

EPS의 공학적 특성 The Engineering Characteristics of Expanded Polystyrene

홍 성 완
한국건설기술연구원
지반연구실장

Sung-Wan Hong
Head of Geot. Engng. Div.
Korea Institute of Construction Technology

ABSTRACT

The engineering characteristics of expanded polystyrene are compiled and summarized. The characteristics are divided into physical properties, mechanical properties and chemical properties. Although expanded polystyrene has been produced in Korea for over 20 years, little results of laboratory or field tests on the mechanical properties of expanded polystyrene is available in Korea. Therefore, it is regrettable that only those test results from foreign countries have to be introduced here.

1. 서론

토목기술과 화학기술이 결혼하여 1972년 노르웨이의 오슬로 동쪽 15km 지점, 159번 도로 상에 있는 후름(Flom)교 교대 뒤의 연약지반 위에 발포 폴리스티렌(EPS: Expanded Polystyrene)성토공법이 탄생하였다. 이때 산파는 노르웨이 국립도로연구소(NRRL: Norwegian Road Research Laboratory)였다.

이 현장은 3m 두께의 이탄(자연함수비~500%)이 10m 두께의 연약 예민점토(자연함수비~35~58%)위에 있어 그림 1(a)에 보인 것처럼 년평균 10cm씩 20년간 2m나 침하한 곳인데 EPS블럭을 1m 성토하고 그 위에 0.5m 두께의 기층과 아스팔트 포장을 시공한 후에는 년평균 1cm 정도로 침하량이 감소하였다¹⁾. 시공후 7년에 현장에서 EPS 자체의 변형을 측정하였는데 그림 1(b)에 보인 바와 같이 시공두께의 1% 정도가 자체변형이었으며 이것도 시공후 바로 정지되었다.

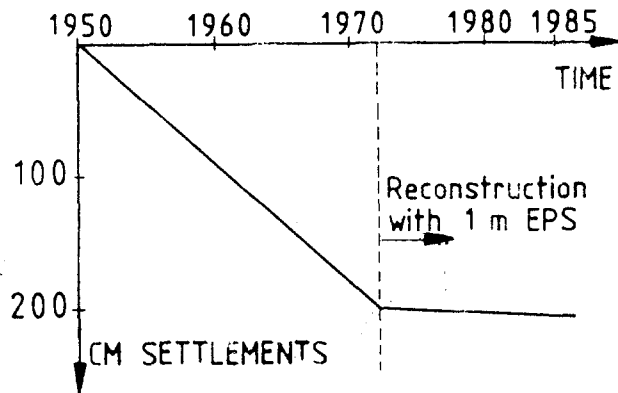
이와 같이 EPS공법이란 대형의 발포 폴리스티렌 블럭을 성토재나 뒷채움재로 사용하여 재료의 장점인 초경량성, 내압축성, 자립성, 내수성과 시공성 등을 유효하게 활용하는 하중 또는 토압 경감대책을 말한다²⁾.

노르웨이에서는 그동안 150개 도로현장에 300,000㎡ 정도가 시공되었으며³⁾ 일본에서는 '92년까지 687개 현장에 450,000㎡가 시공되었다⁴⁾.

한국공업규격 KS M 3808^{5),6)}에는 발포 폴리스티렌을 그 제조과정에 따라 비드법과 압출법

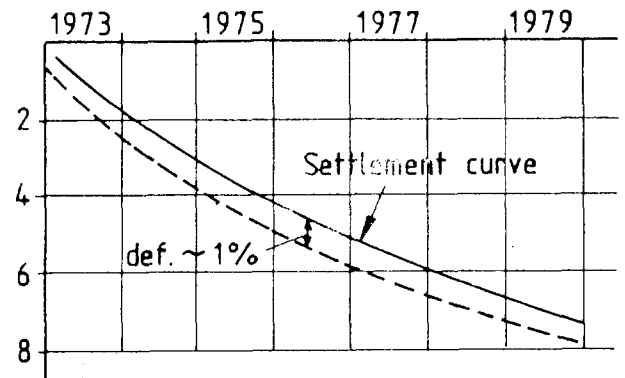
으로 구분하는데 비드법은 형내 발포법(EPS; Expanded Polystyrene)으로 불리기도 하며 압출

Flom bridge



(a)

Deformations of EPS



(b)

그림 1. 프롬(Flom)교의 침하

법은 압출 발포법(XPS; Extruded Polystyrene)으로도 불리운다.

성토용으로는 비드법에 의한 EPS가 주로 사용되므로 여기서는 주로 비드법에 의한 EPS의 공학적 특성을 다루고자 한다.

EPS의 일반적 특성은 참고문헌 7의 표 2.1에 제시되었다. 우리나라 공업규격⁽⁵⁾은 보온재에 대한 것으로 토목공사용 규격이 아니지만 표 1과 같은 특성이 규정되어 있다.

표 1. 비드법 폴리스티렌 보온재

종 류	밀도(gf/cm ³)	열전도율(kcal/m·h·°C)	굴곡강도(kgf/cm ²)	흡수율(용적%)
보온판 1호	0.030 이상	0.030 이하	3.5 이상	1 이하
보온판 2호	0.025 이상	0.031 이하	3.0 이상	1 이하
보온판 3호	0.020 이상	0.032 이하	2.5 이상	1 이하
보온판 4호	0.015 이상	0.034 이하	2.0 이상	1.5 이하

미국은 ASTM C578에 다섯 종류의 형태가 규정되어 있는데 그 공칭 밀도는 표 2와 같고 물리적 특성은 표 3과 같다.

표 2. ASTM C578-92에 규정된 EPS의 표준밀도

형태	표준밀도(kgf/㎡)	허용최소밀도(kgf/㎡)
X I	12	12
I	16	15
VIII	20	18
II	24	22
IX	32	29

표 3. ASTM C 578-92에 따른 EPS의 물리적 특성

Physical Properties of Perform EPS Geofoam ASTM C 578 Classification						
Property	ASTM Test	Type XI	Type I	Type VIII	Type II	Type IX
Density kg/m ³ (lbs/ft ³) Nominal Minimum	C 303/D 1622	12 (0.75) 11 (0.70)	16 (1.00) 15 (0.90)	20 (1.25) 18 (1.15)	24 (1.50) 22 (1.35)	32 (2.00) 29 (1.80)
Thermal Resistance 25.4 mm (1.00 in) thickness minimum k·m ² /W (F·ft ² ·h/BTU) @ 4.4°C (40°F) @ 23.9°C (75°F)	C 177/C 518	0.58 (3.3) 0.55 (3.1)	0.70 (4.0) 0.63 (3.6)	0.74 (4.2) 0.68 (3.8)	0.77 (4.4) 0.70 (4.0)	0.81 (4.6) 0.74 (4.2)
Compressive Resistance at yield or 10% deformation Min. kPa (psi)	C 165/D 1621	35 (5.0)	69 (10)	90 (13)	104 (15)	173 (25)
Flexural Strength Min. kPa (psi)	C 203	70 (10)	173 (25)	208 (30)	276 (40)	345 (50)
Water Absorption by total immersion Max. Vol. %	C 272	4.0	4.0	3.0	3.0	2.0
Dimensional Stability (change in directions) Max. %	D 2126	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
Buoyancy Force kg/m ³ (lbs/ft ³)	—	961 (60)	961 (60)	961 (60)	961 (60)	961 (60)
Modulus of Elasticity (Young's Modulus) kPa (psi)	D 1621	3103 (450)	4655 (675)	5862 (850)	7935 (1150)	10344 (1500)
Stress kPa (psi) @ .5% Strain @ 1% Strain	D 1621	17 (2.5) 35 (5.0)	24 (3.5) 48 (7.0)	29 (4.3) 58 (8.5)	41 (6) 82 (12)	55 (8) 110 (16)
Poisson's Ratio	—	.05	.05	.05	.05	.05

한편, 일본에는 표 4와 같은 종류가 있다⁽⁸⁾.

표 4. 비드법에 의한 EPS의 종류와 밀도

종별	발포배율	밀도(kgf/m ³)	비고
D-30	33.3	30±2.0	
D-25	40.0	25±1.5	
D-20	50.0	20±1.5, 20-1.0	
D-16	62.5	16±1.0	
D-12	83.3	12±1.0	

2. 물리적 특성

2.1 규격

노르웨이에서는 EPS의 표준블럭이 표 5에 보인 규격을 갖고 있다⁽⁹⁾.

표 5. EPS 블럭의 표준규격(노르웨이)

높이(m)	폭(m)	길이(m)	부피(m ³)	무게(kgf)
0.5	1.0	3.0	1.5	30
0.5	1.0	5.0	2.5	50
0.6	1.2	2.5	1.8	36
0.6	1.0	2.5	1.5	30
0.5	1.0	2.0	1.0	20

우리나라는 토목용으로 사용된 사례가 일천하여 아직 표준규격이 정해져 있지 않으나 전술한 보온용 판재는 두께 25mm에서 100mm까지의 규격이 규정되어 있다⁽⁵⁾.

노르웨이의 EPS 블럭은 그 최소치수(두께)가 0.5m 이상으로 되어있으며 모서리는 직각이어야 한다. 이 규격의 정확성은 EPS 블럭 적층이 단차없이 안정되게 시공되기에 중요하며 규격의 허용오차는 ±1.0%이다. 또한, 3m 길이의 직선 정규로 측정하여 5mm 이하의 요철이 허용된다^{(9),(10)}.

EPS블럭을 처음 올려놓은 지반바닥의 면고르기(levelling course)의 정밀성은 3m 길이의 직선 정규로 측정하여 10mm 이하의 요철이 허용된다⁽¹¹⁾.

2.2 밀도

지반공학에서는 단위중량(unit weight) 또는 단위 체적 중량이라는 용어를 사용하지만

EPS 업계에서는 밀도(density)를 사용한다. EPS의 조성은 표 6에 보인 것처럼 중량으로는 폴리스티렌이 97% 정도를 차지하지만 체적으로는 공기가 대부분이다.

표 4에 보인대로 EPS는 발포배율에 따라 밀도를 조절할 수 있으며 0.012 내지 0.030 tf/㎡으로 제작되지만 표준밀도는 0.020 tf/㎡이다. 이는 일반 토사의 1/100 수준이며 다른 경량 성토재료의 1/50 수준이다. 그림 2에 콘크리트 재료와 성토재료의 밀도와 일축압축 강도를 비교하였는데⁽¹²⁾ EPS는 밀도의 관점에서 독특한 특성을 보이고 있다.

EPS는 가볍기 때문에 블럭 한개를 한사람, 또는 두사람이 쉽게 인력으로 운반할 수 있으며 트레일러 한대로 한꺼번에 100㎡까지 운반 가능하다. 또한, 톱(chain saw), 칼, 가열철선(heated wire) 등으로 쉽게 절단가공할 수 있다.

