

粉煤灰筑路技术 译文集

交通部科学技术情报研究所

一九九〇年七月

粉煤灰筑路技术 译文集

交通部科学技术情报研究所

一九九〇年七月

编者的话

随着电力工业的发展，如何有效地利用火力发电厂排放的大量粉煤灰是一项迫切需要解决的问题。公路建设是可以大量利用粉煤灰的生产部门。在发达国家，粉煤灰筑路技术已经较为成熟。粉煤灰不仅是必须妥善处理的废弃物，而且已成为公路建设部门不可缺少的有用材料。在我国，粉煤灰筑路新技术也有了一定发展基础，并列为交通部1989—1991年国家指导性新技术推广项目。

为使我国公路建设部门的管理人员和技术人员了解国外粉煤灰筑路技术的最近动态，我们在广泛搜集资料的基础上编选了这本译文集。在选题时，我们注意既使读者了解到国外这项技术的一般情况，又能获得一定的理论研究成果和实用技术。希望它能够在帮助读者开拓思路、推进工作上起一点作用。欢迎读者对书中译文不妥乃至谬误之处提出批评，并欢迎在有关工作中和我们建立联系，索取资料。

责任编辑：沈华春

编辑：史扬

目 录

1. 粉煤灰在路堤工程中的应用 (美国) (1)
2. 伊利诺伊州粉煤灰路堤工程 (美国) (18)
3. 利用粉煤灰填充洼地 (美国) (24)
4. 粉煤灰—炉底灰混合料作路面基层或填筑路堤
的强度和耐久性 (日本) (28)
5. 粉煤灰在路面、路堤和回填中的应用 (美国) (37)
6. 粉煤灰用于路基和基层的试验研究 (西德) (42)
7. 粉煤灰水硬性基层的工艺、技术和经验 (西德) ... (50)
8. 美国联邦公路局研究的粉煤灰稳定土
概况 (美国) (59)
9. 利用低活性粉煤灰修筑基层的工艺 (苏联) (62)
10. 粉煤灰对掺灰硅酸盐水泥混凝土强度
的影响 (美国) (66)
11. 高粉煤灰含量混凝土的特性 (澳大利亚) (73)
12. 粉煤灰混凝土的设计 (澳大利亚) (90)
13. 粉煤灰效率系数与混凝土强度和耐久性
的关系 (澳大利亚) (101)
14. 粉煤灰在混凝土中的应用 (美国) (111)
15. 对用作普通水泥混凝土无机混合料的粉煤灰和
未经处理或经过煅烧的天然火山灰的标准技术
要求 (ASTM编号: C618-87) (美国) (147)
16. 对用作普通水泥混凝土无机混合料的粉煤灰或
天然火山灰进行取样和试验的标准试验方法
(ASTM编号: C311-87a) (美国) (153)
17. 英国标准BS3892: 粉煤灰 (英国) (166)
18. 粉煤灰新的有效利用技术 (日本) (192)
19. 在沥青中掺用煤灰 (美国) (200)

粉煤灰在路堤工程中的应用

John H. Faber, 全国煤灰协会 (NAA)

Anthony M. DiGioia, Jr., GAI 咨询公司

与自然资源不断枯竭相伴的全球性能源问题使工程领域的主体部门和建设规模不断扩大的部门清醒地认识到,要有效地解决这些问题,在今后数十年内就必须大量增加利用电力工业副产品,如粉煤灰、底灰、炉渣。实际情况也表明,面对天然工程材料短缺的挑战,对保护和利用材料资源新技术的迫切需要与日俱增。

所幸经过全国煤灰协会、矿务管理局、院校、私人企业和其他部门的共同努力,在公路工程中利用粉煤灰、底灰和炉渣的技术已基本可行。目前,粉煤灰在路堤工程中用作填方材料,在沥青混凝土路面中可用粉煤灰、底灰和炉渣作填充料。此外,在水泥稳定或石灰稳定基层施工中还可利用粉煤灰作为火山灰质水硬性材料,在很多情况下可用炉渣作为集料。在欧洲,水泥结粉煤灰基层的设计和施工技术已经得到发展,在美国则通过全国煤灰协会投资的一项工程使这项技术得到进一步发展。底灰和炉渣在冬季还用作路面的防滑材料。

