한국해안 · 해양공학회지
제 17 권 제 1 호, pp. 41~46, 2005년 3월

가진 주파수성분에 따른 항만구조물의 지진응답특성에 관한 연구
Earthquake Response Characteristics of a Port Structure According to Exciting Frequency Components of Earthquakes

김두기* · 류희룡** · 서형렬* · 장성규*
Doo Kie Kim*, Hee Ryong Ryu**, Hyeong Yeol Seo* and Seong Kyu Chang*

요 지 : 항만구조물의 유체-구조물-지반 상호작용(FSSI)을 고려한 지진응답해석을 수행하였다. 우리나라 동남해안에 위치한 방파제 구조물을 대상으로 장주기 및 단주기파로 구분된 지진을 비롯하여 최근 우리나라에서 발생한 울진지진에 대한 지진응답특성에 대하여 고찰하였다. FSSI 효과를 고려하기 위하여 유체요소는 평면변형해석에 사용하는 4절점 사변형요소를 수정한 요소를 이용하여 모델링 하였다. 그리고 FSSI해석, 진도법, 부가질량법에 의한 지진응답특성을 비교하였다. 고유치해석을 통하여 방파제의 고유주기를 찾고, 기존의 지진 및 최근 우리나라에서 발생한 지진에 대한 지진응답특성 결과로부터 방파제 구조물이 장주기성분에 대한 영향을 더 많이 받는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 유체-구조물-지반 상호작용(FSSI), 지진응답해석, 항만구조물

Abstract : The seismic response characteristics of a port structure were investigated by the earthquake analyses of the structure subjected to high-, low-frequency component, and Uljin earthquakes. In the Fluid-Structure-Soil Interaction(FSSI) analysis, the fluid is modeled by the 4-node quadrilateral element which is a modification of a structural plane element, and the port structure and foundation is modelled by the plane strain element. Since the present method directly models the fluid-structure-soil interaction system using finite element method, it can be easily applied to the dynamic analysis of a 2-D fluid-port-soil system with complex geometry. The results of the seismic coefficient, added mass, and FSSI methods are compared. The results showed that the earthquake with high frequency components more affects the seismic response of the structure than that of low frequency components.

Key words : Fluid-Structure-Soil Interaction(FSSI), seismic response analysis, port structure

1. 서 론

1995년 Hyogoken-Nanbu 지진은 RC구조물에 있어서 종래 전혀 경험하지 못했던 심각한 피해를 일으켰다(An and Maekawa, 1997; Senzai et. al., 1997). 이 같은 지진피해에 대하여, 현재 주파수 영역상에서 지반-구조물 상호작용(SSI)효과를 고려한 지진응답해석이 많이 수행되고 있다. 또한 유체저장 구조물에 대해서도 유체-구조물-지반 상호작용(FSSI)효과를 고려한 해석에 대한 연구가 진행되고 있다(Kim et. al., 2002). 본 논문에서는 항만구조물의 구조시스템 환경을 고려한 지진피해를 예측하기 위해서 해수와 구조물, 기초지반의 이력감쇠 및 고유주파수의 변화를 고려한 FSSI(Fluid- Structure-Soil Interaction)해석을 수행하였다. 그리고 이 해석결과를 진도법 및 부가질량법과 비교하여 각 해석방법에 대한 지진응답차이를 알아보고 유체-구조물-지반 상호작용이 고려되었을 경우의 항만구조물의 거동특성을 검토하였다. 해석에 사용된 지반운동은 국내 설계응답스펙트럼을 만족하는 KS지진, 울진지진,

*군산대학교 토목환경공학부(Corresponding author: Doo Kie Kim, Department of Civil & Environmental Engineering, Kunsan National University, Jeonbuk, 573-701, Korea. kim2kie@kunsan.ac.kr)
**전북대학교 생물자원시스템공학부(Division of BioResource Systems Engineering, Chonbuk National University)

