

# 사석지반에 대한 쌍곡선 구성모델의 적용성 연구

## Study on the Adaptability of Hyperbolic Constitutive Model for Rubble Stone

황세환\* · 김종수\*\* · 권오균\*\*\*

Hwang, Se-Hwan · Kim, Jong-Soo · Kwon, Oh-Kyun

### Abstract

Until recently the other attempts except linear elastic analysis using assumed elastic modulus had not been made in order to evaluate the settlement of the rock fill materials in Korea. Especially, it was almost impossible to predict the precise settlement of the breakwater structure made with dumped rubble stone.

In this study, 3 sets of large scaled triaxial compression tests for porous basaltic quarry rocks were carried out and numerical simulation of those triaxial compression tests were performed applying non linear elastic model. Two stress-strain behaviors were compared to study the adaptability of hyperbolic constitutive model for the rubble stone. The results showed quite good agreements between the two stress-strain behaviors. Thus, the hyperbolic constitutive model is thought to be alternative approach evaluate the settlements of the loose rock-fill material.

**Keywords** : Hyperbolic model, Non-linear analysis, Rubble stone, Large scaled triaxial compression Tests

### 요 지

최근까지 우리나라의 암성토의 침하량을 산정하기 위해 가정된 탄성계수를 이용한 선형탄성해석 외에 다른 방법들이 시도 되지 않고 있다. 특히 해상투기된 사석으로 구성된 방파제 구조물의 침하량을 정확히 산정하는 것은 거의 불가능하였다. 이 연구에서는 복제주의 채석장에서 채취한 3조의 다공질의 복제주의 화산암시료에 대해 대형삼축압축시험을 수행하였고 비선형 모델을 이용하여 삼축압축시험을 수치해석으로 모사하였다. 실험과 해석에 의한 응력-변형률 거동이 비교되어 사석에 대한 하이퍼볼릭 구성모델의 적용성을 조사하였다. 비교 결과 두 응력-변형률 거동이 잘 일치하므로 하이퍼볼릭 모델은 느슨한 암성 토체의 침하량을 산정하는데 적절한 것으로 판단되어진다.

**주요어** : 쌍곡선 모델, 비선형 해석, 사석, 대형삼축압축시험

\* 현대산업개발 토목설계팀 과장

\*\* 정회원 · 현대산업개발 토목설계팀 부장

\*\*\* 정회원 · 계명대학교 공과대학 토목공학과 부교수

## 1. 서론

점성토 뿐만 아니라 사질토 지반의 응력-변형을 거동은 작은 응력수준에서도 비선형 거동을 보인다. 전산기 발달 이전에는 지반의 응력해석을 수행함에 있어서 가정된 선형 탄성해석 이외의 해석이 불가능하였으나, 전산기 성능의 발달로 인하여 비선형 해석이 가능하게 되었으며, 최근 흙의 비선형 거동에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. 그 연구의 일부로서 Duncan 등(1970)은 Hyperbolic 구성모델의 적용을 제안하였으며, 최근 설계단계에서 지반의 거동을 파악하기 위하여 Hyperbolic 모델을 활발히 적용하고 있는 실정이다. 이에 본 논문에서는 방파제의 기초사석에 대하여 대형삼축압축실험을 수행한 다음, 그 결과를 근거로 도출된 실험자료들로부터 일축압축강도가 작은 제주 지방의 현무암에 대한 상기 모델의 적용 가능성을 연구하였다. 이를 위하여 북제주에 위치한 석산 3개소에서 채취한 다공질 현무암 시료에 대하여 대형삼축압축실험을 수행하였다. 실험에서 나타난 응력-변형을 거동과 대형삼축압축시험을 수치해석으로 시뮬레이션하여 얻은 응력-변형을 거동을 비교 및 분석하여 Hyperbolic 구성모델의 적용성을 검토하였다.

## 2. 비선형성과 응력 의존성에 대한 고려

### 2.1 비선형성

Konder 등(1963)의 연구에 의하면 점토와 모래질 지반의 비선형 응력-변형을 곡선은 쌍곡선으로 표현된다. Konder 등은 비선형 응력-변형을 곡선 관계를 다음의 식 (1)과 같이 쌍곡선 형태로 제안하였다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{a + b \varepsilon} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_1, \sigma_3$  : 최대 및 최소 주응력,

$\varepsilon$  : 축변형을

$a, b$  : 실험으로부터 결정되는 상수

그림 1은 Hyperbolic 구성모델에 적용되는 응력-변형을 관계를 보여주고 있다. 이 그림에서 보는바와 같이 상수  $a$  는 초기 접선탄성계수  $E_i$ 의 역수이며,  $b$  는 축차응력

에 대한 점근선의 역수이다. Konder 등은 이러한 응력-변형을 관계를 그림 2와 같이 변환하여 상수  $a$  와  $b$  의 값을 용이하게 산정하였으며, 이 그림에서 직선 관계식은 다음의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\frac{\varepsilon}{\sigma_1 - \sigma_3} = a + b \varepsilon \quad (2)$$

일반적으로 축차응력의 점근값은 지반의 압축강도보다 약간 크며, 압축강도와의 관계는 다음의 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = R_f (\sigma_1 - \sigma_3)_{ult} \quad (3)$$

여기서,  $R_f$  : failure ratio

상수  $a$  와  $b$  를 초기 접선탄성계수와 압축강도의 항으로 표현하면, 식(1)은 다음과 같게 된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{\varepsilon}{\left[ \frac{1}{E_i} + \frac{\varepsilon R_f}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]} \quad (4)$$

