

## EPS로 뒷채움된 지반의 장기거동특성

### Long-term Behavior Characteristics of Backfilled Ground by EPS

천 병 식<sup>1</sup> Chun, Byung-Sik  
정 창 희<sup>2</sup> Jung, Chang-Hee  
최 희 림<sup>3</sup> Choi, Hui-Rim

#### Abstract

EPS provides a superb self-sufficient stability. Studies on the process of EPS construction method focus on the inchoate phase of general construction, which is increasingly applied to construction sites throughout the world. Unfortunately, there has been little study on the durability and long-term soil behavior involving EPS materials. In this study, the boring, in-site and laboratory tests were conducted to examine the long-term soil behavior in the back-filling of alternating behind the side to which EPS was applied. And results of finite element analysis considering various test results and the soil behavior data measured during the construction show that EPS construction method is a superb process that relieves the load and consequently reduces the settlement, alleviates the stress on the abutment, and prevents lateral flow.

#### 요 지

EPS는 자립안정성이 우수한 특성으로 인하여 세계적으로 건설현장에 널리 쓰이고 있다. EPS 공법은 일반적인 시공 초기에 관하여 주로 연구되어 있고, EPS 재료의 내구성 및 적용지반의 장기거동에 관한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 EPS가 적용된 교대배면 뒷채움 지반의 장기 거동특성을 파악하기 위하여 EPS재료의 내구성 및 크리프 특성 분석, 시추조사, 현장 및 실내시험을 수행하였으며, 각종 시험결과 및 시공시 측정된 지반거동 계측자료를 고려한 유한요소해석을 통하여 장기 지반거동 특성을 파악한 결과, EPS 공법의 하중경감 효과에 의한 침하량 감소, 교대에 작용하는 응력감소 효과 및 측방유동 방지대책으로 우수한 적용성을 확인할 수 있었다.

**Keywords** : Durability, EPS, Long-term soil behavior, Prevent lateral flow, Relieve the load

#### 1. 서 론

우리나라에 EPS(Expanded Polystyrene) 성토공법의 도입은 1993년 서해안 고속도로 현장에서 시작된 이후 지형적인 특성 때문에 다량의 EPS 블록이 시공되어 왔으며, 국내에 사용된 EPS성토공법의 주 적용분야는 연약지반상의 교대 뒷채움 및 성토체 분야로 EPS 블록 전체사용량의 약 70%정도를 차지하고 있다.

EPS는 블록형태로 제조되어 토목공사에 이용되며, 재료특성상 초경량성 및 내압축성을 가지며 자립안정성이 우수하므로 교대 및 옹벽 등의 횡토압 구조물에서는 토압의 저감이 가능하며, 구체구조 및 기초형식의 간략화, 지반개량 등 보조공법의 생략 등을 도모할 수 있는 공법으로 연약지반상 성토체로 적용하는 경우, 침하 및 측방유동에 대한 대책공법으로 적용이 가능하다.

EPS 특성에 대한 연구내용 중 재료의 내구성에 대한

1 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof. Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ., hengdang@unitel.co.kr, 교신저자)

2 정회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

3 비회원, 한양대학교 토목공학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Hanyang Univ.)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 4월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

연구를 위해 기 시공된 EPS에 대해 시간경과에 따른 재료적 거동에 관한 연구도 진행되었다. 공법적용 초기에 EPS재의 시간경과에 대한 연구는 대표적으로 1979년 노르웨이 Flom에 시공된 후 7년 뒤 수거한 EPS의 자체 변형에 관한 연구와 캐나다에서 시공한 후 5년 뒤 EPS를 수거하여 구조적, 열적 특성을 연구한 것을 들 수 있다(NRRL, 1987).

현재 국내에서는 시공된 EPS에 관한 연구는 매우 미흡하고 공장생산 된 EPS에 대하여 실내시험을 통해 제안된 거동예측 및 수치해석을 이용한 거동 분석에 국한되어 시행되어 왔고, 일반적인 시공초기에 관한 연구를 중심으로 이루어져 있으며, EPS 재료의 장기 내구성 및 적용지반의 거동특성 등에 관한 연구가 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 EPS 적용지반의 장기 거동특성을 파악하기 위하여, EPS가 연약지반상 교대배면 뒷채움재로 적용된 후 5년이 경과한 현장에 대하여 시추조사, EPS 시료채취, 현장 및 실내시험을 수행하였으며, 각종 시험결과 및 시공시 측정된 지반거동 계측자료를 고려한 유한요소해석 결과를 분석하여 장기 지반거동 특성 파악을 통한 EPS공법의 하중경감 효과 및 측방유동 방지대책으로의 적용성을 확인하고자 하였다.

## 2. 연구 동향

### 2.1 수평토압 저감효과

강성 벽체에 작용하는 토압에 대한 지금까지의 연구 결과에 의하면 주동상태에 도달하기 위해 필요한 벽체 변위는 현장 및 실내모형시험을 통하여 옹벽높이(H)의 0.05~0.5%H 정도로 뒷채움 지반의 다짐에 의해 추가 토압이 발생하며, 이와 같은 다짐에 의해 유발되는 잔류 토압은 시공중 벽체 변위가 발생할 경우 소멸된다고 보고하고 있다(Ingold, 1979).

압축재를 포설한 옹벽에 대한 연구결과에 의하면, 옹벽 배면에 압축재를 포설하는 경우 아칭효과가 발생하여 실제 작용하는 토압이 그림 1에서 보듯이 옹벽상단에서 주동토압과 거의 유사한 값을 나타내고 옹벽높이가 증가할수록 옹벽 중간 부위에서 최대가 되는 토압분포 형태가 발생한다고 하였으며(Horvath, 1996), Murphy(1997)는 옹벽 배면에 부분적으로 압축재가 포설된 경우에 있어서도 이러한 토압특성이 발생한다고 하였다.

또한, 김진만 등(2004)은 EPS 블록을 이용한 콘크리

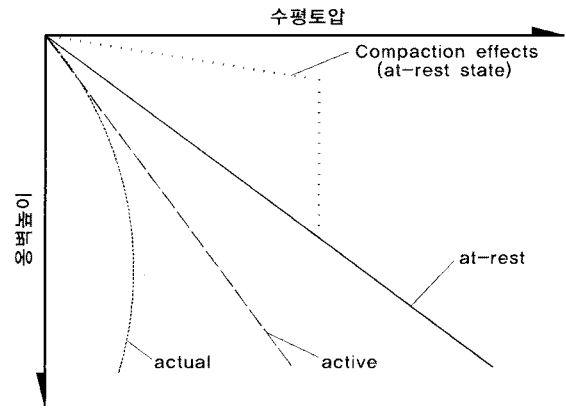


그림 1. Rep-Wall 개념에 의한 토압 분포

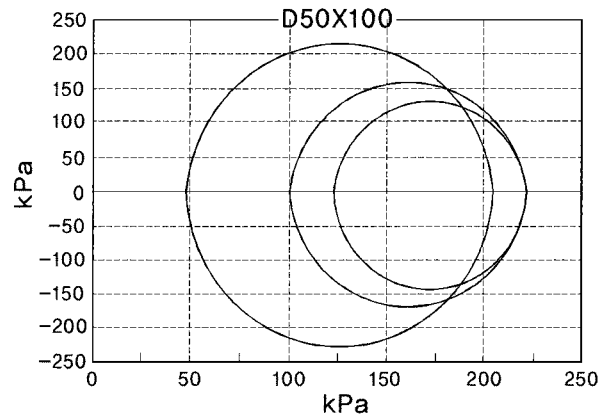


그림 2. EPS 삼축시험 결과(1호)

트 구조물 배면의 수평토압은 벽체 하단부로 갈수록 변위량이 큰 삼각형 형태의 EPS블록 압축특성에 직접적인 영향을 받아 사다리꼴 형태의 토압분포 특성을 가지며, 합력의 작용점은 약 0.41H, 토압계수는 약 0.5K<sub>a</sub>로 평가하였다.

