

水胶比对高强混凝土力学性能影响的实验研究

高 云^{1,2,3}, 杜春苗³, 李 栋³, 赵 平³

(1. 潍坊科技学院, 山东省高校设施园艺实验室, 山东 潍坊 262700; 2. 潍坊科技学院, 建筑工程学院, 山东 潍坊 262700;
3. 青岛科技大学 材料学院, 山东 青岛 266042)

摘要: 为了研究水胶比对混凝土强度的影响规律, 本文自主设计并配制了强度等级为 C50、C60 型号高强度混凝土, 建立了水胶比与混凝土 7 d 龄期和 28 d 龄期抗压强度之间的函数关系式, 并分析了强度增量随水胶比变化的原因。结果表明, 随着水胶比增加, 混凝土抗压强度呈降低趋势, 符合一次线性函数关系; 7 d 后强度增量和相对增长率随着水胶比增长而减小, 基本呈直线下降。因此, 水胶比将直接影响混凝土性能, 若要获得高强度的混凝土, 设计合理的水胶比是关键。经综合分析评价, 高强度混凝土的水胶比存在着一个合适范围, 当水胶比为 0.29 时, 混凝土的性能最优。

关键词: 高强度混凝土; 配合比; 水胶比; 抗压强度; 性能

中图分类号: TU528.31

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2020)05-0653-07

Experimental study on the influence of water-binder ratio on mechanical properties of high strength concrete

GAO Yun^{1,2,3}, DU Chunmiao³, LI Dong³, ZHAO Ping³

(1. Facility Horticulture Laboratory of Colleges and Universities in Shandong Province,

Weifang College of Science and Technology, Weifang 262700, China;

2. College of Civil Engineering, Weifang College of Science and Technology, Weifang 262700, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Qingdao University of Science and Technology,
Qingdao 266042, China)

Abstract: In order to study the influence of water-binder ratio on the strength of concrete, the strength grade of C50 and C60 type of high strength concrete were designed and prepared independently, where the functional relationship between water to binder ratio and compressive strength of concrete at seven and twenty-eight days of age were established. The reason why the strength increment varies with the ratio of water to binder was analyzed. Results show that the compressive strength of concrete decreases with the increase of water to binder ratio, which accords with the primary linear function relation, and the strength increment and relative growth rate decrease with the increase of water to binder ratio after 7 days, and nearly decrease in a straight line. Therefore, the water-binder ratio will directly affect the performance of concrete, and if we want to obtain high strength concrete, the design of reasonable water-glue ratio is the key. After comprehensive analysis and evaluation, there is a suitable range for the water-binder ratio of high strength concrete, and the performance of concrete is optimal when the water-binder ratio is 0.29.

Key words: high strength concrete; mix proportion; water to binder ratio; compressive strength; properties

混凝土是一种水泥基复合材料, 它是以水泥为胶结剂, 结合各种集料、外加剂等而形成的水硬性胶凝材料。混凝土具有原材料丰富, 成本低, 强度高, 耐久性好, 可塑性良好的优点, 是土木工程中用途最广、用量最大的一种建筑材料^[1-2]。混凝土配合比就是根据施工要求与工程需求, 选择所需的各种原材料, 在保证混凝土工作性能和

经济性的条件下, 确定各种材料比例组成以及相应的材料用量。良好的配合比是获得高强度耐用混凝土的必备条件^[3]。目前, 虽然混凝土配合比设计已经有很大的发展, 创建了相应的国标和行标, 以及地方标准和企业标准, 但在不同的建设工地中, 每个工地的环境不同, 各地所产的原材料也不同, 导致了混凝土配合比设计不能完全按照标

准规定的公式和方法进行计算配制。

迄今为止,针对高强度混凝土配合比的研究依然不够充分,对水胶比影响的研究成果还比较缺乏,很多工厂在配制混凝土的时候主要依赖经验添加各种原料、辅料^[4]。从社会发展和技术进步的角度来看,在今后相当长的时间内,中国仍处于大建设时期,混凝土将仍然是应用最广、用量最大的建筑材料。随着对节能减排、可持续发展要求的不断提高,对混凝土性能的要求也越来越高。鉴于此,本文对高强度混凝土进行实验研究,设计了不同水胶比的混凝土,测试其坍落度、抗压强度等各项性能指标,掌握水胶比对混凝土7 d、

