

再生混凝土配合比设计优化—嵌挤骨架密实法

彭小芹, 黄滔, 王开宇, 王淑萍

(重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400045)

摘要:针对不同类型的再生混凝土集料具有不同材质、表面性能、密实度等特性,采用嵌挤骨架密实法对再生混凝土配合比设计方法进行研究。以再生集料振实堆积密实度、富浆系数、浆集比分别确定再生混凝土的集料用量和胶凝材料用量,进行了 4 种不同的再生集料的混凝土试配实验。结果表明,对于不同类型的再生集料配制再生混凝土时,采用浆集比计算胶凝材料的用量比采用富浆系数计算具有更好的适应性。在该试验条件下,配制 C40 再生混凝土浆集比取 0.49 左右为宜,其坍落度和 28 d 抗压强度分别达到 155 mm 和 52 MPa 以上。

关键词:混凝土集料;再生混凝土;配合比设计;嵌挤骨架;密实法

中图分类号: TU 528 文献标志码: A 文章编号: 1674-4764(2009)03-0124-06

Optimization of Mix Proportion Design of Recycled Concrete: Close Packing Method of Mechanically Interlocked Skeleton

PENG Xiao-qin, HUANG Tao, WANG Kai-yu, WANG Shu-ping

(College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

Abstract: The mix proportion design method of recycled concrete by close packing method of mechanically interlocked skeleton was studied, aiming at the various qualities of materials, surface properties and compact degree of recycled concrete aggregates (RCA) from different kinds. The proportion tests of four different kinds of RCA as the aggregate were carried out with the amount determination of RCA and cementing materials by close packing degree of RCA, and mortar-aggregate ratio respectively. It was found that the amount of cementing materials determined by mortar-aggregate ratio was more appropriate than that by rich-mortar coefficient. In the testing condition, the preferable mortar-aggregate ratio of C40 recycled concrete was near 0.49. And the slumps of the concretes and the 28 d compressive strengths reached at 155 mm and 52 MPa, respectively.

Keyword: concrete aggregates; recycled concrete; proportion design; mechanically interlocked skeleton; close packing method

近年来,我国城市建设和旧城改造产生的垃圾在 1 亿 t 以上^[1],其中废弃混凝土的比例约占 40%^[2],其堆放不仅占用土地而且弱碱性的废渣令土壤“失活”,污染环境。利用废弃混凝土制备再生集料,制备再生混凝土是解决这个问题的一个途径。

国内外对再生混凝土的相关研究表明^[3-5]:废弃

混凝土制备的再生集料(RCA, recycled concrete aggregate)与天然集料相比,具有表观密度低、吸水率大、压碎指标大、表面粗糙度大等特点。目前再生混凝土的配合比设计方法^[6-11]均没有考虑种类不同的再生集料不同表面形貌的影响。

针对再生集料不同种类(来源、龄期、材质等)的

收稿日期:2009-03-05

基金项目:重庆市城乡建设委员会科技项目资助(2007 第 42 号);重庆大学重点实验室对本科生开放创新基金(ZDKF-CQU-2008-17);重庆大学大型仪器设备开放基金项目(2008121515)

作者简介:彭小芹(1956-),女,教授,博士生导师,主要从事建筑材料研究,(E-mail)pxq01@cqu.edu.cn。

特点,对采用嵌挤骨架密实法设计再生混凝土配合比进行了试验研究和讨论。

1 原材料

1.1 胶凝材料

重庆拉法基水泥厂 42.5 R 级普通水泥,重庆珞璜电厂 II 级粉煤灰(FA);其化学成分见表 1。

表 1 胶凝材料化学成分

原材料	SiO ₂ /%	CaO/%	Al ₂ O ₃ /%	Fe ₂ O ₃ /%	MgO/%	SO ₃ /%	Na ₂ O/%	Loss/%
水泥 42.5R	22.02	58.99	6.19	2.65	2.53	2.67	0.70	3.08
粉煤灰	49.50	3.92	27.48	8.64	1.13			1.78

