EPS블럭의 현장적용에 따른 하부지반의 거동 연구

A Case of Field Application of EPS Blocks and Its Performance

장 용 채*
Chang, Yong-Chai

Abstract

The use of EPS application to construction field was introduced in this country very recently. Nevertheless, approximately a total of 210,000m^3 of EPS application was conducted in less than four years. Main application areas for the EPS method are: (1)backfill behind a bridge abutment constructed on soft clay soil, (2)embankment constructed on soft clay soil, and (3)backfill of gravity wall. Among these, about 70% of EPS are used for (1) and (2) described above. In this study, an invesitgation was held for the application of the EPS method to backfill of a bridge abutment which was constructed on soft clay soil. Several instruments were installed around the construction site to invesitgate the bahavior of the system. Then, a Finite Element Analysis was conducted for comparison.

요 지

우리나라에 EPS성토공법의 도입은 1993년 서해안 고속도로현장에서 시작된 이후 비록 초창기이지만, 지형적인 특성 때문에 짧은 기간동안에 약 21만m^{3}의 EPS블럭을 시공하였다. 국내에 사용된 EPS성토공법의 주 적용분야는 연약지반상의 교량교대 뒷채움 및 성토체분야로 EPS블럭 전체 사용량의 약 70%정도를 차지하고 있으며, 나머지는 옹벽 등에 사용되었다. 본 연구에서는 주 적용분야인 교량교대 뒷채움 부분에 EPS블럭을 적용하여 구조물의 안정을 이룬 시험시공구간을 대상으로 토압, 간극수압 및 변위량 등의 계측결과를 분석 검토하였다. 교량 교대에 각종 계측기를 매설하여 교량 교대와 배면 토공부의 거동을 파악하고 유한요소해석 프로그램을 이용하여 이들의 거동을 예측하였다.

Keywords : EPS construction method, Backfill, Embankment, Construction site

1. 서 론

인류의 삶은 흙과 더불어 시작되었다. 지반공학 역시 삶을 보다 윤택하고 안전하게 하는데 많은 공헌을 하고 있다. 우리나라는 국토가 한정되어 이어 연안개발이 본격화 되고 있으며, 이에 따라 연약지반의 개량이 국토 개발의 주된 과제 중의 하나로 자리 잡았다.

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 지반연구실 수석연구원

본 연구에서는 이미 25여년 전에 노르웨이에서 시작한 EPS(expanded poly styrene)성토 공법을 한국에 최초로 도입한 1993년 이후(장용채,1994), 연약지반상에 건설되는 고속도로 현장에 교대 뒤채움재로 EPS성토공법의 시공 사례를 수치해석과 계측 결과를 중심으로 분석하고자 한다.

한편, 수치해석에 이용된 구성방정식은 Modified Cam-Clay Model을 사용했으며, 수치해석을 통하여 도로 성토체에 EPS블럭의 사용량에 따른 하부지반의 침하양상과 교량 교대와 교각 하부의 말뚝거동을 예측하고자 한다. 계측기 매설에 있어서는 토압계, 층별침하계, 간극수압계를 각각의 위치에 매설하여 EPS블럭의 시공에 따른 지반의 거동양상을 파악하였다.

우리나라에서는 1993년 최초로 EPS성토공법이 도입된 이후 1997년 5월 현재까지 약 21만m^3 의 EPS블럭이 현장에 시공되었다. 이를 연도별, 용도별로 나타내면 각각 그림 1, 그림 2와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 EPS블럭을 많이 사용했던 해가 94년, 95년으로 나타났는데, 이는 서 남해안에 고속도로의 신설과 확장이 많이 건설되었기 때문이다. 또한, 국내 EPS블럭의 주 사용처는 연약지반상의 교량교대 뒷채움과 성토체(80% 사용)로 나타났다.

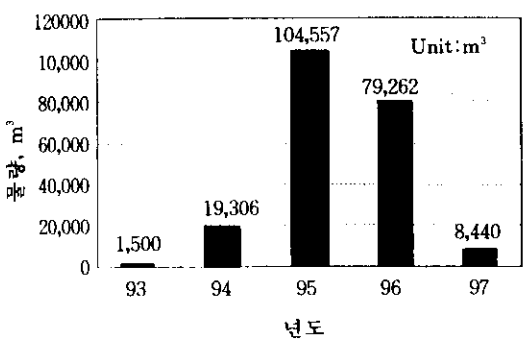

그림 1. EPS블럭의 연도별 물량변화

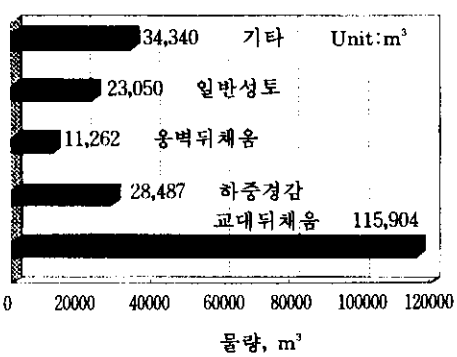

그림 2. EPS블럭의 용도별 물량변화

2. 수치해석 프로그램

2.1. 지배방정식과 구성방정식

우리나라의 서남해안은 대부분이 연약점성토로 구성되어 있는 연약지반이므로 여기에 택지조성, 공업단지, 방조제 및 도로성토체 조성 등 성토공사에는 반드시 압밀현상이 뒷따르게 된다. 이러한 압밀에 의한 지반변위의 물리적 현상파악 및 연약지반상 교량교대의 변위 억제대책 방법의 하나로 EPS성토공법을 적용하는데 있어 이용한 프로그램은 다차원 압밀거동 특성을 파악할 수 있는 범용 프로그램이다. 본 수치해석 프로그램은 지배 방정식으로 Biot의 압밀 방정식을 적용하고, 구성방정식으로 Modified Cam-Clay Model을 결합하였으며, 교량 교대 및 교각의 하부에 있는 말뚝의 거동 특성을 파악하고자 Beam-Column요소를 도입하였다.(박병기,1994)

2.2 유한요소 프로그램

본 수치해석에 이용한 유한요소 프로그램의 특징은 연약지반용이기 때문에 지배방정식으로 Biot의 방정식을 주축으로 구성되어 있으며 부 프로그램으로는 탄성(elast), 그리고 각종 탄소성(oricam or modicam) 및 탄.점소성(EVP)구성식을 활용할 수 있도록 되어 있다. 본 프로그램은 이러한 구성식들을 이용하여 다차원압밀해석, 연약지반을 보강하는 경우의

변형해석 등을 할 수 이도록 되어 이다. 또한 지반 내에서의 경계면에 특이점이 발생할 경우 이를 해석하기 위한 Beam element 및 Joint element 해석을 도입할 수 있도록 되어 있다.

