某地铁车站项目大体积混凝土配合比优化及试验研究

刘继辉[1] 熊逸丰[2] 崔 圳[1] 刘 恒[1] 周 正[1]

1.中铁南方投资集团有限公司 广东深圳 518054；
2.广州城市理工学院 广东广州 510800

摘 要：在温度应力、收缩应力作用下大体积混凝土可能出现早期裂缝，而混凝土温度应力、收缩应力均与混凝土的配合比有关。在某地铁项目前期建设过程中，大体积混凝土出现较多裂缝，导致出现渗、漏水现象，影响了结构的使用及耐久性。为了在后续建设过程中减少大体积混凝土开裂，施工单位对混凝土配合比进行了优化，并采用绝热升温对比试验及混凝土收缩率对比试验进行验证。试验结果表明：通过优化混凝土配合比可以减小大体积混凝土的绝热温升及早期收缩率；通过优化混凝土配合比，减少了胶凝材料用量，降低了单方混凝土造价。

关键词：大体积混凝土；裂缝；配合比优化；试验研究

中图分类号：TU755 **文献标识码：**B

The Optimization and Experimental Study of Mixing Proportion of Mass Concrete in a Metro Project

Jihui Liu[1] Yifeng Xiong[2] Zhen Cui[1] Heng Liu[1] Zheng Zhou[1]

1.China Railway South Investment Group Co.,Ltd,Shenzhen，Guangdong，518054,China;
2.Guangzhou City University of Technology,Guangzhou，Guangdong，510010,China

Abstract: Early cracks may appear in mass concrete under the action of temperature stress and shrinkage stress, which are related to the mix proportion of concrete.In the early construction process of a metro project, there are many cracks in mass concrete, leading to seepage and water leakage, which affects the usage and durability of the structure. In order to reduce the cracks of mass concrete in the subsequent construction, the construction company optimized the concrete mix proportion, and conducted thermal insulation experiment and concrete shrinkage experiment for verification.The results show that, by optimizing the mix proportion of concrete, the heat of hydration and shrinkage rate of mass concrete can be reduced，the amount of cementing material is reduced and the cost of concrete is reduced.

Keywords: mass concrete; crack; optimization of mix proportion; experimental study

大体积混凝土施工的重点及难点是对裂缝的控制，据统计，混凝土总开裂情况中 80%以上源于材料非荷载变形[1]。且结构通常拆模后即出现裂缝，甚至出现贯通性裂缝[2-3]。地铁车站一般具有埋置深、顶板覆土厚、人流密集、重要性高的特点[4]，结构底板、顶板及侧壁受到的荷载大，导致结构构件尺寸大，达到了大体积混凝土的标准。地铁车站大体积混凝土出现裂缝不仅仅影响地铁运维，还会危及结构安全，造成社会经济损失。

1 工程概况

本项目为地铁车站，地下二层有效站台长度 140m，站台宽 13m，标准段为单柱双跨框架结构。顶、底板结构厚分别为 0.9m、1.0m，侧墙、中隔墙厚度分别为 0.7m。小里程端头井段结构外皮净空 14.88m，结构外皮宽 28.28m，顶、底板结构厚分别为 0.9m、1.0m，侧墙厚度为 0.8m。三层换乘段结构外皮净空 21.02m，结构外皮宽 22.7m，顶、底板结构厚分别为 0.9m、1.1m，侧墙厚度为 0.8、0.7m。

表 1 混凝土原配合比

Tab.1 Original mix proportion of concrete

序号	名称	产地	规格	用量（kg/m3）
1	水泥	英德海螺	P.O 42.5	340
2	砂	广东西江	中砂	713
3	碎石	中山	5-25mm	1070
4	粉煤灰	深圳妈湾	F 类Ⅱ级	75
5	外加剂	安徽中铁	RAWY101	9.13
6	水	深圳	自来水	153
7	砂率（%）			40
8	水胶比			0.39

主体结构混凝土强度设计等级为 C35，结合本站所处腐蚀环境，根据规范[5]要求及设计单位的建议，原采用的配合比如表 1 所示。经检测，混凝土试件 28d 立方体抗压强度为 55.9MPa，超出设计强度 43.2MPa 约 29.4%，较大高于国家规范标准[5]。

