

骨料级配优化对混凝土胶凝材料用量的影响

蔡杰龙, 杨永民, 李伟

(广东省水利水电科学研究院, 广东省水利重点科研基地, 广东 广州 510635)

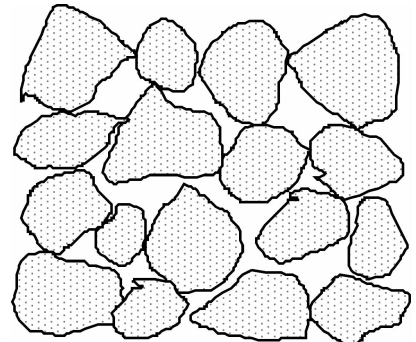
摘要: 骨料级配优化对于改善混凝土工作性能和节省胶凝材料用量具有重要的意义。该文分别对粗细骨料级配进行优化得到堆积密度大、空隙率小的细骨料和粗骨料, 并分2种类型(直卸、泵送)和3种标号(C20、C25、C30)进行混凝土配合比试验对比骨料级配优化前后单方混凝土胶凝材料用量, 最后通过实例进行验算。试验结果表明, 当砂中0.315 mm以下细砂含量控制在一定比例, 并在连续级配的5~31.5 mm碎石或5~25 mm碎石中掺入一定比例的5~10 mm石时, 每 m^3 混凝土中胶凝材料用量均可得到一定程度的降低, 与理论验算结果较为吻合。骨料级配优化可操作性强, 适合在混凝土生产企业中推广。

关键词: 粗骨料; 细骨料; 级配优化; 混凝土; 胶凝材料用量

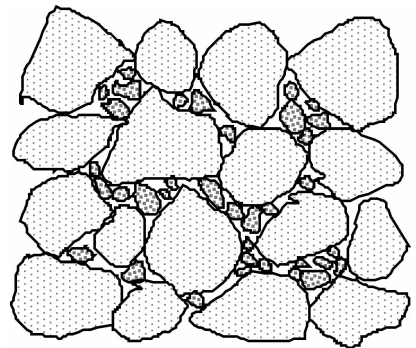
中图分类号: TU528.041 **文献标志码:** B **文章编号:** 1008-0112(2014)06-0064-05

随着建筑工程的蓬勃发展, 混凝土的应用越来越广泛。然而面对激烈的市场竞争, 混凝土生产厂家迫切需要通过各种技术手段降低企业生产成本才能适应市场的发展。在混凝土拌合物中, 水泥浆体填充砂、石空隙, 并包裹砂、石表面起润滑作用, 使混凝土获得施工时必要的和易性, 而砂、石骨料在混凝土中起着骨架作用^[1,4]。为此, 优化粗细骨料级配使粗细颗粒配合得当, 细骨料填充粗骨料空隙, 水泥浆填充细骨料空隙, 可实现在一定程度上减少空隙率并达到降低胶凝材料用量的目的。

然而, 级配优化理论所建立的理想模型与实际应用存在很大差别。在实际生产过程中, 几乎所有砂石都是直接使用, 并未经过任何级配优化处理, 天然骨料堆积形成的空隙往往空隙率较大, 如图1(a)所示, 仍然具有较大的空间可降低, 而骨料级配优化后的堆积空隙率则可得到明显的降低, 如图1(b)所示, 这对于生产企业来讲预示着粗细骨料级配优化存在巨大的经济效益^[2-3,5]。鉴于此, 本文通过优化粗细骨料级配并将级配优化前后的粗细骨料应用在混凝土中, 以对比骨料级配优化对单方混凝土胶凝材料用量的降低作用, 然后结合实例进行验算, 为企业合理使用粗细骨料和降低生产成本提供重要的参考依据。



(a) 骨料级配优化前



(b) 骨料级配优化后

图1 骨料颗粒堆积模型示意

1 试验

1.1 主要原材料

1.1.1 水泥

本试验采用广东塔牌集团生产的P·II 42.5R水泥, 其基本物理性能如表1所示。

收稿日期: 2014-02-17; 修回日期: 2014-03-14

作者简介: 蔡杰龙(1987), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事水泥混凝土及外加剂等建筑材料研究。

表1 水泥的基本物理性能

标准稠度 /%	比表面积 /($\text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$)	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	凝结时间/min		安定性 沸煮法	抗压强度/MPa	
			初凝	终凝		3 d	28 d
24.50	380	3.05	125	195	合格	25.2	48.5

1.1.2 细骨料

天然河砂,属于级配Ⅱ区,细度模数为2.60~2.80,表观密度为 $2\ 670\ \text{kg}/\text{m}^3$,含泥量为0.8%,0.315 mm以下细砂含量为8.12%。

