

路面混凝土配合比正交设计的试验研究

蔡正咏 (研究员) 李世绮 (副研究员)

(交通部公路科学研究所 北京 100088)

提要 本文论述路面混凝土配合比的正交设计试验研究。通过试验结果得知这种方法用于公路混凝土配合比设计是有效的。

关键词 路面混凝土 配合比 正交设计法 公路工程

Experimental Studies of Proportioning Pavement Concrete Mix by Orthogonal Design Method

Cai Zhengyong (Research fellow) Li Shiqi (Associate research fellow)

(Research Institute of Highway, the Ministry of communications, Beijing, 100088)

Abstract The paper deals with the experimental investigation of orthogonal design method with regard to pavement concrete proportioning. From the experimental results this method is effective to concrete mix design for highway pavement.

Key words Pavement concrete Proportioning Orthogonal design method Highway engineering

1 概述

为大规模水泥混凝土路面工程进行配合比设计, 需要建立混凝土抗折强度—灰水比 $F_{28}C/W$ 的关系, 从而较精确地得出所需的水灰比, 同时还要优选粗、细集料(砂、石)用量, 因此往往需要进行多次试验。正交设计是用“均衡分散”和“整齐可比”的正交表来安排优选试验。它可以从多因素的全面试验中, 以较少的试验次数探明多种影响因素的主次关系和某些规律, 找出较好的组合条件。

我们于1989年9月至11月用两个 $L_9(3^4)$ 正交表和两个 $L_8(4 \times 2^4)$ 正交表安排了四批试验。前两个 $L_9(3^4)$ 正交表分别采用碎石和碎石砾石, 按粗集料用量法进行混凝土配合比试验。第三个 $L_8(4 \times 2^4)$ 正交表主要校核前两次选择粗集料用量参数的可靠性, 第四个正交表主要考察水泥用量降至 300 kg/m^3 以下时引气混凝土的和易性和抗折强度。兹分析如下:

2. 砾石混凝土配合比正交试验

2.1 试验目的

选择砾石混凝土配合比的三个参数是: 水灰比 (W/C) 或灰水比 (C/W), 单位用水量(W), 粗集料填充体积百分率 (V)。在 525[#] 中热硅酸盐水泥等原材料一定的试验条件下, 正交试验能以较少的试验次数达到优选这三个配比参数的目的。

2.2 因素、水平和考核指标

试验考察三个因素: ① 水泥用量(C); ② 用水量(W); ③ 粗集料填充体积百分率(V)。

按 GBJ97-87 第 4.2.3 条规定, 路面水泥混凝土的水泥用量不少于 300 kg/m^3 。参考日本经验, 试验水泥用量接近 400 kg/m^3 , 故取 300 kg/m^3 、 350 kg/m^3 、 400 kg/m^3 三个水平。

按 GBJ97-87 第 4.2.7 条规定, 砾石混凝土的用水量估计值为 $140 \sim 160 \text{ kg/m}^3$, 经试拌, 用水量为 160 kg/m^3 时拌和物坍落度超过 10 cm , 故取 140 kg/m^3 、 145 kg/m^3 、 150 kg/m^3 三个水平。三个用水量与三个水泥用量组成 9 个灰水比。用强度作为考核指标时, 可建立强度与灰水比的关系式。

细集料采用汉江河砂, 其细度模数 $F \cdot M = 2$, 按 ACI 推荐值 $D = 40 \text{ mm}$ 时 $V = 73\%$ 。参考日本和我国水工混凝土的经验, $V = 78\%$, 故取 V 为 72% 、 76% 、 80% 三个水平 (汉江砾石最大粒径为 40 mm , $5 \sim 20 \text{ mm}$ 和 $20 \sim 40 \text{ mm}$ 的大、小石子各用 50% , 其合成级配的捣实容重为 1810 kg/m^3)

根据三因素、三水平, 选用 $L_9(3^4)$ 正交表, 见表 1。

考核指标采用坍落度、7d 抗压强度和 28d 抗折强度。包括试拌在内, 10 次试验的混凝土拌和量为 1 m^3 。

2.3 试验结果分析

2.3.1 坍落度

试验结果和直观分析见表 2。直观分析结果表明, 影响坍落度的因素主次顺序是: 用水量、石子用量、水泥用量, 符合一般规律。坍落度最大的是第 2 号试验 (3.4 cm 、 4.1 cm), 即用水量 150 kg/m^3 , 石子填充体积 $V = 76\%$ 。 V 值过大或过小均不利。

