

水泥生料组分混凝土设计理论及试验研究

王立久*, 郑芳宇, 迟耀辉

(大连理工大学 土木水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 以混凝土材料的可循环利用为目标,提出了全新的水泥生料组分混凝土的概念,并研究了水泥生料组分混凝土的配合比设计方法——在配合比设计中引入硅砂率和钙砂率的概念,将混凝土的配合比设计与水泥生产的三率值联系起来,使混凝土的化学成分与水泥生料相同,进而在废弃后可直接作为水泥生料,无需或只需添加少量校正原料. 试验表明: 相同配比的水泥生料组分混凝土,除流动劣于普通河砂混凝土外,其他力学性能均优于河砂混凝土;废弃后的水泥生料组分混凝土氧化物成分与设计水泥生料基本一致. 水泥生料组分混凝土概念的提出解决了废弃混凝土的再生回收利用率低、造价高的问题,同时避免了水泥生产中对天然矿物的过度开采和空气污染问题.

关键词: 水泥生料组分混凝土; 配合比设计; 硅砂率; 钙砂率
中图分类号: TQ172.44 **文献标识码:** A

0 引言

水泥和混凝土作为传统的建筑材料,在人类社会存在已有上百年的时间,它们为人类的发展做出了巨大的贡献,加速了人类社会的文明进程. 另一方面,水泥和混凝土的生产对自然资源和环境造成了严重的破坏,且随着世界范围城市化进程的加快,对原有建筑物的拆除、改造又产生大量建筑垃圾,对环境造成了二次污染,可见传统水泥混凝土材料的资源高消耗、环境大污染的生产方式已不满足 21 世纪可持续发展的要求. 对废弃混凝土进行回收利用,实现水泥混凝土材料的循环利用是实现建筑行业可持续发展的关键.

在废弃混凝土的再生利用方面,国外起步较早,二战后一些欧洲国家在重建家园时,就将战时破坏的房屋废弃物应用到新居的建设中,是最早的混凝土再生利用实例. 随后 Buck^[1]、Hansen 等^[2]、Ravindrarajrh^[3]和 Tavakoli 等^[4]分别对再生混凝土的强度与灰比和龄期的关系、再生骨料强度与原生混凝土强度的关系、再生混凝土强度与弹性模量的关系和再生混凝土的配合比设计等作了详细的研究;我国对废弃混凝土的再生

利用研究开始于 20 世纪末,邢振贤^[5]、邢风^[6]、杜婷^[7]等在再生混凝土的设计和利用方面作出了贡献. 在此期间,刘顺妮^[8]和张大利等^[9]还进行了以混凝土碎屑作为部分生料生产水泥的研究,以期实现水泥混凝土的封闭循环利用.

本研究的目的在于使混凝土在设计之初就满足水泥生料的要求,使其在废弃后可直接作为水泥生料使用,不需或只需填加少量的校正原料. 水泥生料组分混凝土将与再生骨料一起构成水泥混凝土材料的全封闭循环利用体系.

1 水泥生料组分混凝土和混凝土水泥的概念

本文所述水泥生料组分混凝土是以水泥为胶凝材料,以石灰石为粗骨料,以天然砂和石灰石质人工砂为细骨料,按照水泥生料的氧化物比例进行配合比设计的混凝土,因其主要氧化物与水泥生料组分相同,因而称其为水泥生料组分混凝土. 其主要特征在于混凝土中的主要氧化物 CaO 和 SiO₂ 含量比例符合水泥生料要求,在混凝土废弃后不需或只需添加少量校正原料即可作为水泥生料使用.

