

文章编号:1002-0268 (2008) 09-0188-05

考虑粗集料充填体积率与级配的混凝土配合比设计方法

赵尚传<sup>1</sup>, 杨永顺<sup>2</sup>, 梁奎基<sup>3</sup>

(1. 道路结构与材料交通行业重点实验室 (北京), 交通部公路科学研究院;  
2. 山东省交通厅公路局; 3. 山东省公路建设集团有限公司)

**摘 要:** 分析了粗集料充填体积率对混凝土拌合物工作性、混凝土强度和耐久性能的影响, 提出粗集料的充填体积率在 60%~75% 之间对混凝土的工作性和开裂性能的控制比较合适; 分析了级配对粗集料振实容重和空隙率的影响, 试验结果表明最大公称粒径 19mm 的石灰岩粗集料, 振实容重有 20kg/m<sup>3</sup> 的差异, 空隙率有 0.7% 的差异; 分析了连续级配的粗集料最大粒径对振实容重和空隙率的影响, 最大公称粒径 19mm 和 26.5mm 之间, 振实容重有 60~70kg/m<sup>3</sup> 的差异, 空隙率有 2%~3% 的差异; 对石灰岩粗集料配制的混凝土密度与粗集料充填体积率的相关性进行了试验研究, 相关性好, 拟合得到最大公称粒径 19mm、26.5mm 石灰岩粗集料配制的混凝土密度与粗集料充填体积率之间相关性为 0.83~0.98; 基于现有混凝土配合比设计理论, 提出考虑粗集料充填体积率、最大粒径、级配等特征指标的混凝土配合比计算方法, 实例分析表明利用该方法的计算结果与实测情况非常吻合。

**关键词:** 公路工程; 设计方法; 试验研究; 混凝土性能; 粗集料级配; 充填体积率; 配合比

**中图分类号:** U414                      **文献标识码:** B

1 引言

混凝土是由水泥、拌合水、粗集料、细集料为基本成分的混合物。以往对混凝土配合比设计的方法很多, 在混凝土配合比设计规范中归结为密度法和体积法。这两种方法的不同之处在于密度法为假定混凝土的理论密度, 而体积法则假定混凝土体积为所有组合成分之体积之和。二者理论基础基本相同, 即都是在根据混凝土设计强度等级的基础上, 确定混凝土水灰比、根据工作性确定用水量, 然后确定水泥用量。至于粗集料和细集料的含量, 通过前述的假定, 在经验的基础上选择一个砂率, 进行计算。这种方法经过多年的使用, 证明基本是可行的。但是, 也存在一些缺点: (1) 没有考虑混凝土中粗集料的充填体积率。由于混凝土主要以粗集料

为主体骨架, 粗集料的充填体积率对于混凝土的工作性能、力学性能和抗开裂性能均存在重要影响。(2) 没有考虑粗集料最大粒径和级配对于混凝土密实性的影响。在计算混凝土粗集料用量时, 只计算其质量, 没有考虑粗集料最大粒径和级配范围的影响。(3) 几乎不能根据混凝土的使用环境条件和使用要求来设计混凝土配合比。本文通过对混凝土中粗集料充填体积率和空隙率的试验研究, 在现有配合比设计理论的基础上, 提出了改进的混凝土配合比设计方法。

2 粗集料充填体积率与混凝土性能

试验设计强度等级 C40。水泥砂浆中水、水泥、细集料的比例为: 175:440:670。水泥为 42.5R 普通硅酸盐水泥。减水剂为萘系高效减水剂。细集料细度

表 1 试验用两种粗骨料级配

编号	最大粒径/mm	各粒级骨料含量/%					
		2.36~4.75	4.75~9.5	9.5~16	16~19	19~26.5	26.5~31.5
A	26.5	0	15	20	30	30	5
B	19	7	23	30	35	5	0

