국내 지진규모를 고려한 케이슨 안벽의 지진시 수평변위 특성분석

차승훈 | 토목기술부사원 | 02-3433-7760 | chocopie@ssyenc.co.

1. 서론

최근국내신설항만구조물의내진해석은국내설계기준에준하여 장주기및단주기특성의실지진 시간이력과 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 인공지진을입력한동해석의이용이일반화되고 있다. 그리고장주기및단주기지진기록을이용하는경우, 국내에서발생한지진기록이거의없는관계로국내 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서에서 예제수행을 위해수록한지진규모 7.4의 Miyagi-ken-oki(Ofunato) 지진파와 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 적절하게고려할수없기때문에국내내진해석에적용가능한 입력지진을 선정하여 구조물의 내진해석을 수행해야한다는필요성이크게대두되고있다.

본연구에서는우선적으로국내내진동해석에적용가능한 입력지진기록의 선택을위해국내 항만 및 어항시설의내진설계표준서에서설계예로이용한지진파를 포함하여 지진규모 5.3~7.9 범위의 28개의 지진기록을 대상으로 국내 적합성 여부를 평가하였다. 또한, 중약진 지진대로 구분되는 국내 지진특성을 고려한 경제적인 내진 구조물의 건설을 위해 대표적인 항만시설물인케이슨구조물을대상으로제안된지진기록 입력시케이슨 형상및 하부지반상태에 따른 케이슨안벽의동적수평변위특성을분석하였다.

2. 지진규모별 지진특성

지진발생시구조물의거동에영향을미치는지반운동의 주요 요소는 지진의 강도, 주파수 특성, 그리고 지속시간등으로특성화할수있다. 이러한요소들은 내진시 구조물의 거동을 결정짓는 중요한 역할을 해왔으며 지반운동 자체의 특징을 대표한다고 알려져 있다. 그러나 실제적인 공학적 이용에서의 지진동의 크기는 파동의 원리에 기초한 최대값 만을 보편적으로 이용하고 있다. 최근 지진동의 크기 및 지진특성 분석을 좀 더 명확히 나타내기 위해서 RMS (root-mean-square) 가속도와 응답스펙트럼의 크기를 이용하여 지진 에너지로 표현하고 있으며, Fourier 스펙트럼을 이용하여 지진파의 주파수 특성 분석을 수행하는연구가심도있게진행되고있다.

2.1 지진파의에너지산정

본연구에서는국내내진설계에적합한지진기록의 선택을 위해 암반 노두에서 관측된 지진규모 5.3~7.9 수준의 28개의 지진기록을 수집하고, 이를 대상으로 지진규모별 에너지를 산정하였다. 또한 FFT분석을 통해 각 지진기록의 가속도 응답스펙트럼을 산정하고 이를 국내 표준설계응답스펙트럼과 비교하였다. 연구에서 사용된 지진규모별 지진파는 http://db.cosmos-eq.org에서수집하였고 각 지진파의재원은<표1>에나타내었다.

[표1] 지진파의제원(COSMOS Virtual Data Center, 1999)

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

주) * 본연구에서선정된국내내진설계에적용가능한입력지진기록

지진파의 에너지는 1질점계 진동 모델을 기본으로 한 지진계에서 관측된 가속도 시간이력을 Jennings(1968)제안한식 (1)을이용하여지진파의에너지를구하였다.

$$TE(t) = \int [a(t)]^2 dt \qquad (1)$$

여기서, TE(t) : 지진계에서 주어진 시간 t에서 지진계의전체에너지

a(t) : 지진계에의해기록된가속도진폭의크기

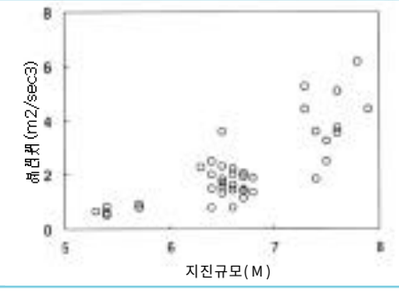
지진규모별 지진파의 설계지반운동수준은 건설교통부주관으로 제정된「내진설계기준 II」(1997)에서 제시한표2에기초하여산정하였다.

