

Influence of Uniformity of the Distribution of Aggregate on Strength and Durability of High Fluidity Concrete

Honggen Qin*, Hui Li, Biao Ma, Chaoming Pang#

School of Material Science and Engineering, Jiangsu Key Laboratory of Civil Engineering Materials, Southeast University, Nanjing Jiangsu

Email: qinhonggen@126.com, #pangchao@seu.edu.cn

Received: Apr. 24th, 2019; accepted: May 9th, 2019; published: May 16th, 2019

Abstract

Based on the non-uniform shrinkage and crack sensibility problems of pumping concrete caused by poor homogeneity, this paper proposes the new testing and characterization methods of concrete homogeneity and studies the relationship between high fluidity concrete homogeneity as well as vibration time and aggregate distribution homogeneity, it also studies the effects of concrete homogeneity on mechanical and durability performance. The results indicate that new mixed concrete fluidity and vibration time have great influences on concrete homogeneity, the aggregate distribution homogeneity in concrete has stronger effects on concrete rupture strength and compressive strength deviation, and has even much stronger influence on concrete deformation and durability performance. With better aggregate distribution homogeneity, concrete will have lower shrinkage rate, better plastic crack resistance and anti-permeability of chlorine ion.

Keywords

High Fluidity Concrete, Homogeneity, Strength, Dry Shrinkage, Plastic Crack, Permeability of Chlorine Ion

骨料分布的均匀性对大流动性混凝土强度和耐久性的影响

秦鸿根*, 李辉, 马彪, 庞超明#

东南大学材料科学与工程学院, 江苏省土木工程材料重点实验室, 江苏 南京

Email: qinhonggen@126.com, #pangchao@seu.edu.cn

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 秦鸿根, 李辉, 马彪, 庞超明. 骨料分布的均匀性对大流动性混凝土强度和耐久性的影响[J]. 土木工程, 2019, 8(3): 666-673. DOI: 10.12677/hjce.2019.83078

收稿日期：2019年4月24日；录用日期：2019年5月9日；发布日期：2019年5月16日

摘要

针对泵送混凝土因均匀性差而产生的不均匀收缩和易开裂等问题，提出了混凝土中骨料分布均匀性的测试和表征新方法，研究了大流动性混凝土流动性和振动时间对其骨料分布均匀性的关系、均匀性对混凝土力学性能和耐久性的影响。结果表明，混凝土拌合物的流动性和振捣效果对混凝土均匀性影响很大，混凝土中骨料分布的均匀性对混凝土抗折强度和抗压强度的偏差值影响较大，对其变形性能和耐久性的影响更大，骨料分布的均匀性越好，混凝土收缩率越低，抗塑性开裂性能和抗氯离子渗透性能越好。

关键词

大流动性混凝土，均匀性，强度，干燥收缩，塑性开裂，氯离子渗透

Copyright © 2019 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代土木工程的发展对混凝土性能的要求越来越高，重要的结构物设计寿命要求达 100 年以上，高的工作性，高的力学性能和高的耐久性构成了高性能混凝土的基本要素[1]。近年来，国内外科研和工程技术人员对混凝土性能提升进行了多方面的研究，但对由于混凝土均匀性问题而导致其力学性能降低和收缩开裂加剧的研究较少。研究混凝土均匀性，是为了探究不同部位混凝土均匀性的差异会给硬化后混凝土力学性能和耐久性能带来的不利影响[2]。混凝土是一种非匀质性材料，其开裂或破坏经常发生在某些均匀性差的薄弱部位中，使耐久性难以保证。均匀性差的混凝土骨料下沉，上部会形成砂浆层，与混凝土相比，同水胶比砂浆的力学性能和耐久性要差得多。含大量砂浆的混凝土会影响混凝土结构承载能力，也会致使混凝土各部位的收缩不一致，易产生收缩裂缝，降低混凝土抗渗，抗冻等耐久性能。泵送混凝土浇筑时常出现和易性不好(流动性过大、保水性和粘聚性欠佳)、振捣不当(漏振和过振)等问题，均会对混凝土的均匀性和密实性产生较大影响，进而产生裂缝[3]。《普通混凝土拌合物性能试验方法》(GB/T50080-2016)中提出用先后出机的混凝土拌合物中砂浆密度的偏差来表征混凝土拌合物的均匀性，还可用先后出机的混凝土的坍落度、扩展度和 28 d 抗压强度等来表征混凝土拌合物的均匀性，但经研究认为骨料(特别是粗骨料)在硬化密实的混凝土中分布的均匀程度更为重要[4]。混凝土拌合物的流动性和成型时的振动时间直接影响到骨料在混凝土中分布的均匀性，而施工人员往往追求过大的流动性便于浇筑，还经常出现漏振和过振的现象，但尚未引起施工管理人员的重视。为此，本文在提出混凝土中骨料分布的均匀性的测试与表征方法的基础上，研究了均匀性对混凝土强度和抗裂限缩性能的影响，具有创新性。探究均匀性对混凝土性能的影响、强调改善均匀性对提高结构混凝土的质量和耐久性能具有重要的理论意义和实用价值。

