

## 조개껍질 혼합모래의 지반공학적 특성

### Geotechnical Characteristics of Shell-Sand Mixtures

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

- 1) 인하대학교 환경토목공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engr., Inha University
- 2) 한국해양연구원 책임연구원, Chief Researcher, Korea Ocean Research & Development Institute
- 3) 삼성물산(주) 건설부문 상무, Samsung Engineering & Construction
- 4) 삼성물산(주) 건설부문 과장, Manager, Ph. D., Civil Tech Team., Samsung Engineering & Construction
- 5) 인하대학교 대학원, Graduate Student, Inha University

**SYNOPSIS** : Shell-sand mixtures are commonly used for reclamation projects. This study presented the engineering properties of shell-sand mixtures. Shell shows higher specific gravities and less compressibilities than quartz sand. From large shear box tests, it can be seen that the shear strength increased with the increase of shell mixtures. At 30% shell mixtures showed about 6° increase in shear friction angle.

**Keywords** : Shell-sand mixtures, Shear strength, Friction angle, Compressibility

## 1. 서론

연약지반의 개량에 있어서 지반공학적 특성이 우수한 모래의 사용은 필수적이며 그 동안 국내에서도 항만 공사 등의 지반개량에 모래의 사용이 주류를 이루어 왔다. 해안공사에 사용되는 모래의 대부분은 해상에서 준설했던 모래로서 조개껍질 등이 함유되어 있는 것이 일반적이다. 그 동안 국내 혹은 해외에서 재활용 혹은 모래의 대체재료로서 파쇄 굴껍질을 연약지반 개량재, 샌드파일재, 안벽 등의 뒷채움재로서 활용하고자하는 연구가 추진된 바 있으며 실제적으로 굴껍질을 혼합하여 일본 동북지방의 방파제 기초지반을 개량한 사례가 있다(윤길림 등, 2001, 2003, 2004; Miyamoto 등, 2001; Miyaji와 Okumura, 2000; Okumura와 Kobayashi, 1996). 그러나 조개껍질 함유모래에 대한 압축 특성, 전단강도 특성에 대한 의문이 제기되고 있음에도 지반공학적 특성에 대한 연구는 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 조개껍질 함유량에 따른 침하 특성 및 전단강도 변화를 고찰하고자 대형직접전단시험을 수행하였다.

## 2. 기본 물성 시험

### 2.1 시험 시료

본 연구에서 사용된 조개껍질은 인천 영종도지역의 해안에서 채취된 바지락과 동죽(9:1)을 파쇄하여 3/8"(9.52mm)체로 걸러 이를 통과한 시료만을 조개껍질 혼합모래에 사용하였으며 모래는 최대 입경 4.75mm 이내로 제한하였다. 조개껍질은 보통의 흙 입자의 형상과는 달리 길이가 2.5~6.0cm, 너비는 2~5cm이며 두께는 0.5~1.0mm 정도의 달걀모양의 타원형의 판상구조를 가지고 있다.

조개껍질 혼합모래는 중량비를 기준으로 조개껍질 혼합비율을 각각 0%, 5%, 10%, 20%, 30%로 달

리하여 총 5개의 시료를 제작하였으며 본 연구에서 조개껍질 혼합모래의 공학적 특성을 파악하기 위한 시험에 사용된 시료는 조개껍질 혼합비율이 다른 5개의 시료에 대해 물리적 특성시험과 역학적 특성 시험을 행하였다. 연구에 사용된 시료와 그에 대한 혼합비율은 표 1과 같다.

표 1. 조개껍질 혼합모래의 혼합비율

시 료		S-0	S-5	S-10	S-20	S-30
혼합비 (%)	조개껍질	0	5	10	20	30
	모래	100	95	90	80	70

## 2.2 물성시험 결과

본 연구에서 조개껍질 혼합모래의 자연상태의 함수비는 조개껍질 혼합비에 따라서 약간의 변화가 있으나 대체적으로 함수비 0.18%~0.41%로 나타났으며 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 자연상태의 함수비도 약간 증가하였다.

