

## 중진지역에서 케이슨 안벽의 동적수평변위 특성에 관한 연구

### A Study on the Dynamic Lateral Displacements of Caisson Quay Walls in Moderate Earthquake Regions

박 근 보<sup>1</sup> Park, Keun-Bo

심 재 옥<sup>2</sup> Sim, Jae-Uk

차 승 훈<sup>3</sup> Cha, Seung-Hun

김 수 일<sup>4</sup> Kim, Soo-Il

#### Abstract

In this study, 28 earthquake records with magnitudes from 5.3 to 7.9 are selected for dynamic analysis in order to assess applicability of the earthquakes for domestic seismic design. The assessment is performed using the seismic spectrum analysis of energy and acceleration. Based on results of the analysis, four acceleration time histories, which satisfy the Korean design standard response spectrum, are proposed. From the dynamic analysis using earthquake magnitudes from 6.4 to 7.9, it is found that horizontal displacements corresponding to earthquake magnitudes greater than 7 are two times larger than those with magnitude 6.5. Therefore, it can be stated that use of strong earthquakes, such as Miyagiken-ken-oki earthquake (Ofunato,  $M_{JMA}=7.4$ ) and Tokachi-oki earthquake (Hachinohe,  $M_{JMA}=7.9$ ), for the seismic design in Korea is not applicable, and may prove to be excessively conservative due to overestimated seismic force. From the dynamic analyses using the proposed acceleration time histories, effects of caisson quay wall dimension and the subsoil condition are investigated as well. The simplified design charts to evaluate horizontal displacements of caisson quay wall are also proposed based on earthquake magnitude 6.5 that is appropriate in Korea.

#### 요 지

본 연구에서는 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예로 이용한 지진파를 포함하여 지진규모 5.3~7.9 수준의 28개의 지진기록에 대한 에너지와 스펙트럼 분석을 통한 국내 적합성 여부를 평가하였고, 이를 통해 국내 내진설계에 적용 가능한 입력지진기록을 제안하였다. 그리고 제안된 지진기록을 이용하여 케이슨의 형상 및 하부지반 상태에 따른 케이슨 안벽의 동적 수평변위특성을 분석하였다. 연구 결과 지진파가 보유하고 있는 에너지와 가속도 스펙트럼의 크기는 지진규모가 커질수록 증가하였다. 특히, 지진규모 7.5 부근의 지진기록은 내진설계기준에 규정된 표준설계응답스펙트럼에서 크게 벗어난 반면, 지진규모 6.5 부근의 4개의 지진기록은 국내 내진설계기준에 규정된 표준설계응답스펙트럼을 거의 만족하는 것으로 나타났다. 그리고, 입력지진에 따른 케이슨 안벽의 동적 수평변위특성 분석 결과 국내 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서의 예제로 제시한 지진규모 7.4 이상의 지진파의 수평변위는 국내의 내진설계기준에서 제시한 표준설계응답스펙트럼을 대체적으로 만족하는 지진규모 6.5 수준의 지진파의 수평변위보다 2배 이상 크게 나타났다. 이러한 결과로부터 지진규모 7.4 이상의 지진파를 이용한 내진설계는 지진력을 과다하게 산정하여 비경제적인 설계를 할 수 있음을 알 수 있었다. 국내 적합성 평가로부터 구한 4개의 지진기록을 입력하중으로 한 동해석 결과에 대한 정량적인 분석을 통해 케이슨의 형상과 하부지반 깊이 및 지반의 표준관입저항치를 이용하여 간편하게 케이슨 안벽의 지진시 수평변위를 산정할 수 있는 간편도표를 제안하였다.

**Keywords :** Energy, Lateral displacement, Seismic magnitude, Standard design response spectrum

1 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 박사후과정 (Member, Post Doc., School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ.)

2 코오롱건설(주) 기술연구소 토목연구팀, 대리 (Assistant Manager, Kolon E&C, ssims@kolon.com, 교신저자)

3 정회원, 쌍용건설 토목기술부, 대리 (Member, Assistant Manager, Ssangyong Eng. & Con. Co., LTD.)

4 정회원, 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수 (Member, Prof., School of Civil & Env. Eng., Yonsei Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

# 1. 서론

최근 지진에 대해 중진지역으로 간주되는 국내에서 수행되고 있는 항만구조물의 내진해석부분을 보면, 국내 설계기준에 준하여 장주기 및 단주기 실지진 시간이력과 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공지진을 입력한 동해석의 이용이 일반화되고 있으며, 장주기 및 단주기 지진기록의 경우, 국내 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서에서 예제수행을 위해 수록한 지진규모 7.4의 Miyagi-ken-oki(Ofunato) 지진파와 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe) 지진파를 이용하고 있는 실정이다. 그러나 해석예제로 수록된 지진파는 강진지역으로 구별되는 일본의 지진기록으로 국내 설계지반운동수준에 준하여 수정하더라도 지진파 자체가 보유한 특성으로 인해 중진 지진대로 구별되는 국내 지진특성을 적절하게 고려할 수 없기 때문에 국내 내진해석에 적용 가능한 입력지진을 선정하여 구조물의 내진해석을 수행해야 한다는 필요성이 크게 대두되고 있다.

국내에서 수행되고 있는 항만구조물의 내진설계부분을 보면 지반응답해석 뿐만 아니라 동해석에 의한 변위 분석이 일반화 되어 있다. 그러나 이런 동적해석의 경우 해석방법에 따라 해석시간이 오래 걸리거나 계산의 양이 증가되어 비경제적인 단점이 있다.

본 연구에서는 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예로 이용한 지진파를 포함하여 지진규모 5.3~7.9 수준의 28개의 지진기록을 대상으로 국내 적합성 여부를 평가하였고, 이를 통해 국내 내진설계에 적용 가능한 입력지진기록을 제안하였다. 그리고 제안된 지진기록을 이용하여 케이슨의 형상 및 하부지반상태에 따른 케이슨 안벽의 동적 수평변위특성을 분석하였으며, 영향인자 분석을 통해서 국내 케이슨 안벽의 지진시 수평변위를 산정할 수 있는 간편도표를 제안하였다.

## 2. 지진규모별 지진특성 비교

### 2.1 지진특성 비교를 위해 사용된 지진파의 종류

지진규모별 에너지 산정을 위해 사용된 지진규모별 지진파는 COSMOS Virtual Data Center(1999) 및 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(1999)에 수록된 지진규모 5.3~7.9 수준의 28개의 지진파이며 이들 지진파의 제원은 표 1과 같다.

표 1. 지진파의 제원

구분	지진규모	발생위치(년)
Lytle Creek	5.3(M <sub>w</sub> )	Southern California(1970)
Nahanni	5.4(M <sub>w</sub> )	Canada Northwest(1985)
Coaling Ca aftershock	5.4(M <sub>w</sub> )	Mexico(1983)
Spitak	5.4(M <sub>w</sub> )	Armenia(1990)
Coyote Lake	5.7(M <sub>w</sub> )	Northern California(1979)
Spitak Aftershock	5.7(M <sub>w</sub> )	Armenia(1998)
Hiyoshi	6.3(M <sub>JMA</sub> )	Japan(1997)
Vlparaiso Chile Aftershock	6.3(M <sub>w</sub> )	South America(1985)
Victoria Mexico	6.4(M <sub>w</sub> )	Mexico(1980)
Baja California	6.4(M <sub>w</sub> )	Mexico(1934)
Big Bear	6.4(M <sub>w</sub> )	Southern California(1992)
Mikawa	6.4(M <sub>w</sub> )	Japan(2001)
Long Beach	6.5(M <sub>w</sub> )	Southern California(1933)
Coalinga	6.5(M <sub>w</sub> )	Mexico(1983)
Imperial Valley	6.5(M <sub>w</sub> )	Southern California(1979)
San Fernando	6.6(M <sub>w</sub> )	Southern California(1971)
Cape Mendocino	6.6(M <sub>w</sub> )	Northern California(1992)
El Salvador	6.6(M <sub>w</sub> )	Central America(2001)
Northridge	6.7(M <sub>w</sub> )	Southern California(1994)
Nisqually	6.8(M <sub>w</sub> )	Pacific Northwest(2001)
Landers	7.3(M <sub>w</sub> )	Southern California(1992)
Kocaeli Turkey	7.4(M <sub>w</sub> )	Turkey(1998)
Miyagi-ken-oki (Ofunato)	7.4(M <sub>JMA</sub> )	Japan(1978)
Limon Costa Rica	7.5(M <sub>w</sub> )	Central America(1991)
Taiwan	7.6(M <sub>w</sub> )	Taiwan(1999)
El Salvador	7.6(M <sub>w</sub> )	Central America(2001)
Valparaiso Chile	7.8(M <sub>w</sub> )	South America(1985)
Tokachi-oki (Hachinohe)	7.9(M <sub>JMA</sub> )	Japan(1968)