표 6. EPS의 조성

물 질 명	체 적 비(%)	중 량 비(%)
폴리스티렌	2.0 - 3.0	96.0 - 97.0
공 기	97.0 - 98.0	0
발 포 제	0	2.0 - 3.0
난 연 제	0	0.8 - 1.0
난연 조제	0	0.1 - 0.3
합 계	100.0	100.0

2.3 흡수성

폴리스티렌은 원래 혐수성(hydrophobic)이어서 물을 잘 흡수하지는 않지만⁽¹³⁾ 지하수 위 아래에 설치하면 발포입자의 용착면에 있는 틈새로 물이 침투할 수 있어 밀도가 증가한다. 흡수량의 대부분은 침수후 1 - 2일 사이에 대부분 발생하며 그 이후는 흡수량이 서서히 증가하지만 100일 이후에는 그 증가량이 미미하다.

흡수량은 체적으로 5 - 6%까지 증가하는 것으로 알려져 있는데 6% 흡수량의 경우 $1,000\text{kgf}/\text{m}^3 \times 0.06 = 60\text{ kgf}/\text{m}^3$ 이므로 EPS 1㎡의 당초 중량이 20 kgf였다면 수침시 80 kgf/㎡이 되는 셈이다. 따라서 설계시 침하량 산출과 안정계산에서는 EPS의 설계 단위체적 중량을 100 kgf/㎡으로 보고 양력 계산시에는 20 kgf/㎡으로 보는 것이 관례이다.

현장에 포설한 EPS의 함수비를 측정해 본 결과 EPS 내의 모관상승고(capillary rise)는 크지 않아서 20cm 정도인 것으로 알려졌으며 설계시 고려할 흡수량은 지하수위 위에서는 체적으로 1% 미만(그림 3(a) 참조), 계절적으로 침수되는 경우에는 4%(그림 3(b) 참조), 그리고 영구히 침수되는 경우에는 9%(그림 3(c)참조)까지를 계산한다⁽¹⁾.

한편, 스웨덴의 시험도로 현장에서 동상방지용으로 설치한 EPS 블럭을 채취하여 흡수량을 측정한 결과에 의하면⁽¹⁴⁾ 그림 4에 보인 바와 같이 EPS 부설 2.5년만에 체적으로 10%, 5년만에는 무려 16%에 육박하고 있어 시공시 EPS의 품질관리와 현장여건에 대한 배려가 필

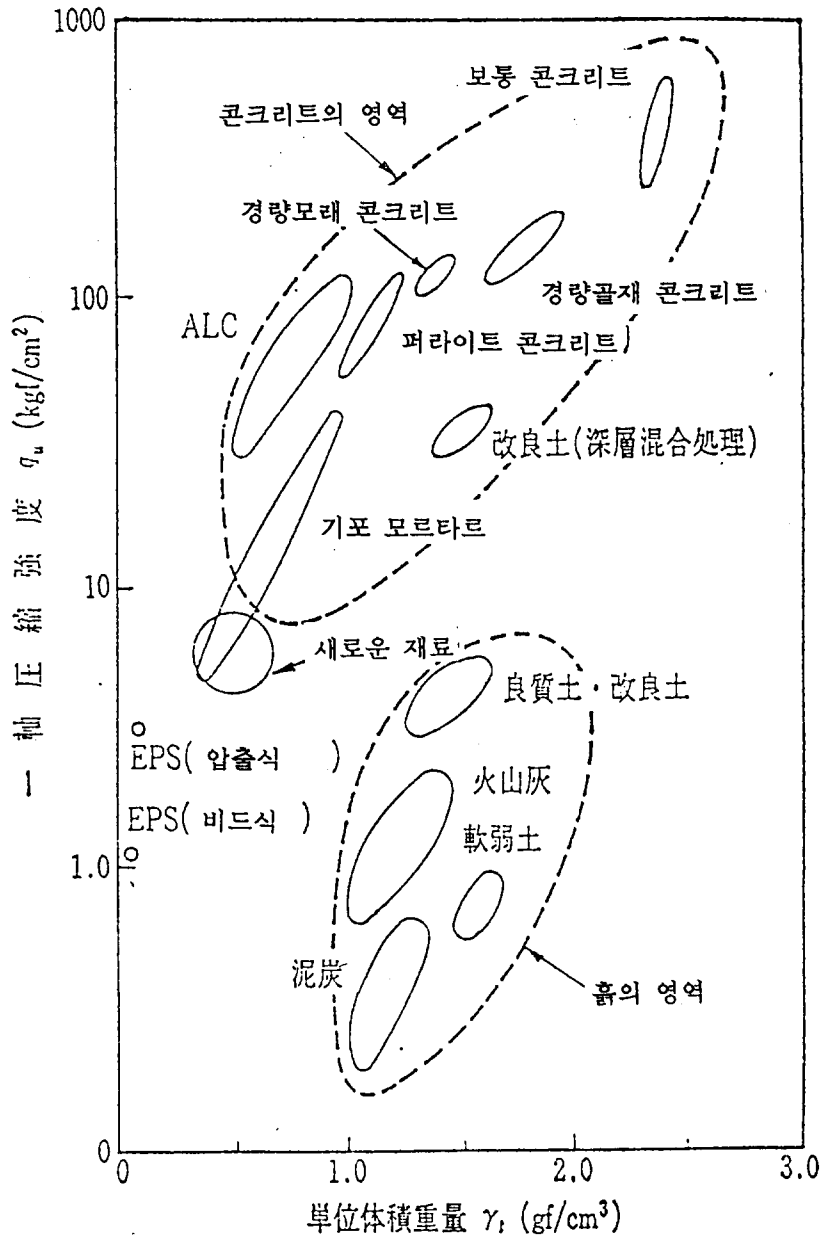
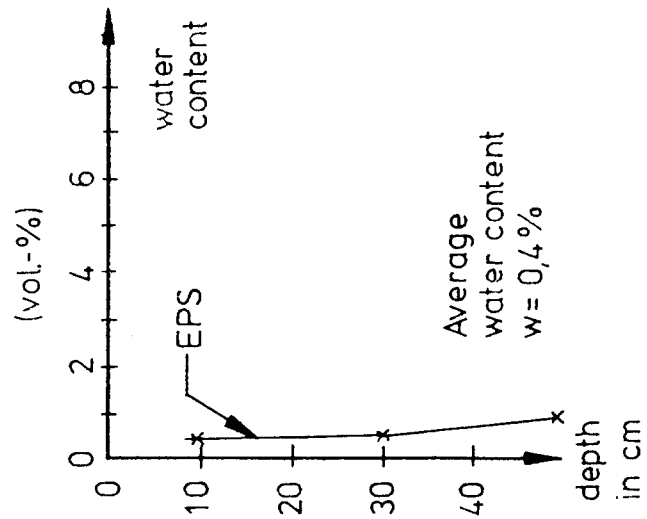


그림 2. 콘크리트 재료와 성토재료의 밀도와 일축압축강도

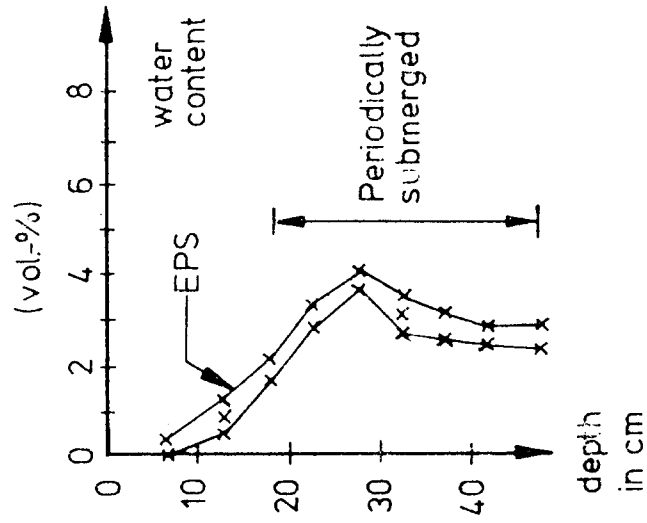
요한 것으로 판단된다.

2.4 열적특성

1960년대에는 EPS 박판이 도로의 동상(frost heave) 방지용 단열재로 노르웨이, 스웨덴, 미국, 캐나다 등지에서 사용되기 시작하였다. 표1에 보인 바와 같이 EPS의 열전도율은 0.030kcal/m.h.℃ 이하이며 캐나다에서의 경험에 의하면 도로에 시공한 후 5년만에 수거하여 시험한 결과 구조적 변화나 열적특성의 변화가 거의 없었다.⁽¹⁵⁾ 다만 시간이 경과함에 따라 흡수량이 증가하면 열전도율도 증가하는 경향을 보였다.⁽¹⁴⁾

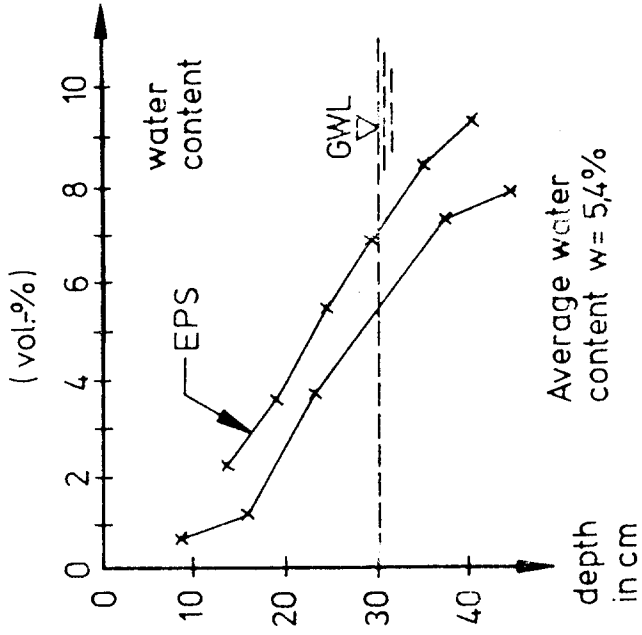


(a) 지하수위 위에 설치한 경우



(b) 계절적으로 침수되는 경우

그림 3. EPS의 흡수량



(c) 지하수위 아래 설치한 경우

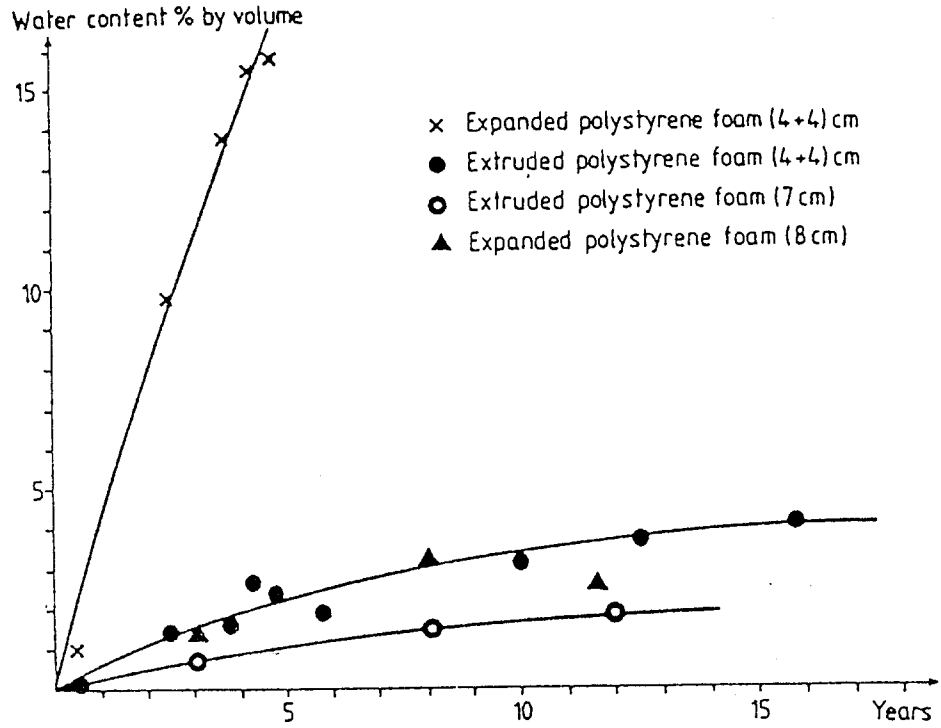


그림 4. EPS의 흡수량(스웨덴의 시험도로)

