

국내 지진규모를 고려한 케이슨 안벽의
지진시 수평변위 특성에 관한 연구

A Study on the Seismically-induced Lateral Displacements
of Caisson Quay Walls Considering Seismic Magnitude in Korea

박근보* 차승훈** 최재순*** 김수일****
Park, Keun Bo Cha, Seung Hun Choi, Jae-Soon Kim, Soo Il

ABSTRACT

There are few earthquake records in Korea and the Japanese or American representative earthquake records have been generally used in the seismic design. In this study, some earthquake records which the range of earthquake magnitudes varies from 5.3 to 7.9 were collected and analyzed to assess which record can rationally reflect Korean seismic characteristics. In this assessment, each seismic energy and acceleration spectrum were analyzed with the unified maximum ground acceleration. Several numerical analyses on Korean representative caisson structures were also carried out to compare each dynamic displacement. In these numerical analyses, soil conditions and the dimension of structure such as height and width were changed. Through this assessment, it is found that the compatible earthquake magnitude in Korea is lower than 7. From the result of numerical analyses, it is shown that horizontal dynamic displacements corresponding to earthquake magnitudes over than 7 are quite larger than those below earthquake magnitude 7. Based on this study, it is necessary that Korean seismic design guideline will refer earthquake magnitude criteria for the construction of the economical aseismic structure.

1. 서론

최근 국내 신설항만구조물의 내진설계에서는 컴퓨터의 발달과 병행한 수치해석의 빈번한 이용에 기초하여 장주기 및 단주기 실지진 시간이력과 국내 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공

* 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 전공 박사과정

** 쌍용건설 사원

*** 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 전공 박사후과정

**** 연세대학교 사회환경시스템공학부 토목공학 전공 교수, 정회원

지진을 입력한 동해석의 이용이 급증하고 있다. 그리고 장주기 및 단주기 지진기록을 이용하는 경우, 국내에서 발생한 지진기록이 거의 없는 관계로 국내 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서에서 예제수행을 위해 수록한 단주기 특성인 지진규모 7.4의 Miyagi-ken-oki(Ofunato) 지진파와 장주기 특성인 지진규모 7.9의 Tokachi-oki(Hachinohe) 지진파를 이용하는 것이 일반적이다. 그러나, 해석예제로 수록된 지진파는 강진지역으로 구별되는 일본의 지진기록으로 국내 설계지반운동수준에 준하여 수정하더라도 지진파 자체가 보유한 특성으로 인해 중약진 지진대로 구별되는 국내 지진특성을 적절하게 고려할 수 없다는 지적이 경제적인 내진구조물 건설과 관련하여 크게 대두되고 있다.

본 연구에서는 우선적으로 국내 내진 동해석에 적용 가능한 입력지진기록의 선택을 위해 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예로 이용한 지진파를 포함하여 28개의 지진규모 5.3~7.9 범위의 지진기록을 수집하고 이에 대한 국내 적합성 여부를 평가하였다. 또한, 중약진 지진대로 구별되는 국내 지진 특성을 고려한 경제적인 내진 구조물의 건설을 위해 대표적인 항만시설물인 케이슨 구조물을 대상으로 국내 일반적인 지반특성을 고려하여 제안된 지진기록 입력시 케이슨 형상 및 하부지반상태에 따른 케이슨 안벽의 동적 수평변위특성을 분석하였다.

2. 지진규모별 지진특성

지진발생시 구조물의 거동에 영향을 미치는 지반운동의 주요 요소는 지진의 강도, 주파수 특성, 그리고 지속시간 등으로 특성화할 수 있다. 이러한 요소들은 지진시 구조물의 거동을 결정짓는 중요한 역할을 해왔으며 지반운동 자체의 특징을 대표한다고 알려져있다. 그러나 실제적인 공학적 이용에서의 지진동의 크기는 파동의 원리에 기초한 최대값 만을 이용하는 것이 보편적이다. 최근 지진동의 크기 및 지진특성 분석을 좀 더 명확히 나타내기 위해서 RMS (root-mean-square) 가속도와 응답스펙트럼 크기를 이용하여 지진 에너지로 표현하는 지진동의 크기를 연구하고 Fourier 스펙트럼을 이용하여 지진파의 주파수 특성 분석을 수행하는 연구가 심도 있게 진행되고 있다.

