전체 제체 단면에서 차지하는 비율이 매우 작으며 강도정수가 보통 성토재의 강도정수보다 낮다.

본 연구에서 적용한 물성치 또한 성토재로 가정한 바텀 애쉬 준설향합토에 비하여 순수한 준설향토의 강도 정수가 상대적으로 낮기 때문에 중심에서 성토재의 활동에 저항하지 못하여 전체 안전율에 미치는 영향이 작게 나타나며 전체에 미치는 영향이 작아 민감도가 제체의 규모에 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단된다.

제체는 보통 만수위시 상류 사면보다 하류 사면의 안전도의 확인이 더 중요하다. 따라서 각 제체 규모에서 만수위시 하류사면의 안전율에 대한 각 토질정수의 민감도에 대하여 분석하였으며 분석 결과는 Fig. 5와 같다.

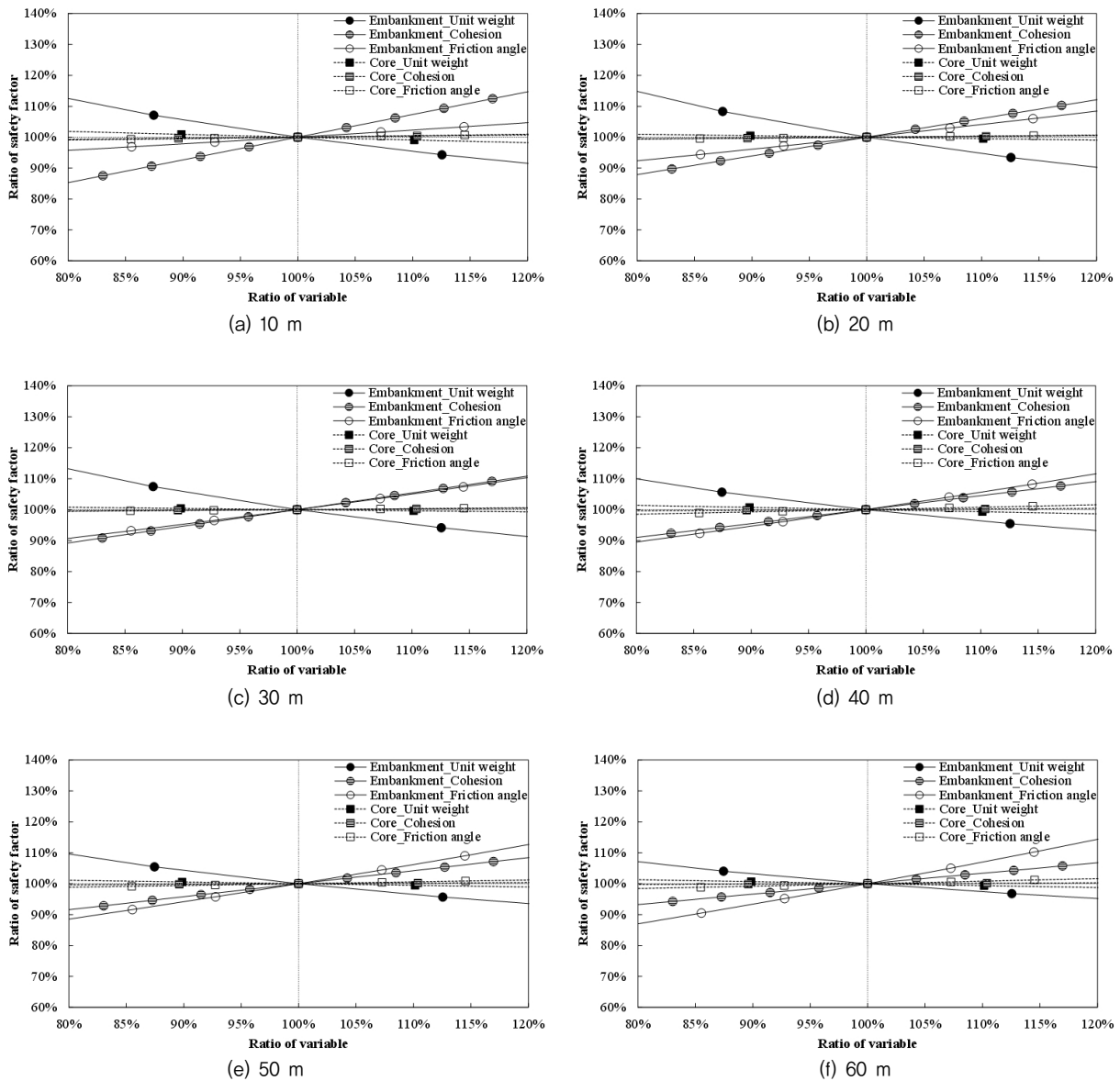


Fig. 5 Sensitivity of soil properties for the safety factor (Full level-Downstream)

제체 규모에 따라 각 부분의 토질정수의 변화가 만수위시 하류 사면의 안전율에 미치는 영향을 분석한 결과, 하류 사면의 안전율 또한 상류 사면의 경우와 유사한 경향을 나타냈다. 