

关于混凝土配合比选择方法的讨论

——关于当代混凝土配合比要素的选择和配合比计算方法的建议之二

廉慧珍¹, 李玉琳²

(1. 清华大学 土木水利学院, 北京 100084; 2. 北京中宏盛建设工程质量检测有限责任公司, 北京 100000)

摘要: 当代混凝土配合比选择的内容实际上是水胶比、浆骨比、砂石比和矿物掺和料在胶凝材料中的比例等四要素的确定,以及按照满足施工性要求的前提下紧密堆积的原理的最后计算方法。对于有耐久性要求的混凝土,这四要素的原则都能以混凝土结构耐久性设计给出的《混凝土技术要求》为根据来确定。调整配合比时,应采用等浆体体积法,以保证混凝土的体积稳定性不变。

关键词: 混凝土配合比; 水胶比; 砂石比; 浆骨比; 掺和料; 等浆体体积法

中图分类号: TU528.01 文献标志码: A 文章编号: 1002-3550(2009)05-0001-04

Discussion on method for selecting mix proportion of concrete(II) Proposal on selection of factors and method for calculating mix proportion of current concrete

LIAN Hui-zhen¹, LI Yu-lin²

(1. School of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Zhonghongsheng Construction Quality Checkup Inc., Beijing 100000, China)

Abstract: Choosing the mix proportion of current concrete is to identify the four factors i.e. water to binder ratio, paste to aggregate ratio, sand to coarse aggregate ratio and percent of mineral admixture in cementitious material (binder) as well as the final calculating method according to the principle of close gather by precondition to conform to the requirements of performance for construction. For durability concrete, those four factors could be chosen according to "specification of concrete" given in design documents on durability design of concrete structure. The method of equal paste volume should be used when the mix proportion were be adjusted or altered.

Key words: mix proportion of concrete, water to binder ratio, paste to aggregate ratio, sand to coarse aggregate ratio, method of equal paste volume, mineral admixture; absolute close-gathered volume

0 引言

多年来多数混凝土工作者习惯于根据自己的经验,用最简单的方法计算混凝土配合比。混凝土的制作工艺看似简单,如果只满足强度和拌和物流动性要求,“怎么都能配出来”。但是对单位立方米混凝土各组成材料质量和进行简单化的假定,实际上当原材料组成变化后,按假定的单位立方米质量所计算的混凝土不是“胀方”就是“亏方”;只满足流动性要求的拌和物离析、泌水现象普遍。混凝土本来就是一种从细观到粗观都是高度非均质的多项复杂体系,由于原材料的变化和对混凝土性能要求的提高,现今的混凝土越来越复杂,现行简单化的方法已不再适用,需要进一步科学化。尽管混凝土配合比不能决定混凝土的最终质量,而得到高质量的混凝土配合比毕竟是当前人们所追求的。什么是“高质量”?按 1999 年 ACI 对高性能混凝土的定义,应是“符合特定工程性能组合和匀质性要求的混凝土”^[1]。这个定义当然指的是最终质量,然而,高质量的配合比却是前提。“符合特定工程性能组合”是不言而喻的,匀质性则是很高的要求,不仅拌和物不离析、不泌水,而且硬化后也具有较高的体积稳定性,能较长期地抵抗环境作用引起的劣化,按照传统方法难以做到。任何新的观念和技术的提出,总是会遭到习惯思维的抵抗,只有改变思维方法和

观念,才能使我们“与时俱进”。谁先做到谁领先。

现行当代混凝土的特点是普遍掺入矿物掺和料和高效减水剂。混凝土中水、水泥、砂、石四种原材料中增加了矿物掺和料,因此传统的配合比三要素——水灰比、浆骨比、砂石比,就成为水胶比、浆骨比、砂石比和矿物掺和料用量等四要素。配合比中需要求出的未知数由传统的 4 个变成 5 个。最后由各材料在满足施工要求的前提下紧密堆积的原理,用绝对体积法计算出各材料用量。不考虑外加剂占据混凝土的体积,则各组成材料的关系和性质及其作用和影响可用图 1 来描述。

