

SCP공법 적용을 위한 굴패각-모래 혼합토의 전단과 압축특성

Shear Strength and Compressibility of Oyster Shell-Sand Mixtures for Sand Compaction Pile

윤길림¹ Yoon, Gil-Lim

윤여원² Yoon, Yeo-Won

채광석³ Chae, Kwang-Seok

김재권⁴ Kim, Jae-Kwon

Abstract

Strength and deformation characteristics of oyster shell-sand mixtures were investigated to utilize waste oyster shell being treated as a waste material. Standard penetration test (SPT) is a common method to obtain in-situ strength in sand. However, in case of oyster shell-sand mixtures, there was no information between SPT N-value and internal friction angle of mixture soils. In this paper SPT experiments from several large scaled model chamber tests and large scaled direct shear tests were carried out with varying unit weight of oyster shell-sand mixtures. Appropriate correlations were in the study observed among N-value, unit weight and internal friction angle, which make it possible to estimate in-situ strength from SPT and the coefficient of volume compressibility from the confined compression tests to compute the settlement of oyster shell-sand mixtures.

요 지

굴양식장에서 폐기물로 처리되는 굴패각을 지반재료로 이용하기 위해서 굴패각-모래 혼합토의 강도 및 변형 특성에 대해 조사하였다. 타설된 모래다짐말뚝 재료의 강도는 표준관입시험(SPT)에 의해 현장에서 타설된 모래다짐말뚝 강도를 확인하는 것으로 되어있다. 그러나 모래는 표준관입시험에서 얻어진 N값과 내부마찰각의 관계에 대해 상당히 밝혀져 있으나, 굴패각-모래 혼합토에 대해서는 N값과 내부마찰각의 관계가 연구되어 있지 않다. 본 연구논문에서는 단위체적중량이 다양한 굴패각-모래 혼합토를 대형 모형토조에서 표준관입시험 및 대형 직접전단시험을 수행하여 N값, 단위체적중량, 내부마찰각의 상호 상관성을 제시하였다. 이러한 연구결과는 현장에서 표준관입시험을 통한 굴패각-모래 혼합토의 강도 평가가 가능하게 했으며 구속압축시험을 통하여 체적압축계수를 산정하고 혼합토의 예상침하량을 계산할 수 있게 하였다.

Keywords : Direct shear test, Oyster shell, Sand mixture, SCP, SPT

1. 서 론

우리나라의 남해 및 서해 연해에서 이루어지는 굴양식은 주변 어민의 주요 소득원이 되고 있으나 양식된

굴의 출하에 있어서는 대부분의 경우 굴의 껍질을 제거한 후에 내용물만을 판매하고 있어 굴 집하장 주변에는 막대한 굴패각이 폐기물로서 남게 된다. 굴패각은 굴 채묘 및 비료 등으로 일정량이 재활용되고 있기

1 정회원, 한국해양연구원, 연안항만공학분부 책임연구원 (Member, KORDI, Coastal Harbor Engrg., glyoon@kordi.re.kr)

2 정회원, 인하대학교 환경토목공학부 부교수 (Member, Inha Univ. Dept of Civil & Environmental Engrg.)

3 정회원, 한국해양연구원, 연안항만공학분부 박사후연구원 (Member, KORDI, Coastal Harbor Engrg.)

4 정회원, 삼성물산, 건설부문 상부 (Member, Samsung Co. Engrg., & Construction)

는 하지만 재활용의 양적 한계 및 처리시의 집하장 확보, 살포 후 토질응결 및 경제성 등의 문제점이 거론되어 재활용의 활성화가 지연되고 있어, 양식되는 대부분의 굴폐각은 재활용되지 않고 매립하거나 주변에 적재하는 형식으로 처리되고 있는 실정이다.

굴폐각의 처리에 대한 연구는 연약지반 개량재, 샌드파일재, 안벽 등의 뒷채움재로서 활용하고자 관련 연구가 추진되어왔다(한국해양연구원, 2000, 2001, 2002). 국내 건설시장에 있어서는 건설재료의 부족 현상이 날로 심각한 문제점으로 대두되고 있으며 폐기물의 재활용에 대한 연구 투자도 실시되고 있다. 이러한 여건을 고려하여 볼 때 국내 현실에 적합하고 실용적인 대안 개발의 하나로서 굴폐각을 건설재료인 모래의 대체재로서 활용하기 위한 연구가 성공적으로 수행된다면 대부분의 연약지반이 해안에 위치하고 있어서 저렴한 운반비용으로 폐자원을 처리할 수 있는 장점을 가지고 있다. 이와 관련하여 굴폐각의 역학적 특성을 파악하기 위한 국내 연구 예는 굴폐각 재활용을 위한 공학적 특성연구(윤길림 등, 2001) 및 모래다짐말뚝 재료로서 파쇄 굴폐각의 특성조사(윤길림 등, 2003) 등을 들 수 있다. 그리고 일본에서는 굴폐각을 모래 대체재로서의 가능성 조사와 실제 시공 예를 다룬 연구(Okumura, 1996; Miyaji, 2000)와 폐기물의 재자원화, 지역한정적인 자원에 대한 운송과 가공경비의 최소화를 만족시킨다는 관점에서, 연약지반에 대한 도로광폭공사의 노상재료로서의 응용(Miyamoto, 2001) 등이 있다.