본 연구에서는 국내 내진설계에 적합한 지진기록의 선택을 위해 암반 노두에서 관측된 지진규모 5.3~7.9 수준의 28개의 지진기록을 수집하고 이를 대상으로 지진규모별 에너지를 산정 하였다. 또한, FFT분석을 통해 각 지진기록의 가속도 응답스펙트럼을 산정하고 이를 국내 표준설계응답스펙트럼과 비교하였다. 본 연구에서 사용된 지진규모별 지진파는 <http://db.cosmos-eq.org>에서 수집하였고 각 지진파의 제원은 표 1에 나타내었다.

본 연구에서 지진파의 에너지는 1질점계 진동 모델을 기본으로 한 지진계에서 관측된 가속도 시간이력을 Jennings(1982)가 제안한 식 (1)을 이용하였다.

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

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

a(t) : 지진계에 의해 기록된 가속도 진폭의 크기

표 1 지진파의 제원(COSMOS Virtual Data Center, 1999)

구분	지진규모(M_w)	발생위치
Lytle Creek Ca	5.3	1970년 Southern California
Nahanni	5.4	1985년 Canada Northwest
Coaling Ca aftershock	5.4	1983년 Mexico
Spitak	5.4	1990년 Armenia
Coyote Lake ca	5.7	1979년 Northern California
Spitak Aftershock	5.7	1998년 Armenia
Hiyoshi	6.3	1997년 Japan
Vlparaiso Chile Aftershock	6.3	1985년 South America
Victoria Mexico	6.4	1980년 Mexico
Baja California	6.4	1934년 Mexico
Big Bear Ca*	6.4	1992년 Southern California
Mikawa	6.4	2001년 Japan
Long Beach Ca	6.5	1933년 Southern California
Coalinga Ca	6.5	1983년 Mexico
Imperial Valley	6.5	1979년 Southern California
San Fernando*	6.6	1971년 Southern California
Cape Mendocino	6.6	1992년 Northern California
El Salvador*	6.6	2001년 2월 Central America
Northridge*	6.7	1994년 Southern California
Nisqually	6.8	2001년 Pacific Northwest
Landers Ca	7.3	1992년 Southern California
Kocaeli Turkey	7.4	1998년 Turkey
Miyagi-oki(Ofunato)	7.4	1978년 Japan
Limon Costa Rica	7.5	1991년 Central America
Taiwan	7.6	1999년 Taiwan
El Salvador	7.6	2001년 1월 Central America
Valparaiso Chile	7.8	1985년 South America
Tokachi-oki(Hachinohe)	7.9	1968년 Japan

주) * 본연구에서 선정된 국내 내진설계에 적용 가능한 입력지진기록

지진규모별 지진파의 설계지반운동수준은 건설교통부 주관으로 편찬된 「내진설계기준 II」(1997)에서 제시한 내용에 기초하여 지진구역 I에 존재하는 내진 1등급 구조물의 붕괴방지 수준에 해당하는 0.154g로 통일하였다. 그림 1은 설계지반운동수준으로 수정한 한 지진파를 식 (1)을 이용해서 구한 에너지를 나타낸 것이다. 그림 1을 보면 동일한 설계지반운동수준으로 수정함에도 불구하고 지진파의 에너지는 지진규모가 커질수록 증가하였으며 설계지반가속도 수준의 최대값이 클수록 에너지도 증가하여 나타났다. 또한 국내 적합한 지진기록의 선택을 위해 보통암(S_B)에 대한 국내 표준설계응답스펙트럼과 암반 노두에서 수집된 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 비교하였다.

그림 2는 최대설계지반운동수준이 0.154g일 때의 지진규모별 가속도 응답스펙트럼과 보통암 지반에 대한 표준설계응답스펙트럼을 지진규모 6.4 ~ 6.7 수준의 중진도 규모와 지진규모 7.4 이상의 지진규모로 분류하여 나타낸 것이다. 그림 2로부터 지진규모 7.4 이상의 지진파가 중진도 규모의 지진파 보다 가속도 응답스펙트럼이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 그림 2의 (a)에서 나타난

바와 같이 지진규모 6.4 ~ 6.7 수준의 중진도 규모의 지진파에 대한 가속도 응답스펙트럼은 보통암 지반의 표준설계응답스펙트럼(설계지반운동수준 0.154g)을 대체로 만족시키나 그림 2의 (b)에서 나타난 바와 같이 지진규모 7.4 이상의 지진파에 대한 가속도 응답스펙트럼이 보통암 지반의 표준설계응답스펙트럼 범위를 초과하는 것을 알 수 있다.