2.3.2 7d 抗压强度 R_7 及灰水比的选择

试验结果和直观分析见表 3。直观分析结果表明, 影响 R_7 的因素主次顺序是: 水泥用量、用水量、试验误差 (空列)、石子用量。石子用量是不显著的因素, 可以忽略不计。

在水泥标号等原材料一定的条件下, 混凝土 7d 抗压强度 R_7 主要取决于灰水比 C/W , 可以建立二者的关系式如下: $R_7 = -13.39 + 19.25C/W$, $n = 10$ (9 次正交和 1 次试拌试验), $r = 0.985$, $S = 1.21 \text{ MPa}$, $Cv = 3.8\%$ 。

初步配合比要求的抗折强度 $F_{28} = 52 \text{ kg/m}^3 \times 0.098 = 5.1 \text{ MPa}$ 。根据经验式 $F_{28} = \sqrt{R_7}$ 或 $R_7 = (F_{28})^2 = 5.1^2 = 26 \text{ MPa}$, 求出相应灰水比 $C/W = (26 + 13.39) / 19.25 = 2.0$ 。

混凝土配合比正交试验的因素、水平表 表 1

因 素	A 水泥用量 (kg/m^3)	B 用 水 量 (kg/m^3)	C 石子用量 (%)
水平 1	300	140	72
水平 2	350	150	76
水平 3	400	145	78

砾石混凝土正交试验塌落度的测定结果 表2

列号	1		3		塌落度 (cm)		
试 验 号	A 水 泥 用 量 (kg/m³)	B 用 水 量 (kg/m³)	C 石 子 用 量 (%)	空列	(1)	(2)	合计
1	(1) 300	(1) 140	(1) 72	(1)	1.2	0.7	1.9
2	(1) 300	(2) 150	(2) 76	(2)	4.1	3.4	7.5
3	(1) 300	(3) 145	(3) 80	(3)	0.6	2.5	3.1
4	(2) 350	(1) 140	(1) 76	(3)	1.7	3.1	4.8
5	(2) 350	(2) 150	(2) 80	(1)	3.2	3.7	6.9
6	(2) 350	(3) 145	(3) 72	(2)	1.3	1.2	2.5
7	(3) 400	(1) 140	(1) 80	(2)	1.1	1.8	2.9
8	(3) 400	(2) 150	(2) 72	(3)	2.7	2.2	4.9
9	(3) 400	(3) 145	(3) 76	(1)	2.6	1.6	4.2
K1	12.5	9.6	9.3	13.0			
K2	14.2	19.3	16.5	12.9			
K3	12.0	9.8	12.9	12.0			
R	2.2	9.7	7.2	0.2			

砾石混凝土正交试验 7d 抗压试验和 28d 抗折强度的测定结果 表3

列 号	1	2	3	4	抗压强度 (MPa)	抗折强度 (MPa)
试 验 号	水泥用量 (kg/m³)	用水量 (kg/m³)	石子用量 (%)	空列		
1	300	140	72	1	28.1	6.13
2	300	150	76	2	24.7	5.92
3	300	145	80	3	26.0	6.99
4	350	140	76	3	36.4	6.57
5	350	150	80	1	32.7	6.62
6	350	145	72	2	31.9	7.11
7	400	140	80	2	39.9	7.60
8	400	150	72	3	39.5	7.44
9	400	145	76	1	39.3	7.77
K1	78.8	104.4	99.5	100.1	注: 试拌用量= 160 kg/m³	
K2	101.0	96.9	100.4	96.5		
K3	118.7	97.2	98.8	101.9		
R	39.9	7.5	1.8	5.4	水泥用量= 300 kg/m³ R ₂ = 22.3 MPa	
K1	19.04	20.30	20.98	20.52		
K2	20.30	20.28	20.26	20.63		
K3	23.11	21.87	21.21	21.30		
R	4.07	1.59	0.95	0.87		

根据直观分析结果优选出混凝土配合比的三个参数是：

① 水灰比 $W/C=1/C/W=0.50$ ，符合规范不大于 0.50 的规定；

② 单位用水量 $W=150\text{kg/m}^3$ ，计算单位水泥用量 $C=W/W/C=150/0.5=300\text{kg/m}^3$ ，符合规范不小于 300kg/m^3 的规定；