단열재로는 보통 비드법에 의한 EPS보다 압출법에 의한 EPS(XPS)가 그 우수한 열적특성과 내구성때문에 주로 사용된다. 비드법의 EPS를 사용할 경우 같은 단열성능을 갖게하려면 XPS보다 그 두께를 30% 내지 50% 두껍게 해야 한다고 한다. 단열재가 노면에 너무 가까우면 초겨울 맑은 날씨에 기온이 영하로 내려갈때 노면 결빙(icing)이 발생하기 쉬우므로 보통 50cm 이상의 깊이에 설치한다.⁽¹⁶⁾

3. 역학적 특성

3.1 시료채취

노르웨이에서는 표7과 같이 EPS 성토량에 따라 시험할 EPS 블럭의 숫자가 정해지고 각 블럭에서는 그림 5에 보인것처럼 3개소에서 샘플을 채취한다. 채취한 샘플에서는 일축압축 강도시험용 50mm x 50mm x 50mm 시편을 두개씩 제작한다.⁹⁾

표 7. 성토량에 따른 시험용 EPS 블럭 갯수

성토량 (m ³)	시험할 EPS 블럭 최소 갯수
500 미만	3
500 - 1,000	4
1,000 이상	5

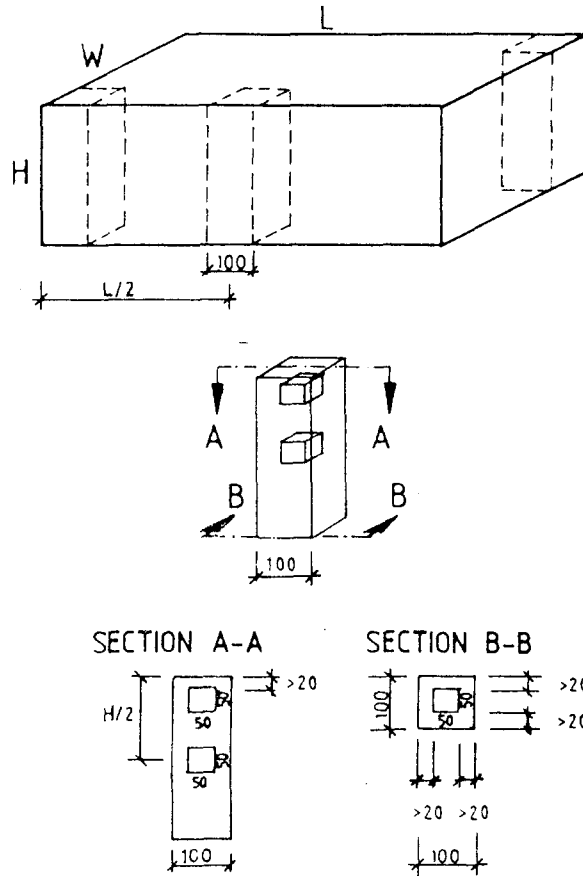


그림 5 EPS 블럭에서 시험용 시편의 채취방법

3.2 압축특성

일축압축강도

그림 6은 밀도 21kgf/m^3 의 EPS에 비교적 급속히 재하하여(10%/mm) 일축압축시험을 시행한 결과이다.⁽¹³⁾

압축응력 900 kPa에서 압축변형이 90%까지 발생하였으며 전형적인 S형 곡선형태를 보여주고 있다.⁽¹³⁾ EPS의 일축압축강도를 말할때 ASTM은 10% 변형의 압축응력을 택하고 있고 노르웨이나 일본은 5% 변형의 압축응력을 취한다.

일축압축 강도용 시편의 크기는 보통 $50\text{mm} \times 50\text{mm} \times 50\text{mm}$ 의 입방체이며 그림 7에 보인것처럼 응력-변형관계가 탄소성(elasto-plastic)이며 변형경화(strain hardening) 특성을 보여준다. EPS의 밀도가 커짐에 따라 압축강도가 증가하지만 항복점 변형은 거의 변하지 않는다. 그림에서 축변형이 1%때까지는 탄성영역내에 있으나 축변형이 5%면 소성영역에 들어감을 알 수 있다. 표 8에 EPS의 일축압축강도를 보였다⁽⁸⁾.

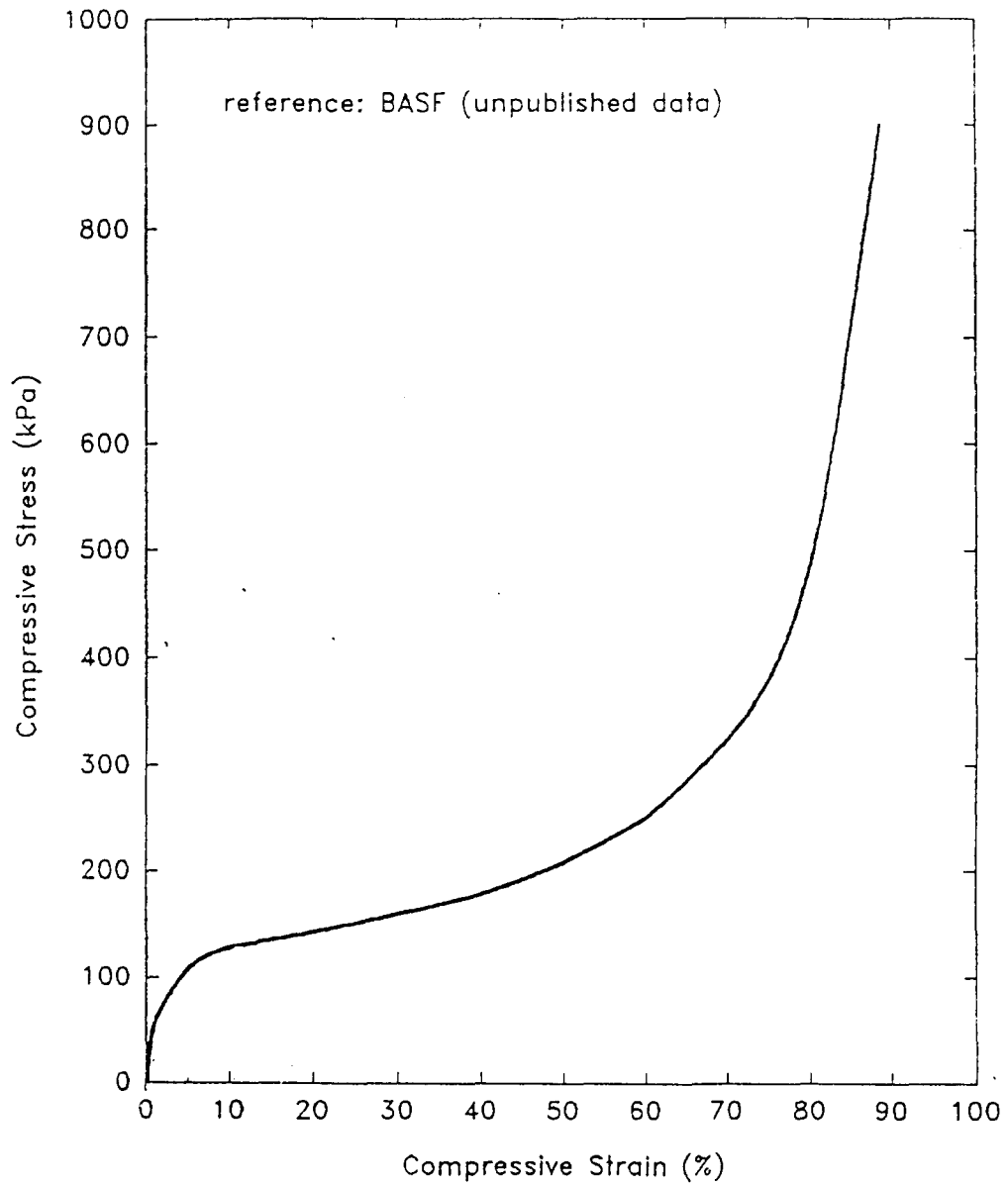


그림 6. EPS의 응력-변형 관계곡선

표 8. EPS의 일축압축강도

항목	단위	EPS의 등급					비고
		D - 30	D - 25	D - 20	D - 16	D - 12	
밀도	kgf/m ³	30	25	20	16	12	
1%변형시 압축응력	tf/m ²	9	7	5	3.5	2	허용압축 응력
5%변형시 압축응력	tf/m ²	18	14	10	7	4	품질관리시 압축강도