3. EPS성토 공법의 현장 적용

3.1 EPS 성토공법

3.1.1 개요

EPS 성토공법은 대형 EPS 블럭을 성토재료 및 뒤채움재료로 도로, 철도, 공원조성 등의 각종 토목공사에 적용되며, 초경량성, 자립성, 내수성, 내압축성, 시공성 및 경제성의 특징이 있다.

(1) 초경량성 : EPS 블럭의 단위체적중량은 흙의 약 1/100 정도이므로 EPS 블럭을 연약지반 상의 성토재로 적용하는 경우, 성토하중을 크게 절감시켜 연약지반의 침하 및 지지력 부족 등의 문제를 동시에 해결할 수 있다(장용채,1994).

(2) 자립성 : EPS 블럭은 자립성이 있기 때문에 이것을 수직으로 쌓아 올려 자립 벽체를 형성할 수 있으며, 그 위에 상재하중이 작용하여도 측방으로의 변형이 매우 작은 특성을 가지고 있다.

(3) 내수성 : EPS 블럭은 합성수지의 발포제로 물과 결합하지 않는 발수성 재료이기 때문에 강우에 의한 침투수가 발생하는 통상의 시공조건에서는 흡수에 따른 재료 특성의 변화는 나타나지 않는다.

(4) 내압축성 : EPS 블럭의 압축강도는 그 단위체적중량에 따라 달라지나, 일반적으로 탄성범위 내의 허용압축강도가 3~14 tf/m^2이기 때문에 성토재료로 적용이 가능하다.

(5) 시공성 : EPS 블럭은 경량이기 때문에 EPS 블럭을 쌓는 데는 대형 건설기계가 필요하지 않으며 인력으로도 시공 가능하다. 따라서 시공속도가 빠르고 연약지반, 급경사지, 시공공간이 좁은 장소 등 대형기계의 사용이 어려운 곳에서의 시공도 용이하다.

(6) 경제성 : 연약지반상의 성토공사에서는 지반개량공법이 불필요하며, 완성 후에 계속되는 잔류 침하 또한 발생하지 않기 때문에 보수 등의 유지관리비가 적게 들어 경제적이다.

3.1.2 물리적 특성

(1) 종류, 형상

EPS 블럭의 종류는 제조공정에 따라 비트 발포법으로 만든 EPS(expanded poly styrene)와 압출 발포법으로 만든 XPS(extruded poly styrene)로 나눌 수 있으며, 국내에서는 단위체적중량에 의해 토목용 1호(0.03 tf/m^3), 토목용 2호(0.025 tf/m^3), 토목용 3호(0.02tf/m^3), 그리고 토목용 4호(0.015tf/m^3)로 구분한다. 규격은 국내의 경우 1800×900×600(mm×mm×mm)을 사용한다.

(2) 흡수성

EPS 블록은 성토재나 구조물 뒤채움재로 사용시 EPS 블럭이 지하수위면 아래에 위치하거나 혹은 수위 상승에 따라 침수될 경우, 물을 흡수하여 단위체적중량이 증가하게 된다(조삼덕,1997). 통상적으로 흡수율은 체적당 물의 양, 즉 Vol %(EPS 블럭 1m^3에 대해서 물이 차지하는 비율)으로 정의된다. 토목용 3호의 수침시 설계 단위체적중량은 0.1t/m^3으로 한다(EDO,1993).

(3)마찰 특성

EPS 블럭의 최대 마찰력 F는 그 면을 연직으로 재하하는 힘 N에 마찰계수 μ를 곱한 것과 같다. EPS 블럭 상호간, EPS 블럭과 모래 혹은 모르타르 면과의 마찰계수 μ=0.55~0.76 범위로 모래가 수분을 함유하고 느슨해짐에 따라 마찰계수 값이 저하된다고 보고되고 있다.

3.1.3 역학적 특성

(1) 압축 강도

EPS 블럭은 약 1% 압축 변형률까지는 탄성거동을, 그 이상의 변형률에서는 소성거동을 보인다. EPS블럭 밀도에 관계없이 1% 변형에서의 압축강도는 5% 변형시 강도값의 1/2 정도로 나타나며, 탄성한계변형률(1% 변형률)에서의 EPS 압축강도는 밀도 증가에 따라 선형

적으로 증가한다.

(2) 변형계수

초기 접선변형계수는 EPS의 밀도 증가에 따라 거의 직선적으로 증가한다.

(3) 포아슨비(Poisson's ratio)

포아슨비는 EPS 블럭의 밀도 증가에 따라 선형적으로 증가하며, 탄성한계변형률(1% 변형률) 내에서의 포아슨비는 대체로 일정한 값(0.1~0.15)을 보여주지만 소성영역에서의 포아슨비는 점차로 감소한다.

(4)크리프 특성

EPS 블럭의 크리프 특성을 살펴보면, 재하하중이 작은 경우에는 시간 경과에 따른 압축변형이 거의 없고, 재하하중이 크게 되면 시간경과에 따라 압축변형이 꾸준히 증가되며, 크리프에 대해 안정상태를 유지할 수 있는 재하하중은 대체로 5% 변형률에서 EPS블럭 압축강도의 1/2 이하로 평가할 수 있다.

(5) 내열성과 내화성

EPS 블럭의 원재료는 폴리스칠렌 수지로서, 열가소성 수지이므로 고온에서 수지 자체가 연화하여 팽창하거나 수축하는 등의 변형을 일으킨다. 그러나, EPS 블럭의 변형과 강도 저하를 유발시키는 온도는 70℃ 이상이므로 EPS 블럭 사용시는 70℃ 이하에서 사용하여야 한다.

3.2 현장적용

3.2.1 교대측방이동

연약한 점성토 지반에 성토 하중을 가하면 하중에 의하여 지반의 응력이 증가하고, 이에 따라 간극 수압이 증대하며 측방유동압이 발생하여 교대에 변형을 유발시킨다. 일반적으로 점성토지반의 변형은 재하후에 바로 생기는 전단 변형과 시간의 경과와 함께 진행하는 압밀변형으로 구분되는데, 교대의 측방유동에는 전자가 깊이 관여하는 것으로 판명된다(정재성, 1995).