28 d 龄期强度的影响规律,研究水胶比对混凝土各项性能的影响,进而确定最经济、高效的施工方案,选择满足工程要求的配料比进行施工,实验结论对混凝土在工程实践中的应用具有重要意义。

1 实验材料和方法

1.1 实验材料

混凝土用原材料主要包括水、水泥、砂、碎石、矿粉、粉煤灰和外加剂等。本实验各原材料用量如表1所示,其中掺合料是指矿粉和粉煤灰总量,外加剂主要是高效减水剂。

表1 高强度混凝土各原材料用量和配比

Tab. 1 Content and proportion of raw materials in high strength concrete

型号	编号	水泥用量/kg · m ⁻³	砂/kg · m ⁻³	石/kg · m ⁻³	用水量/kg · m ⁻³	掺合料/%	外加剂/%
C50	1#	273	710	1 065	150	20	1.14
	2#	265	716	1 074	150	20	1.14
	3#	257	721	1 081	150	20	1.14
C60	4#	362	685	1 028	150	15	1.2
	5#	350	692	1 038	150	15	1.2
	6#	343	696	1 044	150	15	1.2

1.2 实验方法

将各原材料按照设计的配合比称量好后,先将水泥、石英砂、碎石、矿粉、粉煤灰倒入搅拌机中,干拌5分钟,使胶凝材料和石英砂得到全面接触并达到宏观上均匀分布,然后将水与高效减水剂混合,均匀加入搅拌机中,搅拌10 min后出料。然后将活性高强度混凝土材料一次装入钢模,装料时用抹刀沿钢模内壁略加振捣,并使拌和物高出钢模上口,振动成型,持续到混凝土表面出浆为止,用抹刀抹平,然后将模具做好标记放入养护室。试块浇筑完毕应立即用湿润后的木屑覆盖,以防止表面起皮、开裂,最后将试件放入标养室,36 h后拆模。采用边长为150 mm的立方体标准试件进行压缩强度实验。将试件表面和上下承压板擦干净,试件安放在试验机的下压板上,其承压面与成型时的顶面垂直,试件的中心与试验机的下压板中心对准,开动试验机。当上压板与试件接近时,调整球座,使接触均衡。连续均匀施加载荷,当试件接近破坏并开始急剧变形时,调整试验机油门,直至破坏,记录下破坏载荷,混凝土抗压强度测试系统如图1所示。实验测量混凝土7 d和28 d龄期的强度值(R7和R28)。



图1 混凝土强度测试系统

Fig. 1 Concrete strength test system

坍落度的测试是用一个上口100 mm、下口200 mm、高300 mm喇叭状的坍落度桶,分三次填装混凝土,每次填装后用捣锤沿着桶壁均匀地由外向内击25下,捣实后抹平。然后拔起桶,混凝土因自重产生塌落现象,用桶高(300 mm)减去塌落后混凝土最高点的高度,其差值即为坍落度。

2 结果与分析

2.1 高强度混凝土性能及分析

本次试验配制的混凝土级别为C50、C60混凝土。

土, 其抗压强度和坍落度等工作性能如表 2 所示. 于高强度混凝土范畴. 两种混凝土的坍落度在 175~180 mm 之间, 表明其和易性较好.

表 2 实验用高强度混凝土性能
Tab. 2 Performance of high strength concrete for experiment

型号	编号	水胶比	R7/MPa	R28/MPa	坍落度/mm
C50	1#	0.33	57.4	65.1	175
	2#	0.34	55.1	63.3	175
	3#	0.35	53.0	59.6	180
C60	4#	0.29	64.2	75.9	175
	5#	0.30	62.2	72.5	180
	6#	0.31	60.5	70.8	175

通过对 C50 和 C60 混凝土强度进行分析可知, 两类混凝土 7 d 强度与标准强度的比值均大于 1; 而 28 d 强度与标准强度的比值均大于 1.15, 如图 2 所示. 两类混凝土均超过了国家标准 (GB/T50107-2010《混凝土强度检验评定标准》) 所规定的混凝土强度值, 据此判断所获得的混凝土属于高强度混凝土, 具有优异的性能.

