

안벽구조물의 신뢰성 해석 Reliability Analysis of Caisson Type Quaywall

윤길림* · 김동현** · 김홍연***

Gil Lim Yoon*, Dong Hywan Kim** and Hong Yeon Kim***

요 지 : 본 논문에서는 안벽구조물에 대한 지지력, 전도 및 활동에 대한 파괴모드별 수준 I, II & III의 신뢰성 해석을 수행하였다. 파괴모드에 따른 적절한 설계기법을 적용하여 민감도 분석을 실시하고 케이슨식 안벽 설계시 확률변수가 신뢰지수에 미치는 영향을 분석하였다. 신뢰지수 산정결과, 최대위험시의 사례연구 I의 경우, Level II와 III 방법 모두 1.416, 사례 II의 경우, 각각 2.201과 1.880로써 Level II (FORM) 및 Level III의 시뮬레이션 방법이 잘 일치함을 확인할 수 있었다. 대체로 케이슨식 안벽은 주요 파괴모드중 지지력과 활동에 대한 파괴확률이 비교적 크고 전도에 대한 파괴확률이 가장 낮은 것으로 나타났다. 민감도 분석 결과, 신뢰지수에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 활동, 전도 및 지지력 파괴모드에서 각각 마찰계수, 잔류수압 및 저항모멘트로 나타났다. 특히, 지진시 변동계수가 큰 관성력 및 동수압은 민감도 변화가 크지 않아 변동계수와 민감도에 관련된 기존의 연구와 유사한 결과를 얻었다.

핵심용어 : 신뢰성 해석, 민감도 분석, 케이슨식 안벽, 확률변수, 신뢰지수, 민감도 지수

Abstract : Reliability analyses of Level I, II and III for bearing capacity, overturning and sliding of quaywall are carried out to investigate their safety levels depending upon its failure modes, and sensitivity analyses of each design variable are performed to find their effects on safety levels of quaywall. Reliability indices was 1.416 for both level II and III for case study I, and with 2.201 and 1.880, respectively, for the case study II at the critical loading conditions. Thus we were able to know that Level II (FORM) approach is good enough to use in practical design. Generally, it was found that probabilities of failure of quaywall were higher for sliding and bearing capacity failure modes and lower for overturning failure mode. From sensitivity analyses, the most influential design variables to reliability index of quaywall were coefficient of friction, residual water pressure and resistance moment for the sliding, overturning and bearing capacity failure modes, respectively. Especially, the sensitivity of reliability index due to inertial force and dynamic water pressures, which include a large COV when earthquake occurs, did not change greatly.

Keywords : Reliability analysis, Sensitivity analysis, Caisson type quaywall, Design variable, Reliability index, Harbor structure

1. 서 론

최근 국내 항만개발 사업의 활성화로 각종 안벽, 방파제 등의 항만구조물 설계와 시공이 활발히 이루어져 왔으며, 그 설계기술 또한 기존의 고전적 설계법과 함께 터키 및 대

안설계를 중심으로 다소 진보된 신뢰성 설계(reliability based design) 이론의 도입이 가속화 되고 있다. 이는 미국, 유럽, 일본 등 주요 선진국에서의 신뢰성 이론에 바탕을 둔 다양한 설계기법 개발과 새로운 설계기준 제정, 그리고 ISO(국제표준화기구)의 변화된 설계기준 규정(ISO-2394)에

*한국해양연구원 연안개발·에너지연구부(Corresponding author: Gil Lim Yoon, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan PO. Box 29, Seoul 426-744, Korea, glyoon@kordi.re.kr)

**군산대학교 해양건설공학과(Department of Ocean Construction Engineering, Kunsan National University)

*** 한국해양연구원 연안개발·에너지연구부, 인하대 박사과정(Hong Yeon Kim, Coastal Engineering & Ocean Energy Research Department)

따른 향후 해외시장 분위기에 적응하기 위한 간접적인 압력에서 기인하는 것으로 보여지기도 한다. 최근 국내에서도 일부 연구자들에 의해 신뢰성 설계기법 개발에 관한 연구가 시도되고 있으나(이철웅, 1999; 서경덕 등, 2002; 김동현 등, 2003), 아직 실무에서는 국내 설계기준의 부재로 이미 개발된 외국의 기준을 적용하는 사례가 많은 실정이다.

안벽구조물의 국내외 신뢰성해석 연구사례를 살펴보면 長尾 등은 안벽구조물의 신뢰성 설계법 적용에 관한 연구 및 FORM(First Order Reliability Method)에 의해 산정된 파괴확률과 생애주기비용과의 관계를 고찰한 바 있으며(2001), H. Yoneyama 등은 파괴된 중력식 안벽 재료로부터 정확한 목표안전지수를 얻기 위한 파괴확률 평가 및 지진하중에 대한 하중계수를 산정하였다(2000). 또한 동북아 3개국 항만국장회의 국제 공동연구 결과로서 안벽구조물의 목표신뢰지수와 확률변수에 대한 모델 및 건설된 10개 중력식 안벽의 전도 및 활동저항에 대한 부분안전계수 연구를 중국측에서 수행한바 있다(윤, 2004). 국내에서는 김동현 등이 지진시 중력식 안벽의 신뢰성해석에 대하여 연구한 바 있다(2003). 본 연구에서는 항만시설에 필수적인 안벽구조물의 신뢰성 해석사례 연구를 통하여 각 파괴모드별 신뢰지수 및 파괴확률에 대하여 고찰하였으며, 민감도 분석을 통하여 다양한 확률변수중 각 파괴모드별 신뢰지수에 미치는 영향정도를 조사하였다.

2. 신뢰성 해석기법

신뢰성 해석모델은 크게 정적모델(static reliability model)과 동적모델(dynamic reliability model)로 구분된다. 이러한 모델들은 시간에 따라 불규칙한 크기로 반복되는 하중사상의 고려가능 여부가 그 구분의 기준이 된다. 정적모델은 해석방법에 따라 Level I, Level II와 Level III로 구분한다. 동적모델은 시간에 따른 불규칙한 반복 하중사상의 고려방법에 따라 Binominal Approach(BA)와 Poisson Approach(PA)로 구분된다. 본 연구에서는 항만설계 실무에 통상적으로

적용되고 있는 Level I~III의 정적모델을 대상으로 하였다.

2.1 Level I 해석

Level I 해석방법은 가장 하위단계의 신뢰성 해석방법으로서 직접 파괴확률을 산정하지 않고 신뢰성 개념으로부터 부분안전계수를 산정한 후 이를 외력과 저항력에 적용하여 각 파괴모드에 대한 안전여부를 판별하는 방법이며, PSF(Partial Safety Factor method)와 LRFD(Load and Resistance Factor Design)가 이에 속한다. Level I 신뢰성 해석의 수행 절차를 단계별로 정리하면 Table 1과 같다.