大量利用粉煤灰的较有前途的理想方式是用它来修筑路堤。本文介绍了利用粉煤灰作为路堤填方材料的若干工程项目。此外,还综合介绍了美国和英国收集利用煤灰的数量,讨论了粉煤灰、底灰和炉渣的化学成分、指标和工程性质。

收集利用情况

图1以州为单位显示了1973年主要发电厂燃煤的大致数量。其中,燃煤总量的85%以上是由密西西比河以东的发电厂消耗的。图2按区域显示了美国电力工业燃煤的大致数量和煤灰的排放与

利用数量,图3根据全国煤灰协会提供的数据逐年显示了1975年以前电力工业耗煤和排放煤灰的实际数字和以后年度的预计数字。

表1给出了由全国煤灰协会提供的1974年美国利用煤灰的数字。表2逐年给出了自1966至1974年美国收集利用粉煤灰的数字,表明在这段时期煤灰排放量增长了约135%,而利用量则增长了180%以上,同时也表明目前在堆放场地每年必然仍要积存大量煤灰。例如,1974年约有4600万吨煤灰未得到利用。因此,这些有利用价值的副产品在全美的积存数量仍在增长,特别是由于联邦能源管理局最近要求许多发电厂由利用油料转向利用煤炭,今后这种情况还会持续下去。这种局面自然而然地推动我们在公路工程中尽量利用粉煤灰。

1974年美国利用煤灰的情况(百万吨计)

表 1

目 项	粉 煤 灰	底 灰	炉 渣	总 重
煤灰利用方式				
加入1—P型水泥或水泥生产原料中	0.4	<0.1	/	70.4
在混凝土及其制品中部分代替水泥	0.5	/	/	0.5
轻质集料	0.1	0.1	/	0.2
稳定剂和路面材料	0.3	0.5	1.1	1.9
沥青混和料中的填充料	0.1	<0.1	<0.1	>0.1
其它	0.4	0.8	0.9	2.2
总计	1.8	>1.5	>2.0	>5.3
免费从电厂运出以便利用的煤灰数量	0.4	0.5	0.1	1.0
提存利用数量	0.9	0.6	0.1	1.6
按重量总计 数量 百分比	3.1 8.5	2.6 20.0	2.2 50.0	7.9 14.6

注:有关炉渣的数字是指将炉渣从煤灰中分离出来加以利用的数字

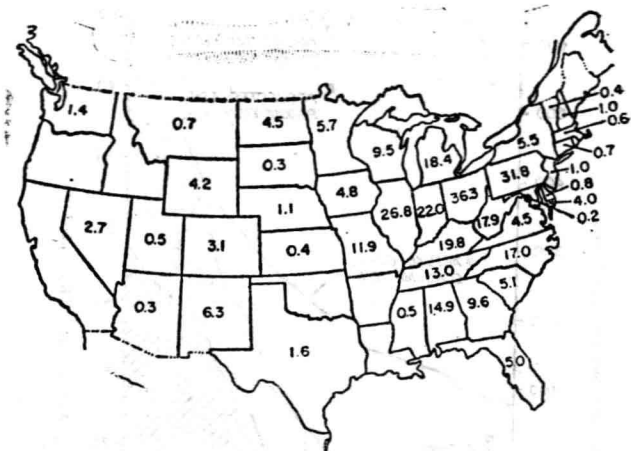
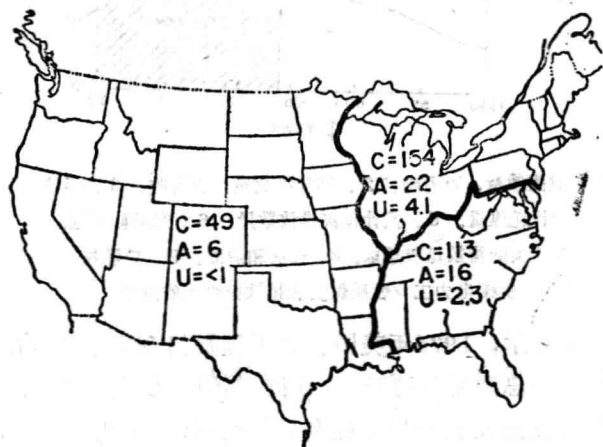
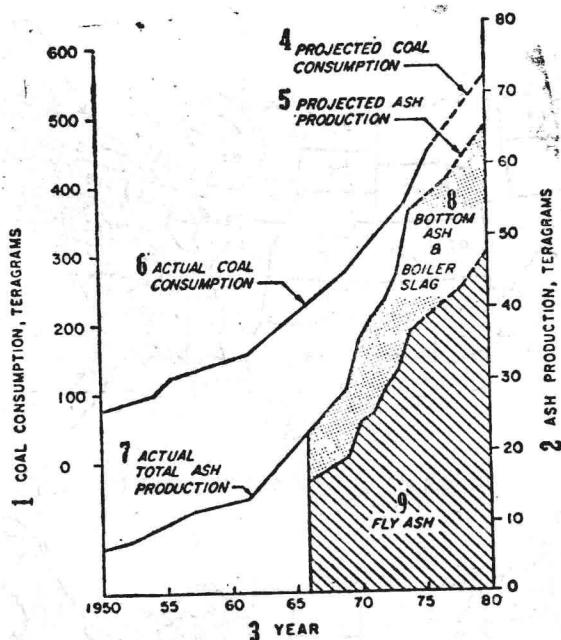


