

# 울릉(사동)항 2단계 동방파제 축조공사 중 해성퇴적모래층 강도정수 평가



김 흥 석  
알지오 이엔씨  
설계사업부 차장  
(hskim@r-geo.com)



김 철 환  
알지오 이엔씨  
설계사업부 이사  
(chkim@r-geo.com)



하 태 균  
㈜포스코건설  
토목설계그룹 과장  
(hatg@poscoenc.com)



김 래 현  
㈜포스코건설  
토목설계그룹 과장  
(presidentkorea@poscoenc.com)

## 1. 서문

울릉도는 우리나라 동해의 유일한 도서군으로 영토 주권의 상징인 독도의 모섬이자 세계적인 녹색 관광자원의 보고로서 21세기 바다시대를 여는 해양과학산업의 전초기지이다.

울릉도와 내륙 간의 관문으로 현재 도동항이 운영 중에 있으나 시설규모가 부족한 실정이며, 특히, 독도 영유권 분쟁에 대한 영토관리 강화사업의 일환으로 해경 경비함 및 해군 함정의 울릉도 내 상시 정박이 가능한 항만 개발이 필요시 되고 있다.

이러한 이유로 여객부두와 해경 및 해군 전용부두가 2단계로 나뉘어 울릉(사동)항에 계획되었으며, 현재 1 단계 공사는 완료된 상태이고, 2단계 부두공사에 앞서 동방파제 축조공사가 대안설계로 발주되어 포스코건설에서 건설 중이다.

현재 건설 중인 울릉(사동)항 2단계 동방파제의 상부 구조물은 케이슨 혼성제이며 하부 기초지반은 해성 퇴적모래층으로, 모래지반 상에 축조되는 케이슨 혼성제의 경우는 편심경사하중에 의한 지지력 검토에 의해 단면이 결정되는 경우가 많아 모래층의 강도정수 평가가 중요하다.

일반적으로 모래층의 강도정수는 표준관입시험 N값을 이용한 경험식으로 산정하여 적용하고 있으나, N값이 동일하면 심도에 관계없이 동일한 값으로 산정된다. 표준관입시험 N값은 시료채취기를 지반 내 30cm 관입시키는데 필요한 해머의 타격횟수로, 표층은 유효응력의 영향이 작아 N값이 작게 측정된다. 이러한 문제점 때문에 N값 보정 항목 중에는 유효응력에 대한 보정계수( $C_N$ )가 제시되어 있으나 이 보정계수는 액상화 평가시에만 적용하고 있다. 따라서, N값을 이

용한 경험식으로 산정한 강도정수는 전 심도가 동일한 N값으로 측정되었다면, 표층이나 심부 모두 동일하게 산정되지만, 표층은 유효응력의 영향으로 N값이 작게 측정된 것이므로 실제 강도보다 작게 산정된다.

편심경사 하중을 받는 기초 지지력의 파괴 활동면은 주로 해저면 부근에 발생하므로, 표층 강도에 의해 단면이 결정된다. 이러한 이유로 항만 및 어항 설계기준에는 지지력 검토시 기초지반의 강도정수는 유효응력의 영향을 고려하여 산정하도록 규정하고 있으나 현재까지는 유효응력의 영향을 고려한 강도정수 평가가 곤란하여 강도가 저평가되는 N값에 의한 경험식의 강도정수를 적용하여 단면을 계획해 왔다.

이러한 문제점을 개선하기 위해 울릉(사동)항 2단계 동방파제 축조공사 대안설계에서는 대형 Calibration

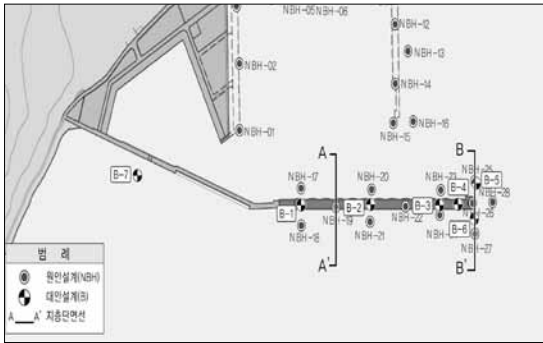
Chamber Test, 삼축압축시험 등을 수행한 후 유효응력의 영향을 고려한 강도정수를 산정하여 단면계획을 수립하였다.

