

深圳地铁一期工程混凝土结构自防水措施研究

高树东

(铁道部第三勘测设计院地铁分院, 天津 300142)

摘 要 文章结合深圳地铁一期工程阐述了解决混凝土结构自防水的技术关键是提高混凝土结构的抗裂性, 从设计、原材料的选择、混凝土配合比和施工工艺等方面较详细地论述了提高混凝土结构抗裂性的主要技术措施。

关键词 混凝土 结构自防水 抗裂性 抗渗性 耐久性

1 概 述

深圳地铁一期工程由 1 号线东段和 4 号线南段组成, 线路全长 19.468 km, 有 17 座地下车站。1 号线所经车站由东向西依次分布是罗湖站、国贸站、老街站、大剧院站、科学馆站、华强路站、岗厦站、会展中心站、购物公园站、香蜜湖站、车公庙站、竹子林站和侨城东站。4 号线所经车站由南向北依次分布是皇岗站、福民站、会展中心站、市民中心站和少年宫站, 其中会展中心站为 1、4 号线的立交换乘站。市民中心站、购物公园站和会展中心站属深圳市中心区工程, 已先后于 1998 年年底和 2000 年年初开工, 现在车站主体结构混凝土已基本浇注完毕或已接近尾声。目前除罗湖和皇岗站土建招标工作尚未完成外, 其余车站于 2001 年年初全面破土动工, 正在施工主体围护结构或开挖土方。

地铁沿线所经地区主要为海积平原、海积冲积

平原、冲积平原和台地等几大地貌单元, 上覆第四系地层, 下伏风化基岩。沿线地下水埋深较浅, 土层渗透系数大, 地下水按其赋存条件可分为第四系孔隙潜水和基岩裂隙水。多数地段地下水对混凝土具有腐蚀性, 其腐蚀类型多为分解性腐蚀, 其次为酸性和溶解性腐蚀, 腐蚀程度分为弱腐蚀、中等腐蚀和强腐蚀。地铁结构处于地下, 长期受地下水的浸泡, 如果没有可靠的防水措施, 地下水就会直接危害地铁的正常运营乃至影响结构物的使用寿命。因此, 地下结构物的耐久性越来越受到重视。针对深圳地铁地下水的腐蚀性特点, 要提高地铁结构物的耐久性就必须首先保证结构防水。结构防水的前提就是混凝土结构自防水, 混凝土结构自防水是防水之本。

2 混凝土结构自防水的技术关键

混凝土结构自防水主要是解决混凝土的抗渗、抗裂性, 解决混凝土结构自防水的技术关键就是控

试验工作不便进行, 希同仁志士在有条件的时候进行研究、试验, 以补我国长隧洞施工技术的空白, 并在灌浆规范中增写上“豆砾石回填与灌浆”这一章。

(收稿日期: 2001 年 9 月 25 日)

〈作者简介〉

夏定光 男 高级工程师

Discussion on gravel backfilling and grouting

Xia Dingguang

(No. 14 Engineering Bureau of China Water Resources & Hydropower, Kunming 650011)

Abstract In this paper, the application scope and construction technology of gravel backfilling and grouting, factors affecting quality and quality checking are introduced herewith. Furthermore some suggestions are put forward, which can be taken as a reference for the construction of shield driven tunnel of urban metro.

Key Words Gravel backfilling Grouting Application scope Quality checking

制好混凝土的收缩裂缝,特别是贯穿裂缝。混凝土是一种抗拉强度低的脆性材料,而大部分裂缝是由混凝土收缩引起的。混凝土的收缩大致可以分为六个方面:①失水干缩。由于水分的蒸发,混凝土产生失水现象而引起的收缩;②塑性收缩。混凝土浇注后4~15 h左右,水泥水化反应激烈,出现泌水和水分急剧蒸发现象引起收缩,是在初凝过程中发生的收缩,发生在混凝土终凝以前即塑性阶段;③化学收缩。水泥水化过程中生成新的水化产物引起的体积缩小现象;④冷缩。水泥的水化是一个放热过程,产生大量的热量,引起混凝土中心温度提高,水化反应进行到一定程度后,混凝土中心的温度不再升高,以后随着时间的推移,由于混凝土中心的温度高于外界,就要往外散热,这一过程是降温过程,由于降温而产生的收缩就是冷缩;⑤碳化收缩。水泥水化物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 吸收空气中的 CO_2 形成 CaCO_3 产生的收缩;⑥沉降收缩。混凝土凝结前和凝结过程中,由于粗骨料——石子下沉引起的收缩。在这六种收缩中,干缩和冷缩是常见的,也是在实际工程中应重点控制的。