图 1、1973年美国各州发电厂燃耗煤炭的大约数量（图中数字以百万吨计）



A=煤灰排放量，U=煤灰利用量，C=燃煤数量，

图 2、1973年美国各地区发电厂燃煤数量和粉煤灰排放与利用数量（图中数字以百万吨计）



1. 燃煤数量, 百万吨。2. 煤灰排放量, 百万吨。3. 年份。
 4. 预计耗煤量。5. 预计煤灰排放数量。6. 实际耗煤量。
 7. 实际排放煤灰总量。8. 底灰和炉渣。9. 粉煤灰。

图 3. 美国电力工业燃耗煤炭和排放粉煤灰的数量

如表 1 所示, 1974 年美国公路工程部门利用了约 200 万吨煤灰, 约占当年总利用量的 25%。而在英国, 如表 3 所示, 1973 年至 1974 年度道路和路堤工程利用了约 160 万吨煤灰, 约占当年总利用量的 35%。过去, 英国的这项数字曾达到 67%。毫无疑问, 在美国公路工程部门是煤灰的最大用户。俄亥俄州大学获得了一项研究在沥青基层和面层中应用电厂底灰的合同。其目的是研究在沥青混合料中应用底灰的可行性, 提出这种材料的物理性质和工程性质技术数据。

GAI 咨询公司获得了研究以粉煤灰作为公路工程材料的另一项合同。与俄亥俄州大学的研究项目一样, 其研究的主要目的是

向设计和施工工程师提供旨在促进在公路工程项目中应用粉煤灰的用户手册。该手册要为粉煤灰用于下列用途提供数据和资料：与水泥和石灰稳定材料一起作为底基层和基层材料，用作土壤稳定材料，用作路堤填方材料，用作坡体稳定工程中的轻质填料，用于拌制薄浆混合料，用于结构回填。

1966—1974年美国回收利用煤灰的数量（除百分比数字外均按百万吨计）

表 2

年 度	回 收 数 量				利 用 数 量							
					粉煤灰		底 灰		炉 渣		总 计	
	粉煤灰	底灰	炉渣	总计	数量	%	数量	%	数量	%	数量	%
1966	15.5	7.4	/	22.9	1.3	8.4	1.5	20.3	/	/	2.8	12.3
1967	16.7	8.2	/	24.9	1.3	7.8	2.1	25.6	/	/	3.4	13.7
1968	18.0	6.6	2.4	27.0	1.7	9.4	1.6	24.2	1.4	58.3	4.7	17.4
1969	19.1	6.9	2.6	28.6	1.7	8.9	1.8	26.1	0.9	34.6	3.7	12.9
1970	24.0	9.0	2.5	35.5	2.0	8.3	1.6	17.8	1.0	39.4	4.6	13.0
1971	25.2	9.2	4.5	38.9	3.0	11.9	1.5	16.3	3.4	75.6	7.9	20.3
1972	28.8	9.7	3.5	42.0	3.3	11.5	2.4	14.7	1.2	34.3	6.9	16.4
1973	31.4	9.7	3.6	44.7	3.5	11.1	2.1	21.6	1.6	44.4	7.2	16.1
1974	36.6	13.0	4.4	54.0	3.1	8.5	2.6	20.0	2.2	50.0	7.9	14.6

