

EPS의 거동 예측 모델에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Modelling
for the Prediction of the Behaviour of EPS

천 병 식*¹

Chun, Byung-Sik

임 해 식*²

Lim, Hae-Sik

Abstract

Recently, EPS which has unit weight of only 20~30Kg/m³, is used for acquiring the safety of settlement and bearing capacity. In Korea, EPS was first used in 1993 as backfill material for abutment that was constructed on soft ground in Incheon. Since then EPS has been used increasingly as backfill material.

However, adequate modelling has not yet been proposed for the prediction of the behavior of EPS. Only it's design strength was proposed as the results of unconfined strength and creep test.

Accordingly this paper executed triaxial compression test on EPS with various density and confining pressure. Through the analysis of test data the behavior of EPS for strain-stress, tangential modulus and poisson's ratio can be expressed in functions with parameters of density and confining pressure of EPS. From these results, this paper proposed a nonlinear model describing the behavior of EPS.

요 지

초 경량제인 E. P. S(20~30Kg/m³)를 성토재로 사용하여 부족한 지지력과 침하에 대한 안정성을 확보하는 방법이 최근 많이 사용되고 있다. 국내에서는 1993년 인천의 연약지반상 교대 뒷채움재로 이 공법이 처음 사용된 이래 점차 활용이 늘어나고 있는 실정이다.

그러나 아직까지 EPS를 성토 재료로 사용한 지반에서 EPS의 거동을 예측하기 위한 합리적인 수치해석 모델이 제시되어 있지 않고 일축압축강도 및 크리프시험 결과에 따른 설계강도만이 제안되어 있는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 성토재료로 사용된 EPS의 수치해석 모델을 제시하기 위하여 성토재료

*¹ 정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정회원, 한양대학교 대학원 박사과정

사용되는 여러 종류 밀도의 EPS에 대해 구속압을 변화시키면서 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험 결과를 분석하여 EPS의 축방향 변형률-응력 관계와 이의 도함수 그리고 포아송비를 밀도와 구속압에 의한 함수식으로 나타낼 수 있었다. 이 관계로부터 EPS의 거동을 예측하기 위한 비선형모델을 제안하였다.

Keyword : EPS, Load Reducing, Numerical Modelling of EPS

1. 서 론

EPS 토목공법은 하중저감공법의 하나로 1972년 노르웨이 국립도로연구소(NRRL)에 의해 최초로 연약지반상 도로 성토에 사용하여 만족한 성과를 거둔 이래 많은 토목 시공을 성공적으로 완료하였고 이후 일본에서 활발하게 적용되었으며 국내에서는 1993년 인천의 연약지반상 교대 뒤채움재로 처음 사용된 이래 점차 활용이 늘어나고 있는 실정이다.(천병식의 3, 1994)

그러나 국내에서는 EPS를 공학적 성토재료로 활용하기 위한 시험 방법이나 설계 적용 기준이 실험적 근거에 의해 제안된 것도 최근의 일이다.(천병식 외 2, 1996) 또한 EPS 성토재의 거동을 묘사하기 위한 적합한 수치해석모델 제시를 위한 국내 연구는 찾아볼 수 없었으며 국외에서는 Sangchul Bang & Yeongki Cho (1992)의 연구가 유일한 것으로 조사되었다.

따라서 본 연구에서는 성토재료로 사용된 EPS의 거동을 예측하기 위한 수치해석 모델을 제시하기 위하여 현재 국내에서 토목성토재료 시판되고 있는 4가지종류 밀도의 EPS에 대해 구속압을 0~60 kPa 범위에서 20kPa씩 변화시켜 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험으로부터 얻어진 축방향 변형률-응력 곡선과 포아송비 값을 검토·분석하여 변형률-응력 관계와 이의 도함수 그리고 포아송비를 EPS의 밀도와 구속압에 의한 함수식으로 표시하였으며 이 관계로부터 EPS의 거동을 예측하기 위한 비선형모델식을 제안하고자 한다.

2. EPS의 삼축시험 및 시료

2.1 시 료

삼축압축시험을 위한 시료는 현재 국내에서 토목용 성토재료로 시판되고 있는 4가지 종류의 밀도(30 Kg/m³, 25 Kg/m³, 20 Kg/m³, 15 Kg/m³)의 EPS 블록을 직경 50mm 높이 100mm의 원주형으로 제작하여 사용하였다.

