

지진규모를 고려한 방파제 특성에 관한 연구

A Study on the Breakwater Characteristics considering Seismic Magnitude

정진호^{1*}, 이광열², 임창규³

Jin-Ho Jeong^{1*}, Kwang-Yeol Lee², Chang-Kyu Lim³

¹Member, Professor, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan, Korea

²Member, Professor, Department of Division of Architecture & Civil Engineering, Dongseo University, 47 Jurye-ro, Sasang-gu, Busan 617-716, Korea

³Member, Ph.D. Candidate, Department of Civil Engineering, Pukyong National University, 365, Sinseon-ro, Nam-Gu, Busan, Korea

ABSTRACT

Busan is located at the mouth of Nakdong River and if an earthquake occurs, it is very likely that the damage by the earthquake will be worse as liquefaction can happen in the sand layer, builtup soil, and landfill ground due to amplification in the lower sedimentary layer that is well developed in the river mouth. Therefore, this study first examined the possibility of liquefaction in the replaced sand layer under breakwater using 14 earthquakes in 5.6-7.9 scale and artificial earthquakes including the seismic wave suggested in the standard specifications for seismic design of ports and fishing port facilities to evaluate the stability of breakwater which is the primary protective structure for port facilities against earthquakes. Second, analysis on characteristics of the seismic energy and acceleration response spectrum by size of earthquake was performed to suggest the most appropriate size of seismic wave for the condition in Korea. Third, finite element analysis was performed using the suggested seismic wave to study the characteristics of earthquake by finding the dynamic lateral displacement of breakwater and verifying the stability of structure and the displacement and forces occurring at geotextile. Results of the study showed that the possibility of liquefaction in the landfill and replaced sand layer, the dynamic lateral displacement of breakwater, and changes of geotextile are greatly affected by the subsurface ground (replaced sand layer).

요 지

부산지역은 낙동강 하구에 위치하여 퇴적층, 매립층 등이 매우 잘 발달되어 있어 지진이 발생한다면 이러한 지층 등에서 증폭현상이 나타나 모래층과 성토층 및 매립지반에 액상화 발생 가능성이 매우 커진다. 만약 액상화가 발생한다면 지진에 의한 피해는 크게 가중되어 막대한 피해를 야기 시키게 된다. 그러므로 본 연구는 지진 발생 시 항만시설의 1차 보호구조물인 부산항 신항 방파제의 안정성을 검토하기 위하여, 국내 내진설계기준과 항만 및 어항 설계기준을 바탕으로 인공지진과 국내에 널리 사용되는 장주기 지진파와 단주기 지진파인 포함하여 지진규모 5.6~7.9 수준의 지진 13개 등을 사용하여 첫 번째로 여러 제시된 액상화 평가방법을 이용하여 방파제 하부 치환모래층의 액상화 발생 가능성을 검토하여 안정성을 평가하고, 두 번째 지진규모에 따른 지진에너지와 가속도 응답스펙트럼에 대한 특성분석을 수행하여 설계기준에 근접하는 지진파 제시 하며, 세 번째 제시된 지진파를 이용하여 방파제의 동적 안정성을 검토하기 위해 유한요소해석을 실시하여 구조물의 안정성을 확인하고, Geotextile에 발생하는 변위 및 인장력의 변화에 대하여 확인하였다. 따라서 본 연구결과 방파제 하부 치환모래층에 대한 액상화 발생가능성과 방파제의 동적수평변위 및 Geotextile의 변화는 하부지반(치환모래층)에 의해 매우 큰 영향을 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Nakdong River, liquefaction, finite element analysis, Geotextile

Received 14 Feb. 2014, Revised 20 Mar. 2014, Accepted 22 Mar. 2014

*Corresponding author

Tel: +82-51-629-6071; Fax: +82-51-622-7451

E-mail address: geojh@pknu.ac.kr (J.-H. Jeong)

1. 서론

낙동강 하구에 위치한 부산지역은 매우 잘 발달된 퇴적층 및 매립층에 의해 지진이 발생한다면 이러한 지층 등에서 증폭현상이 발생하여 모래 퇴적층과 성토 및 매립지반에 액상화 발생 가능성이 매우 높아진다. 이러한 지층에서 액상화 현상이 일어난다면 지진 피해를 더욱 더 크게 가중시켜 막대한 피해를 야기하게 된다. 그러므로 부산지역의 기반시설인 항만, 방파제, 방조제 및 해안 그리고 강 하구 등에 위치한 중요 시설물에 대해 지역적 특성을 고려한 지반의 동적 특성 연구와 그에 따른 액상화 현상예측, 그리고 액상화 현상에 미치는 변수들에 대한 연구가 절실히 요구되어지고 있다. 본 연구는 내진설계기준연구와 항만 및 어항설계기준을 이용하여 인공지진과 대표적인 장주기 및 단주기 지진파인 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 등을 포함한 14개의 지진파를 이용하여 부산항 신항 서방파제 일부구간에 대하여 액상화 발생 가능성을 평가하고 또한 언급된 지진파에 대하여 지진규모에 따른 지진에너지를 파악하고 가속도 응답스펙트럼에 대한 특성을 분석하여 설계기준에 제시된 가속도 표준 설계응답스펙트럼에 근접하는 지진파를 파악한 후 이를 이용하여 방파제 하부 모래치환층의 N치 변화에 따른 동적 안정성과 Geotextile의 변위와 인장력의 변화 등을 비교·분석하고자 한다.

2. 액상화 검토

본 연구에 사용된 지진규모별 지진파는 National Geophysical Data Center의 자료와 “모래층의 액상화 가능성 평가방법에 관한 비교연구”(Yoon, 2002)에 사용된 지진파이며 다음 Table 1과 같으며, 연구대상지역은 Fig. 1 ~ Fig. 2와 같다(Busan Port Construction Office, 2007).

Table 1. The specification of seismic waves

No.	Earthquake	a_{max} (g)	M_w
1	Tokachi-Oki Eq.(68. 05. 16)	0.23	7.9
2	Miyagi-Oki Eq.(78. 06. 12)	0.22	7.4
3	Loma Prieta Eq.(89. 10. 17)	0.11	6.9
4	Northridge Eq.(94. 01. 17)	0.15	6.7
5	Superstition Hills Eq.(87. 11. 24)	0.13	6.6
6	Coalinga Eq.(83. 05. 09)	0.22	6.5
7	San Fernando Eq.(71. 02. 09)	0.32	6.5
8	Morgan Hill Eq.(84. 04. 24)	0.10	6.2
9	Whittier Eq.(87. 10. 01)	0.17	6.1
10	Coyote Lake Eq.(79. 08. 06)	0.11	5.8
11	El Centro Eq.(81. 04. 26)	0.10	5.6
12	Parkfield Eq.(66. 06. 27)	0.27	5.6
13	San Francisco Eq.(57. 03. 22)	0.10	5.3
14	Artificial Eq.	0.08	
		0.04	

