

## 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 신뢰성해석 (Part II: 개량지반의 내부안정)

### Reliability Analysis of a Quay Wall Constructed on the Deep-Cement-Mixed Ground (Part II: Internal Stability of the Improved Soil System)

허정원\* · 박옥주\*\* · 김영상\* · 허동수\*\*\*

Jungwon Huh\*, Ock-Joo Park\*\*, Young Sang Kim\* and Dong Soo Hur\*\*\*

**요 지 :** 외부안정성을 다룬 동반논문과 차별화하여, 이 논문에서는 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 내부안정성에 대한 정량적 위험도 평가를 위한 신뢰성해석 방법을 제안하였다. 내부안정성 위험도 평가를 위해 개량지반의 단지압, 전단강도 그리고 무개량토의 압출 파괴모드에 대해 MVFOSM, FORM 그리고 MCS를 적용하여 안정성을 검토하고 비교하였다. 심층혼합처리지반상 안벽의 내부안정성에 대한 신뢰성해석 결과, 흙-시멘트 개량체 압축강도의 변동성과 분포형태가 파괴확률에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 다른 확률변수들의 영향은 상대적으로 미미했다. 그러므로 흙-시멘트 개량체의 현장 압축강도에 대한 통계적 특성을 합리적이고 정확하게 결정하는 것이 중요하다.

**핵심용어 :** 한계상태함수, 신뢰성해석, 현장압축강도, 분포형태, 심층혼합처리지반

**Abstract :** A reliability analysis method is proposed in this paper to quantitatively evaluate the risk for internal stability of a quay wall constructed on the deep cement mixed ground, differentiating from the companion paper that mainly describes the external stability. Failure modes for toe pressure, shear strength of improved ground and extrusion of unimproved soft soil are investigated and compared in the risk estimation of internal stability using MVFOSM, FORM, and MCS. From the reliability analysis results for internal stability of a quay wall, the variance and distribution type of the compressive strength of Deep Mixed Soil-Cement appear to be very affective to the failure probability. On the other hand, other random variables seem to be relatively very insensitive to the probability of failure. It is therefore very important to rationally and accurately determine the probabilistic properties of the in-site compressive strength of Deep Mixed Soil-Cement.

**Keywords :** limit state function, reliability analysis, in-situ compressive strength, distribution type, deep-cement-mixed ground

## 1. 서 론

동반논문에서 기술하였듯이 최근 해안개발을 통한 공업단지 및 연관 주거시설, 컨테이너 부두건설 등의 해안구조물의 건설에서 해안매립을 통한 연약지반 개량공법으로 심층혼합처리 공법(DCM; Deep Cement Mixing Method)의 활용이 증가하고 있다. 이러한 심층혼합처리공법은 “시멘트계를 주로 하는 분말형태 혹은 물에 희석한 상태의 화학적 안정제를 지중에 공급하고 연약층의 점성토와 강제적으로 혼합함으로써 포졸란 반응 등의 화학적 고결작용을 이용하여 지반 중에 임의의 형

상의 견고한 안정처리토를 형성하는 연약지반 개량공법”(한국 지반공학회, 2003)으로, 심층혼합처리공법에 의한 지반개량 설계 시에는 흙-시멘트 시스템을 지중구조물로 고려하여 전체 구조물의 외적안정성 뿐만 아니라 외력에 의해 개량체에 발생하는 응력이 안정처리토의 허용압축응력과 허용전단응력을 초과하지 않도록 하는 내부안정성에 대한 검토가 절대적으로 필요하다. 개량체의 내부안정성과 관련된 가장 중요한 변수로는 시멘트와 혼합되어 개량된 흙-시멘트 개량체의 일축압축강도( $q_u$ )이다. 흙-시멘트 개량체의 현장 일축압축강도는 시멘트와 점성토의 화학반응에 의존하기 때문에 종래의 역학적 개량지

\*전남대학교 건설환경공학부(Corresponding author : Jungwon Huh, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea, jwonhuh@chonnam.ac.kr)

\*\* (주)경진엔지니어링 항만부(Kyung Jin Engineering Co., Busan 604-850, Korea, dhrwn2000@kj.eng.co.kr)

\*\*\*전남대학교 건설환경공학부(Dept. of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University, Yeosu 550-749, Korea, geoykskim@chonnam.ac.kr)

\*\*\*\*경상대학교 해양토목공학과(해양산업연구소)(Dept. of Ocean Civil Engineering, Gyeongsang National University, Tongyeong 650-160, Korea, dshur@gsnu.ac.kr)

