

지진 시 필댐의 침하량과 지반진동 변수 간의 상관관계 분석

Evaluation of Correlation between Earthquake Induced Settlement of Fill Dams and Ground Motion Parameters

백종민¹, 박두희^{2*}, 윤지남³, 최병한⁴

Jongmin Baeg¹, Duhee Park^{2*}, Jinam Yoon³, Byoung-Han Choi⁴

¹Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Env. Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

²Member, Professor, Dept. of Civil and Env. Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

³Nonmember, Ph.D. Student, Dept. of Civil and Env. Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro, Seoul 04763, Republic of Korea

⁴Nonmember, Senior Researcher, Ph.D., Rural Research Institute, Korea Rural Community Co., E870, Haen-ro Sangnok-gu, Ansan-si, Gyeonggi-do 15634, Republic of Korea

ABSTRACT

Seismically induced settlement exceeding dam freeboard may lead to a dam failure. The prediction of settlement is important also because it is also reported to be strongly related to longitudinal crack width and depth, which are critical indices used for safe evaluation of dams. The empirical correlation derived from numerical simulations is most often used. In this study, two-dimensional dynamic nonlinear analyses are performed using representative CFRD and ECRD fill dams. A total of 20 recorded motions are used to account for the influence on ground motion intensity and magnitude. The calculated crest settlements are correlated to four ground motion parameters, which are peak ground acceleration (PGA), peak ground velocity (PGV), Arias Intensity (I_A), and magnitude. It is demonstrated that using ground motion parameters in addition to PGA can significantly increase the prediction accuracy.

요 지

지진 시 댐에 여유고 이상의 과도한 침하가 발생하는 경우 댐의 붕괴로 이어질 수 있다. 댐의 침하는 댐의 손상 예측에 중요한 지표로 사용되는 횡균열 폭과 깊이에 높은 상관성을 가진 것으로 알려져 있으므로 댐의 손상 평가에서 정확한 침하량 예측이 중요하다. 국내에서는 국외에서 수치해석을 통하여 도출된 경험적인 식이 댐의 손상 평가에 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 필댐으로 분류되는 콘크리트 표면차수벽 석괴댐(CFRD)과 코어형 석괴댐(ECRD) 대표 단면에 대한 2차원 비선형 동적 해석을 수행하여 댐마루의 침하량을 계산하였다. 입력지진파의 지진강도와 지진규모 등의 영향을 복합적으로 고려하기 위하여 20개의 계측기록을 해석에 사용하였다. 수치해석으로 계산된 결과를 바탕으로 댐마루 침하량을 예측하기 위해 지진파의 최대지반가속도, 최대지반속도, Arias Intensity, 지진규모와의 상관관계를 도출하였다. 평가 결과, 최대지반가속도에 추가적인 변수를 사용할 경우, 상관성이 크게 향상되는 것으로 나타났다.

Keywords : Earthquake, Fill dam, Crest settlement, Ground motion parameter, Correlation

1. 서론

전 세계적으로 국지적인 집중호우, 태풍, 지진 등의 극한 자연재해의 발생 빈도가 점차적으로 증가하고 있으며 이로 인한 피해 역시 광범위하게 발생하고 있다. 특히 지진은 최근 들어 발생 횟수와 규모 측면에서 뚜렷한 증가추

Received 5 Nov. 2018, Revised 14 Nov. 2018, Accepted 14 Nov. 2018

*Corresponding author

Tel: +82-2-2220-0322; Fax: +82-2-2220-4322

E-mail address: dpark@hanyang.ac.kr (D. Park)

세를 나타내고 있으며, 지질, 지형적인 변화와 함께 막대한 피해를 야기하고 있다. 최근 국내의 경우에도 지진 발생 횟수는 매년 증가추세를 보이고 있는데, 2016년 경주 지진 발생 이후 계속된 여진 등의 영향으로 인해 지진 발생 횟수가 급격하게 증가하였다. 발생한 지진의 규모 면에서도 규모 4.0 이상의 지진이 국내 전 지역에 걸쳐 발생하고 있다. 지진 발생 횟수, 규모 증가 및 이전과 다른 내륙에서의 발생 등, 외적으로는 지진 하중의 위험성이 증가하고 있으며, 이와 더불어, 국내 사회기반시설물의 노후화에 따른 내적인 취약성 역시 가중되고 있다.

특히 시설물 자체 손상을 넘어 붕괴 시 많은 2차 피해를 야기할 수 있는 댐 시설물은 국민생활과 안전에 밀접한 관계가 있는 국가 주요시설물이므로 댐 관리주체는 지진 대비 댐의 안전성을 확보함으로써 지진에 대한 피해를 최소화해야 한다. 이를 위해 국내에서도 내진설계기준 공통적용사항(MPSS, 2017) 및 댐설계기준(MOLIT, 2016)을 통해 내진특등급 구조물에 대한 지진계 설치 및 운영을 의무화하고 있다. 중요시설물의 관리 주체는 시설물별 가속도 관측을 수행하고 있으나, 설치된 장비의 성능 및 비용을 고려 시 상대적 활용도가 매우 낮은 실정으로, 이러한 활용도를 제고하는 기술개발이 요구되는 상황이다.

