

Influence of Mix Proportion Parameters on Cracking Performance of Box Girder Concrete

Yu Xiong^{1*}, Guangying Miao², Fei Guo³, Honggen Qin^{1#}

¹School of Materials Science and Engineering, Southeast University, Nanjing Jiangsu

²Qinghai Highway Construction Authority, Xining Qinghai

³Jiangsu SuBoTe New Materials Co., Ltd., Nanjing Jiangsu

Email: *1139129602@qq.com, #qinhonggen@seu.edu.cn

Received: Jul. 8th, 2016; accepted: Jul. 22nd, 2016; published: Jul. 28th, 2016

Copyright © 2016 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

Abstract

A large number of engineering examples show that plastic shrinkage and drying shrinkage are the main reasons for the cracks of box girder concrete. This article studies the influence of mix proportion parameters on the cracking performance of box girder concrete, such as the water binder ratio, sand ratio, water unit content, the amount of admixture, etc., puts forward the mixture ratio design method of improving plastic shrinkage and dry shrinkage crack resistance: appropriately reducing the water cement ratio, the sand rate and the water consumption, and optimizing gradation and evaluates the influence degree of parameters on concrete cracking and its order is: the fluidity of the mixture, the water unit consumption, water binder ratio, sand ratio and aggregate gradation.

Keywords

Box Girder Concrete, Mix Proportion Parameter, Plastic Cracking, Ring Dry Cracking

配合比参数对箱梁混凝土开裂性能的影响

熊羽^{1*}, 苗广营², 郭飞³, 秦鸿根^{1#}

¹东南大学材料科学与工程学院, 江苏 南京

*第一作者。

#通讯作者。

²青海省公路建设管理局, 青海 西宁

³江苏苏博特新材料股份有限公司, 江苏 南京

Email: *1139129602@qq.com, *qinhonggen@seu.edu.cn

收稿日期: 2016年7月8日; 录用日期: 2016年7月22日; 发布日期: 2016年7月28日

摘要

大量工程实例表明, 塑性收缩与干燥收缩是导致箱梁混凝土裂缝产生的主要原因。本文研究了水胶比、砂率、单位用水量、外加剂掺量等配合比参数对箱梁混凝土开裂性能的影响, 提出了提高抗塑性收缩和干燥收缩开裂性能配合比设计方法: 适当减小水胶比、降低砂率、减少单位用水量和优化级配, 并评估了各个配合比参数对混凝土开裂性的影响程度, 排序为拌合物流动性、单位用水量、水胶比、砂率和骨料级配。

关键词

箱梁混凝土, 配合比参数, 塑性开裂, 圆环干燥开裂

1. 引言

预应力混凝土箱梁有抗扭刚度大、整体性强、能提供足够的混凝土受压面积等很多优点, 因此在我国桥梁建设中应用广泛[1]。预应力混凝土箱梁由于其体积大、板壁薄、配筋密集, 一般采用 C50 高性能混凝土泵送施工, 其特点是流动性大, 胶凝材料用量和砂率高, 因此, 通常会有较大的收缩并易产生收缩裂缝。实际工程表明, 即使是肉眼不可见的微裂缝, 对高性能混凝土结构耐久性的负面影响依然显著, 使高性能混凝土达不到预期的使用寿命和预先设计的高耐久性[2]。混凝土收缩是产生裂缝的主要原因[3]。为了保证箱梁结构的使用寿命和耐久性, 很多学者对高性能混凝土收缩抗裂性能进行了多方面的研究[4]-[6]。对于实际工程施工来说, 配制早期塑性收缩和干燥收缩小, 水分散失少的高性能混凝土具有极其重要的现实意义[7]。为此, 本文全面地对水胶比、砂率、单位用水量、新拌混凝土的流动性等配合比参数对 C50 箱梁混凝土开裂性能的影响规律进行研究。

