

首钢道路用钢渣混合料的研究与应用

谢产庭 张秉广 杨圣明 苏连生

一、概述

沥青路面使用多年后将会发生开裂，雨水沿裂缝进入沥青面层及基层并渗入路基，导致路面承载能力降低，使用寿命缩短。承重层中的基层材料板体性差，整体强度低，是造成开裂的原因之一。采用石灰、粉煤灰等无机结合料及稳定的首钢钢渣做道路的新型基层材料是一个很好的研究与开发课题。

首钢钢渣是在转炉炼钢过程中排出的液态熔渣冷却后形成的，每年产出量100万吨左右。液态钢渣装入渣罐由炼钢厂运至渣厂后进行热泼，然后向热渣打水，一吨渣打一吨水，持续泼渣和打水至渣厚达6-8m时，泼渣位置水平移动，打水后的渣进入闷渣阶段，7天后用电铲对已闷过的渣进行一次翻倒，完成了闷渣处理作业过程的一个周期。进入破碎、筛分、磁选加工技术生产线，生产出含MFe<1%、粒度0-30mm自然级配的钢渣尾料产品，在料场自然堆放3个月进一步消解后作为生产二灰钢渣混合料的原料。

钢渣的主要化学成分为：SiO₂、FeO·CaO、Al₂O₃、CaO、MgO、FeO，其中SiO₂和Al₂O₃之和约占19.4%，CaO和MgO之和约占57.7%，说明钢渣具有较大的活性。

1995年至1997年，首钢研究与开发公司和北京市市政工程研究院共同完成了钢渣作为道路基层材料的研究，北京市科委通过了该项科研成果的鉴定。1997年以后已开始在北京市道路建设中应用。

二、材料性能的实验室试验

1、原材料性能

石灰、粉煤灰性能见表1

石灰、粉煤灰性能

表1

材料名称	CaO+MgO (%)	SiO ₂ (%)	Al ₂ O ₃ (%)	烧失量 (%)	最大干密度 r(g/cm ³)	最佳含水量 w (%)
消解石灰	61.60 62.60					
粉煤灰		53.08	17.92	10.29	0.672	9.7
标准要求	>60*	>70**		<20**		

注：*GB1594-79中二级钙质消解石灰标准；**JTJ034-93。

从表1可见，消解石灰和粉煤灰性能均符合我国标准的要求。

钢渣性能见表2

钢渣性能

表2

材料名称	压碎值 (%)	f _{50%} (%)	粉化率 波动上限 (%)
钢渣	22.30	1.25 0.74	1.18
行标要求	<35*	<3**	<5***

注：*JTJ034-93；**CJJ35-90；***YBJ230-91。

从表 2 可以看出，钢渣的强度（压碎值）和稳定性指标 (f_{co} 和粉化率波动上限) 均能满足我国交通、城建、冶金行业标准的要求。

2、石灰粉煤灰钢渣混合料和石灰粉煤灰砂砾混合料性能

对 95 年 6 月到 97 年 5 月首钢生产的石灰粉煤灰钢渣混合料和外购的石灰粉煤灰砂砾料的主要性能进行了试验，其结果见表 3。

两种钢渣混合料性能试验结果

表 3

试验项目 混合料品种	最佳 含水量 (%)	最大 干密度 (g/cm ³)	石灰 含量 (%)	抗压强度(MPa)				规范要求			
				试验结果							
				R ₇	R ₁₄	R ₂₈					
石灰粉煤灰 钢渣混合料	9.9	2.38	3.9	1.79	--	3.88	>0.6				
	9.5	2.18	3.3	--	--	--					
	11.9	2.14	4.0	2.2	2.87	5.18					
石灰粉煤灰 砂砾混合料	6.9	2.21	--	0.41	--	0.78	>0.6	1.5-2.0			

注：*JTJ034-93；**DBJ01-11-95

表 3 中石灰粉煤灰钢渣混合料的七天浸水抗压强度为 1.79MPa 和 2.2MPa；参照《公路路面基层施工技术规范》(JTJ034-93) 中二级和二级以下公路基层的二灰混合料 R₇ 要求大于或等于 0.6MPa 的标准增加近 2 倍。二十八天浸水抗压强度达到了 3.88 MPa 和 5.18 MPa。从五个龄期的抗压强度增长规律看，随着龄期的增加，强度呈线性上升趋势。相关系数为 0.94。