收稿日期: 2006-08-15; 修回日期: 2007-01-19.
作者简介: 王立久* (1945-), 男, 教授, 博士生导师.
©1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

将以废弃水泥生料组分混凝土做生料生产的水泥称之为混凝土水泥。

2 水泥生料组分混凝土设计理论

当前的混凝土设计理论基于混凝土强度、工作性能和耐久性等性能的组分配比研究,因而废弃混凝土的再生利用就显得非常受限制。将水泥生产的各率值引入混凝土的设计之中,使混凝土的氧化物组成符合水泥生料的氧化物组成要求,是水泥生料组分混凝土配合比设计的指导思想。以此设计理论配制的混凝土不仅满足混凝土工作性和耐久性要求,而且在废弃后可以磨细作为水泥生料烧制水泥。水泥生料组分混凝土设计理论将混凝土的配合比设计和水泥生料的配料设计合二为一。

2.1 水泥生料组分混凝土设计原理

水泥熟料是一种多矿物集合体,各矿物又是由 4 种主要氧化物化合而成,故常用表示各氧化物之间相对含量的率值来作为生产控制的指标。目前我国水泥生产的主要参数为石灰饱和系数 (K_H)、硅率 (n) 和铝率 (p) 三率值。

普通混凝土是一种人造多相复合材料。混凝土配合比设计中,既要满足新拌混凝土的工作性,又要满足混凝土的长期性能。在混凝土原材料一定的条件下,单位用水量 (W)、水灰比 (W/C) 和砂率 (S_p) 是混凝土配合比设计的 3 个基本参数。

将混凝土配合比设计的三参数与水泥生产三率值建立起联系是水泥生料组分混凝土配合比设计的关键问题。

硅酸盐水泥熟料主要由氧化钙 (CaO)、氧化硅 (SiO_2)、氧化铝 (Al_2O_3) 和氧化铁 (Fe_2O_3) 4 种氧化物组成,通常前 2 种氧化物的含量占 80% ~ 90%,在水泥生产中 CaO 主要由石灰质原料提供,而黏土质原料提供 SiO_2 和 Al_2O_3 ,也提供部分的 Fe_2O_3 。当石灰质原料和黏土质原料配合所得生料成分不能满足配料方案时,则通过掺加相应的校正原料来满足。

废弃混凝土的主要组分为水泥石、河砂和石子。韩国的一项专利技术表明:“将废弃混凝土中的水泥与石子、钢筋等分离开来,然后在 700℃ 的高温下对水泥进行加热处理,并添加特殊的物质,就能生产出再生水泥”^[10],由此可见,水泥石是配料完全的独立水泥生料。因而混凝土的设计与水泥生产三率值关系的建立,主要是寻找混凝土

骨料氧化物成分和水泥生产三率值的关系。当前混凝土生产中细骨料主要是天然河砂,主要成分为 SiO_2 ; 粗骨料主要是石灰石质碎石,主要成分为 $CaCO_3$ 。粗细骨料氧化物成分恰好与水泥生料的主要氧化物要求相符合,因而可以确定:通过理论分析和定量计算可以建立起水泥生产三率值与混凝土骨料氧化物成分之间的关系。

2.2 水泥生料组分混凝土砂率研究

砂作为细骨料在混凝土中的作用是填满石子空隙,同时保证骨料间有一定厚度的砂浆层以便减少粗骨料的滑动阻力。砂率的确定原则是在保证混凝土拌合物具有粘聚性和流动性的前提下,使水泥浆用量最省。砂率会根据水泥用量、水灰比、单位用水量、含气量及集料的颗粒形状等参数的不同而相应变化。

2.2.1 总砂率 (S_p) 的选择 混凝土配合比设计中最佳砂率的确定采用试配法^[11]: 首先依据《普通混凝土配合比设计规程》中推荐的“混凝土砂率选用表”来选定基准砂率,再通过试配确定最佳砂率。本配合比设计中,沿用试配法来确定混凝土的最佳总砂率 S_p 。

2.2.2 硅砂率 (S_{p-SO_2}) 的计算 在混凝土施工中,砂率的选取以水灰比和粗骨料最大粒径为指标来确定。但是在本原理设计中,因为要满足水泥生料的氧化物组成要求,必须要对传统的混凝土细骨料组成做出调整。