반에 비하여 보다 많은 요인에 영향을 받으며 흙-시멘트 개량토의 현장 일축압축강도에 영향을 미치는 요소로는 ① 크게 대상토의 성질(점토광물의 종류, 이온교환능력, 유기물함유량, 흙과 간극수의 pH, 입도조성, 함수비, 액성한계와 소성한계 등) ② 혼합처리의 조건(안정재의 종류, 안정재의 품질, 첨가량, 재령, 혼합비 등) ③ 양생환경(온도, 습도) 등이 있다. 심층혼합처리와 관련된 기존 연구결과들을 종합하면 재령(材齡)이 길수록, 시멘트의 첨가량이 많을수록, 혼합의 비율이 높을수록, 원지반 점성토의 함수비가 낮을수록 개량토의 강도는 증가하는 것으로 보고되고 있으나 각 요인의 영향을 정량화하기는 매우 곤란하다. 따라서 혼합처리된 개량지반의 설계를 위해서는 실제 대상으로 하는 흙에 시멘트를 혼합하여 공시체를 제작하고 실내에서 일축압축강도를 구하는 방법이 가장 현실적이나 전술한 바와 같이 혼합방법과 양생환경에 따라서도 그 강도가 달라지기 때문에 실내에서 얻어진 실내 배합설계 결과와 동일하게 현장타설을 실시하더라도 현장에서 얻어지는 개량토의 일축압축강도에는 일정한 평균(mean)과 분산(deviation)이 반드시 존재하게 되어 Fig. 1과 같이 개량토의 현장 일축강도는 평균, 표준편차 및 분포형태로 표현되는 확률변수로 고려하는 것이 바람직하다(Kitazume et al., 2004; 도덕현 등, 1994).

따라서 본 논문에서는 신뢰성기반 설계의 구현을 위하여 심층혼합처리지반에 설치된 대표적인 해안구조물인 안벽을 대상으로, 내부안정성과 관련된 가장 중요한 설계변수인 현장 압축강도의 확률특성과 그 이외의 설계변수(하중관련 변수, 저항력 관련 변수, 모델링 변수 등)들의 불확실성을 정량적이고 합리적으로 고려할 수 있는 확률론적 신뢰성해석을 적용함으로써 내부안정성에 대한 대표적인 파괴모드인 개량지반의 단지압, 전단강도 그리고 무개량토의 압출에 대한 위험도를 정량적으로 평가하였으며 개량체 현장 압축강도의 변동성과 분포형태에 따른 영향을 검토하였다.

## 2. 개량체의 현장 압축강도에 대한 확률분포

현재 국내에서 수행되는 심층혼합처리공법의 설계에서는 개량체의 내부안정 검토의 기준이 되는 허용압축응력  $\sigma_{ca}$ 을 현장 일축압축강도  $q_{uf}$ 의 평균값(mean)으로부터 다음 식 (1)과 같이 결정하고 있다.

$$\sigma_{ca} = \frac{1}{F}(\alpha \cdot \beta \cdot \gamma \cdot q_{uf}) \quad (1)$$

여기서  $\sigma_{ca}$ 는 허용압축응력,  $F$ 는 안전율,  $\alpha$ 는 단면유효계수,  $\beta$ 는 중첩부분의 신뢰도계수,  $\gamma$ 는 현장강도계수,  $q_{uf}$ 는 현장처리토의 일축압축강도이다. 식 (1)에서 현장에 타설된 개량토에 대한 일축압축강도의 분산을 고려하기 위하여 현장강도계수  $\gamma$ 를 도입하고 있으며 해상공사의 경우 2/3, 육상공사의 경우 1/2를 일괄적으로 적용하고 있다. 이외에도 식 (1)에 포함되어 있는 안전율  $F$ 는 크리프, 반복재하의 영향을 고

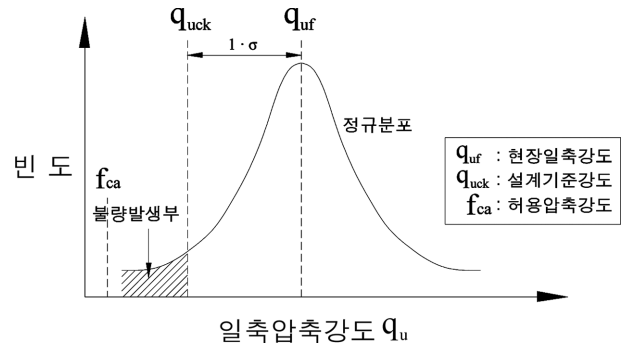


Fig. 1. 개량체의 현장 압축강도에 대한 확률분포 개념.

려함과 동시에 구조물의 중요성, 하중의 종류, 설계방법의 선정 및 재료의 신뢰성을 고려하여 적절한 값을 선정하도록 하고 있으며 상시의 경우 3.0, 지진 시에는 2.0을 사용하고 있다. 그러나 이와 같은 계수들은 다분히 경험적 판단에 기초한 것이며 전술한 바와 같은 다양한 요인에 의해 발생한 개량토의 강도에 대한 변동성과 분산을 고려하기에는 과도한 단순화(simplification)로 인한 많은 불확실성(uncertainty)이 포함되어 있다. 신뢰성이론(양영순 등, 1999)에 따르면 이러한 불확실성은 과도한 안전율의 사용을 불가피하게 할 뿐 아니라 비록 안전율을 크게 사용한다 하더라도 개량체에 존재하는 분산을 줄일 수 있는 것이 아니므로 비용의 증가만을 유도할 뿐 여전히 파괴가능성은 존재하게 된다. 따라서 이러한 단순화로 인해 발생하는 문제점을 극복하기 위해서는 현장에 타설되는 개량체의 일축압축강도를 단순 평균하여 사용하는 것에서 벗어나 Fig. 1에 표현된 바와 같이 일축압축강도의 확률적인 분포형상(distribution type)과 평균(mean), 분산(variation)을 고려할 수 있는 확률론적 신뢰성해석(probabilistic reliability analysis)의 적용이 불가피하다.

