

EPS材料减荷效应及工程应用评述

刘宇翼^{1,2}, 从卫民³, 苏运河¹, 余跃心¹,

杨琴¹, 潘鑫¹, 汤奇¹

(1. 淮阴工学院建筑工程学院, 江苏 淮安 223001)

(2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221008)

(3. 淮安市建设工程施工图审查处, 江苏 淮安 223001)



余跃心

摘要: EPS是由苯乙烯在分散剂作用下悬浮于水中, 经引发剂引发聚合, 再加液体发泡剂浸渍而成的泡沫材料。EPS泡沫具有轻质、压缩性高、稳定性好、耐久性长、吸湿性低、隔热保温效果好等优点, 是一种理想的降低土压力缓冲材料, 在矿业、公路、建筑工程中已得到实践验证, 在广泛收集、认真查阅前人研究成果的基础上, 总结了EPS材料的密度、耐久性、热稳定性、热传导性等物理力学特性, 重点阐述了矿井井筒、填土涵洞、挡土结构三种不同类型结构中使用EPS作为减荷材料的应用效果, 并从能量学、土拱效应、土压力理论等角度诠释了EPS材料的减荷机理。针对矿井井筒中的EPS减荷材料, 提出高应力状态下EPS材料的变形特性、复杂环境中EPS材料的热力性能、岩土-EPS-井壁相互作用以及EPS材料减荷效应的试验验证是今后研究的主要发展方向。

关键词: EPS材料; 减荷效应; 减荷机理; 矿井井筒; 填土涵洞; 挡土结构

中图分类号: U449 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2017)09-0681-07

Reviews of Load-Reduction Mechanism and Engineering Application of EPS Materials

LIU Yuyi^{1,2}, CONG Weimin³, SU Yunhe¹, SHE Yuexin¹,

YANG Qin¹, PAN Xin¹, TANG Qi¹

(1. Faculty of Architecture and Civil Engineering, Huaiyin Institute of Technology, Huaian 223001, China)

(2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 221008, China)

(3. Department of Construction Plan Examination of Huaian, Huaian 223001, China)

Abstract: Expanded Polystyrene (EPS) is a kind of foam material which is made from styrene that suspended in water under the action of a dispersing agent, then polymerized by initiator and impregnated with liquid foaming agent. Tested in mining, roads, building and other projects, EPS is regarded as an ideal buffer material to reduce soil pressure due to its advantages like light weight, high compressibility, good stability, long durability, low moisture absorption, good heat insulation and preservation performance, etc. Based on the predecessors' research, the density, durability, thermal stability, thermal conductivity as well as other physical and mechanical properties of EPS materials are summarized, and the load-reducing effects are analyzed emphatically when EPS materials are applied in the mine shaft wall, culvert under stacked soil and retaining structure. The load-reducing mechanism of EPS material has been illustrated according to energetics,

soil arching effect and earth pressure theory. Finally, it puts forward that the studies on mechanical behaviors of EPS under high stresses, thermal performance of EPS in a complex environment, the rock (soil)-EPS-wall interaction and test verification of load-reducing effect of EPS materials are the main directions of further research.

Key words: EPS materials; load-reduction effects; load-reduction mechanism; mine shaft wall; culverts under stacked soil; retaining structure

收稿日期: 2016-05-04

基金项目: 住房和城乡建设部科技项目(2014-K3-030); 江苏省政策引导类计划(产学研合作)项目(BY2016061-12); 江苏省建设系统科技项目(2015ZD01)

第一作者: 刘宇翼, 男, 1982年生, 博士, 讲师

通讯作者: 余跃心, 男, 1963年生, 教授, 硕士生导师,

Email: y. x. she1963@163.com

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.2017.09.11

1 前言

可发性聚苯乙烯 (Expanded Polystyrene, EPS), 是由苯乙烯在分散剂作用下悬浮于水中, 经引发剂引发聚合, 再加液体发泡剂浸渍而成的泡沫材料。EPS 经预发、熟化和模塑成型即可制得发泡塑料制品。目前, 在全世界发泡塑料中, EPS 产量排第二位^[1]。EPS 成型过程中, 聚苯乙烯颗粒的戊烷受热汽化, 在颗粒中膨胀形成许多封闭的空腔。EPS 材料的颗粒结构如图 1 所示。

