

## 제주연안 퇴적층의 고결 평가

### Evaluation of Cementation Effect of Jeju Coastal Sediments

이 문 주<sup>1</sup> Lee, Moon-Joo

김 재 정<sup>2</sup> Kim, Jae-Jeong

심 재 범<sup>3</sup> Shim, Jai-Beom

임 채 근<sup>4</sup> Lim, Chai-Geun

이 우 진<sup>5</sup> Lee, Woo-Jin

#### Abstract

The Jeju sand was sampled from the beach in Jeju Island and its basic properties were analyzed. The cementation effect of Jeju coastal sediments was evaluated from in-situ tests such as SPT, CPT, and the Suspension-PS test. It was shown from test results that the Jeju sand has high extreme void ratios due to the angularity of grains and the intra-particle voids of hollow particles, similar to typical calcareous sands. From cone penetration test in the calibration chamber, it was found that the cone resistance( $q_c$ )-relative density( $D_R$ )-vertical effective stress( $\sigma_v'$ ) relation of Jeju sand almost matches that of high compressible quartz sand. However, the  $q_c$ - $D_R$ - $\sigma_v'$  correlation suggested for uncemented Jeju sand overestimates the relative density of coastal sediments of Jeju Island due to the cementation effect. From the analysis of the relation of cone resistance, N value, and small strain shear modulus measured in-situ, it seems reasonable to assume that the coastal sediment of Jeju Island is a naturally cemented one.

#### 요 지

본 연구에서는 제주특별자치도 강정항 인근 해역에서 채취한 해사의 기본특성을 분석하고, 실내 챔버시험으로부터 미고결 제주해사의 콘선단저항-상대밀도-연직구속압의 관계를 결정하였다. 또한 현장 표준관입시험, 콘관입시험, Suspension-PS 검층을 수행하여 제주인근 해역 퇴적층의 고결가능성을 평가하였다. 시험결과, 제주해사는 입자의 각진 정도가 크고 입자표면과 내부에 공극이 발달하여 최대, 최소간극비가 큰 탄산염 모래의 특성을 가지고 있었으며, 큰 압축성을 가진 규산염 모래와 유사한 콘선단저항 분포를 나타내었다. 그러나 미고결 제주해사의  $q_c$ - $D_R$ - $\sigma_v'$  관계는 제주인근 해역 퇴적층의 상대밀도를 과대평가하였다. 관입시험(CPT, SPT) 결과와 Suspension-PS 시험에 의한 미소변형전단탄성계수를 비교한 결과, 제주인근 해역의 퇴적층은 고결 가능성이 매우 높은 것으로 확인되었다.

**Keywords :** Calcareous sand, Cementation, Cone resistance, Jeju sand, N value, Small strain shear modulus

#### 1. 서 론

탄산염 모래(calcareous sand)는 연체동물과 녹조류

의 껍데기나 산호와 같은 해안 유기물이 침전하여 생성된 모래로써, 주 구성성분은 탄산칼슘( $CaCO_3$ )이다. 탄산염 모래는 일반적인 육지의 규산염 모래(siliceous

1 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 BK 박사후연구원 (Member, Research Scholar, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)  
2 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ.)  
3 정회원, 삼성물산 토목사업본부 토목ENG팀, 상무 (Member, Director, Samsung C&T Corporation)  
4 정회원, 알지오이엔씨, 이사 (Member, Director, RGEO Engrg. & Construction)  
5 정회원, 고려대학교 건축·사회환경공학부 부교수 (Member, Associate Prof., School of Civil, Environmental, and Architectural Engrg., Korea Univ., woojin@korea.ac.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2010년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

sand)와 비교하여 지반공학적 특성이 매우 상이하기 때문에, 최근의 많은 연구를 통해 탄산염 모래의 특성이 규명되고 있다(Coop 1990; Hyodo et al. 1996; Ismail 2000; Airey et al. 1988; Sharma and Fahey 2004; Golightly and Hyde 1988; Kaggwa 1988; Airey and Fahey 1991). 현재까지 알려진 탄산염 모래의 특징으로는, 우선 탄산염 모래는 각진 입자이며 내부에 기공이 발달해 있기 때문에 일반적인 육상 모래보다 느슨한 상태로 조성된다. 또한 규산염 모래에 비해 입자 자체의 강도가 약하기 때문에 압축이나 전단에 쉽게 파쇄되며, 육상모래보다 높은 마찰각을 가지지만, 탄산염 모래의 내부마찰각은 높은 구속압에서 발생하는 입자 파쇄로 인해 점차 감소하는 것으로 알려지고 있다 (Golightly and Hyde 1988). 또한 탄산염 모래 퇴적지반은 느슨한 상태로 조성될 뿐만 아니라 비교적 낮은 압력에서도 입자파쇄가 발생하기 때문에 액상화에 취약하다(Hyodo et al. 1996). 국내에서는 제주 해안지역에 탄산염 모래가 주로 분포하는 것으로 알려지고 있으나 이에 대한 지반공학적 접근은 미진한 실정이다. 남정만 등(2007)은 제주 해안지역에 분포하는 26종류의 모래를 분석하여 제주 해안 모래층은 화산암류가 풍화되어 형성된 육상기원의 규산염 모래와 조개 등의 어패류가 풍화되어 형성된 해양기원의 탄산염 모래가 혼재되어 분포하는 것을 확인하였으며, 이들 모래의 압축특성을 비교 분석하였다.

자연상태에서 탄산염 성분이 지배적으로 분포하는 퇴적층은 입자 표면이나 입자사이에 결합유발물질이 침전하여 지반의 강도와 변형특성이 향상되는 고결(cementation) 현상이 나타나기도 한다. 일반적으로 사질토의 콘관입 시험은 지반의 상대밀도와 구속응력의 영향이 지배적이며, 입도나 조성광물, 그리고 ageing이나 고결과 같은 시간이력의 영향도 받는다. 현재까지 대부분의 콘관입 시험 결과와 각종 토질 물성치의 상관관계는 입자가 단단하고, 입도분포가 균등하며, fine~medium의 입경을 가지는 정규압밀된 석영질 모래에 적용성이 뛰어나다. 그러나 고결현상은 CPT나 DMT와 같은 현장 관입시험의 관입저항치를 증가시키기 때문에, 고결지반에서 수행된 결과는 현장지반의 상대밀도나 마찰각을 과대평가한다(Puppala et al. 1995; Marchetti et al. 2001). 따라서 고결지반의 각종 지반정수를 추정하기 위해 미고결 상태에서 추정된 상관관계를 적용하는 것은 타당하지 않다.

본 연구에서는 실내 챔버시험을 통해 제주 근해에서 채취한 해사의 상대밀도와 콘선단저항의 관계를 분석하고 이를 이용해 제주근해 퇴적층의 상대밀도를 간접적으로 추정하였다. 또한 현장 퇴적지반의 표준관입저항치( $N_{60}$ )와 콘선단저항, 그리고 Suspension-PS 시험으로 분석된 미소변형전단탄성계수( $G_{max}$ )와 비교하여 현장의 고결가능성을 평가하였다.

## 2. 제주해사 기본특성 및 콘선단저항

### 2.1 제주해사 기본특성

본 연구를 위해 제주특별자치도 서귀포시 강정항 일원의 해안 모래층에서 교란시료가 채취되었으며, 시료 원위치는 그림 1과 같다. 시료의 입도분포와 기본 특성은 그림 2, 표 1과 같다. 시료의 평균입경은 0.41mm로 결정되었고, 균등계수( $C_u$ )와 곡률계수( $C_c$ )는 각각 1.61, 0.92로써, 본 제주해사는 통일분류법상 SP에 해당된다.