### 2.2 설계지반운동 수준으로 수정된 지진파의 에너지

지진파의 에너지는 1질점계 진동 모델을 기본으로 한 지진계에서 관측된 가속도 시간이력을 Jennings(1983)가 제안한 식 (1)을 이용하여 지진파의 에너지를 구하였다.

$$TE(t) = \int_0^t [a(t)]^2 dt \quad (1)$$

여기서, TE(t) : 지진계에서 주어진 시간 t에서 지진계의 전체에너지

a(t) : 지진계에 의해 기록된 가속도 진폭의 크기

지진규모별 지진파의 설계지반운동수준은 내진설계

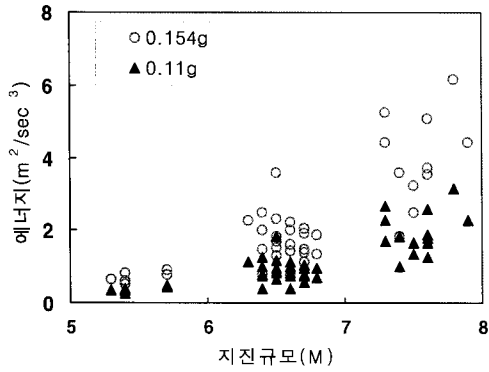


그림 1. 설계지반운동수준이 0.11g, 0.154g일 때 지진규모별 에너지

기준 II(1997)에서 제시한 설계지반운동수준을 기준으로 하여 지진구역 I에 존재하는 내진 1,2등급 구조물의 붕괴방지 수준에 해당하는 0.11g와 0.154g로 하였다. 그림 1은 설계지반운동수준으로 수정한 한 지진파를 식 1을 이용해서 구한 에너지를 나타낸 것이다. 그림 1의 결과로부터 동일한 설계지반운동수준으로 수정한 지진파의 에너지는 지진규모가 커질수록 증가하는 것을 알 수 있다.

### 2.3 지진응답해석을 통해서 구한 증폭된 지진파의 에너지

지진규모별 지진파가 지반을 통과하면서 지진파가 가지는 에너지의 변화를 분석하기 위해 지진응답해석을 수행하였다. 지진응답해석은 설계지반운동수준으로 수정한 지진파에 대해서 수행하였다. 지진응답해석 대상 단면은 국내에 존재하는 실제지반과 모래층의 표준판

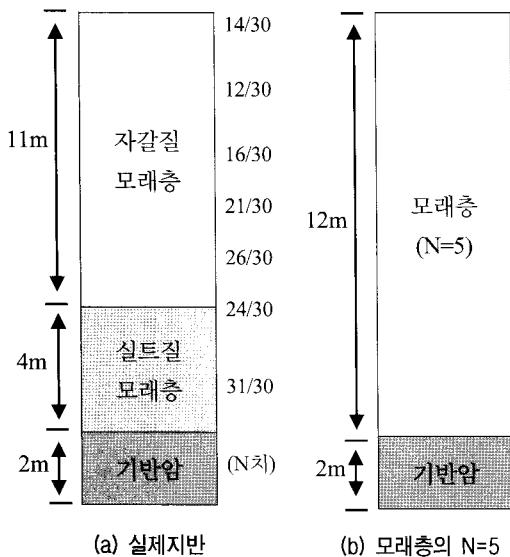


그림 2. 대상지반의 지층구조

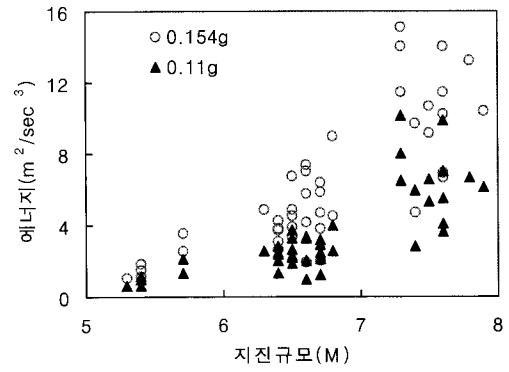


그림 3. 실제지반[그림 2(a)]에서의 지진규모별 에너지

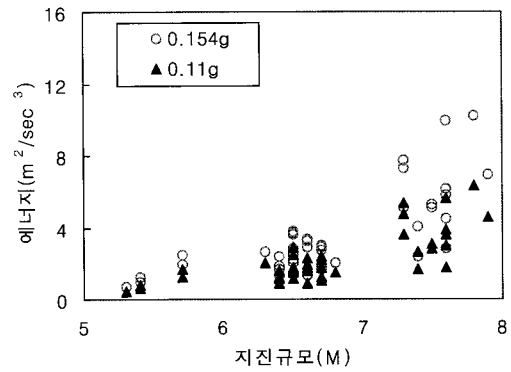


그림 4. N=5인 지반[그림 2(b)]에서의 지진규모별 에너지

입저항치(N)가 5인 기초지반에 대해서 수행하였다. 대상지반의 지층구조는 그림 2에 나타내었다.

그림 2에 나타낸 2종류의 지반에 대해 지진응답해석을 통해 지표면에서의 지진파를 구하였고, 이들 지진파의 에너지는 그림 3과 4에 각각 나타내었다. 그림 3과 4의 결과로부터 실제지반과 하부지반 N=5인 지반에 대해서 지진응답을 통하여 지표면에서 구한 지진파의 에너지는 지진규모가 증가할수록 증가한다는 것을 확인할 수 있었다. 또한 지진파가 모래지반을 통과하면서 지진파의 에너지가 증가함을 알 수 있다.

### 2.4 지진규모별 가속도 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼

국내의 내진설계에 사용되는 표준설계응답스펙트럼은 가속도 응답스펙트럼이므로 본 연구에서는 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 고려하였다. 또한 지진파의 가속도 응답스펙트럼은 1차원 지진응답해석 프로그램인 PRO-SHAKE를 이용하여 구하였다. 설계지반운동수준이 0.11g와 0.154g일 때 표준설계응답스펙트럼은 그

림 5와 같다.