1.1.3 粗骨料

共有3种不同尺寸的碎石,均属花岗岩碎石,5~31.5 mm碎石和5~25 mm碎石连续级配,基本物理指标如表2所示。

表2 粗骨料基本物理指标

粗骨料	尺寸/mm	表观密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	堆积密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	紧密密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
5~31.5 mm碎石	5~31.5	2 680	1 390	1 510
5~25 mm碎石	5~25	2 670	1 380	1 500
5~10 mm石	5~10	2 680	/	/

1.1.4 其它原材料

1) 矿渣粉: S95矿渣粉,为广东韶钢嘉羊新型建材有限公司生产,表观密度为 $2.80\ \text{g}/\text{cm}^3$,28 d活性指数为98%;

2) 粉煤灰: Ⅱ级粉煤灰,为广州恒达资源综合利用有限公司黄电粉煤灰加工厂生产,表观密度为 $2.38\ \text{g}/\text{cm}^3$,28 d活性系数为70%,需水量比为95%,烧失量为7.15%;

3) 减水剂: 使用深圳五山蔡系减水剂,固含量为30%, $\text{pH}=6.3$,密度= $1.10\ \text{g}/\text{cm}^3$,减水率为20%。

1.2 试验方法

1.2.1 粗细骨料样品制备

不同空隙率的细骨料主要通过控制0.315 mm以下细砂含量进行调整,细骨料细度模数应控制在Ⅱ区中砂范围内;不同空隙率的粗骨料主要通过5~10 mm石和5~31.5 mm碎石或5~25 mm碎石按比例搅拌均匀后进行测定,根据工程应用要求,直卸混凝土主要使用5~31.5 mm碎石,泵送混凝土主要使用5~25 mm碎石。

2 试验结果与分析

2.1 骨料级配优化

2.1.1 细骨料最低空隙率

本试验中使用0.315 mm以下细砂含量控制砂的空隙率,主要基于以下2点考虑:(1)《混凝土泵送施工技术规范》(JGJ/T10-95)中指明细骨料宜采用中砂,通过0.315 mm筛孔的砂,不应少于15%;(2)工程实践经验通常以控制0.315 mm以下细砂含量为指标,以改善混凝土的粘聚性和增加混凝土的密实性。

由图2可知,随着0.315 mm以下细砂含量的不断增大,从8.12%逐渐增大到31.0%时,细骨料松散堆积和紧密堆积的空隙率均先逐渐降低后逐渐升高。从试验数据可知,其在17.84%时空隙率达到最低,分别是41.44%和35.18%。从图2中松散堆积对应的空隙率来看,0.315 mm以下细砂含量在20.20%和22.00%时空隙率也相对较低,分别为41.48%和41.47%,其对应的0.315 mm以下细砂含量均可作为工程参考指标。

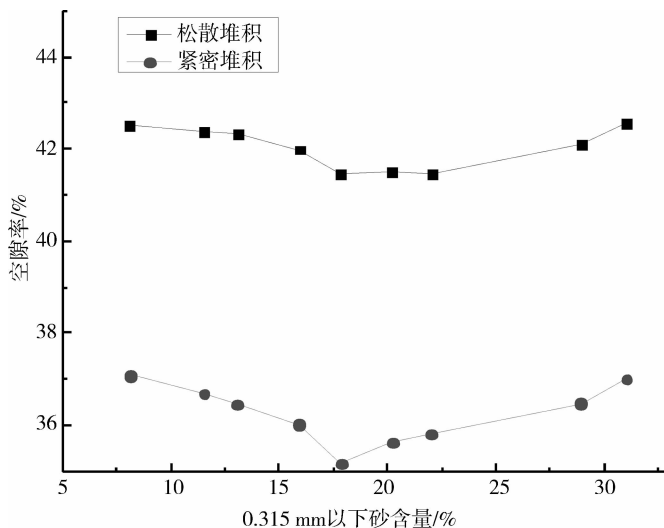


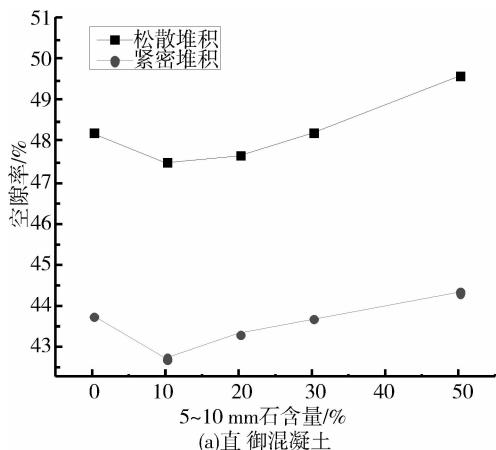
图2 0.315 mm以下细砂含量与细骨料空隙率之间的关系

综上所述,0.315 mm以下细砂含量为17.84%、20.20%和22.00%同样可作为实际工程应用中的参考指标。然而,由于0.315 mm以下细砂含量的增大往往也会直接增大了砂的含泥量,同时砂的总比表面积也会增大,从而导致其需水量增大,增加了减水剂的掺量。因此,为了满足工程要求的同时找出相对较低的空隙率,可将0.315 mm以下细砂含量控制在