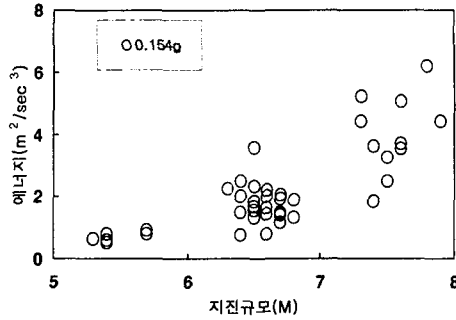
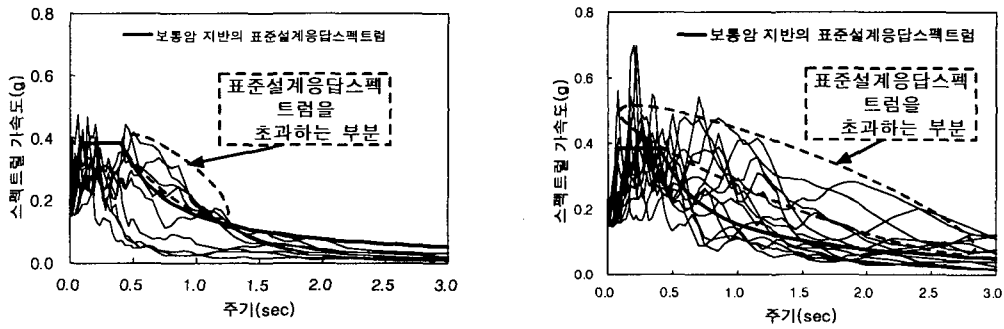


그림 1. 설계지반운동수준이 0154g일 때 지진규모별 에너지



(a) 지진규모 6.4 ~ 6.7

(b) 지진규모 7.4 이상

그림 2. 지진규모에 따른 가속도 응답스펙트럼(설계지반운동수준 0.154g)

3. 케이스 안벽의 동적 수평변위 산정을 위한 입력 조건

본 연구에서는 지진기록이 보유한 각 특성이 설계 구조물 내진해석에 미치는 영향을 파악하기 위해서 국내 표준설계응답 스펙트럼을 만족시키는 지진규모 6.4 ~ 6.7의 지진파와 현재 설계예제로 예시되어 있는 장주기 및 단주기 지진기록을 각각 입력하여 케이스 형상 및 하부지반 상태에 따른 케이스 안벽을 대상으로 동해석을 수행하였다. 수치해석에 사용된 입력지진의 설계응답스펙트럼은 그림 3 및 그림 4와 같으며 설계지반운동수준은 항만 및 어항의 내진설계 표준서(1999)의 내용에 기초하여 붕괴방지 내진 1등급 수준인 0.154로 통일하였다. 수치해석에 사용된 단면의 형상은 인천북항, 제주외항, 마산항 그리고 광양항 등의 기존 항만시설물과 부산신항 등 현재 시공되고 있는 시설물의 단면의 형상을 고려하여 설정하였으며 또한 해석에 사용된 변수와 변화범위는 기존의 항만시설물과 현재 시공되고 있는 시설물의 수준과 현장조건을 고려하여 설정하였다. 표 2에는 입력변수와 해석조건을 정리하였고, 그림 5에는 해석에 사용된 케이스 안벽

및 주변지반의 형상을 나타내었다. 그림 5에서 L1과 L2는 해석시 경계조건의 영향을 고려한 해석 단면의 폭을 나타낸다.

