

응답면 기법을 이용한 잔교식 안벽의 신뢰성해석 Reliability analysis of pier using response surface method

김동현¹, 이상근², 윤길림³
 Dong Hyawn Kim¹, Sang Geun Lee² and Gil Lim Yoon³

1. 서 론

잔교식 안벽은 계류시설로 연약지반에 시공이 가능하며, 케이슨과 같은 중력식 안벽에 비해 공사기간과 비용 측면에서 효율적이므로 잔교식 안벽의 시공이 증가하고 있다. 잔교식 안벽 구조물의 경우 수직 또는 경사로 박혀있는 강관파일과 상부의 Slab가 결합된 구조로 수직력에 대한 저항은 강하나 수평력 즉, 지진하중에 대해서는 취약하다. 이에 본 논문에서는 Level II 방법을 통해 지진하중에 의한 잔교식 안벽의 파괴확률의 산정하였고, Level II 해석에서 구한 각 확률변수의 민감도계수(α)를 사용하여 부분안전계수(Level I)를 산정하였다. 위 신뢰성 해석을 수행하기 위해서는 한계상태함수를 선형화 하는 방법을 사용하는데, 지진하중에 의한 잔교식 안벽의 응력 및 변위결과는 유한요소 해석 등을 통해 얻을 수 있는 종속변수이기 때문에 한계상태함수가 음함수로 존재한다. 이에 유한요소해석 결과를 이용하여 한계상태함수를 양함수로 근사화 하는 방법인 응답면 기법(RSM, Response Surface Method)을 통해 응답면을 구한 후 Level I, II 신뢰성 해석을 수행하였다.

2. 해석대상의 제원 및 유한요소해석 모델

2.1 해석대상의 제원

해석에 사용된 잔교식 안벽은 강관파일이 수직으로 박혀있는 직항식이며, 육지로부터 돌출되어 양쪽에서 접안이 가능한 돌출잔교 형식으로 다음

과 같다.

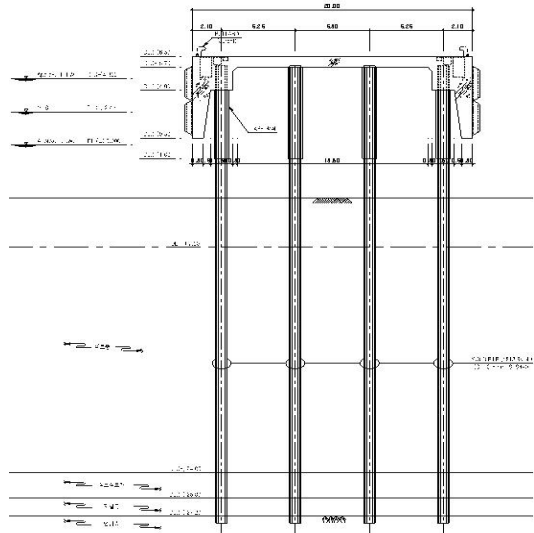


Fig. 1. 설계단면도

위 설계단면도와 같이 상부 Slab는 폭은 20m, 길이는 120m이며, 강관파일은 4열로 길이방향으로 3.4m 간격으로 배치되어 있다. 부재의 규격은 Table.1과 같다.

Table 1. 부재 규격

구분	규격	비고
강관파일	$\phi 812.8 \times 14t$	부식 2mm 고려
Slab	두께 800mm	

1 군산대학교 해양건설공학과 교수
 2 군산대학교 해양산업공학과 석사과정
 3 한국해양연구원 연안개발에너지 연구부 책임연구원

3. 신뢰성 해석

강관파일 및 Slab의 물성치는 다음과 같다.

Table 2. 물성치

구분	강관파일	Slab
탄성계수(Pa)	205.94e9	28.62e9
Poisson's ratio	0.3	0.18
단위중량(kg/m^3)	7849.7	2450.4

강관파일에 작용하는 지반의 종류는 Fig.2와 같이 구분되어 있으며 각 지층별 스프링계수는 Table.3과 같다. 여기서 $\bar{k}_1 \sim \bar{k}_4$ 는 수평스프링계수이며, \bar{k}_5 는 수직스프링계수이다.

