

DOI: 10.11830/ISSN.1000-5013.202203056



地铁车站叠合墙抗渗防裂混凝土 配合比优化与应用

郭雅峰¹, 陈士海¹, 杨宗桦¹, 李少波², 陈春超¹, 罗小峰²

(1. 华侨大学 土木工程学院, 福建 厦门 361021;

2. 厦门轨道交通集团, 福建 厦门 361010)

摘要: 针对地铁车站叠合墙的开裂渗水问题, 为提高混凝土抗渗防裂性能, 开展混凝土配合比设计优化。首先, 基于混凝土配合比设计规程, 对混凝土配合比中多个因素进行正交试验设计法筛选, 并对混凝土的粗骨料级配进行优化。然后, 选择绝热温升最低的混凝土配合比, 掺入混凝土外加剂 DHZ 复合液, 经混凝土和易性试验, 确定外加剂最佳掺量, 得到混凝土最优配合比。最后, 开展混凝土性能试验与地铁车站叠合墙裂缝现场监测分析。结果表明: 经配合比优化并掺入 DHZ 复合液的混凝土能够减少大体积混凝土裂缝的产生, 具有良好的抗渗防裂能力。

关键词: 大体积混凝土; 叠合墙内衬墙; 地铁车站; 抗渗防裂; 绝热温升

中图分类号: U 455.452; U 214.18 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2022)05-0587-09

Optimization and Application of Mix Proportion of Anti-Seepage and Anti-Crack Concrete of Composite Wall of Subway Station

GUO Yafeng¹, CHEN Shihai¹, YANG Zonghua¹,
LI Shaobo², CHEN Chunchao¹, LUO Xiaofeng²

(1. College of Civil Engineering, Huaqiao University, Xiamen 361021, China;

2. Xiamen Rail Transit Group, Xiamen 361010, China)

Abstract: Aiming at the problem of cracking and water seepage of composite wall of subway station, in order to improve the anti-seepage and anti-crack performance of concrete, the mix proportion design optimization of concrete is carried out. Based on the mix proportion design specification of concrete, several factors in the mix proportion of concrete are screened by orthogonal test design method, and the coarse aggregate gradation of concrete is optimized. The mix proportion of concrete with the lowest adiabatic temperature rise is selected, and the concrete admixture DHZ compound liquid is added, through the concrete workability test, the optimal amount of admixture is determined, and the optimal mix proportion of concrete is obtained. The concrete performance test and the in-situ monitoring and analysis of the cracks in the composite wall of the subway station are carried out. The results show that the concrete with optimized mix proportion and DHZ compound liquid

收稿日期: 2022-03-29

通信作者: 陈士海(1964-), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事岩土工程防灾减灾的研究. E-mail: cshblast@163.com.

基金项目: 地铁车站深基坑叠合墙结构设计与施工关键技术研究(厦轨道(合)[2020]0851 号)

can reduce the cracks of mass concrete, and has good anti-seepage and anti-crack ability.

Keywords: mass concrete; lining wall of composite wall; subway station; impermeability and crack prevention; adiabatic temperature rise

随着我国现代化进程的加快,城镇人口不断增加,地上交通日益拥挤,地铁的建设成为解决这个问题 的关键.然而,地铁车站中很多结构由于体积较大、养护困难和地下水环境的特殊性等原因,混凝土结构产生大量水化热,且无法将内部产生的热量及时传导到外界,在热胀冷缩的作用下,出现大量裂缝.裂缝的大小、长短及出现时间不仅与混凝土所处的环境和结构有关,也与混凝土配合比密切相关.因此,在考虑经济性的条件下,优化混凝土配合比,配制性能良好的混凝土是减少混凝土裂缝的产生,提高混凝土抗渗能力的必要条件.

混凝土是一种由骨料、砂浆、界面等组成的多相非均质复合材料,各相间的物质组成对性能有着至关重要的影响.不合适的颗粒级配不仅会增加水泥用量与成本,而且对混凝土的性能产生负面影响^[1].王文璟^[2]基于正交试验,研究原材料类型、水灰比等因素对再生混凝土配合比、混凝土力学性能的影响.李福友等^[3]针对武穴长江公路大桥主桥施工期的早期裂缝控制问题,研究宽箱梁 C55 混凝土配合比及胶凝材料组成对混凝土早期抗裂性、长期收缩徐变性的影响,结果表明,在混凝土中掺入适量粉煤灰、矿粉和高性能外加剂可以有效地降低混凝土的水化热温升,减缓水化放热速率,提高抗塑性收缩开裂性能.Mehta 等^[4]认为粗骨料颗粒与水泥浆体接触面较为薄弱,接触面会出现大量的孔隙和裂缝,故改善骨料配制具有必要性.张义长等^[5]从混凝土原材料方面分析混凝土裂缝的类型和产生原因,发现优化骨料可以有效地减少混凝土收缩和混凝土开裂的情况.在实际工程中,温度收缩和自收缩是导致侧墙混凝土结构在约束下早期收缩开裂的主要原因^[6].现代混凝土应具有高密实度,进而提高混凝土的抗渗性能.通过加入适量的粉煤灰、矿渣和外加剂等减少水化热的产生,浇筑后及时洒水养护,减少混凝土内外温差,最终可减少混凝土裂缝的产生.基于此,本文结合福建省厦门市地铁的杏滨车站叠合墙工况,对地铁车站叠合墙抗渗防裂混凝土配合比进行优化与应用.

