

지진으로 인한 안벽의 액상화 위험도 평가

Liquefaction Susceptibility of Quay Walls to Earthquake Loadings

권오순* · 박우선* · 윤길림*

O-Soon Kwon*, Woo-Sun Park*, and Gil-Lim Yoon*

요 旨 : 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 지반이 액상화에 취약하여 지진 발생시 액상화로 인한 대규모의 파괴가 발생한 사례가 많이 보고된 바 있다. 이번 연구에서는 현재 건설 중인 대형 항만의 안벽 배후지에 대한 액상화평가를 실시함에 있어서 일관되고 합리적인 시험과 평가과정을 통해 액상화에 대한 지반의 안정성을 검토하였다. 또한, 국내 시방서에서 사용하고 있는 액상화예측 모델과 일본 시방서에서 사용하고 있는 액상화예측 모델을 각각 적용하여 그 차이를 검토하였다.

핵심용어 : 지진, 안벽, 액상화, 시방서, 연약지반, 지반해석

Abstract □ The collapses and settlement of harbor facilities from earthquakes were known due mostly to liquefaction of reclaimed land. The most harbor quay walls being designed as gravity types in Korea are known susceptible structures to liquefaction because reclaimed land was not treated resistant to earthquake. In this study, liquefaction susceptibility of reclaimed land behind a large quay walls under construction to earthquake was predicted and its stability was analyzed. In addition, liquefaction prediction methods in harbor facilities specification adopted by both Korea and Japan were compared by applying the methods to prediction of liquefaction susceptibility of reclaimed land, respectively.

Keywords : earthquake, quay walls, liquefaction, specifications, soft ground, geotechnical analysis

1. 서 론

지진은 발생의 원인 및 예측이 매우 어려울 뿐만 아니라 피해 상황도 단지 수분사이에 발생하기 때문에 예보시스템 및 대책 마련도 다른 자연재해에 비해 어렵다. 대규모 지진 발생빈도가 높은 미국과 일본에서는 지진 피해의 최소화를 위해 많은 연구인력과 연구비를 투자하고 있으나 우리 나라는 지진피해 발생정도가 그다지 심하지 않기 때문에 연구의 필요성을 느끼지 못하였고, 단지 원자력발전소와 같이 일부 중요 구조물에 대해서만 내진설계를 의무적으로 수행해 왔다. 지진에 대한 체계적인 공학적인 연구를 위한 지진 가속도 기록이 측정된 경우는 1940년 El Centro 지진이며 이후로 많은 지

진기록과 피해사례에 대한 연구가 이루어 졌다. 이를 토대로 지진발생에 따른 지반의 거동특성 변화에 대한 연구가 활발하게 진행되어 지진 발생시 액상화 현상규명 및 지반-구조물의 상호거동에 관한 연구가 계속적으로 수행되고 있다. 1964년 알래스카에서 발생한 Good Friday 지진 및 일본에서 발생한 Niigata 지진으로 파악된 액상화현상은 1985년 멕시코에서 발생한 Michoacan 지진, 1989년과 1994년 미국 캘리포니아주에서 발생한 Loma Prieta 지진과 Northridge 지진, 그리고 1995년 일본 Kobe 부근에서 발생한 Kobe 지진에서 그 피해의 심각함을 알 수 있다(沿岸開發研究センタ, 1994). 특히, 1985년 Michoacan 지진피해사례를 보면, 그다지 크지 않은 장주기의 지진파가 진원지로부터 수백 km 떨어진 멕시

*한국해양연구소 연안·항만공학연구센터 (Coastal and Harbor Engineering Research Center, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea)

코시타까지 전파됨과 동시에 지반특성으로 인한 지반중 폭현상이 발생하였을 뿐 만 아니라 액상화 피해도 크게 발생하였다. 또한, 1995년 Kobe 지진은 매립지반으로 형성된 Kobe항 부근지역의 액상화 피해를 발생시킨에 따라 매립지반에서의 액상화 거동 연구와 함께 매립지반의 액상화 대책공법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

최근 서·남해 연안에 새로운 대규모 항만의 건설이 급증하고 있으며, 건설될 신항만의 중요성을 감안할 때 내진설계는 반드시 수행되어야 한다. 특히, 매립·조성되는 안벽의 배후지에 대한 액상화평가는 항만시설 전체의 내진 안정성 확보를 위해 최우선으로 해결해야 할 문제인 것이다. 이번 연구에서는 현재 국내에서 건설되고 있는 항만의 대표적인 안벽 단면에 대하여 ‘항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)’에서 제시한 액상화판정방법을 토대로 엄밀한 실내실험과 합리적인 평가과정을 통해 지반의 액상화에 대한 안정성을 평가하였다. 또한, 지진에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있는 일본에서 사용하고 있는 ‘港灣の施設の技術上の基準・同解説(日本港灣協會, 1999)’에서 제안하고 있는 액상화판정방법을 사용하여 액상화를 평가한 결과를 비교·검토하였다.

2. 이론적 배경

2.1 액상화현상

액상화는 크게 ‘유동액상화(flow liquefaction)’와 ‘동적이동(cyclic mobility)’으로 구분된다. ‘유동액상화’는 사면, 댐과 같은 편재하중으로 인해 하부지반에 정적인 전단응력이 존재하는 상태에서 지진시 액상화된 지반의 전단강도가 정적 전단응력보다 작아질 때 급격한 파괴에 도달하는 현상을 말하며, ‘동적이동’은 정적전단응력이 작은 상태에서 반복적인 재하로 인하여 변형이 발생하는

현상을 의미한다. ‘유동액상화’는 ‘동적이동’보다 발생빈도가 아주 적지만 그 피해는 훨씬 크다.

Fig. 1은 느슨하게 배열된 모래지반에 반복하중이 작용할 때 발생하는 입자의 배열 상태를 간략하게 나타낸 것이다. 지진하중에 의해 지반에 전단변형이 발생하고, 배수가 허용되지 않은 급격한 전단변형은 과잉간극수압을 유발하며, 이 때 발생한 과잉간극수압이 증가하여 현장유효응재하중보다 커지게 되면 Fig. 1(b)와 같이 입자가 서로 떨어져 물에 부유하는 상태로 액상화현상이 발생하게 된다. 액상화가 발생하면, 과잉간극수압으로 인하여 유효응력이 거의 없어지므로 지반은 전단강도를 거의 상실하게 되며, 이로 인하여 상부구조의 파괴나 간극수의 배출로 인한 지반의 과도한 침하가 발생하게 된다.