2. 原材料与试验方法

2.1. 原材料

采用江南小野田水泥有限公司生产的 P·II 52.5 水泥，密度为 3100 kg/m³，比表面积为 339 m²/kg，其

化学成分和物理、力学组成分别如表 1、表 2 所示；南京热电厂生产的 I 级粉煤灰，其化学成分如表 1 所示，密度为 2180 kg/m³，比表面积为 419 m²/kg，细度为 7.6%，需水量比为 92%；江西鄱阳湖的 II 类河砂，表观密度为 2620 kg/m³，细度模数 2.72，含泥量为 1.5%；粗骨料粒径为 5 mm~20 mm 连续级配石灰岩碎石，表观密度为 2710 kg/m³，空隙率为 48%，泥含量为 0.5%；外加剂为聚羧酸高性能减水剂，密度为 1070 kg/m³，其减水率为 28%；自来水。所用原材料性能均满足相关标准要求。

Table 1. Chemical composition of cementitious material

表 1. 胶凝材料的化学组成(%)

Chemical composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	SO ₃	K ₂ O ₃	Na ₂ O	LOI
Cement	62.6	21.35	4.67	3.31	1.11	2.25	0.54	0.21	3.26
Fly ash	4.77	54.9	26.9	6.49	1.31	1.16	1.05	0.88	3.10

Table 2. Physical and chemical properties of P·II 52.5 cement

表 2. P·II 52.5 水泥的物理、力学性能

NO.	Test content	The standard indicators	The test results
1	Normal consistency (%)	26~36	28
2	Setting time (min)	Initial setting	≥45
		Final condensate	≤390
3	Specific surface area (m ² /kg)	≥300	339
4	Flexural strengt (MPa)	3 d	≥4.0
		28 d	≥7.0
5	Compressive strength (MPa)	3 d	≥23.0
		28 d	≥52.5
6	Chloride content (%)	≤0.06	0.02

2.2. 混凝土试验配合比

为了研究混凝土的均匀性对其强度和耐久性的影响，首先提出混凝土均匀性的测试与表征新方法，研究表明，影响混凝土骨料分布均匀性的主要因素是混凝土拌合物的流动性和振捣时间[4]，因此设计了在相同配合比参数条件下仅变化减水剂掺量的不同流动性的混凝土，同时采用不同振捣时间模拟漏振、正常振捣和过振的情况，分别测试其力学性能，干燥收缩、抗裂性和抗氯离子渗透性能。

为了得到流动性和振动时间对骨料分布的均匀性和混凝土性能的影响，论文设计 4 组不同流动性的 C50 混凝土，采用了 4 种振动时间，其混凝土试验配合比及其流动性试验结果列于表 3 中。

Table 3. Mixture ratios and liquidity of C50 concrete

表 3. C50 混凝土试验配合比与流动性

Specimen code	C (kg/m ³)	FA (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	W (kg/m ³)	PCA (kg/m ³)	Slump (mm)
J1	412	73	703	1147	165	3.30	120
J2	412	73	703	1147	165	3.78	160
J3 (Zi)	412	73	703	1147	165	4.27	200
J4	412	73	703	1147	165	5.14	240