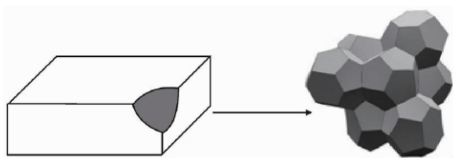


图 1 EPS 材料的颗粒结构^[1]

Fig. 1 Particle structure of EPS^[1]

这种均匀的封闭空腔结构决定了 EPS 具有独特的性质: 质轻、防震、绝热、绝缘、耐潮等, 为此被广泛用作包装、保温、隔热、建筑装潢等方面。北欧在 20 世纪 60 年代后期开始在工程建设领域使用 EPS 材料。1971 年挪威国家道路研究实验室 (NRRL) 首次在 FLOM 大桥引道改造工程中用 EPS 代替 1 m 厚普通填料, 成功控制了桥头段的不均匀沉降。进入 20 世纪 80 年代后, 日本、瑞典、荷兰等国家也逐步在公路项目中使用 EPS 材料^[2]。我国 1995 年在杭甬高速公路望童跨线桥桥头路堤首次使用 EPS, 取得了较好效果。EPS 材料作为一种轻质工程材料, 在工程建设领域中体现出优良的减荷效果, 专家学者和技术人员尝试采取各种研究手段 (理论分析、模型试验、数值计算、原位测试) 探索 EPS 材料的减荷原理及影响。

本文在广泛收集、认真查阅前人研究成果的基础上, 总结了 EPS 材料的物理力学特性, 重点阐述了矿井井筒、填土涵洞、挡土结构三种不同类型工程中使用 EPS 作为减荷材料的应用效果, 并从能量学、土拱效应、土压力理论等角度诠释了 EPS 材料的减荷机理, 评述了目前的研究进展及研究中存在的问题, 并对矿井井筒领域今后的研究方向进行了展望。

2 EPS 材料的物理力学特性

2.1 EPS 材料的物理特性

(1) 密度

EPS 的密度由成型阶段聚苯乙烯颗粒的膨胀倍数决定, 介于 $10 \sim 40 \text{ kg/m}^3$ 之间, 工程中常用密度为 $15 \sim 30 \text{ kg/m}^3$ 。目前许多土工工程中用作轻质填料的 EPS, 其

密度常为 20 kg/m^3 , 仅为普通填料的 $1/50 \sim 1/100$ 。密度是 EPS 的一个重要指标, 与其各项力学性能关系密切^[3]。

(2) 耐久性

EPS 在水中和土壤中化学性质稳定, 不会被微生物分解, 也不会释放出对微生物有利的营养物质, 但可被汽车燃料油溶解。另有研究资料表明, 在特定条件下白蚁可对 EPS 造成破坏^[4]。EPS 在紫外线照射下一段时间后表面由白色变为黄色, 在某种程度上呈现脆性。因此, EPS 与许多高分子土工材料一样, 不允许长时间暴露在紫外线下。

聚苯乙烯本身是憎水的, 而且 EPS 的封闭空腔结构也使水的渗入极其缓慢。EPS 的吸水率与 EPS 的形状有关, 直径 100 mm、高 200 mm 的 EPS 圆柱试件浸水 1 年后的平均体积吸水率为 1.54%, 而 EPS 薄板的体积吸水率可达到 9%^[3]。

(3) 热稳定性

$75 \sim 80^\circ\text{C}$ 以下, EPS 的使用基本不受影响, 但温度接近 150°C 时, EPS 将熔化。如果附近有火源, EPS 也可燃烧。但如果聚苯乙烯颗粒发泡成型时就加入了阻燃剂, EPS 燃烧 3 s 内可自熄, 且阻燃剂对 EPS 的性能没有不利的影响^[5]。

(4) 热传导性

EPS 的封闭空腔结构决定了其具有优良的隔热性, 因此 EPS 最初在道路工程中用于保温层, 以满足严寒季节对道路防冻的要求。但 EPS 的吸水量对其热传导性的影响很明显, 随吸水量的增大, 热传导系数也增大。研究资料表明^[3], EPS 体积吸水率小于 1% 时, 其热传导系数可增大 5%; 体积吸水率达到 3~5% 时, 热传导系数则可增大 15~25%。