지진기록을 지진규모 6.4~6.7 수준의 중진도 규모와 지진규모 7.4 이상의 지진규모로 분류한 후, 가속도 응답스펙트럼을 구하였다. 그림 6에서 9는 지진규모별 가속도 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼을 비교하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 9로부터 지진규모 7.4 이상의 지진파가 중진도 규모의 지진파 보다 가속도 응답스펙트럼이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 가속도 응답스펙트럼은 구조물에 작용하는 힘, 즉 지반으로부터 구조물에 주는 지진입력을 의미하므로 지진규모 7.4 이

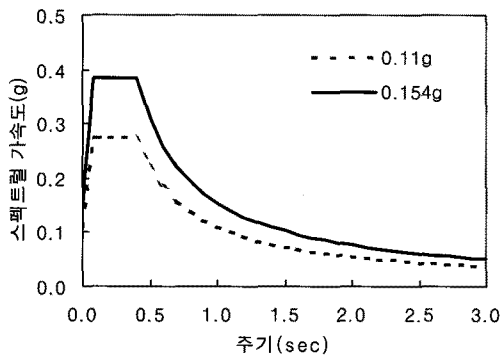


그림 5. 표준설계응답스펙트럼

상의 지진파가 중진 규모 지진파보다 구조물에 큰 힘을 가한다는 것을 알 수 있다.

그림 10은 그림 6에서 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 중진도 규모의 지진파에 대한 가속도 응답스펙트럼을 나타낸 것이다. 그리고 그림 11은 현재 국내의 내진설계에 널리 사용되고 있는 지진규모 7.4의 Miyagi-ken-oki(Ofunato) 지진파와 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe) 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 표준설계응답스펙트럼과 비교한 것이다. 그림 11에서 지진규모 7.4의 Miyagi-ken-oki

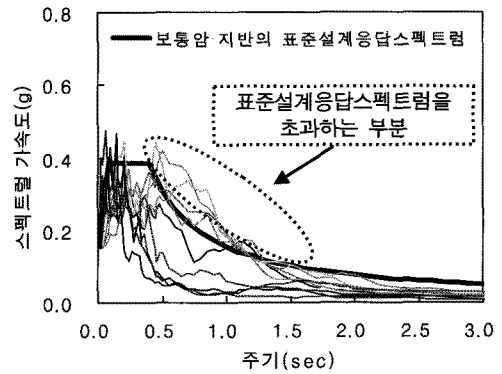


그림 8. 설계지반운동수준 0.154g, 지진규모 6.4~6.7

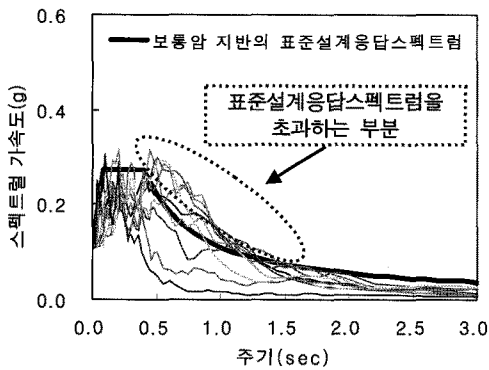


그림 6. 설계지반운동수준 0.11g, 지진규모 6.4~6.7

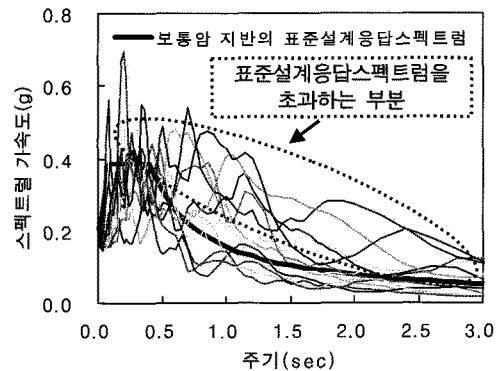


그림 9. 설계지반운동수준 0.154g, 지진규모 7.4 이상

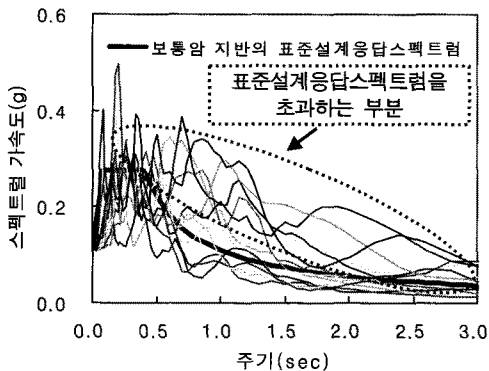


그림 7. 설계지반운동수준 0.11g, 지진규모 7.4 이상

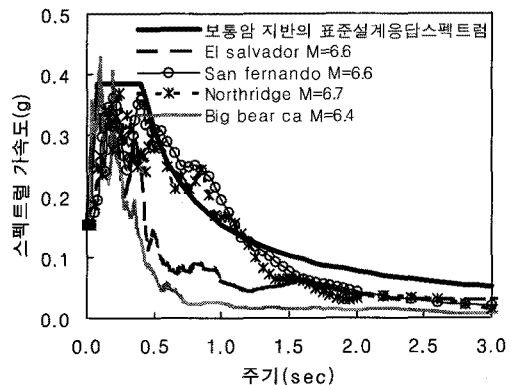


그림 10. 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 중진 규모 지진파

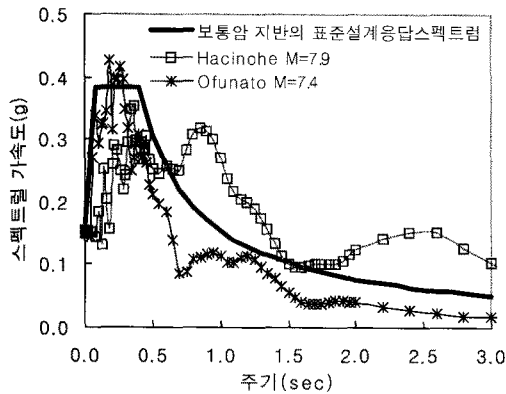


그림 11. Ofunato지진파와 Hachinohe지진파의 가속도응답스펙트럼

(Ofunato)지진파와 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe)지진파의 가속도 응답스펙트럼이 표준설계응답스펙트럼의 범위 밖에 존재한다. 즉 Miyagi-ken-oki(Ofunato)지진파와 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe)지진파는 국내의 내진설계기준을 만족시키지 못함을 알 수 있다.

### 3. 케이슨 안벽의 최대변위 산정

#### 3.1 동해석 기법 및 해석프로그램

동해석 기법은 대상으로 하는 구조물 혹은 지반을 진동모델로 모델화 하여 해석하는 방법이다. 지진에 의한 항만구조물의 동해석 기법으로는 대표적으로 주파수영역해석과 시간영역해석이 있다. 주파수영역 해석은 진동계의 운동방정식을 주파수영역에서 계산하여 구조물의 시간이력응답을 구하는 방법이며, 시간영역 해석은 구조물 또는 지반의 동적특성을 고려하여 가속도-시간이력관계를 이용하여 해석하는 방법이다. 주파수영역 해석은 지반동적강성의 주파수 종속적인 특징을 적절히 고려할 수 있으므로 정확한 해석을 할 수 있는 장점이 있으나, 여러 주파수에 대하여 해석을 수행해야 하기 때문에 많은 양의 계산이 필요하다. 시간영역해석은 지반의 강성과 감쇠를 주파수에 독립되게 정하여 해석을 수행하므로 주파수 종속적인 지반고유의 특성을 정확하게 고려하지 못하지만, 주파수영역 해석에 비해 해석시간이 경제적인 장점이 있다.

본 연구에서는 케이슨 안벽의 지진시 거동을 분석하기 위하여 범용 유한차분 해석프로그램인 FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)을 이용하였다. FLAC(Fast Lagrangian Analysis of Continua)은 상용유한차분해석 프로그램으로서 소성변형을 하는 지반 또는 암반 위의

구조물의 거동을 모형화하기 위한 프로그램이다. 해석 대상은 격자로 구분되어진 요소로서 나누어지고, 각각의 요소는 선형 또는 비선형의 응력-변형률 관계를 가해진 하중과 경계조건에 의해서 계산된다(Itasca Consulting Group, Inc., 1999).