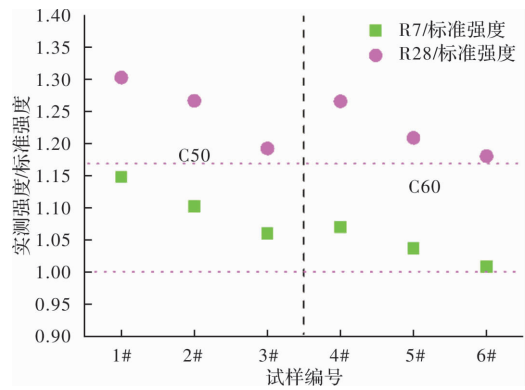


图 2 配制的两种高强度混凝土实测强度与标准强度的比值

Fig. 2 The ratio of the measured strength to the standard strength of the two prepared high-strength concrete

由图 2 可知, 实验设计制备的 C50 和 C60 混凝土获得了良好的工作性能, 其高性能主要得益于以下原因: (1)混凝土中采用了超细的掺合料. 所采用的 I 级粉煤灰, 含有大量的硅铝氧化物, 可与水泥的水化产物进行水化反应. 又由于粒度超细, 参与二次水化的比表面积大, 不仅可以改善混凝土的流动性, 减少水泥用量, 而且可以降低孔隙率, 改善混凝土的孔结构, 使孔隙的分布更加合理, 进而大大提高混凝土的性能; (2)采用了优质的 S95 级矿粉, 粒度小、比表面积大, 矿粉 28 d 的活性指数高于 95%, 可以发挥优异的“火山灰效应”^[5], 使混凝土的强度提高; (3)采用了优

质的骨料, 骨料材质良好, 颗粒形状规则, 抗压强度高. 掺入骨料后粉体颗粒量增加, 可形成更多微粒核心作为水泥水化附着物^[6], 提高了水泥水化率, 并且骨料的掺入降低了混凝土泌水量, 强化了骨料-水泥浆过渡区域, 提高了机械咬合作用和化学黏结作用, 很好的提升了混凝土的性能; (4)添加高效减水剂, 可以有效减少混凝土的单位用水量, 降低水泥用量. 通过坍落度实验发现, 使用高效减水剂之后, 虽然大大降低用水量, 但是混凝土的坍落度仍然保持在 175~180 mm (表 2), 具有良好的和易性.

2.2 水胶比对混凝土强度的影响规律

水胶比影响混凝土的流变性能、水泥浆凝聚结构以及其硬化后的密实度^[7], 因而在组成材料给定的情况下, 水胶比是决定混凝土强度、耐久性和其他一系列物理力学性能的主要参数. 从图 3 可以看出, 高强度混凝土龄期为 7 d 的抗压强度与水胶比呈线性关系, 随着水胶比的减小, 抗压强度逐渐增大. 当水胶比为 0.35 时, 混凝土的强度为 53.0 MPa, 当水胶比为 0.29 时, 混凝土的抗压强度达到 64.2 MPa, 相比增加了 11.2 MPa, 增幅为 21%. 对图 3 进行数据拟合, 根据拟合曲线可知, 7 d 混凝土强度与水胶比大致符合以下关系式:

$$y = 122.7 - 200.4x \tag{1}$$

式中: y 代表 7 d 抗压强度, MPa; x 代表水胶比. 从图 3 和公式(1)可得, 水胶比直接影响混凝土的强度, 两者呈线性相关性.