原配合比水泥用量较高，总胶凝材料较多，使得混凝土的水化热较大、收缩率较高，现场浇筑、养护后混凝土开裂，且大部分裂缝是贯穿性裂缝，如图 1 所示。因此，施工单位对混凝土配合比进行优化，以提高混凝土的抗裂能力。

图 1 原配合比混凝土现场裂缝图

Fig.1 The cracks of concrete with original mix proportion

2 配合比优化原理

导致结构混凝土产生裂缝的因素很多，除设计、施工及养护等因素外，混凝土自身抗裂性对结构裂缝的产生也有很大影响。影响混凝土抗裂性的因素很多，主要有水泥水化热、混凝土收缩率、早期抗裂性、泌水率、混凝土抗拉弹性模量等。其中影响最大的因素是水泥水化热及混凝土收缩率。

有学者对此进行了研究，适当粉煤灰掺加可有效降低水化热，减小温度应力，提高混凝土抗裂性能[6-7]。掺入大掺量矿渣粉能一定程度降低水化热，改善混凝土孔隙情况，提高混凝土抗渗性[8]，但对混凝土的抗碳化能力、自收缩和干燥收缩方面会产生对裂缝控制不利的影响[9]。因此，根据不同部位受力情况、养护情况采用不同优化方案。具体配合比优化思路和方案如表 2、表 3 所示。

表 2　配合比优化思路

Tab.2 Mix ratio optimization idea

部位	底板及顶板	侧墙
特点	较好进行保温保湿，可控制混凝土自收缩和干燥收缩	受力复杂、养护不便
考虑因素	混凝土水化温升、降温速度	混凝土自身收缩、温升、降温速度及失水速率
掺料	双掺(粉煤灰+矿渣粉)	单掺粉煤灰

表 3　配合比优化方案

Tab.3 Optimization schemes of mix proportion

部位	配比编号	胶凝材料用量(kg/m³)	水胶比	砂率(%)	水泥(kg/m³)	粉煤灰(kg/m³)	矿渣粉(kg/m³)	砂(kg/m³)	碎石(kg/m³)	外加剂掺量(%)	拌合水(kg/m³)	容重(kg/m³)
底板及顶板	HTD1	400	0.38	43.0	260	100	40	777	1030	1.5~2.0	146	2360
	HTD2	400	0.38	43.0	240	100	60	777	1030	1.5~2.0	146	2360
	HTD3	383	0.40	43.0	249	96	38	783	1040	1.5~2.0	147	2360
	HTD4	383	0.40	43.0	249	77	57	783	1040	1.5~2.0	147	2360
侧墙	HTC1	400	0.38	43.0	280	120	0	777	1030	1.5~2.0	146	2360
	HTC2	383	0.40	43.0	275	108	0	783	1040	1.5~2.0	147	2360
	HTC3	383	0.40	43.0	287	96	0	783	1040	1.5~2.0	147	2360
中板	HTZ1	400	0.38	43.0	260	100	40	777	1030	1.5~2.0	146	2360
	HTZ2	383	0.40	43.0	268	77	38	783	1040	1.5~2.0	147	2360

表 4　不同配合比混凝土主要参数

Tab.4 Main parameters of concrete with different mix proportion

项目		原配合比	HTD1	HTD2	HTD3	HTD4	HTC1	HTC2	HTC3	HTZ1	HTZ2
抗压强度 MPa	7d	47.8	39.3	37.6	34.8	35.7	43.5	39.5	40.6	39.1	36.4
	28d	55.9	53.2	51	45.1	46.3	56.1	53	54.5	52.5	48.8
收缩率（×10-6）	3d	127	169	187	193	170	63	87	99	165	182
	7d	201	270	282	259	266	189	225	240	266	253
	28d	293	339	375	351	363	298	316	330	327	346
	90d	371	388	420	401	412	351	380	390	384	410
混凝土绝热温升℃	3d	44	34	31	32	32	36	36	37	34	35
	7d	54	47.3	46	45.2	44.5	48.1	43.8	46.5	47.3	43.2

