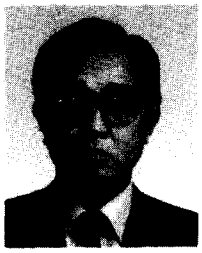


軟弱地盤上 스치로폴 輕量性土工法의 設計

Design of Lightweight Fill Method
on Soft Ground using Expanded Polystyrene

柳 基 松*
Ryu, ki Song

1. 개 요

스치로폴은 발포폴리스티렌(EPS : Expanded Poly-Styrene)을 말하며, 이것은 스티렌 모노머(Styrene Monomer)를 중합하여 만든 폴리스티렌과 여기에 첨가한 발포제가 주원료로 되어 있다. 폴리스티렌은 1930년대에 미국과 독일에서 공업화되었고 스치로폴은 1943년초에 미국에서 공업화가 이루어져 건물의 단열재, 물품포장재 등으로 이용되어 왔다.

1972년에는 노르웨이에서 연약지반상 교량의 접속도로 보수공사에 처음 스치로폴 성토공법이 이용되어 교대의 측방유동 방지대책으로 성공을 거둠에 따라 연약지반상의 경량성토재 및 토압을 받는 옹벽, 교대 등 구조물의 경량 뒷채움재로서 각광을 받게 되었다.

한편 우리나라에서는 1994. 6월에 한국지반공학회 주최로 개최된 "발포폴리스티렌(EPS) 이용 성토공법 국제심포지엄"에서 양산-구포간 고속도로성토(L=70m)[1] 및 서해안고속도로[2]의 교대 뒷채움에 스치로폴 경량성토재가 이용된 문헌이 발표된 바 있으며, 시중에서 단열재용으로 판매되고 있는 스치로폴 평판의 규격은 표 1과 같다.

표 1 스치로폴 평판의 규격[3]

비 중	두께×폭×길이(mm)	용 도
0.015, 0.020 0.025, 0.030	(25~75)×900×1,800 (25~50)×900×3,600 (25~50)×900×5,400 (75~200)×900×3,600	단 열 재

스치로폴은 그 가격이 비싼 편이지만 단위중량(20-40kgf/m³)이 흙의 $\frac{1}{50}\sim\frac{1}{100}$ 밖에 안되는 초경량재로서 강도, 내구성 및 시공성이 우수한 성토용 신재료이기 때문에 연약지반상에서 구조물 시공시 지반의 과대한 침하, 측방유동 및 사면활동 등이 생길 경우 도로성토재 또는 교대, 옹벽 등 구조물의 뒷채움재로서 스치로폴을 사용하면 이를 방지할 수 있으므로 매우 효과적인 토목자재라 할 수 있다.

따라서 본고에서는 지금까지의 연구결과, 시험시공 및 시공실적 등을 토대로 발표된 참고문헌[4]을 중심으로 연약지반상 스치로폴 성토공법의 설계방법에 대하여 간단히 소개하고자 한다.

2. 스치로폴 경량성토공법의 설계

연약지반상의 스치로폴 경량성토공법 설계시는 해로운 지반침하와 사면활동을 방지하고 부력에 안전하도록 해야 하며, 대표적인 성토단면은 그림 1, 설계순서는 그림 2와 같다.

가. 설계하중

1) 토압 및 수압

적층한 스치로폴 블록 뒷면의 토사가 자립되

* 농어업토목기술사, 농어촌진흥공사, 농공기술연구소 재료·토질시험실장

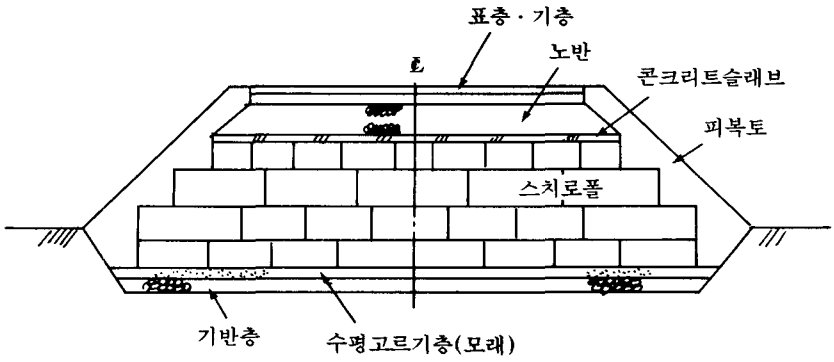


그림 1. 스치로폴 성토의 일반단면도

지 않을 경우는 토압을 쐐기법으로 해석을 하며, 수위상승이 예상될 경우는 정수압이 작용하는 것으로 고려한다.

