

大掺量粉煤灰全厚式碾压混凝土 路面技术的试验研究

李世绮 牛开民*

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

摘要 本文主要介绍了路面 RCC 配合比设计方法、大掺量粉煤灰路面 RCC 强度发展趋势及在人工摊铺条件下的全厚式 RCCP 施工技术等方面的探索性研究及取得的初步成果。

关键词 全厚式 RCCP 大掺量粉煤灰 配合比设计方法 人工摊铺施工

Research on Techniques of Full-Depth Roller Compacted Concrete Pavement (RCCP) With a Great Quantity of Fly Ash Admixture

Li Shiqi Niu Kaimin

(Research Institute of Highway, Beijing)

Abstract In combination with the field project this paper mainly introduces the probing researches and their rudimental results on the proportioning design methods of pavement RCC, its strength growing tendency with a great quantity of fly ash admixture and the construction techniques of full-depth RCCP under artificial spreading conditions.

Key words Full-depth RCCP A great quantity of fly ash admixture
Proportioning design method Artificial spreading construction

0 前言

碾压混凝土路面简称 RCCP, 是采用沥青混凝土路面施工机械, 通过强力振动和碾压的共同作用, 将超干硬性混凝土压实成型的一种新型水泥混凝土路面。碾压混凝土路面既具有普通水泥混凝土路面高强、稳定、耐久的特点, 又兼有沥青混凝土路面施工方便、快速开放交通的优点, 因此, 很受许多国家公路界青睐。近十几年来, 西班牙、美国、法国、挪威、加拿大、澳大利亚、日本等国都先后开展了碾压混凝土路面技术的开发与应用研究, 已分别铺筑试验路和实体工程数十万平方米至数百万平方米。但是, 因普遍存在路面平整度问题, 目前各国主要应用于低速重车货场、港口码头、停车场和低等级重交通路面。日本由于采用高

* 本课题研究人员 交通部公路科学研究所: 覃维祖、李世绮、牛开民、窦莘元;
江苏省淮阴市交通工程管理处: 刘秉轩等。

密实度大型摊铺机并重视路面碾压混凝土配合比设计等材料方面的研究,近年来发展很快,目前已基本解决路面平整度难题,正组织力量进行高等级公路的应用研究。我国从80年代初开始进行RCCP的开发应用,“七五”期间有较快发展。为了解决路面平整度问题,目前我国的碾压混凝土路面主要采用下层碾压混凝土、上层普通混凝土和碾压混凝土上用沥青混凝土罩面等复合路面结构。

1991年交通部下达国家“八五”科技攻关项目“高等级公路碾压混凝土路面材料及施工技术研究”课题,作为该课题的前期准备工作,交通部公路科学研究所结合淮阴市交通局大楼前地坪施工,于1991年3月初至4月底与江苏省淮阴市交通工程管理处合作,开展了大掺量粉煤灰全厚式RCCP技术的探索性研究。本文主要介绍结合此工程进行路面RCC配合比设计方法、大掺量粉煤灰路面RCC强度发展规律及在人工摊铺条件下的全厚式RCCP施工技术等方面的探索性研究及取得的初步成果。

施工和试验工作得到淮阴市交通工程管理处及施工队的领导和同志们们的热情支持及全力帮助,借此机会再次表示衷心感谢。

1 工程概况

1.1 施工规模

地坪基层为二灰碎石,碾压混凝土板厚度为16cm。为了考察粉煤灰掺量对路面RCC强度发展的影响,根据淮阴公路管理处的意见及地坪的使用要求,将地坪划分为4块,分别铺筑粉煤灰掺量为30%、40%、50%的碾压混凝土路面试验块。其中,Ⅲ、Ⅳ块的粉煤灰掺量均为30%,用以比较不同粗集料用量对RCC强度的影响。工区平面布置如图1所示。

1.2 原材料及其物理性能

(1) 水泥:江苏洪泽425号普通硅酸盐水泥,比重2.95;细度4%;标准稠度需水量25.8%;凝结时间:初凝2:50,终凝5:50;水泥胶砂强度示于表1。

(2) 细集料:河砂,比重2.59;细度模数2.2;松散密度1510kg/m³;振实密度1840kg/m³。

(3) 粗集料:碎石,最大粒径25mm;比重2.62;捣实密度1570kg/m³;级配:5~10mm颗粒含量为43.4%,10~20mm及<10mm颗粒含量分别为56.4%和0.2%。

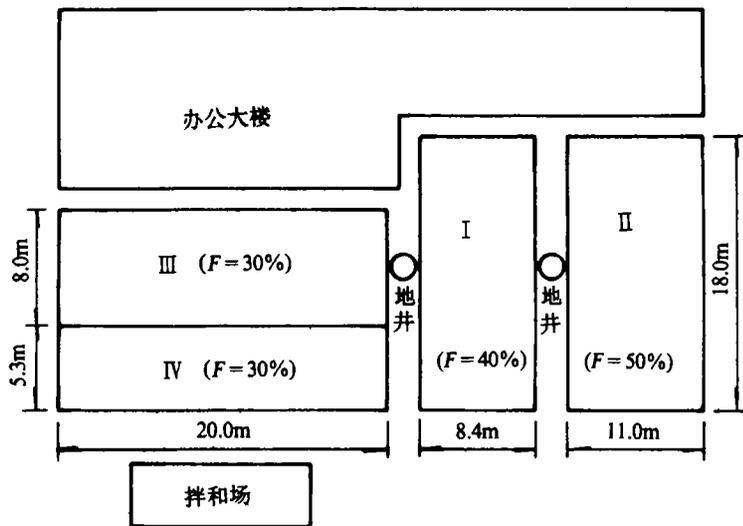


图1 工区平面布置

(4) 粉煤灰: 江阴电厂湿排粉煤灰, 比重 1.85; 烧失量 9.53%; 细度 25.5% (0.080mm 筛孔); 含水率 41.6%~57%; 对照 GBJ146-90《粉煤灰混凝土应用技术规范》中粉煤灰质量指标分级表, 为三级粉煤灰。粉煤灰的化学成分分析结果示于表 2。

