

# 케이슨식 안벽의 내진보강 성능 평가 - 수치해석적 측면에서 -

## Performance Evaluation of Earthquake Resistant Caisson Type Quay Walls

권 오 순\*<sup>1</sup> Kwon, O-Soon

황 성 춘\*<sup>2</sup> Hwang, Sung-Choon

박 우 선\*<sup>3</sup> Park, Woo-Sun

### Abstract

The liquefaction of reclaimed land generally caused the harbor facilities to hazards. In Korea, the major harbor quay walls are gravity type and the gravity quay wall is not a good earthquake resistant structure. Recently, various earthquake resistant quay walls have been suggested, but the study on the efficiency of reinforced quay wall was not much performed. In this study, numerical analysis is carried out for performance evaluation of easily adoptable earthquake resistant quay walls. The results of numerical analysis are compared with shaking table test that is performed at the same cross-section.

### 요 지

항만시설에서 발생하는 지진에 의한 피해의 대부분은 매립지반의 액상화에 기인하는 것으로 알려져 있다. 국내 대형 항만의 안벽은 대부분 중력식 안벽으로 설계·시공되고 있으며, 이러한 중력식 안벽은 조성된 배후 지반의 액상화에 취약하여 지진 발생시 액상화로 인한 대규모의 파괴가 발생한 사례가 많이 보고된 바 있다. 최근 기존에 시공된 중력식 안벽구조물의 내진성능을 향상시키기 위해 다양한 공법이 제안되고 있지만, 그 효율성에 대한 연구는 미진한 실정이다. 이번 연구에서는 기존 안벽의 내진보강공법으로 쉽게 적용할 수 있는 내진안벽 형식에 대한 내진보강 성능을 평가하였다. 이 논문에서는 내진보강안벽의 내진보강 성능을 평가하기 위해 수치해석적 측면에서 케이슨식 안벽의 내진보강 성능을 평가하였으며, 동일한 단면에 대해 실시된 진동대시험 결과와 비교하였다.

**Keywords :** Quay wall, Liquefaction, Earthquake resistant, Numerical analysis

### 1. 서론

1999년 8월 17일 발생한 터키 Izmit 지진과 1999년 9월 21일 발생한 대만 921 Chi-Chi 지진은 우리나라에 지진에 대한 대비를 한층 촉진하는 계기가 되었다. 최근까지 지진에 의한 피해가 심하지 않았던 국내에서는 지진 발생시 피해가 극심한 외국에 비하여 지진에 대한 대책이나 예측

이 매우 미비한 실정이다. 그러나 구조물이나 사회기반 시설에 대한 내진대책 계획 및 지침방향이 최근에 수립 되는 등 내진에 있어서 초보적인 단계이기는 하지만 내진대책에 관한 관심이 높아지는 것 또한 최근의 경향이라 할 수 있다.

지금까지 지진에 대한 고려를 전혀 하지 않았던 항만 구조물에 있어서는 내진에 대한 관심이 육상구조물에 비

\*1 정회원, 한국해양연구소 연안항만공학연구센터 선임연구원

\*2 정회원, 경주대학교 건설환경시스템공학부 전임강사

\*3 한국해양연구소 연안항만공학연구센터 책임연구원

해 늦기는 하지만 지진이 발생하더라도 라이프라인을 유지할 수 있는 최소한의 대책에 대하여 연구가 진행되고 있다. 이번 연구는 항만시설의 내진성능 향상의 일환으로 내진 설계가 되어 있지 않은 기존 안벽구조물에서 적용될 수 있는 여러 가지 내진 보강공법에 대한 성능 평가를 실시하였다. 본 논문은 케이슨 안벽에 대한 진동대 모형실험과 연관하여 수치적인 해석을 실시하여 내진 보강공법의 효율성과 보강공법간의 내진성능을 비교하였다.

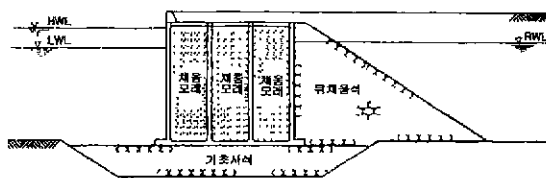
## 2. 케이슨식 안벽의 내진보강공법

기존의 안벽은 여러 가지 구조형식이 있지만 주요 형식으로는 중력식, 널말뚝식 및 잔교식 등으로 분류할 수 있다. 중력식 안벽의 하나인 케이슨식 안벽에 대한 내진 보강공법은 기존에 사용하고 있는 안벽의 법선을 변경하지 않고 사용하는 방법과 법선을 변경하여 보강하는 방법으로 구분된다. 표 1에서는 최근에 많이 사용되는 대표적인 중력식(케이슨식) 안벽의 내진 보강공법을 정리한 것이며, 그림 1과 그림2는 안벽에 작용하는 토압을 감소시키기 위해 배면을 경량재료로 치환하는 공법과 배면에 설치하는 사석을 뒤채움식으로 치환하는 공법의 개념도를 나타낸 것이다. 내진 보강공법들은 설계진도의 증가 정도에 따라 하나의 공법만으로 실시되는 경우와 몇 가지 공법을 조합하여 실시되는 경우도 있다. 공법의 선택은 각 시설에 대한 제약조건(법선 변경의 가능성, 안벽 배면 상황, 공법의 병용 시공, 공사구역 제한 등)이 큰 결정요인이 된다.

## 3. 내진해석기법

### 3.1 전응력해석

유한요소해석을 위한 지반과 구조물의 지배방정식은 다음 식과 같이 표현된다.



