



## 수치해석에 의한 노후저수지의 침투 및 동적거동

### Behavior of Seepage and Seismic for the Deterioration Reservoir Using Numerical Analysis

박성용\* · 장석현\*\* · 임현택\*\* · 김정면\*\* · 김용성\*\*\*,†

Park, Sung-Yong · Chang, Suk-Hyun · Lim, Hyun-Taek · Kim, Jung-Meyon · Kim, Yong-Seong

#### Abstract

It is significant to redevelop the deterioration reservoir through raising for countermeasure to climate change and Earthquake improvement of reservoir. This study aims to investigate the behavior of deterioration reservoir with poor-fabricated core subjected to raising water level and earthquake using numerical analysis. From the analysis results, water level raising and earthquakes induce crack and subsidences at the crown and the front side of deterioration reservoir.

For the reinforcement of the deterioration reservoir is required appropriate measures method and raised method suitable, drainage and slope protection method judged to be necessary.

**Keywords:** Numerical analysis; Seepage; Water level raising; Earthquake; deterioration reservoir

#### 1. 서 론

2014년도 한국 농어촌공사의 저수지전수조사 결과, 국내 저수지 총 17,427개소 중 약 96%가 1980년대 중반 이전에 건설되어 노후가 심하거나 내구성이 취약한 것으로 나타났다. 또한 축조된 지 50년 이상 경과된 노후저수지가 전체의 70%를 차지하고, 점차 시간경과에 따라 노후화의 계속적 진행에 따른 저수지 붕괴 위험, 저수지 하부 토사퇴적에 따른 저수량 감소 등 심각한 문제점을 내포하고 있다 (Kim et al., 2011). 더불어 최근 들어 기후변화에 의한 집중호우의 빈도가 증가하고 있으며, 이는 수위 급상승 및 침투를 동반하여 저수지의 안전을 지속적으로 위협하고 있는 실정이다.

또한, 최근 들어 지진에 대해서 상대적으로 안전하다고 생각되던 지역 및 나라에서 비교적 큰 규모의 지진이 발생하고 있으며, 그로 인해 수많은 인명 및 재산피해가 발생하고 있다. 그로 인한 심각한 피해사례들이 발생하고 있다. 국내에서도

지진에 대한 관측이 시작된 1978년 이후, 규모 5.0 이상의 지진은 1978년의 홍성 지진 등 수차례 발생하였고, 이러한 강도의 지진은 항상 발생할 가능성이 있다. 그 발생빈도 역시 꾸준히 증가하고 있으므로 우리나라 또한 더 이상 지진의 안전지대가 아님을 보여주고 있다 (Kim et al., 2009).

특히, 중요 국가시설물인 댐과 저수지는 사회 간접자본시설로서 지진에 대한 안전성을 충분히 확보해야 한다. 중국 쓰촨성 대지진은 약 400여개의 중대형 댐과 저수지 등에 손상을 발생시킨 바 있다. 이러한 지진에 의한 댐과 저수지의 붕괴는 직접적인 피해 뿐만 아니라 사회경제적인 2차 피해를 발생시킬 수 있으므로, 지진재해에 대한 예방 및 대비에 대한 필요성이 꾸준히 부각되고 있다 (Choo et al., 2011).

따라서, 기후변화 및 지진발생에 따른 노후저수지의 장기 안정성을 도모하기 위해 증고 및 코어보강에 의한 노후저수지의 재개발이 절실하며, 노후저수지의 성공적 재개발을 위하여 먼저, 수위상승에 따른 침투거동 및 지진 발생에 따른 동적거동에 대한 연구가 필요하다.

현재, 수치해석을 통한 지진시 제방 및 성토구조물의 안정성을 검토하는 방법으로 진도법에 의한 원호활동해석이 대부분이며, 잔류변위량의 검토에는 Newmark법 (Hori et al., 1997)이 사용되고 있다. 이러한 간편법은 대상구조물의 단위 중량, 점착력, 내부마찰각 및 수평진도계수를 사용하여 수행하게 된다. 따라서, 반복 재하에 의한 누적변형, 변형을 연하 등 비선형적 재료의 특성, 액상화에 의한 강도 저하 등을 고려하는데 한계가 있으므로 지반거동을 상세히 모사하는데 어려움이 있다.

\* National Disaster Management Institute, Ministry of Public Safety and Security

\*\* Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

\*\*\* Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University

† Corresponding author

Tel.: +82-33-250-6463 Fax: +82-33-251-6463

E-mail: yskim2@kangwon.ac.kr

Received: May 16, 2016

Revised: May 23, 2016

Accepted: May 25, 2016

지진에 의한 거동특성을 상세히 모델화하기 위한 동적 탄소성 유한요소해석도 변위량의 검토방법으로 활용될 수 있으나, 상세한 지반조사·시험과 입력 데이터의 설정 등에 불확실한 요소가 많으므로, 시공실적과 재해 피해사례 등을 포함한 종합적 판단이 요구된다. 단, 2011년 동북지방 태평양 앞바다 지진과 같이, 현재까지 경험한 적이 없는 지진동을 받은 경우에는 경험적 방법에 의한 안정성의 검토가 충분하지 않다고 말할 수 있어 상세한 해석법에 의하여 지진시 거동을 예측하는 것이 중요하다.

지반구조물의 동적해석을 실시한 연구로서, Matsuo et al. (2000) 액상화 위험성이 높은 기초 지반상에 구축된 성토의 지진시 거동에 대하여 수치해석에 의한 연구를 실시하였으며, Kim et al. (2011)은 락필댐과 콘크리트 표면차수벽형 댐을 대상으로 하여 댐의 지진응답을 실험적으로 분석하기 위하여 동적원심모형실험을 수행하였으며, 이를 검증하기 위하여 2차원 수치해석을 추가로 수행하여 그 결과를 비교·분석함으로써 댐의 동적거동을 고찰하였다. Lee et al. (2015)는 흙-간극 유체의 연성을 고려한 수치해석을 수행함으로써 증고저수지의 수위상승에 따른 침투 및 지진시 동적거동을 평가하였다.

이와 같이, 기존의 연구 사례로부터 성토 또는 축조된 지반구조물에 발생하는 침투현상은 내진성의 저하를 유발하는 것으로 알려져 있으나, 그 사례는 아직까지 미미한 현실이다. 우리나라는 오래전부터 상당수의 저수지를 건설하였음에도 불구하고 이러한 분야에 대한 연구결과가 대단히 미흡하다. 따라서, 본 연구에서는 불포화조건을 고려한 수치해석을 통해 코어가 불량한 노후저수지의 수위상승에 의한 침투특성과 지진에 의한 동적거동을 비교분석하고자 한다.