Newmark(1965)는 댐과 제방에서의 변위를 예측하기 위해 최초로 경험적 추정식을 제안하였는데, 이는 항복가속도비(k_y/PGA)와 최대지반속도(PGV)의 함수로 이루어져 있다. 또한, Swaisgood(2003)은 국외 필댐 지진계측자료 69건에 대하여 검토하고, 통계적으로 분석하여 댐마루 변위 추정식을 제안하였다. 이 연구의 결과에 따르면 지진 발생시 댐마루 침하량에 영향을 미치는 가장 중요한 요인은 PGA와 지진 규모이고, 두 변수를 이용하여 댐마루의 예상 변위를 추정하는 경험식을 개발하였다.

본 연구에서는 지진 발생시 필댐의 댐마루 변위를 예측하기 위해 댐의 단면에 대한 2차원 비선형 동적 수치해석을 수행하였다. 콘크리트 표면차수벽 석피댐(concrete faced rockfill dam, CFRD)과 코어형 석피댐(earth core rockfill dam, ECRD)의 대표단면을 선정하여 각각에 대한 동적해석을 수행하였으며, ECRD의 경우 국내 댐의 제원 분석을 통해 평균 단면을 사용하였고, CFRD의 경우 표준 단면도를 사용하였다. 입력지진파는 PGA 0.1g~1.0g, 규모 5.0~8.0 범위의 지진계측기록 20개를 선택하여 적용하였다. 수치해석 결과를 통해 댐체 높이에 대한 댐마루 침하량비와 최대지반가속도(PGA), 최대지반속도(PGV),

지면운동강도인 Arias Intensity(Arias, 1970), 그리고 지진 규모(M)와의 상관관계를 다중 회귀분석 하였다. 이를 통해 침하량과 지진규모 및 지반진동변수 간의 상관관계를 규명하였다.

2. 국외 필댐 지진계측자료를 통한 침하량과 PGA의 상관관계 분석

Swaisgood(2003)은 CFRD, 흙 댐(earthfill dam), ECRD, 물다짐 댐(hydraulic fill dam) 등 4 종류 댐의 실제 지진계측자료 69건을 분석하였다. 댐마루 침하량 기록을 각 댐의 댐체 높이에 대한 비로 나타내었고, PGA에 따른 침하량의 비를 Fig. 1과 같이 나타내었다. 여기서, DH는 댐 높이(m), AT는 충적토의 두께(m), Δ 는 댐마루 침하량(m)이다.

분석 결과, 댐마루에서의 침하량은 PGA, M과 직접적인 연관성을 갖는 것으로 나타났다. 더 강한 진동을 수반하는 큰 규모의 지진의 경우 동일한 PGA가 계측되었지만 침하량에 더 큰 영향을 미친 것을 알 수 있다. Swaisgood(2003)은 이 상관관계를 회귀분석하여 댐마루의 침하량비와 최대지반가속도, 규모 사이에 다음의 식 (1)과 같은 경험적 예측식을 제안하였다.

$$\%Settlement = \exp(6.07PGA + 0.57M - 8.00) \quad (1)$$

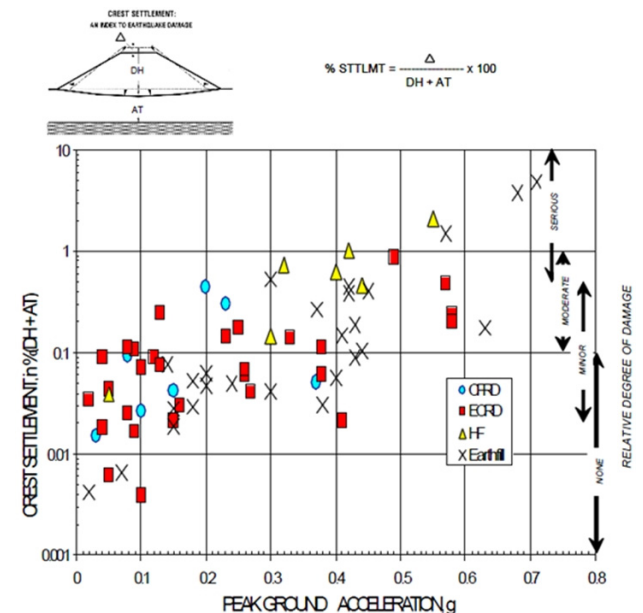


Fig. 1. Settlement of embankment dams during earthquake (Swaisgood, 2003)

3. 수치해석

3.1 대표 단면 선정

본 연구의 수치해석에 사용된 댐의 단면은 Fig. 2의 CFRD와 Fig. 3의 ECRD 단면이며, CFRD의 경우 국내에서 사용중인 CFRD 표준단면도를 사용하였다. CFRD의 구성은 main rockfill, sub rockfill, transition fill로 이루어져 있으며, transition fill 층의 표면에 차수벽으로 concrete face slab가 설치되어 있다. 댐의 폭은 약 185m이며 높이는 약 60m로 이루어져 있다. 상류와 하류의 사면경사는 약 1.6으로 이루어져 있다. ECRD의 경우, 댐 타입별 내진 안정성 평가 기법 연구(KIWE, 2004)에 수록된 국내 댐의 평균 제원을 사용하였다. ECRD의 구성은 가운데 core층을 중심으로 상류와 하류 사면은 rockfill로 이루어져 있다.

