

## 현장재하시험에 의한 굴폐각-모래 다짐말뚝의 거동특성 Behavior of Oyster Shell-Sand Compaction Pile in Field Load Tests

윤여원<sup>1)</sup>, Yeo-Won Yoon, 윤길림<sup>2)</sup>, Gil-Lim Yoon, 김근수<sup>3)</sup>, Keun-Soo Kim  
김재권<sup>4)</sup>, Jae-Kwon Kim, 김승현<sup>5)</sup>, Seung-Hyun Kim

<sup>1)</sup> 인하대학교 환경토목공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., Inha University

<sup>2)</sup> 한국해양연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute

<sup>3)</sup> 인하대학교 대학원, Graduate Student, Inha University

<sup>4)</sup> 삼성물산(주) 건설부문 상무, Director, Civil Tech Team, Samsung Engineering & Construction

<sup>5)</sup> 삼성물산(주) 건설부문 과장, Manager, Ph. D., Civil Tech Team., Samsung Engineering & Construction

**SYNOPSIS :** 실내시험 및 모형시험에 의하면 굴폐각은 모래의 대체재료로써 활용가능한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 굴폐각-모래 혼합시료에 대한 대형전단시험 결과와 굴폐각-모래 다짐말뚝에 대한 현장재하시험 결과를 제시하였다. 굴폐각-모래 혼합시료는 혼합율 30%까지는 혼합율이 증가할수록 전단강도가 증가하였으며 그 이상의 혼합율에서는 수렴하는 경향을 나타내었다. 순수모래다짐말뚝과 굴폐각-모래 다짐말뚝에 대한 재하시험 결과로부터 두 말뚝간의 허용지지력에는 거의 차이가 없음을 알 수 있었다.

**Key words :** 굴폐각, 대형전단시험, 모래다짐말뚝, 재하시험, 허용지지력

### 1. 서 론

우리나라의 남해 및 서해연안에서 이루어지는 굴양식업은 폐기물로써 대량의 굴폐각을 발생시키지만 굴폐각의 처리는 발생량의 약 10%만 굴채료 및 비료 등으로 재활용되고 대부분의 굴폐각은 매립 및 적재하는 방법으로 처리되고 있다. 이러한 처리방법은 경제성문제, 누출수에 의한 환경오염 및 지역주민의 민원발생 등 많은 어려움이 뒤따르고 있다.

한편 국내외 건설시장에서는 모래의 부족 현상이 날로 심각한 문제로 대두되면서 굴폐각을 모래의 대체재료로써 활용하고자 하는 연구가 국내외에서 이루어졌다(運輸省第二港灣建設局, 1992와 1993; Okumura와 Kobayashi, 1996; Miyaji 와 Okumura, 2000; 윤길림과 김순호, 2002; 안영천, 2004).

그 동안 국내에서의 연구는 대부분 실내시험과 모형토조사시험으로 국한해서 굴폐각-모래 혼합재에 대한 역학적 특성에 초점이 맞추어져 수행되었다. 그리고 시험결과 굴폐각의 활용가능성이 높게 판단되었다. 따라서 현장시험의 성공적으로 수행되어 모래다짐말뚝의 재료로써 굴폐각의 활용가능성을 확인할 수 있다면, 모래다짐말뚝 공법의 특성상 굴폐각의 대량처리가 가능할 것이다. 또한 연약지반이 대부분 해안에 위치하고 있으므로 저렴한 운반비용으로 굴폐각을 처리할 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 굴폐각이 혼합된 모래다짐말뚝의 현장적용성 및 지반보강효과를 판단하기 위하여 대형전단시험을 수행하여 지반강도정수를 구하였고, 굴폐각의 혼합율에 따라 연약지반에 모래다짐말뚝을 현장 시공한 후 재하시험을 수행하여 모래의 허용지지력과 비교·분석하여 굴폐각 활용가능성을 고찰하였다.

## 2. 문헌고찰

### 2.1 굴폐각의 물리·역학적 특성

일본의 運輸省에서는 굴폐각의 건설재료로써의 활용가능성을 검토하기 위하여 원형굴폐각과 최대직경이 30mm 및 5mm의 파쇄 굴폐각으로 나누어 물리·역학적 시험을 수행하였다(運輸省第二港灣建設局, 1992). 굴폐각의 실내시험 결과에 따르면 파쇄 굴폐각의 최대입경이 작아질수록 비중은 증가하여 일반적인 모래의 비중에 근접해지는 경향을 나타내었다. 그러나 건조단위중량은 일반적인 모래의 경우보다 상당히 작으므로 굴폐각은 모래에 비해 경량재인 것으로 나타났다.