注：1974年统计比较全面，故当年数字较以往年度有较大增加。

1973—1974年英国回收利用煤灰的数量

表 3

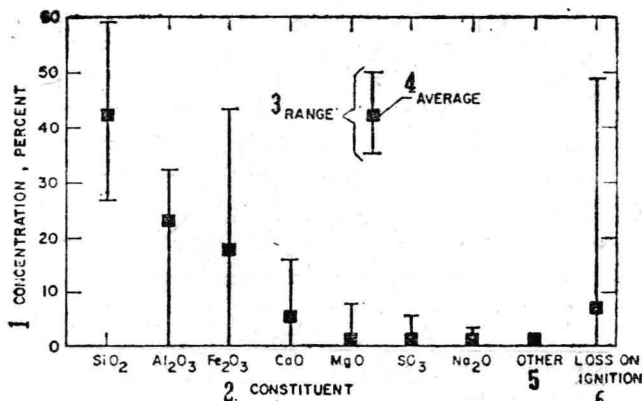
项 目	煤灰数量 (百万吨)
回收总量	8.8
利用煤灰的不同方式	
制造水泥	<0.1
生产混凝土	0.1
混凝土块	1.3
轻质集料	0.2
灌浆	0.1
填料	
路面和路堤	1.6
建筑工地填料	0.9
其他方面	0.1
总用量	
重量	4.3
占回收量的百分比	48.9

煤灰的化学性质

粉煤灰：图 4 所示为美国排放的粉煤灰的化学组成情况。它表明粉煤灰的基本成份是硅石 (SiO_2)、矾土 (Al_2O_3) 和铁的氧化物 (Fe_2O_3)，还有少量氧化钙 (CaO)、氧化镁 (MgO)、三氧化硫 (SO_3)、氧化钠 (Na_2O) 和未燃尽的碳。对粉煤灰质量指标和工程性质最有影响的成份是游离的石灰和未燃尽的碳。游离石灰可影响粉煤灰的火山灰反应，未燃尽的碳则影响其压实和强度性能。粉煤灰中的水溶成份是钙和硫。

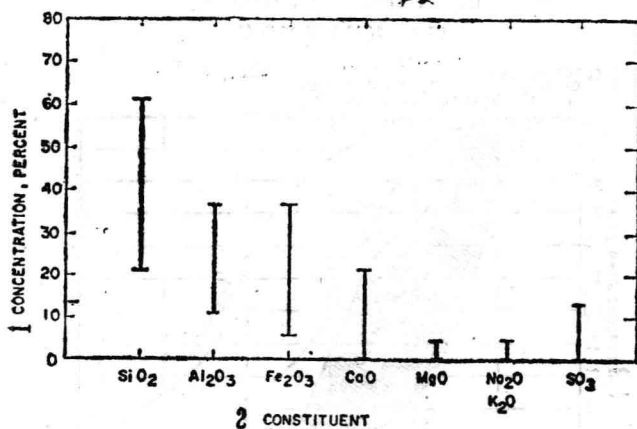
底灰和炉渣：图 5 所示为底灰和炉渣的化学组成情况。与粉煤灰相似，底灰和炉渣的主要成份是硅石、矾土和铁氧化物，还有