表 2 再生集料和碎石集料基本性能

集料种类	粒级/mm	龄期/年	材质	表观密度/(kg·m ⁻³)	堆积密度/(kg·m ⁻³)	含水率/%	吸水率/%	压碎指标/%
再生集料 A	5~20	40	卵石	2 360	1 327	1.85	6.30	10.2
再生集料 B	5~20	10	石灰石	2 418	1 245	1.85	5.79	13.4
再生集料 C	5~20	10	卵石	2 385	1 230	1.25	6.20	11.9
再生集料 D	5~20			2 447	1 301	4.47	7.77	18.2
天然集料	5~10			2 650	1 580		0.40	
天然集料	10~20			2 650	1 405		0.45	8.9
中砂	细度模数 3.1			2 650	1 530			

1.3 外加剂

重庆市江北特种建材有限公司生产的氨基磺酸盐高效减水剂(AJ),固含量为 35%,推荐掺量为胶凝材料用量的 2%。

2 嵌挤骨架密实法设计再生混凝土配合比

2.1 调整再生集料的级配

根据 GB/T14685-2001 级配试验方法,通过增补碎石集料将再生集料的粒级质量比(D_{10~20}/D_{5~10})调整为 6:4。

2.2 最佳砂率和粉煤灰掺量的确定

1)最佳砂率的确定 砂石集料总重为 10 kg,在容积为 10 L 的标准量筒中分 3 次交替混合后振动台振动 30 s 再测量其体积,砂率在 30%~50%之间取值,每次间隔 5%,并通过公式(1)计算各值相应的相对密实度。

$$\beta = \frac{M/V}{(1-S_f) \frac{M_{A0}}{M_{A0} + M_{N0}} \rho_A + (1-S_f) \frac{M_{N0}}{M_{A0} + M_{N0}} \rho_N + S_f \rho_s} \quad (1)$$

1.2 集料

将 3 种废弃混凝土经颚式破碎机两级破碎后筛分得到 A、B、C3 种再生集料,最大粒径为 20 mm。再生集料 D 是通过用再生集料 A、B、C 配制的再生混凝土测试强度后的废弃试件破碎筛分后得到。碎石集料来自重庆歌乐山,砂来自湖南岳阳。再生集料和碎石集料基本性能见表 2。

式中: β 为相对密实度; M 为砂石质量,kg; V 为混合振动后的砂石体积,m³; M_{A0} 为再生集料质量,kg; M_{N0} 为碎石集料质量,kg; M_{S0} 为中砂质量,kg; ρ_A 为再生集料表观密度,kg·m⁻³; ρ_N 为碎石集料表观密度,kg·m⁻³; ρ_s 为砂表观密度,kg·m⁻³; S_f 为砂率。

根据试验结果,把相对密实度最大值所对应的砂率确定为最佳砂率。

2)最佳粉煤灰掺量的确定 与最佳砂率的确定方法相同,通过砂—粉煤灰的堆积密度试验把相对密实度最大值所对应的粉煤灰掺量确定为最佳掺量。

2.3 RCA 虚拟密实度的确定

再生混凝土集料表面不规整,具有较大的棱角系数,在密实过程中松动效应和附壁效应^[7]更明显。因此在振堆过程中,其最大密实度并不是再生集料能达到的最大值。

虚拟密实度是指给定混合料的每个颗粒相互堆积并保持自己原来形状时可达到的最大堆积密实度^[12],其值可通过公式(2)^[8]计算。

$$\beta' = \frac{1}{1/\beta - 2.5/\ln(\eta)} \quad (2)$$

式中: β' 为虚拟密实度; β 为相对密实度; η 为混合物的基准相对黏度, 振动密实时 η 取值为 2 600^[13]。

2.4 集料用量的确定

$$V_0 = (1 - S_f) \frac{M_A}{M_A + M_N} M_G / \rho_A + (1 - S_f) \frac{M_N}{M_A + M_N} M_G / \rho_N + \frac{S_f M_G}{\rho_s} \quad (3)$$

式中: V_0 为集料虚拟体积; S_f 为砂率; M_A 为再生集料用量, kg; M_N 为碎石集料用量, kg; M_G 为集料用量, kg; ρ_A 为再生集料表观密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_N 为碎石集料表观密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_s 为砂表观密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

在 1 m^3 再生混凝土中, 集料的虚拟密实度 β' 近似等于集料的虚拟体积 V_0 (集料的体积百分率), 通过公式(3)及再生集料与碎石集料的比例、砂率, 可计算出再生集料、碎石集料及砂的用量。