또한 굴폐각의 최대입경이 작아질수록 굴폐각의 분쇄할 때 발생하는 미립분에 의해 투수계수가  $3.2 \times 10^0 \text{ cm/s}$ 에서  $8.1 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$ 로 감소하였고, 모래의 투수계수 범위가 대략  $1.0 \sim 1.0 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ 이므로 굴폐각의 투수계수는 모래와 비슷하거나 약간 더 큰 것을 알 수 있다. 그리고 굴폐각의 최대입경이 작아질수록 내부마찰각은 증가하며, 최대입경 5mm인 파쇄 굴폐각의 경우  $42^\circ \sim 57^\circ$ 의 범위를 나타내었다. 느슨한 모래의 내부마찰각 범위가 약  $30 \sim 35^\circ$ , 조밀한 모래에서는 약  $40^\circ$  이상을 나타내므로, 굴폐각을 모래의 입자크기와 비슷하게 파쇄한 경우의 내부마찰각은 모래보다 큰 것을 알 수 있다.

### 2.2 굴폐각-모래 혼합재의 물리·역학적 특성

일본의 運輸省에서 平省3年度에 굴폐각의 물리·역학적 시험을 수행한 결과 굴폐각이 건설재료로써 활용 가능함을 확인하였다. 그리고 平省4年度에는 Ishinomaki(石巻)항의 동북방파제 하부 연약 점토층의 개량에 굴폐각과 모래를 혼합한 모래다짐말뚝(Oyster Shell-Sand Compaction Pile)의 시공가능성을 확인하기 위하여 실내토질시험과 현장 표준관입시험(Standard Penetration Test)을 수행하였다(運輸省第二港灣建設局, 1993).

시료는 최대입경이 30mm인 굴폐각, 原砂, 洗砂, 混合材(굴폐각, 原砂, 洗砂를 1:1:1의 체적비로 혼합)를 사용하였다. SPT의 결과에 따르면 모래(原砂:洗砂=1:1)의 N값은 깊이에 따라 10~20, 혼합재(굴폐각:原砂:洗砂=1:1:1)는 14~20을 나타내었으며, 재료에 따라 크게 차이가 나지 않는 것으로 나타났다.

## 3. 실험

### 3.1 시료

본 연구의 현장과 실내에서 사용된 시료는 통영지역으로부터 운반된 굴폐각과 시험 현장에서 통상적으로 사용되는 낙동강 하구의 을숙도사를 자연상태에서 건조시켜 사용하였으며, 굴폐각과 을숙도사의 자연함수비는 각각 23.1%와 7.0%로 굴폐각은 높은 자연함수비를 나타내었다. 그림 1에 본 연구에서 사용한 굴폐각과 을숙도사를 나타내었으며, 굴폐각은 최대입경 50mm 정도이고 을숙도사는 굴폐각과 퍨각이 소량 혼합되어 있었다.

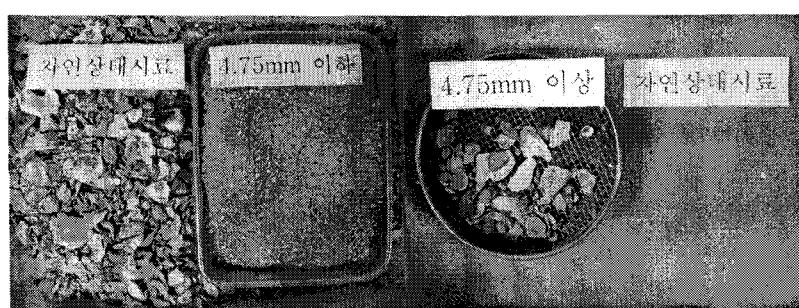


그림 1. 실내 및 현장시험에서 사용한 굴폐각과 을숙도사

현장시험에서는 페이로더를, 실내시험에서는 비커를 이용하여 체적을 계산하여 혼합하였고, 굴폐각의 체적 혼합율을 0, 20, 30, 40, 50, 100%로 달리하여 6개의 시료를 준비하였다. 그림 2에 6개의 혼합 시료에 대한 입도분포곡선을 나타내었으며, 표 1에 굴폐각과 을숙도사의 혼합율에 따른 혼합시료의 물리적인 특성을 나타내었다.