收稿日期: 2008-06-11  
作者简介: 赵尚传 (1973-), 男, 山东青岛人, 副研究员, 主要从事水泥混凝土耐久性研究。

模数为 2.6 的河砂。通过调节粗集料和水泥砂浆的比例而达到控制粗骨料含量的目的。选择的粗骨料分最大粒径为 26.5mm 和 19mm 两种。其级配见表 1。

## 2.1 混凝土拌合物工作性能

图 1 和图 2 所示的是 A、B 两组混凝土在不同粗集料含量下的混凝土坍落度情况。

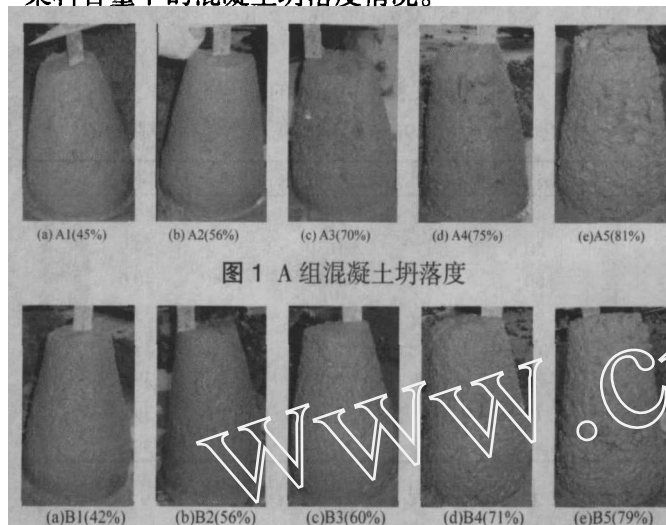


图 1 A 组混凝土坍落度

## 图 2 B 组混凝土坍落度

从照片中可以看出,当骨料含量在 45%~60% 左右时,砂浆占大多数,混凝土粘聚性好,非常容易插捣,几乎感觉不出骨料的阻力,而且容易抹光,保水性能好。骨料在 60%~75% 左右混凝土插捣有较明显的阻力,粘聚性较好,抹光性也较骨料含量小时差,保水性较好。当骨料含量在 75%~80% 左右时,混凝土的插捣变得十分困难,混凝土流动性很差,粘聚性也变差,而且砂浆太少,显得离析,抹光相当困难。

试验中发现,要达到相同的坍落度当粗骨料含量增加时,需要增加减水剂的用量。当骨料含量在 70% 以上时增加减水剂用量对增大坍落度的作用明显减弱。当粗骨料含量在 80% 左右坍落度很小,而且减水剂的增加对坍落度几乎没有影响。

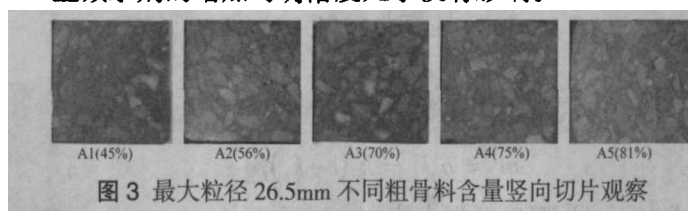


图 3 最大粒径 26.5mm 不同粗骨料含量竖向切片观察

试验对硬化后的混凝土标准抗压试件进行了横向和竖向的切片观察。图 3~图 6 分别为最大粒径 26.5mm 不同骨料含量竖向切片、最大粒径 19mm 不同骨料含量竖向切片、最大粒径 26.5mm 不同骨料含量横向切片及最大粒径 19mm 不同骨料含量横向切片。从照片中可以看出 A1、A2 和 B1、B2 的骨料分布是悬浮于水泥砂浆之中。A3、A4 和 B3、B4 的骨