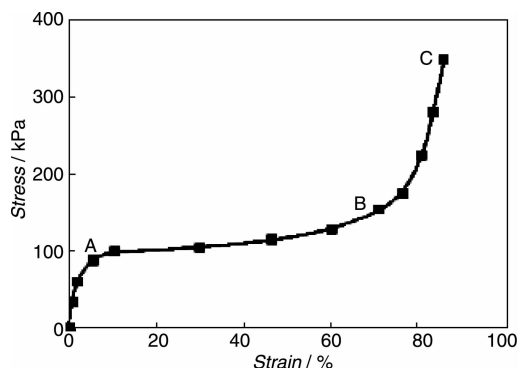
2.2 EPS 材料的力学特性

白冰^[6]、张忠坤^[7]、张卫兵^[8]、颜志平^[9]、伊哈卜^[10,11]、曹周阳^[12]等通过室内单轴压缩试验、三轴压缩试验、蠕变试验、加卸载试验等研究了 EPS 的力学特性。

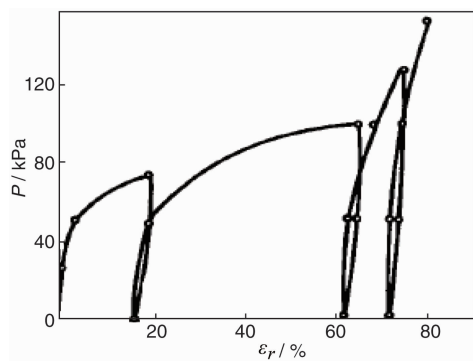
(1) 压缩性能。EPS 材料整个受压变形过程大致可分为 3 个阶段, 即线弹性阶段 OA、屈服阶段 AB 和硬化阶段 BC, 见图 2^[9]。国内外多数研究资料认为可取压缩应变为 5% 时对应的应力值作为其抗压强度。压缩速率不同, 其应力应变关系也不同, 速率快时表现出来的强度高。

(2) 蠕变性能。EPS 的应变发展规律随荷载的大小不同而不同, 荷载大于 75 kPa 时应变在短时间内迅速增大, 而当荷载小于 70 kPa 时应变增长较慢。可以认为 70 kPa 是 EPS 发生屈服与否的标志, 这也就给出了 EPS 材料的工作范围。

(3) 反复荷载作用下的力学特性。由图 3^[11] 中可

图2 EPS 在无侧限压缩下的应力应变关系^[9]Fig. 2 Relation of stress-strain of EPS in unconfined compression^[9]

知,在压缩过程中当达到某一荷载值(如 $P = 50$ kPa)时进行卸荷然后再压,会发现 EPS 的回弹再压缩曲线像是前段荷载作用下的压缩曲线的延续,犹如在此期间没有经过卸载和再压的过程一样。

图3 EPS 加卸载试验^[11]Fig. 3 Loading and unloading tests of EPS^[11]

(4)不同密度 EPS 材料的应力-应变关系。不同密度的 EPS 样品的应力-应变曲线趋势是一致的,都存在线弹性、屈服和硬化三个变形阶段,但是对应同一应变值的应力值不同;随着材料密度的增大,对应同一应变的应力值在不断加大,硬化点在不断提前。

(5)EPS 材料的基本力学指标。基于室内试验^[13],获得了 EPS 材料的基本力学指标的取值范围见表 1 所示。

表1 EPS 材料的基本力学性能^[13]Table 1 The basic mechanical property of EPS^[13]

Parameter	Value
Flexural strength /MPa	0.294 ~ 0.343
Compression strength /MPa	0.088 ~ 0.108
Shear strength /MPa	1.078 ~ 1.470
Tensile strength /MPa	0.216 ~ 0.333
Impact strength/kJ · m ⁻²	0.098 ~ 0.196

3 矿井井筒中 EPS 材料的减荷效应

EPS 材料在矿井井筒中的应用,工程实践先于理论研究。大屯孔庄矿风井,深 250 m,该井首次在外壁和井帮之间铺设一层 30 mm 厚泡沫塑料,设计时井壁承受的压力按减少 20% 计算。淮北桃园煤矿主、副井,穿过表土层 289.5 m,该井在井壁和井帮之间垫一层 75 mm 厚的 EPS 泡沫,设计时冻结压力按减少 0.4 MPa 计算^[14]。两个工程案例均采用泡沫塑料可缩性井壁,但由于当时没有这方面的计算理论,设计时冻结压力一个比常规压力减少 20%,一个减少 13.3%。出于安全考虑,是可以理解的,但缺乏理论依据和实测数据。