17.84%左右为宜,而在实际工程应用中,泵送混凝土要求0.315 mm以下细砂含量必须大于15%,因此17.84%左右的控制指标符合工程实际要求。

2.1.2 粗骨料最低空隙率

由图3(a)可知,随着5~10 mm石含量不断增大,5~10 mm石与5~31.5 mm碎石组成的混合碎石堆积空隙率先降低后升高,当5~10 mm石含量为10%时松散堆积和紧密堆积的空隙率均达到最低,分别为47.48%和42.69%。因此,通过试验结果表明,对于直卸混凝土,为了控制碎石空隙率使其达到最低,实



际工程应用以90%的5~31.5 mm碎石掺10%的5~10 mm石为宜。

由图3(b)可知,随着5~10 mm石含量不断增大,5~10 mm石与5~25 mm碎石组成的混合碎石堆积空隙率先降低后升高,当5~10 mm石含量为10%时松散堆积和紧密堆积的空隙率均达到最低,分别为47.36%和42.50%。因此,通过试验结果表明,对于泵送混凝土,为了控制碎石空隙率使其达到最低,实际工程应用以90%的5~20 mm碎石掺10%的5~10 mm石为宜。

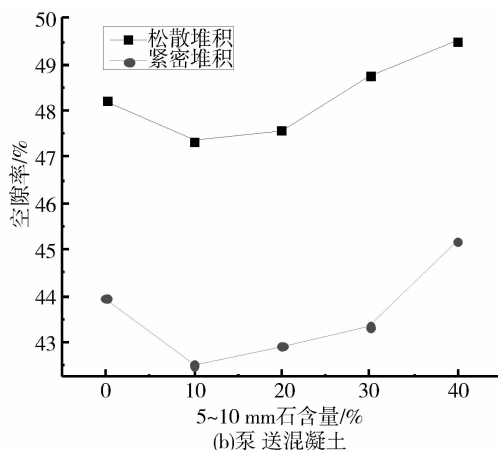


图3 5~10 mm石含量与空隙率之间的关系

2.2 混凝土配合比试验

混凝土骨料级配优化前后所使用的骨料类型如表3所示。2种混凝土数据对比前提条件为:(1)同一强度等级下的2种混凝土(级配优化前和级配优化后)水

胶比保持一致,砂率不变,碎石总用量相同,且坍落度相差均在10 mm以内;(2)胶凝材料中,水泥与粉煤灰固定比例为7:3;(3)混凝土粘聚性均良好,无明显泌水离析现象出现。

表3 混凝土中骨料级配优化前后所使用骨料类型

类型	直卸混凝土		泵送混凝土	
	细骨料	粗骨料	细骨料	粗骨料
级配优化前	0.315 mm以下细砂含量为8.12%的河砂	100% 5~31.5 mm碎石	0.315 mm以下细砂含量为8.12%的河砂	100% 5~25 mm碎石
级配优化后	0.315 mm以下细砂含量为17.84%的河砂	90% 5~31.5 mm碎石和10% 5~10 mm石	0.315 mm以下细砂含量为17.84%的河砂	90% 5~31.5 mm碎石和10% 5~10 mm石

2.2.1 直卸混凝土

由表4可知,对于C20直卸混凝土来讲,在混凝土坍落度、坍落扩展度和28 d抗压强度相近的情况下,使用级配优化后的河砂和碎石进行配合比试验其每m³混凝土中胶凝材料用量相比级配优化前的降低了15 kg/m³。究其原因,级配优化后的河砂和碎石堆积更加密实,空隙率得到一定程度的降低,从而导致需要填充在砂石空隙间的浆体用量减少,胶凝材料用量因此也得到节省。同样,从C25、C30配合比试验

数据同时可以看出,使用级配优化后的河砂和碎石进行混凝土配合比试验,其相比较级配优化前每m³混凝土中胶凝材料用量均降低了10 kg/m³。

因此,从直卸混凝土配合比试验结果可知,通过优化河砂和碎石级配,在确保混凝土工作性能和力学性能的前提下,每m³混凝土中的胶凝材料用量可得到一定程度的降低,而这对于降低企业生产成本或提高混凝土的性能具有重要的指导作用。