2. 原材料与试验方法

2.1. 原材料

2.1.1. 胶凝材料

水泥采用海螺 P-II 52.5 水泥, 密度为 3110 kg/m^3 , 比表面积为 $309 \text{ m}^2/\text{kg}$, 28 d 抗压强度为 59.5 MPa; 采用 I 级粉煤灰, 需水量比为 92.3%, 细度为 8.3% (45 μm 筛)。胶凝材料的化学成分见表 1。

2.1.2. 骨料

细骨料采用 II 类天然河砂, 砂表观密度为 2610 kg/m^3 , 堆积密度 1580 kg/m^3 , 细度模数 2.75, 含泥量 0.6%, 泥块含量 0.2%; 粗骨料选用 5~16 mm 与 5~25 mm 两个级配的石灰岩碎石按 2:8 进行复配, 表观密度为 2750 kg/m^3 , 堆积密度 1450 kg/m^3 , 针片状含量 6.8%, 压碎值指标 8.5%, 含泥量 0.3%, 泥块含量 0.1%。优化之后的骨料空隙率为 40.0%, 比按 2:8 复配 47.7% 的要小。

2.1.3. 外加剂

选用苏博特产的 PCA-I 型聚羧酸高性能减水剂, 减水率为 28%。

2.2. 试验方法

混凝土早期塑性开裂性能根据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法》GB/T 50082-2009 进行。试验在恒温恒湿的环境箱中进行,为了便于比较,在风速和时间不变的情况下,将环境箱温度提高到 30℃。混凝土圆环干缩开裂参照《测定砂浆和混凝土在限制收缩下破裂老化及感应拉应力的试验方法》ASTM C1581M-09a 进行。

3. 实验结果与分析

3.1. 箱梁混凝土配合比设计

为了研究配合比参数对箱梁混凝土抗裂性能的影响规律,本文设计了不同水胶比、砂率、单位用水量、减水剂掺量及骨料级配等 10 组 C50 混凝土,试验配合比设计列于表 2 中。

3.2. 水胶比对混凝土抗裂性能的影响

3.2.1. 水胶比对混凝土早期抗裂性能的影响

对水胶比 0.36、0.33、0.30 的三组 C50 箱梁混凝土试件进行平板塑性收缩开裂试验,试验结果列于表 3 中。

试验结果表明,随着水胶比减小,每条裂缝的平均开裂面积和裂缝总面积降低,前者 0.33、0.30 水胶比混凝土分别比 0.36 水胶比混凝土降低了 32.8%、55.1%,后者水胶比 0.33、0.30 比水胶比 0.36 混凝土分别相对减小了 25.7%、43.3%,即单位面积上裂缝的总开裂面积随水胶比减小而减小;但水胶比 0.33、

Table 1. Chemical composition of cementitious materials (%)

表 1. 胶凝材料的化学成分(%)

Chemical composition	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SO ₃	P ₂ O ₅	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	TiO ₂
Cement	56.3	22.4	8.5	3.10	4.20	4.65	0.56	0	-	-
Fly ash	1.31	57.82	31.96	3.07	0.23	0.25	1.03	0.30	2.68	1.25

Table 2. Concrete mix ratio of C50 box girder

表 2. C50 箱梁混凝土试验配合比

Group	Mix ratio parameter				Quality of raw materials per square concrete (kg/m ³)					
	W/B	S _p %	FA%	PCA%	W	C	FA	S	G	PCA-1
JZ	0.33	38	15	0.85	156	402	71	691	1128	4.02
WB30	0.30	38	15	1.0	153	433	77	678	1106	5.10
WB36	0.36	38	15	0.60	159	374	66	703	1147	2.64
Sp35	0.33	35	15	1.1	156	402	71	637	1182	5.20
Sp41	0.33	41	15	0.9	156	402	71	746	1073	4.26
W141	0.33	38	15	1.1	141	362	64	715	1167	4.69
W171	0.33	38	15	0.7	171	439	78	670	1093	3.62
JP	0.33	38	15	0.8	156	402	71	691	1128	3.78
GY	0.33	38	15	0.6	156	402	71	691	1128	2.84
MJ	0.33	38	15	1.0	156	402	71	691	1128	4.73

