

## EPS 성토지반의 거동 특성 Behavior of Ground Filled with EPS

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 임해식<sup>2)</sup>, Hae-Sig Lim

<sup>1)</sup> 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

<sup>2)</sup> 대한주택공사 연구소 연구원, Researcher, Korea National Housing Co.

**SYNOPSIS** : EPS(Expanded Polystyrene) which has unit weight of only 0.02 ~ 0.03 t/m<sup>3</sup>, is used as one of the methods acquiring the safety for settlement and bearing capacity. Parts of it's applications are for backfill materials of structures like abutment, retaining wall, etc., to reduce horizontal earth pressure and for banking materials to secure the safety of settlement and bearing capacity by minimizing the stress increment. However, adequate numerical modelling has not yet proposed to predict the behavior of EPS and to decide the configuration of banking area by EPS.

In this point of view, 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 as functions or functions of parameters using density and confining pressure of EPS. From these results, this paper proposed the nonlinear model describing the behavior of EPS.

Thus numerical model was applied to the construction of EPS and to the large scaled model test. The applicability of proposed numerical model was confirmed with results of comparison between prediction and measurements.

**KEYWORDS** : EPS, Non-linear Numerical model, Numerical model of EPS

### 1. 서 론

경량성토공법의 하나인 EPS(Expanded Polystyrene)공법은 EPS라는 경량성 및 자립 특성이 우수한 재료를 성토재로 사용하여 교대 및 옹벽 등의 횡토압 구조물에서는 토압의 저감이 가능하며 구체 구조 및 기초 형식의 간략화, 지반개량 등 보조공법의 생략 등을 도모할 수 있는 공법이다.(천병식 외3,1993)

그러나 현재까지 EPS 성토재의 거동을 묘사하기 위한 적합한 수치해석모델 제시를 위한 연구는 EPS 응력-변형을 곡선의 초기접선계수, 소성영역 접선계수, 이 두 접선계수의 교점의 좌표를 이용하여 EPS의 응력-변형을 묘사하고 포아송비를 구속압의 함수로 나타낸 1992년 South Dakota 에서의 연구가 유일한 것으로 조사되었으나 이 연구에서 제시된 EPS의 변형-응력특성 묘사 함수식에 포함된 계수들의 정확한 추출에 어려움이 있는 점과 시험양의 부족으로 도출된 함수식의 신뢰성이 미흡한 점 등의 문제점을 내포하고 있는 것으로 판단되었다.(Yeongki Cho,1992;Sangchul Bang,1995;천병식 외3,1996)

따라서 본 연구의 목적은 EPS를 성토재로서 활용하는 경우에 있어서 작용 하중에 대한 EPS의 거동 예측을 위한 합리적인 연속체 모델식의 개발을 통하여 EPS공법의 적용시 적절한 EPS의 밀도와 치환범위를 선정하고 보다 정확한 EPS의 거동을 예측할 수 있도록 하는 데에 있다.

### 2. EPS모델 개발을 위한 실내시험

삼축압축시험을 위한 시료는 현재 국내에서 토목용 성토재료로 시판되고 있는 4가지 종류의 밀도(30

Kg/m<sup>3</sup>, 25 Kg/m<sup>3</sup>, 20 Kg/m<sup>3</sup>, 15 Kg/m<sup>3</sup>)의 EPS 블럭을 직경 50mm, 높이 100mm 의 원주형으로 제작하여 사용하였다.

4종류 밀도의 시료에 대해 배기상태에서 구속압을 각각 0, 20, 40, 60 Kpa 4가지 단계로 가한 후 변형 제어방법으로 압축력을 가하였다. 변형속도는 1mm/min 로 제어되었다.

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.

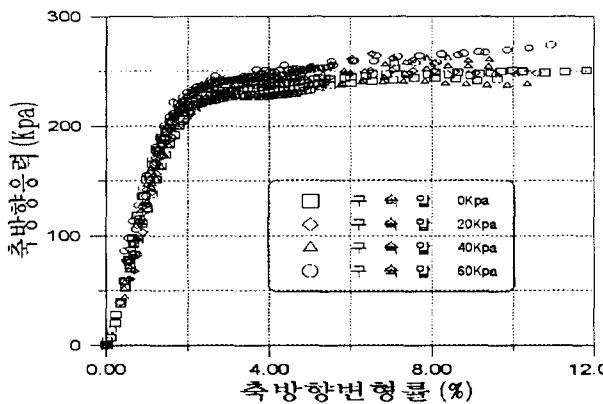
## 2.1. 시험결과

### 2.1.1. 축방향 변형-응력 특성

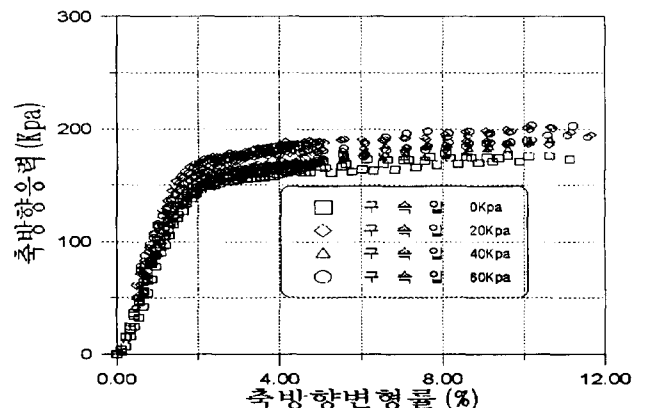
삼축압축시험에 의해 얻어진 축방향 변형률-응력관계를 EPS 밀도별 구속압별로 나타내 보면 그림 1과 같다.