从前期深圳地铁几个车站的施工情况看,主体结构混凝土开裂问题没有较好地得到控制,在底板、侧墙等部位不同程度地出现了混凝土开裂现象,尤其是在侧墙部位,多为横向裂缝,个别裂缝已出现渗水现象。专家一致认为,混凝土裂缝主要为冷缩裂缝。下面就谈谈混凝土裂缝产生的主要原因及其控制措施。

3 混凝土结构自防水的主要技术措施

引起混凝土裂缝的原因是多方面的,也是最复杂的。总的来讲,裂缝主要可分为受力裂缝和其他因素如收缩、温度、不均匀沉降等引起的裂缝。工程实践中结构物由变形引起的裂缝几乎占80%以上,而其中混凝土收缩又是占主要的。混凝土收缩主要表现为上述六个方面。属于由承受外力引起的裂缝约占20%左右,这类裂缝在设计上是可以避免和控制的。

笔者认为,前期深圳地铁几个车站混凝土开裂现象与设计、原材料的选择、混凝土配合比和施工工艺等方面密切相关,尤其是原材料的品质、混凝土配合比和施工工艺影响较大。工程裂缝是不可避免的,但其有害程度是可以控制的。下面分析一下主要应该采取哪些措施,才能在地铁工程中有效地预防和控制混凝土裂缝的产生,特别是干缩和冷缩裂

缝,把裂缝控制在无害的范围内,以提高混凝土结构自防水能力和结构物的耐久性。

3.1 设计方面

设计过程中应尽量保持构件截面均匀,避免截面突变出现尖角、棱角,以减小混凝土收缩应力和荷载应力的集中。通过裂缝宽度验算调整主筋配筋量,把裂缝最大宽度控制在迎水面不大于0.2 mm,背水面不大于0.3 mm。

结构配筋应加强纵向分布钢筋,其总配筋率不得低于0.4%,并按细而密的原则配置,钢筋间距宜控制在150 mm以内,必要时可加设扩张金属网,以提高混凝土的极限拉应变,控制混凝土的收缩裂缝。

设计上还应应对施工段长度的划分提出指导性意见,适当缩短施工缝间距,分段长度宜控制在12 m以内。

3.2 合理选择原材料

(1) 选择优质的外加剂

防水混凝土从过去采用的连续颗粒级配防水混凝土、富砂浆防水混凝土发展到后来的掺有抗渗防水剂的防水混凝土,均从抗渗角度入手,但忽视了混凝土收缩这一致命弱点,因此,抗裂问题没有从根本上解决。

20世纪80年代末、90年代以来,以中国建筑材料科学研究院为主的一些单位成功地研制了膨胀剂,用膨胀剂补偿收缩混凝土作为防水混凝土。补偿收缩混凝土兼有膨胀、抗渗两大功能,这一技术迅速在全国得到广泛应用。后来由于某些工程应用中只注意强度等级、抗渗标号,对混凝土的限制膨胀率没有提出具体要求,造成膨胀剂少掺或误掺,达不到补偿收缩效果而产生有害裂缝,于是一部分人对膨胀剂的作用产生了怀疑。根据《混凝土外加剂应用技术规范》(GBJ119-88)要求,掺膨胀剂的补偿收缩混凝土水中养护14天的限制膨胀率 $\geq 0.015\%$,相当于在结构中建立的预压应力大于0.2 MPa。实际上混凝土限制膨胀率最好控制在0.02%~0.03%,填充用膨胀混凝土的限制膨胀率应在0.035%~0.045%;所有外加剂应符合国家或行业标准一等品及以上的质量要求。地铁工程应用中,应在满足混凝土强度和抗渗要求下,建立以混凝土限制膨胀率为中心的设计原则。

优质外加剂主要技术指标:含碱量低(不允许大于0.75%)。混凝土中掺入适量的膨胀剂、减水剂、抗渗剂、密实剂等外加剂后,能改善混凝土本身

多界面间的密实性,补偿混凝土的收缩,增加混凝土的抗裂防渗性能。在不影响结构强度的情况下,能产生体积膨胀、强度提高、坍落度提高和损失小、收缩落差小等特点。外加剂的品种和掺量应经试验确定。