③ 根据石子振实容重 (1870kg/m^3) 和单位石子填充体积百分率 ($V=76\%$)，计算单位石子用量 $G=0.76 \times 1810=1376\text{kg/m}^3$ 。

这个配合比就是正交表中的第 2 号试验，其中 $F_{28}=5.92\text{MPa}>5.1\text{MPa}$ ，符合设计要求。

根据以上参数求单位砂子用量 S 和标准配合比。

按容重法计算时，取混凝土实测容重 $\gamma=2410\text{kg/m}^3$ ， $S=2410-(150+300+1376)=584\text{kg/m}^3$ ，相应砂率为 29.8%；按绝对体积法计算时， $S=[1000-(150+300/3.15+1376/2.65+10)] \times 2.63=225.5 \times 2.63=593.3\text{kg/m}^3$ ，相应砂率为 30.1%。确定的标准配合比见表 4：

标准配合比

表 4

石子最大 粒径 (mm)	塌落度目标值		水 灰 比	单位粗集料 体 积 (%)	单位体积材料用量 (kg/m³)			
	搅拌站 (cm)	现场 (cm)			水	水 泥	砂	石
40	4.0	2.5	0.50	76	150	300	584	1376

下一步根据现场集料筛分结果和表面含水率进行调整, 提出施工配合比。

3 碎砾石混凝土配合比正交试验

3.1 试验目的

碎砾石混凝土试验, 考察的因素仍是水泥用量 C 、用水量 W 和石子填充体积百分率 V 。与第一个正交表的试验条件不同之处主要是: ① 碎砾石的捣实容重 $\gamma = 1640 \text{ kg/m}^3$, 比砾石 γ 明显降低; ② 砂子细度模数 $F \cdot M = 2.24$, 比上述试验的砂子细度模数 $F \cdot M = 2.65$ 降低 0.41; ③ 满足一定坍落度时, 碎砾石混凝土用水量相应增加 15 kg/m^3 。

3.2 因素、水平和考核指标

与第一个正交表 $L_9(3^4)$ 采用的三个因素相同, 只是用水量的三个水平取 155 kg/m^3 , 160 kg/m^3 , 165 kg/m^3 其余两个因素的水平取值完全相同, 试验考察的因素和水平列于表 5。考核指标采用坍落度和 28d 抗折强度。

碎砾石混凝土配合比正交试验的因素和水平 表 5

因素 水平	A 水泥用量 (kg/m^3)	B 用水量 (kg/m^3)	C 石子用量 (%)
1	300	155	72
2	350	160	76
3	400	165	80

3.3 试验结果及其分析

3.3.1 坍落度

试验结果和直观分析列于表 6。直观分析结果表明, 影响坍落度的因素主次是: 用水量 > 石子用量 > 水泥用量, 与砾石混凝土的试验规律相同, 坍落度最大是第 3 号试验 (4.3cm, 3.9cm) 即用水量 165 kg/m^3 , $V = 80\%$ 。

方差分析计算结果从略。经 F 检验, 用水量、石子用量、水泥用量都是高度显著的影响因素。

3.3.2 28d 抗折强度

试验结果和直观分析列于表 7。直观分析结果表明, 影响 28d 抗折强度的因素主次是: 水泥用量 > 用水量 > 石子用量, 与砾石混凝土的试验规律一致。石子用量 (砂率) 对于抗折强度是不显著的因素。

砾石混凝土正交试验坍落的测定结果 表 6

列 号 因 素 试 验 号	1	2	3	4	坍落度 (cm)		
	A 水泥 用量 (kg/m^3)	B 用水 量 (kg/m^3)	C 石子 用量 (%)		(1)	(2)	合计
1	300	155	72	1	0.6	0.4	1.0
2	300	160	76	2	1.3	1.3	2.6
3	300	165	80	3	4.3	3.9	8.2
4	350	155	76	3	1.5	1.8	3.3
5	350	160	80	1	2.7	3.2	5.9
6	350	165	72	2	3.4	2.8	6.2
7	400	155	80	2	2.5	2.6	5.
8	400	160	72	3	2.1	2.0	4.1
9	400	156	76	1	4.3	3.7	8.0
K1	11.0	9.4	11.3	14.9			
K2	15.4	12.6	13.0	13.9			
K3	17.2	22.4	19.2	15.6			
R	5.4	13.0	7.9	1.7			

