

탄-소성 구성모델을 이용한 사력댐의 동적거동특성

The Seismic Performance of Rockfill Dam with Elasto-Plastic Constitutive Model

이종욱* 임정열* 오병현** 임희대***
Lee, Jong Wook Lim, Jeong Yeul Oh, Byung Hyun Lim, Heui Dae

ABSTRACT

Total stress analysis method and nonlinear constitutive models have been used to analyze a dynamic performance of Dams but, there is some limitation in analysis, for example, effects of build up of pore pressure and generations of permanent deformations.

Therefore considering these limitations, which is mentioned before, dynamic behavior characteristics of dams and response acceleration characteristics was analyzed in time domain, applying an elasto-plastic constitutive model and effective analysis method.

1. 서론

사력댐을 포함한 지반구조물에 대한 지진에 대한 동적해석에는 탄성영역에서의 전단보이론(monobe et al, 1930)과 모드중첩법, 주파수 영역에서의 등가선형해석법(Lysmer et al, 1975), 비선형구성모델에 의한 유한요소법등이 동적응답특성과 안정성 평가에 적용되어져 왔다.

사력댐은 차수재료와 사력재료를 각 존별로 다짐 축조한 유체, 고체, 기체의 3상의 복합체로서 댐체의 안정성은 간극수에 의한 영향이 크며 특히, 지진동에 의해 침윤선 아래의 포화영역의 강도가 감소되어 주로 상류사면에서 변형이 발생하게 된다. 흙댐의 파괴사례로는 액상화에 의한 파괴가 많은 비중을 차지하지만 사력댐의 경우에는 댐체를 구성하는 재료의 입경이 매우 크고 배수성이 탁월한 사력재료로 구성되므로 현저한 과잉간극수압의 발생은 예상되지 않는다. 흙댐과 같이 과잉간극수압에 의한 액상화의 발생이 예측되는 경우에는 전단변형의 발생시 체적의 변화에 따른 과잉간극수압의 관계를 이용한 Finn모델을 적용하여 해석할 수 있으나 구성모델에 사용되는 입력 파라미터를 실내시험 및 현장조사에 의해 시험하여 결정하여야 한다. 이러한 배경으로 본 연구에서는 현재 활용 가능한 전단강도(c, ϕ) 특성에 의한 Mohr-Coulomb의 파괴기준을 기초로 탄-소성(elasto-plastic)구성모델을 적용한 유효응력해석법으로 사력댐을 모델링하고 지진에 의한 가속도

* 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전연구팀 연구원

** 한국수자원공사 수자원연구소 댐안전연구팀 책임연구원

*** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수

시간이력으로 댐체의 동적거동 특성과 가속도 응답특성을 분석하였다.

2. 사력댐의 지진시 동적거동 모델링

2.1 해석프로그램 개요

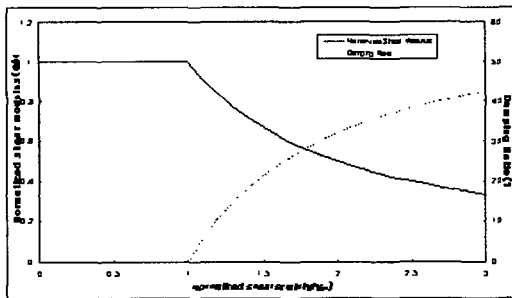
사력댐의 동적해석 모델링에는 ITASCA사의 FLAC V4.0을 사용하였다. FLAC은 지배방정식의 해를 구하기 위해 Explicit Time Marching법을 사용한다. 대변형(Large-Strain)해석과 감쇠(Damping) 및 임의 형태의 매쉬의 해석에 적합하며 이론적으로 dynamic relaxation(Otter et al., 1966)과 동일한 수치해법을 사용한다. 유한차분법은 Wilkins(1964)의 방법을 사용한다.

FLAC은 연속체의 응력-변형해석에 운동방정식과 구성관계를 이용하고, 침투류해석에는 다공성 매체(porous media)를 흐르는 유체에 대하여 Darcy법칙을 사용하여 해석한다. 응력-변형해석과 침투류해석을 동시에 수행할 때는 Biot(the linear quasi-static Biot theory)의 이론을 적용한 해법을 사용한다.