조개껍질의 혼합에 따른 비중 시험 결과를 아래의 표 2에 나타내었다. 조개껍질의 비중 2.88로서 모래의 비중인 2.65보다 큰 값을 나타내고 있다. 따라서 혼합비가 클수록 비중이 증가하는 경향을 나타내며 혼합비에 따라 2.67~2.88까지의 범위를 보이고 있다.

표 2. 조개껍질 혼합모래의 비중

대 상 시 료	비 중 (Gs)
조개껍질 혼합비 0%(S-0)	2.65
조개껍질 혼합비 5%(S-5)	2.67
조개껍질 혼합비 10%(S-10)	2.68
조개껍질 혼합비 20%(S-20)	2.70
조개껍질 혼합비 30%(S-30)	2.72
조개껍질 혼합비 100%(S-100)	2.88

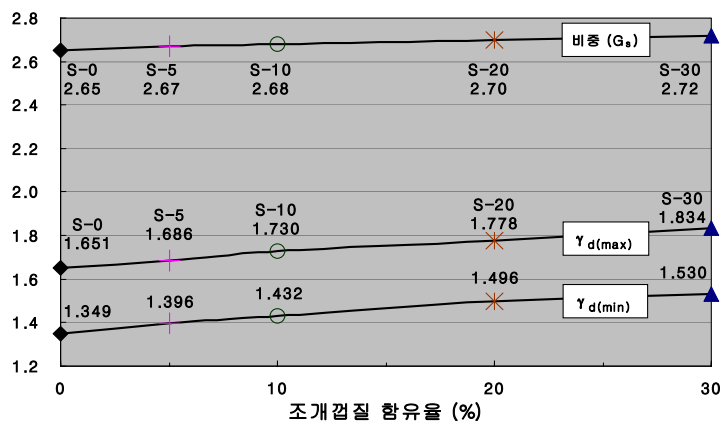


그림 1. 조개껍질 혼합모래의 최대·최소건조단위중량 및 비중

또한 조개껍질 혼합모래의 최대·최소건조단위중량과 최대건조단위중량을 최소건조단위중량에 대한 비로 나타낸 건조단위중량비를 표 3에 나타내었다. 표 3에 나타낸 바와 같이 최대건조단위중량의 경우  $1.651\text{g/cm}^2 \sim 1.834\text{g/cm}^2$ 를 보이고 있고 최소건조단위중량의 경우  $1.349\text{g/cm}^2 \sim 1.530\text{g/cm}^2$ 를 보이고 있다. 각 시료별 최대·최소건조단위중량의 변화를 살펴보면 모래에서 조개껍질 혼합비가 30%인 S-30으로 갈수록 최대·최소건조단위중량은 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 모래의 건조단위중량보다 조개껍질의 건조단위중량이 크므로 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 그에 따라 조개껍질 혼합모래의 최대·최소건조 단위중량도 증가하는 양상을 보이는 것으로 판단된다.

또한 각 시료별 건조단위중량비를 살펴보면 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 건조단위중량비는 줄어드는 것을 알 수 있다. 이는 표 2에 나타낸 것처럼 조개껍질의 비중이 모래의 비중보다 크고 이러한 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 최소건조단위중량과 최대건조단위중량이 모두 증가하게 되므로 이에 따라 건조단위 중량간의 차이는 상대적으로 줄어들기 때문으로 판단된다.

**표 3. 조개껍질 혼합모래의 최대·최소건조단위중량**

대상시료	최대건조단위중량 ( $\text{g/cm}^3$ )	최소건조단위중량 ( $\text{g/cm}^3$ )	건조단위 중량비
S-0	1.651	1.349	1.224
S-5	1.686	1.396	1.208
S-10	1.730	1.432	1.208
S-20	1.778	1.496	1.188
S-30	1.834	1.530	1.199

조개껍질 혼합모래의 입도특성을 살피기 위해 혼합비에 따른 입도분석시험을 실시하였으며 시험시료의 입도분포곡선을 그림 2에 나타냈으며 각 시험시료의 입도분포곡선에 의한 결과를 표 4에 나타내었다.