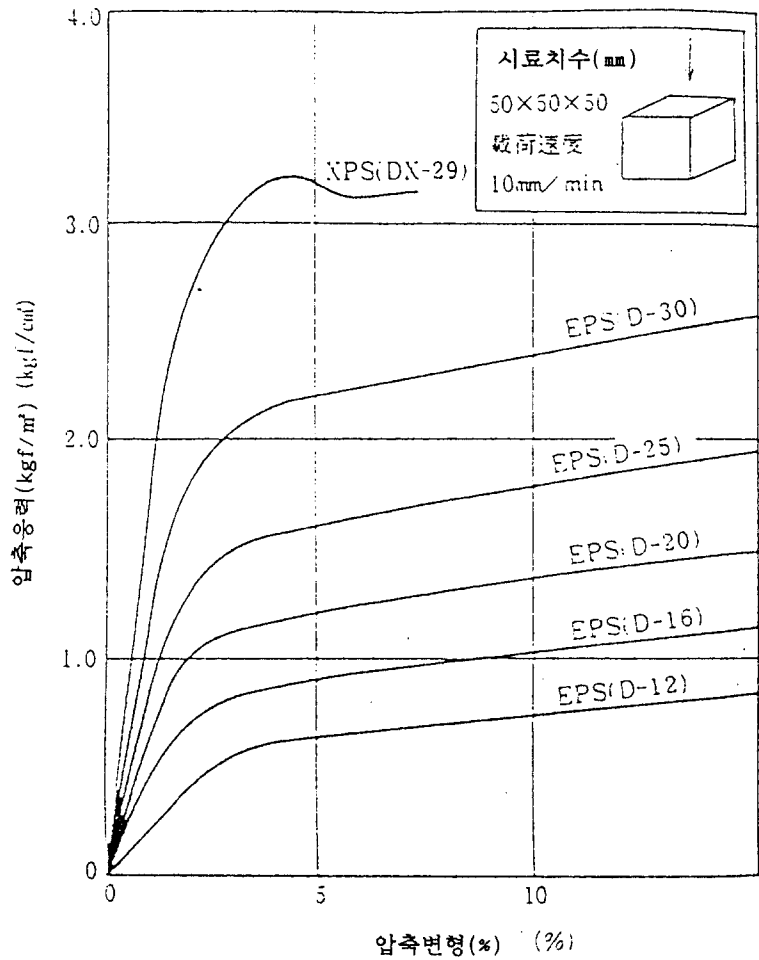


그림 7. 일축압축응력과 변형도 ¹⁷⁾

노르웨이에서는 일축압축시험을 시행하여 5%변형때의 압축강도 평균이 $100\text{kN/m}^2(10\text{tf/m}^2)$ 이상이어야 하고 1회 측정치가 최소 $80\text{kN/m}^2(8\text{tf/m}^2)$ 이상이어야 성토용으로 사용한다. ⁽⁶⁾ 일축압축강도의 최소치는 EPS 위에 시공한 포장의 허용침하량을 근거로 설정하였다 한다.

일축압축강도는 그림 8에 보인 바와 같이 밀도와 비례관계에 있다. ⁽⁸⁾

밀도, $\gamma(\text{kgf/m}^3)$ 와 일축압축강도, $q(\text{tf/m}^2)$ 사이에는 1% 변형 압축강도의 경우

$$q_1 = 0.4\gamma - 3.0 \dots\dots\dots(1)$$

그리고, 5% 변형 압축강도의 경우

$$q_5 = 0.8\gamma - 6.0 \dots\dots\dots(2)$$

정도의 관계가 있음을 알 수 있다.

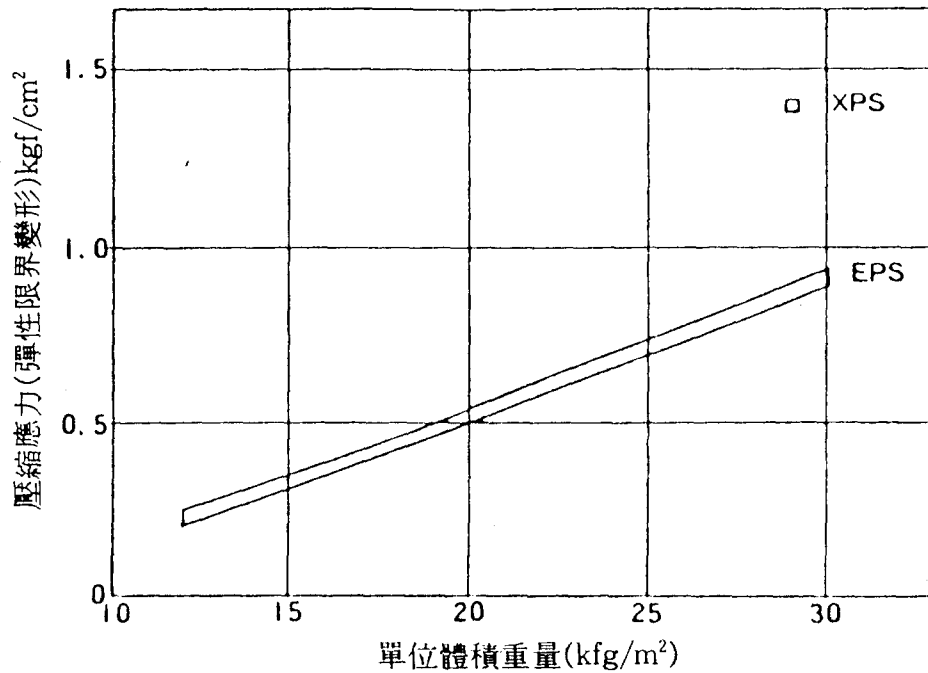


그림 8 밀도와 일축압축강도의 관계

삼축압축강도

그림 9에 삼축압축시험 결과를 보였는데 응력-변형관계는 근본적으로 일축압축시험에서와 같으며 구속응력 (confining pressure)이 커지면 전단강도가 저하하는 경향을 보인다. 체적변형(volumetric strain)은 축방향 변형에 선형비례(linearly proportional)한다.⁽⁸⁾

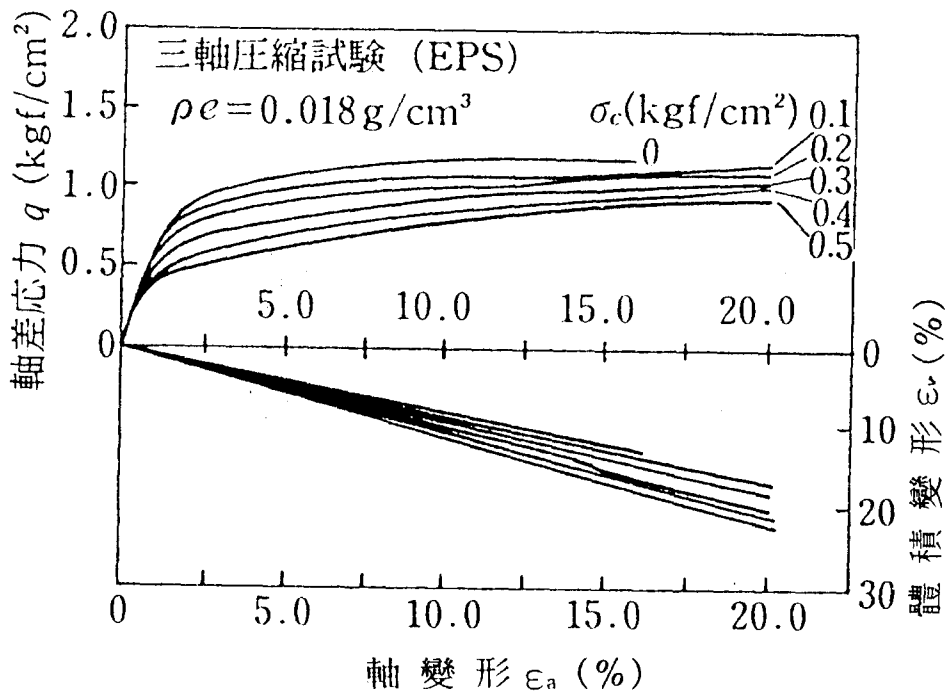


그림 9. 삼축압축시험 결과

축변형이 5% 일때의 응력을 기준으로 Mohr 응력원을 그리면 그림 10과 같이 되므로⁽⁸⁾ 야마노우찌교수⁽¹⁹⁾ 는 EPS의 항복조건을 그림 11과 같이 제시하였다.