(a) 뒤채움식 보강안벽

표 1. 중력식(케이슨식) 안벽의 내진보강공법

법선 변경	기존 구조물	공법의 종류
없음	이용	·배면 토압저감(뒤채움재 경량화, 석재치환 등) ·배면지반 강도증가(사전혼합, 모래다짐말뚝 등) 안벽의 중량화(상치콘크리트 중량화 등)
	철거	·신설구조물 설치
있음	이용	·전면에 새로운 구조물 설치(콘크리트, 널말뚝, 잔교식 구조물 등)
	철거	·콘크리트, 널말뚝, 선반식, 잔교식 구조물 설치 ·신설구조물 설치

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = -\{m\}y - \{V\} + \{F\} - \{T\} \quad (1)$$

여기에서  $\{u\}$ 는 기반에 대한 절점의 상대변위벡터이며,  $[M]$ 은 질량행렬,  $[K]$ 는 재료의 감쇠특성을 포함하는 강성행렬,  $\{m\}$ 은 질량행렬  $[M]$ 에 관련된 벡터이며  $y$ 는 기반에서의 입력가속도이다. 점성경계로부터 작용하는 힘을 나타내는  $\{V\}$ 는 다음 식과 같이 계산된다.

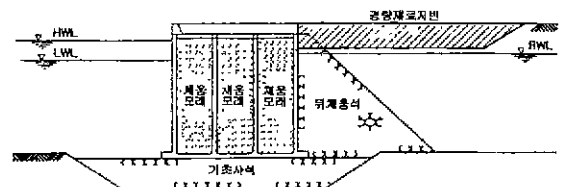
$$\{V\} = \frac{1}{L}[C](\{\dot{u}\} - \{\dot{u}\}_f) \quad (2)$$

여기에서  $L$ 은 요소의 두께,  $[C]$ 는 자유장의 특성에 의존하는 단순대각행렬이며  $\{\dot{u}\}_f$ 는 자유장속도이다.  $\{F\}$ 는 요소 끝단에 작용하는 힘으로 단지 자유장에서 연직면에 작용하며 횡방향의 에너지전달과는 무관하다.

$$\{F\} = [G]\{u\}_f \quad (3)$$

여기에서  $[G]$ 는 자유장에서 주파수에 독립적인 복소 강성행렬을 의미한다. 에너지전달에 관련된 힘을 나타내는 행렬  $\{T\}$ 는 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\{T\} = ([R] + [L])(\{u\} - \{u\}_f) \quad (4)$$



(b) 경량치환 보강안벽

그림 1. 케이슨식 안벽의 내진보강사례

[R]과 [L]은 주파수에 의존하는 정계장성행렬이다 (Lysmer and Drake, 1972; Waas, 1972).

운동방정식은 입력운동을 다수의 조화진동을 조합하여 계산하는 복소응답기법으로 풀 수 있다. 입력 가속도를 시간 간격마다 N개의 가속도로 표현하여 다음 식과 같이 (N/2+1)개의 실수부 조화진동의 합으로 표시하였다.

$$\ddot{y}(t) = Re \sum_{s=0}^{N/2} \ddot{Y}_s \cdot e^{i\omega_s t} \quad (5)$$

여기서,  $\omega_s = \frac{2\pi s}{N\Delta t}$   $s=0, 1, \dots, N/2$

마찬가지로 변위벡터 또한 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\{u\} = Re \sum_{s=0}^{N/2} \{U\}_s \cdot e^{i\omega_s t} \quad (6)$$

$$\{u\}_f = Re \sum_{s=0}^{N/2} \{U_f\}_s \cdot e^{i\omega_s t} \quad (7)$$

여기에서 진폭  $\ddot{Y}_s$ 와  $\{U_f\}_s$ 는 Fourier 변환으로 입력 가속도에서 쉽게 계산할 수 있다.

식 (2)~식 (7)을 식 (1)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 최종 행렬식을 얻을 수 있으며, 행렬식을 계산한 후 시간영역에서 다시 Fourier 역변환을 실시하면 지반의 가속도 및 변위벡터를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \left( [K] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L} [C] - \omega_s^2 [M] \right) \{U\}_s \\ & = -(m) \ddot{Y}_s + \left( [G] + [R]_s + [L]_s + \frac{i\omega_s}{L} [C] \right) \{U_f\}_s \end{aligned} \quad (8)$$

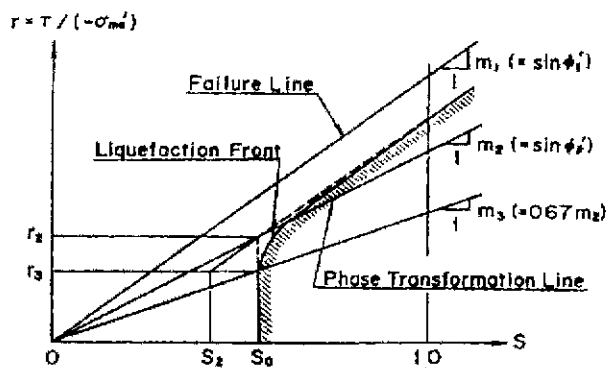


그림 2. Liquefaction front의 개념도

### 3.2 유효응력해석(Cyclic Mobility Model)

간극수압의 영향을 고려한 해석을 수행하기 위해 평형방정식, 적합조건식과 함께 간극수압이 고려되는 운동방정식과 간극수의 평형방정식 및 연속방정식을 만족하여야 한다.