[표2] 설계지반운동수준(내진설계기준연구 II, 1997)

구분재현주기	성능수준별구조물분류		기반암에서의지진가속도	
	기능수행	붕괴방지	지진구역 I	지진구역 II
50년	내진 II 등급		0.044g	0.028g
100년	내진 I 등급		0.063g	0.040g
200년	내진특등급		0.080g	0.051g
500년		내진 II 등급	0.110g	0.070g
1000년		내진 I 등급	0.154g	0.119g
2400년		내진특등급	0.220g	0.140g

본 연구에서의 설계지반운동수준은 지진구역 I에 존재하는내진1등급구조물의붕괴방지수준에해당하는 0.154g를 통일하였다. 그림 1은 설계지반운동수준으로 수정한 지진파를 식 (1)을 이용해서 구한 에너지를 나타낸 것이다. 그림1을 보면 여러 지진파를 동일한 설계지반운동수준으로 수정함에도 불구하고 지진파의 에너지는 지진규모가 커질수록 증가하는것으로나타났다.

[그림1] 설계지반운동수준이 0.154g일때지진규모별에너지



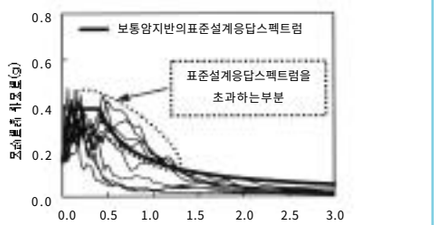
2.2 지진규모별 가속도 응답스펙트럼과 표준설계응답스펙트럼의비교

응답스펙트럼에는 변위, 속도 그리고 가속도 응답스펙트럼 등이 있으며, 국내의 내진설계에 사용되는 표준설계응답스펙트럼은 가속도 응답스펙트럼이므로 본 연구에서는 국내에 적합한 지진기록의 선택을 위해 보통암(Sb)에 대한 국내 표준설계응답스펙트럼

과 암반노두에서 수집된지진파의 가속도응답스펙트럼을비교하였다.

[그림 2]는최대설계지반운동수준이 0.154g일 때의 지진규모별가속도응답스펙트럼과보통암지반에대한표준설계응답스펙트럼을지진규모6.4 ~ 6.7 수준의 중진도 규모와 지진규모 7.4이상의지진규모로분류하여 나타낸 것이다. [그림 2]로부터 지진규모 7.4 이상의 지진파가 중진도 규모의 지진파 보다 가속도 응답스펙트럼이크게나타나는것을알수있다. [그림 2]의 (a)에서 나타낸 바와 같이 지진규모 6.4 ~ 6.7 수준의중진도규모의지진파에대한가속도응답스펙트럼은보통암지반의표준설계응답스펙트럼(설계지반운동수준 0.154g)을대체로만족시키는반면[그림 2]의 (b)에서나타낸지진규모 7.4이상의지진파의가속도 응답스펙트럼은 보통암 지반의 표준설계응답스펙트럼의범위를초과하는것을알수있다.

[그림2] 지진규모에따른가속도응답스펙트럼(설계지반운동수준0.154g)



(a) 지진규모 6.4 ~ 6.7

(b) 지진규모7.4 이상

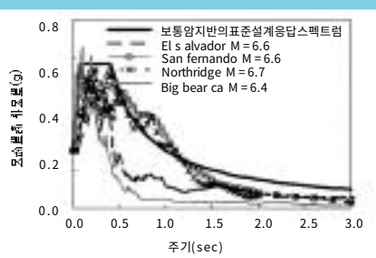
3. 케이슨 안벽의 동적 수평변위 산정을 위한 입력조건

본연구에서는지진기록이보유한각각의지진파의 특성이 구조물 내진해석에 미치는 영향을 파악하기 위해서 국내 표준설계응답스펙트럼을 만족시키는 지진규모6.4 ~ 6.7의지진파와현재설계예제에예시되어있는장주기및단주기지진기록을각각입력하여케이슨형상및하부지반상태에따른케이슨안벽에 대해동해석을수행하였다. 수치해석에 사용된 입력지진의 설계응답스펙트럼은 그림 3 및 4와 같으며 설계지반운동수준은 항만 및 어항의 내진설계 표준서(1999)의내용에기초하여붕괴방지1등급수준인 0.154g로통일하였다.