1 混凝土配合比的初选

为了保证配置的混凝土具有良好的性能,参照多种规范对水胶比、单位体积用水量和砂率等进行计算和取值.同时,为了降低计算量,采用正交试验法分析典型的混凝土配合比数据.

1.1 相关参数

1) 混凝土配制强度. C40 混凝土的配制强度 $f_{cu,0}$ 的计算公式为

$$f_{cu,0} \geq f_{cu,k} + 1.645\sigma.$$
 (1)

式(1)中: $f_{cu,k}$ 为混凝土设计强度等级,文中取 40 MPa; σ 为混凝土强度标准差.

2) 水胶比.参考普通混凝土配合比的设计原理,水胶比 W/B 的计算公式为

$$W/B = \frac{\alpha_a f_b}{f_{cu,0} + \alpha_a \alpha_b f_b}.$$
 (2)

式(2)中: α_a, α_b 均为回归系数,文中取 $\alpha_a = 0.53, \alpha_b = 0.20$; f_b 为胶凝材料 28 d 胶砂抗压强度.经计算可得,水胶比为 0.41.

3) 单位体积用水量.掺入外加剂时,每立方米混凝土的用水量 $m_{w,0}$ 的计算公式为

$$m_{w,0} = m'_{w,0} (1 - \beta).$$
 (3)

式(3)中: $m'_{w,0}$ 为未掺外加剂时推定的满足实际坍落度要求的每立方米混凝土的用水量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; β 为外加剂的减水率, %.

经计算可得, C40 混凝土单位体积用水量为 $163 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

4) 矿物掺合料用量.每立方米混凝土中矿物掺合料用量 $m_{f,0}$ 的计算公式为

$$m_{f,0} = m_{b,0} \beta_f.$$
 (4)

式(4)中: $m_{b,0}$ 为每立方米混凝土中胶凝材料用量, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; β_f 为矿物掺合料掺量, %.

经计算可得,粉煤灰和矿渣粉掺量分别为 21%, 11%.

5) 砂率. 参考 JGJ 55—2011《普通混凝土设计规范》和 GB 50108—2008《地下工程防水技术规范》, 在满足混凝土抗渗等级的条件下, 砂率 β_s 取 35%~40%, 泵送时可增至 45%.

6) 粗骨料用量. 粗骨料用量 $m_{g,0}$ 的计算公式为

$$m_{g,0}=(\frac{m_{s,0}}{\beta_s}-m_{s,0})\times100\%.$$

(5)

式(5)中: $m_{s,0}$ 为每立方米混凝土的细骨料用量, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

1.2 混凝土配合比的正交试验设计

正交试验设计是研究多因素水平的方法, 它根据正交性从整体中筛选出部分具有代表性的点进行试验. 考虑混凝土水泥用量(m (水泥))、粉煤灰掺量(β (粉煤灰))、砂率(β_s)3 个因素, 每个因素对应 3 个取值进行混凝土配合比组合. 采用正交试验设计, 筛选出最具代表性的配合比组合.

材料正交试验设计因素水平表, 如表 1 所示. 表 1 中: A(水泥用量), B(粉煤灰掺量), C(砂率)分别为 3 个变化因素, 每个因素设置 3 个水平. 基于 3 因素 3 水平的正交试验设计, 选择 $L_9(3^4)$ 正交表, 共得到 9 个试验组. C40 混凝土的正交试验配合比, 如表 2 所示.

表 1 材料正交试验设计因素水平表

Tab. 1 Factor level table of material orthogonal test design

水平	因素		
	A (m (水泥)/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	B (β (粉煤灰)/%)	C (β_s /%)
1	292	21	40
2	287	18	42
3	282	14	43

表 2 C40 混凝土的正交试验配合比

Tab. 2 Orthogonal test mix proportion of C40 concrete

试验组	强度等级	$m(\text{水})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m(\text{水泥})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m(\text{粉煤灰})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m(\text{矿渣粉})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m(\text{砂})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	$m(\text{石})/\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$	W/B	$\beta_s/\%$
1	C40P10	163	292	90	51	702	1 052	0.376	40
2	C40P10	163	292	77	64	737	1 017	0.376	42
3	C40P10	163	292	60	81	755	1 000	0.376	43
4	C40P10	163	287	90	51	739	1 020	0.380	42
5	C40P10	163	287	77	64	757	1 003	0.380	43
6	C40P10	163	287	60	81	705	1 055	0.380	40
7	C40P10	163	282	90	51	759	1 005	0.385	43
8	C40P10	163	282	77	64	706	1 059	0.385	40
9	C40P10	163	282	60	81	741	1 023	0.385	42

2 混凝土配合比的优化

粗骨料是混凝土的重要组成部分, 约占普通混凝土体积的 30%~50%. 因此, 粗骨料级配的优化对混凝土的和易性、耐久性和力学性能等具有重要的影响. 首先, 采用连续级配理论对粗骨料级配进行优化. 然后, 根据绝热温升, 对正交试验设计的 9 个试验组进行筛选, 选择绝热温升最低的配合比进行 DHZ 复合液最佳掺量试验, 确定外加剂的最佳掺量.

