

모래질 갯벌의 지반공학적 특성 및 인공갯벌의 안정성 Geotechnical Properties of Sandy Tidal Flat and Stability of Artificial Tidal Flat

권오순* · 장인성* · 이광수* · 염기대*

O-Soon Kwon*, In-Sung Jang*, Kwang-Su Lee*, and Ki-Dai Yum*

요 旨 : 연안역 개발로 인해 갯벌의 면적이 급감하고 있는 현실에서 대체 갯벌의 조성을 위해 연구가 진행되고 있다. 본 연구는 인공갯벌 조성을 위한 연구사업의 일환으로, 자연적으로 형성된 갯벌지반과 인위적으로 조성된 갯벌지반의 지반공학적인 특성을 비교·고찰하고 그 결과를 토대로 인공갯벌 지반의 안정성을 평가하기 위하여 교란 및 불교란시료를 이용한 각종 실내실험을 실시하였다. 실내실험에서 측정된 전단강도와 조류와 파랑으로 인해 유발되는 전단응력을 비교하여 갯벌에 퇴적된 토사의 안정성에 대해 검토하였다.

핵심용어 : 갯벌, 지반공학적 특성, 전단강도, 안정성

Abstract □ The researches on the construction of artificial coastal wetlands have been progressed in order to cope with the situation that the area of Korean tidal flat has been reduced due to several coastal developments. This study, as a part of the project on construction of the artificial tidal flats, deals with the comparison of the geotechnical characteristics between natural tidal flat and artificial tidal flat, and is also focused on the stability analysis of tidal flats. Various laboratory tests were performed using disturbed and undisturbed samples, which were obtained from a sandy tidal flat in Korea. The stability of the sandy soils accumulated on the tidal flat was investigated by comparing the shear strength of soil evaluated from laboratory test with induced shear stress due to both current and wave action.

Keywords : tidal flat, geotechnical properties, shear strength, stability

1. 서 론

우리나라 갯벌의 면적은 1998년 기준으로 약 240,000 ha이며, 이는 농지 확보, 항만조성 및 신공항 건설 등 다양한 연안개발을 위한 간척과 매립으로 인하여 1987년 12월에 비해 30~40%가 감소한 것이다(해양수산부, 1998). 그러나 아산지구, 삼교지구, 대호지구 등 1987년 12월 이전에 완공된 간척사업을 포함하면 지난 30년 동안 우리나라의 갯벌 특히 수도권과 충청권의 대규모 갯벌은 대부분 상실되었다. 우리나라는 국토가 협소하고 70%가 산지이며 인구밀도가 높아 식량자급과 다양한 산업인프라 확충을 위한 간척·매립사업이 이루어져 왔으며, 이것이 국가발전에 기여한 것은 사실이지만 이로 인한 갯벌훼손과 연안수질악화가 개발에 수반되는 불가피한 악영향 정도로

만 간주되는 등 그동안 연안환경의 중요성에 대한 사회적 인식이 낮았다.

미국의 경우, 연안역 개발로 인해 갯벌을 포함한 습지에 미치는 악영향을 피할 수 없을 경우에는 훼손된 습지를 복원하거나 새로운 습지를 창출하도록 하고 있으며, 이러한 인공습지 창출을 위한 많은 연구가 실내 대형모형 실험이나 현장실험을 통해 이루어지고 있다. 이러한 대체 갯벌의 조성이라는 측면에서 인공갯벌 조성에 관한 연구는 많은 연안역 개발이 수행되었으며 또한 계획에 있는 우리나라 상황에서 시급히 수행하여야 할 과제이다.

본 연구는 인공갯벌 조성을 위한 연구사업의 일환으로, 자연적으로 형성된 갯벌지반과 인위적으로 조성된 갯벌지반의 지반공학적인 특성을 비교·고찰하고 그 결과를 토대로 인공갯벌 지반의 안정성을 평가하기 위하여 현장실험

*한국해양연구원 연안·항만공학연구본부(Corresponding author: O-Soon Kwon, Coastal and Harbor Engineering Research Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea. oskwon@kordi.re.kr)

과 불교란시료의 채취 및 채취된 시료를 이용한 각종 실험을 실시하였다. 기존의 갯벌에 대한 연구는 우리나라에서도 90년대 후반부터 본격적으로 이루어져왔으나, 자연갯벌과 간척지의 경제성 분석, 생태적 실태 파악, 오염정화능력 시험 등 대부분으로 갯벌의 기능 및 가치 평가에 관한 것이 대부분이므로, 본 연구에서는 지반공학적인 방법을 통하여 갯벌의 특성에 대한 고찰을 수행하였다.

2. 이론적 배경

2.1 갯벌 퇴적물의 분류

일반적으로 갯벌이란 '조석의 간만주기에 따라 노출과 수몰을 반복하는 모래·점토질의 평탄한 지형'을 의미한다. 또한 사질해안과 갯벌과의 차이가 명확하게 정의되어 있지 않지만, 일반적으로 파랑의 영향이 적고 해안경사가 완만하며 퇴적물의 입경이 작고 생물상이 다양한 평탄한 지형을 갯벌로 간주한다.

해안에 퇴적되는 퇴적물들은 입자를 구성하는 주요 성분과 입자의 크기, 주요 성질에 따라 Table 1에 제시한 바와 같이 점토와 모래로 크게 구분된다. 이 표는 미공병단에서 사용하고 있는 Engineer Manual에서 제시하고 있는 퇴적물 분류로, 토질역학에서 모래와 실트 및 점토를 구분하는 입경의 기준을 각각 0.074 mm, 0.002 mm로 적용하는 것과는 차이가 있는데, 여기에서는 비소성인 실트 가운데 입경이 상대적으로 큰 것을 모래로 간주하고 있다.

따라서 모래질 갯벌과 점토질 갯벌을 구분하는 기준을 퇴적물의 관점에서 판단한다면, Table 1에서 제시한 입경 기준을 따르거나 퇴적토사의 소성성 또는 점착력의 유무로 결정할 수 있다.

2.2 갯벌 퇴적물의 침식에 대한 한계 전단강도

점토층에 조류나 조수에 의한 정상류나 외류가 흐르게 될 때, 그 지층에는 점성이나 난류로 인한 전단응력(τ)이 작용하게 된다. 이 값은 퇴적층에 작용하는 물리학적인 전

단응력으로 파악될 수도 있지만, 흐름에서 교류의 정도를 나타내는 경험적인 기준이 될 수도 있다. 따라서 이 값은 현탁액 상태인 퇴적물의 이동을 표현하는데 유용한 요소이다.