料则比较密实,骨料间的间距较小,形成骨架结构。A5 和 B5 骨料的密度更大,骨料之间几乎是紧密结合,砂浆填充于骨料之间。

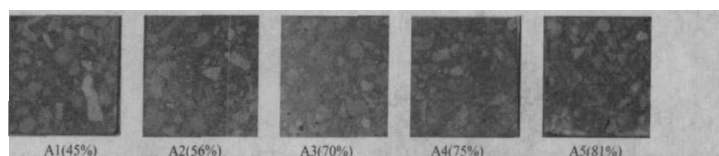


图 4 最大粒径 26.5mm 不同粗骨料含量横向切片观察

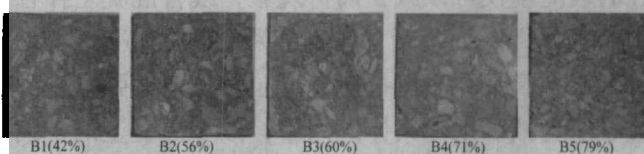


图 5 最大粒径 19mm 不同粗骨料含量竖向切片观察



图 6 最大粒径 19mm 不同粗骨料含量横向切片观察

## 2.2 早期开裂性能

对不同骨料含量的混凝土采用平板法对混凝土塑性裂缝开展进行了试验。图 7 和图 8 分别为粗骨料最大粒径 19mm 和 26.5mm 不同粗骨料体积含量下的裂缝开展情况。A1、A2 和 B1、B2 时,裂缝较少,且多出现在平板边缘,裂缝宽度较小,分叉少。随着粗骨料含量的增加,裂缝宽度增大,且出现在平板的中间,有的几乎贯穿平板,如 A4。裂缝分叉也增多。

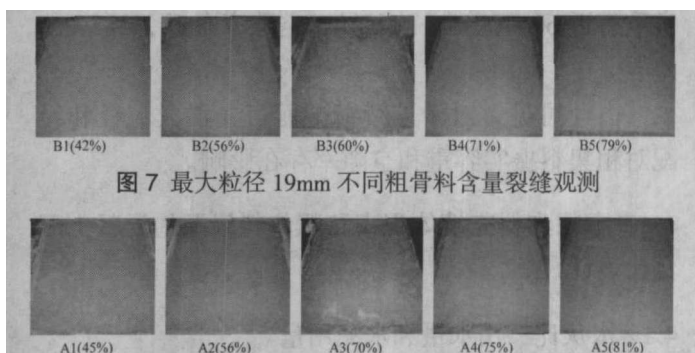


图 7 最大粒径 19mm 不同粗骨料含量裂缝观测



图 8 最大粒径 26.5mm 不同粗骨料含量裂缝观测

随粗集料充填体积率增加,由于混凝土中砂浆含量减少,泌水量小,在早期表面快速失水条件下,内部水分来不及向表面补充,混凝土产生塑性裂缝的趋势明显增大,而且粗集料表面包裹的砂浆量少,较少的砂浆不能有效分散由于干缩而产生的变形量,同时骨料对砂浆局部收缩的约束作用明显,使得砂浆容易开裂,裂缝宽度也较大。但是,由于粗集料的约束,混凝土的总体干缩变形将随体积充填率的增加而降低。

总体看来,混凝土的工作性能与粗集料的充填体积率关系比较密切,粗集料的充填体积率在60%~75%之间对混凝土的工作性和开裂性能的控制比较合适。

### 3 粗集料级配与空隙率

对于占混凝土体积绝大多数的粗集料而言,良好的级配不仅可以减少离析现象,改善混凝土拌合物的工作性,而且增加了粗集料之间的嵌锁能力,有利于提高混凝土的抗压、弯拉及抗剪等强度,并且可适当减少水泥浆体的用量,减小混凝土的干缩量。

对于每一最大公称粒径的粗集料而言,混凝土配制过程中粗集料的各个筛孔控制量为一个范围。只要在这个范围内,集料级配就是可用的。而实际上,对于级配范围内不同级配的粗集料而言,其振实容重和空隙率是有区别的。在现行混凝土配合比设计中,对于粗集料只计算其质量,而不考虑级配和最大粒径的影响。图9是最大粒径为19mm的粗集料的一组级配曲线,该组级配曲线的振实容重和空隙率见表2。