### 3.2 케이슨 안벽의 형상 및 입력조건

#### 3.2.1 케이슨 안벽의 형상 및 경계조건

수치해석에 사용된 단면의 형상은 인천북항, 제주의 항, 마산항 그리고 광양항 등의 기존 항만시설물과 부산 신항 등 현재 시공되고 있는 시설물의 단면의 형상을 고려하여 설정하였다. 또한 해석에 사용된 변수와 변화 범위는 기존의 항만시설물과 현재 시공되고 있는 시설물의 수준과 현장조건을 고려하여 설정하였다. 표 2에는 해석에 사용된 변수와 변화범위를 정리하였고, 그림 12에는 해석에 사용된 케이슨 안벽 및 주변지반의 형상을 나타내었다. 그림 12에서 L1과 L2는 해석시 경계조건의 영향을 고려한 해석단면의 폭을 나타낸다.

안벽의 지진시 거동을 분석하기 위해 일반적으로 지반의 거동예측에 널리 쓰이는 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 전응력해석을 수행하였다. 또한 동해석시 좌·우 경

표 2. 해석에 사용된 변수와 변화범위

변수	변화 범위
하부지반 깊이(D)	H/2, H
설계지반운동수준	0.11g, 0.154g
케이슨의 높이(H)	12m, 18m, 24m
케이슨 높이에 대한 폭의 비(W/H)	0.5, 0.7, 1.0
입력지진파의 지진규모	6.4, 6.6, 6.7, 7.4, 7.9
뒷채움토의 N치	10
하부지반의 N치	3, 5, 15, 25

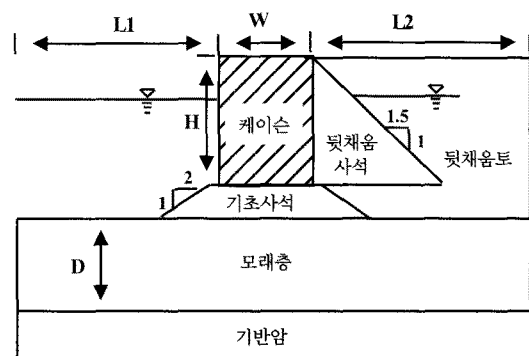


그림 12. 수치해석에 사용된 단면의 형상

계면과 아래쪽 경계면에는 파의 중첩 및 반사를 피하기 위한 흡수경계(quiet boundary)를 사용하였고, 반무한 지반을 반영하기 위한 자유장 경계(free-field boundary)를 사용하였다. 그림 12에서 케이슨 안벽의 좌측 경계길이(L1)는 L1이 케이슨 높이(H)의 3배를 넘어서면 좌측 경계길이 수평변위에 영향을 미치지 않아서 3H로 하였다. 또한 케이슨 안벽의 우측 경계길이(L2)는 뒷채움 지반의 개량범위가 케이슨 높이의 2배를 초과하면 개량효율이 현저히 떨어진다는 내용의 Stephen(1998) 논문을 바탕으로 우측 경계길이(L2)를 2.5H로 하였다.

### 3.2.2 입력물성 결정

동해석에서 사용된 대상지반의 물성은 국내 항만시설물에 사용된 물성을 바탕으로 경험식을 이용하여 산정하였다. 식 (2)와 식 (3)은 일본 항만기술연구소에서 최대전단탄성계수 산정시 추천한 식으로 식 (2)는 표준관입저항치를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정한 식이고, 식 (3)은 전단파 속도를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정하는 식이다. 식 (4)는 전단탄성계수와 체적탄성계수와의 관계식이다.

$$G_{\max} = 1440N^{0.68} (tf/m^2) \quad (2)$$

$$G_{\max} = \frac{\gamma_t}{g} V_s^2 (tf/m^2) \quad (3)$$

$$K = \frac{2(1+\nu)}{3(1-2\nu)} G \quad (4)$$

여기서,  $G_{\max}$ 는 최대전단탄성계수,  $V_s$ 는 전단파속도,  $\gamma_t$ 는 지반의 단위중량,  $g$ 는 중력가속도,  $\nu$ 는 포아송비,  $K$ 는 체적탄성계수,  $N$ 은 표준관입저항치,  $G$ 는 전단탄성계수이다.

기초사석, 뒷채움 사석 그리고 케이슨은 표준관입저항치를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정할 수 없으므로 일본 항만기술연구소에서 추천한 전단파 속도를 사용하여 식 3을 이용하여 최대전단탄성계수를 구하였다(Port and Harbour Research Institute, 1997).

기초사석의 전단파 속도 :  $V_s = 300$  (m/sec)

뒷채움사석의 전단파 속도 :  $V_s = 225$  (m/sec)

케이슨의 전단파 속도 :  $V_s = 2000$  (m/sec)

지진하중 작용시 지반은 변형이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하므로, 지반의 동적 물성치 산정시 변형률 수준을 고려하여 유효전단탄성계수를 사용하였다.

본 연구에서는 변형이 가장 클 것으로 예상되는 기초사석에 대해서는 최대전단탄성계수의 30%값을 사용하였고, 케이슨 안벽의 하부지반, 뒷채움 사석, 뒷채움에 대해서는 최대전단탄성계수의 40%값을 사용하였으며, 기반암에 대해서는 변형이 거의 발생하지 않으므로 최대전단탄성계수 값을 사용하였다.

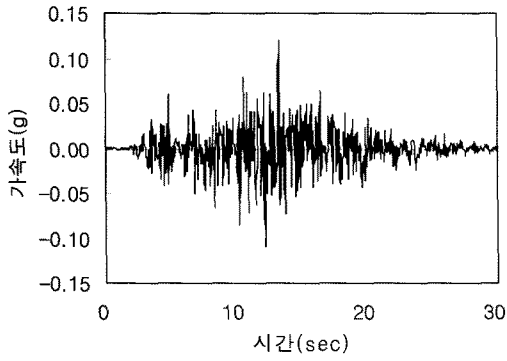
### 3.2.3 입력지진파의 선정

지진시 케이슨 안벽의 수평변위를 비교하기 위해서 표준설계응답스펙트럼을 대체로 만족시키는 중진도 규모의 4개 지진파와 국내의 내진설계에 널리 사용되고 있는 지진규모 7.4의 Miyagiken-ken-oki(Ofunato)지진파와 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe)지진파를 이용하였다. 그림 13은 이들 6개 지진파의 가속도-시간에 대한 그래프이다.

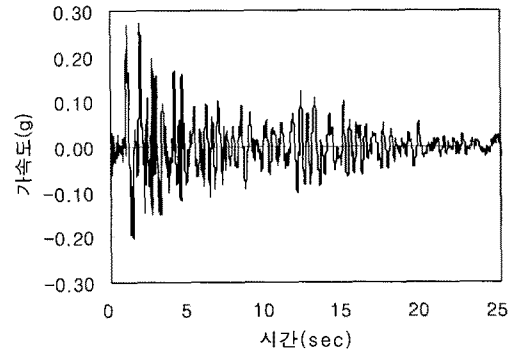
### 3.3 지진규모에 따른 케이슨 안벽의 최대변위

그림 14는 그림 12를 바탕으로 하여 작성한 요소망과 Tokachi-oki(Hachinohe)지진파에 의해 요소망이 변형을 일으킨 모습을 나타낸 것이다. 시간영역에서 동적해석을 수행할 경우 해석에 드는 시간 및 비용을 최소화하고 파의 전파형상을 효과적으로 묘사하기 위하여 요소의 최적화는 반드시 필요하다. 그림에서 요소의 크기는 가장 크게 요소가 설정된 기초사석 외부로부터 경계까지의 구간에 대해 요소 크기에 따른 수평변위를 비교하여 요소의 크기를 최대 2m로 설정하였다.