그리고 특정한 주파수 특성을 가지고 있는 Ofunato 지진과 Hachinohe 지진을 이용하여 항만 방파제에 대해 시간영역상에서 선형해석을 수행하였다(해양수산부, 1999). 지반증폭을 고려한 지진파의 산정은 지반의 비선형성을 고려하기 위하여 등가 선형화 기법에 근거한 대표적인 자유장 해석프로그램인 SHAKE91를 사용하였고, 지진응답변위의 시간이력을 위하여 유체-구조물-지반 상호작용 효과를 고려한 범용해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 지진응답해석을 수행하였다(Idriss et al., 1992).

2. 항만구조물 지진해석법

항만구조물에 대한 지진해석에는 내진설계시 동하중을 등가의 정적하중으로 변환하여 간편하게 해석할 수 있는 진도법, 유사정적 해석의 동수압이 지진시 구조물에 부가된 유체질량으로 작용하도록 고려한 부가질량법 그리고 유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 FSSI 해석법 등이 있다(Chopra, 2001).

2.1 진도법(등가정적해석)

진도법은 해양구조물과 같이 강성이 큰 구조물에서는 지반가속도와 동일한 가속도가 등분포 형태로 구조물에 작용한다는 가정에 기초한 계산법이다(해양수산부, 1999). 지진에 의한 구조물의 거동응답이 시간의 함수이므로 동역학적인 해석을 적용해야 하나, 거동응답이 시간에 따라 서로 다른 값을 갖게 되어 해석이 어렵고 복잡하게 된다. 따라서 이를 정역학적인 방법으로 전환하기 위하여 임의의 시간에서 발생되는 응답값 중 최대응답으로 한정하면 Newton의 제2법칙에 따라 생기는 관성력으로 표현할 수 있다.

$$f = m \cdot \ddot{u}_{g,max} \tag{1}$$

여기서 최대지반가속도 $\ddot{u}_{g,max}$ 대신에 지역별로 발생된 최대 지반가속도를 통계 처리한 값, 즉 설계진도 k로 대체하면 아래와 같이 유도된다.

$$f = m \cdot k \tag{2}$$

식 (2)에서 질량대신 무게를 대입하면 다음과 같이 된다.

$$f = \frac{W}{g} \cdot k = W \cdot k_F \tag{3}$$

식 (3)에서 설계진도를 중력가속도로 나눈 값이 지반의 지진계수 k_F이다. 이 식이 정역학적인 해석을 위한 진도법의 최종식이며, 진도법 에서는 설계지진계수와 제체의 무게를 곱하여 방파제에 등분포로 작용시켜 지진력을 구한다. 방파제의 동수압은 Westergaard 식을 이용한 동수압을 적용하고, 지진에 의한 퇴사압은 고려하지 않는 것으로 하고 있다(일본건설성, 1991). 지진력이 작용한 경우에 발생하는 동수압은 다음의 Westergaard 식에 의해서 계산하며, 이것은 Fig. 1(b)와 같이 방파제의 연직면에 수평으로 작용한다.

$$p_d = \frac{7}{8} W_w \cdot K_h \cdot \sqrt{H \cdot h} \tag{4}$$

여기서, p_d는 수면으로부터의 수심 h에 작용하는 동수압, W_w는 물의 단위중량, K_h는 설계수평진도, H는 수위이고, h는 수면으로부터 하중작용 위치까지의 수심이다.

Westergaard 식은 상류면이 연직인 경우에 대해서 만들어진 식이다. 본 방파제도 상류면이 연직이므로 Westergaard 식을 적용하였다. 유한요소로 모델링 된 방파제의 벽체에 동수압을 가하기 위해서 다음과 같은 식을 이용하여 산정한 후, 해당 절점에 집중하중으로 고려하였다.

$$p_d = \int_{h_1}^{h_2} \left(\frac{7}{8} W_w \cdot K_h \cdot \sqrt{H \cdot h} \right) dh \tag{5}$$

여기서, p_d는 h_1에서 h_2사이에 작용하는 동수압의 합력이다.