本实验选择 28 d 强度值作为标准强度值. 从图 4 中可以看出, 混凝土龄期为 28 d 的抗压强度与水胶比呈线性关系, 随着水胶比的减小, 强度逐渐增大. 当水胶比为 0.35 时, 混凝土的强度为 59.6 MPa, 当水胶比为 0.29 时, 混凝土的抗压强

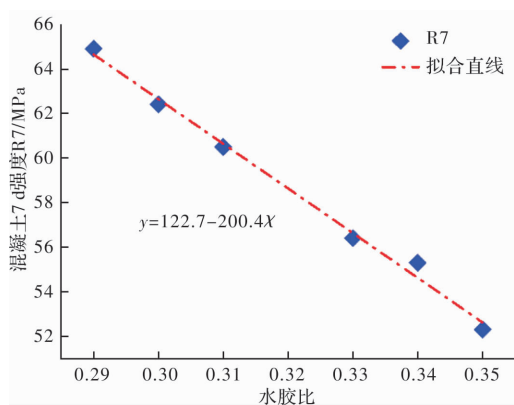


图3 高强度混凝土水胶比与7d抗压强度的关系

Fig. 3 Relationship between water-binder ratio of high strength concrete and compressive strength for 7 days

度可达到 75.9 MPa, 相比增加了 16.3 MPa, 增幅为 27%。对图 4 进行拟合, 发现混凝土龄期为 28 d 的抗压强度与水胶比符合以下关系:

$$y = 137.1 - 220.4x \quad (2)$$

式中: y 代表混凝土 28 d 的抗压强度, MPa; x 代表水胶比。结合图 4 和公式(2), 水胶比对 28 d 龄期强度的影响呈线性关系, 这与 7 天龄期强度关系类似。因此, 若要获得高强度的混凝土, 设计合理的水胶比是关键, 然而, 很多工厂在配制混凝土的时候主要依赖经验添加各种原材料, 很难得到统一的数值, 而通过公式(1)、(2)这两个经验公式, 可以快速估算出符合强度设计要求的水胶比。因高强度混凝土对水胶比很敏感, 在试配时两个相邻的水胶比差值应不大于 0.02。

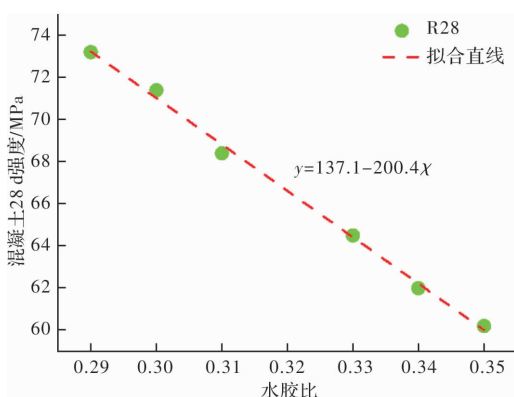


图4 高强度混凝土水胶比与28d抗压强度的关系

Fig. 4 Relationship between water-binder ratio and 28-day compressive strength of high strength concrete

由图(3)~(4)发现, 随着水胶比的降低, 龄期为 7 d 和 28 d 的混凝土抗压强度均大幅度提升。水胶比的大小直接影响到混凝土的孔隙率、密度和力学性能。随着水胶比的降低, 混凝土强度有着较显著的提升。混凝土强度主要是由水泥水化

生成的胶凝性产物决定的, 且水泥硬化初期的反应产物数量主要取决于与水反应的水泥颗粒的表面积。在混凝土凝结硬化过程中, 如若水胶比过高, 一方面, 基体内部的水化反应需水量较少, 过量水的掺入直接导致基体强度下降^[8]; 另一方面, 过量的自由水会在孔隙水压力的作用下发生迁移、泌水, 从而产生一定量的微小毛细孔, 这会增大混凝土的孔隙率, 使混凝土密实性变差^[9], 从而降低了混凝土的强度。另外, 混凝土是含有孔隙的不均质体, 砂子(和小粒径石子)会进入孔隙中, 砂子表面形成的水膜会引起混凝土的沉降收缩和水泥浆水化收缩, 从而产生较大的内应力, 甚至将会引起微裂纹、出现干缩裂缝^[10]。这不仅会减少荷载时有效受力面积, 而且在孔隙周围以及水泥及砂子的界面上也会产生较大的应力集中^[11], 降低混凝土的抗压强度。所以, 在混凝土设计过程中, 为保证混凝土的强度要尽可能的减小水胶比。但是, 水胶比减小、混凝土强度增大后, 其和易性会降低, 而且水胶比过低, 混合料的粘度很大, 在振捣过程中其内部的空气难以排出, 将会较大程度影响密实度, 影响使用效果, 因此混凝土的设计需根据实际应用合理确定水胶比。