제체 성토부의 단위중량과 내부마찰각의 변화에 가장 민감하게 반응하였으며 제체의 규모가 커짐에 따라 그 민감도가 상대적으로 줄어드는 것으로 나타났다. 또한 낮은 변동 범위 안에서는 그 영향이 가장 낮은 것으로 분석되었으며 상류사면에 비하여 상대적으로 성토부의 단위중량에 더 적은 영향을 받는 것으로 해석되었다. 이는 상하류 사면의 경사도가 같을 때, 만수위시 제체의 사면 안전율은 하류사면의 안전율이 상류사면의 안전율에 비해 낮기 때문에 그 변화의 폭이 더 낮은

것으로 판단된다. 제체 높이 변화가 강도 정수의 민감도에 미치는 영향은 상류 사면에서의 경우보다 더 변화가 크게 나타났다. 높이가 높아짐에 따라 성토재의 점착력에 대한 민감도는 점차 낮아지고 마찰각에 대한 민감도는 점차 증가하여 30 m에서는 거의 유사하게 나타났다. 50 m 이상의 높이에서 마찰각의 민감도가 더 크게 나타났다.

저수지 제체는 만수위시와 방류로 인하여 수위가 급강할 때 위험도가 증가한다. 따라서 수위 급강하시 사면 안전율의 검토가 필요하며 토질 정수가 미치는 영향의 정량적인 판단이 필요하다. 따라서 제체 높이별로 수위 급강하시 사면 안전율에 대한 토질 정수의 민감도를 분석하였으며 Fig. 6은 상