少量氧化钙、氧化镁、氧化钠、氧化钾 (K_2O)、三氧化硫和其它成份。



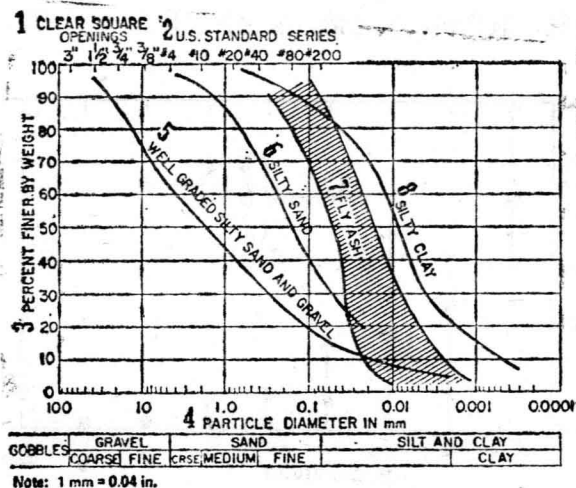
1. 含量, %。2. 成份。3. 范围。4. 平均值。5. 其它。6. 烧失量

图 4、美国粉煤灰化学组成情况



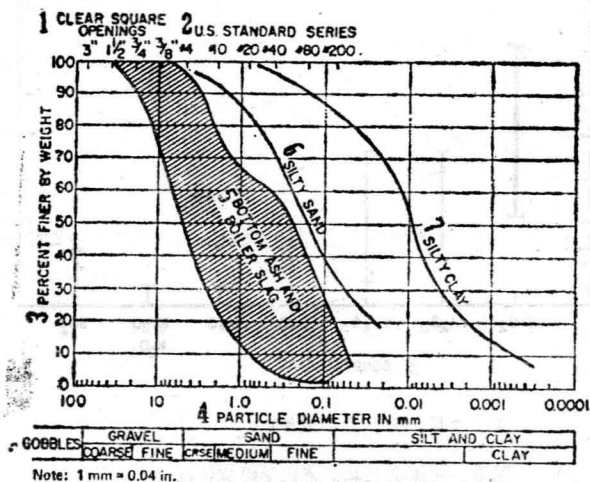
1. 含量, %。2. 成份。

图 5、美国底灰和炉渣化学组成情况



1. 方孔筛净孔。2. 美国标准筛号。3. 小于某粒径的重量百分率。4. 粒径，毫米。5. 级配良好的粉砂土和砾石。6. 粉质砂土。7. 粉煤灰。9. 粉质粘土。

图6、粉煤灰粒度分布



1. 方孔筛净孔。2. 美国标准筛号。3. 小于某粒径的重量百分率。4. 粒径，毫米。5 底灰和炉渣。6、粉质砂土。7、粉质粘土。

图7底灰和炉渣粒度分布

煤灰的质量指标

粉煤灰：粉煤灰的特征是比重小、粒径比较单一、塑性低。粉煤灰颗粒物的比重是随其化学组成变化的。根据对宾夕法尼亚州西部地区堆放的粉煤灰进行的46个试验结果，表明粉煤灰比重的变化范围是2.3~2.6，平均约为2.4。而大多数土壤的比重约为2.6~2.8。

粉煤灰的粒径分布范围如图6所示，它表明与几种土壤相比，粉煤灰的粒径分布是比较单一的，由于粉煤灰颗粒呈球状、表面积小且差不多都属于比较一致的粉状粒径，所以它不具备塑性。

底灰和炉渣：

表4为几种底灰和炉渣样品的比重。一般来说，炉渣的比重要大于底灰。由于它们的比重是由其化学组成决定的，所以含铁(Fe_2O_3)量高的煤灰显然比重也较大。

底灰和炉渣的比重

表 4

来 源	底灰	炉渣	比重
Fort Mortin			
一厂	干底		2.35
二厂	干底		2.48
kammer		湿底	2.72
kanawhe river	干底		2.28
Mltchell	干底		2.78
Mnskinehem		湿底	2.47
Wi llow Island		湿底	2.61

图7所示为底灰和炉渣的粒径分布范围,表明从细砂到细小砾石状的粒径均存在。其中,炉渣的粒径比较一致。

煤灰的工程性质

粉煤灰:图8所示为按AASHTO T-180标准进行的七项压实试验中粉煤灰干容重与含水量的关系。压实曲线的形状总体上与粘性土相似。亦即,与粘性土的情况非常相似,在一定的压实能量下粉煤灰也存在一个可达到最大密度的最佳含水量。其最大密度可从最佳含水量为19%的 $1426\text{kg}/\text{m}^3$ 变化到最佳含水量为29%的 $1233\text{kg}/\text{m}^3$ 。

