

# 粉煤灰与 EPS 路堤研究综述\*

张忠坤<sup>1</sup> 侯学渊<sup>2</sup> 曹正康<sup>3</sup> 殷宗泽<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> 中国路桥(集团)总公司 北京 100011) (<sup>2</sup> 同济大学地下建筑工程系 上海 200092)  
(<sup>3</sup> 上海市市政工程设计研究院 上海 200092) (<sup>4</sup> 河海大学岩土工程研究所 南京 210098)

**摘要** 分析了国内外采用粉煤灰及聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)作为路堤填料以减轻路堤自重,从而减少路堤沉降的研究现状,进一步指出了EPS的多种土工应用意义。

**关键词** 路堤, 沉降, 粉煤灰, 聚苯乙烯泡沫塑料

**分类号** TU 411.93

**文献标识码** A

**文章编号** 1000-6915(2001)04-0538-05

## 1 引言

软土地基上高等级公路的路堤工程中,软土地基的沉降自施工时即已发生,从路面竣工或开放交通时起,在道路使用的一段时间(通常以路面设计年限控制)内发生的沉降定义为工后沉降 $S_s$ <sup>[1]</sup>,有效控制路堤的沉降是保证软土地基上高等级公路质量的关键。控制路堤沉降可以采取两种措施:(1)减轻所填筑的路堤的重量(同时保证满足路堤边坡稳定所需的路堤本身强度与变形),使软土路基所承受的上覆路堤荷载减小,进而可减小地基的压缩变形量,使路堤沉降量减小;(2)对路堤下的软土地基进行加固处理,改善地基条件。为了既保证路堤稳定性又能达到减小路堤沉降的目的,所采取的减轻路堤重量的方法应是寻找一种具有足够强度且不易压缩变形的轻质材料作为路堤填料。

## 2 路堤重量减轻技术的发展历史与研究现状

粉煤灰是电厂燃烧粉煤所排出的灰色粉沫灰渣,粉煤灰压实干重度<sup>[2]</sup>为 $10.7\sim 11.0\text{ kN/m}^3$ ,比土轻 $1/3\sim 1/5$ ,属于轻质材料。另外,室内试验表明,许多粉煤灰的抗剪强度参数完全满足公路路堤的要

求,一些具有自硬性的粉煤灰,抗剪强度随着时间的发展,还可超过土的抗剪强度<sup>[3]</sup>,故用粉煤灰代替土填筑路堤,可减轻路堤重量,在减小路堤沉降量的同时可满足路堤稳定性的要求,国内外软基路堤工程实践也证明粉煤灰是一种可行的减轻路堤重量的填料。

随着土工合成材料新品种的不断出现,其中的聚苯乙烯泡沫塑料(Expanded Polystyrene,简称EPS)是令人瞩目的品种之一,被称为土工领域的一场技术革命<sup>[4]</sup>。EPS块体的大小可根据需要进行生产,它的体积重度约为 $0.18\sim 0.4\text{ kN/m}^3$ ,约为普通土重度 $14\sim 20\text{ kN/m}^3$ 的 $1/50\sim 1/70$ ,属于超轻质材料。EPS的吸水量极小,脱热性能和耐水性能都很好,它具有一定的强度,抗压强度为 $100\sim 300\text{ kPa}$ <sup>[5]</sup>,通常路基所承受上覆路堤压力小于 $100\text{ kPa}$ 。因此,可用EPS作为路堤填料,以减轻路堤重量,减小路堤沉降量,同时保证路堤稳定性。EPS的出现使土工中原来难以解决的问题获得了令人满意的解决方法。1972年挪威道路研究所首次将 $1\text{ m}$ 厚的普通填料层换成聚苯乙烯板,成功地遏制了与桥台连接路堤的过渡沉陷,从此使EPS开创了在土工中应用的先例<sup>[6]</sup>。目前,应用于路堤填料的EPS的密度一般为 $0.2\text{ kN}$ ,因其本身具有足够强度,在路堤内应力环境中不易压缩变形,故其一方面可减少路堤自身的压缩变形量;另一方面可减少地基所承受的上覆路堤荷载,从而减小地基压缩变形量;故EPS