2.1 粗骨料级配的优化

文献[7-8]在前人研究的基础上提出 Andreasen 和 Andersen 连续级配理论模型, 发现凝结作用中的细颗粒对新拌混凝土的和易性有较大影响, 不可忽视. 因此, 引入有限最小颗粒尺寸^[9]对 Andersen 模型进行修正, 也称为 Alfred 方程^[10].

设 D 为碎石粒径, 小于粒径 D 的累计筛余量 CPFT 为

$$\text{CPFT}=\frac{D^q-D_s^q}{D_L^q-D_s^q}\times100\%.$$

(6)

式(6)中: D_L, D_s 分别为粒径体系中的最大粒径和最小粒径; q 为分布系数, 取值范围为 0.21~0.37, q

越小,混凝土的流动性越大.

由文献[11]可知:将粗骨料假设为理想圆形骨料,可得分布系数 q 与堆积骨料理论孔隙率的关系曲线;当 q 约为 0.37 时,颗粒堆积密度最大.若考虑实际骨料多为不规则石子,则分布系数 q 还需重新确定.为了简化计算,此处不做进一步讨论.经计算可得,混凝土的骨料理论级配为 5~10,5~20,16.0~31.5 mm 的碎石以 2:5:3(质量比)进行掺配.

2.2 混凝土的绝热温升

为了更加全面地分析不同配合比的绝热温升,引入等效龄期^[12]的概念.等效龄期是基于 Arrhenius 方程的成熟度系数提出的,它建立了不同温度历程下混凝土达到相同成熟度所需时间之间的关系.通过等效龄期进行换算,可将任意温度历程下混凝土自身性能的发展历程转化为参考温度下混凝土力学性能的发展历程,从而更加便捷地分析混凝土的绝热温升.

考虑温度和湿度影响的等效龄期 τ_e 的计算公式为

$$\tau_e = \int_0^\tau \psi d\zeta = \int_0^\tau \phi_{T_c} \phi_h d\zeta. \tag{7}$$

式(7)中: ψ 为相对水化速率; ϕ_{T_c} 为依赖于混凝土温度的系数; ϕ_h 为依赖于混凝土湿度的系数; ζ 为时间; τ 为龄期.

水泥水化是一个热驱动的过程, ϕ_{T_c} 的计算公式为

$$\phi_{T_c} = \exp\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right]. \tag{8}$$

式(8)中: T 为实际的绝对温度,根据当地环境温度,文中取 303 K; T_0 为参考温度,一般取 293 K; U_h 为水化活动能,对于混凝土材料^[13],当 $T \geq 239$ K 时, $U_h = 335 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$,当 $T < 239$ K 时, $U_h = [335 + 147 \times (293 - T)]$; R 为气体常数, $R = 8.315 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$;当混凝土温度为 0~100 ℃ 时, U_h/R 约为 2 700 K.

ϕ_h 的计算公式为

$$\phi_h = [1 + (3.5 - 3.5h)^4]^{-1}. \tag{9}$$

式(9)中: h 为混凝土的内部湿度.

大体积混凝土内部的水分通常是不损失的,取 $\phi_h = 1$. 因此,大体积混凝土的等效龄期 τ_e 可表示为

$$\tau_e = \int_0^\tau \exp\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] d\zeta = \sum \exp\left[\frac{U_h}{R}\left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right] \Delta\tau. \tag{10}$$

式(10)中: $\Delta\tau$ 为龄期的变化量.

通过混凝土的绝热温升可筛选正交试验设计的混凝土配合比.绝热温升是指假定边界处于隔热条件下,水泥等材料在硬化过程中水化放热而使混凝土增高的温度.如果混凝土自身产生的热量较少,就可以减少混凝土热胀冷缩产生的裂缝.绝热温升可经实验进行测定,当缺乏直接测定的资料时,混凝土绝热温升的计算公式^[14]为

$$\theta(\tau) = \frac{Q(\tau)(m(\text{水泥}) + \nu F)}{C\rho_c}. \tag{11}$$

式(11)中: $Q(\tau)$ 为水泥水化热; ν 为折减系数,对于粉煤灰, $\nu = 0.25$; F 为矿物掺合料用量; C 为混凝土比热容,文中取 $0.98 \text{ kJ} \cdot (\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})^{-1}$; ρ_c 为混凝土密度,文中取 $2\,400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

水泥水化热依赖于混凝土的龄期,水泥在龄期时累积的水化热的双指数公式为

$$Q(\tau) = Q_0(1 - e^{-a\tau^b}). \tag{12}$$

式(12)中: Q_0 为龄期趋于无穷时的最终水化热, $Q_0 = 330 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; a, b 均为常数, $a = 0.69, b = 0.56$.