### 2.1.2. EPS의 체적변형

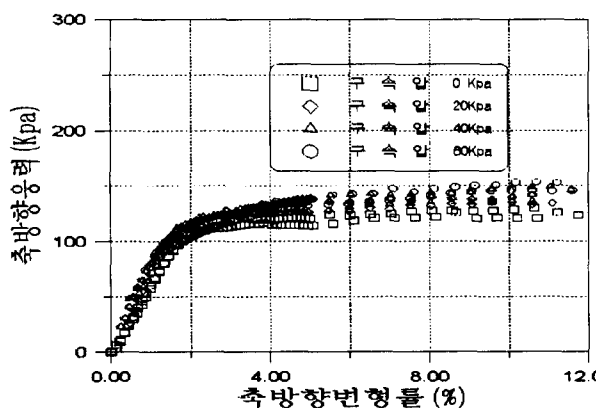
EPS의 변형 거동을 살펴보기 위하여 삼축압축시험으로 측정된 축변형률-체적변형률을 밀도별·구속압별로 나타내 보면 그림 2와 같다.



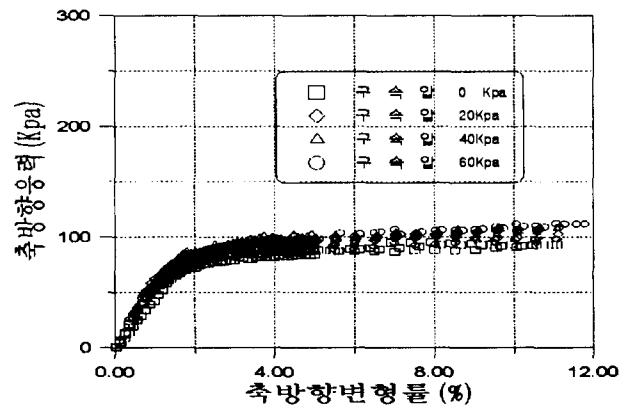
(a) 밀도 0.03 t/m<sup>3</sup>



(b) 밀도 0.025 t/m<sup>3</sup>

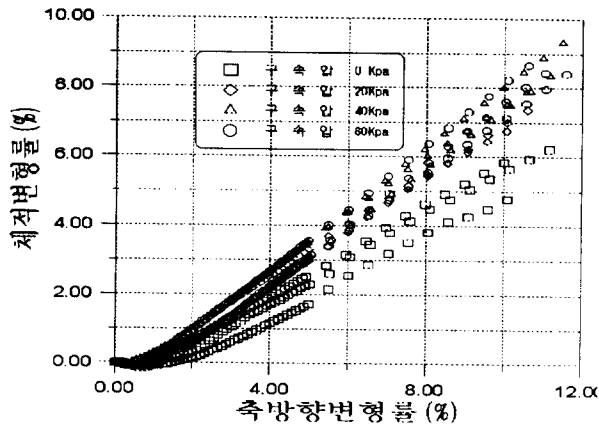


(c) 밀도 0.02 t/m<sup>3</sup>

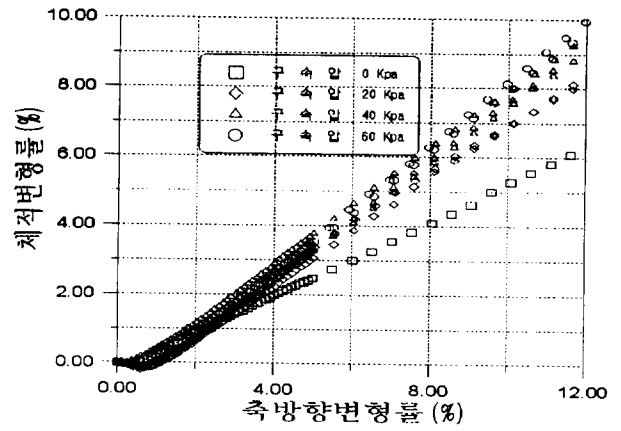


(d) 밀도 0.015 t/m<sup>3</sup>

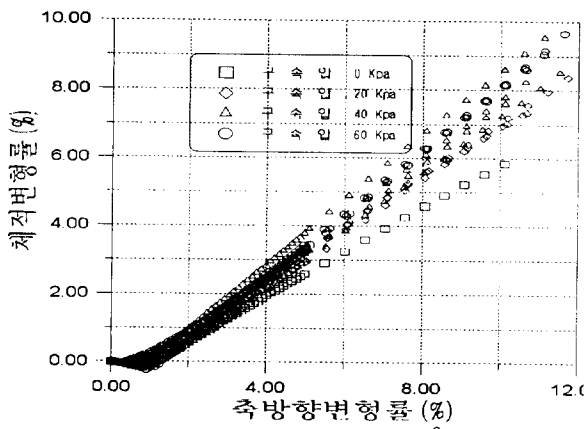
그림1 EPS의 밀도·구속압별 축방향 변형률-응력 특성



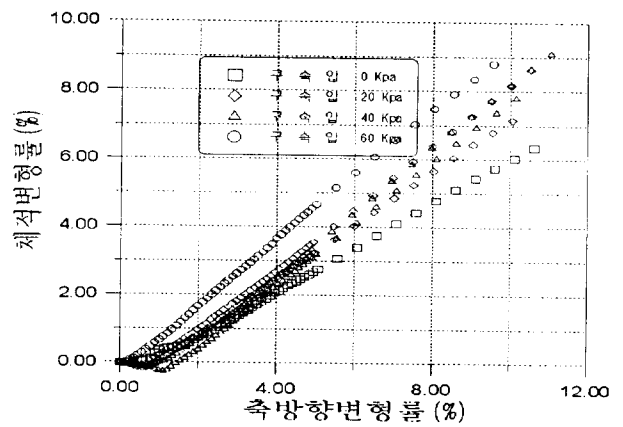
(a) 밀도 0.03 t/m<sup>3</sup>



(b) 밀도 0.025 t/m<sup>3</sup>



(c) 밀도 0.02 t/m<sup>3</sup>



(d) 밀도 0.015 t/m<sup>3</sup>

그림2 EPS의 밀도·구속압별 축방향 변형률-체적변형률

## 2.2. 시험결과 분석 및 모델식 작성

### 2.2.1. 축방향 변형-응력특성

본 연구에서의 실험결과(그림1)를 살펴보면 EPS의 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압에 밀접한 연관이 있음을 알 수 있다. 밀도와 구속압이 클수록 축방향 항복응력이 커지며 초기접선계수가 커짐을 알 수 있다. 이 관계를 하나의 함수식으로 표시하기 위하여 수많은 시행착오를 거쳐 가장 적합한 식 (1)을 제시하였다.

$$\sigma_1 = \frac{a\varepsilon_1^b}{c + \varepsilon_1^b} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_1$  : 축방향 응력  
 $\varepsilon_1$  : 축방향 변형률  
a,b,c : 계수

각각의 축방향 변형률-응력 데이터를 식(1)의 함수식으로 회귀분석하여 계수 a,b,c를 구한후 a,b,c값들을 다양하게 분석한 결과 계수 a,b,c값은 EPS의 밀도와 구속압에 밀접한 연관성을 가지며 따라서 식 (1)의 계수들은 EPS의 밀도와 구속압을 변수로 하는 일련의 함수식으로 나타낼수 있었다. 결론적으로

EPS의 축방향 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압을 변수로 하는 하나의 함수식으로 나타낼 수 있다.