除外加剂外,目前在材料上还可以考虑其它手段,一是钢纤维混凝土,二是近年来发展的聚丙烯纤维混凝土,以提高材料的韧性,但价格都比较昂贵。

(2) 砂的质量与砂率

砂应尽量采用中、粗砂,细度模量为 2.5 ~ 3.0, 平均粒径 ≥ 0.38 mm, 严禁使用混砂。与采用细砂相比,每立方米混凝土可减少用砂量 20 ~ 25 kg, 水泥用量相应减少 28 ~ 35 kg, 从而减少混凝土的干缩和水化热量。要严格控制含泥量,含泥量不应大于 3%。当含细粒(0.02 mm)泥为 5% 时,其收缩率比不含泥时增加 25.6%;含泥块 2% 时,收缩率比不含泥时增加 100%。

因此,采用干净(不带泥土)的中粗砂及合理的砂率是保证混凝土质量、减少和改变孔隙结构、增加密实性、提高抗渗性等作用的重要因素。

(3) 粗骨料

石子最大粒径不宜大于 40 mm,泵送时其最大粒径应为输送管径的 1/4 ~ 1/3,含泥量不应大于 1%,吸水率不应大于 1.5%。

(4) 合理选用低标号、低水化热品种的水泥,水泥中硅酸三钙及铝酸三钙含量越高,发热量就越大,水化速度也越快,出现峰温值也较早。

(5) 每立方米防水混凝土中各类材料总含碱量(Na_2O 当量)不得大于 3 kg。

(6) 积极采用优质粉煤灰

在防水混凝土中掺入一定数量的粉煤灰、磨细砂渣粉、硅粉等,作为胶体材料的一部分,这是防止混凝土开裂的另一个重要因素。掺入粉煤灰等活性混合材料会显著推迟和减少发热量,延缓水泥水化热释放时间,降低温度升值,从而降低温度裂缝的趋向,减少混凝土的冷缩,改善混凝土的和易性和可泵性,延长凝结时间,改善混凝土的抗渗性和混凝土后期强度。

粉煤灰的掺量要根据其品质指标来定,衡量粉煤灰的主要指标是细度、烧失量和需水量比等。粉煤灰级别定义见表 1。由表 1 可以看出,随着粉煤灰 I、II、III 三个级别的递增,烧失量(含碳量)、需水量在增加,这就意味着粉煤灰混凝土的收缩量在加大,即混凝土开裂的概率在增大。所以,在地铁工

程中,应严格控制粉煤灰的品质,严禁使用统灰,粉煤灰的级别不应低于 II 级,最好采用标准中的 I 级粉煤灰,并在施工过程中控制加强对粉煤灰的批量监督检测制度。

表 1 粉煤灰品质指标和分类

Table 1 Flyash quality index and classification

序号	指 标	粉煤灰级别		
		I	II	III
1	细度(0.08 mm 筛筛余)不大于	5	8	25
2	烧失量(%)不大于	5	8	15
3	需水量比(%)不大于	95	105	115
4	三氧化硫(%)不大于	3	3	3
5	含水率不大于	1	1	不规定

粉煤灰的掺量应根据粉煤灰的等级、水泥品种、标号、混凝土强度等级及地铁功能要求综合确定。过量使用粉煤灰对于混凝土则是不利的。过量掺用粉煤灰的混凝土,由于粉煤灰的 pH 值降低,混凝土抗 CO_2 侵蚀能力和对钢筋的保护作用下降,并且随着混凝土中粉煤灰代替水泥量加大及含气量增大,碳化系数加大;由于水泥浓度降低,二次水化作用迟缓,混凝土早期强度较低,强度增长速度较慢;混凝土龄期较短时,硬化粉煤灰-水泥混凝土中有比较大的孔,而且总的孔体积大于普通混凝土,所以其抗渗性和耐久性也较差,因此对于侧墙、大梁等养护条件较差的部位,粉煤灰的掺量宜适当减少。在地铁工程应用中,粉煤灰的掺量一般应控制在胶凝材料的 20% 以内。