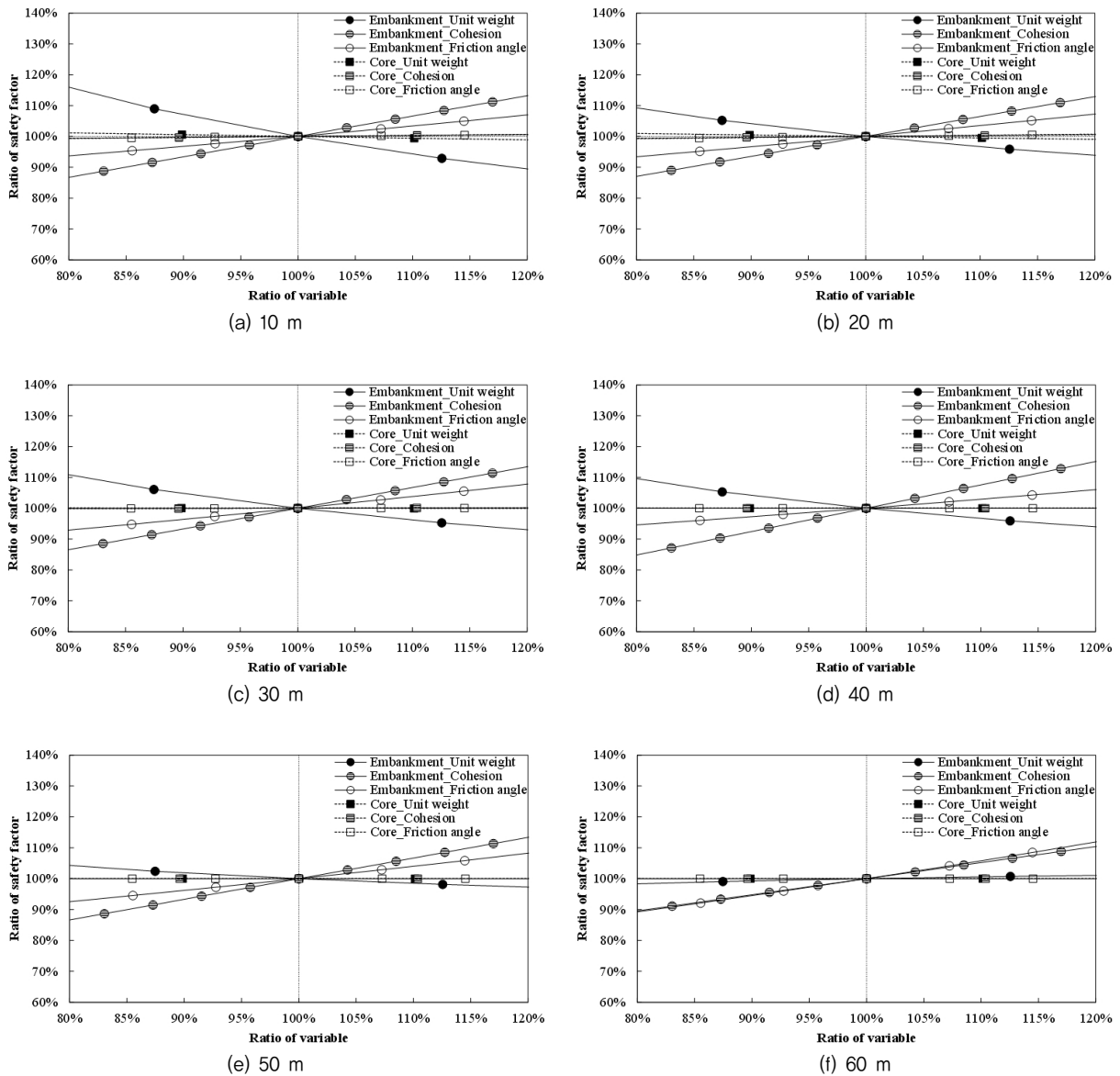


Fig. 6 Sensitivity of soil properties for the safety factor (Sudden draw down-Upstream)

류사면에 대한 해석결과를 나타낸다.

높이별 수위 급강하시 상류 사면의 안전율에 대한 토질 정수의 민감도 분석 결과 만수위시와 유사한 결과를 나타냈다. 중심 코어 부분의 토질 정수는 전체 안전율에 큰 영향을 미치지 않으며 중심 코어는 차수가 목적으로 하류부의 포화대를 낮춤으로써 안전율을 높이기 때문에 다른 정수에 대한 영향이 작은 것으로 나타났다. 만수위시 상하류사면 안전율에 대한 단위 증량이 민감도가 제체의 높이가 높아짐에 따라 작아지지만 가장 높은 60 m 일 때 또한 다른 정수에 비하여 상대적으로 높은 민감도를 보였으나 수위 급강하시 상류 사면의 안

전율 분석에서는 민감도가 점차 줄어들어 60 m에서는 거의 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다. 또한 만수위시와 같이 높이가 높아짐에 따라 제체 성토재의 점착력 민감도가 증가하여 60 m에서는 전체 고려 요소 중에서 가장 높은 민감도를 나타냈다. 따라서 바텀 애쉬와 준설 혼합토의 제체 활용시 큰 규모에서는 점착력과 마찰각에 대한 관리가 필요하다.

마지막으로, 하류 급강하시 하류 사면 안전율에 대한 각 토질 정수의 민감도에 대하여 분석하였다. Fig. 7은 각 높이에서의 토질정수에 대한 민감도 분석 결과를 나타낸다.