2) 상재하중

상재하중은 포장, 스치로폴 상부구조의 자중 및 활하중이 있는데 활하중은 등분포하중 $q=1.0\ tf/m^2$이 작용하는 것으로 고려하며, 각 재료의 단위중량은 표 2와 같다.

표 2 재료의 단위중량[4]

재 료	단위중량(tf/m^3)	비 고
철근콘크리트	2.5	
아스팔트콘크리트	2.3	
자갈, 역질토	2.0	
모래, 사질토	1.9	
실트, 점성토	1.8	LL≦50%

3) 자중

스치로폴의 자중은 건조상태일 경우에 표 3의 값을 이용하여 계산하며, 지하수위 이하 및 그 부근에 시공할 경우는 흡수에 의한 단위중량 증가를 고려하여 50−70kgf/m^3정도를 예상하면 좋다.

4) 스치로폴의 측압

적층한 스치로폴의 측압은 상재하중에 의하여 스치로폴이 횡방향으로 팽창될 경우에 생기는데 일반적으로 측압은 상재하중의 0.1배가 심도방향으로 균일하게 작용하는 것으로 고려한다.

5) 부력

스치로폴 블록이 지하수위 하에 있을 경우는 수침된 스치로폴 부분의 부력을 고려하며, 구

표 3 스치로폴의 물성표준치[4]

구 분	형내발포법					압출발포법	비 고
	D-30	D-25	D-20	D-16	D-12	DX-29	
단위중량(kgf/m^3)	30	25	20	16	12	29	
허용압축응력(tf/m^2)	9.0	7.0	5.0	3.5	2.0	14.0	압축탄성한계
품질관리압축응력(tf/m^2)	18.0 이상	14.0 이상	10.0 이상	7.0 이상	4.0 이상	28.0 이상	5% 변형시
발포배율(배)	33.3	40.0	50.0	62.5	83.3	34.5	

조물에 가장 불리한 조건으로 전도, 활동 등의 검토에는 부력을 고려하고 지지력계산시는 무시를 한다.

6) 지진력

지진시의 안정계산은 원측적으로 수정진도법으로 한다.