石灰粉煤灰钢渣混合料筛分结果见表 4

两种基层混合料筛分结果

表 4

筛孔尺寸 (mm)	30	20	10	5	2.5	1.25	0.6	0.3	0.15	0.075		
筛下累计重量百分数 (%)	石灰粉煤 渣混合料	第一次取样	100	86.9	63.6	46.4	35.7	31.1	24.5	18.8	14.5	7.0
	石灰粉煤 渣混合料	第二次取样	100	98.9	81.8	64.4	50.8	44.5	35.6	28.9	22.5	-
	一次混合料中集料级配 范围 2 号 (JTJ034-93)	100	90- 100	55- 80	40- 65	(2.0) 28- 50	(1.0) 20- 40	(0.5) 10- 20	-	-	0- 10	
	石灰粉 煤渣 砂砾 混合 料	第一次取样	(40) 83.1	46.2	34.4	28.5	26.2	24.6	20.9	18.1	14.2	-
	石灰粉 煤渣 砂砾 混合 料	第二次取样	100	86.5	73.2	62.0	53.2	48.2	35.8	21.2	13.5	-
	一次混合料中集料级配 范围 1 号 (JTJ034-93)	100	60- 85	50- 70	40- 60	(2.0) 27- 47	(1.0) 20- 40	(0.5) 10- 30	-	-	0- 15	

注：*钢渣最大粒径为 3.0 mm，**砂砾最大粒径为 4.0 mm，括号内为筛孔孔径。

从表 4 石灰粉煤灰钢渣混合料筛分结果看：

第一次取样筛分结果与 JTJ034-93 二灰混合料集料 2 号级配范围相比，主要筛孔的通过量都在标准级配范围内。

第二次取样筛分结果的主要筛孔通过量接近标准级配范围的上限，比第一次料偏细。

三、试验路的施工

试验路段地处首钢预制品厂南侧，东西向全长406米，宽9.0米，除在东端与古城南路交接处做一段路面外，其余均做成沥青混凝土路。为了检验道路的实用性能，对比分析两种基层混合料抗压强度、回弹弯沉及抗压回弹模量的变化情况，东半部276米试验路基层为石灰粉煤灰钢渣混合料，西半部130米对比路段基层为石灰粉煤灰砂砾混合料。

原路由于长年通行40吨和60吨运钢坯的拖车，加上原有沥青路面设计等级较低，路面破坏十分严重，出现坑洞、积水，车辆已无法正常行驶。因此，首钢民建公司于95年6月下旬到7月底按试验路结构进行改建。

1、试验路面结构

根据旧路现状和交通荷载情况，考虑到以下几点：

①、为保证沥青面层在高温和重载条件下不产生拥包和车辙变形，沥青混凝土表面层即细粒式沥青混凝土厚度不宜太厚，一般采用2cm，并适当增加中粒式沥青混凝土厚度。

②、厂拌沥青碎石的强度、整体稳定性均明显优于石渣。

③、旧路系土和碎石粒料基层加沥青面层，坑洼不平、松散严重，宜利用旧路表面材料翻松后掺入12%的石灰做成底基层，以提高道路的整体强度。

在首钢设计院设计的路面结构基础上，经研究修改后，商定如下路面结构，见图1

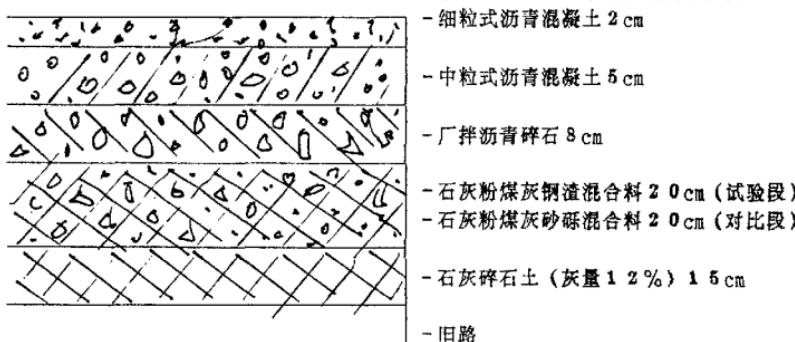


图1 实际施工的路面结构

2、试验路施工简述

①、石灰碎石土底基层

用推土机将旧路的碎石和土铲松、基本推平后，人工均匀撒灰，用推土机推刮两遍，再用机械或人工推平，最后在含水量合适情况下用1.2-1.5t压路机碾压3遍成型。采用MC-3型核密仪测试底基层的密度，压实度达到了98.6%，符合要求。