해석에 사용된 댐의 제원은 폭 약 260m, 높이 60m이다. 상류 사면경사 2.2, 하류 사면경사 2.0을 적용하였고, 코어층의 상하류 경사는 0.2를 적용하였다. 국내 댐 제원 현황 및 평균값을 Table 1에 정리하였으며, 댐 높이와 댐 상하류(upper slope and lower slope)의 사면경사비, 댐 코어층 상하류(upper core slope and lower core slope)의 사면경사비에 대해 정리하였다. 또한, 표 하단부에 본 연구에서 적용된 댐 높이를 비롯하여 댐체와 코어층의 상하류 사면 경사비를 정리하였다.

3.2 수치해석 모델

본 연구에서는 동적해석을 위해 평가 단면에 대하여 범용 유한차분해석 프로그램인 FLAC 2D(Itasca Consulting Group, 2011)를 사용하였다. FLAC 2D는 보, 케이블, 말

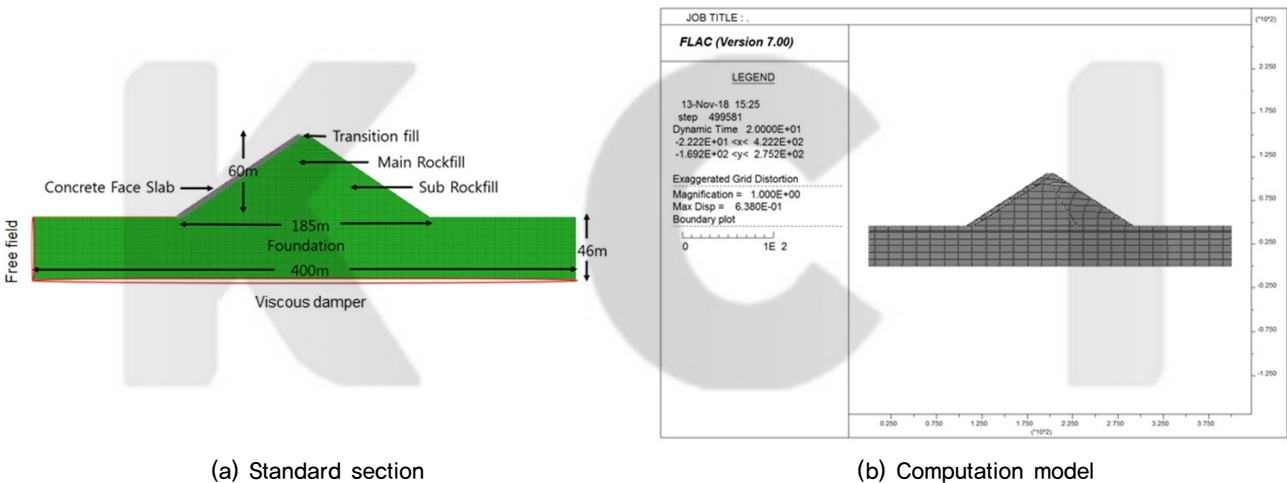


Fig. 2. CFRD standard section and numerical model

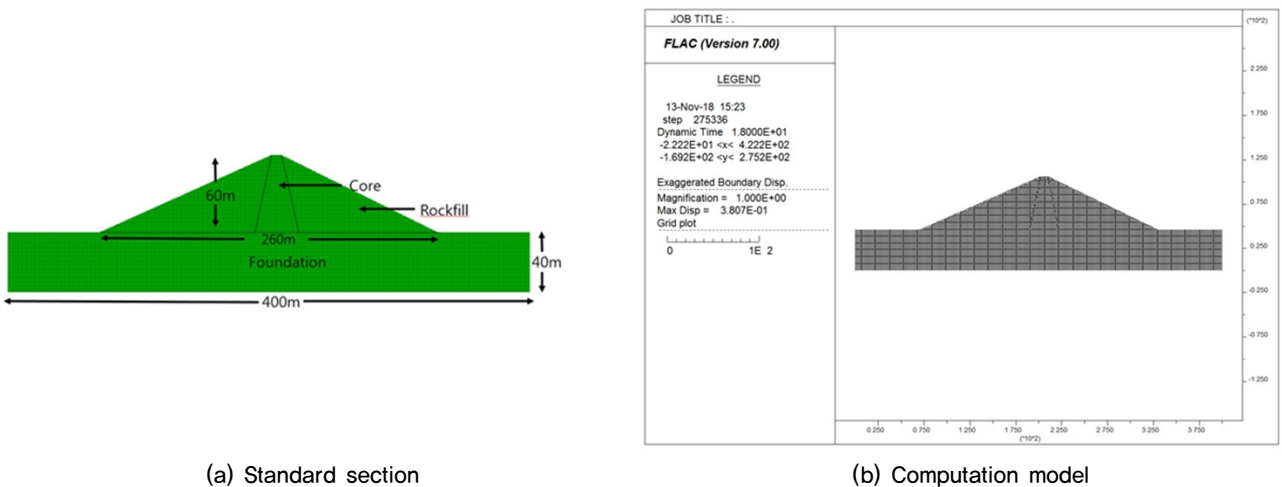


Fig. 3. ECRD standard section and numerical model

Table 1. Domestic dam specifications

Dam Name	Height (m)	Upper slope	Lower slope	Upper core slope	Lower core slope
Dae-Am	27	2,0	2,0	0,25	0,25
Soyang-Gang	123	2,3	2,0	-	-
Andong	83	2,0	1,7	-	-
Young-Cheon	42	2,7	2,5	0,20	0,20
Imha	73	-	-	-	-
JooAm	58	2,2	1,8	0,20	0,20
HyeongSeong	48,5	2,2	1,8	0,25	0,25
Moojoo	60,7	1,8	2,3	-	-
Average	58,4	2,2	2,0	0,22	0,22
This study	60	2,2	2,0	0,20	0,20

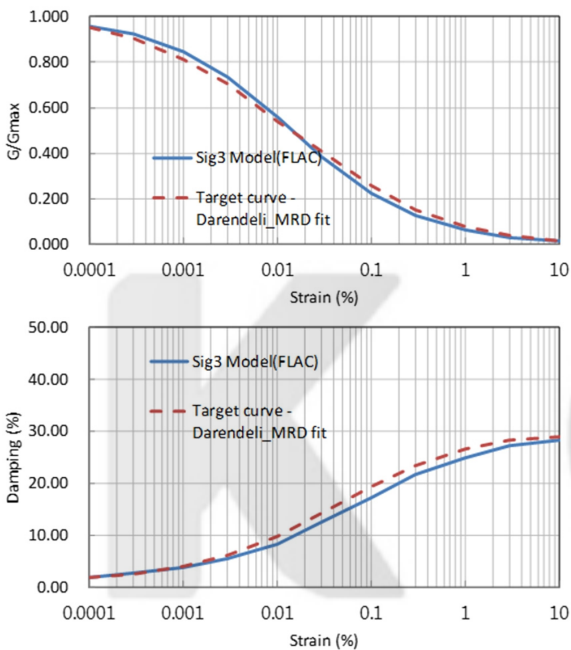


Fig. 4. Comparison of Darendeli (2001) and Sig3 model nonlinear curves