## 2. 사업구간 지층현황 및 구역구분

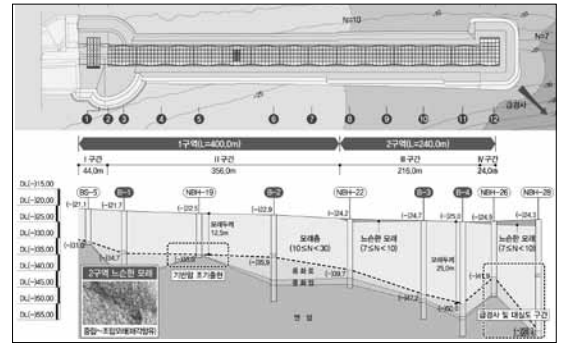
### 2.1 지층현황

총 19공(원안설계 12공, 대안설계 7공)의 시추공에 대해서 지층분석을 수행하였으며, 분석결과 과업구간은 해성퇴적모래층, 풍화토, 풍화암 및 연암 순으로 분포하고 있다.

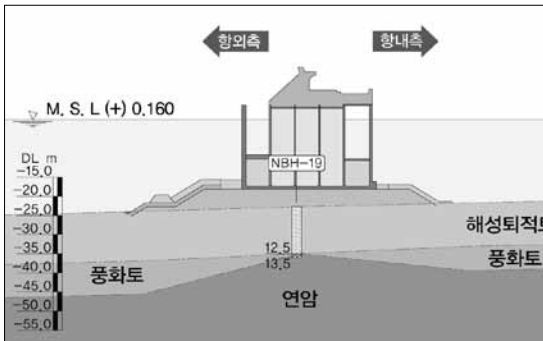
해성퇴적모래층은 패각을 함유한 SM, SP-SM으로



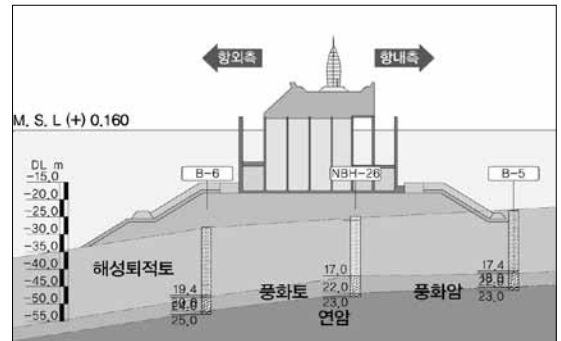
a. 지반조사 위치도



b. 지층단면도



c. A-A'단면



d. B-B'단면

그림 1. 지층현황

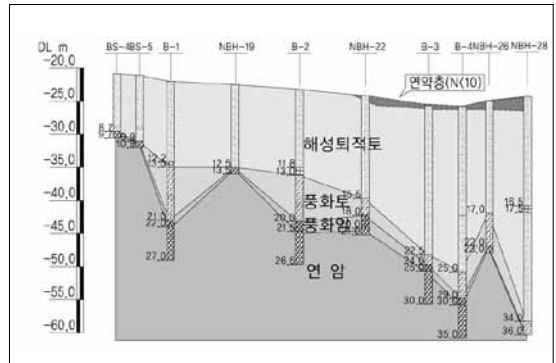
구성되어 있으며 11.0~34.0m 두께로 분포하며, N값은 7/30~34/30의 범위이다.