2.2 삼축시험 방법 및 조건

4종류 밀도의 시료에 대해 배기상태에서 구속압을 각각 0, 20, 40, 60 kPa 4가지 단계로 가한 후 변형제어방법으로 압축력을 가하였다. 변형속도는 1mm/min 로 제어되었다. 구속압을 60kPa 이하로 제한한 이유는 이보다 큰 압력에서는 EPS가 큰 변형을 일으키므로 이 상황에 도달하지 않는 범위에서 EPS가 사용되어야 한다. 그러나 실제 적용 시에는 특별히 응력집중이 되는 부위나 심도가 깊은 부위에서의

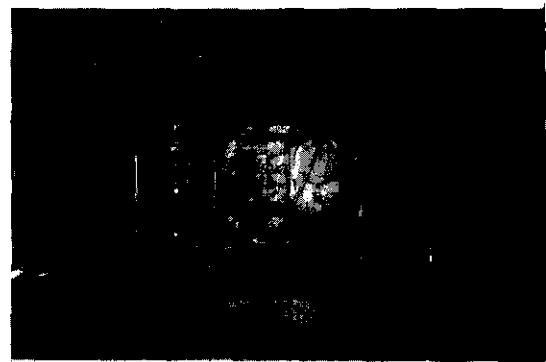


사진 2.1

EPS설치의 경우를 제외하고는 EPS 구속압은 작은 범위에 있게 된다.

포아송비 측정을 위한 체적변화는 시료를 감싼 고무막과 삼축시험셀(cell) 사이의 체적 변화를 자동 체적변화 측정장치로 측정하였다. 시험기의 제어는 퍼스널 컴퓨터로 이루어 졌으며 측정값은 컴퓨터 파일로 자동 기록하였다.

3. 기존 연구에 의한 EPS의 거동특성 고찰

EPS에 대한 기존의 자료들을 고찰해 보면 변형-응력특성은 그림 3.1에서와같이 탄소성적이며 변형계수는 대략 변형률 1%~1.5%이내에서는 직선적이다. 밀도가 커짐에 따라 곡선의 기울기는 급해지고 압축응력도 커지지만 명확한 정점은 나타나지 않는다.(EPS 土木工法開發機構, 1993; BASF, 1995)

EPS의 변형 형태를 나타내는 포아송비(poisson's ratio)는 그림 3.2에서와 같이 정육면체 시료에 재하속도 10mm/min 로 하중을 가하며 측정된 경우, 탄성한계내(변형률 < 1%)에서는 일정한 값에 도달하여 일정한 값을 유지하다가 탄성한계 이상의 변형률 영역(변형률

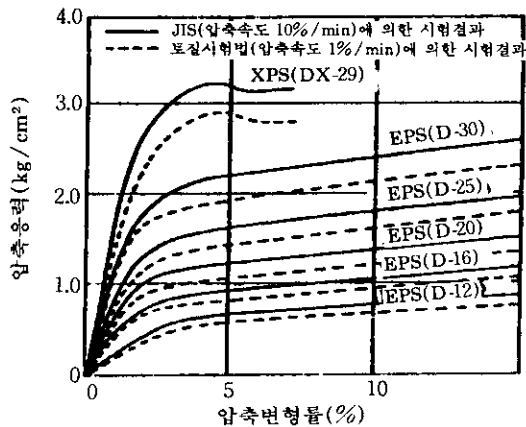


그림 3.1 EPS의 변형-응력특성(EPS 토목공법 개발기구, 1993)

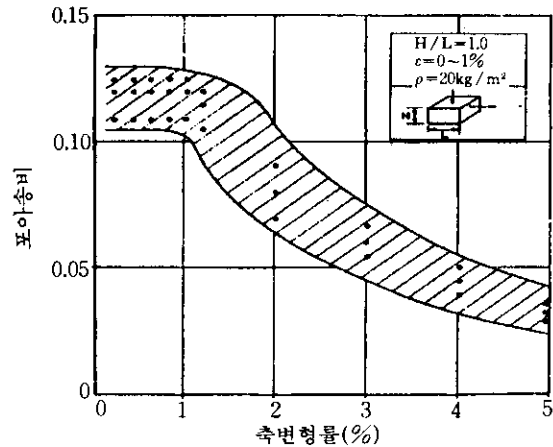


그림 3.2 EPS의 포아송비 특성(EPS 토목공법 개발기구, 1993)

> 1%)에서는 점차 감소하는 경향을 나타낸다. (천병식 외 2인, 1996; EPS 土木工法開發機構, 1993)

浜田英治 와 山内豊聰(1989)의 연구에 의하면 압축중의 체적변화는 거의 직선적으로 감소한다. 변화율은 밀도와 구속압에 따라 차이를 보이나 그 양은 아주 작아서 정밀한 측정방법 및 측정정도가 요구된다.