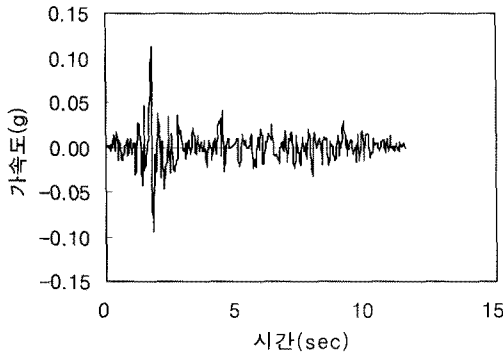
지진규모에 따른 케이슨 안벽의 수평변위를 비교하기 위해서 그림 13에 나타낸 6개의 지진파를 동일한 설계지반운동수준으로 수정한 후 케이슨 안벽에 대해서 동해석을 수행하였다. 그림 15는 여러 동해석 결과 중 케이슨 높이(H)는 18m, 하부지반 깊이(D)는 18m, 케이슨 높이에 대한 폭의 비(W/H)는 0.5, 0.7, 1.0일 때 지진규모별 케이슨 안벽의 최대수평변위를 나타낸 것이다. 그래프의 y축은 입력지진하중에 의한 케이슨 안벽의 상단에서 발생한 최대수평변위를 나타내며 x축은 지진규모를 나타낸다. 그림 15로부터 지진규모 7.4 이상의 지진파를 입력하중으로 하였을 때의 안벽의 최대수평변위가 지진규모 6.5 정도의 지진파보다 크게 발생함을 알 수 있다. 또한 그림 16에서는 케이슨의 폭과 높이(W/H) 비를 0.5, 0.7, 1.0으로 일정하게 하고 각각의 경우에 대해서 하부지반의 N치를 변화시켰을 때의 수치해석 결



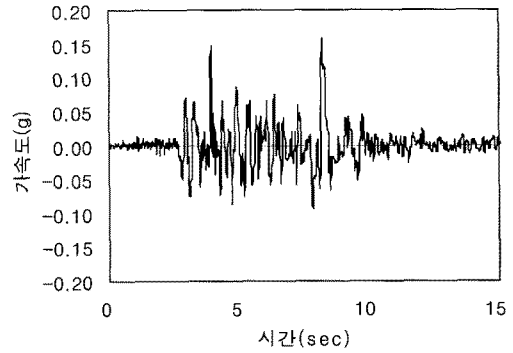
(a) Big Bear( $M_w=6.4$ )



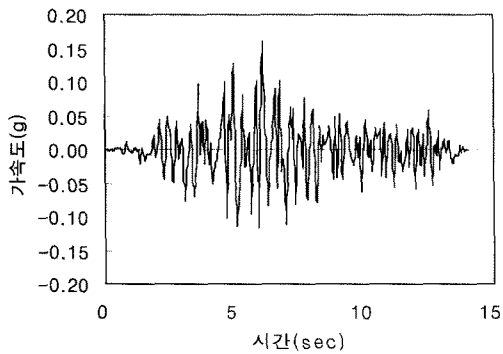
(b) San Fernando( $M_w=6.6$ )



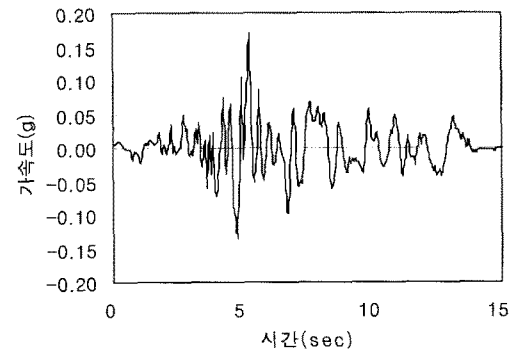
(c) El Salvador( $M_w=6.6$ )



(d) Northridge( $M_w=6.7$ )



(e) Miyagi-ken-oki( $M_{jMA}=7.4$ )



(f) Tokachi-oki( $M_{jMA}=7.9$ )

그림 13. 입력 지진기록의 가속도-시간 그래프

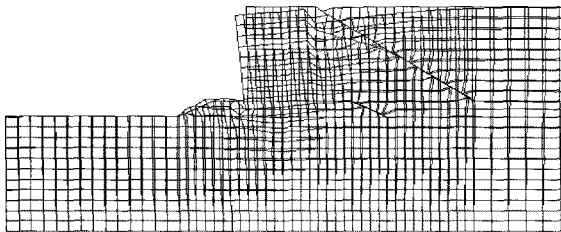
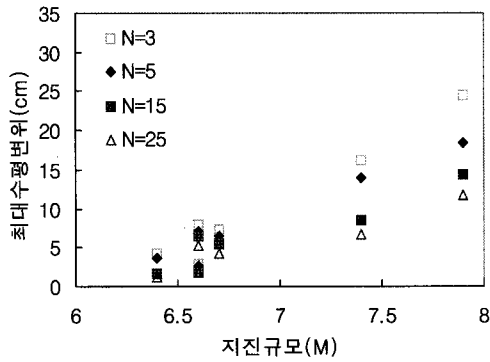


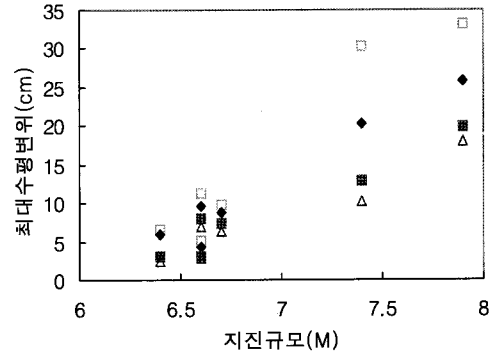
그림 14. Tokachi-oki(Hachinohe)지진파에 의해 변형된 케이스 안벽의 요소망

과로서 케이스의 높이에 대한 폭(W/H)비가 증가할수록 최대수평변위는 감소하는 것을 알 수 있었다. 그러나 지

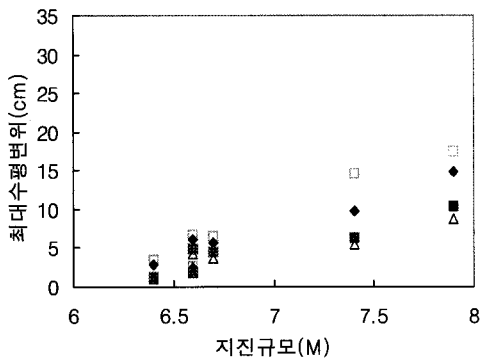
진규모 6.6의 El Salvador 지진파의 최대수평 변위가 다른 지진파에 비해 상대적으로 작게 발생하였다. 지진규모가 증가함에 따른 케이스 안벽의 최대수평변위 변화 정도를 나타내기 위해  $H=18m$ ,  $D=18m$ ,  $W/H=0.5, 0.7, 1.0$ , 하부지반  $N=5$ , 설계지반운동수준  $=0.154g$ 인 조건에서 지진규모 6.4의 Big Bear 지진파를 입력하중으로 하였을 때 발생한 변위를 1.0이라는 기준으로 하여 지진규모 6.5 정도 지진파 4개와 지진규모 7.4 이상의 지진파 2개에 대한 변위를 비교하여 표 3에 나타내었다. 표 3으로부터 지진규모 7.9의 Tokachi-oki (Hachinohe) 지진파