정적인 상태에서 볼 때, 아래의 식 (1)에 나타낸 바와 같이 양력, 항력과 함께 전단력은 중력, 흙 입자들 사이의 마찰력 및 점착력 등의 합과 균형을 이룬다. 즉, 작용력이 저항력보다 작게 될 때 정적인 상태를 유지하게 된다. 그러나 만약 흐름이 보다 크게 발생하여 이전의 정적인 상태의 입자가 층을 떠나 이동을 하게 되며, 입자가 정적인 상태를 벗어나는 식 (2)와 같은 상태의 전단응력을 침식에 대한 한계 전단강도(τ_c)라고 한다.

$$\text{SHEAR} + \text{LIFT} + \text{DRAG} < \text{GRAVITY} + \text{FRICTION} + \text{COHESION} \quad (1)$$

$$\text{SHEAR} + \text{LIFT} + \text{DRAG} = \text{GRAVITY} + \text{FRICTION} + \text{COHESION} \quad (2)$$

여기서, 점착력이 없는 모래와 같은 흙에서는 식 (1)이나 식 (2)에서 점착력 항을 고려하지 않으면 된다. 일반적인 점성토에서는 점착력 항이 침식에 대한 저항력에 있어 가장 큰 역할을 하게 되고, 이 값이 최소화될 경우 파괴(또는 침식)가 발생한다고 볼 수 있다.

침전에 대한 한계 전단강도(τ_c)는 비점착성 퇴적물의 경우에는 침식에 대한 한계 전단강도와 거의 유사한 반면, 점착성 퇴적물의 경우에는 일반적으로 τ_c 의 1/4 정도로 알려져 있다(US Army Corps of Engineers, 2001).

2.3 조류와 파랑으로 인해 발생하는 해저면의 전단력

조류나 파랑으로 인해 해저면에서 발생하는 다양한 형태의 물의 흐름은 해저 표면에 전단력을 유발한다. Fig. 1은 물의 흐름으로 인한 평균유속분포와 난류경계층(turbulent boundary layer)을 나타낸 것으로, 이 난류경계층은 점성층과 난류발생층, 외곽층으로 구성되어 있다. 점성층에서는 난류의 변동은 있지만, 속도의 변동은 경계에

Table 1. Comparison of two types of sediments (US Army Corps of Engineers, 2001)

Types	Bases of classification		
	Usual composition	Size range	Bulk properties
Clay	Clay minerals (Sheets of silicates)	Less than 0.0039 mm	Cohesive Plastic under stress Impermeable
Sand	Quartz (SiO ₂)	0.00625~2.0 mm	Noncohesive Rigid under stress Permeable

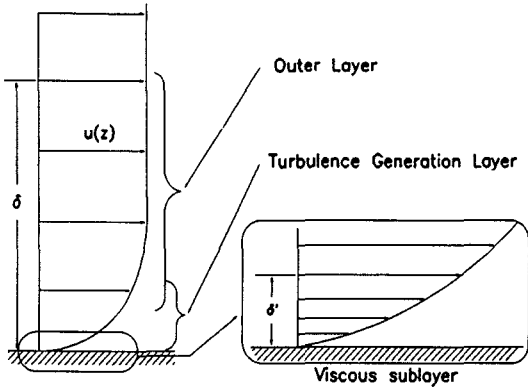


Fig. 1. Turbulent boundary layer structure and mean velocity profile (Schlichting, 1960).

가까워지면서 거의 0으로 수렴한다. 따라서 물에 의한 흡입자의 이동은 경계에 인접한 층의 난류 이동에 결정되며, 전단력(τ)은 근사적으로 층류경계층(laminar boundary layer)이론에 의거하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau = \rho v \frac{\partial u}{\partial z} \quad (3)$$

여기서, ρ : 유체의 밀도, v : 유체의 운동학적 점성, u : 횡방향 유속, z : 경계층에서 거리.

회전속도(obital velocity) 특성을 가진 파랑에 비해 조류로 인한 유속은 일반적으로 정상속도(steady velocity)로 볼 수 있으며, 이 때의 유속분포곡선은 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$u_c = \frac{u_{*c}}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (4)$$

여기서, ($u_{*c} (= \sqrt{\tau_c/\rho})$)는 조류전단속도이며, κ : von Karman's 계수. 유속분포곡선은 깊이 z 에 따른 로그곡선이며, z_0 는 유속이 0일 때의 z 이다.

Mathisen(1993)은 실제 유속을 측정하여 Fig. 2와 같은 결과를 도출하였는데, 난류속도 측정결과 경계로부터 약 10 cm 정도 이상의 흐름은 경계 저항(boundary resistance)에 크게 영향을 미치지 않는다고 하였다.

조류로 인한 경계층에서 발생하는 전단력은 조류마찰계수(current friction factor; f_c)를 사용하여 다음 식과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau_c = \rho u_{*c}^2 = \frac{1}{2} \rho f_c (u_c(z_r))^2 \quad (5)$$

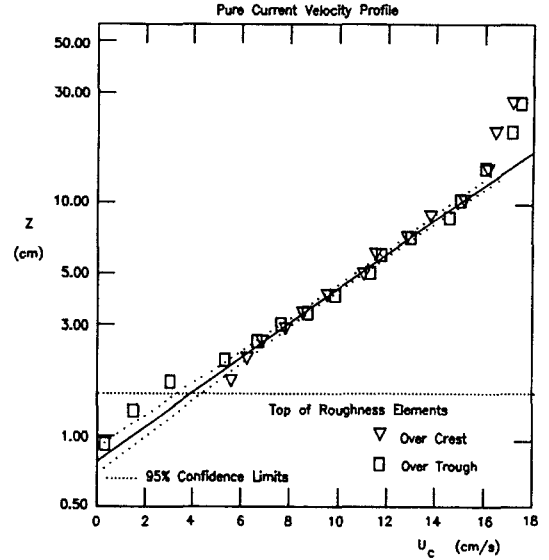


Fig. 2. Measured turbulent velocity profile for flow over artificial two-dimensional roughness element (Mathisen, 1993).