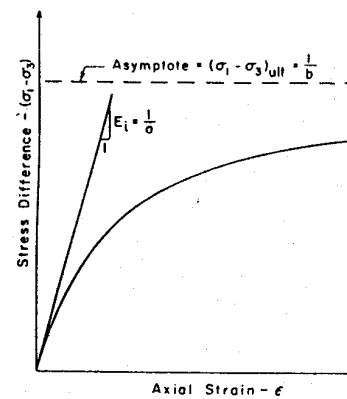


그림 1. Hyperbolic구성모델에서의 응력-변형을 곡선

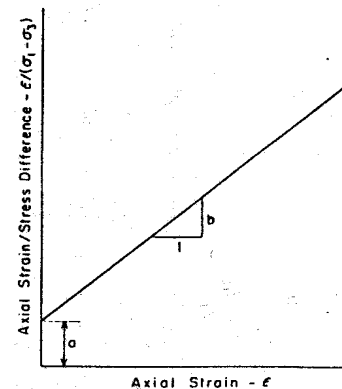


그림 9. 변환된 응력-변형을 곡선

## 2.2 응력 의존성

포화토에 대한 비압밀비배수시험의 경우를 제외하고 흙의 접선탄성계수와 압축강도는 실험에 적용된 구속압의 크기에 따라 변화하게 된다. Janbu(1963)는 실험적 연구를 통하여 초기 접선탄성계수와 구속압 사이의 상관관계를 다음의 식 (5)와 같이 표현하였다.

$$E_i = K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (5)$$

여기서,  $E_i$  : 초기 접선탄성계수,

$\sigma_3$  : 최소주응력

$P_a$  :  $E_i$ 와 같은 단위의 대기압,

$K, n$  : 상수

식 (5)에서  $K$ 와  $n$ 의 값은 삼축압축시험에서 얻은 구속압  $\sigma_3$ 와 초기 접선탄성계수  $E_i$  사이의 관계를 대수-대수 용지에 도시하면 쉽게 구할 수 있다. 구속압과 초기 접선탄성계수 사이의 관계 직선식의 절편값과 기울기가 각각  $K$ 와  $n$ 이 된다. 그림 3은 실트와 Rockfill 재료에 대한 실험결과를 나타낸 적용예를 보여주고 있다.

파괴시 최소주응력  $\sigma_3$ 의 변화가 없다고 가정하면, 압축강도와 구속압 사이의 관계를 Mohr-Coulomb 파괴기준의 향으로 표현하면 다음의 식 (6)이 된다.

$$(\sigma_1 - \sigma_3)_f = \frac{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (6)$$

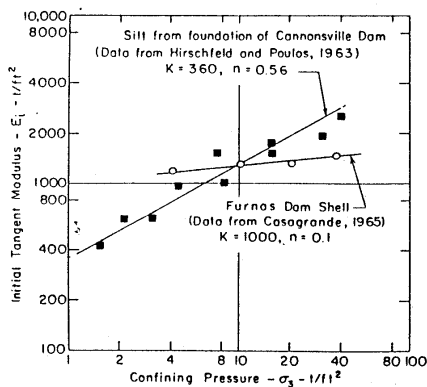


그림 3. 구속압과 초기탄성접선계와의 관계

## 2.3 접선탄성계수

파괴이전 상태의 지반에 대한 응력-변형을 거동을 확인하기 위하여 선형탄성해석에서는 탄성계수를 응력에 관계 없는 일정한 값을 적용하고, 비선형 해석에서는 각 응력수준 또는 변형율의 크기에 따른 접선탄성계수를 적용한다. 각 변형률에서의 접선탄성계수는 다음의 식 (7)로 나타낼 수 있다.

$$E_t = \frac{\partial(\sigma_1 - \sigma_3)}{\partial \varepsilon} \quad (7)$$

식 (4)를 미분하면 접선탄성계수는 다음과 같이 된다.

$$E_t = \frac{\frac{1}{E_i}}{\left[ \frac{1}{E_i} + \frac{R_f \varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)_f} \right]^2} \quad (8)$$

식 (4)를  $\varepsilon$ 에 대해 정리하여 식 (8)에 대입하여  $\varepsilon$ 을 소거하고 식 (5)와 (6)을 대입하면, 접선탄성계수는 다음의 식 (9)와 같이 Mohr-Coulomb 강도정수, 축차응력, 구속압 등의 함수로 표현할 수 있다. 여기서  $K$ 와  $n$ 은 삼축압축시험의 결과로부터 구할 수 있다.

$$E_t = \left[ 1 - \frac{R_f(1 - \sin \phi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \cos \phi + 2\sigma_3 \sin \phi} \right]^2 K P_a \left( \frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (9)$$

## 3. 대형삼축압축시험

### 3.1 실험장치

본 연구에서 사용한 대형삼축압축시험기의 전체적인 모식도가 그림 4에 나타나 있으며, 시험기의 주요 제원 및 특징이 표 1에 나타나 있다. 재하대는 4분 지주식으로 이루어져 있다. 실험에 사용된 공시체는 그 크기가 직경 30cm × 높이 60cm인 원주형이고, 제한된 공시체 크기 때문에 시료의 입경이 2.0mm~50.2mm로 제한되었다.