2.2 Level II 해석

Level II 해석방법중 기본이 되는 FOSM(First Order Second Moment)은 한계상태함수(limit state function)의 평균 및 표준편차(second moment)에 대한 일차(first order)근사값을 이용하여 신뢰지수 및 파괴확률을 산정하는 방법이다. 또한, 근사치를 구함에 있어 평균치 부근에서 근사치를 구하지 않고 파괴면 부근에서 근사치를 구함으로써 신뢰성 해석의 정밀도를 높인 방법을 AFOSM(Advanced FOSM)이라고 한다. 후자는 파괴점 부근에서 근사치의 정확도가 큼으로 인해 전자보다 더 정확하게 안정성을 평가할 수 있고, 정규화된 설계변수가 서로 상관성이 없을 때 식 (1)로 표현된다. 식에서 파괴점은 유일하게 결정할 수 없으므로 수렴계산에 의해 추정한다.

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\right)_{X^*}(\mu_{X_i} - X_i^*)}{\sqrt{\sum_i^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i}\right)_{X^*}^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (1)$$

여기서, X^* 는 파괴점에서 설계변수 X 의 값이고, μ_z 와 σ_z 는 각각 한계상태함수의 평균 및 표준편차를 나타낸다. 본 연구에서는 AFOSM중 FORM(First Order Reliability Method)을 적용하였으며, Table 2는 AFOSM의 신뢰지수 산정절차를 나타낸다.

Table 1. Level I 신뢰성 해석 절차

단계	해석 내용	단계	해석 내용
1	적절한 한계상태함수를 정의한다.	4	확률변수의 확률분포와 목표 신뢰지수를 이용하여 부분안전계수를 산정한다.
2	확률변수의 확률분포를 결정한다.	5	부분안전계수와 한계상태함수를 이용하여 안전여부를 판정한다.
3	목표 신뢰지수(β_T)를 결정한다.	6	불안정일 경우 단계 3의 목표 신뢰지수를 수정하여 단계4부터 재계산하며 안정일 경우 해석을 종료한다.

Table 2. Level II 신뢰성 해석 절차(AFOSM)

단계	해석 내용	단계	해석 내용
1	적절한 한계상태함수를 정의한다.	5	신뢰지수를 이용하여 파괴점을 표시한다($X'=-\alpha\beta$).
2	확률변수의 확률분포를 결정한다.	6	새로운 파괴점을 한계상태함수에 대입하여 $g(X')=0$ 을 만족하는 신뢰지수 β 를 구한다.
3	확률변수의 평균값을 초기 파괴점으로 가정한 후 좌표축을 변환한다($X'=(X-\mu_X)/\sigma_X$).	7	새로운 파괴점을 구한다($X'=-\alpha\beta$).
4	파괴점에서 한계상태함수의 gradient $\partial g/\partial X$ 를 계산하여 방향벡터 α 와 신뢰지수 β 를 구한다.	8	신뢰도 지수가 수렴할 때까지 단계 4에서 단계 7을 반복한다.

2.3 Level III 해석

Level III 해석방법은 MCM(Monte Carlo Method), DIM(Direct Integration Method) 등으로 구분되며, Level II 방법과는 달리 한계상태함수를 근사화하지 않고 직접 신뢰성 해석을 수행한다. 즉, 한계상태함수에 대한 확률밀도함수(Probability Density Function, PDF)를 알고 있을 때 해석이 가능하며, 다음 식 (2)와 같이 파괴확률을 구한다.

$$P_f = \int_{R < S} p_z dZ \tag{2}$$

여기서, p_z 는 한계상태함수의 PDF이다.

그러나, 한계상태함수는 사용된 모든 확률변수에 대한 복잡한 비선형함수의 형태이기 때문에 각 확률변수에 대한 확률밀도함수를 알고있다 하더라도 유도 확률밀도함수(derived

probability density function)를 구하는 것이 대단히 어렵고 그것을 얻었다 하더라도 직접 적분을 구하는 것은 쉽지 않다 실무적으로는 시뮬레이션 방법을 이용하여 파괴확률을 추정한다. Table 3은 시뮬레이션 방법을 이용한 파괴확률 산정 절차를 나타낸다.

3. 케이슨식 안벽의 신뢰성 해석

신뢰성 설계는 다양한 개념의 해석방법으로 개발되어 실무에서는 주로 한가지 이상의 해석을 실시하여 구조물의 안정성을 판단하는 것이 일반적이다. 그러나 국내에는 아직 설계기준이 명확히 제안되어 있지 못하므로 현행의 결정론적 설계법과 신뢰성 기법에 의한 해석 결과를 비교·검토하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 본 논문에서는 일본의 설

Table 3. Level III 신뢰성 해석 절차

단계	해석 내용	단계	해석 내용
1	시뮬레이션 회수(N_{tot})를 결정한다.	5	한계상태함수가 영 또는 음의 값을 가지면 파괴회수(N_f)를 증가시킨다.
2	확률변수의 확률분포를 결정한다.	6	단계 3~5의 과정을 시뮬레이션 회수만큼 반복한다.
3	각 확률변수의 확률분포에 부합되는 한 세트의 설계치를 추출한다.	7	파괴확률 $P_f=N_f/N_{tot}$ 을 구한다.
4	추출된 설계치를 이용하여 한계상태함수값을 계산한다.		

Table 4. 주요설계제원

해석사례 I				해석사례 II					
기본 제원				기본 제원					
마루 높이	DL(+) 6.00 m	잔류수위	DL(+) 1.936 m	마루 높이	DL(+) 4.00 m	잔류수위	DL(+) 1.475 m		
계획수심	DL(-) 17.00 m	설계조위	DL(+) 3.872 m	계획수심	DL(-) 14.50 m	설계조위	DL(+) 2.95 m		
케이슨 규격	13.6B×9.9L×20.1H	상재 하중	상 시	2.0 t/m ²	케이슨 규격	10.2B×29.9L×14.6H	상재 하중	상 시	3.0 t/m ²
	1630.69 t		지진시	0.5 t/m ²		2903.63 t		지진시	1.5 t/m ²
곡주	150 t급	크레인	상 시	71.0 t/wheel	곡주	100 t급	크레인	상 시	-
내진설계 기준	내진2등급		하 중	지진시 100.0 t/wheel	내진설계 기준	내진1등급		하 중	지진시

Table 5. 하중조합

구 분	기본하중	상재하중	견인력	장비하중	동수압	관성력
상 시	CASE 1	I-II	-	II	-	-
	CASE 2	I-II	I	II	-	-
	CASE 3	I-II	II	I-II	II	-
	CASE 4	I	I	I	-	-
	CASE 5	I	I	I	I	-
지진시	CASE 1	I-II	-	-	I-II	I-II
	CASE 2	I-II	I	-	II	I-II
	CASE 3	I-II	I-II	-	I-II	I-II

계기준(2007)에 근거하여 설계조건이 다른 두가지 사례의 케이스식 안벽에 대한 수준별 신뢰성 해석을 통하여 Level I~III 해석기법간 정밀도 및 결과를 비교하고 민감도 분석을 통하여 확률변수가 설계결과에 미치는 영향을 고찰하였다.