## II. 수치해석의 제반조건

### 1. 적용프로그램

본 연구에서는 일본 Kyoto 대학에서 개발된 LIQCA-SF를 이용하여 노후저수지의 침투 및 동적거동을 분석하고자 하였다. LIQCA-SF는 불포화영역으로 확장된 Oka의 반복 탄소성 구성식 (Oka et al., 1999)이론을 기반으로 한다. 반복 탄소성 구성식은 응력파라미터로서 상대응력비를 일반화한 회전경화 (Oka and Washizu, 1981)를 사용함으로써 다차원적인 응력상태를 자유롭게 표현할 수 있으며, 비선형 이동경화법칙 (Armstrong and Frederick, 1966)을 적용하여 반복 재하에 따른 응력반전시 경화파라미터를 초기화할 필요가 없다. 또한 팽창성의 감소 등을 표현하기 위하여 과압밀 경계면 (Oka, 1982)을 도입하였으며, 여러 종류의 모래가 보유하고 있는 응

력-다일레이턴시 특성을 고려하기 위하여 일반화된 유동법칙 (Naghdi and Trapp, 1975)을 사용하고 있다.

본 연구에서는 응력변수로 골격응력을 적용하고, 석션해방에 의한 지반의 골격구조 변화를 탄소성구성식에 대입함으로써 불포화도에 확장된 구성식을 사용하였다 (Oka et al., 2006). 석션이 변화하면 흙의 특성은 크게 변화하게 된다. 일반적으로 석션이 감소하면 전단강도가 저하하는 것이 알려져 있다. 습윤 (Wetting), 건조 (Dring)에 동반한 석션해방에 대한 강도감소를  $\sigma_{mb}'$ 에 도입하였다. Fig. 1은 석션 해방에 따른  $\sigma_{mb}'$  변화의 모식도이며, Fig. 2는 석션의 효과에 의한 과압밀 경계면의 축소에 대한 모식도이다. 즉, 초기상태로부터 습윤에 의한 석션 해방에 기인한 지반강도 저하에 따른 과압밀 경계면 축소에 대한 개념을 나타낸다.

지반의 불포화 침투특성은 압력수두와 체적함수율의 관계 (수분특성곡선)와 비투수계수 (포화투수계수에 대한 불포화투수계수의 비)의 관계로 정의되며, 본 연구에서는 비교적 용이하고 적용성이 우수한 van Genuchten (1980)에 의한 불포화 침투모델을 사용하였다.

### 2. 제체특성 및 물리량 측정위치

해석을 위한 대상 저수지 단면은 한반도 중북부 지역에 위치하고 있는 실제 저수지에 근거하여 결정하였다. 저수지 제방고는 4.8 m이며, 그 구성은 제체 (Shell)와 코어 (Core)로 되

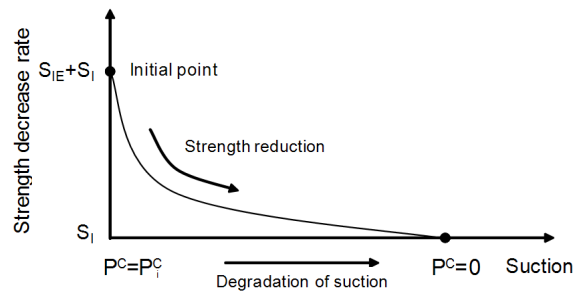


Fig. 1 Strength decrease rate

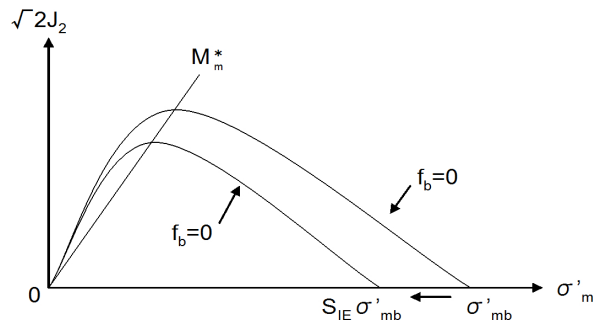


Fig. 2 Overconsolidation boundary surface

어 있다.

Fig. 3은 저수지의 형상 및 수치해석시 침하량, 간극수압, 지진응답가속도의 분석위치를 나타낸다. 본 연구에서는 제정부(L1)와 하류측(L2)에서 변위를 분석하고, 저수지 저부의 상류측(P1, P2)과 하류측(P3, P4)에서 간극수압을 분석하였다. 또한, 제정부 1개소(A1)와 상류측(A2, A3) 및 하류측(A4, A5)에서 동적과정 중 가속도 응답을 분석하였다. 저수지 하부 기초지반은 지진응답의 증폭비를 확인하기 위하여 약 12.4 m의 기반암을 모사하였으며, 불량한 코어조건을 모사하기 위하여 코어 중간에 0.4 m 두께로 침투층을 형성하였다.

### 3. 수치해석

해석을 위한 모델 및 경계조건을 Fig. 4에 나타내었다. 본 모델은 599개의 절점과 546개의 요소를 갖는다. 배수경계조건은 저수지 수위상승에 대응하는 유입 경계, 물의 이동이 발생하지 않는 비배수 경계 및 물이 지반으로부터 배출되는 유출 경계의 3가지로 분류하였으며, 저면을 비배수 경계 및 변위고정조건으로 설정하였다.