水泥胶砂强度 (MPa) 表 1

龄期	3d	7d	28d
抗压	28.7	35.0	46.1
抗折	4.8	5.4	6.7

江阴电厂湿排粉煤灰的化学成分 表 2

成分	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃
含量%	53.3	24.8	3.53	6.4	1.01	0.6

(5) 外加剂: RC-1 缓凝引气型减水剂。

水泥、粉煤灰、砂及碎石的比重均为绝干状态下的比重。由于工地试验室条件限制, 各种材料的比重均采用简易方法近似测定, 试验结果有一定误差。

1.3 施工设备

(1) RCC 拌和: 采用山东建筑机械厂 500L 强制式双卧轴混凝土搅拌机, 人工称量原材料并控制混凝土加水量。

(2) 摊铺: 因施工条件所限, 采用人工摊铺 RCC 地坪。

(3) 碾压: ①振动压路机: 德国产 T12 型, 整机质量 15t, 激振力 12t; ②江阴交通机械公司生产 VP200 型轮胎式压路机, 机重 25t; ③6t 重静态光轮压路机。

2 配合比设计

2.1 正交设计试验

平整度及强度是反映路面行车舒适性和承载能力的重要指标。对于碾压混凝土路面, 在混凝土配比强度一定的条件下, 压实度是影响路面强度的决定性因素。碾压混凝土的稠度对路面平整度和压实度具有互相制约的影响: 稠度偏小时路面易于压实但却难以保证平整度; 稠度偏大时利于碾压平整却不易于充分压实, 即难以获得足够的强度。为此, 须在施工前采用现场原材料进行室内配合比正交设计试验。

2.1.1 试验考察的因素与水平

重点考察碾压混凝土的胶凝材用量、粉煤灰掺量、用水量及石子填充体积等因素对碾压混凝土稠度及强度的影响。各因素的水平如表 3 所示。由于工地试验室条件限制, 不能准确测定砂石材料的饱和面干密度, 因此配合比的用水量按原材料绝干状态计, 粉煤灰掺量

正交试验考察的因素及其水平 表 3

因素 水平	胶凝材用量 (kg/m ³)	粉煤灰掺量 (%)	用水量 (kg/m ³)	石子填充体积 (%)
1	300	20	130	70
2	330	35	138	73
3	360	50	145	76

采用等量取代, 石子填充体积根据砂子细度模数及石子最大粒径参考经验表选用。

2.1.2 考核指标及测试方法简介

(1) RCC 混合料稠度 (改进 VC 值及振实率)

由于路面碾压混凝土系特干硬性混凝土,《公路工程水泥混凝土试验规程》(JTJ053-83)的维勃仪法难以准确反映不同配合比的稠度差异。经参考有关资料^{〔1〕、〔2〕、〔3〕}, 采用改进维勃仪法。主要改进点及方法简述如下:

①采用 JTJ053-83 中普通混凝土稠度试验的维勃仪, 但在圆盘上增加配重, 使混凝土表面

荷重为 $50\text{g}/\text{cm}^2$;

②不用坍落筒，将拌合料分两层装满料桶，每层插捣 25 次；

③开启振动后，通过透明圆盘观察混凝土表面出浆情况，以水泥浆布满圆盘面积所需时间的长短衡量稠度大小，称之为改进 VC 值 (s)；

④改进 VC 值测定后，通过测定圆桶中的拌合料质量及表面下沉深度（在圆桶中心位置量测圆桶口至混合料表面的深度）求得混凝土的振实密度。振实密度与理论密度之比即为振实率。

每个配比均测试 2 次，以平均值为试验结果。

(2) 混凝土抗压强度和抗折强度及强度增长率

经参考有关资料并根据现场试验条件，抗折试件用改装的平板振捣器加压振动成型；抗压试件采用维勃仪的振动台成型，试件表面荷载约为 $50\text{g}/\text{cm}^2$ ，振动成型时间均为两倍改进 VC 值。试件尺寸分别为 $15\times 15\times 55\text{cm}$ 和 $15\times 15\times 15\text{cm}$ 。每个配比各成型 4 个抗压和抗折试件，7d 和 28d 龄期各 2 个，以试验平均值为结果。

2.1.3 试验安排及 RCC 配合比

采用 $L_9(3^4)$ 正交表共安排 9 组试验。试验方案示于表 4。

$L_9(3^4)$ 正交试验方案及其试验结果

表 4

试验号	胶凝材用量 (kg/m^3)	粉煤灰掺量 (%)	用水量 (kg/m^3)	石子填充体积 (%)	改进 VC 值 (s)	振实率 (%)	抗压强度 (MPa)		抗折强度 (MPa)	
							R_7	R_{28}	F_7	F_{28}
1	①300	①20	①130	①70	55	96	27.0	35.8	4.53	5.20
2	①300	②35	②138	②73	18	94	15.3	26.6	2.93	4.74
3	①300	③50	③145	③76	18	97	7.6	17.8	1.47	2.76
4	②330	①20	②138	③76	12	96	24.3	32.9	4.26	5.34
5	②330	②35	③145	①70	13	97	13.7	28.1	2.79	4.36
6	②330	③50	①130	②73	130	92	8.3	18.3	1.60	3.40
7	③360	①20	③145	②73	9	96	25.3	42.5	4.15	4.83
8	③360	②35	①130	③76	100	93	27.6	31.8	3.33	4.54
9	③360	③50	②138	①70	120	91	14.2	19.0	2.26	3.40