2.2 액상화 평가기법

2.2.1 개요

지반에 지진하중이 작용했을 때 액상화가 발생할 것인지에 대한 평가 및 예측 방법은 구조물의 종류에 따라 여러 가지 기준이 사용되고 있지만, 현재 많이 사용되고 있는 액상화평가 방법은 다음과 같다.

- ① 표준관입시험을 이용한 간편예측(해양수산부, 1999; Seed and Idriss, 1971)
 - ② 콘관입시험을 이용한 간편예측(Olsen, 1998)
 - ③ 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간편예측(日本港灣協會, 1999)
 - ④ 반복전단시험과 지진응답해석을 이용한 상세예측
 - ⑤ 진동대시험이나 현장 액상화시험을 통한 예측
- 간편예측은 표준관입시험과 입도분포와 같이 비교적 쉽게 얻을 수 있는 지반의 조건을 이용하여 간단하게 액상화에 대한 판정을 할 수 있고 정밀도도 비교적 높기 때문에 많이 사용되고 있다. 최근, 연약지반에서는 표준관입시험보다는 높은 정밀도와 연속적인 결과를 얻을

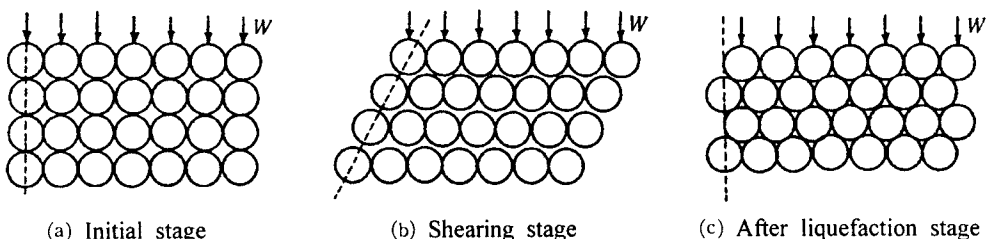


Fig. 1. Liquefaction mechanism.

수 있는 현장시험으로 콘관입시험이 많이 실시되고 있기 때문에, 콘관입시험의 결과를 액상화예측에 사용하는 경향도 있다. 상세예측은 간이예측보다 상대적으로 정밀도가 높지만 특별한 시험과 해석이 필요하기 때문에 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다. 따라서, 상세예측은 간편예측으로 정확한 판정이 어려운 경우나, 보다 상세한 판정이 필요한 주요 구조물에서 주로 실시된다. 진동대시험이나 현장 액상화시험을 통한 평가는 해당 구조물에 대한 액상화에 대한 정밀한 예측이 필요한 특별한 경우에 사용한다.

2.2.2 표준관입시험을 이용한 간편예측(해양수산부, 1999; Seed and Idriss, 1971)

액상화에 대한 안전율은 지진으로 인해 지반에 전달되는 전단응력을 유효상재압으로 정규화시킨 지진 전단응력비 τ_d/σ'_v 와 지반이 발휘할 수 있는 최대전단응력을 유효상재압으로 정규화시킨 액상화 저항응력비 τ_c/σ'_v 의 비로 정의된다.

지진전단응력비는 지반 최대 가속도(a_{max})를 이용하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다. 지반 최대 가속도는 기반암에서의 가속도를 지진응답해석을 통해 구한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \quad (1)$$

여기서, τ_d/σ'_v =지진 전단응력비(FD), a_{max} =최대 지표면 지반가속도, g =중력가속도, σ_v =전체 상재압, σ'_v =유효상재압이다.

지반의 액상화 저항응력비는 표준관입시험의 결과인 N 치를 사용하며, 다음 식 (2)를 이용하여 계산한다. 평균입경(D_{50})이 0.15 mm 이하인 실트질 모래와 실트질 지반에서는 식 (3)과 같이 수정하여 사용한다.

$$N_c = C_N N \quad (2)$$

$$N_c = C_N N + 7.5 \quad (3)$$

여기서 N_c =환산 N 치, C_N =보정계수($=0.77 \log(200/\sigma'_v)$)이다. 산출된 환산 N 치와 지진의 진도와의 관계를 나타낸 Fig. 2를 이용하여 지반의 액상화 저항응력비(FL)를 결정한다.

2.2.3 표준관입시험과 입도분포를 이용한 간편예측(日本港灣協會, 1999)

이 방법은 입도분포와 표준관입시험 결과를 이용해 액상화 발생 여부를 판별하며, 먼저 입도분포 기준곡선인

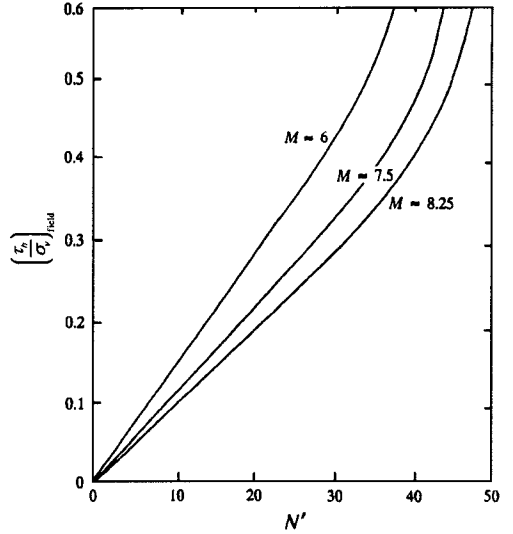


Fig. 2. Factored N-value and liquefaction resistance.

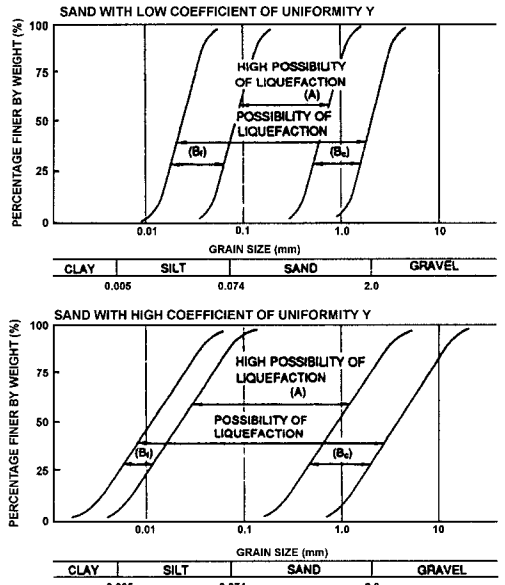


Fig. 3. Grain size distribution and liquefaction potential.

Fig. 3을 참조하여 대상 지반의 입도분포가 액상화가 발생하기 쉬운지 아닌지를 판단한다. 입도분포가 A 또는 Bc의 범위에 속할 경우 등가 N 치는 다음 식 (4)를 이용하여 계산하며, B_l의 범위에 속할 경우 등가 N 치는 표준관입시험의 결과인 N 치를 그대로 사용한다.