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

여기서  $d = \text{EPS 밀도}(t/m^3)$        $\sigma_3 = \text{구속압}(Kpa)$

$R = \text{상관계수}(correlation coefficient)$

$R^2 = \text{결정계수}(coefficient of determination)$

또한 각 응력수준에서의 접선계수를 나타내는 식 (1)의 1차도함수는 식 (3)과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$E_t = \frac{abc \varepsilon_1^{b-1}}{\varepsilon_1^{2b} + 2c\varepsilon_1^b + c^2} \quad (3)$$

여기서,  $E_t$  : 접선계수

$\varepsilon_1$  : 축방향변형률

$a, b, c$  : 밀도, 구속압에 따른 계수

## 2.2.2. EPS의 체적변형

그림 2의 측정결과에서와 같이 EPS의 체적변형률은 축방향 압축변형률에 선형비례관계가 있으며 기울기는 밀도와 구속압에 따라 어떤 상관성을 가짐을 알 수 있다

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)와 같이 구할 수 있다.

$$\nu = \left(1 - \frac{\varepsilon_v}{\varepsilon_1}\right) \quad (4)$$

여기서,  $\nu$  : 포아송비(poisson's ratio)

$\varepsilon_v$  : 체적변형률

$\varepsilon_1$  : 축방향 압축변형률

식 (4) 를 이용하여 구해진 각각의 포아송비(poisson's ratio)값의 밀도, 구속압과 관련성을 분석한결과 다중선형상관성이 있으며 식 (5)와 같은 회귀분석식이 얻어졌다. 즉 EPS의 포아송비(poisson's ratio) 또한 밀도와 구속압을 변수로 하는 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$\nu = 0.0967 + 3.0863*d - 0.0023*\sigma_3 \quad R^2 = 0.84 \quad (5)$$

여기서,  $\nu$  : 포아송비(poisson's ratio)

$d$  : EPS 밀도( $t/m^3$ )

$\sigma_3$  : 구속압(Kpa)

$R^2$  : 결정계수(coefficient of determination)

## 3. 제안된 수치모델의 적용성 검증

제안된 EPS의 적용성을 검토해보기 위하여 일본 건설성토목연구소에서 실시한 대형실물모형실험과

실제로 옹벽배면에 EPS를 성토재로 사용한 경우에 대해 제안된 모델과 초기접선계수를 이용한 선형탄성모델을 적용시켜 해석하였다.

