

## 지진하중을 받는 펠램 정부변위에 영향을 미치는 입력물성에 대한 민감도 분석

### Sensitivity Analysis of Rockfill Parameters Influencing Crest Displacements of CFRD Subjected to Earthquake Loading

하익수\*

Ha, Ik Soo

신동훈\*\*

Shin, Dong Hoon

#### ABSTRACT

In this study, quantitative sensitivity analysis on rockfill material influencing the dam crest displacement of Concrete-Faced Rockfill Dam(CFRD) subjected to earthquake loading was carried out. The purpose of this study is to indicate the most important input parameter and to show the quantitative variation of displacement at the crest of CFR type dam during earthquake loading with this input parameter. From the sensitivity analysis, it was found that the crest displacement of CFR type dam subjected to dynamic loading was absolutely affected by the shear modulus of rockfill material and the effect of friction angle of it was negligible. This relative difference of sensitivity was more outstanding in case of crest settlement than in case of crest horizontal displacement. Also, it was found that the extent of effect of shear modulus on the displacement at the crest of CFRD due to dynamic loading decreased as maximum amplitude of input acceleration increased.

#### 1. 서 론

콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(Concrete-Face Rockfill Dam, 이하 "CFRD"라 한다.)이란 댐 단면이 물과 접하는 상류부에 차수를 위한 프린스(plinth) 및 콘크리트 표면차수벽과 차수벽을 지지하는 차수벽 지지존 및 암석존으로 구성되는 댐을 말한다(댐설계기준, 2003). CFR 형식의 댐은 그 시공성, 경제성, 내진성능 우수성 등의 이유로 최근 들어 대댐(높이 15m 이상) 시공 시 가장 많이 적용되는 댐 형식이다.

\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원, 선임연구원/공학박사

\*\* 비회원·한국수자원공사 수자원연구원, 책임연구원/공학박사

현재 필댐(사력댐과 CFRD)의 내진성능 및 안정성을 수치해석을 통한 변형해석으로 판단하고자 할 때, 댐 정상부 응답변위를 기준값(댐 높이의 1% 이하, 한국시설안전기술공단, 2004)과 비교함으로써 내진 안정성을 판단하고 있다. 따라서 지진하중에 대한 댐정상부의 변위응답이 필댐의 내진안정성을 판단하는 가장 중요한 기준이라고 할 수 있다.

일반적으로 CFRD의 동적거동을 평가하는 경우, 콘크리트 표면차수벽의 구조적 역할은 무시된다(Uddin, 1992). 따라서 CFRD의 거동은 제체 구성재료의 대부분을 차지하는 사력 및 사석재료의 공학적 특성에 의존한다고 할 수 있다.

본 연구는 지진하중을 받는 CFRD의 정상부 변위에 대한 사력재료 주요물성들의 민감도를 정량적으로 분석하는데 그 목적이 있다.

민감도분석을 위한 사력재료 물성조합은 국내(한국수자원공사)에서 수행된 대형삼축압축시험 결과로 산정된 물성에 대해, 기 조사된 사력재료 통계특성치(물성범위, 분포특성, 물성간 상관성)(하익수 등, 2005)를 바탕으로 Latin Hypercube 표본추출기법에 의해 27개를 구성하고, 각각에 대해 동적수치해석을 수행하여 지진하중에 의한 댐 정부 변위응답을 고찰하였다. 해석 대상댐은 가장 최근에 축조된 CFR 형식의 대곡댐으로 하였고 해석에 사용된 입력지진동은 Hachinohe 지진파를 사용하였다. 입력지진동으로 사용된 Hachinohe 지진파의 최대가속도 크기는 0.11g와 0.154g로 정하였는데 이는 국내에 축조된 모든 CFRD의 설계진도는 이 두 값 중의 하나이기 때문이다.

## 2. 민감도분석을 위한 사력재 물성 및 통계특성치 요약

민감도 분석을 위한 수치해석 모델은 복잡한 모델을 사용하는 경우 변수가 많아지는 점과 선정된 모델에 사용된 입력변수들의 물리적 의미를 쉽게 짐작할 수 있는 모델을 선택해야 한다는 점을 감안하여 Mohr-Coulomb 모델을 해석모델로 선정하였다.

통계분석시 사용된 사력재료 물성은 국내에서 수행된 사력재에 대한 대형삼축압축시험 결과로 도출된 물성값을 이용하였다. Mohr-Coulomb 모델 적용시 필요한 입력정수로는 단위중량, 전단탄성계수, 마찰각, 점착력 등이 있으며 이중 단위중량은 모든 사력재에 대해 시험시 단위중량이 거의 비슷하여 민감도분석시 일정한 값으로 하였고 마찰각, 점착력, 전단탄성계수는 기 조사된 통계특성치를 바탕으로 민감도분석에 이용하였다. 사력재료의 입력변수에 따른 민감도분석 수행을 위해 댐 기초지반과 콘크리트차수벽의 입력정수는 댐 공사지에서 제시된 고정된 입력정수를 사용하여 민감도분석시 고정값으로 하였다.