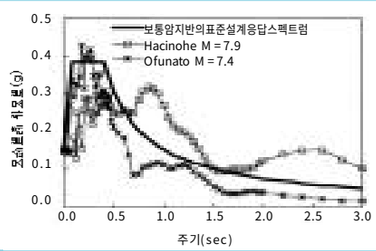
3.1 케이슨안벽의형상및경계조건

수치해석에 사용된 단면의 형상은 인천북항, 제주외항, 마산항그리고광양항등의 기존 항만시설물과 부산신항등현재시공되고 있는 시설물의단면의형상을 고려하여 설정하였다. 또한 해석에사용된변수와 변화범위는 기존의 항만시설물과 현재 시공되고 있는 시설물의 수준과 현장조건을 고려하여 설정하였다. <표 3>에는 해석에 사용된 변수와 변화범위를 정리하였고, [그림 5]에는 해석에 사용된 케이슨 안벽및주변지반의형상을나타내었다.

[그림3] 표준설계응답스펙트럼을만족시키는지진파(설계지반운동수준0.154g)



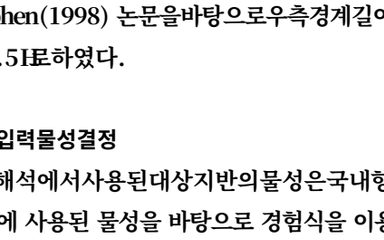
[그림4] 표준설계응답스펙트럼과ofunato 지진파, Hachinohe 지진파



[표3] 해석에사용된변수와변화범위

변수	변화범위
하부지반깊이(D)	H
설계지반운동수준	0.154g
케이슨의높이(H)	12m
케이슨높이에대한폭의비(W/H)	0.5, 0.7, 1.0
입력지진파의지진규모	6.4,6.6,6.7,7.4,7.9
하부지반(모래층)의N치	5, 15, 25

[그림5] 수치해석에사용된단면의형상



안벽의 지진시 거동을 분석하기 위해 본 연구에서는 일반적으로 지반의 거동예측에 널리 쓰이는 Mohr-Coulomb 모델을이용한전응력해석을수행하였다. 또한동해석시좌、우경계면과아래쪽경계면에는 파의 중첩 및 반사를 피하기 위한 흡수경계(quiet boundary)를사용하였고, 반무한지반을반영하기 위한 자유장 경계(free-field boundary)를 사용하였다. [그림 5]에서 케이슨 안벽의 좌측 경계길이(L1)는 L1이 케이슨 높이(H)의 3배를 넘어서면 좌측경계길이가수평변위에영향을미치지않아서 3H로하였다. 또한케이슨안벽의우측경계길이(L2)는 뒷채움지반의개량범위가케이슨높이의2배를초과하면 개량효율이 현저히 떨어진다는 내용의 Stephen(1998) 논문을바탕으로우측경계길이(L2)를 2.5H로하였다.

3.2 입력물성결정

동해석에서사용된대상지반의물성은국내항만시설물에 사용된 물성을 바탕으로 경험식을 이용하여 산정하였다. 식 (2)와 식 (3)은 일본 항만기술연구소에서최대전단탄성계수산정시추천한식(Handbook on Liquefaction of Reclaimed Land, 1997)으로 식 (2)는표준관입저항치를 이용하여 최대전단탄성계수를 산정한 식이고, 식 (3)은 전단파 속도를 이용하여 최대전단탄성계수를산정하는식이다. 그리고식 (4)는전단탄성계수와탄성계수와의관계식이다.

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

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

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

여기서, Gmax는최대전단탄성계수, N은표준관입저항치, γ는 지반의단위중량, g는중력가속도, Vs는 전단파 속도, K는 체적탄성계수, v는 포아송비, G는 전단탄성계수이다.

기초사석, 뒷채움사석그리고케이슨의최대전단탄성계수는 식 (3)을 이용하여 산정하였으며 이때, 아래와 같이 일본 항만기술연구소에서 추천한 전단파 속도를이용하였다.

기초사석의전단파속도: $V_s = 300$ (m/sec)

뒷채움사석의전단파속도: $V_s = 225$ (m/sec)

케이슨의전단파속도: $V_s = 2000$ (m/sec)