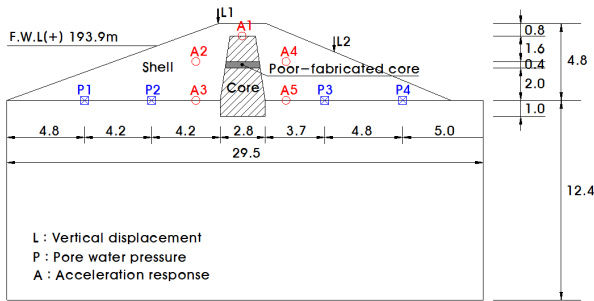
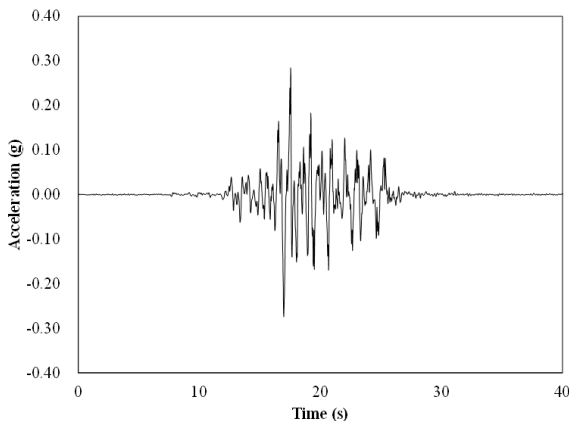


Fig. 3 Model configuration and measuring locations



(a) Hachinohe waveform

본 해석에서는 먼저 홍수위 (FWL, Flood water level; EL 193.9 m)까지 0.148 m/hr의 속도로 수위를 상승시킨다. 수위 상승 과정 (23시간)이 간극수압 250시간동안 완료되면, 지진동을 입력하여 중고 저수지 체체의 거동을 분석한다. 본 연구에서는 장주기 성분을 나타내는 Hachinohe 지진파와 단주기 성분의 특성을 나타내는 Ofunato 지진파를 입력파형으로 선정하였으며, 지속시간은 40초로 설정하였다.

Fig. 5는 KOCED 지오센트리퓨지 실험센터의 원심모형시험기의 진동대에서 예비실험을 통해 측정된 가속도파형으로써 동적 수치해석을 위한 입력파형을 나타낸다. 이때 설계지반가속도는 Hachinohe 지진파의 경우 0.25 g, Ofunato 지진파의 경우 0.3 g로 적용하였다.

### 4. 수치해석을 위한 설계정수

Table 1은 수치해석에서 사용한 기본물성값 및 설계정수

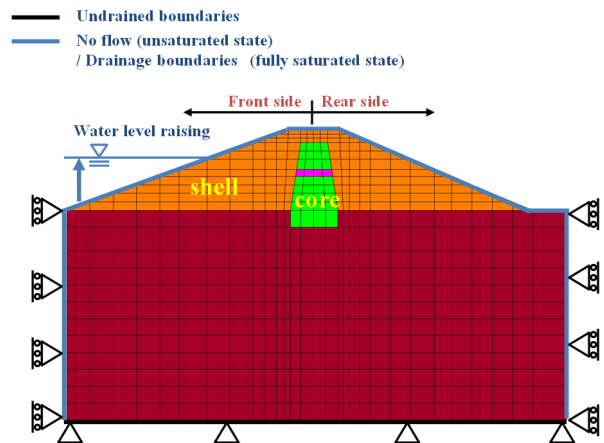
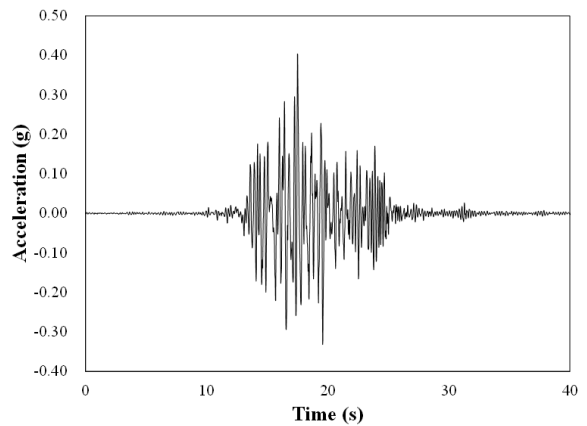


Fig. 4 Numerical analysis modeling and Boundary conditions



(b) Ofunato waveform

Fig. 5 Input dynamic loads–time profile

를 나타내고 있다. 제체재료 (Shell) 및 코어 (Core) 및 기반암 (Bed rock)의 설계정수는 실내실험결과 및 사용프로그램에서 제안한 재료에 따른 보편적 특성값 (The LIQCA Research and Development Group 2009)를 분석하여 결정하였다. 비투수계수와 수분특성곡선은 Lee (2012), Lee et al. (2015)의 연구결과를 인용하여 정의하였으며 (Fig. 6 참조), 동적해석 시에는 정규화 전단탄성계수 ( $G_0/\sigma_{m0}'$ ) 및 경화 파라미터 ( $B_0^*$  및  $B_1^*$ )를 침투해석을 위한 설계정수의 10배로 결정하였다. 간극유체의 체적압축계수는 2,000 kPa로 설정하여 간극수와 간극공기의 혼합체를 모델링할 수 있도록 하였다 (Okusa, 1985). 또한 불량한 코어조건을 모사하기 위한 침투층의 물성

값 및 설계정수는 제체재료와 동일하게 적용하였다.

### III. 수치해석 결과

#### 1. 침투거동

Fig. 7, Fig. 8는 수위상승에 따른 간극수압과 침하의 분포 및 변화를 나타낸다.

수위상승과정 (A-B구간)시 간극수압의 경우, 홍수위 (EL 193.9 m; GL 3.4 m)까지 수위가 상승하는 경우 상류제체는 급속히 포화되는 양상을 보이며, 하류 제체는 불량한 코어로

Table 1 Material properties used during seepage process

Material		Core	Shell	Bed Rock
Specific gravity ( $G_s$ )		2,672	2,223	2,650
Water content (%)		20,00	16,14	-
Density ( $g/cm^3$ )	$\rho_d$	1,634	1,691	2,000
	$\rho_t$	1,936	1,964	2,100
Elastic modulus, E ( $kN/m^2$ )		30,000	15,000	40,000
Poisson's ratio, $\nu$		0,30	0,35	0,23
Cohesion, c ( $kN/m^2$ )		10,0	0,0	0,0
Shear resistance angle, $\phi$ (deg)		27,4	35,0	45,0
Permeability, k (cm/sec)		2,96E-7	1,35E-3	1,00E-10
USCS		SC	SW	-
Swelling index, $\kappa$		0,0190	0,0025	0,0025
Normalized shear elastic modulus, $G_0/\sigma_{m0}'$		100	150	1,205
Stress ratio at phase transformation, $M_m$		1,270	1,270	0,910
Stress ratio at failure, $M_f^*$		1,270	1,270	1,500
Hardening parameter, $B_1^*$		25	35	45
Hardening parameter, $C_1$		600	50	0
Anisotropy disappearance parameter, $C_d$		2,000	2,000	2,000
Quasi-overconsolidation ratio, $OCR^*$		1,0	1,0	1,0
Dilatancy coefficient parameter, $D_0^*$		1,0	0,0	0,0
Referential strain parameter (in plastic), $\gamma_r^{P^*}$		0,008	0,015	0,015
Referential strain parameter (in elastic), $\gamma_r^{E^*}$		0,08	0,10	0,10
Dilatancy coefficient parameter, n		10,0	9,0	10,0
van Genuchten's parameter, $\alpha$		1,28	9,81	1,00
van Genuchten's parameter, $n'$		1,65	5,00	4,00

