

高性能混凝土配合比设计方法研究综述

贺东青 任志刚
(武汉理工大学)

摘 要: 综述了高性能混凝土配合比设计的基本原则,对国内外典型的高性能混凝土配合比设计方法作了介绍和评述,并提出今后的研究方向。

关键词: 高性能混凝土; 配合比设计; 研究方向

高性能混凝土(High-performance Concrete, 简称为HPC)是一种体积稳定性好、具有高耐久性、高强度与高工作性能的混凝土。HPC一般具有的特点:(1)在新拌阶段具有高工作性,即高流动度、可泵性,或自密实、免振捣的性能。上海金茂大厦、东方明珠电视塔工程施工实现一次泵送C60混凝土达到380 m高度。(2)在水化、硬化早期和服役过程中具有高体积稳定性,即具有高弹模、低收缩、低徐变和低温度应变的特性。(3)在硬化后具有足够的强度和低渗透性满足工程所需的力学性能和耐久性。多数学者认为HPC必须是高强度的,1998年美国西雅图双联广场应用混凝土强度达到C135;也有学者认为,HPC应根据具体的工程要求,允许向中等强度的混凝土(30~40 MPa)适当延伸。日本利用乙醇醚剂氨基醇衍生物,已配出了耐久性达500年的混凝土。显然,高工作性、高体积稳定性、低渗透性和良好的力学性能是HPC从浇注、硬化到正常服役等不同阶段的具体表现,而高耐久性是HPC的最终目标。

从1990年前后HPC产生至今,纵观近十几年来来的研究成果,制备HPC的技术途径基本上是采用在普通混凝土4种基本组分(水、水泥、砂、石)基础上复合超塑化剂(高效减水剂)和活性掺合料的方法。

传统的普通混凝土的配合比,多利用保罗马(Bolomy)混凝土强度公式

$$f_{cu,p} = A \cdot f_{ce}(C/W - B)$$

式中, $f_{cu,p}$ 为混凝土配制强度(MPa); f_{ce} 为水泥的实际抗压强度(MPa); A 、 B 为经验系数; C/W 为灰水比。

计算出灰水比后,再确定用水量、砂率得出配合比。普通混凝土的配合比,以满足强度和工作性能为主,配合比设计相对简单,也比较成熟。而HPC需要

考虑的因素多,如上述强度、耐久性、体积稳定性、工作性以及经济性等;再加上原材料的选择范围宽,相应的组合繁多。因此,其配合比设计较复杂。文中综述了高性能混凝土配合比设计的基本原则,对国内外典型的高性能混凝土配合比设计方法作了介绍和评述,并提出了其今后的研究方向。

1 HPC 配合比设计原则

相比于普通混凝土,HPC的配合比设计显得尤为重要。HPC有比传统混凝土低得多的水胶比(W/C)和总用水量,通常还有高得多的坍落度。而且常常要设计成低渗透性混凝土,如通过限制氯化物渗入来保护钢筋免受侵蚀。当然,强度也是主要的考虑。总之,HPC配合比设计应充分考虑强度和耐久性,以及原材料的性能、水胶比、砂率、用水量等多重因素,遵循综合设计的原则。

1.1 确定配制强度的原则

为满足强度要求,混凝土的试配强度必须高于设计强度。超出值取决于试验的标准方差和变异系数。按照美国ACI过去的试验结果,HPC的标准方差取值范围为3.5~4.8 MPa。试配强度的预估值为 $f'_{cr} = f'_c + 1.34S$ 或 $f = f' + 2.33S - 3.5$ 式中, f'_{cr} 为混凝土试配强度,MPa; f'_c 为混凝土设计强度,MPa; S 为标准方差,MPa。

我国目前对HPC配合比中预期抗压强度的确定,依然沿袭了《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55—2000)中的有关规定

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma$$

式中, $f_{cu,0}$ 为混凝土的配制强度(MPa); $f_{cu,k}$ 为混凝土的设计强度(MPa); σ 为施工单位的混凝土强度标准差(MPa)。

当无可靠的强度统计数据和标准差数值时,混凝土的配制强度应不低于设计强度的 1.15 倍。

1.2 低用水量原则

在满足 HPC 工作性的条件下,应尽量减少用水量,以抑制混凝土的干缩,增加骨料与水泥石界面粘结力及钢筋与混凝土之间的握裹力。

1.3 适宜的水胶比

较高的水泥用量和较低的用水量是制备 HPC 的前提条件。然而水泥用量超过临界值并非一定有利于提高抗压强度,相反,有时还会导致强度降低。 $0.25 \sim 0.40$ 的水胶比是 HPC 通常的取值范围。具体情况要视强度等级,外加剂的减水效率,混凝土坍落度要求等因素而定。需指出的是,当使用液体外加剂时,高效减水剂中的水应考虑在水胶比中。