注: JZ 为流动性混凝土; JP 为骨料最优级配的混凝土; GY 为低坍落度的塑性混凝土; MJ 为产生离析、泌水现象的大流动混凝土。

0.30 混凝土单位面积的裂缝数目有所增加,说明随着水胶比的降低,混凝土的粗裂缝减少,细裂缝增多,裂缝细化。这是由于随着水胶比的减小,粒子之间的相对距离减小,虽然毛细管压力较大,但在较小粒子间距下,塑性收缩仅能产生相对较小的压密作用。并且水胶比较高时,整体性和粘聚性较差,产生的塑性沉降较大。同时,水胶比减小时,水泥化学减缩量也随着水胶比的减小而减小。

3.2.2. 水胶比对圆环收缩开裂的影响

WB30、JZ、WB36 三组不同水胶比的混凝土圆环抗裂试验结果如图 1,随着龄期的增加,混凝土环的应变增加,并且早期增加较快,但是后期增加幅度减小,应变逐渐趋于稳定。WB30、JZ、WB36 组混凝土环 33 d 干燥应变值分别为 242×10^{-6} 、 461×10^{-6} 、 746×10^{-6} ,随着水胶比的增大,混凝土环的应变增大,水胶比 0.33 和 0.36 的混凝土环应变比水胶比 0.30 的混凝土环分别增加了 90%、208%。由于水胶比越大,混凝土浆体中孔隙越多,基体密度越差,越容易失水,表现混凝土环应变增大。

3.3. 其他配合比参数对混凝土抗裂性能的影响

3.3.1. 其他不同配合比参数对混凝土塑性抗裂性能的影响

制备了不同砂率、单位用水量和优化骨料级配的混凝土试件进行平板塑性收缩开裂试验,平板开裂试验结果列于表 4 中。

试验结果表明,随着砂率和单位用水量的增大,箱梁混凝土的单位面积上总开裂面积、最大裂缝宽度、单位面积上裂缝数目及每根裂缝平均开裂面积均增大。SP41 组混凝土比 SP35 组单位面积上总开裂面积、单位面积上裂缝数目、最大裂缝宽度、每根裂缝平均开裂面积分别增加了 59.6%、24.9%、50.0%、

Table 3. Test results of plastic cracking of concrete with different water binder ratios

表 3. 不同水胶比混凝土的塑性开裂试验结果

Group	W/B	Cracking area (mm ²)	Number of cracks (条)	The maximum width of cracks (mm)	Average cracking area A (mm ² /条)	The number of cracks in unit area B (条/m ²)	Total area of the cracks in the unit area C (mm ² /m ²)
WB36	0.36	370.2	19	0.32	9.74	40	386
JZ	0.33	274.9	21	0.24	6.55	44	286
WB30	0.30	210.0	24	0.24	4.38	50	219

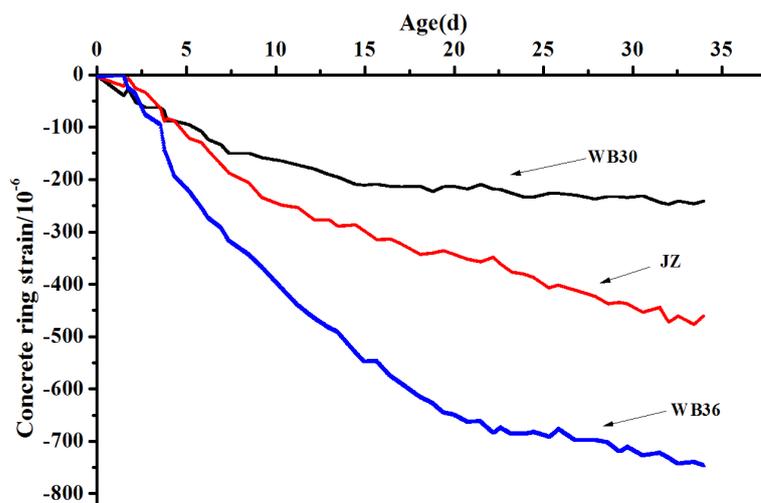


Figure 1. Effect of water binder ratio on ring strain of box girder concrete

图 1. 水胶比对箱梁混凝土环应变的影响

Table 4. Test results of plastic cracking of concrete with different mix ratio parameters
表 4. 不同配合比参数下混凝土的塑性开裂试验结果

