

## 실내 진동대 실험을 통한 하구둑 구조물의 내진 안정성에 관한 연구 A Study on Stability of Earthquake in Estuary Barrage through Shaking Table Test

신은철<sup>1)</sup>, Eun-Chul Shin, 강현희<sup>2)</sup>, Hyoun-Hoi Kang, 류병현<sup>3)</sup>, Byung-Hyun Ryu

<sup>1)</sup> 인천대학교 도시환경공학부 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

<sup>2)</sup> 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

<sup>3)</sup> 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

**SYNOPSIS** : Shaking table tests were performed to reproduce the dynamic behavior of estuary barrage and its subbase soil which can be potentially damaged during earthquake loading. For understanding the vibration effect to the ground during earthquake, the model was formulated with 1/300 scale of prototype estuary barrage and subbase soil. Scott and Iai(1989) proposed the law of the similarity for similar experimental conditions. The laboratory model shaking table test was conducted under the vibration condition of simulated earthquake of 0.154g. The horizontal displacement on the structure was measured during the shaking table test. The pore water pressure was also monitored for the underground layers of soil. The field horizontal displacement and the pore water pressure can be predicted by using the results of the laboratory shaking table test.

**Keywords** : horizontal displacement, pore water pressure, shaking table test, earthquake

### 1. 서 론

구조물에 대한 지진 피해는 단순히 시설물의 피해뿐만 아니라 주변 지역에 위치한 산업 시설물 등의 피해를 유발하여 심각한 인명 및 재산상의 피해가 발생할 수 있다. 최근 국내에서도 지진발생 빈도가 증가함에 따라 내진에 대한 관심이 높아지고 있으며 이에 대한 기준의 강화 및 적용은 바람직한 현상이라고 할 수 있다. 따라서 신설되는 구조물에 대하여 국내 내진설계 기준에 입각한 내진설계 기법을 적용하여 안정성을 확보하여야 할 것이다.

이번 사용된 구조물은 하천 하류의 하구둑 구조물로서 총 7개의 교각으로 이루어져 있으며 하부는 파일로 지지력을 확보하고 있다. 구조물 모형과 시추주상도에 의해 모사된 지반을 구성하였다. 이 모형은 상사법칙을 적용하여 구성하였으며, 진동하중조건은 0.154g의 가속도를 각각 장주기의 Hachinohe파, 단주기의 Ofunato파, 장단주기 특성을 모두 반영하여 생성한 인공지진파를 각각 적용하여 지진특성에 따른 구조물의 변위 및 간극수압의 증가량을 계측하여 구조물의 내진 안정성과 지진하중시의 액상화 안정성을 판단하였다.

## 2. 모형실험에 대한 상사법칙

모형실험을 통해 지반구조물의 동적 거동을 정량적으로 평가할 때에 중요한 점은 원형의 거동과 모형의 거동이 닮아야 하고, 원형과 모형에서 평형방정식 등과 같은 기본법칙이 만족되어야 한다는 것이다. Scott와 Lai(1989)는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 구성법칙, 변위와 변형률 관계와 같은 기본방정식을 이용하여 지반-구조물-유체 시스템에 대한 상사법칙을 연구하였다. Scott와 Lai가 유도한 상사법칙을 아래 표1.에 나타내고 있다. 흙의 변형이 반복유동성 거동을 보이는 경우, 지반-구조물 시스템의 동적거동을 이해하기 위해서는 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 을 고려하는 것이 매우 중요하다. 모형 지반의 전단파 속도를 알 때에는 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 은 식 (1)에 의해 결정된다(다음 표의 제 1형태), 그렇지 않다면 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 을 식 (2)로부터 구할 수 있다(제 2형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[ \frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (1)$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

여기서,  $(V_s)_m$ 과  $(V_s)_p$ 은 각각 모형지반과 원형지반의 전단파 속도이다.

흙의 변형이 변형률 연화거동을 보일 경우에는, 큰 변형이 발생하기 때문에 변형률에 대한 상사비  $\lambda_\epsilon$ 을 도입할 수 없으며, 원형지반의 거동을 모사하기 위하여 모형지반의 상대밀도를 원형지반의 상대밀도보다 낮게 조성하게 된다(Roscoe 1968; Schofield 1980; Scott 1989). 이 경우 제 3형태의 상사법칙을 적용할 수 있다.