여기서, $u_{*c} = \sqrt{\frac{\tau_c}{\rho}} = \sqrt{\frac{f_c}{2}} u_c(z_r)$ (6)

파랑으로 인해 경계층에서 발생하는 전단유속과 전단응력은 다음 식과 같이 표현된다(Jonsson and Carlsen, 1976).

$$u_{*um} = \sqrt{\frac{\tau_{wm}}{\rho}} = \sqrt{\frac{f_w}{2}} u_{bm} \quad (7)$$

$$\tau_{um} = \frac{1}{2} f_m \rho u_{bm}^2 = \rho u_{*bm}^2 \quad (8)$$

여기서, u_{*bm} : 바닥에 가장 인접한 파랑의 회전속도(maximum near-bottom wave orbital velocity), f_w : wave friction factor (Fig. 3. 참조)

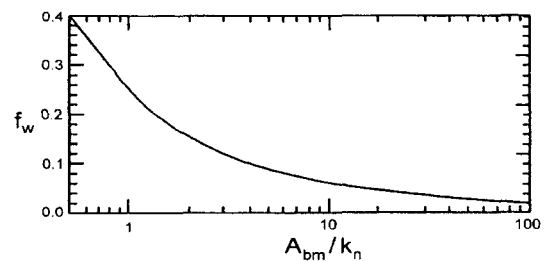


Fig. 3. Wave friction factor $A_{bm} = u_{bm}/\omega$, k_n : equivalent roughness.

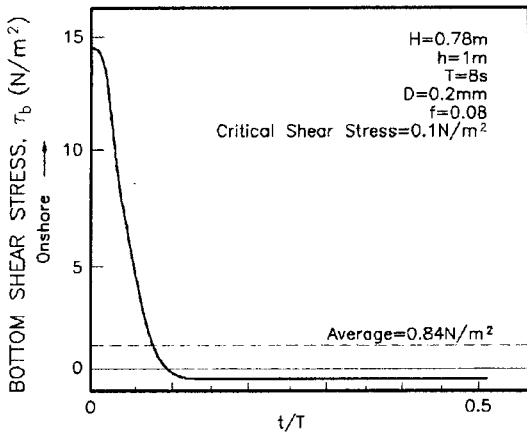


Fig. 4. Variation with time of the bottom shear stress under a breaking nonlinear wave. $H=0.78\text{m}$, $h=1.0\text{m}$, $T=8.0\text{s}$, and $D=0.2\text{m}$ (Dean, 1987).

Dean(1987)은 이론적인 해를 이용하여 Fig. 4와 같이 흐름함수(stream function)에 의거한 바닥면 전단력을 도출한 바 있다.

한편, Raudkivi(1976)는 일반적으로 평탄하지 않은 경계에서는 다음 그림과 같이 전체전단력이 항력과 함께 바닥 형상으로 인해 발생하는 표면마찰력을 합산하여 계산하는 '표면마찰력이론(skin friction concept)'을 제시한 바 있다.

2.4 갯벌 퇴적물의 전단강도

지반의 전단강도는 기본적으로 Mohr-Coulomb의 파괴이론에 따라 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\tau = \sigma_v' \tan \phi + c \tag{9}$$

여기서, σ_v' : 연직응력, ϕ : 내부마찰각, c : 점착력.

점착력이 없는 흙에서는 연직응력 즉, 흙 입자의 자중으로 인한 마찰력이 흙의 이동에 저항하는 힘이 되며, 점착력이 있는 흙에서는 점착력이 주로 저항력을 발휘하게 된다. 지반의 내부마찰각이나 점착력을 구하기 위한 많은 실험은 실제 현장조건에 부합하도록 응력조건을 구현하여야 한다. 그러나 Fig. 5와 같이 표면이 고르지 않은 경우라면 구속응력조건을 적절히 정의하기가 매우 어려울 것이다.

3. 실험조건 및 방법

3.1 현장조건

이번 연구는 현재 인공갯벌 조성을 위한 기반 연구를 수행하고 있는 충청남도 태안군 이원면 이원방조제 전면 기본수준면상 표고 2.0m인 조간대(Fig. 6 참조)에 설치되는 퇴적축진 장치의 시공 전·후의 지반에 대하여 현장실험과 불교란시료 채취 및 실내실험을 수행하여 그 결과를 분석하였다. 시료 채취 위치는 썰물조건에서 지반이 노출되며, 밀물 조건에 GL+5m 정도의 수심이 형성되며, 평균수심은 DL-0m이다(한국해양연구원, 2001).

3.2 시료채취 및 현장실험

대상 갯벌 지반의 공학적 특성을 규명하기 위한 실내 실험을 수행하기 위하여 시료를 채취하였다. 퇴적축진장치가 설치되기 이전의 지반에서 A-시료를 채취하였으며(2002년 5월 10일, 이하 A-sample), 또한 퇴적축진장치를 설치하여 새롭게 퇴적된 토사를 2차로 채취하였다(2002년 9월 20일, 이하 B-sample).

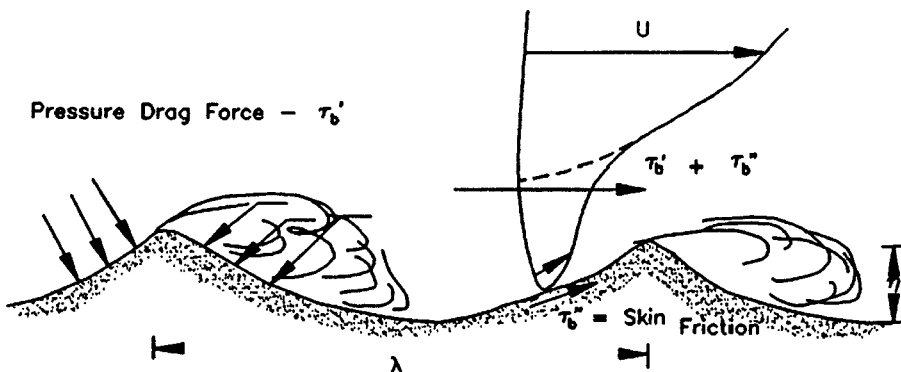


Fig. 5. Conceptualization of pressure drag τ_b'' , skin friction τ_b' , total shear stress $\tau_b' + \tau_b''$, for turbulent flow over a rippled bed (Raudkivi, 1976).