Group	Cracking area (mm ²)	Number of cracks (条)	The maximum width of cracks (mm)	Average cracking area A (mm ² /条)	The number of cracks in unit area B (条/m ²)	Total area of the cracks in the unit area C (mm ² /m ²)
JZ	274.9	21	0.24	6.54	44	286
Sp35	211.6	20	0.20	5.29	42	220
Sp41	337.6	25	0.30	6.75	52	352
W141	231.9	18	0.20	6.44	38	242
W171	395.4	30	0.40	6.59	63	412
JP	194.1	22	0.20	4.41	46	202

27.6%。因为砂率的增大，混凝土中的细集料含量增加，粗集料减小，砂浆含量多，粗集料之间的浆体过渡层明显变多，抵抗塑性变形的能力下降。W171 组混凝土最大裂缝宽度比 W141 增加了一倍，并且单位用水量从 141 kg/m³ 增加到 171 kg/m³，混凝土单位面积裂缝数目和单位面积上总开裂面积分别增加了 66.7%、70.5%，但每根裂缝的平均开裂面积随单位用水量变化不明显。在水胶比一定的情况下，随着单位体积用水量增加，混凝土浆体含量增大，集料含量相对减少，孔隙率增大，水泥化学减缩增大。同时，单位用水量增大，混凝土内部骨料对毛细孔的连通性阻断减弱，泌水通道增多，混凝土的塑性收缩应力相对增大，进一步加速了混凝土的塑性开裂风险。

优化骨料级配后，混凝土的每条裂缝平均开裂面积由原来的 6.55 mm²/条减小到 4.41 mm²/条，减小了 32.6%。同时，单位面积上总开裂面积从 286 mm²/m² 降低到 202 mm²/m²，降低了 29.4%。由于优化骨料级配后，粗骨料的堆积密度增大，骨料内部空隙率减小，起骨架支撑作用的粗骨料增多，更有利于发挥各级骨料的中心质网络结构的骨架作用，充分抑制了混凝土的塑性收缩，从而减小混凝土塑性开裂风险。

3.3.2. 其他配合比参数对混凝土干燥收缩开裂的影响

砂率、单位用水量以及优化骨料级配对箱梁 C50 混凝土环应变影响如图 2、图 3 和图 4。

试验结果表明，由于混凝土表面出现微裂纹，收缩应力释放，混凝土环应变均未出现明显的突变点，未发生可见裂纹，但随着时间的延长，混凝土环应变逐渐增大。砂率从 35% 增加至 38%、41% 时，混凝土环应变分别增加了 62.9%、128%。由于砂率增加，混凝土中的细集料用量增大，砂浆体积相对增大，粗集料间的浆体过渡多，抵抗干燥收缩变形能力降低。单位用水量从 141 kg/m³ 增加到 156 kg/m³、171 kg/m³ 时，混凝土环的应变值分别增加了 41%、81%。相同水胶比情况下，增加单位用水量，实际相当于减小混凝土中骨料的体积，增大了混凝土中可收缩相的体积，减弱了骨料对收缩的限制作用，缩短了水分在水泥石中湿扩散行程，加速混凝土的干燥收缩。优化骨料级配后，箱梁混凝土圆环的干燥应变减小了 29.1%。骨料的堆积密度增加，空隙率减小，粗骨料在混凝土内部能够更好发挥骨架作用，限制混凝土因收缩而产生的应变。提高了混凝土的干燥收缩抗裂性能。