3.3 严格控制混凝土配合比

防水混凝土的配合比应通过实验确定,其抗渗等级应比设计要求提高一级(0.2 MPa)。抗渗等级见表 2。

表 2 防水混凝土抗渗等级

Table 2 Impermeability grade of waterproof concrete

工程埋置深度/m	设计抗渗等级
< 10	S_6
10 ~ 20	S_8
20 ~ 30	S_{10}
30 ~ 40	S_{12}

(1) 控制水泥用量

在满足混凝土强度和抗渗性的条件下,应尽量减少水泥用量,一是为降低成本,更重要的是降低水

化热,这是防止混凝土开裂的重要措施。经实验测试表明,水泥水化后的体积要减小,每增加 100g 水泥净浆的化学减缩为 7~9 mL,可蒸发水分约 6 mL。如混凝土的水泥用量为 300 kg/m^3 ,则蒸发量达 18 L,在混凝土内形成可观的毛细孔缝,成为渗水渠道。毛细孔中的水逸出产生毛细应力,使混凝土发生毛细收缩,由此引起水泥砂浆的干缩量为 0.1%~0.2%,而混凝土的实际干缩量只有 0.04%~0.06%。由于混凝土抗拉强度低,极限拉应变只有 0.015%~0.03%,故易于产生干缩开裂。

水泥水化是个放热过程,其水化热为 40~60 卡/克,混凝土水化时温度可达 50°C ~ 60°C ,与环境温度出现温差效应。研究表明,当混凝土内外温差为 10°C 时,产生冷缩量约为 0.01%;当温差为 20°C ~ 40°C 时,其冷缩量则为 0.02%~0.04%,这是开裂的主要原因。因此,在满足混凝土强度和抗渗性的条件下,建议地铁工程中每立方米混凝土的水泥用量为 280~300 kg。

(2) 减小水胶比(W/B)

水胶比有两部分组成:第一部分为水泥水化热所需的水胶比(水泥完全水化热所需的水用量,为水泥用量的 20%~25%);另一部分为改善施工和易性所需的水,要求保证在不影响混凝土施工和易性条件下,尽量减少水的用量,可以减少混凝土的收缩、泌水、干缩现象。实验证明,水泥用量每增加 100 g,混凝土收缩增加 5%;水泥用量不变,水用量每增加 10%,混凝土强度降低 20%,混凝土和钢筋粘着力降低 10%,干缩约增加 20%~30%。因此减少水的用量,是保证混凝土抗渗、抗裂的另一个重要因素,也是提高混凝土耐久性的重要因素之一。建议地铁工程中水胶比应控制在 0.5 以内。

(3) 坍落度

坍落度大、骨料沉降剧烈,粗骨料沉降趋于稳定后,其间的水泥砂浆不再继续沉降,一部分游离水绕过骨料上升到混凝土拌和物的表面,形成外部泌水。在混凝土硬化过程中,这些多余的游离水逐渐蒸发,其泌水通路在混凝土内形成毛细孔道,粗骨料下面形成沉降缝隙,使混凝土的抗渗性能下降。要求普通防水混凝土坍落度不宜大于 50 mm。用于防水的商品混凝土的入模坍落度宜控制在 $120 \pm 20 \text{ mm}$,入模前坍落度损失每小时应小于 30 mm。坍落度总损失值不应大于 60 mm。

3.4 防水混凝土施工及工艺

加强施工过程中的管理和控制是防止混凝土开

裂的另一重要手段。防水混凝土施工应注意以下事项:

(1) 防水混凝土拌和物在运输后出现离析,必须进行二次搅拌。当坍落度损失后不能满足施工要求时,应加入原水灰比的水泥浆进行搅拌,严禁直接加水。

(2) 做好施工过程中的降水、排水工作,内衬混凝土浇注前必须做到围护结构或初期支护无渗漏水,严禁带明水灌注混凝土。

(3) 对于明挖法施工采用排桩的围护结构,桩间凹槽部位应采用喷射混凝土和防水砂浆找平抹压,尽量减少基面对新浇注的侧墙混凝土收缩的约束。

(4) 对于浅埋矿山法施工的区间隧道,一定要做好开挖断面轮廓的控制,保证喷混凝土与围岩、二次衬砌与初期支护之间的密贴,并做好初期支护背后的注浆工作。

(5) 模板平整,拼缝严密不漏浆,并有足够的刚度和强度,吸水性小,以钢模板为宜。

(6) 混凝土结构内部设置的各种钢筋或绑扎铁丝不得接触模板,固定模板的螺栓必须穿过混凝土结构时应有止水措施。

(7) 合理划分施工段长度,适当缩短施工缝间距,分段长度宜控制在 12 m 以内,底板、边墙、顶板施工缝尽可能对齐,必要时采取跳槽施工,也可采用后浇带。

(8) 防水混凝土应分层连续浇注,采用高频机械振捣密实,以混凝土泛浆和不冒气泡为准,应避免漏振、欠振和超振。灌注混凝土的自落度不应超过 2 m,每次分段灌注长度不宜超过 12 m。