当 $\tau = 28 \text{ d}$ 时,计算等效龄期,联立式(10)~(12),可得混凝土的绝热温升.试验组 1~9 的绝热温升分别为 39.66,39.24,38.71,39.03,38.62,38.08,38.40,38.12,37.44 ℃. 因此,采用试验组 9(绝热温升最低)的配合比进行 DHZ 复合液最佳掺量试验.

2.3 外加剂最佳掺量的确定

试验采用的水泥为 P·O42.5 水泥(福建省龙岩市春驰水泥有限公司,比表面积为 $317 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$,初凝时间为 236 min,终凝时间为 295 min);粉煤灰为Ⅱ级粉煤灰(福建省漳州市后石电厂,密度为 $2.36 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,细度为 21.2%, SO_3 的质量分数为 0.58%);矿渣粉为 S95 级磨细矿渣粉(福建省龙海市三钢

集团(龙海)矿微粉有限公司,密度为 $2.90\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,比表面积为 $446\text{ m}^2\cdot\text{kg}^{-1}$,28 d 的活性指数为 100%;机制砂(福建省厦门市鸿铭建材有限公司,细度模数为 2.9,级配区间为中砂Ⅱ区,石粉的质量分数为 4.4%,亚甲蓝(MB)值为 0.75);河砂(福建省厦门市万翔同实业有限公司,细度模数为 2.6,级配区间为中砂Ⅱ区,含泥量为 0.4%);粗骨料(福建省泉州市中轻石材有限公司,采用 5~10,5~20,16.0~31.5 mm 碎石三档级配,针片状颗粒的质量分数为 4%,含泥量为 0.4%)。

随着我国经济的日益发展,为了提高工程质量,外加剂已广泛地应用于建筑行业中,如减水剂、引气剂、缓凝剂、早强剂、膨胀剂等。对比市面上的各种产品,选择 DHZ 复合液(广西南宁市大胡子防水科技有限公司)作为混凝土外加剂。DHZ 复合液是一种具有减水、防水、缓凝、保水、微膨胀和抗裂等功能的复合型外加剂,在国内大中型防水工程中得到了实践应用。DHZ 复合液的减水率为 28%;泌水率比为 32%;密度为 $1.043\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$;氯离子质量分数为 0.01%;含固量为 38.2%;收缩率比(28 d)为 105%;凝结时间差(初凝)为-20%;7 d 抗压强度比为 113%;28 d 抗压强度比为 105%。

文献[15]中外加剂掺量为胶凝材料总量的 0.5%~1.0%,而 DHZ 复合液说明书中的推荐掺量为 0.6%~0.8%,故选取 0.60%,0.65%,0.70%,0.80%等 4 种 DHZ 复合液掺量;混凝土中水、水泥、粉煤灰、矿渣粉、砂、石的用量分别为 163,282,60,81,741,1 023 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ 。由此可确定外加剂最佳掺量试验中 4 个试验组的配合比。5~10,5~20,16.0~31.5 mm 的碎石按 2:5:3(质量比)掺配,机制砂、河砂按 1:1(质量比)掺配。

对 4 个试验组的混凝土和易性(流动性、保水性和粘聚性)进行测试,结果如表 3 所示。表 3 中: s 为坍落度; E 为扩展度; β (DHZ)为 DHZ 复合液掺量。由表 5 可知:当 DHZ 复合液掺量为 0.70%时,混凝土的和易性最佳。

表 3 混凝土和易性试验结果
Tab. 3 Results of concrete workability test

试验组	s/mm	E/mm	和易性			$\beta(\text{DHZ})/\%$
			流动性	保水性	粘聚性	
1	215	465	合格	好	合格	0.60
2	210	410	合格	好	好	0.65
3	220	580	好	好	好	0.70
4	220	610	好	合格	合格	0.80

2.4 混凝土最优配合比的确定

由此可确定混凝土最优配合比,即水、水泥、粉煤灰、矿渣粉、砂、石的用量分别为 163,282,60,81,741,1 023 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$,DHZ 复合液掺量为 0.70%。

3 混凝土性能试验

将掺入 DHZ 复合液的混凝土(试件 T_1)与未掺入 DHZ 复合液的混凝土(试件 T_2)进行混凝土性能试验(强度试验、抗渗试验、抗裂试验和收缩试验),分析二者的性能差异。

3.1 混凝土强度试验

制备尺寸(长×宽×高)为 150 mm×150 mm×150 mm 的试件 $T_{1,\text{st}}$, $T_{2,\text{st}}$,在标准养护室中进行养护。对试件 $T_{1,\text{st}}$, $T_{2,\text{st}}$ 进行强度试验,结果如表 4 所示。表 4 中: σ_7 为 7 d 抗压强度; σ_{28} 为 28 d 抗压强度。