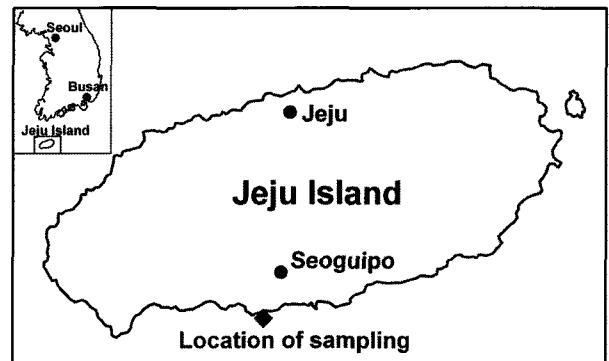


그림 1. 시료채취 원위치

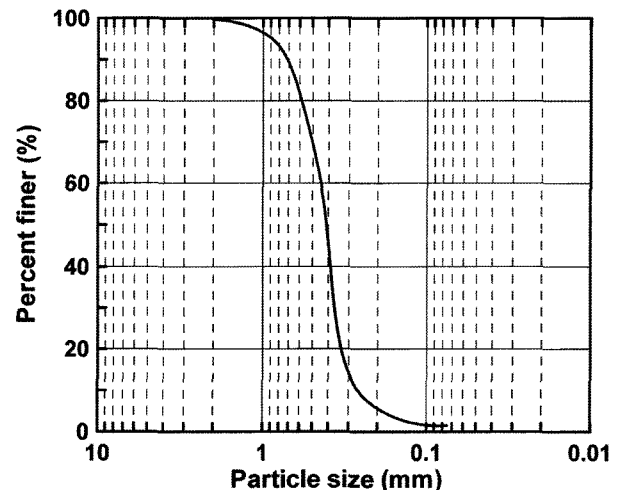


그림 2. 제주해사 입도분포곡선

표 1. 제주해사 기본물성

$G_s$	$D_{10}(mm)$	$D_{50}(mm)$	$C_u$	$C_c$	$e_{max}$	$e_{min}$	USCS
2.79	0.28	0.41	1.61	0.92	1.439	1.026	SP

표 2. 제주해사 XRF 분석결과

성분	$Al_2O_3$	CaO	$Fe_2O_3$	$K_2O$	MgO	MnO	$Na_2O$	$P_2O_5$	$SiO_2$	$TiO_2$	LOI
함유율(%)	11.09	24.24	6.12	1.10	3.43	0.08	2.07	0.36	31.96	1.21	18.31

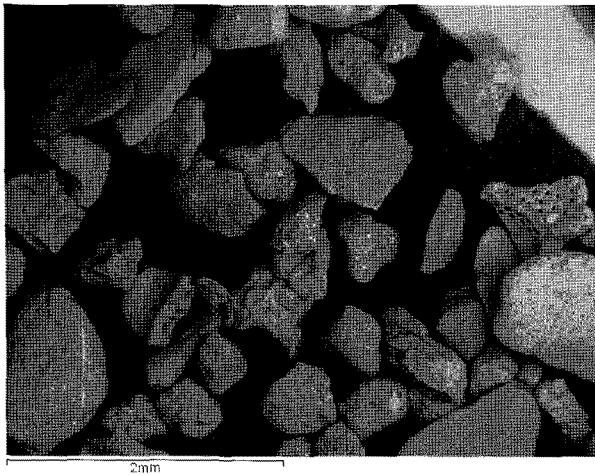


그림 3. 제주해사 SEM 분석

표 2에 표시된 시료의 성분분석(XRF) 결과, 제주해사는 규산염 모래의 주성분인  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ 가 약 49.3%이며, 탄산염 성분의 주성분인 CaO+LOI(loss of ignition)이 약 42.6%로 나타났다. 즉 본 시료는 육상기원의 규산염 모래와 해상기원의 탄산염 모래가 혼재하는 것으로 분석된다. 그림 3의 SEM(scanning electron micrograph) 이미지에서 확인되는 바와 같이, 본 시료는 입자형상이 매우 불규칙하고 각이 매우 많으며, 입자표면에 기공이 발달하여 전형적인 탄산염 모래의 특성을 보인다.

사실토의 최소 간극비를 결정하는 표준방법인 진동대 시험은 시험도중 시료 분리나 입자 파쇄가 발생할 수 있는 것으로 알려져 있다(Lo Presti et al. 1992). 특히 제주해사와 같은 탄산염 모래의 경우, 일반적인 규산염 모래보다 입자 강도가 약하기 때문에 진동대 시험을 적용할 경우 최소 간극비를 과소평가할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 입자파쇄 효과가 발생하지 않는 낙사법(Miura and Toki 1982)을 적용하였다. 또한 시료의 최대 간극비는 2.54cm 높이에서 시료를 낙하시키는 깔대기 법으로 결정하였다. 이로부터 제주해사의 최대, 최소 간극비는 각각 1.439, 1.026으로 결정되었다. 이는 그림 4에서 보는 바와 같이 기존 문헌에서 수록된 일반적인

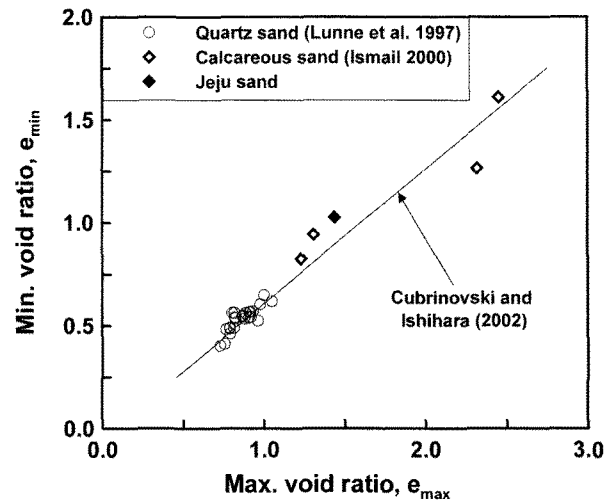


그림 4. 모래의 최대간극비와 최소간극비 관계

규산염 모래의 최대, 최소 간극비보다 크며, 호주 해안 지역에서 발견되는 탄산염 모래와는 유사하였다. 제주해사와 같은 탄산염 모래의 큰 간극비는 입자의 모난 정도가 클 뿐만 아니라, 입자 표면과 내부에 기공구조가 발달되었기 때문이다. 또한 제주해사와 호주지역 탄산염 모래의 큰 최대-최소 간극비 관계는 Cubrinovski and Ishihara(2002)가 제안한 식에 근접하였다.

## 2.2 미고결 제주해사 큰관입시험

### 2.2.1 대형 챔버시스템 및 시료조성

지반공학에서는 현장상태를 실내에서 모사하여 현장 지반의 불확실한 응력상태와 불균질성을 극복하기 위해 다양한 방법을 시도하고 있으며, 대형 챔버는 흙의 상대밀도와 응력조건을 정확히 조절하면서 다양한 관입시험을 수행할 수 있는 중요한 시험장비 중 하나이다(Jamiolkowski et al. 1988). 본 연구에서 사용된 챔버시스템은 높이 1.0m, 직경 1.2m의 챔버셀과 하부 피스톤, 그리고 각종 관입시험을 위한 아답터가 연결된 상판으로 구성되어 있다. 횡방향 경계조건을 조절할 수 있도록 측면의 챔버셀은 이중벽으로 구성되어 있고, 응력은 챔버의 내측

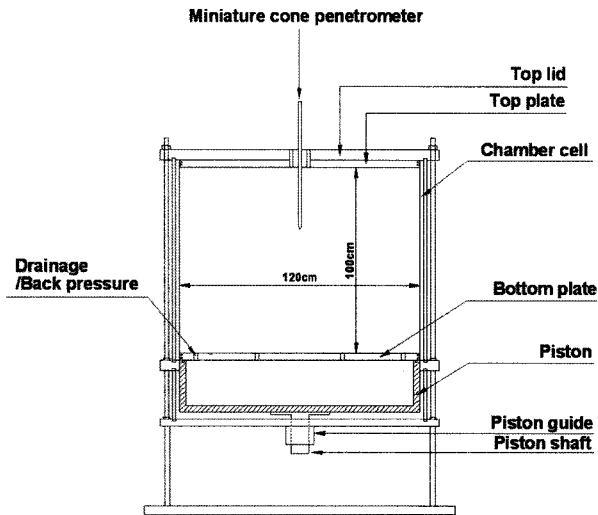


그림 5. 대형 챔버시스템 및 미니콘 관입시험 모식도

셀, 외측셀, 그리고 하부 피스톤과 연결된 제어판에서 조절한다. 챔버의 구성 및 작용원리는 Kim(2005)에 설명되어 있으며, 챔버시스템의 모식도는 그림 5와 같다.