3.1 해석조건

2가지 해석사례에 대한 설계제원을 Table 4에 나타내었다. 케이스 규격, 설계조위, 상재하중 등 전반적으로 서로 상이한 임의의 단면을 선정하였다. 설계시 하중조합은 Table 5에 보인바와 같이 두 경우 모두 상시와 지진시에 대하여 검토하였고 동수압과 관성력은 지진시에만 적용하였다. 사례 I의 경우는 상시에 기본하중만 작용하는 경우(CASE 1),

Table 6. 확률변수의 편향계수 및 변동계수

확률변수	편향계수(α)	변동계수(V)
단위 증량 철근콘크리트(w_{rc})	0.98	0.02
무근콘크리트(w_c)	1.02	0.02
채움석(w_s)	1.02	0.04
마찰계수(f)	1.06	0.15
정적도압(E_{st})	1.00	0.10
지진계수(k_h)	0.91~1.74	0.25

기본 및 상재하중이 작용하는 경우(CASE 2), 기본하중과 견인력만 작용하는 경우(CASE 3) 및 장비하중이 존재 또는 부존할 경우(CASE 4, 5)에 대하여 검토하여 하중조합을 좀더 세분화 하였다. 신뢰성 설계를 수행하기 위하여 확률변수의 확률분포는 일본 통계자료를 근거로 작성된 Table

Table 7. 목표 신뢰지수에 따른 부분안전계수

부분안전계수	활동 파괴모드		전도 및 지지력 파괴모드		
	A급($\beta_T=1.51$)	특급($\beta_T=2.05$)	A급($\beta_T=1.51$)	특급($\beta_T=2.05$)	
γ_f	0.942	0.903	0.942	0.903	
$\gamma_{W_{IR}}$	철근콘크리트	0.970	0.966	0.966	0.961
	무근콘크리트	1.009	1.006	1.005	0.999
	속채움재	0.999	0.992	0.990	0.980
	뒤채움재	0.999	0.992	0.990	0.980
$\gamma_{W_{IS}}$	철근콘크리트	0.987	0.990	0.990	0.994
	무근콘크리트	1.027	1.030	1.031	1.034
	속채움재	1.035	1.040	1.041	1.048
	뒤채움재	1.035	1.040	1.041	1.048
$\gamma_{E_{stR}}$	0.948	0.931	0.926	0.901	
$\gamma_{E_{stS}}$	1.074	1.099	1.074	1.099	
$\gamma_{k_{hER}}$	1.091	1.121	1.130	1.173	
$\gamma_{k_{hES}}$	0.871	0.827	0.871	0.827	
γ_{Δ_R}	-0.554	-0.573	-0.578	-0.604	
γ_{Δ_S}	-0.422	-0.396	-0.422	-0.396	
γ_{k_h}	1.130	1.173	1.130	1.173	
γ_{WL}	0.693	0.725	0.693	0.725	
γ_{RWL}	1.214	1.252	1.214	1.252	

6의 편향계수 및 변동계수를 따른다고 가정하였으며, 각 그룹에 해당하는 파괴모드별 부분안전계수는 Table 7에 제시하였다. 일본지역 확률변수의 확률분포는 국내와 다소 차이가 있으나 국내 실정이 반영된 객관적 자료가 아직 부재하므로 참고로 이용하였다. 여기서, γ_f , γ_{WR} , γ_{WS} , γ_{ER} , γ_{ES} , $\gamma_{k_{ER}}$, $\gamma_{k_{ES}}$, γ_{AR} , γ_{AS} , γ_{k_h} , γ_{WL} , γ_{RWL} 는 각각 마찰계수, 저항-하중 계산시 자중, 정적토압, 동적토압계수, 동적토압의 위상차, 정적토압계수, 설계조위 및 잔류수위에 대한 부분 안전계수이다.

3.2 한계상태함수의 정의

케이스 안벽의 파괴모드는 크게 활동파괴, 전도파괴, 지지력파괴 등으로 나눌 수 있으며, 각 파괴모드에 대한 한계상태함수를 정의하면 다음과 같다.

활동

$$Z_{sl} = f(W - B + C_V + E_V + Q - P_U) - [k_h W + C_H + E_H + S + R + D + P] \quad (3)$$

전도

$$Z_{ot} = a_1 W - a_2 B + a_3 C_V + a_4 E_V + a_5 Q - a_6 P_U - (a_7 k_h W + a_8 C_H + a_9 E_H + a_{10} S + a_{11} R + a_{12} D + a_{13} P) \quad (4)$$

지지력

$$Z_{br} = q_a \begin{cases} \frac{F_V}{B_c} \left(1 + \frac{6e}{B_c}\right) & \left(e < \frac{B_c}{6}\right) \\ \frac{4F_V}{3(B_c - 2e)} & \left(e > \frac{B_c}{6}\right) \end{cases} \quad (5)$$

활동파괴에 대한 한계상태함수에서 f , W , C , Q , P_U , P , S , k_h 는 각각 마찰계수, 케이스자중, 크레인하중, 상재하중, 양압력, 파괴, 선박하중 및 수평지진계수를 의미하며 첨자 V 와 H 는 수직 및 수평성분을 의미한다. 전도파괴에 대한 한계상태함수에서 a_i 는 모멘트 중심에서 하중작용점까지의 거리를 나타내고, 지지력파괴에 대한 한계상태함수에서 q_a , E_V , B_c , e 는 각각 허용지지력, 연직합력, 케이스 폭, 편심계수를 나타낸다. 또한 공통으로 사용된 B , E , R 및 D 는 각각 부

Table 8. Level I 해석결과

하중조합	사례	사례 I (A급)			사례 II (특급)			
		저항(R)	하중(S)	판정	저항(R)	하중(S)	판정	
상시	1	활동	243.57	118.08	OK	123.17	46.47	OK
		전도	3918.96	1041.78	OK	1685.10	326.96	OK
		지지력	60.00	42.18	OK	46.99	20.58	OK
	2	활동	257.78	127.92	OK	124.51	56.91	OK
		전도	4230.21	1157.88	OK	1712.70	413.61	OK
		지지력	60.00	44.11	OK	46.99	23.35	OK
	3	활동	243.57	133.23	OK	144.80	56.91	OK
		전도	3918.96	1407.65	OK	1954.20	413.61	OK
		지지력	60.00	49.26	OK	46.99	26.12	OK
	4	활동	257.78	143.07	OK			
		전도	4230.21	1523.75	OK			
		지지력	60.00	51.19	OK			
5	활동	290.21	148.81	OK				
	전도	4499.85	1659.21	OK				
	지지력	60.00	61.83	NG				
지진시	1	활동	245.05	173.24	OK	122.30	94.41	OK
		전도	3963.10	1656.67	OK	1665.00	652.93	OK
		지지력	75.00	54.29	OK	56.40	32.02	OK
	2	활동	248.56	175.83	OK	123.97	106.08	OK
		전도	4039.39	1691.11	OK	1700.10	750.16	OK
		지지력	75.00	54.86	OK	56.40	35.11	OK
	3	활동	294.25	183.91	OK	134.11	107.70	OK
		전도	4419.20	1881.80	OK	1820.90	777.06	OK
		지지력	75.00	71.16	OK	56.40	37.40	OK

력, 토압, 잔류수압 및 동수압이다.