根据金德率值理论^[12],暂不考虑 SO_3 等影响,且铝率大于 0.64 时,水泥三率值公式为

$$K_H = \frac{m(CaO) - [(1.65m(Al_2O_3) + 0.35m(Fe_2O_3))]}{2.8n(SiO_2)} \tag{1}$$

$$n = \frac{m(SiO_2)}{m(Al_2O_3) + m(Fe_2O_3)} \tag{2}$$

$$p = \frac{m(Al_2O_3)}{m(Fe_2O_3)} \tag{3}$$

熟料三率值确定后,熟料中 4 种氧化物的含量即被确定,即可根据原料进行生料的配料计算。配料计算的依据是物料平衡:反应物的量应等于生成物的量。因而由式 (1)、(2) 和 (3) 可推导出灼烧水泥生料中

$$\frac{m(CaO)}{m(SiO_2)} = \frac{2.8nK_H(p+1) + 1.65(p+1) - 1.30}{n(p+1)} \tag{4}$$

在混凝土配合比设计中,砂率公式

$$S_p = \frac{m(S)}{m(S) + m(G)} \tag{5}$$

其中 $m(S)$ 为细骨料质量 (kg), $m(G)$ 为粗骨料质量 (kg).

其中砂的主要成分 SiO_2 在高温下成分恒定, 没有物质分解挥发, 因而其在作为生料烧制成熟料的过程中保持质量守恒; 而石灰质粗骨料将发生 $CaCO_3$ 分解反应, 释放出 CO_2 , 质量不守恒. 为了利用式 (4) 来限制水泥生料组分混凝土中 $m(CaO)/m(SiO_2)$, 同时便于水泥生、熟料之间质量守恒关系的建立, 将砂率式 (5) 以氧化物质量形式表示为

$$S_p = \frac{m(SiO_2)}{m(SiO_2) + m(CaO)/0.56} \tag{6}$$

天然细骨料中 SiO_2 成分不是 100%, 粗骨料中也不完全是 $CaCO_3$, 因而, 增加氧化物含量保证系数 A, B , 其中 A 为石灰石中 $CaCO_3$ 含量的倒数, $A > 1$; B 为天然砂中 SiO_2 含量的倒数, $B > 1$, 取值由粗、细骨料氧化物含量实验获得. 则式 (6) 变为

$$S_p = \frac{B \cdot m(SiO_2)}{B \cdot m(SiO_2) + A \cdot m(CaO)/0.56} \tag{7}$$

式 (7) 表示的砂率公式体现了混凝土骨料中的 $m(CaO)/m(SiO_2)$. 当 $A = 1, B = 1$ 时, 式 (7) 表示的 $m(CaO)/m(SiO_2)$ 则可宏观表现为混凝土中粗细骨料的比例.

联合式 (4) 和式 (7) 可得

$$S_p = \frac{1}{1 + \frac{A}{B} \frac{5nKH(p+1) + 2.95(p+1) - 2.32}{n(p+1)}} \tag{8}$$

式中三率值限制了水泥生产中的生料及熟料中 4 种氧化物之间的含量比例, 因而该式表示的砂率是满足水泥生料及熟料中氧化物组分要求的混凝土砂率. 天然砂的主要成分是 SiO_2 , 因而将其定义为硅砂率, 以符号 S_{p-SiO_2} 表示, 则 S_{p-SiO_2} 的计算式为

$$S_{p-SiO_2} = \frac{1}{1 + \frac{A}{B} \frac{5nKH(p+1) + 2.95(p+1) - 2.32}{n(p+1)}} \tag{8}$$

在实际生产中, 硅酸盐水泥熟料配料方案的率值取值范围大致为 $K_H = 0.85 \sim 0.97, n = 1.5 \sim 2.8, p = 1.0 \sim 1.9$ [13].

天然砂中 SiO_2 含量为 89% ~ 99.43%, 石灰石中 $CaCO_3$ 含量为 86% ~ 98% [14 15]. 即保证系数 A 的取值范围为 1.0 ~ 1.1, 保证系数 B 的取值范围为 1.02 ~ 1.16. 将三率值及保证系数代入式 (8), 可算得 S_{p-SiO_2} 范围为 0.12 ~ 0.16, 这样的

砂率不能满足混凝土工作性要求, 因而必须采用其他种类的砂来补充理论计算得到的硅砂率 S_{p-SiO_2} 和满足工作性要求的混凝土总砂率 S_p 的差异.