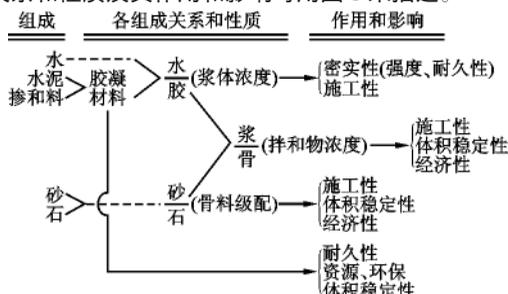


图 1 混凝土各组成材料的关系和性质及其作用和影响

由图 1 可看出,混凝土配合比四要素都影响拌和物与硬化混凝土性能,当决定混凝土强度和密实性的水胶比确定之后,

所有要素都影响拌和物施工性能。施工是保证混凝土质量的最后的和最关键的环节,则考虑浆体浓度的因素、按拌和物的施工性能选择拌和物的砂石比与浆骨比,就是混凝土配合比选择的主要因素。其中浆骨比是保证硬化前后混凝土性能的核心因素。无论是改变水胶比,还是矿物掺和料用量,调整配合比时应使用等浆体体积法,以保持浆骨比不变。

我国混凝土年产量可占到全世界的一半,质量却相对落后。例如,全世界只有我国使用“假定容重法”计算混凝土配合比,也只有我国使用绝干基的砂石生产混凝土,造成我国混凝土质量控制的困难。由于混凝土原材料的波动和使用环境和条件的不确知性与不确定性,并不存在普遍适用的配合比,在本文中所介绍的方法只是一种推荐,相信会有更多方法可以使用,但是原理和原则应当是更科学与更便于质量控制的^[2]。和施工技术一样,“混凝土配合比设计”不适于制订成规范。设计提出的《混凝土性能技术要求》所要求的也只是性能而不是组成(performance based specification)。希望与大家不断为提高混凝土的技术与质量而共同努力,在实践中不断修正已有的知识、观念和方法,不仅在产量上,而且在技术和管理水平上尽快走向先进。相信目前“做不到”的事,只要大家齐心协力,外国人能做到的,我们也都能做得到。

为便于与读者沟通,给出所推荐配合比选择与计算的实例,供参考和讨论。

1 确定混凝土配合比的原则

(1)按具体工程提供的《混凝土技术要求》选择原材料和配合比。

(2)注重骨料级配和粒形,按最大松堆密度法优化级配骨料,但级配后空隙率应不大于42%。

(3)按最小浆骨比(即最小用水量或胶凝材料总量)原则,尽量减小浆骨比,根据混凝土强度等级和最小胶凝材料总量的原则确定浆骨(体积)比,按选定的浆骨比得到1 m³混凝土拌和物浆体体积和骨料体积,计算骨料体积所使用的密度应当是饱和面干状态下所测定的。

(4)按施工性要求选择砂石比,按《混凝土技术要求》中的混凝土目标性能确定矿物掺和料掺量和水胶比。

(5)分别按绝对体积法用浆体体积计算胶凝材料总量和用水量,用骨料体积计算砂、石用量。调整水胶比时,保持浆体体积不变。

(6)根据工程特点和技术要求选择合适的外加剂,用高效减水剂掺量调整拌和物的施工性。

(7)由于水泥接触水时就开始水化,拌和物的实际密实体积略小于各材料密度之和,则当未掺入引气剂时,可不考虑搅拌时掺入约1%的空气。

2 混凝土配合比四要素的选择

2.1 水胶比

对有耐久性要求的混凝土,按照结构设计和施工给出《混凝土技术要求》中的最低强度等级,按保证率95%确定配制强度;以最大水胶比作为初选水胶比,再依次减小0.05~0.1百分点,取3~5个水胶比试配,得出水胶比和强度的直线关系,找出上述配制强度所需要的水胶比,进行再次试配。或按无掺和料的普通混凝土强度-水灰比关系选择一个基准水灰比,掺入粉煤