일반적으로 모래의 입도분포특성은 통일분류법에 의하면 #4체 통과량이 50%이상이고 #200체 통과량이 5%보다 작으며 균등계수가 6보다 크고 곡률계수가 1과 3사이의 값을 가질 경우 입도가 좋은 모래로 분류되며 균등계수와 곡률계수가 이외의 값을 가질 경우는 입도가 나쁜 모래로 분류된다.

연구에 사용된 시험시료의 경우 균등계수의 범위는 1.48~2.31로 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 균등계수도 증가하는 양상을 보이고 있고 곡률계수의 경우는 그 범위가 0.73~1.52의 범위를 나타내고 있으며 조개껍질의 혼합비가 감소할수록 곡률계수는 증가함을 보이고 있다. 균등계수가 작을수록 시료는 균등한 입도분포를 의미하므로 조개껍질 혼합모래의 경우 모래의 혼합비가 증가할수록 시료의 입도분포는 균등해지는 것을 알 수 있다. 표 4에 나타난 시험시료의 입도분포 특성을 바탕으로 각 시험시료를 통일분류법으로 분류한 결과 시험시료 전체가 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류 되었다.

### 3. 대형직접전단시험

#### 3.1 대형직접전단시험 결과 및 분석

준설모래의 해상투기는 수중에서 이루어지게 되므로 대단히 큰 밀도의 조성은 어려우며 표준관입시험치 5내외의 느슨한 상태를 유지하게 된다. 따라서 조개껍질 혼합모래의 밀도를 상대밀도 40%로 조성하였다. 상대 밀도 40%인 조개껍질 혼합모래에 대하여 대형직접전단시험을 통하여 조개껍질 혼합모래의 혼합비에 따른 내부마찰각 및 역학적 특성에 관하여 고찰하였다. 그림 3.1~그림 3.5에 시험시료에 대한 대형직접전단 시험의 결과로 전단응력-수평변형을 관계를 도시하였다.

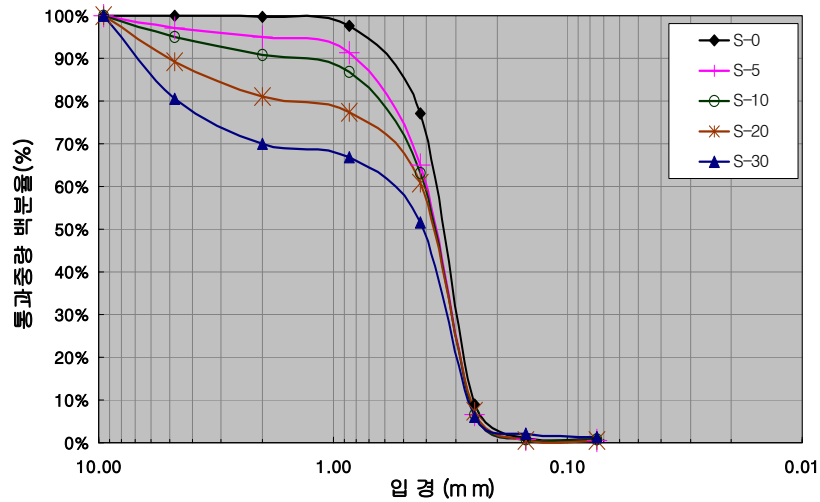


그림 2. 조개껍질 혼합모래의 입도분포곡선

표 4. 조개껍질 혼합모래의 입도분포 특성

대상시료	S-0	S-5	S-10	S-20	S-30	
D <sub>10</sub>	0.16	0.27	0.27	0.27	0.27	
D <sub>30</sub>	0.30	0.32	0.32	0.32	0.33	
D <sub>60</sub>	0.37	0.40	0.41	0.43	0.55	
Cu	2.31	1.48	1.52	1.59	2.04	
Cg	1.52	0.95	0.93	0.88	0.73	
통과량 (%)	#4	100.00	97.18	94.91	89.09	80.47
	#10	99.84	95.05	90.67	80.96	70.09
	#40	77.04	65.06	63.06	60.72	51.56
	#200	0.89	0.42	0.68	0.62	1.40
#200체 잔류량 (%)	0.21	0.41	0.18	0.02	0.60	
통일분류	SP	SP	SP	SP	SP	