2.2.3 钙砂率的计算 式 (8) 确定了混凝土中 $m(CaO)/m(SiO_2)$, 即确定了混凝土骨料中硅质骨料与钙质骨料的含量. 因而在骨料的调整中, 只能在确定比例的钙、硅骨料中调整粗、细骨料的分配: 所有的硅质骨料作为细骨料仍然不能满足混凝土工作性的要求, 因而必须将部分石灰石质粗骨料转换成细骨料, 以满足混凝土工作性的要求, 而不改变混凝土中氧化物成分的比例关系. 确定石灰石质人工砂作为混凝土细骨料的另一组分, 因其成分主要为 CaO , 故将其率值称为钙砂率, 以符号 S_{p-CaO} 表示, 则钙砂率计算公式为

$$S_{p-CaO} = S_p - S_{p-SiO_2} \tag{9}$$

由此确定: 水泥生料组分混凝土由水、水泥、硅砂 (天然砂)、钙砂 (石灰石质人工砂) 和石灰石质粗骨料五部分组成. 其中硅砂和钙砂共同构成混合砂来完成混凝土配制过程中的粘聚性和流动性职能. 当水泥生料组分混凝土被废弃后作为水泥生料时, 水泥石可以看做是单独的配料完全的生料; 硅砂、钙砂和石灰石质粗骨料是在混凝土配合比计算过程中已经按照水泥生产三率值和质量守恒定律进行配料计算的水泥生料, 其中硅砂是作为水泥生产中的硅质原料, 钙砂和石灰石质粗骨料共同作为水泥生产中的钙质原料.

3 水泥生料组分混凝土力学性能试验研究

3.1 试验原料

大连小野田 P II 42.5R 和 P I 52.5R 普通硅酸盐水泥, $d_c = 3.2 \text{ g/cm}^3$; 天然砂为河砂, $d_{s-O_2} = 2.65 \text{ g/cm}^3, M_x = 2.72$; 石子为石灰石质碎石, $d_s = 2.70 \text{ g/cm}^3, D_m = 20 \text{ mm}$; 人工砂由石灰石场废弃石粉经筛洗得到, $d_{c-aO} = 2.71 \text{ g/cm}^3, d'_{os-CaO} = 1.47 \text{ g/cm}^3, M_x = 3.35$; 自来水.

3.2 混凝土主要性能试验结果及分析

本试验的目的在于探索按照水泥生料组分混凝土设计方法设计的混凝土与普通天然河砂混凝土的区别, 因而相同等级采用了相似的配合比, 配合比按照 JGJ 55—2000《普通混凝土配合比设计规程》设计.

设计水泥率值 $K_H = 0.95$ $n = 2.1$ $p = 1.3$. 3. 2. 1 混凝土工作性试验结果及分析 混凝土
为了简化混凝土的设计,将保证系数取值定 配合比及流动性试验结果如表 1所示.
为 $A = 1, B = 1$.

表 1 混凝土配合比及流动性试验结果
Tab. 1 Mix proportions and slump results of concrete

试件编号	水泥品种	配合比 /(kg· m ⁻³)					S_{p-SO_2} /%	S_{p-CaO} /%	S_L /mm
		W	C	s-SiO ₂	s-CaO	G			
P-30	42. 5	205	380	661	0	1 125	37	0	90
C-30	42. 5	205	380	286	375	1 125	16	21	70
P-40	52. 5	205	402	637	0	1 131	36	0	70
C-40	52. 5	205	402	283	354	1 131	16	20	55
P-50	52. 5	215	500	580	0	1 078	35	0	60
C-50	52. 5	215	500	265	315	1 078	16	19	50