何积善^[15]开始研究这种泡沫塑料可缩性井壁,将井帮的厚度看作无限大,在垂直和水平压力作用下内壁有一确定的变位,利用轴对称荷载作用下厚壁筒的计算公式,推导了井壁上的压力公式和应力公式,如下:

$$P_a = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma h = \frac{E}{(1+\mu)a} u \quad (1)$$

$$P_b = \frac{\mu}{1-\mu} \gamma h \quad (2)$$

$$\sigma'_r = -P_b \mp (P_a - P_b) \quad (3)$$

式中 γ ——土层平均容重;

h ——计算点以上的土柱高;

E ——土的弹性模量;

a ——井筒外半径;

μ ——土的泊松比;

u ——预留井帮位移值;

P_a ——预留位移值 u 后作用于井壁的压力;

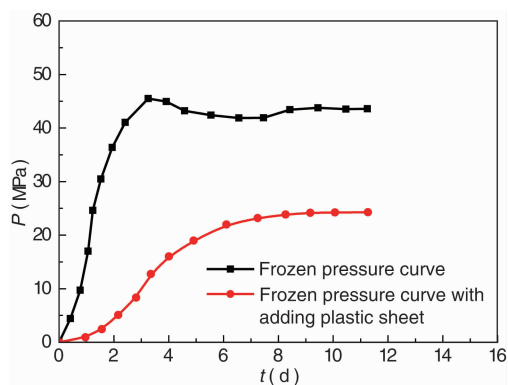
P_b ——预留位移值为零时作用在井壁的压力;

σ'_r ——径向、切向应力。

预留值 u 难以准确确定,但理想的 u 应是在井帮稳定条件下,井壁所受压力最小。何积善关于预留值 u 这一论述实际上就是目前学术界和工程界比较流行的现代予力技术中的“预位移”技术^[16]。

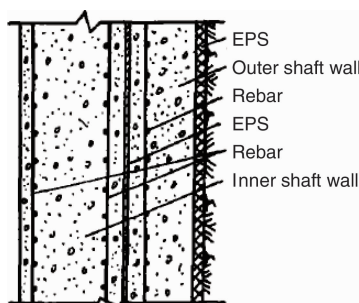
杨永敏^[17]在矿井建设实践中,为了探索泡沫塑料板作为可缩保温层对外层井壁冻结压力的影响,在淮南谢桥研石井垂深 237 m 处的粘土层中作了实测研究,见图 4。实测结果表明:①加了泡沫塑料板的外层井壁,塑料板可缩时井壁受力很小。当塑料板受冻结壁挤压紧密后,井壁受力立即增大,并随即达到最大值。②加泡沫塑料板后,外层井壁处于正常的温度、含水量、无压条件下养护,可延缓高峰压力出现的时间,避免了混凝土井壁在初凝期就承受巨大的冻结压力。

赖应得^[18]在国内首次应用能量学原理来考虑井筒井壁问题,创造并发展了基于文克尔假定的能量支护

图4 谢桥矸石井粘土层冻土压力实测曲线^[17]Fig. 4 Testing curve of frozen soil pressure in Xieqiao well^[17]

学^[19], 推导了围岩和支护的能量平衡方程, 提出用于释放能量的可缩性材料的选择原则 (一定的抗压强度、一定的弹性、一定的抗冲击振动能力、耐酸碱、抗腐蚀性能和保温性能), 并指出 EPS 材料是各种可缩性材料的首选。其他学者在研究冻结壁和井壁时, 也发现了泡沫塑料层的减荷效果。崔广心、杨维好等^[20]提出: “外层井壁和冻结壁之间垫泡沫塑料以 25 ~ 75 mm 为宜, 起降低传冷 (隔热) 作用, 也可防止混凝土析水被冻结成为冻害, 同时由于冻结壁径向变形压缩, 泡沫塑料层能起到缓和冻结压力的作为。粘土层使用效果较明显。”

图 5 为 EPS 泡沫塑料可缩性井壁的设计实例^[20]。计算结果表明, 这种释放能量的可缩性井壁结构, 适用冻结深度大、穿过粘土和钙质粘土冻结能量和冻结压力均大的冻结井筒, 其经济效益相当可观。

图5 泡沫塑料可缩性井壁示意图^[20]Fig. 5 Schematic plot of shrink tier well wall used EPS^[20]