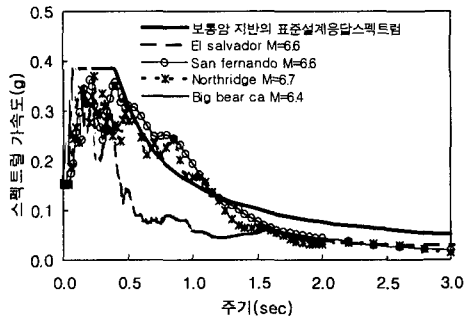


그림 3. 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 지진파(설계지반운동수준 0.154g)

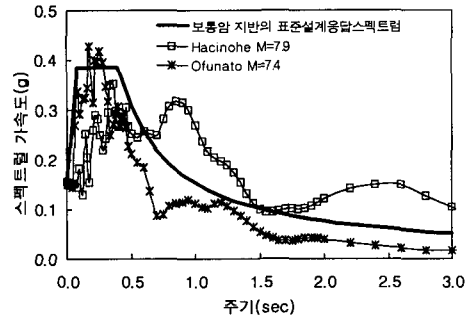


그림 4. 표준설계응답스펙트럼과 Ofunato지진파 및 Hachinohe지진파의 비교 (설계지반운동수준 0.154g)

표 2. 해석에 사용된 변수와 변화범위

변수	변화 범위
하부지반 깊이(D)	H
설계지반운동수준	0.154g
케이슨의 높이(H)	12m
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	5, 15, 25

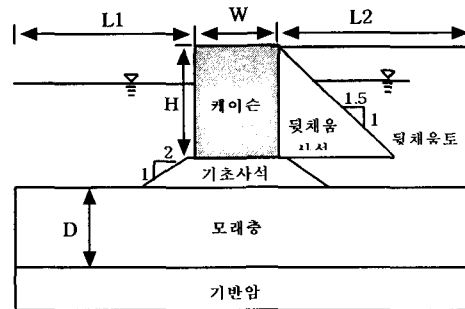


그림 5. 수치해석에 사용된 단면의 형상

본 연구에서는 케이슨 안벽의 지진시 거동 분석을 위해 일반적으로 지반의 거동예측에 널리 쓰이는 Mohr-Coulomb 모델을 이용한 전응력해석을 수행하였다. 또한 동해석시 좌·우 경계면과 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 5에서 케이슨 안벽의 좌측 경계길이(L1)는 L1이 케이슨 높이(H)의 3배를 넘어서면 좌측 경계길이가 수평변위에 영향을 미치지 않는다는 가정하에 3H로 하였다. 또한 케이슨 안벽의 우측 경계길이(L2)는 뒷채움 지반의 개량범위가 케이슨 높이의 2배를 초과하면 개량효율이 현저히 떨어진다는 내용(Stephen, 1998)을 바탕으로 우측 경계길이(L2)를 2.5H로 하였다.

동해석에서 사용된 대상지반의 물성은 실제 국내 항만시설물 건설시 조사된 지반물성을 식 (2)와 식(3)의 경험식에 대입하여 산정하였다. 식 (2)와 식 (3)은 일본 항만기술연구소에서 최대전단탄성 계수 산정시 추천한 식(Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, 1997)으로 식 (2)는 표준관입저항치를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정한 식이고, 식 (3)은 전단파 속도를 이용

하여 최대전단탄성계수를 산정하는 식이다. 식 (4)는 전단탄성계수와 체적탄성계수와 관계식이다.

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

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

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

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

기초사석, 뒷채움 사석 그리고 케이슨의 최대전단탄성계수는 식 (3)의 전단파속도로 산정하였으며 이때, 아래와 같이 일본 항만기술연구소에서 추천한 속도를 이용하였다.