이번 연구에서는 지반의 액상화를 모델링하기 위해 액상화현상을 느슨한 상태의 모래가 조밀한 상태의 모래로 변화하는 동적인 이동현상(cyclic mobility)이 발생한다고 정의하여 지반의 거동을 해석하는 방법인 cyclic mobility model을 도입하였다. 이 모델에서 가장 중요한 인자가 바로 변상선(phase transformation line)과 전단일(shear work)이 같은 응력점을 연결한 곡선인 등전단일선(equal shear work envelope)이다. 반복재하에 따라 점차 전단일이 누적되어 등전단일선은 점차 파괴포락선에 접근하고 있으며, 이러한 곡선을 액상화의 관점에서 다른 표현으로 액상화전선(liquefaction front)라고 부른다. 또한, 변상선과 전단일(S)과의 관계로부터 그림 2와 같은 곡선을 얻을 수 있는데, 액상화전선의 형상에 관련된 변수인 S를 다음과 같이 정의한다.

$$S = S_0 \quad (r < r_3) \quad (9)$$

$$S = S_2 + \sqrt{(S_0 - S_2)^2 + [r - r_2]/m_1]^2} \quad (r > r_3) \quad (10)$$

여기서,

$$r_2 = m_2 S_0, \quad r_3 = m_3 S_0, \quad S_2 = S_0 - (r_2 - r_3) m_1$$

$$r: \text{전단응력비}, \quad r = \frac{\tau}{(-\sigma'_{v0})}$$

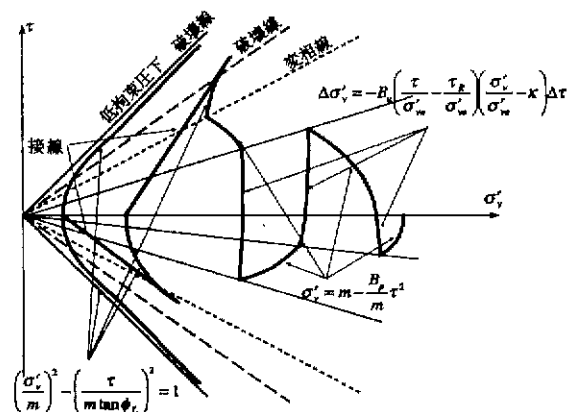


그림 3. 반복재하에 따른 유효응력경로

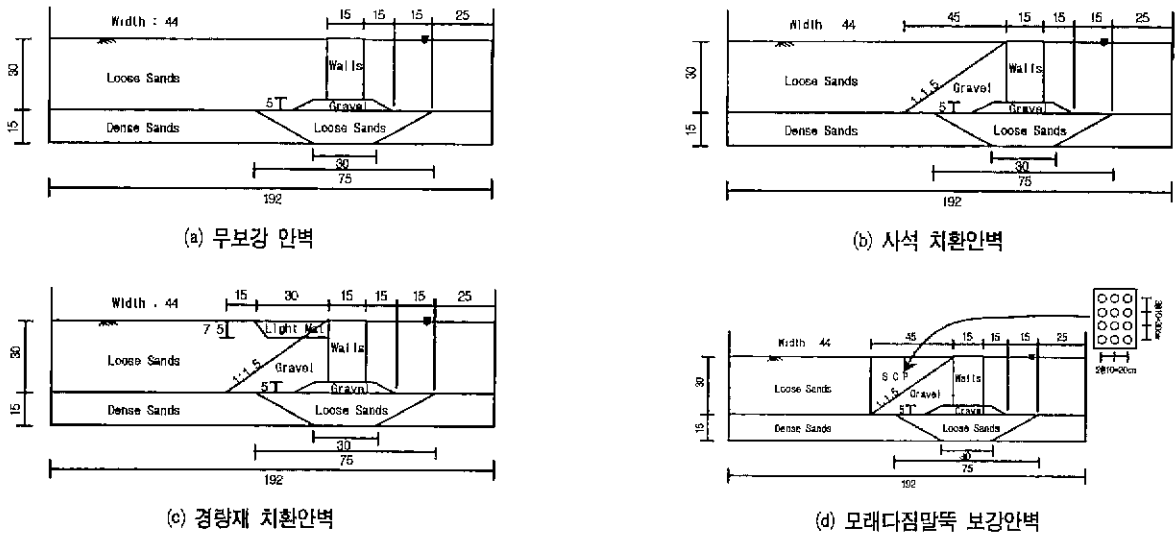


그림 4. 검토단면

$S_0$  : liquefaction front parameter

$m_1$  : 파괴포락선의 기울기

$m_2$  : 변상선의 기울기

이러한 변상선과 전단일의 개념을 도입하여 변상선의 특성을 반영하는 변상선의 기울기와 전단일의 특성을 나타내는 변수인  $S_0$  등과 지반의 응력-변형 관계를 이용하여 지반의 유효응력경로를 다음 그림 3과 같이 정의할 수 있다. 미리 결정된 유효응력경로에 따라 반복재하에 의해 발생하는 파괴간극수압을 계산할 수 있다.

## 4. 해석결과

### 4.1 해석단면 및 해석조건

케이슨식 안벽의 내진보강 성능을 평가하기 위하여 보강하지 않은 무보강 안벽과 대표적인 서로 다른 보강기법을 적용한 3가지 단면에 대한 검토를 실시하였다. 내진 보강안벽은 안벽에 작용하는 토압을 경감시키며 배수를 촉진시키는 사석치환공법과 경량치환공법 그리고 안벽 배면지반의 강도를 증가시키는 모래다짐말뚝 보강공법을 적용한 안벽단면을 사용하였다. 다음 그림 4는 케이슨식 안벽의 내진보강 성능 평가를 위해 실시된 진동대 실험에 사용된 단면을 나타낸 것으로 이번 연구에서도 동일한 조건의 단면에 대하여 해석을 수행하였다(김성렬 등, 2000). 립에서 느슨한 지반의 단위중량은  $1.87t/m^3$ ,

조밀한 지반의 단위중량은  $1.99t/m^3$ 이고, 경량재료로 사용한 토사의 단위중량은  $1.10t/m^3$ 이며, 모래다짐말뚝 보강지반은 상대밀도 90%로 조성하였다.