2.3 水胶比对混凝土强度增量的影响

混凝土的强度增长过程就是凝胶材料中的化学成分(硅酸盐、铝酸盐等)水化反应的过程。通过计算分析, 随着水胶比的增大, 混凝土养护 7 d 后的强度增大趋势逐渐放缓, 水胶比与强度增长呈现负相关, 如图 5 所示。当水胶比为 0.29 时, 混凝土强度增量 ($\Delta R = R_{28} - R_7$) 为 11.7 MPa, 而当水胶比为 0.35 时, 强度增量仅为 6.6 MPa。随着水胶比增加, 强度增量呈直线下降。

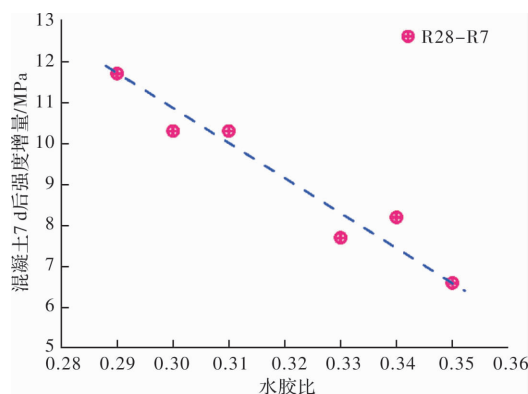


图5 水胶比与高强度混凝土7d后强度增量的关系

Fig. 5 Relationship between water-binder ratio and strength increment of high strength concrete after 7 days

实验配制的高强度混凝土7 d龄期之后的强度增长率 $((R_{28}-R_7)/R_7)$ 表示每单位水胶比混凝土强度增长的幅度.图6展示了混凝土水胶比与强度增长率的关系,当水胶比为0.29时,强度增长率为18.2%,而当水胶比为0.35时,强度增长率仅为12.5%,两者之间呈直线下降趋势,与图5中相似,但数据离散性较大.

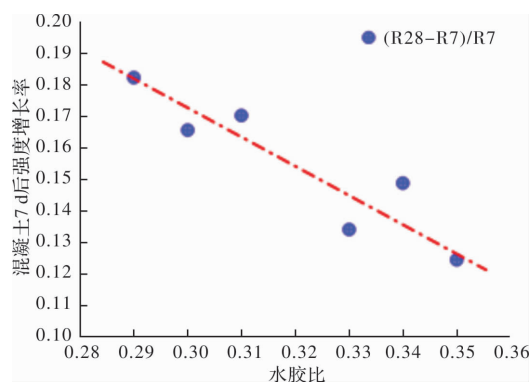


图6 高强度混凝土水胶比与7 d后强度增长率的关系

Fig. 6 The relationship between cement ratio of high-strength concrete and the growth rate of strength after 7 days

本实验中,在C50和C60混凝土中分别添加了1.14%和1.2%的高效减水剂(表1).掺入减水剂后,减水剂的憎水基团定向吸附于水泥颗粒表面,而亲水基团指向水溶液,构成单分子或多分子层吸附膜^[12].由于表面活性剂的定向吸附,使水泥胶粒表面带有相同符号的电荷,在同性相斥的作用下,不但能使水泥—水体系处于相对稳定的悬浮状态,而且能使水泥在加水初期所形成的絮凝状结构分散解体,将絮凝结构内的水释放出来^[13],使得反应更加充分,故7 d龄期后混凝土抗压强度以较大的幅度增加.当水胶比过大时,混凝土本身含水量较高,减水剂又将水泥水化生成的絮凝结构中的水释放出来,体系中将会存在过量的水,从而大大增加水泥结构中的孔隙率.水胶比增大也会使内部二次水化不完全,水化产物的减少导致混凝土内部结构组织稀疏,使得混凝土强度增加的幅度下降^[14].水泥熟料中含有的游离CaO/MgO遇水后熟化极缓慢,熟化所产生的体积膨胀延续很长时间,会破坏水泥结构,使混凝土强度增幅下降.这种现象随水含量增大,将变得更严重,故随着水胶比的增大,7 d后强度的增量及相对增长率呈下降趋势(图5~6).另外,水胶比对混凝土中的自由氯离子扩散系数的影响也严重影响混凝土强度的增长.混凝土中的自由氯离子扩散系数随水胶比的增大而增大,随着水胶比的增大,氯离子扩散程度越大,扩散速度越