1.4 适宜的砂率

砂率主要影响混凝土的工作性。HPC 中的粗骨料用量应该比中低强度等级混凝土中多一些。当水胶比不同时,HPC 中的最优砂率也有所不同。一般而言,随着混凝土砂率的增加,强度呈增长的趋势,而弹性模量则呈下降趋势。HPC 的砂率可根据胶凝材料总用量、粗细骨料的颗粒级配及泵送要求等因素来选择。

1.5 高效减水剂和掺合料用量的优化原则

高效减水剂和掺合料掺量的优化原则主要有 2 层含义:一是高效减水剂和掺合料用量优化。HPC 中掺入活性矿物细掺料的主要作用是改善水泥石与骨料的界面结构,提高界面粘结强度。掺入高效减水剂的主要作用是在低水胶比情况下获得高流动性。据文献[6]研究结果:优质粉煤灰和磨细矿渣的需水量比小于 100%,具有明显的减水增强作用;而硅粉虽增强效果更好一些,但其需水量比大于 100%,高达 135% 左右。所以,在掺入不同的掺料时,要考虑它们不同需水量的特性,调整高效减水剂的用量来保证用水量的不变,进而保证水胶比的不变。简言之,配制 HPC 要考虑活性掺合料与高效减水剂优化用量,发挥其“叠加效应”。二是不同掺合料用量优化。在配制 HPC 时,建议掺合料尽量采用“复掺”技术,“复掺”是指在混凝土中掺入 2 种或 2 种以上的细掺料。据文献[8,9]研究结果:“复掺”后混凝土具有良好的工作性能和耐久性能,而且有很好的经济效益。“复掺”利用的化学机理是:粉煤灰的化学活性相对较低,它对混凝土早期强度影响较大,尤其是在掺量较高的情况下,影响更大。为了弥补这一缺陷,加入粉煤灰后再复合活性较高的超细矿渣粉,可提高火山灰效应,增加体系中微粒间的化学交互,诱导激

发,从而提高粉体的化学活性。粉煤灰和矿渣粉复掺后,在混凝土强度上有一定互补,产生单一混合材所不具有的优良效果,发挥其更大的优势。

2 HPC 配合比设计方法

HPC 的组分复杂,影响其性能的因素繁多。尤其是目前对 HPC 的理解尚有差异,所以对 HPC 的配合比设计尚无统一的成熟方法。近年来,国内外学者对 HPC 配合比设计进行了大量的研究,提出了许多方法。

2.1 法国国家路桥试验室(LCPC)的方法

法国路桥中心对高性能混凝土的研究走在世界的前沿,该配比设计方法的主要思想是:在模型材料上进行大量的试验,用胶结料浆体进行流变试验,用砂浆进行力学试验。这样可避免用直接的方法优化 HPC 配比参数时所进行的大量试配工作。LCPC 还开发了 HPC 配合比设计的计算机辅助软件,其思想是:建立若干个数学模型,各自表述某种工作性能和混凝土组成的关系,然后将这些模型组合起来。引入数学模型和计算机大大减少了配合比设计所需要的试验次数且节约了时间。

2.2 美国混凝土协会(ACI)的方法

ACI 211 委员会制定的“使用粉煤灰和硅酸盐水泥的高强混凝土设计指南”,提出了一种掺粉煤灰的高强混凝土(HSC)配合比设计和优化的方法。此方法适用于抗压强度在 41~83 MPa 之间的普通容重非引气混凝土,主要是采用一系列不同胶凝材料比例和用量进行试验,从而得到最佳配合比。