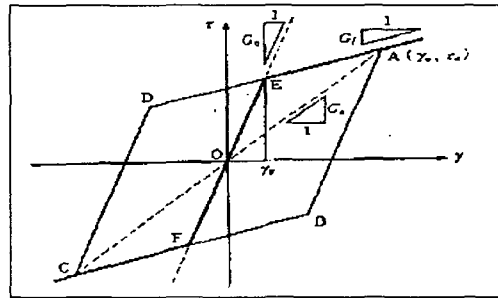
2.2 구성모델

현재까지 흙댐과 사력댐에 대한 지진응답해석에는 변형을 수준(strain level)에 따라 전단탄성계수(G) 및 댐핑(D)이 변화되는 등가선형모델(equivalent linear analysis model)이 많이 사용되어 왔다. 등가선형모델에 의한 해석법은 전응력해석법(total stress analysis method)으로 분류할 수 있으며 탄성 증분해석(Incremental analysis)으로 재료의 비선형적인 거동을 모델링하는 유사-비선형(quasi-linear)해석법이다. 따라서, 실제의 흙댐 및 사력댐에서와 같이 지진시 댐의 거동에 간극수압에 대한 영향을 고려하지 못하며 지진에 의한 외력이 재료의 항복조건을 초과하는 경우에 발생하는 소성변형을 모델링하기에는 한계가 있어 실내 시험결과와 상호 비교분석을 해야만 한다.

대부분의 탄-소성모델과 같이 Mohr-Coulomb의 파괴기준에 의한 탄-소성모델은 주로 일반적으로 정적하중 조건 또는 단순반복하중의 모델링에 적합한 것으로 알려져 있으며 흙과 암석의 전단 파괴 거동에 대한 모델이다(Vermeer and deBorst, 1984). 본 모델을 사용하여 지진 시 축조재료의 비선형적인 거동을 다음의 <그림-1>과 같이 소성변형률에 따른 전단탄성계수(G)와 감쇠비의 변화로 모델링 할 수 있으며 <그림-2>과 같은 Bilinear형 모델의 특수한 경우로 생각할 수 있다.



<그림-2> 전단탄성계수 및 감쇠비의 관계



<그림-3> Bilinear 모델

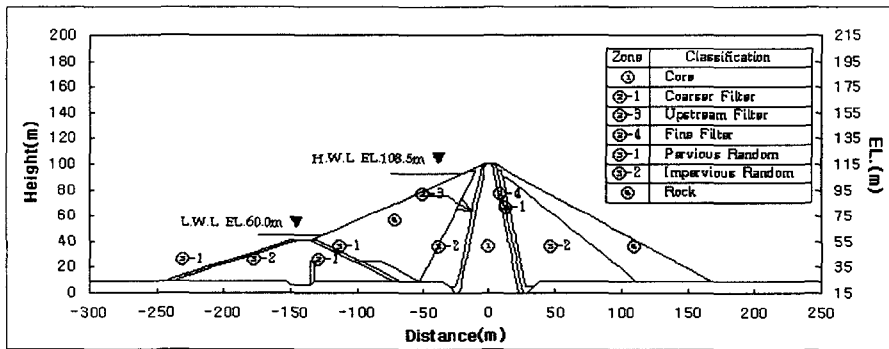
3. 사력댐의 동적해석

3.1 해석대상 댐

해석대상 사력댐은 높이는 100m, 길이는 562.6m이며 다음의 그림과 같은 형상으로 단면이 구성되고 상세한 제원은 <표-1>과 같다.

<표-1> 대상댐 제원

구 분	내 용
댐 높이	99.9m
댐 길이	562.6.0m
댐마루 표고	EL.115.0m
계획홍수위(F.W.L)	EL.111.1m
상시만수위(N.H.W.L)	EL.108.5m
저수위(L.W.L)	EL. 60.0m



<그림-4> 해석 대상댐의 단면

3.2 해석단면 및 경계조건 설정

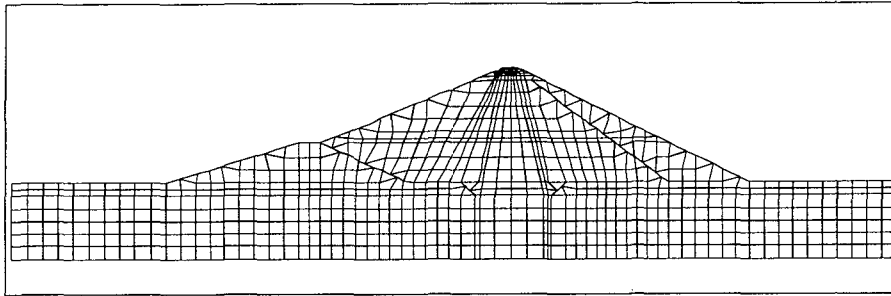
동적해석시 높이가 높은 대형구조물의 경우 기초와의 상호작용 효과를 무시할 수 없으며 지진동의 파동전파(Wave Propagation)특성을 표현하기 위해 기초압반을 고려하여 다음의 <그림-5>와 같이 모델링 하였으며 기초압반의 하부는 고정경계조건을 적용하였다. 기초압반의 좌·우 경계면에는 전파되는 파동을 경계면에서 반사시키지 않고 적절히 감쇠시키기 위해 free-field 경계조건과 3차원 영향을 고려한 3D-Damping 경계조건을 적용하였다.