快,混凝土的抗腐蚀能力下降^[15],导致混凝土的强度、强度增量及增长率降低.其原因主要是水胶比大的混凝土本身原料中含有大量的水分,而这些水分蒸发后将会在混凝土中留下许多毛细孔隙,致使混凝土内部结构不致密,因而氯离子在混凝土中的扩散更加方便,传输速率也更大.氯离子侵入混凝土结构使得内部应力增大^[16],使得混凝土产生微裂纹,抗压强度降低,强度的增量及相对增长率均呈现下降趋势.

2.4 掺合料对高强度混凝土性能的影响

本文配制的C50混凝土矿物掺合料的加入量为20%,C60混凝土中矿物掺合料的加入量为15%(表1).虽然C50中粉煤灰的掺加量高于C60,但其强度仍然远高于同级别混凝土的标准强度.实验所采用的粉煤灰颗粒粒形圆整、表面很光滑、质地十分致密,提高水泥的致密度、抗渗性,改善水泥粒子的填充性,并且粉煤灰的微集料效应改善了水泥水化环境,提高了混凝土均匀性.粉煤灰的加入弥补了水泥浆与骨料结合面不良的缺陷,增大了混凝土的强度.C50混凝土与C60混凝土相比,粉煤灰取代部分水泥后,水泥的水化产物相对减少,而粉煤灰早期水化较慢,未能有效弥补减少的水泥水化产物,造成界面联结薄弱^[17],导致混凝土强度不足.由于掺合料的相对密度小于水泥,因此所形成的浆体体积大,使得混凝土的流动性增加,坍落度达到175~180 mm.

粉煤灰中含有以酸性氧化物为主的玻璃体,该玻璃体可以与水泥水化的产物 $(Ca(OH)_2)$ 发生“火山灰反应”^[18].粉煤灰中含有大量的 SiO_2 和 Al_2O_3 ,水泥水化产物 $Ca(OH)_2$ 作为碱性激发剂能够促进粉煤灰的水化. $Ca(OH)_2$ 与粉煤灰之间存在着一个水膜层,受扩散控制的溶解反应造成粉煤灰微珠表面溶解,反应生成物沉淀在颗粒的表面上.后期 Ca^{2+} 继续通过表层和沉淀的水化产物层向心部扩散,通过扩散作用穿过水膜层,与粉煤灰颗粒生成较多的C-S-H(水化硅酸钙凝胶)及C-A-H等水化产物^[19],此水化产物在颗粒表面进行沉积,之后水膜层继续被填实,并与水泥水化产物联结,其中C-A-H可以和氯离子反应生成Friedel盐^[20],提高化学固化量,而C-S-H凝胶能够吸附较多的氯离子,提高物理吸附量,从而混凝土内部粘结强度增大,这将提高混凝土强度.

本实验采用的矿粉有非常出色的“潜在活性”,在不掺加激发剂的条件下,水泥中的石膏和Ca

(OH)₂能够激发矿粉的活性,并且水化产物能够在基体内获得更好的配列^[21]。矿粉内的主要化学成分是Ca(OH)₂、SiO₂和Al₂O₃,这些成分将参与二次水化反应,在反应过程中吸收大量的CH晶体,使混凝土中尤其是界面过渡区的CH晶粒变小、变少。由于CH被大量吸收反应,水化反应速度加快,水泥石与骨料界面粘结强度及水泥浆体的孔结构得到改善,提高了混凝土的密实性,硬化混凝土,从而提高了混凝土的强度。