表 4 中 9 组试验的混凝土配合比，除规定的因素、水平变化外，其它试验条件均相同。混凝土中掺加 RC-1 缓凝引气型减水剂，用量为 1.5%。

按绝对体积法计算配合比。因掺用引气缓凝型减水剂，设 RCC 含气量为 2%。为了便于与国外资料对比^[3]，还计算每个配合比的水泥浆填充系数 (K_m) 和砂浆填充系数 (K_p)。各组混凝土配合比示于表 5。

因原材料的比重是用简易法测定的，测值偏低，致使混凝土的理论密度也相应偏小。后经校核振实密度，确定体积修正系数约为 1.05。

L₉ (3⁴) 正交试验的混凝土配合比

表 5

编号	水	水泥	粉煤灰	砂	碎石	减水剂	水胶比	砂率%	砼密度	K _m	K _p
1	130	240	60	821	1098	0.750	0.433	42.8	2349	1.88	1.98
2	138	195	105	731	1145	0.750	0.460	40.3	2314	1.98	1.84
3	145	150	150	643	1192	0.750	0.483	35.5	2280	2.63	1.71
4	138	264	66	678	1192	0.825	0.418	37.8	2338	2.16	1.71
5	145	214	116	727	1098	0.825	0.439	40.3	2300	2.35	1.98
6	130	165	165	694	1145	0.825	0.394	37.3	2299	2.51	1.84
7	145	288	72	627	1145	0.900	0.403	37.6	2327	2.54	1.84
8	130	234	126	641	1192	0.900	0.361	35.0	2323	2.74	1.71
9	138	180	180	685	1098	0.900	0.383	40.0	2281	2.41	1.98

注：原材料用量及混凝土密度的单位为 (kg/m³)

2.1.4 试验结果及其分析

试验结果示于表 4。为了解诸因素对于各项考核指标的影响程度及其规律，对试验结果进行了直观分析和方差分析，其综合结果示于表 6。诸因素对于改进 VC 值、振实率、28d 抗压、抗折强度及 7d 与 28d 抗折强度比值的影响趋势图示于图 2~图 6。

直观分析及方差分析的综合结果

表 6

考核指标	诸因素的影响顺序及影响显著性程度	F 检验的标记说明
改进 VC 值: VC	用水量** > 粉煤灰掺量** > 胶凝材用量** > 石子填充体积**	** : 特别显著的影响 * : 显著影响 (*): 一定影响 无标记: 无显著影响
砼振实率: K	用水量** > 粉煤灰掺量** > 胶凝材用量* > 石子填充体积	
抗压强度: R ₂₈	粉煤灰掺量** > 胶凝材量(**) > 用水量 > 石子填充体积	
抗折强度: F ₂₈	粉煤灰掺量** > 胶凝材量 > 用水量 > 石子填充体积	
F ₇ /F ₂₈	粉煤灰掺量** > 胶凝材量(**) > 石子填充体积 > 用水量	