여기서, D<sub>10</sub> : 통과백분율 10% 입경  
D<sub>30</sub> : 통과백분율 30% 입경  
D<sub>60</sub> : 통과백분율 60% 입경  
Cu : 균등계수  
Cg : 곡률계수

일반적인 모래의 조밀한 상태에서의 전단응력-수평변위 관계 곡선은 초기 변위의 증가와 함께 비교적 급격히 전단응력이 증가하다가 일정변위 이상에서는 전단응력이 감소하여 첨두점을 나타낸다. 반면 느슨한 상태의 모래의 경우 첨두점이 발생하지 않고 변위의 증가와 함께 비교적 완만하게 전단응력이 증가한다.

그림 3 ~그림 7에 나타난 것과 같이 본 시험에서의 전단응력-수평변형률 곡선은 조개껍질의 혼합비가 적은 시료의 경우 느슨한 상태의 모래와 같이 첨두점이 발생하지 않고 변형률의 증가에 따라 비교적 완만하게 전단응력이 증가함을 보이고 있는 반면 조개껍질의 혼합비가 상대적으로 많은 S-30의 경우 수평변형률이 증가함에 따라 점점 급한 전단응력의 증가를 보이고 있다.

본 연구에 사용된 전 시료가 전단응력-수평변형률 곡선에서 뚜렷한 전단응력의 첨두점은 보이지 않았으나 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 수평변위가 증가함에 따라 급격한 전단응력의 증가를 보임을 그림 3~

그림 7를 통해 알 수 있다

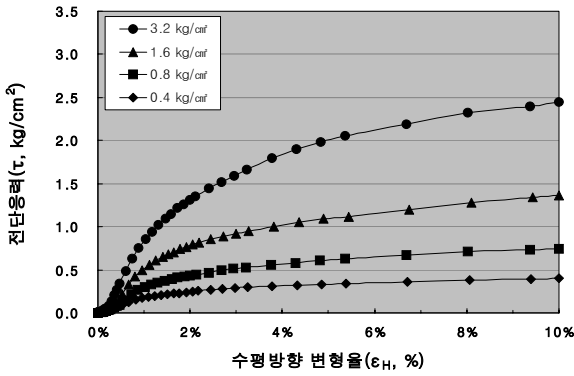


그림 3 전단응력-변형률 곡선(혼합비 0%)

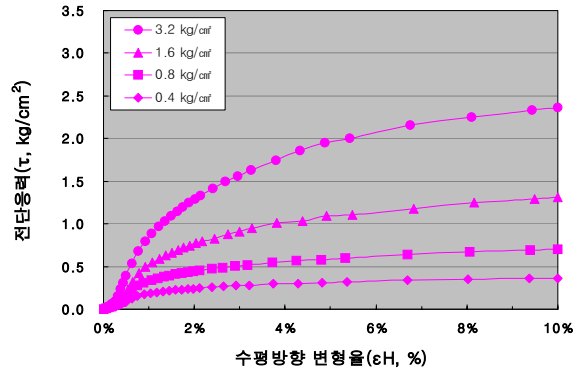


그림 4. 전단응력-변형률 곡선(혼합비 5%)

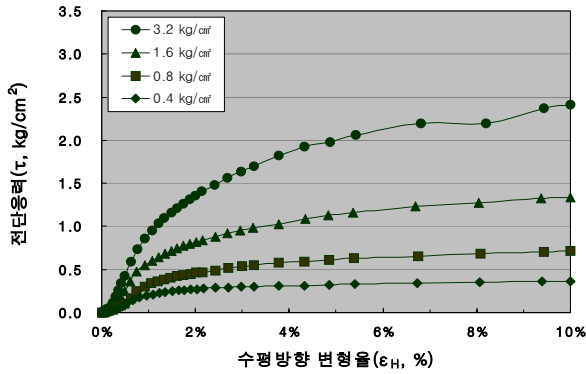


그림 5 전단응력-변형률 곡선(혼합비 10%)