②、石灰粉煤灰钢渣混合料基层

试验段东起门卫室，西至预制品厂南门向西约20m处。石灰粉煤灰钢渣混合料由首钢研究与开发公司综合利用厂生产，汽车运到施工现场，每3-5m堆放成堆，然后由两台推土机整平，局部由人工整平，充分洒水养生，再采用8-10t和12-15t压路机各碾压4遍成型。用MC-3型核密仪跟踪测试密度，压实度达96.5%。满足建设部行标《钢渣石灰类道路基层施工及验收规范》(CJJ35-90)基层压实度大于95%要求，无明显轮迹。

③、石灰粉煤灰砂砾混合料基层

试验路西半部约130m基层采用石灰粉煤灰砂砾混合料，由门头沟永联砂石厂生产。来料先用推土机基本推平，然后用人工整平。碾压前洒水养生。先用8-10t两轮压路机碾压3遍，后用12-15t三轮压路机碾压4遍成型。用MC-3型核密度仪跟踪测试密度，压实度为95.4%，达到有关指标要求(>95%)。

④、沥青混合料层施工

沥青混合料分三层施工，连接层为厂拌沥青碎石，中层为中粒式混凝土，上面层为细粒式沥青混凝土。沥青混合料由门头沟公路分局沥青厂生产，汽车送到施工现场。来料温度大都在130-150℃，摊铺温度在120-140℃，上碾温度都在100-110℃，先用8-10t压路机碾压3-4遍，后用12--15t重碾压3遍，重碾温度一般不低于50℃，均属常规施工。

碾压过程中用MC-3型核子密度仪跟踪测试密度，发现不合格部位及时追压密实，使各结构层的沥青混合料均满足压实度的要求。

四、路用性能观测

1、沥青面层综合密度检测

试验路全部完成后，用MC-3型核子密度仪对东段、西段的沥青面层（即细粒式沥青混凝土+中粒式沥青混凝土）进行全面测试。石灰粉煤灰钢渣混合料层压实度达到了99.4%，石灰粉煤灰砂砾混合料对比段沥青层密实度达到了98.2%，均符合施工技术指标>95%的要求。

2、整体路面使用前后综合评价

沥青面层采用人工摊铺，基本平整，没有出现大的起伏。沥青混合料粘结良好，没有发现脱粒现象。通车二年后，路面没有出现车辙、拥包及因基层材料引起的爆裂现象。总的情况是良好的，长期效果还有待进一步观测。

3、整体回弹弯沉值和曲率半径的对比测试

1995年到1997年，在竣工时、冻前、春融期分五次对试验段和对比段进行回弹弯沉值和曲率半径的测定，观察石灰粉煤灰钢渣混合料基层试验段与石灰粉煤灰砂砾混合料基层对比段整体弯沉值（体现承载力）的差别及发展变化情况，从而为判断钢渣混合料修筑道路基层的应用前景提供科学依据。

①、测试方法及要求

路面弯沉值测定方法按照现行国家行业标准，按拟定的检测方法进行。

测定车采用标准的黄河车JN171型，后轴重及配载 $100 \pm 2\text{ kN}$ ，轮胎气压为 0.7 MPa ，用一台贝克曼梁弯沉测左后轮轮隙中心位置的弯沉值，用一台曲率仪在右后轮轮隙中心测曲率半径。

试验路宽度为9m，由于该路为东西走向，由西往东是首钢运钢坯车必经之路，所以选择在该路南半幅进行测试。试验段和对比段每段各测9点，最后计算弯沉平均值和代表值以及曲率半径。