본 연구에서는 경남 통영지역에서 수집된 굴폐각과 인천송도 모래를 자연 상태에서 건조시켜 사용하였다. 굴폐각의 입경은 30mm정도가 되는 것을 사용하였으며 모래의 경우 원사나 세사의 구분은 없는 것으로 생각하여 실질적으로 굴폐각과 모래의 혼합비율은 중량비에 의한 1 : 2의 비율로 하였다.

2. 굴폐각 혼합토의 물리적 특성 및 전단특성

2.1 굴폐각 혼합토의 물리적 특성

그림 1과 표 1에 모래시료 및 굴폐각-모래의 혼합토에

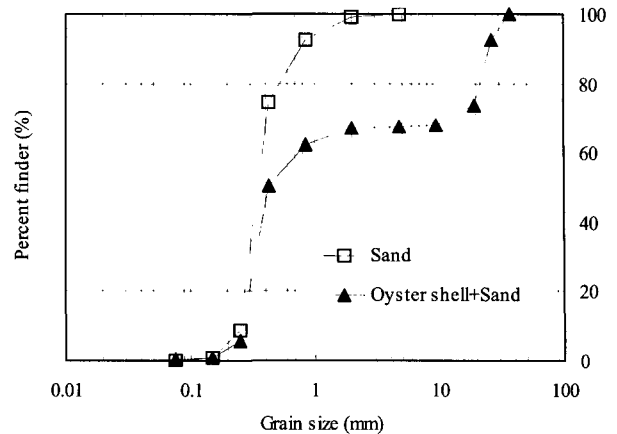


그림 1. 굴폐각-모래 혼합토의 입도분포곡선

대해서 체분석 및 함수비시험을 실시하여 그 결과를 나타내었다. 통일분류법에 따른 모래의 입도분포특성은 #4체(4.75mm)의 통과량이 50%이상이고 #200체(0.075mm)의 통과량이 5%보다 작은 시료일 때, 균등계수(C_u)가 6보다 크고 곡률계수(U_c')가 1 - 3의 범위인 경우에는 입도가 좋은 모래로 분류된다. 본 실험에 사용된 모래와 굴폐각 혼합토의 균등계수가 1.35 - 2.58의 범위이고, 곡률계수는 0.56 - 0.84의 범위를 나타내고 있으므로, 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류할 수 있다. 굴폐각과 모래의 혼합토는 중량비 1 : 2로 하여 각각의 자연건조상태시료를 중량비로 준비한 후, 최대한 균질하게 교반하여 시험을 실시하였다.

2.2 굴폐각 혼합토의 전단특성

2.2.1 모형토조내의 표준관입시험(SPT)

굴폐각과 모래의 중량비를 1 : 2로하여 초기단위체적 중량 10.5, 12.0, 14.0kN/m³로 시료를 조성하였다. 각각의 시료에 상재하중을 가하여 각각의 표준관입시험을 통한 N값을 측정하였다. 토조의 체적에 대한 시료무게를 사용하여 단위체적중량을 각각 계산하여 초기단위체적중량을 구하였으며 수평변위의 구속에 의하여 수평방향의 팽창은 없다고 가정하고 압축하중을 가한 후, 수직 침하량을 측정하여 압축후의 단위체적중량을 계산하였다.

시험장치는 크게 나누어서 밀도측정이 가능한 토조, 토층에 상재하중을 작용시키는 재하장치 및 표준관입시험 장치로 구성되어 있다. 그림 2와 같이 토조는 200리터의

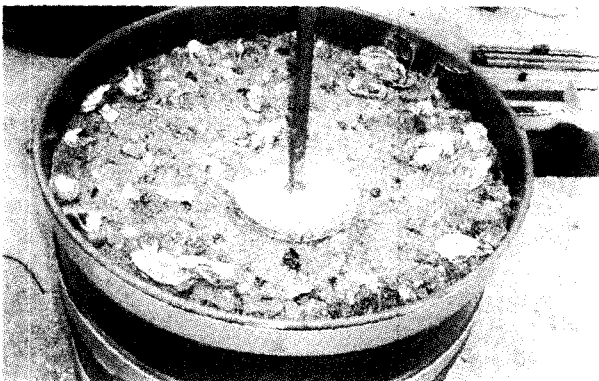
표 1. 모래와 굴폐각혼합토의 입도분포특성

	Water content (%)	D ₁₀ (mm)	D ₃₀ (mm)	D ₆₀ (mm)	C _u	U _{c'}
Sand	3	0.28	0.30	0.38	1.35	0.84
Oyster shell + Sand	1.5	0.29	0.35	0.75	2.58	0.56