3.3 해석조건

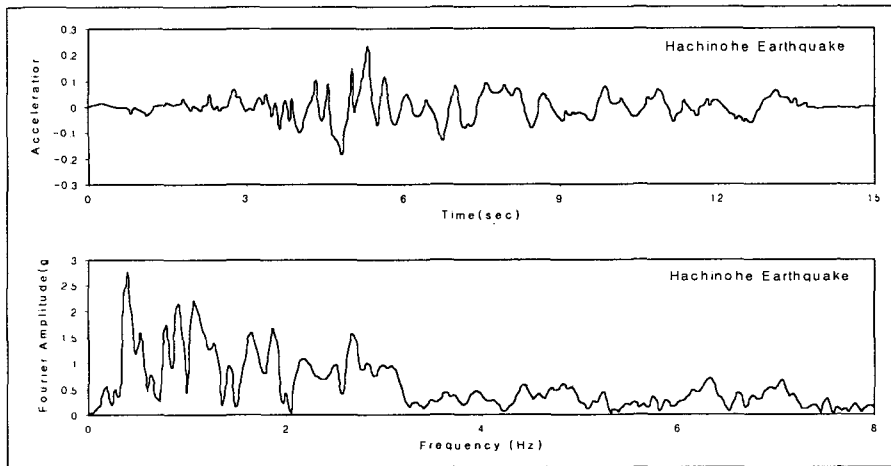
3.3.1 해석단계

사력댐의 동적거동 해석단면을 설정하여 레일리(Rayleigh)형 감쇠를 도입하기 위한 자유진동해석으로 탁월진동수(Predominant Frequency)를 계산하고 지진하중을 도입하기 전, 침투류 해석을 포함한 정적해석을 실시하여 초기 정적응력 평형상태를 평면변형율조건으로 계산한다. 위와 같이 초기조건을 마련한 후, 지진 가속도의 시간이력을 적용하여 사력댐의 동적해석을 실시한다. 침투

류 해석 및 동적해석시 상시만수위조건(EL.108.5m)으로 해석하였다. 동적해석에 적용한 가속도 시간이력은 Hachinohe(N-S, $A_{max}=232.671gal$, $peak=5.38sec$)과를 이용하여 최대가속도값을 0.098g로 조정하여 입력하였다. 지반재료의 감쇠비는 대략 2~5%의 범위(Biggs, 1964)이므로 5%의 감쇠비를 적용하였다.



<그림-5> 해석 대상댐의 모델



<그림-6> 입력 가속도 시간이력, Hachinohe(N-S, $A_{max}=232.671gal$, $peak=5.38sec$)

3.3.2 축조재료 특성

축조재료의 입력 파라미터는 다음의 <표-2>와 같이 설정하였으며 전단탄성계수 및 체적탄성계수는 일본에서 제안된 사력댐의 일반적인 전단파 속도모델에 의해 추정하였으며, 기초암반은 설계시 물리탐사에 의한 탄성과 속도를 이용하여 추정하였다.

4. 동적거동특성 분석

4.1 사력댐 동적거동

대상댐에 대하여 지속시간 15초의 최대가속도 0.098g의 가속도 시간이력을 이용한 동적해석결과 <그림-7>과 같이 상류사면에서의 침하가 주로 발생하며 이것은 담수로 인한 상류 제각부의 강성

<표-2> 대상댐 축조재료 입력변수

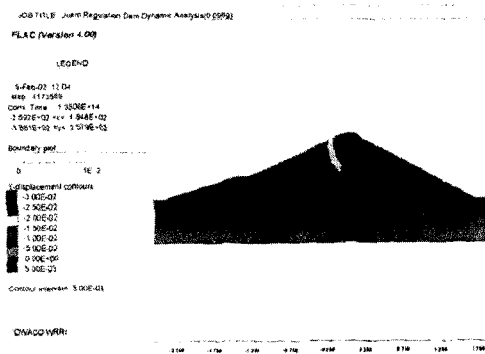
구분 \ Zone	①	②	③-1	③-2	④
최대입경(mm)	100	150	500	200	1000
상대밀도(%)	-	75	75	75	75
ρ_d (t/m ³)	1.68	1.90	1.90	1.95	1.90
K (cm/sec)	0.5×10^{-5}	1×10^{-3}	1×10^{-1}	1×10^{-2}	1×10^0
c (t/m ²)	1.0	0.0	0.0	0.0	0.0
ϕ (°)	27	34	38	28	41
G (MPa)	514.408	835.181	241.613	835.181	835.181
K (MPa)	2166.749	2041.554	1429.54	2041.554	2041.554