注: 其中 P代表普通天然河砂混凝土, C代表水泥生料组分混凝土,后面数字代表混凝土的设计等级

试验结果表明: 相同配合比条件下,水泥生料组分混凝土的坍落度都低于普通河砂混凝土,降低幅度不等,范围在 10~ 20 mm. 这主要是由于普通混凝土中的部分河砂被人工砂所代替,人工砂中含有少量石粉,石粉具有较强的保水性能,同时石灰石质人工砂的吸水性也稍高于普通河砂,因而降低了混凝土拌合物的实际水灰比;另外人工砂表面粗糙,有尖锐棱角,增加了相对运动阻力,从而影响了混凝土拌和物的流动性. 本试验中,水泥生料组分混凝土的流动性劣于普通河砂混凝土,但 70 55和 50 mm的坍落度可以满足通常建筑物的施工要求.

3. 2. 2 混凝土力学性能试验结果及分析 混凝土力学性能试验结果如表 2所示.

表 2 混凝土力学性能试验结果
Tab. 2 Results of concrete mechanical properties

试件编号	f_{cu} /MPa				f_t /MPa		f_e /MPa	
	3 d	7 d	28 d	180 d	28 d	180 d	28 d	180 d
P-30	20. 0	24. 7	34. 2	40. 7	5. 83	6. 71	3. 00	3. 30
C-30	27. 6	30. 5	42. 3	44. 9	6. 75	7. 23	3. 20	3. 75
P-40	25. 7	34. 7	45. 1	47. 8	6. 48	6. 78	3. 06	3. 58
C-40	28. 9	35. 6	45. 3	49. 0	7. 65	8. 20	3. 52	4. 01
P-50	32. 5	40. 6	48. 3	50. 6	6. 32	6. 95	3. 80	4. 15
C-50	39. 0	43. 3	49. 6	52. 5	7. 45	8. 30	4. 06	5. 06

(1) 抗压强度分析
水泥生料组分混凝土的抗压强度随养护龄期的增长而提高,且发展规律与普通河砂混凝土一致. 相同配比条件下,C30水泥生料组分混凝土的抗压强度明显高于普通河砂混凝土,3 7 28 d的抗压强度提高幅度分别为 38%、23. 5% 和 23. 7%. C40和 C50水泥生料组分混凝土 3 d强度高于同龄期的普通河砂混凝土,而 7 d以后强度与普通河砂混凝土相当.

试验中 C30水泥生料组分混凝土较同等级的普通混凝土强度提高较大,其主要原因是水泥生料组分混凝土具有较致密的水泥石结构和界面强度. 低强度等级混凝土选取较大的水灰比,混凝土凝结硬化后,水泥石孔隙率高,原始缺陷多. 石灰石质人工砂具有稍高于硅质河砂的吸水性能,在混凝土拌合过程中人工砂吸收了部分的拌合水,降低了实际的水灰比,因而在原始水灰比不变的条件下,减少了水泥石中的原始缺陷;另外,石灰石质人工砂中含有一定数量的石灰石粉,一方面石灰石粉的微集料效应改善了硬化水泥浆体中孔隙的孔径和分布,同时改善了界面过渡区的结构;另一方面石灰石质人工砂的表面织构较普通河砂粗糙,且表面石灰石粉可与水泥生成化学结合,因而黏结性增强,提高了界面过渡区的强度.

1994-2015 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

也为水泥生料组分混凝土强度的提高做出了贡献.

C40和 C50水泥生料组分混凝土强度与普通河砂混凝土相似,这是因为 C40和 C50等级的混凝土水灰比较 C30小得多,使界面过渡区结构较 C30混凝土有很大的改善;另外随着混凝土强度的提高,石灰石质人工砂的掺量减少,因而对混凝土的实际水灰比的影响减小,对界面过渡区的改善也不如原始水灰比的减小对其的影响明显.