수위 급강하시 하류 사면 안전율에 대한 토질정수의 민감

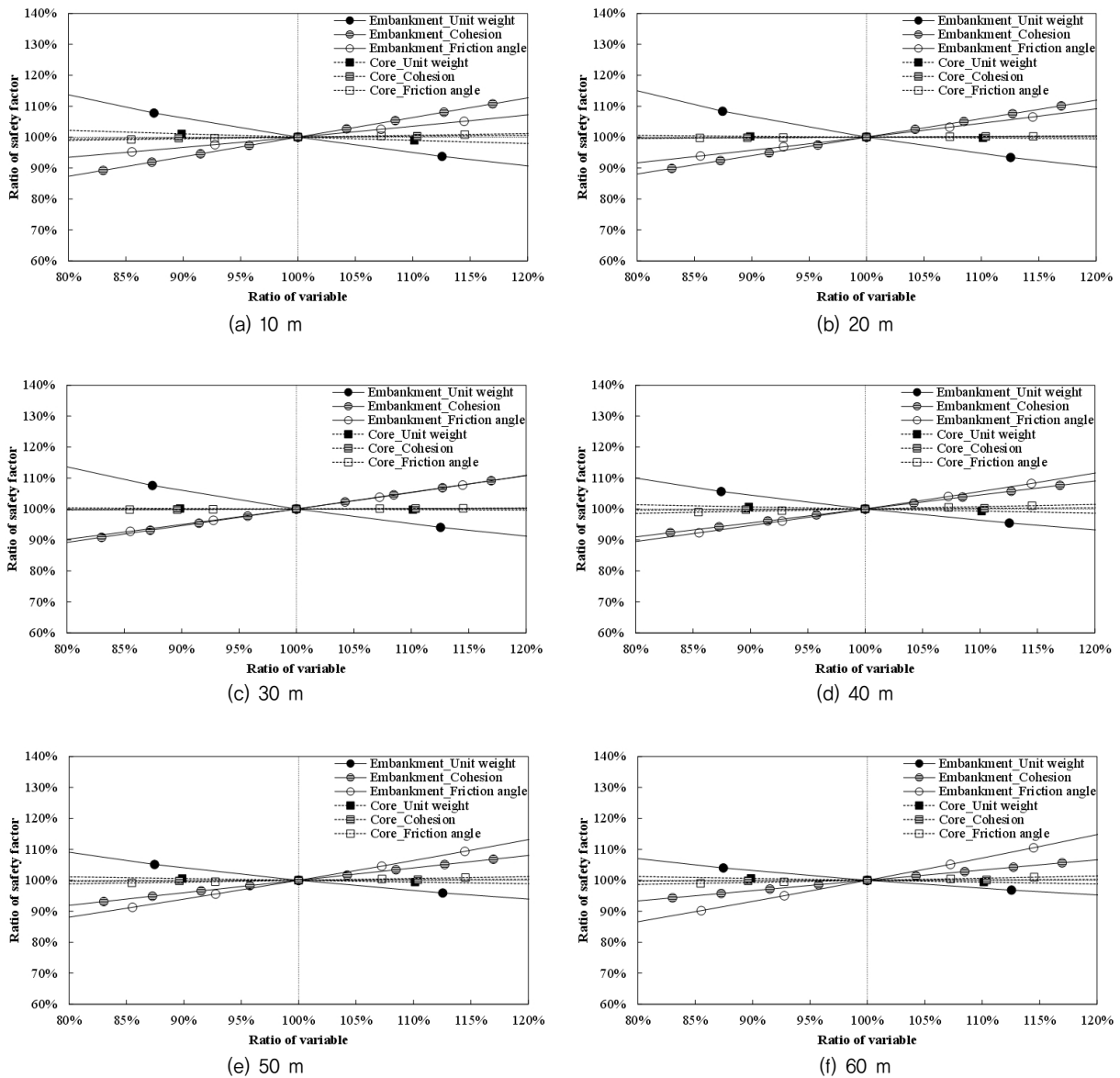


Fig. 7 Sensitivity of soil properties for the safety factor (Sudden draw down-Downstream)