특요소 그리고 셀 요소 등으로 구조물을 모형화 할 수 있으며 Modified cam-clay 모델, Bilinear strain-hardening 및 Softening 모델 등과 같은 기존의 구성 모델과 더불어 Fish function을 이용한 사용자 정의 모델의 적용 역시 가능하다. 또한 유한요소해석 프로그램과 달리 구조물계 전체에 대한 강성도 역행렬을 구성하지 않으므로, 댐과 같은 대단면 모델에 대하여 효율적인 해석이 가능하다.

구성모델은 Mohr-Coulomb(MC) 모델과 Sig3 모델을 동시에 적용하였다. MC 모델은 가장 널리 사용되는 구성 모형이기는 하나 미소변형률에서의 비선형성을 고려하지 못하는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 이를 보완하기 위해서 FLAC 2D에 탑재되어 있는 Sig3 모델을 MC 모델

과 융합하여 적용하였다. 즉, 미소변형에서는 Sig3 모델이 적용되며 소성 상태에 도달해서는 MC 모델로 소성변위를 계산한다.

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp(-(L - x_0)/b)} \quad (2)$$

여기서, M_s : 접선전단탄성계수

L : $\log(\gamma)$

x_0, a, b : curve fitting 변수

Sig3 모델로부터 도출된 감쇠 곡선과 목표 곡선인 Darendeli 곡선을 Fig. 4에 비교하였다.

FLAC 2D에서는 측면 경계조건으로 자유장 경계를 적용하거나 수평영역을 충분히 넓게 모델링할 것을 권장하고 있는데 이는 반사파가 모델링된 지반 내부로 재입사되는 것을 방지하기 위함이다. 본 해석에서의 측면경계조건은 점성댐퍼가 연결된 측면경계에 자유장 운동으로 계산된 동적 응답을 강제적으로 적용하는 방식인 자유장 경계조건이 적용되었다. 하부 경계조건으로는 점성댐퍼에 가장 널리 사용되는 방법인 Kuhlemeyer and Lysmer(1973)에 의해 제시된 댐퍼를 적용하였다. 이는 상부층으로부터 반사되어 하향으로 전파되는 진동을 모두 흡수한다.

지반의 저변형률 감쇠는 Rayleigh 감쇠를 통해 모사하였다.