주) 1 MPa = 100 t/m²

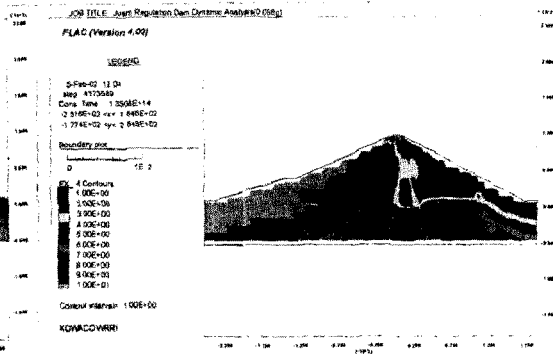
<표3.2.1> 사력댐의 일반적인 속도모델(Z=표면에서의 심도, m)

Zone \ depth(m)	Rock		Core	
	Unsaturated	Saturated	Upper	Lower
0~5	$V_s=245$		$V_s=210$	
5~30	$V_s=250Z^{0.2}$	$V_s=250Z^{0.2}$	$V_s=180Z^{0.35}$	$V_s=140Z^{0.34}$
30~	$V_s=200Z^{0.315}$			
ν	$\nu=0.375-0.006Z$	$\nu=0.49-0.001Z$	$\nu=0.45-0.006Z^{0.6}$	

의 저하되었기 때문에 판단된다. 최대침하는 댐마루 상류부에서 3.1cm의 침하가 발생하였다. 15초의 지진동에 의해 변형된 댐체의 각 요소에 <그림-8>과 같이 국소안전율을 계산한 결과 모두 1.0 이상을 나타내어, 지진 후 사면안정성은 유지하고 있으며 상류 제각부(shell)의 상시만수위(H.W.L) 부근의 요소(element)의 안전율이 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 지진이 발생하기 전 정적인 상태에서도 불투수 코어의 상류면에는 침투수압이 작용되며 코아에 인접한 상류제각부(shell)에서 코아면에 수직방향으로 작용하는 수직응력이 작은 값을 나타내어 파괴에 가까운 높은 응력비(stress ratio)상태이기 때문에 판단된다. 해석결과 가장 취약한 부분은 수위면 바로 아래 상류면의 제각부(shell)이며 이 부분에서 균열(Cracking) 또는 국부적인 활동의 가능성이 있으나 신속한 보수·보강이 이루어진다면 댐의 기능에는 문제가 없는 것으로 판단된다.