灰后再按等浆骨比调整水胶比。一般,有耐久性要求的中等强度等级混凝土,掺用粉煤灰超过30%时(包括水泥中已含的混合材料),水胶比宜不超过0.44。

2.2 浆骨(体积)比

在水胶比一定的情况下的用水量或胶凝材料总量,或骨料总体积用量即反映浆骨比。对于泵送混凝土,可按表1选择,或按GB/T 50746—2008《混凝土结构耐久性设计规范》对最小和最大胶凝材料的限定范围,由试配拌和物工作性确定,取尽量小的浆骨比值。水胶比一定时,浆骨比小的,强度会稍低、弹性模量会稍高、体积稳定性好、开裂风险低,反之则相反。

表1 不同等级混凝土最大浆骨比

强度等级	浆体百分率(浆骨体积比)	用水量/(kg/m ³)
C30~C50(不含C50)	≤0.32(1:2)	≤175
C50~C60(含C60)	≤0.35(1:1.86)	≤160
C60以上(不含C60)	≤0.38(1:1.63)	≤145

2.3 砂石比

通常在配合比中的砂石比,以一定浆骨比(或骨料总量)下的砂率表示。对级配良好的石子,砂率的选择以石子松堆空隙率与砂的松堆空隙率乘积为0.16~0.2为宜。一般,泵送混凝土砂率不宜小于36%,并不宜大于45%。为此应充分重视石子的级配,以不同粒径的两级配或三级配后松堆空隙率不大于42%为宜。石子松堆空隙率越小,砂石比可越小。在水胶比和浆骨比一定的条件下,砂石比的变动主要可影响施工性和变形性质,对硬化后的强度也会有所影响(在一定范围内,砂率小的,强度稍低,弹性模量稍大,开裂敏感性较低,拌和物黏聚性稍差,反之则相反)。

2.4 矿物掺和料掺量

矿物掺和料的掺量应视工程性质、环境和施工条件而选择。对于完全处于地下和水下的工程,尤其是大体积混凝土如基础底板、咬合桩或连续浇筑的地下连续墙、海水中的桥梁桩基、海底隧道底板或有表面处理的侧墙以及常年处于干燥环境(相对湿度40%以下)的构件等,当没有立即冻融作用时,矿物掺和料可以用到最大掺量(矿物掺和料占胶凝材料总量的最大掺量粉煤灰为50%,磨细矿渣为75%);一年中环境相对湿度变化较大(冷天处在相对湿度为50%左右、夏季相对湿度70%以上),无化学腐蚀和冻融循环一般环境中,对断面小、保护层厚度小、强度等级低的构件(如厚度只有10~15 cm的楼板),当水胶比较大时(如大于0.5),粉煤灰掺量不宜大于20%,矿渣掺量不宜大于30%(均包括水泥中已含的混合材料)。不同环境下矿物掺和料的掺量选择见GB/T 50746—2008附录B和条文说明附录B。如果采取延长湿养护时间或其他增强钢筋的混凝土保护层实度措施,则可超过以上限制。

3 混凝土配合比选择的步骤

(1)确认混凝土结构设计中《混凝土技术要求》提出的设计目标、条件及各项指标和参数:混凝土结构构件类型、保护层最小厚度、所处环境、设计使用年限、耐久性指标(根据所处环境选择)、最低强度等级、最大水胶比、胶凝材料最小和最大用量、施工季节、混凝土内部最高温度(如果有要求)、骨料最大粒径、拌和物坍落度、1 h坍落度最大损失(如果有)。

(2)根据上述条件选择原材料。

(3)确认原材料条件:

①水泥:品种、密度、标准稠度用水量、已含矿物掺和料品种及含量、水化热、氯离子含量、细度、凝结时间。

②石子:品种、饱和面状态的表现密度、松堆密度、石子最大粒径、级配的比例和级配后的空隙率。

③砂子:筛除5 mm以上颗粒后的细度模数、5 mm以上颗粒含量、饱和面状态的表现密度、自然堆积密度、空隙率、来源。

④矿物掺和料:品种、密度、需水量比、烧失量、细度。

⑤外加剂:品种、浓度(对液体)、其它相关指标(如减水剂的减水率、引气剂的引气量、碱含量、氯离子含量、钾钠含量等)。

(4)混凝土配合比各参数的确定。

①各材料符号:质量:水泥 C ,矿渣 SL ,粉煤灰 F ,砂 S ,石 G ,水 W ,胶凝材料 B ,浆体 P ,骨料 A ,水胶比 W/B ,胶凝材料的组成:水泥占胶凝材料的质量百分比 α_c ,矿渣粉占胶凝材料的质量百分比 α_{SL} ,粉煤灰占胶凝材料的质量百分比 α_F ;密度:水泥 ρ_c ,矿渣 ρ_{SL} ,粉煤灰 ρ_F ,砂 ρ_s ,石 ρ_G ,水 ρ_w ,胶凝材料密度 ρ_B ;体积:水泥 V_c ,矿渣 V_{SL} ,粉煤灰 V_F ,砂 V_s ,石 V_G ,水 V_w ,胶凝材料 V_B ,骨料体积 V_A ,将体体积 V_p ,浆骨(体积)比 V_p/V_A 。

②按《混凝土技术要求》选取最低强度等级,并按保证率大于95%计算配制强度。

③根据环境类别和作用等级、构件特点(例如构件尺寸)、施工季节和水泥品种,确定矿物掺和料掺量,根据矿物掺和料掺量,以《混凝土技术要求》的最大水胶比为限,调整水胶比(即水胶比随矿物掺和料掺量增大而减小)。

④级配骨料,得到最小的骨料松堆空隙率。

⑤根据骨料级配和粒形和《混凝土技术要求》中的混凝土强度等级要求的最小和最大浆骨比,以浆体与骨料绝对密实体积最小浆骨比的原则选定浆骨(体积)比,分别用浆体体积中的水胶比计算用水量和胶凝材料总量,用骨料体积中砂石比计算粗细骨料用量。

(5)混凝土配合比各参数及材料用量的计算。

按表1选定体积浆骨比:

$$V_p/V_A \quad (1)$$

混凝土拌和物总体积为 1 m^3 ,则由式(1)可知 V_A 和 V_p ,按级配骨料所用砂率和砂石表现密度计算砂石用量 S 、 G 。

$$V_p = V_B + V_w \quad (2)$$

参考GB/T 50746—2008条文说明附录B,根据环境条件和构件尺寸确定胶凝材料组成:

$$B = C + F + SL \quad (3)$$

计算各材料占胶凝材料的百分数:

$$\alpha_c, \alpha_F, \alpha_{SL} \quad (4)$$

由式(3)和式(4)以及各自相应的密度,计算胶凝材料的密度:

$$\rho_B = \alpha_c \rho_c + \alpha_F \rho_F + \alpha_{SL} \rho_{SL} \quad (5)$$

按《混凝土技术要求》选取试配用的最大水胶比 $(W/B)_1$,水的密度近似为1,由式(4)、(5)已知胶凝材料密度为 ρ_B ,计算体积水胶比:

$$\frac{V_w}{V_B} = \rho_B (W/B)_1 \quad (6)$$

由式(5)和式(6),计算胶凝材料用量 B 和用水量 W 。

(6)试配和配合比的确定。

在所选用高效减水剂的推荐掺量的基础上,按混凝土的施工性调整为合适的掺量。

在《混凝土技术要求》最大水胶比的基础上,依次减小水胶比,选取3~5个值,计算各材料用量后进行试配,检测所指定性

能指标值,从中选取符合目标值的水胶比,再次进行试配。

根据实测试配结果得出配合比的拌和物密度,对计算密度进行配合比的调整。

4 混凝土配合比选择实例

4.1 技术条件

某滨海城市地下水位为 -2 m ,地下水中硫酸根离子和氯离子含量具有对混凝土结构中中等腐蚀程度,商住楼地下两层,底层车库墙体厚度为 350 mm ,设计使用年限为70年,保护层厚度为 50 mm ,设计强度等级为C40/P8,混凝土浇筑季节最高气温 $33\text{ }^\circ\text{C}$,最低气温 $21\text{ }^\circ\text{C}$ 。要求施工期间每次连续浇筑 100 m^3 ,宽度不大于 0.1 mm 的纵向裂缝不多于3条。混凝土最大水胶比为0.45,最小胶凝材料用量最小 320 kg/m^3 ,最大 450 kg/m^3 ,骨料最大粒径 25 mm 。混凝土坍落度 $180\sim 200\text{ mm}$,到达现场浇筑前坍落度应为 $160\sim 180\text{ mm}$ 。

4.2 技术要点

确认《混凝土技术要求》提供的工程所处环境为V-C级,对处于地下的 350 mm 墙体热天施工来说,应按大体积混凝土考虑,以控制温度应力产生的裂缝为重点。

4.3 原材料选择

水泥:振兴P·O42.5级,已掺入粉煤灰20%,水化热 262 kJ/kg ,密度 3.0 g/cm^3 ,氯离子含量不大于0.6%,标准稠度用水量27%;
粉煤灰:0.045 mm筛筛余量17%,烧失量4.5%,需水量比103%;

粗骨料:5~10 mm和10~25 mm以2:8级配后,表现密度 2.69 g/m^3 ,自然堆积密度 1620 kg/m^3 ,空隙率40%;

细骨料:筛除5 mm以上颗粒的河砂,表现密度 2600 kg/m^3 ,松堆密度 1432 kg/m^3 ,空隙率为45%。

外加剂:略。

4.4 混凝土配合比参数选择

水胶比:按技术要求最大值选用 W/B 为0.44;

砂石比:按最紧密堆积原则,根据石子空隙率,选取砂率为40%,则砂石比为40:60;

浆骨比:选择浆骨比为 $V_p/V_A=0.30$;

粉煤灰掺量:按GB/T 50746—2008《混凝土耐久性设计规范》条文说明附录B,对V-C的环境作用有:

$$\text{下限: } \frac{\alpha_F}{0.25} + \frac{\alpha_{SL}}{0.4} = 1, \text{ 上限: } \frac{\alpha_F}{0.5} + \frac{\alpha_{SL}}{0.8} = 1。$$

因拟掺入膨胀剂,为控制混凝土温升,不宜再掺入矿渣粉;则上述限定中,单掺粉煤灰的掺量限定范围为25%~50%,鉴于P·O42.5水泥中已掺入粉煤灰20%,现选择粉煤灰掺量 $\alpha_F=30\%$ 。

4.5 初步配合比计算

由材料条件知 $V_A = \frac{G}{2.69} + \frac{S}{2.6} = 0.68$,并 $S:G=0.67$,则计算得 $G=1080\text{ kg/m}^3$, $S=724\text{ kg/m}^3$ 。

$$\text{最大}(W/B)_1 = 0.44 \quad (7)$$

$B=C+F$ 则:

$$\rho_B = \alpha_c \rho_c + \alpha_F \rho_F = 0.7 \times 3.0 + 0.3 \times 2.3 = 2.79\text{ g/cm}^3 \quad (8)$$