### 4.2 실내실험 결과

해석에 사용될 지반의 동적 강도정수를 구하기 위하여 공진주시험을 실시하였다. 사용 응력상태 범위에서 최대 전단탄성계수와 사용변형을 범위에서의 전단탄성계수와 감쇠비의 변형을 의존곡선을 도출하였으며, 그 결과는 다음 그림 5 및 그림 6과 같다. 일반적으로 지반의 전단

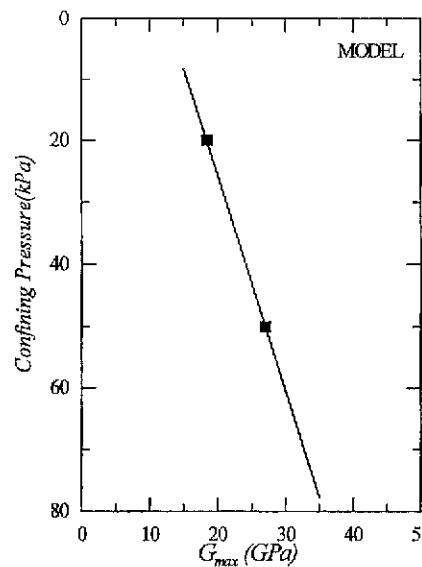


그림 5. 최대전단탄성계수



램 FLIP)를 사용하였다.

사용한 해석프로그램은 해석 구성모델의 차이뿐만 아니라 감쇠 특성의 입력에 차이가 있다. 등가선형화 이론을 적용하는 경우에는 기반암에서 지진파가 입력되며 감쇠비는 실험결과에 의거하여 변형률 의존곡선을 사용한다. 그러나, 유한요소해석의 경우에는 속도벡터에 곱해지는 감쇠특성 행렬로 적용된다. 따라서, 엄밀한 전응력 해석과 유효응력해석 결과의 비교는 어려우며, 일반적으로 전응력해석에서는 지반의 변위와 가속도 응답특성을 고찰하고 유효응력해석에서는 간극수압발현 및 소산특성을 고찰하여 보았다.

입력지진파는 4Hz의 정현파를 0.15g 진폭으로 5초간 적용시켰으며, 지진파는 지반의 하단에 작용하는 것으로 보고 해석을 실시하였다.

### 4.3.2 무보강 안벽

해석 결과, 하단에서 입력된 지진동은 지반 내를 전파하면서 증폭되는 경향을 보였다. 그림 7은 지반의 최대 횡방향 가속도 응답을 나타낸 것으로, 최대 지반 가속도는 지반 상부에서 200gal(≒0.20g)로 나타났으며, 느슨한

모래층과 조밀한 모래층과의 경계에서는 최소의 응답가속도를 보이고 있다. 그림 8은 지진동에 의해 발생한 횡방향 변위를 도시한 것으로 안벽 상단에서 최대변위가 발생하며 최대 횡방향 변위는 70mm로 나타났다.

그림 9는 지진동에 의해 발생하는 과잉간극수압의 응답특성을 시간에 따라 나타낸 것이다. 최대 과잉간극수압이 발생하는 0.28초를 지나면서 과잉간극수압이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 그림 9 (a)에서 나타난 바와 같이 최대 과잉간극수압이 발생할 시점에서 유효구속압에 대한 발생과잉간극수압의 비를 뜻하는 과잉간극수압비가 거의 1에 가까워지는 것을 알 수 있다. 과잉간극수압은 안벽의 배후 지반과 느슨하게 조성된 안벽의 하부 지반에서 크게 발생하는 것으로 나타났으며, 시간이 경과함에 따라 배면 지반은 원활히 배수가 이루어져 간극수압이 점차 감소하고 있지만 느슨하게 조성된 안벽 하부 지반은 배수가 충분히 이루어지지 않아 과잉간극수압비가 상대적으로 크게 유지되고 있다.