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (3)$$

여기서 $[C]$ 는 감쇠행렬, $[M]$ 은 질량행렬, $[K]$ 는 강성행렬이며 α 와 β 는 식에 대한 변수이다. α 는 $4\pi\xi \frac{f_m f_n}{f_m + f_n}$, β 는

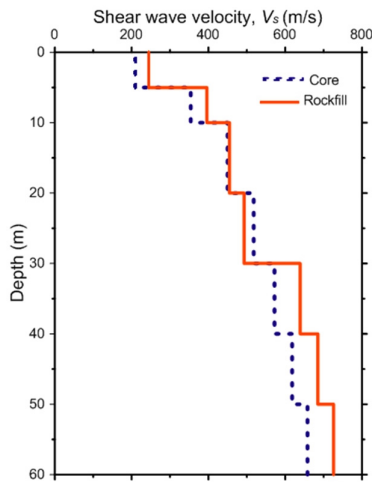


Fig. 5. Shear wave velocity of rockfill and core

$\frac{\xi}{\pi} \frac{1}{f_m + f_n}$ 로 계산되며 ξ 는 감쇠비, f_m 과 f_n 은 Rayleigh 공식의 주파수 의존성을 결정하는 주파수이다. 실제 지반의 감쇠는 진동 주파수의 영향을 받지 않으나 Rayleigh 공식은 진동 주파수의 영향을 받게 된다. 따라서 Rayleigh 공식 적용 시, 진동 주파수의 영향을 최소화하는 f_m 과 f_n

조합을 결정해야 한다(Park et al., 2013). Kwok et al. (2007)은 시간영역 지반응답해석 프로그램에 대한 비교연구를 수행한 연구에서 f_m 과 f_n 으로 토층의 1차와 5차 모드 주파수를 사용할 것을 제안하였다. 본 해석에서는 토층의 경우 1차와 5차 모드 주파수를 각각 사용하였고, 암반의 경우 f_m 에 1차 모드, f_n 에 지진파의 탁월주파수를 사용하였다.

본 연구에서는 수치해석 대상 댐 모델에 국내 유수의 댐 물성의 평균값 물성을 적용하였다. 또한 Sawada and Takahashi(1975) 경험식에 의해 산출된 깊이별 전단파속도를 적용하였다. Fig. 5에 해석에 사용한 전단파속도 구상도를 도시하였으며, Table 2에는 각각의 rock fill 채움재 및 core 채움재의 물성치를 정리하였다.

3.3 입력지진파

입력지진파는 PEER(Pacific earthquake engineering research center) Database(Timothy et al., 2014)에서 선택한 20개의 지진파를 사용하였고 Table 3에 지진파의

Table 2. Material properties

Division	γ (kN/m ³)	Friction angle (°)	Poisson's ratio
Main Rockfill	21	45	0.3
Sub Rockfill	21	44	0.3
Transition fill	21	42	0.3
Core	20	27	0.35
Bedrock	24	50	0.25

Table 3. Input motions used in the analysis from PEER database (Timothy et al., 2014)

No.	Earthquake event	Station	Year	M	Depth (km)	PGA (g)	PGV (cm/s)
1	Cape Town, S. Africa	Capetown	1969	6.3	15.0	0.384	21.9
2	Chichi, Taiwan	CHY-101	1999	7.6	8.0	0.183	39.3
3	Coyote, USA	San Juan Bautista	1979	5.7	10.0	0.124	7.6
4	Duzce, Turkey	Bolu	1999	7.1	13.7	0.727	56.4
5	El-Centro, USA	Imperial Valley Distr.	1940	6.9	8.8	0.400	37.8
6	Hector, USA	North Palm Spr.	1999	7.1	5.0	0.265	28.5
7	Imperial Valley, USA	Elcentro array#1	1979	6.5	10.0	0.169	11.6
8	Kobe, Japan	Nishi-Akashi	1995	6.9	17.9	0.509	37.3
9	Kocaeli, Turkey	Arcelik	1999	7.4	15.0	0.218	17.7
10	Landers, USA	Yermo Fire	1992	7.3	7.0	0.244	25.7
11	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#2	1989	6.9	17.5	0.170	14.2
12	Loma Gilroy, USA	Gilroy array#3	1989	6.9	17.5	0.357	28.6
13	Mammoth Lakes, USA	Long Valley Dam	1980	6.3	14.0	0.430	23.5
14	Nahanni, Canada	Nahanni-Station #3	1985	6.8	6.0	0.148	6.1
15	Northridge, USA	Beverly Hills	1994	6.7	17.5	0.217	9.8
16	Northridge, USA	Canyon Country	1994	6.7	17.5	0.098	8.9
17	Parkfield, USA	Parkfield-Cholame 5w	1966	6.1	10.0	0.357	21.5
18	San Fernando, USA	Pacoima Dam	1971	6.6	13.0	0.209	18.9
19	Tabas, Iran	MIHUD-Bajestan	1978	7.8	5.8	0.899	55.0
20	Whittier Narrows, USA	Rancho Palos Verdes	1987	6.0	14.6	0.186	4.6

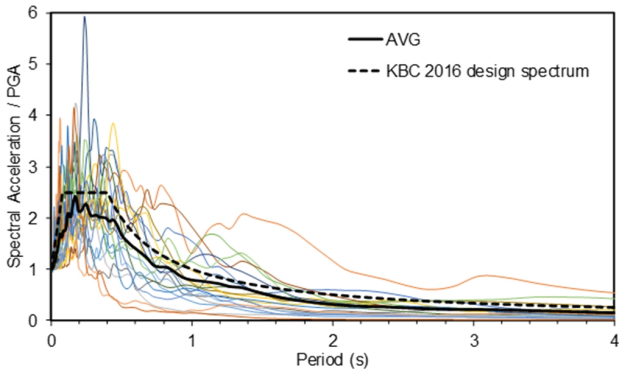


Fig. 6. 5% damped response spectrum of input motions and design response spectrum of MOLIT (2016) normalized to the PGA

PGA, M 등 세부항목을 정리하였다. 이 지진파들은 PGA는 0.1~1.0, M은 5~8의 범위로 선정하였고, 진원거리 50 km 미만의 실제 지진 계측기록이다. Fig. 6은 입력지진파의 5% 감쇠비가 적용된 가속도 응답 스펙트럼과 건축구조기준(MOLIT, 2016)의 설계응답스펙트럼을 각 지진파의 최대지반가속도로 정규화하여 비교한 결과이다.