### 3.1 모형실험결과에의한 적용성 검토

#### 3.1.1 실내 모형실험 현황

그림 3과 같이 EPS를 역사다리꼴로 쌓은후 그림4,5 에서와 같이 상재성토를 한경우에 대해 수평토압과 침하량을 측정하였다.(竹内辰典 외2, 1990)  
 사용된 E.P.S는 밀도 20 Kg/m<sup>3</sup> 로 칫수 2.0m x 1.0m x 0.5m 크기이며 배면 토사는 하천모래를 사용하였으며 토질시험 결과에 의한 강도정수 및 물성치는 표 1과 같다.

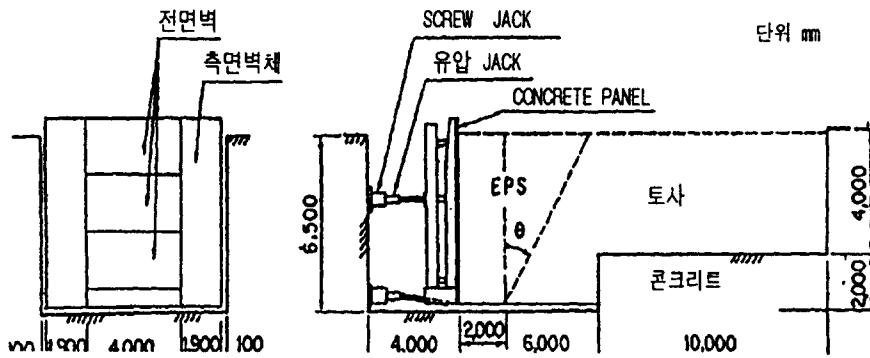


그림 3. 실내 모형실험 현황

#### 3.1.2 해석조건 및 적용 물성치

해석시 EPS 부분은 제안된 비선형 탄성모델과 초기접선계수를 사용한 선형탄성모델을 적용하였고 저부 콘크리트 부분은 선형탄성모델을 적용하였으며 토사부분은 Mohr-Coulmb 탄소성 모델을 적용하였다. 토사

부분의 물성치는 삼축 실내시험과 현장밀도시험 결과치에의한 점착력,내부마찰각 값과 그값에 의해 추정된 탄성계수,포아송비값을 사용하였다. EPS는 선형탄성모델의경우 스웨덴 토질공학연구소의 EPS밀도별 초기접선계수 시험결과값과 일본 發泡 スチロール 土工工法開發機構(1993)에서의 삼축시험에의한 포아송비값을 적용 하였으며 제안된 비선형 탄성모델의 경우 식(3) 과 식(5)에 의한 접선계수와 포아송비를 적용하였다. 이와같은 해석에 사용된 물성치를 표 2에 나타내었다.

#### 3.1.3 해석결과

실내모형실험에서 측정된 벽면에서의 수평토압과 상재하중에따른 침하량값과 EPS를 선형탄성모델과 본 연구에서 제안된 모델을 적용시켜 해석한결과를 그림4,5,6에 나타내었다.

### 3.2 실제 시공에의한 적용성 검토

#### 3.2.1 EPS의 시공현황

검토 대상지구의 EPS시공 현황은 그림 4.5와 같이 경사면 위에 옹벽을 설치하므로써 2단의 옹벽이 설치되게 된다. 상단 옹벽 저판의 기초지지력 부족과 하단 옹벽에 미치는 토압경감 효과를 얻기 위하여 경사면의 토사부분은 안정적 경사(1 : 1.5)로 조정하고 기 설치된 하단 옹벽의 상부에 옹벽을 설치한 후 EPS로 옹벽 뒷채움을 실시하였다.옹벽 뒷채움에 사용된 EPS는 KSM3808에 규정된 보온판 3호(밀도 20 Kg/m<sup>3</sup> 이상) 로 칫수 1.8m x 0.9m x 0.4m 크기의 EPS 블럭을 그림4.6에서와 같이 중간에 콘크리트판(상부판 두께 15cm, 중간판 두께 10cm)을 설치하면서 쌓아 시공하였다. 콘크리트 중간판 내에는 와이어 메쉬를 설치하고 배면 토사와의 접합부에 그림7 에서와 같이 머리부를 두어 정착단의 역할을 하도록 하였다.

EPS 설치부위 지반의 토질은 GM, SM으로 분류되는 암편이 함유된 토사로서 실내 토질시험 및 현장밀도시험에 의한 강도정수 및 물성치는 표 1 과 같다.

표 1. EPS설치 배면토사의 시험결과

구분	단위중량 $\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	자연함수비 $\omega_n$ (%)	내부마찰각 $\phi$ ( $^\circ$ )	점착력 $c$ ( $t/m^2$ )	최대건조밀도 $\gamma_{dmax}$ ( $t/m^3$ )	최적 함수비 $\omega_{opt}$ (%)
모형실험배면토사	1.46	6.3	31.3	0.5	1.606	10.9
시험시공경사면의 토사 및 옹벽 저부 지반	1.78	-	30	1.5	1.967	9.5