②测点平面布置，见图 2。

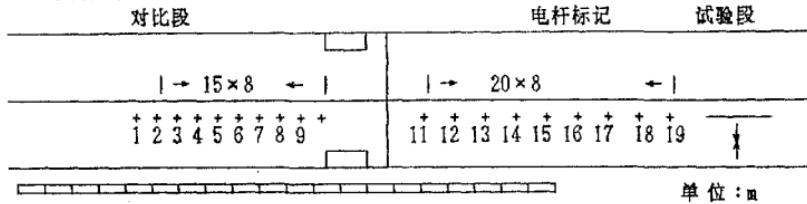


图 2 弯沉测点平面布置图

③、测试结果及分析

路面回弹弯沉值

将实测弯沉值按温度修正系数修正后，计算不同路段的代表弯沉值。

$$L_r = L_{z_0} + Z_a \cdot S$$

式中： L_r ——一个评定路段的代表弯沉值（0.01mm）。

L_{z_0} ——一个评定路段内经修正后的各测点弯沉值的平均值（0.01mm）。

Z_a ——与保证率有关的系数，本试验路按二级路设计， Z_a 取 1.645。

S ——一个评定路段内经修正后的全部测点弯沉值的标准差（0.01mm），五次测定结果见表 5

试验段和对比段弯沉值测定结果

表 5

路 段 日 期	项 目	回 弹 弯 沉 L_{z_0} (0.01mm)	标 准 差 S (0.01mm)	代 表 弯 沉 L_r (0.01mm)
石 灰 粉 煤 灰 钢 渣 混 合 料 基 层 试 段	95.7.24	13.76	7.170	26
	95.11.14	20.40	11.16	39
	96.4.10	18.31	12.12	38
	96.11.18	14.97	9.12	30
	97.3.28	14.48	6.07	24
石 灰 粉 煤 灰 钢 渣 混 合 料 基 层 对 比 段	95.7.24	21.40	9.99	38
	95.11.14	37.24	13.26	59
	96.4.10	38.36	18.11	68
	96.11.18	25.55	13.18	47
	97.3.28	35.19	12.62	56
(1) x 100%	95.7.24	-35.70	-28.20	-31.6
	95.11.14	-45.20	-15.80	-33.9
	96.4.10	-52.30	-33.10	-44.1
	96.11.18	-41.40	-30.80	-36.2
	97.3.28	-58.90	-51.90	-57.1

由表 5 可见：

就同期测定结果相比，石灰粉煤灰钢渣混合料试验段比石灰粉煤灰砂砾混合料对比段的代表弯沉值减少 31.6 - 57.1%，五次平均减少 40.6%，说明前者的整体强度明

显高于后者，随着龄期的增长，差距呈增大趋势。

从使用二年效果看，钢渣混合料试验段承载力基本无变化，而砂砾混合料对比段衰减了47%。

从两次春融期和冻前测定结果相比，钢渣混合料变化不大，而砂砾混合料的代表弯沉值增大17%，说明前者基层稳定，受冻融影响极小。

路面弯沉盆竖向曲率半径

测定弯沉盆的竖向曲率半径，用来比较两种基层材料板体性的差异，为得出结论提供依据，5次测定结果见表6。

钢渣试验段和砂砾对比段曲率半径（平均值）

表6

路 段 测定日期	①石灰粉煤灰 钢渣混合料基 层试验段	②石灰粉煤灰 砂砾混合料基 层对比段	(① - ②) × 100, %
(1) 95.07.24	--	--	--
(2) 95.11.14	1737	924	+88.0
(3) 96.04.10	1475	588	+151.0
(4) 96.11.18	1539	959	+60.0
(5) 97.03.28	2303	1481	+56.0

从表6中看出：

钢渣混合料比砂砾混合料冻前测的曲率半径大60~80%，春融期的曲率半径大56~151%，表明钢渣混合料的板体作用优于砂砾混合料，刚度大，变形小。

五、设计参数测试

1、抗压回弹模量试验

①、两种基层材料对比

为考察首钢钢渣混合料作道路基层材料时的设计参数——抗压回弹模量，在室内对石灰粉煤灰钢渣混合料与石灰粉煤灰砂砾混合料作了对比测定。试验材料均与试验路相同，即石灰：粉煤灰：钢渣=4:16:80%；石灰：粉煤灰：砂砾=4:11:85%，试件公称直径100mm（实际为101.6mm），高度为100mm，龄期30天。

试验按《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》（JTJ057-94）T0808方法进行。两种基层材料抗压弹性模量见表7。