由表 4 可知:试件 $T_{1,\text{st}}$ 的 7 d 抗压强度大于 $T_{2,\text{st}}$;试件 $T_{2,\text{st}}$ 的 28 d 抗压强度略高于试件 $T_{1,\text{st}}$,但是差异不大;两种试件的抗压强度均满足 GB 5017—2010《混凝土强度检验评定标准》的强度要求。

3.2 混凝土抗渗试验

参照 GB/T 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》,对试件 $T_{1,\text{se}}$ (6 个)和试件 $T_{2,\text{se}}$ (6 个)进行抗渗试验。试件的上口直径为 175 mm,下口直径为 185 mm,高为 150 mm。

表 4 试件的强度试验结果

Tab. 4 Strength test results of test pieces

参数	试件	
	$T_{1,\text{st}}$	$T_{2,\text{st}}$
σ_7/MPa	46.4	39.3
σ_{28}/MPa	52.3	53.3

启动混凝土抗渗仪(图 1),对试件进行测试,混凝土抗渗仪每隔 8 h 对试件自动增加 0.1 MPa 水压,直至水压为 1.3 MPa. 试件 $T_{1,se}$ 的加压开始时间为 2021 年 8 月 11 日 12:00,加压结束时间为 2021 年 8 月 15 日 20:00;试件 $T_{2,se}$ 的加压开始时间为 2021 年 8 月 11 日 12:10,加压结束时间为 2021 年 8 月 15 日 20:10. 采用混凝土抗渗仪自动加压至 1.3 MPa 后,试件 $T_{1,se}$ 、 $T_{2,se}$ 均未出现渗水情况. 参照 GB 50164—2011《混凝土质量控制标准》,试件 $T_{1,se}$ 、 $T_{2,se}$ 的抗渗等级均大于 P12,满足抗渗等级 P10 的要求,表明试件具有较高的密实度,抗渗性能良好.

3.3 混凝土抗裂试验

根据 GB/T 50082—2009《混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》和《客运专线高性能混凝土暂行技术条件》中的圆环约束试件法相关规定,对试件 $T_{1,cr}$ (2 个,编号分别为 $T_{1,cr,1}$ 、 $T_{1,cr,2}$) 和试件 $T_{2,cr}$ (2 个,编号分别为 $T_{2,cr,1}$ 、 $T_{2,cr,2}$) 进行抗裂试验. 试件的尺寸(外圆周长×内圆周长×高)为 425 mm×305 mm×100 mm. 从加水搅拌到龄期(28 d)的时间范围内,对试件进行每日观察,并记录试件开裂情况. 硬化前后的试件,分别如图 2 所示.



(a) 硬化前 (b) 硬化后图 2 硬化前后的试件

Fig. 2 Test piece before and after hardening

试件的抗裂试验结果,如表 5 所示. 表 5 中: l 为裂缝长度; w 为裂缝宽度. 由表 5 可知:试件 $T_{1,cr}$ 产生的裂缝时间比试件 $T_{2,cr}$ 晚 6 d,试件 $T_{1,cr}$ 产生的裂缝数量比试件 $T_{2,cr}$ 多 19 条,试件 $T_{1,cr}$ 的裂缝宽度为 0.15~0.20 mm,试件 $T_{2,cr}$ 的裂缝宽度为 0.09~1.20 mm. 这说明加入 DHZ 复合液可以减少混凝土裂缝的产生,并提高混凝土的抗裂性能.

表 5 试件的抗裂试验结果

Tab. 5 Anti-crack test results of test pieces

试件	裂缝	出现日期	l/cm	w/mm	试件	裂缝	出现日期	l/cm	w/mm
$T_{1,cr,1}$	第 1 条	2021-08-10	2.50	0.15	$T_{2,cr,1}$	第 11 条	2021-08-11	4.00	1.00
$T_{1,cr,1}$	第 2 条	2021-08-11	4.90	0.18	$T_{2,cr,1}$	第 12 条	2021-08-12	3.10	1.10
$T_{1,cr,2}$	第 1 条	2021-08-12	4.00	0.19	$T_{2,cr,2}$	第 1 条	2021-08-04	3.00	0.09
$T_{1,cr,2}$	第 2 条	2021-08-12	2.40	0.20	$T_{2,cr,2}$	第 2 条	2021-08-06	2.50	0.15
$T_{2,cr,1}$	第 1 条	2021-08-04	2.50	0.10	$T_{2,cr,2}$	第 3 条	2021-08-06	3.00	0.18
$T_{2,cr,1}$	第 2 条	2021-08-04	5.00	0.10	$T_{2,cr,2}$	第 4 条	2021-08-06	3.50	0.15
$T_{2,cr,1}$	第 3 条	2021-08-06	3.00	0.10	$T_{2,cr,2}$	第 5 条	2021-08-08	4.00	0.50
$T_{2,cr,1}$	第 4 条	2021-08-08	4.30	0.80	$T_{2,cr,2}$	第 6 条	2021-08-08	3.50	0.20
$T_{2,cr,1}$	第 5 条	2021-08-08	2.50	0.50	$T_{2,cr,2}$	第 7 条	2021-08-09	2.00	0.20
$T_{2,cr,1}$	第 6 条	2021-08-09	2.50	0.20	$T_{2,cr,2}$	第 8 条	2021-08-09	3.60	0.40
$T_{2,cr,1}$	第 7 条	2021-08-10	3.90	1.20	$T_{2,cr,2}$	第 9 条	2021-08-10	3.10	0.50
$T_{2,cr,1}$	第 8 条	2021-08-10	4.00	0.50	$T_{2,cr,2}$	第 10 条	2021-08-12	2.60	0.80
$T_{2,cr,1}$	第 9 条	2021-08-11	5.00	0.90	$T_{2,cr,2}$	第 11 条	2021-08-13	2.90	0.20
$T_{2,cr,1}$	第 10 条	2021-08-11	4.30	0.90					