## 3. 신뢰성해석을 위한 구성요소

신뢰성해석은 설계 과정에 포함되는 여러 설계변수(개량체의 현장 압축강도, 구조 단면의 형상 및 재료특성, 현장조건 지반특성, 설계하중의 강도 및 작용위치 등)의 불확실성을 다양한 통계적 기법을 통하여 정량적으로 고려함으로써 구조수명동안 구조물의 안전성 또는 파괴가능성을 정량적이고 합리적으로 평가하는 과정이다. 이를 위해서는 구조안전성의 판단기준을 정의하는 한계상태함수를 대표적인 내부안정성에 대한 파괴모드인 개량지반의 단지압, 전단강도 그리고 무개량토의 압출에 대하여 정확히 수립하고 관련된 확률변수의 통계특성치를 올바르게 결정하는 것이 중요하다.

### 3.1 한계상태함수의 정식화

내부안정성에 대한 한계상태함수는 개량지반의 단지압, 전단강도 그리고 무개량토의 압출로 나누어 정의할 수 있다. 먼저 개량지반의 단지압에 대한 한계상태함수는 개량지반에 발

생하는 지반반력이 현장개량체의 압축강도를 초과하지 않는 조건으로, 평상시와 지진시로 나누어 각각 식 (2) 및 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$Z = q_u - \frac{\Sigma W_i + E_V}{B \cdot R_1} \left( 1 + \frac{6e}{B} \right) \quad (2)$$

$$Z = q_u - \frac{2(\Sigma W_i + E_V)}{3XR_1} \quad (3)$$

여기서  $q_u$ 는 흙-시멘트 개량체의 현장 압축강도,  $\Sigma W_i$ 는 유효중량,  $E_V$ 는 주동토압의 연직성분,  $e$ 는 편심량,  $X$ 는 합력의 작용위치,  $R_1$ 은 장벽의 비율,  $B$ 는 개량폭이다.

다음으로 개량지반의 전단강도에 대한 한계상태함수는 개량지반 내부에 발생하는 최대전단응력이 개량체의 전단강도를 초과하지 않는 조건으로, 장벽과 단벽에 대해 각각 식 (4)와 (5)로 정의하였다. 여기서 개량체의 전단강도는 압축강도의 1/2이며, 장벽과 단벽에 발생하는 최대전단응력은 Fig. 2의 개념도를 통해 계산할 수 있다.

$$Z = \tau - S_l = 0.5q_u \times A + W_l - V_l \quad (4)$$

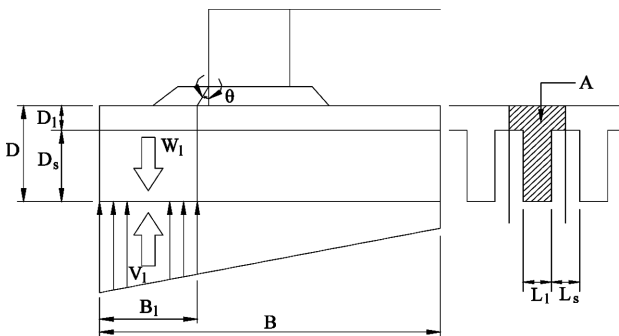
$$Z = \tau - S_s = D_s q_u - (T_i' + \gamma' h_m + \gamma_T D_s) L_s \quad (5)$$

여기서  $\tau$ 는 개량체의 전단강도,  $S_l$ 는 장벽의 최대전단응력,  $S_s$ 는 단벽의 최대전단응력,  $V_l$ 는 개량지반 전면에서  $B_l$ 점까지의 장벽에 작용하는 지반반력,  $W_l$ 는  $B_l$ 간의 전 중량(무개량토의 중량 제외),  $T_i'$ 는 마운드에 의한 분포후의 단지압,  $\gamma'$ 는 마운드의 단위체적중량,  $\gamma_T$ 는 개량지반의 단위체적중량,  $D_s$ 는 단벽의 높이,  $h_m$ 는 마운드의 폭이다.

마지막으로 무개량토의 압출에 대한 한계상태함수는 Fig. 3과 같이 장벽사이의 미개량토에 작용하는 불균형 하중(주동토압, 잔류수압, 지진시 관성력)의 조합이 개량체와 미개량토의 주변부착력을 초과하지 않는 조건으로, 평상시와 지진시로 나누어 각각 식 (6)과 (7)로 표현할 수 있다.

$$Z = \{2(L_s + D_i)c_u B + E_p'\} - (E_a' + h_w \gamma_w D_i L_s) \quad (6)$$

$$Z = \{2(L_s + D_i)c_u B + E_p'\} - (E_a' + k_h \gamma_2 B D_i L_s + h_w \gamma_w D_i L_s) \quad (7)$$



(a) 장벽

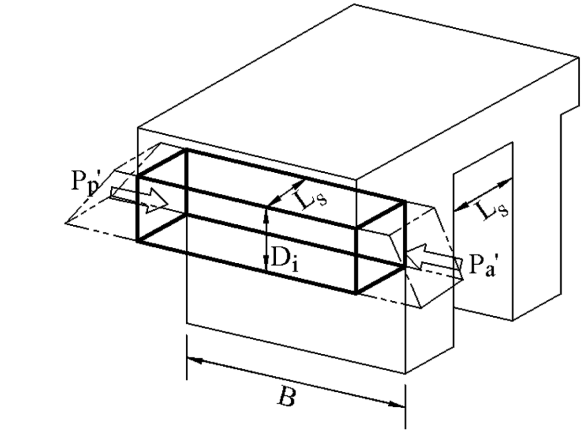


Fig. 3. 무개량토 압출 계산의 개념도.