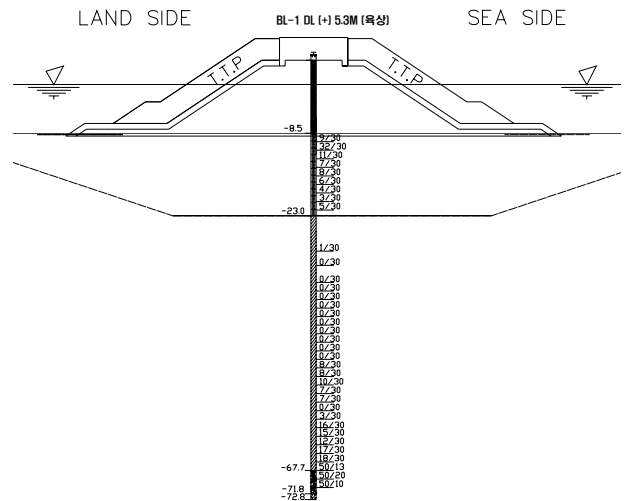


Fig. 1. Section of the breakwater

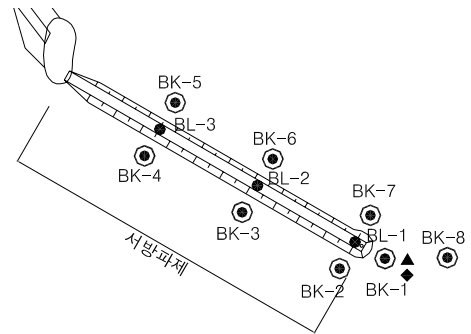


Fig. 2. Location map

2.1 액상화 간편예측법

2.1.1 지진에 의한 반복응력비

Seed와 Idriss(1971)는 많은 지진기록에 대한 분석을 통해 지진력을 최대전단응력의 65%인 등가전단응력으로 표현함으로써 보다 간편하게 산정할 것을 제안하였다.

Eurocode에서는 Seed 이론을 토대로 지진에 의한 반복응력비(Cyclic Stress Ratio : CSR) 산정을 위해서 지진응답해석을 수행해야 하는 경우는 지반이 매우 연약한 경우로 국한하고 이외의 지반인 경우에는 기본가속도 계수와

지반계수를 이용하여 산정하도록 규정하고 있다.

Kim(1998)은 Seed와 Idriss 방법을 기본으로 하고 있는데 감소계수를 사용하지 않고 지진응답해석을 통해 소정

Table 2. Typical formulas of Cyclic Stress Ratio (CSR)

Classification	CSR	Remarks
Seed&Idriss	$0.65 \times (a_{max}/g) \times (\sigma_v/\sigma'_v) \times r_d$	Equivalent Shear Stress
Eurocode	$0.65 \times S \times \alpha_{max} \times (\sigma_v/\sigma'_v)$	
Modified Seed&Idriss	$0.65 \times (a_{depth}/g) \times (\sigma_v/\sigma'_v)$	

의 깊이에서의 지진가속도를 구하여 이를 이용해 CSR을 산정하도록 하고 있다.

2.1.2 지반의 액상화 반복저항비

Seed et al. (1985)는 많은 지진기록 및 피해사례에 대한 분석을 통해 보편적으로 획득하기 용이한 표준관입저항 N 값과 지진규모 7.5에 대한 액상화 반복저항비(Cyclic Resistance Ratio : CRR)와의 관계를 세립분함유량에 따라 도시한 도표를 작성하여 간편하게 이용할 수 있도록 하였다. Blake (1996)는 세립분의 소성도와 함유량을 동시에 고려한 계수를 적용하여 세립분 함유량 5%미만의 사질토에 대한 값으로 변환한 $(N_1)_{60cs}$ 를 통하여 $CRR_{7.5}$ 를 식 (1)과 같이 나타낼 수 있음을 제안하였다.

$$CRR_{7.5} = [(0.04844 - 0.004721(N_1)_{60cs} + 0.0006136(N_1)_{60cs}^2 - 1.673E-05(N_1)_{60cs}^3)] / [(1 - 0.01248(N_1)_{60cs} + 0.009578(N_1)_{60cs}^2 - 0.00032853714E-06(N_1)_{60cs}^3 + 3714E-06(N_1)_{60cs}^4)] \quad (1)$$

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (2)$$

여기서, α, β : 세립분 함유량 5%미만의 사질토에 대한 등가 환산계수

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot N \quad (3)$$

$$C_N = \sqrt{(10/\sigma'_v)} \quad (4)$$

여기서, $(N_1)_{60}$: 환산 N값, C_N : 유효연직상재응력에 따른 수정계수

σ'_v : 평가대상지층의 유효연직응력

Eurocode는 Seed와 Idriss의 방법을 기초로 하고 있는데 유효응력과 에너지 효율을 고려한 수정N치를 이용해서 CRR을 평가하도록 하고 있다. CRR을 평가하기 위한 또 다른 방법으로 전단파 속도를 이용하는 방법이 있다. 크로스홀시험, 다운홀시험, 진동콘관입시험, 또는 표면파 시험을 통해서 측정된 현장의 전단파속도 V_s 는 유효응력을 고려하여 보정한 후 식 (6)을 이용해서 $CRR_{7.5}$ 를 평가하게 된다(Robertson et al., 1992).

$$V_{S1} = V_s(P_a/\sigma'_v)^{0.25} \quad (5)$$

$$CRR_{7.5} = a(V_{S1}/100)^2 + b[(1/(V_{S1C} - V_{S1})) - (1/V_{S1C})] \quad (6)$$

여기서, V_{S1} : 수정 전단파속도(m/s), P_a : 대기압(100kPa), σ'_v : 액상화를 평가하고자 하는 깊이의 총 유효상재압(kPa)

2.1.3 지진특성을 고려한 지진규모 수정계수

중약진 지진지역에 위치한 국내 지진특성을 고려하는 항목은 지진규모별 수정계수(Magnitude Scaling Factor ; MSF)이며 국내에서는 설계지진규모를 6.5로 선정하고 있

Table 3. Magnitude scaling factor, MSF (Youd et al., 1997)

Earthquake magnitude M_w	Magnitude scaling factor (MSF)					
	Seed and Idriss (1982)	Idriss (1996)	Ambraseys (1988)	Arango (1996)	Andrus and Stokoe (1996)	
5.5	1.43	2.20	2.86	3.00	2.20	2.80
6.0	1.32	1.76	2.20	2.00	1.65	2.10
6.5	1.19	1.44	1.69	1.60	1.40	1.60
7.0	1.08	1.19	1.30	1.25	1.10	1.25
7.5	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8.0	0.94	0.84	0.67	0.75	0.85	0.80
8.5	0.89	0.72	0.44			0.65

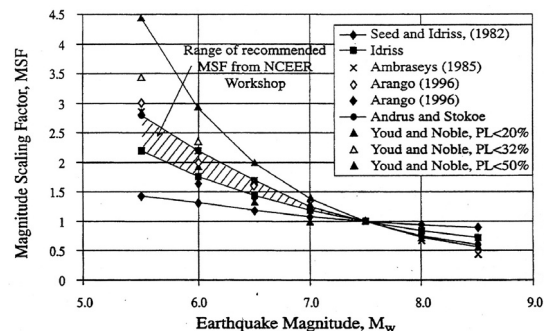


Fig. 3. Magnitude scaling factors derived by various investigators (Youd et al., 2001)

다. 그러므로 액상화 안전율(FS)는 CRR7.5와 CSR의 비에 수정계수를 곱하여 산정한다(식 (7)).