방파제의 유한요소모델에 상기와 같이 구한 하중을 작용시켜 정적해석을 하면, 진도법에 의한 해석이 완료 된다.

2.2 부가질량법(동적해석법)

유사정적해석법인 진도법을 이용한 해석으로는 방파제의 지진거동을 충분히 고려할 수 없으므로 동적해석을 실시하여야 한다. 부가질량법에 의한 동적 해석시에는 유사정적해석에서와는 달리 동수압을 방파제에 부가된 질량으로 고려하여 해석을 수행하게 된다(일본건설성, 1991). 즉, Fig. 1(c)와 같이 유체가 방파제와 거동하는 부가질량으로 고려된다. 이 때의 부가질량은 방파제의 상류면 벽면의 각 절점에서 합산하여 구하며, 질량은 다음과 같은 식으로 산정이 된다.

$$m_w = \frac{7}{8} \rho \sqrt{H \cdot h}$$

$$M_w = \int_{h_1}^{h_2} \left(\frac{7}{8} \rho \sqrt{H \cdot h} \right) dh \tag{6}$$

여기서, m_w는 수면으로부터의 수심 h에 작용하는 질량 밀도, M_w는 수심 h_1과 h_2사이에 존재하는 질량밀도의 합이다. M_w가 산정이 되면 이를 유한요소모델 벽면의 각 절점에 부가하여 동적해석을 실시한다.

2.3 FSSI 해석법(동적해석법)

유체-구조물-지반의 상호작용을 고려한 방파제의 지진해석에서는 Fig. 1(d)와 같이 2차원 유체-구조물-지반계로 모형화 할 수 있다(김재민 · 홍선기, 2001; 윤정방 등, 2001). 구조물과 근역지반은 평면변형률요소(Plane Strain Element)로 모형화 하였으며, 유체영역은 유체를 모델링하기 위해 사용되는 2차원 고체요소와 유사한 ANSYS의 유체요소(Fluid79)로 모델링하였으며 이 요소는 온도 뿐만 아니라, 가속도 효과와 같이 유체의 slushing 문제 등을 고려한 유체-구조물 상호작용 해석에 적절히 사용할 수 있다.

유체요소와 고체요소간의 경계조건을 적용하기 위해, 롤러(roller)를 사용하였고, 지반저면은 고정단으로 고려하였으며, 수평지반과 유체의 좌·우측 경계면은 재료 물성값을 근거로 P- 및 S-파 만을 고려한 근사 댐퍼를 사용하여 파동전파를 근사하였다.

3. 해석과정 및 결과

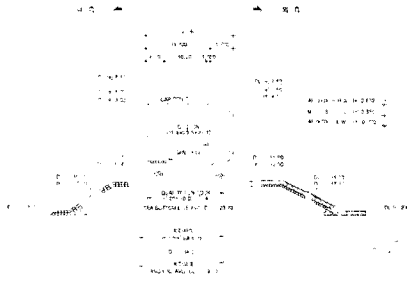
3.1 해석모델

본 연구에서는 Fig. 1과 같은 지반에 시공예정인 방파제의 지진해석을 수행하였다. Fig. 1(a)에 제원과 사용된 해석모델을 나타내었다. Fig. 1(b)는 진도법에 의한 유사정적해석을 하기위한 개념도이며, Fig. 1(c)는 평면요소를 사용하여 지반과 구조물을 모델링하고, 동수압을 계산하여 방파제의 경계면에 부가질량요소로 모델링 하였다. 유체요소를 사용하여 내·외측의 해수를 모델링한 후 FSSI 해석을 수행한 해석모델은 Fig. 1(d)과 같다.