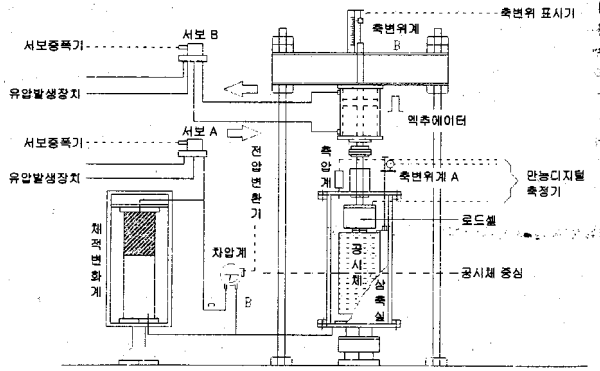


그림 4. 대형삼축압축시험기의 모식도

표 1. 대형진동삼축시험기의 주요제원 및 특징

		주요 제원
적용시험		<ul style="list-style-type: none"> <li>정적시험</li> <li>동적시험 (cyclic loading test)</li> </ul>
공시체의 크기		<ul style="list-style-type: none"> <li>직경 300mm×높이 600mm</li> </ul>
동적시험	타입	<ul style="list-style-type: none"> <li>전기유압서보방식</li> </ul>
	용량	<ul style="list-style-type: none"> <li>500 kN</li> </ul>
	사용주파수	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.01~100 Hz (working frequency 0.1~10 Hz)</li> </ul>
	사용파형	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sine파 외 3개 파형</li> </ul>
제어방식		<ul style="list-style-type: none"> <li>응력제어법</li> <li>변위제어법</li> </ul>
정적시험	타입	<ul style="list-style-type: none"> <li>전기유압서보 방식</li> </ul>
	용량	<ul style="list-style-type: none"> <li>600 kN</li> </ul>
	변위 속도	<ul style="list-style-type: none"> <li>0.01~60 mm/min.</li> </ul>
구속압	형식	<ul style="list-style-type: none"> <li>공압-수압 변환방식</li> </ul>
	용량	<ul style="list-style-type: none"> <li>2Mpa (20kgf/cm<sup>2</sup>)</li> </ul>
공시체 제작법		<ul style="list-style-type: none"> <li>충격다짐에 의한 자동다짐</li> </ul>

### 3.2 실험계획

대형삼축압축시험에 사용된 시료는 3개소의 채석장(S사, B사, H사)을 대상으로 하였으며, 공시체에 사용된 암석의 일축압축강도는 400~800 kgf/cm<sup>2</sup>의 범위로 비교적 작은 일축압축강도를 나타내었다. 3개의 채석장으로부터 모두 9개의 대형 원주형 공시체(직경 300mm × 높이 620mm)를 성형하여 1.0, 2.0 및 3.0 kgf/cm<sup>2</sup> 등 세 가지 구속압력 하에서 축하중을 3mm/min의 속도로 재하하여 압밀배수(CD)실험을 실시하였다.

공시체 제작에 사용된 시료의 입도분포곡선이 그림 5에 나타나 있다. 3개 시료 모두 균등계수  $C_u$ 가 1.6~1.9인 거의 균등한 입자크기를 나타내고 있으며, 상사입도를 적용하여 실험에 사용된 시료의 최대 입경을 50.8 mm로 하였다.

공시체 제작방법으로는 평행 입자 분포법(Parallel Grading Method, 그림 6 참조), 절단 치환법(Scalping and Replacement Method), 입자 모형법(Matrix modeling Method) 등이 있으며 본 연구에서는 평행 입자 분포법이 사용되었다. 대형 삼축압축시험시 시료의 직경과 최대 입경의 비는 주로 4~8이며 가장 많이 사용되는 비는 약 1:6이므로 시료의 최대 입경을 50.8 mm를 사용하였다. 항만공사에서 사용하는 일반적인 사석의 규모는 0.015~0.03 mm이며, 사석을 구로 가정할 경우 입자의 지름은 30.6~38.5 mm이다. 이러한 크기에 상사 입도를 적용하면 40.4~50.8 mm가 되는데, 이는 매우 균등한 입도분포를 나타낸다. 그리고 공시체 제작시 다짐은 실시하지 않았다.