3个等级的水泥生料组分混凝土强度增长均体现为早期强度增长速率大于普通混凝土,而 7 d 后强度增长速率与普通混凝土持平. 这主要是由于机制人工砂中的石灰石粉与水泥发生了反应:石灰石粉在混凝土中作为微集料分散了水泥颗粒,使其充分水化;岳昌年^[16]的研究显示:石灰石粉与水泥中的铝酸钙反应加速阿利特的水化,也会提高混凝土的早期强度. 石灰石颗粒在与水泥成分发生反应时,是作为反应晶核,反应后大量产物聚集在石灰石颗粒表面,大大降低了石灰石颗粒进一步参加反应的可能性,因而对混凝土的长期强度没有很大的影响.

(2)混凝土抗折与劈裂性能分析

混凝土的抗拉强度大大低于抗压强度,这主要是因为拉伸条件下,混凝土的裂缝更容易发展,而对混凝土的抗拉强度影响最大的是水泥与集料颗粒间的界面区强度^[17]. 表 2显示:3个等级的水泥生料组分混凝土抗折强度和劈裂抗拉强度分别高于同等级的普通河砂混凝土,且提高幅度随混凝土强度的提高而增加. 其提高原因与抗压强度提高的原因大体相同,主要是因为石灰石质人工砂的加入提高了水化水泥石的密实程度,改善了界面区性能;另外一个关键因素是人工砂的粗糙表面:人工砂表面粗糙机械黏结力优于表面光滑的河砂,在拉应力作用下限制了骨料周围水泥石的变形,进而限制了裂缝的发展及破坏.

由此可见,以石灰石质人工砂代替部分河砂的水泥生料组分混凝土除了流动性低于普通河砂混凝土外,其力学性能均高于或相似于普通河砂混凝土,且所有性能满足当前普通混凝土的施工和使用要求,适合于在工程中广泛应用.

4 混凝土水泥生料成分分析

水泥生料组分混凝土的设计目标是在该种混凝土废弃后可直接用做水泥生料,其成分与水泥

生料成分吻合. 将本试验废弃水泥生料组分混凝土破碎磨细后,经 DHF82多元素快速分析仪分析,主要氧化物含量与设计生料氧化物含量对比如表 3所示.

表 3 废弃水泥生料组分混凝土与设计水泥生料主要氧化物成分对比

Tab. 3 Oxides contrast result between the CCRM concrete and the designed cement raw material

氧化物	w /%	
	废弃水泥生料组分混凝土	设计水泥生料
SiO ₂	14. 04	14. 01
Al ₂ O ₃	1. 92	2. 90
Fe ₂ O ₃	1. 10	3. 77
CaO	48. 16	44. 54
MgO	1. 65	
烧失量	32. 64	
其他	0. 49	

由表 3可见,废弃混凝土的 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 与设计水泥生料相似,但稍有偏差,这主要是因为在设计中采用了 $A=1, B=1$ 的保证系数,即天然河砂与石灰石的品质造成了 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 在实际中的偏差;另外水泥在粉磨中需加入石膏($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)以减缓其水化速度,所以混凝土中使用的水泥的 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 比熟料中的高,也影响了实际的混凝土氧化物成分比例. 废弃水泥生料组分混凝土生料中氧化铝和氧化铁含量远远低于设计含量,这是因为在混凝土设计中没有考虑这两种氧化物的含量,设计的初衷即是在水泥生产配料阶段利用校正物质来满足设计要求. 如本试验所示,采用 $A=1, B=1$ 的保证系数设计的水泥生料组分混凝土废弃后作为水泥生料在 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 上基本满足水泥生料的要求.

5 结 论

(1) 将混凝土的配合比设计与水泥生料的配料设计相结合,提出了水泥生料组分混凝土和混凝土水泥的概念.