3.4. 新拌混凝土流动性对混凝土抗裂性能的影响

通过改变外加剂掺量制备的低坍落度塑性混凝土、流动性混凝土、产生离析和泌水现象的大流动性混凝土，对各组 C50 混凝土进行大平板塑性收缩开裂试验，试验结果列于表 5 中。

减水剂有基准组 0.85% 增大到 1%，混凝土拌合物坍落度由 200 mm 增大到 230 mm，并出现离析泌水现象；当减水剂减少到 0.6% 时混凝土拌合物坍落度减小到 100 mm，单位面积总开裂面积和裂缝条数

Table 5. Test results of cracking of concrete with different working properties
表 5. 不同工作性混凝土的开裂试验结果

Group	PCA (%)	Slump (mm)	Cracking area (mm ²)	Number of cracks (条)	The maximum width of cracks (mm)	Average cracking area A (mm ² /条)	The number of cracks in unit area B (条/m ²)	Total area of the cracks in the unit area C (mm ² /m ²)
GY	0.6	90	238.2	12	0.40	9.25	25	231
JZ	0.85	220	274.9	21	0.24	6.55	44	286
MJ	1.0	230	419.2	42	0.20	4.99	88	437

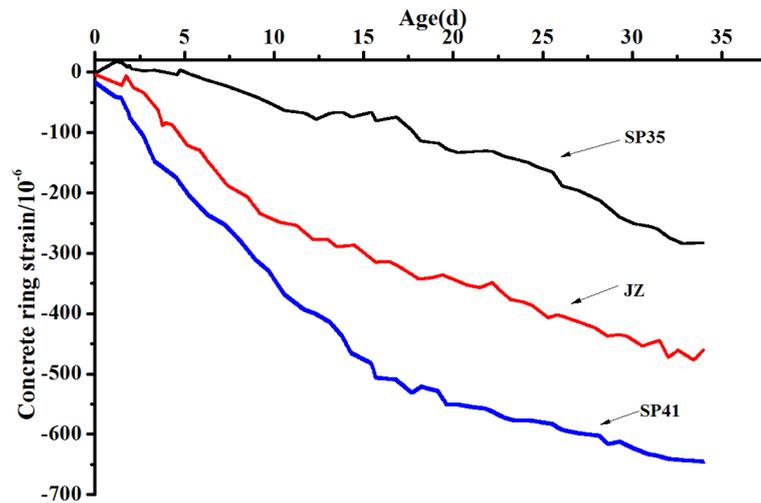


Figure 2. Effect of sand ratio on ring strain of box girder concrete
图 2. 砂率对箱梁混凝土环应变的影响

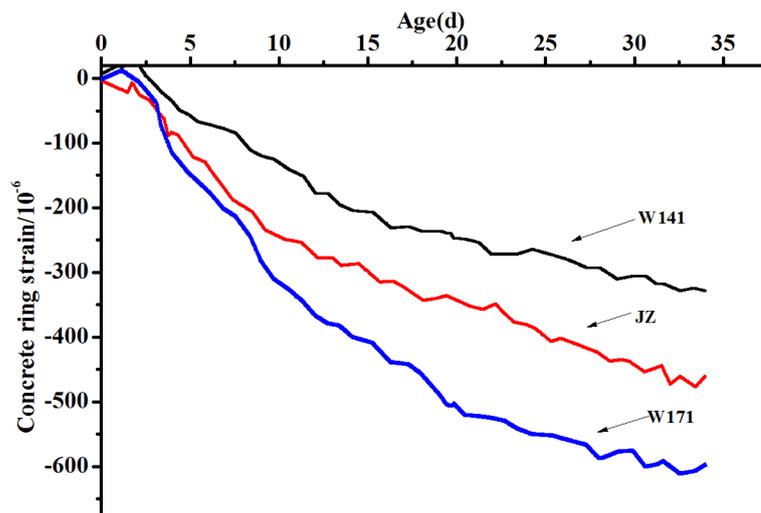


Figure 3. Effect of unit water consumption on ring strain of box girder concrete
图 3. 单位用水量对箱梁混凝土环应变的影响