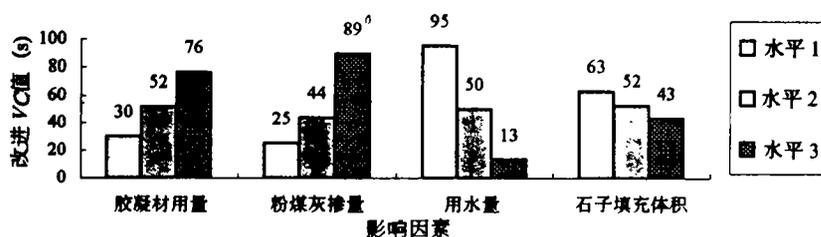


图 2 各因素对改进 VC 值的影响

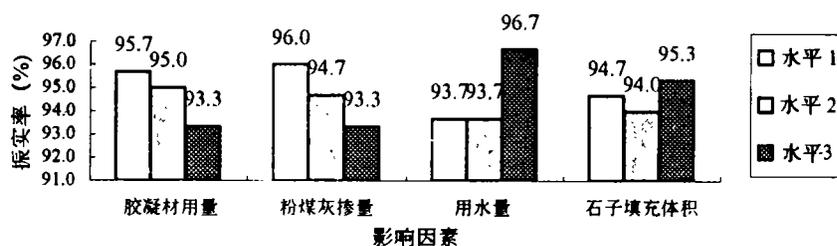


图 3 各因素对振实率的影响

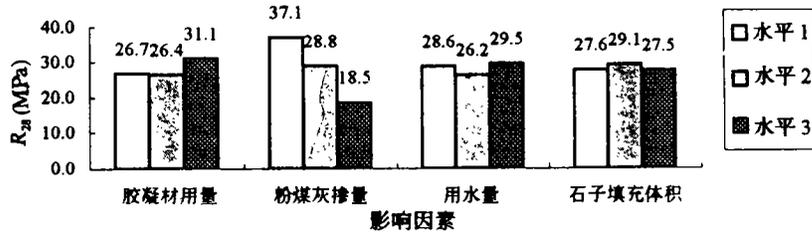


图 4 各因素对 28d 抗压强度的影响

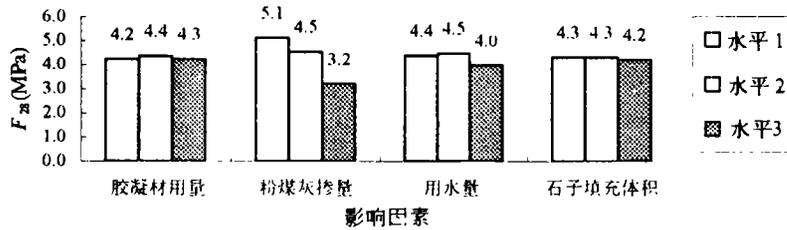


图 5 各因素对 28d 抗折强度的影响

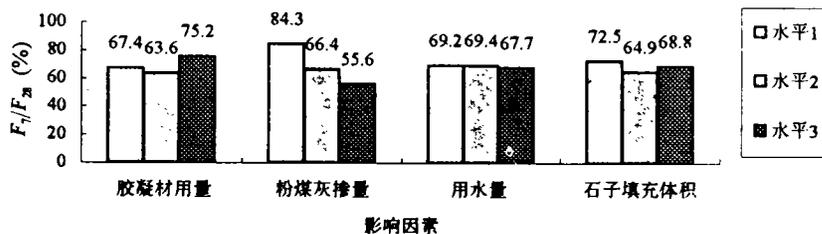


图 6 各因素对 7d 与 28d 抗折强度比值的影响

(1) 诸因素对 RCC 稠度、振实率、抗压强度、抗折强度及强度增长率的影响

①RCC 用水量对改进 VC 值和振实率均有特别显著的影响。改进 VC 值随用水量的增加而急剧下降(图 2);当用水量为 130、138kg/m³ 时,振实率均较低,当加大至 146kg/m³ 时,振实率显著增加(图 3);用水量对 RCC 抗压强度、抗折强度及 7d 与 28d 抗折强度比值均无显著性影响,其波动主要由试验误差造成。

②粉煤灰掺量对各个考核指标均有特别显著的影响。由于工程所用的湿排粉煤灰的品质较差,而且配合比采用等量取代法,因此,增加粉煤灰掺量,使 RCC 稠度明显加大,振实率、抗压强度、抗折强度及强度增长率(7d 与 28d 强度比值)则大幅度下降。

③本次试验胶凝材用量的变化(300~360kg/m³)对 RCC 稠度有特别显著的影响,对振实率也有显著性影响。增加胶凝材使稠度显著变大,振实率则明显下降;胶凝材用量对 28d 混凝土抗压强度有一定影响,300 和 330kg/m³ 用量时的抗压强度基本相同,用量为 360kg/m³ 时,抗压强度明显提高;本次试验胶凝材用量的变化对 28d 抗折强度无显著性影响。

④石子填充体积的变化对于 RCC 稠度有特别显著性影响,石子用量越大 RCC 稠度则越小;

本次试验石子用量的变化(70%~76%)对振实率、抗压强度、抗折强度及强度增长率均无显著性影响。

(2) 诸因素对RCC稠度及28d抗压、抗折强度的影响规律

根据表4的试验结果并参考表6的方差分析结果,对影响显著的因素进行回归分析,建立RCC稠度、抗压强度及抗折强度的经验关系式,结果示于表7。

RCC稠度、抗压及抗折强度与显著影响因素间的经验关系式 表7

序号	回归关系	经验式	相关系数	剩余标准差
1	$VC \sim [W \cdot F / (F + C), (C + F), V_g]$	$VC = 709.1 - 5.45W + 214.4F / (F + C) + 0.764(F + C) - 319.4V_g$ ($t_1 = 10.1, t_2 = 7.9, t_3 = 5.7, t_4 = 2.4$)	0.990	10(s)
2	$R_{28} \sim [W / (F + C), F / (F + C)]$	$R_{28} = 65.1 - 36.44W / (C + F) - 62.1F / (F + C)$ ($t_1 = 1.3, t_2 = 7.7$)	0.956	2.9(MPa)
3	$F_{28} \sim [W / (F + C), F / (F + C)]$	$F_{28} = 7.62 - 2.575W / (F + C) - 6.46F / (F + C)$ ($t_1 = 0.8, t_2 = 6.6$)	0.942	0.35(MPa)
符号说明	VC为改进VC值; R_{28} 为28d抗压强度; F_{28} 为28d抗折强度; W为用水量; C为水泥用量; F为粉煤灰用量; V_g 为石子填充体积; C+F为胶凝材用量; $F / (F + C)$ 为粉煤灰掺量; $W / (C + F)$ 为水胶比。			

由表7可见:

①RCC改进VC值与用水量、胶凝材用量、粉煤灰掺量及石子填充体积等4个因素的经验关系式(1式)相关系数高达0.99,反映因素影响程度的t值均大于2,说明上述因素不仅与RCC稠度有极好的相关关系,而且有特别显著的影响。因此,此经验式可用于RCC配合比设计及现场调整配合比。

②28d抗压强度、抗折强度与水胶比及粉煤灰掺量的经验关系式(2式和3式)的相关系数高达0.95左右,剩余标准差分别为2.9MPa和0.35MPa,均具有很高的推定精度;抗折强度经验式可用于路面RCC配合比设计及现场质量控制。

③2式的 t_1 及 t_2 分别为1.3($2 > t_1 > 1$)和7.7($t_2 > 2$),3式的 t_1 及 t_2 值分别为0.8($t_1 < 1$)和6.6($t_2 > 2$),表明本次试验中水胶比对RCC抗压强度有一定影响,而对抗折强度无显著影响;粉煤灰掺量对抗压、抗折强度均具有特别显著的影响。此结果与方差分析一致。