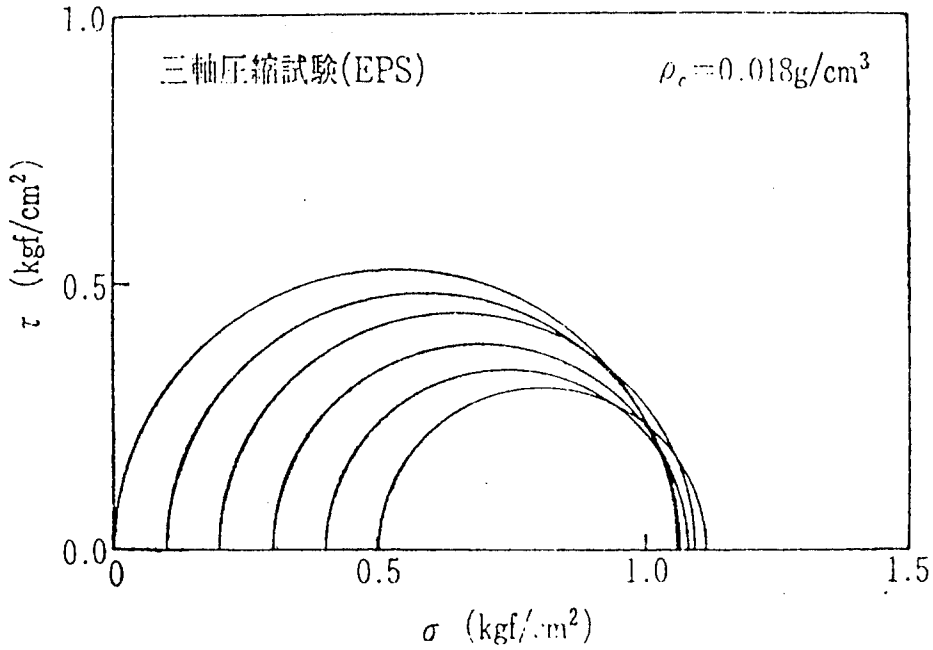


그림 10. 축변형 5% 때의 Mohr 응력원

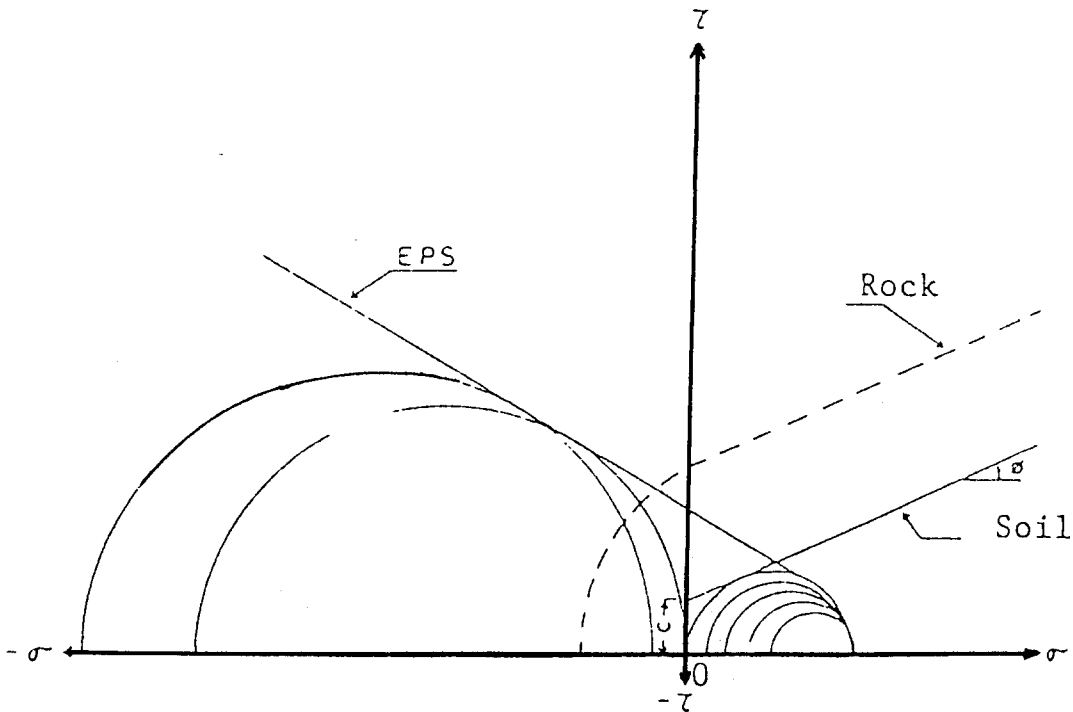


그림 11. 토사재료와 EPS의 항복조건 비교.⁽¹⁹⁾

즉, 근본적으로 압축저항재인 흙이나 암석에 비하여 EPS는 인장 저항재이므로 흙과 암석이 그림 11에 보인 것처럼 제 1 상한에 그려지는데 비하여 EPS는 제 2 상한에 그려진다. 도로성토에 EPS를 사용하는 것은 인장저항재의 압축저항특성을 활용하는 격이라는 것이다.⁽¹⁹⁾

변형계수

그림 12는 일축압축 시험시의 응력-변형곡선에서 구한 초기 접선변형계수(initial tangent deformation modulus)와 밀도와의 관계를 나타내는데 EPS의 변형계수는 밀도에

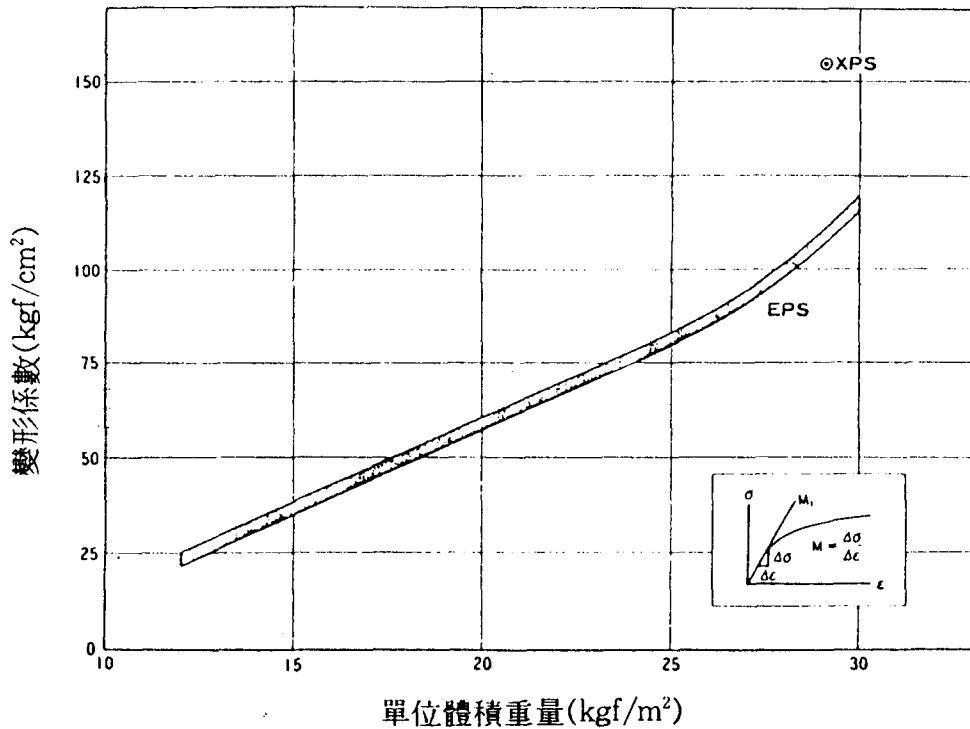


그림 12. 변형계수와 밀도

거의 비례함을 알 수 있다⁽⁸⁾. 밀도, γ (kgf/m³)과 변형계수, E (kgf/cm²)사이에는 대체로

$$E = 4.6\gamma - 32 \dots\dots\dots (3)$$

의 관계가 있다.

한편, 그림 13은 스웨덴 지반기술연구소(SGI)의 실험결과인데 역시

$$E = 3.8\gamma - 20 \dots\dots\dots (4)$$

정도로 나타낼 수 있어 식 (3)과 비교된다.

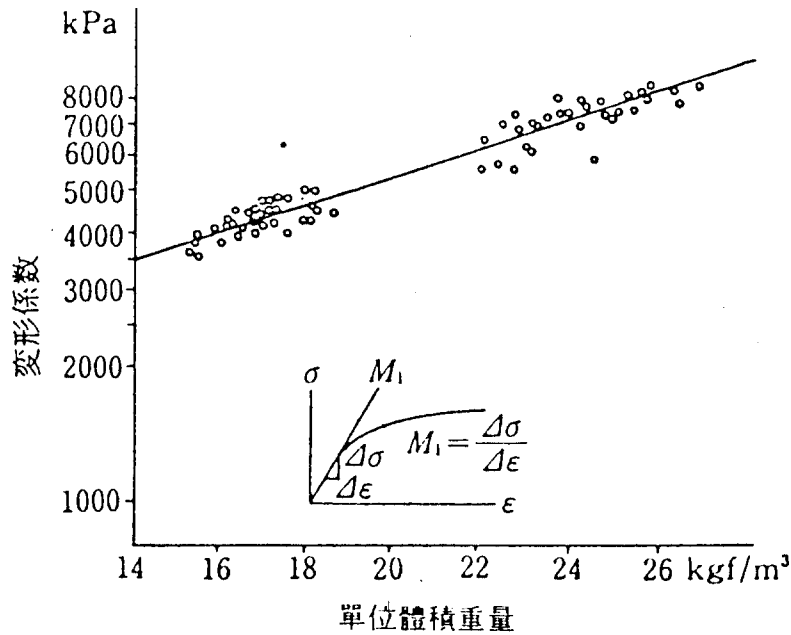
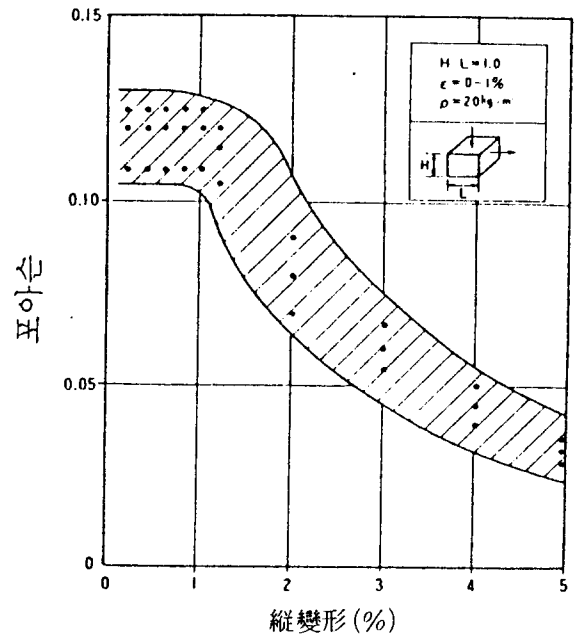
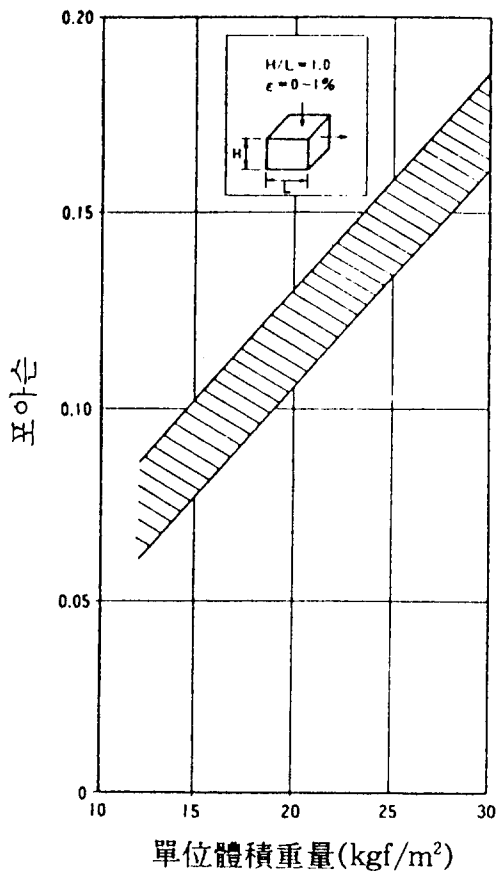


그림 13. 변형계수와 밀도(SGI 시험성과)

포아슨비

EPS의 포아슨비(Poisson's ratio)는 0.12 정도로 작아서 실험하여 측정하기도 쉽지 않다. 포아슨비는 그림 14(a)에 보인 것처럼 밀도가 증가하면 증가한다. 또한 그림 14(b)에 보인 것처럼 축변형이 1% 이내(탄성영역)에서는 0.12 정도로 일정하지만 그 이상의 변형(소성영역)에서는 점차로 감소하여 0에 근접함을 알 수 있다.

노르웨이에서 교량(Lambertseterveien교) 교량 배면에 EPS로 뒷채움할 때 횡방향 변위를 점검하기 위해 교대 배면과 EPS 블럭사이에 작은 틈을 두고 시공하였는데 7년 후 관측한 결과 그 틈이 그대로 있어서 교대 배면에 미치는 토압이 없다는 결론을 얻었다.⁽¹⁾ 따라서 노르웨이에서의 표준설계방법은 그림 15에 보인 것처럼 교대 배면에 EPS로 인한 균등분포의 수평응력을 10kN/m^2 로 가정하는 것이라 한다.⁽¹⁾



(a)

(b)

그림 14. 포아슨비와 밀도, 변형과의 관계

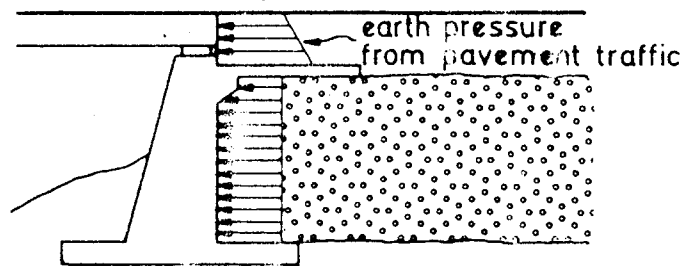


그림 15. EPS로 인한 교대 배면의 토압(설계)

일본 건설성 토목연구소에서는 옹벽 배면에 작용하는 토압이 EPS 성토체의 설치형상과 외력(토사부로 부터의 토압과 상재하중)에 의해 어떻게 변화하는가를 파악하기 위하여 표 9에 보인 다섯 경우에 대해 대형 토조시험을 시행하였다.