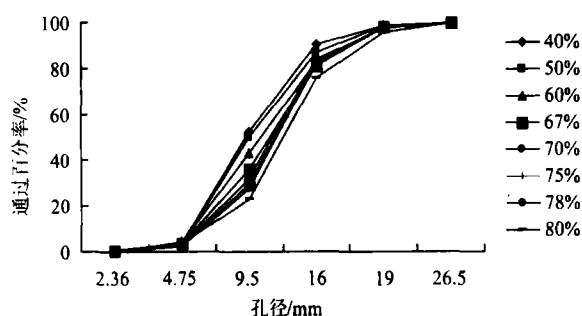


图9 最大粒径19mm的筛分曲线

表2 最大粒径19mm粗集料振实容重和空隙率

单粒级比例/%	振实容重/kg·m <sup>-3</sup>	空隙率/%
40	1624	40.1
50	1630	39.9
60	1630	40.0
67	1642	39.5
70	1644	39.4
75	1643	39.5
78	1643	39.4
80	1634	39.8

由表中数据可见,不同级配曲线之间振实容重有20kg/m<sup>3</sup>的差异,空隙率有0.7%左右的差异。

最大公称粒径26.5mm某级配粗集料的振实容重和空隙率见表3。

对比表2和表3,不同最大粒径的粗集料,振实

表3 最大公称粒径26.5mm粗集料级配及振实容重和空隙率

各粒级骨料含量/%						振实容重/kg·m <sup>-3</sup>	空隙率/%
2.36~4.75	4.75~9.5	9.5~16	16~19	19~26.5	26.5~31.5		
0	15	20	30	30	5	1699	37.8%

容重有近60~70kg/m<sup>3</sup>的差异,空隙率有近2%~3%的差异。

由此可见,对于连续级配而言,最大粒径和级配对粗集料振实容重和空隙率存在影响。

### 4 考虑粗集料充填体积率和粗集料级配的混凝土配合比设计

#### 4.1 水灰比、用水量和水泥用量

根据现行有关混凝土配制技术标准,根据施工配制强度,确定混凝土水灰比(W/C);根据混凝土工作性,确定用水量(W);根据水灰比和用水量,确定水泥用量(C)。

#### 4.2 粗集料用量

粗集料在混凝土中的充填体积率可以表示为

$$k_c = \frac{V_{az}}{V_c} \quad (1)$$

式中,  $V_{az}$  为粗集料的振实后的体积, m<sup>3</sup>;  $V_c$  为混凝土体积, m<sup>3</sup>。

粗集料振实后的空隙率以体积表达式可表示为

$$k_i = \frac{V_{ai}}{V_{az}} \quad (2)$$

式中,  $V_{az}$  为振实后粗集料的空隙体积, m<sup>3</sup>;  $V_{az}$  为粗集料振实后的体积, m<sup>3</sup>。