2.5 胶凝材料用量及需水量的确定

普通混凝土密实法配合比设计方法对胶凝材料的确定有两种方法, 即富浆系数法^[14]和浆集比(体积比)法^[15]。

1) 富浆系数法为使再生混凝土具有较好的工作性, 富浆系数在 1.5~1.7 之间取值^[13]。通过集料的虚拟体积可确定胶凝材料浆体和空气的体积, 由于再生集料孔隙率高, 空气体积按 2% 计算。根据 Bolomey 水灰比—混凝土强度相关图^[12] 确定混凝土的水灰比。通过公式(4)和水灰比、富浆系数, 可计算出水、水泥的用量。

$$n(1 - V_0 - 2\%) = C/\rho_c + W_1/\rho_w \quad (4)$$

式中: n 为富浆系数; V_0 为集料虚拟体积; C 为水泥用量, kg; W_1 为用水量, kg; ρ_c 为水泥表观密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; ρ_w 为水表观密度, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。

根据试配混凝土的工作性和抗压强度, 确定出较好的富浆系数。

2) 浆集比法浆集比为 $(V_C + V_{W1} + V_{W2} + V_{FA}) / (V_{MA} + V_{MNS} + V_{MS})$, 其中粉煤灰用量 FA 、再生集料用量 M_A 、碎石集料用量 M_{NS} 、砂用量 M_S 、附加水用量 W_2 及它们的密度、水灰比均为已知量, 根据浆集比的取值即可计算出水泥 C 和水 W_1 的用量。

3 实验与分析

通过对 C40 再生混凝土的配合比设计和试配,

分析对比了胶凝材料用量确定方法的适应性、再生集料附加水的掺入方式以及浆集比—嵌挤骨架密实法与普通混凝土配合比设计方法的比较。

3.1 C40 再生混凝土的试配

采用嵌挤骨架密实法对 C40 再生混凝土配合比进行设计, 粗集料主要采用 4 种再生集料 A、B、C、D。

3.1.1 最佳砂率及粉煤灰掺量确定 采用振动堆积密度测试方法, 计算再生集料 A、B、C、D 在不同砂率(30%~50%)下的相对密实度, 见图 1。

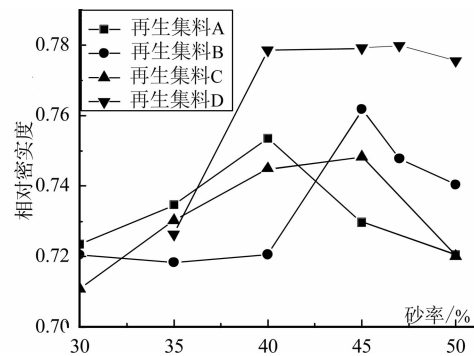


图 1 混合集料的相对密实度

图 1 表明再生集料 A、B、C、D 的最大相对密实度所对应的最佳砂率分别为 40%、45%、45%、47%, 根据实际情况砂率可在 2%~5% 之间浮动。根据同样方法, 确定出粉煤灰的最佳掺量为中砂质量的 10%。

3.1.2 再生混凝土配合比的确定 根据水灰比—混凝土强度相关图^[12] 得到 C40 混凝土的水灰比为 0.42。通过富浆系数(1.5、1.6、1.7)、公式(3)和(4)计算出再生集料 A 试配再生混凝土的配合比, 如表 3 中 A-1、A-2、A-3、A-4 组所示。通过试配混凝土的工作性和抗压强度、水泥用量等得到再生集料 A 配制混凝土的富浆系数, 并计算富浆系数相应配合比所对应的浆集比。采用富浆系数及其浆集比计算再生集料 B、C、D 分别配制再生混凝土的配合比, 如表 3 中 B-1、B-2、C-1、D-1 组所示。

其中 W_1 是按公式(4)计算的用水量, 外掺附加水 W_2 为再生集料达到饱和吸水率时所需水量减去集料的含水量。减水剂 AJ 采用推荐掺量。

A-1、A-2、A-3 组在试配前, 将再生集料 A 在水中浸泡至恒重, 试验时取出并用毛巾擦拭至饱和面干状态。

表3 嵌挤骨架密实法设计再生混凝土配合比

编号	n	m	C/kg	W_1/kg	W_2/kg	M_A/kg	M_{NB}/kg	M_{NS}/kg	M_S/kg	FA/kg	$AJ/\%$
A-1	1.5		375	155		734		315	858	86	2
A-2	1.6		405	165		734		315	858	86	2
A-3	1.7		436	175		734		315	858	86	2
A-4	1.6		405	165	37.0	734		315	858	86	2
B-1	1.6		313	137	65.9	980	84		942	94	2
B-2		0.49	422	174	39.2	980	84		942	94	2
C-1		0.49	403	166	35.0	934	81		900	90	2
D-1		0.49	411	169	32.9	966	71		919	92	2