(3) 7d、28d抗压强度与抗折强度的相关性

7d、28d抗压强度与抗折强度的回归分析结果示于表8。

RCC抗压、抗折强度及7d、28d强度的回归分析结果 表8

序号	相关关系	经验式	相关系数 r	剩余标准差 S (MPa)	变异系数 C_v (%)
1	$R_{28} \sim R_7$	$R_{28} = 10.91 + 0.9474R_7$	0.88	4.4	15.7
2	$F_{28} \sim F_7$	$F_{28} = 2.028 + 0.74F_7$	0.94	0.3	7.6
3	$F_{28} \sim R_{28}$	$F_{28} = 1.78 + 0.089R_{28}$	0.86	0.50	11.7
4	$F_{28} \sim R_7$	$F_{28} = 1.381R_7^{0.397}$	0.86	0.49	11.4

由表 8 可见：

① $R_{28} \sim R_7$ 、 $F_{28} \sim F_7$ 均具有很好的相关性。其中， $F_{28} \sim F_7$ 经验式的相关系数高度显著， $S = 0.33\text{MPa}$ ， $C_v = 7.6\%$ ，具有较高的推定精度。

② $F_{28} \sim R_{28}$ 、 $F_{28} \sim R_7$ 经验式的相关系数均高达 0.86，剩余标准差约为 0.5MPa，变异系数为 11.5% 左右，说明路面碾压混凝土与普通混凝土相似，抗压强度与抗折强度也有较好的相关关系。

(4) 本次正交试验的最佳配合比

综合各个指标的直观分析及方差分析结果，确定本次正交试验的最佳配合比为：胶凝材用量 $330\text{kg}/\text{m}^3$ ，粉煤灰掺量 20%，用水量 $138\text{kg}/\text{m}^3$ ，石子填充体积为 70%~73%。因石子用量对稠度有特别显著的影响，考虑到地坪平整度及混合料抗离析性的要求，确定施工配合比的石子填充体积为 72%。

2.2 现场施工配合比

2.2.1 配合比设计指标

①粉煤灰掺量和石子用量：为了进一步考察粉煤灰掺量及石子用量对 RCCP 性能的影响，I 号、II 号和 III 号地坪 RCCP 的粉煤灰掺量分别为 50%、40% 和 30%，石子填充体积均为 72%；IV 号地坪的粉煤灰掺量与 III 号地坪相同，但石子填充体积为 78.5%。

②配比强度：以抗折强度为设计指标。考虑到加大掺量粉煤灰会对混凝土早期强度有一定影响，但后期强度效果较好。因此，对不同粉煤灰掺量的 RCC 采用不同的 28d 抗折强度指标。地坪设计强度按粉煤灰掺量 30%、40%、50% 分别为 4.0MPa、3.5MPa 和 3.0MPa。取混凝土强度变异系数约为 12%~15%，相应配比强度 F_{28} 为 4.5MPa、4.0MPa 和 3.5MPa。

③稠度（改进 VC 值）：参考有关资料并根据地坪平整度及压实率的要求，RCC 拌合料的改进 VC 值控制在 $35 \pm 5\text{s}$ 。

2.2.2 地坪 RCC 配合比的确定

根据正交试验建立的经验式（即表 7 的 1 式和 3 式）计算符合配比强度和改进 VC 值要求的配合比，具体步骤如下：

①根据配比强度 F_{28} 和粉煤灰掺量 $F/(F+C)$ ，由经验式算出 RCC 的水胶比 $W/(F+C)$ ，即： $W/(C+F) = [7.62 - 6.46F/(F+C) - F_{28}]/2.575$ (1)

②根据稠度设计指标改进 VC 值、粉煤灰掺量 $F/(F+C)$ 、优选的石子填充体积 V_g 及按式(1)求得的水胶比 $W/(C+F)$ ，由表 7 的 3 式求得 RCC 用水量 W ，即：

$W = W/(F+C) \times [709.1 + 214.4F/(F+C) - 319.4V_g - VC]/[5.45W/(F+C) - 0.764]$ (2)

③根据粉煤灰用量及由式(1)和式(2)求得的水胶比和用水量，确定水泥用量 C 及粉煤灰用量 F ，并根据胶凝材用量计算外加剂 RC-1 用量。

④根据石子填充体积 V_g 及石子的振实密度 M_g ，计算石子用量 G ($G = V_g \times M_g$)，并按照绝对体积法计算出砂子用量 S ，进而计算出 RCC 的理论密度和含水率等与配合比有关的参数。

⑤按照计算求得的理论配合比拌制混凝土，校核 RCC 的稠度及振实密度，必要时可对理论配合比作适当修正，最后确定地坪施工配合比，结果示于表 9。

地坪施工配合比

表 9

地坪 编号	设计指标				RCC 的材料用量 (kg/m ³)						水胶 比 W/C+F	RCC 含水率 B (%)	砼理论 密度 M (kg/m ³)
	F/F+C	V _g	VC 值 (s)	F ₂₈ (MPa)	W(*)	C	F	S	G	RC-1			
I	0.50	0.72	35±5	3.5	150	175	175	661	1130	150	0.428	7.01	2290
II	0.40	0.72	35±5	4.0	145	205	136	702	1130	145	0.425	6.68	2317
III	0.30	0.72	35±5	4.5	140	232	100	743	1130	140	0.423	6.35	2343
IV	0.30	0.78	35±5	4.5	128	193	83	730	1230	128	0.463	5.72	2365