(9) 在炎热季节施工时,应采用有效措施(如遮凉棚)降低原材料温度,并应减少混凝土运输时吸收外界热量。混凝土厚度中心与表面温度差值不应大于 25°C 。

(10) 侧墙模板支撑拆除时间宜控制在混凝土强度达到 80% 左右,避免失水过快,控制混凝土表面温度与环境温度之差不超过 15°C ,并控制降温速率。

3.5 防水混凝土的养护要求

在每次混凝土浇注完毕后,应及时按温控技术措施的要求进行保温养护。保温养护是保证混凝土不开裂的关键环节。

(1) 保温养护措施应使混凝土浇注块体的里外温差及降温速度满足温控指标的要求。

(2) 防水混凝土保温养护持续时间不得少于 15

天,尤其不能在阳光下暴晒,要有防晒措施。

(3) 在养护期间要求混凝土表面始终保持湿润,雨天灌注混凝土应有遮雨措施。

(4) 对混凝土保温养护应建立专人负责制,实行定人、定岗、定时,加强重要环节的管理和过程控制。

4 防水混凝土配合比试验结果与工程实际应用情况

通过以上理论分析研究,了解了控制混凝土结构开裂的重要技术措施。结合深圳地铁一期工程购

物公园站(原益田站)主体结构防水混凝土配合比试验结果和实际应用情况(由深圳地铁一期工程商品混凝土供应商深圳港创建材有限公司提供,详见表3),我们不难发现在混凝土配合比试验中水胶比(W/B)和水泥(C)用量对混凝土抗渗等级和混凝土结构的抗裂性起着至关重要的作用。综合混凝土抗渗等级和抗裂效果,第一种配合比效果最佳,第三种次之,第二种效果较差,因此,建议地铁工程中每立方米混凝土的水泥用量控制在280~300 kg,水胶比控制在0.5以内。

表3 防水混凝土配合比试验及工程应用效果

Table 3 Mix ratio test of waterproof concrete and practical application result

序号	水胶比	每立方米混凝土材料用量/kg						抗渗试验结果	每施工段混凝土裂缝数量	每施工段混凝土裂缝宽度/mm
		水	水泥	粉煤灰	砂	骨料	减水剂			
1	0.49	170	280	84	815	1038	13.10	$> S_{12}$	0~1	0.13
2	0.46	179	340	74	783	1010	13.66	$> S_{12}$	4~5	0.31
3	0.55	191	280	84	825	1009	10.92	$> S_9$	3~4	0.2

5 结束语

地下铁道结构防水是十分重要的,而混凝土结构自防水又是保证防水质量的重要一环,愈来愈受到业主及地下工程界的重视。工程实践表明,如果说设计、选材是防水基础的话,那么施工及工艺则是防水的技术关键,只有做好两者才能达到预期效果。

在文章编写过程中得到了深圳港创建材有限公司张永秋总工程师的大力协助,在此表示感谢。

参考文献

[1] 地下工程防水技术规范(GBJ108-87)

[2] 王铁梦. 工程结构裂缝控制. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997-08

[3] 施仲衡, 张弥, 王新杰, 沈子钧. 地下铁道设计与施工. 西安: 陕西科学技术出版社, 1997-07

[4] 深圳地铁一期工程初步设计中间阶段. 车站、区间结构防水专家评审意见. 深圳, 1999-03

[5] 何克文. 深圳地铁一期工程施工设计地下结构防水工程技术要求. 铁道部第三勘测设计院, 2000-07

[6] 深圳地铁防水防腐专题会议专家评审意见. 深圳, 2001-05

(收稿日期: 2001年11月19日)

〈作者简介〉

高树东 男 工程师 深圳地铁结构专业负责人

Study on self-waterproofing for concrete structure of phase I project , Shenzhen metro

Gao Shudong

(Metro Branch of No. 3 Survey and Design Institute, the Ministry of Railways, Tianjin 300142)

Abstract In this paper it points out that the know-how of self-waterproofing of concrete structure is to improve the crack resistant ability by taking the phase I project of Shenzhen metro for example. Furthermore the technical measures to improve crack resistant ability of concrete structure are presented in terms of design, material selection, concrete mix ratio and construction technology.

Key Words Concrete Self-waterproofing Crack resistant Impermeability Durability