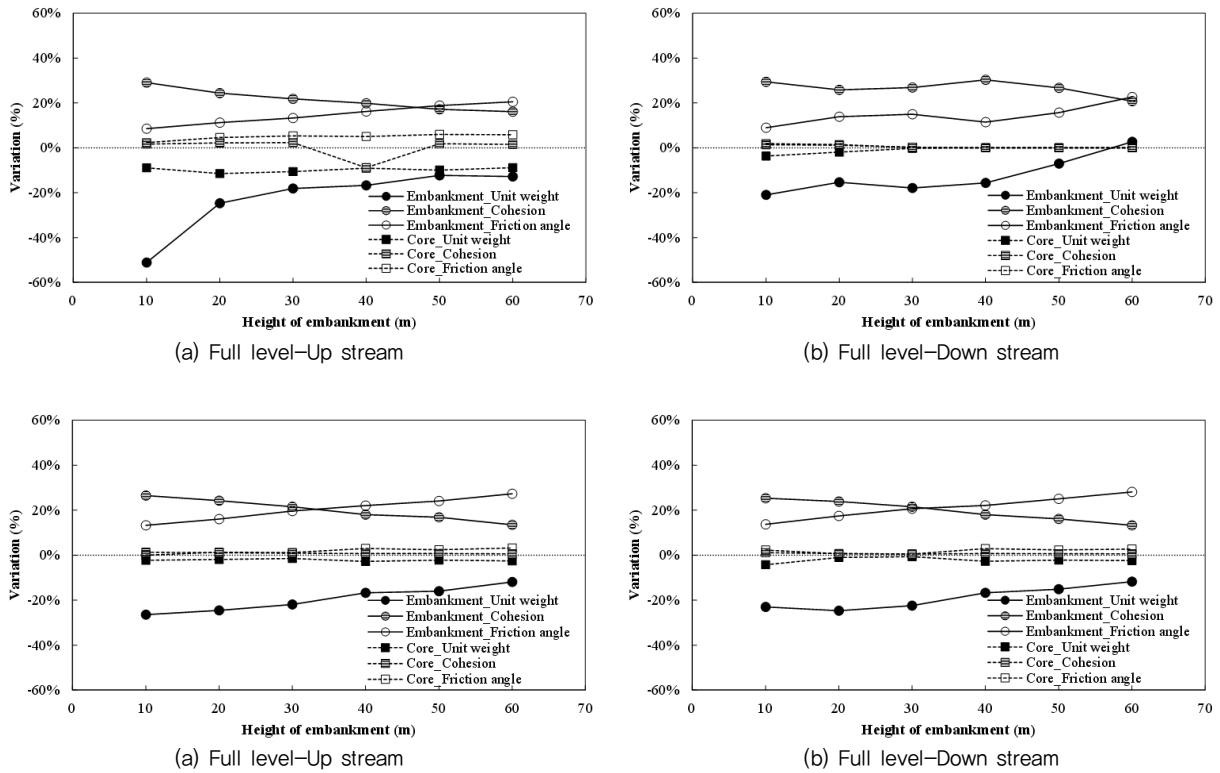


Fig. 8 Change of the variation of sensibility for each parameters according to increase the height of the embankments

도는 다른 결과와 유사한 경향을 나타냈다. 제체 성토부의 단위 중량과 내부마찰각이 가장 높은 민감도를 보였으며 제체 높이가 높아짐에 따라 민감도가 낮아졌다. 또한 상류 사면의 결과와 같이 제체 높이가 높아짐에 따라 성토재 점착력에 대한 민감도가 높아져 60 m에서는 단위중량과 유사한 민감도를 보였다.

3. 높이 변화에 따른 민감도 변화 분석

제체의 규모 변화에 따른 민감도 변화에 대한 정량적 분석을 위하여 제체 높이별로 토질 정수가 80 %에서 120 %로 증가할 때 변화하는 원상태 안전율 대비 비율의 차이를 분석하였다. Fig. 8은 제가 높이가 증가함에 따른 각 토질정수의 민감도 변화를 나타낸다.