(*)：用水量按砂、石材料绝干状态计。

由于粉煤灰的烧失量较大,因此粉煤掺量愈大,满足一定稠度要求的 RCC 用水量也愈大,所以出现用水量随粉煤灰掺量变大的现象。Ⅲ、Ⅳ号地坪由于石子用量不同,所以用水量也不同。在稠度要求相同的条件下,用水量随着石子用量的加大而减少。

3 施工概况

3.1 RCC 拌和、运输和摊铺

现场采用 1 台 500l 双卧轴强制式混凝土搅拌机拌和 RCC,每拌的拌和量为 300l。砂、石、水泥及粉煤灰均用人工称量,用水量及外加剂按体积计量。

混凝土拌和后用翻斗车运至铺筑处由人工摊铺。松铺系数根据试验确定为 1.24。由于拌和能力和人工摊铺速度等施工条件的限制,4 块地坪分 4 天施工完成。每块地坪均在宽度方向分若干块连续摊铺,每块宽度约为 3m。第一块铺好后进行碾压,边碾压边摊铺相邻地块。

3.2 碾压

RCC 摊铺后先用压路机静碾 1~2 个往返,然后振动碾压 4~6 个往返。碾压过程中采用核子密度仪检测压实度,以决定振动碾压遍数。当压实度达到要求(大于 96%)后,再用轮胎压路机往反碾压数次,碾压过程中,对表面混合料不均匀的部位,撒布混凝土湿筛砂浆,起表面修整作用。

3.3 养护

碾压完毕后在表面喷洒一薄层养护剂。由于地坪上时有施工人员和工具车走动,使养护膜受到不同程度的破坏。因此,等混凝土终凝后即洒水养护。为防止水分过快蒸发,地坪洒水后再复盖塑料薄膜。洒水养生期为 3 天。

3.4 现场质量控制及检测结果

(1) RCC 含水量

含水量是决定 RCC 稠度的重要指标,也是影响 RCCP 平整度和压实度的重要因素。施工时期正值雨季,现场原材料含水率很不稳定,尤其湿排粉煤灰的含水量大且不稳定,不仅每堆灰的含水量各异,即使同堆灰,上、下层含水量也相差悬殊。为了控制混凝土稠度,施工中采用炒干法测试 RCC 含水量,并随时目测混合料稠度。根据 RCC 含水量的测试结果及目测情况,调整混凝土加水量。用炒干法快速测定现场混凝土含水量并据此推定实际加水量的结果示于表 10。

现场 RCC 质量检测结果

表 10

地坪编号	RCC 含水量设计值 (%)	现场采用炒干法 实测的 RCC 含水量 B (%)				RCC 用水量设计值 (kg)	根据现场实测含水量推算 的混凝土用水量 (kg/m ³)			
		测试次数	均值	均方	变异系数 (%)		推定次数	平均值	均方差	变异系数 (%)
I	7.01	4	7.69	0.57	7.45	150	4	165	12	7.3
II	6.68	4	6.17	0.63	10.3	145	4	134	14	10.4
III	6.35	3	6.46	0.38	5.88	140	3	143	8.3	5.8
IV	5.72	3	5.62	0.49	8.74	128	3	124	11	8.8

由表 10 可见, I 号地坪 RCC 设计用水量为 150kg, 相应含水量为 7.01%。但现场实测含水量为 7.69%, 据此推定混凝土用水量为 165kg/m³, 即 RCC 实际含水量比配合比设计用水量约多 15kg/m³。II 号地坪在开始 1、2 小时施工时, RCC 的实测含水量比设计值低得太多, 但后来得到较好控制, 4 次测试结果平均约少 11kg/m³; III 号和 IV 号地坪 RCC 含水量控制较好, 实测含水量与设计值很接近, 平均误差未超过 ±4kg/m³。

之所以出现上述情况, 是因为施工期间正值雨季, 现场原材料含水量很大且不稳定, 粉煤灰含水量高达 50% 左右, 砂子含水量也达 6%~8%。I 号地坪由于粉煤灰掺量高达 50%, 致使施工配合比的原材料含水量超过理论用水量。按照施工配合比拌和混凝土时, 即使一点水都不加, 拌合料实际含水量也超过了设计用水量, 使加水量处于失控状态。I 号地坪由于 RCC 含水量太大, 所以碾压时出现推挤和弹簧现象, 平整度较差。II 号地坪施工时吸取了 I 号地坪的教训, 为减少原材料含水量, 施工前先将现场粉煤灰摊开凉晒, 又特别加强混凝土拌和水量的控制。开始时由于缺乏经验, RCC 含水量偏低, 后来逐步正常。III、IV 号地坪总结了 I、II 号地坪的施工经验, 使 RCC 含水量得到了较好控制。

(2) 混凝土抗压、抗折强度

为考察大掺量粉煤灰路面碾压混凝土的强度发展规律, 当现场取样测试定 RCC 含水量稳定时成型混凝土试件, 用于测定 7d、28d、90d 及 180d 龄期的抗压、抗折强度。试件拆模后送到工地临时试验室置于常温水中养护。强度发展趋势及增长速率示于图 7 和图 8。试验结果示于表 11。