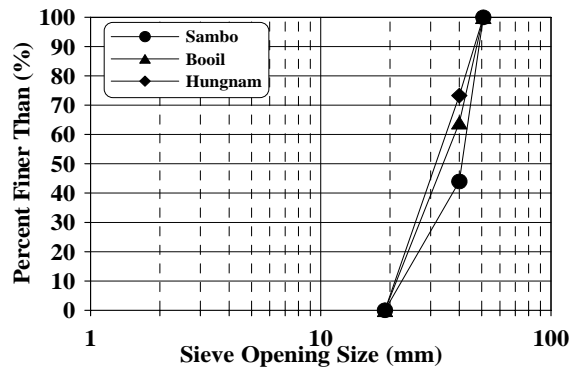


그림 19. 실험에 사용된 시료의 입도분포곡선

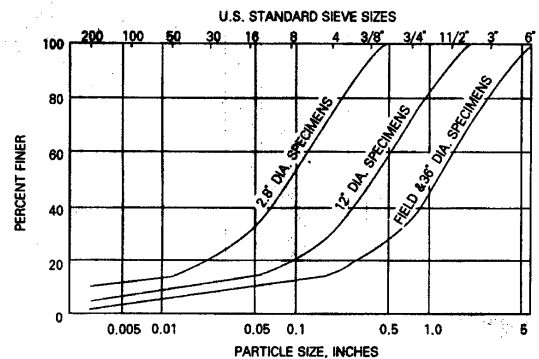
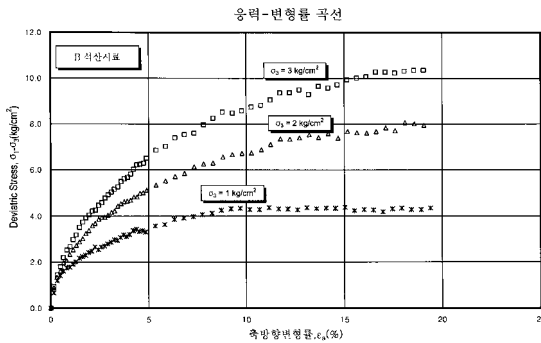


그림 6. 미국 캘리포니아대학의 평행입자분포법

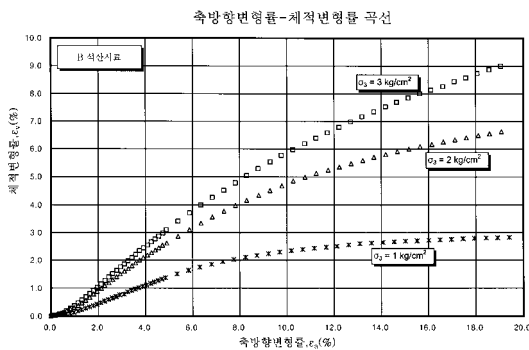
### 3.4 대형삼축압축실험 결과

#### 3.4.1 응력-변형을 곡선

본 연구에서는 9개의 공시체에 대한 대형삼축압축실험을 실시하였으며, 실험에서 얻어진 축차응력-변형을 관계와 축방향 변형을-체적변형을 관계를 그림 7~9에 나타내었다. 이 그림들로부터 실험에 사용된 시료들의 축차응력-변형을 관계곡선의 특성은 파괴에 도달하여도 peak 점이 명확하게 나타나지 않은 느슨한 사질토의 압축특성과 유사하게 나타났다. 이는 균등한 입경의 시료를 사용한 점과 다짐을 하지 않은데 기인한 것으로 보인다. 구속압이 증가할수록 축방향 변형율의 증가에 따라 체적변형율도 같이 증가하는 경향을 보이고 있다.