表中: n 为富浆系数; m 为浆集比; C 为水泥用量,kg; W_1 为用水量,kg; W_2 为附加水用量,kg; M_A 为再生集料用量,kg; M_{NB} 为碎石集料(10~20 mm)用量,kg; M_{NS} 为碎石集料(5~10 mm)用量,kg; M_S 为中砂用量,kg; FA 为粉煤灰用量,kg; AJ 为高效减水剂掺量。

表4 再生混凝土工作性能

编号	抗压强度/MPa			坍落度/mm	90 min 经时 损失/mm	粘聚性
	7 d	28 d	90 d			
A-1	30.4	45.5	46.7	180		较好
A-2	29.9	41.5	44.4	220		好
A-3	28.7	40.7	45.4	225		好
A-4	36.1	56.6	62.4	155		好
B-1	30.2	42.0	47.1	170		较差
B-2	46.6	57.4		190	90	好
C-1	34.6	53.1	60.7	170	85	好
D-1	51.4	60.8		200	100	好

3.2 C40 再生混凝土的力学性能及工作性

A-1、A-2、A-3 组分别为用再生集料 A 按富浆系数为 1.5、1.6、1.7 试配的再生混凝土。表 4 表明随着富浆系数的增加,A-1、A-2、A-3 组的 7 d、28 d 的抗压强度降低,坍落度增大,这是因为当粉煤灰的掺量不变时,富浆系数的增大引起水胶比的增大所致。A-1、A-2、A-3 组 90 d 抗压强度相近且均在 40 MPa 以上,其变化规律需要做更进一步的试验、取更大量的样本数进行研究。

综合考虑 A-1、A-2、A-3 组的抗压强度和工作性,确定后续试验 A-4、B-1 组的富浆系数为 1.6。

A-4 与 A-1、A-2、A-3 组的附加水掺入方式不同,A-4 为试配时将 W_1 和 W_2 一起掺入,而后者在试验时不能很好地控制其表面为饱和面干状态,有可能使得其附加水比 A-4 组多,相当于 A-4 的实际水胶比比 A-1、A-2、A-3 组的更低,因此其 28 d 和 90 d 的抗压强度有很大提高。虽然其坍落度有所降低,但浆体量充足,粘聚性很好。故在试配再生混凝土

时掺入附加水比预先浸泡再生集料能更好地控制用水量。

以富浆系数为 1.6 配制的 B-1 组再生混凝土,其浆体量明显偏少,粘聚性较差,需加入更多的附加水才具有较好的流动性,因此对于再生集料 A 适应的富浆系数 1.6 并不适应于再生集料 B 的胶凝材料用量的确定。

根据 A-4 组的配合比,计算其浆集比为 0.49,对再生集料 B、C、D 以浆集比为 0.49 分别计算 B-2、C-1、D-1 各组的胶凝材料与水的用量,试配时其浆体量充足,粘聚性很好。表 4 表明以浆集比试配的再生混凝土 B-2、C-1、D-1 组具有较好的工作性,且 28 d 强度均达到 50 MPa 以上。这说明对于再生集料 A 适应的浆集比 0.49 也适应于再生集料 B、C、D 用于配制 C40 再生混凝土胶凝材料用量的确定。而 B-1 组的结果表明,富浆系数对于不同种类的再生集料而言,并不存在类似的适应性,若要保证所配的混凝土性能相似,其富浆系数取值应根据再生集料不同种类而变化。这是因为富浆系数确定的胶凝材料用量是基于理论胶凝材料用量计算的倍数,而浆集比确定的胶凝材料用量是基于集料用量计算的,可能在某种程度上综合了不同再生集料表面形貌异性的影响。但再生混凝土坍落度经时损失大的缺点仍然存在。