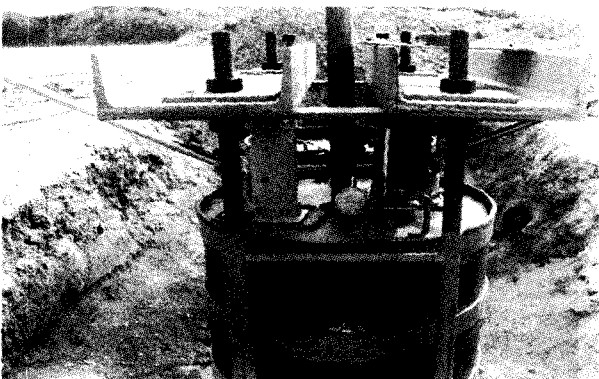
드럼통으로 제작하여 바닥판의 변형을 막기 위해서 2cm의 철판을 덧대었으며 아랫부분에는 밸브를 설치하여 포화가 가능하게 하였다. 재하판 중앙에는 10cm의 구멍을 뚫어서 표준관입시험 샘플러가 통과할 수 있도록 하였으며 수평변위를 억제하기 위해서 토조외부에 금속띠를 사용하여 구속하였다. 초기단위체적중량에 의한 시료조성 후 재하판 위의 유압잭을 통해 응력을 가하여 침하가 완료된 후에 표준관입시험을 실시하여 N값을 측정하였다.

표준관입시험은 초기단위체적중량 10.5, 12.0, 14.0kN/m³의 자연건조상태의 시료를 제작하여, 수직응력 40.6, 81.2, 121.8, 162.4kPa의 상재하중을 가하여 침하량을 측정하였다. 초기단위체적중량에 대하여 침하량의 측정에 의한 단위체적중량 변화를 계산하고 각각에 대하여 표준관입시험을 실시하여 N값을 측정하였다.

그림 3은 모래(16.0kN/m³)와 굴패각 혼합토(10.5, 12.0, 14.0kN/m³)에 대한 초기단위체적중량에 따른 N값과 상재하중의 관계를 도시한 것이다. 상재하중이 증가함에 따라 N값이 증가하고 있으며, 모래와 거의 비슷한 거동이 굴패각 혼합토에서도 나타나고 있다.



(a) 굴패각-모래 혼합토 시료



(b) 표준관입시험(SPT)의 모습

그림 2. 굴패각-모래 혼합토와 수행한 표준관입시험

그림 4는 굴패각 혼합토에 대한 상재하중에 따른 N값과 압축 후의 단위체적중량의 관계에서 단위체적중량이 클수록 N값은 증가하는 것을 알 수 있다.

모래의 N값은 상대밀도와 더불어 상부 흙의 무게에 의한 구속압의 영향을 받는다. 상대밀도(D_r)와 구속압의 관계 대해서는 Gibbs와 Holtz(1957)의 대형토조실험에 의한 연구를 青木(1985)가 동일한 D_r 에 대하여 ($\sigma_v' + 0.7\text{kgf/cm}^2$)와 N값의 관계(그림 5(a))와 동일한 σ_v' 에 대한 D_r 와 N값의 관계(그림 5(b))를 도시하였고 다음과 같은 식을 구하였다.

$$D_r = 25 \left(\frac{N}{\sigma_v' + 0.7} \right)^{0.43} \quad (1)$$

또한 Meyerhof(1957)는 다음과 같은 식을 제안하였다.