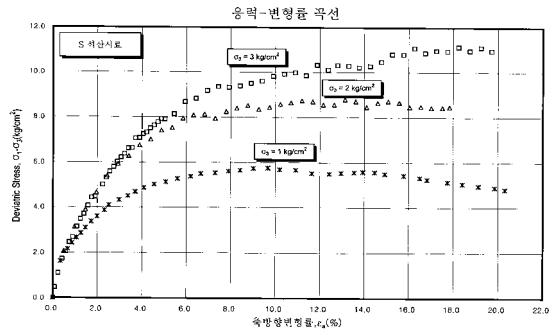


(a) 응력-변형을 관계

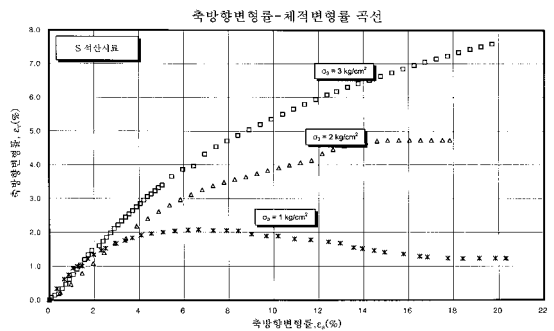


(b) 축방향변형률-체적변형을 관계

그림 7. B 석산시료에 대한 삼축압축실험 결과

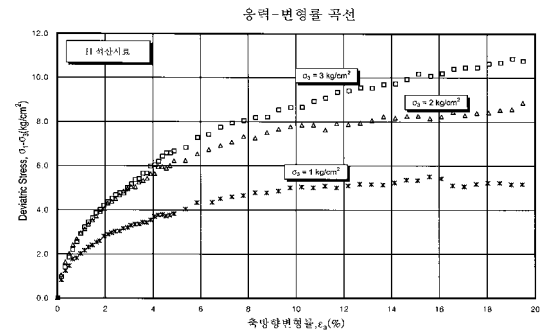


(a) 응력-변형을 관계

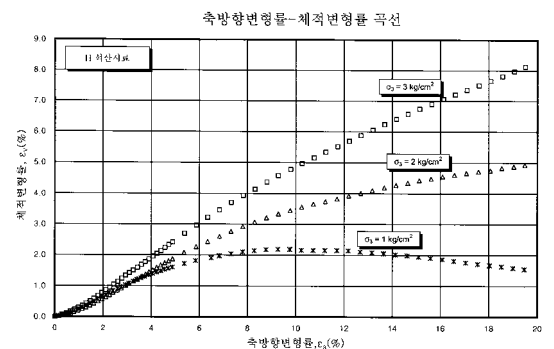


(b) 축방향변형률-체적변형을 관계

그림 8. S 석산시료에 대한 삼축압축실험 결과



(a) 응력-변형을 관계



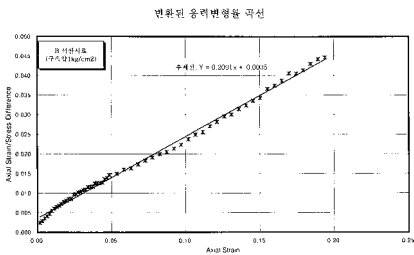
(b) 축방향변형률-체적변형을 관계

그림 9. H 석산시료에 대한 삼축압축실험 결과

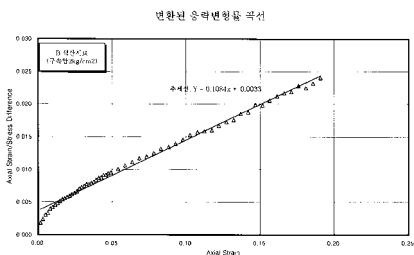
### 3.4.2 Hyperbolic 구성모델의 정수 산정

그림 7~9에서 나타난 축차응력-변형을 관계곡선을 식 (2)에서 표현된  $\frac{\varepsilon}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \sim \varepsilon$  관계로 변환하여 도시하면 다음의 그림 10~12와 같다. 이 그림들로부터 실험 결과들은 S 석산 시료의 구속압 1  $kgf/cm^2$  경우를 제외하고는 거의 직선형태에 가까운 경향을 보여주고 있다. 실험결과  $a$ 는 0.0023~0.0035,  $b$ 는 0.079~0.209의 범위로 나타났다.  $a$ 의 역수는 초기접선탄성계수를 의미하며 286~435  $kgf/cm^2$  사이의 값을 갖는다.

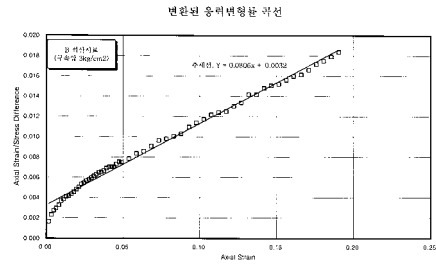
구속압에 따른 초기접선 탄성계수의 변화계수  $K$ 와  $n$ 은 구속압에 대한 초기접선탄성계수를 대수-대수 용지에 도시하면 선형적인 관계가 성립한다. 기울기와  $y$  절편은 각각  $n$ 과  $K$  값을 의미한다. 본 연구에서 실시한 실험중 B 석산에서 채취한 시료에 대한 구속압에 대한 초기접선탄성계수의 변화를 그림 13에 나타내었다. 3개의 석산에서 채취한 시료들에 대한 실험결과  $K$  값은 270~330의 범위에 분포한다. 그리고 구속압에 대한 민감성을 나타내는 지수인  $n$ 은 0.08~0.24의 크기로 나타났다. 그림 3과 같이 Cannonsville Dam의 기초지반인 실트의 경우  $K = 360$ ,  $n = 0.56$ 이고, Furnas Dam의 Rock Fill 재료에 대한  $K = 1,000$ ,  $n = 0.1$ 과 비교할 때  $K$  값이 상당히 작게 나타나고 있으며, 이는 낮은 구속압에서 초기접선탄성계수가 300 $kg/cm^2$  이하임을 의미하며 구속압의 증가에 따라 완만하게 증가함을 나타낸다.