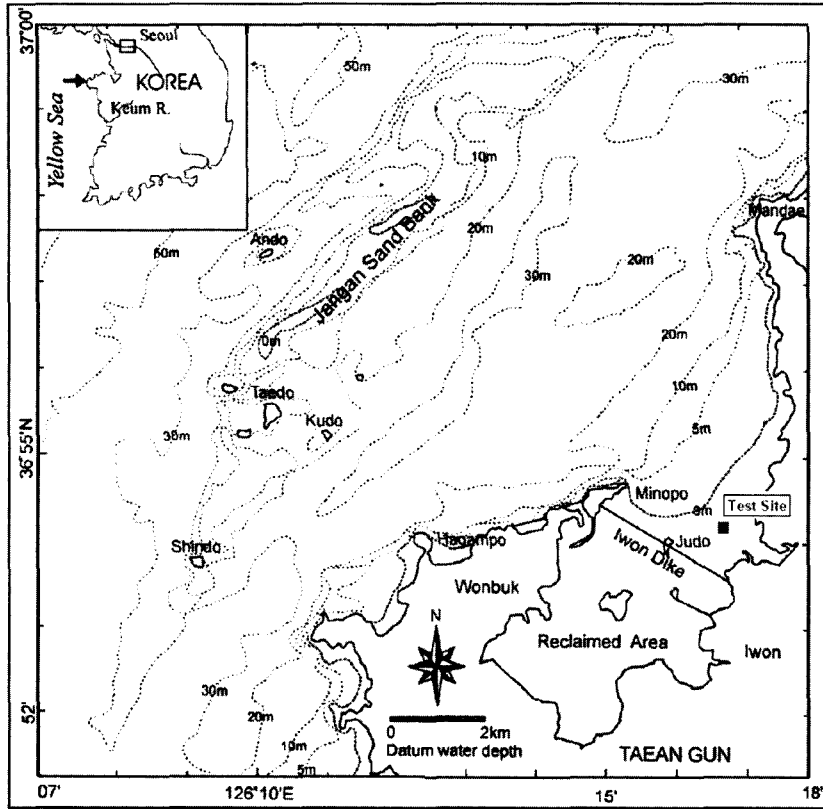


Fig. 6. Location map of test site.

시료는 샘플러(캔코아, $\phi 67 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$)를 지반에 관입 후 주변 흙을 걷어낸 후, 아래에서 절단하여 교란되지 않은 상태로 채취하였으며, 채취한 샘플러를 곧바로 준비한 드라이 아이스 상자에 넣어 급속 냉동을 시켜 이동과 보관 상태에서 발생할 수 있는 교란을 최소화하고자 하였다. 채취된 시료는 평균온도 -15°C 의 냉동상태로 보관하였다. 이러한 동결시료 채취법은 교란되지 않은 상태로 채취하기 어려운 모래나 풍화토 같은 조립질 시료의 채취에 사용되어 왔으며, 동결에 따른 영향에 대한 연구가 많이 수행된 바 있다(권, 1998; Hoshino, 1977; Konrad, 1990; McCabe, *et al.*, 1985; Singh and Seed, 1982; Yoshimi, *et al.*, 1978).

또한, 현장에서 토층의 단위중량을 측정하기 위하여 압밀링($\phi 60 \text{ mm} \times \text{H}-20 \text{ mm}$)을 사용하여 시료를 채취하였다. 단위중량은 원 지반과 퇴적된 지반의 밀도를 판단하기 위해 중요한 인자이므로 지표면에서 5 cm 단위로 채취하였다. 교란되지 않은 시료 채취와 마찬가지로 A-시료 채취와 B-시료 채취에서 각각 단위중량 측정 실험을 수행하

였다. A-시료 채취 시에는 GL-0 cm~GL-25 cm까지 5 cm 깊이 간격으로 건조 단위중량을 측정하였으나, B-시료 채취 시에는 해수위가 상당히 높아 GL-15 cm까지 단위중량 측정용 시료를 채취하였다. 압밀링을 이용하여 채취된 시료는 다른 시료들과 마찬가지로 냉동보관하여 실험실로 이동한 후, 실험실에서 24시간 동안 110°C 로 건조하여 측정된 건조중량과 압밀링의 부피를 비교하여 건조 단위중량을 결정하였다.

3.3 실내실험의 종류 및 방법

먼저 채취된 시료에 대하여 입도분포 특성을 고찰하기 위하여 체분석을 실시하였다. 또한, 1차 및 2차에 채취된 불교란시료에 대하여 전단강도를 구하기 위하여 삼축시험을 수행하였다. 실험은 배수조건으로 수행하였으며, 구속압(σ'_3)은 30 kPa, 50 kPa를 적용하였다. Table 2에 실험조건을 정리하였다. 정적인 하중에 대하여 주응력 방향에 따른 전단강도-변형 특성을 고찰하기 위하여 압축시험과 인장시험을 수행하였으며, 또한 파광과 같은 반복적인 하

Table 2. Types of triaxial test

Types	Confining pressure (σ_3'), kPa (A-sample and B-sample)
Test method	
Drained compression	30, 50
Drained extension	30
Cyclic shear	$\sigma_3' = 50$ $\sigma_{peak} = 25, 40, 60$ $\sigma_{valley} = -25, -40, -60$

중에 대한 거동을 살펴보기 위하여 압축과 반복을 반복적으로 재하하는 반복재하실험을 수행하였다.

삼축시험은 동결된 시료를 샘플러에서 추출하여 동결된 상태로 삼축시험기에 올려 놓은 후, 셀에 물을 채워 시료를 구속시킨 후 서서히 융해되도록 하였다. 시료의 포화와 구속조건을 만족시키기 위해 기본적인 배압을 100 kPa로 모든 실험에 일정하게 가하였으며, 전단은 변형을 제어로 0.167%/min의 변형률 속도를 적용하여 실시하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 입도분포

체분석 결과, 1차 및 2차에 채취된 시료 모두 가는 모래로 구성된 조립질 토사임을 확인하였다. Fig. 7은 체분석 결과에서 얻어진 입도분포곡선으로 입자가 가늘고 고르게 분포하는 것을 잘 알 수 있으며, 두 시료 모두 통일 분류법상 SP(poorly graded sand)에 속한다. 이러한 토사는 투수계수가 크고 자연상태의 건조단위중량이 작으며, 다짐이 불량한 것을 특징으로 한다.

4.2 단위중량

현장에서 압밀링을 이용하여 측정한 토사의 건조단위

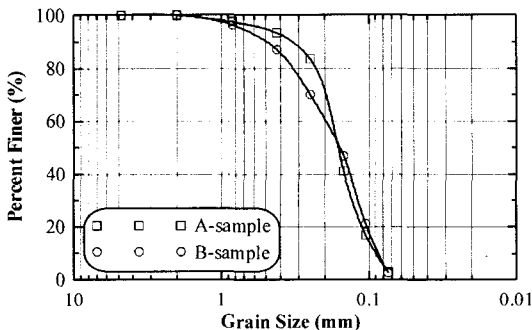


Fig. 7. Grain size distribution.

Table 3. Dry unit weight of A-sample

Sampling depth (GL-cm)	0	5	10	15	20	25
Dry unit weight (t/m^3)	1.44	1.58	1.50	1.56	1.62	1.63

Table 4. Dry unit weight of B-sample

Sampling depth (GL-cm)	0	5	10	15
Dry unit weight (t/m^3)	1.52	1.53	1.45	1.44

Table 5. Dry unit weight of undisturbed sample

Sample type	A-sample	B-sample
Dry unit weight (t/m^3)	1.62	1.63

중량은 Table 3과 Table 4와 같다. A-시료에 대한 건조단위중량을 깊이에 따라 도시한 그림이 Fig 8이다. 그림에서 깊이가 깊어질수록 단위중량이 증가하는 경향을 보이고 있어 퇴적에 따라 자중으로 인한 다짐이 발생한 것을 알 수 있다. 그러나 B-시료의 경우에는 퇴적된 후 시간이 많이 경과하지 않았기 때문에 퇴적 깊이에 따른 건조단위중량의 변화는 일관성이 없는 것으로 나타났다.