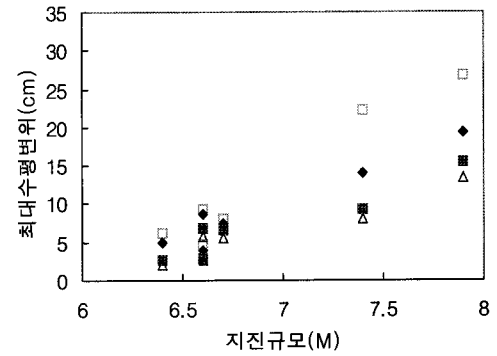
(a) 설계지반운동수준 0.11g, W/H=0.5



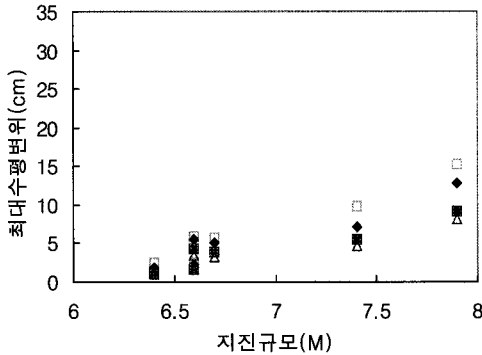
(b) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.5



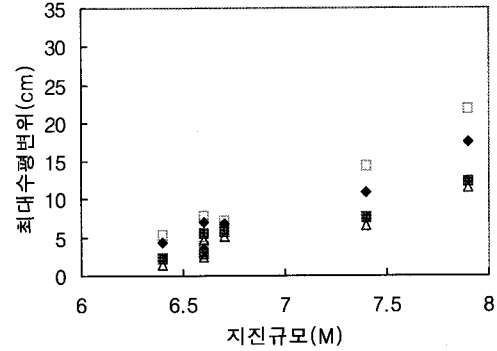
(c) 설계지반운동수준 0.11g, W/H=0.7



(d) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.7



(e) 설계지반운동수준 0.11g, W/H=1.0



(f) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=1.0

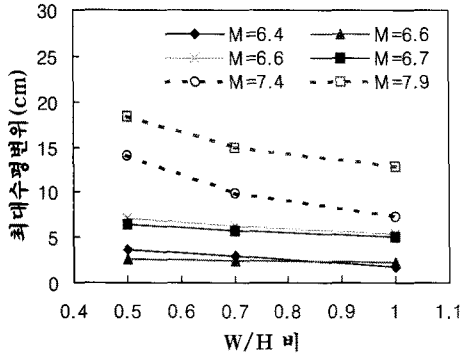
그림 15. 지진규모와 하부지반 N치에 따른 안벽의 최대수평변위

에 의해서 발생한 변위는 지진규모 6.5 정도의 지진파에 의해서 발생한 변위보다 2배~4배정도 크게 발생함을 알 수 있었다. 따라서 동일한 설계 지반가속도 수준으로 수정된 지진파를 입력하여도 강진규모 지진파에 의한 동적 수평변위가 중진규모 지진파에 의한 동적 수평변위보다 크게 발생함을 알 수 있다.

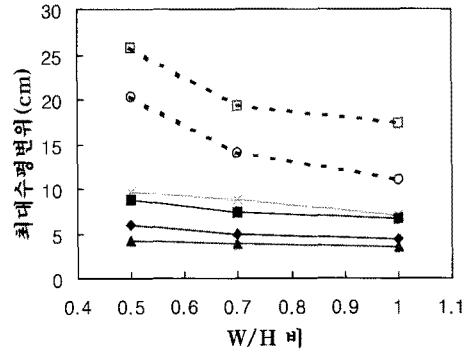
케이슨의 높이에 대한 폭(W/H)비와 케이슨 안벽 하부지반의 N치 중 어떤 인자가 지진시 안벽의 최대수평변위에 더 큰 영향을 미치는 지를 알아보기 위해 케이슨의 높이(H)와 하부지반의 깊이(D)를 일정하게 하고, 하

부지반의 N치와 케이슨의 높이에 대한 폭(W/H)비에 따른 지진시 안벽의 최대수평변위의 감소율을 비교하여 표 4와 5에 나타내었다. 감소율의 산정은 하부지반의 N치는 5이고 케이슨 높이에 대한 폭(W/H)비가 0.5일 때 지진시 발생한 변위를 기준으로 하였다. 표 4와 5의 안벽의 최대수평변위 감소율을 비교해 보면 케이슨의 높이에 대한 폭(W/H)의 비보다는 케이슨 안벽 하부지반의 N치의 평균 감소율이 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 지진규모에 따라 수평변위의 감소율이 경향성을 보이지는 않았다. 이것으로 케이슨 안벽의 최대수평변위에

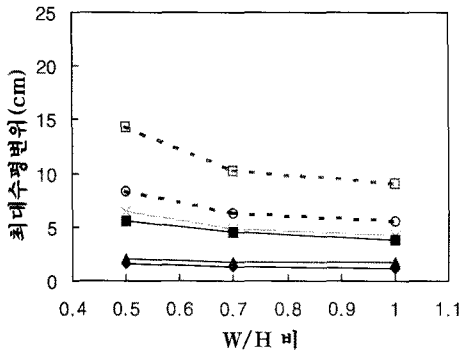




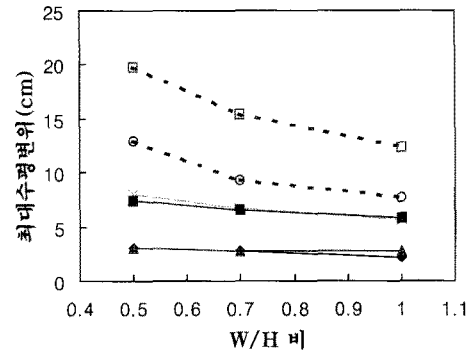
(a) 설계지반운동수준 0.11g, N=5



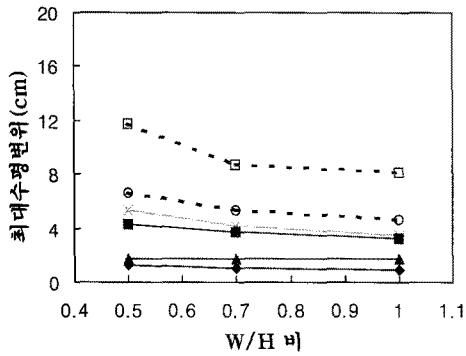
(b) 설계지반운동수준 0.154g, N=5



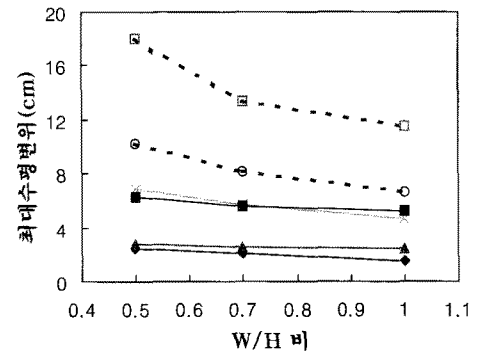
(c) 설계지반운동수준 0.11g, N=15



(d) 설계지반운동수준 0.154g, N=15



(e) 설계지반운동수준 0.11g, N=25



(f) 설계지반운동수준 0.154g, N=25

그림 16. 케이스의 W/H 비에 따른 케이스의 최대수평변위(H=18m, D=18m)

표 3. Big Bear지진파를 기준으로 한 경우의 규모에 따른 상대 변위 (W/H)비

구분	지진규모 (M)	W/H		
		0.5	0.7	1.0
Big Bear	6.4(M <sub>W</sub> )	1.00	1.00	1.00
San Fernando	6.6(M <sub>W</sub> )	1.62	1.75	1.61
El Salvador	6.6(M <sub>W</sub> )	0.71	0.79	0.79
Northridge	6.7(M <sub>W</sub> )	1.47	1.51	1.52
Miyagi-Oki (Ofunato)	7.4(M <sub>JMA</sub> )	3.44	2.85	2.52
Tokachi-Oki (Hachinohe)	7.9(M <sub>JMA</sub> )	4.37	3.93	3.95