지층분포 특이사항으로 횡단 A-A'는 침하 대상층

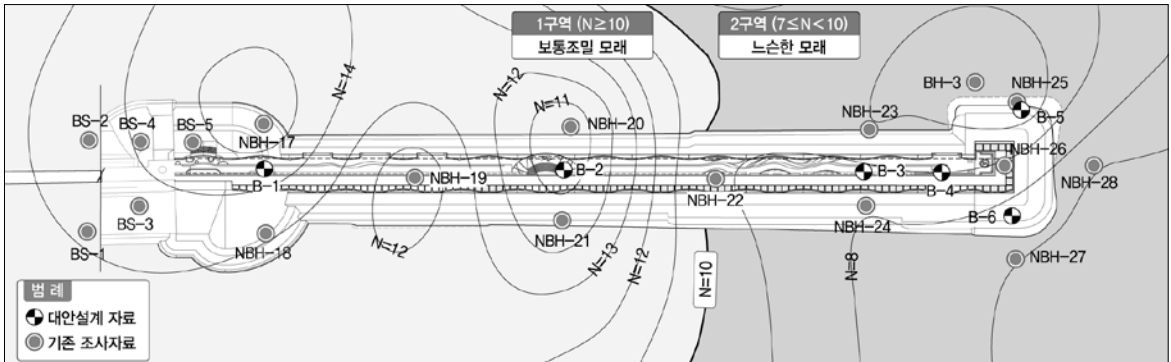
두께가 급변하는 구간이며, 횡단 B-B'는 항외측으로 심도가 깊어지는 경사 급변구간이다.



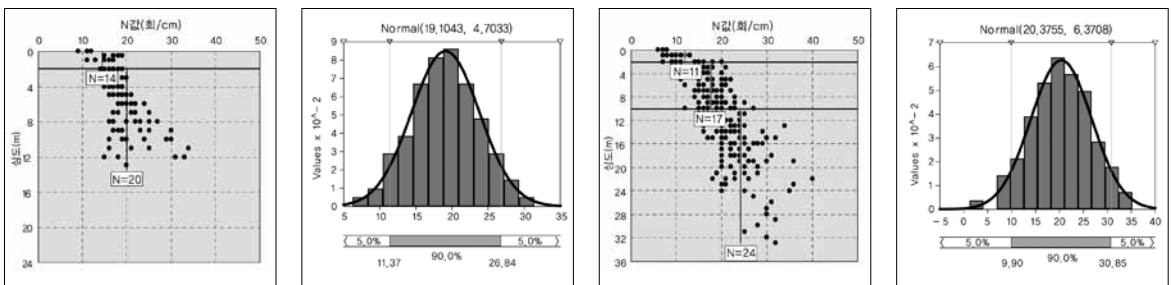
a. 연약 해성퇴적층 분포지역



b. 지층중단에 의한 수평적 분석



c. 평면적 유사성 구분



1구역

2구역

d. 심도별 유사성 구분

그림 2. 구역구분(계속)

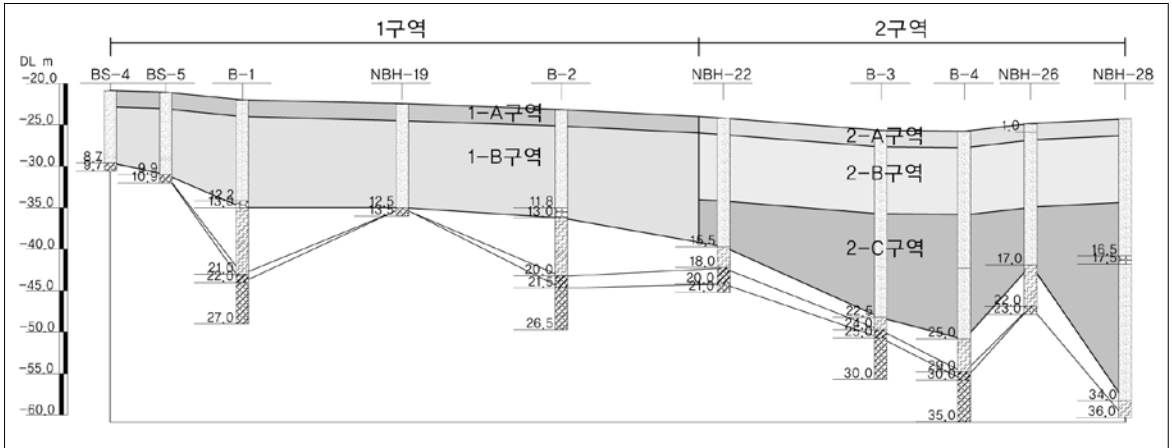


그림 2. 구역구분

## 2.2 구역구분

표층부에 대한 평면적 유사성을 분석한 결과 NBH-22를 기준으로 좌측을 1구역, 우측을 2구역으로 구분 하였으며, 1구역은 보통 조밀한 상태, 2구역은 느슨한 상태이다.