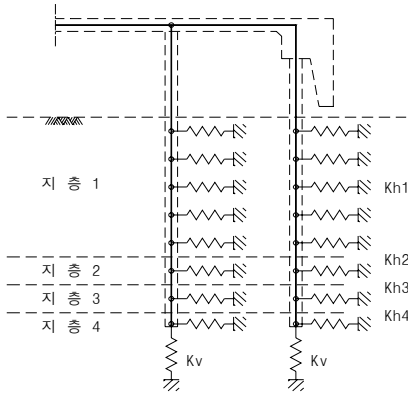


Fig. 2. 지반조건

Table 3. 지층별 스프링계수

구분	지반종류	스프링계수(tf/m)
\bar{k}_1	해성점토	100
\bar{k}_2	"	800
\bar{k}_3	실트질 모래	3900
\bar{k}_4	자갈층	5700
\bar{k}_5	연암	57700

2.2 유한요소 해석모델

범용 유한요소해석 프로그램인 Ansys를 사용하여 Slab 및 강관 파일을 각각 Shell과 Beam요소를 사용하여 유한요소모델링을 하였으며, 지반은 Spring damper요소를 사용하여 각 지층에 따른 스프링계수를 적용하였다.

3.1 지진확률 및 지진계수

구조물이 설치되어 있는 지역의 지진이 발생할 확률은 항만 및 어항설계기준(2005)에 의한 재현주기별 지진재해도를 통해 얻을 수 있다. 설계기준의 지진계수는 암반노두의 값이므로 지진구역의 구분표에 따라 증폭계수를 이용하여 Table.4와 같이 지표에서의 값을 얻을 수 있다.

Table 4. 재현주기에 따른 지진계수

재현주기(년)	최대지진가속도(g)	
	암반노두(outcrop)	지표(surface)
50	0.025	0.0295
100	0.040	0.0472
200	0.055	0.0649
500	0.075	0.0885
1000	0.110	0.1298
2400	0.170	0.2006
4800	0.190	0.2242

지진계수의 적합한 확률 분포형을 추정하기 위해 극치분포 Type I II III에 대해 지진계수별 초과확률을 구하여 확인한 결과 Fig.3 과 같이 TypeIII (Weibull)분포(식(1))가 가장 적합하여 확률모델로 사용하였다.

$$F_X(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{x-c}{b}\right)^k\right] \quad (1)$$

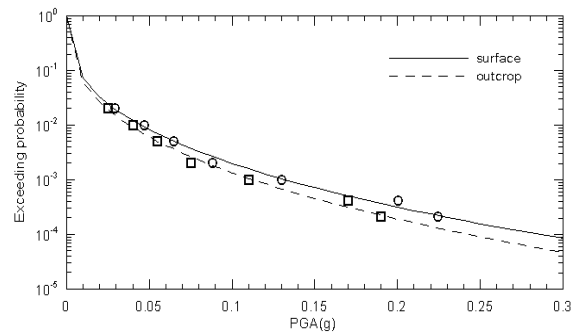


Fig. 3. 지진계수별 초과확률

재현주기 T 년에 해당하는 지진계수 K_h^T 는 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$K_h^T = F_{K_h}^{-1}(1 - 1/T) \quad (2)$$

여기서 $F_{K_h}^{-1}$ 는 극치분포 TypeIII(Weibull)의 누적분포함수의 역함수이다. 계수 b, c, k 는 식(3)과 같이 재현주기 T 와 이에 해당하는 지진계수 K_h^T 와의 관계로부터 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$K_h^T = b(\ln T)^{1/k} + c \quad (3)$$