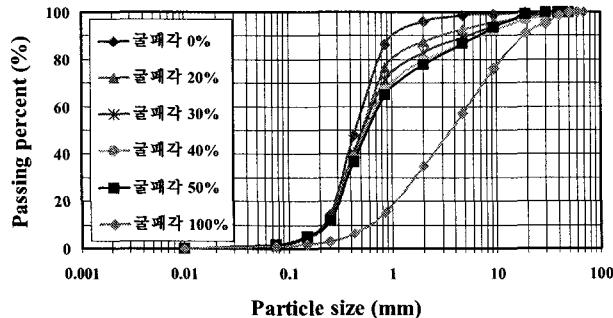


그림 2. 굴폐각 혼합율에 따른 혼합시료의 입도분포곡선

표 1. 굴폐각-을숙도사 혼합시료의 물리적 특성

굴폐각 혼합율(%)	0	20	30	40	50	100
균등계수	2.43	2.61	2.86	3.00	3.17	8.50
곡률계수	1.02	0.89	0.83	0.77	0.77	1.06
$\gamma_d(\text{max})(\text{kN/m}^3)$	16.7	16.5	16.4	16.2	16.0	10.4
$\gamma_d(\text{min})(\text{kN/m}^3)$	13.7	13.4	13.3	13.1	12.9	7.8
$e_{\text{max}}$	0.94	0.97	0.98	0.99	1.01	2.17
$e_{\text{min}}$	0.58	0.60	0.60	0.61	0.62	1.39
$G_s$	2.64	2.63	2.63	2.62	2.58	2.48
USCS	SP	SP	SP	SP	SP	

### 3.2 대형전단시험

본 연구의 현장시험에서 사용된 굴폐각-을숙도사 혼합시료의 압축특성과 전단특성을 고찰하기 위하여 실내에서 대형전단시험을 KS F 2343-1997의 규정을 적용하여 수행하였고, Head(1982)가 제안한 방법을 참고하였다.

본 연구에서 수행한 굴폐각-을숙도사 혼합시료의 대형전단시험 계획을 표 2에 나타내었다.

표 2. 대형전단시험 계획

시료	수직응력 ( $\text{kN/m}^2$ )	압밀후 상대밀도 (%)
굴폐각 혼합율 0, 20, 30, 40, 50%	40, 80, 160, 320	$70.0 \pm 1.0$

### 3.3 굴폐각-모래 다짐말뚝

SCP를 시공하게 될 원지반에서 SPT를 실시한 결과 N값이 2~3정도의 연약지반이었다. 표 3에 SCP 시공 원지반의 깊이에 따른 물리적인 특성을 나타내었다. 지표면으로부터 약 5.5m까지의 흙은 통일분류법으로 CL-ML 또는 CL로 분류되었고, 액성지수가 1보다 커서 불안정한 상태에 있는 연약지반이었다.

표 3. 모래다짐말뚝 시공 원지반의 물리적 특성

깊이 (m)	자연함수비( $w_n$ )	애터버그 한계시험			USCS	비중
		액성한계( $w_f$ )	소성지수( $H$ )	액성지수( $LI$ )		
2.5	40.3	29.0	8.4	2.3	CL-ML	2.69
5.5	52.4	35.5	17.3	2.0	CL	2.69
7.0	23.8	N.P.	N.P.	-	SW	2.70
8.5	35.6	N.P.	N.P.	-	SW	2.67
10.0	26.7	N.P.	N.P.	-	SP	2.70
11.5	15.6	N.P.	N.P.	-	SW	2.67

굴폐각 혼합율의 변화에 따른 현장적용성과 시공성을 판단하기 위하여 표 4에 나타낸 바와 같이 1개의 SCP와 5개의 OSCP를 현장시공 하였다. 표 4의 SCP 및 OSCP 시공단면과 같이 SCP 및 OSCP의 말뚝직경은 0.7m, 말뚝길이 10m, 말뚝간 중심거리는 가로·세로 각각 3.2m로 계획하였다. 그리고 실내시험에서 사용한 최대직경 50mm의 굴폐각과 최대직경 20mm의 을숙도사를 사용하여 시공하였으며, 자연상태에서의 함수비는 각각 23.1%와 7.0%이었다.