표화 하였다.

3.3 해석결과 및 민감도 분석

신뢰성 해석은 위에서 구한 각 파괴모드에 대한 한계상태함수를 이용하여 Level I~III 방법에 의하였으며, Level II 해석은 FORM을 이용하였고, Level III 해석은 MCM에 의해 파괴확률을 산정하였다. 또한, 민감도 분석을 통하여 각 확률변수의 안정성에 기여하는 정도를 평가하였다.

3.3.1 신뢰성 해석 결과

Level I 해석

Level I에서는 목표 신뢰지수의 특급($\beta_T=2.05$)과 A급($\beta_T=1.51$) 2가지 경우에 대하여 저항과 하중을 모두 산정하였다. 2가지 설계조건에 대한 해석결과, 사례 II에서는 작용하중이 저항력을 초과하지 않아 A급과 특급기준을 모두 만족하였으나, 사례 I에서는 상시 지지력 파괴모드에서 작용하중이 저항력을 미미하게 상회하였다. Table 8의 해석결과 중 □는 최대위험 case이고, Fig. 1에서는 그 경우를 도

Level II 해석

FORM을 이용한 Level II 해석결과에서도 Table 9과 같이 사례 II의 지진시 활동 파괴모드에서 가장 작은 신뢰지수가 산정되었으나 목표 신뢰지수를 상회하여 안전하였고, 반면 사례 I에서는 상시 지지력 파괴모드에서 신뢰지수가 목표치에 미달하여 불안정한 것으로 나타났다(목표 신뢰지수 $\beta_T=2.05$ (특급), $\beta_T=1.51$ (A급)).

Level III 해석

MCM에 의한 Level III 해석에서는 Table 10에 나타난 바와 같이 활동과 지지력 파괴모드에서 신뢰지수가 Level II의 해석결과와 매우 유사한 결과를 나타내었다. Fig. 2는 각 사례별 파괴모드중 신뢰지수가 낮은 가장 위험한 경우의 PDF를 나타낸다. 사례 I의 지지력 파괴모드(그림 a)는 한계상태함수 값(Z)이 허용지지력(R)을 초과하지는 않으나 목표 파괴확률을 초과하여 불안정하고, 사례 II의 활동 파

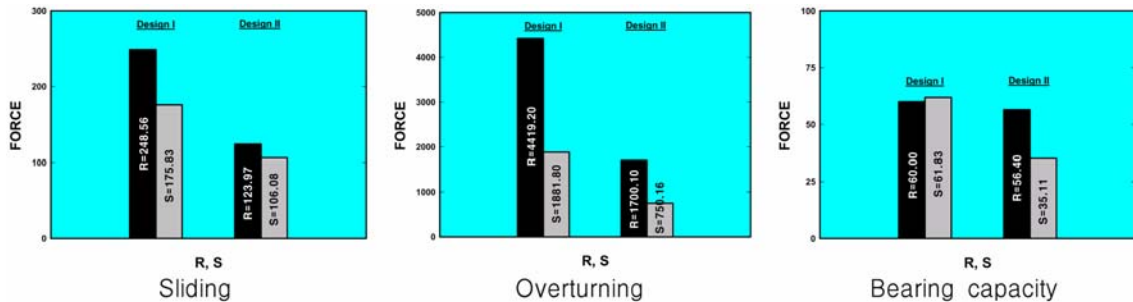


Fig. 1. 최대위험 case의 결과.

Table 9. Level II 해석

사례	I			II		
	상시 CASE 5 (A급, 특급기준 미달)			지진시 CASE 2 (A급, 특급기준 만족)		
파괴모드	신뢰도 지수 β	파괴 확률 P_f (%)	판정	신뢰도 지수 β	파괴 확률 P_f (%)	판정
활동	4.199	0.134	OK	2.201	1.390	OK
전도	12.804	7.80E-34	OK	8.009	5.69E-12	OK
지지력	1.416	7.845	NG	3.767	0.816	OK

Table 10. Level III 해석

사례	I			II		
	상시 CASE 5 (A급, 특급기준 미달)			지진시 CASE 2 (특급기준 만족)		
파괴모드	신뢰도 지수 β	파괴 확률 P_f (%)	판정	신뢰도 지수 β	파괴 확률 P_f (%)	판정
활동	4.417	0.050	OK	1.880	2.849	NG
전도	4.753이상	0.010 이하	OK	4.260이상	0.001 이하	OK
지지력	1.416	7.843	NG	2.28	1.120	OK

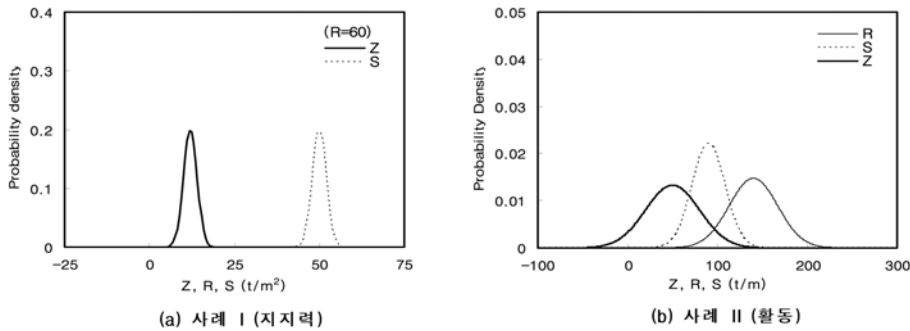


Fig. 2. 최대위험 파괴모드의 확률밀도함수.

파괴모드(그림 b)는 A급의 목표 파괴확률에는 만족하나 특급 기준을 초과하여 불안정한 것으로 나타났다(목표 파괴확률 $P_f=2.02\%$ (특급), $P_f=6.55\%$ (A급)).