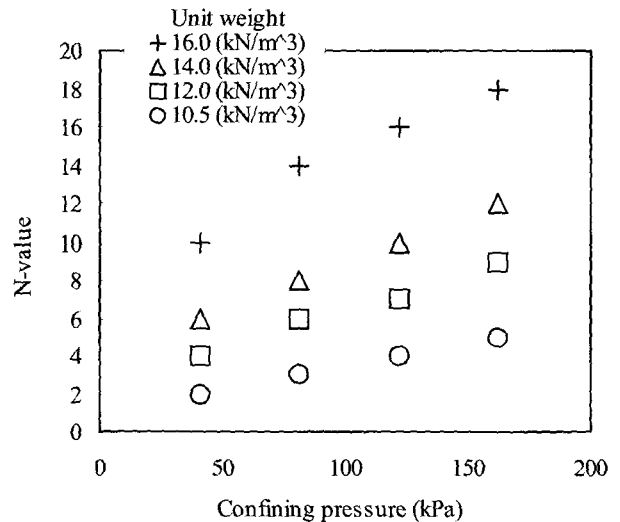


그림 3. 단위체적중량에 따른 N값과 상재하중의 관계

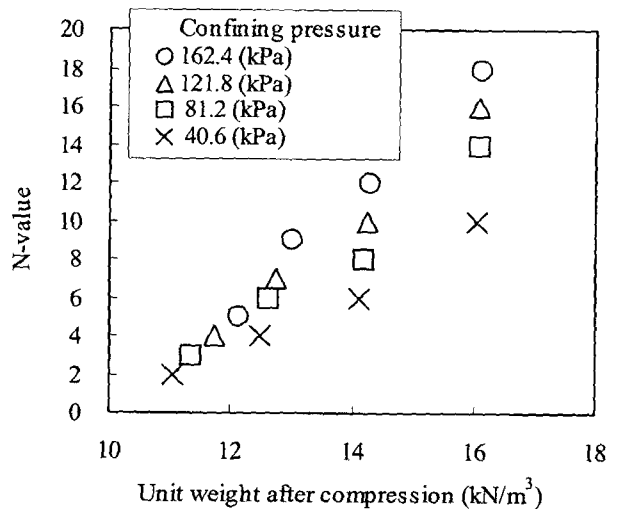
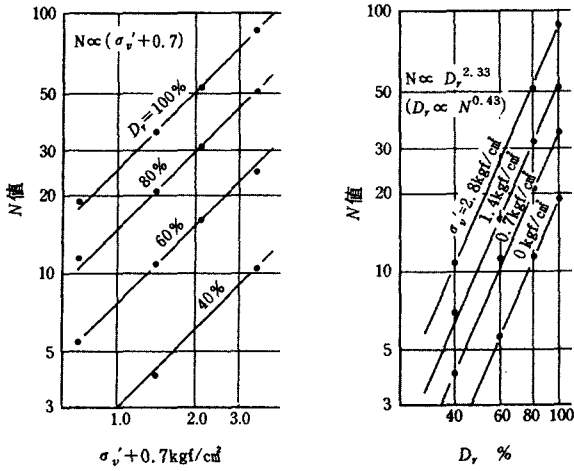


그림 4. 상재하중에 따른 N값과 압축후의 단위체적중량의 관계



(a) $(\sigma_v' + 0.7 \text{kgf/cm}^2) - N$ 값의 관계 (b) $D_r - N$ 값의 관계

그림 5. 상대밀도와 구속압의 상관관계

$$D_r = 21 \left(\frac{N}{\sigma_v' + 0.7} \right)^{0.5} \quad (2)$$

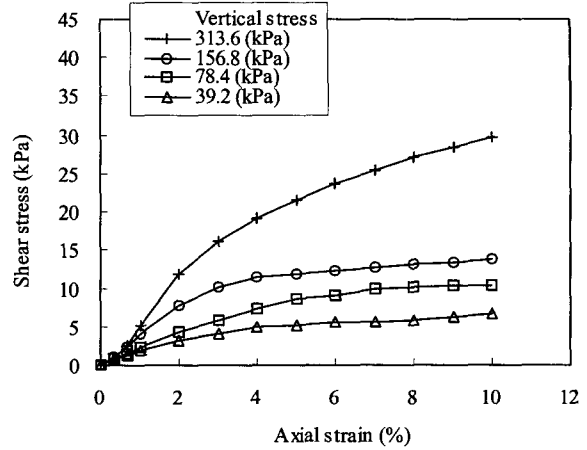
이와 같이 N값은 상대밀도에 의해 지배되고 있으며, 상대밀도는 구속압에 영향을 받는다. 모래의 내부마찰각은 상대밀도에 상관되어 있기 때문에 N값에서 내부마찰각을 추정할 때에는 구속압을 고려하지 않으면 안 된다. 그러나 본 실험과 같이 모래와 굴폐각을 혼합할 경우, 굴폐각의 입자크기가 일정하지 않고 파쇄성이 큰 재료에 위의 식을 대입하여 사용하는 것이 곤란하므로, 모래의 단위체적중량을 기준으로 굴폐각 혼합토의 N값을 추정하는 방법을 택하였다.

$$\left(\frac{\gamma_{\text{mixed soil}}}{\gamma_{\text{sand}}} \right) = 0.6 \left(\frac{100N}{\sigma_v' (\text{kPa}) + 70} \right)^{0.23} \quad (3)$$