3.2.2 현황

EPS블럭의 현장 적용에 따른 하부지반의 거동을 파악하고 이를 분석 검토하고자, 연약지반 성토시 성토 하중으로 인하여 구조물의 측방변형이 예상되는 남해안 고속도로의 교량 교대 뒤채움재로 EPS블럭을 이용하였다. 본 연구에서 수행한 시험 시공 현장의 개요는 다음 표 1과 같다.

우리나라의 고속도로 노선도를 살펴보면 다음과 같고 EPS를 시험 시공한 장소는 그림 3의 별표(★)로 나타낸 곳이다.

3.2.3 지반 조사

현장의 지층 특성은 구성 성분 및 두께에 따라 표층, 퇴적층, 잔류토층 및 풍화암으로 구성되며 표 2에 나타냈다.

3.2.4 연약지반 처리공

시험시공 구간의 연약지반 처리공법은 압밀촉진 공법인 Sand Drain공법으로 시공되었으며, 간격은 3.0m×3.0m로 설치되었다. 성토고는 8.7~9.47m 로 EPS성토 공법의 적용 전 2

표 1. 현장개요

	교량제원			선 형		EPS블럭 설치량	EPS블럭 설치 높이	공사기간
	교장(L)	교폭(W)	높이(H)	종단구배	횡단구배			
교대2	120m	18.5m	9.715m	0.657%	−2.0%	2,285m²	5.2m	'94.8.29~9.31

표 2. 시험 시공 대상 교량의 지반 특성

표 고, EL(m)	두께(m)	토질상태	N값	점착력(t/m²)	마찰각(°)
3.2~−1.8	5.0	풍화토	25		
−1.8~−11.4	9.6	실트질 점토	2~4	2.6	8
−11.4~−13.8	2.4	화강토	50		

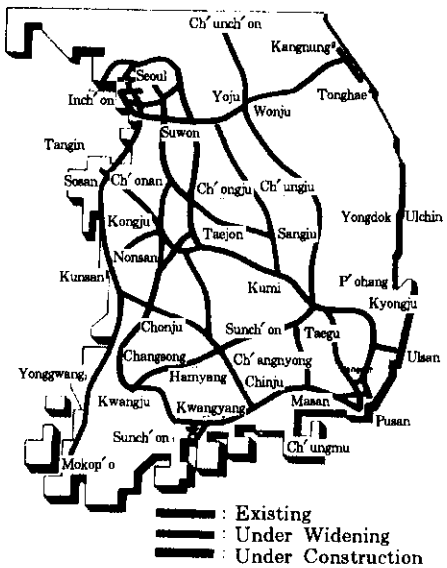

그림 3. 우리나라 고속도로 노선도

단계 성토(5m)가 완료된 상태에서 교량교대에 변형이 발생하여 하중을 제거하고 하중경감공법을 도입하였으며, EPS블럭의 설치단면도는 그림 4와 같다.

4. 교대변위에 대한 유한요소해석(FEM)

4.1. 해석 단면

시험시공 교량을 중심으로 유한요소해석을 실시하였으며, 하중은 EPS 성토 구간과 일반토공 구간으로 나누어 (포장 하중을 포함) 각각 2.016tm, 16.4tm으로 재하하였다. 하중 재하 단계는 총 5단계로 하였고, 각 단계하중은 EPS블럭과 토공하중으로 각각 나뉘어, 1단계(0.0002, 2.0), 2단계(0.0004, 3.0), 3단계 (0.0008, 3.0), 4단계(1.0, 3.4), 5단계(1.0146, 5.0tm)로 780일에 걸쳐 재하한 후 시공 완료하였다.

지반의 경계면 조건은 하단과 양측면은 고정, 상단은 자유조건으로, 배수 조건은 상단은 배수, 하단과 양측면은 비배수조건으로 하고, 해석조건은 평면 변형률 조건으로 실시하였다. 여기서 하부 암반은 일반적으로 투수성이 낮기 때문에 불투수층인 비배수조건으로 해석하였다. 계산 지반의 모델 제원은 깊이 13m, 폭 90m이며 교대와 교각이 각각 설치되어 있고, 토체의 총요소수 198개, 절점수 238개이다. 또한, Sand drain의 해석에 있어서는 강성과 투수성을 크게 주어 압밀이 진행되도록 하였고, 말뚝의 거동을 예측하고자 Beam Element을 이용하였으며, Beam의 요소수는 12개, 절점수는 14개가 해석 대상 개소이다. 해석시 교대에 사용된 강관말뚝을 아래와 같은 등가의 강널말뚝벽 (Equivalent Steel Sheet Pile Wall)으로 환산하였다.

Φ=508mm, (강관말뚝의 지름)
E=2.1×107t/m²(강관말뚝의 탄성계수)
I=2.2×10⁻⁴m⁴(강관말뚝의 I)

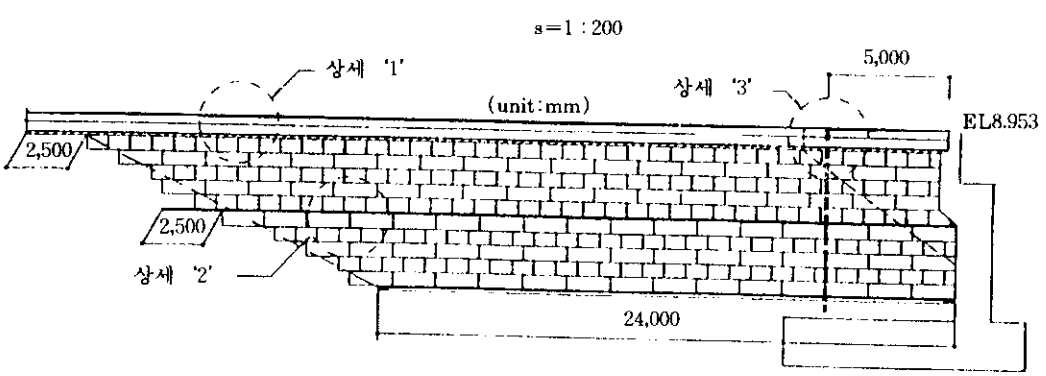

그림 4. EPS 블록 설치 단면

본 해석 결과 나타난 강관말뚝의 거동 예측값은 정오에 있어 많은 논란이 있지만, 다만 경향과 물리력의 작용에 대해서 판단 자료로서 충분하리라 여겨진다. 기존에 연약지반 처리공법으로 샌드드레인이 적용되었기 때문에, 본 해석에서도 3.0m 간격으로 샌드드레인을 시공한 단면을 대상으로 검토하였으며 해석 단면은 그림 5와 같다(장용채,1994).