表4 直卸混凝土配合比试验

砼编号	每方混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³)						砂率/%	水胶比	坍落度/mm	坍落扩展度/mm	28 d 抗压强度/MPa
	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂					
C20-1	203	87	748	1 145	177	6.38	39.5	0.61	195	515	24.2
C20-2	192.5	82.5	748	1 145	168	6.05	39.5	0.61	190	505	23.8
C25-1	217	93	722	1 177	177	6.82	38	0.57	188	480	28.5
C25-2	210	90	722	1 177	171	6.60	38	0.57	183	476	28.9
C30-1	224	96	686	1 193	176	7.04	36.5	0.55	180	465	33.4
C30-2	217	93	686	1 193	171	6.82	36.5	0.55	184	468	32.8

说明: 砼编号中“-1”表示骨料级配优化前,“-2”表示骨料级配优化后,下同。

2.2.2 泵送混凝土

由表5可知,对于不同标号的泵送混凝土来讲,掺入级配优化前后的粗细骨料的混凝土坍落度、坍落扩展度和28 d抗压强度均较为相近。其中,掺入级配优化后的粗细骨料的C20和C25泵送混凝土中每m³胶凝材料用量相比级配优化前的均降低15 kg/m³,

C30则降低10 kg/m³。其降低幅度与直卸混凝土较为一致。从表5试验数据同样可以说明,掺入级配优化前后的粗细骨料的混凝土工作性能和力学性能较为相近,而粗细骨料级配优化则可以在一定程度上降低混凝土中胶凝材料用量。

表5 泵送混凝土配合比试验

砼编号	每方材料用量/(kg·m ⁻³)						砂率/%	水胶比	坍落度/mm	坍落扩展度/mm	28 d 抗压强度/MPa
	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂					
C20-1	227.5	97.5	825	1 009	176	7.80	45	0.54	180	486	23.5
C20-2	217	93	825	1 009	167	7.44	45	0.54	176	480	24.1
C25-1	241.5	103.5	786	1 043	166	8.97	43	0.48	204	525	29.2
C25-2	231	99	786	1 043	158	8.58	43	0.48	200	518	28.8
C30-1	248.5	106.5	767	1 060	163	9.94	42	0.46	210	535	34.7
C30-2	241.5	103.5	767	1 060	159	9.66	42	0.46	205	528	34.2

3 应用实例验算

以C20直卸混凝土为例子进行计算求得理论节省胶凝材料用量,再与实际混凝土配合比应用中所节省

的胶凝材料用量进行对比,最终验证两者数据是否相符(本理论计算忽略骨料表面积改变对胶凝材料用量的影响)。C20直卸混凝土配合比如表6所示。

表6 C20直卸混凝土配合比试验

砼编号	每方混凝土原材料用量/(kg·m ⁻³)						砂率/%	水胶比	坍落度/mm	坍落扩展度/mm	28 d 抗压强度/MPa
	水泥	粉煤灰	砂	碎石	水	外加剂					
C20-1	203	87	748	1 145	177	6.38	39.5	0.61	195	515	24.2
C20-2	192.5	82.5	748	1 145	168	6.05	39.5	0.61	190	505	23.8

验算过程如下所示:

1) 1 m³混凝土中,级配优化后的河砂可节省体积

$$\text{为: } \frac{748 \text{ kg}}{1 320 \text{ kg/m}^3} - \frac{748 \text{ kg}}{1 330 \text{ kg/m}^3} \approx 0.004 \text{ m}^3;$$

一级配优化前河砂(0.315 mm以下细砂含量为8.12%)松散堆积密度:1 320 kg/m³;

一级配优化后河砂(0.315 mm以下细砂含量为17.84%)松散堆积密度:1 330 kg/m³;

一本验算假定混凝土中河砂以松散形式堆积。

2) 1 m³混凝土中,级配优化后的碎石可节省体积

$$\text{为: } \frac{1 145 \text{ kg}}{1 390 \text{ kg/m}^3} - \frac{1 145 \text{ kg}}{1 410 \text{ kg/m}^3} \approx 0.012 \text{ m}^3;$$

一级配优化前碎石(100% 5~31.5 mm 碎石)松散堆积密度:1 390 kg/m³;

一级配优化后碎石(90%的5~31.5 mm 碎石和10%的5~10 mm 石)松散堆积密度:1 410 kg/m³;