3.2 확률변수

신뢰성해석에 사용된 확률변수는 Table.5와 같이 극치분포 TypeIII(Weibull)인 지진계수를 제외한 나머지는 정규분포 확률변수이다. 여기서 각 지층에 적용된 스프링계수를 각각의 독립적인 확률변수로 가정하게 되면 해석횟수의 증가로 효율성 측면에서 불리하므로, 각 지층별 스프링계수의 변동계수는 동일하다고 가정하여 스프링계수에 동일한 정규분포 확률변수 a_k 를 곱하여 스프링계수 전체에 대한 확률 변동성을 고려할 수 있도록 다음과 같이 간략화 하였다.

$$k_i = \bar{k}_i a_k \quad (4)$$

Table 5. 확률변수

구 분	평 균	변동계수	확률분포
허용 휨압축응력	271.95 (MPa)	0.08	정규분포
지반스프링계수비(a_k)	1	0.755	대수분포
지진계수(K_h)	$b = 7.5539e-4$ $c = 0, k = 0.374$		극치분포

개선된 일게이차모멘트법은 표준정규분포 확률변수의 공간상에서 한계상태함수를 근사화 하여 기하학적으로 정의되는 신뢰도지수 β 를 계산하고 파괴확률을 산정하므로, 한계상태식을 정의하는 모든 확률변수가 정규분포 확률변수일 경우에만 적용이 가능하다. 여기서 지진가속도는 극치분포 TypeIII(Weibull)이기 때문에 Rackwitz-Fiessler 변환법에 의해 등가의 정규분포 확률변수의 평균과 표준편차를 정의할 수 있다.

3.3 응답 면기법(Response surface method)

지진하중에 의한 잔교식 안벽의 한계상태함수 식(5)에서 최대응력(f_{max})은 응답면 기법을 통해 식(6)과 같이 2차방정식 형태의 다항식으로 비선형성을 고려한 응답면으로 표현할 수 있다.

$$g(S_y, f_{max}) = S_y - f_{max}(K_h, a_k) \quad (5)$$

$$f_{max} = C_0 + C_1 K_h + C_2 a_k + C_3 K_h^2 + C_4 a_k^2 + C_5 K_h a_k \quad (6)$$

구조해석을 수행할 구조해석점은 다음 식과 같이 결정한다.

$$X_{d_i} = X^* + k_i \sigma h \quad (7)$$

여기서 k 는 구조해석점을 결정하는 scattering index matrix 이며, h 는 확장폭이다. 구조해석점에서 유한요소해석 후 그 결과를 회귀분석 하여 응답면 계수벡터($C_0 \sim C_5$)를 구한다. 이와 같이 응답면을 구함으로써 양함수로 근사화된 한계상태함수를 정의할 수 있다.

3.4 민감도 계수

부분안전계수는 다음과 같이 민감도 계수 α_X , 목표 신뢰도지수 β_T , 확률변수 X 의 변동계수, 평균, 특성치인 V_X, μ_X, X_k 를 사용하여 구할 수 있다.

$$\gamma_X = (1 - \alpha_X \beta_T V_X) \frac{\mu_X}{X_k} \quad (8)$$

여기서, 민감도 계수 α_X 는 Level II 신뢰성 해석을 통해 얻을 수 있기 때문에 앞서 응답면 기법으로 정의된 한계상태함수를 사용하여 Level II 신뢰성 해석을 수행한 결과 각 확률변수의 민감도 계수는 Table.6 과 같고, 신뢰도 지수 β 는 3.4152로 Fig.4 와 같이 수렴하였다.

Table 6. 민감도계수(α)

α_{S_y}	α_{K_h}	α_{a_k}
0.7967	-0.9955	0.0512

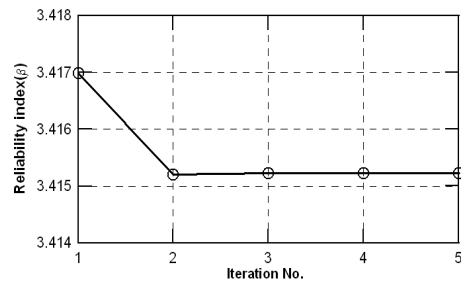


Fig. 4. 신뢰도지수의 수렴결과

3.5 중요도 추출법을 통한 검증

응답면 기법을 사용한 Level II 신뢰성 해석으로 산정된 파괴확률을 검증하기 위해 Level III 신뢰성 해석방법인 중요도 추출법을 사용하여 해석한 결과 Fig.5 와 같다.