4. 시험결과 및 분석

4.1 삼축압축시험 결과

기 밝혀진 대로 EPS는 탄소성적 거동을 하며 변형-응력특성 및 체적변형은 EPS의 밀도와 구속압에 영향을 받는다. 이 경향을 적합한 수치식으로 나타내기 위하여 삼축압축시험을 실시하였다.

4.1.1 축방향 변형-응력 특성

삼축압축시험에 의해 얻어진 축방향 변형률-응력관계를 EPS 밀도별 구속압별로 나타내 보면 그림 4.1과 같다.

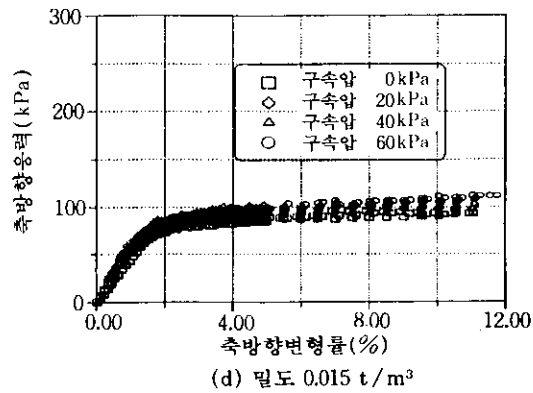
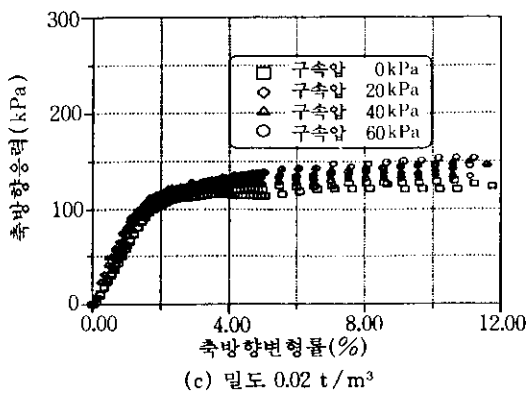
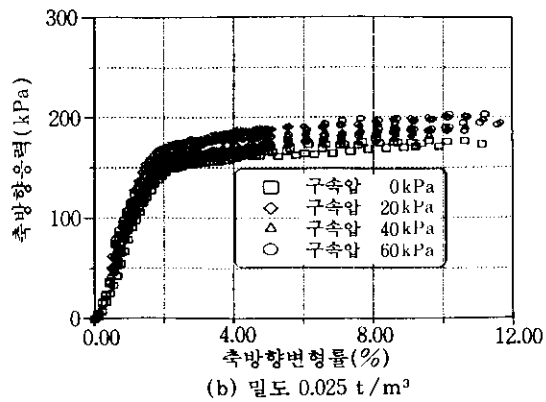
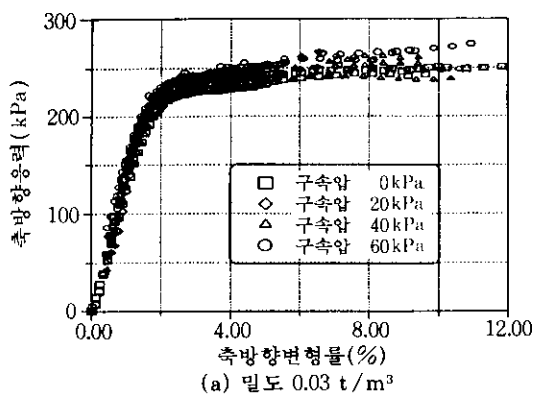
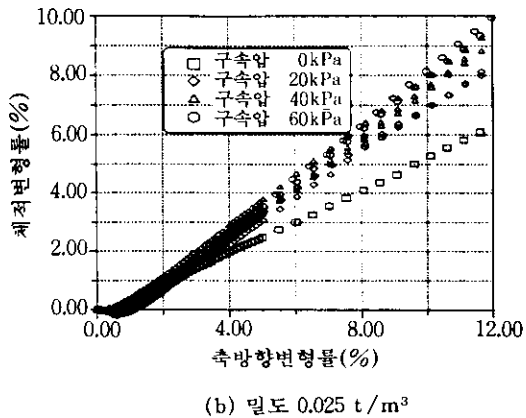
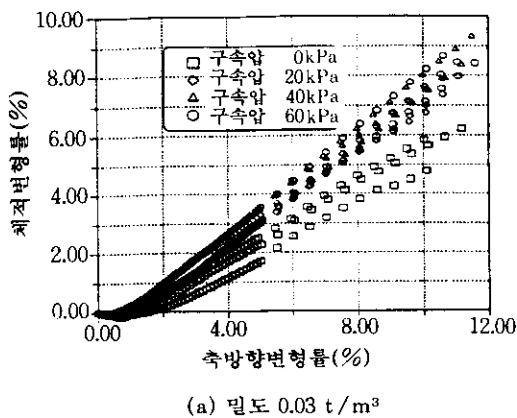