표 1. 진동대 모형실험을 위한 주요 상사법칙(Scott and Iai, 1989)

물리량	상사비(원형/모형)			
	일반화된 상사비	실제 사용되는 상사비		
		제1형태	제2형태	제3형태
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
길이	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$
밀도	$\lambda_\rho$	1	1	1
시간	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도	1	1	1	1
속도	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
변위	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	$\lambda$
변형률	$\lambda_\epsilon$	$\lambda_\epsilon$	$\lambda^{0.5}$	1
투수계수	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
간극수압	$\lambda\lambda_\rho$	$\lambda$	$\lambda$	$\lambda$

### 3. 구조물 및 하부지반 내진 안정성 판단을 위한 진동대실험 방법

#### 3.1 대표 단면 및 모형 토조내 계측기 구성

이 연구에서 사용된 축소모형은 강하구의 수공구조물로 실제 구조물의 축소폭을 길이의 비로 1/300축소하여 제작하였다. 그림1은 하구둑 구조물의 대표단면이며 이를 통하여 축소 제작된 모형의 크기는 전체의 길이가 1100mm이고 110mm에서 180mm의 하구둑구조물 7개가 나열되어 있는 형태로 구성하였다. 모형토조의 하부지반은 자갈층 3cm, 하부모래층 5cm, 점성토층 2cm, 느슨한 하부모래층 2cm, 점성토층, 5cm, 상부모래층 2cm의 순서로 토조를 구성하며, 강도발현을 위해 일정한 하중으로 다짐은 하고 축소 모델링된 하구둑 조물을 설치한후 하부지반을 공기압을 통하여 포화시켰다.

이렇게 구성된 모형의 하부지반에는 그림 2와 같이 간극 수압계 가속도계, 변위계등이 매설되었다. 간극 수압계는 수위의 해측 내측을 구별하여 상부 모래층에 설치를 하고 간극수압의 깊이별 영향을 알아보기 위하여 하부모래층에도 설치를 하였다. 변위계는 지진하중 재하시의 구조물의 수평변위와 연직 침하를 알아보기 위하여 교각의 연직방향과 수평방향에 설치하였고, 하부기초의 연직방향으로 설치를 하였다.

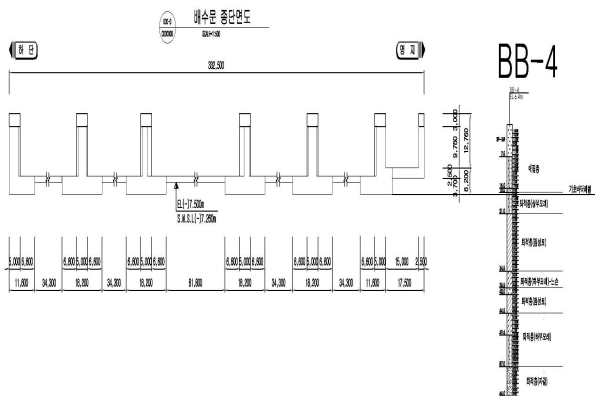


그림1. 진동대 실험에 사용된 수공구조물 단면도

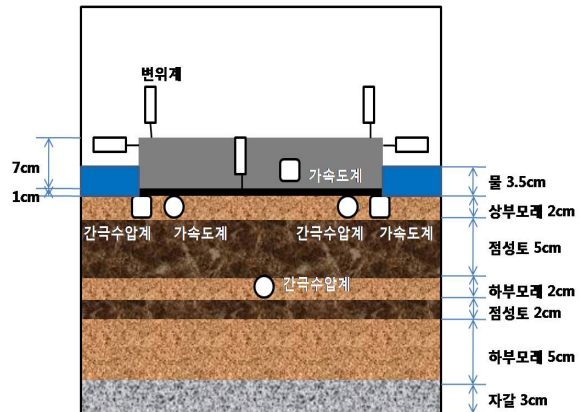


그림2. 진동대 실험 계측기 매설 및 구조물 모식도

#### 3.2 상사비의 결정 및 실험 조건

이 연구는 하구둑 구조물과 이 구조물이 구성된 지반의 내진성능을 상사율을 고려한 진동대 모형실험(Shaking Table Test)을 통하여 평가하여 안정성 평가를 하는 것을 주목적으로 하였다. 여기서 동적거동을 검토하여 적용된 상사율은 1/300으로 실험을 수행하였으며, 모형제작에 순서는 실제 시공순서에 따라 설치한 후 진동대 모형실험기 저부에 단주기파형과 장주기 파형 그리고 인공지진파의 3가지 파형으로 지진하중을 발생시켜 지진에 의한 지반과 제방의 상호작용을 분석한다.