矿井井筒中 EPS 材料的减荷机理可用能量学原理加以诠释: 支护形式和支护强度确定之后, 吸收的支护能量基本确定, 所以井筒冻结壁的位移越大, 释放冻能越多, 围岩对支护的压力就越小, 支护结构便可以设计得越薄。但是能量不能释放过多, 位移过大, 会危及冻结

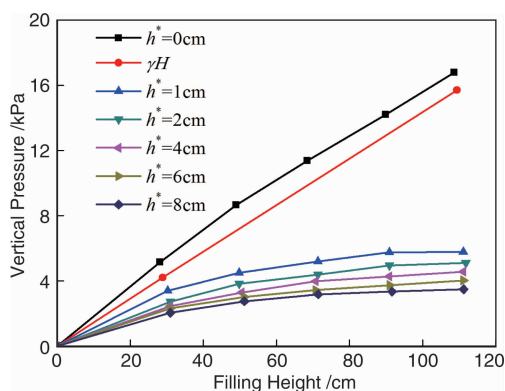
管的安全。利用能量支护原理, 采用 EPS 泡沫材料作为井壁和冻结壁之间的缓冲材料, 设计可缩性井壁结构, 使支护既有一定强度, 以吸收围岩的一部份能量, 又可缩, 以释放多余的能量。当冻能大于支护吸收能量时, 释放多余的能量; 冻能小于支护吸收的能量, 支护不收缩, 不释放能量。这样, 支护既不被压坏, 又能维护井筒空间。

4 填土涵洞中 EPS 材料的减荷效应

随着我国高等级公路建设的迅猛发展, 特别是向重丘和山岭区的延伸, 高填土路堤下涵洞 (或涵管) 的受力、变形、沉降与开裂问题引起了工程界的普遍关注。如何正确计算涵洞的实际受力, 以及采取何种工程措施减小洞周土压力具有重要的研究意义。

顾安全指出一些设计部门采用了计算值偏小的公式或经验曲线计算涵洞顶的垂直土压力, 是开裂病害产生的主要原因。他在国内首次发现采用柔性材料作为涵洞顶填料, 可以改变洞顶应力集中现象。通过多组实验证明了柔性材料具有明显的减荷效应, 以此提出了采取减荷措施的垂直土压力计算公式^[21]。关于柔性材料的选取, Sladen J A^[22]指出, EPS 泡沫便是最佳选择。白冰^[6]的模型试验发现: 在填土较低的情况下, 使用 EPS 颗粒比 EPS 板材减压效果更为明显, 采用 EPS 颗粒情况下侧向土压系数 K 最小可达到 0.3。

王晓谋^[23]基于顾安全思想, 进行了用海绵来模拟 EPS 材料铺设在涵洞上的室内模型试验, 研究了不同厚度、不同变形模量海绵的减荷效果。试验结果表明: 海绵的厚度 (h^* 值) 越大, 减荷效果越好, 但是随着填土高度 H 的增加, 减荷效果会迅速衰减, 见图 6。此外, 海绵的变形模量 E 值越小, 减荷效果越显著, 但随着填土的增高, 减荷效果同样迅速衰减。

图6 不同厚度海绵的减荷试验结果^[23]Fig. 6 Load reducing test results of different thickness of the sponge^[23]

金滨^[24]认为,要达到经济和技术均佳的减荷效果,EPS 材料的压缩强度和铺设厚度至关重要,而 EPS 材料的选择又取决于填土高度、涵洞高度等参数。

郭婷婷^[25]、顾安全^[26]结合四川南广高速填土涵洞工程实例,进行了涵顶与涵侧同时铺设柔性材料 EPS 板的减荷效果试验对比。实测结果验证了 EPS 材料的显著减荷效果,并且 EPS 板厚度越大,洞顶和洞侧的土压力越小。顾安全^[27]根据以往 EPS 板的现场减荷试验成果和涵洞土压力理论公式,建立了简明的 EPS 板减荷设计方法,主要包括涵洞顶和涵侧 EPS 板密度和厚度的确定,EPS 板切割、铺设以及施工要点。