3.3.2 민감도 분석

각 파라미터의 설계 결과에 미치는 영향정도를 파악할 수 있는 민감도 분석에서 민감도 지수(sensitivity factor)는 한계상태함수의 선형 근사치 계수이다. 확률변수 사이에서 서로 상관성이 없을 때 민감도 지수는 식 (6)로 정의된다.

$$\alpha_X = \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \right) \frac{\sigma_{X_i}}{\sigma_Z} \quad (i = 1, 2, \dots, n) \tag{6}$$

$$= -\frac{X'_i}{\beta} \quad \text{여기서, } X'_i = \frac{X_i^* - \mu_{X_i}}{\sigma_{X_i}} \tag{6a}$$

식 (6a) 표준화된 공간상의 각 확률변수 축에서 신뢰지수의 방향여현(direction cosine)을 의미하며, 한계상태함수가 로 정의될 때 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 민감도 지수는 각 확률변수 사이에 상관관계가 없을 경우, 저항에 대하여 양의 값을 가지고 하중효과에 대하여 음의 값을 가지는 한편, 그 제곱의 합은 1이 된다. 그것은 Fig. 3에서 민감도 지수의 절대값이 1에 근접함에 따라 파괴점에서 표준화된 값과 신뢰지수 사이의 일치도가 양호해짐이 분명히 나타난다. 이러한 사실은 민감도 지수가 신뢰지수에 크게 영향을 미침을 의미한다.

확률변수 사이에서 서로 상관관계가 있을 때 상관계수는 한계상태함수의 표준편차와 민감도 지수를 이용하여 고려하게 된다. 이들의 표현식은 식 (7) 및 (8)과 같다.

$$\sigma'_Z = \sqrt{\sum_i^n \sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_i} \right) \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \right) \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_i} \sigma_{X_j}} \tag{7}$$

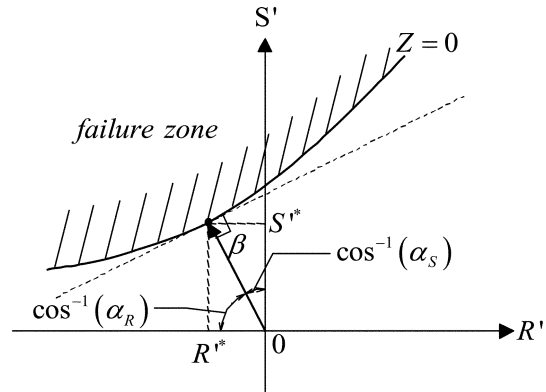


Fig. 3. 신뢰지수와 민감도 지수의 관계.

$$\alpha'_i = \frac{\sum_j^n \left(\frac{\partial Z}{\partial X_j} \right) \rho_{X_i X_j} \sigma_{X_j}}{\sigma'_Z} \tag{8}$$

이들 식으로부터 신뢰지수와 민감도 지수를 이용함으로써 Level I 신뢰성 설계법에서의 부분안전계수를 구할 수 있다. 특정 확률변수가 구조물의 각 파괴모드별 안정성에 미치는 영향정도를 파악하기 위하여 두가지 사례의 모든 하중조합에 대하여 FORM에 의한 민감도 분석을 실시하였다. 모든 분석 결과중 각 파괴모드별, 사례별로 확률변수의 민감도 특성을 잘 나타내는 하중조합의 경우를 다음에 나타내었다.

Table 11과 Fig. 4에서는 상시의 각 파괴모드에 대한 정규화된 민감도 지수를 나타내고 있다. 활동 파괴모드에서 구조물의 파괴에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 케이슨과 기초지반 사이의 마찰계수(f)로 나타났으며, 그 다음으로 수평토압(E_h), 자중(W), 부력(B), 잔류수압(P_{wr}) 및 연직토압(E_v)이 민감하였다. 활동모멘트와 저항모멘트의 크기에 따라 파괴가 결정되는 전도 파괴모드에서는 확률변수중

Table 11. 정규화된 민감도 지수(상시)

	활동		전도		지지력	
	사례 I	사례 II	사례 I	사례 II	사례 I	사례 II
E_v	6.84E-03	E_v 1.15E-02	M_{Ev} 0.174	M_{Ev} 0.243	F_v -0.587	F_v -0.602
f	0.985	f 0.984	M_{Eh} -0.311	M_{Eh} -0.460	M_x 0.494	M_x 0.526
E_h	-0.156	E_h -0.162	M_W 0.756	M_W 0.839	M_y -0.641	M_y -0.600
W	5.66E-02	W 5.59E-02	M_B -0.549	M_{Pwr} -0.161		
B	-4.33E-02	P_{wr} -5.01E-02	M_{Pwr} -1.31E-02			
P_{wr}	-5.54E-03					

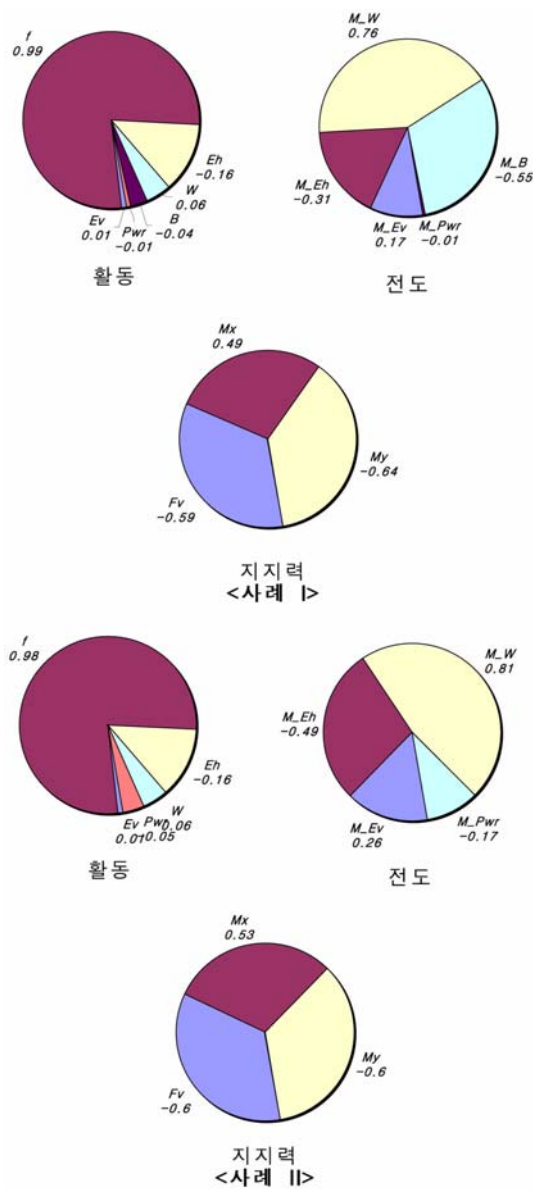


Fig. 4. 상시의 민감도 지수 분포.