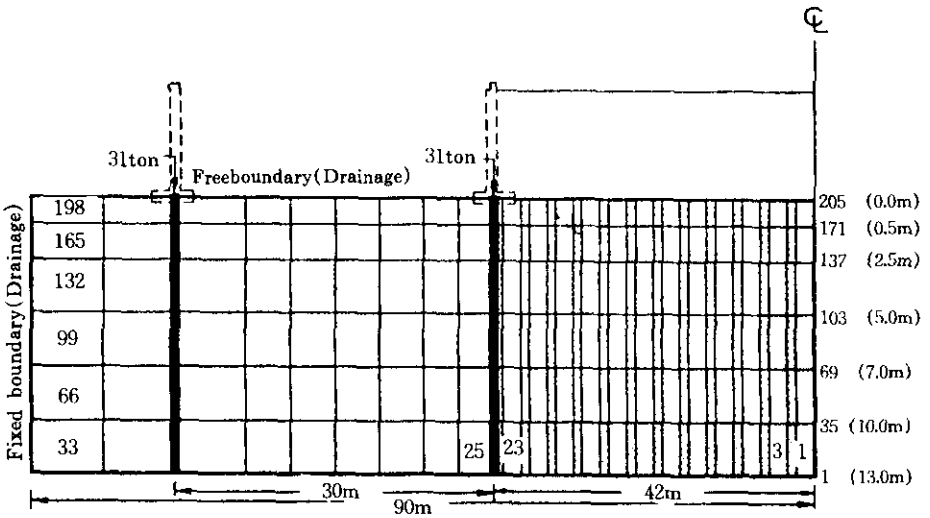

그림 5. 수치해석단면

해석에 이용된 입력상수는 표 3과 같다.

표 3. 입력상수

	λ	κ	M	C_α	G_o	μ	σ_{vc}	K_{oc}
S.D	0.0	0.0	38.0	0.0	250.0	0.25	2.0	0.5
Clay	0.28	0.028	1.5	0.0	93.0	0.33	15.3	0.5

	σ'_{vc}	K_o	e_o	γ_t	V_o	λ_k	K_{xo}	K_{yo}
S.D	2.0	0.5	0.8	1.85	0.0	0.0	$0.1*10^{-1}$	$0.1*10^{-1}$
Clay	15.3	0.5	1.1	1.65	$0.1*10^{-5}$	0.5	$0.1*10^{-5}$	$0.1*10^{-5}$

표 3에 나타낸 재료상수에 대한 설명은 다음과 같으며 λ, M, Kxo, Kyo는 압밀실험결과에서, 나머지는 Simulation 과정에서 가정치(Akio Nakabe, 1988)를 수정한 것이다.

여기서, λ : e−lnP 곡선의 정규압밀 부분의 기울기, χ : e−lnP 곡선의 팽윤−재압축 곡선의 기울기(λ의 약 1/10으로 추정), M : p−q 평면에서 한계상태의 기울기, C_α : 2차압축지수, G_o : 초기 전단 탄성계수(t/m²), μ : Poisson 비, σ_{vc} : 선행시의 유효수직 응력(t/m²), k_{oc} : 선행시의 정지 토압 계수, σ'_{vc} : 현재의 유효연직 응력(t/m²), k_o : 정지토압 계수, e_o : 초기 간극비, γ_t : 흙의 단위 중량(t/m²), V_o : 초기 체적 변형률 속도, λ_k : e−lnk 곡선의 기울기, K_{xo} : 초기 수평 방향의 투수계수(m/day), K_{yo} : 초기 연직방향의 투수계수(m/day)

4.2. 해석 결과

4.2.1. 침하검토

교량교대 배면의 침하계측은 EPS구간과 토공구간으로 나누어 계측기를 매설하였으며, 현

장계측과 수치해석결과를 비교분석하면 다음과 같다. 교량교대 배면의 하중경감 범위가 침하 및 변위에 미치는 영향을 파악하고자, 각각 연약층 심도(D)를 기준으로 교대배면에 EPS 블럭을 전혀 사용하지 않은 경우(0.0D)에서부터 EPS블럭을 연약층심도(D)의 0.5배(0.5D), 1.0배(1.0D), 1.5배(1.5D) 그리고 2.0배(2.0D) 거리까지 적용한 5가지 경우로 나누어 해석하였다. 침하검토 대상지역의 EPS블럭 설치는 교량교대의 통상적인 측방유동 가능범위에 대한 안전성을 고려하여, 연약층 심도의 약 1.5D 거리까지 적용하여 수치해석하였다.

이 결과 EPS블럭을 실제현장에 적용한 경우(EPS블럭 적용 폭=1.5D)와 일반토공구간(EPS블럭 적용 폭=0.0D)을 나타내면 각각 그림 6, 그림7과 같다.