1 m^3 中 $V_p/V_A=30:70$,则 $V_p=0.32\text{ m}^3$ 。

$$V_B + V_w = V_p = 0.32 \quad (9)$$

$$\frac{V_w}{V_B} = \rho_B (W/B)_1 = 2.79 \times 0.44 = 1.23 \quad (10)$$

由式(3)、(4)得 $W=176\text{ kg/m}^3$, $B=400\text{ kg/m}^3$,由设定的粉煤

灰掺量为 30% ,得知粉煤灰用量为 120 kg/m³。

4.6 初试配合比

初试配合比,见表 2。

表 2 初试配合比

水 (W/B) ₁	P·O 42.5 级水泥	粉煤灰	砂	石	高效减水剂
176	0.44	280	120(30%)	724	1 080
					略

4.7 配合比的计算

按上述步骤另外分别计算出 (W/B)₂=0.42、(W/B)₃=0.40 的配合比,取得 3 组 (W/B)-性能关系,从中优选出生产配合比。

5 改变水胶比时计算混凝土配合比的等浆体体积法举例

按上述步骤另外分别计算出 (W/B)₂=0.42、(W/B)₃=0.40 的配合比,与 (W/B)₁=0.44 一起,共取得 3 组 (W/B)-性能关系,以备优选生产配合比。

改变水胶比后浆体量发生变化,会影响到施工性,应按等浆体体积进行调整如表 3 所示。

调整说明:

(1)水胶比 0.42 时,浆量减小了 9 L,可能影响施工性,如增

表 3 改变水胶比后按等浆体体积进行调整配合比的计算

原材料		胶凝材料(B)	水(W)	浆体数量	W/B	砂	石		
密度/(g/cm ³)		2.7	1	-	-	2.60	2.69		
原配合比	(W/B) ₁	用量/(kg/m ³)	400	176	576	0.44	724	1 080	
		体积/(m ³ /m ³)	0.148	0.176	0.323	-	0.278	0.401	
改变水胶比后的配合比	(W/B) ₂	计算	用量/(kg/m ³)	400	168	568	0.42	-	-
		体积/(m ³ /m ³)	0.148	0.168	0.316	-	-	-	
	调整	用量/(kg/m ³)	409	172	581	0.42	-	-	
		体积/(m ³ /m ³)	0.151	0.172	0.323	-	-	-	
	(W/B) ₃	计算	用量/(kg/m ³)	400	160	560	0.40	-	-
		体积/(m ³ /m ³)	0.148	0.160	0.308	-	-	-	
调整	用量/(kg/m ³)	419	169	578	0.40	-	-		
	体积/(m ³ /m ³)	0.155	0.169	0.324	-	-	-		

表 4 等浆体体积法计算过程举例

原材料		水泥(c)	水(W)	FA(30%)	浆体数量	W/B	砂	石
密度/(g/cm ³)		3.10	1	2.4	-	-	2.61	2.67
原配合比	用量/(kg/m ³)	347	198	0	545	0.57	681	1151
	体积/(m ³ /m ³)	0.112	0.198	0	0.310	-	0.261	0.431
简单等量取代掺入粉煤灰	用量/(kg/m ³)	243	198	104	545	-	-	-
	体积/(m ³ /m ³)	0.078	0.198	0.043	0.319	-	-	-
掺粉煤灰后保持浆骨比计算	用量/(kg/m ³)	243	188	104	545	0.54	681	1151
	体积/(m ³ /m ³)	0.078	0.188	0.043	0.310	-	0.261	0.431
按耐久性要求水胶比为 0.44	用量/(kg/m ³)	243	153	104	500	0.44	-	-
	体积/(m ³ /m ³)	0.078	0.153	0.043	0.274	-	-	-
按保持原浆骨比调整	需增加体积/(m ³ /m ³)	0.010	0.020	0.006	0.036	-	-	-
	用量/(m ³ /m ³)	273	173	118	564	0.44	681	1151
	体积/(m ³ /m ³)	0.088	0.173	0.049	0.310	-	0.261	0.431

计算说明:

实测各原材料密度计算 1 m³ 中原浆体体积 $V_F=V_C+V_W=0.112+0.198=0.310$ m³。

掺入粉煤灰 30%等量取代水泥后,粉煤灰用量为 347×0.3=104 kg,实测粉煤灰密度为 2.4 g/cm³,则浆体体积为 104/2 400=0.043 m³。