그림 10 횡방향 최대가속도

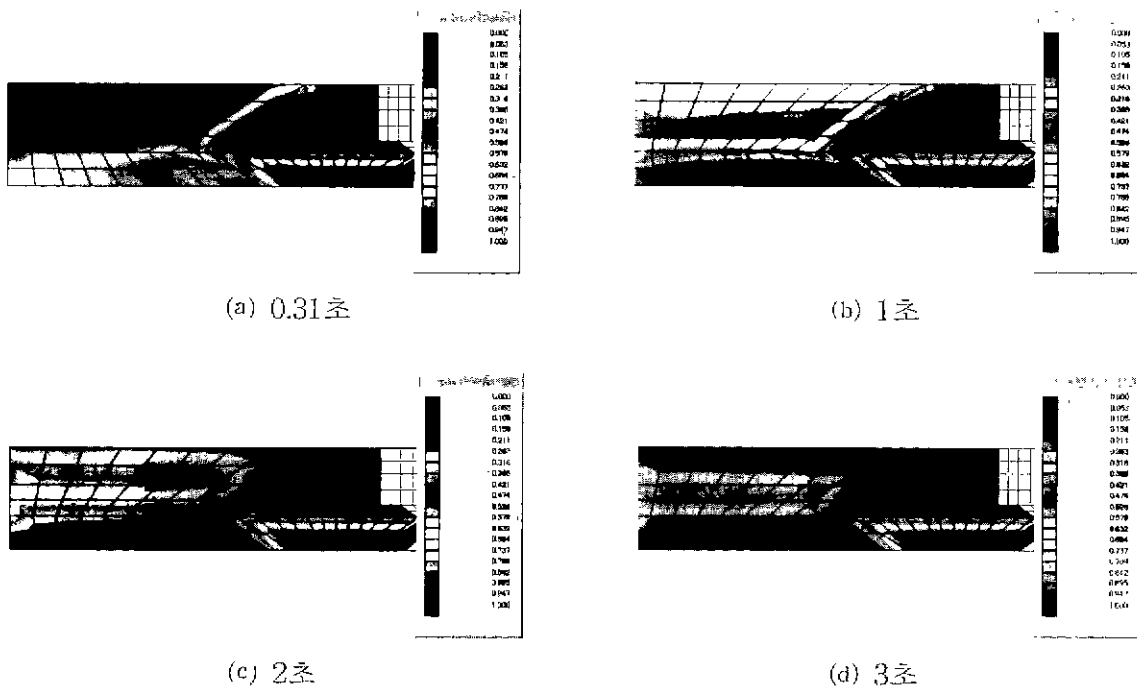
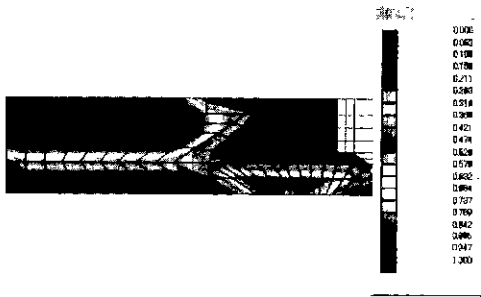
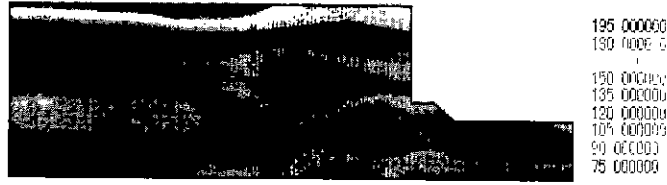
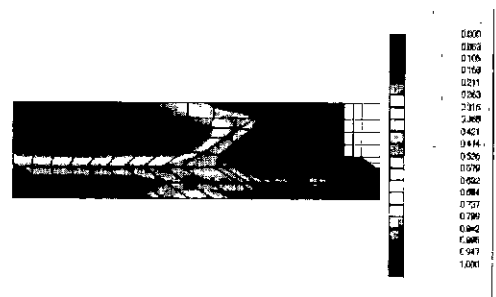


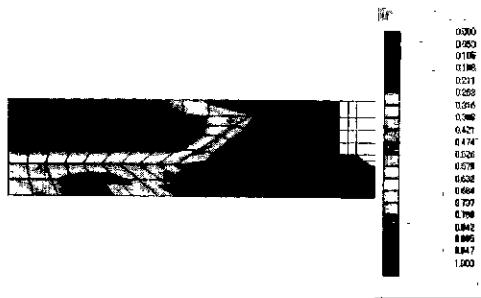
그림 11. 시간에 따른 과잉간극수압비(사석치환안벽)



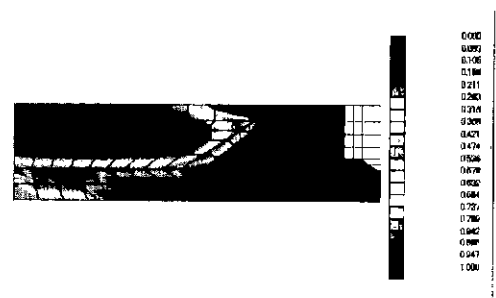
(a) 0.31초



(b) 1초



(c) 2초



(d) 3초

그림 13. 시간에 따른 과잉간극수압비(경량치환안벽)

### 4.3.3 사석치환안벽

사석치환안벽에 대한 해석결과, 무보강안벽과 유사한 가속도 응답특성을 보이고 있지만 사석이 설치된 부근의 가속도 응답특성은 다소 상이한 경향을 보이고 있다. 발생한 최대 횡방향 지반 가속도를 나타낸 그림 10은 지반 상부에서 210gal( $\approx 0.21g$ )로 나타났으며, 사석재료의 하단에서 최소의 가속도 응답을 나타내고 있다. 무보강안벽과 마찬가지로 안벽 상단에서 최대변위가 발생하며, 최대 횡방향 변위는 64mm로 나타나 무보강 안벽에서 발생한 변위보다는 작지만 그 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.

과잉간극수압의 응답특성을 시간에 따라 나타낸 그림 11을 살펴보면, 앞의 경우와 마찬가지로 최대 과잉간극수압이 발생하는 0.31초를 경과하면서 점차 과잉간극수압이 감소함을 알 수 있다. 그림에서 사석이 설치된 위치에서는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않으며, 안벽의

배후 지반과 느슨하게 조성된 안벽의 하부 지반에서는 과잉간극수압이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 시간이 경과함에 따라 배면 지반은 원활히 배수가 이루어져 간극수압이 점차 감소하지만 느슨하게 조성된 안벽 하부 지반은 배수가 충분히 이루어지지 않아 시간이 경과하여도 과잉간극수압비가 크게 나타나고 있다.

### 4.3.4 경량치환안벽

경량치환안벽에 대한 해석결과, 대체적으로 사석치환안벽의 경우와 유사한 가속도 응답특성을 보이는 것으로 나타났다. 발생한 최대 횡방향 지반 응답가속도를 나타낸 그림 12에서 최대 지반 가속도는 지반 상부에서 195gal( $\approx 0.20g$ )로 나타났으며, 사석재료의 하단에서 최소의 응답가속도를 나타내고 있다. 최대변위는 안벽 상단에서 18mm가 발생하는 것으로 나타나 무보강안벽이나 사석치환안벽보다 상대적으로 작은 변위가 발생하였다.