표 2. 적용모델 및 지반의 물성치

구분	단위중량 $\gamma_t$ ( $t/m^3$ )	내부 마찰각 $\phi$ ( $^\circ$ )	점착력 $c$ ( $t/m^2$ )	탄성계수 $E$ (Kpa)	포아송비 $\nu$	체적탄성 계수 $K$ (Kpa)	전단탄성 계수 $G$ (Kpa)
모형실험배면토사	1.46	31.3	0.5	$1.5 \times 10^4$	0.25	$1.0 \times 10^4$	$6.0 \times 10^3$
경사면의 토사 및 옹벽 저부 지반	1.78	30	1.5	$1.96 \times 10^4$	0.30	$1.63 \times 10^4$	$7.5 \times 10^3$
비선형 탄성 EPS 모델	0.02	-	-	식 (3)	식 (5)	-	-
탄성 EPS 모델	0.02	-	-	$5.10 \times 10^5$	0.12	$2.24 \times 10^5$	$2.28 \times 10^5$
콘크리트	2.5	-	-	$2.04 \times 10^9$	0.15	$9.52 \times 10^9$	$7.69 \times 10^9$

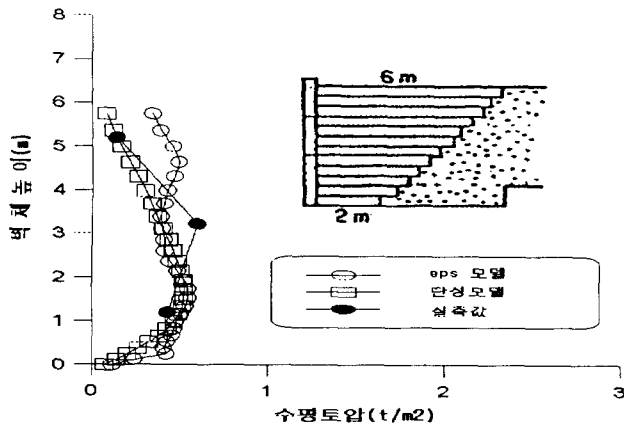


그림 4 상재하중 재하전의수평토압그림

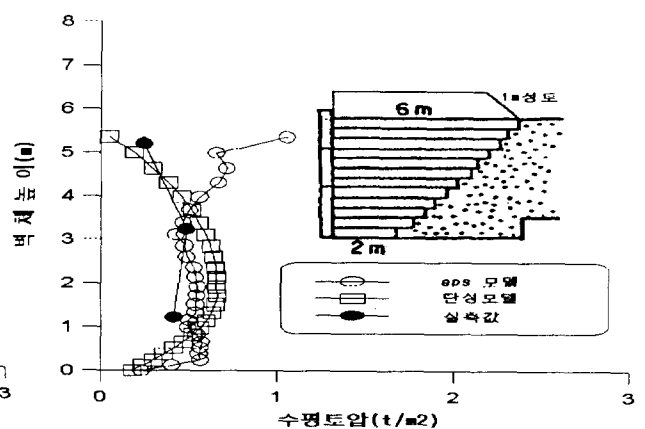


그림 5. 상재하중 1m 재하시의 수평토압

### 3.2.2 EPS 성토지반의 해석조건 및 적용 물성치

EPS 성토지반은 그림7 에서 나타낸 바와 같으며 해석시 EPS 부분은 제안된 비선형 탄성모델과 초기접선계수를 사용한 선형탄성모델을 적용하였고 옹벽 및 EPS 블럭 중간 및 최상부의 콘크리트 상판은 선형탄성모델을 적용하였으며 토사부분은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

적용물성치는 3.1.2 에서와 동일한 기준을 적용하였으며 이와같은 해석에 사용된 물성치를 표 2에 나타내었다.

경계조건은 해석영역 저부는 X축, Y축 방향 변위를 구속하고 좌,우측면은 X축 방향 변위는 구속하고 Y축 방향 변위는 허용하는 것으로 하였다.

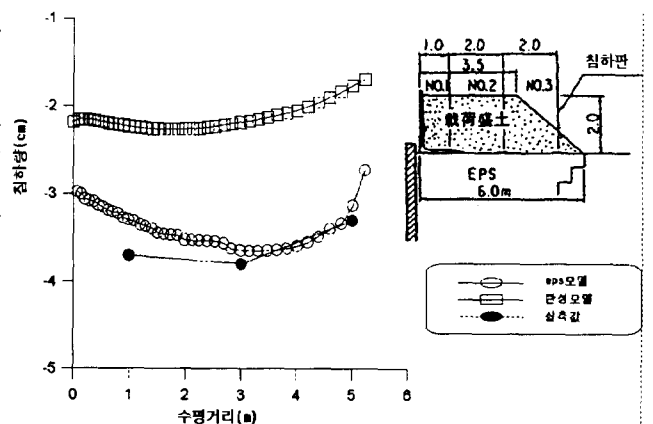


그림 6 상재하중 2m 재하시의 침하량

EPS 설치지반 표면은 도로로 사용되고 있으므로 해석시에 교통하중을 DB24t(도로 표면 등분포 하중  $5.1t/m^2$ ), DB18t(도로 표면 등분포 하중  $3.8t/m^2$ ), DB13.5t(도로 표면 등분포 하중  $2.9t/m^2$ ), 도로 표면 등분포 하중  $1t/m^2$  4가지 경우에 대해 해석하였다. 이때 DB24t, DB18t, DB13.5t에 해당하는 도로표면 등분포 하중은, 본 연구의 해석대상 지중 구조물 설계시 도로표면 차량 축하중에 의한 분포하중을 Kö gler식에 분포각  $55^\circ$ 를 고려하여 산정 하였으므로 같은 기준을 적용하여 산정 하였다.