1999年11月30日收到初稿,2000年1月18日收到修改稿。

\*上海市博士后基金资助项目。

作者张忠坤简介:男,33岁,1998年于河海大学岩土工程专业获博士学位,2000年从同济大学岩土工程专业博士后出站后在中国路桥(集团)总公司任高级工程师,主要从事公路施工技术管理与项目投标等方面的工作。

的优良特性在于从这两个方面减少路堤的沉降量[7]。

### 2.1 粉煤灰作为路堤轻质填料的发展历史及研究现状

早在50年代,英美等国家就开始对粉煤灰填筑路堤进行了研究<sup>[3, 8]</sup>。英国为确定路堤设计的参数和施工方法而修筑了一系列的试验工程,60年代中期将粉煤灰的应用纳入了大不列颠快速干道计划。70年代以来美国及一些欧洲国家相继在高速公路工程中推广应用,在此基础上,一些国家制定了比较完善的粉煤灰筑路技术规范 and 相应的经济政策,较好地解决了粉煤灰运输、储存以及使用过程中对环境的污染等问题。80年代以来,我国公路部门开展了粉煤灰路堤的试验研究,西安坝桥、天津新港疏港公路、沪嘉及莘松高速公路等试验路堤的研究,获得了不少粉煤灰填筑路堤的有益经验。根据填筑路堤用灰量大、投资少的特点,以及沿海地区电厂多、排灰量大的情况,推广粉煤灰筑路技术,扩大粉煤灰筑路的应用范围和规模,也是粉煤灰综合利用的有效途径。粉煤灰用作路堤轻质填料的不利因素在于:粉煤灰为粉性材料,渗透性大,易为雨水冲淋流失。但这种不利因素可通过合理设置路堤结构形式加以克服,即将粉煤灰作为路堤芯材填料,外包粘土<sup>[9]</sup>。通常的粉煤灰路堤结构示意图如图1所示。

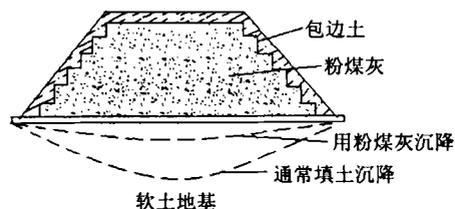


图1 粉煤灰路堤结构示意图

Fig.1 Structure of coal ash road embankment

目前对粉煤灰减轻路堤重量已做的研究主要包括:对粉煤灰的材料性能和工程特性的研究,对粉煤灰路堤施工工艺的研究,对粉煤灰路堤检测的研究和对粉煤灰路堤受力特性的研究。文[10]通过粉煤灰在“开洛”高速公路路堤中的应用,研究了粉煤灰的物理化学性质、颗粒组成、压缩性、内摩擦角及粘聚力、渗透性及毛细作用、击实性能、强度和CBR值;对粉煤灰的路用性能进行了论述和分析,提出了松铺系数、含水量控制、压实厚度等参数;特别就粉煤灰

粒径、形态和击实特性对压实控制的影响进行了研究,对高等级公路粉煤灰路堤现场检测方法和压实控制标准提出了看法和建议。文[9]通过对粉煤灰的材料性能和工程特性的研究,对粉煤灰路堤从路堤结构形式、边坡、压实标准、设计强度及沉降等提出了看法和建议;根据粉煤灰路堤的施工特点,提出了摊铺要求、含水量控制、压实机械碾压方式、碾压遍数等。文[8]结合“沪宁”高速公路路基的模型试验研究,通过室内材料试验与路堤模型试验,得出了粉煤灰轻质路堤在荷载作用下路堤内部定点应力、位移变化规律;说明了静载作用下,粉煤灰路堤内应力-荷载和表面位移-荷载基本上呈线性关系,只有在荷载较大的情况下出现非线性变化;粉煤灰路堤在荷载作用下的受力特点类同于土质路堤,同时,粉煤灰路堤的强度和稳定性亦能满足设计要求。用粉煤灰作为路堤轻质填料可发展粉煤灰的综合利用,也具有良好的经济效益。现有研究与工程实践均证明用粉煤灰作为路堤轻质填料是可行的。