4. 수치해석 결과 및 댐 침하량비 상관관계 분석

4.1 해석결과

각각의 ECRD, CFRD 단면에 20개의 지진파를 적용하여 동적해석을 수행하였다. 해석결과 발생한 침하량을 댐체 높이에 대한 침하량비로 나타내었고, 본 연구 해석 결과인 PGA에 따른 댐의 침하량비와 Swaisgood(2003)의 69건의 PGA에 따른 침하량비를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. CFRD의 경우 본 연구와 국외 사례의 결과는 상당히 유사한 반면 ECRD의 경우 수치해석 결과가 국외 사례 자료에 비하여 다소 작은 것으로 분석되었다. Swaisgood(2003)은 해석에 사용된 댐의 제원과 지반조건에 대한 상세 내용을 보고하지 않았기에 위와 같은 차이가 발생하는 이유는 명확하게 규명할 수 없지만 필연적으로 내재된 해석 조건의 차이에도 불구하고 확인된 유사성은 본 연구 결과의 신뢰성을 입증한다. Swaisgood(2003) 연구 대비 본 연구의 장점은 해석에 사용된 가속도 시간이력과 관련된 정보로부터 PGA 뿐만 아니라 M, PGV 등의 추가적인 변수가 확보 가능하다는 점이며 0.9g를 상회하는 PGA의 지진파까지 사용하였기에 보다 넓은 스펙트럼의 결과를 도출하였다는 점이다. 이에 대한 분석은 아래에 제시하였다.

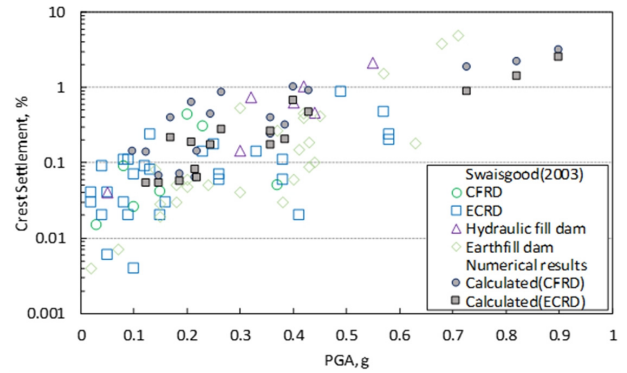


Fig. 7. Comparison of calculated crest settlements with the results of Swaisgood (2003)

4.2 댐 침하량비와 지반진동변수의 상관관계 회귀 분석식

본 절에서는 침하량비와 입력지반운동의 지반진동변수와의 상관관계를 도출하였다. 평가에 사용된 지반진동변수는 PGA, PGV, 지진 모멘트 규모, 그리고 Arias Intensity I_A 이다. 상관성 분석에 가장 널리 사용되는 PGA와 더불어서 PGV를 사용하는 주파수 특성에 관한 정보가 추가적으로 사용이 되며 지진 규모는 지속시간과 주파수 특성에 관한 정보를 제공한다. Arias Intensity는 가속도 제곱의 적분값을 나타내므로 이를 활용하면 지속시간과 누적 에너지에 대한 특성을 반영할 수 있다. 본 연구에서는 4가지 변수와 침하량의 상관관계를 Fig. 8에 도시하였다. PGA와 PGV의 상관관계는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

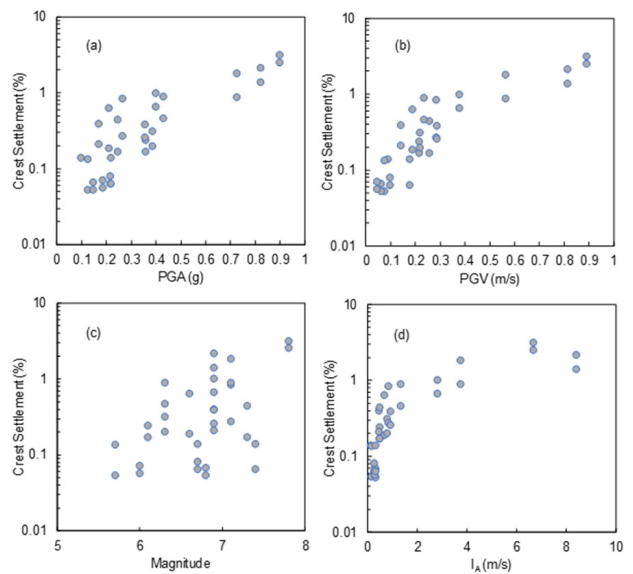


Fig. 8. Correlations between crest settlement (%) and four ground motion parameters