모형 단면의 조성순서는 원지반 조성, 계측기 매설, 파일 설치, 교각등의 구조물 설치, 상부 계측기 설치, 수위조절의 순서로 실시를 하며 구조물 설치후 토조내 가압기를 통하여 원지반을 포화시킨다. 원지반의 구성은 그림 1.에 나와있는 시추 주상도를 바탕으로 두께를 상사비에 맞추어 축소하여 구성을 하고 모형 구조물의 경우 일반적인 콘크리트 구조물의 단위 중량인 2.3 t/m<sup>3</sup>의 석조 재료를 통하여 제작 설치 하였다. 적용 최대 지진가속도는 지역계수와 1000년 빈도의 위험도 계수를 통하여 0.154g로 선정하여 실험을 실시 하였다.

표 2. 진동대 실험 조건

구분	적용 상사비	모형 토조 조건	비고
구조물 폭(mm)	300	1000mm	상사고려
진동조건		장단주기,인공지진파	최대 지진가속도 : 0.154g
다짐도		80%다짐	
포화도		100%포화	
입도			상사미고려

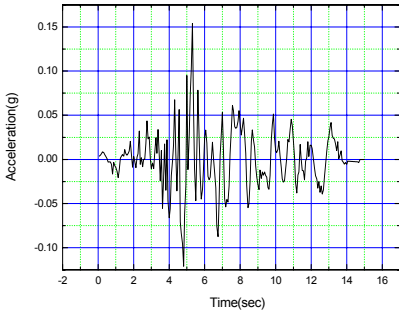


그림3. 장주기파형(0.154 g)

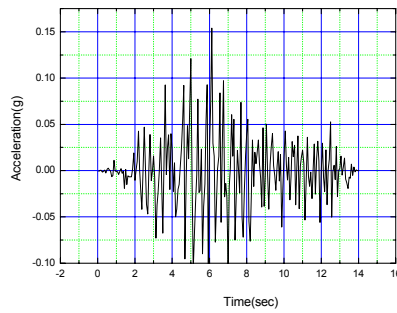


그림4. 단주기파형(0.154 g)

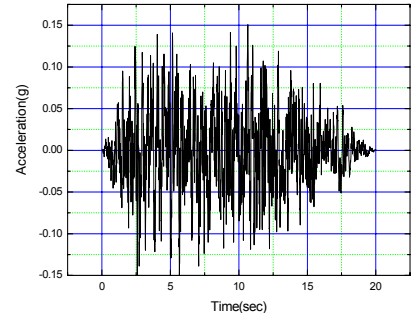


그림5. 인공지진파(0.154 g)

## 4. 진동파형에 따른 간극수압 및 침하 특성

### 4.1 간극수압의 변화

지진하중 재하 전 간극수압계를 이용한 각 심도별 간극수압은 느슨한 하부모래층에서 1.128 kPa, 구조물 해측에서 0.36 kPa, 구조물 내측에서 0.358 kPa로 나타났다. 간극수압계가 설치된 각 층의 유효응력은 느슨한 하부모래층에서 3.99 kPa, 구조물 해측에서 0.137 kPa, 구조물 내측에서는 0.137 kPa로 나타났다. 그림 6 ~그림 11은 지진하중재하시의 과잉 간극 수압 및 과잉간극수압비를 각 파형조건에서 측정된 것이다. 단주기 파형인 Ofunato 파형 재하조건시의 원지반의 간극수압 증가 현상은 구조물 해측부에서 최대 0.022 kPa 미만으로 거의 없는 것으로 나타났고 장주기 파형인 Hachnohe 파형과 인공지진파의 경우는 구조물 내측부에서 각각 0.1 kPa, 0.11 kPa이 나타났다.