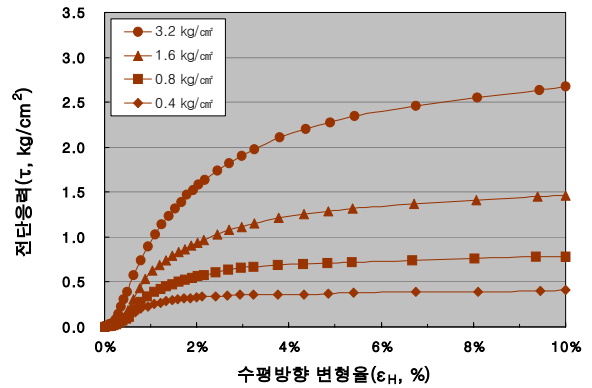


그림 6. 전단응력-변형률 곡선(혼합비 20%)

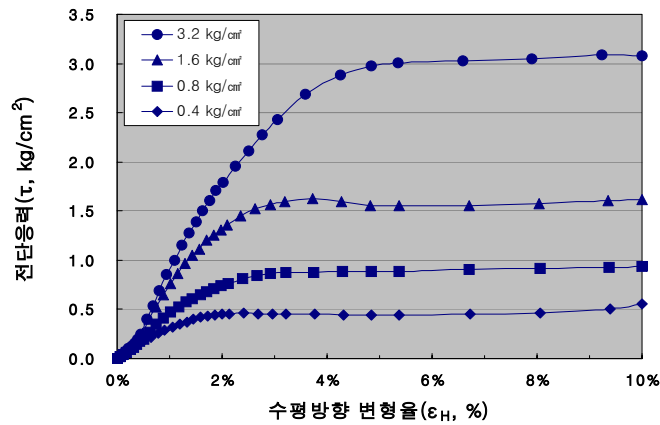


그림 7. 전단응력-변형률 곡선(혼합비 30%)

### 3.2 조개껍질 혼합모래의 전단특성

조개껍질 혼합모래의 전단특성 결과를 표 5에 정리하였다. 시험결과, 시험시료의 내부마찰각  $\phi$ 의 범위는  $35.4^{\circ} \sim 41.9^{\circ}$ 로 나타났으며 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 내부마찰각  $\phi$ 도 증가하는 경향을 보였다. 이는 조개껍질의 입경이 모래의 입경에 비해 크고 모난 상태이므로 전단시험시 수평변위에 대해 보다 큰 전단저항을 나타낸 것에 기인한 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용된 시험시료의 경우도 수직응력이 증가할수록 혼합된 조개껍질이 파쇄되는 특성을 보였으며 이로 인해 각 시험시료의 파괴포락선을 도시하였을 때 절편  $c'$ 값이 나타나며 이는 표 5에 나타난 결과와 같이 그 값이 0.12에서 0.20으로 약간 커지는 경향을 보이고 있다.

그림 8에는 조개껍질 혼합모래의 조개껍질 혼합비에 따라 내부마찰각의 변화를 종합하여 나타냈다. 조개껍질 혼합비가 증가함에 따라 내부마찰각은 증가하는 경향을 보이는데, 조개껍질 혼합비 5%에서는 모래에서보다 내부마찰각이 작아지는 것을 알 수 있다. 이는 판상구조를 갖는 점토의 fabric이 재성형되면서 전단면을 따라 평행해지는 것처럼 조개껍질 혼합비가 적은 경우 시료 성형시 직접전단시험에서의 정해진 전단면에 놓이게 되는 조개껍질이 적거나 거의 없고 다짐에 의해 거의 대부분이 평행하게 존재하게 되며 모래 속에 혼입된 조개껍질의 오목한 부분으로 다일러터시 없이 모래가 미끄러져 유입되어 전단저항이 적게 일어나 전단응력이 모래에서보다 작아지며, 내부마찰각 또한 감소하는 것으로 생각된다. 이러한 현상은 자갈이 일부 함유된 모래에서도 나타나는 현상과 유사하다(김방식, 2004).