표 4. 모래다짐말뚝 및 굴폐각-모래 다짐말뚝의 시공계획

번호	굴폐각 혼합율 (%)	SCP	시공단면	비고
1	0	실시		
2	100	타설실패		
3	20	실시		
4	30	실시		
5	40	실시		
6	50	실시		

\* 원안의 숫자는 굴폐각 혼합율

- 굴폐각의 최대직경 : 50mm
- 혼합비율 : 체적비
- $w_n(\text{굴폐각})$ : 23.1%,  $w_n(\text{모래})$ : 7.0%
- 다짐말뚝 직경 : 0.7m
- 다짐말뚝 길이 : 10m
- 다짐말뚝간 중심 간격 : 3.2m
- 굴폐각 내의 PP-Rope와 굴폐각의 높은 함수비에 의해 casing이 막혀 2번 타설실패

### 3.4 재하시험

본 연구에서는 ASTM D 1143-81, KS F 2445-1979에 규정되어 있는 말뚝의 하중 재하방법 중 앵커말뚝의 반력을 이용하여 하중을 재하하기 위해 SCP 및 OSCP 주위의 네 곳의 지점에 앵커말뚝을 시공하였다. 반복하중재하 시험법으로 시험을 수행하였으며, 표 5에 굴폐각-모래 다짐말뚝의 재하시험개요 및 재하시험대를 나타내었다.

표 5. 모래다짐말뚝 및 굴폐각-모래 다짐말뚝의 재하시험개요

번호	굴폐각 혼합율 (%)	재하시험	재하시험대	비고
1	0	실시		<ul style="list-style-type: none"> <li>• 다짐말뚝 직경 : 0.7m</li> <li>• 다짐말뚝 길이 : 10m</li> <li>• 다짐말뚝간 중심 간격 : 3.2m</li> <li>• 예상최대하중(극한하중) : 400kN</li> <li>• 재하 단계하중 : 50kN 제하 단계하중 : 100kN</li> <li>• 각 주기의 종료하중은 100kN씩 증가</li> <li>• 재하관측시간 : 20분(초기압축하중) 10분(재압축하중)</li> <li>제하관측시간 : 10분, 종료시는 30분</li> </ul>
2	100	-		
3	20	실시		
4	30	실시		
5	40	실시		
6	50	실시		

### 4. 실험결과 및 고찰

#### 4.1 대형전단시험

대형전단시험을 통하여 굴폐각 혼합율에 따른 굴폐각-모래 혼합시료의 전단특성을 확인하였으며, 시험결과는 그림 3에 나타내었다.

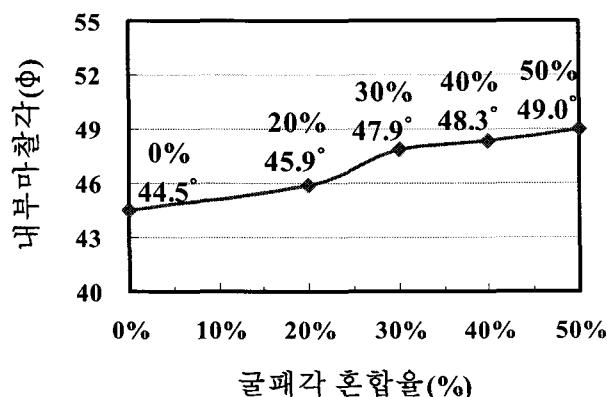


그림 3. 굴폐각 혼합율과 내부마찰각의 관계

그림 3에서 굴폐각 혼합율 30%까지는 44.5°에서 47.9°로 내부마찰각이 큰 증가를 나타내었으나, 40%에서는 48.3°, 50%에서는 49.0°로 수렴하는 경향을 보여주고 있다. 이것은 굴폐각 혼합율이 30%을 넘으면 굴폐각이 모래보다 상대적으로 많아지게 되어 굴폐각의 오목한 부분 및 굴폐각 간의 간극에 모래가 완전히 채워지지 않는 경우가 많아지게 될 것이다. 따라서 굴폐각의 파쇄 후에 전단저항을 유지하기 위한 모래가 부족 하므로, 굴폐각만의 전단저항이 나타나게 되어 굴폐각 혼합율이 증가하여도 내부마찰각은 크게 증가하지 않는 것으로 생각된다.