2.3 Mehta P K 和 Aitcin P C 的方法

该方法是在现有 HPC 实践经验的基础上,对主要的配合比设计参数作出一些假设,从而得到试拌用的第一盘配料的配合比。其主要假设有:水泥浆与骨料的体积比为 35~65。用水量根据混凝土强度等级取不同的设定值。假定含气量,再根据用水量和水泥浆体积,算出水泥用量。近似假设水泥与矿物掺合料(粉煤灰、硅灰及矿渣等)的体积比为 75~25,复合双掺时,硅灰与粉煤灰或矿渣的体积各为 10%,15%;粗细骨料体积比设为 60~400;高效减水剂的掺量设为 1%。由于这种方法中有许多假设,所以第一盘配料经计算出的配合比仅能起引导作用,为了获得正确的配合比,尚需进行大量的试验。

2.4 英国的 Domone P L J 等的方法

该方法基于最大密实度理论,主要步骤如下:
(1) 根据混凝土的 28 d 强度与水胶比关系选择混凝土的水胶比;
(2) 选择高效减水剂的掺量;
(3) 利用专

门设计的仪器量测不同砂率下集料颗粒堆积物的空隙含量,找到空隙率最小时的砂率;(4)试验研究集料堆积物的空隙含量与其表面积的综合效应;(5)确定最优砂率。

2 5 保罗米(Bolomy)修正法

对HPC来说,由于活性矿物细掺料和高效减水剂的掺入,保罗米公式不再适用。万朝均在保罗米公式中引入与水胶比 W/B 有关的系数 Y 以及矿物细掺料的活性指数 A ,即

$$f_{cu,p} = A \cdot Y \cdot a_a \cdot f_{ce} [B/W - a_b]$$

$$Y = -0.4952 + 5.514W/B$$

式中, $f_{cu,p}$ 为配制强度(MPa); a_a 、 a_b 为经验系数。

计算用水量 W 时,可采用工作度方程。研究发现,在胶凝材料组成、高效减水剂用量一定时,保证坍落度不变所需的用水量与水胶比有下述直线关系

$$W_0 = k_1 + k_2 \frac{W}{B}$$

式中, k_1 、 k_2 是由胶凝材料组成、高效减水剂用量以及所要求的混凝土工作度决定的常数,可由试验确定。

2 6 全计算法

传统的HPC配合比设计是以经验为基础的半定量设计。陈建奎和王栋民是在建立普遍适用的混凝土体积模型的基础上,经科学推导求得了HPC用水量计算公式和砂率 S_p 计算公式,结合传统的水灰(胶)比定则,提出了HPC配合比设计的全算法。姜德民等采用这种全算法对高性能自密实混凝土进行配合比设计,其结果表明:采用全算法进行HPC配合比设计,材料用量准确,施工性能、强度和耐久性都有足够的保证。全算法使HPC配合比设计从半定量走向定量、从经验走向科学成为了可能。

2 7 其它

HPC配比设计的最终目标是高耐久性。所以,许多学者针对结构不同的服役环境,提出了如下几种HPC配合比设计方法:(1)抗碳化的HPC配合比设计;(2)抗盐害的HPC配合比设计;(3)抗冻融的HPC配合比设计;(4)抗硫酸盐腐蚀的HPC配合比设计。

近年来随着人工神经网络(ANNs)等人工智能技术的发展,混凝土配合比的智能化、优化设计技术也得到了很大发展。陈斌采用Monte-Carlo随机试验法和遗传算法(GA),结合BP神经网络建立混凝土配合比的多目标优化模型。优化目标包括坍落度、强度、成本、水泥用量(放热量)以及用水量(干缩)等。

王继宗等以经济成本为目标建立非线性规划的数学模型,用Matlab语言实现该模型,通过序列二次规划的程序求解,以实现HPC的配合比优化设计。

3 结 语

从上述HPC配合比设计方法研究现状来看,目前大多停留在理论研究和实验室阶段,对配合比设计、应用理论和工程技术还有待系统深入的研究。陈斌、王继宗等针对HPC组分多、生产过程中质量影响因素多的问题,建立有关数学模型,采用计算机语言以实现HPC配合比优化设计。尽管限于现存数据量不足,还存在实用的局限性。但是,计算机化将是HPC配合比设计的一个发展方向。HPC中的掺合料(粉煤灰、磨细矿渣、硅灰等)是工业废渣的二次利用,同时HPC具备高耐久性,以及自密实混凝土的广泛应用,使HPC达到节能又环保的经济效益和社会效益。所以,“绿色”是HPC的发展道路。