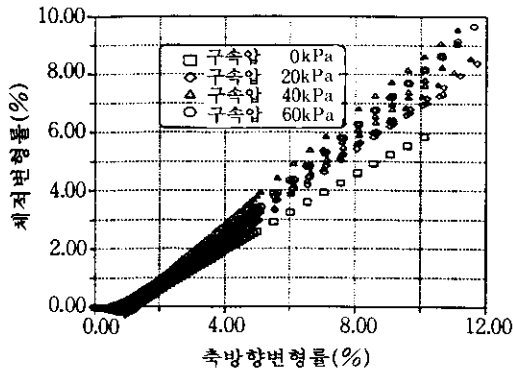
그림 4.1 EPS의 밀도·구속압별 축방항 변형률-응력 특성

4.1.2 EPS의 체적변형

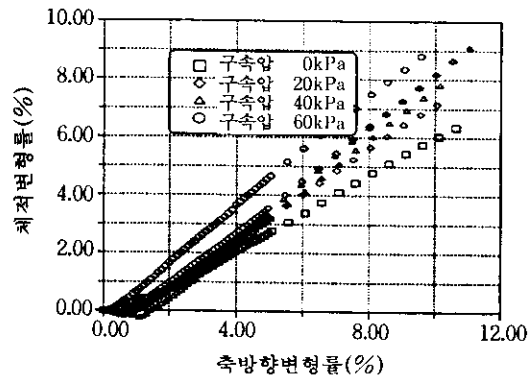
EPS의 변형 거동을 살펴보기 위하여 삼축압

축시험으로 측정된 축변형률-체적변형률을 밀도 별·구속압별로 나타내 보면 그림 4.2와 같다.





(c) 밀도 0.02 t/m³



(d) 밀도 0.015 t/m³

그림 4.2 EPS의 밀도·구속압별 축방향 변형률-체적변형률

4.2 시험결과 분석 및 고찰

4.2.1 축방향 변형-응력특성

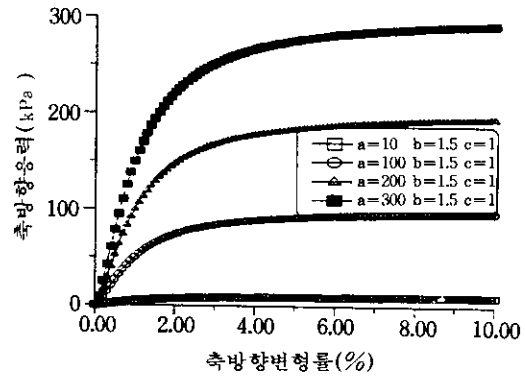
그림 3.1과 본 연구에서의 실험결과(그림 4.1)를 살펴보면 EPS의 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압에 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 밀도와 구속압이 클수록 축방향 강부응력이 커지며 초기접선계수가 커짐을 알 수 있다. 이 관계를 하나의 함수식으로 표시하기 위하여 수많은 시행착오를 거쳐 가장 적합한 식 4.1을 제시하였다.(그림 4.3)