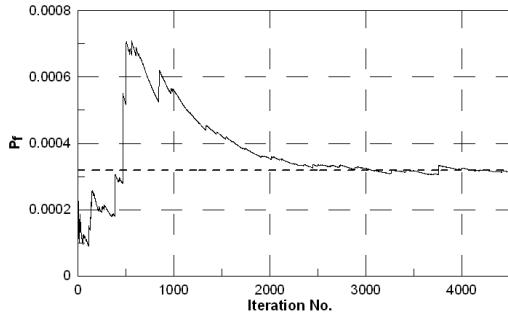


Fig. 5. 중요도 추출법을 통한 검증

Fig.5에서 점선은 Level II 신뢰성 해석으로 계산된 신뢰도 지수를 파괴확률로 환산하여 표시한 것이며, 실선은 중요도 추출법에 의한 해석결과로 Table.7과 같이 두 방법 사이의 오차가 매우 적은 것을 알 수 있다.

Table 7. 신뢰성 해석 결과 비교

구분	신뢰도 지수	파괴확률
Level II (AFOSM)	3.4152	3.1868×10^{-4}
Level III (ISMCS)	3.4191	3.1409×10^{-4}

3.6 부분안전계수 산정

부분안전계수를 적용한 설계방법은 계산설계치에 부분안전계수를 곱한 값을 설계 검토치로 사용하는 방법으로 본 논문에서는 재현주기 200년에 해당하는 0.0652g를 설계 지진계수로 설정하고 목표 신뢰도 지수를 3.0 으로 설정하여 각 확률변수의 부분안전계수를 계산하면 Table.8과 같다.

Table 8. 부분안전계수

구분	α	γ
허용휨 압축응력	0.7967	0.9808
지진계수(K_h)	-0.9955	1.4859
지반스프링계수비(a_k)	0.0512	0.9075

4. 결 론

지진하중에 의한 잔교식 안벽의 신뢰성 해석을 수행하였다. 음함수로 존재하는 잔교식 안벽의 한계상태함수를 양함수로 근사화 하기위해 응답면 기법을 사용 하였으며, 구해진 응답면의 검증을 위해 Level III 신뢰성 해석방법인 중요도 추출법을 사용하여 Level II 신뢰성 해석 결과와 비교한 결과 두 방법 사이의 파괴확률 오차가 0.0459×10^{-4} 으로 매우 적은 것으로 확인되어 구해진 응답면을 신뢰할 수 있다고 판단한다.

Level II 신뢰성 해석결과 신뢰도지수는 3.4152로 수렴하였으며, 목표 신뢰도지수를 3.0으로 설정하여 각 설계변수의 부분안전계수를 산정하여 검토한 결과 목표신뢰도지수를 충족하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 및 한국해양수산진흥원의 지원으로 수행된 “항만구조물 신뢰성설계법 개발” 과제의 일부이며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김동현, 조홍연, 김두기, 조병일 (2007). 잔교식 안벽구조물의 확률론적 지진위험도해석, 한국해양공학학회지, 19(3), 237-243.
- 해양수산부 (2005). 항만 및 어항 설계기준.
- Takashi NAGAO, Shugo FUJIMORI (2007) A study on the Estimation of Failure Probability of Pile-upported Wharves against a Level-One Earthquake Ground motion by using First-Order Second-Moment Method, TECHICAL NOTE of National Institute for Land and Infrastructure Management
- A.H.S. Ang & W.H. Tang (1975) Probability concepts in engineering planning and design, vol. I & II, basic principles, John Wiley & Sons, Inc.11