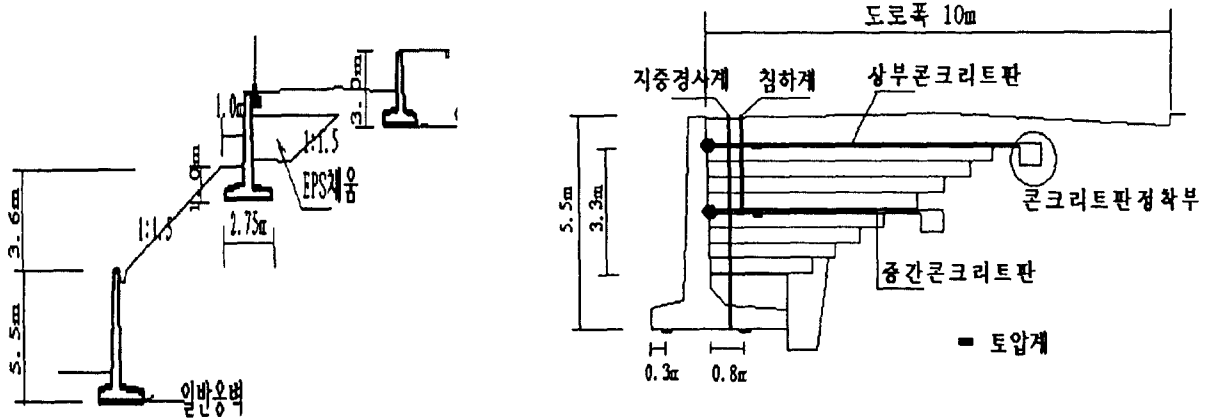


그림 7. EPS옹벽 설치개요

### 3.2.3 해석결과

EPS 설치 지반을 원지반 상태와 시공 과정대로 단계별로 해석하여 최종 침하량 해석결과를 실제 계측기 설치 부위를 포함하여 그림으로 나타내어 보았다. 침하량을 도로표면, 상부콘크리트판, 중간콘크리트판, EPS 설치지반면에서 도로폭 10m 구간에 대하여 하중 조건별로 EPS를 탄성 모델로 해석한 경우와 본 논문에서 제안한 모델로 해석한 결과를 그림 8 ~ 그림 15에 나타내었다. 이때 실제 계측값도 해석 결과의 해당 위치에 같이 표시하였다.

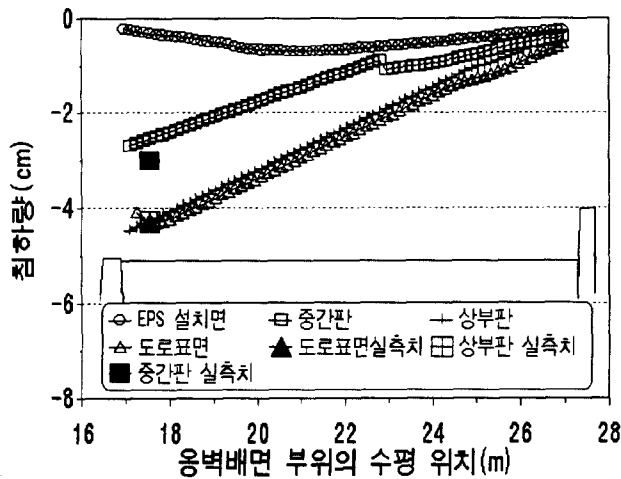


그림 8 제안된 EPS 모델에 의한 부위별 침하량(DB24)

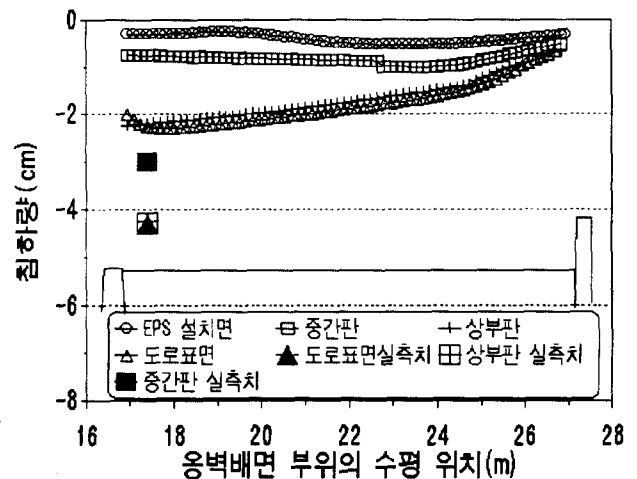


그림 9 EPS를 탄성 모델로한 부위별 침하량(DB24)

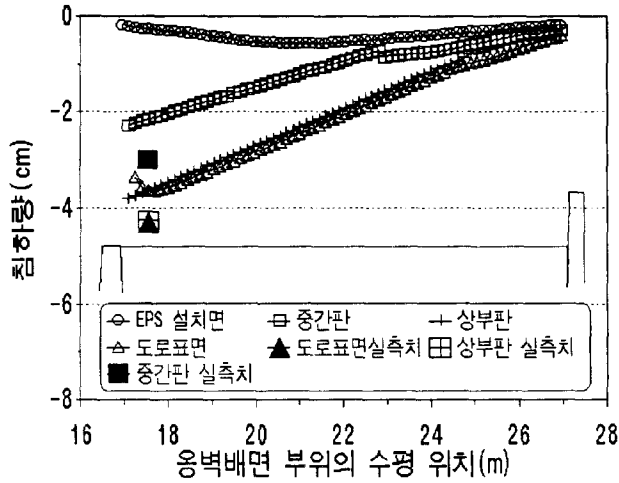


그림 10 제안된 EPS 모델에 의한 부위별  
침하량(DB18)