表5 普通配合比设计方法试配的再生混凝土配合比

编号	C/kg	W_1/kg	W_2/kg	M_A/kg	M_{NB}/kg	M_{NS}/kg	M_S/kg	FA/kg	$AJ/\%$
A-5	383	158	49	973		112	723	86	2
C-2	383	158	38	998	87		723	86	2

表 6 普通配合比设计方法试配的再生混凝土性能

编号	抗压强度/MPa			坍落度/mm	粘聚性
	7d	28d	90d		
A-5	34.5	39.6	56.0	145	较差
C-2	47.6	54.3	64.4	165	较差

3.3 浆集比-嵌挤骨架密实法与普通配合比设计方法试配的再生混凝土的比较

3.3.1 与普通配合比设计方法试配的再生混凝土的性能比较 分别采用再生集料 A、C,以普通混凝土配合比设计方法试配的 C40 再生混凝土的配合比见表 5,其力学性能和工作性见表 6。

如表 6 所示, C-2 组抗压强度高于表 4 中 C-1 组的强度, A-5 组的强度低于 A-4 的强度。但由于再生集料表面形貌不规则度高于碎石集料,采用普通配合比设计方法试配再生混凝土时,其砂率明显偏低,虽然流动性相近,粘聚性却较差。

3.3.2 与普通配合比设计方法试配的再生混凝土的微观分析比较 对龄期为 28 d 的再生混凝土 A-4、A-5 组试件进行 SEM 微观分析,分别见图 2(a)、(b)。

在图 2(a)中部和(b)中上部均发现再生集料和浆体之间存在一条明显的微裂纹,其成因是:1)由于再生集料和水泥浆体弹性模量、热膨胀系数的差异,当温度、湿度变化时,两者形变不一致;2)再生集料吸水率较大,水泥浆体中的水分向其迁移并在其表面形成一层水膜。在图 2(b)右上部的水泥浆体中还可可见微小的放射状干缩微裂纹,可能是由集料的限制收缩产生的。这是由于普通配合比设计方法试配的再生混凝土再生集料用量较大、砂率偏低、水泥砂浆较少;加上再生集料表面棱角系数大、吸水率大,从而使水泥砂浆干缩产生放射状微裂纹。在图 2(a)水泥砂浆中未发现干缩微裂纹的存在,说明嵌挤骨架密实法配制的再生混凝土的微观结构较好。

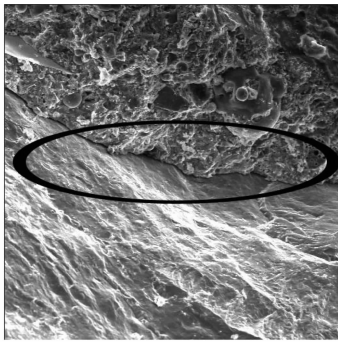
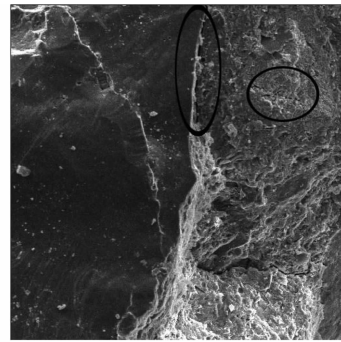
(a) 浆集比设计再生混凝土($\times 300$)(b) 常用配合比设计再生混凝土($\times 300$)

图 2 不同配合比设计的再生混凝土 SEM 图

3.4 再生混凝土的表观密度及配合比调整

嵌挤骨架密实法试配的再生混凝土 A-4、B-2、C-1、D-1 组的设计表观密度和龄期为 28 d 试件的实际表观密度见表 7。

表 7 再生混凝土的表观密度

编号	设计表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	实际表观密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
A-4	2 600	2 371.4
B-2	2 735	2 397.5
C-1	2 609	2 401.6
D-1	2 661	2 436.7

表 7 表明采用嵌挤骨架密实法试配再生混凝土的设计表观密度均在 $2\ 600\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 以上,而再生混凝土的实际表观密度均低于设计值。因此,再生混凝土的配合比需根据试配后的实际表观密度进行相