前者增加了 52.8% 和 100%，后者减小了 19.2% 和 76%。虽然随着混凝土流动性增大，裂缝的条数显著增多，但最大裂缝宽度和平均每条裂缝的开裂面积减小。随着减水剂掺量增大和混凝土流动性的增大，混凝土的沉降加大，匀质性变差，早期塑性收缩加大，越容易产生塑性收缩开裂。因此在满足施工要求的情况下适当减小坍落度，不但可以节约成本，还能改善混凝土的抗裂性能。

圆环干燥收缩抗裂的试验结果见图 5, GY、JZ、MJ 组混凝土环的 33 d 应变分别为 265×10^{-6} 、 461×10^{-6} 、 594×10^{-6} 。随着减水剂掺量增加, 拌合物的流动性增大, 混凝土环的应变也增大, JZ 和 MJ 组混凝土 33 d 的应变比 GY 组混凝土分别增加了 74%、124%。塑性混凝土虽然表面毛细管水压力发展较快, 可以较早产生塑性收缩, 但其颗粒间距较小, 可压缩空间减小, 降低了混凝土环的应变。

3.5. 不同配合比参数对混凝土开裂程度的影响

不同配合比参数对混凝土开裂性能指标的极差分析结果列于表 6 中。试验结果表明, 水胶比对平均开裂面积影响最大, 其次是减水剂掺量, 然后是骨料级配, 接着是砂率, 最后是单位用水量。而影响单位面积的裂缝条数最大的影响因素为减水剂掺量, 其次是单位用水量, 然后是砂率, 接着是水胶比, 最后是骨料级配。评定混凝土抗裂性能好坏的关键性指标为单位面积的裂缝总面积, 所以混凝土配合比参数对其抗裂性能有重要影响, 其因素排序为新拌混凝土的流动性、单位用水量、水胶比、砂率和骨料级配。在高性能混凝土配合比设计中要充分考虑到这些配合比参数对混凝土抗裂性能的影响。

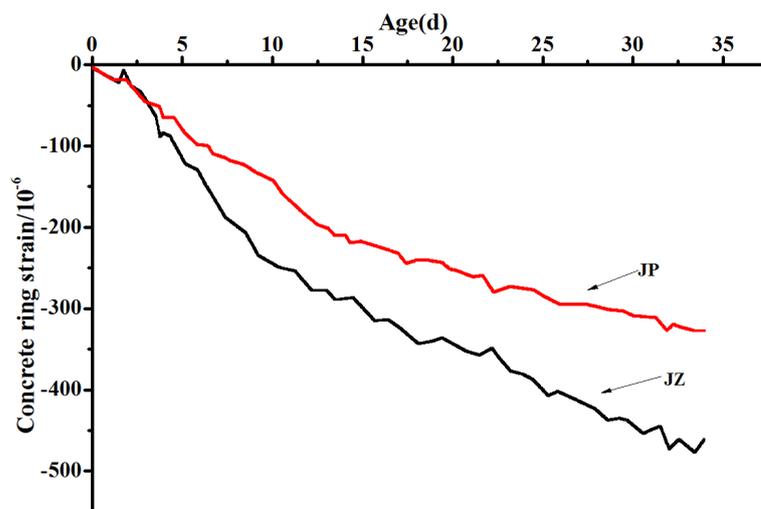


Figure 4. Effect of aggregate gradation on ring strain of box girder concrete
图 4. 骨料级配对箱梁混凝土环应变的影响