현장에서 측정한 단위중량과 함께 동결채취한 삼축시료에서도 건조단위중량을 측정하였으며 그 결과가 Table 5와 같다. 이와 같이 건조단위중량을 비교해 본 결과, 원지반 상태라 볼 수 있는 A-시료는 새롭게 퇴적된 B-시료보다 상대적으로 건조단위중량이 $0.2 t/m^3$ 정도 큰 것으로 나타났다.

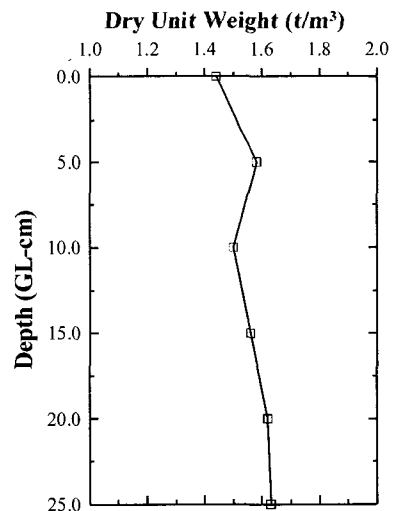


Fig. 8. Dry unit weight vs. sampling depth (A-sample).

4.3. 전단강도-변형 특성

주응력 방향을 달리하여 삼축시험을 수행한 결과, 다음 Table 6과 같은 결과를 얻었다. 여기에서 최대축차응력으로 표시된 값의 1/2이 바로 시료의 전단강도이다. 표를 살펴보면, 동일한 구속압 조건에서 A-시료가 B-시료보다 전단강도가 더 큰 것을 알 수 있다. 또한, 인장시험의 결과도 A-시료가 B-시료에 비하여 더 큰 전단강도를 발휘함을 알 수 있다.

다음 Fig. 9는 압축시험으로 인해 시료가 파괴가 발생한 장면으로 A-시료의 압축시험에서는 모두 파괴면이 뚜렷이 발생하여 그 면을 따라 시료가 미끄러져 내리는 1면 파괴양상(slip plane failure mode)을 보였으며, B-시료에서는 Fig. 10과 같이 특정한 파괴면이 발생하지 않고 전반적으로 시료의 가운데의 단면적이 넓어지면서 파괴에 도달하는 확장형파괴양상(barrelling failure mode)을 나타냈다. 일반적으로 조립질 시료에서는 조밀한 상태에서 1면 파괴양상이 주로 나타나며, 느슨한 경우에 확장형파괴양상이 발생하는 것으로 알려져 있다. 이번 경우에는 구속압이 아주 작기 때문에 A-시료의 경우에는 구속압에 비해 상대적으로 조밀한 상태로 존재하며, B-시료는 상대적으로 느슨한 경우라 할 수 있다. 축차응력을 점차 감소시켜 시료를 전단파괴시키는 인장시험의 경우에는 시료 전체에서 가장 취약한 시료 상부에서 단면적이 급격하게 감소하는 넥킹파괴양상(necking failure mode)을 보였다.

압축과 인장시험에서 나타나는 이와 같은 특징은 축변형률과 축차응력 곡선으로 실험 결과를 도시한 Fig. 11(a)에서도 알 수 있는데, 그림에서 A-시료인 경우에는 구속압에 관계없이 축변형률이 증가함에 따라 점차 축차응력이 증가하다가 첨두점(peak)에 도달한 후 연화현상(softening)이 발생하는 것을 알 수 있는데, 이러한 전단응력저등 역시 조밀한 조립질 흙에서 나타나는 특징이다. 그러나 B-시료에는 이러한 첨두점이 나타나지 않고 계속적으로 축차응력이 증가하다가 어느 정도에서 수렴하는 경화현상(hardening)이 나타나 느슨한 조립질 흙의 전단거동과 일치하고 있다. 그림에서 구속압이 같은 경우에는 A-시료와 B-시료의 축차응력곡선이 극대점이 나타나는 것과 극대점이 나타나지 않는 것에는 차이가 있지만, 최종적으로 축변형률 15% 정도에서 거의 동일한 전단강도를 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 특징은 동일한 입도분포를 갖는 조립질 흙에서 단지 상대밀도만 다른 경우, 조밀한 경우에는 극대점이 나타나고 느슨한 경우에는 극대점이 나타나지 않지만 최종적으로 한계상태(critical state)에

Table 6. Maximum shear stress of samples

Types		A-sample		B-sample	
Triaxial compression test	Confining pressure, (σ_3'), kPa	30	50	30	50
	Maximum deviatoric stress (σ_d), kPa	108	240	77	164
	Shear strength, kPa	54	120	39	82
Triaxial extension test	Confining pressure, (σ_3'), kPa	-	50	-	50
	Maximum deviatoric stress (σ_d), kPa	-	-46	-	-33
	Shear strength, kPa	-	23	-	17



Fig. 9. Slip line failure mode (A-sample, triaxial compression test).

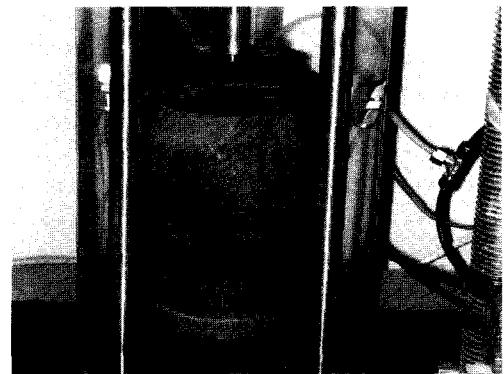


Fig. 10. Barrelling failure mode (B-sample, triaxial compression test).

도달하면 동일한 전단강도를 가진다는 한계상태 토질역학의 기본 이론에 충실하게 부합하는 것을 의미한다.

인장시험의 결과를 도시한 Fig. 11(b)에서는 특별한 첨두점이 나타나지 않는 응력경화특성을 보이고 있다.