粗集料体积与混凝土体积之比可以表示为

$$\frac{V_a}{V_c} = \frac{V_{az} - V_{ai}}{V_c} = k_c(1 - k_i) \quad (3)$$

单方混凝土中粗集料的用量为

$$m_a = \rho_a V_a = k_c(1 - k_i)\rho_a \quad (4)$$

式中,  $\rho_a$  为粗集料视密度, kg/m<sup>3</sup>。

#### 4.3 细集料用量

混凝土主要由粗集料和水泥砂浆组成,因此

$$m_c = m_a + m_m \quad (5)$$

式中,  $m_m$  为砂浆质量, kg。

单方混凝土中砂浆的质量

$$m_m = \rho_c - k_c(1 - k_i)\rho_a \quad (6)$$

式中,  $\rho_c$  为混凝土密度,  $\text{kg/m}^3$ 。

图 10 和图 11 是试验得到的不同粗集料最大公称粒径和粗集料充填体积率与混凝土密度的对应关系曲线。

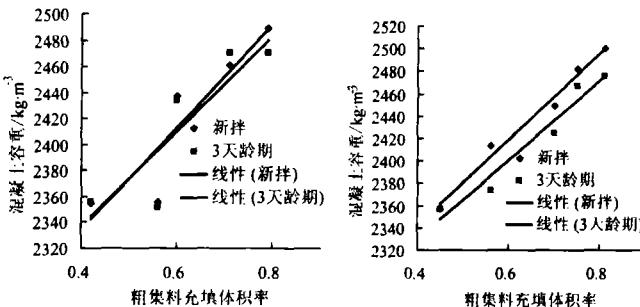


图 10 粗集料最大粒径 19mm 图 11 粗集料最大粒径 26.5mm

可以看出, 无论粗集料最大粒径是 19mm 还是 26.5mm, 粗集料充填体积率与混凝土密度存在良好的线性关系。由于存在水分的蒸发, 新拌混凝土容重大于 3 天龄期混凝土容重。在混凝土配合比设计中, 一般采用新拌混凝土容重。在试验中得到的混凝土容重和石灰岩粗集料充填体积率关系如下:

石灰岩粗集料最大公称粒径 19mm

$$\rho_c = 394.36k_c + 2176.7, R^2 = 0.8361 \tag{7}$$

石灰岩粗集料最大公称粒径 26.5mm

$$\rho_c = 386.39k_c + 2187.5, R^2 = 0.9843 \tag{8}$$

单位体积混凝土中砂的用量为

$$m_s = m_m - m_w \tag{9}$$

5 混凝土配合比计算实例

设计 C40 混凝土, 混凝土中单方水和水泥用量分别为: 175, 440kg。

5.1 《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2000)设计方法

根据《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2000)中相关规定, 选择砂率为 35%, 假定混凝土容重为 2450 $\text{kg/m}^3$ , 则可以计算出粗集料和细集料的用量分别为 1193, 642 $\text{kg/m}^3$ 。

5.2 本文的设计方法

选择两种不同粒径的石灰岩粗集料: 19mm, 26.5mm; 空隙率分别为 39.4%, 37.8%。石灰岩视密度为 2720 $\text{kg/m}^3$ 。在不同的粗集料充填体积率下, 混凝土配合比见表 4。

5.3 结果分析

对于不同粗集料充填体积率、最大粒径和粗集料级配, 混凝土配合比是有区别的。在混凝土配制强度一定的条件下, 当粗集料充填体积率增加时,

表 4 不同粗集料充填体积率的混凝土配合比及容重和砂率

最大粒径 19mm 粗集料					
体积含量/kc	粗集料用量/kg	细集料用量/kg	计算混凝土容重/ $\text{kg} \cdot \text{m}^3$	实测新拌混凝土容重/ $\text{kg} \cdot \text{m}^3$	砂率/%
0.42	744.5	782.8	2342	2355	51
0.56	926.4	656.1	2398	2356	41
0.60	992.6	605.7	2413	2437	38
0.71	1174.6	467.1	2457	2461	28
0.79	1307.0	366.2	2488	2489	22
最大粒径 26.5mm 粗集料					
0.45	764.1	782.3	2361	2357	51
0.56	950.9	638.0	2404	2413	40
0.70	1188.6	454.4	2458	2449	28
0.75	1273.5	383.3	2477	2482	23
0.81	1375.4	310.0	2500	2500	18

粗集料用量增加, 而细集料用量降低; 当粗集料级配比较密实、空隙率小时, 细集料用量少。

利用本文的混凝土配合比计算方法可以反映粗集料充填体积率、最大粒径、级配等特征指标, 计算结果表明与实测情况比较吻合。

按现行混凝土配合比设计规范计算的混凝土各成分含量相当于按本文配合比计算方法在粗集料充填体积率 70% 左右时计算的混凝土各成分含量。

6 结论

(1) 混凝土的工作性能与粗集料的充填体积率关系比较密切, 粗集料的充填体积率在 55%~75% 之间对混凝土的工作性和开裂性能的控制比较合适。

(2) 对于连续级配而言, 最大粒径和级配对粗集料振实容重和空隙率存在影响。最大公称粒径 19mm 的石灰岩粗集料, 振实容重有 20 $\text{kg/m}^3$  的差异, 空隙率有 0.7% 的差异; 最大公称粒径 19mm 和 26.5mm 之间, 振实容重有 60~70 $\text{kg/m}^3$  的差异, 空隙率有 2%~3% 的差异。