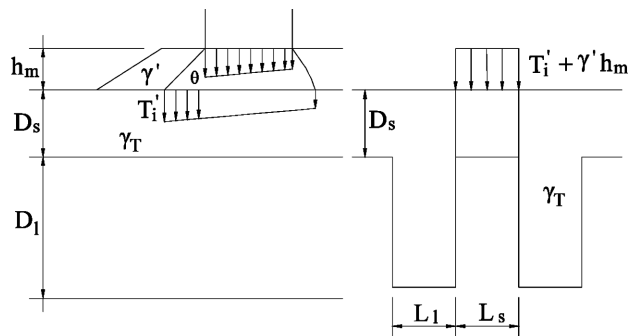
여기서  $D_i$ 는 단벽하부에서 검토단면까지의 깊이,  $L_s$ 는 단벽의 폭,  $c_u$ 는 미개량토의 평균전단강도,  $\gamma_2$ 는 미개량토의 단위체적중량,  $k_h$ 는 설계진도,  $h_w$ 는 잔류수위,  $E_a'$ 는 장벽사이의 미개량토에 작용하는 주동토압의 합력,  $E_p'$ 는 장벽사이의 미개량토에 작용하는 수동토압의 합력이다.

### 3.2 확률변수

식 (2)~(7)의 한계상태함수에 포함된 확률변수의 선정과 그 통계특성치인 평균, 변동계수(COV; Coefficient of Variation) 그리고 분포형태를 결정하는 것은 매우 중요하다(Haldar & Mahadevan, 2000; 허정원, 2003). 심층혼합처리지반에 설치된 안벽구조물의 내부안정성 평가를 위한 확률변수로는 국내회의 다양한 참고문헌(Nagao et al., 2001; 김동현 등, 2003; Kitazume et al., 2004)에 기초하여 자중 및 토압과 관련된 단위중량과 설계진도, 내부마찰각, 벽면마찰각, 점성토의 점착력, 잔류수위 등을 고려할 수 있다. 그리고 내부안정성 평가에서 가장 중요한 설계변수인 개량체 현장 압축강도는 실제 현장자료에 기초하여 산정해야 한다.

### 3.3 신뢰성해석 기법

확률론적 개념으로부터 정의되는 확률변수를 이용하여 신뢰성지수나 파괴확률과 같이 구조물의 안전성을 정량적으로 평



(b) 단벽

Fig. 2. 최대전단응력 계산의 개념도: (a) 장벽, (b) 단벽.

가할 수 있는 신뢰성해석은 해석방법과 수준에 따라 일반적으로 Level I, Level II 및 Level III로 분류된다. 신뢰성기반 설계의 구현을 위하여 Level II의 대표적인 방법인 MVFOSM (Mean Value First Order Second Moment)방법(Burcharth et al., 1994; Nagao et al., 1998) 그리고 분포형태를 고려하여 보다 정확한 해석결과와 산출이 가능한 FORM(First Order Reliability Method) (허정원 등, 2007) 및 Level III의 MCS (Monte Carlo Simulation)를 이용한 신뢰성분석을 본 논문에서 적용하였으며, 적용기법의 내용과 방법별 특징은 이미 연계논문(허정원 등, 2010)에서 상세히 기술하였으므로 여기서는 생략하였다.

#### 4. 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 내적 신뢰성해석 사례

이 논문에서는 Fig. 4와 같이 심층혼합처리공법을 이용하여 지반을 벽식으로 개량한 안벽구조물을 대상으로, 개량지반-안벽 구조계를 통합적으로 고려하여 식 (2)~(7)에서 정의한 개량지반의 압축강도, 전단강도 그리고 무개량토의 압축에 대한 한계상태함수를 통해 구조계의 위험도를 정량적으로 평가하는 내적 신뢰성해석을 수행하였다. 개량지반의 전단강도에 대해서는 장벽과 단벽으로 해석을 하였으며 무개량토의 압축은 Fig. 4와 같이 검토면 1(-16.5 ~ -22.5 m), 검토면 2(-16.5 ~ -31.0 m), 검토면 3(-16.5 ~ -40.0 m)으로 분류하여 내적 신뢰성해석을 수행하였다.