注：水胶比为 0.34，砂率为 38%，不同振动时间(0、10 s、30 s 和 50 s)试验采用 J3 (Zi)组配合比。

2.3. 试验方法

根据《普通混凝土拌合物性能试验方法标准》(GB/T50080-2002), 制备并测试新拌混凝土性能, 依据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2002), 将标准养护到规定龄期的混凝土试块进行力学性能试验; 根据《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》(GB/T50082-2009), 将混凝土试件标准养护到规定龄期, 放于 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、 $\text{RH}60 \pm 5\%$ 的恒温恒湿室内, 采用立式收缩仪测试其长期干燥收缩, 采用大平板法测试混凝土塑性开裂性能; 采用氯离子扩散系数测试仪测试混凝土抗氯离子渗透性能; 参照《超声法检测混凝土缺陷技术规程》(CECS21:2000)标准, 采用非金属超声波检测仪测试其不同位置的超声声速, 用于计算混凝土不均匀性。

3. 混凝土中骨料分布均匀性的测试与表征方法

混凝土均匀性对其变形性能和耐久性影响很大, 流动性较大的泵送混凝土经常出现分层离析和塑性开裂现象, 对大面积混凝土尤为明显。超声波在岩石中的传播速度远大于混凝土, 超声波在混凝土中的传播速度远大于砂浆。为了评测均匀性对混凝土性能的影响, 参照有关文献[5]和 CECS21:2000 标准, 用超声法测试不同部位的硬化混凝土的声速, 提出混凝土中骨料分布均匀性的测试与评定的新方法。按相关标准, 成型 $150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 的立方体试样, 养护 28 d, 每组 5 块, 对同组混凝土试样进行超声波检测, 采用对测法, 试件成型面朝上, 测试面与成型面垂直, 将试块分成上中下三层, 每层 50 mm, 测点布置如图 1 所示。

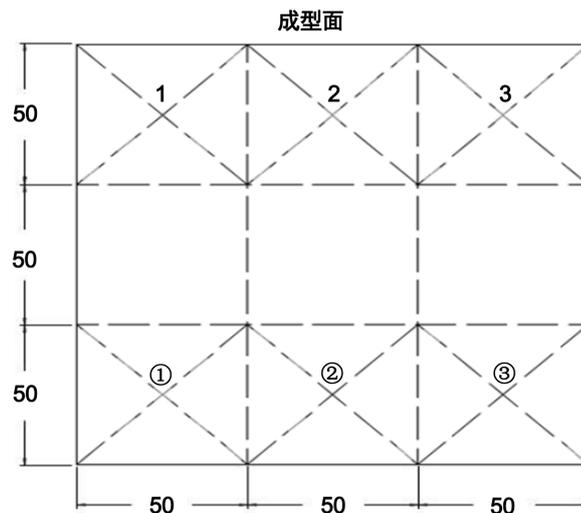


Figure 1. Layout of measuring points for ultrasonic testing specimens of concrete ununiformity
图 1. 混凝土不均匀度超声波检测试件的测点布置图

令 5 块混凝土试块上部的 15 个测点测量到的超声波声速分别为 e_1, e_2, \dots, e_{15} 下部的 15 个测点测量到的超声波声速分别为 E_1, E_2, \dots, E_{15} 。

上下声速均值差为:

$$\alpha = \left| \frac{e_1 + e_2 + \dots + e_{15}}{15} - \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_{15}}{15} \right| \quad (2-1)$$

整体声速的标准差:

$$\gamma = \sqrt{\frac{1}{30} \sum_{i=1}^{30} [(e_i - u)^2 + (E_i - u)^2]} \quad (2-2)$$

式中 μ 为同组 5 块试样上 30 个测点声速的平均值。

为了表征粗骨料在混凝土中分布的均匀性, 本文提出不均匀度的概念, 并定义上下层混凝土声速均值差 α 与整体声速标准差 γ 的乘积为不均匀度 θ , 其计算公式如下:

$$\theta = \alpha \times \gamma \quad (2-3)$$

上下层混凝土声速均值差 α 和整体标准差 γ 的数值越小, 即不均匀度越小, 混凝土均匀性越好。在理想状态下, 混凝土各个部位的声速值无差异, 则不均匀度 θ 为 0。

4. 均匀性对混凝土力学性能的影响

按表 1 的混凝土配合比制备不同流动性和不同振动时间的 8 组 C50 混凝土。标准养护 28 d, 采用超声波检测仪按图 1 方法测试混凝土的超声声速, 并计算不均匀度, 同时测试了混凝土 28 d 的抗折、抗压强度, 试验结果列于表 4 中。

Table 4. The relationship between strength parameters and the parameters of uniformity characterization