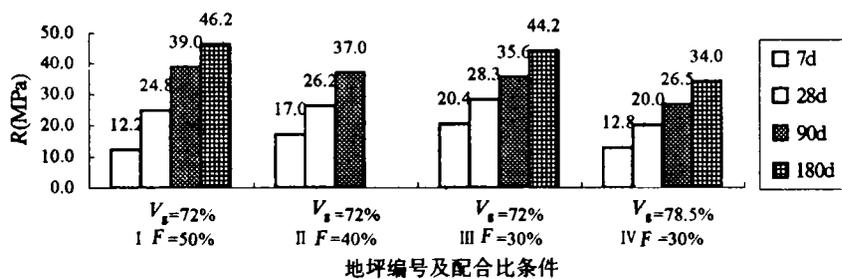


图 7 不同粉煤灰掺量及石子填充体积的 RCC 抗压强度发展趋势

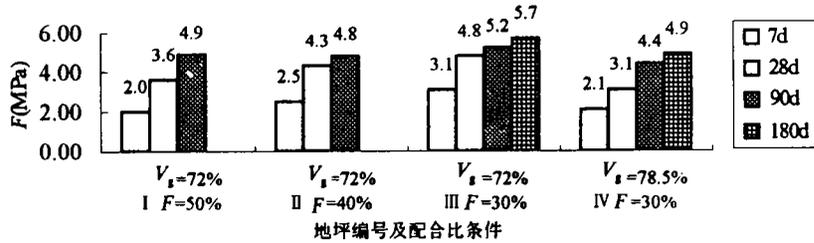


图 8 不同粉煤灰掺量及石子填充体积的 RCC 抗折强度发展趋势

地坪施工配合比混凝土强度试验结果

表 11

地坪编号 及 配比条件	抗压强度 R (MPa)				抗折强度 F (MPa)				配比强度 F_{28} (MPa)
	7d	28d	90d	180d	7d	28d	90d	180d	
I ($F=50\%$) ($V_g=72\%$)	12.2 (0.49)	24.8 (1.00)	39.0 (1.57)	46.2 (1.86)	2.0 (0.55)	3.6 (1.00)	4.90 (1.36)	-	3.5
II ($F=40\%$) ($V_g=72\%$)	17.0 (0.65)	26.2 (1.00)	37.0 (1.41)	-	2.5 (0.58)	4.3 (1.00)	4.80 (1.12)	-	4.0
III ($F=30\%$) ($V_g=72\%$)	20.4 (0.72)	28.3 (1.00)	35.6 (1.26)	44.2 (1.56)	3.1 (0.65)	4.8 (1.00)	5.2 (1.08)	5.7 (1.19)	4.5
IV ($F=30\%$) ($V_g=78.5\%$)	12.8 (0.64)	20.0 (1.00)	26.5 (1.32)	34.0 (1.70)	2.1 (0.68)	3.1 (1.00)	4.4 (1.42)	4.9 (1.58)	

注：①强度值下的数字为该龄期强度与 28d 强度的比值，反映强度增长速率。

②强度结果凡标“-”记者，系施工时因混凝土拌合物取样量太少，试件量不足，故缺少 180d 龄期的试验结果。

由表 11 和图 7、图 8 可见：

① I、II、III 号地坪混凝土 28d 抗折强度实测值与设计值很接近，误差不超过 ± 0.3 MPa，说明配合比设计比较准确。IV 号地坪 RCC 由于石子用量增大 6.5%，使抗压、抗折强度都明显降低，经分析原因，可能由于石子用量太大而影响了混凝土的均匀性。

② 比较 I、II、III 号地坪的 RCC 强度，无论抗压强度还是抗折强度，粉煤灰掺量越大，早期 (7d、28d) 强度越低，而后期强度增长率越大。

③ 4 块地坪 RCC 的 90d 龄期强度 (F_{90}) 均达到或超过 4.5 MPa。

(3) 地坪压实度

① 碾压工艺对地坪压实度的影响

施工中通过核子密度仪 (Troxlter 3240 型) 检测地坪压实度，用以控制地坪碾压工艺。II 号、III 号地坪不同碾压遍数后地坪压实度的测试结果示于图 9 (a) 和图 9 (b)。II 号地坪因实测 RCC 用水量比理论值小 (见表 10)，混合料比较干硬，振动碾压 6 次往复后压实度达 97.7%，III 号地坪实测含水量与理论值相近，混合料干硬程度适中，振动碾压 2 次往复后压实度就已达到 97.2%。另外，从表中所示结果可见，最后采用轮胎压路机碾压，不仅可使地坪表面由于振动碾压而产生的横向细裂缝得到弥合，起表面修整作用，而且可使地坪压实度进一步提高。II、III 号地坪经轮胎压路机修整碾压后，地坪压实度均达 99% 以上。

② 地坪深度与 RCC 压实度

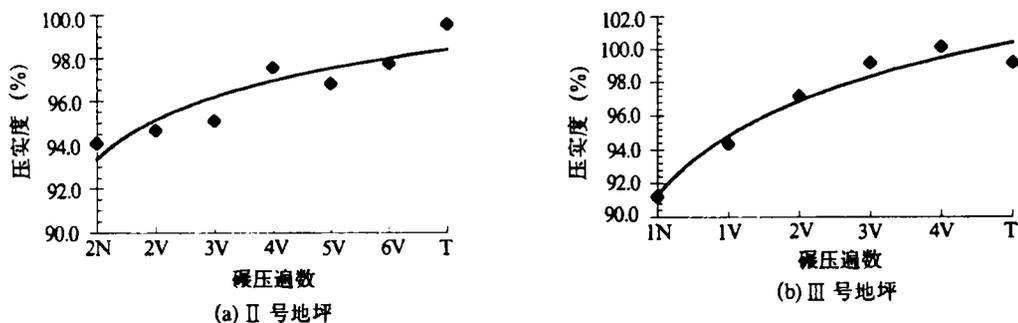


图9 压实度随碾压遍数的变化

注：N 无振碾压 V 振动碾压 T 轮胎压路机碾压

地坪碾压混凝土的厚度为16cm。为考察不同深度的压实度的情况，在I号地坪振动碾压2次往复后测定了不同深度的RCC压实度，结果示于图10。测试结果表明，地坪表面与15cm深度的RCC压实度并无显著差异。