与第一个正交表砾石混凝土试验结果相比较, 在水泥用量为 400 kg/m^3 条件下, 砾石混凝土 28d 平均抗折强度 $F_{28} = 7.7 \text{ MPa}$, 而碎砾石混凝土 28d 平均抗折强度 $F_{28} = 6.37 \text{ MPa}$, 约低 17%。由此可见, 由于砾石的需水性比碎砾石的低, 砾石混凝土达到一定和易性时的用水量少, 在水泥用量一定的条件下水灰比小, 可以制成抗折强度高达 7.7 MPa 的混凝土。

碎砾石混凝土正交试验 28d 抗折强度的测试结果 表 7

序号	1	2	3	4	抗折强度 (MPa)
试验号	A 水泥用量 (kg/m³)	B 用水量 (kg/m³)	C 石子用量 %		
1	300	155	72	1	6.04
2	300	160	76	2	5.87
3	300	165	80	3	5.70
4	350	155	76	3	7.00
5	350	160	80	1	6.72
6	350	165	72	2	6.39
7	400	155	80	2	6.01
8	400	160	72	3	6.97
9	400	165	76	1	6.12
K1	17.61	19.05	19.40	18.88	
K2	20.11	19.56	18.99	18.27	
K3	19.10	18.21	18.43	19.67	
R	2.50	0.35	0.97	1.40	

4 水泥用量 300kg/m³ 的混凝土配合比正交试验

4.1 试验目的

通过中、日两国“规范”中的混凝土配合比举例可以看出，二者砂率相差很大。我国 GBJ97-87 的砂率为 28%，日本的砂率为 38%。影响砂率的因素很多，例如水泥用量、砂子细度模数、石子种类和级配、外加剂等。此次试验在采用 525# 中热水泥，水泥用量 300kg/m³ 和砂子 F·M=2.24 的条件下，石子填充体积 V 值从 74% 增至 84% (相应砂率从 38.5% 降至 21.8%)，同时探明碎砾石和砾石、掺与不掺引气减水剂对于坍落度和抗折强度的影响。

4.2 因素、水平和考核指标

试验考察三个因素：① 石子填充体积 V；② 碎砾石与砾石；③ 掺与不掺引气减水剂。V 值采用 74%，78%，82%，86% 四个水平，其余两个因素各取两个水平，故用 L₈(4×2⁴) 正交表安排试验。用水量根据掺与不掺外加剂和石子的种类而定：不掺外加剂的碎石混凝土用水量为 165 kg/m³；掺外加剂时用水量为 145kg/m³；不掺外加剂的砾石混凝土用水量为 150kg/m³，掺外加剂时用水量为 130kg/m³。

考核指标采用坍落度和 28d 抗折强度。

4.3 试验结果及其分析

① L₈(4×2⁴) 表中 8 组混凝土试验的材料用量、配合比见表 8。

水泥用量维持 300kg/m³ 条件下，8 组试验的混凝土材料用量和配合比 表 8

序号	石子用量 (kg/m³)	石子种类	外加剂	材料用量 (kg/m³)				砂率 (%)	灰水比 C/W	水灰比 W/C	含气量 (%)
				水	水泥	石	砂				
1	0.74	碎砾石	不加	165	300	1214	761	38.5	1.82	0.55	—
2	0.74	砾石	加	130	300	1339	651	32.7	2.31	0.433	5.5
3	0.78	碎砾石	不加	165	300	1279	696	35.2	1.82	0.55	—
4	0.78	砾石	加	130	300	1412	578	29.0	2.31	0.433	5.5
5	0.82	碎砾石	加	145	300	1345	630	31.9	2.07	0.483	4.3
6	0.82	砾石	不加	150	300	1484	506	25.4	2.00	0.500	—
7	0.86	碎砾石	加	145	300	1410	565	28.6	2.07	0.483	4.0
8	0.86	砾石	不加	150	300	1557	433	21.8	2.00	0.500	—