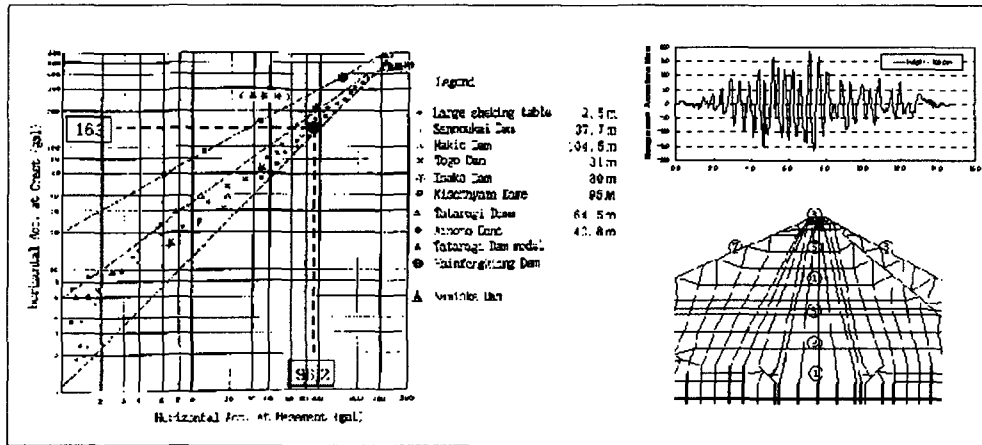
<그림-7> 침하량 분포



<그림-8> 국소안전율 분포

4.2 댐마루에서의 가속도 응답특성

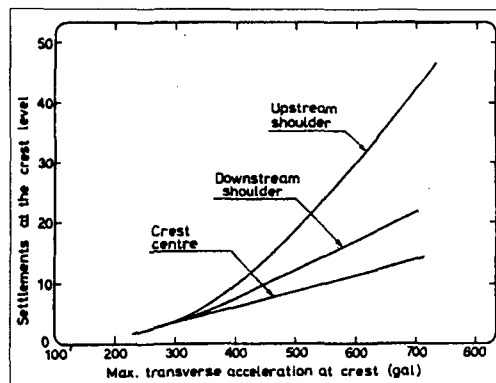
대상댐의 0.098g(96.2gal)의 입력가속도에 대한 댐마루에서의 응답가속도는 0.167g(163gal)로 약 1.94배 증폭된 것으로 해석되었다. 입력가속도와 댐마루에서의 증폭된 가속도에 대하여 외국의 댐에서 계측된 실측치와 다음의 <그림-9>와 같이 비교·분석한 결과 유사한 경향을 나타내고 있는 것을 확인하였다.



<그림-9> 실측 응답가속도 특성과의 비교

4.2 댐 마루의 변형

대상댐의 동적해석결과 댐마루의 침하는 상류부에서 최대 3.1cm, 중앙부에서는 2.2cm, 하류부에서는 0.04cm 침하되는 것으로 해석되었으며 이때 댐마루에서의 응답가속도는 0.167g(163gal)이다. 기존 실측자료와 비교·분석하기 위하여 댐마루에서의 응답가속도와 침하량과의 관계를 이용한 결과 본 대상댐의 경우에는 <그림-10>과 같이 응답가속도는 0.167g(163gal)에서 침하량이 매우 작은 경우에 해당된다.



<그림-10> 댐마루 침하량의 실측치와의 비교(Ishihara et al)

6. 결론

본 연구는 탄-소성(elasto-plastic)구성모형을 적용하여 유효응력해석법으로 사력댐을 모델링하고 지진에 의한 가속도 시간이력으로 댐의 동적거동 특성과 가속도 응답특성을 분석하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1. 지진에 의한 사력댐의 거동은 하류사면에 비하여 상류사면에서 침하가 주로 발생하며 이것은 담수로 인해 상류 제각부(shell)의 강성의 저하되었기 때문인 것으로 판단된다. 최대침하는 댐마루의 상류부에서 발생하였다.
2. 변형된 댐체에 대하여 각각의 요소(element)에 대한 국소안전율을 계산한 결과, 안전율은 1이상이므로 안전하며 상류제각부의 상시만수위 높이 부근의 요소의 안전율이 상대적으로 낮은 것으로 확인되었다. 이러한 경향은 지진동에 의한 외력이 작용되기 전의 정적인 응력상태에서도 기하학적 형상 및 침투수압에 의해 높은 응력비(stress ratio)를 나타내기 때문이다.
3. 실측자료와의 비교분석결과 입력된 지진가속도에 대하여 댐마루에서의 증폭된 응답가속도는 실측치의 경향과 유사한 1.94배이며 댐마루의 변형은 매우 적은 경우에 해당된다. 이러한 경향은 낮은 규모의 입력지진가속도에 의해 댐체의 비선형거동이 탁월하지 않기 때문인 것으로 판단된다.
4. 우리나라의 댐설계기준에는 필댐에 대한 활동면법에 의한 사면안정 검토시 설계진도는 일반적으로 진도법 개념으로 대상지역의 지표면에서의 진도로 규정되어 있으나 본 해석결과 사력댐과 같은 대형구조물의 경우에는 응답가속도가 증폭되는 현상을 나타내므로 이러한 영향을 고려하여 할증된 값으로 검토하여야 타당할 것으로 생각된다.

사력댐을 포함한 필댐의 내진안정성에 대한 중요한 고려사항으로는 지진 발생중의 댐의 거동뿐만 아니라 지진 후의 안정성에 영향을 미치는 과잉간극수압의 소산에 따른 변형의 발생과 균열(crack)을 통한 수압할렬(hydraulic fracturing) 및 침식(erosion)등에 대한 향후 연구가 필요하다.

참고문헌

1. ITASCA, "FLAC V.4.0 User's Guide", 2001.
2. Braja M. Das, "Principles of Soil Dynamics", PWS-KENT, 1993.
3. Steven L. Kramer, "Geotechnical Earthquake Engineering", Prentice-hall, 1996.
4. K. Ishihara et al, "Permanent earthquake deformation of embankment dams", Dam Eng.
5. Osamu Arai, "Seismic Design Standard for Embankment Dams(Draft)", River Dep., River bureau, Ministry of Construction, Japan., 1991.
6. "댐설계기준", 건설교통부, 2001.
7. 오병현, 임정열, 이종욱, "수자원시설물의 내진성능 평가연구", 한국수자원공사, 2001.