$$\sigma_1 = \frac{a\varepsilon_1^b}{c + \varepsilon_1^b} \quad (4.1)$$

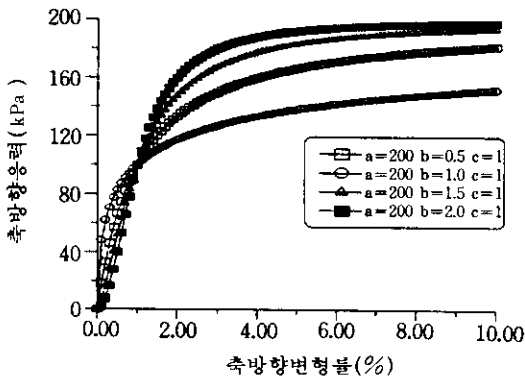
여기서 σ_1 = 축방향 응력

ε_1 = 축방향 변형률

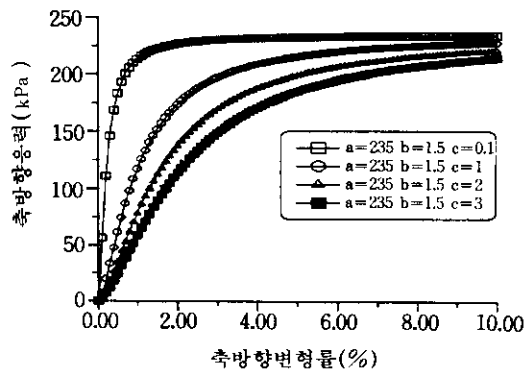
a, b, c = 계수



(a) 계수 a의 특성



(b) 계수 b의 특성



(c) 계수 c의 특성

그림 4.3 제안된 함수식의 특성

각각의 축방향 변형률-응력 데이터를 식 4.1의 함수식으로 회귀분석하여 계수 a, b, c를 구한 후 a, b, c 값들을 다양하게 분석한 결과 계수 a, b, c 값은 EPS의 밀도와 구속압에 밀접한 연관성을 가지며 따라서 식 4.1의 계수들은 EPS의 밀도와 구속압을 변수로 하는 일련의 함수식으로 나타낼 수 있었다. 결론적으로 EPS의 축방향 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압을 변수로 하는 하나의 함수식으로 나타낼 수 있다. 이러한 과정은 그림 4.5에 축방향 변형률-응력 추정치와 이를 식 4.1의 함수식으로 회귀분석한 결과를 EPS 밀도 30Kg/m³, 20Kg/m³에 대해 구속압별로 1개씩 나타내었다.

$$\begin{aligned}
 a &= -60.955 + 9843.4 \cdot d + 0.339 \cdot \sigma_3 \quad R = 0.982 \\
 b &= 1.135 + 41.97 \cdot d - 0.008 \cdot \sigma_3 \quad R = 0.800 \\
 c &= -0.437 + 101.906 \cdot d - 2007.100 \cdot d^2 + \\
 &\quad 0.011 \cdot \sigma_3 - 0.389 \cdot d \cdot \sigma_3 \quad R^2 = 0.31 \quad (4.2)
 \end{aligned}$$

여기서 $d = \text{EPS 밀도}(t/m^3)$

$\sigma_3 = \text{구속압}(kPa)$

$R = \text{상관계수}$

(correlation coefficient)

$R^2 = \text{결정계수}$

(coefficient of determination)