윤길립과 양은익(2000), 윤길립과 김순호(2002)는 굴폐각의 입경이 클수록, 혼합율이 증가할수록 내부마찰각이 증가한다고 하였다. 굴폐각의 입경이 크면 전단면에서 더 큰 전단저항을 할 수 있으므로, 입경이 커질수록 내부마찰각은 32.5°에서 40.9°로 증가하였다. 또한 굴폐각은 파쇄할 때 까지 모래보다 더 큰 전단저항을 할 수 있으므로, 굴폐각 혼합율이 증가함에 따라 내부마찰각도 35.2°에서 43.2°로 증가하는 경향을 나타내었으나, 굴폐각 혼합율이 50%이상에서는 거의 증가하지 않았다. 또한 안영천(2004)은 모래와 굴폐각을 중량비로 2:1로 혼합하였을 때, 밀도의 변화에 따른 내부마찰각의 범위가 약 43°~53°라고 하였다.

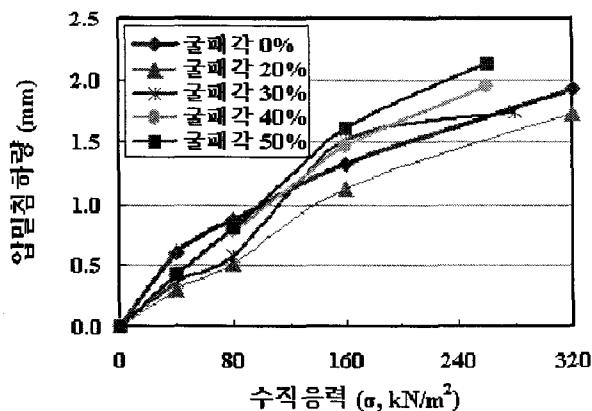


그림 4 굴폐각 혼합율에 따른 수직응력-압밀침하량 관계

수직응력-압밀침하량을 나타낸 그림 4에서 굴폐각 혼합율 20%인 경우에는 전 수직응력에서 모래의 침하량보다 작고, 굴폐각 혼합율이 30%, 40%, 50%인 경우에는 작은 수직응력 40, 80kN/m<sup>2</sup>에서는 모래의 침하량보다 작으나 일정 수직응력 100kN/m<sup>2</sup>을 넘으면서부터 더 큰 침하가 발생하였다. 이것은 일정 수직응력 이상에서 발생하는 굴폐각의 파쇄특성 및 굴폐각 혼합율이 증가하면 간극을 채워줄 모래의 부족현상과 관련이 있다고 생각된다.

즉 굴폐각이 작은 수직응력에서는 파쇄가 거의 발생되지 않지만, 항복수직응력으로 생각되는 100kN/m<sup>2</sup>을 넘으면 파쇄가 쉽게 발생하였다. 그리고 굴폐각 혼합율 20%인 경우에는 간극에 채워져 있는 모래에 의해 추가침하가 크게 발생하지 않았지만, 굴폐각 혼합율 30%, 40%, 50%인 경우에는 간극에 모래가 채워지지 않는 경우가 많으므로 추가침하가 발생함으로써 모래보다 더 큰 침하량이 발생하는 것으로 생각된다.

## 4.2 재하시험

표 6에는 극한하중, 항복하중, 허용하중을 SCP 및 OSCP의 단면적으로 나누어 굴폐각 혼합율에 따른 극한지지력, 항복지지력, 허용지지력을 비교하여 나타내었다. 결과를 비교해보면 OSCP의 허용지지력은 260~271kN/m<sup>2</sup>으로 SCP의 269kN/m<sup>2</sup>과 비슷하거나 약간 작았다. SCP와 OSCP의 허용지지력이 비슷한 이유는 주변지반이 연약한 점성토 지반이므로 다짐말뚝 주변이 bulging failure가 발생하기 때문으로 생각된다.