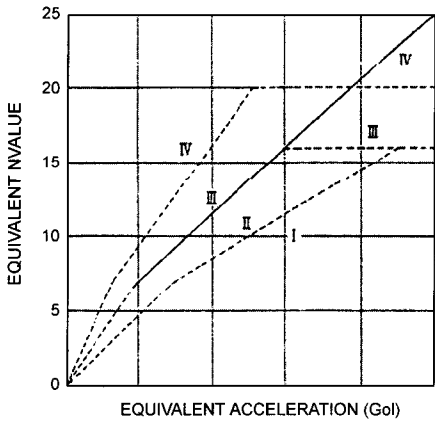
$$(N)_{0.66} = \frac{N - 1.828(\sigma'_v - 0.66)}{0.399(\sigma'_v - 0.66) + 1} \quad (4)$$

여기서 $(N)_{0.66}$ =등가 N 치를 나타낸다.

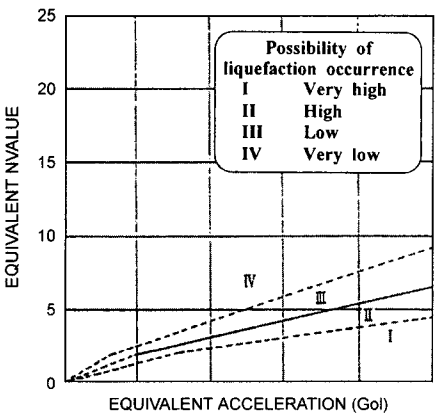
대상 지반의 등가가속도는 다음 식을 이용하여 계산한다.

$$\alpha_{eq} = 0.7 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} g \quad (5)$$

여기에서 α_{eq} =대상 지반의 등가가속도, τ_{max} =최대전단응력이다. 계산된 등가 N 치와 등가가속도를 이용하여 Fig. 4에서 대상 지반의 액상화 발생 등급을 결정한다. Fig. 4(a)는 대상 지반의 입도분포가 A의 범위에 속하는 경우에 적용하며 Fig. 4(b)는 입도분포가 B_f 또는 B_e에 속하는 경우에 적용한다. 입도분포가 A의 범위에 속하는 경우에 한하여 세립률이 5% 이상인 경우 감소계수를 N 치에 곱하여 사용한다.



(a) FOR SOIL LAYER WITH GRADATION IN ZONE A



(b) FOR SOIL LAYER WITH GRADATION IN ZONE B_f AND B_e

Fig. 4. Liquefaction prediction chart.

3. 액상화평가 단면 및 지반특성

3.1 평가 단면 및 입력지진파

이번 연구에서는 현재 시공 중에 있는 4개 항만의 대표적인 안벽 단면에 대한 액상화평가를 수행하였다. 액상화평가를 위한 지진응답해석은 1차원 중복반사파이론을 적용하였으며, 지반의 응력-변형 모델은 등가선형화이론을 적용하였다(Idriss and Sun, 1992). 액상화평가는 표준관입시험의 결과와 입도분포를 이용한 간편법을 사용하였다. 계산의 편리성과 일관성을 위해 해석 프로그램을 제작하여 사용하였다(권 등, 2000).

액상화평가를 위해 먼저 대상 지반의 지반조건을 검토한 후, 현재 매립 중이거나 매립 예정인 매립재료를 채취하여 실내 실험을 통하여 지반의 전단탄성계수와 감쇠비의 변형을 의존곡선을 결정하였다. 시료를 채취하지 못한 지반에 대해서는 설계도서의 지질주상도를 참조하여 지반 조건을 결정하였다.

입력 지진파 시계열은 내진해석에서 많이 사용되고 있는 대표적인 장주기와 단주기 지진파인 Tokachi-Oki 지진(Hachinohe, 1968)과 Miyagi-Oki 지진(Ofunato, 1978)을 사용하였다. 또한, '항만 및 어항시설의 내진설계표준서(해양수산부, 1999)'에 제시된 것과 같이 지진지역구분과 토사지반조건에 따라 결정된 인공지진스펙트럼을 적용하여 인공지진파를 제작하여 적용하였다.

지진구역은 지진 2등급 붕괴방지구준에 해당하는 평균재현주기 500년을 기준으로 해당 항만의 위치를 고려하여 적용하였으며, 지반조건은 연약한 토사지반인 SE 조건을 사용하였다. Figs. 5~8은 입력지진파로 사용한 실지진의 가속도 시계열과 제작한 인공지진의 설계스펙트럼과 가속도 시계열을 나타낸 것이다. 지진응답해석에서 지진파는 기반암 위치에서 작용하는 것으로 보았으며, 사용지진파는 시간영역에서 최대가속도에 대한 비례계수를 적용하여 사용하였다.

3.2 실내실험결과

해석 단면의 대표적인 매립재료를 채취하여 기본적인 실내 실험을 수행하였다. 기본 물성시험으로 입도분포 시험을 실시하였으며, 현장에서 불교란 상태로 시료를 채취할 수 없기 때문에 침강·매립되는 과정을 실내에서 모사한 자중 압입시험을 실시하여 현장의 단위중량을 결정하였다. 또한, 추가적인 1차원 압축재하시험을 실시하여 상재하중에 의한 지반의 압축 특성을 고찰하였다. Fig.

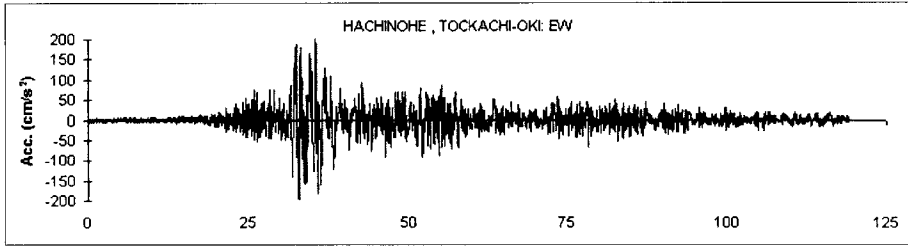


Fig. 5. Tokachi-Oki earthquake.