### 2.2 EPS用作路堤超轻质填料的发展历史与研究应用现状

EPS应用于土工领域已有20多年的历史<sup>[11-19]</sup>,软土地基上的高等级公路常用重度为 $0.2 \text{ kN/m}^3$ 的EPS作为路堤填料,就是充分利用EPS密度小与力学性能好的特点,用以减小路堤本身的重量,进而减小路基压缩变形量和路堤沉降量,同时满足路堤边坡稳定性要求。EPS属于超轻质材料,它对路堤重量的减轻程度远远超过了粉煤灰对路堤重量的减轻程度。EPS用作路堤填料时,施工非常方便,EPS块体大小可根据需要进行生产,通常采用的EPS块体的大小尺寸为:长3m、宽1m、厚0.5m,类似手摆“积木”一样,不需要大型机械。挪威已经有50多个公路项目采用这种材料,用于桥台背路基与软土地基地段,通车数年而无沉降现象<sup>[17]</sup>。EPS自身强度足以满足路堤荷载与边坡稳定性要求,应用中EPS填筑高度一般在5m左右,可填高度最高达20m<sup>[17]</sup>。EPS用作路堤填料时,EPS两侧坡面用土包边,其路堤边坡的稳定性取决于包边土体的稳定性,而包边土体的稳定性则可用常规土力学中边坡稳定性的方法进行确定。由于EPS本身是块体且内聚力强的特点,存在EPS填料的路堤会使路堤边坡更趋稳定。EPS路堤施工中,EPS必须平放,为确保EPS填筑路基的良好排水,在最底层的EPS底部要垫铺透水砂层,要严格控制砂层及EPS铺砌层的平整度;铺砌的EPS块体之间不能留任何空隙,排列紧密,用

粘结材料或合缝钉将 EPS 块体结合在一起,以防路堤填筑过程中 EPS 块体的相互错动与移位,若 EPS 块体间产生缝隙或高低差,必须用无收缩水泥砂浆调整:在最上层 EPS 块体的顶面上铺设 12~15 cm 厚的钢筋混凝土,在这层钢筋混凝土上面再铺设的路面基底普通压实填料厚度不宜小于 30 cm,以便使路面基底能够得到充分压实<sup>[12]</sup>。EPS 用作路堤超轻质填料的不利因素在于 EPS 的抗风化性、耐冲击性和化学药剂性能差,但它作为路堤填料时被埋于土中,所受紫外线的影响小,老化缓慢,因此强度劣化很小,也就克服了这些不利因素。另外, EPS 不适用于在地表洪水泛滥地区用作路堤超轻质填料,以免地表洪水浮力将 EPS 路堤抬起,从而导致路堤破坏。EPS 作为路堤超轻质填料的结构示意如图 2 所示。

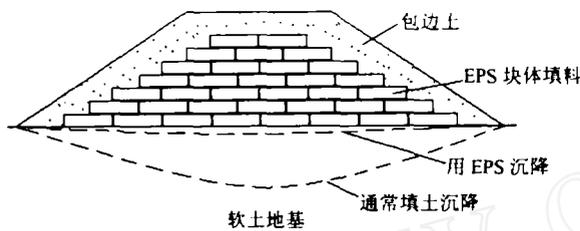


图 2 EPS 路堤结构示意图

Fig.2 Structure of EPS road embankment

EPS 首次作轻质填土材料,于 1972 年用于奥斯陆郊外的 Flom 大桥改造工程中,该桥建在年沉降量达 100 mm 的厚泥炭层上。未用 EPS 之前,年年都需要维修;采用 EPS 块体进行施工处理后,几乎再没有发生沉降。此后,挪威对 EPS 作了广泛的研究,到 1990 年底止,共完成 120 处 EPS 填方施工  $24 \times 10^4 \text{ m}^3$ ;瑞典、法国和德国也瞄准了 EPS,瑞典 1980 年就开始采用 EPS 修复年沉降量达 50~70 mm 的桥梁引桥。1985 年 6 月,在挪威召开了路堤工程填土中应用 EPS 的国际会议。日本不久就引进了这项技术,对 EPS 材料进行了广泛的研究,1986 年成立了 EPS 轻质填料开发机构,集中力量进行了 EPS 的研究开发和普及利用,并对筑造的 EPS 大规模填土工程进行了反复实车运行,研究了 EPS 的应力-应变关系和其他力学性质,证明了 EPS 能充分作为填土材料应用,并将这种材料广泛地推向了路堤填土工程的应用。