한편, 천병식 등(1996)은 EPS재료에 대한 삼축(UU) 시험 결과에 의하면 그림 2에 파괴포락선의 기울기가 마이너스인 매우 특이한 특성을 나타내며, 이는 EPS가 최대 축하중에 따른 축압의 영향이 일반 흙에 비하여 작은 재료로 작은 측방 구속응력 하에서도 큰 압축강도를 기대할 수 있으므로 측방토압 경감효과가 양호하다고 하였다.

### 2.2 하중 저감효과

도로성토 하중저감공법중의 하나인 EPS공법은 초경량재로서 연약지반상에 성토재로 사용하여 지반의 유효응력 증가를 최소화함으로써 지지력과 침하에 대한 안정성을 쉽게 확보할 수 있고, 옹벽·교대 등의 구조물 뒷

표 1. 연약지반 대책공법의 적용

적용구간	성토고 (m)	연약 층후 (m)	Sand Mat (cm)	드레인간격	PET Mat (15tf/m)	단계 성토고 (m)	순압밀기간 (개월)
STA. 0+708 ~ 0+850	11.2 ~ 13.0	12.0 ~ 13.0	70	중앙부 SD : 2.0×2.0 사면부 SCP : 2.0×2.0	3	5.0	5
						4.0	5
						3.0	4
						1.0	4

채움재로 활용할 경우 하중저감 효과를 기대할 수 있다.

NRRL(1994), Yuichi et al.(1996) 등은 EPS 블록의 압축성을 이용한 매설관저의 하중저감 기법에 관한 연구를 발표하였으며, 이와 같은 EPS 블록을 이용한 고성토에 따른 하중저감기법은 하중저감에 따른 구조물의 안정성 증대, 시공성 등 많은 장점을 갖고 있다.

한편, 김진만 등(2004)은 박스암거 상단에 흙성토와 EPS 성토를 수행한 후 측정한 결과에 의하면, 암거 중앙부에서는 흙성토 구간에 대한 EPS 성토구간의 수직토압 저감효과는 약 45% 정도로서 암거 선단부의 수직토압은 중앙부에 비해 작은 것으로 평가하였으며, 장용채(1998)는 교대배면으로부터 연약층 깊이만큼 떨어진 지점의 침하 검토결과, 흙성토 구간이 EPS성토에 비해 약 10배 정도로 큰 침하를 보이는 것으로 EPS 블록을 이용해 현저한 하중경감 효과를 확인하였다.

### 3. EPS 적용현장 현황

#### 3.1 현장현황 및 지반특성

본 연구목적에 달성하기 위한 연구대상은 ○○고속도로의 ○○교 교대 배면지반으로서 퇴적층, 풍화토층, 풍화암의 지층분포를 보이고 있으며, 퇴적점토층은 약 12.0m의 두께로 N치 2~5의 연약한 연경도를 보이는 연약지반으로 나타난다.

본 연구대상 구간의 연약층(퇴적토층)은 자연함수비( $w_n$ )가 19.9~52.1%, 액성한계( $w_L$ ) 28.9~65.7%, 소성지수( $I_p$ ) 4.2~37.2% 정도로 나타나며, 연경지수 분포상황으로 미루어 볼 때, 심도 6.0m까지는 불안정한 상태이며, 6.0m이하의 심도에서는 중간 내지 안정한 상태를 보인다.

역학적 특성으로 일축압축강도( $q_u$ )는 0.16~0.94 kgf/cm<sup>2</sup>, 예민비는 1.2~15.9의 범위를 보이며, 삼축압축시험(UU)결과 비배수전단강도는 0.19~1.36 kgf/cm<sup>2</sup>, 전단저항각은 0°를 나타내었다. 또한, 압밀시험결과, 초기간극비( $e_0$ )는 0.936

표 2. 시공순서 및 일자

시공일자	공종
1999.07 ~ 11	연직배수재 타설
1999.11 ~ 2002.02	재하성토 및 방치
2002.03	재하성토 제거
2002.04 ~ 06	구조물/EPS시공
2002.07 ~	도로포장
2002.12	도로개통

~1.491, 선형압밀하중(P)은 0.68~2.10kgf/cm<sup>2</sup>, 압축지수(C)는 0.19~0.56의 범위로 나타난다.

#### 3.2 연약지반 처리대책 및 EPS 적용현황

본 연구대상은 교대 배면구간으로 도로계획에 따른 계획고를 포함한 최종성토고는 12.0m로써, 연약전성토층이 12.0m이상임을 고려할 때 발생침하량은 129.9cm로 나타나며, 연약지반 무처리시, 소요압밀도에 도달하기 위한 개량기간은 약 12년 정도로서 공기 충족을 위한 연약지반 압밀축진대책 및 사면부 측방유동 대책 필요에 따라 표 1과 같이 중앙부는 배수에 효과적인 SD(Sand Drain)공법, 사면부는 측방유동에 효과적인 SCP(Sand Compaction Pile)공법을 차등 적용하였다. 시공순서 및 시공일자는 표 2와 같다.

EPS를 연약지반위에 성토할 경우, EPS 및 부대공의 자중과 도로포장 두께의 자중, 교통하중 등 상재하중에 의하여 과도한 잔류침하가 발생할 가능성이 있으며, 연약지반상에 교대를 시공할 경우, 교대배면 성토하중으로 인하여 측방유동이 발생할 가능성이 큰 것으로 나타났다. 따라서, 이에 대한 대책방안으로 주변현황, 경제성 및 시공성 등을 종합하여 EPS공법을 적용하였다.

일반적으로 EPS 시공에 있어서, 상재하중에 대응하는 심도로 굴착한 다음 EPS를 시공하는 방안을 적용하고 있으나, 본 구간의 경우는 상재하중에 대응하는 하중을 사전 재하하여 초기에 압밀침하를 유도한 다음 EPS

를 시공하는 개념을 적용하였으며, EPS 적용구간에 대한 단면을 나타내면 그림 3 및 그림 4와 같다.

#### 4. 현장조사 및 시험결과 분석

##### 4.1 조사개요

본 연구구간은 교대배면의 뒷채움으로 성토를 수행한 A1교대부와 EPS 뒷채움을 수행한 A2교대부로 구분되며, 조사위치는 그림 5와 같이 성토부 외측의 원지반 특성을 파악하기 위한 조사 2공(BH-4, BH-8) 및 성토높이에 따른 지반거동특성 파악을 위한 성토법면부 조사 6공을 수행하였으며, 원지반과 성토구간 및 EPS구간에 대한 Piezocone시험을 수행하였다.