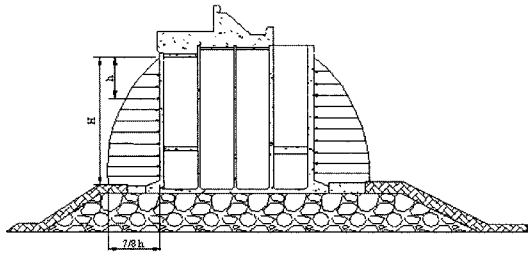
3.2 설계지반운동

입력지진은 지진재해도로부터 해석지반의 기반암에서의 설계지반운동수준을 산정하여 설계진도를 0.09g로 결정하여 시방서 설계응답스펙트럼에 부합하는 KS 인공지진, 울진지진, Ofunato지진, Hachinohe지진을 각각 사용하였다. Fig. 2는 4개 지진자료에 대한 시계열과 각각의 응답스펙트럼을 정리한 것이다.

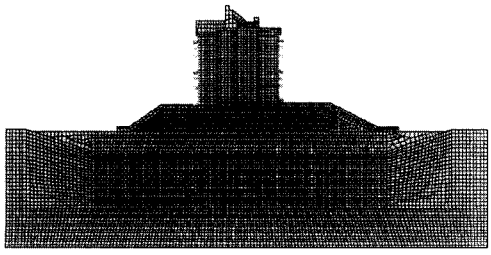
지진해석을 수행하기 위하여 산정된 4개 지진에 대해 지반증폭효과를 고려하기 위하여 Fig. 3의 대표단면에 대해 SHAKE91을 이용한 1차원 부지응답특성평가를 수행



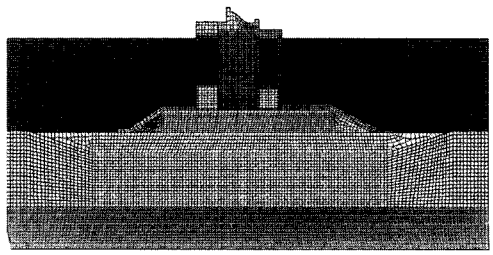
(a) A port structure



(b) Seismic coefficient method



(c) Added mass method



(d) FSSI analysis method

Fig. 1. A port structure and a analysis model.

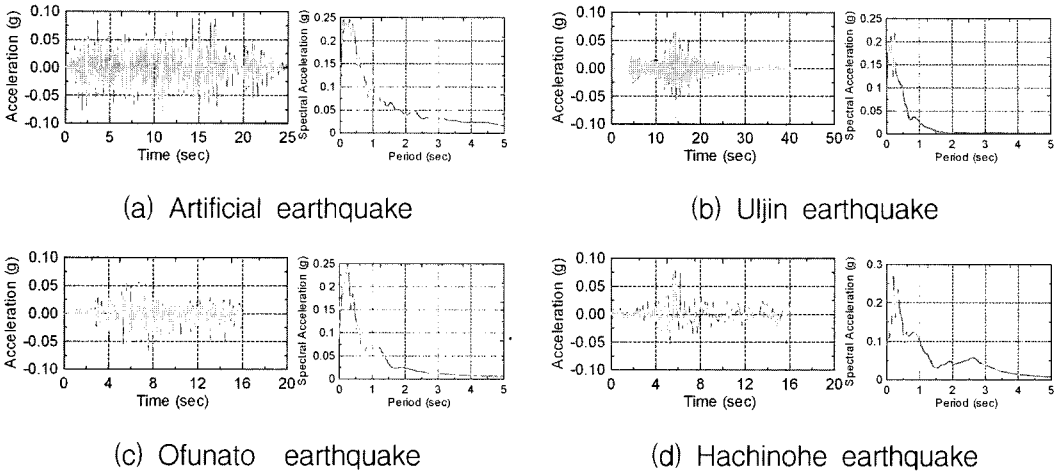


Fig. 2. Input accelerations and response spectra(PGA=0.09g).