维持水泥用量 300kg/m³ 混凝土正交试验
坍落度的测试结果

表 9

列号	1	2	3	4	5	坍落度 (cm)		
试验	A 石子用量 (%)	B 石子种类	C 外加剂			(1)	(2)	合计
1	74	碎石	不加	1	1	2.1	2.1	4.2
2	74	砾石	加	2	2	4.0	3.5	7.5
3	78	碎石	不加	2	2	3.7	3.5	7.2
4	78	砾石	加	1	1	4.5	4.4	8.9
5	82	碎石	加	1	2	6.7	6.7	13.4
6	82	砾石	不加	2	1	4.4	6.2	10.6
7	86	碎石	加	2	1	5.4	5.2	10.6
8	86	砾石	不加	1	2	2.1	4.6	6.7
K1	11.7	35.4	28.7	33.2	34.3			
K2	16.1	33.7	40.4	35.9	34.8			
K3	24.0							
K4	17.3							
R	12.3	1.7	11.7	2.7	0.5			

② 试验结果和直观分析见表 9。方差分析结果见表 10。结果表明,石子用量和外加剂是影响坍落度最主要的两个因素 当砂子 $F \cdot M = 2.24$, $V = 0.82$ 时,坍落度最大,此时的最优砂率,碎砾石为 32%,砾石为 25%。GBJ97-87 中举例,碎石混凝土配合比砂率采用 28% 似属偏低,未经试验,并非最优砂率。掺引气减水剂时,在减水 20kg/m³ 条件下,仍然能够增加坍落度约 3cm、改善了和易性。在掺外加剂,减少用水量,碎石仍比砾石用水量多的条件下,石子品种(碎石和砾石)对坍落度没有明显的影

响(表 9)。根据日本标准,混凝土单位用水量不大于 150kg/m³,则碎石混凝土必须掺用外加剂。

维持水泥用量 300kg/m³ 混凝土坍落度的方差分析

表 10

方差列号	方差来源	方差名称	平方和	自由度	均方	值	显著性
1	A	石子用量	19.42200	3	6.47400	10.531	>F0.01=
2	B	石子种类	0.18100	1	0.18100	0.295	7.6
3	(AB)1	外加剂	8.55600	1	8.55600	13.926	>F0.01=
	Se1	空列误差	0.47037	2	0.23519	0.383	11.3
	Se2	试验误差	4.91500	8	0.61438		
合 计			33.54438	15			

③ 28d 抗折强度

试验结果和直观分析见表 11。直观分析结果表明,尽管石子用量或砂率大幅度变化,但对 28d 抗折强度没有明显的影响。在 525# 中热水泥、水泥用量为 300kg/m³ 条件下,砂率从 21.8% 增至 38.5%,无论是碎石或砾石,掺与不掺引气剂,混凝土 28d 抗折强度在 5.55 ± 0.21 MPa 波动,强度变化不超过 4%,在试验误差范围内。说明在满足 $F_{28} = 5.1$ MPa 的条件下,水泥用量降至 300kg/m³ 以下是可能的。同时说明,在水泥用量维持一定时,掺用引气减水剂可以改善和易性,在坍落度略增加的情况下,由于减少用水量,缩小水灰比,引气并不降低混凝土的抗折强度和抗压强度。

引气与不引气，碎石，砾石，不同石子用量混凝土正交试验及结果 表 11

直观分析的考核指标	列号	1	2	3	4	5	R _区 (MPa)		抗折强度 F ₂₈ (MPa)	含气量 (%)
		A	B	C						
	试验号	石子用量 (%)	石子种类	外加剂			7d	28d		
	1	74	碎石	不加	1	1	20. 5	32. 6	5.52	5.5
	2	74	砾石	加	2	2	27. 6	38. 4	5.56	
	3	78	碎石	不加	2	2	20. 4	36. 2	5.87	
	4	78	砾石	加	1	1	25. 2	35. 0	5.49	5.5
	5	82	碎石	加	1	2	21. 8	32. 2	5.83	4.3
	6	82	砾石	不加	2	1	22. 1	33. 4	5.56	4.0
	7	86	碎石	加	2	1	23. 2	34. 7	5.29	
	8	86	砾石	不加	1	2	20. 2	31. 5	5.36	
R ₇	K1	48. 1	85.9	83.2	87.7	91.0	F ₂₈ =5.55MPa S=0.21MPa V=3.8%			
	K2	45. 6	95.1	97.8	93.3	90.0				
	K3	43. 9								
	K4	43. 4								
	R	4. 7	9.2	14.6	5.6	1.0				
R ₂₈	K1	71. 0	135.7	133.7	131.3	135.7				
	K2	71. 2	138.3	140.3	142.7	138.3				
	K3	65. 6								
	K4	62. 2								
	R	5. 0	2.6	6.6	11.4	2.6				
F ₂₈	K1	11. 08	22.51	22.31	22.20	21.86				
	K2	11. 36	21.97	22.28	22.28	22.62				
	K3	11. 39								
	K4	10. 65								
	R	0. 74	0.54	0.14	0.08	0.76				