기존에 조사된 사력재 물성의 통계특성치는 표 1과 그림 1에 요약되어 있다. 각 변수는 상관성이 작긴 하나 세 변수가 완전한 독립적 변수가 아닌 것으로 분석되어 변수 상호간의 상관성을 고려하는 대역적 민감도분석법을 적용하였다. 민감도분석시 각 변수 표본 추출은 같은 확률을 갖도록 물성 분포곡선을 3등분하고 각 등분된 분포곡선내에서 평균 확률을 가지는 표본을 각각 1개씩 추출하는 방법(Latin Hypercube 표본추출기법)을 사용하였다. 이를 통해 추출된 각각의 변수 표본값은 표 2와 같다.

표 1. 사력재료 주요 물성 분포 특성치

입력변수	분포	범위	평균	표준편차
마찰각( $^{\circ}$ )	정규분포(90% 신뢰도)	34.1~45.6	39.04	2.35325
점착력( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	정규분포(90% 신뢰도)	0.10~1.61	0.669	0.33678
전단탄성계수( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	대수정규분포(90% 신뢰도)	88.5~627	282.4	157.883

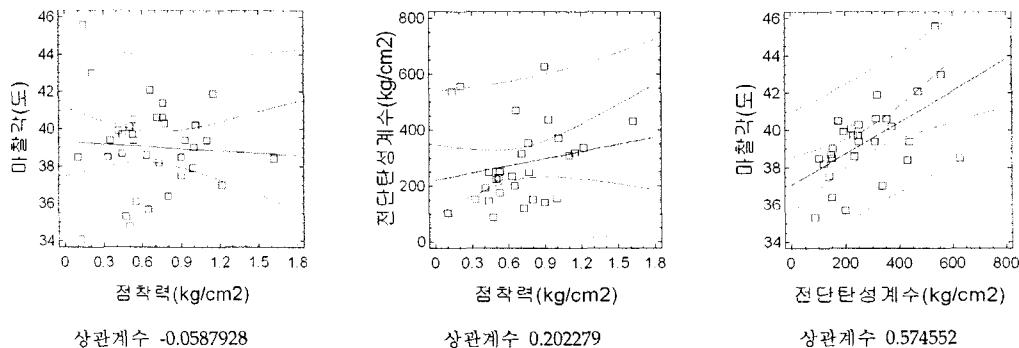


그림 1. 사력재 주요물성 간 상관성

표 2. 변수의 추출 표본 물성값

민감도 분석에 사용된 사력재 입력물성	추출 표본 물성값		
	1	2	3
마찰각( $^{\circ}$ )	36.8	39.0	41.3
점착력( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	0.344	0.669	0.996
전단탄성계수( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )	149	247	409

### 3. 민감도분석을 위한 동적수치해석

범용 지반해석 프로그램인 FLAC4.0을 이용한 수치해석을 통한 민감도분석을 수행하였다. 해석 모델은 Mohr-Coulomb 모델을 사용하였다. 수치해석시 해석요소망은 그림 2와 같다.

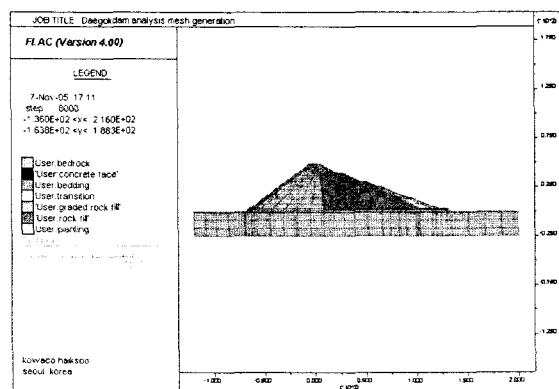


그림 2. CFRD 해석요소망

### 3.1 입력지진동

입력가속도는 Hachinohe 지진파를 스케일 조정한 가속도 시간이력을 사용하였고 해석면 바닥에서의 가속도의 최대진폭을 조정하여 댐체 바닥에서 최대가속도가 각각 0.11g, 0.154g가 되도록 최대가속도 크기를 규모 조정하였다. 그림 3과 그림 4는 예로써 댐체 바닥에서 최대가속도 0.11g가 발현되도록 조정되어 해석면 바닥에 입력된 Hachinohe 지진파 시간이력과 지진파의 Fourier Spectra를 각각 나타낸 것이다.