(a) 구속압 1 $kg/cm^2$

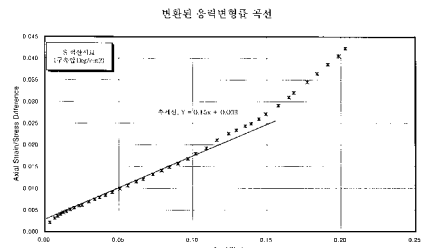


(b) 구속압 2 $kg/cm^2$

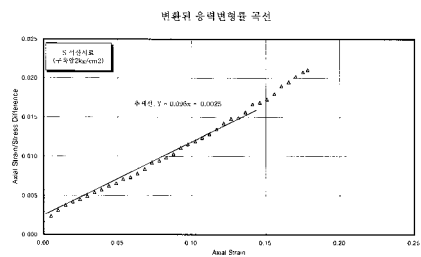


(c) 구속압 3 $kg/cm^2$

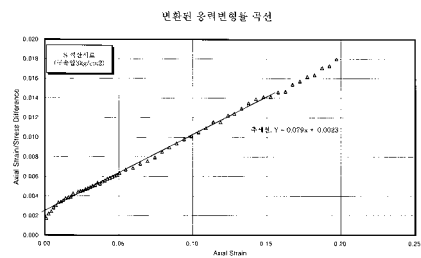
그림 10. B 석산시료에 대한 삼축압축실험결과



(a) 구속압 1 $kg/cm^2$

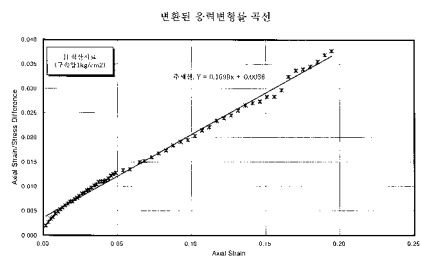


(b) 구속압 2 $kg/cm^2$

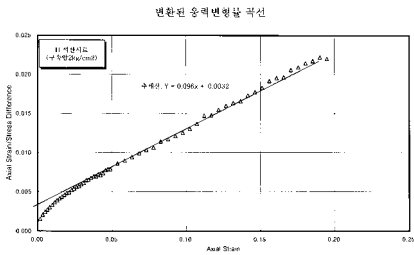


(c) 구속압 3 $kg/cm^2$

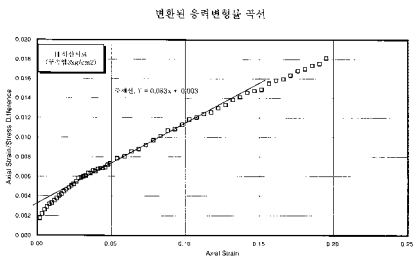
그림 11. S 석산시료에 대한 삼축압축실험결과



(a) 구속압 1 $kg/cm^2$

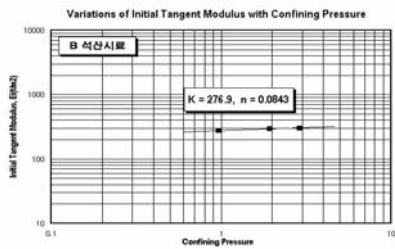


(b) 구속압 2kg/cm<sup>2</sup>

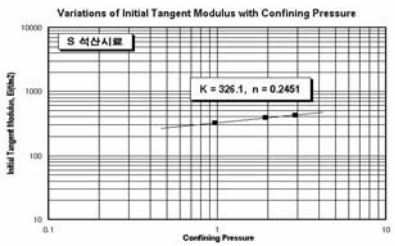


(c) 구속압 3kg/cm<sup>2</sup>

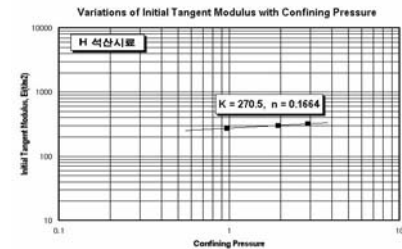
그림 12. H 석산시료에 대한 삼축압축실험결과



(a) B 석산시료



(b) S 석산시료

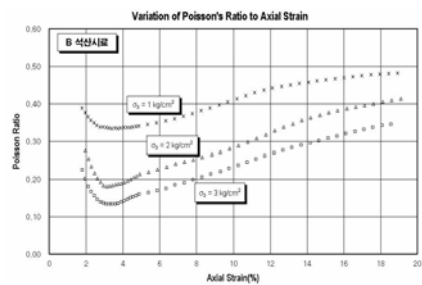


(c) H 석산시료

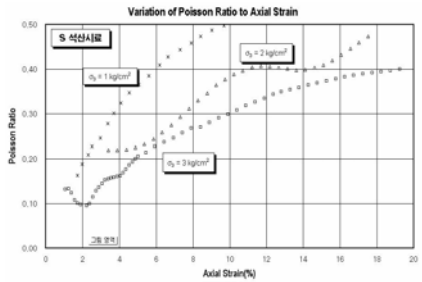
그림 13. 삼축압축실험에 의한 구속압과 초기접선탄성계수의 관계

### 3.4.3 포아송비

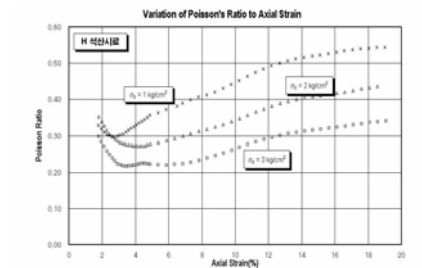
실험결과 나타난 축변형률에 대한 포아송 비의 변화가 그림 14에 나타나 있다. 이 그림들로부터 포아송 비는 축 변형률 2~4 % 범위에서 최소값을 나타내고 있으며, 축 변형률이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주고 있다. 3 개 석산의 시료 모두 약간의 차이는 있지만 거의 비슷한 경향을 보여주고 있다. 그리고 구속압이 증가함에 따라 포아송 비가 작아지는 경향을 보이고 있다. 본 논문에서 사용된 해석에서는 구속압 및 변형률에 대한 포아송비의 변화를 고려하지 않고 0.2의 포아송비를 적용하였다.



(a) B 석산시료



(b) S 석산시료



(c) H 석산시료

그림 14. 구속압에 따른 축변형률과 포아송 비의 관계

### 3.4.4 지반정수

3개 석산에서 채취한 시료에 대한 대형삼축압축실험 결과로부터 얻어진 시료의 강도정수는 다음의 표 2에 나타나 있다. 실험결과 내부마찰각은 33.1~35.3. , 점착력은 0.46~0.94 kg/cm<sup>2</sup> 으로 나타났다.

표 2. 대형삼축압축시험결과의 요약

시료	구속압 ( $kgf/cm^2$ )	초기탄성계수 ( $kgf/cm^2$ )	$(\sigma_1 - \sigma_3)_ult$	$(\sigma_1 - \sigma_3)_f$	$R_f$	$K$	$n$	$c$ ( $kgf/cm^2$ )	$\phi(^\circ)$
B 석산	1.0	286	4.782	4.385	0.917	276.9	0.0843	0.46	35.3
	2.0	303	9.225	7.675	0.832				
	3.0	313	11.62	9.935	0.855				
S 석산	1.0	333	6.67	5.50	0.824	326.1	0.2451	0.94	33.4
	2.0	400	10.42	8.72	0.836				
	3.0	435	12.66	10.81	0.854				
H 석산	1.0	278	5.88	5.33	0.906	270.5	0.1664	0.85	33.1
	2.0	313	9.63	8.26	0.858				
	3.0	333	12.05	10.17	0.844				

#### 4. 수치해석 결과 및 비교분석

##### 4.1 해석모델

본 연구에서는 대형삼축압축시험의 결과를 검증하기 위하여 Hyperbolic model module을 내장한 Sage-Crisp 프로그램을 사용하여 수치해석을 실시하였다. 삼축셀(크기 300mm×620mm)의 응력분포 양상이 대칭이므로 축대칭(axisymmetric) 조건으로 시료의 1/2만 모델링하여 해석을 실시하였으며, 그림 15에 수치해석에 사용된 단면이 나타나 있다. Loading Cap의 구속효과를 고려하여 횡방향의 변위를 구속하였고, 시료에 초기구속압을 재하시켜 등방압밀시킨 후, 축차응력을 가하는 방법으로 응력해석을 실시하였다.