3.4 混凝土收缩试验

GBT 50082—2009《普通混凝土长期性能和耐久性试验方法标准》中的接触法可以用于早期混凝土自由收缩变形的测定,也可用于无约束状态下混凝土自收缩变形的测定.采用尺寸(宽×高×长)为 100 mm×100 mm×515 mm 的棱柱体试件 $T_{1,sh}$ (3 个)和试件 $T_{2,sh}$ (3 个)进行收缩试验.对试件进行 28 d 的养护,在规定时间内测量试件长度,获取试件的收缩率变化情况.

混凝土收缩率 ϵ_{sh} 的计算公式为

$$\epsilon_{sh} = (L_0 - L_t) / L_b, \tag{13}$$

式(13)中: L_b 为测量标距,用混凝土收缩仪(图 3)测量时应等于两测头内侧的距离; t 为从测定初始长度时算起的天数; d ; L_t 表示试件在试验期为 t 时测得的长度,mm; L_0 为试件长度的初始读数,mm.

试件的收缩率变化曲线和收缩量变化曲线,分别如图 4,5 所示.图 4,5 中: ΔL 为收缩量;试件 $T_{1,sh}$, $T_{2,sh}$ 的收缩率和收缩量为 3 个试件的算术平均值.



图 3 混凝土收缩仪

Fig. 3 Concrete shrinkage meter

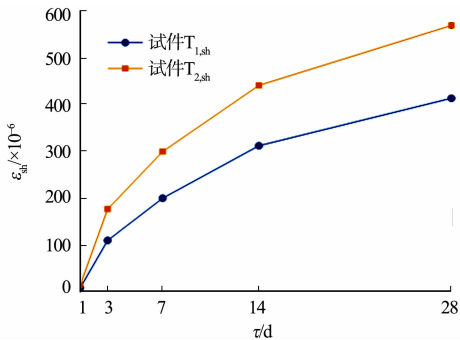


图 4 试件的收缩率变化曲线

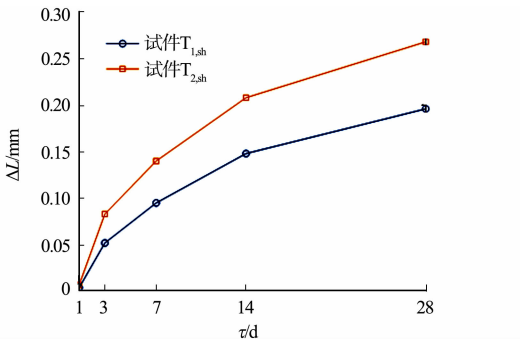


图 5 试件的收缩量变化曲线

Fig. 4 Shrinkage rate variation curves of test pieces

Fig. 5 Shrinkage amount variation curves of test pieces

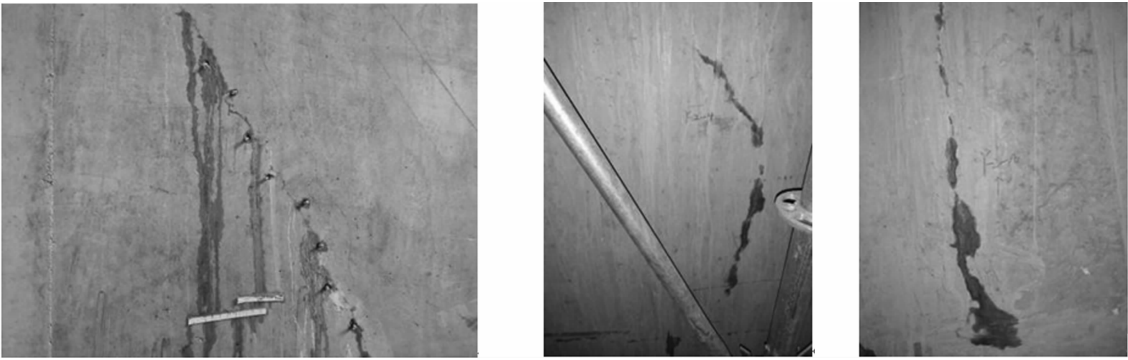
由图 4 可知:第 1~3 天试件 $T_{1,sh}$, $T_{2,sh}$ 的收缩率迅速增大,第 3 天收缩率比第 1 天增长近 0.000 1, 7 d 后收缩率的增长速度逐渐变缓;试件 $T_{1,sh}$ 的收缩率一直小于 $T_{2,sh}$,说明试件在浇筑后的 1~3 d,混凝土由于水分蒸发产生的干燥收缩程度较大,养护 7 d 后,干燥收缩程度变化稳定.因此,对于现场施工,充分养护早期大体积混凝土能够有效地改善混凝土开裂问题.由图 5 可知:第 28 天,试件 $T_{1,sh}$ 收缩量最小(0.196 mm).综上可知,试件 $T_{1,sh}$, $T_{2,sh}$ 的收缩量和收缩率的变化规律基本相同;经过 28 d 的养护,试件 $T_{1,sh}$ 的收缩量一直小于试件 $T_{2,sh}$,说明混凝土自身产生的热量较低,DHZ 复合液能够降低早期混凝土的收缩量,提高混凝土的抗裂性能.