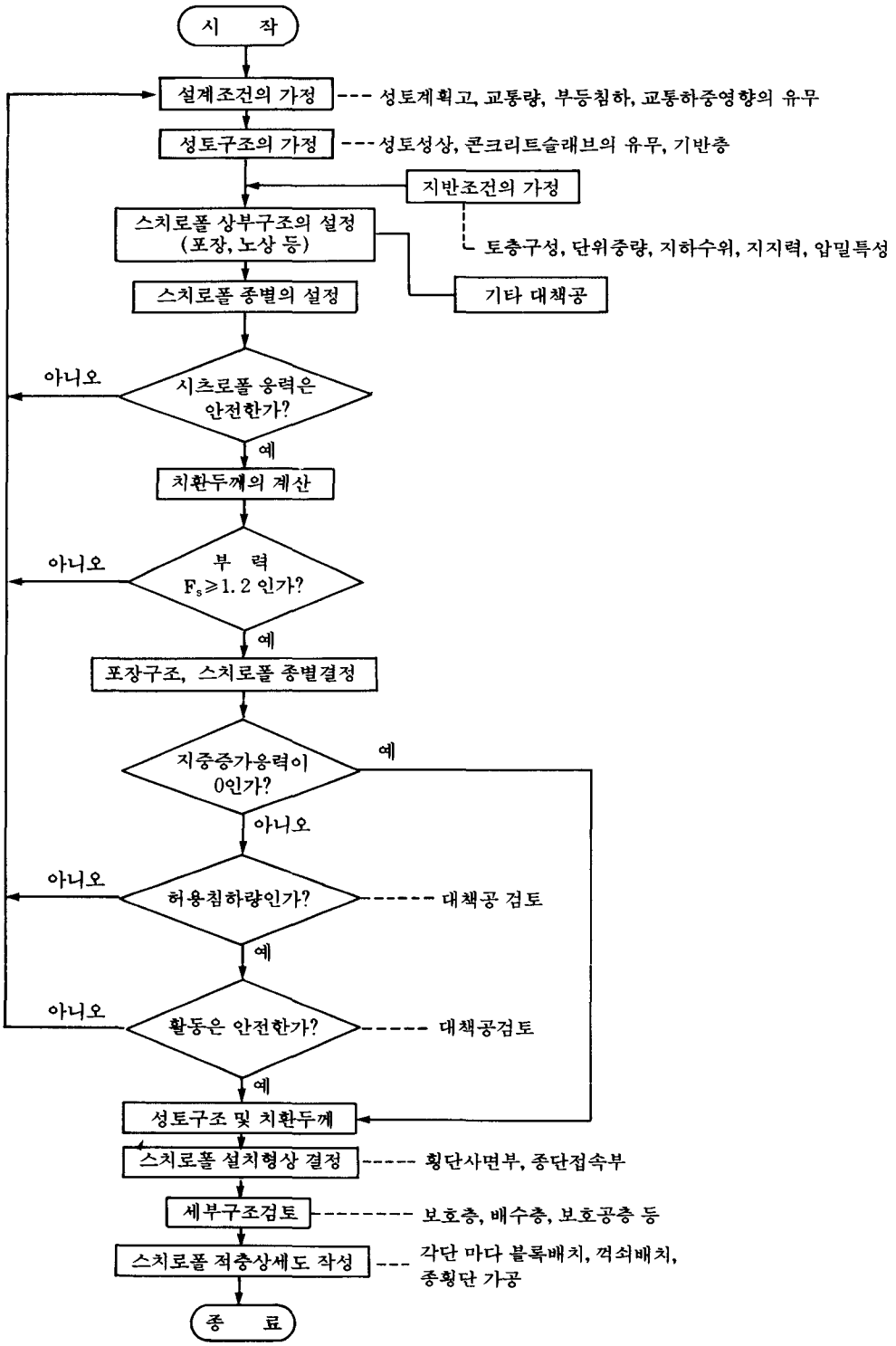


그림 2. 연약지반상 스치로폴 경량성토공법의 설계흐름도[4]

나. 지반의 압밀침하 검토

연약지반의 침하는 스치로폴 성토에 따라 응력증가로 인한 압밀침하량이 허용침하량을 초과하지 않도록 설계를 하며, 스치로폴 성토에 의한 지중증가응력이 0이면 압밀침하에 대한 검토를 생략해도 좋다.

1) 지중증가응력

스치로폴 성토에 의하여 연약압밀토층 중앙부에 작용하는 지중증가응력은 식(1), (2), (3)을 이용하여 구한다(그림 3 참조).

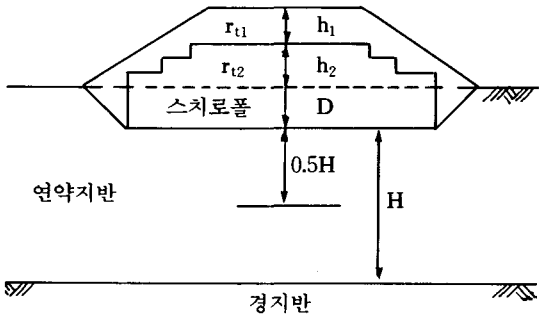


그림 3. 스치로폴 성토의 지중증가응력계산

$$p_1=\sum\gamma_{t1}\,h_1+\gamma_{t2}(h_2+D)+\gamma_t\,0.5H+WL \cdots (1)$$

$$p_o=\gamma_t(D+0.5H) \cdots (2)$$

$$\Delta p=p_1-p_o \cdots (3)$$

여기서, p_1 : 시공후 연약점토층 중앙부에 작용하는 응력(tf/m²)

γ_{t1} : 포장, 노반, 토사 등의 단위중량(tf/m³)으로서 수중일 경우는 수중단위 중량을 적용한다(표 2 참조)

h_1 : 포장, 노반, 토사 등의 두께(m)

γ_{t2} : 스치로폴의 단위중량(tf/m³), 표 3 참조

h_2 : 지반면 상부 스치로폴의 두께(m)

D : 굴착심도(m)

WL : 교통하중 영향에 의한 하중(tf/m²), 그림 4 참조

H : 연약압밀토층의 두께(m)

p_o : 시공전 스치로폴 성토저면 위치에 작용하는 응력(tf/m²)

γ_t : 굴착지반토의 단위중량(tf/m³)으로서 수중일 경우는 수중단위중량을 적용한다.