EPS 的力学性质不同于土的力学性质,正确地认识 EPS 的力学性质对正确地计算与分析 EPS 路堤的沉降变形,为路堤设计提供可靠的参数具有十分

重要的意义。国内外岩土工作者对 EPS 的研究可分为:对其物理化学性质的研究和对其力学性质的研究。物理化学性质方面,主要研究了 EPS 本身的物理化学性质特点和 EPS 块体所适应的周围水土介质环境,指出了在 EPS 的土工应用过程中,所应做的适当的防护措施。力学性质方面,主要研究了 EPS 的应力-应变关系、压缩变形特性、抗弯性能和摩擦性能。在 EPS 的应力-应变关系和压缩变形特性的研究中,主要做了单轴压缩试验和三轴压缩试验,得出了单轴压缩条件下及三轴压缩条件下的 EPS 应力-应变试验关系曲线。文[12]指出, EPS 为弹塑性体,单轴压缩条件下,当轴向压缩应变小于或等于 2% 时, EPS 为弹性体;当轴向压缩应变大于 2% 时, EPS 为弹塑性体。文[18]通过对体积重度  $\rho = 0.18 \text{ kN/m}^3$  的 EPS 的三轴压缩试验研究,得出了围压  $\sigma_3 = 10, 20, 30, 40, 50 \text{ kPa}$  条件下, EPS 的应力-应变关系及轴向应变与体积应变的试验关系曲线,但没有对这些关系曲线进行全面分析和进一步研究。

文[6]对 EPS 的力学性能进行了一些试验研究,主要包括:压缩性能试验、蠕变性能试验和加荷-卸荷试验;此外,还就 EPS 作为减压材料的应用进行了模型试验。该研究结果中根据轴向应变  $\epsilon$  值的大小,将 EPS 的压缩全过程划分为:弹性 ( $\epsilon < 5\%$ )、屈服 ( $\epsilon = 5\% \sim 50\%$ ) 和硬化 ( $\epsilon > 50\%$ ) 3 个阶段,但没有考虑围压对 EPS 的强度、变形及应力-应变关系的影响。

上面所述国内外岩土工作者对 EPS 应力-应变关系所做的不同研究结果表明:如何正确描述 EPS 的应力-应变关系特征的研究工作仍处在发展之中,只有通过试验,正确地确定 EPS 的应力-应变关系,才能适应当前 EPS 在土工应用中的计算要求。笔者通过三轴试验<sup>[7]</sup>,对重度  $\gamma = 0.2 \text{ kN/m}^3$  的 EPS 的应力-应变关系作了进一步深入的研究,得出 EPS 内在的力学性质规律性。所得 EPS 应力-应变关系曲线表明,在围压  $\sigma_3$  从 0 增大到 100 kPa 的过程中,近似为双曲线, EPS 试样结构达到破坏时所需的偏应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 减小(取  $\gamma_a$  为 15% 时的偏应力来分析),亦即结构强度减小,这一点与土的三轴试验结果恰恰相反;而在  $\sigma_3$  从 100 增至 300 kPa 的过程中,试样达到破坏时所需的偏应力 ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) 增大,这时情况又与土的三轴试验结果一致。围压  $\sigma_3$  从 0 增大到 100 kPa 的过程可视为 EPS 本身的结构破坏过程,因而强度降低;围压  $\sigma_3$  从 100 kPa 继续增大的过程可视为试样本身结构破坏已完成而致密,又进入了再压缩密实阶

段,因而表现出强度增大。

目前国内还很少有EPS路堤工程实例,笔者对宁—通一级公路K102+990断面处的路段,进行有限元数值模拟研究分析<sup>[19]</sup>,将采用EPS作为路堤重量减轻填料、用粉煤灰作为路堤重量减轻填料和普通土作为路堤填料时所产生的路基沉降,与该路段软土地基已经采用的二灰土桩复合地基加固之后再行路堤填土所产生的沉降进行数值模拟分析对比,研究结论表明,采用轻质填料能够明显减小路堤沉降量,EPS超轻质填料比相同厚度的粉煤灰填料对路堤沉降的减小程度大得多。