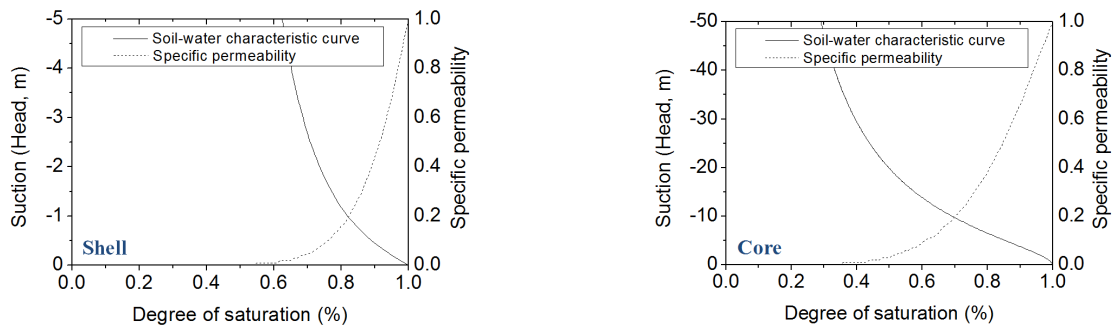


Fig. 6 Permeability of materials and water characteristic curve

인해 상류제체 포화이후 침윤선이 급격히 상승하는 경향을 확인할 수 있다. 이후 상류, 하류부 모두 간극수압의 완만한 거동 및 침윤이 나타나고 있다. 침하의 경우, 본 구간에서 하류측(L2)은 발생하지 않으나, 침투에 따른 상류측 제체의 변형에 따라 제정부(L1)에서 수위상승과 동시에 변위가 급증하는 것으로 판단된다.

수위상승 완료된 이후 (B-C구간)에는 상류측 간극수압(P1, P2)이 안정되고, 하류측의 간극수압(P3, P4)는 해석 개시 후 각각 25시간, 35시간부터 증가하며, 이후 수렴되는 경향을 보인다. P3 및 P4의 증가경향은 P1, P2과 거의 동일한 기울기로 급증하고 있는데, 이는 불량한 코어를 통한 제체 하류측으로 침투발생에 기인한 것으로 판단된다. 이와 같은 급격한 수압의 증가로 인해 코어부에 상당한 응력전이의 발생이

예상되며, 수압할렬 (Hydraulic fracturing)이 발생함으로써 제체균열이 발생할 우려가 있다고 판단된다 (Lim and Park, 1996; Shin, 2003).

침하의 경우, 침투로 인한 포화도가 높아지면서 유발되는 제체의 강성저하에 기인한 체적 수축이 발생하고, 이로 함께 L2의 침하속도가 해석 개시후 40시간부터 급증하는 것이 확인되었다. 불량한 코어를 통한 하류측으로의 침투가 계속되면서 L1 및 L2의 침하량이 지속적으로 증가하며, 해석종료시 최종침하량은 5.93 mm, L2에서 3.25 mm로 나타남을 확인할 수 있다. 본 해석 결과로부터, 코어가 불량한 노후 저수지의 경우 급속한 수위상승시 제정부 및 하류사면에서 침하, 균열 등의 변상이 발생할 우려가 있다고 판단된다.