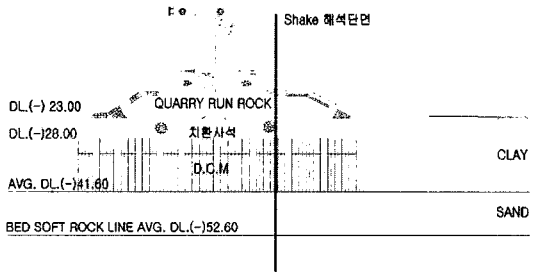


Fig. 3. Soil profile for SHAKE91 analysis.

하였다(Idriss 등, 1992; Rechard 등, 1970). Fig. 4는 지반증폭효과를 고려하여 생성한 각각의 입력지진파를 보이고 있다. 또한 재료감쇠비는 구조물과 지반에 대하여 각각 2%와 5%, 유체에 대하여는 1%를 사용하였다.

3.3 해석결과

각 지반운동에 대하여 방파제 두부에서의 가속도 응답스펙트럼을 구하여 Fig. 5에 나타내었다. 해석결과 방파제의 상단부 가속도 응답은 단주기 성분인 Ofunato지진에 비해 장주기 성분인 Hachinohe지진에 대해 응답가속도가 크게 나타났다. 또한 Table 1로부터 진도법은 부가질량법에 대해 최대 4.9배, FSSI해석에 대해 최대 11.14배가 큰 응답결과를 보이는 것으로 나타났다. 부가질량법과 FSSI해석에 의한 변위 응답은 방파제 두부 최대변위가 각각 2.5 cm, 2.16 cm로 비슷한 결과를 보이고 있다.

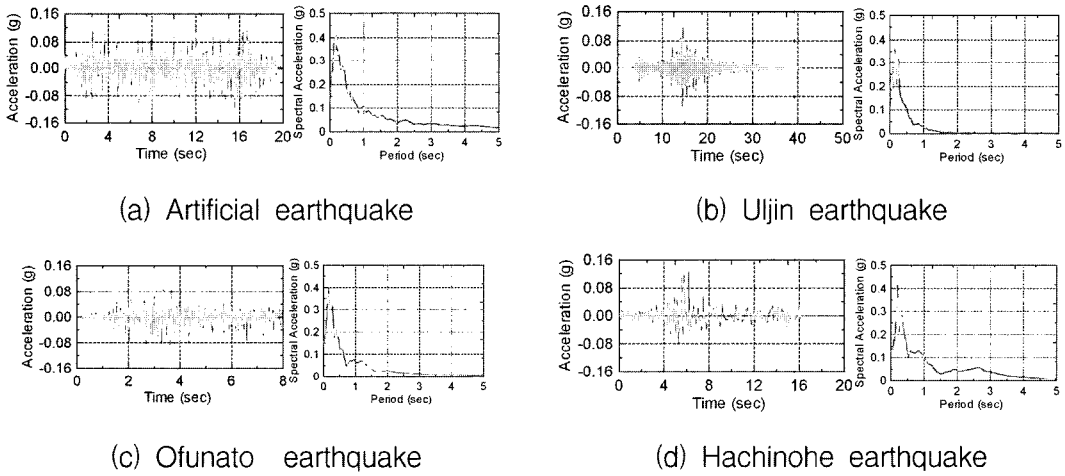


Fig. 4. Input accelerations and response spectra(PGA=0.09g).