케이스 자중과 부력에 의한 모멘트의 민감도가 가장 컸으며, 그 다음으로 수평토압, 연직토압 및 잔류수압에 의한 모멘트 순으로 파괴에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 지지력 파괴모드의 최대 민감도 지수는 저항모멘트(M_x) 및 연직합력(F_v)이 서로 비슷하게 나타나 전도모멘트(M_x)에 비하여 확률변수의 변화에 따라 파괴에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다.

신뢰지수의 변화에 따른 민감도 지수의 변화속도를 조사하기 위하여 케이스의 폭을 50% 범위 내에서 단계적으로 증감시키며 민감도 지수의 변화 추이를 관찰하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 활동 파괴모드에서는 수평토압 및 부력에 대한 민감도 지수가 신뢰지수 증가에 따라 증가하다가 수렴하는 경향을 나타내었고, 자중에 대한 민감도 지수는 소폭 감소하였다. 특히, 마찰계수의 민감도 지수는 거의 1에 근접하여 신뢰지수에 큰 영향을 미치는 반면, 연직토압의 경우는 거의 0에 가까운 값을 보이는데 이는 신뢰지수에 거의 영향이 없음을 의미한다. 전도 파괴모드의 경우, 신뢰지수 증가에 따라 자중 및 수평토압에 의한 모멘트의 민감도 지수는 비교적 빠른 속도로 증가하다가 수렴 또는 감소하였고, 연직토압 및 부력에 의한 모멘트의 민감도 지수는 오히려 감소하였다. 또한 잔류수압에 의한 모멘트의 민감도 지수는 거의 0에 가까워 설계에 영향이 가장 적은 것으로 나타났다. 지지력 파괴모드의 경우, 전도 및 저항모멘트에 대한 민감도 지수는 신뢰지수가 커질수록 감소하는 반면 연직합력의 경우는 증가하는 경향을 나타내었다. 모든 확률변수의 민감도 지수는 증가 또는 감소하다가 신뢰지수가 일정값 이상이 되면 수렴하는 양상을 보였다.

Table 12와 Fig. 6은 지진시 각 파괴모드에서 확률변수에 대한 정규화된 민감도 지수를 나타내고 있다. 지진시 활동 파괴모드에서 설계에 가장 큰 영향을 미치는 인자는 상시와 마찬가지로 케이스와 기초지반 사이의 마찰계수, 수평토압 순으로 나타났으며, 그 다음으로 자중, 부력 및 동수

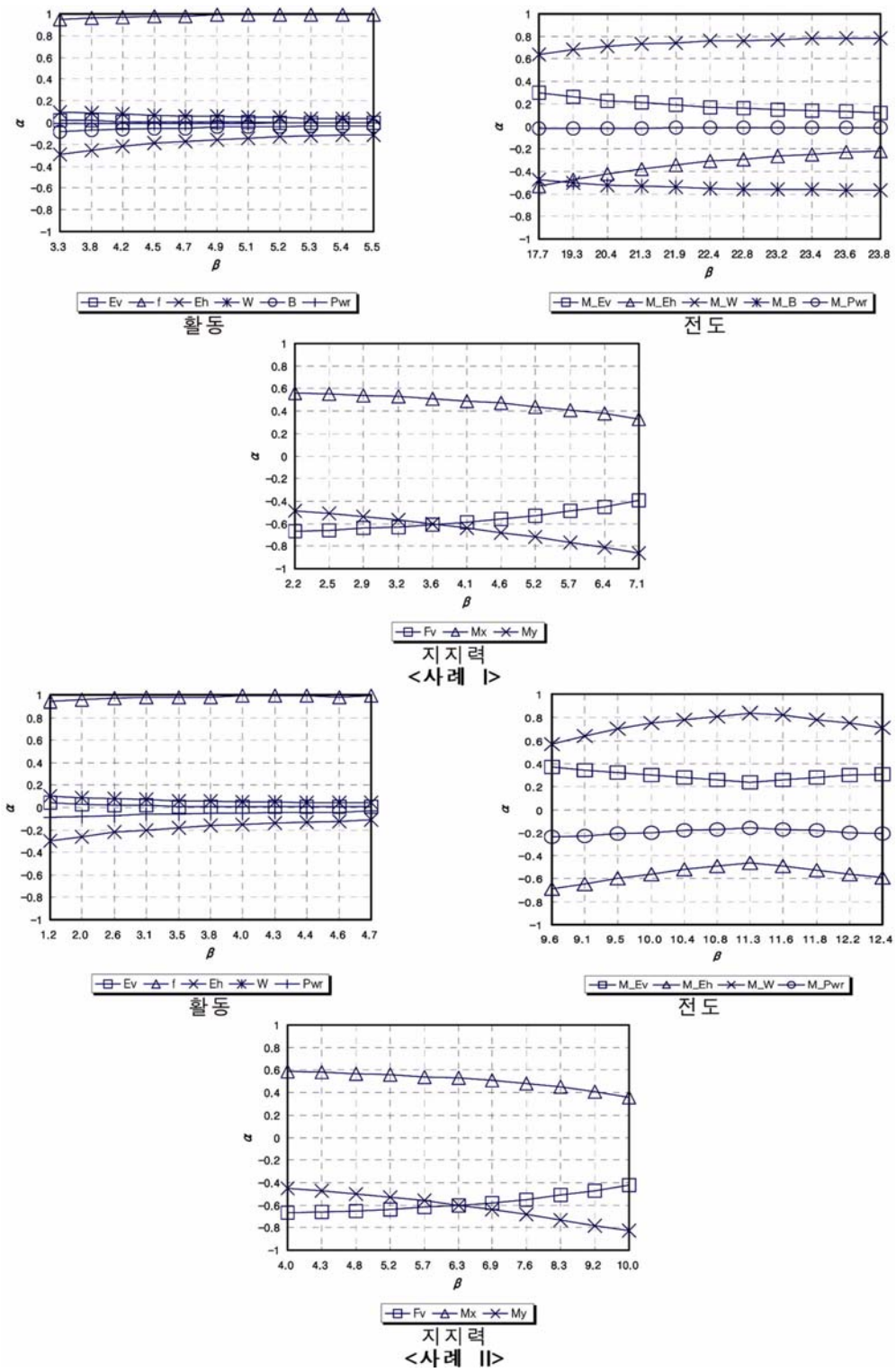


Fig. 5. 신뢰지수와 민감도 지수 사이의 상관관계(상시).