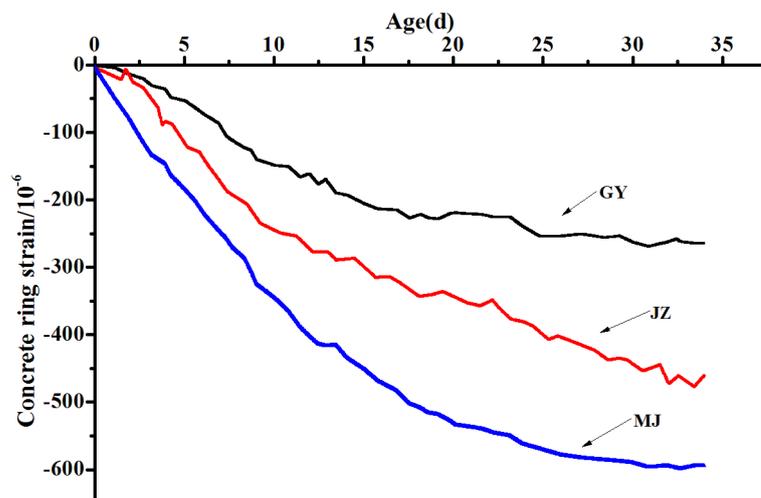


Figure 5. Effect of liquidity on ring strain of box girder concrete
图 5. 流动性对箱梁混凝土环应变的影响

Table 6. Range analysis of various factors on concrete cracking performance index
表 6. 各种因素对混凝土开裂性能指标的极差分析

Factors	The maximum width of cracks (mm)	Average cracking area A (mm ² /条)	The number of cracks in unit area B (条/m ²)	Total area of the cracks in the unit area C (mm ² /m ²)
W/B	0.08	5.36	10	167
Sp	0.10	1.46	11	132
W	0.10	0.15	25	170
PCA	0.20	4.26	63	206
Gradation	0.04	2.14	2	84

4. 结论

通过配合比参数对 C50 箱梁混凝土开裂性能的影响规律的研究, 得出如下结论:

1) 在一定范围内, 减小水胶比能够使最大裂缝宽度减小, 而条数有所增加, 裂缝细化, 混凝土开裂面积明显减少, 这表明适当减小水胶比可提高混凝土的抗裂性能。

2) 在单位用水量一定的条件下, 适当减少减水剂掺量, 控制混凝土拌合物流动性, 对提高混凝土抗裂性有利。

3) 影响混凝土开裂程度的因素由大到小的排序为: 拌合物流动性、单位用水量、水胶比、砂率和骨料级配。

4) 采用适当减小水胶比、减少单位用水量、降低砂率、优化粗骨料级配和控制混凝土流动性等技术措施, 可显著提高混凝土抗塑性收缩开裂和干燥收缩开裂性能, 这也是箱梁高性能混凝土配合比设计的基本原则。

基金项目

青海省科学技术厅高新技术研究与发展计划项目(2014-GX-209)。

参考文献 (References)

- [1] 夏京亮, 李北星, 柯国炬, 等. C55 大跨箱梁混凝土配合比设计与抗裂评估[J]. 建材世界, 2009, 30(3): 21-24.
- [2] Plank, J., Sakai, E., Miao, C.W., Yu, C. and Hong, J.X. (2015) Chemical Admixtures—Chemistry, Applications and Their Impact on Concrete Microstructure and Durability. *Cement & Concrete Research*, **78**, 81-99. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.05.016>
- [3] 李晓宁. 预应力钢筋混凝土连续刚构箱梁裂缝处理措施[J]. 山西建筑, 2006(22): 340-341.
- [4] Shi, C.J., Wu, Z.M., Xiao, J.F., Wang, D.H., Huang, Z.Y. and Fang, Z. (2015) A Review on Ultra-High Performance Concrete: Part I. Raw Materials and Mixture Design. *Construction & Building Materials*, **101**, 741-751. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- [5] Shen, D.J., Jiang, J.L., Shen, J.X., 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. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.039>
- [6] 王运金, 李北星, 唐凯, 等. 超宽箱梁抗裂混凝土配合比试验研究[J]. 桥梁建设, 2012, 42(4): 58-63.
- [7] 景强, 丁庆军, 高纪宏. 大跨箱梁抗裂混凝土配合比优化设计[J]. 武汉理工大学学报, 2008, 30(4): 32-35.

期刊投稿者将享受如下服务：

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

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