이를 통하여 유효응력에 대한 간극수압의 증가율을 나타내는 과잉간극수압비를 확인한 결과 상부모래층과 하부모래층 모두 1.0 미만으로 지진하중에 대한 액상화에 대하여 안전한 것 예측할 수 있었다.

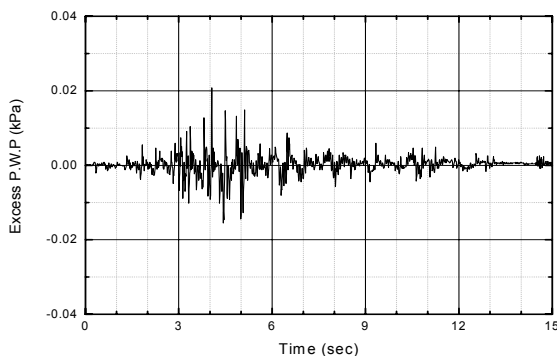


그림 6. 단주기파 과잉간극수압(구조물해측)

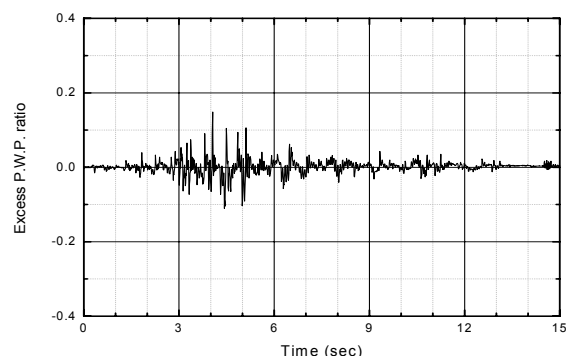


그림 7. 단주기파 과잉간극수압비(구조물해측)

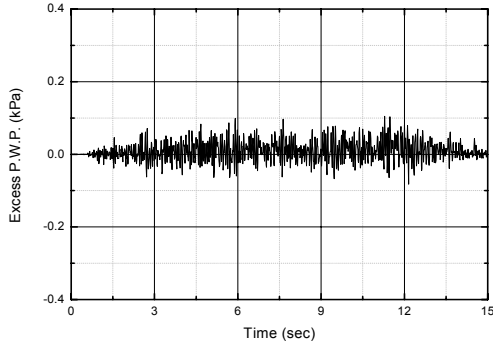


그림 8. 장주기와 과잉간극수압(구조물내측)

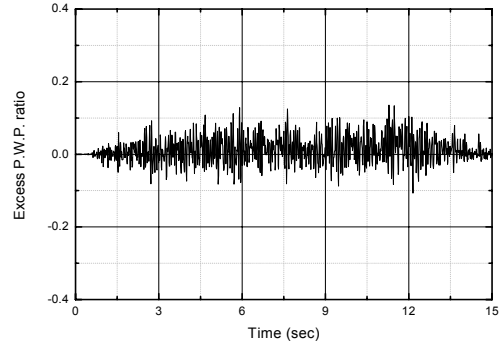


그림 9. 장주기와 과잉간극수압비(구조물내측)

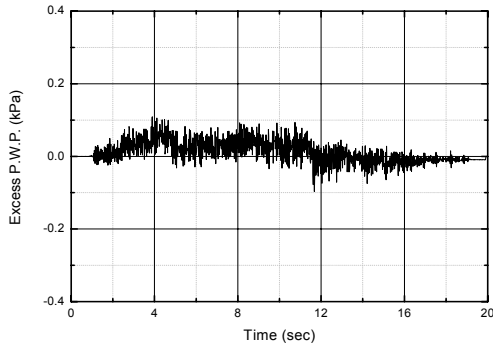


그림 10. 인공지진과 과잉간극수압(구조물내측)

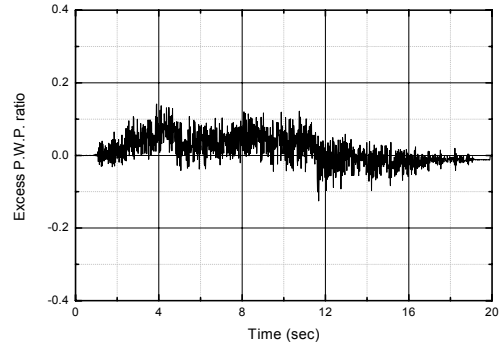


그림 11. 인공지진과 과잉간극수압비(구조물내측)

#### 4.2 지진하중 재하시의 구조물의 변위 특성

이 연구의 구조물의 변위는 붕괴 방지 수준의 내진시 허용 수평 변위인 300mm를 기준으로 그 안정성을 평가 하였다. 전체적인 계측위치는 그림 2에 나타난 것과 같이 수직 벽체에서 연직 수평변위를 하부기초에서 연직 변위를 각각 계측 하였다.