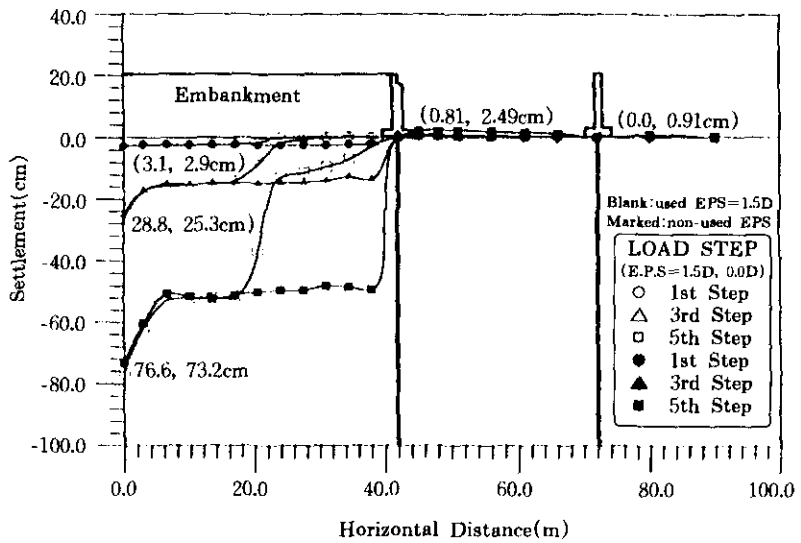

그림 6. 하중단계에 따른 수평거리와 침하곡선

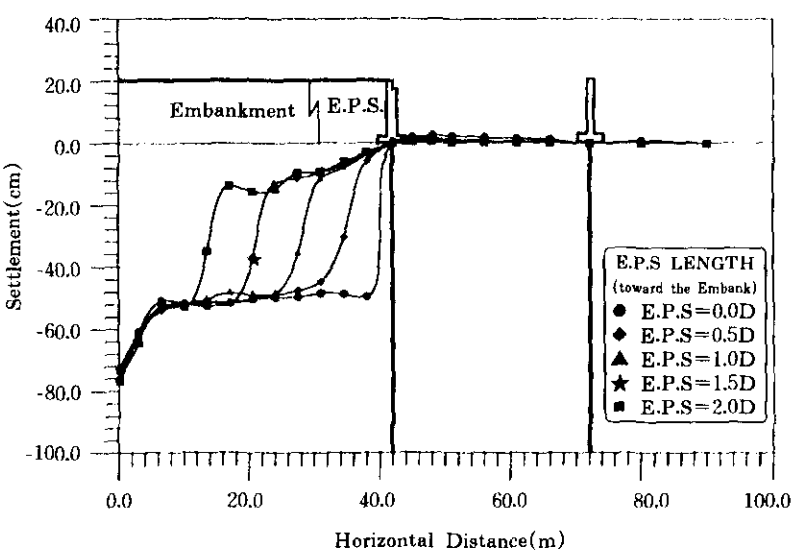

그림 7. EPS블럭의 적용폭에 따른 수평거리와 침하곡선

교대배면으로부터 연약층 깊이만큼 떨어진 일정한 곳의 침하량을 비교해 보면, 최종하중단계에서 EPS블럭을 적용한 경우는 약 5cm정도인 반면, 전체를 토공으로 적용한 경우는 약 53cm 정도로 10배정도의 침하량 차이가 나타났다. 이는 EPS블럭을 이용해 성토체의 상재하중을 경감시킴으로서 제체침하를 현저히 경감시킬 수 있음을 보여준다. 하중단계별로 보면, 1단계, 3단계 하중하에서도 최종단계와 유사한 침하양상을 보이고 있으나 그 량은 현저히 감소함을 알 수 있다(그림 6 참조).

또한 EPS 블럭을 연약층 심도의 비로 교대배면에 적용한 경우, 최종단계(5단계)만을 종합하여 나타내면 그림 7과 같다. 전체적인 경향은 유사하나 EPS블럭의 적용범위에 따라 침하양상이 교대배면쪽에서 성토체 쪽으로 점점 증가하는 경향이 뚜렷하게 나타난다. 따라서 EPS블럭을 교대배면에 적용할 때는 EPS블럭과 토공접속부와의 상대적인 단차를 최소화하기 위하여 EPS성토공법의 기 연구에서 제시한 1:2~1:4 이상의 접속부 경사를 형성하는 것이 효율적일 것이라 판단된다. 이상의 결과를 정리하면 EPS블럭을 연약지반상의 성토체에 적용할 경우 하중경감 효과가 현저하다는 것을 알 수 있다.

4.2.2 제체하부 말뚝의 변위

교대의 수평변위는 근본적으로 교대기초말뚝의 수평변위와 같다고 가정하여 평면변형률 조건으로 말뚝을 해석하였다(일본토질공학회, 1993). 교대하부말뚝의 수평변위를 검토하기 위하여 교대배면에 EPS블럭의 사용량을 점차 증가시켰다. 여기서, EPS블럭을 전혀 사용하지 않은 경우 교대하부 말뚝의 최대수평변위가 5.8cm인 반면, EPS블럭을 연약층 심도의 1.5D까지 사용한 경우에는 1.2cm로 약 5배의 수평변위 차가 발생하였다. 이는 상재하중이 교대수평이동에 막대한 영향을 주고 있다는 것을 의미하며, 교대의 수평이동을 억제할 수 있는 공법으로 EPS성토공법이 효과적이라는 것을 의미한다(그림 8 참조).

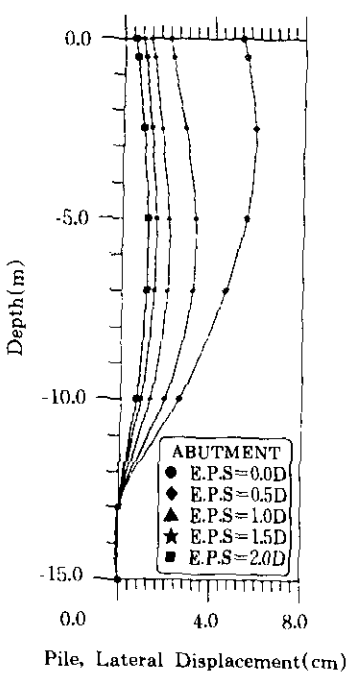

그림 8. 교대 하부 파일의 측방변위

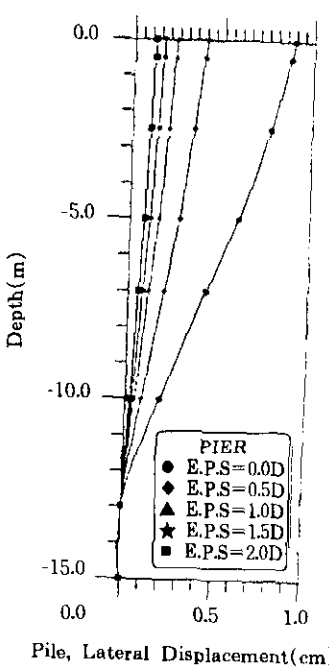

그림 9. 교각 하부 파일의 측방변위

한편, 교량교대로부터 30cm 떨어진 교각하부 말뚝의 변위를 분석해보면, 재하 발생원으로부터 교각이 멀리 떨어져 있어 전반적인 교각의 거동은 둔화되는 것을 볼 수 있다. EPS=0.0D인 경우는 최대수평변위가 0.89cm인 반면 EPS=1.5D인 경우는 0.16cm로 나타나 성토체로부터 교각이 너무 가까이 있으면, 교대뿐만 아니라 교각에 까지 측방유동압이 작용한다는 것을 미루어 알 수 있다(그림 9 참조).