Δp : 스치로폴 성토에 의한 지중증가응력(tf/m²)

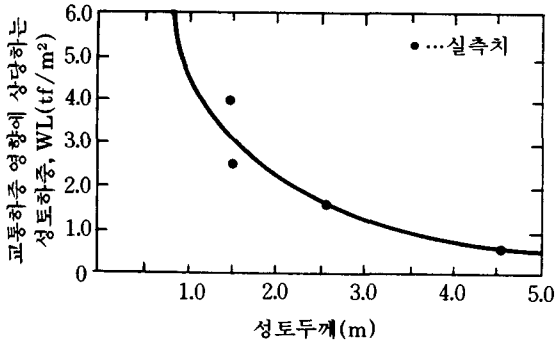


그림 4. 교통상당하중과 성토두께[4]

2) 압밀침하량

스치로폴 성토에 의한 연약지반의 압밀침하량은 식(4), (5) 또는 (6)을 이용하여 구한다.

$$S_c=\frac{e_o-e_1}{1+e_o}\,H \leqq S_a \cdots (4)$$

$$S_c=m_v\,\Delta p\,H \leqq S_a \cdots (5)$$

$$S_c=\frac{C_c}{1+e_o}\log\frac{p_o+\Delta p}{p_o}\,H \leqq S_a \cdots (6)$$

여기서, S_c : 압밀침하량(cm)

e_o : 연약압밀토층의 e−log곡선에서 p_o에 대한 간극비

e_1 : 연약압밀토층의 e−log곡선에서 $(p_o+\Delta p)$에 대한 간극비

H : 연약압밀토층의 두께(cm)

S_a : 허용침하량(cm)

m_v : 체적압축지수(cm²/kgf)

Δp : 스치로폴 성토에 의한 지중증가응력(kgf/cm²)

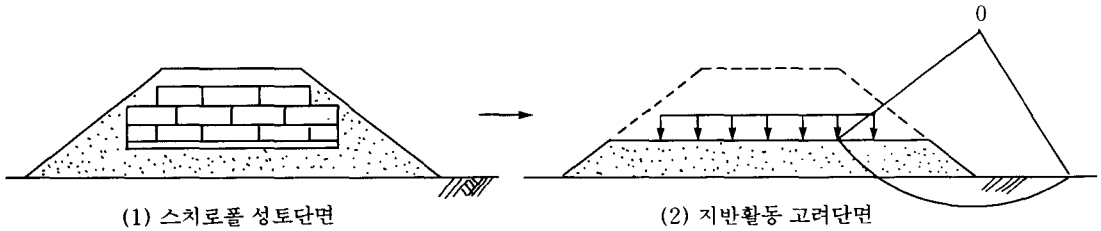
C_c : 압축지수(e−logp 곡선에서 구한다)

p_o : 시공전 압밀토층 중앙부의 유효응력(kgf/cm²)

다. 지반의 안정검토

스치로폴 성토의 안정은 원호활동법으로 검토를 하며, 이때 스치로폴 성토는 작용하중으로 계산을 하고 안전율은 1.2 이상으로 한다. 현재로서는 지반활동시 스치로폴 성토의 거동이 정확히 규명되지 않은 상태이다.

따라서 성토를 포함하는 연약지반의 안정을 검토할 경우 스치로폴은 하중으로 계산하며, 그림 5와 같이 스치로폴 단면에는 활동면을 설정하지 않고 스치로폴 성토 밖을 통과하는 활동면에 대하여 원호활동에 의한 안정을 검토한다. 그러나 지중증가응력이 0이면 안정계산을 생략해도 좋다.



(1) 스치로폴 성토단면　　(2) 지반활동 고려단면

그림 5. 지반의 활동

라. 부력검토

스치로폴은 초경량재이므로 부력에 유의해야 하며, 특히 침수가 예상되는 곳에서는 원칙적으로 스치로폴 성토를 하면 안된다. 지하수위에 따른 부력검토는 예상되는 고수위로 하며, 부력에 대한 안전율은 식 (7)을 이용하여 구한다(그림 6 참조).

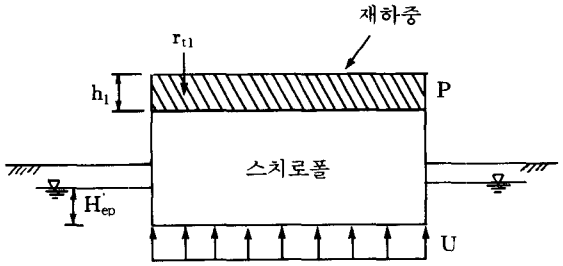


그림 6. 부력에 대한 안정

$$F_s = \frac{P}{U} = \frac{\sum \gamma_{t1} h_1}{\gamma_w H'_{ep}} \geqq 1.2 \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots (7)$$