表 4. 各强度参数和表征均匀性参数的关系

Specimen item	Slump (mm)	Vibration time (s)	Ununiformity	28d compressive strength (MPa)	28d rupture strength (MPa)	Compressive strength deviation (MPa)
J1	120	10	0.18	57.4	8.4	12.5
J2	160	10	0.10	62.2	9.1	6.7
J3	200	10	0.08	67.0	10.1	2.2
J4	240	10	0.14	55.1	9.2	8.2
Z0	200	0	0.36	52.2	7.1	7.8
Z10	200	10	0.08	67.1	10.1	2.2
Z30	200	30	0.20	60.2	9.1	5.0
Z50	200	50	0.45	55.3	6.4	9.3

表 2 的试验结果表明, 随着减水剂掺量的增加, 混凝土流动性逐步增大; 在相同振动时间(10 s)下, 坍落度由 120 mm 增大到 200 mm 时, C50 混凝土不均匀度逐步减小, 抗压、抗折强度逐步提高, 而且抗压强度偏差也逐步减小; 但当坍落度进一步增大(到 240 mm), 不均匀度明显增大, 抗折、抗压强度降低, 且抗压强度偏差也明显增大。

采用坍落度为 200 mm 的 C50 混凝土和不同的振动时间, 与 Z10 组相比, Z0 组属于漏振, 而 Z30、Z50 属于过振。表 2 的结果表明, 对于 200 mm 的流动性混凝土, 振捣 10 s 较为合适, 漏振和过振组混凝土不均匀性明显增大, 抗压、抗折强度降低, 且抗压强度偏差也明显增大。而随着过振时间的延长, 混凝土力学性能劣化越严重。混凝土抗折强度与抗压强度偏差值和骨料分布均匀性的关系如图 2 所示, 同配比下, 混凝土均匀性越好, 抗折强度越高, 而抗压强度偏差值越低。

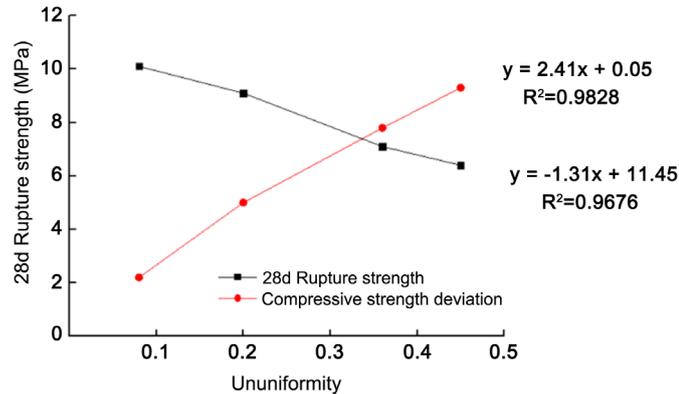


Figure 2. Relationship between deflection strength, compressive strength deviation and ununiformity
图 2. 抗折强度和抗压强度偏差与不均匀度的关系

5. 均匀性对混凝土长期性能和耐久性的影响

5.1. 均匀性对混凝土收缩性能的影响

混凝土收缩变形引起的裂缝约占总裂缝的 70%~80%，控制裂缝产生首先应该控制混凝土结构的收缩变形[6] [7]。研究混凝土的收缩规律，进而采取措施有效地减少或避免混凝土结构裂缝的产生。

为了研究骨料分布的均匀性对混凝土收缩性能的影响，避免其它因素的干扰，使用相同配合比(表 1 中 J3 (Zi)组)和不同的振动时间来进行试验，振动时间分别为 0、10 s、30 s、50 s，其不均匀性分别为 0.36、0.08、0.20 和 0.45 测试了不同均匀性的混凝土干燥收缩率，结果如图 3 所示。

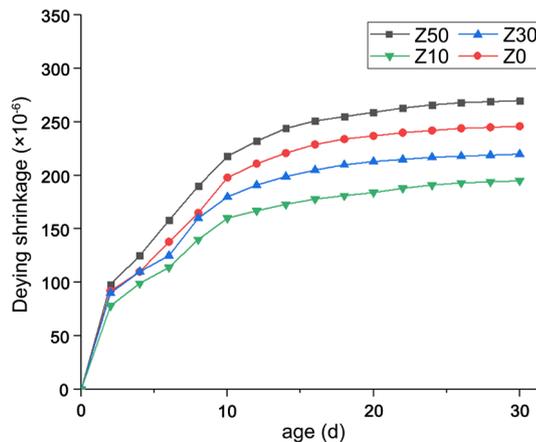


Figure 3. Concrete drying shrinkage curve with different vibration time
图 3. 不同振动时间混凝土的干燥收缩变化曲线