각 추정치를 식 4.1로 회귀분석한 결과를 살

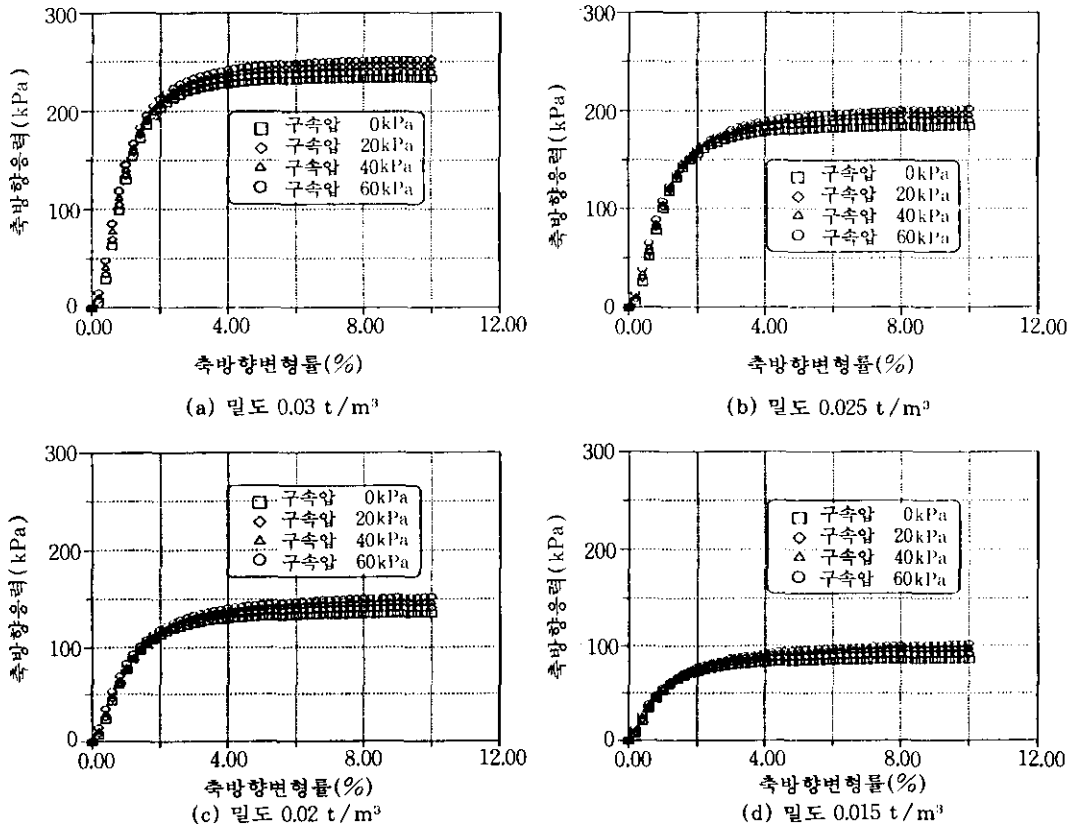


그림 4.4 통계분석 결과식에 의한 축방향 변형률-응력

해보면 상관계수가 최소 0.99이상으로 식 4.1은 EPS의 축방향 변형률-응력 거동을 매우 잘 묘사하고 있음을 알 수 있다. 식 4.2의 통계분석 결과에서 계수 a, b, c의 밀도, 구속압과의 연관성을 살펴보면 a, b는 다중선형상관성이 있으며 상관계수 R(correlation coefficient)가 a = 0.982 b = 0.800으로 비교적 높은 상관성이 얻어졌다. 반면 c는 다중비선형상관성을 보이며 통계분석상 결정계수(coefficient of determination) R²가 0.31로서 낮은상관성을 나타내고 있다. 그 원인으로는 c 값의 범위가 회귀분석 함수식에 의할 경우 0.814 ~ 0.929로 다른 계수 값에 비해 매우 작은 범위로 존재하므로써 발생하는 것으로 사료된다.

실험결과 및 분석결과를 살펴보면 EPS의 축방향 변형률-응력특성은 초기단계에서 구속압의 영향은 밀도별 영향에 비해 크지 않으나 변형률이 클수록 구속압에따른 응력 차이가 점차 크게 나타나고 있다. 따라서 일련의 함수식으로 표시된 축방향변형-응력 특성식을 EPS지반의 해석모델로 사용하면 EPS설치 형태나 범위에 따른 부위별 응력 과 변위 분포를 보다 정확히 파악할 수 있을 것으로 판단된다.

또한 각 응력수준에서의 접선계수를 나타내는 식 4.1의 1차도함수는 식 4.3과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$E_t = \frac{abc\varepsilon_1^{b-1}}{\varepsilon_1^{2b} + 2c\varepsilon_1^b + c^2} \quad (4.3)$$

여기서 E_t = 접선계수

ε₁ = 축방향 변형률

a, b, c = 밀도, 구속압에 따른 계수

4.2.2 EPS의 체적변형

그림 4.2의 측정결과에서와 같이 EPS의 체적변형률은 축방향 압축변형률에 선형비례관계가 있으며 그기울기는 밀도와 구속압에따라 어떤 상관성을 가짐을 알 수 있다. 변형 초기의 경향은 체적변형률/축방향 압축변형률 값이

작거나 구속압이 작은 경우 “-” 값을 나타내기도 하는데 이는 시료와 재하면사이의 밀착오차와 구속압을 일정하게 유지한후 축방향력을 가하기 시작하는 초기단계에서 구속압을 일정하게 유지시켜주는 시험기의 제어시스템의 불안정 때문인 것으로 사료된다.

따라서 EPS의 체적변형률과 축방향 압축변형률의 상관 관계를 구체적으로 살펴보기 위하여 각각의 측정 결과에 대하여 초기 부분을 제외한 직선부분에 대해 체적변형률/축방향 압축변형률 값을 선형 관계로 회귀분석한 결과 상관계수가 최소 0.9934 이상의 높은 상관성을 나타내었다.

또한 포아송비(poisson's ratio)는 식 4.4와 같이 구할 수 있다.

$$\nu = (1 - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_1}) \quad (4.4)$$

여기서 ν = 포아송비(poisson's ratio)

ε_v = 체적변형률

ε₁ = 축방향 압축변형률

식 4.4를 이용하여 구해진 각각의 포아송비(poisson's ratio)값의 밀도, 구속압과 관련성을 분석한결과 다중선형상관성이 있으며 식 4.5와 같은 회귀분석식이 얻어졌다. 즉 EPS의 포아송비(poisson's ratio) 또한 밀도와 구속압을 변수로 하는 함수식으로 나타낼 수 있었다.