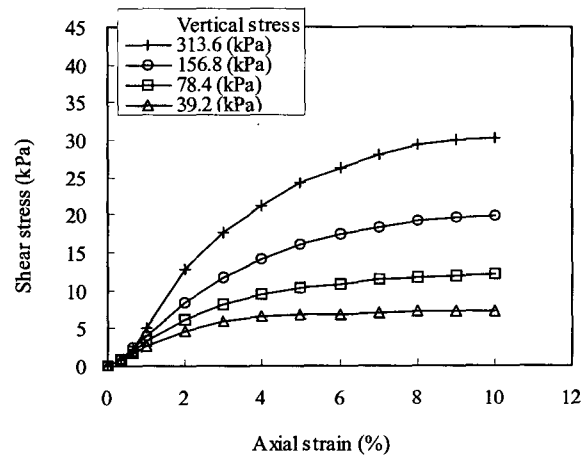
2.2.2 대형직접전단시험

대형직접전단시험기의 전단상자(단면적 $30 \times 30 \text{cm}$, 높이 19.5cm)에 굴폐각 혼합토를 초기단위체적중량 $10.5, 12.0, 14.0 \text{kN/m}^3$ 로 달리하여 시료의 초기높이 15.6cm 로 조성하였다. 수직하중을 $39.2, 78.4, 156.8, 313.6 \text{kPa}$ 로 가하여 압밀침하를 완료한 후에 평균전단속도 0.8mm/min 으로 전단시험을 실시하였다. 전단응력과 수평변위 관계에 있어서 일반적인 모래의 경우 느슨한 경우에는 첨두점이 발생하지 않고 변위의 증가와 함께 완만하게 전단강도가 증가하지만, 조밀한 경우에는 초기변위의 증가와 함께 급격하게 전단응력이 증가한 후 일정변위 이후 전단강도가 감소하는 첨두점이 나타난다. 최대전단응력은 수평변위가 증가하여도 더 이상 전단응력이 증가하지 않거나 감

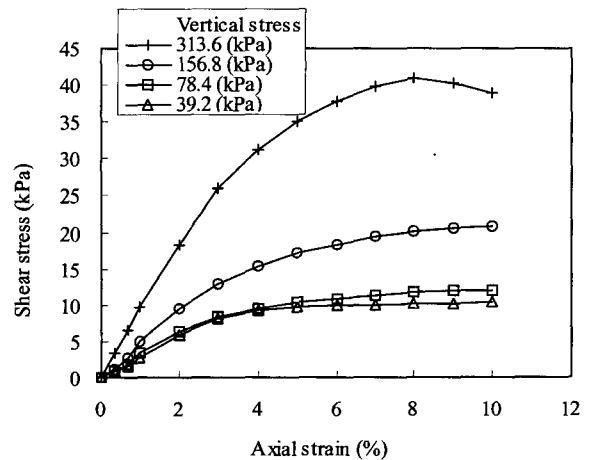
소할 경우, 첨두점의 값을 최대전단응력으로 결정하였고, 첨두점이 나타나지 않고 변형률이 증가할수록 전단응력이 증가하는 경우에는 변형률 10%일 때인 수평변위 30mm 일 때의 값을 최대전단응력으로 정하였다.



(a) 초기단위체적중량이 10.5kN/m^3 인 경우



(b) 초기단위체적중량이 12.0kN/m^3 인 경우



(c) 초기단위체적중량이 14.0kN/m^3 인 경우

그림 6. 굴폐각 혼합토의 초기단위체적중량에 따른 전단응력과 수평변위의 관계

그림 6에 굴폐각 혼합토에 대한 초기단위체적중량에 따른 전단응력과 수평변위의 관계를 나타냈다. 내부마찰각은 약 40 - 55도의 범위에서 나타나며, 초기단위체적중량이 클수록 내부마찰각도 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 수평변위의 증가와 함께 계속해서 전단응력이 증가하는 경화거동을 보였다. 이것은 느슨한 모래시료의 전단거동과 유사하다고 볼 수 있다.

그림 7은 수직응력에 따른 내부마찰각의 변화를 나타내었다. 수직응력이 증가함에 따라 내부마찰각은 감소하지만, 150kPa 이상이 되면 일정한 값을 갖는 경향을 볼 수 있다.

