

技术创新

# 青藏铁路多年冻土区桥梁施工关键技术

陈鹏

(中铁十八局集团青藏铁路工程指挥部, 西藏那曲 853400)

**[摘要]** 介绍了青藏铁路多年冻土区桩基的施工技术及严寒大温差条件下的混凝土施工方案; 讨论了耐久混凝土的应用及质量控制, 耐久混凝土非结构性开裂情况、开裂原因及裂缝防治措施。

**[关键词]** 多年冻土; 钻孔桩; 耐久混凝土; 混凝土裂缝

**[中图分类号]** U213; TU279 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)07-0027-07

新建青藏铁路格拉(格尔木至拉萨)段全长1 142 km, 其中有约550 km线路通过多年冻土区。我集团公司承建了青藏铁路格拉段9标和18标, 全长约80 km, 均位于青藏高原腹地无人区, 线路经过地段海拔高程达4 685~5 072 m, 是全线海拔最高的段落, 为多年冻土区。两个标段跨越唐古拉山山前冰水沉积平原区、唐古拉山低山丘陵区和头二九山区。区内多年冻土上限1.8~3.5 m, 地温分区涵盖了高温极不稳定区、高温不稳定区、低温

基本稳定区和低温稳定区, 含冰量涵盖了少冰冻土、多冰冻土、富冰冻土和含土冰层。

青藏高原独特的冰缘干寒气候, 寒冷干旱, 气候多变, 四季不明, 具有“一日四季”的气候特征。年冰冻期长达7~8个月。蒸发量远大于降水量。此外, 青藏高原与我国东北多年冻土地区相比, 具有年较差小, 日较差大的特点。年内日平均较差10℃~19℃, 极端日较差35℃。气象条件如安多气象站气象统计所示(表1)。

表1 安多气象站气象统计资料

Table 1 Weather statistic data for Anduo weather station

| 气温/℃ |      |       | 绝对湿度/MB |      |    | 蒸发量/mm  |         | 降水量/mm |       |       | 其他     |        |       |        |           |
|------|------|-------|---------|------|----|---------|---------|--------|-------|-------|--------|--------|-------|--------|-----------|
| 年均   | 最高   | 最低    | 平均      | 最大   | 最小 | 年最大     | 年平均     | 年平均    | 年最大   | 年最小   | 年均降水日数 | 年均大风天数 | 年均雾日数 | 年均雷暴日数 | 最大积雪厚度/cm |
| -2.9 | 23.3 | -36.7 | 31      | 11.5 | 0  | 1 782.9 | 1 941.1 | 428.4  | 604.6 | 292.3 | 172.6  | 178    | 8.8   | 47.8   | 39        |

注: 1965年11月建站, 海拔4 800 m。

9标和18标两个标段共有桥梁78座, 累计长22 km左右, 2003年开工, 现已完工。由于两个标段地处气候最为恶劣、地质条件最为复杂的唐古拉山越岭地段, 因此所遇到的技术问题在全线多年冻土区桥梁施工中具有典型性和普遍性。笔者就多年冻土区桥梁施工中的关键技术, 即桩基施工对多年冻土的热扰动; 严寒大温差条件下混凝土的施工

方案、温度控制及防裂; 耐久性混凝土质量控制等三个问题做概要介绍。

## 1 桩基施工

### 1.1 减少对冻土热扰动的施工方案及措施

1.1.1 旋挖钻机干法快速成孔 青藏铁路格拉段施工初期桩基成孔采用冲击钻, 泥浆护壁, 效果不

理想。试验表明,在多年冻土区采用大功率旋挖钻机干法成孔的效果好。采用大功率旋挖钻机钻孔速度快,在非岩石地层3 m/h以上,功效为普通冲击钻机的数倍,更为可取的是钻机自出碴,不用泥浆浮碴,杜绝了泥浆的热量带入。

**1.1.2 长钢筋笼一次快速吊装入孔** 当桩长达到20 m后,一台吊车无法将钢筋笼一次调入孔内时,通常的做法是分段吊装,孔口接长焊接,作业时间长,焊接质量差。施工过程中,采取两台吊车5个吊点将长钢筋笼一次吊装入孔的办法获得成功。具体做法是:主吊车主钩负责钢筋笼一端的两个吊点,主吊车副钩负责钢筋笼1/3处的吊点;配合吊车主钩负责钢筋笼另一端及2/3处的两个吊点;主吊车起吊时,配合吊车跟随主吊车的起吊节奏徐徐将钢筋笼的另一端吊起,保证钢筋笼的形状;当起吊空间满足钢筋笼垂直离地时,摘除配合吊车的主钩和主吊车的副钩,由主吊车将钢筋笼吊装入孔。同时将钢筋保护层可用的垫块改为圆形滑轮状绑在钢筋笼主筋上,使钢筋笼下降过程中的阻力大大减小,同时可防止和减少钢筋笼吊装过程中的塌孔。