加 9 kg 粉煤灰和 4 kg 水,则浆体体积可增加到 311 L,可视为不变;

(2)水胶比 0.40 时,浆量减小了 17 L,如增加 19 kg 粉煤灰和 9 kg 水,则浆体量增加到 320 L,可视为不变;

(3)调整后质量水胶比不变,浆骨体积比不变,则砂石用量可不作调整,施工性不受影响;

(4)如果调整水胶比后浆骨比减小,则拌和物体积会不足,从而影响施工性,可按新调整的水胶比增加浆量(即同时增加水和水泥用量)骨料用量而不改变浆骨比;

(5)尽管浆骨比不变,而浆体浓度可能有变化,可视胶凝材料的需水性,调整减水剂用量。

6 改变矿物掺和料掺量时计算配合比的等浆体体积法举例

如果已有一无掺和料的硅酸盐水泥混凝土的配合比,当掺和料入粉煤灰后,需用等浆体体积法,保持原配比的浆骨比不变,以保持混凝土的体积稳定性。

假定混凝土原配合比如表中所示,掺入粉煤灰 30%,按粉煤灰特性,掺入粉煤灰的混凝土水胶比必须不大于 0.5。计算配合比步骤见表 4。

水泥用量为 347-104=243 kg,实测水泥密度为 3.1 g/cm³,则体积为 243/3 100=0.078 m³。

浆体体积为 0.078+0.043+0.198=0.319 m³。

要保持浆体体积仍为 0.310 m³ 不变,需减水 0.01 m³,用水量从 198 kg/m³ 减为 188 kg/m³,则水胶比应为 188/345=0.54,掺粉煤灰的

表8 混凝土的主要组成材料的粒径范围

组成材料	粗骨料	砂	水泥	粉煤灰	磨细矿渣	硅粉
	/mm	/mm	/μm	/μm	/μm	/μm
粒径范围	5~40	0.16~5	0.5~100	10~150	3~100	0.01~0.5

表9 对混凝土不同组分颗粒的模拟

组成材料	粗骨料	砂	水泥	硅粉
粒径范围/mm	2.5~40	0.25~4	2.5×10 ⁻⁶ ~40×10 ⁻⁶	0.025×10 ⁻⁶ ~4×10 ⁻⁶
孔隙率/%	~21	~21	~21	~21
孔隙连通性/%	~100	~100	~100	~100
连通孔隙的尺寸/mm	0.4	0.04	0.4×10 ⁻⁶	4×10 ⁻⁹

由于尚未建立起宽尺寸颗粒范围颗粒堆积体的计算方法,用表9的结果显然不能分析实际混凝土颗粒堆积体的孔隙率和孔隙连通性,但是上述部分结果,如骨料孔隙率与实际结果基本一致,其他一些结果对混凝土的配合比设计也有借鉴之处。

如考虑不透水混凝土的情况。因水分子的直径是0.4nm,要想使水在孔隙中不流动,假定需要的孔隙尺寸应小于5倍水分子直径(即2nm)的话,那么,要想使混凝土变得不透水,按表9的结果可以推断,加入如硅粉类的超细颗粒材料,将会使混凝土的配制变得更加容易。

当然,只有综合考虑了不同颗粒间的相互作用,不同尺寸范围孔隙间的填充方法,考虑了界面和过渡区,建立起多尺寸范围颗粒堆积体的科学模型和分析方法后,才能真正用于混凝土的配合比设计和孔结构分析。

6 结论

考虑颗粒堆积体系在自重作用下达到密实,用PFC3D软件模拟颗粒堆积体,同时计算其孔隙率,通过所建立的方法近似计算颗粒堆积体孔隙的连通性,在本研究颗粒体系的粒径范围内(最大与最小粒径的比值小于16),计算结果表明:

- (1)球形颗粒在重力作用下堆积体系的孔隙率大约在20%~45%之间。
- (2)符合Fuller粒径分布曲线的颗粒堆积体具有相对低的孔隙率。
- (3)颗粒形状对堆积体系的孔隙率有影响,球形颗粒能够得到孔隙率较低的堆积体。
- (4)模拟颗粒堆积体的孔隙连通性接近100%。