제체의 높이가 증가함에 따라 제체 단위 중량 증가에 따른 안전율 감소 효과가 크게 낮아 졌으며 내부마찰각 증가에 따른 안전율 상승효과가 커지는 것으로 나타났다. 또한 점착력 증가에 따른 안전율 상승효과는 다소 낮아지는 것으로 분석되었다. 반면 중심 코어 재료의 단위중량, 내부 마찰각 및 점착력은 제체 높이가 증가하여도 민감도의 변화가 매우 낮은 것으로 나타났다. 이는 중심 코어 재료의 강도 정수가 전체 안

전율에 미치는 영향이 낮기 때문인 것으로 판단된다. 이와 같은 경향은 만수위시 상류사면에서 가장 뚜렷하게 나타났으며 다른 조건에서는 유사한 경향을 나타냈다. 따라서 제체의 증가함에 따라 각각의 토질 정수가 안전율에 영향을 미치는 정도가 달라지기 때문에 바텀 애쉬와 준설 혼합토의 제체 적용시 제체 높이에 따른 토질 정수의 품질관리가 필요할 것이라 판단된다.

V. 요약 및 결론

본 연구에서는 바텀 애쉬와 준설 혼합토의 저수지 제체 적용 가능성을 살펴보기 위하여 제체 규모에 따른 사면 안전율과 토질 정수의 민감도에 대하여 분석하였다. 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 각 단면에 바텀 애쉬 준설 혼합토 및 준설토 물성치를 적용하여 각 사면의 활동 안전율을 분석하였으며 만수위시와 수위 급강하시에 대하여 상하류 사면 안전율을 계산하였다. 분석 결과, 60 m일 때 만수위시 하류사면 안전율을 제외하고 모든 경우 기준에 적합한 것으로 판단되며 일반적

농업용 저수지 제체 규모를 생각할 때 바텀 애쉬 준설향합토는 제체 성토재로 적합할 것이라 판단된다.

2. 민감도 분석 결과, 모든 수위 조건과 상하류 사면 모두 사면 안전율은 제체 성토부의 단위 중량과 내부마찰각에 가장 민감하게 반응하였고 성토부 제체의 규모가 커짐에 따라 단위 중량에 대한 민감도는 줄어들었다. 또한 단위 중량은 증가로 인한 안전율 감소보다 단위 중량이 작아짐으로 인한 안전율 증가의 폭이 더 크게 나타났다. 하지만 낮은 변동 범위 안에서는 낮은 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 강도 정수인 점착력과 마찰각의 경우 제체의 규모가 커짐에 따라 점착력의 민감도는 상대적으로 다소 증가하였으나 마찰각의 민감도는 다소 감소하는 것으로 나타났다.
3. 높이 변화에 따른 민감도의 변화는 각 수위 조건과 상하류 사면에 따라 다소 다르게 나타났으며 수위 급강하 시 상류 사면의 경우 제체 높이가 증가함에 따라 성토재 단위 중량의 민감도가 매우 낮아져 60 m에서는 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 따라서 바텀 애쉬와 준설향합토를 제체에 적용시 기준하는 상황에 따라 적합한 토질 정수 관리가 필요하다. 하지만 한 재료에 대한 단위중량, 점착력, 마찰각은 따로 분리하여 관리할 수 없으며 각각이 영향을 미치기 때문에 이에 대한 종합적 고려가 필요할 것이라 판단된다.
4. 제체의 규모 변화에 따른 민감도 변화에 대한 정량적 분석 결과, 모든 수위 조건과 상하류 사면 모두에서 제체의 높이가 증가함에 따라 제체 단위 중량 증가에 따른 안전율 감소 효과가 낮아 졌고 내부마찰각 증가에 따른 안전율 상승 효과가 커지는 것으로 나타났으며 점착력 증가에 따른 안전율 상승효과는 다소 낮아졌다.
5. 본 연구결과를 종합적으로 분석하여 볼 때, 전체 안전율은 단위중량이 감소할 경우에는 단위중량의 영향으로 안전율이 크게 증가하나 단위중량이 증가할 경우, 그로 인한 안전율 감소보다 점착력과 마찰각의 증가로 인한 안전율 상승 효과가 더 높게 나타났다. 다짐을 많이 하면 단위중량 높아지고 강도정수인 점착력과 마찰각이 변화하기 때문에 바텀 애쉬와 준설향합토의 제체 활용을 위해서는 단위 중량을 결정하는 다짐관리가 중요할 것이라 판단된다.