(3) 石灰岩粗集料配制的混凝土密度与粗集料充填体积率具有明显的线性关系, 随粗集料充填体积率的增加混凝土密度增大。根据试验结果提出了最大公称粒径 19mm、26.5mm 石灰岩粗集料配制的混凝土密度与粗集料充填体积率之间的相关关系。

(4) 基于现有混凝土配合比设计理论, 提出了考虑粗集料充填体积率、最大粒径、级配等特征指标的混凝土配合比计算方法, 实例分析表明利用该方法的计算结果与实测情况非常吻合。

## 参考文献:

- [1] 吴沙和.粗集料的级配普通混凝土耐久性的影响[J].商品混凝土.2005(1):32-35.
- [2] 王雨利,管学茂,潘启东,等.粗骨料颗粒级配混凝土强度的影响[J].焦作工学院学报(自然科学版),2004,23(3):213-215.

- [3] S.S. Jamkar,C.B.K. Rao. Index of Aggregate Particle Shape and Texture of coarse aggregate as a parameter for concrete mix proportioning[J]. cement and concrete research,2004, 34(12):2021-2027.
- [4] 刘国华,陈斌,曹学有.粗骨料对混凝土性能的影响与定量评价[J].浙江水利科技,2003(6):1-3.

(上接第 187 页)

外加剂 4.95kg, 其市场价格为 1.4 元/kg, 其成本 6.93 元/m<sup>3</sup>。

合计成本为:664.3 元/m<sup>3</sup>。采用普通硅酸盐水泥混凝土修补时, 其每立方米成本为 320 元。与普通混凝土相比, 其单立方成本增加为 344.3 元。

在进行混凝土裂缝修补时, 假定混凝土板厚为 24cm, 裂缝宽为 2cm, 采用聚合物改性自密实混凝土进行修补时, 其单位长度混凝土用量为 0.0048m<sup>3</sup>, 成本为 3.19 元。采用普通混凝土进行修补时, 其单位长度混凝土成本为 6.4 元, 其中还不包含钎钉的价钱。

由于采用本研究成果修补混凝土路面裂缝时, 不需要将原破损面进行切割成规则形状, 不需振捣, 操作工艺更为简单, 其施工操作人工和机械费用大大减少, 相应地施工成本显著下降。因此, 从综合经济成本来看, 利用聚合物改性自密实混凝土进行路面修补时, 综合成本明显低于目前采用的普通混凝土修补成本。

由此我们可以得出: 采用聚合物改性自密实混

凝土进行裂缝修补时, 一方面聚合物的掺入使混凝土材料的脆性减小, 韧性增加, 抗变形能力和容许应力提高。而且粘结强度也大大提高。另一方面, 采用改性自密实混凝土修补裂缝时, 其维修成本明显低于普通混凝土的修补成本。因此, 采用聚合物改性自密实混凝土进行裂缝病害的修补, 就具有了实际应用的可能性。

## 参考文献:

- [1] 李祝龙,梁乃兴,编著.丁苯类聚合物乳液对水泥水化硬化的影响[M].建筑材料学报, 1993.
- [2] 华南理工大学.路面新技术选编[M].1999.
- [3] Todorka Paskova, Christian Meyer. Low-cycle Fatigue of Plain and Fiber- Reinforced Concrete[J]. ACI Materials journal, 1997,
- [4] 索默.高性能混凝土的耐久性[M].北京:科学出版社, 1998.
- [5] 赵国藩,黄承逵.纤维混凝土的研究与应用[M].大连:大连理工大学出版社, 1992.
- [6] 贺子岳,等.国外新型纤维增强混凝土及应用[J].国外建材科技, 1998.
- [7] 吴中伟.纤维增强—水泥基材料的未来[J].混凝土与水泥制品, 1999,(1).