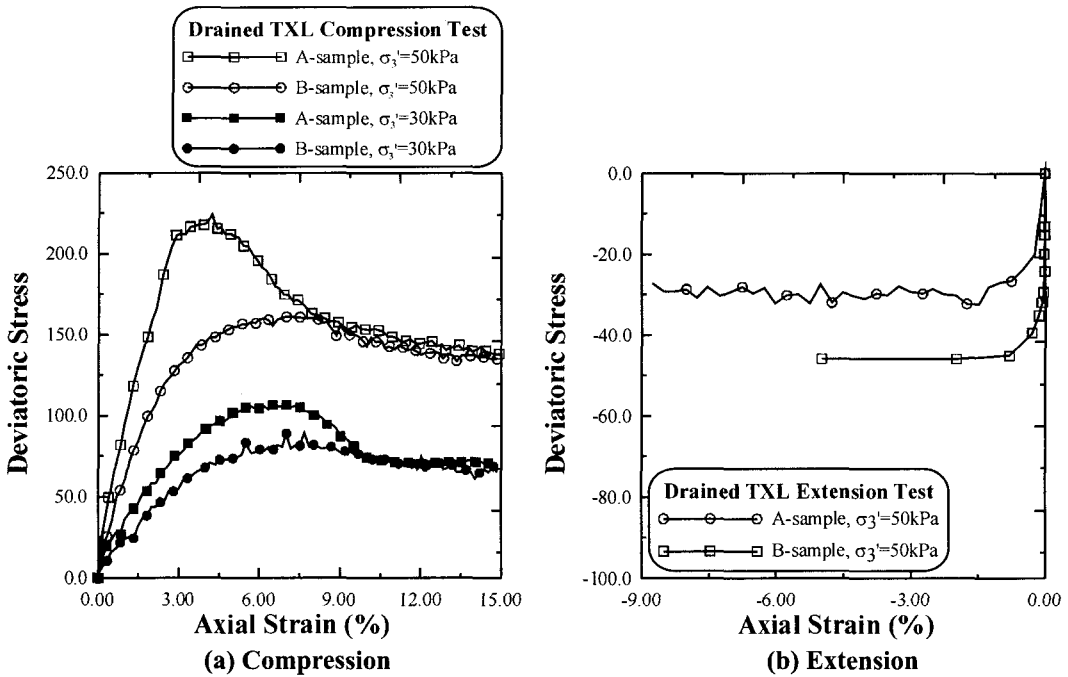


Fig. 11. Stress-strain behaviors of triaxial tests.

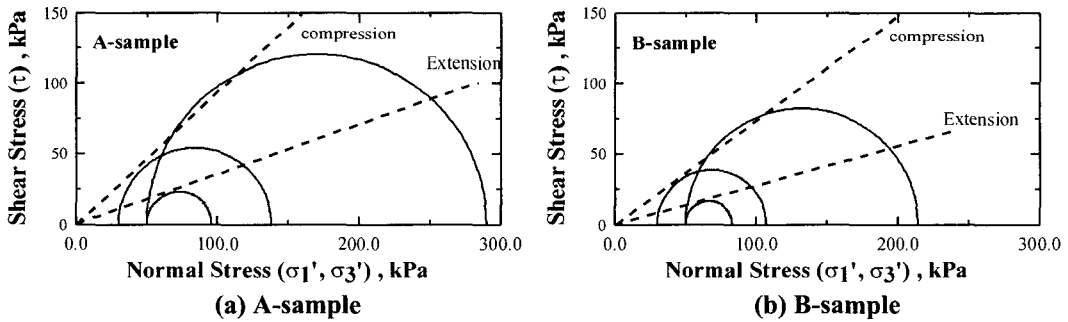


Fig. 12. Mohr-Coulomb failure envelop.

다음 Fig. 12는 삼축시험 결과로부터 얻어진 전단강도로부터 Mohr-Coulomb의 파괴포락선을 도시한 것으로, A-시료와 B-시료로 구분하여 압축전단과 인장전단으로 얻어진 파괴포락선을 나타내었다. 그림에서 압축축과 인장축에서 파괴포락선의 기울기, 즉 내부마찰각이 상당히 차이가 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 시료의 전단강도가 방향성이 있다는 것을 의미한다.

Fig. 13~Fig. 14는 반복삼축시험의 결과를 도시한 것이다. 대상 시료가 반복하중을 받는 해저면 토사이기 때문에 반복적인 하중에 대한 거동을 비교해 보기 위하여 압축과 인장을 반복적으로 재하한 결과이다. 삼축시험의 결

과에서 압축전단강도가 인장전단강도보다 크기 때문에 인장전단에 파괴가 발생할 것으로 예측되었으며, 반복재하시험에서 그 결과를 확인하였다. A-시료와 B-시료 모두에서 정적인 상태에서 전단을 한 경우보다 좀 더 큰 전단강도를 보이고 있는 것을 알 수 있는데, 이것은 전단속도가 강도에 영향을 주기 때문이다.

4.4 인공갯벌의 안정성

갯벌 퇴적물의 조류 및 파랑에 대한 안정성을 평가하기 위하여, 지반의 전단강도를 실내시험을 통해 평가하였다. 지반의 연직 유효응력(σ_v')과 삼축시험에서 얻어진 내

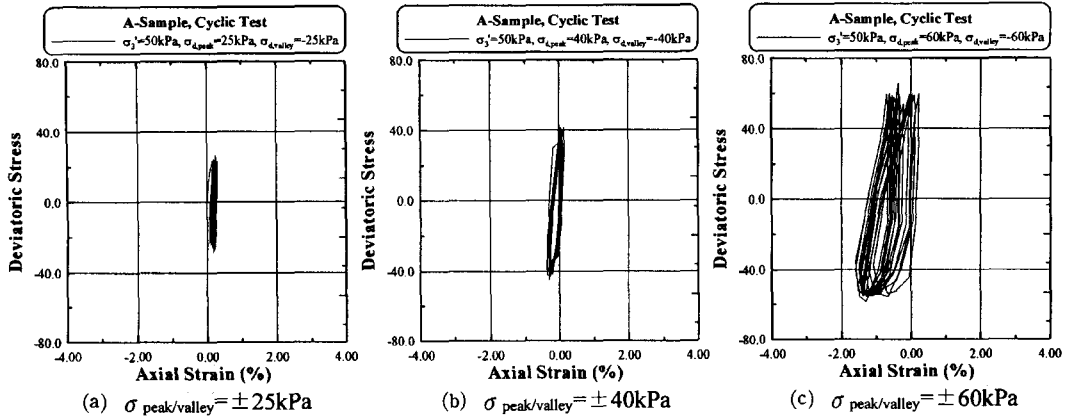


Fig. 13. Cyclic test results, A-sample, $\sigma_3' = 50$ kPa.