그림 8은 내부마찰각과 압밀 후의 단위체적중량비의 관계를 도시하였다. 단위체적중량비는 모래에 대한 각각의 혼합토의 단위체적중량비로 구하였으며, 초기단위체적중량에 대해 압축 후의 단위중량은 수직응력에 의해 변화가 된다. 단위체적중량비가 증가할수록 내부마찰각이 증가하는 것을 알 수 있으며, 다음과 같은 관계

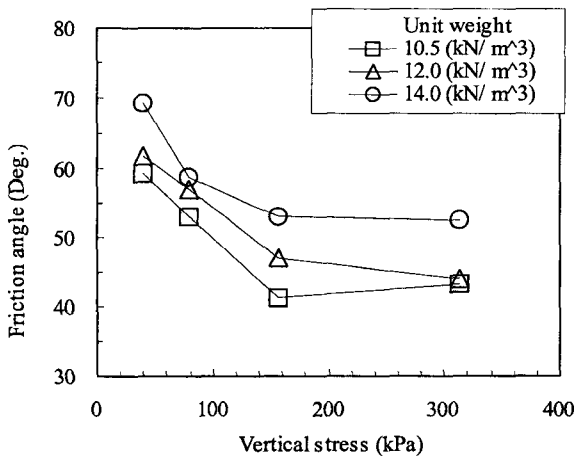


그림 7. 내부마찰각과 수직응력의 관계

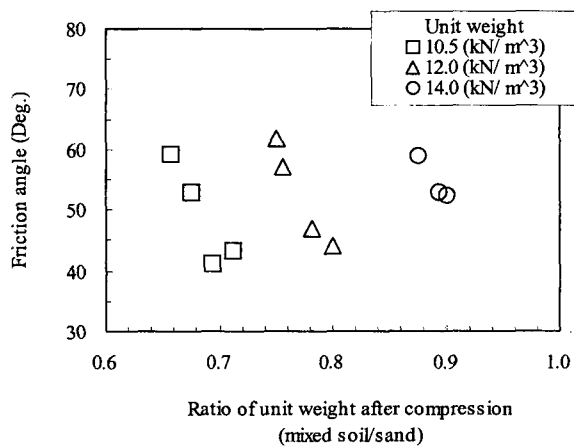


그림 8. 내부마찰각과 압밀 후의 단위체적중량비

식을 도출 할 수 있다.

$$\phi = \left(\frac{\gamma_{\text{mixed soil}}}{\gamma_{\text{sand}}} \right)^{0.67} / 500 \quad (4)$$

식 (4)에 모형토조실험에 구한 식 (3)을 대입하여, 다음과 같이 상재하중을 고려한 내부마찰각과 N값의 관계를 정의할 수 있다.

$$\phi = 45 \left(\frac{100N}{\sigma_v (\text{kPa}) + 70} \right)^{0.15} \quad (5)$$

항만 및 어항 설계기준(1999)에서는 Meyerhof가 제안한 상대밀도와 내부마찰각의 관계식에 얻어진 내부마찰각을 수정하여 다음과 같은 식을 제안하고 있다.

$$\phi = 25 + 3.2 \left(\frac{100N}{\sigma_v (\text{kPa}) + 70} \right)^{0.5} \quad (6)$$

또한 Dunham(1954)은 모래의 입자형상별로 내부마찰각과 N값의 관계를 정의하고 있는데, 입자가 각이 지고 입도분포가 좋은 시료에 대한 관계식은 다음과 같다.

$$\phi = 25 + \sqrt{12N} \quad (7)$$

그림 9에서 구속압에 따른 내부마찰각과 N값의 관계에 대해 본 실험에서 얻어진 추정식과 Meyerhof와 Dunham이 제안한 식의 결과를 비교하였다. 그림에서 알 수 있듯이 굴폐각 혼합토의 경우에 대해서 기존의 연구에서는 N값에 대한 내부마찰각이 과소평가되는 것을 알 수 있다. 또한 Dunham의 경험식과 같이 상재하중을 고려하지 않을 경우 N값으로부터 적절한 내부마찰각을 추정하는 것이 곤란하다.

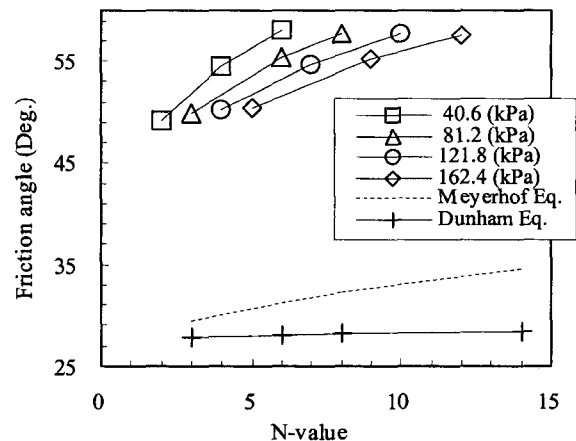


그림 9. 구속압에 따른 내부마찰각과 N값의 관계

2.3 압축특성

구속압축시험은 초기단위체적중량 10.5, 12.0, 14.0kN/m³의 굴폐각 혼합토에 대하여, 직접전단시험에서 이용한 대형직접전단 상자(단면적 30×30cm, 높이 19.5cm)에 시료를 조성하여 수직응력의 증가에 따른 침하량을 측정하였다. 그림 10은 구속압축시험 결과를 간극비 *e*와 수직응력으로 나타내었다. 초기의 단위체적중량에 따라서 다른 간극비를 갖는 시료는 초기단위체적중량이 큰 값을 가질수록 기울기가 완만해져 14.0kN/m³의 경우, 수직하중이 증가해서 거의 일정한 간극비 값을 나타내었다.