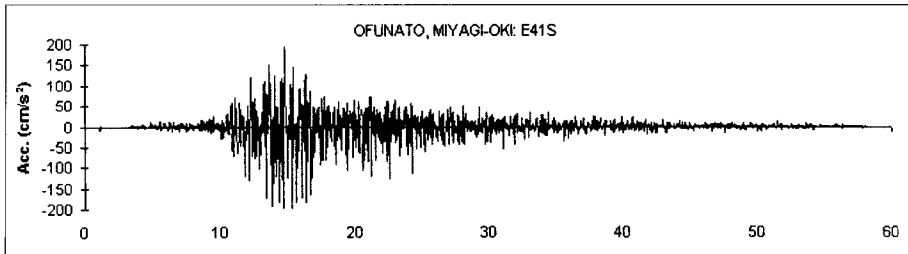
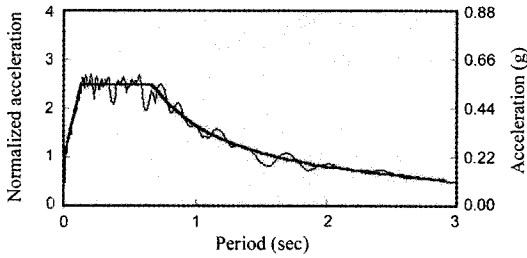
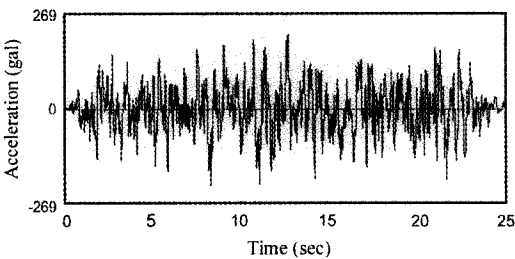


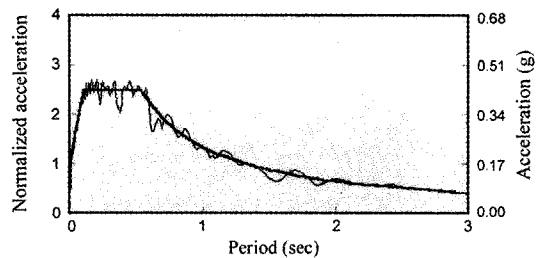
Fig. 6. Miyagi-Oki earthquake.



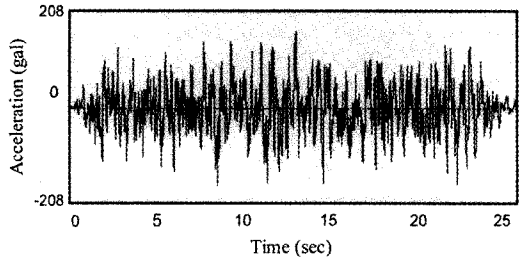
(a) Spectral acceleration response



(b) Time series of acceleration



(a) Spectral acceleration response



(b) Time series of acceleration

Fig. 7. Artificial earthquake (I-region, SE type).

Fig. 8. Artificial earthquake (II-region, SE type).

9는 입도분석 결과를 나타낸 것으로 D항의 매립 모래와 B항의 매립모래는 중간 정도 굵기에 입도분포가 좋게 나타났으며, A항의 매립모래는 조개껍질이 많이 함유되어 있고 비교적 균등한 입도분포 특성을 가진 것으로 나타났다. C항에서 매립재료로 사용된 토사는 입도분포가 좋은 조립토로 나타났다.

지반의 전단탄성계수는 미소변형에서 최대값을 나타

내기 때문에 현장시험에서 측정된 값을 사용하여야 하지만, 현장시험을 실시하지 못하였기 때문에 실내 공진주시험에서 측정된 최대전단탄성계수를 안전 측으로 사용하였다. 최대전단탄성계수는 변형률에 무관하게 일정한 값을 보이는 한계변형률(threshold strain) 이하에서 측정하였다. 공진주시험에서 사용한 시료는 1차원 압축제하시험에서 측정된 단위중량으로 제작한 재성형시료를 사

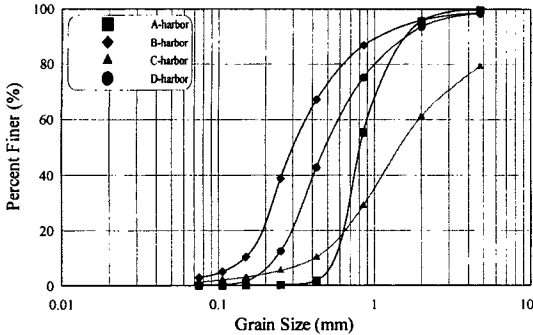


Fig. 9. Grain size distribution.

Table 1. G_{max} from resonant column test.

Types	Confining stress (kPa)	G_{max} (GPa)
A harbor	50	25.76
	100	49.21
B harbor	50	24.12
	100	41.48
C harbor	50	22.75
	100	35.88
D harbor	50	27.79
	100	42.60

용하였다. Table 1은 공진주시험에서 얻어진 최대전단탄성계수를 요약한 것이며, 등가선형화이론을 적용할 때 사용되는 전단탄성계수와 감쇠비의 변형을 의존곡선은 Fig. 10과 같다.

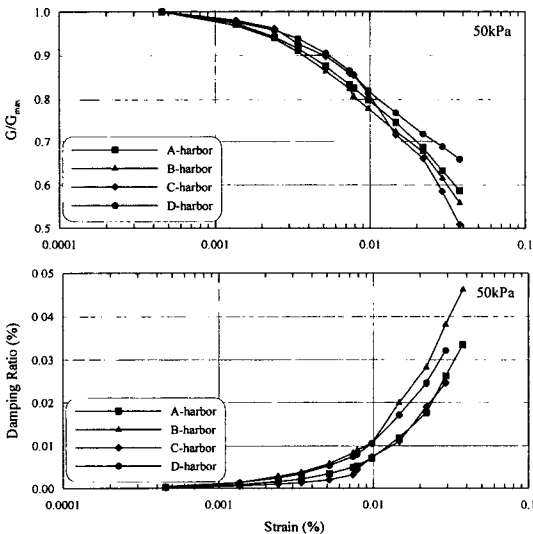


Fig. 10. G_{max} and damping ratio.

실험을 실시하지 못한 다른 지반에서는 기존에 제시된 경험식과 일반적인 범위의 값(한국해양연구소, 2000; Seed and Idriss, 1970)을 취하여 사용하였으며, 지반의 액상화강도 결정에 필요한 표준관입시험은 지반 매립이 완료된 상태가 아니기 때문에 가정하여 적용하였다.