사 사

이 연구는 2012년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임 (2012R1A1A1010633)

REFERENCES

1. Bishop, A. W., 1955. The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique* 5: 7-17
2. Chang, P. W., C. S. Song, T. K. Park, C. W. Woo, and J. W. Won, 1997. Studies on structural degradation of agricultural reservoirs in Kyungki province. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 39(4):90-97 (in Korean).
3. Choi, W. S., Y. H. Son, J. S. Park, S. K. Noh, T. H. Bong, 2013, Analysis of strength characteristic for bottom ash mixtures as mixing ratio and curing methods. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3):129-140 (in Korean).
4. Choi, W.S., Y.H. Son, J.S. Park, S.K. Noh, and T.H. Bong, 2013. Analysis of Strength Characteristic for Bottom Ash Mixtures as Mixing Ratio and Curing Methods. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 55(3): 129-140. (in Korean)
5. Chun, B. S., Y. I. Koh, M. Y. Oh, and H. S. Kwon, 1990. Studies on engineering properties of coal ash obtained as industrial wastes. *Journal of Korean Society of Civil Engineers* 10(1): 115-124 (in Korean).
6. Huang, W. H., 1990. The use of bottom ash in highway embankments, subgrades, and subbases, Purdue University.
7. Kim H. T., 2005. The cause of the fault of fill dam and the direction of facility safety inspection against flood. *Journal of Facility Safety* 19: 48-61 (in Korean).
8. Kim, T. W., Y. H. Son, J. S. Park, S. K. Noh, T. H. Bong, 2014, The Electrical Properties and Unconfined Compression Strength of Bottom Ash. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 56(1):21-30 (in Korean).
9. Kim, T. W., Y. H. Son, T. H. Bong, S. K. Noh, J. S. Park, 2013, The time-dependent behavior characteristic of bottom ash by maximum particle size and application of creep models. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 55(5):9-16 (in Korean).
10. Kuk, K. K., H. Y. Kim, and B. S. Chun, 2010. A study on the engineering characteristics of power plant coal ash. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 11(5): 25-34 (in Korean).
11. Kumar, S., and P. Vaddu, 2004. Time dependent strength and stiffness of PCC bottom ash-bentonite mixtures. *Soil & Sediment Contamination* 13(4): 405-413.
12. Lee, J., J. Jeon, and H. Lim, 2009. Assessment of the priority order of monitoring devices on maintenance for the long-term safety of existing fill dam. *Journal of Korean Geo-Environmental Society* 10(7): 67-79 (in Korean).
13. Lee, Y. H., 2008. A study on the utilization of bottom ash as a substitute material for sand in vertical drain. Master's degree,

- Hanyang University (in Korean).
14. Marto, A., K. A. Kassim, A. M. Makhtar, L. F. Wei, and Y. S. Lim, 2010. Engineering characteristics of Tanjung bin coal ash. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering* 15: 1117-1129.
 15. Noh, S. K., 2014. Recyclability of bottom ash and dredged soil mixture based on physical characteristics and life cycle CO₂ emissions. Doctoral Dissertation, Seoul National University (in Korean).
 16. Noh, S. K., Y. H. Son, T. H. Bong, J. S. Park, W. S. Choi, 2013. Analysis of the Effects for the Safety Factor of Slope and Seepage According to Change Cross-Section in the Reservoir Embankment. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 55(6):37-46 (in Korean).
 17. Park, J. S., W. S. Choi, T. W. Kim, and Y. H. Son, 2012. Evaluation of environmental stability and geochemical properties of coal combustion products. The 2012 KSAE Annual Conference (in Korean).
 18. Rogbeck, J., and A. Knutz, 1996. Coal bottom ash as light fill material in construction. *Waste Management* 16(1): 125-128.