$$FS = (CRR_{7.5} / CSR) MSF \quad (7)$$

2.1.4 지진응답해석

지진응답해석은 지반의 동적물성치(변형률 수준별 전

단계수 및 감쇠비)를 토대로 파의 전파특성을 해석하는 것으로 지진응답해석을 통한 심도별 최대가속도는 액상화 평가 시 지진에 의한 CSR을 산정하는데 이용된다. 본 연구에서 수행한 액상화 가능성 평가 대상지반은 부산항 신항 서방과제 중 BL-1으로 선정하였고, 지진응답해석은 다중반사모형을 바탕으로 하여 작성된 ProShake를 이용하였으며 지진응답해석에 사용된 지진파 제원은 Table 1에

Table 4. Decision of design earthquake acceleration

Seismic Target	Selection method	Design earthquake acceleration	Application
Seismic II Class Collapse prevention level	Using a seismic section modulus	0.11g	
	Using a earthquake Disaster map	0.08g	◎

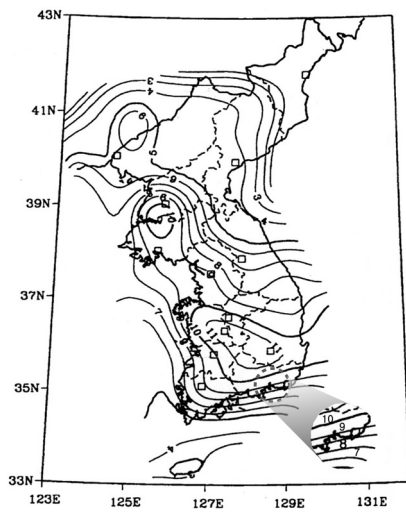


Fig. 4. Average return period for a earthquake Disaster map of 500 years (The ministry of construction and transportation, 1999)

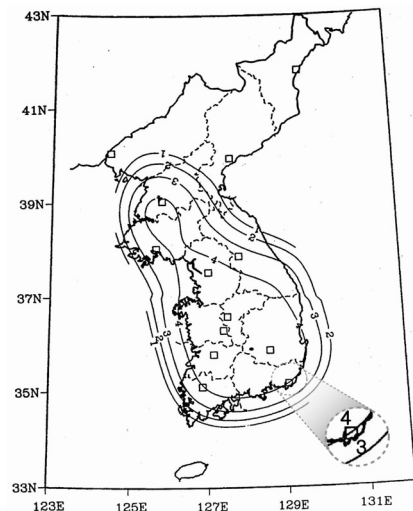


Fig. 5. Average return period for a earthquake Disaster map of 50 years (The ministry of construction and transportation, 1999)

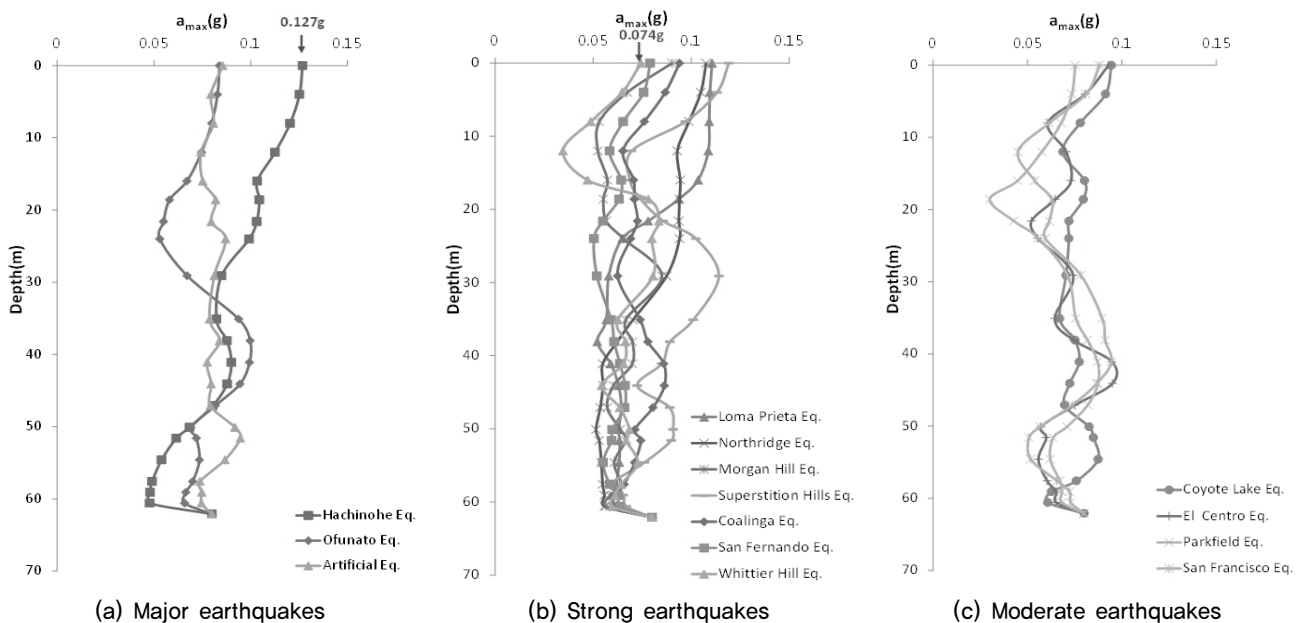


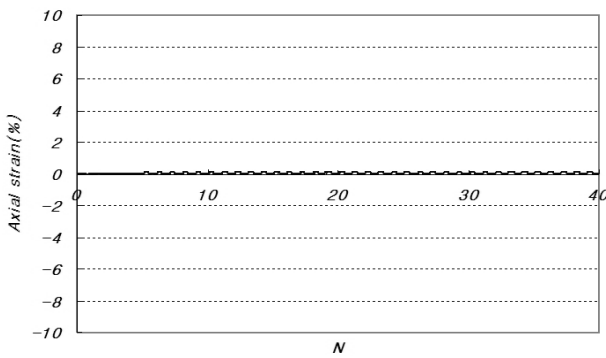
Fig. 6. Results of seismic response analysis

제시한 바와 같다. 설계지진가속도는 항만 및 어항설계기준에 제시되어 있는 내진II등급, 지진구역 I, 붕괴방지수준에 해당하는 기반암에서의 입력 설계가속도와 지진재해도 (Fig. 4 ~ Fig. 5)를 비교하여 0.08g을 적용하였다(Table 4. 참조). 연구대상지반에서 수행한 지진응답해석 결과는 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 지진기록에 따른 가속도의 증폭형태는 지반조건과 각 지진의 특성에 따라 각각 다르게 나타나는데 지표면 최대가속도는 작게는 0.074g에서 크게는 0.127g까지 증폭되는 것을 볼 수 있다.