심도별 유사성 분석 결과, 1구역은 상부 2.0m까지 평균 N값이 14, 2.0m 하부 평균 N값은 20으로 분석 되었으며, 2구역은 상부 2.0m까지 평균 N값이 11, 2.0~10.0m는 평균 17, 10.0m 하부는 평균 24로 분석 되었다. 분석 결과를 바탕으로 1구역은 심도 2.0m기준으로 1-A와 1-B, 2구역은 심도 2.0m와 10.0m기준으로 2-A, 2-B, 2-C로 구역구분을 세분화 하였다.

## 3. 해성퇴적모래층 강도정수 평가

울릉(사동)항 해성퇴적모래층의 합리적인 강도정수를 평가하기 위하여 우선 1차로 상대밀도 제안식을 비교하여 Meyerhof 제안식과 Terzaghi 제안식을 선정 하였으며, 2차로 1차에서 선정한 상대밀도 제안식과 대형 Calibration Chamber Test 결과에 의한 상대밀도 관계식을 비교분석하여 구역별로 지지력 검토시와

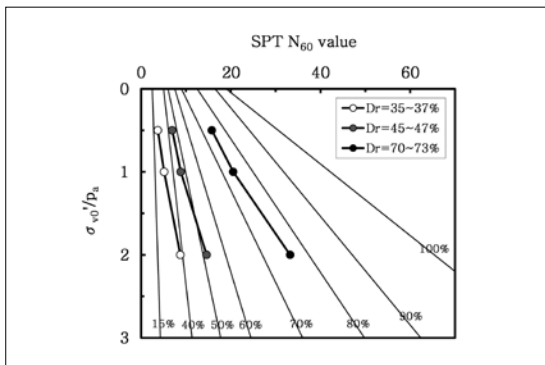
원호활동 검토시의 현장 상대밀도를 결정하였다. 이와 함께 상대밀도별 삼축압축시험을 수행하여 내부마찰각-상대밀도의 관계식을 도출하고, 안정성 검토항 목별 현장 상대밀도와 내부마찰각-상대밀도의 관계 식을 이용하여 현장 퇴적모래층의 강도정수를 평가하 였다. 마지막으로 안정성 항목별로 평가한 강도정수 는 설계기준, 제안식의 강도정수와 비교하여 적정성 을 확인하였다.

## 3.1 상대밀도 제안식 선정

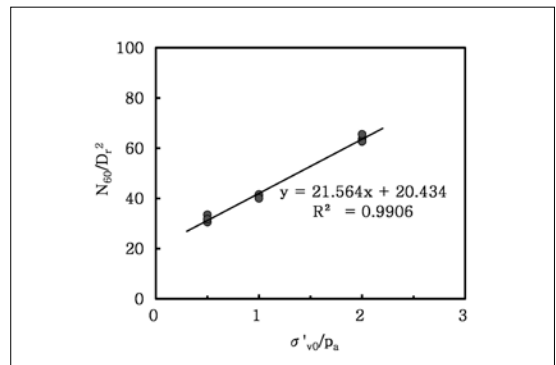
Terzaghi, Meyerhof, Cubrinovski, Kulhawy and Mayn의 4개의 상대밀도 제안식에 대해서 적용 성을 검토하기 위해, 심도 20m 전 층의 N값을 10으로 가정하여 심도별 상대밀도 분포를 산정하였다. 심도 별 상대밀도 산정 결과 N값 만을 고려하는 Terzaghi 제안식의 경우 다른 제안식에 비해 상대밀도가 작으 며 심도에 관계없이 일정하였다. 유효응력의 영향을 고려하는 Meyerhof 제안식의 경우 상부 상대밀도 는 Terzaghi 제안식보다 크며, 심도가 깊어질수록 작 아지다가 Terzaghi 제안식에 수렴하는 경향을 보였 다. Cubrinovski, Kulhawy and Mayn 제안식의 경 우 상부 상대밀도는 Terzaghi 제안식보다 크나, 심도