##### 4.1 현장 압축강도의 통계특성치

내부안정성과 관련된 가장 중요한 설계변수인 개량체의 현

장 압축강도는 국내시공자료(동아지질, 2004)로부터 얻은 네 지역(여수항, 부산부두, 부산신항, 울산 남방파제)의 현장 압축강도에 기초하여 압축강도의 분포형태 및 변동계수를 결정하고, 압축강도의 평균값은 예제에서 고려한 현장 압축강도의 설계값을 사용하였다. 네 지역에서 조사된 현장 압축강도 데이터로부터 얻은 실험적(empirical) 누적확률분포의 값을 대표적인 분포형태인 Normal Distribution, Lognormal Distribution, EVD(Extreme Value Distribution), Weibull Distribution에 대하여 정해진 축척을 적용하는 Probability Plotting 기법(Ang et al., 1984)을 이용함으로써, 각 확률분포에 대한 자료의 선형성을 비교하여 가장 적합한 확률분포의 형태를 결정하였다. 지면의 제약으로, 데이터의 수가 가장 많은 울산남방파제(data=42)에서 획득한 현장 압축강도의 분포형태를 Probability Plotting 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

해석 결과를 보면, 각 확률분포의 누적분포함수(CDF)와 데이터 간의 적합도가 Lognormal Distribution( $R^2=0.9797$ )일 때 가장 높게 나타났으나 Normal 분포와 EVD 분포와의 차이가 크지 않음을 알 수 있었다. 이상의 방법을 적용하여 네 지역(여수항, 부산부두, 부산신항, 울산 남방파제)에서 획득한 현장 압축강도의 분포형태를 포함한 통계특성치를 Table 1에 나타내었다.

네 지역의 현장 압축강도에 대한 통계특성치 결과를 보면, 지역 간의 압축강도의 평균과 변동계수가 큰 차이를 보이고 압축강도의 분포형태도 지역마다 조금씩 달리 나타났다. 따라서 내부안정성에 대한 신뢰성해석의 정확성을 높이기 위해서는 실제 현장자료에 기초하여 개량체의 현장 압축강도의 통계특성치를 결정해야 할 것으로 사료된다. 본 연구에서는 특정 안벽 구조물의 설계조건(동아지질, 2004)에 기초하여 압축강도의 평

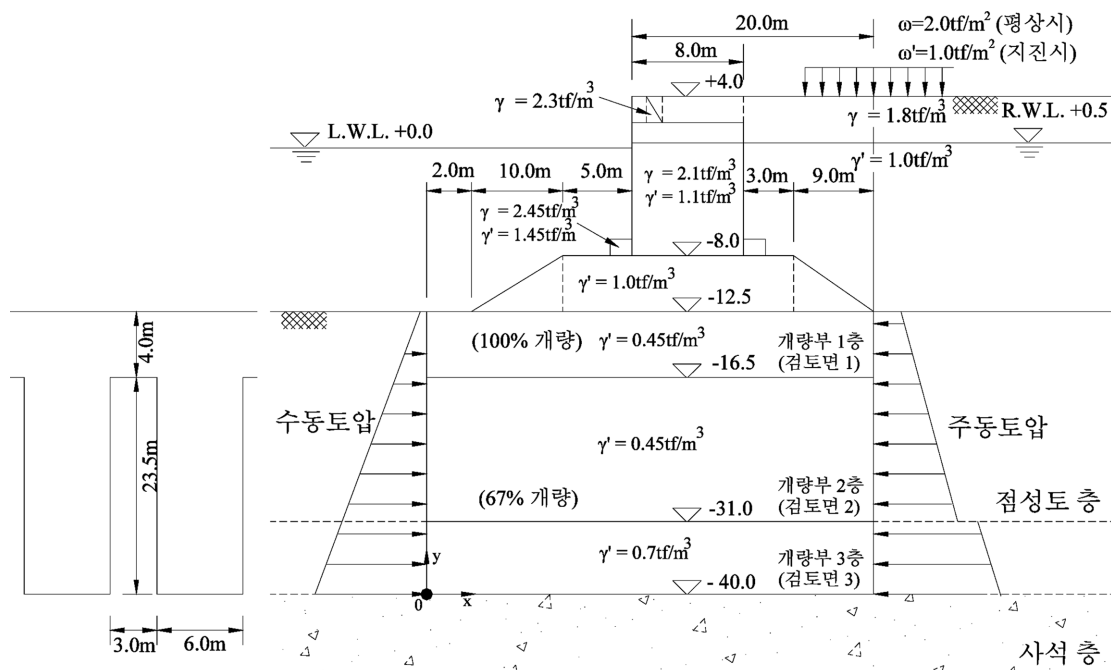


Fig. 4. 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 단면도(벽식).

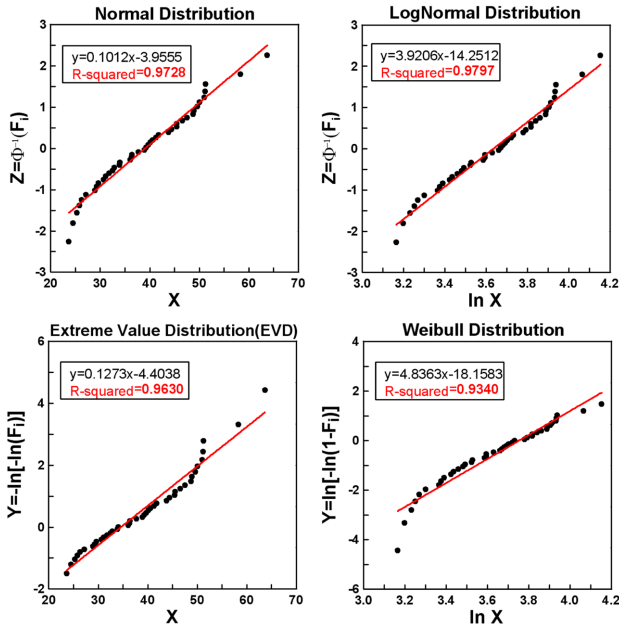


Fig. 5. 현장 압축강도의 분포형태에 대한 적합도 시험(울산남방파제).