그림 11은 체적압축계수 *m_v*와 수직응력 *σ_v*의 관계를 도시하였다. 체적압축계수는 수직응력이 증가함에 따라 점차 감소하지만 약 150kPa에 이르면서 반전하여 증가하는 결과를 나타내고 있다. 이것은 초기에는 모래에 비해, 크기가 크고 강도가 약한 굴폐각이 1차파쇄를 일으

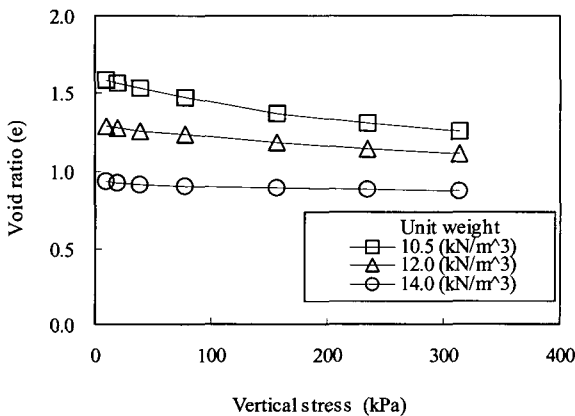


그림 10. 간극비와 수직응력의 관계

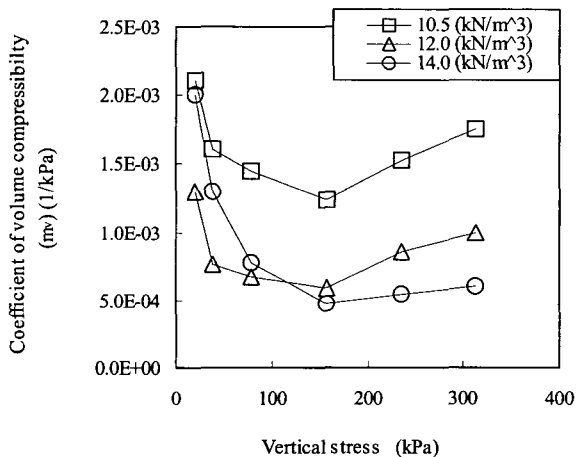


그림 11. 체적압축계수와 수직응력의 관계

킨 후 일정한 하중이상을 받을 경우 2차파쇄가 일어나는 것으로 생각되어진다. 또한 초기단위체적중량이 작을수록 2차파쇄는 크게 일어난다.

파쇄 굴폐각의 실험결과를 통하여 제시한 *m_v* - *σ_v*의 관계(윤길립 외 3인, 2003년)에 대하여, 모래의 단위체적중량을 고려하여 다음과 같은 식으로 수정하여 사용할 수 있다.

$$m_v = \alpha \left(\frac{1}{\sigma_v} \right)^\beta \left(\frac{\gamma_{mixed\ soil}}{\gamma_{sand}} \right) \quad (8)$$

여기서, $\alpha=0.003$, $\beta=0.4$

σ_v : 수직응력 (kPa)

$\gamma_{mixed\ soil}$: 굴폐각 혼합토의 단위체적중량

γ_{sand} : 모래의 단위체적중량

그림 12는 굴폐각 혼합토에 대한 구속압축시험에서 측정한 침하량과 식 (8)에서 추정된 *m_v*값에 의해 얻어진 예상침하량인 식 (9)의 비교를 나타내었다. 초기단위체적중량 10.5kN/m³의 경우, 실험결과와 예측곡선이 잘 일치하고 있으며, 초기단위체적중량의 값이 커질수록 예측곡선이 실제침하량을 크게 산정하는 경향임을 알 수 있다.