##### 4.2 시험결과 분석

###### 4.2.1 표준관입시험 결과

EPS 적용지반의 상대밀도를 파악하고자 시추작업과 병행하여 실시한 표준관입시험 결과, 시공전 지반의 N값과 급회조사(시공후 5년정도 경과)의 N값을 비교한 결과는 그림 7 및 그림 8과 같이 원지반에 비해 다소

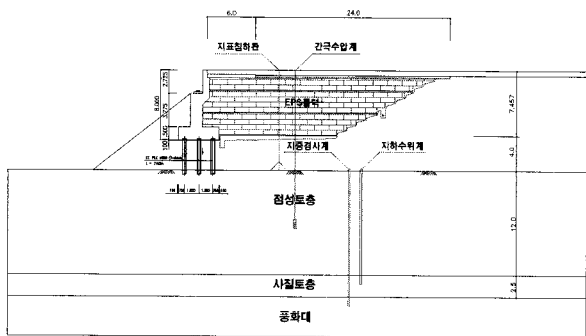


그림 3. EPS 뒷채움구간 종단면도

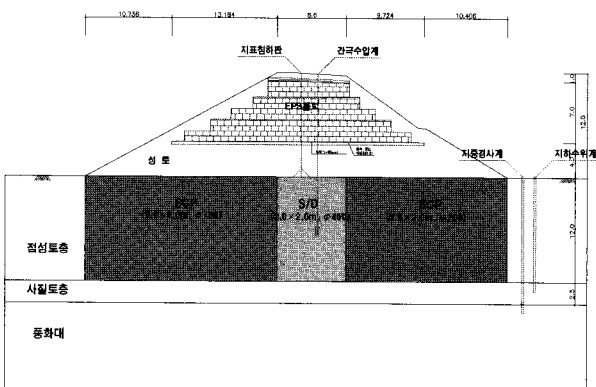


그림 4. EPS 뒷채움구간 횡단면도

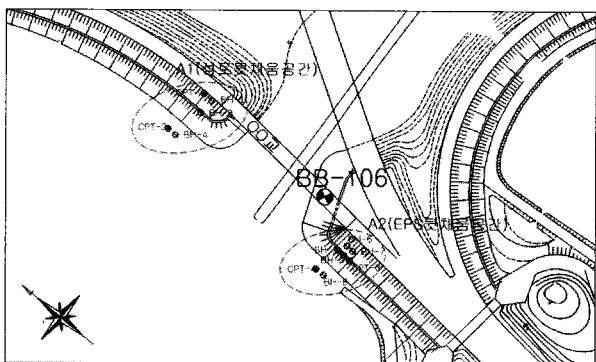


그림 5. 조사위치 평면도

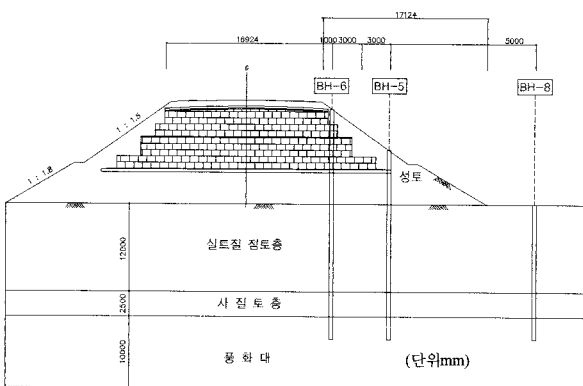


그림 6. 조사위치 단면도

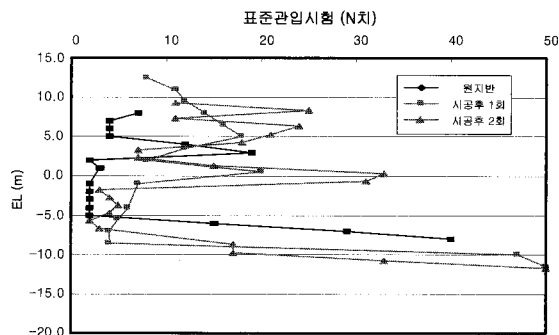


그림 7. 성토 뒷채움 구간

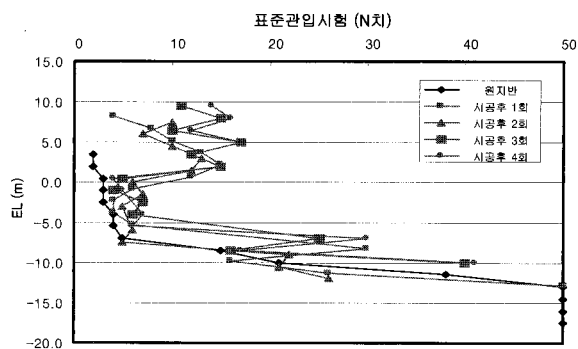


그림 8. EPS 뒷채움 구간

증가된 경향을 보이고 있으며, EPS 뒷채움 구간의 증가 경향이 성토 뒷채움 구간에 비해 작은 것으로 나타났다.

#### 4.2.2 콘관입시험 결과

본 지역에 분포되어 있는 상부 연약지반의 전단강도는 심도에 따른 변화폭이 심하여 뚜렷한 경향은 없으며, 시공전 1.9~7.3  $\text{tf/m}^2$ 의 범위로서 설계시에는 심도 6.0m까지는 2.0  $\text{tf/m}^2$ 을 심도 6.0m이하는 2.5  $\text{tf/m}^2$ 을 적용하였으나, 금회 조사결과, EPS 적용구간은 평균 3.6~4.4  $\text{tf/m}^2$ 정도로 나타나 시공전과 비교하여 전단강도가 약 44~76%(평균 60%) 증가한 것으로 나타났다.

#### 4.2.3 물리적 특성시험 결과

불교란 시료에 대한 물리적 특성시험 결과, 표 3과 같이 조사지점과 인접한 시공전 시추공의 원지반 물리적 특성과 비교하여 함수비는 45.2%에서 39.7%로 낮아졌으며, 액성한계는 60.9%에서 37.5%로, 소성지수는 33.7%에서 12.1%로 낮아진 것으로 나타나 지반개량 특성을 보이는 것으로 나타났다.

#### 4.3 EPS 크리프 특성 분석

EPS가 정적하중을 받는 경우 탄성적 변형이외에 재하시간에 의존하는 크리프 특성은 EPS의 허용응력과 더불어 중요한 특성 중의 하나이다. 이들의 특성을 알아보기 위해 본 연구에서는 표준압밀 시험기를 이용하여 압밀링을 제거한 후 시료를 50×50×50mm의 시편으로 제작하여 응력증가분 4.10 $\text{tf/m}^2$ (5%변형 시 강도의 약 47%)이 가해진 상태에서 시간경과에 따른 변형량을 측정하였다. 또한 초기조건의 EPS를 5%변형시 압축응력의 50%에 해당하는 응력을 가하여 시간경과에 따른 변형량을 측정하였으며, EPS에 대한 크리프 시험 결과는 그림 9와 같다.