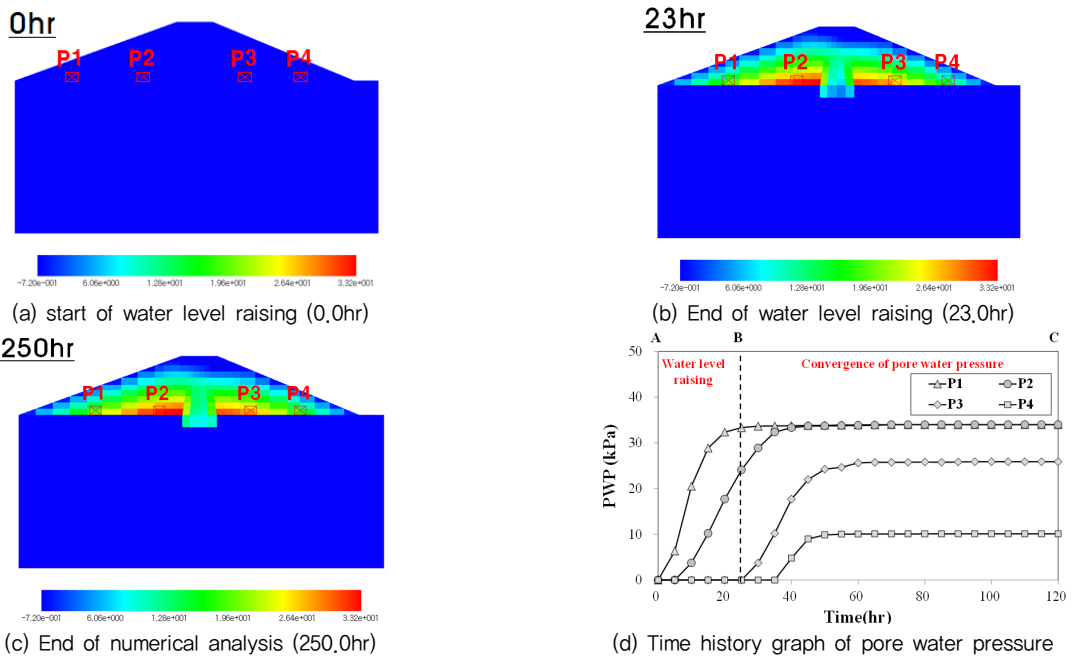


Fig. 7 Distribution of pore water pressure with time during seepage process

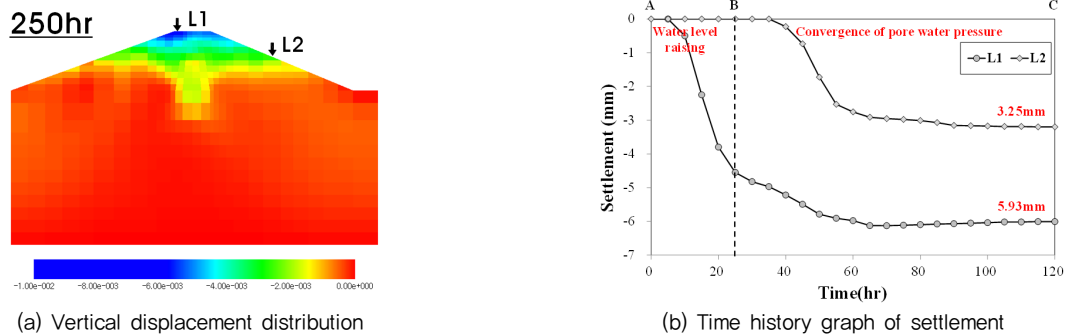


Fig. 8 Time history graph of settlement during seepage process



## 2. 동적거동

Fig. 9는 동적과정 중의 간극수압의 분포를 나타내고 있다. 여기서, 간극수압은 동적과정 중 급격한 증가경향을 확인할 수 있으며, 불량한 코어로 인해 포화가 상당히 진행된 하류측에서도 간극수압의 증가가 확인된다. 또한, 동적하중의 지속 시간인 40초 이후에는 간극수압이 소산되고 있다.

Fig. 10은 동적과정 중의 시간에 따른 간극수압의 변화를 나타낸다. Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 모두 상류측

의 P1, P2 및 하류측의 P3, P4에서 지진파로 인한 과잉간극수압이 발생하며, 동적하중 종료시 급하게 소산되고 있다. 여기서, 상류측 과잉간극수압의 소산이 하류측 과잉간극수압의 소산보다 다소 느리게 나타나고 있는데, 상류와 하류측의 침투에 따른 포화도의 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

Fig. 11은 동적과정 중의 연직변위의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 연직변위는 동적하중의 부가와 함께 제정부(L1)와 하류측(L2) 모두 증가하기 시작하여 동적하중 종료시부

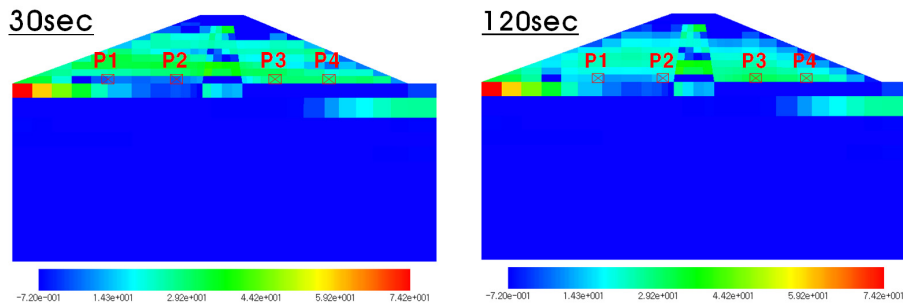


Fig. 9 Distribution of pore water pressure during dynamic process

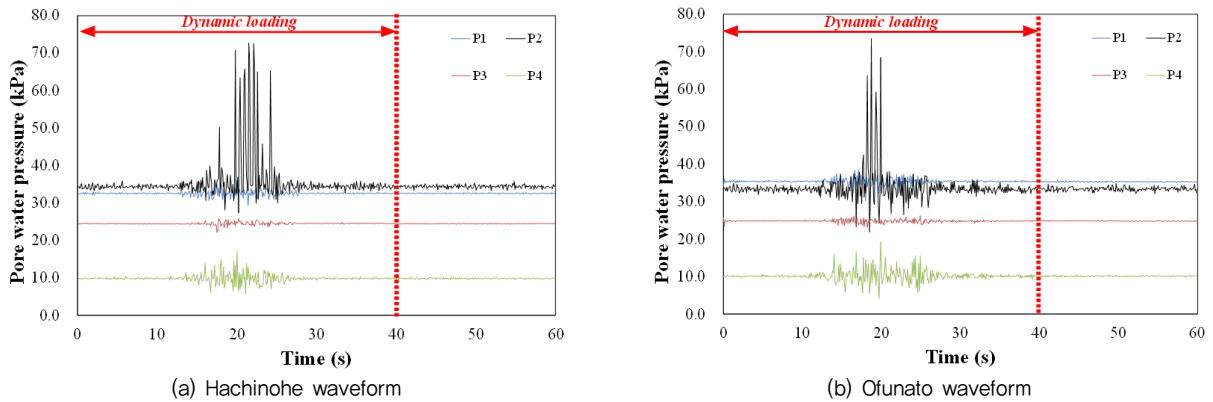


Fig. 10 Time history graph of pore water pressure during dynamic process

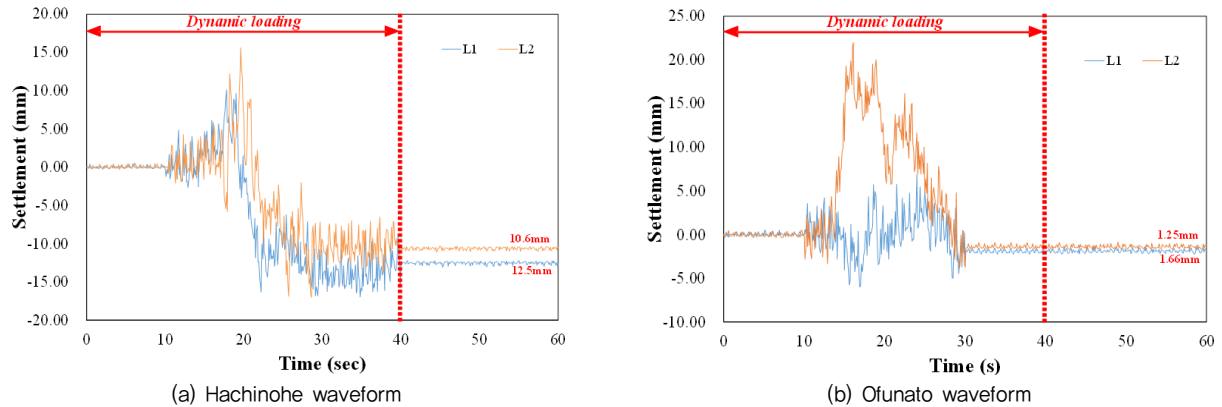


Fig. 11 Time history graph of settlement during dynamic process

터 소산됨을 확인할 수 있다. 이때, 최종 침하량은 Hachinohe 지진파의 경우 제정부에서 1.66 mm, 하류측에서 1.25 mm로 미소하게 발생하였으나, 하류사면에서 위쪽으로 약 20 mm의 용기가 순간적으로 발생한 것으로 나타났다. Ofunato 지진파의 경우 제정부에서 12.5 mm, 하류측에서 10.6 mm의 침하량이 발생하였으며, 제정부와 하류측 모두 용기와 침하가 복합적으로 발생하는 것으로 나타났다. 이때, 모든 조건에서 진폭이 작을 경우에는 전반적으로 변위가 작게 발생하고, 진폭이 클 경우에 변위가 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 하류사면보다 제정부에서 다소 이른 시점에서 침하가 발생하며, 최종 침하량도 크게 나타나는 것으로 확인되었다.