표 3은 실험 결과를 길이의 상사비인 300배를 적용하여 실제 구조물에서 발생할 수 있는 변위를 예측한 결과이다. 장주기 파형에서의 변위 특성은 수평변위가 13.2mm로 나타나고 연직 변위가 8.4mm로 나타난다. 그리고 단주기 파와 인공지진파의 경우는 각각 수평변위가 11.1mm, 8.4mm로 나타나고 연직 변위는 7.5mm와 7.8mm로 단주기파와 인공지진파 장주기와 비슷한 경향을 보인다.

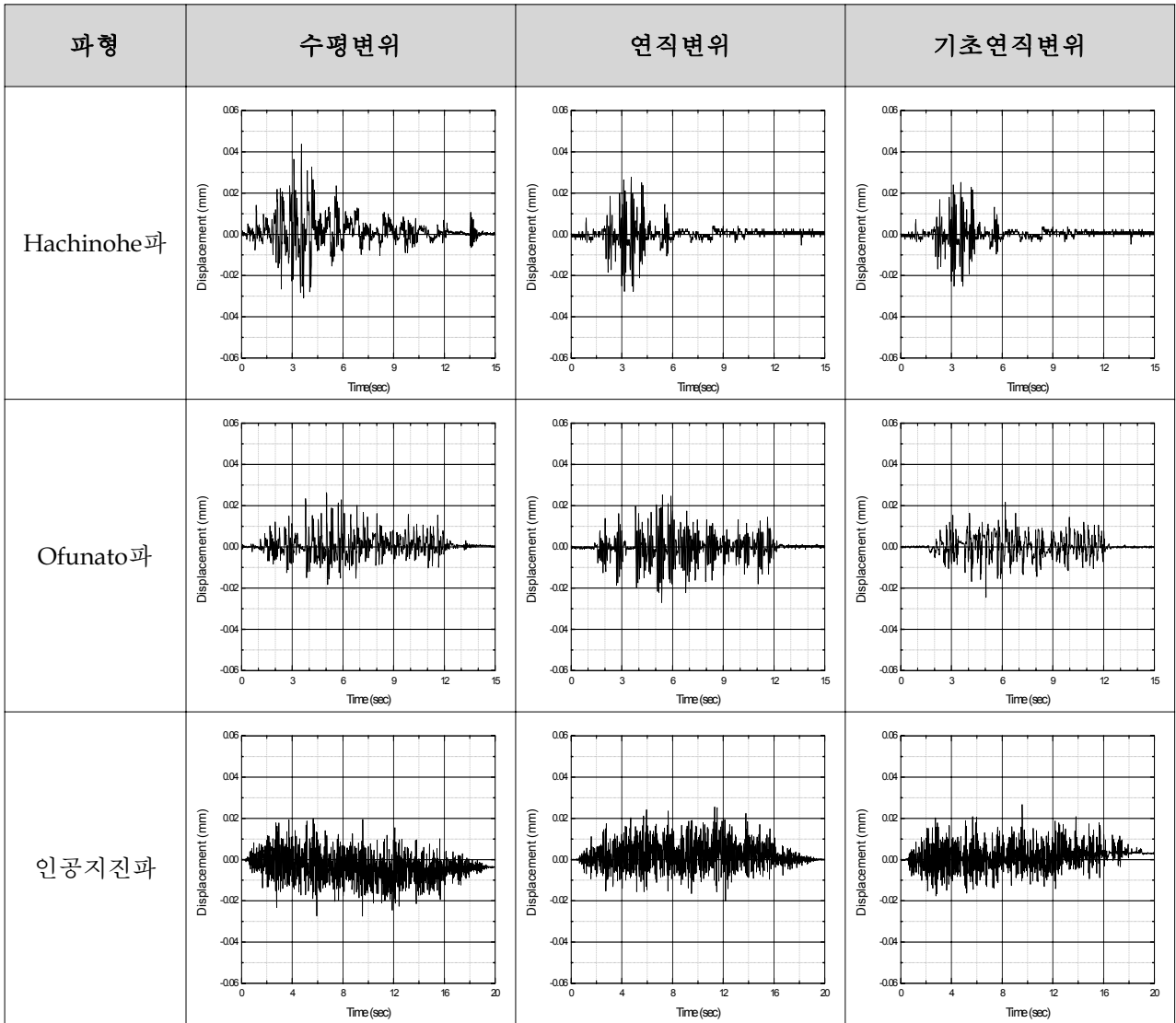
각 파형별 최대지진가속도 0.154g에서의 최대 수평변위는 모두 13mm이하로 기준인 붕괴방지 수준에서의 허용 수평변위량 300mm에 안정측에 들어감을 확인할 수 있었다.