4 工程应用

厦门地铁的杏滨车站采用明挖法施工,车站主体结构外包长度为 258.5 m,采用 800 mm 地下连续墙和 400 mm 内衬墙叠合受力的结构形式,主体结构标准段宽度为 21.1 m.随着建筑行业的持续发展,混凝土结构的应用范围日益增大,为了满足建筑功能的需求,混凝土结构的尺寸越来越大,约束也越来越强,这些原因加剧了混凝土裂缝的产生.为了减少裂缝的产生,杏滨车站采用跳仓法施工,前期采用聚羧酸减水剂进行施工,为了提高混凝土的性能,后期改用 DHZ 复合液作为外加剂.

为了对比两种外加剂对混凝土性能的影响,对内衬墙的裂缝进行收集与分析,记录各条裂纹的最大宽度、裂纹数量和裂纹分布.现场部分裂缝照片,如图 6 所示.

现场使用的混凝土均采用汽车泵送,运送时间、振捣时间、浇筑温度等因素都会影响混凝土的抗裂能力.为了减少裂缝,混凝土的搅拌、运输、浇筑、振捣和养护等都必须严格执行施工规范.采用掺入聚羧酸减水剂的混凝土浇筑某一叠合墙,获取其 28 d 龄期的裂缝生成情况.掺入聚羧酸减水剂的叠合墙裂



(a) 斜裂缝 (b) 弧形裂缝 (c) 竖向裂缝

图 6 现场部分裂缝照片

Fig. 6 Partial crack in-situ photos

缝分布,如图 7 所示.图 7 中:蓝色虚线为钢模板拼接缝位置;数字表示裂缝编号.

由图 7 可知:整个叠合墙上裂缝较多,大部分为竖向裂缝且间距规整,同时也伴随一小部分斜裂缝和弧形裂缝.

为了便于对比,在车站施工时,用掺入 DHZ 复合液的混凝土浇筑某一叠合墙.掺入 DHZ 复合液的叠合墙裂缝分布图,如图 8 所示.

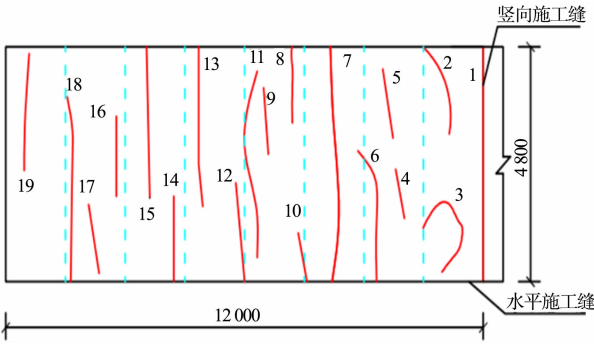


图 7 掺入聚羧酸减水剂的叠合墙裂缝分布(单位:mm)
Fig. 7 Cracks distribution of composite wall mixed with polycarboxylate water reducer (unit: mm)

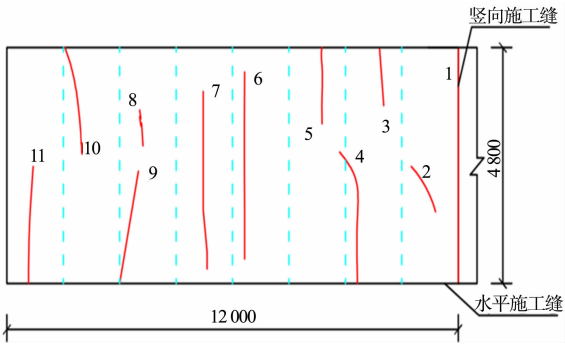


图 8 掺入 DHZ 复合液的叠合墙裂缝分布(单位:mm)
Fig. 8 Cracks distribution of composite wall mixed with DHZ compound liquid (unit: mm)

经后期的数据整理可知:外掺 DHZ 复合液且经过配合比优化后的叠合墙裂缝数量减少了 8 条,减少了从叠合墙顶部到底部贯穿裂缝的产生;优化前叠合墙裂缝总长度为 56.7 m,优化后裂缝总长度为 32.4 m,裂缝长度减少了 24.3 m,表明外掺 DHZ 复合液且经过配合比优化后的混凝土抗裂性能优于外掺聚羧酸减水剂的混凝土,可提高混凝土的性能,减少混凝土裂缝的产生.