표 1. 상대밀도 제안식 검토

구분	영향요인	제안식 검토	상대밀도 분포(N=10)
Terzaghi	N	$D_r = (N_{60}/60)^{0.5}$	
Meyerhof	N, 유효응력	$D_r = 21(N_{60}/((\sigma'_{vo}/98)+0.7))^{1/2}$	
Cubrinovski	유효응력 N, D <sub>50</sub>	$D_r = [(N_{60}(0.23 + \frac{0.06}{D_{50}})^{1.7} \times (\frac{98}{\sigma'_{vo}})^{1/2})/9]$	
Kulhawy and Mayn	N, D <sub>50</sub> , 과압밀비, 퇴적시간	$D_r = [(N_{60})/(C_p C_A C_{OCR})]^{0.5} \times 100$	



Holtz and Gibbs(1979)결과와 비교



$N_{60}/D_r^2 - \sigma'_{vo}/p_a$  관계

그림 3. 대형 Calibration Chamber Test 결과

가 깊어지면 Terzaghi 제안식보다 작은 값을 보였다. 이는 유효응력의 영향 이외에  $D_{50}$ , 과압밀비 등의 영향이 고려되었기 때문이며 추가 인자들의 신뢰성 문제로 현장 상대밀도 결정시에는 Terzaghi 제안식과 Meyerhof 제안식만 적용하기로 했다.

### 3.2 현장 상대밀도 결정

울릉(사동)항 모래지반의 유효응력의 영향을 고려한 강도정수 평가를 위해 수행한 대형 Calibration Chamber Test는 상대밀도 3case(40, 60, 80%), 구속압 3case(50kPa, 100kPa, 200kPa)를 조합하여 총 9case로, 시료 조성 후 표준관입시험을 수행하여  $N_{60}$ 을 측정하였다. 상대밀도별 구속압별  $N_{60}$  측정결

과를 Holtz and Gibbs(1979)가 제안한 관계도에 도시해 보면, 비교적 유사한 결과를 보여 신뢰성 있음을 확인하였으며,  $N_{60}/D_r^2 - \sigma'_{vo}/p_a$ 의 관계로 부터 상대밀도- $N_{60}$ -구속압의 관계식을 도출하였다.

Terzaghi 제안식, Meyerhof 제안식, 대형 Calibration Chamber Test 관계식에 대해 각 시추공별 상대밀도 분포를 산정해 보면 유효응력의 영향을 고려하지 않는 Terzaghi 제안식이 가장 작은 상대밀도를 나타내며, 유효응력의 영향을 고려하는 Meyerhof 제안식이 가장 큰 상대밀도를 나타냈다. 그리고, 역시 유효응력의 영향을 고려하는 대형 Calibration Chamber Test 관계식에 의한 상대밀도가 Meyerhof 제안식보다 보수적인 값을 보였다.

편심경사 하중을 받는 기초의 지지력은 파괴 활동면

울릉(사동)항 2단계 동방파제 축조공사 중 해성퇴적모래층 강도정수 평가

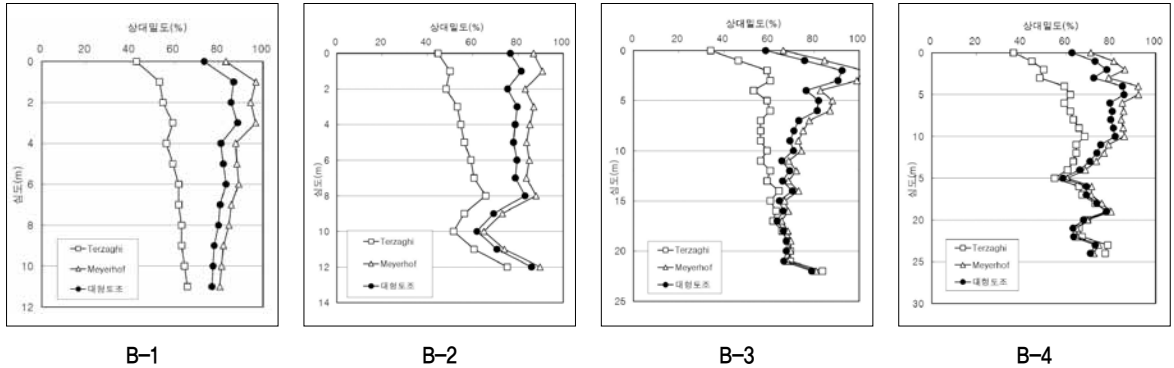


그림 4. 시추공별 상대밀도 비교

표 2. 구역별 상대밀도

구분	심도	대표 N값	지지력 검토시 (대형 Calibration Chamber Test 관계식)	원호활동 검토시 (Terzaghi 제안식)
1구역	0~2m	14	80.0%	49.7%
	2m 이상	20	75.9%	58.5%
2구역	0~2m	11	69.5%	43.3%
	2~10m	17	71.8%	53.6%
	10m 이상	24	66.3%	62.6%