챔버에서는 레이닝 시스템을 이용한 건조낙사법을 이용하여 자연상태 퇴적층의 조직과 유사한 시료를 다양한 상대밀도로 균등하게 조성한다. 본 연구에서 사용된 레이닝 시스템은 모래시료 저장을 위한 상부 모래저장고 (sand storage), 모래시료의 낙사율을 조절하기 위한 개폐판(shutter plate), 시료 낙사도중 적정 낙하고를 유지하기 위한 extension tube, 시료의 균일한 낙하를 위한 분산체 등으로 구성되며, Choi(2008)에 자세히 설명되어 있다.

레이닝 시스템의 모래 낙하고와 개폐율을 조절하여 다양한 상대밀도의 미고결 시료를 조성하였다. 낙사가 완료된 시료의 초기 상대밀도를 측정하고, 시료상부에 상부 플레이트 및 챔버셀을 조립한 후, 연직구속압과 시료의  $K_0$  압밀을 위한 수평구속압을 가하였다. 가압에 의한 변위를 보정하여 조성된 시료의 최종 상대밀도를 결정하였다.  $K_0$  상태 압밀을 위해 100~400kPa의 연직구속압과  $K_0=0.33 \sim 0.40$ 에 해당하는 수평구속압을 가하였다. 가압 후 시료의 최종 상대밀도는 43~83%로 결정되었다.

### 2.2.2 미니콘 관입시험

챔버시스템에서 측정된 모래의 콘선단저항은 상대밀도, 수평응력, 챔버직경, 그리고 경계조건 등의 영향을 받으며, 챔버직경과 경계조건은 챔버와 콘의 직경비에 의해 평가된다. 일반적으로 시료의 상대밀도가 높고 구속압이 낮을수록 직경비와 경계조건의 영향은 증가하며, 낮은 상대밀도( $D_R < 30\%$ )에서 직경비 20 이상,

높은 상대밀도( $D_R > 90\%$ )의 경우 직경비 50 이상에서 경계조건이 콘관입시험 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 알려지고 있다(Been et al. 1986). 본 연구에서는 이들 영향을 최소화하기 위해 A.P.V.d. Berg사에서 제조한 직경 1.6cm의 미니콘(직경비 75)을 사용하였다. 조성된 미고결 제주해사시료에 연직 및 수평구속압을 가한 후, 시료 중심의 아답터를 통해 관입속도 2cm/sec로 미니콘을 관입하였다(그림 5).

### 2.2.3 미고결 제주해사의 콘선단저항

사질토의 콘선단저항은 상대밀도와 유효응력과 같은 상태변수와 관계되어 표현된다. 그림 6은 본 챔버시험에서 결정된 상대밀도와 연직응력에 따른 제주해사의 콘선단저항 분포를 Jamiolkowski et al.(1985)이 제안한 도표에 나타낸 것이다. 그림에서 확인되는 바와 같이 제주해사의 경우, Jamiolkowski et al.(1985)이 제안한 도표의 높은 압축성을 지닌 규산염 모래의 콘선단저항과 매우 유사한 것으로 분석된다.

Jamiolkowski et al.(2003)는 Ticino sand, Toyoura sand, Hoksund sand를 이용한 챔버시험 결과를 바탕으로 일반적인 규산염 모래의 콘선단저항-상대밀도-유효연직응력 관계를 식 (1)과 같이 제시하였다. 제주해사의 경우, 상대밀도와 유효연직응력( $\sigma_v'$ )에 따른 콘선단저항은 식 (2)와 같이 결정되었다. 여기서, 상대밀도의 단위는 %이다.

$$D_R = 32.26 \times \ln \left[ \frac{q_c/p_a}{17.68(\sigma_v'/p_a)^{0.5}} \right] : \text{for quartz sand (1)}$$

$$D_R = 31.75 \times \ln \left[ \frac{q_c/p_a}{8.16(\sigma_v'/p_a)^{0.62}} \right] : \text{for Jeju sand (2)}$$