경량치환안벽의 과잉간극수압 응답특성을 시간에 따라 나타낸 그림 13을 살펴보면, 앞의 경우와 마찬가지로 0.31초에서 최대 과잉간극수압이 발생하고 시간이 진행될수록 과잉간극수압비가 점차 감소하는 것으로 나타났다. 사석으로 보강된 지반과 경량재료로 치환한 지반에서는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않았다. 사석치환안벽의 경우와 마찬가지로 안벽의 배후 지반과 느슨하게 조성된 안벽의 하부 지반에서는 과잉간극수압이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 경량재료로 치환하여 상재하중이 상대적으로 작게 작용한 안벽 하부의 느슨한 모래층에서는 다른 경우에 비하여 발생 과잉간극수압이 상대적으로 작으며, 시간이 경과함에 따라 간극수압이 빠르게 소산되는 경향을 보이고 있다.

#### 4.3.5 모래다짐말뚝(SCP) 보강안벽

모래다짐말뚝 보강안벽에 대한 해석결과, 발생한 최대 횡방향 지반 응답가속도를 나타낸 그림 14에서 최대 지반가속도는 지반 상부에서 200gal( $\approx 0.20g$ )로 나타났으며, 안벽의 상단에서 최대 지반 응답가속도를 보이고 있다. 다른 경우와 마찬가지로 안벽 상단에서 18mm의 최대변위가 발생하는 것으로 나타났으며, 이것은 경량치환안벽의 경우와 거의 같은 값이다.

지진동에 의해 발생하는 과잉간극수압 응답특성을 시간에 따라 나타낸 그림 15를 살펴보면, 다른 경우와 마찬가지로 0.31초에서 최대 간극수압이 발생한 후, 시간이 경과할수록 점차 감소함을 알 수 있다. 그림에서 알 수 있듯이 사석으로 보강된 지반과 모래다짐말뚝으로 보강된 지반에서는 과잉간극수압이 거의 발생하지 않았다. 사석치환안벽의 경우와 마찬가지로 안벽의 배후 지반과 느슨하게 조성된 안벽의 하부 지반에서는 과잉간극수압이 크게 발생하며, 시간이 경과함에 따라 배면 지반은 원활히 배수가 이루어져 간극수압이 점차 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 모래다짐말뚝으로 보강된 지반에서 발생한 간극수압은 시간이 지남에 따라 급속히 배수가 이루어지는 것을 알 수 있다.

#### 4.3.6 해석결과분석

전응력해석에서 얻어진 지반의 가속도응답특성을 나



그림 34. 횡방향 최대가속도

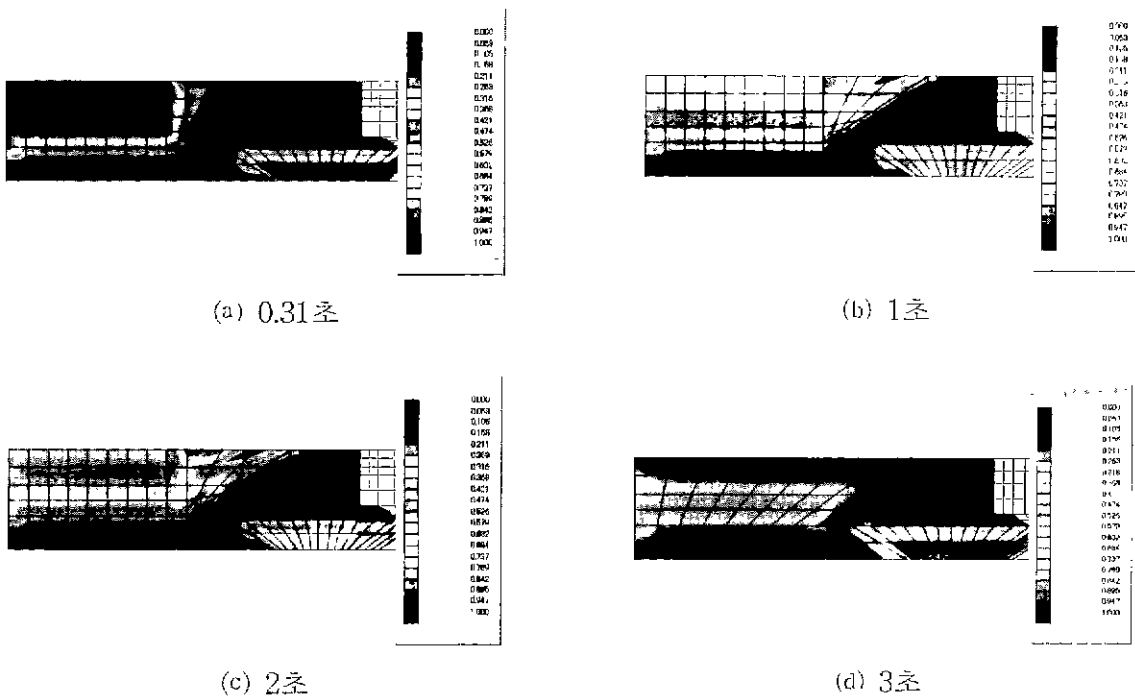


그림 15. 시간에 따른 과잉간극수압비(SCP보강안벽)



타낸 그림 7과 그림 10, 그림 12 및 그림 15에서 가속도 응답의 분포 특성은 다소 차이가 있지만, 발생한 지반 가속도의 최대값은 200gal 정도로 거의 비슷하게 나타났다. 이것은 지반 하단에서 입력된 지진파가 지반을 통하여 증폭되는 양상이 모든 경우에 있어서 유사하게 작용하고 있는 것을 의미한다.