$$S = \sum_{i=1}^n m_{vi} H_i \Delta p \quad (9)$$

여기서, *m_{vi}* : 체적압축계수

H_i : 시료의 두께

ΔP : 응력증분

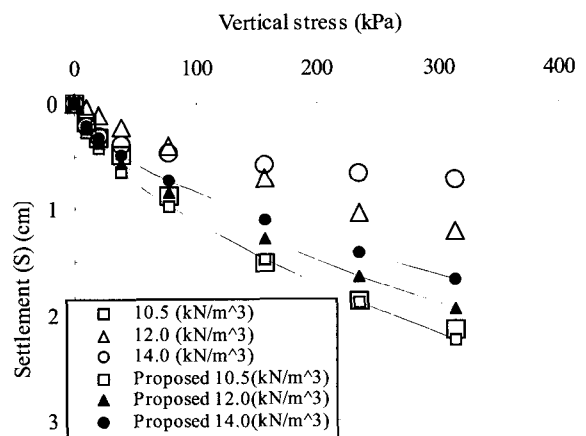


그림 12. 침하량과 수직응력의 실험값과 제안식의 비교

3. 결 론

굴패각을 모래다짐말뚝공법의 모래 대체재로서 사용하기 위하여 굴패각-모래 혼합토에 대하여 표준관입시험, 대형직접전단시험 및 구속압축시험을 실시하여 지반공학적인 특성을 분석한 결과는 다음과 같다.

- (1) 굴패각-모래 혼합토는 모래와 비슷한 거동을 나타내고 있으며 단위체적중량과 상재하중의 증가함에 따라 표준관입시험의 N값은 증가하는 것으로 나타났다.
- (2) 굴패각-모래 혼합토의 내부마찰각은 40 - 55도의 범위이고, 초기단위체적중량이 클수록 내부마찰각이 증가하는 것을 알 수 있다.
- (3) 굴패각-모래 혼합토의 초기단위중량이 클수록 내부마찰각도 증가하나 수직응력이 증가함에 따라 내부마찰각은 다소 감소하지만, 수직응력이 150kPa 이상 이 되면 내부마찰각은 일정한 값에 수렴하는 경향을 알 수 있었다.
- (4) 굴패각-모래 혼합토의 체적압축계수의 값은 수직응력이 증가함에 따라 감소하지만, 수직응력이 150kPa에 이르면 오히려 증가하는 경향을 나타내었다. 이것은 초기단위체적중량이 작아짐에 따라 2차 파쇄가 일어날 가능성이 있다는 것을 의미하는 것으로, 2차 파쇄의 가능성을 최소화하기 위해서는 굴패각-모래 혼합토의 초기단위중량을 14.0kN/m³ 이상으로 하는 것이 필요하다고 판단된다..

감사의 글

본 논문은 2003년 해양수산부 국책과제인 “굴패각 혼입 특수콘크리트 개발(IV)”의 연구 및 (주) 삼성물산과 인하대학교의 산학연 공동연구로 수행한 연구결과의 일부입니다. 현장시험을 수행한 인하대학교 안영천 군에게 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 윤길립, 권오순, 임영준, 양은익 (2001), “굴패각 재활용을 위한 공학적 특성 연구”, 대한토목학회 논문집, 제21권, pp.421-431.
2. 윤길립, 윤여원, 채광석, 권오순 (2003), “모래다짐말뚝(SCP) 재료로서 파쇄 굴패각의 특성조사”, 한국지반공학회논문집, Vol.19, No.5, pp.281-290.
3. 윤길립, 채광석 (2000 - 2003), 굴패각 혼입 특수콘크리트 개발, 한국해양연구원 보고서, 해양수산부.
4. 해양수산부 (1999), “항만 및 어항 설계기준”, 해양수산부, 제2편 11장 pp.250.
5. 青木一三三 (1985), “砂の内部摩擦角の新算定式”, 港湾物設計資料No.82, 日本鐵道施設協會, pp.30-35.
6. Dunham, J.W. (1954), “Pile foundations for building”, *Proc. of ASCE, Journal of the Soil Mech. and Found. Div.* 82, No. SM 1., Paper 866, pp.3-17.
7. Gibbs, H.J. and W.G. Holts (1957), “Research on Determining the Density of Sands by Spoon Penetration Testing”, *Proc. 4th ICSMFE*, Vol.1, pp.35-39.
8. Meyerhof, G.G. (1957), “Discussion on soil properties and their measurement”, *Discussion 2, Proc. 4th ICSMFE*, Vol.3, pp.110.
9. Miyaji Y. and Okumura T. (2000), “Geo-material properties of wasted oyster shell-sand mixture and its application as material for sand compaction pile”, *Proc. of Coastal Geotechnical Engineering in Practice*, Nakase & Tsuchida (Eds.), Rotterdam, pp.675-680.
10. Miyamoto, M., Taniguchi, K., Yamada, M. and Hana, S. (2001), “Reuse of Oyster shell Resources of civil engineering materials”, *Japan Ishigawa Industry Reports (IRII)*, Vol.51, pp.1-5.
11. Okumura T. and Kobayashi M. (1996), “Oyster shell-sand mixture as material of sand compaction pile”, *Proc. of Environmental*, Kamon (ed.), Rotterdam, pp.863-868.

(접수일자 2004. 3. 6, 심사완료일 2004. 11. 15)