표 4. 수평변위 감소율(설계지반운동수준=0.154g, H=12m, D=12m, W/H=0.5)

구분	지진규모 (M)	안벽의 수평변위 감소율(%)		
		N=5	N=15	N=25
Big Bear	6.4(M <sub>W</sub> )	*	21	28
San Fernando	6.6(M <sub>W</sub> )	*	9	17
El Salvador	6.6(M <sub>W</sub> )	*	24	34
Northridge	6.7(M <sub>W</sub> )	*	11	17
Miyagi-Oki(Ofunato)	7.4(M <sub>JMA</sub> )	*	9	22
Tokachi-Oki(Hachinohe)	7.9(M <sub>JMA</sub> )	*	18	33
평균	*	*	15	25

표 5. 수평변위 감소율(설계지반운동수준=0.154g, H=12m, D=12m, N=5)

구분	지진규모 (M)	안벽의 수평변위 감소율(%)		
		W/H=0.5	W/H=0.7	W/H=1.0
Big Bear	6.4(M <sub>w</sub> )	*	7	11
San Fernando	6.6(M <sub>w</sub> )	*	8	13
El Salvador	6.6(M <sub>w</sub> )	*	3	7
Northridge	6.7(M <sub>w</sub> )	*	5	9
Miyagi-Oki (Ofunato)	7.4(M <sub>JMA</sub> )	*	7	11
Tokachi-Oki (Hachinohe)	7.9(M <sub>JMA</sub> )	*	4	8
평균	*	*	6	10

가장 큰 영향을 끼치는 변수는 하부지반 조건임을 알 수 있다.

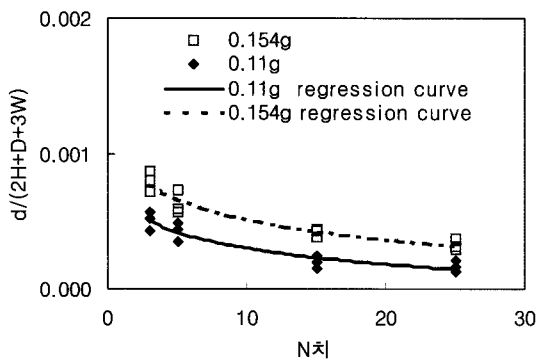
### 3.4 내진안벽설계 간편도표

본 연구에서는 내진설계기준 II(1997)에서 제시한 표준설계응답스펙트럼을 대체로 만족하는 중진도 규모의 지진파 4개를 입력하중으로 하여 케이슨의 치수 및 하

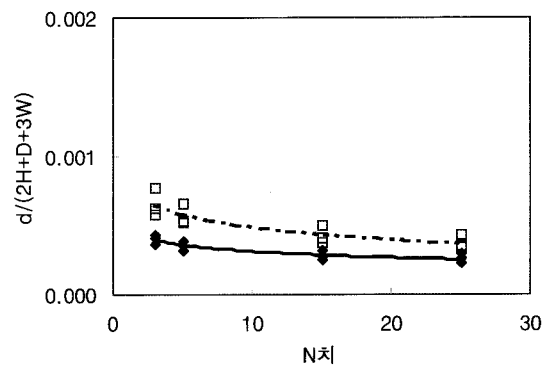
부지반상태를 다양하게 조합하여 수행한 동해석 결과를 바탕으로 케이슨 안벽설계를 위한 간편도표를 제안 하였다.

동해석시 입력하중은 Big Bear(M<sub>w</sub>=6.4), San Fernando (M<sub>w</sub>=6.6), El Salvador(M<sub>w</sub>=6.6) 그리고 Northridge(M<sub>w</sub>=6.7) 지진파를 사용하였고, 설계지반운동수준은 0.11g와 0.154g 로 하였다. 그림 17은 지진파의 종류별 하부지반 N치의 변화에 따른 케이슨 안벽의 최대수평변위 변화를 나타 낸 간편도표이다.

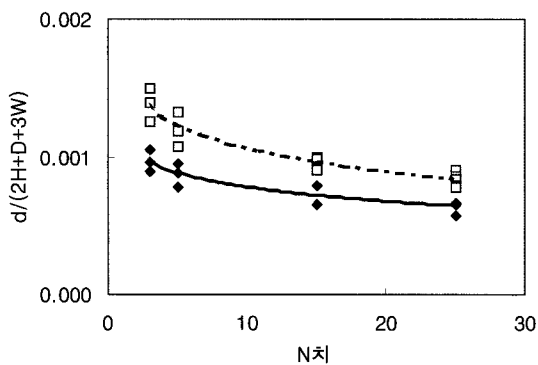
지진시 케이슨 안벽의 최대수평변위(d)에 영향을 미치는 인자로는 케이슨 높이(H), 하부지반 깊이(D), 케이슨 폭(W), 하부지반상태, 지진파의 종류, 지진규모, 설계 지반운동수준 등 여러 가지가 있다. 지진시 케이슨 안벽의 수평변위 산정을 위한 간편도표를 만들기 위해 이들 영향인자 중에서 변위에 큰 영향을 미치는 인자를 분석 하여 케이슨 높이(H), 하부지반 깊이(D), 그리고 케이슨 폭(W) 3개를 영향인자로 선택하였다. 그리고 이들 3가지 인자에 대한 회귀분석을 통해서 동해석 결과를 가장 잘 맞는 형태로 나타낸 변위비[d/(2H+D+3W)]를 간편도 표의 y축으로 그리고 최대수평변위에 가장 큰 영향을



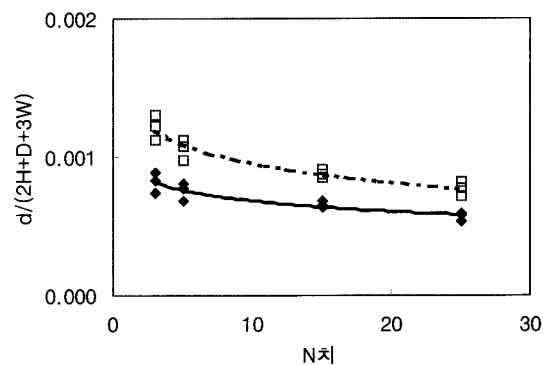
(a) Big Bear(M<sub>w</sub>=6.4)



(b) El Salvador(M<sub>w</sub>=6.6)

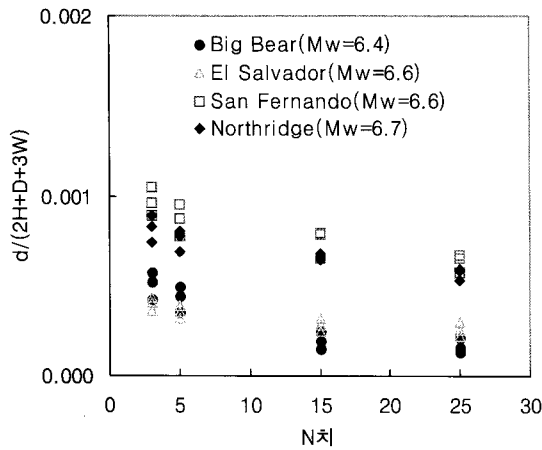


(c) San Fernando(M<sub>w</sub>=6.6)

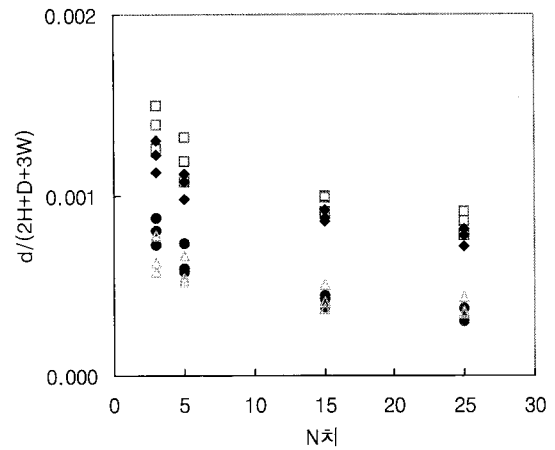


(d) Northridge(M<sub>w</sub>=6.7)

그림 17. 내진안벽설계 간편도표(H/D=1.0, W/H=0.5)



(a) 설계지반운동수준 0.11g



(b) 설계지반운동수준 0.154g

그림 18. 주기특성에 따른 케이스 안벽의 변위분포(H/D=1.0, W/H=0.5)

끼치는 N치를 x축으로 하여 케이스 안벽의 최대수평변위를 정규화 하였다. 간편도표에서 하부지반의 N치와 증가함에 따라 변위비가 감소함을 알 수 있으며 설계지반운동수준의 크기에 따라 차이가 남을 알 수 있다.