两种基层材料抗压回弹模量

表7

材料名称	平均回 弹模量 E(MPa)	标准 差S (MPa)	偏差 系数 Cv(%)	E _{0.855} -E _{0.645} (MPa)	最佳含 水量 (%)	最佳干 密度 (g/cm ³)
石灰粉煤灰钢渣 混合料	1533	314	20.5	1016	9.5	2.18
石灰粉煤灰砂砾 混合料	841	140	16.6	611	7.8	2.16

由表 7 可知：

首钢石灰粉煤灰钢渣混合料比常用的基层材料——石灰粉煤灰砂砾混合料回弹模量 E_0 高出 2 倍。为使钢渣混合料基层设计安全起见，并与基层上的结构层回弹模量匹配，建议采用的设计模量为 900~1000 MPa。

在道路设计强度相同时，采用钢渣混合料可减薄基层厚度。若在相同结构厚度情况下，用钢渣混合料比常用的混合料，可延长寿命。

②、几种半刚性材料的抗压回弹模量值对比分析

在路面结构所用的基层和底基层材料中，半刚性材料的回弹模量明显大于柔性材料。“七五”科技项目专题《半刚性基层沥青路面结构设计的研究》，大量试验路观测和室内试验结果表明，级配碎石的回弹模量为 400~500 MPa，而用少量水泥或石灰粉煤灰稳定后，其抗压回弹模量通常在 1000 MPa 以上；级配砂砾的回弹模量为 250~300 MPa，用少量水泥、石灰粉煤灰或石灰土稳定后，其抗压回弹模量也常达 1000 MPa。一些细粒土用石灰、石灰粉煤灰或水泥稳定后，其抗压回弹模量也可达 400~500 MPa。

参考“七五”科技攻关专题《高等级公路半刚性基层沥青路面结构设计与抗滑表层的研究》的内容，现把 1980 年完成的北京门头沟试验路、京津塘高速公路和西安试验路取样室内试验所得抗压回弹模量值列表 8。“七五”攻关题建议路面厚度计算、验算的抗压设计的半刚性基层回弹模量列表 9。以便与首钢试验路所用基层材料对比分析。

门头沟、京津塘、西安试验路的室内抗压回弹模量值 (MPa)

表 8

材料 名称	3% 水泥 砂砾	石灰粉 煤灰砂 砾	石灰粉 灰砾砾 (密实与 土)	水泥	石灰水	6.4%水	4.2% 水泥 砂砾	石灰粉 煤灰砂 砾砾砾 5:15 :80	石灰粉 煤灰砂 砾砾砾 10:40 :50	11.1% 石灰土	石灰粉 煤灰砾 合料 4:16:80	石灰粉 煤灰砾 合料 4:11:85
龄期 (天)												
28	1120 (1030)	—	—	530 (460)	550 (440)	1290 (760)	1140 (890)	—	—	—	1533 (1016)	841 (611)
90	—	1400 (1090)	950~1550 (880~910)	—	—	1540 (1160)	1110 (880)	1440 (710)	1090 (810)	420 (320)	—	—
180	—	—	—	—	—			1680 (1160)	1290 (1070)	480 (440)	—	—
试验 地址	北京门头沟			京津塘高速公路			西安			首钢		

注：室内抗压回弹模量采用承载板法（首钢料为全断面法）。

表中上面值为一组试件平均值，括号内的值为 90% 概率值（首钢为 95% 概率值）。
首钢试验料龄期为 30 天。

“七五”攻关题建议路面厚度计算、验算的抗压回弹模量值

表 9

半刚性基层材料名称	建议采用回弹模量(MPa)	备注
水泥粒料(含碎石、砂砾)	800-900	
二灰粒料	800-900	
石灰土粒料	700-800	
水泥土、水泥石灰土	400-500	
二灰土	600-700	
石灰土	300-400	

从表 8 和表 9 对比分析看出：

室内抗压回弹模量，以 28 天龄期（或 30 天龄期）对比看，首钢试验路采用的石灰粉煤灰钢渣混合料的抗压回弹模量值比几条试验路采用的 4 种半刚性基层材料的抗压回弹模量值超过 14-131%。（即与 5% 水泥砂砾相当）。