一本验算假定混凝土中碎石以松散形式堆积。

3) 1 m³混凝土中,河砂和碎石级配优化后可节省体积为:0.004 m³+0.012 m³=0.016 m³;

4) 以 1 m^3 C20 - 1 混凝土为例, 净浆浆体密度:

$$\frac{177 \text{ kg} + 202 \text{ kg} + 97 \text{ kg}}{177 \text{ kg/m}^3 + \frac{103 \text{ kg}}{3 \text{ 030 kg/m}^3} + \frac{97 \text{ kg}}{2 \text{ 330 kg/m}^3}} \approx 1 \text{ 667 kg/m}^3;$$

5) 0.016 m^3 可填充净浆浆体质量: $0.016 \text{ m}^3 \times 1 \text{ 667 kg/m}^3 \approx 26.7 \text{ kg}$;

6) 1 m^3 混凝土理论节省胶凝材料用量:

$$26.7 \text{ kg} \times \frac{202 \text{ kg} + 97 \text{ kg}}{177 \text{ kg} + 203 \text{ kg} + 97 \text{ kg}} = 16.6 \text{ kg};$$

7) 1 m^3 混凝土实际节省胶凝材料用量:

$$(203 \text{ kg} + 87 \text{ kg}) - (192.5 \text{ kg} + 82.5 \text{ kg}) = 15.0 \text{ kg}.$$

通过以上验算得知, 骨料级配优化后的混凝土理论节省胶凝材料为 16.6 kg , 而实际应用中的混凝土则节省胶凝材料为 15.0 kg , 虽实际节省胶凝材料较理论的稍低, 但两者数据较为接近, 实际和理论基本吻合。

4 结论

1) 实际工程进行混凝土配合比设计试验时, 将河砂中 0.315 mm 以下细砂含量控制在 17.84% 左右, 同时确保细度模数落在 II 区中砂范围内, 可在一定程度上降低河砂空隙率;

2) 对于直卸和泵送 2 种类型的混凝土, 分别在其所使用的连续级配的 $5 \sim 31.5 \text{ mm}$ 碎石和 $5 \sim 25 \text{ mm}$ 碎石中掺入 10% 的 $5 \sim 10 \text{ mm}$ 石可降低堆积空隙率;

3) 在保证工作性能、 28 d 抗压强度且满足其它工程技术要求的前提下, 骨料级配优化后的不同标号 (C20, C25, C30) 的直卸或泵送混凝土, 在进行配合比设计试验时, 每 m^3 混凝土胶凝材料用量可降低 $10 \sim 15 \text{ kg/m}^3$, 这与理论验算结果基本吻合。

参考文献:

- [1] 沈威, 黄文熙, 闵盘荣. 水泥工艺学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 1998(3).
- [2] 山启江. 骨料级配优化对普通混凝土配合比的影响[J]. 内蒙古煤炭经济, 2003(7): 60 - 61.
- [3] 吴国诚, 王立华. 混合粗骨料混凝土性能模型研究[J]. 广东水利水电, 2007(3): 59 - 62.
- [4] 李燕, 申向东. 碎石、浮石混合骨料级配优化试验研究[J]. 内蒙古农业大学学报, 2010, 1(31): 224 - 226.
- [5] 钟贤香. 沥青路面级配碎石基层配合比设计应用技术[J]. 广东水利水电, 2007(12): 65 - 67.

(本文责任编辑 王瑞兰)

Effect of Gradation Optimization of Aggregate on Binder Content in Concrete

CAI Jielong, YANG Yongmin, LI Wei

(Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower,
Guangdong Provincial Key Scientific Research Base, Guangzhou 510635, China)

Abstract: Aggregate Gradation optimization is of great importance in improving the working performance of concrete and saving binder content. In this article, gradation of coarse aggregate and fine aggregate is respectively optimized to obtain the aggregate with higher bulk density and lower voidage. Then design mix of concrete experiments on two kinds of concrete (field concrete, pump concrete) and three kinds of grades (C20, C25, C30) are carried out to compared the binder content in an unit of concrete before and after gradation of aggregate is optimized. Finally, checking computations is implemented by example. It is shown that the binder content in an unit of concrete gets an certain degree of reduction if the ratio of fine sand ($\leq 0.315 \text{ mm}$) in fine aggregate is proper and a certain proportion of $5 \sim 10 \text{ mm}$ gravel is mixed into $5 \sim 31.5 \text{ mm}$ or $5 \sim 25 \text{ mm}$ gravel. And the result accords with the theoretical checking computations. Gradation optimization of aggregate is easily operability and suitable for promotion in concrete manufacturing enterprise.

Key words: coarse aggregate; fine aggregate; gradation optimization; concrete; binder content