4. 액상화평가 결과

4.1 A 항만

설계도서에 제시된 안벽 단면 중에서 대표 단면으로 20,000 DWT급 일반부두의 표준단면을 선택하였으며, 간략한 단면도는 Fig. 11과 같다. 해당 지반은 기존 해저면(DL-12 m)으로부터 DL-40 m까지 연약한 점성토 지반으로 구성되어 있으며, 안벽의 건설을 위해 케이슨 안벽 하단의 원 지반은 침중혼합처리공법을 적용하여 지반을 개량하며, 배후 지반 하단의 원 지반은 배수공법(PDB)을 적용하여 지반을 개량하도록 설계되었다. 케이슨 안벽의 전면은 선박의 접안을 위해 DL-11.5 m까지 준설한다. 케이슨 안벽의 배후에는 안정성 확보와 배수 측면에서 사석(QRR)이 설치되며, 매립토층과의 사이에 필터층이 설치된다. 이 지역은 지진구역 분류에 의해 지진 I 구역에 해당하며, 재현주기 500년에 해당하는 지진구역계수(z) 값이 0.11 g에 해당한다. 따라서, 해석에 적용한 설계지반운동 가속도 시계열의 최대지반가속도를 0.11 g로 적용하였다.

Figs. 12~13은 각각의 설계 지반가속도에 대한 안벽 단면의 지진응답해석과 액상화평가 결과를 나타낸 것이다. 지진응답해석 결과를 나타낸 Fig. 12를 살펴보면, 복합지반의 특성을 반영하여 기반층에서 입력된 지진파가 증폭과 감쇠를 반복하는 것으로 나타났다. 입력 지진파에 따라 지진응답해석 결과를 비교해 보면 증폭과 감쇠가 발생하는 위치는 다소 차이가 있지만 전체적인 가속도 및 전단응력 응답특성은 큰 차이가 없는 것으로

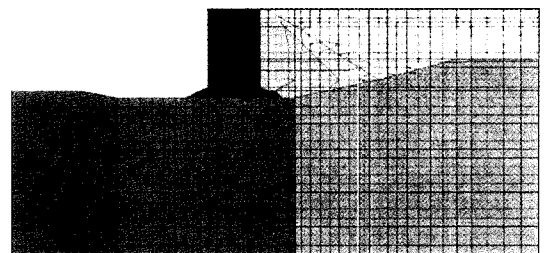


Fig. 11. Cross-section of the quay wall in A-harbor.

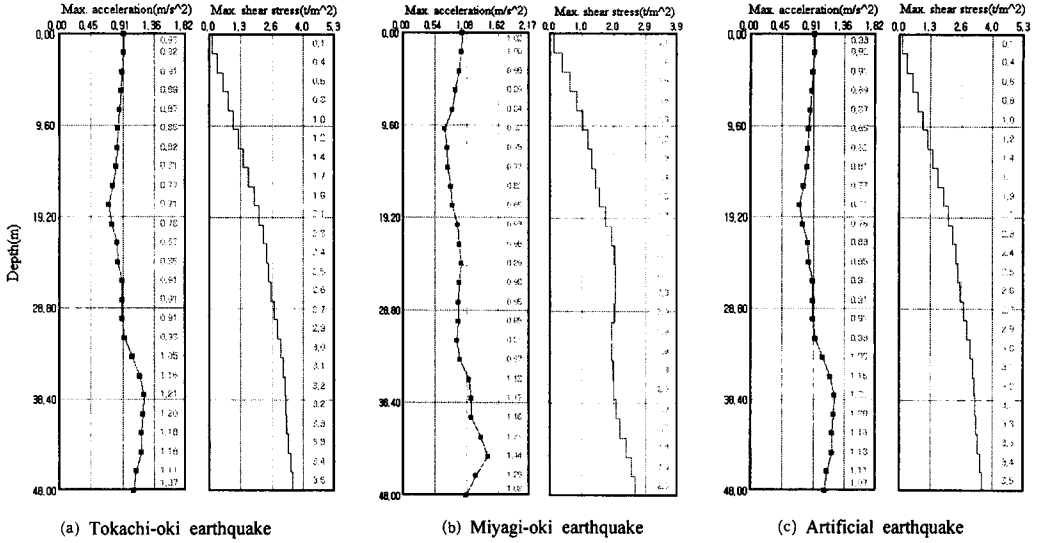


Fig. 12. Results of earthquake response analysis for the quay wall in A-harbor.

나타났다. Fig. 13에서는 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)와 일본 항만시설의 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에 의한 방법으로 각각 액상화

평가를 실시한 결과를 비교하였다. 두 방법 모두 상부층에서는 액상화가 발생할 것으로 나타났으나, 하부층에서는 평가 방법에 따라 액상화 발생 가능성이 다소 차

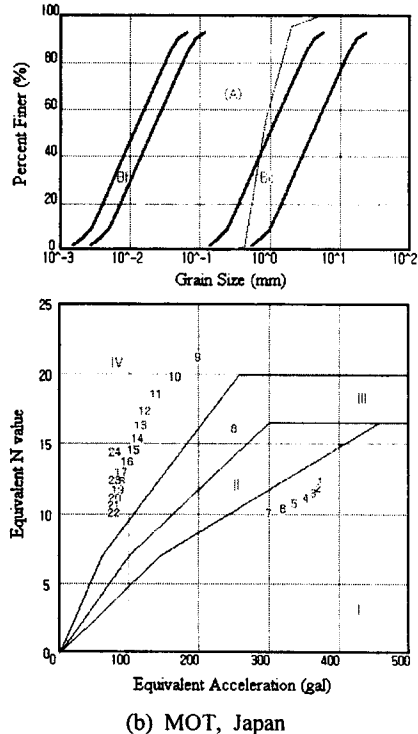
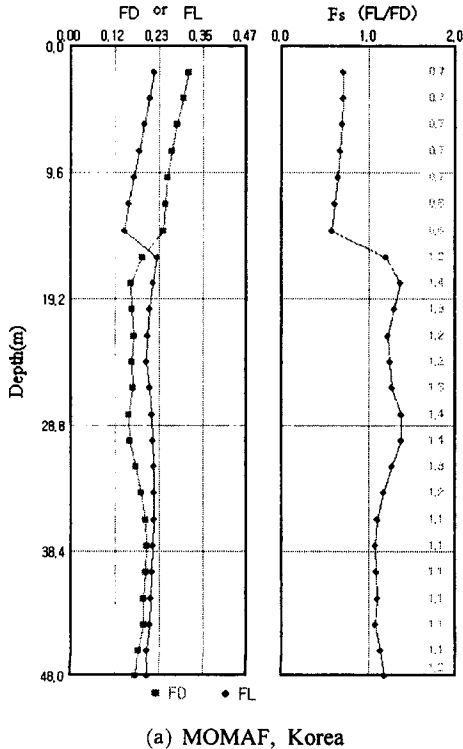


Fig. 13. Liquefaction prediction for the quay wall in A-harbor.