Table 4. Matrix of correlations between settlement and ground motion parameters

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6	Case 7	Case 8
PGA	○	○	○	○	○	○	○	○
PGV		○			○		○	○
M			○		○	○		○
IA				○		○	○	○
R2	0.694	0.745	0.709	0.695	0.745	0.710	0.764	0.773

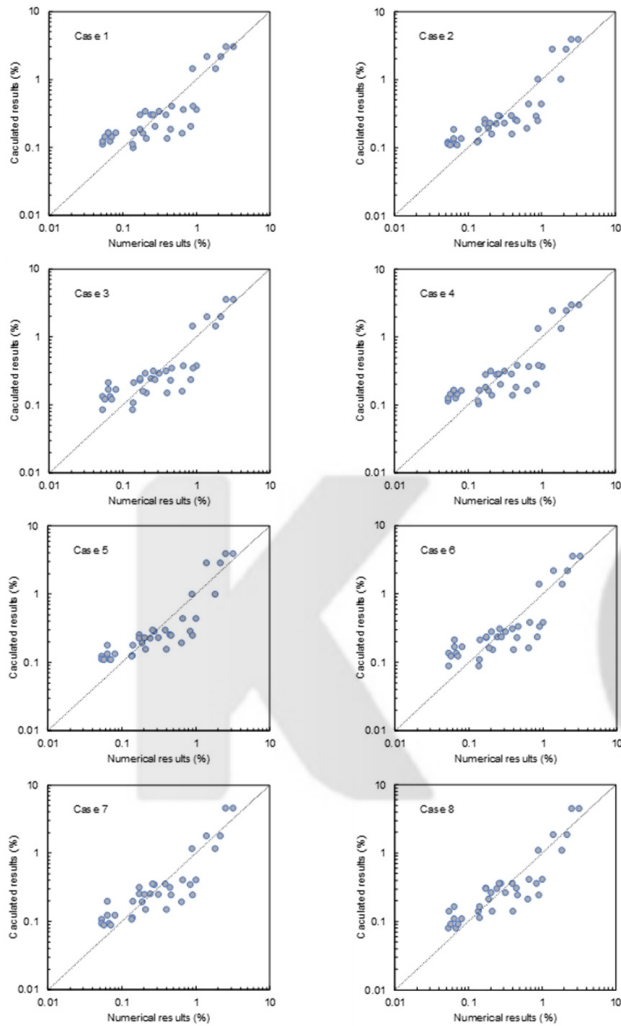


Fig. 9. Comparison of calculated and numerical results of dam crest settlement in %: case 1~case 8

진규모는 PGA나 PGV에 비하여 상관성은 상대적으로 낮은 것으로 나타났다. Arias Intensity는 작은 값에서는 상관성이 우수한 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 다양한 지반진동 변수와 침하량간의 상관관계를 도출하기 위해 다중 회귀분석을 수행하였다. SPSS(IBM Corp, 2016) 프로그램을 통해서 종속변수로 침하량비(%), 각각의 독립변수로 PGA, M, PGV, IA를 적용하여 다중 회귀분석을 실시하였고 그 결과 도출된 회귀

분석식을 제안하였다. 상관관계 도출을 위한 분석 조건은 Table 4에 정리하였다.

Table 4에 정리된 조건에 따라 각 변수가 적용되었을 때 도출된 회귀분석식은 식 (4)와 같다. Case 별로 상관식과 수치해석 결과와의 결정계수 R^2 를 비교한 결과, PGA만을 사용하는 경우가 0.694로 작았으며 추가 변수를 사용하는 경우 정확도가 향상되는 것으로 나타났다. Swais good(2003)은 PGA와 M을 사용하여 상관식을 제안하였는데 본 연구 결과 2개의 변수를 사용하는 경우, PGA - PGV 조합의 상관성이 가장 높은 것으로 나타났다. 3개의 변수를 사용하는 경우는 PGA, PGV, IA의 조합이 0.764로 상관도가 가장 우수하며 4개의 변수를 모두 사용하는 Case 8의 상관성은 $R^2 = 0.773$ 으로 가장 높은 것으로 분석되었다. 각 식에 의해 도출된 계산결과와 수치해석 결과를 비교한 그래프를 Fig. 9에 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 \text{Case1: \%settlement} &= e^{(4.259PGA - 2.727)} \\
 \text{Case2: \%settlement} &= e^{(0.312PGA + 3.987PGV - 2.460)} \\
 \text{Case3: \%settlement} &= e^{(3.947PGA + 0.317M - 4.759)} \\
 \text{Case4: \%settlement} &= e^{(3.771PGA + 0.0521IA - 2.640)} \\
 \text{Case5: \%settlement} &= e^{(0.179PGA - 0.042M + 4.163PGV - 2.179)} \\
 \text{Case6: \%settlement} &= e^{(3.607PGA + 0.311M + 0.037IA - 4.653)} \\
 \text{Case7: \%settlement} &= e^{(0.458PGA + 6.093PGV - 0.240IA - 2.718)} \\
 \text{Case8: \%settlement} &= e^{(-0.554PGA - 0.337M + 8.283PGV - 0.329IA - 0.561)}
 \end{aligned} \tag{4}$$