공장제품은 채취시료에 비하여 변형률이 1.16배정도 크게 나타났으며, 이는 채취시료의 경우 성토 및 차량 하중에 의해 압축되어 공장 제품 EPS보다 변형이 작게 일어나는 것으로 판단되며, 채취시료의 경우 10일 이후

에 변형이 일정한 값에 수렴하는 경향을 나타냈고, EPS 재료의 장기 변형 특성은 시간에 따라 큰 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

#### 4.4 EPS 흡수특성 분석

본 연구에서 EPS 채취시료와 공장제품에 대해 각각 50×50×50mm의 시료를 제작하여 24시간 수침 후 흡수성을 측정된 결과는 그림 10과 같다.

EPS의 흡수성은 지하수에 노출시간이 지속됨에 따라 흡수율이 초기에 증가하는 것을 확인하였으며, 채취시료의 경우 수침일 32일까지 4.50%의 흡수율을 나타냈고, 공장제품의 경우 32일까지 4.65%의 흡수율을 나타냈다. 공장제품 EPS의 경우 시공이력이 있는 EPS보다 흡수율이 다소 큰 것으로 나타났다. 이는 시료 채취 후 구속압에 의해 EPS 비드 입자는 압축되어 간극의 감소로 인하여 흡수율이 다소 감소한 것으로 판단되며, 수침일이 지속됨에 따라 흡수율 변화는 거의 없는 것으로 판단된다.

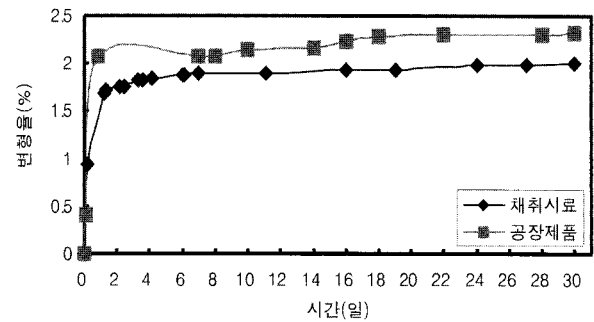


그림 9. EPS의 크리프 특성

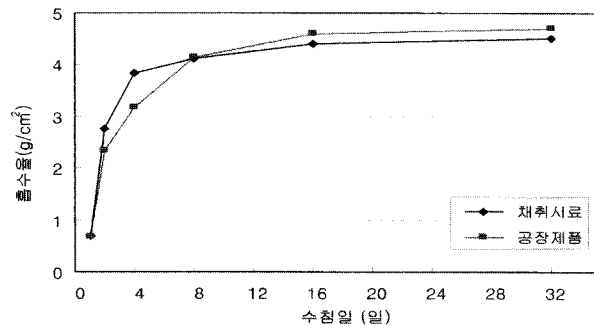


그림 10. 흡수성 시험결과

표 3. 물리적 특성 변화

구분	Boring No.	Depth(m)	N	w <sub>n</sub> (%)	G <sub>s</sub>	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>P</sub> (%)	I <sub>P</sub> (%)	USCS
시공전(원지반)	BB-106	8.5	5	45.2	2.58	60.9	27.2	33.7	CH
시공후 금회	BH-8	9.0	9	39.7	2.71	37.5	25.4	12.1	CL

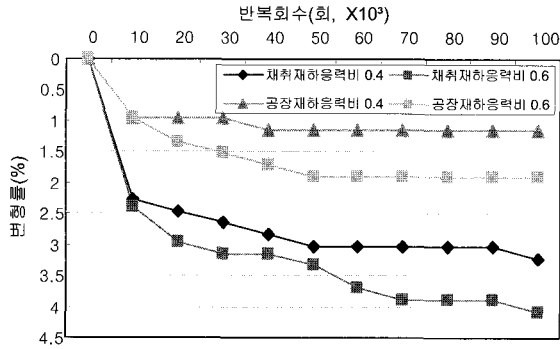


그림 11. 반복회수와 압축변형의 관계

#### 4.5 EPS 반복재하특성 분석

채취시료와 공장제품 EPS에 대하여 100,000회의 일축반복재하시험을 실시한 경우의 변형 특성을 시험하였다. 시험에 사용한 시편의 크기는 50×50×50mm(±3mm)의 정육면체로 단위체적중량 0.021tf/m<sup>3</sup>의 EPS를 사용하였다. 일축압축강도에 대한 동적 재하율비는 0.4, 0.6으로 하여 2Hz의 주파수로 시험하였으며, 그림 11은 반복회수에 대한 변형량을 측정한 결과이다.

공장제품의 경우 재하율비 0.4일때 1%, 0.6일때 2%의 변형율을 나타냈으며, 채취시료의 경우 최대 4%까지 변형률이 나타났다. 응력비가 0.4인 경우 10,000회 이후로 큰 변형이 발생하지 않았으며, 0.6인 경우 50,000회 이후로 변형이 발생하지 않았다.

변형은 일정한 회수 이후로 변형 발생 경향이 현저하게 낮아지는 것으로 시공초기의 변형 발생 후 이후 발생하는 변형이 거의 없을 것으로 판단된다. 또한 재하율비가 0.4 이내로 시공할 경우 변형이 현저히 낮은 것으로 판단된다.

### 5. EPS 적용지반 거동특성 분석

#### 5.1 개요

본 장에서는 EPS가 적용된 지반의 장기 거동특성을 파악하기 위하여 현장 및 실내시험을 통한 시공전 원지반과 시공후 지반특성 변화를 검토하였으며, 현장 계측자료 분석을 바탕으로 실제 지반거동을 반영한 유한요소 해석을 통하여 EPS 적용지반의 거동특성을 파악하였다.

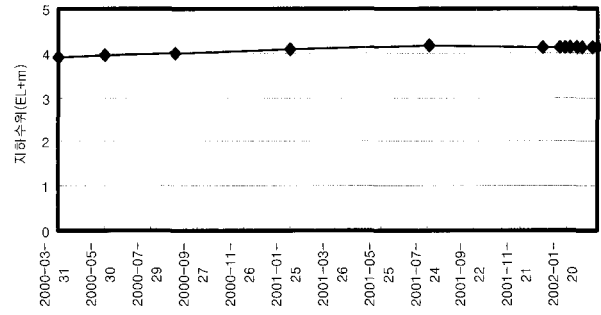


그림 12. 지하수위 계측결과

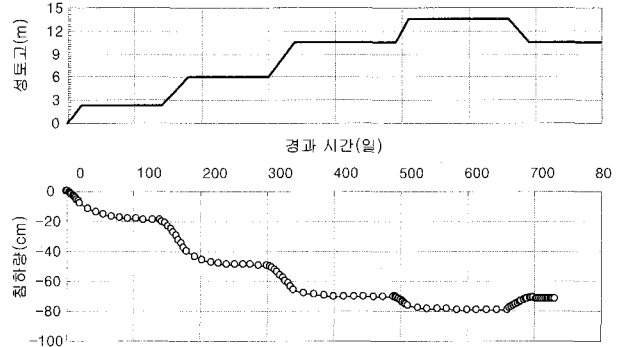


그림 13. 지표침하판 계측결과

#### 5.2 계측자료 분석

##### 5.2.1 지하수위 계측 분석

연구구간의 지하수위는 GL(-)0.6~0.9m (EL(+))3.9~4.1m)의 심도에 분포하며, 지하수위 변화양상은 연직배수공법으로 적용된 Sand Drain 및 SCP에 의해 성토하중 재하에 따른 과잉간극수압 소산이 빠르게 진행됨에 따라 지하수위의 변화는 크지 않은 것으로 나타난다.