Table 12. 정규화된 민감도 지수(지진시)

	활동		전도				지지력	
	사례 I	사례 II	사례 I	사례 II	사례 I	사례 II		
E_v	2.47E-02	E_v 6.65E-02	M_{Ev} 0.347	M_{Ev} 0.272	F_v -0.584	F_v -0.443		
f	0.922	f 0.818	M_{Eh} -0.592	M_{Eh} -0.531	M_x 0.458	M_x 0.387		
E_h	-0.305	E_h -0.449	M_W 0.577	M_W 0.373	M_y -0.670	M_y -0.809		
W	9.19E-02	W 9.55E-02	M_B -0.419	M_{Pwr} -9.65E-02				
B	-6.71E-02	P_{wr} -5.84E-02	M_{Pwr} -9.98E-03	M_{Pwd} -0.243				
P_{wr}	-4.38E-03	P_{wd} -0.189	M_{Pwd} -0.118	M_{Fi} -0.661				
P_{wd}	-6.22E-02	F_i -0.279	M_{Fi} -8.36E-02					
F_i	-0.197							

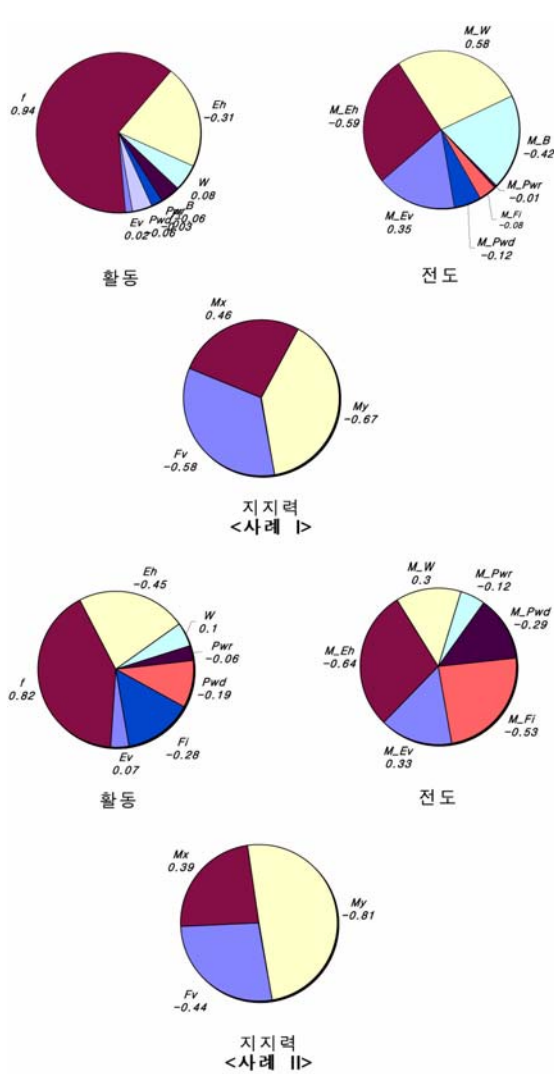


Fig. 6. 지진시의 민감도 지수 분포.

압(P_{wd}), 지진하중에 의한 관성력, 연직토압, 잔류수압의 순이었다. 전도 파괴모드에 대한 민감도 지수는 수평토압에 의한 모멘트가 가장 큰 값을 나타내었으며, 그 다음으로 자중, 부력, 연직토압, 동수압, 지진하중에 의한 관성력 및 잔류수압에 의한 모멘트 순이었다. 지지력 파괴모드에 대한 민감도는 저항모멘트가 가장 컸으며, 연직합력, 전도모멘트 순으로 민감하게 나타났다.

Fig. 7은 지진시 각 파괴모드에 대한 신뢰지수 변화에 따른 민감도 지수 변화 추이를 나타낸 것이다. 활동 파괴모드의 경우, 마찰계수 및 수평토압의 민감도 지수는 신뢰지수와 함께 증가하는 반면, 나머지 설계변수는 소폭 감소하거나 거의 일정한 양상을 나타내었다. 상시와 마찬가지로 마찰계수의 민감도 지수는 거의 1에 근접하여 신뢰지수에 가장 큰 영향을 미치는 반면, 잔류수압의 경우 0에 가까워 거의 영향이 없는 것으로 나타났다.

전도 파괴모드의 경우는 자중과 수평토압에 의한 모멘트가 신뢰지수 증가에 따라 현저히 증가하였고, 관성력, 연직토압 및 부력에 의한 모멘트는 감소, 동수압에 의한 모멘트의 민감도 지수는 큰 변화가 없었다. 주목할 만한 점은 관성력과 동수압이 비교적 변동계수가 큰 지진계수에 영향을 받는 확률변수임에도 불구하고 신뢰지수 변화에 따른 민감도의 변화가 그다지 크지 않다는 점이다. 이러한 결과는 Nagao 등(2004)이 방파제의 민감도 분석을 통하여 도출한 조위레벨-민감도 지수 관계와 유사한 결과로서, 변동계수가 큰 확률변수의 민감도가 모두 크다고 할 수 없다는 사실과 일맥상통 한다. 지지력 파괴모드에서는 신뢰지수가 증가할수록 전도 및 저항모멘트의 민감도 지수는 감소하는 양상을 보였고, 연직합력의 민감도는 증가하는 추세를 보였다.