이 실험에서 얻은 결과는 대체로 다음과 같았다.⁽²⁰⁾

- 1) EPS를 옹벽등의 구조물 뒷채움재로 사용하면 토사를 사용할 때 보다 토압이 감소한다.
- 2) EPS를 2m 폭으로 직립하여 옹벽배면에 설치한 경우(케이스 A)의 옹벽배면의 토압은 EPS 배면에 작용하는 토압의 50% 수준이다.
- 3) EPS 블럭을 저면폭 2m, 천단폭 6m의 역사다리꼴로 설치한 경우(케이스 B)에 토압은 대폭적으로 감소(0.2~0.3tf/m²)한다.
- 4) EPS 블럭을 저면폭 5.5m, 천단폭 1m의 사다리꼴로 설치하면 (케이스 C) 벽면에 작용하는 토압이 대폭적으로 감소한다.
- 5) EPS 상부에 상재하중을 작용시키면 벽면에 미치는 수평토압은 상재하중의 10% 수준이다.

한편, Bang⁽²¹⁾은 케이스 B의 경우에 옹벽이 가장 유리하다고 평가하였다.

3.3 마찰특성

노르웨이에서는 설계시 EPS 블럭과 EPS 블럭사이, 또는 EPS 블럭과 사질토 사이의 내부마찰각을 35° 또는 마찰계수를 0.7로 본다.¹⁰⁾

일본에서의 실험결과는 EPS와 EPS 상호간의 마찰계수는 0.63으로 일정하고 EPS와 모르타르 사이의 마찰계수도 0.66으로 일정한 반면 EPS와 모래 사이의 마찰계수는 0.55 정도이지만 모래의 상태에 따라 표 10과 같다고 보고되었다.⁸⁾

표 10. 모래의 상태에 따른 EPS와 모래사이의 마찰계수

건조한 모래	조밀	0.58
	느슨	0.46
습윤상태의 모래	조밀	0.52
	느슨	0.25

즉, 모래가 조밀하고 건조할수록 마찰계수가 커진다.

표 9. 대형 응벽 실험의 케이스 일람표

項目	케이스 A	케이스 B(1)	케이스 B(2)	케이스 B(3)	케이스 C
模 式 圖					
E P S 材	天端2m, 底面2m 100.6m ³	天端6m, 底面2m 200.7m ³	天端6m, 底面2m 200.7m ³	天端6m, 底面2m 200.7m ³	天端1m, 底面5.5m 160.0m ³
料	$\gamma = 1.459\text{tf/m}^3$ 501.2m ³ w = 8.3%	$\gamma = 1.457\text{tf/m}^3$ 401.7m ³ w = 8.4%	$\gamma = 1.472\text{tf/m}^3$ 437.3m ³ w = 8.1%	$\gamma = 1.464\text{tf/m}^3$ 472.4m ³ w = 8.2%	$\gamma = 1.492\text{tf/m}^3$ 442.4m ³ w = 8.4%

3.4 동역학적 특성

EPS 성토체는 도로의 노상이나 철도의 노반의 일부가 되는 경우가 많으므로 교통에 의한 반복하중을 받게되고 이때 EPS의 동역학적 특성이 관심의 대상이 된다.

정적 반복 재하시의 거동

그림 16은 정적 반복 일축압축시험의 결과로서 앞서 보인 단순재하시의 응력-변형관계와 유사함을 알 수 있다.

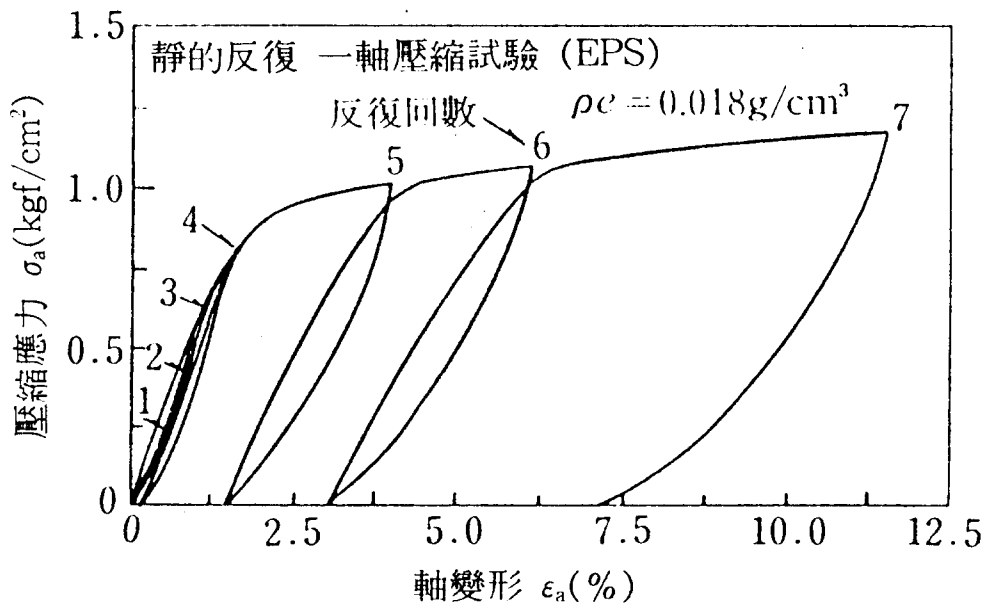


그림 16. 정적 반복 일축압축시험결과

동적 반복 재하시험

그림 17은 50cm × 50cm × 50cm의 대형 EPS 시편에 대해 동적 반복 재하시험을 실시한 결과로서 재하비, 즉(최대반복하중강도)/(5% 변형시 일축압축강도)와 항복반복 회수를 보인 것으로 재하비가 0.4 이하이면 20만회 이상을 변형이 거의 없이 지탱할 수 있음을 보여준다.

또다른 시험결과에 의하면 재하비가 0.4 이하인 경우, 반복재하 회수가 100만회 이상이 되어도 잔류변형이 축적되지 않는것으로 보고되었다⁽⁸⁾. 한편, 노르웨이에서는 재하비가 0.8 이하인 경우 EPS가 무제한의 반복재하 회수를 견딜 수 있다고 보고하고 있다^{(1), (10)}.

182cm × 90cm × 40cm의 EPS 블럭표면에 충격을 가하고 블럭내부를 전파하는 탄성과 속도를 측정된 결과는⁽⁸⁾ 압축파 속도 $V_p = 714\text{m/sec}$ 와 전단파 속도, $V_s = 484\text{m/sec}$ 를 얻었으며, 이로부터 탄성변형계수, $E = 108\text{kgf/cm}^2$ 과 포아슨비 0.075를 계산하였다.

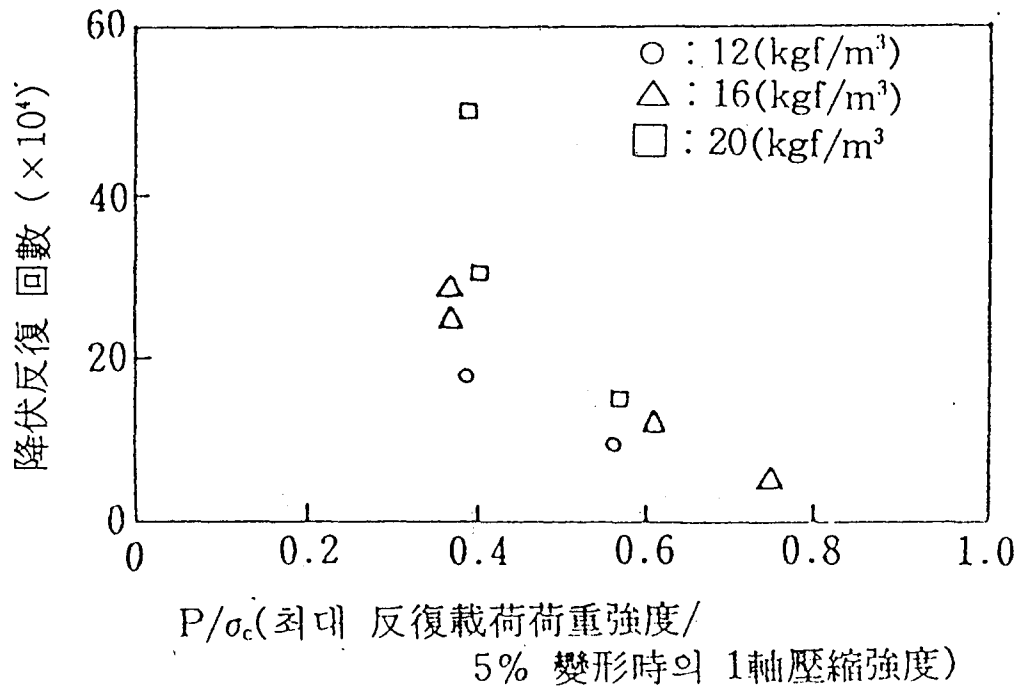


그림 17. 동적 반복 재하 시험 결과

전단변형계수

그림 18은 직경 50mm, 높이 100mm의 원주형 시편에 구속응력을 0.1, 0.3 및 0.5kgf/cm²로 하여 비배기상태에서 정현파(sine파)를 0.1Hz의 주파수로 10만회 반복재하하여 얻은 전단 탄성계수 G와 전단변형 δ 의 관계와, 감쇠정수 h의 관계를 보여준다.

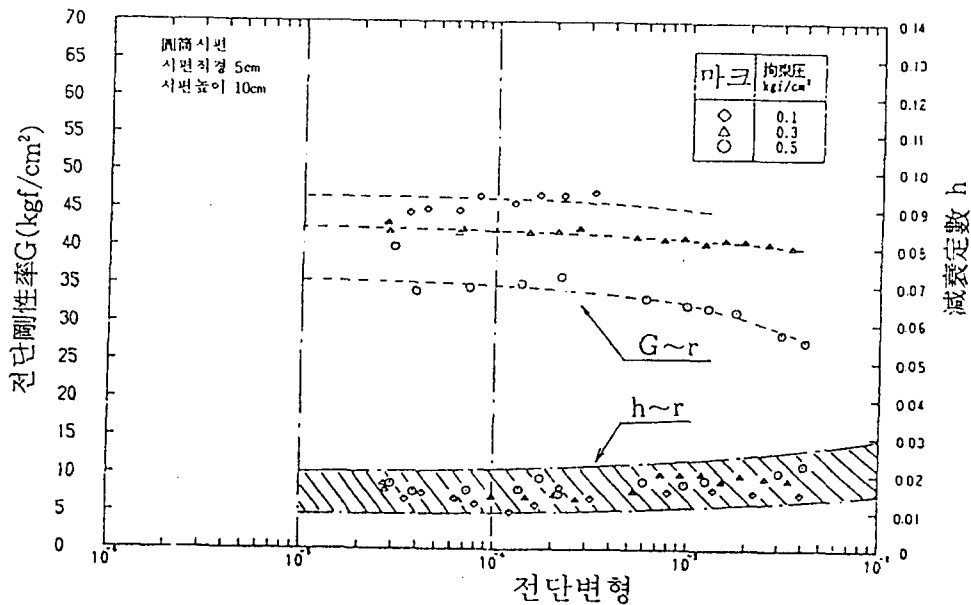


그림 18. 전단변형, 전단 탄성계수, 감쇠정수의 관계

전단탄성 계수는 구속응력이 커지면 감소하는 경향이 있으나 전단변형의 크기에는 거의 의존하지 않음을 알 수 있다. 한편, 감쇠정수는 구속응력이나 전단변형 모두에 의존하지 않는 경향을 보였다⁽⁸⁾.