$$\nu = 0.0967 + 3.0863*d - 0.0023*\sigma_3 \quad (4.5)$$

$$R^2 = 0.84$$

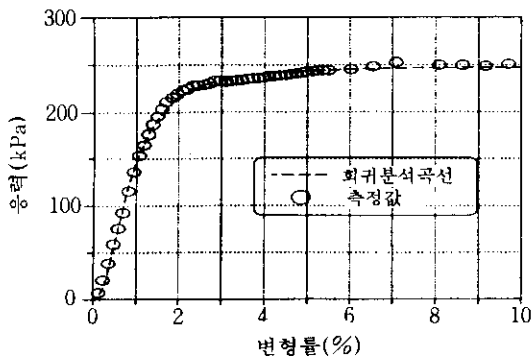
여기서 ν = 포아송비(poisson's ratio)

d = EPS밀도(t/m³)

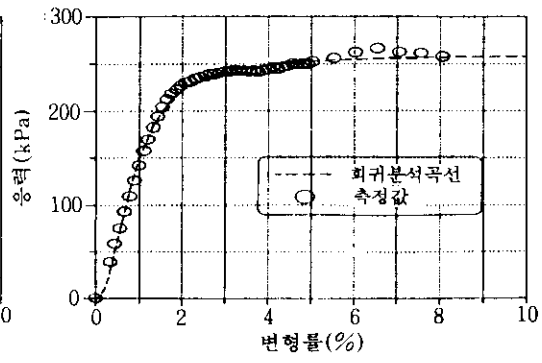
σ₃ = 구속압(Kpa)

R² = 결정계수

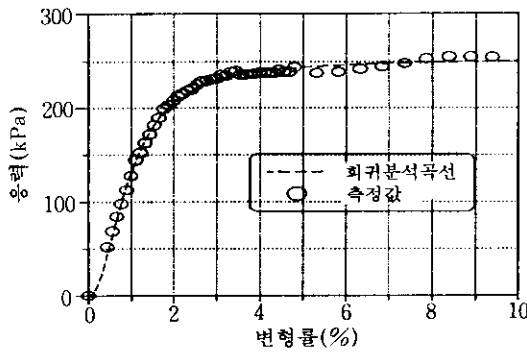
(coefficient of determination)



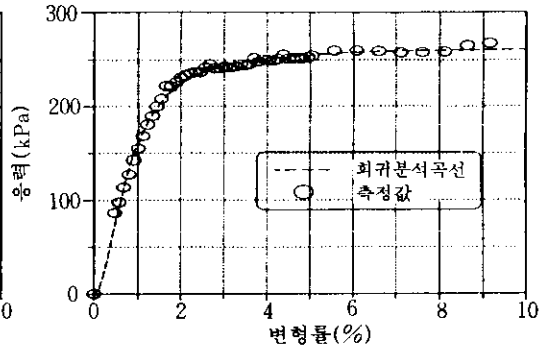
(a) 밀도 30Kg/m³ · 구속압 0kPa(상관계수 0.9978)



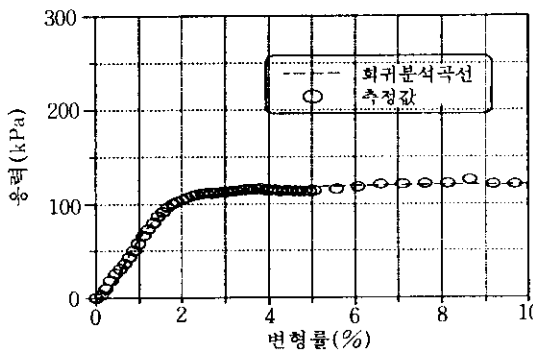
(b) 밀도 30Kg/m³ · 구속압 20kPa(상관계수 0.9977)



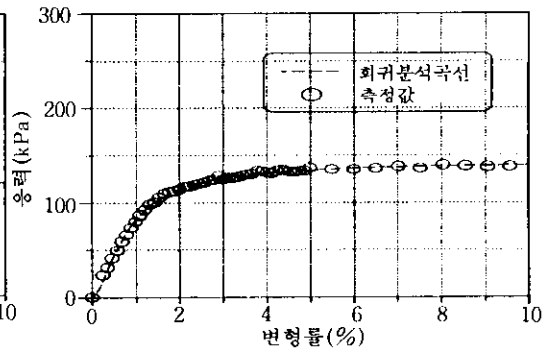
(c) 밀도 30Kg/m³ · 구속압 40kPa(상관계수 0.9986)