기초사석의 전단파 속도 : $V_s = 300 \text{ (m/sec)}$

뒷채움사석의 전단파 속도 : $V_s = 225 \text{ (m/sec)}$

케이슨의 전단파 속도 : $V_s = 2000 \text{ (m/sec)}$

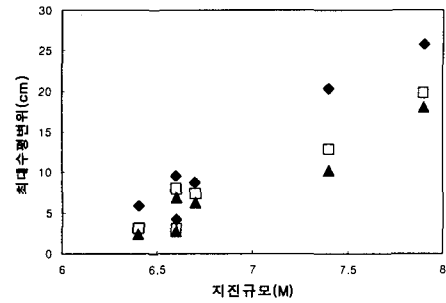
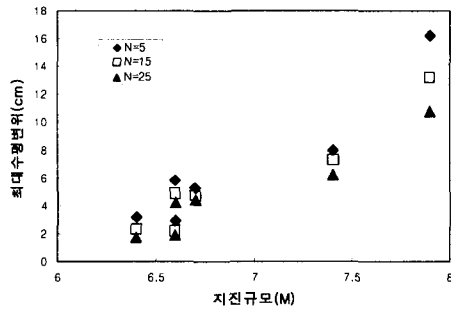
지진하중 작용시 지반은 변형이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하므로, 지반의 동적 물성치 산정시 변형률 수준을 고려하여 유효전단탄성계수를 사용하였다. 유효전단탄성계수 값은 김재현 (2001) 등이 케이슨 안벽에 대해서 지반의 변형률 수준을 고려한 민감도 분석 결과를 이용하여 본 연구에서는 변형이 가장 클 것으로 예상되는 기초 사석에 대해서는 최대전단탄성계수의 30%, 케이슨 안벽의 하부지반, 뒷채움 사석, 뒷채움에 대해서는 최대전단탄성계수의 40%값을 사용하였으며, 기반암에 대해서는 변형이 거의 발생하지 않는 것으로 가정하여 최대전단탄성계수 값을 사용하였다.

4. 케이슨 안벽의 동적 수평변위 특성

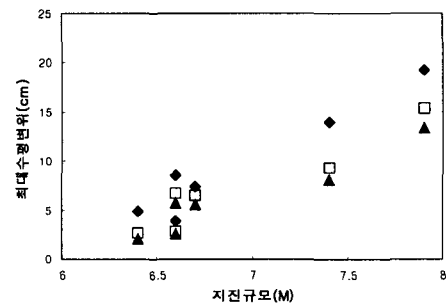
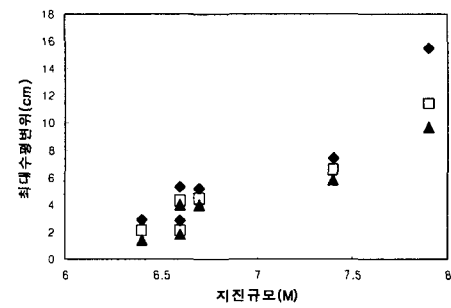
지진규모에 따른 케이슨 안벽의 수평변위를 비교하기 위해서 동일한 설계지반운동수준으로 동일한 그림 3과 그림 4의 지진파를 입력지진으로 하여 동해석을 수행하였다. 동해석시 표 2에 나타난 바와 같이 하부지반조건은 3가지(표준관입저항치, $N=5, 15, 25$), 케이슨 높이 2가지($H=12, 18\text{m}$), 그리고 케이슨 형상비($W/H=0.5, 0.7, 1.0$)로 하였다. 그림 6은 각각 해석조건 변화에 따른 동해석을 수행한 결과를 나타내고 있으며 또한 케이슨의 폭과 높이(W/H)비를 0.5, 0.7 및 1.0으로 일정하게 하고 하부지반의 N 치를 변화시켰을 때의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 그래프의 y 축은 입력지진하중에 의한 케이슨 안벽의 상단에서 발생한 최대수평변위, 그리고 x 축은 지진규모를 나타내고 있다.

그림 6을 보면 동일한 설계지반운동수준으로 수정된 지진파의 지진규모가 증가함에 따라 케이슨 안벽의 최대수평변위는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 케이슨 안벽의 하부지반의 N 치가 증가함에 따라 케이슨 안벽의 수평변위는 감소하고, 케이슨의 폭과 높이(W/H)비가 증가할수록 수평변위는 감소함을 알 수 있었다.