参考文献

- [1] 冯乃谦. 高性能混凝土结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004
- [2] Yao Wu, L izongjin. Effects of Slag Upon the Flow ability and Mechanical Properties of High Streng Concrete Sixth CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete American Concrete Institute, Bangkok, Thailand: 1998
- [3] Neville A M. Propertie of Concrete 2nd Edition[M]. New York: John Wiley and Sons, 1973
- [4] Day KW. Quality Control off 55 MPa Concrete for Conllins Project, Melbourne, Australia Concrete International: Design Construcion, 1982, 3(3).
- [5] Cook James E. Research and Application of High Strength Concrete U sing Class C Fly Ash. Concrete International: Design Construction, 1982, 4(7).
- [6] 马保国, 何永佳, 吕林女. 高性能混凝土配合比设计[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(7): 14-17.
- [7] 成国强. 高性能混凝土配合比设计与配制的研究[J]. 混凝土, 1998(3): 29-35
- [8] 王玉璞, 杜守明. 采用复合掺合料配制预拌混凝土的试验研究与应用[J]. 施工技术, 2005
- [9] 胡 凌, 廖晓军. 细矿渣粉和粉煤灰双掺对水泥性能影响的正交试验[J]. 水泥, 2003
- [10] 吴中伟, 廉慧珍. 高性能混凝土[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1999

(下转第43页)

裂缝宽度、采用足够的保护层厚度(当然保护层亦不能太厚,否则构件有效高度减小,受力时将加大裂缝宽度);施工时应控制混凝土的水灰比,加强振捣,保证混凝土的密实性,防止氧气侵入,同时严格控制含氯盐的外加剂用量,沿海地区或其它存在腐蚀性强的空气、地下水地区尤其应慎重。

2 3 防止冻胀裂缝

冬季施工时,采用电气加热法、暖棚法、地下蓄热法、蒸汽加热法养护以及在混凝土拌和水中掺入防冻剂(但氯盐不宜使用),可保证混凝土在低温或负温条件下硬化。

3 结 语

a 总结出桥梁裂缝为:荷载裂缝、温差裂缝、收缩裂缝、地基裂缝、锈蚀裂缝、冻胀裂缝和施工裂缝。

b 提出了提高抗收缩、防锈蚀和防冻胀等几种方法。

参考文献

- [1] 李文波 鹤洞大桥大体积混凝土的温度控制及防裂[J] 桥梁建设, 1999, (3):.
- [2] 钢筋混凝土结构设计规范[S] 北京: 中国建筑工业出版社, 1999
- [3] 安明吉 高性能混凝土自收缩的研究[D] 北京: 清华大学, 1999
- [4] JTJ041—2000, 公路桥涵施工技术规范[M] 北京 人民交通出版社, 2000
- [5] JTJ053—94, 公路工程水泥混凝土试验规程[M] 北京 人民交通出版社, 1994
- [6] 邵容光 结构设计原理[M] 北京人民交通出版社, 1988

收稿日期: 2006-06-15

作者简介: 陈 武, 助理工程师; 广州, 广东晶通公路工程建设集团有限公司(510635).

(上接第 34 页)

- [11] Mehta P K. Advancements in Concrete Technology [J] Concrete International, 1999
- [12] A itcinP C. NevilleA. M. High Performance Concrete Demystified[J] In: Concrete International, 1993
- [13] Dom one P L J, SoutosM N. An Approach to the Proportioning of High-strength Concrete Mixes[J] Concrete International, 1994, (10): 26-31
- [14] 万朝均 高强超高性能混凝土配合比设计经验探讨[J] 混凝土, 2002(3): 41-43
- [15] 王德怀, 陈肇元 高性能混凝土的配合比设计[J] 混凝土, 1996, (3): 4-10
- [16] 陈建奎, 王栋民 高性能混凝土(HPC)配合比设计新法- 全算法[J] 硅酸盐学报, 2000, 28(2): 194-198
- [17] 姜德明, 高振林 高性能自密实混凝土的配合比设计[J] 北方工业大学学报, 2001, 13(3): 89-96
- [18] 陈 斌 混凝土配合比优化及结构早期裂缝防治研究[D] 浙江大学, 2005
- [19] 王继宗, 梁晓颖, 梁宾桥, 等 基于Matlab 语言的高性能混凝土配合比优化设计[J] 工业建筑, 2005, 35(1).

收稿日期: 2006-06-10

作者简介: 贺东青, 硕士研究生; 武汉, 武汉理工大学道路桥梁与结构工程技术研究中心(430070).