표 6. 굴폐각 혼합율에 따른 극한, 항복, 허용지지력의 비교

굴폐각 혼합율(%)	극한지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	항복지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	허용지지력 (kN/m <sup>2</sup> )
0	806	572	269
20	780	598	260
30	780	572	260
40	813	546	271
50	780	598	260

우리나라의 구조물 기초 설계기준(한국지반공학회, 1998)에서는 극한지지력을 구하여 설계에 사용할 것을 제안하고 있으며, 또한 중요한 구조물에서는 허용변위 이상의 침하가 발생하지 않도록 하고 있다. OSCP의 경우 하중을 재하하면 굴폐각의 파쇄에 의한 과대침하가 발생할 수 있으므로, Terzaghi와 Peck(1967), Touma와 Reese(1974)의 제안치를 적용하여 허용침하량을 25.4mm(1inch)로 정하고 허용침하량이 발생했을 때의 극한지지력을 구하였다. 허용지지력은 극한지지력을 안전율 2(Touma와 Reese(1974)는 안전율 2를 제안, Terzaghi와 Peck(1967)은 1.5를 제안)로 나누어 계산하였으며, 그 결과를 표 7에 비교하여 나타내었다. 굴폐각 혼합율에 따른 허용침하량 발생시의 허용지지력을 비교해보면 OSCP의 경우 234~254kN/m<sup>2</sup>이며 SCP의 234kN/m<sup>2</sup>보다 약간 크거나 비슷하게 나타났다.

표 7. 허용침하량(25.4mm) 발생시의 허용지지력 비교

굴폐각 혼합율(%)	극한하중 (kN)	극한지지력 (kN/m <sup>2</sup> )	허용지지력 (kN/m <sup>2</sup> )
0	180	468	234
20	195	507	254
30	180	468	234
40	193	502	251
50	190	494	247

## 5. 결 론

본 연구는 연약지반을 개량하기 위한 SCP 공법의 모래 대체재료로써 굴폐각을 활용하기 위해 굴폐각의 혼합율을 달리하여 실내시험으로는 대형전단시험을 수행하였고, 현장에서는 OSCP의 시공 및 재하시험을 수행함으로써 굴폐각의 SCP 공법의 현장적용성 및 시공성에 대한 다음과 같은 연구결과를 얻었다.

1. 굴폐각-모래 혼합시료를 약 70%의 상대밀도로 조성한 후 1시간 동안 압밀을 시킨 결과 굴폐각 혼합율 20%의 경우에는 모든 수직응력에서 모래보다 작은 침하량이 발생하였으나, 굴폐각의 혼합율이 30% 이상의 경우에는 항복수직응력( $100\text{kN/m}^2$ )보다 큰 수직응력에서 모래보다 큰 침하량이 발생하였다.
2. 내부마찰각은 굴폐각의 혼합율이 증가할수록 커진다. 굴폐각 혼합율이 30%까지는 내부마찰각은 크게 증가하지만, 40%와 50%에서는 내부마찰각의 증가가 크지 않고 수렴하는 경향을 나타낸다.

3. 연약 점성토 지반에 시공한 SCP 및 OSCP에 대하여 재하시험을 수행한 결과 허용지지력은 굴폐각의 혼합율에 따라 큰 차이가 없었고 SCP와 비슷하거나 약간 작았다. 허용침하량(25.4mm)이 발생했을 때의 허용지지력 또한 SCP보다 약간 크거나 비슷하였다.

## 감사의 글

본 연구는 2005년 삼성물산(주)의 연구비 지원으로 한국해양연구원과 공동으로 수행된 연구의 일부로써 이에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 안영천 (2004), "모형 시험에 의한 굴폐각 혼합토의 거동특성 연구", 인하대학교 대학원 석사학위논문.
2. 윤길립, 양은익 (2000), "굴폐각을 혼합한 특수 콘크리트 개발", 한국해양연구원보고서, 해양수산부, pp.73~100.
3. 윤길립, 김순호 (2002), "굴폐각 혼입 특수콘크리트 개발", 한국해양연구원보고서, 해양수산부, pp.15 ~40.
4. 한국지반공학회 (1998), "구조물 기초 설계기준", 도서출판 구미서판, pp.118~280.
5. 運輸省第二港灣建設局 (1992), "平成3年度 石巻港建設資材活用調査報告書".
6. 運輸省第二港灣建設局 (1993), "平成4年度 石巻港建設資材活用調査報告書".
7. Head, K. H. (1982), "Manual of soil laboratory testing". Pentech Press, pp.509~580.
8. 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.
9. 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.
10. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), "Soil Mechanics in Engineering Practice, 2nd ed", John Wiley and Sons, New York, pp.346~352.
11. Touma, F. T. and Reese, L. C. (1974), "Behavior of Bored Piles in Sand", Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 100, no. GT7, pp.749~761.