조개껍질 혼합비가 10%를 넘어가면서부터는 조개껍질 입자가 많아지면서 시료 성형시 전단면에 수직으로 존재하는 입자가 많아지게 되고 전단면에서의 저항으로 작용하여 전단응력이 커지며, 내부마찰각 또한 증가하는 것으로 판단된다. 조개껍질 혼합비가 10%로부터 30%로 증가함에 따라 점착력은 약  $0.08 \text{ kg/cm}^2$  로서 약간 증가하고 내부마찰각은  $6^{\circ}$ 증가하여 1%당  $0.3^{\circ}$ 의 마찰각 증가를 나타내고 있다.

표 5. 조개껍질 혼합모래의 전단특성

대상시료	내부마찰각 $\phi$ (°)	절편값 $c'$ ( $\text{kg/cm}^2$ )
S-0	36.0	0.15
S-5	35.4	0.12
S-10	36.0	0.12
S-20	38.7	0.13
S-30	41.9	0.20

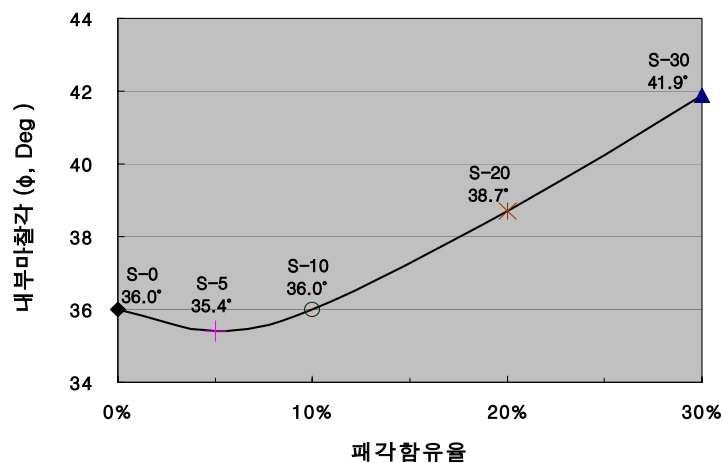


그림 8. 패각함유율에 따른 내부마찰각 변화

### 3.3 조개껍질 혼합모래의 압축특성

조개껍질은 파쇄성이 큰 재료이기 때문에 수직하중이 가해졌을 때 그 압축량이 모래에 비해 클 것으로 생각되므로 본 연구에서는 이러한 조개껍질의 특성이 조개껍질 혼합모래에서도 유사하게 나타날 것이라 판단되어 대형직접전단시험을 수행하였다. 각 하중 단계별 수직하중 아래에서 1시간동안 압밀 시킨 후 조개껍질 혼합비에 따른 압축량을 측정하였고 그 결과를 그림 9에 나타내었다. 그림에서 보인 바와 같이 일반적인 기대와 달리 모든 조개껍질 혼합모래에서 순수 모래보다 압축량이 작게 나타났다. 이것은 조개껍질의 모서리부가 일부 모래와 접촉되어 일부 파쇄되는 경우를 제외하고는 최대·최소건조단위중량이 조개껍질 혼합모래가 모래보다 밀도가 크므로 압축량이 더 작기때문으로 사료된다.

그림 9에 나타난 것과 같이 단계별 수직하중 중에서 최대수직하중인  $3.2\text{kg/cm}^2$ 의 상태에서의 시험시료의 압축량의 범위는 모래의 경우  $1.760\text{mm}$ , 조개껍질 혼합모래인 경우  $1.195\text{mm}\sim 1.530\text{mm}$ 를 보이고 있고 단계별 수직하중이 증가할수록 압축량은 증가하는 경향을 보이고 있다.

수직응력  $3.2\text{kg/cm}^2$ 의 상태에서 조개껍질 혼합모래 S-30(혼합비 30%)과 순수모래의 압축량은 약  $0.35\text{mm}$ 의 차이를 보이고 있으며 조개껍질혼합비에 따른 압축량의 차이는 크지 않은 것으로 나타났다. 그리고 순수모래의 압축량 변화율은 수직응력  $1.6\text{kg/cm}^2$  이상에서는 거의 같은 것으로 나타났다. 따라서 조개껍질 혼합이 내부마찰각에서는 증가를 보이고 압축량은 적어서 역학적인 면에서 더 유리한 것으로 나타났다.