이 알기 때문에 유효응력의 영향이 크므로 유효응력의 영향을 고려해야 하며, 원호활동의 경우 파괴 활동면이 깊기 때문에 유효응력의 영향이 크지 않아 일반적으로 고려하지 않는다. 따라서, 편심경사 하중을 받는 기초의 지지력 검토시는 유효응력의 영향이 고려되며, Meyerhof 제안식 보다는 보수적인 대형 Calibration Chamber Test 관계식을 적용하고, 원호활동 검토시는 유효응력의 영향을 고려하지 않는 Terzaghi 제안식을 적용하여 구역별 상대밀도를 산정하였으며, 그 결과는 표 2와 같다.

### 3.3 현장 강도정수 산정

내부마찰각-상대밀도 관계식을 도출하기 위해 상

대밀도 40, 60, 80%의 모래시료 조성 후 직접전단시험, 삼축압축시험을 수행하였다. 시험결과 직접전단시험의 내부마찰각은 패각의 영향으로 다소 높은 값을 나타내어 배제하고, 삼축압축시험 결과만을 이용하여 내부마찰각-상대밀도 관계식을 도출하였으며, 이 값은 기존 설계사례의 범위내의 값을 나타냈다.

삼축압축시험 결과로 도출된 내부마찰각-상대밀도 관계식을 이용하여 안정성 검토항목별로 내부마찰각을 산정하였으며, 그 결과는 표 3과 같다.

### 3.4 강도정수 적정성 검증

대형 Calibration Chamber Test 관계식에 의한 내부마찰각(지지력 검토시 강도정수)은 항만 및 어항설

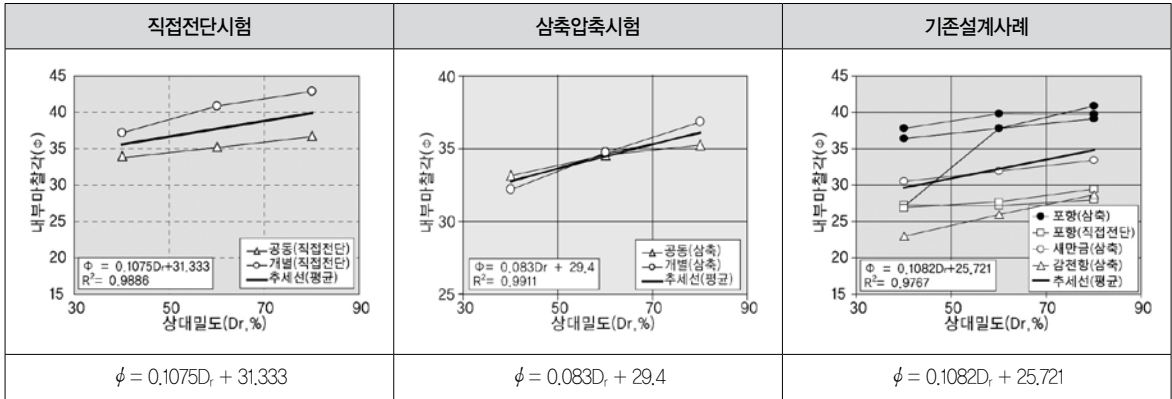


그림 5. 내부마찰각 관계식 도출

표 3. 구역별 상대밀도-내부마찰각

구분	심도	지지력 검토시(대형 C.C.T 관계식)		원호활동 검토시(Terzaghi 제안식)	
		상대밀도(%)	내부마찰각(°)	상대밀도(%)	내부마찰각(°)
1구역	0~2m	80.0	36.0	49.7	33.0
	2m 이상	75.9	35.0	58.5	34.0
2구역	0~2m	69.5	35.0	43.3	32.0
	2~10m	71.8	35.0	53.6	33.0
	10m 이상	66.3	34.0	62.6	34.0