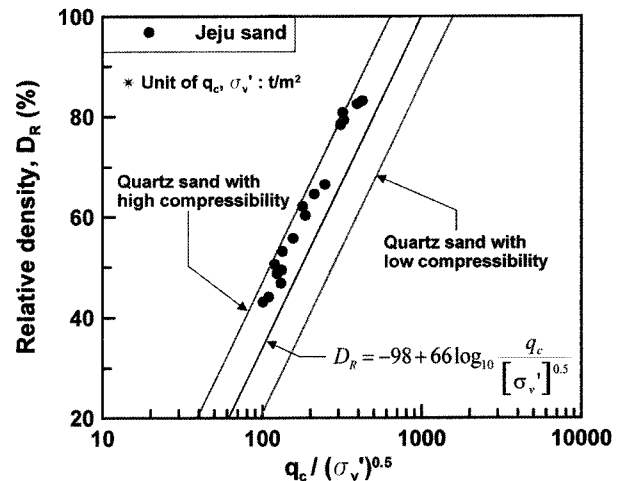
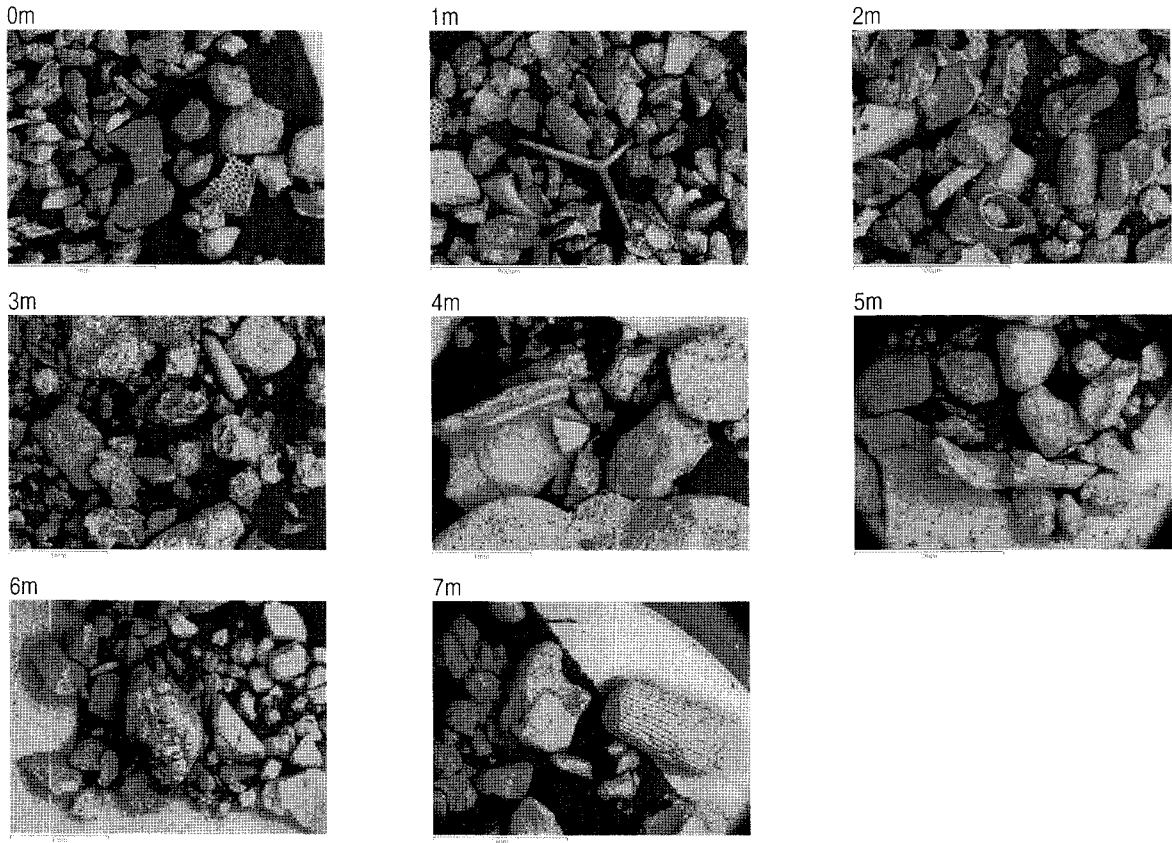
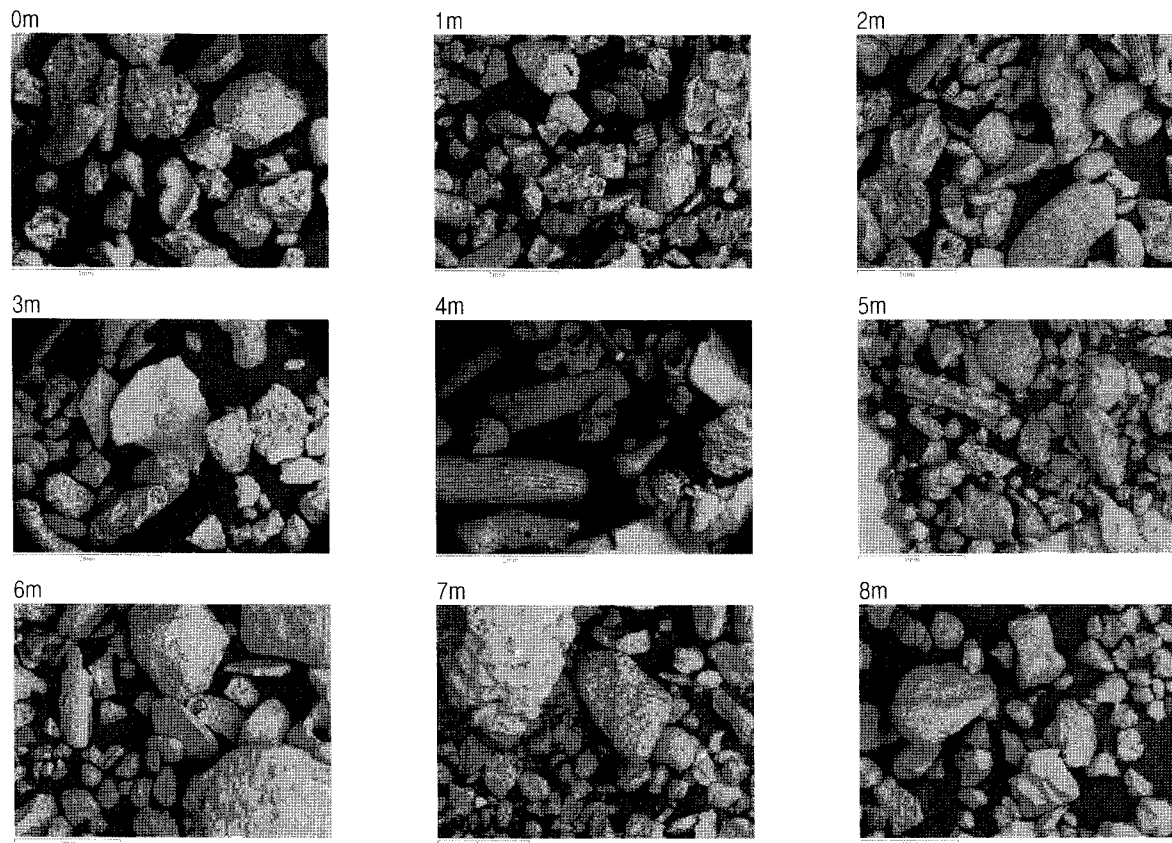


그림 6. 미고결 제주해사의 콘선단저항과 압축성



(a) Site A



(b) Site B

그림 7. 강정항 인근해역 심도별 SEM 분석

### 3. 현장시험

#### 3.1 현장개요

제주 강정항 인근해역의 상부 약 7~8m 두께의 해안 퇴적(모래)층에서 표준관입시험(SPT), 콘관입시험(CPTu) 과 Suspension-PS 시험을 수행하고, 교란시료를 채취하여 지반특성을 분석하였다. 그림 7은 심도별로 채취된 해사의 SEM 분석 결과로써, 제주 인근해역의 퇴적층은 해양의 조개껍데기나 산호 등과 같은 해양 유기물이 침전하여 생성된 지반이며, 입자의 형상이 매우 불규칙하고, 입자표면에 기공이 발달되어 있는 전형적인 탄산염 퇴적지반임이 확인되었다.

그림 8은 깊이별 현장토층의 탄산염성분 함유율, 평균입경( $D_{50}$ ), 세립분 함유율 분포이다. Site A는 심도 2m 까지 약 73%의 탄산염 함유율을 보이다가 3~7m까지 50~60%로 비교적 일정한 탄산염 함유율을 보였다. Site B의 탄산염 함유율은 심도 5m까지 Site A와 유사하였으나, 6m 이상의 심도에서는 15~30%로 Site A에 비해 탄산염 함유율이 적게 평가되었다. 평균입경의 경우, Site A는 상부 2m까지는 약 0.2mm이며, 심도가 깊어질수록 평균입경이 점차 증가하여 7m 깊이에서는 0.64mm로 다소 조립질의 모래로 나타났다. Site B의 평균입경은 약 0.2mm로 퇴적층에서 거의 일정하게 나타났다. 세립분 함유율의 경우 Site A는 11~18%, Site B는 10~17%로

거의 유사하게 나타났으며, 점착성분은 없는 실트질 성분으로 분석되었다. 정리하면, 두 시험공 모두 통일분류법상 실트질 모래(SM)과 실트섞임 입도불량모래(SP-SM)으로 구성되지만, Site A는 심도별 입도분포가 심한 반면, Site B의 경우 심도별 입도분포가 비교적 일정한 지반으로 판명되었다.

#### 3.2 SPT, CPTu와 Suspension-PS 검증

한국산업규격(KS F 2307) 규정에 의거하여 현장 표준관입시험(SPT)이 실시되었으며, SPT 에너지 효율시험으로 획득한 장비별 에너지효율을 적용하여 획득한 N값를 국제 표준규격인 해머효율 60%의  $N_{60}$ 으로 보정하였다. CPTu 장비는 Geotech사의 장비로, 콘 단면적  $10\text{cm}^2$ , 마찰면적이  $150\text{cm}^2$ 이며, 콘 선단 뒷부분에서 간극수압을 측정할 수 있는  $U_2$  형의 전기식 피에조콘이다. 콘 프로브를  $2\text{cm/sec}$ 의 속도로 관입시키면서 발생하는 콘저항력과 간극수압, 마찰력을 측정하였다. Suspension-PS 검증은 시추공을 대상으로 실시되는 시추공 물리탐사의 한 방법으로, 하나의 발진원과 두 개의 수신기가 장착된 Sonde를 공내에 삽입한 후 공내에서 발진과 수신을 실시하여 각 구간별 P파와 S파 속도를 검출하는 방법이다. 전단파 속도 측정을 위한 프로브는 일본 OYO사에 제작한 Model-3302A을 사용하였으며, Suspension