已有理论分析成果、模型试验和现场实测结论解释了 EPS 材料应用于填土涵洞的减荷机理:刚性涵洞近乎于不可压缩,而两侧与涵洞同高填土层可以压缩,导致涵洞两侧外土柱沉降大于涵顶内土柱沉降,在涵顶平面内外土柱间出现沉降差 $+\delta$,于是在填土施工期间及后期固结过程中,涵洞两侧外土柱对内土柱产生向下的摩擦力(即附加土压力),从而使涵顶垂直土压力大于涵顶内土柱自重压力。为此,在涵顶铺设一定厚度的压缩性大于填土的 EPS 柔性材料,促使涵顶平面内外土柱间的沉降差为 $-\delta$,于是外土柱对内土柱产生向上的有利摩擦力,从而使涵顶垂直土压力小于内土柱自重压力。在土力学中,把这类移动的土体将部分自重压力通过摩擦力的形式转嫁给相对静止的土体,从而使移动土体向下的压力减小的这一现象,称之为土拱效应。

5 挡土结构中 EPS 材料的减荷效应

挡土结构所受土压力的大小和计算理论,一直是土力学中的热点和难点问题。随着土工合成材料的迅速发展,国外学者发现在挡土结构和填土之间布设一定厚度的可压缩土工合成材料作为缓冲层,可以降低挡土结构所受土压力^[28]。

Horvath 认为 EPS 泡沫具有轻质、压缩性高、稳定性好、耐久性强、吸湿性低、隔热保温效果好等优点,是一种理想的降低侧向土压力的缓冲材料,并创造性提出了基于 EPS 泡沫减压效应的减压挡土墙(Reduced Earth Pressure Wall, REP-Wall)^[29-31]。张小平^[32]也认为用轻质泡沫材料作为挡土墙后的填料,可减少竖向荷载,同时轻质材料是一种很好的胶结材料,它不产生侧向荷载,可减少沉降。

关于 EPS 泡沫的减荷效果,Murphy G^[33]、葛折圣^[34]、Zarnani S^[35]、崔晓东^[36]、汪益敏^[37]、韦杰^[38]、Trandafir A C^[39,40]、Ertugrul O L^[41,42]、Zekkos A A^[43]等开展了大量的模型试验和数值模拟研究。结果表明:无论

是静荷载还是动荷载、刚性墙还是柔性墙,使用 EPS 泡沫作为缓冲层都起到显著的减压效果,侧向土压力减小幅度可达 30~60%,且与 EPS 的厚度、压缩模量密切相关。从工程经济学角度分析发现,对于 3~12 m 高重力式挡墙,采用 10 cm 厚 EPS 泡沫作为缓冲层,大约能减少工程造价 28% 左右,可见其经济效益十分显著^[44]。

将 EPS 泡沫作为挡土结构和填土之间的缓冲层,其减压原理如下:

根据土压力理论,挡土墙后的土压力与墙体位移密切相关,如图 7 所示。当墙体没有侧向移动时,作用在挡土墙上的土压力称为静止土压力 E_0 ; 墙体向填土方向移动,墙后土体发生挤压,当位移量达到被动极限平衡状态位移 Δ_p 时,墙后填土临近破坏状态,此时作用在挡土墙上的土压力称为被动土压力 E_p ,即土压力的最大值; 墙体背向填土移动,墙后土体因侧限放松而有下滑趋势,土内潜在滑动面剪应力增加,土的抗剪强度得以发挥,土压力随墙体移动而减小,当位移量达到主动极限状态位移 Δ_a 时,墙后填土临近破坏,此时作用在挡土墙上的土压力称为主动土压力 E_a ,即土压力的最小值^[45]。

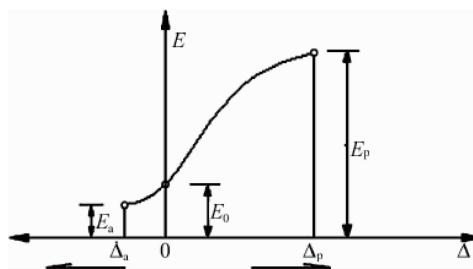


图 7 土压力与挡墙位移关系

Fig. 7 Relation of soil pressure and displacement of the wall

如果给挡土墙一定的离开土体方向的位移量,那么作用在墙体上的土压力将减小,利用这一点,将 EPS 板的压缩变形视为挡土结构背向填土方向产生的位移,则作用在挡土结构上的土压力可接近或达到主动状态,其值远小于静止土压力。