由表 4 和图 3 的试验结果表明，均匀性对混凝土的干燥收缩影响较大。对坍落度为 200 mm 的 C50 混凝土，振动 10 s 时，不均匀度最小，混凝土干燥收缩率也最小；不振动组，不均匀度明显增大，干燥收缩也随之明显增大；当振动时间大于 10 s 时，随振动时间的延长，不均匀度逐渐增加，干燥收缩也逐渐增大，不振动、振动 30 s、振动 50 s 比振动 10 s 的混凝土，其不均匀度分别增大了 3.5 倍、1.5 倍和 4.6 倍，30 d 干燥收缩率分别增大了 16.4%、14.0%和 20%。振动时间过长，粗骨料下沉，混凝土易出现分层和离析泌水现象，水分容易积存于上部砂浆层中，砂浆的收缩率远大于混凝土，且水分逐渐散失，故均匀性差的混凝土干燥收缩率明显增大。

5.2. 均匀性对混凝土抗裂性能的影响

混凝土均匀性较差时,常出现的现象是混凝土中粗骨料下沉,砂浆和净浆上浮。考虑到流动性和振动时间对混凝土均匀性和抗裂性能的影响[8],采用不同流动度和不同振动时间的试验配合比(见表1)进行抗裂性试验。试验结果列于表5中。

Table 5. Cracking properties of concrete with different uniformity

表 5. 不同均匀性的混凝土开裂性能

Specimen item	Slump (mm)	Ununiformity	Average cracking area (mm ² /piece)	Per unit crack number (piece/m ²)	Per unit total cracking area (mm ² /m ²)
J4	240	0.14	28	20.8	590
Z0	200	0.36	9	16.7	149
Z10	200	0.08	5	8.3	43
Z30	200	0.20	11	23.2	315
Z50	200	0.45	19	25.0	486

表5中试验结果表明,混凝土骨料分布的均匀性对其抗塑性开裂性能的影响很大。不均匀度越小,混凝土抗裂性越好(Z10组)。其每条裂缝的平均开裂面积、单位面积的裂缝数目和单位面积的总开裂面积各指标值均最小;当混凝土流动性过大(J4组),或不振捣(Z0组)时,混凝土不均匀度增大,其抗裂性明显变差,J4组、Z0组与Z10组相比,其单位面积上的总开裂面积分别增大12.75倍和2.5倍;当混凝土过振时,随振捣时间的延长,不均匀度增大,抗裂性随之逐步变差。坍落度为200 mm的C50混凝土振动时间为30 s、50 s时,其单位面积总开裂面积比Z10组分别增大6.3倍和10.3倍。由此可见,骨料分布的均匀性的确影响混凝土的开裂程度,均匀性越好的混凝土单位开裂面积越小,即抗裂性能越好。

5.3. 均匀性对混凝土抗渗性能的影响

影响混凝土耐久性的各种破坏过程几乎都与水密切相关,混凝土的劣化是由于外部侵蚀性介质和水侵入混凝土内部而造成的,因此,混凝土的抗渗性是评价混凝土耐久性的重要指标[9][10]。

按照表1中配合比J3(Zi)组配制4组混凝土,坍落度均为200 mm,采用不同振动时间0、10 s、30 s、50 s,成型长度为200 mm、直径为100 mm的圆柱体试件,标准养护28 d,按上部、中部、下部切割成一组3块,测试混凝土的氯离子渗透系数,计算不同振动时间成型的试件的氯离子渗透系数平均值和整体标准差,试验结果列于表6中。

Table 6. Chloride permeability coefficient of concrete with different uniformity

表 6. 不同均匀性混凝土的氯离子渗透系数

Specimen item	Ununiformity	Vibration time (s)	Average (10 ⁻¹² m ² /s)	Total standard deviation (10 ⁻¹² m ² /s)
Z0	0.36	0	8.12	1.33
Z10	0.08	10	7.39	0.35
Z30	0.20	10	8.04	1.04
Z50	0.45	30	7.87	2.64