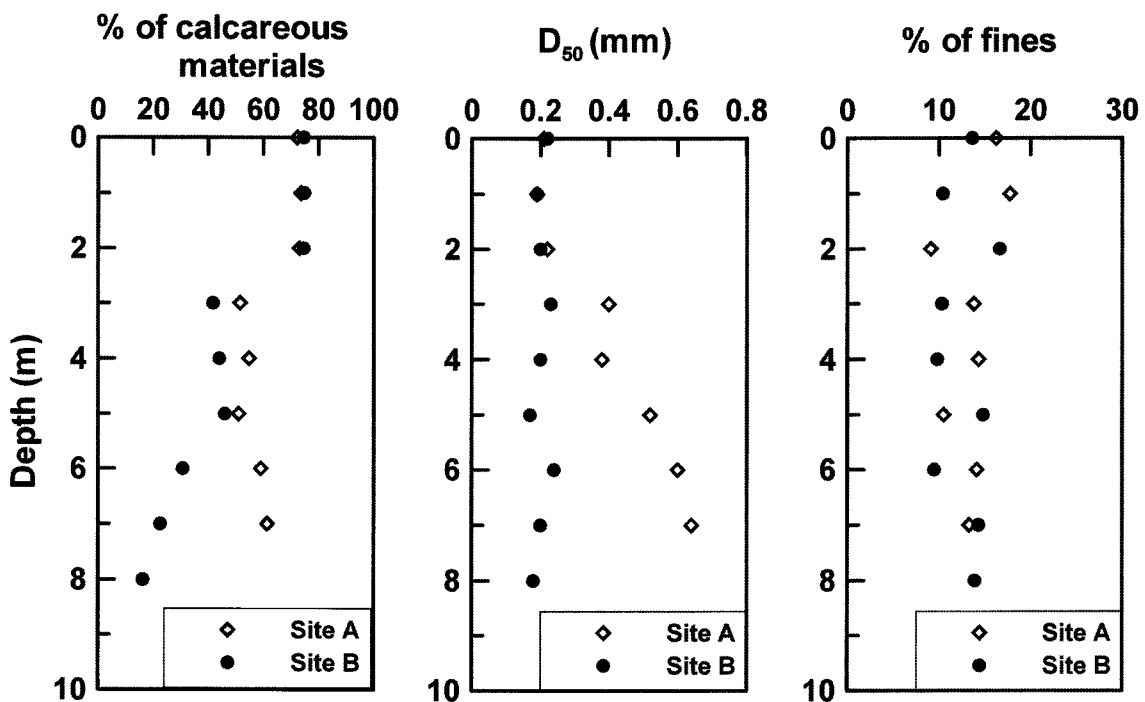


그림 8. 강정항 인근해역의 심도별 탄산염성분 함유율, 평균입경, 세립분함유율

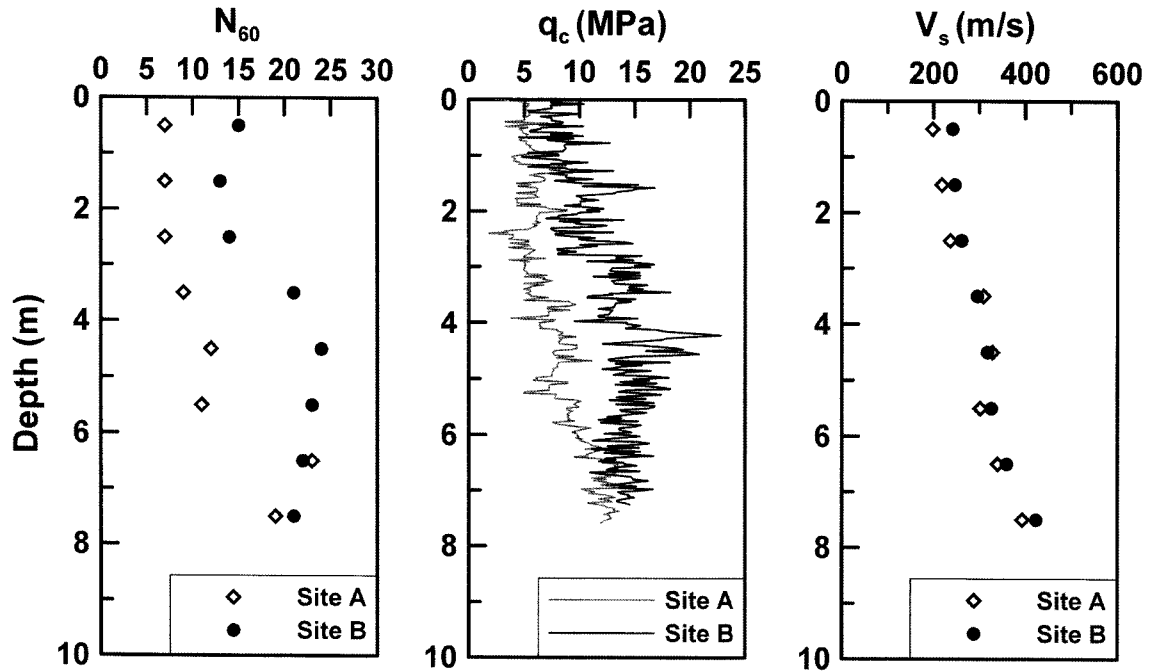


그림 9. 제주근해 현장시험 결과( $N_{60}$ , 콘선단저항, 전단파속도)

PS Logger(Model-3660A)를 이용하여 측정된 전단파를 판독하였다.

그림 9는 현장시험 결과로써, 상부 2.5m까지 Site A와 Site B의 보정된 N값은 비교적 일정하며, 4.5m 깊이까지 다소 증가하며, 다시 일정한 경향을 보였다. Site A의 콘선단저항은, 상부 2m 까지 약 5MPa로 일정하며 깊이에 따라 점차 증가하였다. Site B의 경우, 약 5m 깊이까지 콘선단저항이 증가하다가 다시 점차 감소하는 경향이 나타났다. 전체적으로 Site B의 N값과 콘선단저항이 Site A에 비해 크게 측정되었다. Suspension-PS 시험으로 나타난 전단파 속도( $V_s$ )의 경우에도 Site B가 Site A보다 다소 크게 결정되었으며 깊이에 따라 점차 증가하였다.

#### 4. 제주근해 퇴적층 고결평가

##### 4.1 현장 상대밀도추정

실내 챔버시험 결과는 현장지반의 상대밀도, 마찰각이나 변형특성과 같은 지반정수를 결정하기 위해 활용된다. 본 연구에서 결정된 제주해사의 콘선단저항-상대밀도-유효연직응력 관계인 식 (2)는 규산염 모래에서 확립된 식 (1)보다 제주지역 탄산염 퇴적층의 상대밀도를 좀 더 합리적으로 추정할 수 있다. 그림 9의 현장 콘관

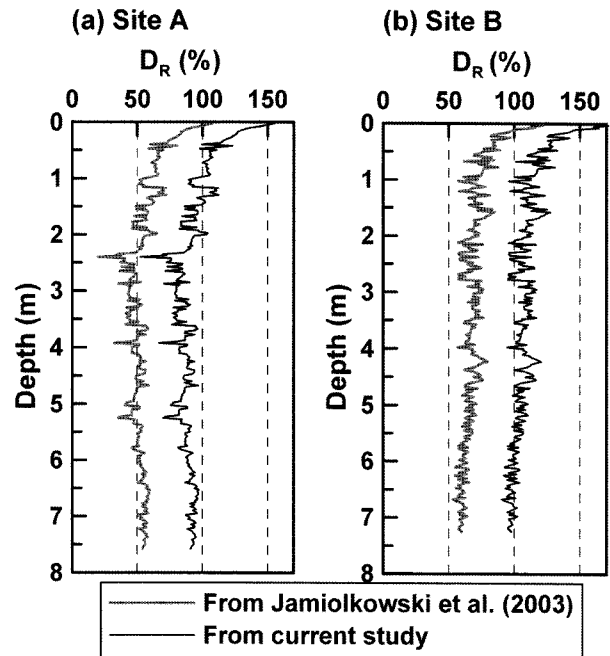


그림 10. 콘선단저항을 이용한 제주근해 현장 상대밀도 추정

입시험 결과를 Jamiolkowski et al.(2003)이 제시한 식 (1)과 본 연구에서 결정된 식 (2)에 적용하여 제주지역 탄산염 퇴적층의 상대밀도를 추정하여 그림 10에 도시하였다. Jamiolkowski et al.(2003)의 식을 이용하여 추정된 제주지역 퇴적층의 상대밀도는 심도 2.5m 이상에서 site A에서는 약 50%, site B에서는 약 70%로 일정하였다. 반면, 식 (2)로부터 Site A의 상대밀도는 상부 2m까

지 90~160%로 추정되며, 2m 이상의 깊이에서는 약 85%의 비교적 일정한 상대밀도가 나타났다. 또한 Site B의 경우, 상부 2m의 상대밀도는 110~175%로 점차 감소하였으며, 2m~7.5m까지는 약 100%의 상대밀도가 비교적 일정하게 분포하였다.