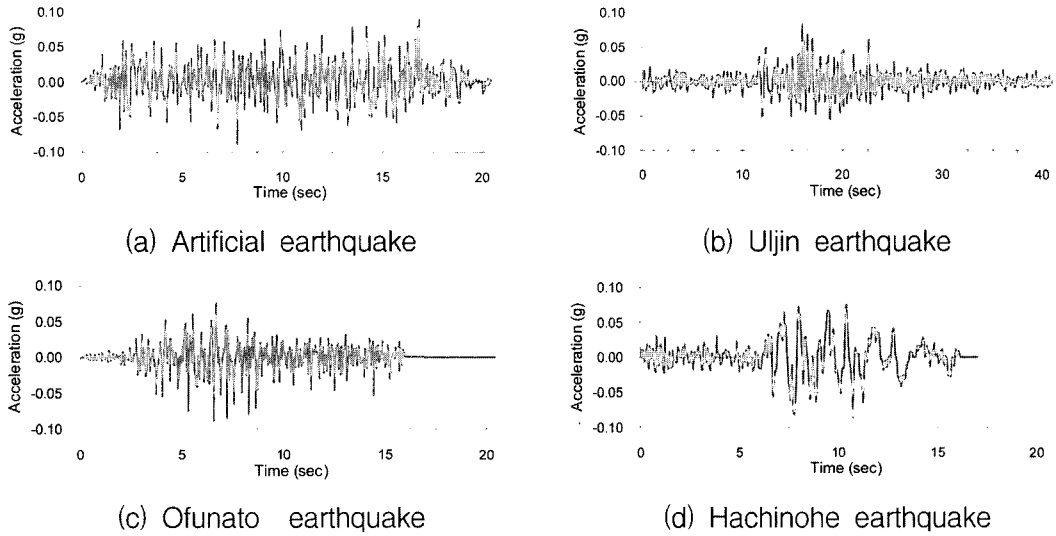


Fig. 5. Seismic response at the top of breakwater.

Table 1. Seismic response analyse

해석방법		방파제 상단부 최대 변위(cm)
부가질량법	진도법	5.35
	인공 지진	2.50
	울진 지진	1.09
	Ofunato항 지진(단주기 성분)	1.17
	Hacinohe항 지진(장주기 성분)	1.95
FSSI 해석	인공 지진	2.16
	울진 지진	0.48
	Ofunato항 지진(단주기 성분)	0.97
	Hacinohe항 지진(장주기 성분)	1.80

Fig. 6은 방파제 구조물의 고유치 해석을 통해 얻은 구조물의 고유주파수 및 고유모드이다. Mode 1은 구조물의 좌·우 수평방향 1차 고유모드로써 고유주기 2.139sec의 저주파수 특성을 보이며 구조물의 수평변위와 전도에 영향을 줄 것 것으로 생각된다. Mode 2는 2차 고유모드로써 고유주기가 1.455sec이며 지반과 구조물의 수평변위 발생방향이 서로 반대인 모드이다. 이는 방파제 구조물 하단부의 전단파괴 및 슬라이딩에 영향을 줄 것으로 생각된다.

Fig. 2와 4의 Hachinohe파의 주기성분을 보면 Ofunato파에 비하여 장주기 성분을 많이 포함하고 있다. 따라서 Fig. 6에 보인 방파제 구조물의 1·2차 모드인 저주파 성분에 영향을 미칠 수 있는 영역이 더 클 것으로 판단된다. Table 1의 결과에서 보인 바와 같이 장주기 성분을 많이 포함한 Hachinohe파가 단주기 성분이 많이 포함된 Ofunato파에 비하여 보다 큰 지진응답결과를 보이고 있다.