表6的试验结果表明,混凝土中骨料分布的均匀性对其抗氯离子渗透有着很大的影响。对坍落度为200 mm的C50混凝土,Z10组混凝土,振动时间(10 s)与其流动度相适应,整体均匀性良好,且结构密

实,因此渗透系数最低,同时氯离子渗透系数离散性很小。不振动(漏振)和过振的混凝土,其不均匀度明显增大,而抗氯离子的渗透性能也明显变差。不振动的 Z0 组混凝土氯离子渗透系数明显增大,其标准差比 Z10 组增大了 2.8 倍;当振动时间过长,混凝土氯离子渗透系数也明显增大,其整体标准差随振动时间的延长和不均匀度增大而明显增大。与抗渗性能最好的 Z10 组混凝土相比,Z30 组混凝土渗透系数标准差增大了 2 倍,Z50 组混凝土渗透系数标准差增大了 6.5 倍,其离散性最大。这说明振动时间越长,均匀性越差。Z0 组混凝土未振动,由于内部孔隙太多,而且很多是连通孔和大孔,导致渗透系数最大。而所以均匀性越好的混凝土其抗渗能力越强,即耐久性越好。

6. 结论

1) 提出了混凝土中骨料分布均匀性的测试和表征新方法,定义混凝土试件(或构件)上下部位的声速均值差和整体标准差的乘积为混凝土中骨料分布的不均匀度。混凝土不均匀度越小,其均匀性越好。测试上下层混凝土超声声速并计算其不均匀度,可用于研究和评定混凝土的性能和质量。

2) 混凝土中骨料分布的均匀性直接影响到混凝土强度和耐久性。随着混凝土中骨料分布的不均匀度增大,混凝土的抗压强度、抗折强度均逐渐降低,混凝土抗压强度偏差值明显增大;混凝土干燥收缩率增大、抗裂性明显变差,氯离子渗透系数及其整体标准差明显增大,混凝土耐久性降低。

3) 混凝土的流动性和振动时间对骨料分布的均匀性影响很大,过大的流动性不但会增加材料成本,而且还增大了混凝土中骨料分布的不均匀度;流动性不同的混凝土应选择相适应的振动时间,漏振或过振都会增大混凝土的不均匀性,劣化结构混凝土的性能。

基金项目

2016 江苏省级建筑产业现代化科技支撑项目;中交一公局苏州分公司苏州过街天桥项目。

参考文献

- [1] 唐建华,蔡基伟,周明凯.高性能混凝土的研究与发展现状[J].国外建材科技,2006,27(3):11-15.
- [2] 白雪梅,白永辉,张鸣.混凝土匀质性及其长期性能的关系研究[J].山东建材,2008,29(5):21-26.
- [3] 赵艳君,赵海洋.混凝土开裂的原因和预防[J].建筑工程技术与设计,2014(20):724,817.
- [4] 马彪.大流动性混凝土均匀性控制与抗裂技术研究[D]:[硕士学位论文].南京:东南大学,2017.
- [5] 徐双利.超声波声时判断混凝土的密实性与均匀性[J].辽宁省交通高等专科学校学报,2013,15(4):70-73.
- [6] 冯浩.超高性能混凝土早期塑性收缩开裂的研究[D]:[硕士学位论文].长沙:湖南大学,2014.
- [7] Shen, D., Jiang, J., Shen, J., Yao, P.P. and Jiang, G.Q. (2016) Influence of Curing Temperature on Autogenous Shrinkage and Cracking Resistance of High-Performance Concrete at an Early Age. *Construction & Building Materials*, **103**, 67-76. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.039>
- [8] 周小菲.混凝土抗开裂性能的评价方法与影响因素研究[D]:[硕士学位论文].北京:清华大学,2011.
- [9] 罗睿,蔡跃波,王昌义.磨细矿渣净浆和砂浆结合外渗氯离子的性能[J].建筑材料学报,2001,4(2):148-153.
- [10] Tang, Y.J., Zuo, X.B., He, S.L., Ayinde, O. and Yin, G.-J. (2016) Influence of Slag Content and Water-Binder Ratio on Leaching Behavior of Cement Pastes. *Construction & Building Materials*, **129**, 61-69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.11.003>

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择：[ISSN]，输入期刊 ISSN：2326-3458，即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入，输入文章标题，即可查询

投稿请点击：<http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱：hjce@hanspub.org