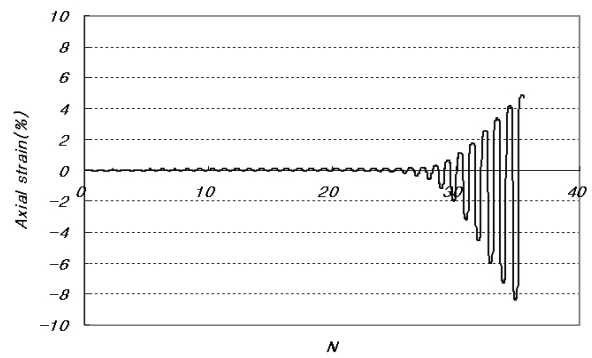
2.2 액상화 상세예측법

액상화 간편예측법에서 안전율(FS)이 1.5미만을 나타내

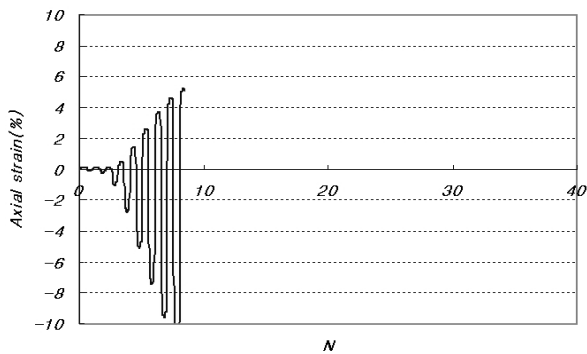
고 있어 실내 진동삼축시험 결과를 이용하여 액상화 상세예측법을 수행하였다. 액상화 상세예측법은 Seed & Idriss 간편예측법과 전체적인 판단 방법은 유사하나 지진응답해석을 이용하여 얻은 액상화 반복응력비(CSR)와 진동삼축시험을 하여 산정된 반복저항비(CRR)를 적용한다. 액상화 반복저항비(CRR)는 진동재하 횟수에 따른 액상화 전단 저항 응력비 특성곡선(Fig. 7)을 이용하여 산정하며, 이때 액상화 반복저항비(CRR)는 특성곡선에서 지진규모 6.5에 해당하는 진동재하횟수 10회시의 값으로 산정한다(Fig. 8). 그리고 특성곡선에 이용되는 실내 진동삼축시험 결과는 현장 지반조건 및 지진특성 등을 고려해 식 (8)을 이용하여 보정 작업이 수행하였다(Busan Port Construction Office, 2009).



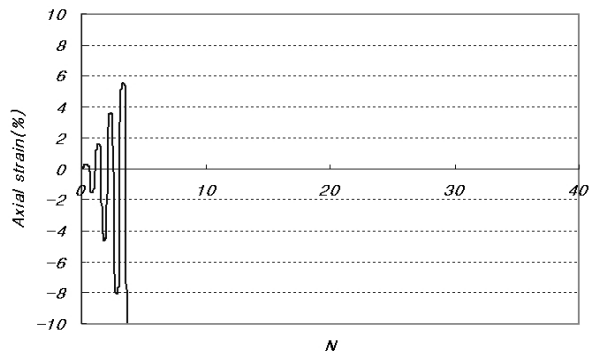
(a) Deviatoric stress $\sigma_d = 30\text{kPa}$



(b) Deviatoric stress $\sigma_d = 40\text{kPa}$



(c) Deviatoric stress $\sigma_d = 50\text{kPa}$



(d) Deviatoric stress $\sigma_d = 60\text{kPa}$

Fig. 7. Strains - cycle numbers (N) for the replaced sand of relative density 50%

Table 5. Results of dynamic triaxial test

Classification	CRR	Number of Cycles (N)
Replaced sand	0.09	200
	0.12	31
	0.15	5

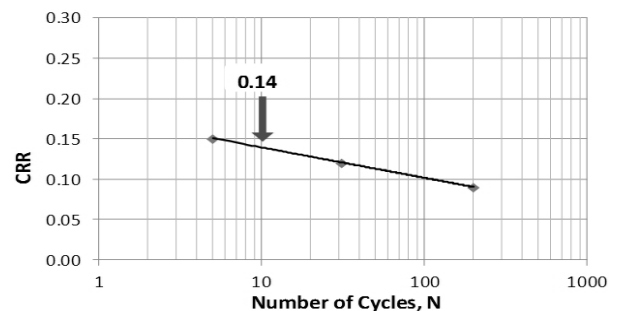
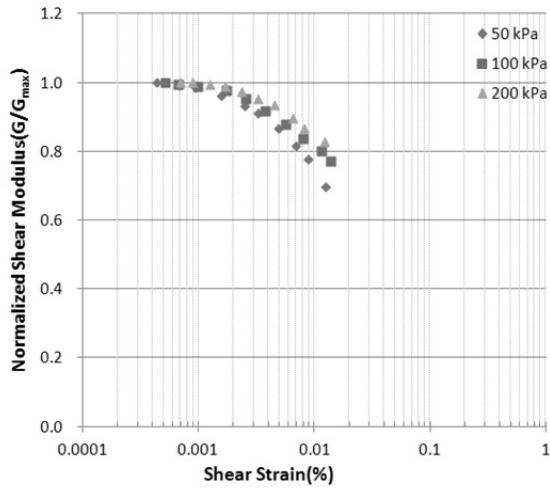
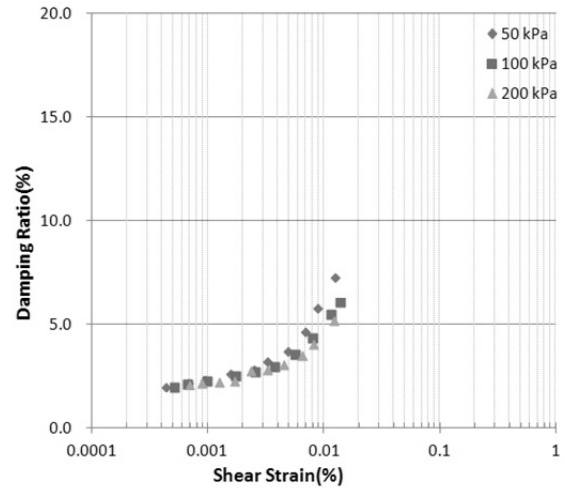


Fig. 8. Determination CRR for number cycle, N = 10

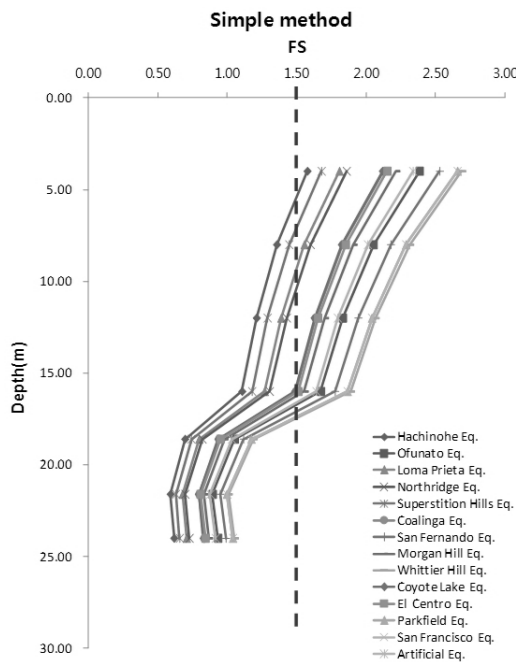


(a) Normalized Shear Modulus & Shear Strain

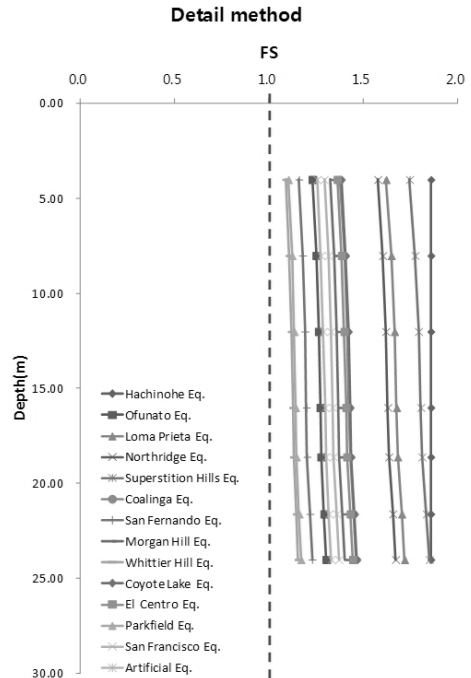


(b) Material Damping Ratio & Shear Strain

Fig. 9. Resonant Column Test Results (Sand)