在图8中还沿零含水量线绘出了按ASTM D2049-69标准对干燥粉煤灰试样做的六个相对密度试验结果。最大相对密度为 $1250\sim 1410\text{kg}/\text{m}^3$,相应地,最小相对密度为 $961\sim 1073\text{kg}/\text{m}^3$ 。

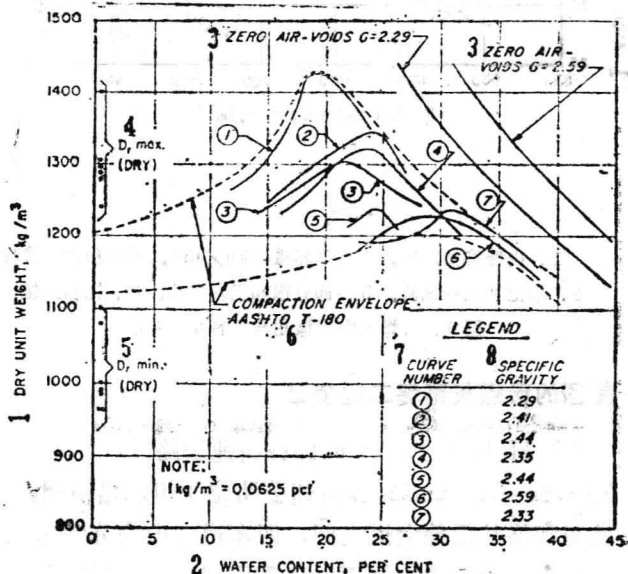
粉煤灰的抗剪强度取决于其压实度。对压实完毕不久的粉煤灰试样进行直剪试验和三轴试验的结果如图9所示,它显示了宾夕法尼亚州西部地区排放的粉煤灰的内摩擦角与干容重关系的一般情况。这些强度数据表明,对于松散堆填和完全排除水分的粉煤灰路堤,采用1:4的边坡即可保证稳定,经过良好压实和完全排除水分的路堤则其边坡可采用1:2的坡度。此外还表明,由于空隙水的界面张力作用粉煤灰具有显著的粘聚力,又由于其经久硬化或火山灰作用,其抗剪强度也会随时间发生显著变化。粉煤灰经久硬化的作用与其中所含游离石灰的数量有极为密切的关系。

粉煤灰的固结过程非常类似于粘性土。也就是说,在竖向压力的作用下。最初由土壤结构和孔隙水分担应力。随着空隙水不断被挤压排出,超孔隙水压力逐渐消失;由于孔隙水压力消失,应力荷载转移到粉煤灰结构上。这一过程中要发生灰体体积上的变化。试验室固结试验表明,压实可以显著地降低粉煤灰的压缩性。

粉煤灰的渗透系数取决于它的压实度和火山灰反应程度。在美国，新填筑粉煤灰的渗透系数为 $1 \sim 5 \mu\text{m/s}$ 。如在粉煤灰中掺入10%的石灰和水泥，可使其渗透系数降低10倍。

底灰和炉渣：已发表的有关底灰和炉渣压实、强度和渗透性的数据较有限。底灰的最大和最小相对密度分别为 $1105 \sim 1860 \text{ kg/m}^3$ 和 $800 \sim 1458 \text{ kg/m}^3$ 。炉渣的最大和最小相对密度分别为 $1458 \sim 1762 \text{ kg/m}^3$ 和 $1137 \sim 1410 \text{ kg/m}^3$ 。