(2) 试验证明:在相同配合比条件下,水泥生料组分混凝土工作性要劣于普通的河砂混凝土,但强度发展趋势与普通河砂混凝土相似,早期强度高于普通河砂混凝土, C30水泥生料组分混凝土后期强度明显高于普通河砂混凝土,而 C40和 C50的水泥生料组分混凝土的后期强度分别与同

等级的普通河砂混凝土相似。

(3) 3个等级的水泥生料组分混凝土抗折强度和劈裂抗拉强度分别高于同等级的普通河砂混凝土,设计强度越高,提高幅度越大。

(4) 将上述试验废弃的混凝土磨细后进行成分分析,结果显示:采用 $A = 1, B = 1$ 的保证系数设计的水泥生料组分混凝土的 $m(\text{CaO})/m(\text{SiO}_2)$ 与设计水泥生料相似,只需添加少量的校正原料即完全符合设计的水泥生料要求。

参考文献:

- [1] BUCK A D. Recycled concrete as a source of aggregate [J]. *J of ACI*, 1977, 2(5): 212-219
- [2] HANSEN T C, NARUD H. Strength of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate [J]. *Concr Int*, 1983, 1(1): 79-83
- [3] RAVINDRARAJH R S, TAM C D. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate [J]. *Magaz of Concr Res*, 1985, 37(3): 29-38.
- [4] TAVAKOLI M, SOROUSHIAN P. Drying shrinkage behavior of recycled aggregate concrete [J]. *Concr Int*, 1996, 18(11): 58-61
- [5] 邢振贤,周曰农. 再生混凝土的基本性能研究 [J]. 华北水利水电学院学报, 1982, 19(2): 30-32
- [6] 邢风,冯乃谦, 建彤. 再生骨料混凝土 [J]. 混凝土与水泥制品, 1999, 4(2): 10-13
- [7] 杜婷. 建筑垃圾再生骨料混凝土性能及强化实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2001
- [8] 刘顺妮. 水泥-混凝土体系环境影响评价及其应用研究 [D]. 武汉: 武汉理工大学, 2002
- [9] 张大利,唐明. 石灰石作混凝土可循环集料的特征性能及其特征参数 [J]. 建筑技术开发, 2004, 31(4): 34-37
- [10] 中建. 韩国开发成功水泥再生利用技术 [J]. 建材工业信息, 2003(5): 46
- [11] 王立久,李振荣. 建筑材料学 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2000
- [12] 王君伟,李祖尚. 水泥生产工艺计算手册 [M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2001
- [13] 林宗寿,李凝芳,赵修建,等. 无机非金属材料工学 [M]. 武汉: 武汉工业大学出版社, 1999
- [14] 李同锋. 煤矸石代黏土的配料计算 [J]. 水泥, 2005, 2(2): 18-19
- [15] 王中伟,潘淑琴. 电石渣配料在立波尔窑上的应用 [J]. 水泥, 2005(2): 16-17
- [16] 岳昌年. 含粉状颗粒石灰岩碎石配制特细砂混凝土的研究 [J]. 南京建筑工程学院学报, 1994, 31(4): 30-37
- [17] MINDESS S, YOUNG J F, DARWIN D. 混凝土 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2005

Theoretical and experimental studies on CCRM concrete

WANG Li jiu^{*}, ZHENG Fang yu, CHI Yao hui

(School of Civil and Hydraul. Eng., Dalian Univ. of Technol., Dalian 116024, China)

Abstract In order to realize the recycle use of concrete, the concept of concrete designed by the constituents of cement raw material (CCRM concrete for short) is put forward and the mix design method of this concrete is provided. In the mix design, sand percentage is divided into two parts, nature sand percentage and manufactured limestone sand percentage, and then the mix design of concrete is contacted with the three ratios of cement clinker, which make the oxide constituents of concrete to be similar to those of the cement raw material. After the concrete is abandoned, it can be directly used as cement raw material but not need or just need little materials to adjust the constituents. The experiments show that the workability of the CCRM concrete is lower than that of the corresponding normal concrete, but its mechanical properties are all better; the ratio of the abandoned CCRM concrete is similar to that of the cement raw material which has been designed before the concrete design. The concrete designed by the constituents of cement raw material resolves the problem of the recycle use of the concrete, and at the same time reduces the excessive exploitation of natural resources and the air pollution.

Key words concrete designed by the constituents of cement raw material; mix design; nature sand percentage; manufactured limestone sand percentage