표 4는 진동대 실험의 변위 계측값을 나타낸 것으로 각 파형과 유사한 형태의 파형을 나타내는 것을 알수 있다.

표 3. 지진하중 재하시 구조물의 예측 변위

구 분	최종변위(mm)			안정성 판단
	수평	연직	기초연직	
Hachinohe파	13.2	8.4	7.5	O.K
Ofunato파	11.1	7.5	6.6	O.K
인공지진파	8.4	7.8	8.1	O.K

표 4. 지진하중재하시 구조물의 변위 계측값



## 5. 결론

이 연구는 하구둑 구조물의 내진 안정성을 평가하기 위하여 상사비를 고려한 대상 구조물과 지반의 축소모형을 제작하여 진동대 실험을 실시하였다. 지진하중은 단주기파형과 장주기파형, 장주기와 단주기파형의 특징을 모두 가지고 있는 인공지진파를 선택을 하였으며, 이러한 지진파형의 재하시의 연직 수평 변형을 평가하여 구조물의 안정성을 판단하고 간극수압을 계측하여 액상화 안정성을 판단하였다. 이러한 연구의 결론은 다음과 같다.

1. 일반적인지반의 액상화는 비배수 상태에서 반복하중으로 지반내에 발생된 과잉간극 수압에 의하여 유효응력이 감소하여 발생하므로 과잉간극수압비를 계산하여 액상화 가능성을 효과적으로 평가할 수 있다. 본 실험을 통해 계측된 과잉간극수압의 증가는 구조물 및 하부지반 전체에 미미한 수준으로 계측되었다.

2. 모형조건에서의 간극수압은 구조물 내측과 해측부분에서 단주기파형에서 0.022 kPa 미만으로 거의 없는 것으로 나타났고, 장주기 파형인 Hachnohe 파형과 인공지진파의 경우는 구조물 내측부에서 각각 0.1 kPa, 0.11kPa로 나타났다. 이 부근에서의 유효응력은 0.137 kPa로 유효 응력이 간극수압의 증가량보다 현저히 크므로 연구 단면은 진동대 모형실험을 통해서도 액상화 안정한 것으로 판단할 수 있다.
3. 항만 및 어항 설계기준의 내진설계 기준에는 횡방향 변위 30cm이하가 안정한 것을 기준으로 참고하여 1/300 비율로 제작된 구조체의 횡방향 변위가 1mm이하일 때 내진 설계기준에 만족한다고 판단하였다. 따라서 본 실험결과 횡방향 변위는 0.045mm로 기준에 만족하고 이를 실제 스케일의 구조물에 적용하였을 때 13.2mm의 최대 변위가 생기는 것으로 예상되어 본 실험을 통해 내진검토를 수행한 구조물은 안정성에 문제가 없는 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. 원재익 (2004), "1g 진동대 모형시험을 위한 상사법칙의 적용성 평가" 한국지반공학회는문집 제20권 3호 , pp.141~150
2. 이국현 (2006), "모형실험을 통한 DCM기초 안정에 관한 연구"
3. Scott, R.F. (1989), Centrifuge and modelling technology : a survey:, Rev. Franc. Geotech, No48, July, pp.15-34
4. Iai,s. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, soils and Foundation, Vol.29(1), pp105~118
5. Whitman, R.V And Liao, S. (1985), "Seismic design of retaining wall", Miscellaneous paper GL-85-I, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.