5 结论

基于混凝土配合比设计规范,对混凝土配合比中的多个因素进行正交试验设计筛选,对混凝土的粗骨料级配进行优化,计算各试验组的绝热温升,并选取绝热温升最低的试验组配合比掺入 DHZ 复合液,得到地铁站抗渗防裂混凝土的最优配合比.通过混凝土性能试验和实际工程应用,可以得到以下 2 个结论.

1) 由混凝土的强度试验、抗裂试验、抗渗试验和收缩试验可知,掺入 DHZ 复合液的混凝土强度满足设计规范.相较于未掺入 DHZ 复合液的试件,掺入 DHZ 复合液的混凝土产生的裂缝较少,收缩率和收缩量较低,表明掺入 DHZ 复合液能够提高混凝土的抗裂防渗性能.

2) 工程应用的结果表明,相较于掺入聚羧酸减水剂的地铁站叠合墙,掺入 DHZ 复合液的地铁站叠合墙的裂缝少了 8 条,裂缝长度减少了 24.3 m.因此,采用 DHZ 复合液的混凝土能够提高混凝土的抗裂性能,减少地铁站叠合墙裂缝的产生.

参考文献:

[1] 孙凤阁. 施工中如何处理混凝土粗骨料的级配问题[J]. 东北水利水电, 1989(5): 44-46. DOI:10. 14124/j. cnki. db-slsd22-1097. 1989. 05. 013.

[2] 王文璟. 基于正交实验的混凝土力学特性及配比优化研究[J]. 北京印刷学院学报, 2021, 29(9): 175-177. DOI:10. 19461/j. cnki. 1004-8626. 2021. 09. 051.

[3] 李福友, 李北星, 闫海超, 等. 边跨宽箱梁混凝土配制及抗裂性研究[J]. 铁道建筑技术, 2021(10): 1-5, 49. DOI:10. 3969/j. issn. 1009-4539. 2021. 10. 001.

[4] MEHTA P K, MONTEIRO J M. 混凝土微观结构、性能和材料[M]. 欧阳东, 译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.

[5] 张义长, 张早林. 地下工程混凝土非荷载裂缝成因分析及控制对策[J]. 工程建设, 2019, 51(4): 62-65. DOI:10. 13402/j. gcjs. 2019. 04. 013.

[6] 张勇, 李明, 刘永胜, 等. 高温入模条件下侧墙结构混凝土早期收缩裂缝控制技术研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2020(3): 15-18, 23. DOI:10. 19761/j. 1000-4637. 2020. 03. 015. 05.

[7] MEHDIPOUR I, HKHAYAT K H. Effect of particle-size distribution and specific surface area of different binder systems on packing density and flow characteristics of cement paste[J]. Cement and Concrete Composites, 2017, 78: 120-131. DOI:10. 1016/j. cemconcomp. 2017. 01. 005.

[8] MENG Weina, VALIPOUR M, KHAYAT K H. Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete[J]. Materials and Structures, 2017, 50(1): 1-16. DOI:10. 1617/s11527-016-0896-3.

[9] 张洪萍, 白培康, 王建弘, 等. 多种掺合料颗粒群分布与水泥基复合体系强度关系研究[J]. 混凝土与水泥制品, 2019(1): 23-25. DOI:10. 19761/j. 1000-4637. 2019. 01. 023. 03.

[10] 王尚伟, 朱海堂, 王博, 等. 混凝土配合比优化设计的紧密堆积理论综述[J]. 材料导报, 2021, 35(3): 3085-3091. DOI:10. 11896/cldb. 20010108.

[11] 王谦. 紧密堆积理论在设计活性粉末混凝土中的应用[J]. 混凝土, 2012(12): 129-131. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2012. 12. 042.

[12] 朱伯芳. 大体积混凝土温度应力与温度控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.

[13] AZENHA M, FARIA R, FERREIRA D. Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring and numerical simulation[J]. Cement and Concrete Composites, 2009, 31(6): 369-378. DOI:10. 1016/j. cemconcomp. 2009. 03. 004.

[14] KIM J K, LEE Y. Numerical analysis of the early age behavior of concrete structures with a hydration based micro-plane model[J]. Computers and Structures, 2007, 87(17): 1085-1101. DOI:10. 1016/j. compstruc. 2009. 05. 008.

[15] 杨阳, 朱惠英, 王新民, 等. 高性能防水混凝土的制备及其性能研究[J]. 混凝土, 2017(9): 154-156, 160. DOI:10. 3969/j. issn. 1002-3550. 2017. 09. 040.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 方德平)