### 3 EPS的土工应用综合分析

EPS自身重量小的超轻质特性和其特有的力学性质,决定了EPS能够有效地减轻路堤重量,保证路堤强度和稳定性,从而有效地控制路堤沉降,保证路面的使用质量,从而也决定了EPS在路堤工程中特有的应用价值。EPS不仅可以用作路堤填料,在其他类似的低围压环境土工领域中,也可发挥出其特有的作用。桥台背面回填土的沉降往往产生引道部分和桥台的垂直错位,使用EPS代替填土就能有效防止基础下沉而避免垂直错位;EPS回填还可以减小桥台等构筑物侧向土压,减小构筑物的移动变位。在滑坡地区填土,由于填土的荷重,往往更容易导致坡地的滑动,若用EPS代替填土,则荷重将大大减小,可有效地防止滑坡的产生。高填土下的涵洞,由于填土厚,土压大,涵洞壁的断面厚度要很大才能承受上面的土压力,若在涵洞上面回填EPS,则土压大大减小,而且涵洞壁的断面厚度也可相应减小。在山地由于斜面崩塌及滑坡等原因造成的道路破坏,可考虑用EPS代替填土应急修复道路,施工容易且迅速,可根据现场情况灵活应用。在软弱地基中埋设多种管道,可以用EPS作为基础,以减小不均匀沉降的产生,防止基础差异沉降造成的管道破坏。军事工程中的临时铺路也可应用EPS作为主要铺垫层,其施工要求也比公路的施工要求简单得多,因公路的路堤EPS填料可认为是永久设施,而军事临时铺路中的EPS铺垫层是临时设施,且EPS临时铺垫层被拆除后,其中的EPS块体可以反复使用,这必然会节省大量的军事铺路工程费用。在城市地区的某些地段进行路堤施工时,为保护地下市政设施与临近建(构)筑物的安全,不允许对地基进行扰动类加固处理,但又要控制路堤沉降,EPS作为路堤填料,减

轻路堤重量,便可达到控制路堤沉降的目的。总之,EPS具有独特的土工应用价值,EPS的土工应用可节省相当体积的回填土,尤其是在人口众多、土地资源贫乏的我国,更应珍惜土地资源,重视EPS的土工应用;土地是生命之源,是人类乃至地球上所有动植物永久的财富,在实现我国现代化宏伟蓝图的建设过程中,也要将宝贵的土地资源留给我们的子孙万代。因此,EPS的土工应用也具有长远的社会意义。

### 4 结 语

在减小软土地基土方工程造成的沉降问题上,换土垫层法、预压法和排水法等以前都有许多学者与工程师作过充分的研究;但在对如何成功地将EPS应用于软土地基的处理问题上的研究仅是初步阶段。本文通过综合分析EPS与粉煤灰用作路堤轻质填料的研究发展现状,旨在更好地将这种技术应用于对路堤工后沉降量的有效控制,确保公路建设的工程质量。随着石油化工业科学技术的发展,EPS成品的造价与市场价格也会降低,故EPS在我国土工领域的工程应用,将会象西方国家一样,具有很大的发展潜力。

### 参 考 文 献

- 1 陆永青,李月光.软基路堤沉降计算方法的讨论[J].华东公路,1997,(6):50~54
- 2 徐 奔.粉煤灰在公路工程中的应用与前景[J].上海建设科技,1992,(2):33~34
- 3 沈华春.国外粉煤灰在路堤工程中的应用[J].国外公路,1993,(5):45~48
- 4 唐作华,唐业清.泡沫苯乙烯(EPS)轻量填土[A].见:龚晓南编.第三届全国地基处理学术讨论会论文集[C].杭州:浙江大学出版社,1992,484~485
- 5 王善存.超轻量填土材料——发泡苯乙烯[J].公路,1989,(9):39~41
- 6 白 冰,陆士强.聚苯乙烯泡沫塑料的测试及其在土工中的应用[J].岩土工程学报,1994,15(2):104~108
- 7 张忠坤,殷宗泽,曹正康等.聚苯乙烯泡沫塑料路堤填料三轴试验的研究[J].河海大学学报,1997,25(5):106~108
- 8 杨 军,韩以谦,邓学钧等.粉煤灰轻质路堤的静力模型试验研究[J].中国公路学报,1994,7(4):26~32
- 9 王 静.对粉煤灰填筑路堤的看法和建议[J].中南公路工程,1992,6(2):1~7
- 10 刘 华,张延华,张启亮.粉煤灰在“开洛”高速公路路堤中的应用与研究[J].中南公路工程,1993,9(3):28~34
- 11 Norwegian Road Research Laboratory. Expanded polystyrene used in