(a) Results of simplified method (Seed&Idriss)



(b) Results of laboratory method

Fig. 10. Safety factors against the ground of liquefaction

$$CRR = C_1 \cdot C_2 \cdot (CRR)_{TX} \quad (8)$$

여기서, C_1 : 0.9(지진의 방향성에 따른 보정계수),
 C_2 : $(1+2K_0)/3$ (현장 응력상태에 대한 보정계수)
 K_0 : 지진하중 작용전의 정지토압계수(=0.5),
 $(CRR)_{TX}$: 진동삼축압축시험에서 얻어진 전단
 응력비

치환모래층에 대한 공진주시험 결과는 Fig. 9와 같으며

이 값을 지진응답해석에 이용하였다. 액상화 간편예측법 (Seed&Idriss 방법)과 상세예측법의 액상화 평가 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

3. 지진규모별 특성 비교

3.1 설계지반운동 수준으로 수정된 지진파 에너지

지진계에서 관측된 가속도 시간이력을 다음 식 (9)을 이

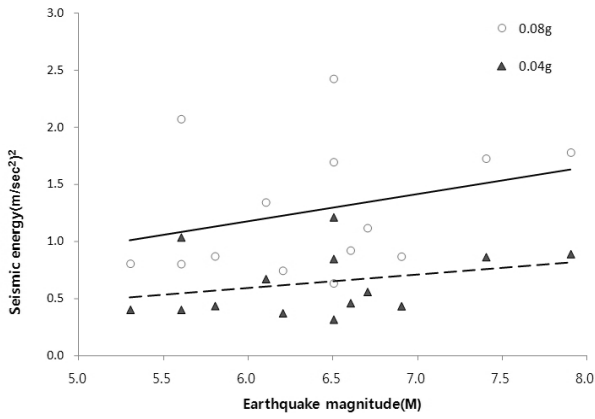


Fig. 11. Seismic energy for design ground motion

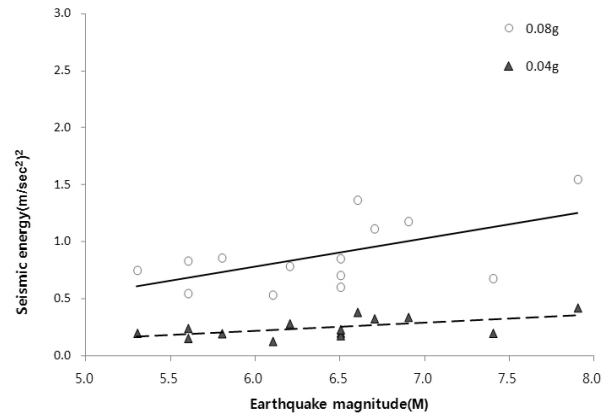
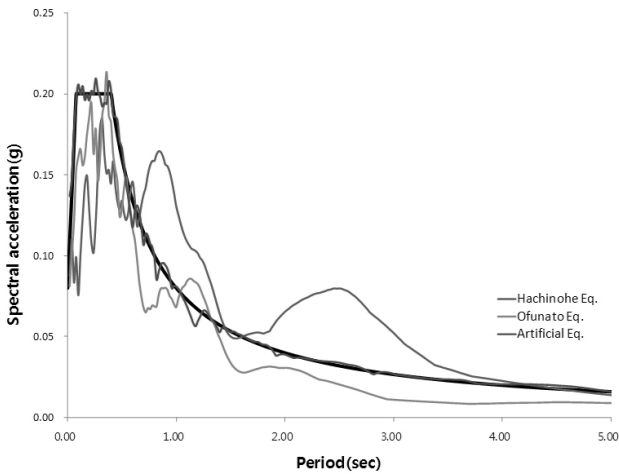
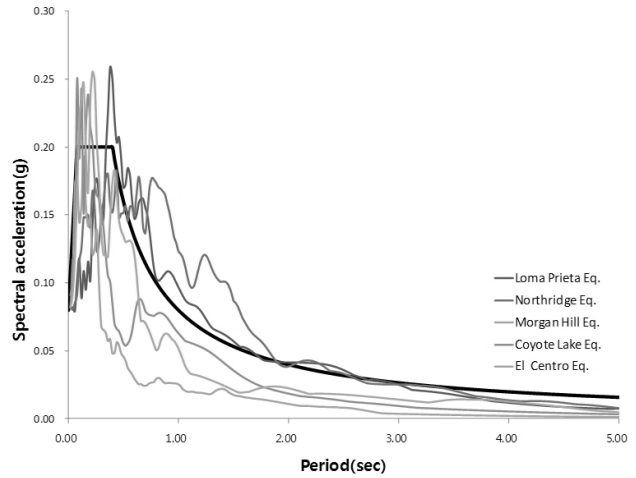


Fig. 12. Seismic energy for earthquakes applied to the ground



(a) Acceleration response spectrum for Hachinohe, Ofunato and Artificial earthquake



(b) Acceleration response spectrum for strong and moderate earthquakes

Fig. 13. Results of spectral analysis

용하여 지진파의 에너지를 구하였다(Park et al., 2008).

$$TE = \int_0^t [a(t)]^2 dt \quad (9)$$

여기서, TE(t) : 지진계에서 주어진 시간t에서 지진계의 전체에너지

a(t) : 지진계에 의해 기록된 가속도 진폭의 크기

지진규모별 지진파의 설계지반운동수준은 지진재해도에서 구한 값인 0.08g과 0.04g로 하였다(Table 4). 지진파의 에너지는 지진규모가 커질수록 증가하는 것을 Fig. 11 ~ Fig. 12에서 나타낸 것과 알 수 있다.

Fig. 13은 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 분석하여 가속도 표준설계응답스펙트럼에 근접하는 지진파를 분류하였다. 이렇게 분류된 지진파를 이용하여 방파제의 동적

안정성 검토에 사용하여 방파제의 변화를 확인하도록 하였다.

4. 방파제 수평변위 검토

본 연구에서는 방파제의 지진시 거동을 분석하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 PLAXIS를 사용하여 Standard earthquake boundaries, Linear Elastic 모델, Mohr-Coulomb 모델, 해수면 적용 등 다양한 입력조건을 선택해서 동적해석을 수행하였다. 방파제의 지진에 대한 안정성 검토를 확인하기 위하여 수평변위를 이용하였으며 항만 및 어항 설계기준에 언급되었듯이 붕괴방지수준의 수평변위의 허용범위는 30cm를 초과하지 않을 시 안전한 것을 기준으로 하였다.

4.1 동해석 입력 물성치 산정

동해석에서 사용된 대상지반의 물성은 지반조사 자료를 바탕으로 국내 항만시설물에 사용되는 물성과 경험식을 이용하여 산정하였다(Table 7).

모래치환층에 대해서는 탄성계수 및 내부마찰각만을 변화시키며 지진에 대한 수평변위에 대한 특성을 확인하였다.