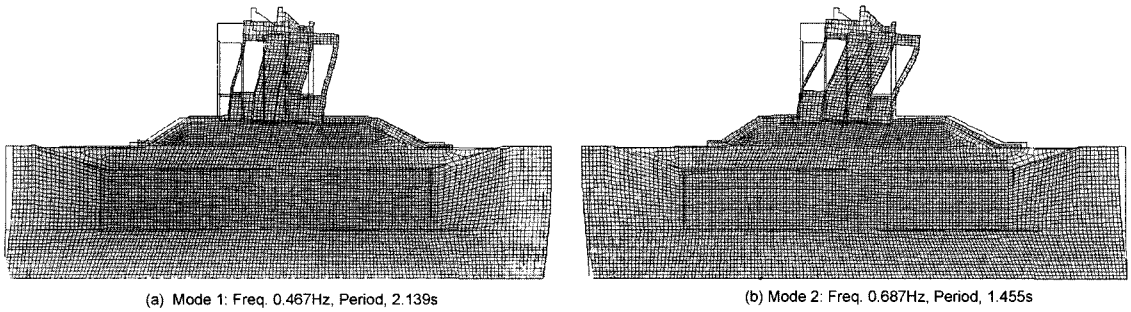


Fig. 6. Natural frequencies and mode shapes of breakwater.

4. 결 론

본 연구에서는 시간영역상에서 유체-지반-구조물 상호작용해를 구할 수 있는 범용유한요소해석프로그램인 ANSYS를 사용하여 KS지진, 울진지진, Ofunato지진과 Hachinohe지진에 대하여 지진응답해석을 수행하였고, 부가질량법, FSSI해석법과 진도법의 응답특성을 비교한 결과 최대 지반가속도를 사용하여 등가정적으로 해석한 진도법이 보수적인 결과를 나타냈으며, 동적해석법인 부가질량법과 FSSI해석법은 유사한 결과를 나타냈다. 방파제 구조물의 고유진동특성을 구하고, 장·단주기파에 대한 방파제의 지진응답특성을 분석하였다. 그 결과 장주기파인 Hachinohe지진에 대한 지진응답결과이 단주기파인 Ofunato 지진에 대한 지진응답결과에 비해 보다 큰 응답특성을 보였다.

감사의 글

본 연구는 교량설계핵심기술연구단의 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

건설교통부 (1993). 댐 설계기준.

김재민, 윤정방, 김두기 (2000). 유한요소-무한요소를 사용한 2차원 지반-구조물계의 주파수영역 지진응답해석법. 한국전산구조공학회지, 13(2), 231-244.

김재민, 홍선기 (2001). 지진하중에 대한 댐 구조물의 유체-유체-구조물 구조물-지반 상호작용해석. 대한토목학회 학술발표회 논문집, 구조공학.

박우선, Shigeo Takahashi (1998). 파랑-해저지반의 상호작용해석을 위한 유한요소모델. 대한토목학회 발표 논문집, 4(3), 369-372.

윤정방, 김재민, 장수혁 (2001). 2차원 유체-구조물-지반계의 지진응답해석. 한국해양공학회 추계학술대회, 132-137.

해양수산부 (1999). 항만 및 어항 설계기준.

An, X. and Maekawa K. (1997). Failure analysis of undergraound RC frame subjected to seismic actions. J. Materials, Conc., Struc., Pavements, JSCE, .36, 251-267.

Chopra, A. K. (2001). Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering (2nd Edition). Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ 07458.

Idriss, I. M. and Sun, J. I. (1992). User's Manual for SHAKE91: Center for Geotechnical Modeling. Department of civil and Environmental Engineering, University of California.

Kim, J.M., Jang, S.H. and Yun, C.B. (2002). Fluid-structure-soil interaction analysis of cylindrical liquid storage tanks subjected to horizontal earthquake loading. Structural Engineering and mechanics, 13(6), 615-638.

Kim, Y-S. and Yun, C-B. (1997). A spurious free four-node displacement-based fluid element for fluid-structure interaction analysis. Engineering Strcuctures, 19(8), 665-678.

Rechart, F.E., Woods, R.D. and Hall, J.R. (1970). Vibrations of soils and foundations. Prentice-Hall.

Senzai, S., Hajime, O. and Takashi, M. (1997). A study of the damage of subway structures during the 1995 hanshin-awaji earthquake. Cement and Concrete Composites, 19, 223-239.

日本建設省 土木研究所 (1991). ダム構造研究室. コンクリートダムに作用する地震時動歷に關する實驗的檢討, 5-35.

Received December 6, 2004
Accepted March 11, 2005