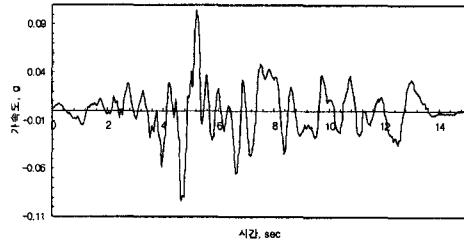


그림 3. 입력 가속도 시간이력 예

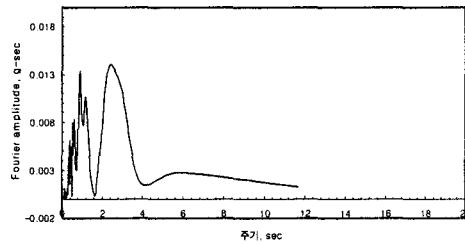


그림 4. 입력가속도의 Fourier Spectra

### 3.2 입력물성

물성구분은 기초지반, 콘크리트 차수벽, 사력재료로 구분하였다. 즉, 그림 2에서 기초지반과 콘크리트 차수벽을 제외한 나머지 영역은 모두 동일한 사력재료로 구분하였다. 사력재료의 물성값은 표 2에서 추출된 각각의 값을 조합하여 27개의 물성조합을 만들었다.

표 3. CFRD 수치해석 입력물성

구분 단면#	기초지반			Face Slab			사력재			$\gamma$ (t/m <sup>3</sup> )
	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	G (t/m <sup>2</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	G (t/m <sup>2</sup> )	c (t/m <sup>2</sup> )	$\phi$ (°)	G (t/m <sup>2</sup> )	
1	10.0	45	8.3E5	100	60	8.3E5	3.44	36.8	1490	2
2							3.44	36.8	2470	
3							3.44	36.8	4090	
4							6.69	36.8	1490	
5							6.69	36.8	2470	
6							6.69	36.8	4090	
7							9.96	36.8	1490	
8							9.96	36.8	2470	
9							9.96	36.8	4090	
10							3.44	39	1490	
11							3.44	39	2470	
12							3.44	39	4090	
13							6.69	39	1490	
14							6.69	39	2470	
15							6.69	39	4090	
16							9.96	39	1490	
17							9.96	39	2470	
18							9.96	39	4090	
19							3.44	41.3	1490	
20							3.44	41.3	2470	
21							3.44	41.3	4090	
22							6.69	41.3	1490	
23							6.69	41.3	2470	
24							6.69	41.3	4090	
25							9.96	41.3	1490	
26							9.96	41.3	2470	
27							9.96	41.3	4090	

### 3.3 동적수치해석 결과

그림 5와 그림 6은 각각 바닥가속도 0.11g 작용시 동적수치해석결과 나타난 댐 정부의 횡방향, 연직방향 변위 시간이력 예(case 1)를 나타낸 그림이다. 표 4는 수치해석결과 나타난 최대가속도 크기별 각 물성조합에 따른 동적해석 결과 나타난 댐 정부 변위를 나타낸 것이다.

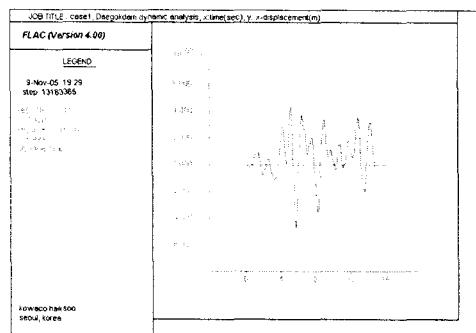


그림 5. 동적해석결과 횡방향 변위  
시간이력 예(0.11g, case 1)

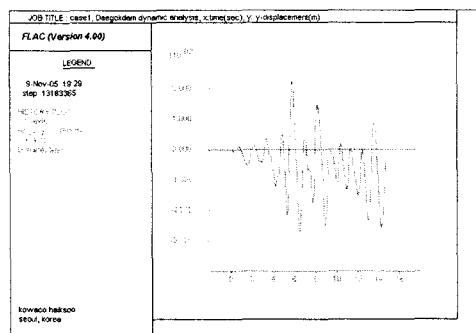


그림 6. 동적해석결과 침하량  
시간이력 예(0.11g, case 1)