5 引气混凝土配合比的正交试验

5.1 试验目的

通过试验探明水泥用量在 250kg/m³ ~ 325kg/m³ 范围内，采用425[#]、525[#] 两种标号硅酸盐水泥和两种石子的引气混凝土能否满足道路工程抗折强度和坍落度的要求，以及这些因素的影响。

引气混凝土 正交试验的考查的因素与水平 表 12

5.2 因素、水平和考察指标

试验的因素及水平列于表 12。

采用 L₈(4×2⁴)表安排试验，8 组试验的混凝土材料用量和配合比列于表 13。考核指标采用坍落度和 28d 抗折强度。

因 素 \ 水 平	1	2	3	4
水 泥 用 量 (kg/m ³)	250	275	300	325
石子种类及用水量 (kg/m ³)	碎砾石 140	砾石 125		
水泥标号、品种	汉江 425 [#] 普通水泥	夹江 525 [#] 中热水泥		

8 组引气混凝土试验的材料用量和配合比

表 13

序号	石子种类	水泥 标号	材料用量 (kg/m ³)				砂率 (%)	C/W	W/C	含气量 (%)
			水	水泥	石	砂				
1	碎砾石	425	140	250	1345	638	32.1	1.79	0.560	4.0
2	砾石	525	125	250	1484	511	25.6	2.00	0.500	4.6
3	碎砾石	425	140	275	1245	610	31.2	1.96	0.509	2.7
4	砾石	525	125	275	1484	460	24.7	2.20	0.455	4.1
5	碎砾石	525	140	300	1345	585	30.3	2.14	0.467	4.0
6	砾石	425	125	300	1484	481	23.7	2.40	0.417	5.0
7	碎砾石	525	140	325	1345	560	29.4	2.32	0.431	3.4
8	砾石	425	125	325	1484	438	22.7	2.60	0.385	3.7

注：(1) 混凝土设计容重 $\gamma = 2370 \text{ kg/m}^3$

(2) 砂子细度模数 $F.M = 2.24$

(3) 碎砾石捣实容重 $\gamma = 1640 \text{ kg/m}^3$, $D_{\max} = 40 \text{ mm}$

(4) 砾石捣实容重 $\gamma = 1810 \text{ kg/m}^3$, $D_{\max} = 40 \text{ mm}$

(5) 汉中 425# 普通硅酸盐水泥的 28d 抗压强度为 46.9 MPa, 28d 抗折强度为 8.7 MPa

(6) 夹江 525# 中热硅酸盐水泥的 28d 抗压强度为 53.3 MPa, 28d 抗折强度为 8.7 MPa

(7) 选用的石子填充体积百分率为 $V = 82\%$

5.3 试验结果及其分析

5.3.1 坍落度

试验结果及其直观分析见表 14。直观分析结果表明, 影响坍落度的主次因素是: 水泥标号, 石子种类及用水量 > 空列 (交互作用) > 水泥用量。525# 水泥对坍落度有不利影响。碎砾石混凝土即使用水量比砾石混凝土多 15 kg/m^3 , 坍落度仍明显偏低, 和易性不及砾石混凝土, 坍落度随着水泥用量的增多而降低。水泥用量与石子种类、水泥品种对坍落度影响有交互作用。例如, 水泥用量为 $300 \text{ kg/m}^3 \sim 325 \text{ kg/m}^3$ 时, 用 525# 水泥的碎石混凝土坍落度是最低的。

5.3.2 28d 抗折强度和抗压强度

表 14 的直观分析结果表明, 影响 28d 抗折强度因素的主次是: 水泥品种、标号 > 水泥用量 > 空列 > 石子种类。石子种类的影响是不显著的。如果设计要求 $F_{28} = 5.1 \text{ MPa}$, 采用 525# 中热水泥的砾石混凝土, 水泥用量可能降至 250 kg/m^3 , 采用 425# 普通水泥的碎石混凝土, 水泥用量可能降至 275 kg/m^3 。