그림 10에서 확인된 바와 같이, 미고결 정규압밀 상태의 챔버시료로부터 결정된 제주해사의 콘선단저항-상대밀도-연직구속압의 관계로부터 현장 모래층의 상대밀도를 추정할 경우, 70% 이상의 높은 상대밀도로 평가되었으며, 퇴적층 상부에서는 100% 이상의 상대밀도로 평가되었다. 일반적으로 미고결 상태로 조성되는 챔버시료와는 달리 자연상태 지반은 aging이나 고결과 같은 시간이력의 영향을 받기 때문에 현장지반은 동일 상대밀도인 미고결 지반보다 더 큰 콘선단저항이 측정된다. 특히 본 제주해사의 경우 조개껍질 및 산호 등이 풍화되어 형성된 탄산칼슘(CaCO<sub>3</sub>)을 다량 함유하고 있는 탄산염 모래로 분류되며, 일반적인 탄산염 모래의 경우 수온이 높은 아열대나 열대지역에 존재할 때 쉽게 고결 특성을 나타내는 것으로 알려지고 있어, 본 지역의 고결 가능성을 배제할 수 없다. 약한 고결결합이 발생하더라도 현장의 관입시험 결과는 미고결 사질토의 시험결과와 매우 상이할 뿐만 아니라, 고결로 인해 증가된 관입 저항치는 사질토의 상대밀도나 내부마찰각을 과대평가할 가능성이 크다(Puppala et al. 1995).

#### 4.2 제주근해 퇴적층 고결평가

최근 들어 고결효과에 대한 관심이 증가하면서, 고결이 사질토의 콘관입시험 결과에 미치는 영향에 대한 연구가 지속적으로 수행되고 있다. 일반적으로 챔버 콘관입시험을 위한 대형 불교란 고결시료의 채취는 기술적, 경제적으로 어려울 뿐만 아니라, 다양한 매개변수 분석을 위한 균질한 시료를 다량으로 확보하는 것 또한 불가능하기 때문에, 고결모래의 콘관입시험에 대한 연구는 대부분 실내 챔버에 조성된 인위적인 고결시료에서 수행되었다. 해외의 경우, Puppala et al.(1995)이 직경 76cm의 챔버를 활용한 콘관입시험을 수행하여 고결에 의해 콘선단저항과 콘주면마찰력이 증가됨을 확인한 바 있으며, 국내의 경우에는 이문주 등(2008, 2009)이 직경 1.2m의 챔버에 고결시료를 조성한 후 미니콘 및 딜라토미터 시험을 수행하여 다양한 고결도를 가진 사질토의 콘선단저항과 딜라토미터 지수를 비교분석하였다. 콘관입시

험에 의해 사질토의 고결을 평가할 경우, 고결은 동일 상대밀도의 미고결 상태보다 콘선단저항을 증가시키지만, 고결에 의해 증가된 콘선단저항을 상대밀도나 구속압 증가에 의한 콘선단저항의 증가와 구분하기는 난이하다. 따라서 모래의 고결여부와 고결정도를 평가하기 위하여 다양한 시험법을 복합적으로 적용하는 방법이 시도되고 있다. Cruz and Fonseca(2006)와 Fonseca et al.(2008)은 현장 고결지반에서 콘관입시험과 딜라토미터 시험을 수행하여 지반의 고결에 의한 각 측정값들의 상관관계를 평가하였으며, 이문주 등(2009)은 챔버에 조성된 인위적인 고결시료에서의 콘관입시험과 딜라토미터 시험으로부터 고결모래의 콘선단저항과 딜라토미터 지수, 그리고 횡방향구속 변형계수와와의 관계를 분석하였다.

일반적으로 고결지반의 고결여부와 고결도는 고결결합이 10<sup>-3</sup>% 이하의 미소변형에서는 파괴되지 않는 특성을 활용하여 평가한다. 즉 SPT나 CPTu와 같은 관입시험은 관입 주변의 고결결합을 파괴하기 때문에 고결도를 명확히 평가할 수 없다. 반면, 전단파속도(V<sub>s</sub>)나 미소변형 전단탄성계수(G<sub>max</sub>)와 같은 미소변형 특성은 고결결합의 파괴 없이 측정이 가능하다. 따라서 Schnaid et al.(2004)은 G<sub>max</sub>와 콘선단저항, G<sub>max</sub>와 N<sub>60</sub>의 상대적인 값으로부터 지반의 고결도를 평가하는 식 (3), (4)를 제안하였다.

$$G_{max} = 110 \sqrt[3]{q_c \sigma'_v p_a} : \text{Lower bound of uncemented sand}$$

$$G_{max} = 280 \sqrt[3]{q_c \sigma'_v p_a} : \text{Upper (Lower) bound of uncemented (cemented) sand}$$

$$G_{max} = 800 \sqrt[3]{q_c \sigma'_v p_a} : \text{Upper bound of cemented sand} \quad (3)$$

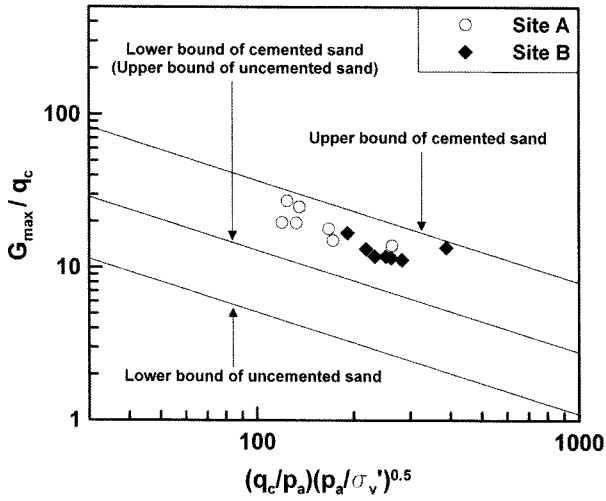
$$G_{max} = 1200 \sqrt[3]{N_{60} \sigma'_v p_a^2} : \text{Lower bound of uncemented sand}$$

$$G_{max} = 450 \sqrt[3]{N_{60} \sigma'_v p_a^2} : \text{Upper (Lower) bound of uncemented (cemented) sand}$$

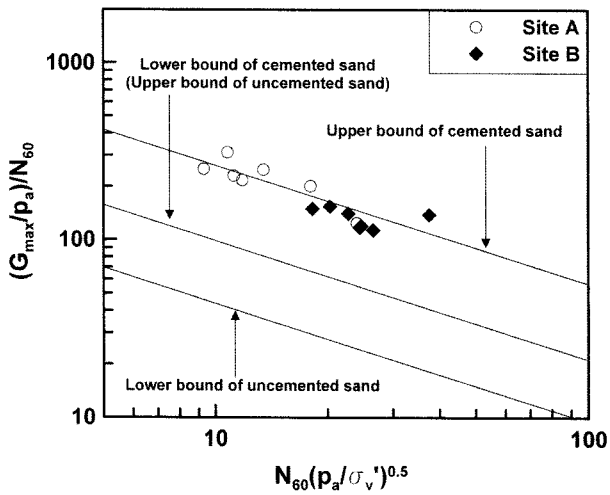
$$G_{max} = 200 \sqrt[3]{N_{60} \sigma'_v p_a^2} : \text{Upper bound of cemented sand} \quad (4)$$