首钢试验路的石灰粉煤灰钢渣混合料抗压回弹模量均比表 9 “七五”攻关题建议采用的水泥粒料和二灰粒料的回弹模量还要大，说明该混合料作基层材料是比较好的。

2、抗弯拉强度和弯拉回弹模量试验

对路面设计中，计算层及计算层以上的整体性结构层验算底层弯拉应力时，需要用材料的弯拉回弹模量，所以对钢渣混合料进行弯拉回弹模量试验，同时测试了抗弯拉强度。所用材料配合比同抗压回弹模量试验。试件：中梁 ($400 \times 100 \times 100$ mm)，数量各 5 个（其中一个先测破坏荷载），龄期 3 个月。采用延度法测试。测试结果见表 10。

两种基层材料弯拉试验结果（平均值）

表 10

石灰粉煤灰钢渣混合料(4:11:85%)					石灰粉煤灰砂砾混合料(4:11:85%)				
编 号	应变 $\epsilon_{0.5P} \times 10^{-4}$	应力 $\delta_{0.5P}$ (MPa)	弯拉回 弹模量 $E_{0.5P}$ (MPa)	抗弯 拉强度 S (MPa)	编 号	应变 $\epsilon_{0.5P} \times 10^{-4}$	应力 $\delta_{0.5P}$ (MPa)	弯拉回 弹模量 $E_{0.5P}$ (MPa)	抗弯拉 强度 S (MPa)
1	0.3063	0.3766	12295	1.21	1	0.3438	0.1730	5032	0.39
2	0.5125	0.3674	7169	1.15	2	0.2438	0.2054	8425	0.52
3	0.3188	0.2295	7199	0.75	3	0.3750	0.2601	6936	0.63
4	0.3250	0.2066	6357	0.56	4	0.4062	0.2742	6750	0.70
平均值			6908	0.66	平均值			6843	0.58

注：计算中按试验规程要求列出了超差值。

分析结果可知。钢渣混合料与砂砾混合料相比，弯拉回弹模量增大 21.6%，抗弯拉强度提高 64.3%。

六、结语

首钢预制品厂南路试验路铺筑了 2500 m^2 二灰钢渣基层，用料 1130t，相继 1997 年京石高速公路杜家坎收费站扩建工程应用 10000t，八宝山南路扩建工程 12000t，白颐路辅路基层 15000t，1998 年平安大街铺筑二灰钢渣混合料基

层310m，厚0.5m面积10410m²，用料11450t。平安大街二灰钢渣混合料含水量W10.7%，含灰量5.3%，R₁₄=0.91MPa，R₂₈=1.37MPa，R₆₀=3.52MPa，三个月龄期的回弹模量代表值E=1353MPa。施工单位对二灰钢渣混合料反映良好。

综上所述的研究与应用，归纳如下几点结论：

1、首钢钢渣经前述加工工艺进行处理后，测定结果表明，粉化率测定值波动上限和游离氧化钙含量等稳定性指标分别小于我国冶金部和建设部有关行标的要求（5%和3%），因此，可用它拌制钢渣混合料。

2、石灰粉煤灰稳定钢渣混合料抗压强度R₇和R₂₈超过了建设部行标和北京市关于公路用二灰混合料的强度要求（R₇>0.6MPa，R₂₈1.5~2.0MPa），而且随着龄期的增加，强度呈上升趋势。

3、一个月龄期的抗压回弹模量试验表明，钢渣混合料比砂砾混合料高出66%，达到1016MPa，推荐设计值为900~1000MPa。三个月龄期达到1353MPa。

4、在二年使用期内，由五次整体承载能力测定结果可见，钢渣混合料基层试验段比砂砾混合料基层对比段高出40%，刚性大，板体作用好，整体性能稳定，基本没有衰减。

5、试验路建成后，40~60t大型挂运料车非常忙，但路面基本平整，试验段没有发生车辙、拥包和基层爆裂等病害。

首钢综合利用厂从德国引进全套钢渣加工线，已形成年加工能力120万吨，为大规模销纳钢渣、利用钢渣创造了条件。首钢研究与开发公司已制定了企业标准《首钢道路用钢渣混合料产品标准》（Q/SY001-1997），还完善了厂部检化验设施，为利用好钢渣、生产合格产品提供了技术保证。