3 结语

本文根据某公路施工要求实际设计并制备了不同配合比的高强度混凝土,研究了配合比对混凝土工作性能的影响,分析了水胶比与抗压强度及强度增量的关系规律,主要得到以下结论:

(1)采用52.5 MPa级优质水泥、砂、碎石、超细掺合料等原材料,添加少量高效减水剂,成功制备性能优良的高强度混凝土,C50级别混凝土的强度可达65.1 MPa,C60级别可达75.9 MPa;

(2)水胶比直接影响混凝土强度,其中7 d龄期强度值与水胶比之间函数关系式为 $y = 122.7 - 200.4x$,28 d龄期强度值与水胶比之间关系式为 $y = 137.1 - 220.4x$;

(3)随着水胶比增加,混凝土7 d后抗压强度增量和相对增长率均减小,呈直线下降趋势。

参考文献 References

- [1] 郭欢. 新型混凝土材料在土木工程领域中的应用[J]. 四川水泥, 2020(1): 38.
GUO Huan. Application of new concrete material in civil engineering[J]. Sichuan Cement, 2020(1):38.
- [2] 黄华,朱亮,黄敏,等. 不同材料改性混凝土的性能研究及现状分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(6): 1887-1896.
HUANG Hua, ZHU Liang, HUANG Min, et al. Research and analysis on the performance of modified concrete with different materials[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(6): 1887-1896.
- [3] 张松涛,贾欣悦,宋卓,等. 无砂再生透水混凝土配合比设计[J]. 混凝土与水泥制品, 2016, 12(12): 6-12.
ZHANG Songtao, JIA Xinyue, SONG Zhuo, et al. Design on mix proportion of no-fines pervious recycled concrete[J]. China Concrete and Cement Products, 2016, 12(12): 6-12.
- [4] 张岩,杜应吉,张文剑. 水胶比对塑性混凝土主要性能影响的试验研究[J]. 混凝土, 2020(1): 15-18.
ZHANG Yan, DU Yingji, ZHANG Wenjian. Experimental study on influence of water-to-binder ratio on main properties of plastic concrete[J]. Concrete, 2020(1): 15-18.
- [5] 李芳花,李双喜,仲从春,等. 不同水胶比下硅粉掺量对矿渣粉活性的影响[J]. 粉煤灰综合利用, 2018(2): 12.
LIFanghua, LI Shuangxi, ZHONG Congchun, et al. The dosage of silicon powder under different water-binder ratio effect on the activity of slag powder[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization, 2018(2):12.
- [6] 陈嘉健. 掺石灰石粉降低混凝土渗透性及吸水性方法研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2018, 50(1): 45-50.
CHENJiajian. Adding limestone fines in concrete for permeability and sorptivity reduction[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2018, 50(1): 45-50.
- [7] 李丹丹,林志豪,赵海坤,等. 环保型无砂再生透水混凝土配合比设计分析[J]. 中国资源综合利用, 2018, 36(4): 14-16.
LI Dandan, LIN Zhihao, ZHAO Haikun, et al. Design analysis on the combination ratio of environmentally friendly sandless regenerated permeable concrete [J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018, 36(4): 14-16.
- [8] 王秋维,王志伟,陶毅,等. 配合比及养护制度对活性粉末混凝土强度影响的试验研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(3): 382-387.
WANG Qiuwei, WANG Zhiwei, TAO Yi, et al. Experimental research on effect of mix ratio and curing system on the strength of reactive powder concrete[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 382-387.
- [9] 周朋,谢松林,李强. 水胶比对混凝土性能及气孔结构的影响分析[J]. 硅酸盐通报, 2018, 37(3): 974-978.
ZHOU Peng, XIE Songlin, LI Qiang. Effect of water-binder ratio on properties and pore structure of concrete[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2018, 37(3): 974-978.
- [10] 尹宾. 建筑施工中混凝土裂缝控制技术的研究[J]. 住宅与房地产, 2019(34): 173.
YIN Bin. Research on concrete crack control technology in construction [J]. Housing and Real Estate, 2019 (34): 173.
- [11] 贾金青,胡玉龙,王东来,等. 混凝土抗压强度与孔隙率关系的研究[J]. 混凝土, 2015, 56(10): 56-59, 63.
JIAJinqing, HU Yulong, WANG Donglai, et al. Effects of porosity on the compressive strength of concrete[J]. Concrete, 2015, 56(10): 56-59, 63.
- [12] 向浩天,蒋炳,李之军,等. 外加剂对低温水泥浆性能