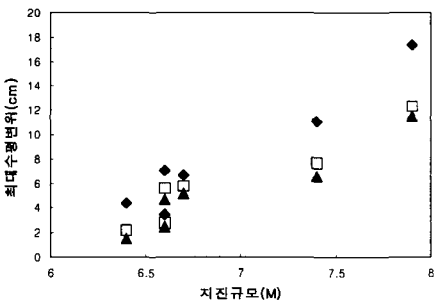
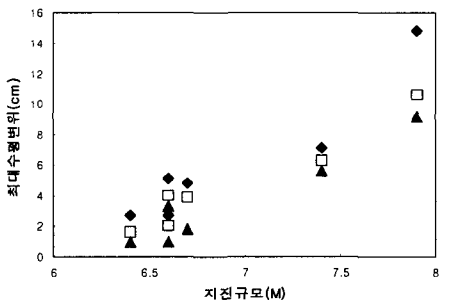
지진규모 7.9의 Tokachi-oki (Hachinohe)지진파에 의해서 발생한 변위는 전반적으로 지진규모 6.5 정도의 지진파에 의해서 발생한 변위보다 2배 이상 크게 발생함을 알 수 있다.



(a) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.5, H=12m (b) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.5, H=18m



(c) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.7, H=12m (d) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=0.7, H=18m



(e) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=1.0, H=12m (f) 설계지반운동수준 0.154g, W/H=1.0, H=18m

그림 6. 지진규모와 하부지반 N치에 따른 안벽의 최대수평변위(H=12m, H=18m)

5. 결 론

본 연구에서는 내진설계에 이용되는 지진기록이 실제 내진해석에 어떻게 영향을 미치는지를 검토하기 위해 지진규모 5.3~7.9 수준에 해당하는 28개의 보통암 지반에서 관측된 지진기록을 수집 하였고, 국내 적합성 평가를 위해 지진파가 보유하고 있는 에너지와 가속도 스펙트럼분석을 하였다. 또한 적합성 평가 결과를 토대로 국내 내진설계기준의 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 지진

파와 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예제로 이용한 지진파를 구분하여 대표적인 항만구조물인 케이슨 안벽에 대해서 케이슨의 형상 및 하부지반상태에 따른 케이슨 안벽의 동적 수평변위특성을 분석하였다. 본 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 스펙트럼분석결과, 지진규모가 증가할수록 지진파가 가지는 에너지와 가속도 응답스펙트럼 값이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고 국내 항만 및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예제로 사용된 지진규모 7.4 이상의 지진파는 국내 표준설계응답스펙트럼을 만족하지 못하는 반면 지진규모 6.4에서 6.7 수준의 지진파는 전반적으로 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 것으로 나타났다.

2. 국내 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 지진규모 6.4 ~ 6.7 범위 지진파와 현재 설계예제를 사용하고 있는 지진규모 7.4 이상의 지진파를 이용한 케이슨 안벽 구조물에 대한 동해석 결과, 지진규모 7.4 이상의 지진기록에 의해 발생한 수평변위는 지진규모 6.4에서 6.7 수준의 지진파에 의해서 발생한 변위보다 크게 발생하였으며, 특히 장주기 특성의 지진파가 단주기 특성의 큰 지진파보다 그 변화정도가 심화되어 나타났다.

3. 이상의 결과로부터 국내 내진설계시 현재 일반적으로 사용되고 있는 지진규모 7.4 이상의 지진기록의 이용은 경제적인 내진구조물 건설 측면에서 비효율적인 것으로 나타났으며 실제적으로 국내 내진설계기준에 지진규모에 대한 별도의 기준이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 두뇌한국21사업과 서울대학교 지진공학연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원에 의한 것입니다.

참고문헌

1. 김재현, "지반개량공법을 적용한 연약지반상 케이슨 안벽의 지진시 수평변위 특성에 관한 연구", 석사학위논문, 연세대학교, 2000.
2. 한국지진공학회, 한국건설기술연구원, "내진설계기준연구(II)", 건설교통부, 1997, pp.29-41.
3. 해양수산부, "항만 및 어항시설의 내진설계표준서", 해양수산부, 1999, pp.21-27.
4. COSMOS Virtual Data Center, <http://db.cosmos-eq.org>, the Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems, 1999.
5. Jennings P. C., "Engineering seismology", Proceedings of the International School of The Physics Enrico Fermi, varenna, 1982.
6. Port and Harbour Research Institute, Handbook on Liquefaction Remediation of Reclaimed Land, A. A. Balkema, 1997
7. Stephen, E. D., and Yang, D. S., "Seismically-Induced Deformation of Caisson Retaining Walls in Improved Soils," Geotechnical Special Publication No.75 Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics III, ASCE, Vol2, 1998, pp.1071-1082.