동적거동 사례

쿠타라⁽²²⁾ 등은 EPS를 CBR 3정도의 노상재료로 가정하고 그림 19에 단면을 보인바와 같이 포장한 시험도로에서 주행시험을 실시하였다. 시험은 중량 26.6 tf의 덤프트럭을 15,000회, 중량 40tf의 덤프트럭을 1,000회 주행시켰으며 그 결과 그림 19에 보인 것처럼 바퀴위치에 바퀴자국 패임(rutting)이 생겼으나 EPS 표면은 평활한 상태를 유지하였다.

한편, 스웨덴에서는 20m 이상의 매우 연약한 유기성 점토위에 2.5m 높이의 EPS 성토를 하고 EPS 1m 아래 위치의 탄성변위를 열차가 통과할 때 측정하였는데⁽²³⁾ 그림 20과 같이 2mm 정도의 탄성변형을 보였다.

3.5 포행특성

하중이 일정한 상태에서 시간에 따라 변위가 증가하는 포행(creep)은 EPS의 장기적인 안정을 위해 고려할 필요가 있다. 일본에서 50m×50m×50m의 EPS 시편에 일방향으로 재하하고 400일 이상 압축변형을 측정해 본 결과를 보면⁽⁸⁾

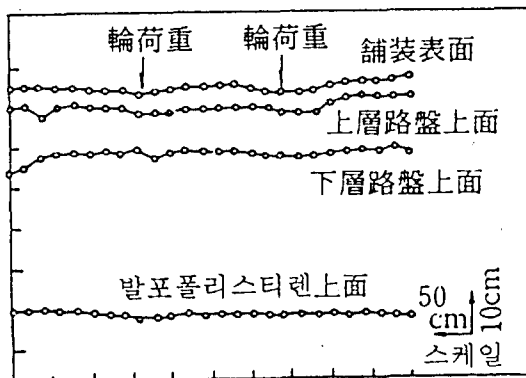
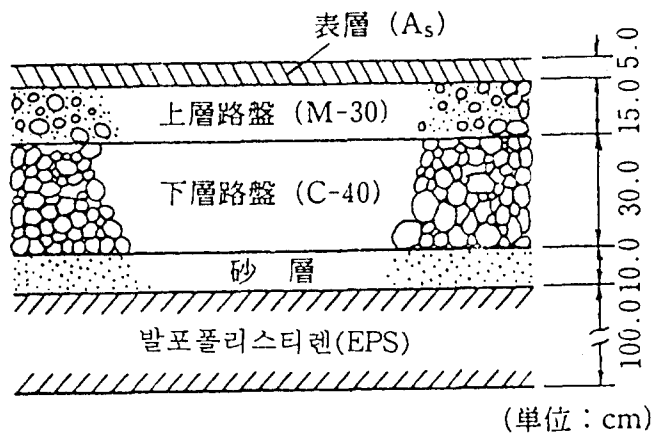


그림 19. 시험도로의 동적거동

Section 0/110

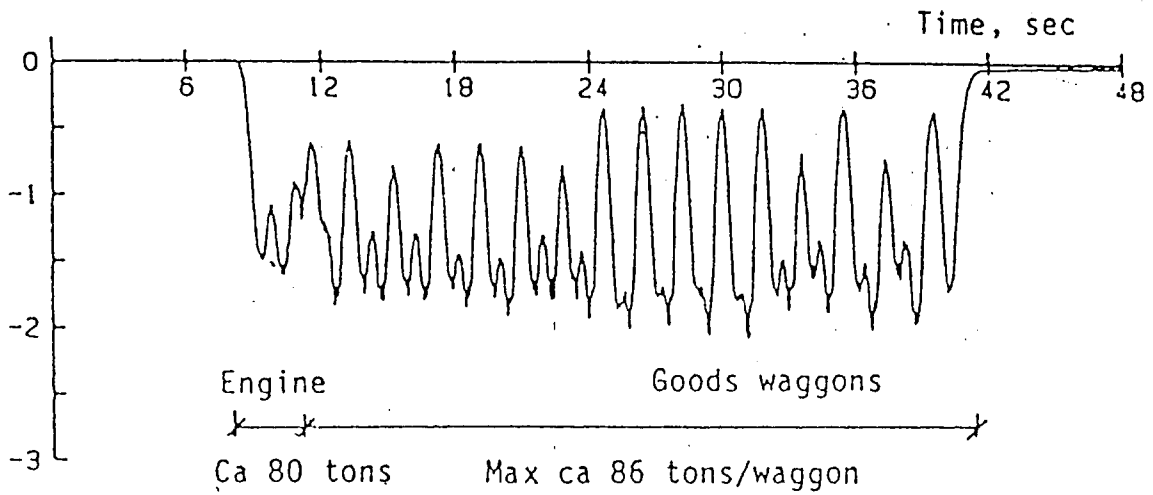


그림 20. 열차하중에 의한 EPS의 탄성변형

- (1) 하중의 크기가 작으면 재하 초기에 발생한 압축변형이 그대로 유지되며 증가하지 않는다. 즉, 포행이 발생하지 않는다.
- (2) 하중이 어느 범위를 넘어서면 포행이 발생하는데 이 하중은 5% 변형시 압축강도의 1/2 정도이다.

그림 21은 EPS의 압축포행 특성을 보여주는데 그림에서 ☆표는 5% 변형 압축강도의 1/2에 해당하는 하중이다.

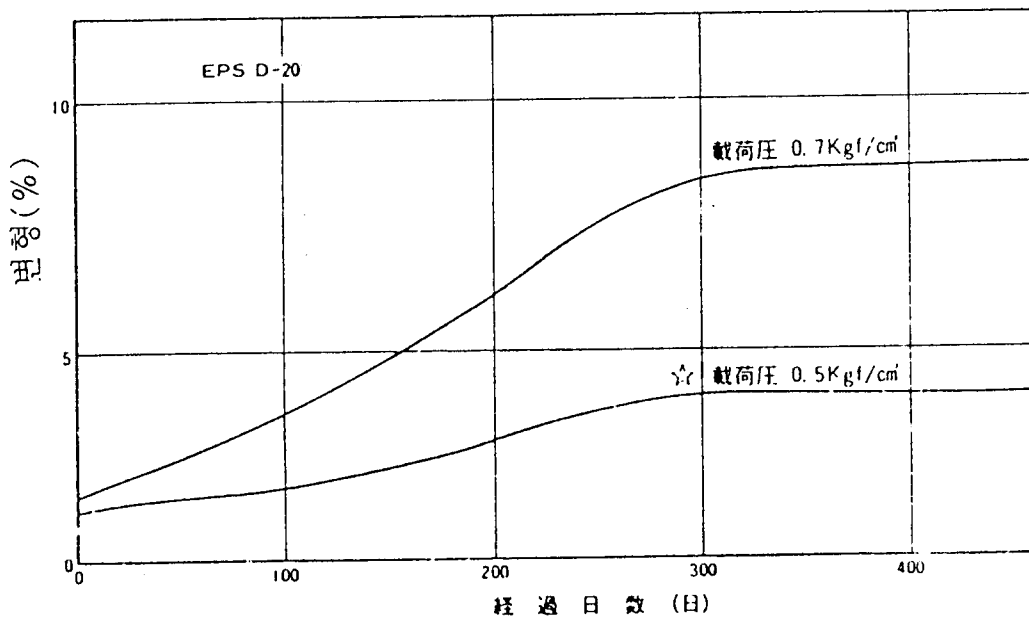


그림 21. EPS의 포행특성

4. 화학적 특성

EPS는 생물에 부패되지 않고(non-biodegradable) 화학적으로 안정(chemically inert)하여 지반을 구성하는 토양이나 지하수를 오염시키지 않는다⁽¹³⁾

4.1 내열성

EPS는 열에 약하며 높은 온도의 환경에서는 노화(aging)가 급속히 진행된다. 폴리스티렌은 70℃ 내지 80℃ 부근에서 연화(softening)하기 시작하며 150℃ 이상의 온도에 노출되면 수축하기 시작한다. 따라서 변형이나 강도저하를 일으키는 한계온도는 70℃이다.

성토체 내에 시공되어 흙으로 덮혀있는 EPS 블럭은 흙속의 지온이 지상화재 등의 영향을 적게받고 산소가 계속적으로 공급되기 힘들므로 설사 발화가 되더라도 연소가 지속되기는 힘들다. EPS는 일반적으로 가연성이어서 문제가 되는 것은 현장에 적치, 보관중에 발생하는 화재이며 실제로 노르웨이와 일본에서 용접시의 불뚱 등의 부주의로 화재가 발생한 사례가 있다.

화재의 위험이 클 때는 EPS 제조시 난연제를 첨가한 난연제품도 생산되는데 화원(fire source)을 제거하면 3초 이내에 불이 꺼지는 것을 자기 소화성(self extinguishing)이라 부른다.

난연성, 즉 연소하기 어려운 정도를 정량적으로 나타내는 방법으로 산소지수(O₂-Index)가 있는데 이는 시료가 시험조건하에서 지속적으로 연소하는데 필요한 최저 산소농도(체적%)를 말하며 공기는 보통 산소지수 21이고 EPS의 산소지수는 18이어서 EPS는 가연성(flammable)이다. 노르웨이에서는 산소지수 25 이상을 난연성(non-flammable)이라 규정하는데⁽⁹⁾ 일본은 산소지수 26을 난연성으로 규정한다⁽⁸⁾.

또 EPS는 유기용제에 용해하는 성질이 있어 이들 용제를 흡수하면 난연성을 상실하기도 한다.

4.2 내구성

EPS는 흡수성이 낮은 수지로서 자연환경하에서 생물학적으로 매우 안정한 재료이며 곰팡이, 박테리아, 효소 등 미생물이나 세균 등에 저항력이 있어 전혀 침식당하지 않는 것으로 알려져 있다.