표 4. 동적 수치해석 결과 댐정부 변위

구분 단면#	0.11g		0.154g	
	최대횡변위(cm)	최대침하량(cm)	최대횡변위(cm)	최대침하량(cm)
1	4.67	2.71	7.39	3.13
2	5.48	1.86	8.37	2.17
3	5.26	1.01	7.93	1.31
4	4.49	2.67	6.94	3.26
5	5.48	2.04	8.34	2.39
6	5.21	1.09	7.88	1.44
7	4.48	2.68	6.94	3.31
8	5.48	2.03	8.34	2.40
9	5.23	1.09	7.88	1.44
10	4.61	2.69	7.31	3.12
11	5.47	1.89	8.36	2.21
12	5.26	1.02	7.92	1.34
13	4.49	2.67	6.97	3.26
14	5.48	1.94	8.32	2.42
15	5.22	1.09	7.87	1.44
16	4.48	2.62	6.93	3.27
17	5.46	1.93	8.35	2.39
18	5.22	1.09	7.89	1.45
19	4.58	2.68	7.28	3.17
20	5.48	1.95	8.36	2.26
21	5.25	1.03	7.81	1.36
22	4.50	2.63	6.92	3.28
23	5.46	1.94	8.33	2.39
24	5.23	1.10	7.90	1.45
25	4.50	2.64	6.93	3.31
26	5.48	1.94	8.32	2.41
27	5.22	1.09	7.89	1.44

#### 4. 지진하중시 CFRD 정부변위에 영향을 주는 사력재 물성에 대한 민감도분석 결과

본 연구에서는 민감도지수 중 편상관계수(Partial Correlation Coefficient, PCC)의 절대값을 비교함으로써 민감도를 정량적으로 분석하였다.

지진하중을 받는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 정부변위는 전단탄성계수에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히, 침하량은 전적으로 전단탄성계수에만 영향을 받음을 알 수 있었다. 마찰각은 지진하중에 의한 CFRD 정부변위에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 또한, 지진하중에 의한 CFRD 정부변위의 전단탄성계수에 대한 영향도는 지진가속도가 크면 더 작은 것으로 나타났다.

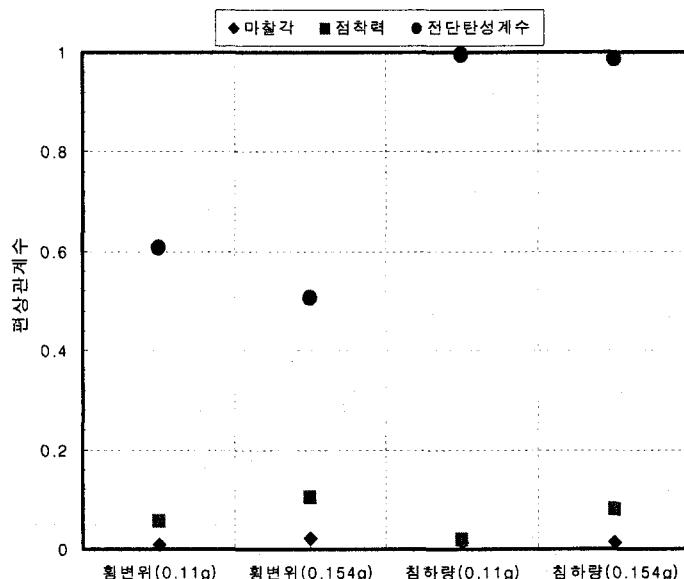


그림 7. 지진하중 작용시 CFRD 정부변위 민감도

#### 5. 결 론

본 연구에서는 사력재료 주요물성들이 지진하중 작용시 CFRD 정부변위 거동에 미치는 영향도를 정량적으로 분석하여 CFRD의 정상부 변위에 주된 영향을 미치는 물성을 결정하고자 하였다. 이러한 민감도분석을 통해 동적해석시 사력재료 물성값 중 중요하게 고려해야 할 물성을 제시하였다.

- (1) 지진하중을 받는 콘크리트 표면차수벽형 석괴댐(CFRD)의 정부변위는 전단탄성계수에 크게 영향을 받는 것으로 나타났으며 특히, 침하량은 전적으로 전단탄성계수에만 영향을 받음을 알 수 있었다.
- (2) 마찰각은 지진하중에 의한 CFRD 정부변위에는 전혀 영향을 주지 않는 것으로 나타났다.
- (3) 지진하중에 의한 CFRD 정부변위의 전단탄성계수에 대한 영향도는 지진가속도가 크면 더 작은 것으로 나타났다.

## 참고문헌

1. 하의수, 서민우, 정우성, 오병현, “단기적 락펠댐 침하량에 영향을 미치는 사력재료 입력물성들에 대한 민감도분석”, 2005 대한토목학회 정기학술대회 논문집, 2005, pp.5512-5515.
2. 한국수자원학회, “건설교통부제정 댐설계기준”, 2003.
3. 한국시설안전기술공단, “기존댐의 내진성능 평가 및 향상 요령”, 2004.
4. Uddin, N., “Seismic analysis of earth-core and concrete-face rockfill dams”, PhD thesis, State Univ. of New York at Buffalo, 1992.