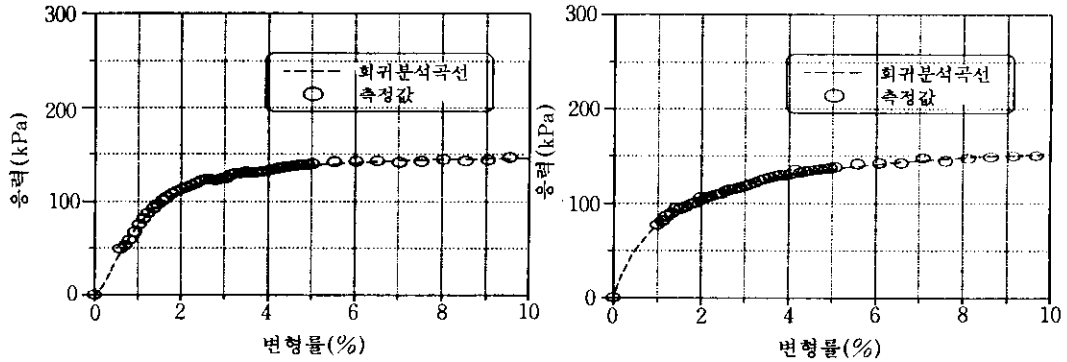
(d) 밀도 30Kg/m³ · 구속압 60kPa(상관계수 0.9977)



(e) 밀도 20Kg/m³ · 구속압 0kPa(상관계수 0.9969)



(f) 밀도 20Kg/m³ · 구속압 20kPa(상관계수 0.9989)



(g) 밀도 20Kg/m³ · 구속압 40kPa(상관계수 0.9989) (h) 밀도 20Kg/m³ · 구속압 60kPa(상관계수 0.9982)

그림 4.5 EPS의 밀도·구속압별 변형-응력 곡선의 측정치와 회귀분석 결과 대표치

5. 결 론

EPS를 성토재로 사용하는 하중저감공법의 활용성이 점차 높아지고 있으나 EPS지반의 거동을 예측할 수 있는 적합한 모델식이 없는 실정이다. 이를 위하여 본 연구에서는 토목공사용으로 시판되고 있는 EPS를 밀도와 구속압을 변화시키면서 축변형률 10% 전후까지 삼축압축시험을 실시하고 시험결과를 다각도로 분석 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 축방향 변형률-응력 특성은 탄소성적 거동을 하며 밀도와 구속압에 밀접한 연관성을 가진다.
- (2) 토목용 성토재로 국내에서 주로 사용되는 EPS(밀도 0.03t/m³ ~ 0.015t/m³)는 일정한 구속압 범위내에서(0~60kPa) 축방향 변형률-응력 특성을 밀도와 구속압을 변수로 하는 계수를 포함한 일련의 함수식으로 나타낼 수 있다.
- (3) 제안된 함수식에서 계수 a, b는 밀도와 구속압에 대해 다중선형상관성을 보이며 계수 c는 다중비선형 상관성을 보인다.
- (4) 각 응력 수준에서 변화하는 접선계수를 의미하는 제안된 축방향 변형률-응력 함수

식의 1차도함수도 밀도와 구속압을 변수로 하는 계수를 포함한 일련의 함수식으로 나타낼 수 있다.(식 4.2)

- (5) 체적변형특성을 나타내는 체적변형률-축방향변형률은 선형비례관계가 있으며 그 기울기는 밀도와 구속압과 상관관계가 있다.
- (6) 체적변형률/축방향변형률 값을 이용하여 식(4.3)으로 구해지는 포아송비(poisson's ratio)값은 밀도와 구속압에 대해 다중선형 상관성을 보이며 그 관계는 일련의 함수식으로 나타낼 수 있다.

참 고 문 헌

1. 천병식, 박강호, 김준, 임해식(1993), "E. P. S를 이용한 하중 저감 공법에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집(1), pp.473~476.
2. 천병식, 남용재, 임해식, 최용진(1994), "옹벽 뒤채움재로 EPS 사용효과", 대한토목학회 학술발표회 논문집(1), pp.713~716.
3. 천병식, 장명순, 임해식(1996), "도로성토하중경감재 EPS의 공학적 특성에 관한 연구", 한국지반공학회지, pp 59~69
4. 浜田英治,山内豊聰(1989), "輕量盛土材としての發泡スチロールの力學的特性", 土と基礎, 일본,

pp.13~18

5. 發泡 スチロール 土工法開發機構(1993), "EPS 工法", 理工圖書, 일본, pp.1~58.
6. Yeongki Cho(1992), "Behavior of Retaining Wall with EPS Blocks as Backfill", Thesis of Master Course, University of South Dakota, pp.1~29
7. Sangchul Bang(1995), "Experimental and

Analytical Study of Expanded Polystyrene Blocks in Highway Application", EPS 토목 공법 국제학술세미나 논문집, 한국건설기술연구원, 서울, pp.105~133.

8. BASF, "Code of Practice Using Expanded Polystyrene for the Construction of Road Embankments", Technical Information From BASF, 독일, pp.7~9.

(접수일자 1996. 6. 4)