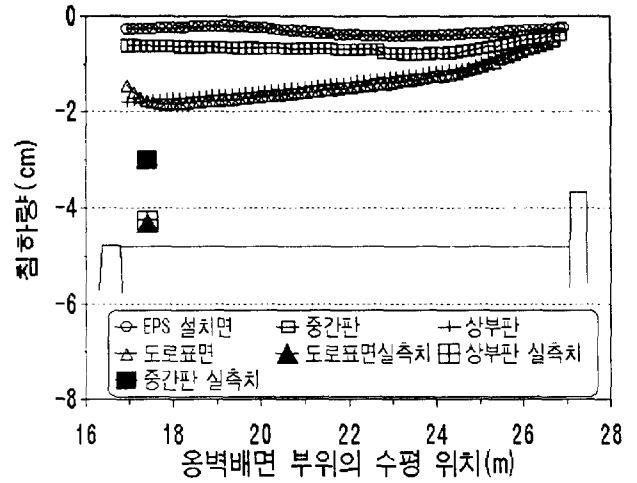


그림 11 EPS를 탄성 모델로한 부위별  
침하량(DB18)

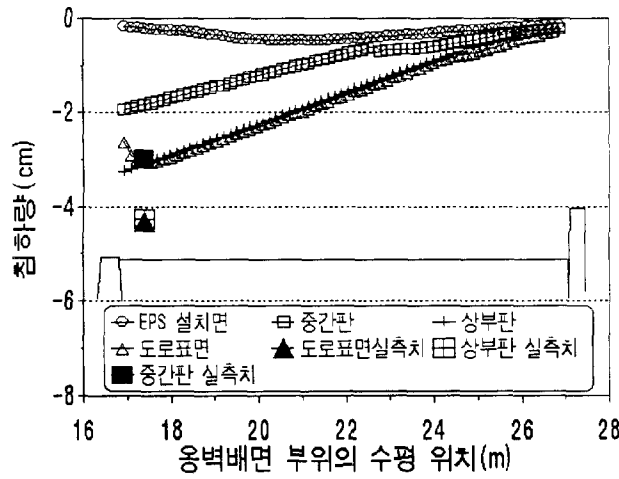


그림 12 제안된 EPS 모델에 의한 부위별  
침하량(DB13.5)

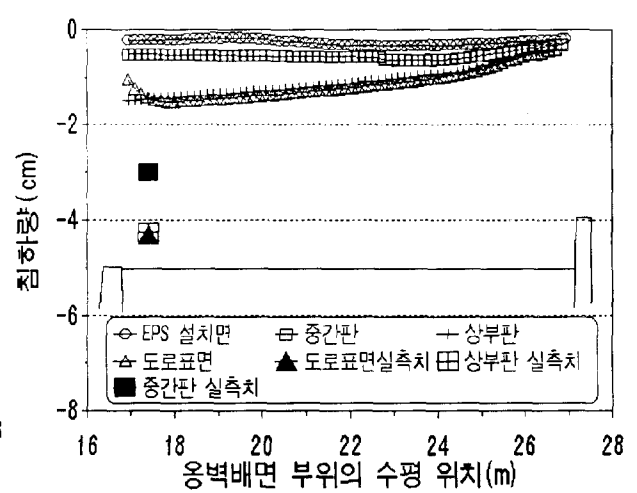


그림 13 EPS를 탄성 모델로한 부위별  
침하량(DB13.5)



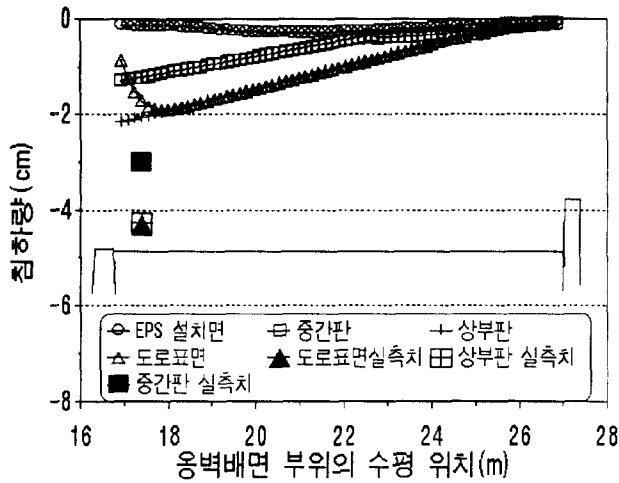


그림 14 제안된 EPS 모델에 의한 부위별  
침하량( $1t/m^2$ )