6 正交试验优选砂石用量的验证试验结果及与标准配合比的比较

用最大粒径 $D = 40 \text{ mm}$ 的两种石子 (砾石和碎砾石)、两种细度模数 ($F.M = 2.65$ 和 2.24)、砂子, 通过三次正交试验优选出坍落度最大的单位石子填充体积百分率 V 值列于表 15:

现将我国《水工混凝土试验规程》、日本《水泥混凝土路面设计施工纲要》和美国建立的 $V = F.M$ 关系列于表 16。

采用高低标号水泥、碎石、砾石和 250-325 kg/m³ 水泥量引气混凝土正交试验结果

表 14

直观分析的考核指标	列号	1	2	3	4	5	塌落度 (cm)			抗折强度	抗压强度
	试验号	A 水泥用量 (kg/m³)	B 石子种类 及用水量	C 水泥标号			(1)	(2)	合计	(MPa)	(MPa)
	1	250	碎石 140	425	1	1	4.6	4.6	9.2	4.23	21.8
	2	250	砾石 125	525	2	2	3.0	3.0	6.0	5.26	31.2
	3	275	碎石 140	425	2	2	3.2	2.5	5.7	5.51	29.8
	4	275	砾石 125	525	1	1	4.5	4.0	8.5	5.49	34.3
	5	300	碎石 140	525	1	2	1.1	0.7	1.8	6.53	42.0
	6	300	砾石 125	425	2	1	4.7	4.1	8.8	4.94	29.8
	7	325	碎石 140	525	2	1	1.1	0.9	2.0	4.33	48.0
	8	325	砾石 125	425	1	2	3.9	5.5	9.4	5.36	33.8
塌落度	K1	15.2	18.7	33.1	28.9	28.5					
	K2	14.2	32.7	18.3	22.5	22.9					
	K3	10.6									
	K4	11.4									
	R	4.6	14.0	14.8	6.4	5.6					
F _{it}	K1	9.49	22.24	19.68	21.61	20.99					
	K2	10.64	21.05	23.61	21.68	22.30					
	K3	11.47									
	K4	11.69									
	R	2.20	1.19	3.38	0.07	1.31					
R _n	K1	53.0	141.6	115.2	131.9	133.9					
	K2	64.1	129.1	155.5	138.8	136.8					
	K3	71.8									
	K4	81.8									
	R	28.8	12.5	40.3	6.9	2.0					

塌落度最大的石子填充体积百分率优选的试验结果

表 15

序 号	石 子 种 类	最 大 粒 径 (mm)	捣 实 容 量 (kg/m³)	砂子细度模数	单位石子填充体积 (%)
1	砾 石	40	1810	2.65	0.76
2	碎 砾 石	40	1640	2.24	0.80
3	碎 砾 石	40	1640	2.24	0.82

从表 16 看出：① 我国《水工混凝土试验规程》中的 V 值与日本《水泥混凝土路面设计施工纲要》中砾石混凝土的 V 值完全相同；② 日本碎石混凝土的 V 值与美国 ACI 的 V 值完全相同；③ 表 15 的验证试验结果与表 16 国内外 $V \cdot F \cdot M$ 的规律基本相符。

中国、日本、美国不同砂子细度模数的 V 值表

表 16

提 出 者		V 值					经 验 式
		2.2	2.4	2.6	2.8	3.0	
水工 混凝土试验规程 SD105-82	碎石或砾石	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	$V=1.04-0.1F \cdot M$
日本水泥混凝土路面施工设计纲要	砾 石	0.82	0.80	0.78	0.76	0.74	$V=0.76(1.37-0.133F \cdot M)$ $V=1.04-0.1F \cdot M$
	碎 石	0.78	0.76	0.74	0.72	0.70	$V=0.73(1.37-0.133F \cdot M)$ $V=1.00-0.1F \cdot M$
美国 ACI	碎石或砾石		0.76	0.74	0.72	0.70	$V=1.00-0.1F \cdot M$