3 配合比试验研究

为了确定最优配合比方案，按表 3 配合比及原配合比制备混凝土试件，进行绝热升温试验及混凝土收缩率试验，对不同混凝土配合混凝土在胶凝材料用量、绝热温升和收缩率方面进行对比分析，以期得到综合效益最好的配合比，对比结果如表 4 及图 2、图 3 所示。

从表 4 可见：

（1）配合比优化后，所有试件 28d 立方体抗压强度略小于原配合比试件，但均大于 43.2MPa，满足规范要求；

（2）配合比优化后，顶板、侧墙单方混凝土胶凝材料减少 15~32kg，节约胶凝材料 6~12.8 元/m³；中板单方混凝土胶凝材料减少 10~27kg，节约胶凝材料 4~10.8 元/m³。

从图 2、图 3 可以看到：

（3）配合比优化后，顶板、侧墙 3d 绝热温升降低 7~13° C、降低幅度 15.9%~29.5%，中板 3d 绝热温升降低 7~8° C、降低幅度 16.7%~19.0%，降低幅度均超过 15%；

（4）顶板、侧墙 7d 绝热温升降低 5.9~10.2° C、降低幅度 10.9%~18.9%，中板 7d 绝热温升降低 5~9.1° C、降低幅度 9.6%~17.4%，降低幅度均超过 9%；

（5）侧墙混凝土配合比优化后，3d 混凝土收缩率由 127×10^{-6}，降低到 $63\sim99\times10^{-6}$，降低幅度 22.0%~50.4%，7d、28d、90d 混凝土收缩率有所提高，但提高比例不大，90d 收缩率基本相同。