그림 11은 Schnaid et al.(2004)이 제안한 식 (3)과 (4)에 근거하여 Site A와 B의 고결도를 평가한 것이다. 예측된 바와 같이 두 지역의 콘선단저항과 G<sub>max</sub> 관계는 Schnaid et al.(2004)가 제안한 고결지반의 범주에 포함되었다. 또한 보정된 N값과 G<sub>max</sub>의 관계도 Schnaid et





(a)  $G_{max}$ - $q_c$  관계



(b)  $G_{max}$ - $N_{60}$  관계

그림 11. 제주근해 퇴적층의 고결평가(Schnaid et al. 2004)

al.(2004)가 제안한 고결지반의 범주에 포함되었으며, 일부에서는 고결모래의 상한경계선을 초과하기도 하였다. 그림 11의  $q_c$ - $G_{max}$ ,  $N_{60}$ - $G_{max}$  관계로 판단할 경우, 제주근해 퇴적층은 중간 고결~강한 고결 정도의 결합력을 가질 것으로 예측된다.

#### 4.3 제주 고결층의 $q_c$ - $G_{max}$ , $N_{60}$ - $V_s$ 관계

Rix and Stokoe(1991)는 두 종류의 규산염 모래에 대한 챔버 콘관입시험과 공진주시험으로부터 식 (5)와 같은 사질토의  $q_c$ - $G_{max}$ 의 관계를 제안하였다. 여기서  $G_{max}$ ,  $q_c$ ,  $\sigma'_v$ 의 단위는 kPa이다.

$$\frac{G_{max}}{q_c} = 1634 \left[ \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right]^{-0.75} \quad (5)$$

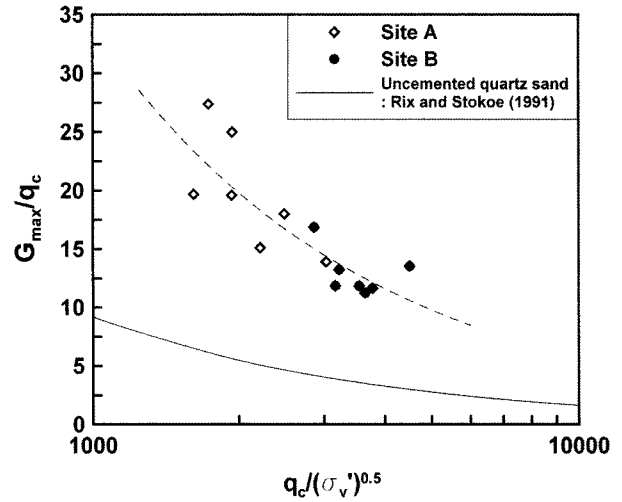


그림 12. 제주 고결층의  $q_c$ - $G_{max}$  관계

그러나 전술한 바와 같이, 관입시험은 관입체 주변의 고결결합을 파괴하며 수행되기 때문에 지반의 고결도를 명확히 평가할 수 없는 반면, 지반의 미소변형특성은  $10^{-3}\%$  이하의 변형율에서 고결결합을 파괴시키지 않고 측정이 가능하다. 따라서, 기준에 제안된 일반적인 미고결 모래의  $q_c$ - $G_{max}$  관계식은 고결된 모래에는 적용할 수 없다. 따라서 Puppala et al.(1996)은 챔버에 조성된 고결 모래의 콘선단저항과 공진주시험을 통해 결정된 고결 모래의 미소변형전단탄성계수로부터 고결모래의  $q_c$ - $G_{max}$  관계식을 제안하기도 하였다.

그림 12는 고결된 제주 퇴적지반의  $q_c$ - $G_{max}$ 의 관계와 미고결 규산염 모래에 적합한 Rix and Stokoe(1991)의 제안식을 비교한 것으로서, 연직응력으로 정규화된 동일한 콘선단저항에서 제주지반의  $G_{max}/q_c$ 가 미고결 규산염 모래에 비해 과대평가되었다. 고결된 제주지반(Site A, B)의  $q_c$ - $G_{max}$ 의 관계는 식 (6)과 같이 결정되었다. Rix and Stokoe(1991)의 제안식(식 (5))에 의해 추정된 고결 모래의  $G_{max}$ 는 Suspension-PS 검층으로 결정된 현장 고결지반  $G_{max}$ 의 5~25%에 불과한 것으로 나타났다. 즉, 고결된 시료에서의 콘관입시험은 고결결합이 파괴된 상태를 평가하기 때문에 고결을 제대로 평가할 수 없으며, 이때 미고결 모래의  $q_c$ - $G_{max}$  관계식을 통한 고결모래의  $G_{max}$ 의 추정은 상당히 과소평가됨을 보여준다.

$$\frac{G_{max}}{q_c} = 2747 \left[ \frac{q_c}{\sqrt{\sigma'_v}} \right]^{-0.68} \quad (6)$$

표준관입시험 결과인 N값과 미소변형특성인  $V_s$ 와의 상관관계는 경험적으로 산정되고 있으며, 본 연구에서

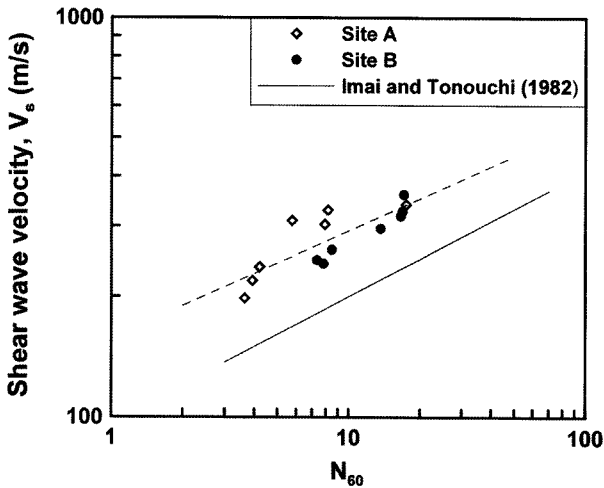


그림 13. 제주 고결층의  $N_{60}$ - $V_s$  관계

표 3. 제주해안 퇴적층과 기존  $N$ - $V_s$  상관관계

References	상관관계
선창국 등(2005)	$V_s(m/s)=93N^{0.325}$
Imai and Tonouchi(1982)	$V_s(m/s)=97N^{0.314}$
Ohta and Goto(1978)	$V_s(m/s)=85N^{0.348}$
This study for Jeju sediments	$V_s(m/s)=157.4N_{60}^{0.269}$

는 에너지 보정된  $N_{60}$ 과  $V_s$ 의 관계인 그림 13으로부터 식 7과 같은 상관관계식이 도출되었다. 표 3에서 확인되는 바와 같이, 제주 고결층의  $N_{60}$ - $V_s$  관계와 기존 국내 외의  $N$ - $V_s$  상관관계는 큰 차이를 보였다. 특히 제주 고결층의  $N_{60}$ - $V_s$  관계에서  $N$ 값의 지수는 기존 상관관계의 지수보다 다소 작게 나타났으며, 이는 미소변형특성인  $V_s$ 는  $N$ 값의 변화에 상대적으로 둔감함을 의미한다. 또한 제주 고결층의  $N_{60}$ - $V_s$  관계의 상관도( $R^2$ )는 약 0.66으로 다소 낮게 결정되었으며, 이는 관입시 발생하는 주변 고결결합의 파괴가  $N$ 값에 정량적으로 반영되지 못하였기 때문이다.

$$V_s(m/s) = 157.39 \times N_{60}^{0.269} \quad (7)$$

## 5. 결론

본 연구에서는 제주특별자치도 서귀포시 강정항 인근 해역에서 해사를 채취하여, 실내 챔버시험을 통해 제주해사의 상대밀도와 콘선단저항의 관계를 분석하고 이를 현장시험 결과와 비교하여 제주 근해 퇴적층의 고결 가능성을 평가하였다. 본 연구의 주요 결론은 다음과 같다.