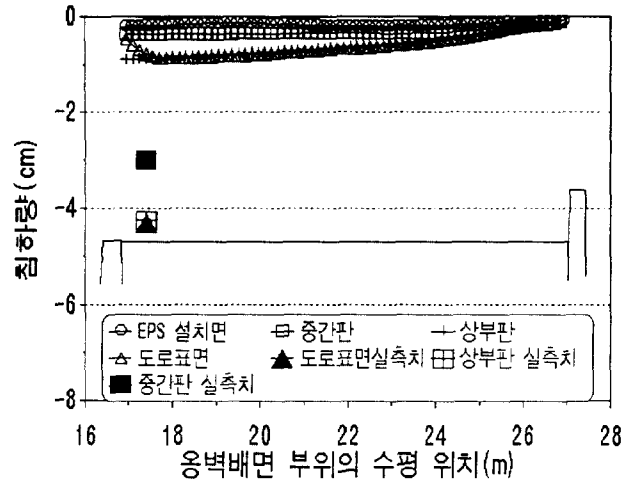


그림 15 EPS를 탄성 모델로한 부위별  
침하량( $1t/m^2$ )

#### 4. 결론

EPS를 성토재로 사용하는 하중저감공법의 활용성이 점차 높아지고 있으나 EPS 성토지반의 침하량 예측 및 EPS 성토범위 결정에 필수적인 EPS의 거동예측을 위한 수치해석 모델이 없는 실정이다. 본 연구에서는 EPS의 밀도와 구속압을 변화시키면서 축변형률 10% 전후까지 삼축압축시험을 실시하고 시험 결과를 다각도로 분석 고찰 하여 EPS 거동예측 모델을 제안하였다.

제안된 EPS 거동예측 모델의 적용성을 검토하기 위하여 실제 성토공법을 적용한 시공 구간과 일본에서 실시한 대형 실내모형실험에 대하여 수치해석을 실시하고 측정자료와 비교 검토 하였다.

이와 같은 일련의 연구과정에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 삼축 하중하의 EPS 축방향 변형률-응력 특성은 탄소성적 거동을 하며 밀도와 구속압에 밀접한 연관성이 있다. 토목용 성토재로 주로 사용되는 EPS(밀도  $0.03 t/m^3 \sim 0.015 t/m^3$ )에 대한 삼축시험 결과의 분석을 통해 EPS의 축방향 변형률-응력 특성은 밀도와 구속압을 변수로 하는 계수(a,b,c)를 포함한 일련의 함수식으로 나타낼수 있다. 제안된 함수식에서 계수 a,b는 밀도와 구속압에 대해 다중선형상관성을 보이며 계수 c는 다중비선형 상관성을 보였다.
- 2) 각 응력 수준에서 변화하는 접선계수를 의미하는 제안된 축방향 변형률-응력 함수식의 1차도함수도 밀도와 구속압을 변수로 하는 계수를 포함한 일련의 함수식으로 나타낼수 있다.
- 3) 체적변형특성을 나타내는 체적변형률-축방향변형률은 선형비례관계가 있으며 그 기울기는 밀도와 구속압과 상관관계가 있다. 체적변형률/축방향변형률 값을 이용하여 구해지는 포아송비값은 밀도와 구속압에 대해 다중선형 상관성을 보이며 그 관계는 일련의 함수식으로 나타낼수 있다.
- 4) 새로 제안된 비선형 탄성 EPS 모델식을 적용하여 해석한결과 수평토압은 선형탄성모델로 해석한결과와 큰 차이가 없으며 실측치와도 잘 일치하나 침하량 해석결과는 선형탄성모델로 해석한 결과보다 훨씬 큰 침하를 나타내고 이 값이 실측 침하량과도 잘 일치한다. 이같은 결과로 본 연구에서 제안된 비선형탄성모델이 EPS의 비선형 압축성을 잘 묘사할 수 있으며, 특히 현재까지 대부분의 경우 적용되던 선형탄성EPS모델에비해 EPS성토지반의 침하량을 정확히 예측할 수 있었다.
- 5) 제안된 비선형 탄성 EPS 모델식을 적용하여 EPS 성토시공 지반과 대형 모형실험을 해석한 결과 제안된 모델식이 합리적으로 EPS 시공지반의 거동 예측에 적용될수 있음을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

1. 천병식,박강호,김준,임해식(1993), "E.P.S 를 이용한 하중 저감 공법에 관한 연구", 대한토목학회 학술발표회논문집( I ), pp.473~476.
2. 천병식,임해식,권형석,김정관(1996), "EPS의 거동예측 모델에 관한 연구",대한토목학회 학술발표회 논문집(III), pp.453~456.
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, pp 13 ~ 18.
5. 發泡 スチロール 土木工法開發機構(1993), "EPS 工法", 理工圖書, pp.1~58.
6. 竹内辰典,久樂勝行,青山憲明(1990),"發泡スチロールを用いた構造物背面の土壓輕減工法の大型擁壁實驗",建設省土木研究所, pp4 ~ 55.
7. Sangchul Bang(1995), "Experimental and Analytical Study of Expanded Polystyrene Blocks in Highway Application", EPS 토목공법 국제학술세미나 논문집, 한국건설기술연구원,서울, pp 105 ~ 133.
8. Yeongki Cho(1992), "Behavior of Retaining Wall with EPS Blocks as Backfill", Thesis of Master Course, University of South Dakota, pp 1 ~ 29