4.2.3 제체하부 말뚝의 모멘트

말뚝에 작용하는 모멘트가 측방유동압과 상재하중에 의해 어떻게 분포하는가를 검토하고자 다음과 같은 분석을 수행하였다. EPS블럭을 전혀 사용하지 않고 설치한 제체하부 말뚝에 작용하는 모멘트는 27.8tm, EPS블럭을 연약층 심도의 1.5배 거리까지 적용한 경우(EPS=1.5D)에는 9.8tm로 나타나, 후자가 전자에 비해 약 3배의 모멘트 감소효과를 나타냈다(그림 10 참조). 한편, 교각부분의 모멘트를 분석해보면, EPS=0.0D인 경우는 1.8tm, EPS=1.5D인 경우는 0.27tm로 나타나 일반적인 경우에서와 같이 하중체로부터 멀어짐에 따라 하부 말뚝에 작용하는 모멘트가 감소하였다(그림 11 참조). 이들 하부말뚝의 거동을 분석한 결과, 교대배면하중이 교량기초 하부말뚝에 직접적인 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

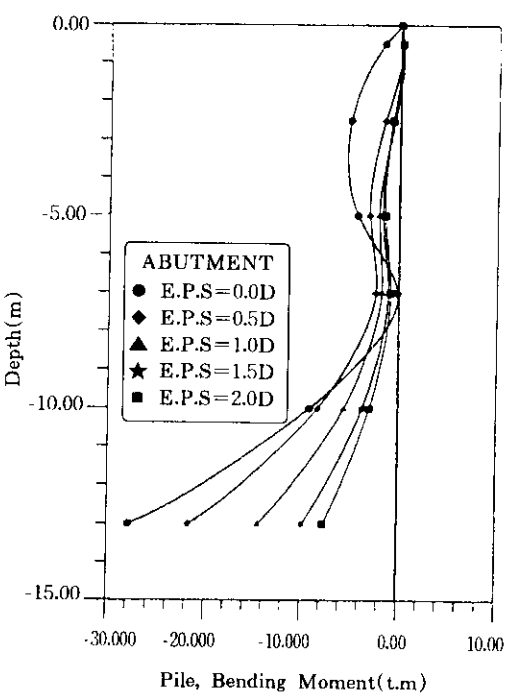

그림 10. 교대 하부 파일의 휨모멘트

5. 현장계측분석

본 연구에서는 연약지반상에 설치되는 구조물이 성토나 그 밖의 하중변화 조건에 따라 발생하는 변형거동과 발생원인을 분석하고 이들의 정량적인 값을 구하고자 각 부분에 계측기를 매설하였다. 이곳에 매설한 계측기의 종류와 단면도는 그림 12와 같다.

5.1 수평토압계

교대배면에 작용하는 EPS블럭의 측압을 측

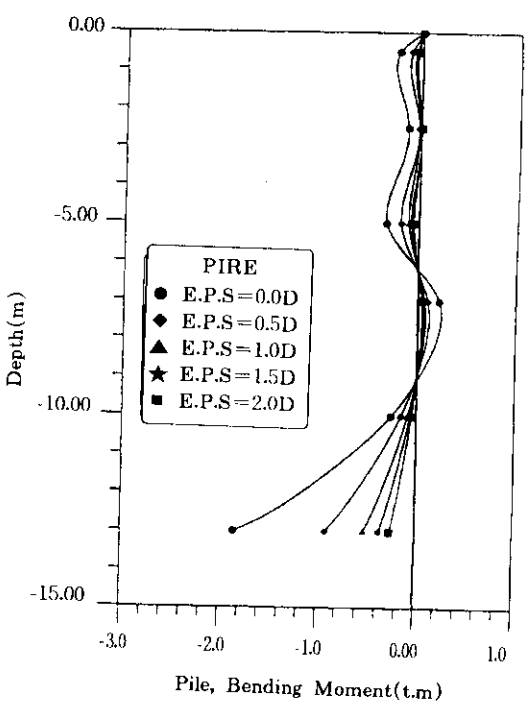

그림 11. 교각 하부 파일의 휨모멘트

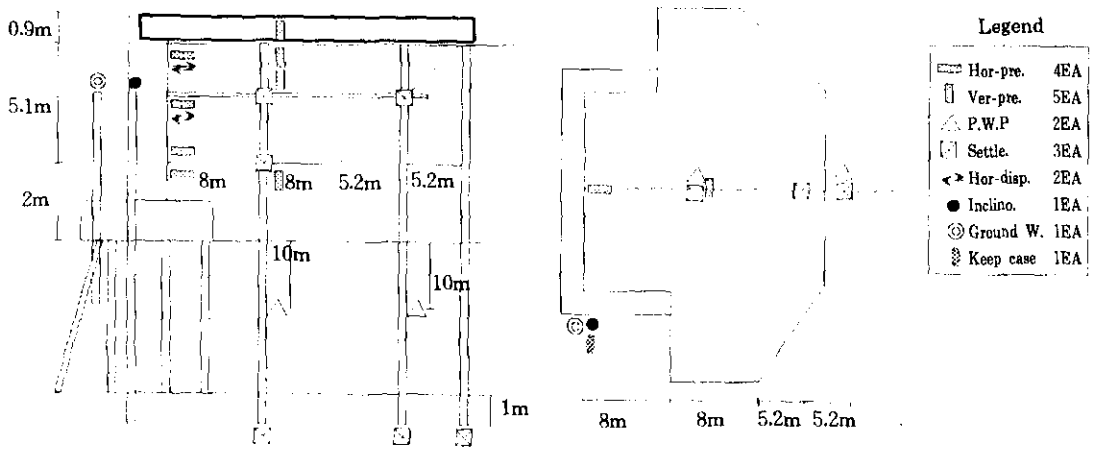

그림 12. 계측기 매설 단면도

정하고자 교대배면의 하단 성토부에 1개, EPS 블럭의 상중하에 각각 1개씩 총 4개의 수평토압계를 매설하였다. 현장의 계측결과에 의하면, 상부콘크리트만 타설(94년 11월 이전), 포장체완성 후(95년 1월 이후), 그리고 교통하중을 개방시킨 후(95년 3월이후) 다소 토압의 변화가 나타나지만 전반적인 변화경향은 일정함을 알 수 있다. 특히, 포장체 완성 후 수평토압의 변화는 상부하중에 의한 하부 응력증가가 두드러짐을 알 수 있다. EPS블럭을 연약층 깊이의 1.5배 거리까지 적용한 경우을 분석해 보면, 교대배면의 EPS블럭 접면부에 설치한 수평토압은 0.5t/m², 교대하단부인 성토쪽에 설치한 토압은 1.5t/m²으로 나타나 EPS블럭 설치벽체에 작용하는 수평토압의 감소효과를 알 수 있다(原田, 1994). 즉 하부 토층의 토압과 상부 EPS블럭층의 수평토압차는 약 3배 정도로 나타났으며, 교대배면에 작용하는 수평토압이 0.5t/m²을 초과하지 않았고, 교량교대의 변위도 미미해 구조물의 안정에 EPS 블럭이 크게 기여하는 것을 알 수 있다(그림 13 참조).