현재 국내 댐의 내진성능평가 기준인 댐마루 연직변위는 댐 높이의 1% 이내로 규정되어 있다. 본 해석결과 나타난 최종침하량/댐높이(%)는 0.03%~0.26%로 나타났으며, 이는 Choo et al. (2011)의 연구에서 계측된 0.5%미만의 상당히 작은 침하에 부합되어, 연직변위에 대한 내진성능평가 기준은 만족하는 것으로 판단된다. 그러나 지진발생시 평상시보다 크게는 3배 이상의 연직변위의 발생이 예상되므로 저수

지 제체의 안정성을 저하시킬 우려가 있다.

본 해석결과는 동적하중 부가시 제정부의 침하량이 하류측보다 크게 발생하고, 그 이유는 침투과정에서의 수위상승에 따른 제체의 포화 및 석션 해방에 따른 강성감소에 따른 것으로 판단된다. 이는 Lee (2012)의 연구결과인 수분이력을 경험한 도로성토의 내진성 저하와 유사한 경향이며, 또한, 제정부와 하류측의 최종침하량이 큰 차이가 나지 않는 이유는 불량한 코어로 인해 하류측의 포화도가 증가함에 따라 제체의 강도 및 강성 감소가 발생하였기 때문으로 사료된다.

Fig. 7(c)에 나타난 침투해석 완료시 간극수압분포상에 가속도 측정위치를 표기하여 Fig. 12에 나타내었다. 또한 각 측정점에서의 최대가속도의 증폭비를 침투해석 완료시의 간극수압 분포상에 표기하여 Fig. 13에 나타내었다. 또한 입력지진파에 따른 제체 내 위치별 가속도 응답을 Fig. 14, Fig. 15에 나타내었다. 모든 측정점에서의 가속도응답파형은 입력파형보다 크게 나타났다. 또한 입력가속도는 제체저면으로부터 높이가 증가할수록 가속도가 크게 증폭되어 A1에서 최대값(Hachinohe 지진파 1.54 g, Ofunato 지진파 2.54 g)을 나타내고 있다. 이와 같은 가속도 증폭경향은 중복반사이론에 근거한 선형탄성체 내에서의 그것과 유사한 것으로 판단된다(Lee et al., 2014). Fig. 13으로부터, 상류측의 최대가속도 증폭비(1.38배~2.48배)가 하류측(1.35배~1.98배)에 비하여 크게 평가되고 있으며, 이는 상하류측 제체의 포화도 증가 및 석션 해방에 따른 강성 저하에 기인한 것으로 판단된다.

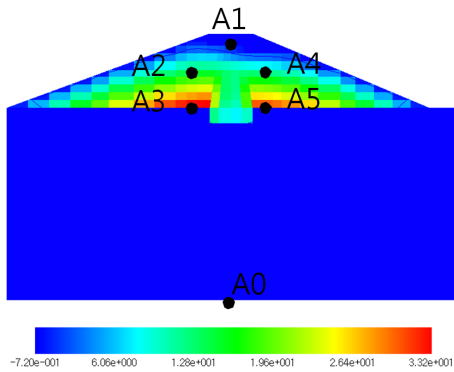


Fig. 12 Measuring points of acceleration

#### IV. 결 론

본 연구에서는 수치해석에 의해 코어가 불량한 노후 저수지의 침투특성과 동적거동을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