##### 5.2.2 지표침하판 계측 분석

현장 재하성토 과정 중 지표침하판 측정결과는 그림 13과 같다. 분석결과, 4단계 재하성토에 따른 최종침하량은 79.1cm로 나타났으며, 이론식에 의한 설계침하량 124.7cm보다 작게 평가된다. 또한 하중 제거 시에 따른 침하량은 71cm로 분석되어 최종침하량 79.1cm에 비해 약 8.1cm 회복되는 것으로 분석되었다. 이러한 침하발생 경향을 바탕으로 지반거동 특성 파악을 위한 유한요소 해석시 현장 침하발생 상황에 유사성을 갖도록 설계 적용 물성치를 조정하여 반영하였다.

##### 5.2.3 간극수압계 계측 분석

현장 시공 과정 중 간극수압계 측정결과는 그림 14와 같다. 분석결과, 간극수압은 재하성토 단계에 따른 과잉

간극수압의 발생으로 상승한 후 빠르게 소산되는 되는 경향을 보였으며, 이러한 원인은 대상구간에 연약지반 개량공법으로 타설된 Sand Drain 및 SCP에 의한 것으로 판단된다.

### 5.2.4 지중경사계 계측 분석

교대 뒷채움 시공에 따른 배면지반의 공용후 지중경사계에 의한 수평변위 계측결과는 그림 15에 나타난 바와 같이 성토뒷채움 구간에서는 최대 22.5mm로 나타났으며, EPS 뒷채움 구간은 최대 12.6mm로서 EPS 적용구간의 수평변위가 작은 것으로 나타난다.

## 5.3 유한요소 해석

### 5.3.1 적용 프로그램

본 연구에서는 연약지반 거동특성을 파악하기 위해 수치해석 프로그램인 SAGE CRISP 5.2를 사용하였다. 본 프로그램은 유한요소해석 프로그램으로서 대변형시의 압밀해석에 합리적이고 자중압밀을 고려할 수 있으며, 간극비 변화에 따라 유효응력 및 투수계수의 비선형

적 거동을 통한 압밀거동을 예측할 수 있다. 특히, 현장의 시공상황을 적극적으로 해석에 반영할 수 있어 시공단계별 지반의 응력분력분포를 정확히 파악할 수 있는 장점이 있다.

### 5.3.2 검토단면 및 단계별 시공 상황

본 연구대상 구간은 표 4와 같이 연직배수재 설치, 재하성토 및 제거, 교대구조물 설치 및 EPS시공, 포장의 단계로 시공되었으며, 검토단면은 그림 4에 나타난 바와 같다.

### 5.3.3 지반요소별 구성모델 및 적용 물성치

본 연구대상 구간의 유한요소 해석시 적용한 지반 물성치는 표 5에 나타난 바와 같다.

한편, 하부 점성토 지반은 Modify Cam-Clay모델을 적용하였으며, 연직배수공법(SD, SCP)에 의한 지반개량 완료후 말뚝기초 시공 및 구조물, EPS를 시공하는 단계를 모델링 하였다.

표 4. 연구대상 구간 단계별 시공상황

구분	시공상황		
1. SD, SCP타설	점성토층(12m)까지 설치(Ø700mm, 2m×2m)		
2. 재하성토 (Preloading) 단계별 시공	1단계	성토고	3.0m
		방치기간	4개월
	2단계	성토고	3.0m
		방치기간	4개월
	3단계	성토고	3.0m
		방치기간	5개월
	4단계	성토고	3.0m
		방치기간	5개월
3. 교대구조물 설치 및 EPS 뒷채움 시공			
4. 도로포장 및 공용(교통)하중 재하			

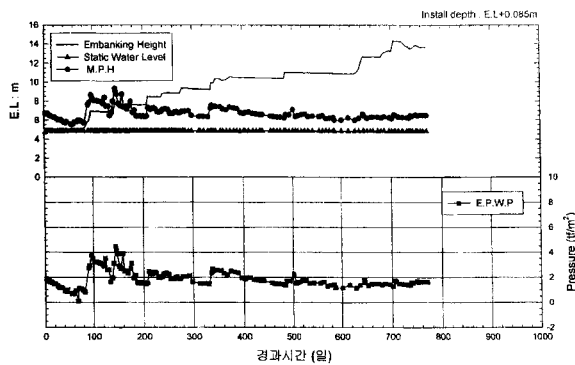
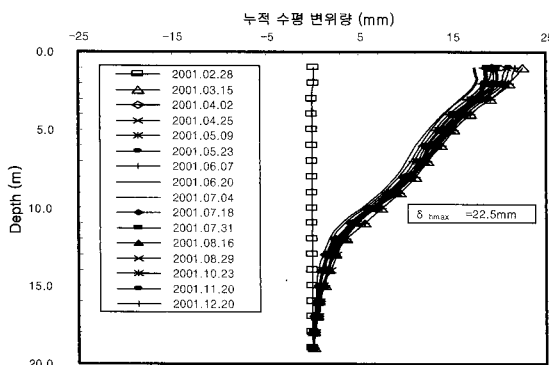
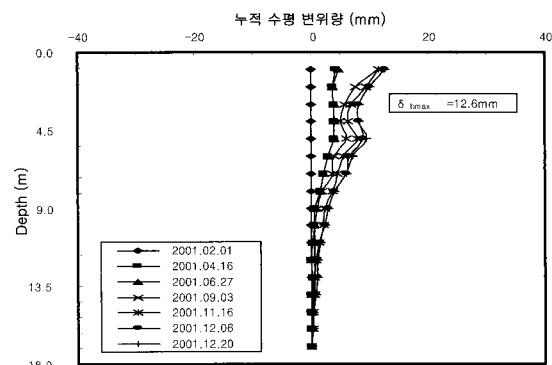


그림 14. 간극수압계 측정결과



(a) 성토뒷채움 구간 수평변위



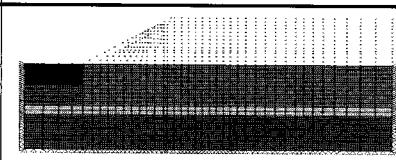
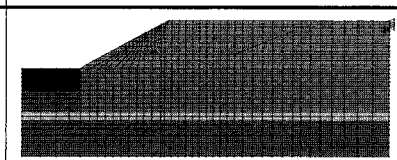
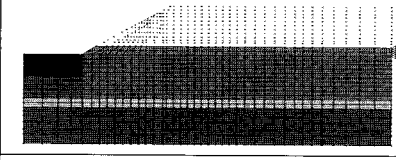
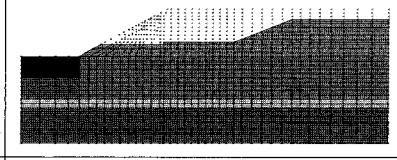
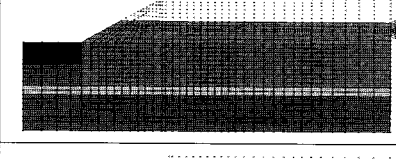
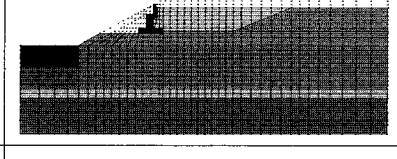