두더지, 들쥐 등 작은 동물이나 흰개미(termite)같은 곤충들이 굴을 팔 수 있겠으나 EPS는 셀룰로오스나 영양가가 없어 이들 생물의 식용이 될수 없으며 국지적인 굴이 성토체에 구조적인 영향을 미칠 가능성도 극히 작다.

서론에서 소개한 최초의 EPS 성토인 노르웨이의 후름(Flom)에서는 시공후 12년간 EPS의 재질 변화를 점검하였는데 표 11에 보인 바와 같았다.

표 11. 후름(Flom)교 EPS의 시료채취 조사결과

조사항목	단 위	1972년	1973년	1979년	1984년
		0	6개월 후	7년 후	12년 후
밀도(건조)	kgf/m ³	20.6	23.0	22.5 - 23.3	23.6
밀도(습윤)	kgf/m ³	-	-	37.9 - 46.6	46.6
흡수율	% Vol.	-	-	1.87 - 2.30	2.30
일축압축강도 (5% 변형)	kgf/cm ²	0.88	1.05	1.00 - 1.17	1.30

즉, 밀도는 지하수의 영향에 의한 흡수작용과 압축변형의 결과로 약간 증가하였으나 압축 강도의 저하가 없어 EPS가 성토내에서 안정한 상태에 있음을 보여준다 하겠다.

4.3 내후성

EPS는 자외선(UV radiation)에 의해 열화하여 그 표면이 누렇게 되면서 부스러진다. 따라서, 여름철 햇빛이 강할 때는 한시간 이상 햇빛에 노출되지 않도록하고 시트(sheet) 등으로 덮어서 보호해야 한다.

4.4 내 화학성

EPS는 일반적으로 산, 알칼리, 시멘트, 아스팔트, 그리고 에타놀 등의 알콜에는 강하나 방향족계의 탄화수소와 그 염화물, 케톤류, 그리고 에스테르류 등의 유기용매에 약하여 용해하는 결점이 있다. 이들은 대부분 도료, 접착제, 세정제 등에 포함되어 있으므로 주의 를 요한다. 또한, 동·식물류와 파라핀유 등도 장기적으로 EPS 표면을 침식하여 수축을 일으킨다. 표 12는 각종 화학물질에 대한 EPS의 저항정도를 정리한 것이다.

EPS는 또한 석유제품 특히 차량의 연료인 휘발유와 디젤유에 용해하므로 차량 전복 사고 등의 경우를 상정하여 이들 유류가 EPS 성토체에 침투하지 못하게 차단해야 할 필요가 있다.

노르웨이에서는 주로 10cm 내지 15cm 두께의 빈배합 철근 콘크리트 슬래브를 EPS 성토위에 타설하는데 이 슬래브는 성토체에 강성을 주어 상부에 포설할 기층의 두께를 줄일 수 있다. 철근 콘크리트 슬래브 대신 폴리에틸렌 쉬트를 덮거나 폴리에틸렌 쉬트로 EPS 성토체를 둘러 싸기도 한다. 또한, 측구부분에서 이들 유류가 침투되지 않도록 측구를 불투수성 재료로 둘러 싸기도 한다.

표 12. EPS의 내화학적성

物 質 名	耐藥品性	物 質 名	耐藥品性
아크릴로니트릴	×	글리시	○
아스팔트	○	글리콜 에테르	×
아세토니트릴	×	글로로포름	×
아세톤	×	經油	△
亞麻仁油	△	醋酸	○
아밀알콜	○	醋酸 아밀알콜	×
아릴알콜	○	醋酸 에틸알콜	×
암모니아	○	醋酸 부틸	×
에탄올	○	살균제	○
에탄올	×	살충제	○
에틸벤젠	×	디에틸 에테르	×
에틸렌옥사이드	×	디에틸 케톤	×
에틸렌글리콜	○	디에틸 벤젠	×
염화벤젠	×	디에틸 글리콜	○
염화메틸렌	×	디옥산	×
염화메틸렌	×	시클로헥산올	×
염화수소	○	시클로헥산	×
염소수	△	취스액	×
올리브油	△	重油	△
海水	△	주석산	△
荷性칼리 용액	○	醋酸(30%)	○
荷性소다 용액	○	소독액	○
가솔린	×	除草劑	○
크실렌	×	실리콘 오일	○
구연산	○	水銀	○
水性接着劑	○	수산화칼륨	○
水性塗料	○	수산화나트륨	○
스틸렌	×	水醋酸	×
石油	×	피리딘	×
석유에테르	×	肥料(N.P.K)	○
석회수	○	페놀	△
石膏	○	부타디엔	×
세멘트	○	부탄올	×
炭酸소다	○	부탄	×
테트라클로로에탄	×	프로판	×
테트라클로로에틸렌	×	헥산	×
테트라하이드로퓨란	×	헤판	×
동식물성유지	○ △	벤질알콜	×
燈油	×	벤젠	×
트리에틸아민	×	펜탄	×
트리클로로에탄	×	硼酸溶液	○
트리클로로에틸렌	×	無數醋酸	×
트리클로로페놀	×	메탄올	○
트리클로로벤젠	×	메탄	×
몰루엔	×	메틸 이소부틸 케톤	×
나프탈렌	×	메틸 이소프로필 케톤	×
乳酸	○	메틸 에틸 케톤	×
濃鹽酸	△	메틸 프로필 케톤	×
濃醋酸	△	용제형접착제	×
濃硫酸	△	용제형도료	×
파라핀油	△	硫酸(50%)	○
		硝酸(87%)	○

○ : 安定 △ : 膨潤 × : 溶解

5. 결론

경량 성토재료의 하나인 발포폴리스틸렌의 공학적 특성을 소개하였다. 종래 연약지반 처리대책은 이를 제거하고 대체하거나 변형을 촉진시켜 자체의 강도가 증가하고 압축성이 감소하기를 기다리거나 약액주입 등으로 보강하는 것이었다. 이에 반하여 경량 성토공법은 하중 자체를 줄인다는 착상의 변환을 필요로하는 매우 흥미로운 공법이다. 여러가지 경량 성토공법들이 이 땅에 시도되기를 기대하며 EPS 성토시공과 결부해서도 바닥고르기에 경량골재를 사용한다거나 상부 철근 콘크리트에 경량 콘크리트나 기포 콘크리트를 도입하는 등의 융통성을 위해 이 분야에 대한 관계인사들의 관심을 촉구하면서 끝내고자 한다.

참고문헌

1. Aabøe, R. (1987), 13Years of Experience with Expanded Polystyrene as a Lightweight Fill Material in Road Embankment, in Plastic Foam in Road Embankments, Meddel-else nr. 61, Norwegian Road Research Laboratory, pp.21-27.
2. Miki, G. (1990), 연약지반과 성토, 권두언, 기초공 Vol.18, No.12, pp.1.
3. Frydenlund, E. and R. Aabøe, (1994). Expanded Polystyrene - A Lighter Way Accross Soft Ground, Proc. 13th ICSMFE, New Delhi, Vol.3, pp.1287-1292.
4. EDO, (1994). EPS - Expanded Polystyrol Construction Method, prepared for the International Geotechnical Symposium, Polystyrene Foam in Below Grade Applications, Honolulu, Hawaii, E.P.S. Construction Method Development Organization, Japan, pp.11-16.
5. KS M3808, (1988). 발포 폴리스티렌 보온재, 한국공업규격
6. 유기송, (1991). 발포 폴리스티렌(EPS)에 의한 성토의 설계, 기술자료, 대한토질공학회지, 제 7 권 제 2 호, pp.83-86.
7. 정형식, (1994). 발포 폴리스티렌 및 발포 폴리스티렌 이용 성토공법의 특징과 개요, 발포 폴리스티렌 이용 성토공법 국제심포지움 논문집, 한국지반공학회, pp.1-28.
8. 發泡 スチロール 土木工法 開發 機構編. (1993). EPS工法 - 發泡 スチロール(EPS)을 이용한 超輕量 盛土 工法, 理工圖書.
9. Myhre, O. (1987). EPS-Materials Specifications, in plastic Foam in Road Embankments, Meddelelse nr. 61, Norwegian Road Research Laboratory, pp.13-16.
10. Frydenlund, T. E. (1991). Expanded Polystyrene - A Lighter Way Across Soft Ground, Internal Report No.1502, Norwegian Road Research Laboratory. 12p

11. Refsdal, G.(1987). EPS - Design Considerations, in Plastic Foam in Road Embankments, Meddelelse nr. 61, Norwegian Road Research Laboratory, pp.17-20.
12. Furutani, T. (1989). Foamed Mortar as Lightweight Fill Material, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp.73-77.(in Japan)
13. Horvath, J.S. (1994). Expanded Polystyrene(EPS) Properties for Geotechnical Engineering Applications, prepared for the Int. Symp. on Polystyrene Foam in Below-Grade Applications, Honolulu, Hawaii, March 30, 1994.
14. Gandahl, R. (1987). Polystyrene Foam as Frost Protection Measure on National Roads in Sweden, Transportation Research Record 1146, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp.1-9.
15. Louie, T.M., W.A. Phang, and R.A. Chishom, (1983). The Val Gagne Pavement Insulation Experiment, Transportation Research Record 918, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp.34-42.
16. Frydenlund, T.E. (1987). Outline of Alternative Solutions and the Various Applications of Expanded Polystyrene as a Light Fill Material in Norway, in Plastic Foam in Road Embankments, Meddelelse nr. 61, Norwegian Road Research Laboratory, pp.7-12.
17. Higuchi, Y.(1990). 발포스티롤 성토공법, 기초공, Vol.18, No.12, pp.10-20.
18. Hamada, A. and T. Yamanouchi, (1989). Mechanical Properties of Expanded Polystyrene as a Lightweight Fill Material, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp.13-18.
19. Yamanouchi, T. (1987). Mechanical Characteristics of Expanded Polystyrene(EPS) and Problems in the Use for a Ultra-lightweight Fill Material in Road Construction, 大韓土質工學會, '87年度 學術發表會, 發表講演集, pp.109-119.
20. Aoyama, N. (1990). 뒤채움재로 사용한 발포스티롤의 구조물 배면에 미치는 영향, 기초공, Vol.18, No.12, pp.21-25.

21. Bang, S.C. (1992). Use of Expanded Polystyrene Blocks as Backfill, Lecture delivered at the Korea Institute of Construction Technology, Seoul on 4th November, 1992.
22. Kutara, K., N. Aoyama, T. Takeuchi, and O. Takechi, (1989). Experiments on Application of Expanded Polystyrol to Light Fill Materials, Soils and Foundations, Vol.37, No.2, pp.49-54.
23. Case History 10, (1987). The Embankment at Händelö, Norrköping, Sweden, in Plastic Foam in Road Embankments, Meddelelse nr.61, Norwegian Road Research Laboratory, pp.52.