그림 10에서 Big Bear(M<sub>w</sub>=6.4), El Salvador(M<sub>w</sub>=6.6) 지진파는 단주기 특성이 크고, San Fernando(M<sub>w</sub>=6.6), Northridge(M<sub>w</sub>=6.7) 지진파는 단주기 특성이 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 18에서는 이러한 지진파의 주기특성이 케이스 안벽의 최대수평변위에 미치는 영향을 나타내었다. 장주기 특성이 큰 San Fernando(M<sub>w</sub>=6.6), Northridge(M<sub>w</sub>=6.7) 지진파에 의한 변위가 단주기 특성이 큰 Big Bear(M<sub>w</sub>=6.4), El Salvador(M<sub>w</sub>=6.6) 지진파보다 크게 발생함을 알 수 있다.

동적해석의 경우 해석방법에 따라 해석시간이 오래 걸리거나 계산의 양이 증가되어 비경제적인 단점뿐만 아니라 동해석시 많은 입력변수가 요구되어 현실적으로 적용이 쉽지 않은 측면도 있다. 따라서 장단주기별 내진설계간편도표를 제안하여 보다 쉽게 실무자들이 실제의 항만설계시 응용할 수 있는 예를 제시하고자 하였다. 그러나 본 내진설계간편도표는 정적 및 등가정적 설계 단계에서 미리 동적해석을 만족시키는 단면을 설정하기 위한 것이므로 실제 설계를 할 때에는 반드시 동해석을 수행하여 내진설계기준에서 제시하는 허용변위와 비교해야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 지진규모가 다른 지진파를 이용한 내

진설계가 국내기준에 어떻게 영향을 미치는지를 검토하기 위해 지진규모 5.3~7.9 수준에 해당하는 28개의 관측된 지진기록을 수집하였고, 이를 대상으로 국내 적합성 평가를 수행하였다. 국내 적합성 평가를 위해 지진파가 보유하고 있는 에너지와 가속도 스펙트럼분석을 하였다.

지진규모에 따른 동해석시 케이스 안벽의 수평변위 특성을 분석하기 위해 국내 내진설계기준의 표준설계 응답스펙트럼을 만족하는 지진파와 국내 항만 및 어항 시설의 내진설계표준서에서 설계 예제로 이용한 지진파를 이용하여 대표적인 항만구조물인 케이스 안벽에 대해서 케이스의 형상 및 하부지반상태에 따른 케이스 안벽의 동적 수평변위특성을 분석하였다. 또한 국내 내진설계기준의 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 지진파에 대한 케이스 안벽의 동적 수평변위에 대한 정량적인 분석을 통해 케이스의 형상치수, 하부지반 깊이, 그리고 지반의 표준관입저항치를 이용하여 간편하게 케이스 안벽의 지진시 수평변위를 산정할 수 있는 간편도표를 제안하였다.

본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 스펙트럼분석결과, 지진규모가 증가할수록 지진파가 가지는 에너지와 가속도 응답스펙트럼 값이 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한 Big Bear(M<sub>w</sub>=6.4), San Fernando(M<sub>w</sub>=6.6), El Salvador(M<sub>w</sub>=6.6) 그리고 Northridge(M<sub>w</sub>=6.7)와 같이 지진규모 6.5 수준의 지진파는 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 반면, 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계

예제로 사용된 지진규모 7.4 이상의 지진파는 이를 벗어나는 것으로 나타났다.

- (2) 케이슨 안벽 구조물에 대한 동해석 결과, 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe) 지진파에 의해서 발생한 변위는 지진규모 6.5 수준의 지진파에 의해서 발생한 변위 보다 2배~4배 정도 크게 산정되었다. 이상의 결과로부터 중진 지역으로 구분되는 우리나라에서 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예제로 사용된 지진규모 7.4 이상의 지진기록을 이용한 내진해석은 케이슨 안벽구조물의 거동을 과다하게 산정하여 비경제적인 결과를 나타낼 수 있음을 알 수 있었다.
- (3) 국내의 내진설계기준에서 제시한 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 4종류의 지진규모 6.5 수준의 지진파를 입력하중으로 한 동해석결과를 회귀분석하여 케이슨 안벽의 지진시 수평변위를 산정할 수 있는 간편도표를 제안하였다. 또한 간편도표 분석결과 장주기 특성이 크게 나타나는 San Fernando( $M_w=6.6$ ), Northridge( $M_w=6.7$ ) 지진파가 단주기 특성이 큰 Big Bear( $M_w=6.4$ ), El Salvador( $M_w=6.6$ ) 지진파보다 변위가 크게 발생함을 알 수 있었다.

## 참 고 문 헌

1. 이희현, 채원규, 남순성 (1996), *지진파의 스펙트럼 해석 입문*, 도서출판 골드.
2. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원 (1997), *내진설계기준연구(III)*, 건설교통부.
3. 한국해양연구소 (1999), *항만 및 어항시설의 내진설계표준서*, 해양수산부.
4. Arango, I. (1996), "Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations", *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.122, No.11, pp.929-936.
5. COSMOS Virtual Data Center (1999), <http://db.cosmos-eq.org>, the Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems.
6. Itasca Consulting Group Inc. (1999), *FLAC Theory and Background*, Itasca, Itasca Consulting Group, Inc.
7. Hudson, D. E. (1979), "Reading and Interpreting Strong Motion Accelerograms", *Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records*, Vol.1, Earthquake Engrg. Res. Inst., Univ. of California, Berkeley.
8. Iai, S., Ichii, K., Morita, T., and Miyata, M. (1997), "Seismic Performance of Caisson Walls on Loose Saturated Sand Foundation", *Proc. 14th ICSMFE*, Hamburg, 2, pp.987-990.
9. Iai, S., Ichii, K., Sato, Y., and Liu, H. (1999), "Residual Displacement of Gravity Quaywalls Parameter Study through Effective Stress Analysis", *Proc. 7th U.S.-Japan Workshop on Earthquake Resistant Design of Lifeline Facilities and Countermeasures against Soil Liquefaction*, Seattle, MCEER-99-0019, pp.549-563.
10. Jennings P. C. (1982), "Engineering Seismology", *Proceedings of the International School of The Physics Enrico Fermi*, varenna.
11. Kanamori, H. and Boschi, E. (1983), *Earthquakes : Observation, Theory and Interpretation*, North-Holland Publishing Company.
12. Kramer, S. L. (1996), *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall.
13. Stephen, E. D., and Yang, D. S. (1998), "Seismically-induced Deformation of Caisson Retaining Walls in Improved Soils", *Geotechnical Special Publication No.75 Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III*, ASCE, Vol.2, pp.1071-1082.

(접수일자 2008. 6. 24, 심사완료일 2008. 8. 23)