그러나, 최대변위가 발생하는 안벽 상단의 변위는 무보강안벽과 사석치환안벽의 경우와 경량치환안벽과 SCP보강안벽의 경우가 뚜렷하게 차이를 보이고 있다. 즉, 경량치환안벽과 SCP보강안벽이 다른 안벽들보다 상대적으로 내진성능이 뛰어난 것을 알 수 있다.

유효응력해석에서 얻어진 간극수압 응답특성은 대체적으로 0.5초 미만의 시점에서 최대과잉간극수압이 발생한 후 점차 소산되는 특성이 나타났다. 전응력해석과 마찬가지로 경량치환안벽과 SCP보강안벽이 다른 안벽의 경우에 비하여 상대적으로 과잉간극수압이 작게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 안벽의 하부지반에서 발생한 과잉간극수압은 지반의 자중을 감소시킨 경량치환안벽에서 가장 작게 나타났다.

다음 표 2는 전응력해석에서 최대변위가 발생하는 시점과 유효응력해석에서 최대 과잉간극수압이 발생하는 시점을 요약·정리한 것이다. 표에서 간극수압은 지진동이 작용하기 시작한 직후에 바로 최대값에 도달하지만 안벽 상단에 발생하는 최대변위는 상대적으로 시간이 경과한 후에 발생하는 것으로 나타났다. 이러한 경향의 원인은 지반의 동적 거동특성으로부터 찾을 수 있다. 그림 16은 전형적인 반복삼축시험의 결과(Seed and Lee, 1966)를 나타낸 것으로 반복재하가 계속되면서 간극수압은 점증적으로 증가하지만 축변형은 거의 없다가 갑자기 크게 발생하는 경향을 보이고 있다. 이와 같은 특성이 반영되어 안벽단면에서 발생하는 과잉간극수압은 지진동이 가해진 초기부터 발생하며 동시에 소산이 발생하기 때문에 재하 초기 시점에서 최대값을 보이지만, 지반의

표 2. 해석결과비교

구 분		무보강 안벽	사석치환 안벽	경량치환 안벽	SCP보강 안벽
전응력 해석	최대변위 발생시점(초)	2.53	2.27	1.19	0.46
	안벽상단 최대변위(mm)	70	64	18	18
유효응력 해석	최대간극수압 발생시점(초)	0.28	0.31	0.31	0.31

변형은 임의의 시점에 도달한 이후에 급격히 발생하기 때문에 상대적으로 시간이 경과한 후에 최대값에 도달한 것으로 판단할 수 있다. 최대변위가 발생하는 시점이 내진성능이 우수할수록 빨라지는 것은 지진동에 저항력이 상대적으로 크기 때문에 최대변위 발생시점 이후 더 이상 변위가 증가하지 않기 때문으로 볼 수 있다.

#### 4.4 실험결과와 비교

해석을 수행한 4개 단면에 대한 진동대시험을 수행한 결과와 수치해석 결과를 비교해 보았다. 다음 그림 17은 실험결과(김성렬 등, 2000)와 해석결과에서 얻어진 과잉간극수압 응답특성을 비교·도시한 것으로, 전반적으로 실험과 해석의 결과가 일관된 경향을 가지고 있음을 알 수 있다. 해석결과와 실험결과 모두 무보강안벽과 사석치환안벽보다는 경량치환안벽과 SCP보강안벽이 과잉간극수압이 작게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 진동대시험 결과에서는 경량치환안벽에서 가장 작은 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타났지만, 해석 결과에서는 SCP보강안벽에서 상대적으로 더 작은 과잉간극수압이 발생하는 것으로 나타났다.

#### 5. 결론

기존 안벽구조물에서 적용될 수 있는 여러 가지 내진보강공법에 대한 성능 평가를 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 0.15g의 지진동을 입력가속도로 사용한 무보강안벽과 내진보강안벽 모든 경우에 있어서 지반의 최대 가속