·上接第4页

混凝土水胶比应不大于0.5,并随粉煤灰掺量的增加而降低,现掺量为30%时,按耐久性要求设水胶比为0.44,用水量为347×0.44=153kg。浆体体积为0.173+0.078+0.043=0.274m³,则浆体体积不足。

为保持原浆骨比,需增加浆体0.036m³。按浆体中原比例调整,

表5 掺30%粉煤灰的混凝土配合比计算结果

材料	水泥	水	粉煤灰	浆体总量	水胶比	砂	石	拌和物表观密度
质量/(kg/m ³)	270	173	117	560	0.45	681	1151	2392
体积/(m ³ /m ³)	0.087	0.173	0.049	0.309	0.45	0.261	0.431	1

胶凝材料总用量从347kg/m³增加到387kg/m³,但因用水量减少,故浆体体积不变,即浆骨比保持不变。

无论是经过优选还是经过调整得出的配合比,都必须再经过试拌。

参考文献:

[1] ACI TAC (Technical Activities Committee). Definition on high perfor-

(5)要想使混凝土变得不透水,在混凝土中掺入超细颗粒(纳米量级)材料将更容易实现。

参考文献:

[1] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999.
 [2] ABBAS A. Permeability of mortars and the degree of saturation[R]. L^{re} rencontre Internationale de Toulouse, 1998.
 [3] 刘培生,马晓明.多孔材料检测方法[M].北京:冶金工业出版社,2006.
 [4] VAN BREUGEL K. Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 1991.
 [5] BENTZ D P. Three-dimensional computer simulation of portland cement hydration and microstructure development[J]. Journal of the American Ceramic Society, 1997, 80(1): 3-21.
 [6] 胡静. 水中和水泥基材料水化与结构发展的三维计算机模拟[J]. 国外建材科技, 2004(2): 1-6.
 [7] GUANG Y E. Experimental study and numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials[D]. The Netherlands: Delft University of Technology, 2003: 97-121.
 [8] JOHANSEN V, ANDERSEN P J. Particle packing and concrete properties[C]//Mindess. Materials Science of Concrete II. The American Ceramic Society, Westerville, OH, 1991: 111-148.
 [9] ANDERSEN P J. Control and monitoring of concrete production[D]. Academy of Technical Sciences, The Technical University of Denmark, 1990.
 [10] 王燕民,李竟先, FORSSBERG Eric. 颗粒堆积现象的计算机模拟(英文)[J]. 硅酸盐学报, 2003(2): 169-178.
 [11] FULLER W B, THOMPSON S E. The laws of proportioning concrete[J]. ASCE J. Transport, 1907(59): 67-143.
 [12] TALLBOT A N, RICHART F E. The strength of concrete, its relation to the cement aggregates and water[D]. University of Illinois at Urbana Champaign, 1923.
 [13] 朱宝林,黄新. 连续粒径水泥颗粒在浆体中的堆积密度[J]. 建筑材料学报, 2006(4): 447-452.

作者简介: 顾馨允(1984-),女,在读研究生,建材专业。

单位地址: 清华大学建材所(100084)

联系电话: 010-62779359

增加水(0.036/0.274)×0.153=0.02m³,增加水泥(0.036/0.274)×0.078=0.10m³,增加粉煤灰(0.036/0.274)×0.043=0.006m³。

计算结果:

掺30%粉煤灰的混凝土配合比计算结果见表5。

mance concrete[J]. Concrete International, 1999, 21(2).

[2] 廉慧珍,李玉琳.当前混凝土配合比“设计”存在的问题——关于混凝土配合比选择方法的讨论之一[J].混凝土,2009(3): 1-5.

作者简介: 廉慧珍(1933-),女,教授。

单位地址: 北京清华大学高1楼606(100084)

联系电话: 010-62785836