표 4. 내부마찰각 제안식과 비교

구분	심도	대표 N값	지지력 검토시			원호활동 검토시	
			항만 및 어항 설계기준	Thorburn & Hason	대형 C.C.T 상관식	기존 경험식	Terzaghi 제안식
1구역	0~2m	14	45°	34°~37°	36.0°	31.2°~33.0°	33.0°
	2m 이상	20	45°	36°	35.0°	32.9°~35.5°	34.0°
2구역	0~2m	11	45°	32°~35°	35.0°	29.8°~31.5°	32.0°
	2~10m	17	45°	32°~35°	35.0°	32.0°~34.3°	33.0°
	10m 이상	24	45°	32°~35°	34.0°	34.0°~37.0°	34.0°

계기준 제시값, Thornburn & Hason(1974) 제안식에 의해 산정한 값과 비교하였으며, Terzaghi 제안식에 의한 내부마찰각(원호활동 검토시 강도정수)은 경

험식에 의해 산정한 값과 비교하였다.

대형 Calibration Chamber Test 관계식에 의한 내부마찰각은 항만 및 어항 설계기준에서 제시한 45°

보다는 다소 보수적인 값을 보이며, Thornburn & Hason(1974) 제안식에 의한 값과는 유사한 값을 보였다.

Terzaghi 제안식에 의한 내부마찰각은 기존 경험식(Dunham, Ohsaki, Terzaghi-Peck)에 의한 값과 유사한 값을 보였다.

#### 4. 맺음말

울릉(사동)항 2단계 동방파제의 기초지반은 해성퇴적모래층으로, 항만 및 어항 설계기준에는 편심경사 하중을 받는 기초지반의 지지력 검토시 모래층의 강도정수는 유효응력의 영향을 고려하여 산정하도록 규정하고 있다. 본 대안설계에서는 대형 Calibration Chamber Test와 삼축압축시험 등을 수행하여 유효응력의 영향을 고려한 강도정수를 산정하였으며, 산정된 강도정수는 설계기준과 제안식에 의한 값과 비교하여 적정성을 검증하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- ① 모래층의 강도정수 산정에 앞서 상대밀도 평가가 선행되어야 하며, 상대밀도는 N값 뿐만아니라 유효응력의 영향을 받는다. 동일한 N값일 경우 표층은 유효응력이 작아 상대적으로 상대밀도가 크며, 심부로 갈수록 유효응력이 커 상대적으로 상대밀도가 작다. 편심경사 하중을 받는 기초의 지지력은 파괴 활동면이 얇은 경우가 대부분이므로

유효응력의 영향을 고려한 상대밀도 평가가 요구된다.

- ② 울릉(사동)항 해성퇴적모래층에 대해서 유효응력의 영향을 고려한 상대밀도- $N_{60}$ -구속압의 관계식을 도출하기 위해 대형 Calibration Chamber Test를 수행하였으며, 시험결과는 Holtz and Gibbs(1979)가 제안한 관계도와 유사한 결과를 나타냈다.
- ③ 유효응력의 영향을 고려할 경우(지지력 검토시, 대형 Calibration Chamber Test 관계식 적용) 표층 2m의 상대밀도는 69.5%~80.0%, 내부마찰각은 35.0°~36.0°로 검토되었으며, 유효응력의 영향을 고려하지 않을 경우(원호활동 검토시, Terzaghi 제안식 적용) 상대밀도는 43.3%~49.7%, 내부마찰각은 32.0°~33.0°로 검토되었다. 검토결과 유효응력의 영향 고려 여부에 따라 강도정수 차이가 크므로 안정성 검토항목별로 강도정수를 구분할 필요가 있다.
- ④ 유효응력의 영향을 고려한 내부마찰각(지지력 검토시, 대형 Calibration Chamber Test 관계식 적용)은 Thornburn & Hason(1974) 제안식의 내부마찰각과 유사한 값을 보이며, 유효응력의 영향을 고려하지 않은 내부마찰각(원호활동 검토시, Terzaghi 제안식 적용)은 기존 경험식(Dunham, Ohsaki, Terzaghi-Peck)의 내부마찰각과 유사한 값을 보여 산정된 강도정수의 적정함을 확인할 수 있었다.