이를 보이고 있다. 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)에서 제시한 방법으로 액상화를 평가한 결과에서는 하부층에서도 액상화에 대해 안전한 것으로 판정하는 안전율 1.5를 넘지 못하는 것으로 나타났다지만, 일본 항만시설의 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에 의한 방법에 의한 평가 결과에서는 하부층은 액상화에 대한 안전한 것으로 나타났다. 이것은 전자의 방법이 지반가속도 응답을 사용하는 것에 반하여 후자에서는 전단응력 응답을 사용하기 때문이며, 이러한 차이는 판정 기법의 차이와 함께 지반의 동적 물성치(전단탄성계수와 감쇠비)의 부정확성으로 인해서도 발생할 수 있다. 따라서, A 항만의 검토 단면에 대한 정확한 액상화 판정을 위해서는 좀 더 정밀한 지반조사와 액상화에 대한 상세평가가 실시되어야 할 것으로 판단된다.

4.2 B 항만

설계도서에 제시된 대표적인 안벽의 단면에 대하여 해석을 수행하였다. Fig. 14는 해석에 사용한 대표단면을 간략히 나타낸 것으로, 7단 콘크리트 블록을 시공한 후 배면을 매립하는 방식으로 시공이 진행되며, 인근에서 준설한 모래를 매립재료로 사용하고 있다. 이 지역도 지진구역 분류에 의해 지진 I 구역에 해당하여 설계지반운동 가속도 시계열의 최대지반가속도를 0.11 g로 적용하였다.

설계 지반가속도에 대한 안벽 단면의 지진응답해석과 액상화평가 결과를 나타낸 Figs. 15 및 16을 살펴보면, 항만 및 어항시설의 내진설계표준서(1971)와 일본 항만시설의 기술상의 기준(1999)에서 제안된 방법을 적용한 모든 경우에서 상부층에서 액상화가 발생하며 GL-3.0 m 이하의 지반에서는 액상화에 안정한 것으로 나타났다. 그러나, 매립지반의 상부 2~3 m의 토층은 완전 포화상태로 보기 어렵기 때문에 B 항만의 안벽 배후지는 액상화에 안정한 것으로 판단할 수 있다.

4.3 C 항만

Fig. 17은 해석에 사용한 안벽의 대표단면의 표준단

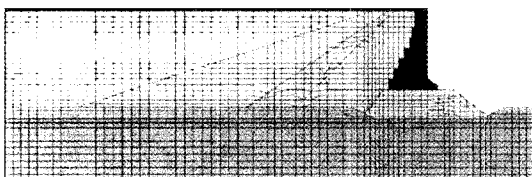


Fig. 14. Cross-section of the quay wall in B-harbor.

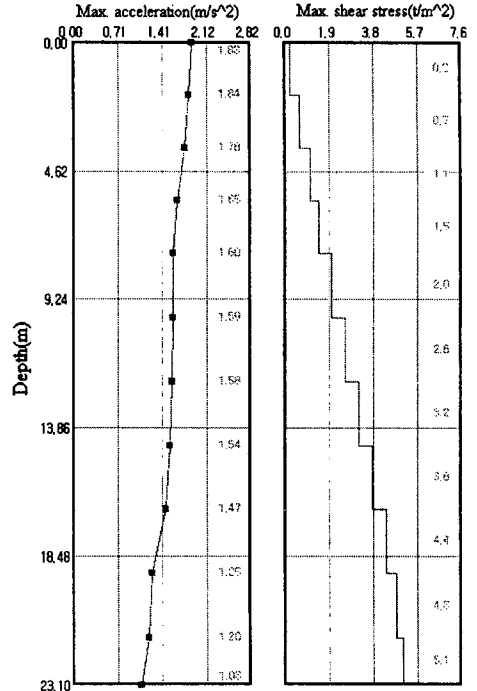
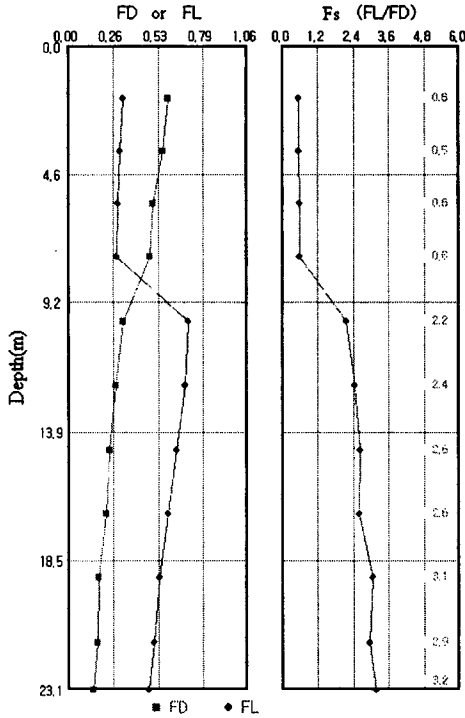


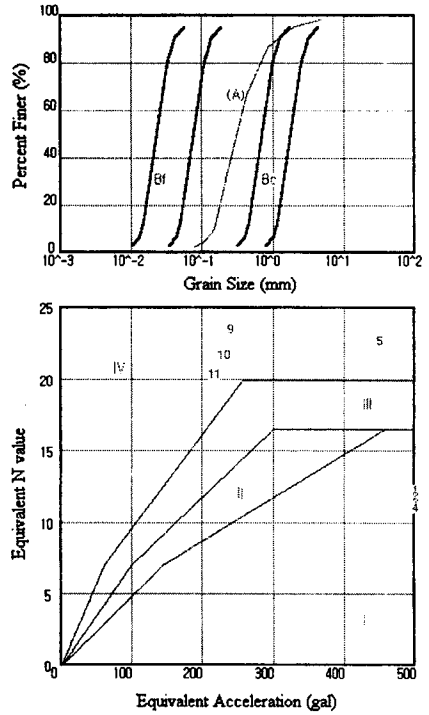
Fig. 15. Results of earthquake response analysis for the quay wall in B-harbor.

면도를 간략하게 나타낸 것이다. 시공 순서는 심층혼합치환 공법을 적용하여 원 지반을 개량한 후 사석 마운드를 거치하고 케이슨식 안벽을 설치하였으며, 안벽의 배후를 준설점토로 매립하여 안정화시킨 후, 산토 매립을 실시하여 배후지반을 형성하였다. 안벽의 전면 지반은 준설로 인하여 그림에서와 같이 경사면을 형성하고 있다. 이 지역은 지진구역 분류에 의해 지진 II 구역에 해당하며, 재현주기 500년에 해당하는 지진구역계수(z) 값이 0.07 g에 해당한다. 따라서, 해석에 적용한 설계지반운동 가속도 시계열의 최대지반가속도를 0.07 g로 적용하였다.