Table 1. 현장 압축강도의 통계특성치

위치	Mean(kN/m <sup>2</sup> )	COV	Distribution Type
여수항	2943	0.254	N, Wei
부산부두	2351	0.375	Log, EVD, N
부산신항	3038	0.349	EVD, Log
울산 남방파제	3831	0.249	Log, N, EVD

균값을 1787 kN/m<sup>2</sup>로 정하였고 다만 변동계수는 국내 시공 사례를 반영하기 위해 네 지역의 평균치인 0.3을 사용하였으며 압축강도의 변동성에 따른 위험도의 영향을 검토하였다. 그 외 확률변수의 통계특성치는 관련된 조사자료(동아지질, 2004) 및 국내·외의 다양한 참고문헌(Nagao et al., 2001; 김동현 등, 2003; Kitazume et al., 2004)을 기초로 하여 Table 2에 정리하였다. 한편 신뢰성해석 기법간의 비교를 위해서 모든 확률변수는 정규분포로 가정하였고 신뢰성해석을 수행한 뒤, 확률분포와 변동계수의 영향에 대하여 검토하였다.

Table 3. 내부안정성에 대한 신뢰성해석 결과

파괴모드	해석방법	MVFOSM		FORM		MCS	
		$\beta$	$\approx P_f$	$\beta$	$\approx P_f$	$\approx P_f$	
개량지반의 단지압	평상시	2.650	0.00403	2.630	0.00427	0.00454	
	지진시	1.719	0.04277	1.719	0.04277	0.04228	
개량지반의 전단강도	장벽	평상시	3.057	0.00112	3.053	0.00113	0.00117
		지진시	2.733	0.00314	2.717	0.00329	0.00345
	단벽	평상시	3.067	0.00108	3.063	0.00109	0.00114
		지진시	2.962	0.00153	2.956	0.00156	0.00161
무개량토의 압출	검토면 I	평상시	9.038	0	9.038	0	0
		지진시	7.309	0	7.309	0	0
	검토면 II	평상시	9.392	0	9.392	0	0
		지진시	8.691	0	8.691	0	0
	검토면 III	평상시	9.446	0	9.446	0	0
		지진시	9.238	0	9.238	0	0

Table 2. 기본 확률변수의 통계특성치

확률변수		평균값	변동계수	
단위 중량 (kN/m <sup>3</sup> )	철근	케이슨(수중부)	10.9	0.02
	콘크리트	케이슨(공중부)	20.6	0.02
		상부콘크리트	22.5	0.02
지반 (사석, 자갈)	뒤채움토	배면(수중부)	9.80	0.04
		배면(공중부)	17.6	0.04
		기초마운드	9.80	0.03
	개량토(1, 2층)		4.41	0.04
			6.86	0.04
설계진도 $K_h$		0.10	0.25	
마찰계수 $f$		0.70	0.10	
내부마찰각( $^\circ$ )		30.0	0.10	
점착력 $c$ (kN/m <sup>2</sup> )		0.2Z (Z: 깊이)	0.10	
잔류수위(m)		0.50	0.20	

### 4.2 신뢰성해석 기법에 따른 차이점 검토

심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 내적 신뢰성해석을 위하여 앞서 정의된 한계상태함수와 확률변수를 고려하여 평상시와 지진시의 하중조합에 대하여 3가지 신뢰성해석방법(MVFOSM, FORM, MCS)을 적용한 해석결과를 Table 3에 나타내었다. MCS해석에 적용된 모사횟수는 1,000,000번이다.

해석결과 Table 3으로부터, 세 가지 신뢰성해석방법(MVFOSM, FORM, MCS)에서 일관된 해석결과를 얻을 수 있었으며, 지진시 개량지반의 단지압에 대한 파괴모드가 가장 위험한 파괴모드로 판명되었다. 한편 세 가지 신뢰성해석방법에서 유사한 결과를 얻은 것은 고려한 한계상태가 선형함수이며 모든 확률변수를 정규분포로 가정하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 비선형 한계상태함수나 확률변수가 비정규분포인 경우에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

### 4.3 현장 압축강도의 변동성 및 분포형태에 따른 영향

개량지반의 단지압과 전단강도에 대한 파괴모드에서 현장 압축강도의 변동성과 분포형태의 변화에 따른 위험도를 평가하여 그 영향을 검토하였다. 먼저 개량지반의 단지압과 전단강도에 대한 파괴모드에 대해, 현장 압축강도의 변동계수를 0에

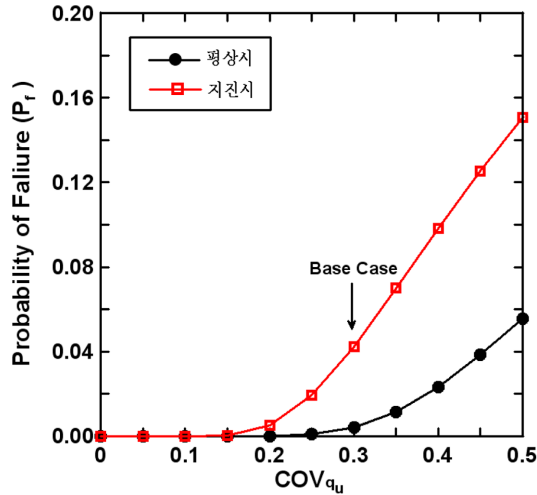


Fig. 6.  $q_u$ 의 COV 변화에 따른 파괴확률(단지압).