- 的影响试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2020, 47(1): 36-42.
- XIANGHaotian, JIANG Bing, LI Zhijun, et al. Study on effect of additives on cement slurry at low temperature[J]. Exploration Engineering (Rock & Soil Drilling and Tunneling), 2020, 47(1): 36-42.
- [13] 汤潜潜. 聚羧酸系高性能减水剂的研究进展[J]. 内江科技, 2020, 41(3): 107-108, 152.
- TANGQianqian. Research progress of polycarboxylic acid system high performance water reducer[J]. Neijiang science and technology, 2020, 41(3): 107-108, 152.
- [14] 严麟, 肖刚, 祝瑜. 不同掺量高效减水剂对水泥净浆收缩性能的影响[J]. 材料研究与应用, 2015(1): 30-32.
- YAN Lin, XIAO Gang, ZHU Yu. Effect of different amount of superplasticizer on shrinkage of cement paste[J]. Materials Research and Application, 2015(1): 30-32.
- [15] 彭跃辉, 黄琳雅, 陈梦成, 等. 陶瓷粉再生混凝土氯离子扩散性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(2): 177-185, 229.
- PENG Yuehui, HUANG Linya, CHEN Mengcheng, et al. Study on chloride diffusion properties of reclaimed concrete from ceramic powder[J]. Journal of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(2): 177-185, 229.
- [16] 蔡健, 魏沐杨, 罗赤字, 等. 弯曲荷载与氯盐侵蚀共同作用下的预应力混凝土梁耐久性能研究[J]. 工程力学, 2018, 35(7): 208-218, 242.
- CAIJian, WEI Muyang, LUO Chiyu, et al. Durability of prestressed concrete beams under simultaneous flexural load and chloride erosion[J]. Engineering Mechanics, 2018, 35(7): 208-218, 242.
- [17] 吴耀鹏, 李晓蕾, 姜厚文, 等. 不同配合比再生混凝土高温后的残余抗压强度[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2017, 49(03): 375-381.
- WU Yaopeng, LI Xiaolei, JIANG Houwen, et al. Residual compressive strength of recycled aggregate concrete with the different mixture ratio after high temperature[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2017, 49(3): 375-381.
- [18] 徐志华, 李桂林, 荣耀. 水胶比和粉煤灰对砼层面砂浆抗折抗压强度的影响[J]. 南昌工程学院学报, 2018, 37(1): 32-36.
- XU Zhihua, LI Guilin, RONG Yao. Effect of water-binder ratio and fly ash on mechanical properties of mortar in RCC[J]. Journal of Nanchang Institute of Technology, 2018, 37(1): 32-36.
- [19] 李博. 高强度泡沫混凝土的制备及其性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2018.
- LI Bo. Preparation and properties of high strength foam concrete[D]. Changchun: Jilin University, 2018.
- [20] 李东, 朱月圆, 耿健, 等. 矿物掺合料和 CLDH 对水泥基材料氯离子固化性能研究[J]. 西安建筑科技大学学报(自然科学版), 2019, 51(3): 344-349.
- LI Dong, ZHU Yueyuan, GENG Jian, et al. A study on curing characteristics of chloride ions binding in cement based materials with mineral admixture and CLDH[J]. J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition), 2019, 51(03): 344-349.
- [21] 黄勇, 王边. S95 矿粉对混凝土性能的影响[J]. 粉煤灰, 2016, 28(6): 27-28.
- HUANG Yong, WANG Bian. Effect of S95 slag powder on the performance of concrete[J]. Coal Ash China, 2016, 28(6): 27-28.

(编辑 桂智刚)