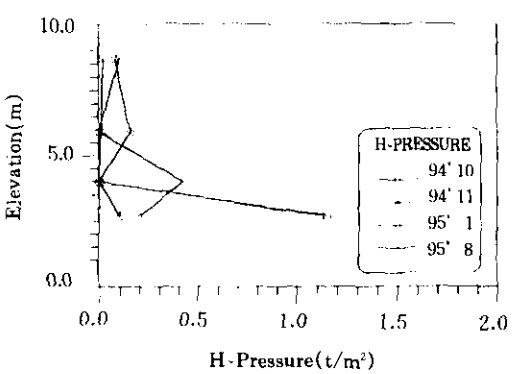

그림 13. 수평토압 계측결과

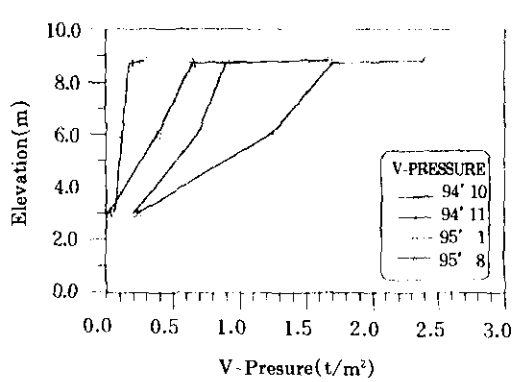

그림 14. 수직토압 계측결과

5.2 수직토압계

수직토압계는 상재하중이 EPS 블럭 위에 재하됐을 때 토층의 변화에 따른 연직응력의 분산효과를 파악하고자 상판콘크리트의 상하단면, EPS블럭의 중간과 하부토층과의 접면부에 각각 1개씩 설치하였다. 계측결과에 의하면, 15cm두께의 콘크리트의 상부에 작용하는 토압은 2.4t/m², 하부에 작용하는 토압은 1.15t/m²으로 나타나 상부콘크리트층이 하부 EPS블럭에 하중분산효과를 크게 발휘하는 것으로 나타났다. 이는 상부하중을 곧바로 포장체가 받기 때문에 상부토압이 크게 나타났고 하부로 갈수록 감소해 응력분산효과가 뚜렷함을 알 수 있다. 따라서, 콘크리트 상판은 EPS블럭의 부력에 대한 억제역할뿐만아니라 상부하중의 분산효과에도 크게 기여한다는 것을 알 수 있다(조삼덕,1996).

한편, EPS블럭 하부와 토공 상층부 사이에 작용하는 연직응력이 0.2t/m²으로 나타나, 하부 원지반에 작용하는 하중이 현저히 감소하였다. 이는 EPS성토공법이 지반의 전체적인 침하안정에 크게 기여한다는 것을 나타낸다(그림 14 참조).

5.3 간극수압계

토공부와 EPS블럭 설치부의 시간변화에 따른 간극수압의 변화를 계측하고자 이곳에 각각 계측기를 설치하여 최종 하중재하후의 간극수압의 변화관계를 분석하였다. 교대-1지역에는 EPS블럭설치구간의 EL. −6.0m위치, 교대−2지역은 A, B로 나누어 A는 EPS블럭 설치구간 하부 EL. −7.0m, B는 토공구간에 각각 설치하였다.

교대−1의 과잉간극수압은 2.0t/m²이하로 나타나 안정을 이루었으나, 교대−2(B)에서는 갑자기 5.0t/m²까지 상승하였다가(1995. 8. 14) 다시 안정을 이루었다. 이는 당시 집중호우로 인하여 교대 배면으로부터 50m 떨어진 인접지역에 발생한 사면붕괴의 영향에 의한 것으로 판단된다. 현장 정리가 끝난 이후 모든 구간에서의 간극수압 분포는 일정한 값 이하로 나타났으며 제체는 안정을 이루었다(그림 15 참조).

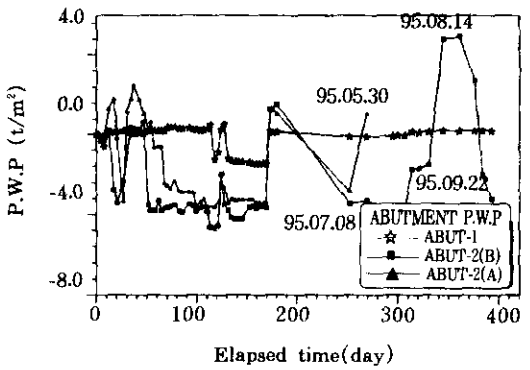

그림 15. 간극수압 계측결과

5.4 층별침하계

EPS블럭과 성토체 사이의 침하형태를 파악하고자 층별침하계를 EPS블럭 지역, EPS블럭과 성토체 사이, 성토체 지역에 각각 설치하였다. EPS블럭을 적용한 곳과 적용하지 않은 일반 토공구간에 대하여 각각 수치해석한 결과와 계측결과를 비교해보면 다음과 같다. 먼저 EPS블럭 지역을 보면, 포장하중의 재하후에 EPS블럭 자체의 압축과 자리메김에 의해 1%(5.2cm)정도의 즉시침하가 탄성범위내로 발생하였다. 이는 수치해석 결과(5.8cm)와 매우 근접하였으며 침하경향도 유사했다. 한편, 토공지역은 실측치가 68.5cm정도, 수치해석 결과가 73.2cm정도 침하한 것으로 나타나, 양자 모두 수치해석 결과가 다소 크게 나타났으나 전반적인 침하양상은 유사하였다. 즉, EPS블럭 설치부분과 설치하지 않은 토공부 측의 최종침하량 값은 10배이상 차이를 나타내 EPS블럭이 침하를 최소화하는데 효과적임을 알 수 있다(그림 16, 그림17 참조). EPS 블럭을 시공하기 전에 토공을 60%이상 형성하여 사전에 프리로딩 효과를 가져왔기 때문에 EPS블럭 설치부의 침하가 현저히 줄어든 것이다.