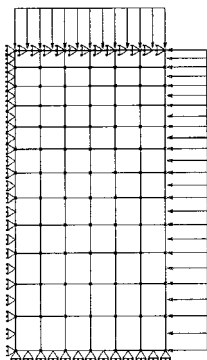


그림 15. 수치해석에 사용된 단면

##### 4.2 수치모델의 적정성

그림 16은 축방향변형율이 15%일 때 유한요소해석 결과에서 나타난 시료의 변형된 모습을 보여주고 있으며, 그림 17은 실제 삼축압축시험이 완료된 후의 시료 모습을 보여주고 있다. 그림 16과 그림 17로부터 수치해석 결과가 실제 거동을 유사하게 묘사하고 있음을 알 수 있다. 그림 18은 Perloff와 Pombo(1969)에 의해 제안된 1%의 축변형율에서 비선형 탄성 시료의 응력분포를 보여주고 있다. Perloff와 Pombo는 삼축시험에서 단부의 구속효과에 대한 수치연구를 통해서 응력-변형률의 비균일성이 크다고 지적한 바 있다. 본 연구에서 수행한 유한요소해석에 의한 동일한 변형율 조건에서 응력상태의 분포를 보여주는 그림 19와 Perloff와 Pombo의 결과를 비교하여 보면 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과들로부터 본 연구에서 얻어진 수치해석결과는 실제 거동과 유사한 결과를 묘사하고 있다고 볼 수 있으므로 본 연구의 수치해석에 사용된 모델의 정당성은 있는 것으로 판단된다.



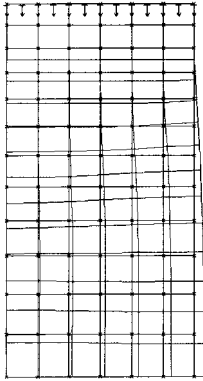


그림 16. 수치해석결과 시료단면의 변형된 모습

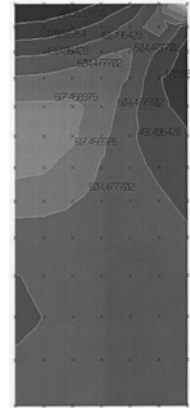


그림 19. 수치해석에 의한 응력분포 양상



그림 17. 삼축압축시험 완료 후 시료의 변형된 모습

### 4.3 실험 결과와 수치해석결과의 비교 및 분석

본 연구에서 수행한 대형삼축압축시험과 수치해석의 결과 얻어진 응력-변형을 관계를 비교한 것이 그림 20~22에 나타나 있다. 이 그림들로부터 3개 채석장에서 채취한 시료에 대한 대형삼축압축시험과 수치해석에서 얻어진 응력-변형을 관계는 다소 차이가 있지만 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과로부터 본 연구에서 수행한 대형삼축압축시험과 수치해석의 결과는 정수 중에 자유낙하시켜 형성한 사석 체체나 암성토 지반의 변형거동을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

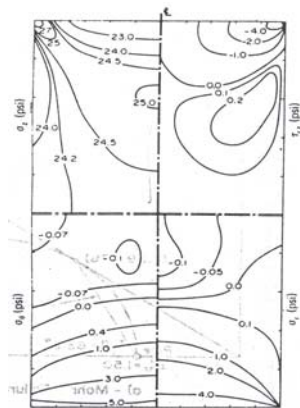
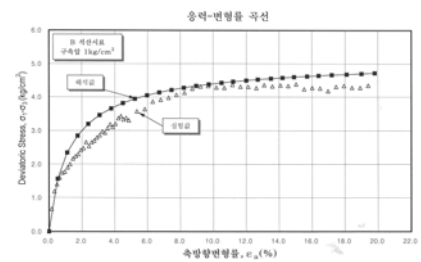
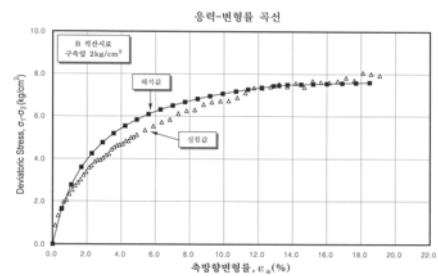


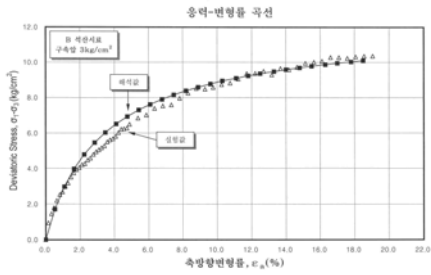
그림 18. 비선형 시료의 응력분포 (Perloff & Pombo, 1969)