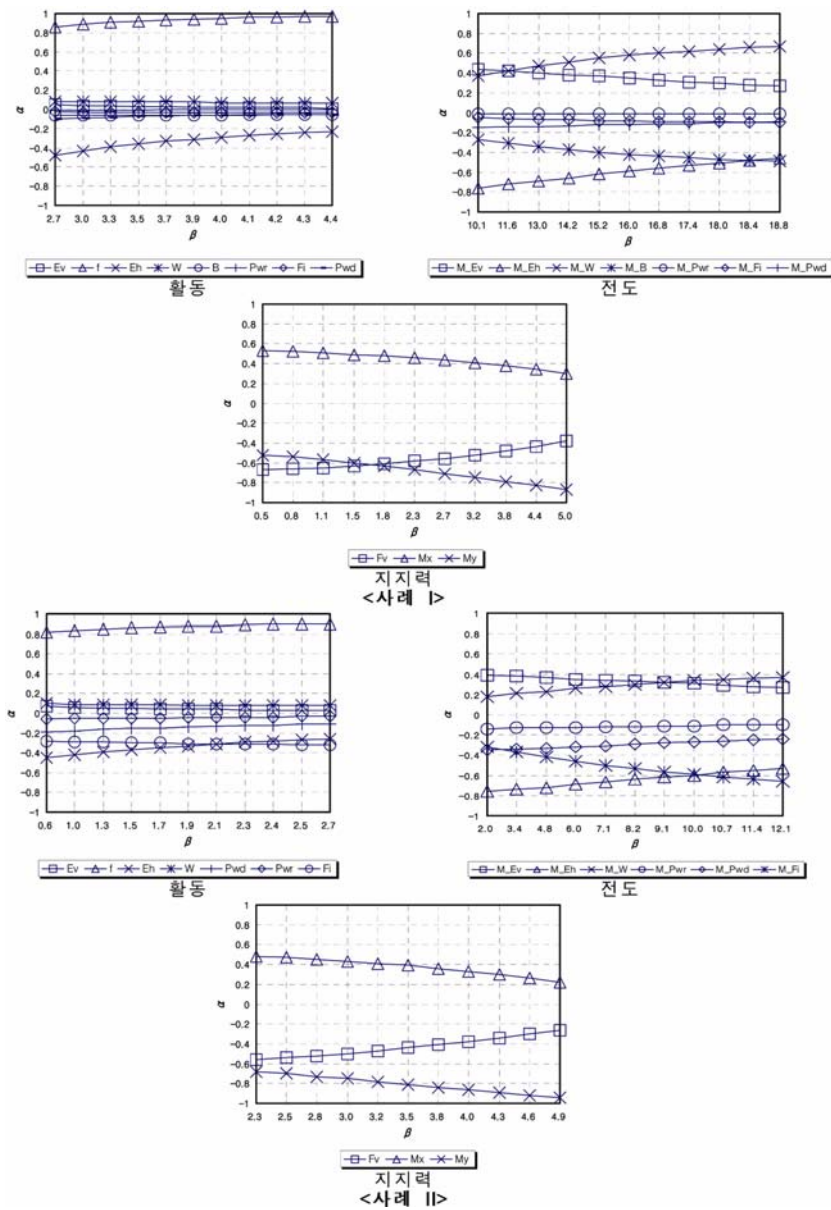


Fig. 7. 신뢰지수와 민감도 지수 사이의 상관관계(지진시).

결 론

1. 안벽구조물의 3가지 파괴모드별(활동, 전도 및 지지력) 설계변수가 신뢰지수에 미치는 영향을 조사하기 위하여 설계조건이 다른 단면에 대하여 민감도 분석을 수행하였다. 신뢰성 해석결과, 안벽의 활동과 지지력 파괴모드에 대한 파괴확률이 크게 산정된 반면, 전도파괴에 대하여는 파괴

확률이 낮은 결과를 제시하여 안전측인 것으로 나타났다. 그리고 파괴모드에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 활동에 대하여 케이슨과 기초지반 사이의 마찰계수, 전도에 대하여 케이슨 자중과 부력에 의한 모멘트, 지지력에 대하여 저항모멘트 및 연직합력으로 나타났다.

2. 지진시에 가장 큰 영향을 미치는 확률변수는 상시와 그 차이가 없으나, 활동에 대하여 케이슨과 기초지반 사이

의 마찰계수, 수평토압, 자중, 부력 및 동수압, 지진하중에 의한 관성력, 연직토압, 잔류수압의 순으로 민감도가 컸다. 전도에 대하여는 수평토압, 케이슨 자중, 부력, 연직토압, 동수압, 지진하중에 의한 관성력 및 잔류수압에 의한 모멘트 순으로 크게 나타났다. 지지력의 경우는 저항모멘트의 민감도가 가장 컸고 연직합력, 전도모멘트의 순이었다. 따라서, 활동과 전도 파괴모드의 지배적인 확률변수는 마찰계수와 자중 또는 수평토압 등으로 파악되었으며, 지진관련 확률변수는 동수압의 영향이 비교적 큰 것으로 판단되었으며 지진시 관성력과 동수압이 비교적 변동계수가 큰 지진계수에 영향을 받는 확률변수임에도 불구하고 관성력과 동수압에 대한 민감도 지수는 신뢰지수 증가에 따라 변화가 크지 않았다.

3. 신뢰지수의 증가에 따른 민감도 변화를 조사하기 위하여 케이슨의 폭을 증감시키며 그 변화를 분석한 결과, 활동 파괴모드에서는 수평토압 및 부력에 대한 민감도 지수가 신뢰지수 증가에 따라 증가하다가 수렴하는 경향을 나타냈다. 마찰계수의 민감도 지수는 거의 1에 근접하여 신뢰지수에 큰 영향을 미치는 반면, 연직토압의 경우는 거의 0에 가까워 신뢰지수에 미치는 영향이 거의 없었다. 전도 파괴모드의 경우, 신뢰지수 증가에 따라 자중 및 수평토압에 의한 모멘트의 민감도 지수는 빠른 속도로 증가하다가 수렴 또는 감소하였으며, 지지력 파괴모드의 경우, 연직합력의 민감도가 증가하는 경향을 나타내 케이슨 폭이 커질수록 신뢰지수에 미치는 영향이 커짐을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부 국책 연구과제인 “항만구조물 신뢰성 설계법 개발(PM64500)”의 연구결과의 일부임을 밝히며 연구수행이 가능하도록 연구비 지원을 해주신 국토해양부 항만건설정책관실의 항만건설기술과 및 한국해양수산진흥원에 감사의 글을 전합니다.

참고문헌

김동현, 윤길림, 박우선 (2003). “지진토압의 위상차를 고려한 케이슨안벽의 신뢰성 해석”, 한국해양해양공학회지 제

15권 4호, pp. 242-248.
 김동현, 조홍연, 김두기, 조병일 (2007). “잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도해석”, 한국해양해양공학회지 제 19권 3호, pp. 237-243.
 서경덕, 권혁민, 윤현덕 (2002). “파향의 변동성을 고려한 방파제 소파블록의 신뢰성 설계”, 한국해양해양공학회 학술대회지, pp. 82-91.
 윤길림 (2004). “차세대 항만 설계기술 개발(IV)”, 한국해양연구원 연구보고서, 해양수산부.
 윤길림, 이규환 (2005). “신뢰성 기법을 이용한 연약지반의 침하해석”, 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 87-100.
 윤길림, 채광석, 신재설, 이훈연 (2005). “항만구조물 사례 분석을 통한 안정해석법 설계기준”, 대한토목학회 학술발표회 논문집, pp. 220-226.
 윤길림, 이규환, 채광석 (2004). “확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 연구”, 한국지반공학회 지반조사위원회 특별세미나 논문집, pp. 73-105.
 이철웅 (1999). “경사제 피복재의 안정성에 대한 신뢰성 해석”, 한국해양해양공학회지 제11권3호, pp. 165-172.
 ENV (1998). “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance”.
 H. Yoneyama, S. Shiraishi and T. Uwabe (2000). “A Study on Load Factors of Seismic Loads on Limit State Design Method for Port and Offshore Structures in Japan”, 8th ASCE Specialty Conference on Probabilistic Mechanics and Structural Reliability.
 Kweon, Hyuck-Min, Suh, Kyung-Doug and Lee, Young-Yeol (2003). “마루높이 설정을 위한 월파확률의 신뢰성 해석”, 한국해양해양공학회 학술대회지, pp. 376-381.
 T. Nagao, Y. Yoshinami, T. Sanuki and M. Kamon (2001). “ケソン式岸壁の外的安定に關する信頼性設計法の適用”, 構造工學論文集 Vol. 47A.
 財團法人 沿岸技術研究センター (2007). “港灣構造物 設計事例集(下卷)”.

Received April 13, 2007

Accepted October 21, 2008