（6）综上，经混凝土配合比优化，降低了混凝土单方成本，减小了混凝土的早期绝热温升及早期收缩率，增强了混凝土的早期抗裂性。

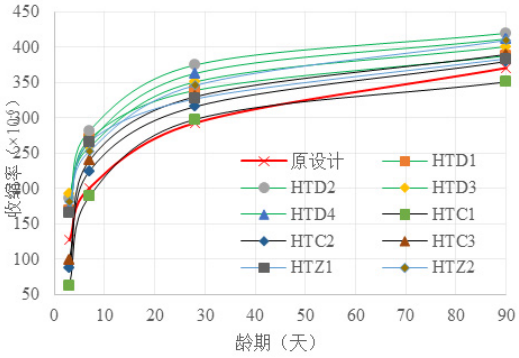

图 2　不同配合比收缩率对比图

Fig.2 Shrinkage contrast of different mix proportion

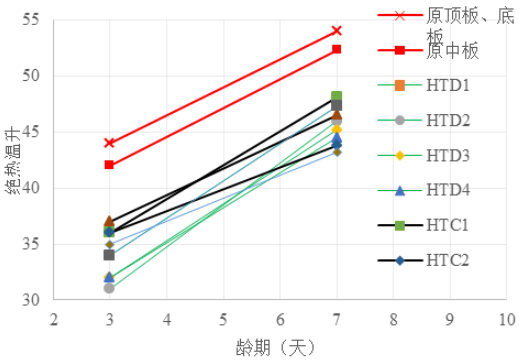

图 3　不同配合比绝热温升对比图

Fig.3 Adiabatic temperature rise contrast of different mixing proportion

4 粉煤灰及矿渣粉对混凝土抗裂性的影响

为研究粉煤灰及矿渣对混凝土性能的影响，对比分析了 HTD1、HTD2、HTD3、HTD4 及原配合比试件的收缩率、绝热升温，如图 4、图 5 所示。

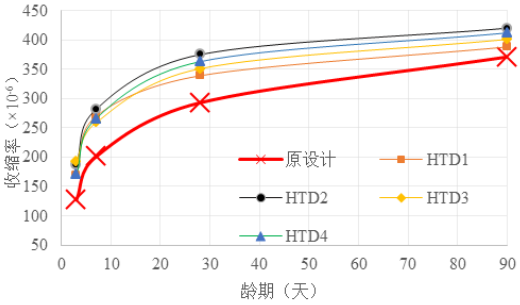

图 4　HTD1~HTD4 收缩率对比图

Fig.4 Shrinkage comparison of HTD1~HTD4

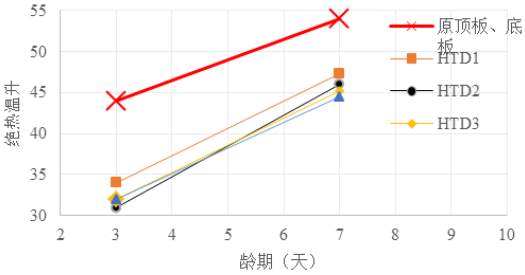

图 5　HTD1~HTD4 绝热温升对比图

Figure 5 Comparison of adiabatic temperature rise of HTD1~HTD4

从表 3 及图 4、图 5 中可以看到：

（1）HTD1、HTD2 胶凝材料总用量、粉煤灰用量相同，水泥、矿渣用量不同：HTD1 水泥用量较多、矿渣用量较少。HTD1 收缩率较低但绝热温升较高，说明矿渣可以减小混凝土绝热温升但会提高混凝土收缩率；

（2）HTD1、HTD3 粉煤灰、矿渣粉用量相同，水泥、总胶凝材料用量不同：HTD1 水泥用量、总胶凝材料用量较多。HTD1 收缩率较低但绝热温升较高，说明水泥用量越大绝热温升越大收缩率降低；

（3）HTD3、HTD4 胶凝材料总用量、水泥用量相同，粉煤灰、矿渣用量不同：HTD3 粉煤灰用量较多，矿渣用量较少。HTD3 早期（3d）收缩率较高，绝热升温与 HTD4 相同，HTD3 在 7d 以后，收缩率低于 HTD4，但绝热温升与 HTD4 基本持平，说明掺入粉煤灰相较于掺入矿渣提高了 3d 混凝土收缩率但能降低混凝土 7d 后收缩率。

5 结论

不同配合比混凝土的绝热温升对比试验及收缩率对比试验表明：

（1）混凝土中适当掺入粉煤灰及矿渣粉后，降低了造价，增强了混凝土的早期抗裂性，现场施工后未产生裂缝，产生了良好的社会经济效益，可供类似项目提供参考；

（2）应结合受力情况、养护情况进行配合比优化；

（3）掺入粉煤灰、矿渣粉可以减小混凝土绝热温升但会提高混凝土收缩率；

（4）掺入粉煤灰相较于掺入矿渣提高了 3d 混凝土收缩率，但能降低混凝土 7d 后收缩率。

参考文献：

[1]韩宇栋,张君,岳清瑞,曾滨,郝挺宇,林松涛.现代混凝土收缩研究评述[J].混凝土,2019(02):1-12+16.

[2]王维. 地铁车站混凝土结构开裂有限元分析[D].上海交通大学,2008.

[3]李明,姚婷,王育江,田倩,叶铁民,朱先发.基于多场耦合机制的混凝土墙板结构裂缝控制[J].混凝土,2017(11):58-62.

[4]袁望,熊逸丰,吕雄伟,钟登科,周志鹏. 某地铁车站项目大体积混凝土抗裂技术研究[J]. 建筑结构,2022,v.52(S2):1019-1023.

[5]大体积混凝土施工标准：（GB 50496-2018）[S].北京：中国建筑工业出版社,2018.

[6]谢彪,徐文,张坚,吴玲正,周威,夏丰勇,周俊宏.C50 低温升、低收缩海工大体积混凝土抗裂性能研究与应用[J].混凝土,2021(0[1]张喜平,刘仲洋,王山,王玲,王丙亮.跳仓法施工中超长大体积混凝土配合比优化设计研究[J].建筑结构,2021,51(S2):1017-1019.9):98-101+105.

[7]张文博,赵双权,毛明杰,徐以希,陈伟.大体积粉煤灰混凝土水化热分析研究[J].混凝土,2018(09):157-160.

[8]刘士红,黄义雄,修晓明,林熙,殷新博,季锡贤.C50 清水混凝土的配制与施工技术[J].混凝土与水泥制品,2013(05):75-77.DOI:10.19761/j.1000-4637.2013.05.020.

[9]张雅杰,冯辉,郭永辉.粉煤灰在混凝土中适宜掺量的研究[J].粉煤灰综合利用,2004(01):31-33.