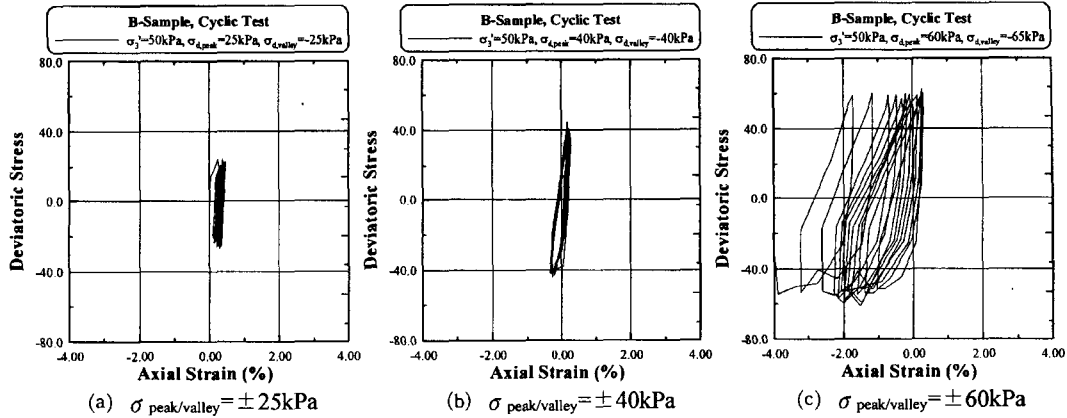


Fig. 14. Cyclic test results, B-sample, $\sigma_3' = 50$ kPa.

부마찰각을 Mohr-Coulomb의 파괴기준에 적용하여 전단강도를 산정하였다. 여기에서 연직 유효응력은 유효단위중량을 이용하여 깊이에 따라 산출하였는데, 다음 Fig. 15(a)에서 A-시료와 B-시료의 깊이에 따른 연직유효응력을 도시하였다. 또한, Fig. 15(b)와 (c)에서 연직 유효응력을 이용하여 계산된 지반의 전단응력을 깊이에 따라 도시하였다. 전단응력은 삼축압축시험에서 얻어진 내부마찰각과 삼축인장시험에서 얻어진 내부마찰각을 각각 사용하여 산출하였다. 토질역학에서 지반의 전단강도는 배수조건과 흙 입자의 변형 상태, 즉 주응력 방향에 따라 서로 다른 실험결과를 사용하는 것을 기본으로 하는데, 여기에서는 깃벌 퇴적물의 전단형태가 압축에 따른 변형 상태라기보다는 입자가 유속에 의해 이동하는 형태라고 본다면 삼축인장시험 결과를 사용하는 것이 바람직할 것이다.

Fig. 15(b)와 (c)에서 점선은 반복삼축시험 결과를 이용

한 것으로 반복삼축시험에서도 인장파괴가 발생하였으므로 인장 전단강도라고 할 수 있다.

한편, 이 논문에서는 파랑에 대한 영향은 무시하고 조류만으로 해저지반에 전단력이 발생한다고 가정하고 경계층의 전단응력을 계산하였는데, 최대 유속 $u_c(z_c)$ 은 0.35 m/s, 평균 해수면 깊이 z_c 을 1m, 평균입경을 해저면 입자의 지름으로 보고 $D=0.2$ mm, 해수의 밀도(ρ)는 1,025 kg/m³, $\nu=1.0106 \times 10^{-6}$ m²/s, 조류마찰계수(f_c)는 2.47×10^{-3} 으로 가정하면, 전단응력(τ_c)은 0.16 Pa로 계산할 수 있다.

Fig. 15(d)에서 도시한 깊이에 따른 지반의 전단강도와 계산된 조류에 의한 전단응력을 비교하면, 원 지반 상태라고 할 수 있는 A-시료가 새롭게 퇴적된 B-시료보다는 단위중량도 크고 내부마찰각도 크기 때문에 전단저항력도 크며, 가정한 조류기준에 의한 전단응력을 기준으로 보면 A-시료는 GL-4 cm 정도까지, B-시료는 GL-7 cm 정

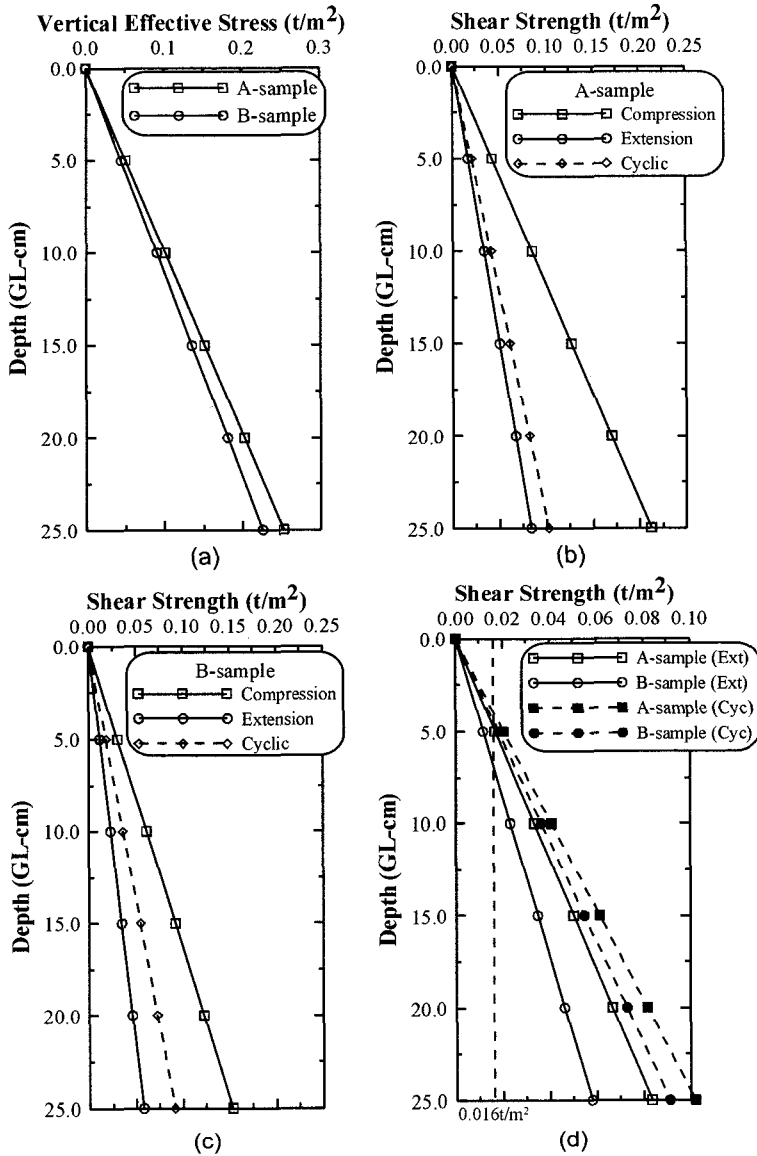


Fig. 15. Vertical effective stress and shear stress of bottom soil layer.