4.2 지진규모별 방파제의 최대 수평변위

지진규모에 따른 방파제의 수평변위를 비교하기 위해서 Table 6에 나타난 8개의 지진파를 이용하여 방파제에 대해서 동해석을 수행하였다. 각각의 경우에 대하여 하부 치환모래층의 N치를 변화시켰을 때의 수치해석 결과는 N치가 15일 때까지 최대 수평변위는 큰 폭으로 감소한 후 둔화하는 것으로 나타났다. Fig. 15에서 그래프의 y축은

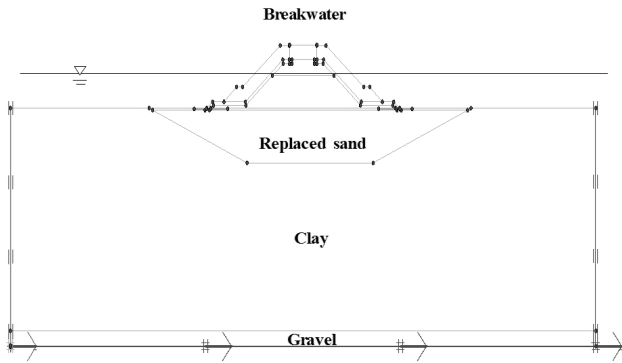


Fig. 14. Scheme of breakwater in dynamic analysis

방파제의 상단 중심에서 발생한 최대수평변위를 나타내며 x축은 N치 변화를 나타낸다. 또한, 동일한 설계 지반가속도 수준으로 수정된 지진파를 입력하여도 강진규모 지진파에 의한 동적 수평변위가 중약진규모 지진파에 의한 동적 수평변위보다 크게 발생함을 알 수 있다. 지진시 방파제의 최대 수평변위의 감소율을 N치의 변화에 대하여 Table 8에 나타내었다. 지진규모에 따라 수평변위의 감소율은 일정한 경향성을 보이지는 않으나, 방파제의 최대 수평변위에 가장 큰 영향을 끼치는 변수는 하부지반 조건임을 알 수 있다.

4.3 지진규모별 Geotextile의 변화

방파제 하부 치환모래층에 Geotextile(10t/m)이 설치되어 있다. 이에 대하여 치환모래층의 N치 변화에 따른 Geotextile 변위의 변화를 확인하였다.

Table 6. Variables used in analysis

Variables	Range
Sea level	8.5m
Breakwater structure's height	16.8m
Design ground motion level	0.04g, 0.08g
Input data of Earthquake magnitudes	7.9, 7.4, 6.9, 6.7, 6.2, 5.8, 5.6, Artificial Eq.
N values of replaced sand layer	5, 7, 10, 15, 20, 25

Table 7. The soil properties used in analysis

Variables	γ_{sat} (kN/m ³)	E (kN/m ²)	c (kN/m ²)	ϕ (°)	ν	
Riprap	18.0	17,300	0	28.0	0.30	
landfill	16.0	2,700	0	23.0	0.50	
Clay	16.1	1,350	3,66	21.45	0.50	
Gravel	20.0	64,000	0	35.0	0.30	
Revetment	16.5	10,000	0	40	0.30	
Concrete	24.5	2.4E07	-	-	0.17	
TTP	23.0	2.07E06	-	-	0.25	
Replaced Sand layer	17.0	N=5	3,630	0	25.0	0.50
		N=7	5,000	0	26.0	
		N=10	7,950	0	28.0	
		N=15	12,400	0	31.0	
		N=20	17,000	0	33.0	
		N=25	22,200	0	35.0	

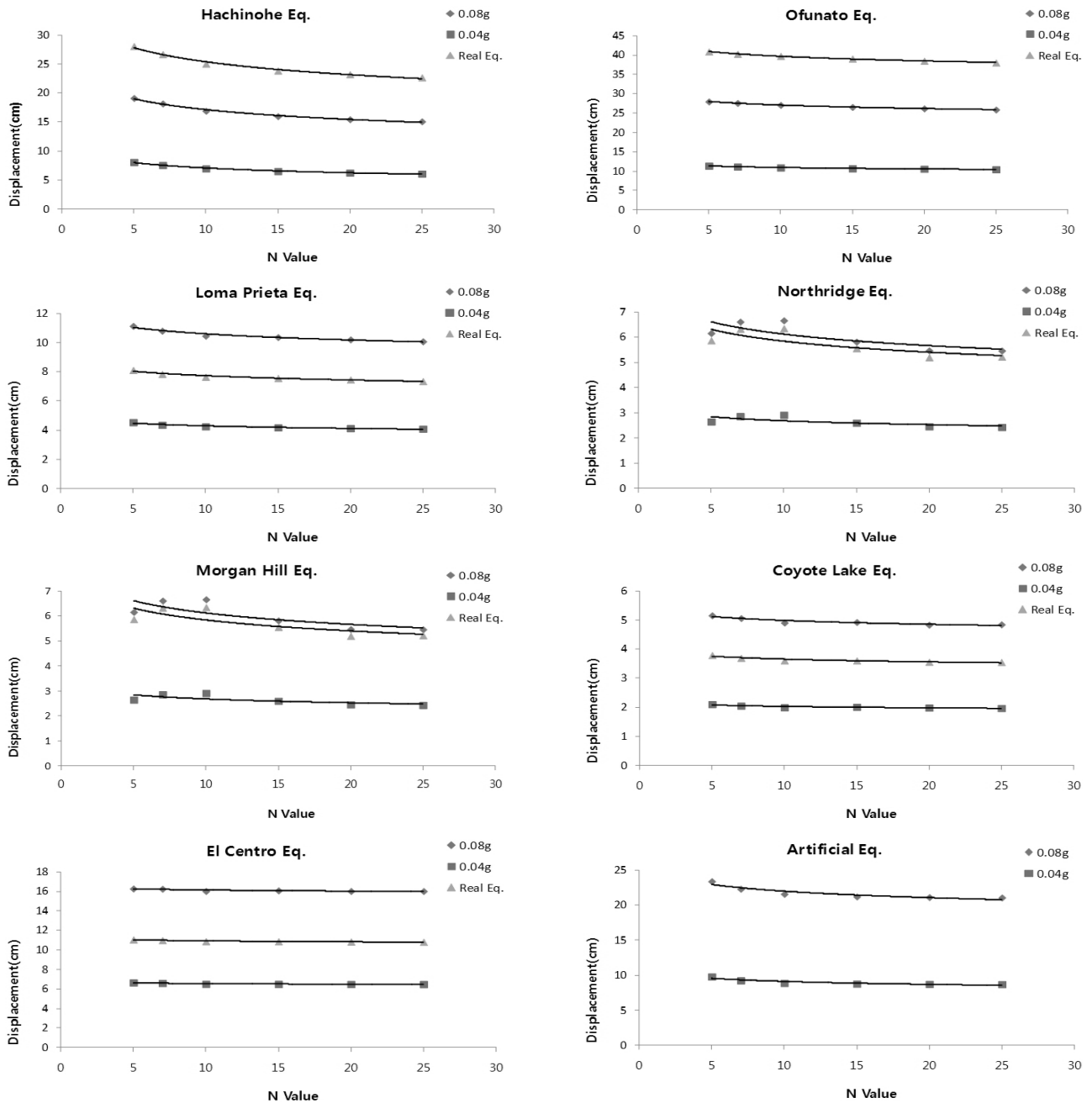


Fig. 15. Maximum horizontal displacement of breakwater based on the changes of N-values in the replaced sand layers

Table 8. The reduction rates of horizontal displacement according to due N values

Classification	Earthquake magnitude	Reduction rate for the horizontal displacement in breakwater (%)		
		N=5	N=15	N=25
Hachinohe	7,9	–	16,37	21,06
Ofunato	7,4	–	5,02	7,47
Loma Prieta	6,9	–	6,88	9,48
Northridge	6,7	–	5,51	11,28
Morgan Hill	6,2	–	15,29	11,95
Coyote Lake	5,8	–	4,47	6,03
El Centro	5,6	–	1,18	1,61
Artificial	6,5	–	9,31	9,92
Average	–	–	8,00	9,85

4.3.1 Geotextile의 최대 수평변위 변화
 지진규모별 Geotextile의 최대 수평변위를 모래치환층
 의 N치 변화에 대해 확인한 결과, N치가 15이전까지 급격

한 변화를 이루고 있으나 N치가 15이상 일 때는 완만한
 변화를 나타내고 있다(Fig. 16).