설계 지반가속도에 대한 안벽 단면의 지진응답해석과 액상화평가 결과를 나타낸 Figs. 18 및 19를 살펴보면, A 항의 검토사례와 유사하게 입도분포 특성이 액상화가 쉽게 발생하지 않는 범위에 있어 일본 항만시설의 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에 의한 평가방법에서 액상화가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 또한, 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)에 의한 판정에서도 대부분 액상화에 대한 안전율이 1.5 이상으로 나타나 액상화에 대하여 대체적으로 안정한 것으로 평가되었다.



(a) MOMAF, Korea



(b) MOT, Japan

Fig. 16. Liquefaction prediction (B-harbor).

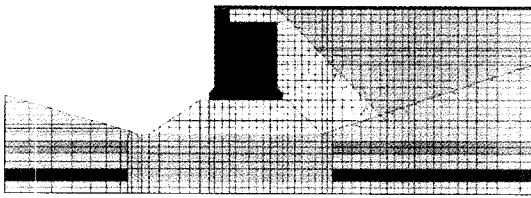


Fig. 17. Cross-section of the quay wall in C-harbor.

4.4 D 항만

Fig. 20은 해석에 사용한 안벽의 대표단면의 표준단면도를 간략하게 것이다. 콘크리트 블록식 안벽의 배면에 대립을 통하여 배후 지반을 조성하는 방법으로 계획되었다. 이 지역은 지진구역 분류에 의해 지진 I 구역에 해당하여 설계지반운동 가속도 시계열의 최대지반 가속도를 0.11 g로 적용하였다.

설계 지반가속도에 대한 안벽 단면의 지진응답해석과 액상화평가 결과를 나타낸 Figs. 21 및 22를 살펴보면, 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)에 의한 평가방법과 일본 항만시설의 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에 의한 관점에서 모두 액상화가 발생

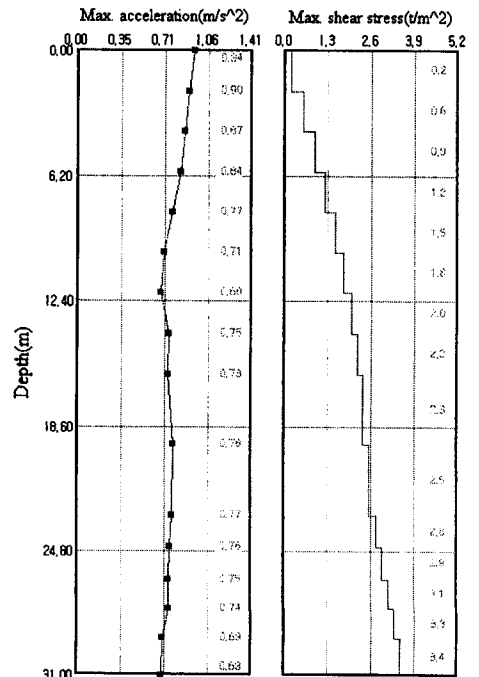


Fig. 18. Results of earthquake response analysis for the quay wall in C-harbor.

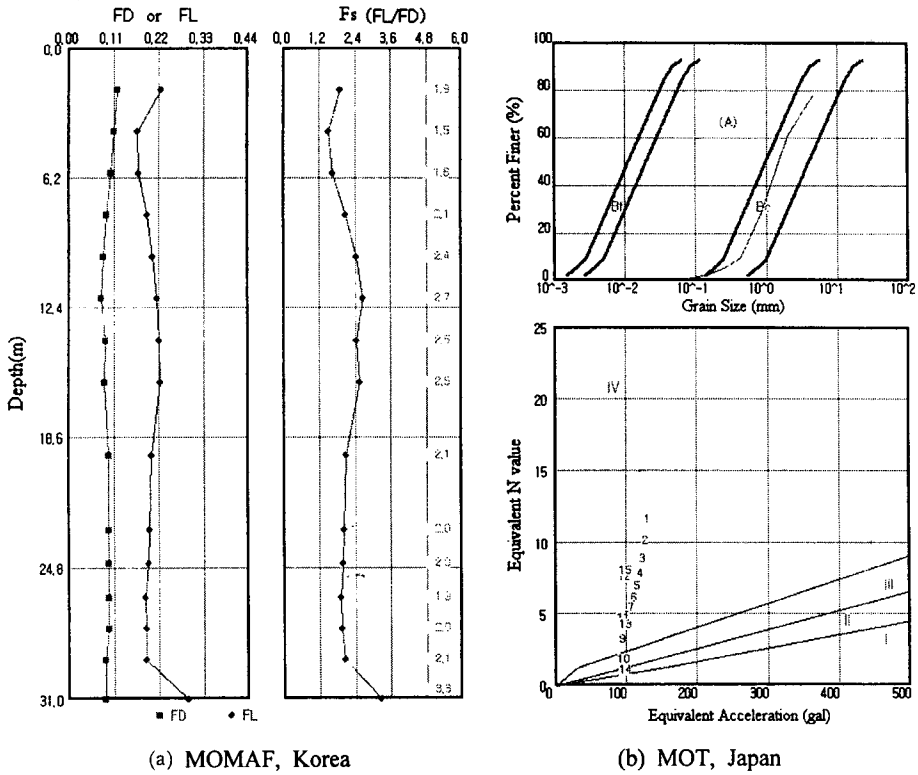


Fig. 19. Liquefaction prediction for the quay wall in C-harbor.

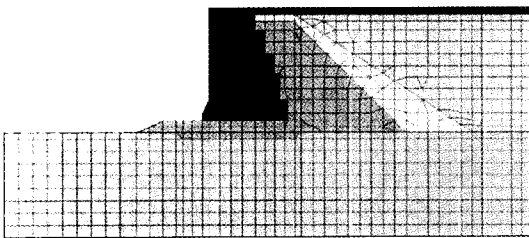


Fig. 20. Cross-section of the quay wall in D-harbor.

하는 것으로 나타났다. 입도분포도 액상화가 쉽게 발생하는 범위에 속하며, 지진응답특성도 지표면으로 지진파가 증폭되어 전달되고 있어 액상화가 발생하는 것으로 판정할 수 있다.