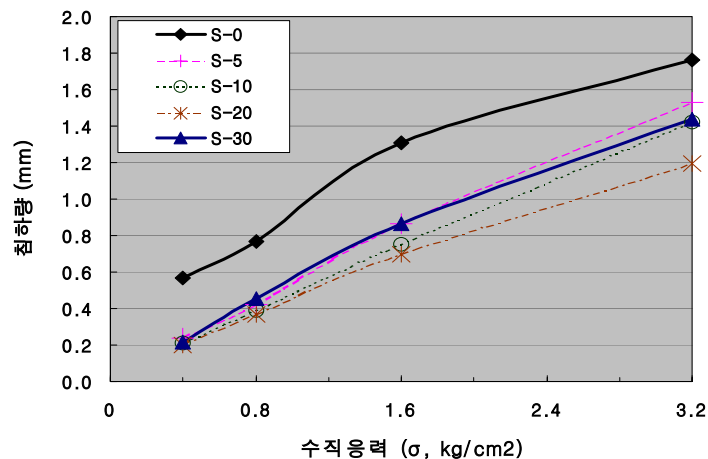


그림 9. 조개껍질 혼합비에 따른 수직응력-압축량 곡선

## 4. 결론

조개껍질 혼합모래의 공학적 특성을 규명하기 위해서 혼합비가 다른 시험시료를 제작하여 각 시험시료에 대해 물리적 특성시험을 실시하여 자연상태의 함수비, 최대·최소건조단위중량, 비중 및 입도분포를 파악하였다. 또한, 조개껍질 혼합모래의 혼합비에 따른 전단특성을 고찰하기 위해 시험시료에 대해 대형직접전단시험을 실시하였으며 압축특성을 여러 단계의 하중에 대하여 고찰하였다.

1. 조개껍질은 모래보다 비중과 건조단위중량이 큰 것으로 나타났으며 조개껍질 혼합비가 증가할수록 비중과 건조단위중량이 증가하는 양상을 보였다. 시험시료의 입도분포 특성을 바탕으로 각 시험시료를 통일분류법으로 분류한 결과 시험시료 전체가 입도분포가 나쁜 모래(SP)로 분류되었다.
2. 본 연구에 사용된 전 시료가 전단응력-수평변형률 곡선에서 뚜렷한 전단응력의 침투점은 보이지 않았으나 조개껍질의 혼합비가 증가할수록 수평변위가 증가함에 따라 급격한 전단응력의 증가를 보였다.
3. 상대밀도 40%인 조개껍질 혼합모래의 전단강도는 혼합비가 10% 이상일 경우 강도증가를 보여 30%일

경우 약 6°의 내부마찰각 증가를 나타내었다. 또한 상재하중 증가에 따른 압축은 조개껍질혼합의 경우가 순수 모래의 경우보다 더 작게 나타나 조개껍질혼입이 더 좋은 역학적 특성을 나타내었다.

## 감사의 글

본 연구는 2004년 삼성물산(주) 건설부문의 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 윤길립, 권오순, 이영준, 양은익(2001), "굴폐각 재활용을 위한 공학적 특성 연구", **대한토목학회 논문집**, 제 21권, pp. 421-431.
2. 윤길립, 윤여원, 채광석(2004), "SCP 공법 적용을 위한 굴폐각-모래 혼합토의 전단과 압축 특성", **한국지반공학회 논문집**, 제20권 제9호, pp. 1-7.
3. 윤길립, 윤여원, 채광석, 권오순(2003), "모래다짐말뚝(SCP)재료로서 파쇄 굴폐각의 특성조사", **한국지반공학회 논문집**, Vol. 19, No. 5, pp. 281-290.
4. 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.
5. 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.
6. Okumura T. and Kobayashi M. (1996), "Oyster shell-sand mixture as material of sand compaction pile", *Proc. of Environmental Geotechnics*, Kamon (ed.), Rotterdam, pp. 863-868.