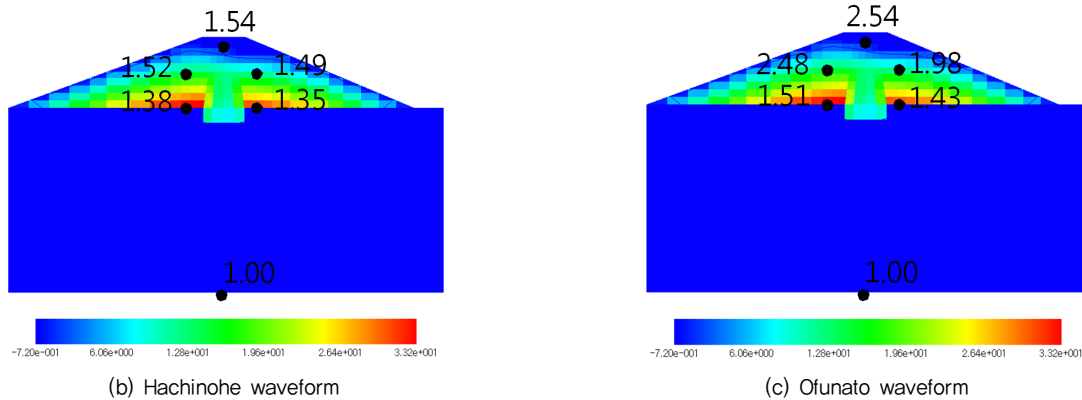


Fig. 13 Amplification ratio of acceleration of measuring points

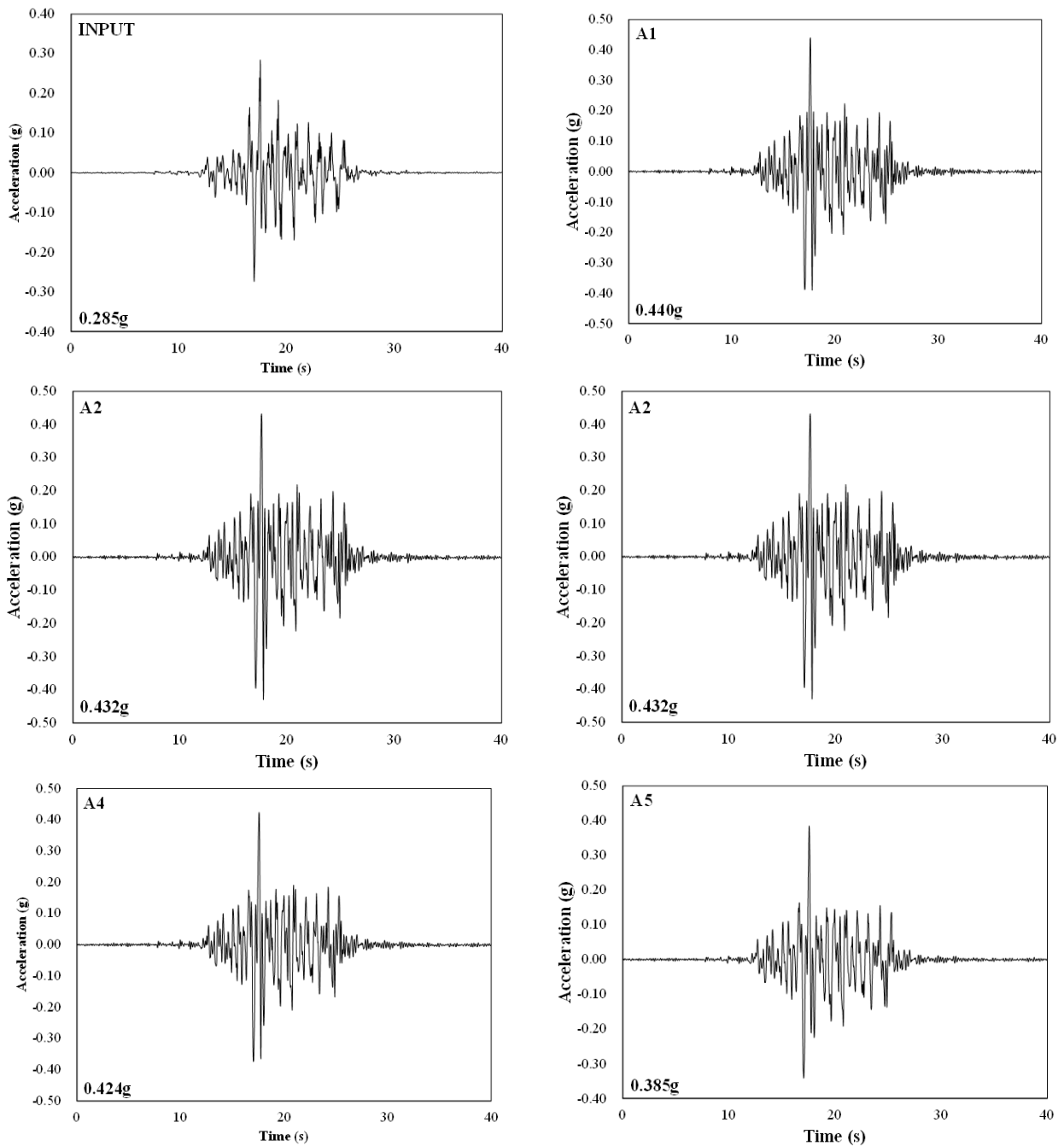


Fig. 14 Acceleration response of measuring points (Hachinohe waveform)

1. 수위상승에 따라 상류사면은 급속히 포화되는 양상을 보이며, 하류사면은 불량한 코어를 통한 침투로 침윤선이 급격히 증가하였다.
2. 침하량은 제정부에서 크게 나타났는데, 이는 침투과정에 따른 저수지의 침윤 및 제체 포화진행으로 인한 강도와 강성의 저하에 기인한 것으로 판단되며, 저수지 상류측의 가

- 속도응답이 하류측에 비해 크게 증폭되는 것으로 판단된다.
3. 코어가 불량한 노후저수지의 경우 수위 상승시에는 제정부 및 사면부에서 함몰, 균열 등이 발생하고, 지진 발생시에는 저수지의 변위 및 가속도응답이 크게 발생하여 액상화 위험성이 있는 것으로 나타났다.