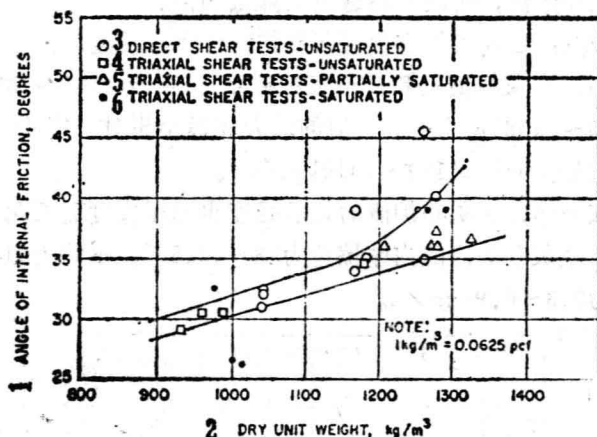
同粉煤灰一样，底灰和炉渣的抗剪强度也随压实度而变化。在松散状态下底灰和炉渣的内摩擦角为 $38 \sim 42.5^\circ$ ，平均为 41° 。其渗透系数为 $0.3 \sim 0.9 \text{ mm/s}$ 。



1、干容重， kg/m^3 。2、含水量，%。3、零空隙比重。4、最大相对密度。5、最小相对密度。6、压实包络曲线（AASHTO T-180）。

7、曲线号。8、比重。

图8. 粉煤灰实验室击实试验结果



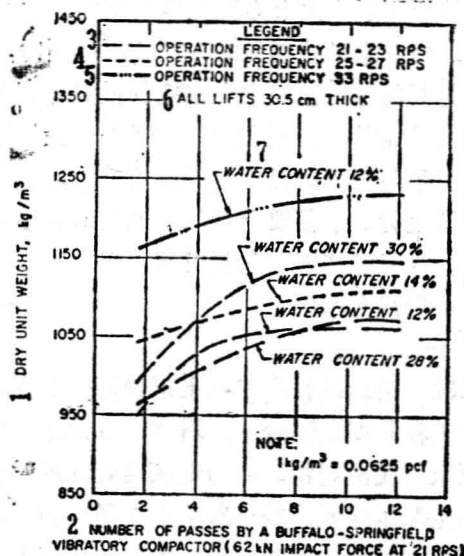
1、内摩擦角，度。2、干容重， kg/m^3 。不饱和直剪试验。
4、不饱和三轴试验。5、部分饱和三轴试验。6、饱和三轴试验。

图9. 粉煤灰内摩擦角与干容重的关系

美国的粉煤灰路堤工程项目

(1) Melvin E. Amstutz高速公路

Melvin E. Amstutz高速公路位于伊利诺伊州 Waukegan 的格兰德和格林伍德大道之间，四车道，中央分隔带宽12.8米。其工程包括填方路堤的施工。工程承包商采取了用粉煤灰修筑路堤的D方案，报价为2.42美元/立方米。按此报价，粉煤灰路堤可比填土路堤节省约6.2万美元。工程合同规定的粉煤灰填筑和压实工作的数量为188,845 m^3 。粉煤灰路堤的平均高度为1.1m，在匝道地段其高度则达到5.5~6.1米。在中央分隔带，粉煤灰路堤的上方覆盖0.6米的土层，在边坡外侧其上覆盖土层厚度为



- 1、干容重, kg/m^3 。2、用BUFFALO-SPRINGFIELD振动压路机进行压实的遍数(每秒21转时冲击力为62KN)。3、工作频率21~23转/秒。4、工作频率25~27转/秒。5、工作频率33转/秒。6、压实层厚均为30.5厘米。7、含水量。

图10. 粉煤灰现场振动压实试验结果

2.4米。

施工时,将粉煤灰从封闭的干燥储灰池或电厂外的堆场用卡车运到现场,每层摊铺厚度为15.2厘米。按AASHTO T-99标准,采用振动一重力压路机对每层粉煤灰进行碾压,最低密度要达到试验室最大密度的85%。用于这项工程的粉煤灰的最佳含水量为25%,相应的最大干密度为 $1426\text{kg}/\text{m}^3$ 。为达到所要求的密实度,承包商在粉煤灰中适当地加了水。

在填筑粉煤灰前,清除了现场不适应工程要求的土层,在地下水位标高以上0.6米范围内换填了粒料。

根据从此项工程中获得的经验,伊利诺伊州运输局认为:

全部情况表明,由于粉煤灰的经久硬化特性,在本项工程中