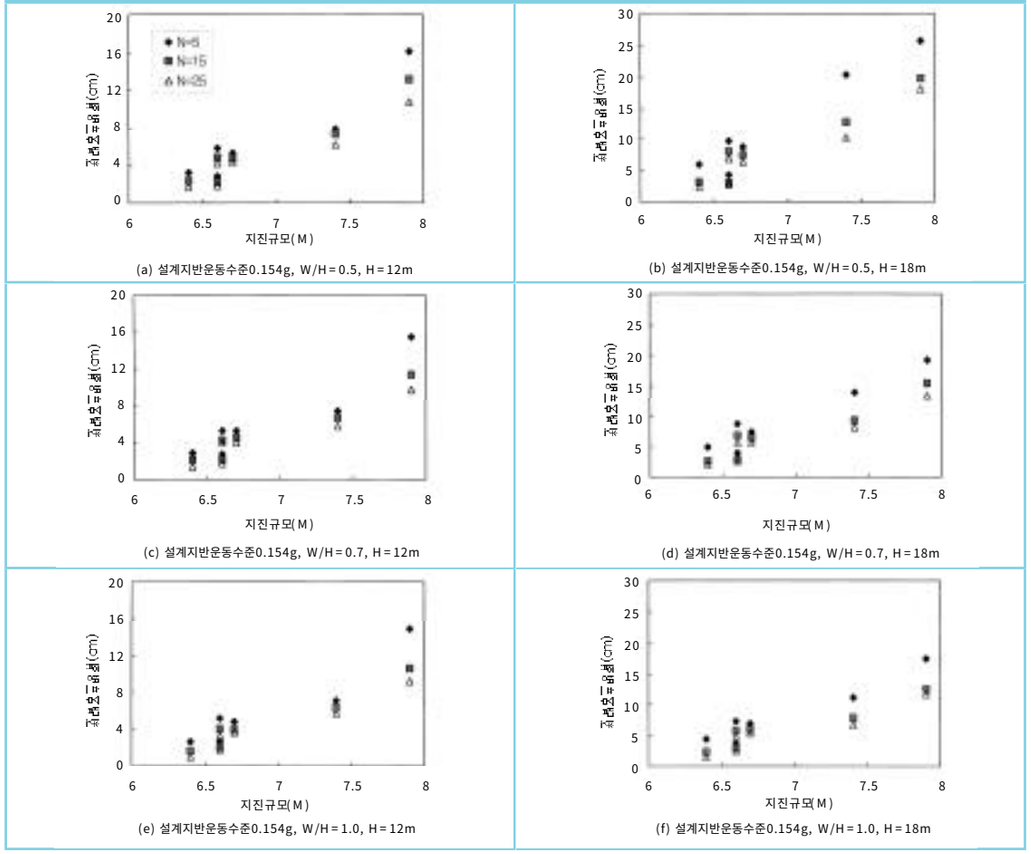
지진하중 작용시 지반은 변형이 커짐에 따라 전단탄성계수는 감소하므로, 지반의 동적 물성치 산정시 변형율 수준을 고려하여 유효전단탄성계수를 사용하였다. 유효전단탄성계수 값은 김재현(2001) 등이 케이슨안벽에대해서지반의변형율수준을고려한민감도 분석 수행결과를 이용하여 본 연구에서는 변형이가장클것으로예상되는기초사석에대해서는최대전단탄성계수의 30%값을 사용하였고, 케이슨 안벽의하부지반, 뒷채움사석, 뒷채움에대해서는최대전단탄성계수의 40%값을 사용하였으며, 기반암에대해서는 변형이 거의 발생하지 않으므로 최대전단탄성계수값을사용하였다.

4. 케이슨 안벽의 동적수평변위 특성

지진규모에따른케이슨안벽의수평변위를비교하기 위해서 동일한 설계지반운동수준으로 통일한 [그림 3]과 [그림 4]의지진파을입력지진으로하여2차원 동해석을 수행하였다. 동해석시 <표 2>에 나타난 바와 같이 하부지반(모래층)의 조건은 3가지(표준관입저항치, N=5,15,25), 케이슨 높이 2가지(H=12, 18m), 그리고 케이슨의 형상비(W/H=0.5, 0.7, 1.0)로 하였다. [그림 6]은 각각 해석조건 변화에 따른동해석을수행한결과를나타내고있으며또한케이슨의폭과높이(W/H)비를0.5,0.7,1.0로일정하게 하고하부지반의지반상태(N치)를변화시켰을때의 수치해석 결과를 나타낸 것이다. 그래프의 Y축은 입력지진하중에 의한 케이슨 안벽의 상단에서 발생한 최대수평변위를 나타내며, X축은 입력지진파의 지진규모를나타내고있다.

[그림 6]을 보면 동일한 설계지반운동수준으로 수정된 지진파의 지진파의 지진규모가 증가함에 따라 케이슨 안벽의 최대수평변위는 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 케이슨 안벽의 하부지반 N치가 증가함에 따라 케이슨 안벽의 수평변위는감소하고, 케이슨 폭과 높이(W/H)비가 증가할수록 케이슨 안벽의 수평변위는감소함을알수있었다.