6 结 语

通过上文的分析可以得知, EPS 作为一种减荷材料,在国内外逐渐引起工程界和学术界的重视,并在矿井、涵洞以及挡土结构中得以成功应用。但由于 EPS 材料本身性能的复杂性以及研究方法的局限性,在使用过程中尚有许多需要解决的问题。而且在不同的工程应用中, EPS 材料所表现的减荷效应也不尽相同。

针对矿井井筒中 EPS 材料的减荷效应及机理研究,今后可从以下几个方面开展深入研究:

(1) 高应力条件下 EPS 材料的变形特性

在矿井井筒的外井壁和冻结壁(井帮)之间使用 EPS 作为减压材料, EPS 在高应力条件下的压缩性能、蠕变性能等变形特性需要进一步明确。

(2) 复杂环境中 EPS 材料的热力性能

矿井井筒处于恶劣的工程环境之中, 十分必要研究地下水、温度变化以及水热力耦合作用下 EPS 材料的含水率、渗透性、抗压性能、抗剪性能、导热性能。

(3) 岩土-EPS-井壁相互作用

基于相互作用理论, 探讨 EPS 与岩土、EPS 与井壁界面的接触性状和力学响应, 从而分析其减荷效应, 此外, 由于含水层疏水, 引起上覆土体下沉, 使井壁产生向下的竖直附加力, 故需研究 EPS 材料的存在对竖直附加力的影响。

(4) EPS 材料减荷效应的试验验证

创新研究方法, 采用模型试验、数值试验等手段, 验证矿井井筒中 EPS 材料的减荷效应, 分析其影响因素, 根据试验结论提出井壁受力计算的经验公式。

参考文献 References

- [1] Zhong Shiyun (钟世云), Li Yan (李岩). *Building Plastic* (建筑塑料) [M]. Beijing: China Petrochemical Press, 2007.
- [2] Dong Jinmei (董金梅). *Thesis for Doctorate* (博士论文) [D]. Nanjing: Hohai University, 2005: 7-10.
- [3] Duskov M. *Geotextiles and Geomembranes* [J], 1997 (15): 147-181.
- [4] Horvath J S. *Geotextiles and Geomembranes* [J], 1994 (13): 263-280.
- [5] Du Cheng (杜骋), Yang Jun (杨军). *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)* (东南大学学报(自然科学版)) [J], 2001, 31 (3): 138-142.
- [6] Bai Bing (白冰), Lu Shiqiang (陆士强). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (岩土工程学报) [J], 1993 (2): 104-108.
- [7] Zhang Zhongkun (张忠坤), Yin Zongze (殷宗泽), Cao Zhengkang (曹正康), et al. *Journal of Hohai University* (河海大学学报) [J], 1997 (5): 106-108.
- [8] Zhang Weibing (张卫兵). *Highway* (公路) [J], 2004 (5): 146-149.
- [9] Yan Zhiping (颜志平). *Highway Engineering* (公路工程) [J], 2005, 30 (4): 42-45.
- [10] Yi Habu (伊哈卜). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2006.
- [11] Yi Habu (伊哈卜), Xie Yongli (谢永利), Zhao Liya (赵丽娅). *Journal of Chang'an University (Natural Science Edition)* (长安大学学报(自然科学版)) [J], 2010, 30 (3): 18-23.
- [12] Cao Zhouyang (曹周阳), Wang Xiaomou (王晓谋). *China Plastics Industry* (塑料工业) [J], 2011, 39 (S1): 85-88.
- [13] Chen Leyi (陈乐怡), Zhang Congrong (张从容), Lei Yanxiang (雷燕湘), et al. *The Performance of the Commonly Used Synthetic Resin and Application Manual* (常用合成树脂的性能和应用手册) [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [14] Lai Yingde (赖应得). *Coal Mine Design* (煤矿设计) [J], 1989 (8): 1-5, 31.
- [15] He Jishan (何积善). *Coal Science and Technology* (煤炭科学技术) [J], 1979 (3): 1-5.
- [16] Zong Lan (宗兰), Li Zhangzhen (李章珍), Li Zhiqiang (李志强). *Journal of Hebei Institute of Civil Engineering* (河北建筑工程学院学报) [J], 2002, 20 (4): 38-40.
- [17] Yang Yongmin (杨永敏), Liu Qingyun (刘庆云). *Coal Mine Design* (煤矿设计) [J], 1985 (8): 4-6, 39.
- [18] Lai Yingde (赖应得). *Journal of Refrigeration* (制冷学报) [J], 1987, 1: 38-45.
- [19] Lai Yingde (赖应得). *Energy Support* (能量支护学) [M]. Beijing: Coal Industry Press, 2010.
- [20] Cui Guangxin (崔广心), Yang Weihao (杨维好), Lv Henglin (吕恒林). *Frozen Wall and the Borehole Wall in Deep Overburden* (深厚表土层中的冻结壁和井壁) [M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 1998.
- [21] Gu Anquan (顾安全). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (岩土工程学报) [J], 1981, 3 (1): 3-15.
- [22] Sladen J A, Oswell J M. *Canadian Geotechnical Journal* [J], 1988 (3): 541-549.
- [23] Wang Xiaomou (王晓谋), Gu Anquan (顾安全). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (岩土工程学报) [J], 1990, 12 (3): 83-89.
- [24] Jin Bing (金滨). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: Chang'an University, 2002.
- [25] Guo Tingting (郭婷婷). *Dissertation for Master* (硕士论文) [D]. Xi'an: North West Agriculture and Forestry University, 2004.
- [26] Gu Anquan (顾安全), Guo Tingting (郭婷婷), Wang Xingping (王兴平). *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (岩土工程学报) [J], 2005, 27 (5): 500-504.
- [27] Gu Anquan (顾安全), Lv Zhenfeng (吕镇锋), Jiang Fenglin (姜峰林), et al. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering* (岩土工程学报) [J], 2009, 31 (10): 1482-1486.
- [28] Partos A M, Kazaniwsky P M. *Proceeding-Geosynthetics* 87 [C]. New Orleans: Industrial Fabrics Association International, 1987: 628-639.
- [29] Horvath J S. *Proceeding-Geosynthetics* 91 [C]. New Orleans: Industrial Fabrics Association International, 1991: 409-424.
- [30] Horvath J S. *Proceedings of the International Symposium on EPS Construction Method* [C]. Tokyo: EPS Tokyo 1996, 1996: 71-81.
- [31] Horvath J S. *Geotextiles and Geomembranes* [J], 1997 (15): 77-120.
- [32] Zhang Xiaoping (张小平), Bao Chenggang (包承纲), Li Jinjun