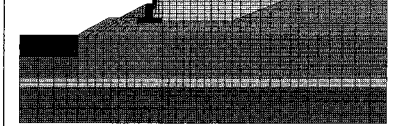
(b) EPS 구간 수평변위

그림 15. 뒷채움 시공후 수평변위 계측결과

표 5. 지반요소별 구성모델 및 적용물성치

구분	구성모델	적용 높이 (m)	단위 중량 (kN/m <sup>3</sup> )	점착력 (kPa)	압축 지수 (C <sub>c</sub> )	전단탄 성계수	탄성 계수 (kPa)	포아 송비 (ν)	마찰각 (°)	재압축 지수 (C <sub>s</sub> )	간극비 (e <sub>0</sub> )	수직투수 계수 (k <sub>v</sub> , m/s)	수평투수 계수 (k <sub>h</sub> , m/s)
점성토	Modify Cam-Clay	0~6	18.0	20	0.3	-	-	-	-	0.03	1.12	2.0×10 <sup>-9</sup>	4.0×10 <sup>-9</sup>
		6~12	18.0	25	0.3	-	-	-	-	0.03	1.12	2.0×10 <sup>-9</sup>	4.0×10 <sup>-9</sup>
사질토	Mohr-Coulomb	2.5	18.0	5.0	-	-	50,000	0.3	28	-	-	-	-
EPS	Non-Linear	7.0	0.2	-	-	2,280	5,000	0.12	체적탄성계수 : 2,240 kPa				
성토재	Linear Elastic	11.5	20.0	-	-	-	20,000	0.3	-	-	-	-	-
교대	Isotropic Elastic	8.0	24.0	-	-	-	1×10 <sup>7</sup>	0.2	-	-	-	-	-
강말뚝	Beam Element	24.0	-	-	-	-	2×10 <sup>8</sup>	0.2	강관단면적 : 0.0156 m <sup>2</sup> 단면2차모멘트 : 4.85×10 <sup>-4</sup> m <sup>4</sup>				

표 6. 시공단계별 모델링

공정	FEM 모델링	공정	FEM 모델링
1. 원지반, 연직배수재 설치		5. 4단계 성토 및 압밀방치	
2. 1단계 성토 및 압밀방치		6. 여성제거 및 구조물터파기	
3. 2단계 성토 및 압밀방치		7. 구조물 및 EPS 시공	
4. 3단계 성토 및 압밀방치		8. 도로시공 및 옹하중재하	

한편, EPS 재료의 거동을 묘사하기 위한 수치해석 모델은 국외에서는 South Dakota(1992)에서의 연구가 유일하며, 국내에서는 천병식 등(1996)이 EPS의 응력-변형률 특성 묘사 함수식에 포함된 계수의 산정을 개선한 비선형 모델을 제안한 바, 본 연구에서는 비선형 모델을 적용하였다.

### 5.3.4 해석조건 및 시공단계별 모델링

하중은 교대의 수평변위를 방지하기 위해 교대의 뒷채움 일정구간을 EPS로 재하하고, 나머지 구간은 일반토사로 재하 하였으며, 하중 재하단계는 실제 성토속도와 같도록 하였다.

또한, 지반의 경계면 조건은 하단은 수직, 수평방향으로 고정시키고 양 측면은 수평방향만 고정시켰으며, 배수조건은 원지반 상부와 모래층에서 배수가 이루어져 양면배수조건으로 하였고, 해석조건은 평면 변형률 조건으로 실시하였다. 한편, 시공단계별 모델링은 표 6에 나타내었다.

### 5.4 EPS 적용지반 거동특성

#### 5.4.1 침하특성

본 연구의 도로 계획고는 10.0m, 여성고는 2.0m, 최종성토고는 12.0m로 4단계 성토시 최종성토고인 12m까



지 성토 후 압밀 방지하였으며, 교대구조물 시공을 위해 7.4m 터파기 후 EPS블록과 일반토사로 뒷채움을 실시하였다. 뒷채움으로 인해 발생하는 교대배면지반 침하량을 검토한 결과, 지반개량 완료 후 뒷채움 적용으로 침하발생은 작게 나타났다. 그러나 뒷채움 재료의 차이로 인한 침하발생 정도는 그림 17에서와 같이 EPS 뒷채움 구간이 4배 정도 작은 것으로 나타나 EPS블록에 의해 상대하중을 경감시킴으로서 제체침하를 현저히 감소시킬 수 있는 것으로 판단된다. 한편, 장용채(1998)는 지반개량을 실시하지 않은 지반의 경우 성토 뒷채움 구간이 EPS 뒷채움 구간에 비해 약 10배 정도 큰 침하를 보인다고 하였다. 이런 침하량 차이는, 점성토지반의 연약정도에 따라 크게 차이가 나타나는 것으로 판단된다.

#### 5.4.2 수평거동 특성

수평거동 특성 검토결과, 수평변위가 가장 크게 발생한 지점(성토 선단부)에서의 시공단계에 따른 수평변위를 살펴보면 그림 18과 같이 지반개량 완료시점까지 최대 수평변위량은 34.5cm이고, 도로공용 이후 현재까지의 수평변위는 지표에서 최대 0.17cm 발생하여 심도에 따라 점차 감소하는 경향으로서 수평변위는 거의 발생하지 않는 것으로 나타났다.

또한, 교대 뒷채움 재료에 따른 배면지반의 수평거동

특성을 검토한 결과는 그림 19 및 그림 20과 같이 지반개량 완료단계의 경우, 성토 뒷채움 구간은 26.4cm, EPS 뒷채움 구간은 18.5cm로 나타나며, 공용후 현재까지의 경우, 성토 뒷채움 구간은 0.78cm, EPS 뒷채움 구간은 0.16cm로서 변위발생 정도는 작으나, 수평변위는 성토 뒷채움 구간에 비해 EPS 뒷채움 구간이 작은 것으로 나타났다.

한편, 본 연구구간에 대한 성토단계별 수직변위 및 수평변위의 상관성을 살펴본 결과, 다음 그림 21에 나타난 바와 같이 성토과정중 수직변위-수평변위의 관계식은  $\delta_h = 0.38\delta_v - 90.5$ 로 나타났으며, 공용후 성토뒷채움 구간은  $\delta_h = 0.36\delta_v - 78.1$ , EPS 뒷채움 구간은  $\delta_h = 0.38\delta_v - 39.6$ 의 경향을 보이는 것으로 나타나 Tavenas(1980)이 제시한 관계식과 유사한 거동을 보이고 있다.