4 地坪平整度检测结果

施工结束后，采用3m直尺连续测量地坪平整度，取每尺最大值。I号地坪因施工时混凝土用水量失控，压路机碾压后地坪轮辙严重，为满足使用要求，后来采用水泥砂浆罩面，以改善其平整度。II、III、IV号地坪平整度的测试结果示于表12。

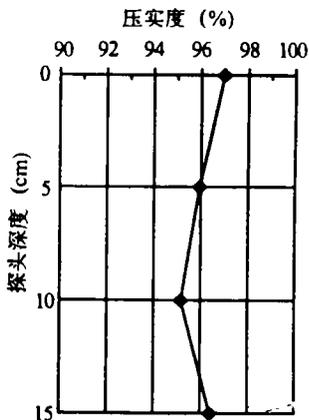


图10 探头深度与压实度的关系

按照GBJ 97-87《水泥混凝土施工及验收规范》的规定，以3m直尺最大间隙的平均值为指标，高速公路应满足 $X \leq 3\text{mm}$ ；一般道路应满足 $\bar{X} \leq 5\text{mm}$ 的要求；按照GBJ 92-86《沥青路面施工及验收规范》的规定，以3m直尺最大间隙的均方差为指标，应满足 $\bar{X} + 1.645S \leq 5\text{mm}$ 的要求。

由表12可见，III号地坪的平整度最佳($\bar{X} < 3\text{mm}$, $\bar{X} + 1.645S \approx 5\text{mm}$)，达到高速公路水泥混凝土路面的标准，接近沥青路面的质量要求；II号地坪 $\bar{X} \leq 5\text{mm}$ ，满足一般水泥混凝土路面的要求；IV号地坪 $\bar{X} = 5.88\text{mm}$ ，稍大于一般水泥混凝土路面的质量标准。

对照附表4所示现场RCC含水量结果进行分析，可见：III号地坪RCC含水量控制最好，其实测用水量的平均值与设计的配合比只差 3kg/m^3 ，变异系数仅为5.8%，因为RCC质量稳定，所以地坪平整度较好；I号地坪RCC用水量与配合比相差较大且不够稳定，因此平整度不如III号地坪的好；IV号地坪RCC用水量控制虽比II号地坪好，但由于石子用量偏大，施工时混合料有石子离析现象，所以对地坪平整度有一定影响。因此，加强现场RCC用水量控制对于保证路面平整度至关重要。

地坪平整度测定结果 表12

地坪编号	I	II	IV
测定尺数	17	16	8
平均值 \bar{X} (mm)	4.76	2.94	5.88
均方差 S (mm)	2.95	1.39	3.83
$\bar{X} + 1.645S$	9.61	5.22	12.18

5 小结

(1) 正交设计试验不仅可考察 RCC 配合比中各因素对于稠度及强度的影响程度及其内在联系,而且能得出可适用于 RCC 配合比设计及现场调整配合比的稠度及强度的经验关系式,因此,正交设计是进行 RCC 配合比设计的一种科学方法。

(2) 加强现场原材料质量控制,特别应须加强原材料含水量控制,是稳定现场 RCC 稠度、确保路面平整度的关键。路面碾压混凝土不宜采用湿排粉煤灰并应注意现场砂石材料含水量的稳定性。

(3) 在采用粉煤灰等量取代水泥的情况下,粉煤灰掺量对路面碾压混凝土的后期(90d以后)强度无显著性影响,但对早期(7d和28d)强度影响极大,掺量越大早期强度越低,7d强度下降尤为突出。大掺量粉煤灰固然利于降低工程造价,但不利于发挥碾压混凝土路面早期开放交通的优势。因此,从综合技术经济性出发,路面碾压混凝土的粉煤灰掺量不应太大,根据本次室内外的研究结果,粉煤灰掺量以不超过20%为宜。

(4) 在碾压混凝土路面的碾压工序中,采用核子密度仪进行路面压实度控制,是优化碾压工艺保证路面施工质量的有效方法。

(5) RCC 稠度是影响碾压混凝土路面平整度及压实度的决定性指标。进行全厚式碾压混凝土路面施工,只要掌握好混合料的稠度及适量的粗集料用量(石子填充体积),就有可能获得较好的路面平整度。但是,人工摊铺只适合小面积地坪施工,在路面工程中要获得理想的宏观平整度并达到一定的生产进度,宜采用大型路面摊铺设备。

(6) 施工实践表明,进行全厚式碾压混凝土路面施工,宜采用具有自动称量及加水装置的混凝土拌和设备及路面摊铺设备,并加强施工质量控制。

参考资料

- 1 水工碾压混凝土试验规程(SL 48-94). 中华人民共和国水利部, 1994. 7.
- 2 振动碾压混凝土路面译文集. 交通部公路科学研究所.
- 3 碾压コンクリートの配合设计法に关すあへ检讨. (日) 道路建设, 2/8.
- 4 石谷雅彦. 木材ヤードにおけるRCCP工法の施工报告. (日) 土木学会北海道支部论文报告集昭和63年度.
- 5 蔡正咏, 王足献. 正交设计在混凝土中的应用. 中国建筑工业出版社.