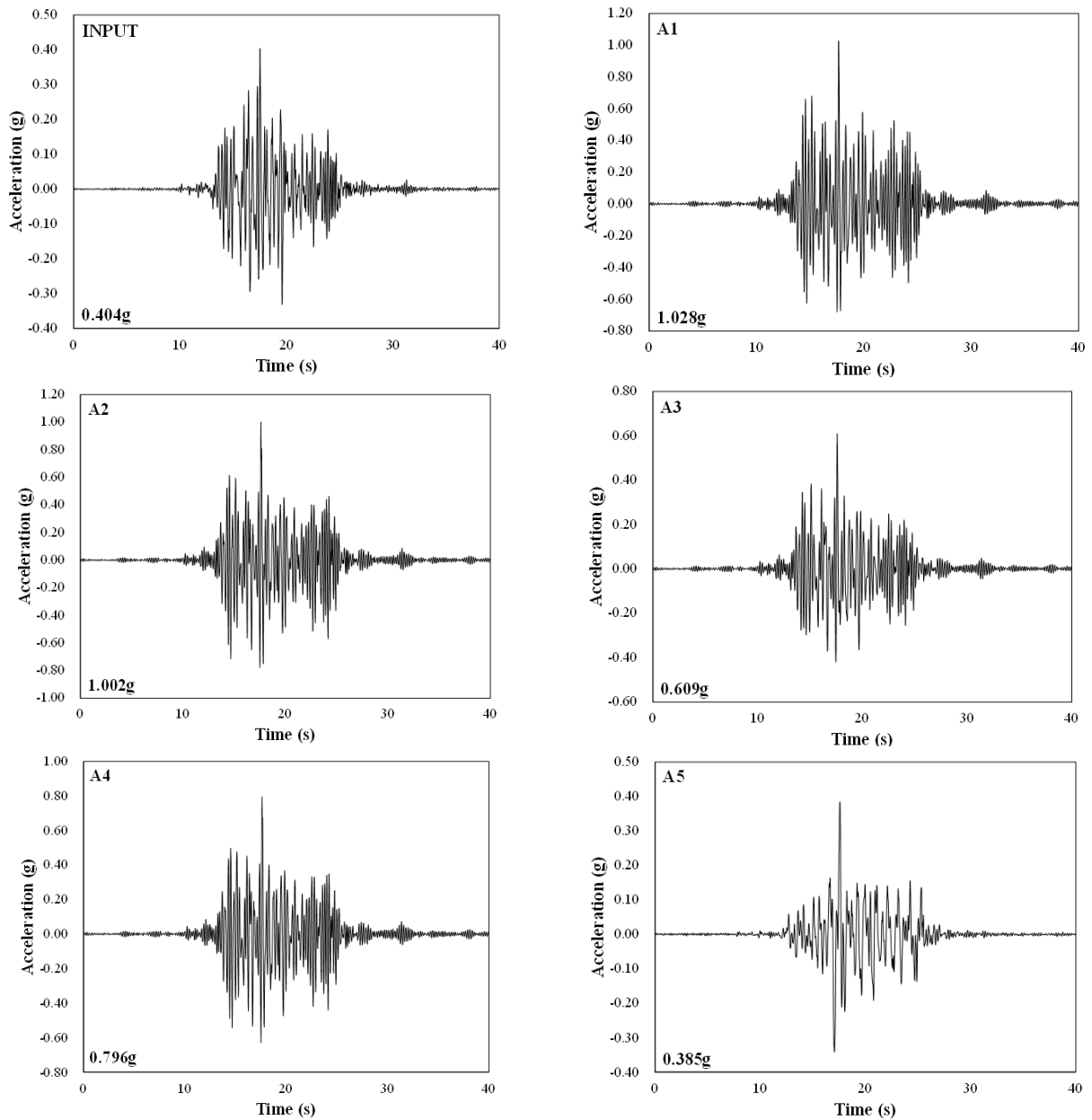


Fig. 15 Acceleration response of measuring points (Ofunato waveform)

따라서, 노후저수지를 재개발 할 때에는 그라우팅 공법 등을 통한 코어의 보강 등 현장조건에 맞는 적절한 공법을 선정할 필요가 있으며, 우수의 제체 내 침투를 억제하기 위한 사면 보호공법 등이 고려되어야 한다. 또한 수위상승에 따라 제체의 침하량이 증가할 가능성이 있으므로, 호우 등에 의해 급격히 수위가 증가하는 경우 간극수압 및 변위 계측치의 실시간 모니터링을 실시하여 이상 발생시 수문개방 등을 통해 저수지의 수위급증을 방지하는 조치를 강구할 필요가 있다.

## 사 사

본 연구는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축사업 (NEMA-기반-2013-106)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

1. Armstrong, P. J. and C. O. Frederick, 1966. A mathematical representation of the multiaxial Bauschinger effect. Central

- Electricity Generating Board and Berkeley Nuclear Laboratories. *Research & Development Department*.
2. Choo, Y. W., S. H. Lee, M. K. Kim, and D. S. Kim, 2011. A Study on the Criteria for the Earthquake Safety Evaluation of Fill Dams. *Journal of the Earthquake Society of Korea* 15(6):19-31 (in Korean).
  3. Horii, K., M. Tateyama, Y. Uchida, J. Koseki, and F. Tatsuoka, 1997. Permanent displacement accompanied by circular failure of railway embankments due to seismic loading. *the 32nd annual meeting of Japanese Geotechnical Society* 946: 1895-1896.
  4. Kim, J. S., J. M. Lee, H. W. Lee, and J. H. Jeong, 2009. A study on the stability of the breakwater according to replacement-layer change under earthquake loading. *Proc. of the 35th Annual Conference of Korean Society of Civil Engineers* : 2873-2876 (in Korean).
  5. Kim, M. K., S. H. Lee, Y. W. Choo, and D. S. Kim, 2011. Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rock-fill dams by dynamic centrifuge tests. *Soil dynamics and earthquake engineering* 31(11): 1579-1593.
  6. Kim, Y. I., K. S. Yeon, K. S. Kim, J. W. Jeong, and Y. S. Kim, 2011. An experimental study of reservoir failure phenomena according to transitional zone : spillway scour during overflow. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(2) (2011): 27-33 (in Korean).
  7. Lee, C. W., 2012. A study on dynamic stability of unsaturated road embankments using dynamic centrifugal model tests, Ph.D. dissertation, Kyoto University, Japan.
  8. Lee, C. W., Higo, Y. and Oka, F., 2014. Dynamic-stability Evaluation of Unsaturated Road Embankments with Different Water Contents. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 30(6): 5-21.
  9. Lee, C. W., S. Y. Park, H. M. Oh, and Y. S. Kim, 2015. Numerical simulation seepage and seismic behaviors of poorly compacted raised reservoir levee. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 57(4): 85-99 (in Korean).
  10. Lim, H. D. and S. Y. Park, 1996. A study of load transfer hydraulic fracturing in Juam main dam and regulation dam, *Journal of the Korean Society of civil engineers* 16(3\_3): 303-301.
  11. Matsuo, O., T. Shimazu, R. Uzuoka, M. Mihara, and K. Nishi, 2000. Numerical analysis of seismic behavior of embankments founded on liquefiable soils, *Soils and Foundations*, 40(2): 21-39.
  12. Naghdi, P. M. and J. A. Trapp, 1975. Restrictions on constitutive equations of finitely deformed elasto-plastic materials. *Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics* 28(1): 25-46.
  13. Oka, F. and H. Washizu, 1981. Constitutive equations for sand and overconsolidated clays. *Proc. Int. Conference on Recent Advances in Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. St. Louis, Prakash, S. ed. 1: 71-74.
  14. Oka, F., 1982. Constitutive equations for granular materials in cyclic loadings. *Proc. IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*. Delft, Vermeer, P. A. and Luger, H. J. eds., Balkema.
  15. Oka, F., T. Kodaka, S. Kimoto, Y. S. Kim, and N. Yamasaki, 2006. A multi-phase coupled FE analysis using an elasto-viscoplastic model for unsaturated soil. *Geomechanics II, Geotechnical Special Publication, ASCE, Proc. 2nd US-Japan workshop on Geomechanics*.
  16. Oka, F., A. Yashima, A. Tateishi, Y. Taguchi, and S. Yamashita, 1999. A cyclic elastoplastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus. *Geotechnique* 49(5): 661-680.
  17. Okusa, S., 1985. Wave-induced stresses in unsaturated submarine sediments. *Geotechnique* 35(4): 517-532.
  18. Shin, J. H., 2003. A study on the behavior of an earth and rockfill dam due to reservoir water. *Journal of the Korean Geotechnical Society* 19(6):61-70.
  19. The LIQCA Research and Development Group (Representative: Oka, F. of Kyoto University), 2009. User's manual for LIQCA2D09 (in Japanese).
  20. van Genuchten, M. T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal* 44: 892-898.