将日本水泥混凝土路面设计施工纲要和我国 GBJ97-87 的混凝土配合比设计举例及此次验证试验结果一并列于表 17。

路面混凝土标准配合比的比较

表 17

规范及验证试验	石子 最大 粒径 (mm)	塌 落 度 (cm)	含 气 量 (%)	配合比强 度 F_{28} (MPa)	水 灰 比	单位石子 填充体积 (%)	材料用量 (kg/m^3)				砂 率 %	砂 子 $F \cdot M$	备 注
							水	水泥	砂	碎石			
日本水泥混凝土路面设计施工规范	40 碎石	2.5~ 4.0	4~5	5.2	0.40	0.73	136	340	720	1172	38	2.87	日本硅酸盐水泥引气剂
中国 GBJ97-87	40 碎石	1~2	—	5.0	0.48	—	144	313	544	1339	28	中砂	425 [#] 普通硅酸盐减水剂
验 证 试 验	40 碎砾石	6.7	4.3	5.8	0.48	0.82	145	300	630	1345	32	2.24	525 [#] 中热硅酸盐水泥引气减水剂

从表 17 看出: ① 日本采用引气混凝土, 通过试验优选工作度 (秒) 最低的石子填充体积为 73%, 相应最优砂率为 38%; ② 我国 GBJ97-87, 非引气混凝土未经优选试验直接采用砂率为 28%, 比日本引气混凝土的砂率低 10%; ③ 此次验证试验结果表明, 通过优选的砂率以 32% 为宜。

7 结论

① 正交试验法, 用于公路工程混凝土配合比设计是行之有效的。

② 通过试验优选的 V 值与国内外 $V-F \cdot M$ 数值基本相符。可供路面混凝土配合比设计中试用。

③ 本次试验结果表明, 在采用 525[#] 中热硅酸盐水泥, 水泥用量为 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 的条件下, 掺引气减水剂可以改善施工和易性。由于用水量减少, 水灰比缩小, 引气并不降低混凝土的抗折强度和抗压强度。

④ 石子种类对强度的影响, 在相同试验条件下, 与水泥品种、标号 and 水泥用量相比, 石子种类是不显著的影响因素。碎石和砾石对混凝土强度的影响在一般试验误差范围内。由于试验条件不同, 引起的差异远大于碎石和砾石对混凝土强度的影响。

用无破损方法检测混凝土路面抗折强度

张 敏

(唐山市交通局工程质量监理站 063000)

1 采用超声回弹综合法检测路面抗折强度的必要性

众所周知,采用 28 天龄期的标准试件抗折强度值作为路面抗折强度的标准,其试验时简便易行,而且很直观,故被世界各国所采用。但也存在取样有时缺乏代表性,试件的制作、养生与施工现场难免有差异等缺点。

对此,我们提出了一种能直接在现场路面上测得抗折强度的方法——超声回弹综合法。

这种方法是将在路面上测得的超声波声速值和回弹值两个参数综合在一起,以反映路面混凝土的质量。由于超声波是在混凝土路面结构表层以下 8~12cm 深度范围内部穿过,可反映混凝土内部的密实性、均匀性,而且回弹值可以反应路面结构表层 2~3cm 的硬度,二者结合能较全面地反应混凝土的质量,且可以消除因混凝土湿度、龄期长短等因素给试验带来的影响,参见参考文献[2]。

同时,辅以取芯校正,不仅可以进一步提高数据精度,而且可以对混凝土路面不同部位、各龄期强度进行定性和定量检测,方法简便,检测速度快,结果较准确,很有实用价值。

⑤ 此次验证试验结果,引气混凝土优选的砂率以 32% 为宜。

参考文献

- [1] GBJ97-87 水泥混凝土路面施工及验收规范及条文说明,北京:中国计划出版社,1988 年。
- [2] 日本道路协会编,水泥混凝土路面设计施工纲要(1984 年修订版),北京:中国建筑工业出版社,1988 年 9 月。
- [3] 交通部公路科学研究所,路面水泥混凝土配合比设计方法的试验研究,1990 年 3 月。
- [4] ACI standard Recommended practice for selecting proportions for Normal Weight concrete (ACI211.1-70)
- [5] (日)伊东茂富、矶崎正晴、养王田学一,路面混凝土的单位水量和单位石子体积(铺装用コンクリートの単位水量および単位粗骨材容積),ヤソント・コンタリット, No.232
- [6] 水电部十三工程局,混凝土配和比经验式计算法,北京:中国建工出版社,1975 年。
- [7] 水电部部颁标准,水工混凝土试验规程,水力电力出版社,1982 年。
- [8] 蔡正咏 王足献,正交设计在混凝土中的应用,北京:中国建工出版社,1985 年 1 月。