[그림6] 지진규모와하부지반N치에따른케이슨안벽의최대수평변위(H=12m, H=18m)



(a) 설계지반운동수준0.154g, W/H=0.5, H=12m
(b) 설계지반운동수준0.154g, W/H=0.5, H=18m
(c) 설계지반운동수준0.154g, W/H=0.7, H=12m
(d) 설계지반운동수준0.154g, W/H=0.7, H=18m
(e) 설계지반운동수준0.154g, W/H=1.0, H=12m
(f) 설계지반운동수준0.154g, W/H=1.0, H=18m

5. 결 론

본연구에서는지진규모가다른지진파를이용한내진설계가 국내기준에 어떻게 영향을 미치는지를 검토하기위해지진규모 5.3 7.9 수준에해당하는28개의 보통암지반에서관측된지진기록를수집하였고, 이를 대상으로국내적합성평가를수행하였다. 국내적합성평가를위해지진파가보유하고있는에너지와가속도스펙트럼분석을하였다. 지진규모에따른동해석시케이슨안벽의수평변위특성을분석하기위해국내내진설계기준의표준설계응답스펙트럼을만족하는 지진파와국내항만및어항시설의내진설계표준서에서설계예제로이용한지진파를이용하여대표적인항만구조물인케이슨안벽에대해서케이슨의형상및하부지반상태에따른케이슨안벽의동적수평변위특성을분석하였다. 본연구로부터얻은결론은다음과같다.

①스펙트럼분석결과, 지진규모가증가할수록지진파가 가지는에너지와 가속도 응답스펙트럼값이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그리고, 국내 항만 및 어항시설의내진설계표준서에서설계예제로사용된지진규모 7.4이상의지진파는국내표준설계응답스펙트럼을만족하지못하는반면지진규모 6.4에서 6.7 수준의지진파는전반적으로표준설계응답스펙트럼을만족시키는것으로나타났다.

②국내 표준설계응답스펙트럼을 만족하는 지진규모 6.4 ~ 6.9범위 지진파와현재 국내 항만및 어항시설의 내진설계표준서에서 설계 예제로 사용되고 있는지진규모 7.4이상의지진파를이용한케이슨안벽구조물에대한동해석결과, 지진규모7.4 이상의 지진기록에의해 발생한 케이슨 안벽의 수평변위는 지진규모 6.4에서6.7 수준의 지진파에 의해서발생한변위보다크게발생하였다.

③이상의결과로부터국내의내진설계시일반적으로사용되고 있는 지진규모 7.4 이상의 지진기록의 이용은 경제적인 내진구조물 건설 측면에서 비효율적인 것으로 나타났으며 실제적으로 국내 내진설계기준에 지진규모에 대한 별도의 기준이 필요할것으로판단된다.

참고문헌

1) 김재현,“ 지반개량공법을 적용한 연약지반상 케이슨 안벽의 지진시수평변위특성에관한연구 ”, 석사학위논문, 연세대학교, 2000.
2) 이희현, 채원규, 남순성“ 지진파의스펙트럼해석입문, 도서출판 골드 ”, 1996.
3) 한국지진공학회, 한국건설기술연구원,“ 내진설계기준연구(Ⅱ) ”, 건설교통부, 1997, pp.29-41.
4) 한국해양연구소,“ 항만 및 어항시설의 내진설계표준서 ”, 해양수산부, 1999, pp.21-27.
5) Arango, I. (1996),“ Magnitude Scaling Factors for Soil Liquefaction Evaluations ”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol.122, No.11, pp.929-936
6) COSMOS Virtual Data Center(1999), http://db.cosmos-eq.org, the Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation Systems.
7) Das, B. M. (1994), Principle of Geotechnical Engineering, International Thomson,
8) Ghalandarzadeh, A., Orita, T., Towhata, I., and Yun, F.(1998),“ Shaking Table Tests on Seismic Deformation of Gravity Quay Wall, ” Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake No.2, pp.115-132
9) Hudson, D. E.,“ 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, 1979.
10) Jennings P. C.,“ Engineering seismology ”, Proceedings of the International School of The Physics Enrico Fermi, varenna, 1982.
11) Kanamori, H. and Boschi, E., ₩Earthquakes : Obeservation, Theory and Interpretation, North-Holland Publishing Company, 1983.
12) Kramer, S. L, ₩Geotechnical Earthquake Engineering, Prentice Hall, 1996, pp46-50.