5. 결 론

이번 연구에서는 현재 건설 중인 4개 신항만의 대표적인 안벽 단면에 대한 액상화평가를 수행하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 단일지반에서 주파수 특성이 상이한 지진의 종류

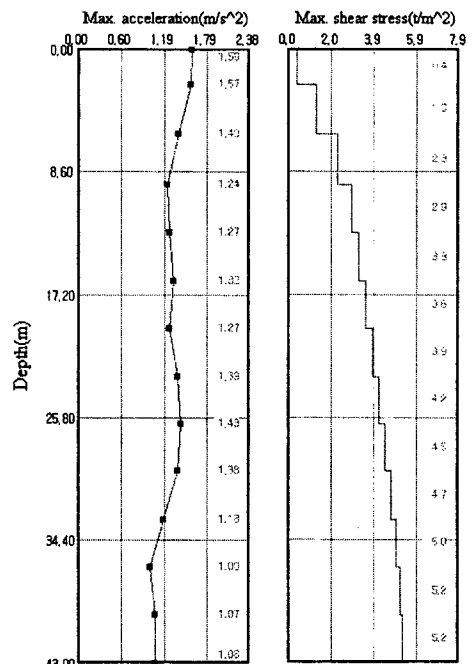


Fig. 21. Results of earthquake response analysis for the quay wall in D-harbor.

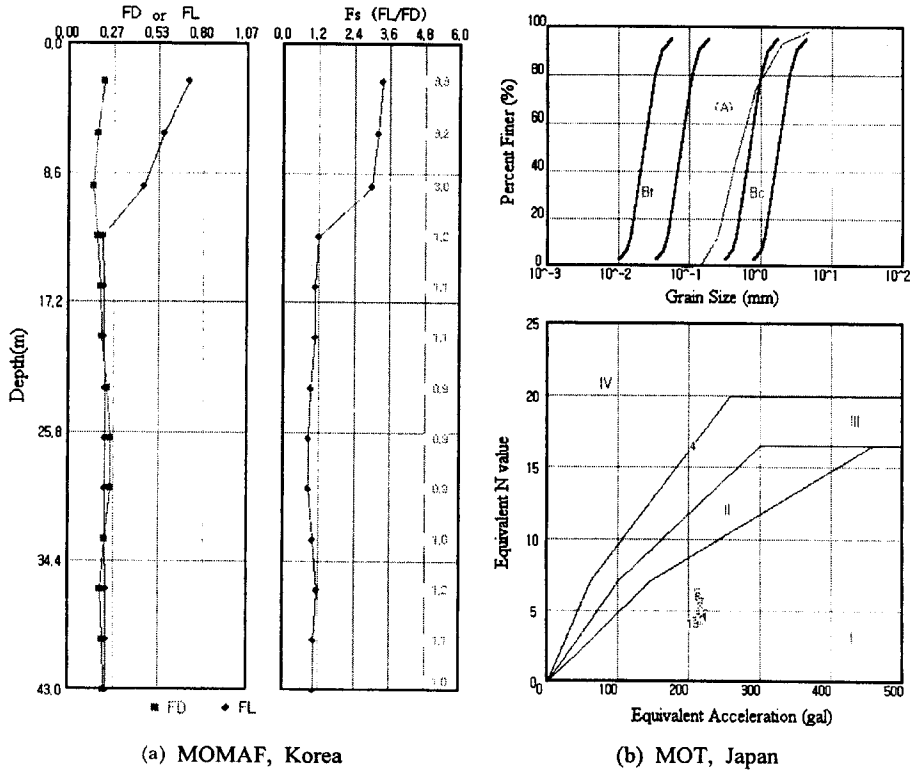


Fig. 22. Liquefaction prediction for the quay wall in D-harbor.

에 따라 지반의 가속도 응답 특성이 상당한 차이를 보이는 것과는 달리 복합지반에서는 지진의 종류에 따라 가속도 응답특성이 큰 차이를 보이지 않는다.

② 액상화 검토 결과, 4개 항만 중에서 2개 항만의 안벽에서만 액상화에 안정한 것으로 평가되었으며, A 항만의 경우 평가기법에 따라 다소 차이는 있지만 세 부적인 액상화 검토가 필요한 것으로 나타났다. D 항만의 안벽의 경우에는 액상화가 발생할 것으로 평가되었다. 현재 D 항만의 안벽 단면은 액상화에 대한 안정성을 확보할 수 있는 단면으로 설계변경하여 시공 중에 있다.

③ 대표적으로 액상화를 평가하기 위한 간편법으로 사용되고 있는 두 방법을 비교한 결과, 일본 항만시설 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에서 액상화가 쉽게 발생하지 않는 입도분포를 가지는 지반에서의 액상화 평가 결과와 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부, 1999)에 따른 평가결과는 차이를 보일 수 있음을 알 수 있었다.

④ 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서(해양수산부,

1999) 방법에 의한 액상화 판정이 일본 항만시설 기술상의 기준(일본항만협회, 1999)에 의한 방법보다 보수적인 안전측의 결과를 얻을 수 있었다.

사 사

본 연구는 해양수산부의 '지진에 대비한 항만구조물 보강 및 신형안벽개발 연구용역'의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 권오순, 박우선, 2000. 등가선형화에 의한 1차원 지진응답 해석의 민감도분석, 한국지반공학회지(계재 예정)
- 한국해양연구소, 1999. 항만 및 어항시설의 내진설계 표준서, 해양수산부.
- 한국해양연구소, 2000. 지진대비 항만구조물 보강기법 및 신형안벽개발(II), 해양수산부.
- Idriss, I.M. and Sun, J.L., 1992. User's manual for SHAKE91,

- Dept. of Civil and Env. Engrg., Univ. of California, Davis, California.
- Lysmer, J., Udaka, T., Seed H.B. and Hwang, R., 1974. LUSH - A Computer program for complex response analysis of soil-structure systems, *Rep. No. UCB/EERC-74/4*, Earthquake Engrg. Res. Center, Univ. of California, Berkeley.
- Olsen, R.S., 1998. Using the cone penetrometer test (CPT) to predict liquefaction potential, *U.S. NCEER workshop on "In situ based techniques for prediction of liquefaction potential"*.
- Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B., 1972. SHAKE - A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, *Rep. No. UCB/EERC-72/12*, Earthquake Engrg. Res. Center, Univ. of California, Berkeley.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1970. Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses, *Report No. UCB/EERC-70/10*, Earthquake Engrg. Res. Center, Univ. of California, Berkeley.
- Seed, H.B. and Idriss, I.M., 1971. "Simplified procedures for evaluating soil liquefaction potential", *J. of the Soil Mechanics and Foundations Div.*, ASCE, Vol. 97, No. SM9, pp. 1249-1273.
- 日本港湾協會, 1999. 港湾の施設の技術上の基準・同解説. (財)沿岸開発技術研究センタ, 1994. 埋立地の液状化対策 ハンドブック.

Received March 16, 2000

Accepted April 10, 2000