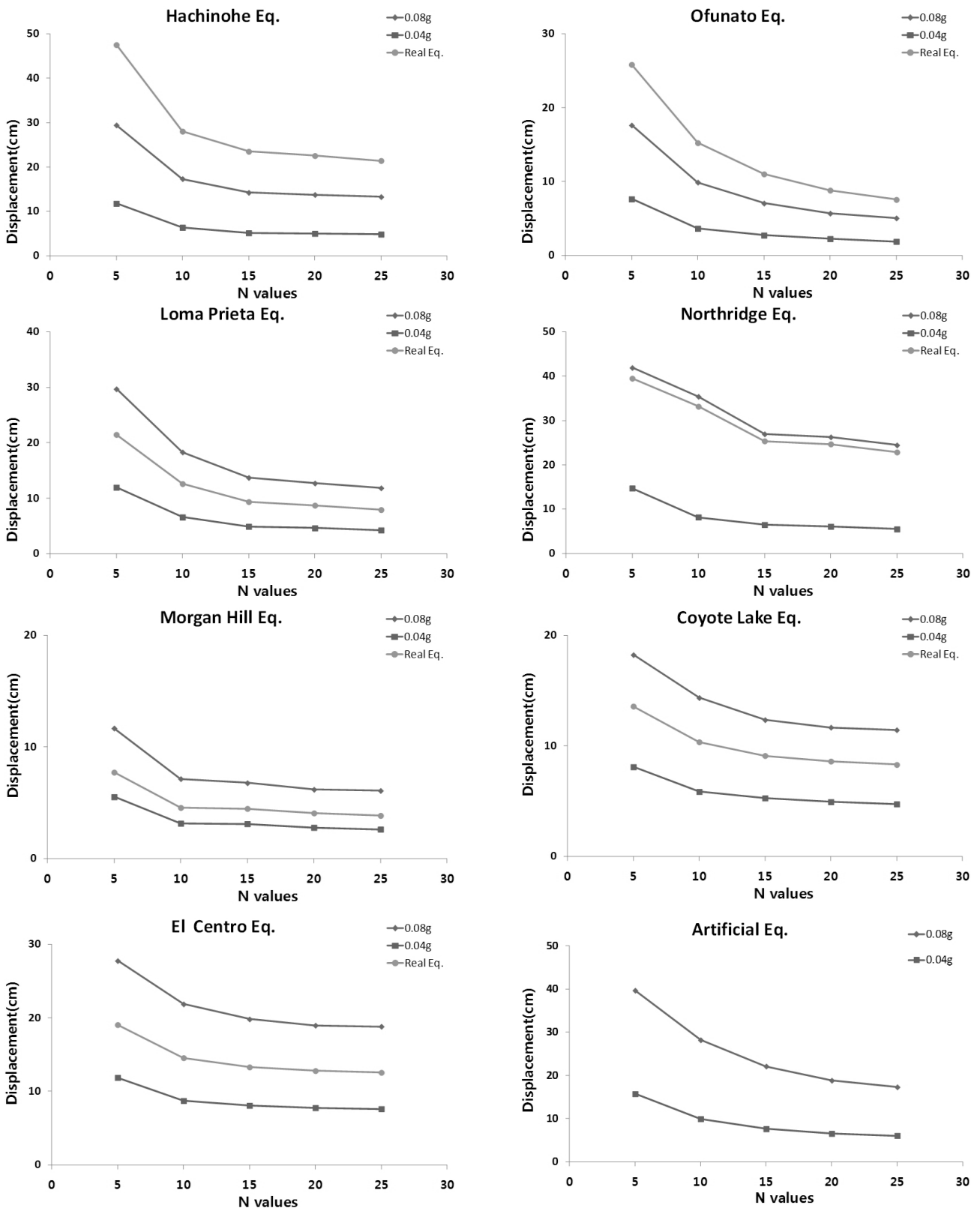


Fig. 16. Changes of the x-axis maximum displacement of Geotextile (Land Side)

4.3.2 Geotextile의 인장력

치환모래층 N치의 변화에 따른 Geotextile의 인장력 변화는 지반이 단단해질수록(N치 증가) 줄어드는 것으로 나

타났다(Fig. 17). 지진규모가 7.0이상일 경우 실지진과가 더 크게 나타났으며 중약진에서는 0.08g이 더 크게 나타나는 것으로 확인되었으며, Geotextile의 최대 인장력은