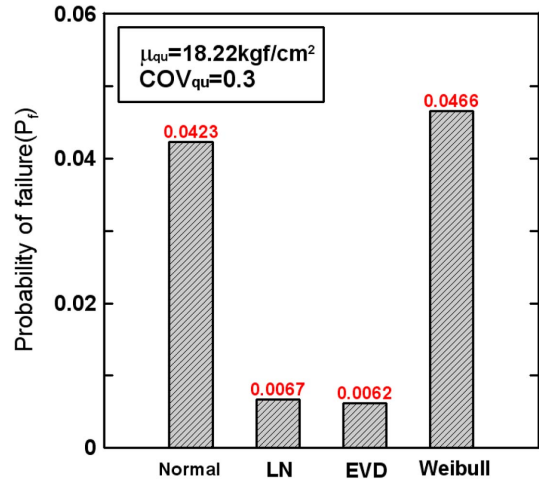


Fig. 8.  $q_u$ 의 분포형태 변화에 따른 파괴확률(단지압, 지진시).

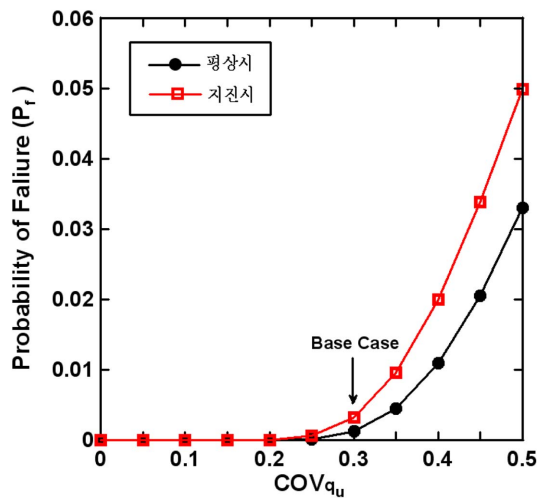


Fig. 7.  $q_u$ 의 COV 변화에 따른 파괴확률(전단강도, 장벽).

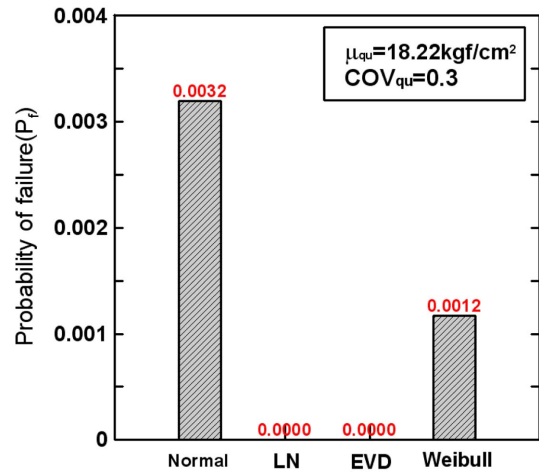


Fig. 9.  $q_u$ 의 분포형태 변화에 따른 파괴확률(전단강도, 장벽, 지진시).

서 0.1씩 증가시켜 0.5까지의 범위에 대한 위험도를 각각 Fig. 6과 7에 나타내었다.

Fig. 6과 7을 살펴보면, 개량체의 현장 압축강도의 변동계수가 클수록 파괴확률이 크게 발생하는 것을 볼 수 있다. 이는 현장 압축강도를 제외한 다른 설계변수(단위중량, 내부마찰각 및 벽면마찰각)의 변동계수가 상대적으로 매우 작으며, 저항과 관련된 현장 압축강도의 변동성이 크면 강도저하에 따른 위험성이 증가하기 때문이다. 즉 개량지반의 단지압과 전단강도에 대한 파괴모드에서는 현장 압축강도가 지배적인 설계변수라 할 수 있다. 다음으로 현장 압축강도의 분포형태를 대표적인 확률분포인 Normal, Lognormal, EVD, Weibull 분포로 변화시킬 때 개량지반의 단지압(지진시)과 전단강도(벽식\_지진시) 파괴모드에 미치는 영향을 검토하여 Fig. 8과 9에 나타내었다.

Fig. 8과 9의 해석결과를 보면, 압축강도의 분포형태에 따라 파괴확률이 크게 변하는 것을 알 수 있었다. 특히 개량지반의 전단강도에 대한 해석시 그 영향의 범위가 더욱 크게 나타났

다. 그러므로 내부안정성에 대하여 주요 설계변수로 판명된 현장 압축강도의 통계특성치인 특히 변동계수와 분포형태를 실제 현장 자료에 기초하여 결정하는 것이 매우 중요하다고 판단된다.