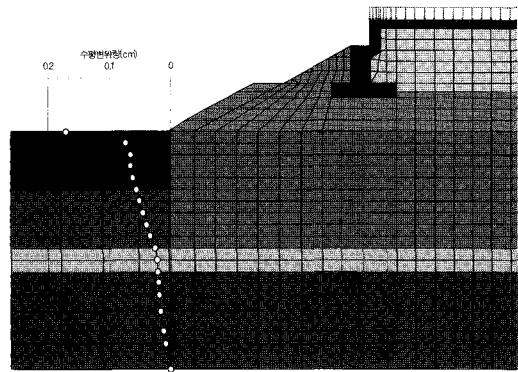


그림 18. 성토선단부 수평변위

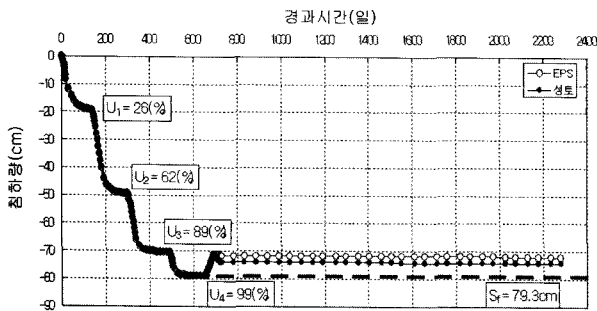


그림 16. 전체공정을 고려한 침하발생 경향

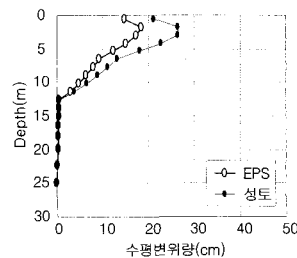


그림 19. 지반개량 완료단계

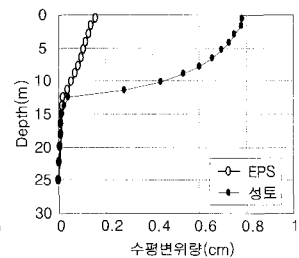


그림 20. 공용후 현재단계

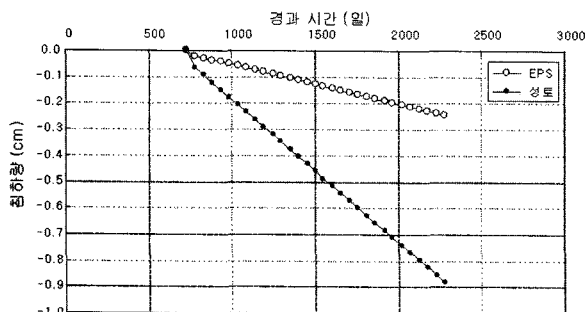


그림 17. 공용하중 재하후 침하발생 경향

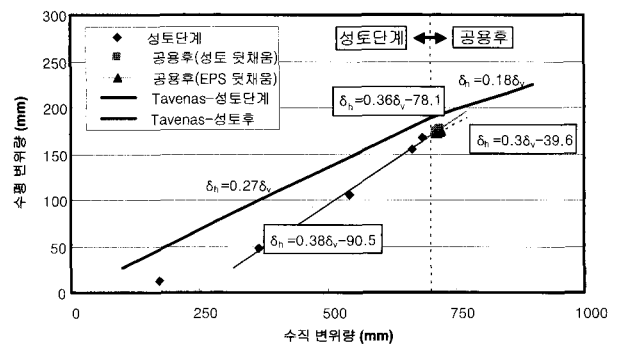


그림 21. 지반개량 완료단계 수평변위

상기와 같이 성토하중에 의하여 발생하는 연직변위 및 측방변위는 공용후 보다는 성토가 진행되는 기간중에 더 크게 발생함을 알 수 있으며, 성토후 성토 뒷채움 구간의 경우보다 EPS 뒷채움 구간의 기울기가 작은 것으로 나타나 측방변위 방지대책으로 효과적인 것으로 사료된다.

### 5.4.3 교대배면에 작용하는 토압

교대 배면지반에 작용하는 응력상태를 검토한 결과는 그림 22 및 그림 23과 같다.

교대배면의 수평토압 발생을 검토한 결과, 성토 뒷채움 구간의 경우, 뒷채움 표면에서 18.5kPa의 수평응력이 발생하여 심도에 따라 증가하여 뒷채움 구간 하부에서 33.7kPa의 응력을 보이는 것으로 나타났으며, EPS 뒷채움 구간은 EPS 상부면에서 2.3kPa의 수평응력이 발생 후 심도증가에 따라 감소하여 하부면에서는 1.5kPa로 감소된 것으로 나타났다. 따라서, 수평토압의 경우, EPS 뒷채움 구간은 심도에 따라 수평응력이 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타나며, 성토 뒷채움 구간은 심도에 따라 수평응력이 증가하는 것으로 나타나 교대 배면을 EPS재료로 뒷채움 할 경우, 교대에 작용하는 수평응력을 크게 경감시킬 수 있을 것이다.

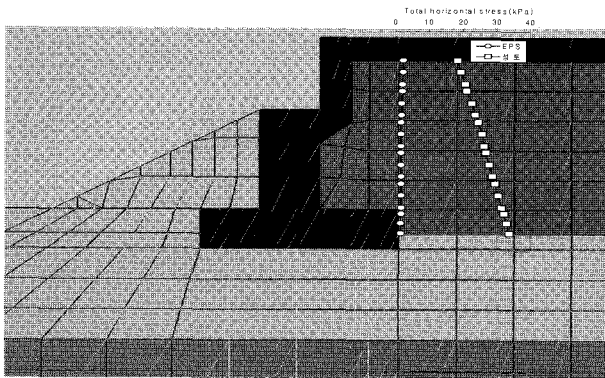


그림 22. 교대배면 수평토압 발생

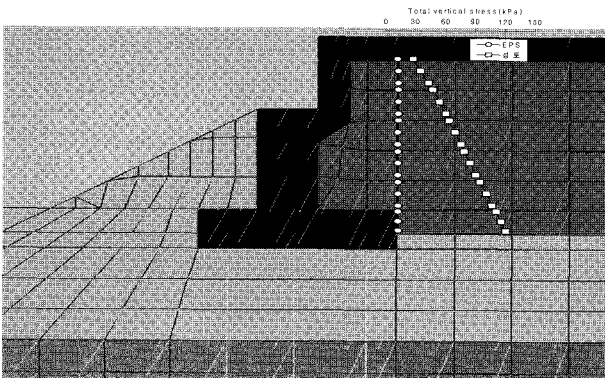


그림 23. 교대배면 연직응력 작용

또한, 교대배면의 연직응력을 검토한 결과, 성토 뒷채움 구간은 26.9kPa의 연직응력이 발생하여 심도에 따라 증가하여 121.2kPa까지 비례적으로 증가하였으며, EPS 뒷채움 구간은 EPS 상부면에서 11.9kPa의 연직응력이 발생하여 하부면에서는 12.6kPa의 응력을 보이는 것으로 나타났다.

따라서, 성토 뒷채움 구간에 비하여 EPS 뒷채움 구간의 연직응력이 크게 감소되는 특성을 보인다.

상기 검토에서와 같이 수평토압의 경우, EPS 뒷채움 구간은 심도에 따라 수평응력이 감소하며, 성토 뒷채움 구간은 심도에 따라 수평응력이 증가하는 것으로 나타나 교대 배면을 EPS재료로 뒷채움할 경우, 교대에 작용하는 수평응력을 크게 경감시킬 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 교대배면의 연직응력의 경우, 성토 뒷채움 지반에 비하여 EPS 뒷채움 지반의 연직응력이 크게 감소되는 것으로 나타나 우수한 상재하중 저감 효과를 보이는 것으로 판단된다.