(a) 구속압 1 kgf/cm<sup>2</sup>

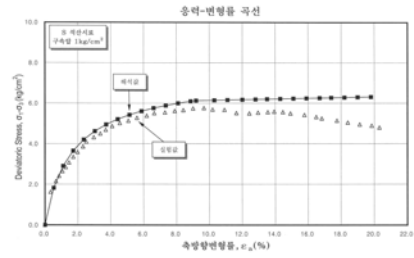


(b) 구속압 2 kgf/cm<sup>2</sup>

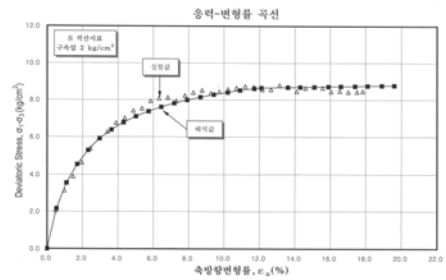


(c) 구속압 3  $kgf/m^2$

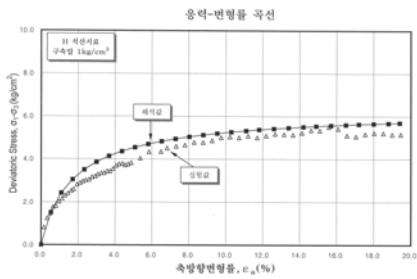
그림 20. B 석산시료에 대한 삼축압축실험과 수치해석 결과 비교



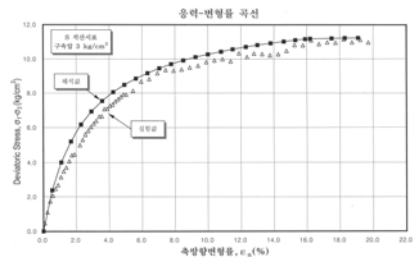
(a) 구속압 1  $kgf/m^2$



(b) 구속압 2  $kgf/m^2$

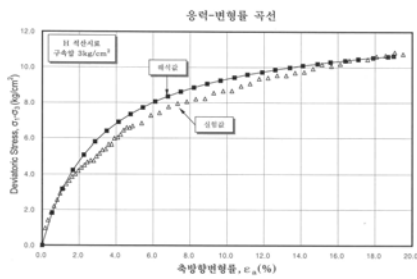


(a) 구속압 1  $kgf/m^2$

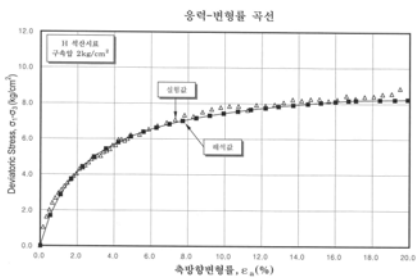


(c) 구속압 3  $kgf/m^2$

그림 22. S 석산시료에 대한 삼축압축실험과 수치해석 결과 비교



(b) 구속압 2  $kgf/m^2$



(c) 구속압 3  $kgf/m^2$

그림 21. H 석산시료에 대한 삼축압축실험과 수치해석 결과 비교

## 5. 결론 및 앞으로의 연구방향

본 연구에서는 제주도 지방의 방파제의 기초사석에 대한 대형삼축압축실험과 Hyperbolic 구성모델을 이용한 수치해석을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3개 채석장으로부터 제작한 9개 공시체에 대한 대형삼축압축실험과 이에 대한 수치해석 결과, 축차응력-변형률 거동이 잘 일치하는 것으로 나타났고, 일축압축강도가 400~800  $kg/cm^2$  정도인 다공질의 현무암 시료에 대한 Hyperbolic 구성모델의 적용성을 확인하였다.
2. 정수 중에 자유 낙하하여 구성된 느슨한 사석시료에 대

한 대형삼축압축시험 결과는 다짐이 어려운 방파제의 사석체체나 암성토 지반의 응력-변형률 거동을 예측하는데 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 향후 방파제 사석체체의 거동을 정밀하게 파악하기 위해서는 보다 많은 실험적 연구가 필요하며, 암성토 지반의 경우도 다양한 암석의 종류와 현장다짐조건 등의 변화에 대한 실험적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2002. 6. 20)

### 참 고 문 헌

1. Charles, W. (1980), The Influence of Confining Pressure on the Shear Strength of Compacted Rockfill. Geotechnique, No.4.
2. Donaghe, R. T., and Townsend, F. C. (1976), Scalping and Replacement Effects on the Compaction Characteristics of Earth-rock Mixtures, ASTM STP 5999.
3. Duncan, J. M. and Chang, C. Y. (1970), Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, September, pp. 1629~1653.
4. Holtz, W. G., and Gibbs, H. J.(1956), Triaxial Shear Tests on Pervious Gravelly Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 82, SM1.
5. Janbu, Nilma, Soil Compressibility as determined by Oedometer and Triaxial Tests, European Conference on Soil Mechanics & Foundations Engineering, Wiesbaden, Germany Vol. 1, 1963, pp. 19~25.
6. Konder, R. L., Hyperbolic Stress-Strain Response : Cohesive Soils, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 89, Proc. Paper 3429, 1963, pp. 115~143.
7. Marchi, N. D., Chan, C. K., Seed, H. B., Duncan, J. N.(1969), Strength and Deformation Characteristics of Rockfill Materials, Report No. TE-69-5. University of California.
8. Perloff, W. H., and Pombo, L. E.(1969), End Restraint Effects in Triaxial Test, 7th ICSMFE.