## 5. 결 론

현행 국내 해안-항만구조물의 경험적 안전율을 사용한 확정적 설계기준은 차후 국제표준화에 대응하기 위한 신뢰성에 기초한 성능설계법으로의 개정을 위하여 기초적 연구 및 개정작업이 진행되고 있으며 심층혼합처리지반에 설치된 해안-항만구조물에 대한 신뢰성기반 설계법의 적용도 필연적일 것으로 사료된다. 본 논문에서는 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 내부안정성에 대한 위험도를 평가하기 위하여, 기초-상부구조에 대한 주요 변수들의 불확실성을 정량적으로 취급할 수 있는 신뢰성해석기법을 제안하였으며 Level II 신뢰성기법인 MVFOSM 및 FORM 그리고 Level III 신뢰성기법인 MCS를 적용하여 내부안정성에 대한 대표적인 파괴모드인 개량지반의

단지압, 전단강도 그리고 무개량토의 압축에 대한 정량적 위험도를 평가하였다. 내적 신뢰성해석의 주요 결과로 먼저 세 신뢰성해석방법에서 일관된 해석결과를 얻었는데, 이는 고려한 한계상태가 선형함수이며 모든 확률변수를 정규분포로 가정하였기 때문인 것으로 판단된다. 다음으로 압축강도의 변동성과 분포형태에 따른 내부안정성의 위험도를 검토한 결과, 현장 압축강도의 변동성이 클수록 강도저하에 따른 위험성이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 현장 압축강도의 분포형태를 다르게 고려하였을 때 파괴확률이 크게 변하였다. 이상의 결과로부터 확률론적 신뢰성해석을 통하여 위험도를 정량적으로 평가하기 위해서는 실제현장자료에 기초하여 확률변수의 통계특성치를 합리적으로 선정하는 것이 필요하다. 특히 내부안정성의 가장 중요한 설계변수인 현장 압축강도에 대해서는 실제 현장에서 획득한 흙-시멘트 개량체의 현장 압축강도에 대한 통계특성치인 평균 및 변동계수와 함께 정확한 분포형태를 선정 후 신뢰성해석을 통해 가장 합리적이고 경제적인 설계단면이 산출되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0077342).

## 참고문헌

- 김동현, 윤길림, 박우선 (2003). 지진토압의 위상차를 고려한 케 이슨 안벽의 신뢰성해석. 한국해양-해양공학회지, 15(4), 242-248.
- 도덕현, 이인형, 조현래 (1994). 심층혼합처리공법에 의한 연약 지반상의 물양장 기초의 시공사례. 한국지반공학회논문집, 93-108.
- 양영순, 서용석, 이재욱 (1999). 구조신뢰성공학, 서울대학교출판부, 서울.
- (주) 동아지질 (2004). 시멘트계 심층혼합처리공법의 설계와 시

- 공 매뉴얼.
- 한국지반공학회 (2003). 건설교통부제정 구조물기초설계기준 해설.
- 허정원 (2003). 시화호 조력발전소 건설공사 기본설계를 위한 구조신뢰성해석 및 안전도평가에 대한 최종 연구결과보고서. 연구보고서, 여수대학교 수산과학연구소.
- 허정원, 박옥주, 김영상, 허동수 (2010). 심층혼합처리지반에 설치된 안벽의 신뢰성해석(Part I: 개량지반의 외부안정). 한국해양-해양공학회논문집, 22(2), 79-87.
- 허정원, 박재현, 김경준, 이주형, 광기석 (2007). 국내 항타강관 말뚝 설계법의 신뢰성평가, 한국지반공학회논문집, 23(12), 61-73.
- Ang, A.H. and Cornell, C.A. (1974). Reliability bases of structural safety and design. *Journal of Structural Engineering Division, ASCE*, 100(9), 1755-1769.
- Burcharth, H.F., Sorensen, D. and Christiani, E. (1994). On the evaluation of failure probability of monolithic vertical wall breakwaters., *Wave Barriers in deepwaters*, 458-469.
- Haldar, A. and Mahadevan, S. (2000). *Probability, Reliability and Statistical Methods in Engineering Design*. John Wiley & Sons, New York, N.Y.
- Kitazume, M., Nagao, T., Furuta, G., Nozu, M. and Tsuijioka, S. (2004). Study on Performance Based Deep Mixing Method as the Base of Port and Harbor Structure. 39th JGS National Conference, 27-28.
- Nagao, T., Okubo, N., Kawasaki, S. and Hayashi, Y. (1998). Evaluation of safety of breakwaters by the reliability based design method (3rd report: Concluding the applicability of reliability based design method). *Rep. of the Port and Hab. Res. Inst.*, 37(2), 132-176.
- Nagao, T., Yoshinami, Y., Sanuki, T. and Kamon, M. (2001). 케-손식안벽의 외적안정にする信頼性設計法の適用. *構造工學論文集*, 47(A), 293-304.

원고접수일: 2010년 2월 11일

수정본채택: 2010년 3월 16일

게재확정일: 2010년 3월 23일