- (李进军). *Geotechnical Engineering Technology* (岩土工程技术) [J], 2000 (1): 58–62.
- [33] Murphy G. *The Influence of Geofoam Creep on the Performance of a Compressible Inclusion* [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 1997 (15): 121–131.
- [34] Ge Zhesheng (葛折圣), Huang Xiaoming (黄晓明). *Journal of Transportation Engineering* (交通运输工程学报) [J], 2004, 4 (1): 11–14.
- [35] Zamani S, Bathurst R J. *Geosynthetics International* [J], 2007, 14 (3): 165–177.
- [36] Cui Xiaodong (崔晓东), Mei Guoxiong (梅国雄), Song Linhui (宋林辉), et al. *Building Science* (建筑科学) [J], 2007, 23 (9): 11–26.
- [37] Wang Yimin (汪益敏), Bathurst R J. *Chinese Journal of Civil Engineering* (土木工程学报) [J], 2008, 41 (10): 73–80.
- [38] Wei Jie (韦杰), Zhang Fan (张帆), Mei Guoxiong (梅国雄), et al. *Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition)* (南京工业大学学报(自然科学版)) [J], 2010, 32 (2): 62–65, 71.
- [39] Trandafir A C, Moyles J F, Erickson B A. *Proceedings of the Earth Retention Conference* [C]. Virginia: ASCE Geotechnical Special Publication No. 208, 2010: 756–763.
- [40] Trandafir A C, Ertugrul O L. *Proceedings of the Geo-Frontiers 2011* [C]. Virginia: ASCE Geotechnical Special Publication No. 211, 2011: 3177–3185.
- [41] Ertugrul O L, Trandafir A C. *ASCE Journal of Materials in Civil Engineering* [J], 2011, 23 (12): 1711–1718.
- [42] Ertugrul O L, Trandafir A C. *Engineering Geology* [J], 2013 (158): 23–33.
- [43] Zekkos A A, Lamote K, Athanasopoulos G A. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* [J], 2012 (41): 59–71.
- [44] Reeves J N, Filz G M. *Earth Force Reduction by a Synthetic Compressible Inclusion* [R]. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2000.
- [45] Fang Y S. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* [J], 1986, 112 (6): 317–333.

(编辑 吴琛)