5. 결론

본 연구에서는 지진시 필댐의 손상 예측에 필요한 댐마루 침하량을 산정하기 위하여 일련의 비선형 동적해석을 수행하였다. ECRD와 CFRD 대표단면을 선정하여 각각에 대한 2차원 비선형 동적해석을 수행하였다. ECRD의 경우 국내 댐의 제원 분석을 통해 추정된 단면을 사용하였고, CFRD의 경우 표준단면도를 확보하여 사용하였다. 입력

지진파는 PGA 0.1g~1.0g, M 5.0~8.0 범위의 실제 지진 계측기록 20개를 선택하여 적용하였다. 수치해석 결과를 분석하여 댐체 높이에 대한 침하량비와 지진규모 및 지반 진동변수와의 상관관계를 규명하였다. 연구에 사용된 지반진동변수는 PGA, PGV, Arias Intensity, 그리고 M의 총 4개이다. 나아가 계산된 침하량비와 지반진동변수와의 회귀분석식을 제안하였으며 제안식의 정확성을 평가하였다. 본 연구에서 도출된 결론은 다음과 같다.

- (1) 국내 대표 필댐 단면으로 해석을 수행한 결과, 국외에서 제안된 PGA - M과 댐마루 침하량의 경험적 관계와 해석결과에서 차이를 보이는 것으로 나타났다. 본 과업에서는 해석결과를 기반으로 새로운 경험식을 제안하였다.
- (2) 본 연구에서 도출된 PGA와 M 회귀분석식의 예측정확도는 높지 않으며 오히려 PGA와 PGV를 사용하는 경우, 상관성이 향상되는 것으로 나타났다.
- (3) PGA에 추가적으로 M, PGV, Arias Intensity 등 총 4개의 변수를 고려한 새로운 다중변수 회귀분석식을 사용하는 경우 PGA만을 사용하거나 PGA - M을 사용하는 경우 대비 상관성이 각각 11%와 9% 향상되는 것으로 나타났다.
- (4) 단, 본 연구 결과는 ECRD와 CFRD 표준단면에 국한된다는 점을 밝힌다. 댐의 높이, 크기 등의 변수들이 결과에 영향을 줄 수 있으므로 추후 매개변수 연구에서 이들의 영향을 평가할 필요가 있다고 사료된다.

Acknowledgement

This research was supported by a grant (2017-MOIS31-002) from Fundamental Technology Development Program for Extreme Disaster Response funded by Korean Ministry of Interior and Safety(MOIS).

References

1. Arias, A. (1970), "Measure of earthquake intensity", *Seismic Design for Nuclear Power Plants*, edited by Hansen, R. J., Massachusetts Inst. of Tech., Cambridge, pp.438-483.
2. Darendeli, M. B. (2001), *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*, Ph. D. dissertation, University of Texas at Austin.
3. Itasca Consulting Group (2011), *Fast Lagrange Analysis of Continua*, Version 7.0.
4. KIWE (2004), *Study on evaluation method of seismic safety on various types of dams*, KIWE-DRC-04-14, K water (in Korean).
5. Kwok, A. O., Stewart, J. P., Hashash, Y. M., Matasovic, N., Pyke, R., Wang, Z. and Yang, Z. (2007), "Use of exact solutions of wave propagation problems to guide implementation of nonlinear seismic ground response analysis procedures", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol.133, No.11, pp.1385-1398.
6. Kuhlemeyer, R. L. and Lysmer, J. (1973), "Finite element method accuracy for wave propagation problems", *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, Vol.99, No. Tech Rpt.
7. MOLIT (2016), *Korean building code* (in Korean).
8. MOLIT (2016), *Korean design standard of Dam* (in Korean).
9. MPSS (2017), *Common application of seismic design criteria* (in Korean).
10. Newmark, N. M. (1965), "Effects of earthquakes on dams and embankments", *Geotechnique*, Vol.15, No.2, pp.139-160.
11. IBM Corp. (2016), *IBM SPSS Statistics for Windows*, Version 24.0., New York.
12. Park, D., Kim, T. G., Ahn, J. K. and Park, I. J. (2013), "Amplification characteristics of mountain slope", *Journal of KOSHAM*, Vol.13, No.2, pp.117-123.
13. Sawada, Y. and Takahashi, T. (1975), "Study on the material properties and the earthquake behaviors of rockfill dams", *Proc. of 4th Japan Earthquake Engineering Symposium*, Tokyo, pp.695-702 (in Japanese).
14. Swaisgood, J. R. (2003), "Embankment dam deformations caused by earthquakes", *Proc. of 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Christchurch NZ.
15. Timothy D. A., Robert B. D., Jonathan P. S., Emel, S., Walter J. S., Brian S. C., Katie E. W., Robert W. G., Albert R. K., David M. B., Tadahiro, K. and Jennifer L. D. (2014), "NGA-West2 Database", *Earthquake Spectra: August 2014*, Vol.30, No.3, pp.989-1005.