도까지는 불안정한 상태로 평가할 수 있다. 그러나 유속 조건을 평균(약 0.25 m/s)으로 사용한다면, 전단응력을 $0.008 t/m^2$ 정도로 평가되어 불안정한 층의 두께는 상당히 얇아질 수도 있다. 여기에서 사용한 조류 조건은 대략적으로 평가한 것으로 엄밀한 평가를 위해서는 좀 더 세밀한 조류 및 유속조건을 평가하는 것이 중요하다.

안정성 평가 결과를 기준으로 실험지반은 해수면 아래에 잠기면 조류와 파랑으로 인해 표면 4 cm~7 cm 정도는 어느 정도 유동성을 가진 현탁액 상태로 조류와 파랑

에 따라 움직이는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 이와 같은 결론을 토대로 지표면에 요철이 있을 경우에 있어 조류와 파랑으로 인해 쉽게 침식이 발생하고 매워지는 현상을 공학적으로 평가할 수 있다.

조간대에서는 수위가 지표면 위와 아래로 반복적으로 변화하기 때문에 자연적인 압축·압밀 현상이 발생하기 때문에 항상 해수면 아래에 있는 지반보다는 빨리 단단해지지만 지표면 상부는 언제라도 침식이 발생할 수 있는 상태이며, 만약 새롭게 퇴적된 지반의 안정성을 인위적으

로 증가시키고자 한다면 다짐 등과 같은 방법으로 지반의 강도를 증가시키거나 경계층에서 유속을 감소시킬 수 있는 방법을 고려하여야 할 것이다.

5. 결 론

인공갯벌 조성을 위한 연구의 일환으로 퇴적축진장치 설치 이전의 원 지반과 새롭게 퇴적된 지반에 대하여 다양한 실험을 통하여 갯벌 퇴적물의 지반공학적인 특성을 고찰하고 조류와 파랑에 대한 갯벌 퇴적물의 안정성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

① 퇴적축진장치를 설치하기 이전의 원 지반에서 채취된 토사는 퇴적축진장치로 인해 추가로 퇴적된 흙에 비하여 상대적으로 조밀하며, 단위중량도 크다.

② 지반의 전단강도 측면에서도, 원 지반에 비해 추가로 퇴적된 토사는 작은 전단강도를 가지고 있는 것을 알 수 있으며, 현장의 최대유속조건에서 계산된 전단력과 비교하면 원 지반은 GL-4 cm, B-시료는 GL-7 cm 정도까지는 불안정한 상태로 평가할 수 있다. 대상 해역의 지반은 조석으로 인해 해수면 조건이 변화하며, 지반이 해수면 아래에 잠기면 지표면 상부는 유동성을 가진 현탁액 상태로 조류와 파랑에 따라 움직이는 것으로 판단할 수 있다. 그러나 여기에서 사용한 조류 조건은 대략적으로 평가한 것으로 엄밀한 평가를 위해서는 좀 더 세밀한 조류 및 유속조건을 평가하는 것이 중요하다.

③ 지반이 평탄하지 않은 경우라면, 입자들 간의 구속조건을 만족하지 못해 지반의 전단력이 상당히 저하되며 또한 추가적인 표면마찰력의 작용으로 인해 안정성을 확보하기 어렵다고 판단할 수 있다. 따라서 갯벌 지반에서 흔히 나타나는 요철이 깎이고 메워지는 현상을 공학적으로 평가할 수 있다.

④ 국부적인 세굴조건을 고려하지 않고, 새롭게 퇴적된 갯벌 퇴적물이 안정성을 확보하기 위해서는 오랜 시간을 그대로 방치하여 퇴적된 토사가 자연적으로 다져져 안정한 상태가 되는 지반이 되게 하거나, 다짐 등과 같은 방법으로 지반의 강도를 증가시키거나 경계층에서 유속을 감소시킬 수 있는 방법을 고려하여야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국해양연구원 기관고유 연구사업 '황해 연안역의 해양환경 복원에 관한 연구: 인공갯벌(BSPE 828-

00-1500-2)'의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

권오순, 1998. 풍화토의 전단강도-변형 특성에 관한 실험적 연구, 박사학위논문, 서울대학교, pp. 61-62.

한국해양연구원, 2001. 황해연안역의 해양환경복원을 위한 연구(인공갯벌 I-II), BSPE 00821-00-1399-2, pp. 332-340.

해양수산부, 1998. 해양환경공정시험방법, p. 317.

Dean, R.G., 1987. Additional Sediment Input into the Near-shore Region, *Shore and Beach*, 55(3-4), pp. 76-81.

Hoshino, K., 1977. Soil Sampling, Specialty Session 2, *Proceedings of 9th International Conference of Soil Mechanics and Foundations*, Vol. 3, Tokyo, Japan, pp. 469-478.

Jonsson, I.G. and Carlsen, N.A., 1976. Experimental and Theoretical Investigation in an Oscillatory Turbulent Boundary Layer, *Journal of Hydraulic Research*, 14(1), pp. 45-60.

Konrad, J.-M., 1990. Sampling of Saturated and Unsaturated Sands by Freezing, *Geotechnical Testing Journal*, 13(2), pp. 88-96.

Mathisen, P.P., 1993. *Bottom Roughness for Wave and Current Boundary Layer Flows over a Rippled bed*, Ph.D. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge.

McCabe, E.Y. and Kettle, R.T., 1985. Soil Freezing Response: Influence of Test Conditions, *Geotechnical Testing Journal*, 8(2), pp. 49-58.

Raudkivi, A.J. 1976. *Loose Boundary Hydraulics* (2nd edition), Pergamon Press, Oxford, England.

Schlichting, H., 1960. *Boundary Layer Theory (fourth ed.)*, McGraw-Hill, New York.

Singh, S. and Seed, H.B., 1982. Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing, *Journal of Geotechnical Engineering Division*, American Society of Civil Engineers, Vol. 108, No. GT2, February, pp. 247-264.

US Army Corps of Engineers, 2001. *Coastal Engineering Manual*, pp III-6-2-III-6-17.

Yoshimi, Y., Hatanaka, M., and Oh-Oka, H., 1978. Undisturbed Sampling of Saturated Sands by Freezing, *Soils and Foundations*, Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, 18(3), pp. 59-73.

Received May 1, 2003

Accepted May 23, 2003