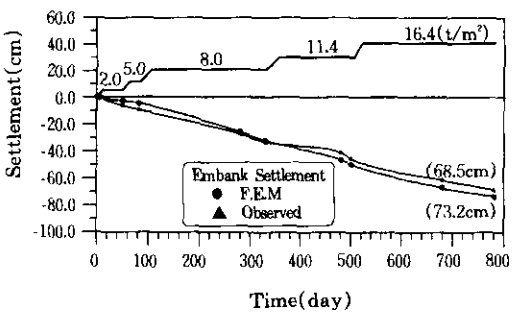

그림 16. 하중-침하곡선(성토측)

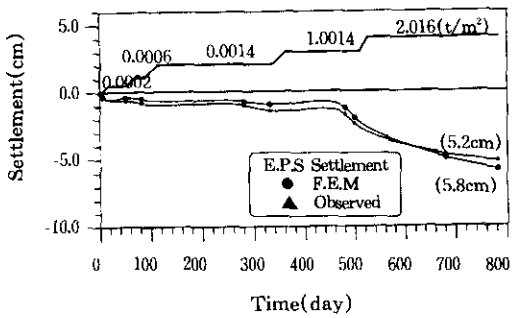

그림 17. 하중-침하곡선(EPS측)

6. 결 론

연약지반상에 교대변위 억제대책공법으로 EPS성토공법을 적용하여 분석한 수치해석결과와 현장계측결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 일반적으로 연약지반상의 성토체에 변형을 일으키는 범위가 연약지반 심도의 1.0~2.0배 정도라고 한다. 본 연구에서는 사면활동에 대한 안전성 검토를 한 결과, 교대배면으로부터 연약층 심도의 1.5D거리 까지 EPS블럭을 적용한 결과 구조물에 안정적이었다. 따라서 이는 EPS블럭을 설치하지 않은 경우보다 10배 이상의 침하량 감소가 있었으며, 또한 수치해석결과와 실측값이 잘 일치하여, 구조물과 제체의 안정에 EPS성토공법이 효율적임을 알 수 있다.
2) 교대 말뚝의 변위양상은 EPS블럭을 전혀 사용치 않은 EPS=0.0D일 때가 EPS=1.5D인 경우보다 약 5배의 변위증가를 나타내, 교대배면 하중이 교대 말뚝의 거동에 지대한 영향을 미치는 측방유동압을 일으킨다는 것을 알 수 있다.
3) EPS블럭의 상부 레벨링 콘크리트의 응력을 측정한 결과 콘크리트 상판 상부에서 1.8t/m², 하부에서 0.6t/m²으로 나타나 상부레벨링 콘크리트의 응력분산효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 이는 콘크리트 상판이 EPS 블럭의 부력에 대한 억지효과뿐만아니라 상부하중의 응력분산에도 효과적이라는 것을 의미한다.
4) 교대배면에 EPS블럭을 적용할 경우, 토공부와 EPS블럭의 접면부에 단차가 크게 발생한다. 이를 최소화하기 위해서는 접속부의 구배를 1:2~1:4정도 또는 그 이상으로 완화시켜 제체의 안정을 기하여야 한다.
5) 교량교대 배면에 작용하는 수평토압의 계측결과, 하부토공부는 1.5t/m²으로 나타났고, 상부 EPS블럭설치부에서는 0.5t/m²이하로 나타나 전반적으로 EPS블럭이 제체에 작용하는 토압감소에 효율적임을 알 수 있다.
6) 토공부와 EPS블럭 설치부에 매설된 간극수압의 계측결과 인접지역의 사면파괴시를 제외하고 모두 2t/m²이하로 안정을 이루었다. 이는 간극수압의 계측결과가 제체의 안정성 검토에 효율적으로 활용할 수 있음을 나타냈다.
7) 결과적으로, 이제 우리나라에서는 시작단계에 있는 EPS성토공법을 연약지반상의 교량교대에 적용한 결과 구조물 및 제체의 안정에 효율적이라는 것을 알 수 있다.

참 고 문 헌

1. 도로설계요령(1992), "제 8-3편 교량하부구조물", 한국도로공사, 제3권, pp.410~411.
2. 박병기(1994), "연약지반의 변위에 대한 사례연구", 한국지반공학회, 94년 학술발표회.
3. 장용채(1994), "발포폴리스티렌(EPS)을 이용한 경량성토공법", 한국지반공학회지, 제10권 제3호, pp. 149~172
4. 장용채외 2인(1994), "EPS 성토공법연구", 한국도로공사 도로연구소 1994년도 연구보고서
5. 장용채외 1인(1995), "교대변위 억제대책에 관한연구", 한국도로공사 도로연구소 1995년도 연구 보고서
6. 장용채외 1인(1995), "연약지반에서의 토질공학", 도서출판 새론, 제4, 5장
7. 정재성(1995), "연약지반상 성토에 의한 교대의 측방이동", 전남대 석사학위논문.
8. 조삼덕외 4인(1997), "산악도로에서 EPS성토공법의 시공성/경제성 평가 및 설계 S/W 개발연구", 한국건설기술연구원 연구보고서.
9. 建設省 土木研究所 構造橋梁部 基礎研究室(1981), "橋台の 側方移動に關する研究", 土木研究所資料, 第 1804.
10. 發泡 スチロール開發機構(1993), "EPS工法"－發泡 スチロール을 用いだ 超 輕量盛土工法－, 理工圖書.
11. 原田智嘉(1994), "發泡スチロールを 利用いた 高盛土施工", 基礎工, Vol.22, No.10 pp.52~58
12. 日本土質工學會(1993), "地盤の 側方移動", 土質基礎工學ライブラリ.
13. Akio Nakabe at al(1988), "Constitutive parameters estimated by plasticity index", ASCE, Vol.114, pp.844~858.
14. Chang yong-chai(1995), "A case study on EPS Construction in abutment backfill", Proceeding of the eight conference of road engineering association of Asia and Australasia, Vol. 1, Taipei, ROC. pp 73~78
15. Cho samdeok at al(1996), "Behavior of vertical wall system using EPS blocks", EPS Tokyo '96
16. HIGUCHI Yasuaki(1990), "發泡スチロール盛土工法", 基礎工, Vol.18, No.12 pp.10~20
17. Kutara Katsuyuki(1994), "軟弱地盤と基礎工－最近の軟弱地盤對を考える－", 基礎工, pp. 1~11.

(접수일자 1997. 8. 25)