应的调整。如试配的 C40 再生混凝土 B-2 的实际表观密度为 $2\ 397.5\ \text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,则根据实际表观密度调整后的各材料用量为: $C=370\ \text{kg}$ 、 $W_1=153\ \text{kg}$ 、 $W_2=34.4\ \text{kg}$ 、 $M_A=859\ \text{kg}$ 、 $M_{NB}=74\ \text{kg}$ 、 $M_S=826\ \text{kg}$ 、 $FA=82.6\ \text{kg}$ 。

4 结 论

1)采用嵌挤骨架密实法试配再生混凝土,适合于不同种类的再生集料,其试配步骤为:调整再生集料级配、砂率的确定、计算虚拟密实度、确定集料和胶凝材料的用量、根据再生混凝土实际表观密度调整其配合比。

2)对于不同种类的再生集料配制再生混凝土时,采用浆集比计算胶凝材料的用量比采用富浆系数计算具有更好的适应性。配制 C40 再生混凝土

时,浆集比取 0.49 左右为宜。

3)采用嵌挤骨架密实法试配的 C40 再生混凝土,与普通配合比设计方法试配的相比,具有较好的粘聚性。其坍落度达到 155 mm 以上、28 d 抗压强度高于 52 MPa。

参考文献:

- [1] 周宏敏,柴俊,柴华,等.再生骨料混凝土技术及其研究现状[J].混凝土,2008(12):75-76.
ZHOU HONG-MIN, CHAI JUN, CHAI HUA, et al. Introduction of recycled aggregate concrete technology and current research situation [J]. Concrete, 2008 (12):75-76.
- [2] NIK D, OIKONOMOU. Recycled concrete aggregate[J]. Cement & Concrete Composites, 2005, 27:315-318.
- [3] 张虹,熊学忠.废弃混凝土再生骨料的特性研究[J].武汉理工大学学报,2006,28(3):64-66.
ZHANG HONG, XIONG XUE-ZHONG. Properties of recycled aggregate made by scrap concrete debris[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2006, 28 (3):64-66.
- [4] I LKER B T, SELIM S. Properties of concretes produced with waste concrete aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1307-1312.
- [5] LTKER S. Using waste concrete as aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 1995, 25(7):1385-1390.
- [6] 马立国.再生混凝土的应用和配合比设计研究进展[J].建筑节能,2008,36(11):35-37.
MA LI-GUO. Development of research on application and mix design of recycled concrete[J]. Construction Conserves Energy, 2008, 36(11):35-37.
- [7] JURIC B, HANZIC L, ILIC R, et al. Utilization of municipal solid waste bottom ash and recycled aggregate in concrete [J]. Waste Management, 2006, 26:1436-1442.
- [8] TU TSUNG-YUEH, CHEN YUEN-YUEN, HWANG CHAO-LUNG. Properties of HPC with recycled aggregates [J]. Cement and Concrete Research, 2006, 36: 943-950.
- [9] SALOMON M L, PAULO H. Durability of recycled aggregates concrete; a safe way to sustainable development [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:1975-1980.
- [10] ROUMIANA Z, FRANCOIS B B, ERIC W. Frost resistance of recycled aggregate concrete [J]. Cement and Concrete Research, 2004,34: 1927-1932.
- [11] GOKCE A, NAGATAKI S, SAEKI T, et al. Freezing and thawing resistance of air-entrained concrete incorporating recycled coarse aggregate [J]. Cement and Concrete Research, 2004, 34:799-806.
- [12] 弗朗索瓦·德拉拉尔.混凝土混合料的配合[M].廖欣,叶枝荣,李奇令,译.北京:化学工业出版社,2004.
- [13] 吴中伟,廉慧珍.高性能混凝土[M].北京:中国铁道出版社,1999:148-149.
- [14] 千鹤茂,张萍,单咏,等.紧密堆积混凝土配合比模型及其技术路线[J].混凝土,2008(7):117-119.
QIAN HE-MAO, ZHANG PING, SHAN YONG, et al. Mix proportion model of the close-packing concrete and the executive method of technology [J]. Concrete, 2008(7):117-119.
- [15] 刘广同,张宝生,袁杰,等.基于最佳浆骨比的混凝土配合比设计方法研究[J].混凝土,2003(7):32-34.
LIU GUANG-TONG, ZHANG BAO-SHENG, YUAN JIE, et al. Discussion of mix proportion design method based on the optimum paste-aggregate ratio [J]. Concrete, 2003(7):32-34.

(编辑 陈蓉)