- road embankments[R]. Norway: Norwegian Road Research Laboratory, 1992
- 12 Forschungsgesellschaft für Straßen-und Verkehrswesen. Code of practice using expanded polystyrene for the construction of road embankments[S]. [s. l.]: [s. n.], 1995
- 13 Thomas A Coleman. Polystyrene Foam Is Competitive. Lightweight Fill[M]. New York: Civil Engineering, ASCE, 1974
- 14 Sorlie A. Use of Expanded Polystyrene in Road Congress [M] Vienna: [s. n.], 1979
- 15 Rygg N O. Polystyrene foam for lightweight road embankment[A]. In: Proc. 10th Inter. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering[C]. [s. l.]: [s. n.], 1981
- 16 Leif Eriksson, Roland Trank. Properties of expanded polystyrene laboratory experiments[R]. [s. l.]: SGI, 1988
- 17 王精一, 王乃. 北欧公路建设中的新技术新材料[J] 华东公路, 1994, (2): 35~36
- 18 EPS construction method development organization[R]. Technical report of Construction Method Using Expanded Polystyrene. Tokyo: EPS Construction Method Development Organization, 1991
- 19 张忠坤. 高等级公路路堤减轻与复合地基加固的研究[博士学位论文][D] 南京: 河海大学, 1998

## REVIEW ON COAL ASH AND EPS USED AS FILLER OF ROAD EMBANKMENT

Zhang Zhongkun<sup>1</sup>, Hou Xueyuan<sup>2</sup>, Cao Zhengkang<sup>3</sup>, Yin Zongze<sup>4</sup>

(<sup>1</sup> China Road and Bridge Corporation, Beijing 100011 China)

(<sup>2</sup> Department of Underground Construction, Tongji University, Shanghai 200092 China)

(<sup>3</sup> Institute of Municipal Design of Shanghai, Shanghai 200092 China)

(<sup>4</sup> Institute of Geotechnical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098 China)

**Abstract** The current study on both coal ash and expanded polystyrene (EPS) used as the filler of road embankment to reduce settlement of road embankment is reviewed. The extensive geotechnical meaning of EPS application is pointed out.

**Key words** road embankment, settlement, coal ash, expanded polystyrene(EPS)

### Calendar of Academic Events

#### 15th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Engineering

27~31 August 2001, Istanbul, Turkey

Contact: Ergun Togrol, Faculty of Civil Engineering, Istanbul Technical University, 80626 Ayazaga, Istanbul; Tel: 90 212 285 3747, Fax: 90 212 285 3582; e-mail: [15icsmqe@itu.edu.tr](mailto:15icsmqe@itu.edu.tr)

#### 1st Asian Pacific Congress on Computational Mechanics, APCOM'01

20~23 November 2001, Sydney, Australia

Contact: Dr. N. Khalili, School of Civil & Environmental Engineering, University of New South Wales, Sydney, NSW 2052, Australia; Fax: 61 2 9385 6139; e-mail: [n.khalili@unsw.edu.au](mailto:n.khalili@unsw.edu.au)

#### 3rd International Conference of Soft Soil Engineering

6~8 December 2001, Hong Kong

Contact: Miss May Ho, Conference Secretariat Section, The Hong Kong Institution of Engineers, 9/F Island Beverley, 1 Great George Street, Causeway Bay, Hong Kong; e-mail: [conf@hkie.org.hk](mailto:conf@hkie.org.hk)

(go to P559)