여기서, F_s : 부력에 대한 안전율

P : 재하중(tf/m²)

U=부력(tf/m²)

γ_{t1} : 스치로폴성토 상부 각층의 단위중량(tf/m³), 표 2 참조

h_1 : 스치로폴성토 상부 각층의 두께(m)

γ_w : 물의 단위중량(tf/m³)

H'_{ep} : 지하수위하 스치로폴의 두께(m)

이때 스치로폴의 자중 및 지반의 마찰력은 안전을 고려하여 무시하며, 만약 부력에 대한 안전율이 1.2보다 적을 경우는 굴착심도의 감소, 성토하중의 증가 및 배수공에 의한 지하수위저하 등의 대책을 강구하여 소요의 안전율($F_s \geqq 1.2$)을 확보해야 한다.

마. 포장

스치로폴성토 상부의 포장설계는 교통하중, 노상강도(路床強度) 및 기상조건을 토대로 그 구조를 결정하며, 스치로폴 및 상부보호층은 그림 7과 같이 노상의 일부로서 취급을 한다. 일반적으로 스치로폴 도로성토의 보호층에는 철근콘크리트 슬래브가 이용되고 있는데 이층의 역할은 지지력보강 보다는 스치로폴 상부 노반의 시공성 확보에 있다고 볼 수 있다.

이 철근콘크리트 슬래브 보호층의 두께는

10cm 정도로서 변형되기 쉬운 스치로폴 위에 설치되므로 균열되기 때문에 포장부분으로 보기는 문제가 많아 슬래브를 노상의 일부로 보아 설계하는 것이 공학적으로 안전하다.(스치로폴+10cm 두께의 철근콘크리트 슬래브)의 변형계수 및 CBR치 기준은 표 4와 같다.

표 4 변형계수 및 CBR치의 기준[4]

제조방법	단위중량 (kgf/m³)	변형계수 (kgf/cm²)	CBR (%)
형내발포법	18	150-200	6 이하
	20	350-500	8 이하
압출발포법	29	600-800	8-12 정도

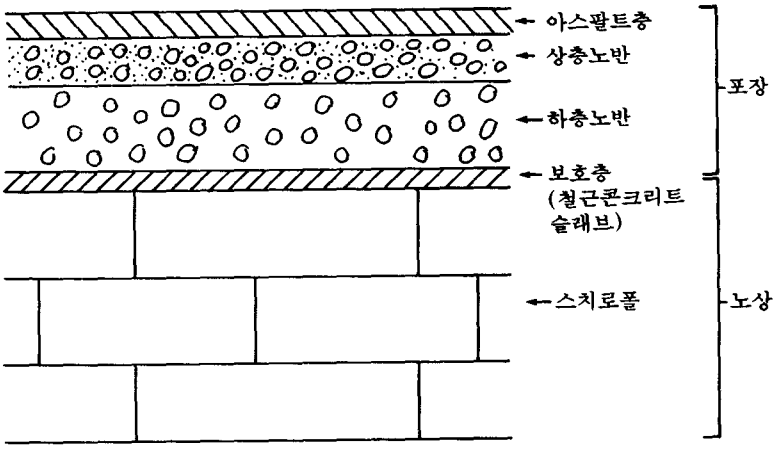


그림 7. 스치로폴 성토에 따른 포장구성

바. 스치로폴 부재의 응력검토

스치로폴 부재의 응력은 스치로폴 상면(철근콘크리트 슬래브 하면) 위치에서 검토를 하며, 작용하는 응력은 포장, 노반 등에 의한 토압 및 활하중으로서 그림 8을 참조, 식 (8), (9) 및 (10)을 이용하여 구한다.

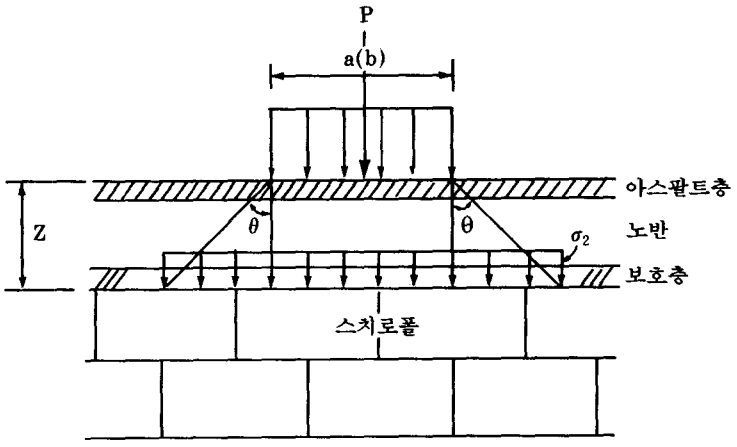


그림 8. 차량 윤하중의 분산

$$\sigma_{z1}=\sum\gamma_{t1}\,h_1 \quad \cdots\cdots(8)$$

$$\sigma_{z2}=\frac{P(1+i)}{(a+2\,Z\tan\theta)(b+2\,Z\tan\theta)} \quad \cdots\cdots(9)$$