### 5.4.4 EPS 적용지반에 따른 지반거동 특성

교대 배면지반 뒷채움으로 EPS 적용시 사면부 적용위치에 따라 사면부 선단, 사면부 중앙, 사면부 정상으로 구분하여 검토한 결과는 그림 24 및 25, 26에 나타내었다.

EPS 적용위치에 따른 지반거동 특성 검토결과, A지점의 경우, 수직변위 6.8mm, 수평변위는 12.0mm, B지점의 경우 수직변위 14.4mm, 수평변위는 10.4mm, C지점의 경우는 수직변위 21.7mm, 수평변위는 5.5mm로 나타났으며, 수직변위는 측방유동 발생 경향과 유사하게 제체 중앙에서 바깥쪽으로 감소하며, 수평변위는 제체 중앙에서 바깥쪽으로 증가하는 경향으로 나타나, EPS 적용높이가 높을수록 수직변위는 크나 수평변위는 작은 특성을 보인다.

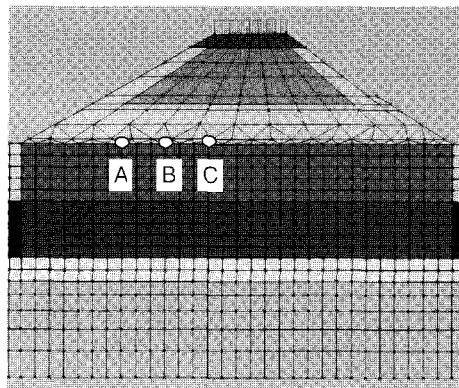


그림 24. EPS적용위치별 거동해석

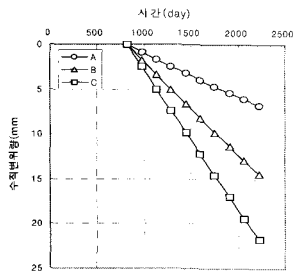


그림 25. 수직변위

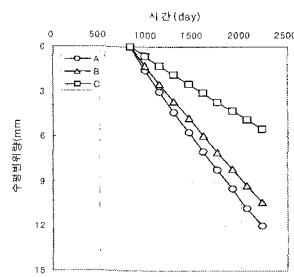


그림 26. 수평변위

## 6. 결론

EPS가 적용된 교대배면 뒷채움 지반의 장기 거동특성을 파악하기 위하여 EPS 채취시료와 공장제품에 대한 내구성 및 크리프 특성을 비교하였으며, 각종 조사·시험 결과 및 시공시 측정된 지반거동 계측자료를 고려한 유한요소해석 수행결과를 바탕으로 교대구조물에서 성토뒷채움 경우와 EPS뒷채움 경우를 비교하여 EPS 적용후 현재까지(약 5년경과)의 장기 지반거동 특성을 검토한 결과는 다음과 같다.

- (1) EPS 채취시료와 공장제품에 대한 흡수성, 크리프 및 반복재하특성을 비교 분석한 결과, 재료의 장기 변형특성은 시간에 따라 큰 영향을 받지 않으며, 구속 압에 의해 EPS 비드 입자는 압축되어 흡수율이 감소되고, 반복재하 시험에서 변형은 일정한 회수 이후에 그 경향이 현저하게 낮아지는 것으로 나타나 시공초기의 변형 발생 후 발생하는 변형이 거의 없을 것으로 판단된다.
- (2) EPS 뒷채움 구간은 성토 뒷채움 구간에 비해 작은 침하량을 보이고 있고 EPS블록에 의해 상재하중을 경감시킴으로서 재채침하를 현저히 감소시킬 수 있는 것으로 보인다.
- (3) 교대 뒷채움 재료에 따른 배면지반의 수평거동 특성을 검토한 결과, 지반개량 완료단계 및 공용후 현재까지 수평변위는 성토 뒷채움에 비해 EPS 뒷채움 구간이 작은 것으로 밝혀졌다.
- (4) 교대배면의 수평응력 검토결과, EPS 뒷채움 구간은 심도에 따라 감소하는 경향을 보이며, 성토 뒷채움 구간은 증가 경향을 보이는 바, EPS에 의해 수평응력을 크

게 경감시킬 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 연직응력 검토결과, 성토 뒷채움 지반에 비하여 EPS 뒷채움 지반의 연직응력이 크게 감소됨을 확인할 수 있었다.

- (5) EPS적용 위치에 따른 지반 거동특성 검토결과, EPS 적용위치가 높을수록 수직변위는 다소 크나 수평변위는 오히려 작은 특성을 보이는 것을 알 수 있었다.

## 참고 문헌

1. ○○고속도로주식회사 (2002), “○○고속도로 연약지반 계측관리 분석보고서”, pp.1~67.
2. 김진만, 조삼덕, 최봉혁, 오세용 (2004), “EPS의 압축성을 이용한 토압저감효과에 관한 연구”, *한국지반공학회* 논문, pp.101~108
3. 장용채 (1998), “EPS블럭의 현장적용에 따른 하부지반의 거동 연구”, *한국지반공학회지*, 제14권, 1호, pp.15~27.
4. 천병식, 장명순, 임해식 (1996), “도로성토하중 경감재 EPS의 공학적 특성에 관한 연구”, *한국지반공학회지*, pp.59~69.
5. 한국건설기술연구원 (1995), “EPS 토목공법 국제학술세미나 논문집”, pp.1~363.
6. Cho, Yeongki (1992), “Behavior of Retaining Wall with EPS Blocks as Backfill”, Thesis of Master Course, University of South Dakota, pp.1~29.
7. Horvath J. S. (1996), “The Compressible-Inclusion Function of EPS Geofoam : An Overview”, *Int. Symp. on EPS Construction Method*, pp.72~81.
8. Ingold, T. S. (1979), “Retaining Wall Performance during Back-Filling”, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Volume 105, Issue 5, pp.613~626.
9. Murphy, G. (1997), “The Influence of geofoam creep on the performance of a compressible inclusion.” *Geotextiles and Geomembranes*. Vol. 15, pp.121~131.
10. NRRL (1987), “Case History 1 : Flom (the first EPS road)”, *Plastic Foam in Road Embankments*, Meddelelse nr 61, NRRL, pp.34~35.
11. NRRL (1994), “Rigid Culverts Beneath High Fills, Long Term Behavior”, Publication No.74, NRRL, pp.70.
12. S. Bang, T. Preber, Y. Cho (1992), “Evaluation of Expanded Polystyrene Blocks as Bridge Backfill by Finite Element Method of Analysis”, *South Dakota School of Mines & Technology Rapid City, South Dakota*.
13. Tavenas, F. & Leroueil, S. (1980), “The behaviour of embankments on clay foundations”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.17, pp.236-260.
14. Yuichi, Ooe, Yasuaki, Matsuda, Shuichi, Tada, Junichi, Nishikawa (1996), “Earth Pressure Reduction for Culverts Using EPS”, *proc. international symposium on EPS construction Method (EPS TOKYO '96)*, TOKYO, pp.214~221.

(접수일자 2007. 6. 11, 심사완료일 2007. 10. 25)