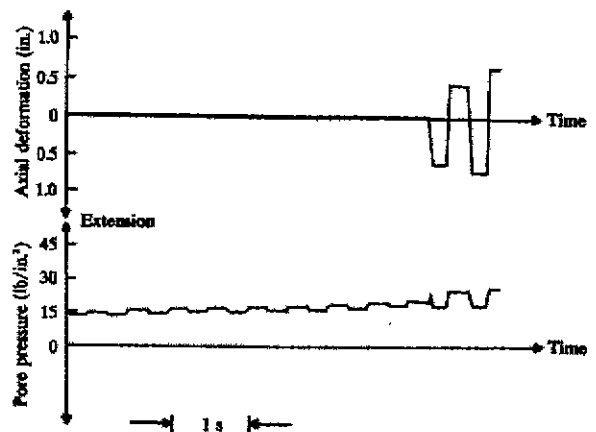
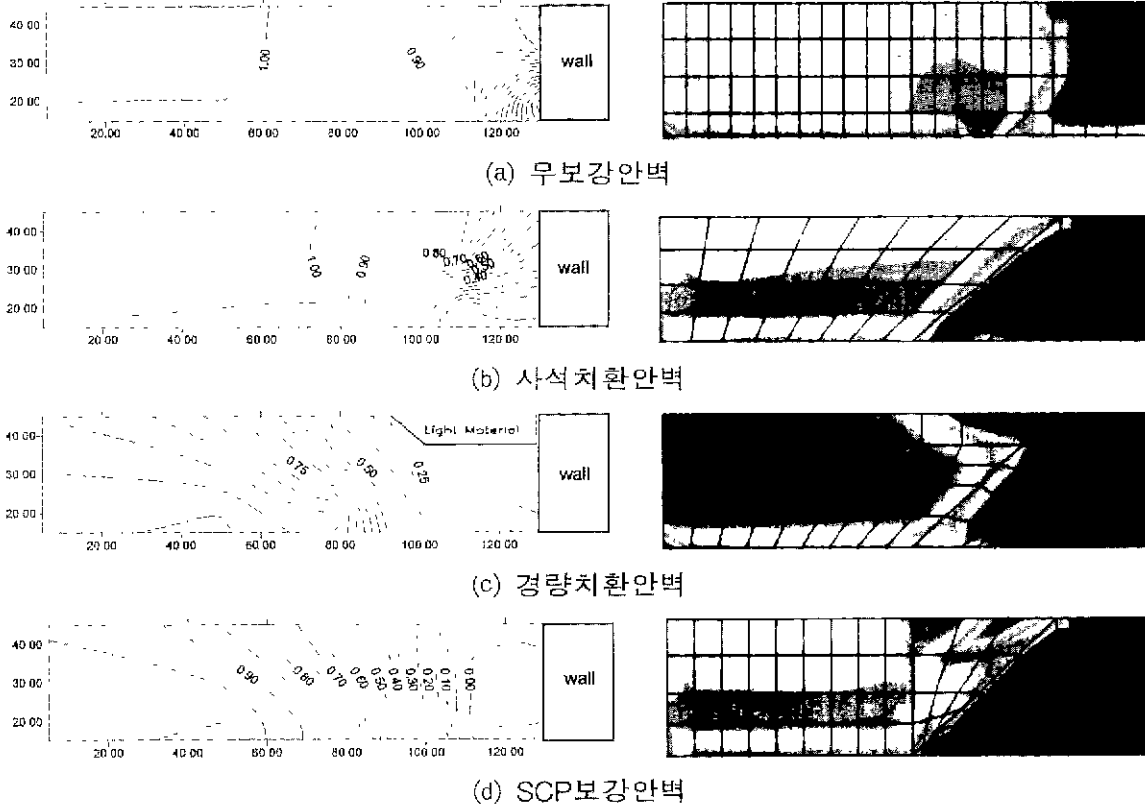


그림 16. 반복시험 결과(Seed and Lee, 1966)



진동대시험결과

유효응력해석결과

그림 17. 과잉간극수압비 분포 (입력가속도 0.15g, 1초 경과 후)

도는 0.2g 정도가 발생하는 것으로 나타났다.

- (2) 최대변위는 안벽 상단에서 발생하였으며, 경량치환안벽과 모래다짐말뚝 보강안벽에서 발생한 최대변위는 무보강안벽과 사석치환안벽에서 발생한 최대변위의 약 26% 정도로 뚜렷한 감소 추세를 확인할 수 있었다.
- (3) 유효응력해석 결과에서 얻어진 과잉간극수압도 경량치환안벽과 모래다짐말뚝 보강안벽이 무보강안벽과 사석치환안벽의 경우보다 작은 것으로 나타났다.
- (4) 해석결과에서 경량치환안벽은 지반의 중량을 감소시켜주기 때문에 모래다짐말뚝 보강안벽보다 안벽 하부 지반의 과잉간극수압을 상대적으로 작게 유발하는 것으로 나타났다.
- (5) 진동대시험에서 측정된 과잉간극수압의 분포특성과 유효응력해석 결과를 비교해 본 결과, 실험과 해석에서 모두 일관된 경향을 가지고 있음을 알 수 있었다.
- (6) 지진이 고려되지 않고 시공된 기존 안벽에 대한 내진보강공법의 성능을 검토한 결과, 경량치환공법이나 모래다짐말뚝 보강공법은 과잉간극수압의 발생을 적절히 억제하고 또한 발생된 간극수압을 신속히 소산시킬 수

있는 적절한 공법으로 볼 수 있다.

### 참고 문헌

1. 김성렬, 권오성, 권오순, 김명보(2000), "지진동을 받는 안벽구조물의 내진성능 평가," 춘계 한국지진공학회 학술발표회, pp 112~119
2. 해양수산부(1998), 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신행안벽개발 (I), pp 151~166
3. 해양수산부(1999), 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신행안벽개발 (II), pp 153~316
4. 運輸省港灣局技術課(1996), 既存岸壁の耐震補強工法事例集, pp 3~30
5. Iai, S.(1998), "Seismic Analysis and Performance of Retaining Structures," Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, Proceedings of a Specialty Conference, Geotechnical Special Publication No. 75, American Society of Civil Engineers, pp 1020~1044
6. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.(1990). "2. Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility," Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4
7. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.(1990), "3. Parameter Identification for a Cyclic Mobility Model," Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 29, No. 4
8. Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.(1992), "Strain Space Plasticity Model for Cyclic Mobility," Soils and Foundations, Vol. 32, No. 2, pp 1~15

9. Lysmer, J., Udaka, T., Seed, H. B. and Hwang, R.(1974). LUSH-A Computer Program for Complex Response Analysis of Soil-Structure Systems, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-74/4, University of California, Berkeley
10. Schnabel, P. B., Lysmer J., and Seed, H. B.(1972), SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC-72/12. University of California, Berkeley
11. Seed, H. B. and Lee, K. L.(1966), "Liquefaction of Saturated Sands During Cyclic Loading." Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 92, No. SM6, pp105 ~ 134
12. Simon, B. R., Zienkiewicz, O. C. and Paul, D. K.(1984). "An Analytical Solution for the Transient Response of Saturated Porous Elastic Solids," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 8, pp 381 ~ 398
13. Simon, B. R., Wu, J. S. S., Zienkiewicz, O. C. and Paul, D. K.(1986), "Evaluation of u-w and u- $\pi$  Finite Element Methods for the Dynamic Response of Saturated Porous Media using One-Dimensional Models," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, Vol. 10, pp 461 ~ 482

(접수일자 2000. 3. 15)