$$\sigma_z=\sigma_{z1}+\sigma_{z2}\leqq\sigma_a \quad \cdots\cdots(10)$$

여기서, σ_{z1} : 포장, 노반 등에 의한 토압(tf/m^2)

γ_{t1} : 스치로폴 성토상부 각층의 단위중량(tf/m^3)

h_1 : 스치로폴 성토상부 각층의 두께(m)

σ_{z2} : 활하중에 의한 응력(tf/m^2)

P : 차량 후륜하중(tf)

i : 충격계수(0.3)[4]

a : 차륜의 접지폭(m)

b : 차륜의 접지길이(m)

Z : 노면에서 스치로폴 상면까지의 두께(m)

θ : 하중의 분산각(°)

σ_z : 스치로폴 상면에 작용하는 응력(tf/m^2)

σ_a : 허용압축응력(tf/m^2), 표 3 참조

만약 스치로폴 상면에 작용하는 응력이 그 허용치보다 크면 노반 밑에 성토를 하여 포장 표면으로 부터 스치로폴 상면까지의 두께를 크게 하거나 허용압축응력이 큰 스치로폴로 변경 또는 콘크리트 슬래브의 두께를 두껍게 설계를 한다.

3. 결 언

노르웨이에서는 스치로폴 경량성토공법을 시공한 현장에서 스치로폴 시료를 채취하여 단위중량, 흡수량 및 일축압축강도 등을 조사, 장기적인 연구를 계속하고 있으며, 우리나라에서도 스치로폴 성토공법에 관한 심포지움 개최와 아울러 도로공사에서는 도로성토에 스치로폴을 시험성토하여 이 공법에 대한 연구를 하고 있다.

현재로서는 스치로폴 가격이 흙재료보다 훨씬 비싸서 비경제적이므로 본격적으로 우리나라에서 이 공법을 적용하기에는 아직 이르지만 구조물의 설치조건 및 특성에 따라서는 이 공법을 이용해야만 하는 경우도 있다.

따라서 제품회사는 경제적으로 설계시공을 할 수 있는 스치로폴 생산에 역점을 두고 각 연구기관은 더욱 관심을 가지고 산학협동으로 토목재료로서 우리나라 제품 스치로폴의 허용응력, 물성시험방법 등의 연구를 진행해야 될 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 정형식(1994) : "EPS 이용 성토공법의 개요", 발포폴리스티렌(EPS) 이용 성토공법 국제심포지엄 논문집, 한국지반공학회, pp. 5-31.
2. 장용채, 허윤, 김홍종, 최영철, 유병옥(1994) : "한국의 EPS 성토공법 시공사례연구", 발포폴리스티렌(EPS) 이용 성토공법 국제심포지엄 논문집, 한국지반공학회, pp. 81-103.
3. 한국응용통계연구소 편(1994) : "보온단열재", 월간 유통물가통계, 4월호, pp. 272.
4. 日本 建設省 土木研究所 編(1992) : "發布スチロールを用いた設計・施工のマニュアル"
5. Thomas A. Coleman(1974) : "Polystylene Form is Competitive, Lightweight Fill", Civil Engineering, ASCE, 14-2, pp. 68-69.
6. T. E. Frydenlund(1987) : "Soft Ground Problems", Plastic Form in Road Embankments, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo pp. 7-12.
7. G. Refsdad(1987) : "EPS-design considerations", Plastic Form in Road Embankments, Norwegian Road Research Laboratory, Oslo. pp. 17-20.
8. 福住隆二(1986) : "發泡スチロール土木工法", 日本土木學會論文集, 373號, pp. 148-150.
9. 能等繁幸(1986) : "發泡ポリスチレンを用いた盛土工法", 土木技術, 41-3, pp. 30-34.
10. 류기송(1989) : "발포폴리스티렌(Expanded Polystyrene)의 물성과 이용", 한국농공학회지, 31-1, pp. 9-12.

◇ Page 56으로 계속 ◇