- (1) 채취된 제주해사는 탄산염 성분과 규산염 성분을 비슷한 비율로 함유하고 있었으며, 제주해사의 최대, 최소 간극비 관계는 일반적인 규산염 모래의 관계와 유사하였다. 제주해사는 입자의 모난 정도가 크고 입자표면과 내부에 발달된 공극에 의해 최대, 최소간극비가 일반적인 규산염 모래에 비해 크게 결정되었다.
- (2) 대형 챔버에 조성된 미고결 제주해사의 콘선단저항은 높은 압축성을 지닌 규산염 모래의 콘선단저항과 유사한 것으로 분석되었으며, 이로부터 미고결 제주해사의 콘선단저항-상대밀도-유효연직응력의 관계를 규명하였다.
- (3) 챔버 콘관입시험에서 결정된 제주해사의 콘선단저항-상대밀도-유효연직응력의 관계를 바탕으로 추정된 제주근해 퇴적층의 상대밀도는 매우 크게 평가되었으며, 상부 퇴적층에서는 160~170%의 상대밀도로 매우 과대평가되었다. 따라서 제주해사는 탄산칼슘( $CaCO_3$ )을 다량 함유하고 있는 탄산염 모래이기 때문에, 제주 인근해역의 퇴적층은 화학적 고결(cementation)현상이 발생되었기 때문으로 판단된다.
- (4) 현장의 표준관입시험, 콘관입시험과 Suspension-PS 시험결과를 Schnaid et al.(2004)이 제안한 고결모래 판별법에 적용한 결과, 제주인근 해역의 퇴적층은 고결지반의 범주에 포함되는 것이 확인되었다. 현장시험 결과로부터 고결된 제주 퇴적층의 콘선단저항-미소변형전단탄성계수의 관계,  $N$ 값-미소변형전단탄성계수 관계가 결정되었다.
- (5) 이상의 결과로부터 제주인근 해역에 분포하는 퇴적층에서의 각종 물성치 평가시험은 제주해사의 고결 가능성을 고려하여 적용되어야 할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 남정만, 조성환, 김태형 (2007), "제주 해안지역 모래의 압축특성", *한국지반공학회논문집*, 제 23권, 6호, pp.103-114.
2. 이문주, 최성근, 추현욱, 이우진 (2008), "고결모래의 콘선단저항과 변형계수의 관계", *한국지반공학회논문집*, 제 24권, 12호, pp. 53-63.
3. 이문주, 최성근, 홍성진, 이우진 (2009), "CPT와 DMT에 의한 사질토 고결영향 평가", *한국지반공학회논문집*, 제 25권, 2호, pp. 67-77.
4. Airey, D. W., and Fahey, M. (1991), "Cyclic response of calcareous soil from the North-West Shelf of Australia", *Geotechnique*, Vol.41, No.1, pp.101-121.
5. Airey, D. W., Randolph, M. F., and Hyden, A. M. (1988), "The

- strength and stiffness of two calcareous sands”, *Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments*, Perth, Australia, Vol.1, pp.43-50.
6. Been, K., Crooks, J. H. A., Becker, D. E., and Jefferies, M. G. (1986), “The cone penetration test in sands: Part I, state parameter interpretation”, *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.239-249.
  7. Coop, M. R. (1990), “The mechanics of uncemented carbonate sands”, *Geotechnique*, Vol.40, No.4, pp.607-626.
  8. Choi, S. K. (2008), *Estimation of stress history of sands using CPT and DMT*, Ph.D. thesis, Korea University.
  9. Cruz, N., and Fonseca, A. V. (2006), “Portuguese experience in residual soil characterization by DMT tests”, *Proceeding of 2nd International Conference on the Flat Dilatometer*, Washington, D.C., pp.359-364.
  10. Cubrinovski, M., and Ishihara, K. (2002), “Maximum and minimum void ratio characteristics of sands”, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.6, pp.65-78.
  11. Fonseca, A. V., Silva, S. R., and Cruz, N. (2008), “Geotechnical characterization by in situ and lab tests to the back-analysis of a supported excavation in Metro do Porto”, *Geotechnical and Geological Engineering*, Published online.
  12. Golightly, C. R., and Hyde, A. F. L. (1988), “Some fundamental properties of carbonate soils”, *Proceedings of International Conference on Calcareous Sediments*, Perth, Australia, Vol.1, pp.69-78.
  13. Hyodo, M., Aramaki, N., and Itoh, M. (1996), “Cyclic strength and deformation of crushable carbonate sand”, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, Vol.15, pp.331-336.
  14. Imai, T., and Tonouchi, K. (1982), “Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus”, *Proceedings of the 2nd European Symposium on Penetration Testing*, Amsterdam, pp.57-72.
  15. Ismail, M. A. (2000), *Strength and deformation behaviour of calcite-cemented calcareous soil*. Ph.D. Thesis, the University of Western Australia.
  16. Jamiolkowski, M., Ladd, C. C., Germaine, J. T., and Lancellotta, R. (1985), “New Developments in Field and Laboratory Testing of Soils”, *Proceedings of the 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, pp. 57-153.
  17. Jamiolkowski, M., Lo Presti, D.C.F. and Manassero, M. (2003), “Evaluation of relative density and shear strength of sands from CPT and DMT”, *Soil Behavior and Soft Ground Construction*, ASCE GSP 119, pp.201-238.
  18. Jamiolkowski, M., Ghionna, V. N., Lancellotta, R., and Pasqualini, E. (1988), “New correlation of penetration tests for design practice”, *Proceedings of the 1st International Symposium on Penetration Testing*, Orlando, Florida, pp 263-296
  19. Kaggwa, W. S. (1988), *Cyclic behavior of carbonate sediments*, Ph.D. thesis, The University of Sydney.
  20. Kim, T. J. (2005), *Dissipation of porewater pressure due to piezocone penetration in OC clay*, Ph.D. dissertation, Korea University.
  21. Lo Presti, D. C. F., Pedroni, S., and Crippa, V. (1992), “Maximum dry density of cohesionless soils by pluviation and by ASTM D-4253-83: A comparative study”, *Geotechnical Testing Journal*, ASTM, Vol.15, No.2, pp.180-189.
  22. Marchetti, S., Monaco, P., Totani, G., and Calabrese, M. (2001), “The flat dilatometer test (DMT) in soil investigations”, *International Conference on In Situ Measurement of Soil Properties*, Bali, Indonesia.
  23. Miura, S., and Toki, S. (1982), “A Sample Preparation Method and Its Effect on Static and Cyclic Deformation-Strength Properties of Sand”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.1, pp.61-77.
  24. Rix, G. J., and Stokoe, K. H. (1991), “Correlation of initial tangent modulus and cone resistance”, *Proceedings of the 1st International Symposium on Calibration Chamber Testing*, Potsdam, pp.351-362.
  25. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Tumay, M. T. (1995), “Cone penetration in very weakly cemented sand”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.121, No.8, pp.589-600.
  26. Puppala, A. J., Acar, Y. B., and Tumay, M. T. (1996), “Low strain dynamic shear modulus of cemented sand from cone penetration test results”, *Transportation research record 1548*, Transportation research board, pp.60-66.
  27. Schnaid, F., Lehane, B. M., and Fahey, M. (2004), “In situ test characterization of unusual geomaterials”, *Proceedings of 2nd International Conference on Site Characterization*, Porto, Vol.1, pp.49-74.
  28. Sharma, S. S., and Fahey, M. (2004), “Deformation characteristics of two cemented calcareous soils”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.41, pp.1139-1151.

(접수일자 2009. 9. 1, 심사완료일 2009. 11. 17)