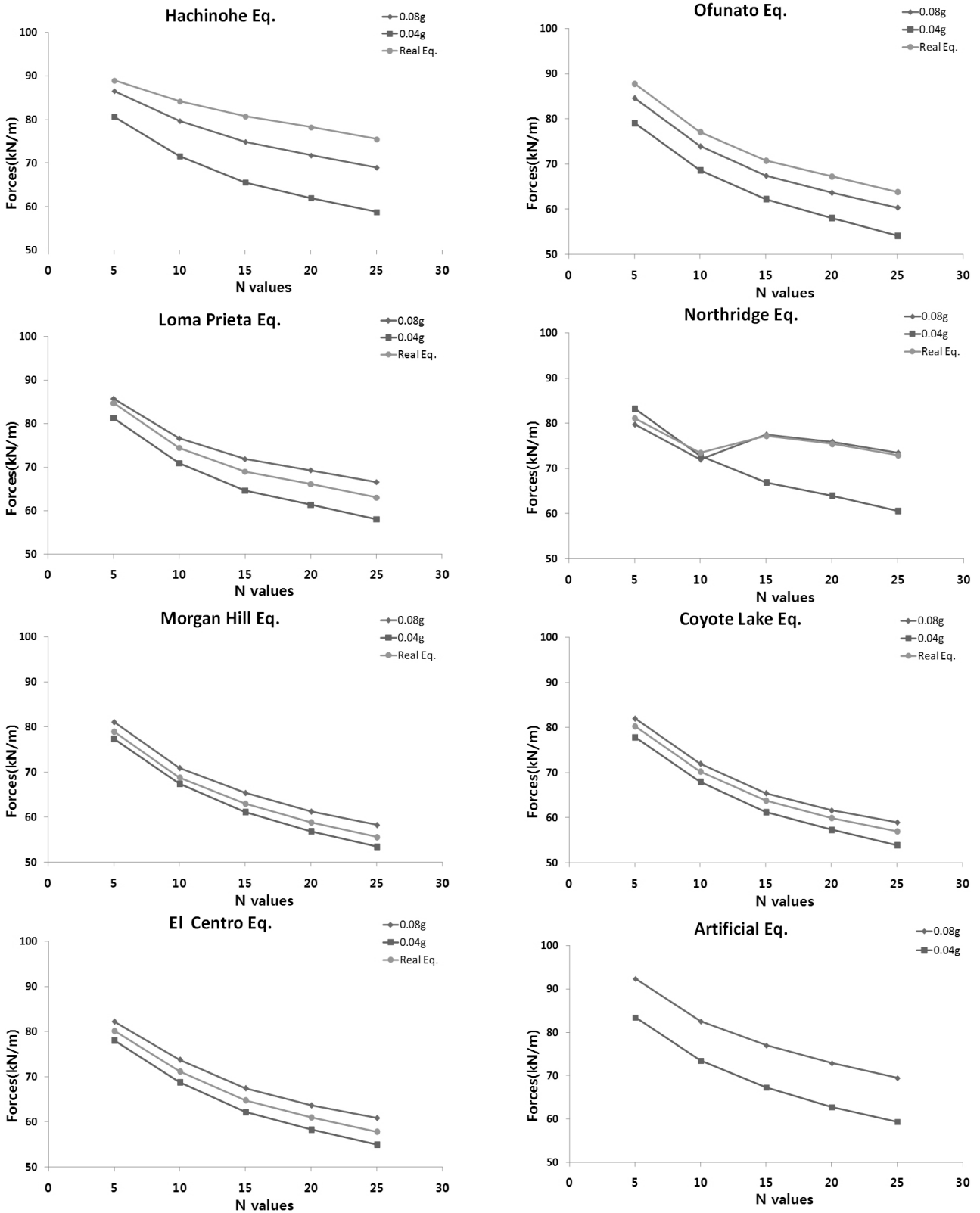


Fig. 17. Changes of the x-axis maximum tensile force of Geotextile (Land Side)

Table 9. Reduction rates of Geotextile properties according to N values

	Magnitude	Reduction rate for the horizontal displacement of Geotextile (%)		Reduction rate for tensile force of Geotextile (%)	
		N=15	N=25	N=15	N=25
Hachinohe	7.9	51.62	54.87	13.49	20.32
Ofunato	7.4	59.97	71.37	20.32	28.64
Loma Prieta	6.9	53.86	60.16	16.19	22.34
Northridge	6.7	35.71	41.66	2.78	7.86
Morgan Hill	6.2	42.00	47.92	19.38	28.16
Coyote Lake	5.8	32.26	37.28	20.16	28.08
El Centro	5.6	28.61	32.19	17.96	26.00
Artificial	6.5	44.30	56.42	16.66	24.80
Average	—	43.54	50.23	15.87	23.28

92.40kN/m로 설치된 Geotextile의 최대 인장강도 98kN/m (10t/m)를 만족하는 것으로 나타났다. Table 9는 모래치환층의 N치를 5로 기준으로 하였을 때 Geotextile의 수평변위량과 인장력의 차이를 각각 N=15, 25에 대하여 수치적으로 나타낸 것이다.

5. 결론

본 연구는 지진규모별 방파제의 특성을 알아보기 위하여 설계지진규모 6.5의 붕괴방지수준에 대한 액상화 평가를 수행하였으며, 방파제의 특성을 확인하기 위해 동해석을 수행하여 방파제 구조물의 최대 수평변위 및 Geotextile의 변위 및 인장력에 대하여 검토하였다. 이에 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 지진파의 규모 선정은 국내에 발생하고 있는 지진규모와 국내 설계지진규모 6.5를 고려하였고 또한 내진설계에 널리 사용되는 Hachinohe 지진파와 Ofunato 지진파 등을 이용하였다.
- (2) 지진규모가 다른 14개의 지진을 사용하여 내진II등급에 해당하는 붕괴방지수준(0.08g)에 대해 액상화 평가를 실시한 결과, 간편예측법으로 평가 시에 액상화 안전율(FS=1.5이상)을 만족하지 못하는 것으로 판정되어 상세예측법으로 재평가를 실시한 결과 액상화 안전율(FS=1.0이상)을 만족하는 것으로 나타났다.
- (3) 지진에너지는 지진규모가 커질수록 증가하는 것을 연구대상지반에서도 확인하였고, 지진파의 가속도 응답스펙트럼을 분석하여 가속도 표준설계응답스펙트럼

에 근접하는 지진파를 분류하여 방파제의 동적해석에 사용하였다.

- (4) 방파제에 대하여 모래치환층의 N치 변화에 따른 동해석을 수행하여 방파제의 최대 수평변위를 확인한 결과, 중약진에서는 최대 1.94 ~ 16.28cm가 발생하였으며, 국내 내진설계에 이용되는 Hachinohe Eq.와 Ofunato Eq. 그리고 인공지진에서는 19.13 ~ 27.96cm의 최대 수평변위가 발생하는 것으로 나타나 설계기준(붕괴방지수준 30cm)를 만족하고 있으며, N치별 평균 수평변위 감소율은 N=5을 기준으로 N=15일 때 평균 8.00%, N=25일 때 평균 9.85%로 나타나는 것을 확인하였다.
- (5) Geotextile의 평균 최대 수평변위 감소율은 N=5을 기준으로, N=15일 때 평균 43.54%, N=25일 때 평균 50.23%이며 인장력의 평균 감소율은 N=15일 때 평균 15.87%, N=25일 때 평균 23.28%로 나타났다.

감사의 글

이 논문은 2012학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구입니다(PK-2012-76).

References

1. Blake, T. F. (1996), Personal Communication from T. L. Youd.
2. Busan Port Construction Office (2007), *A Basis Reinforcement Construction Investigation Services Soil Survey Report for Breakwater in Busan new port*, Busan Regional Maritime Affairs and Port Administration.

3. Busan Port Construction Office (2009), *A Detailed Design Research and Experiment Report for Breakwater in Busan new port*, Busan Regional Maritime Affairs and Port Administration.
4. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. EN 1998-5:2010(E).
5. Kim Soo-Il (1998), "Assessment and Remediation for Liquefaction in Korea", *Journal of THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY*, Vol.1998, No.3, pp.3-30.
6. Park Keun-Bo, Sim Jae-Uk, Cha Seung-Hun, Kim Soo-Il (2008), "A Study on the Dynamic Lateral Displacements of Caisson Quay Walls in Moderate Earthquake Regions", *Journal of THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY*, Vol.24, No.8, pp.137-148.
7. Robertson, P. K., Woeller, D. J. and Finn, W. D. L. (1992). "Seismic Cone Penetration Test for Evaluating Liquefaction Potential Under Cyclic Loading", *Canadian Geotechnical Journal*, Ottawa, Canada, Vol.29, pp.686-695.
8. Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1971). "Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol.97, No. SM9, pp.1249-1273.
9. Seed, H. B., Tokimatsu, K., Harder, L. F., and Chung, R. M. (1985). "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.12, pp.1016-1032.
10. The ministry of construction and transportation (1999), *A Study on Seismic Design Criteria*.
11. Yoon Yong-Jun (2002), *A Comparative Study on the Evaluation Methodologies of Liquefaction Potential*, Master's Thesis, Pukyong National University.
12. Youd, T. L. and Seed, I. M. (2001), "Liquefaction Resistance of Soil: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.127, No.4, pp.297-313.