**1.1.3 加强工序衔接的组织协调** 成孔前,要切实做好钢筋笼、导管、吊车及混凝土浇灌的一切准备工作,最大限度地缩短工序衔接时间。

**1.1.4 选择适宜的施工季节和时段** 多年冻土区桩基混凝土入模温度要求控制在5℃,困难时可以放宽至10℃。桩基的适宜施工时间为暖初暖末的4,5,10,11月份;混凝土的入模温度易于保证,同时由于地表水和冻结层上水处于冻结状态,不易塌孔。暖季6~9月份施工必须选择施工时段和采取降温措施,否则混凝土的入模温度会超标,最高可以达到15℃以上。为保证入模温度,暖季桩基灌注一般选择在20:00至次日9:00,并对骨料采取洒水、遮阳等措施,不得已在9:00至20:00期间灌注时,对混凝土运输车进行包裹后饱水降温。

## 1.2 旋挖钻机钻具的地质适用性

短螺旋钻头适用于细砂、中砂、砾砂、角砾土,圆砾土及抗压强度不高的风化、中风化岩层;带导向管的勘察钻头适用于强度不均匀、易偏孔的地质情况以及风化、中风化岩层;筒式切削钻头适用于岩层局部破碎、软硬不均、存在孤石与冰层、破碎岩无规律交织,局部抗压强度极高的地质条件;普通旋挖筒式钻头适用于冻结层上水较多致使

孔内积水较多,其他钻头提碴困难的地段。

因地制宜选择钻头,可大大提高钻孔速度及成孔质量;对于下部嵌岩深度深,表层风化覆盖层厚的情况,上部风化层采用旋挖钻机成孔,进入微风化岩层后再改用普通冲击钻成孔可以大大加快整根桩的施工速度。

## 1.3 不良地质成孔技术

冻结层上水发育,地层透水性强的易塌孔地层,须埋设双层护筒,护筒之间填塞粘土,可解决冻结层上水引起的塌孔。

对桩基穿透多年冻土上限,出现承压水塌孔严重的地段,采用膨润土泥浆提供水头压力,全护筒旋挖钻机钻进,并严格控制钻进速度。

## 1.4 桩头养护

桩基混凝土具备在-5℃以上负温环境中硬化而获得设计强度,但青藏高原即使在暖季环境温度也经常出现低于-5℃的情况,因此桩头是桩基的薄弱环节且容易被忽视,因此,必须按地面混凝土进行保温保湿养护。

## 2 严寒大温差条件下混凝土施工

### 2.1 承台墩台身综合蓄热法施工

铁路桥梁承台及墩身表面系数一般小于2,根据严寒地区混凝土施工经验,最低温度-18℃,平均温度-12℃的环境下可以采用综合蓄热法施工。以桥墩墩台身为例,保温材料为棉被,每层厚度5 cm,入模温度分别取5℃,10℃为条件,采用蓄热法养护,计算不同工况条件下混凝土温度下降到0℃所需的时间,计算结果见表2。计算结果表明,当环境气温在0℃时,混凝土只需要保湿养生,无需保温;环境温度在0℃~-15℃之间,只需要覆盖一层棉被采用蓄热法养生;在混凝土温度下降到0℃前,完全可以获得抗冻临界强度<sup>[1]</sup>。

### 2.2 综合蓄热法施工保温保湿养生温度监控

实时监控混凝土结构内外温差及结构表面与环境的温差,对混凝土结构防裂及掌握结构实体强度发展意义重大。为此我们对休冬曲大桥第9承台及DK大桥的拉舍大桥承台的混凝土施工开展了实测:第9承台的结构尺寸为5.4 m×6.4 m×2.0 m,拉舍承台的结构尺寸为6.4 m×10.4 m×2.5 m,2003年8月19日及9月23日分别完成两个承台的混凝土浇注后,立即用3层“塑料布+1 cm厚棉毡+塑料布”包裹进行保温保湿养生,对两个

承台分别进行了连续 15 d 和 20 d 的温度监测，取得了大量的相关数据（示于图 1 和图 2）。

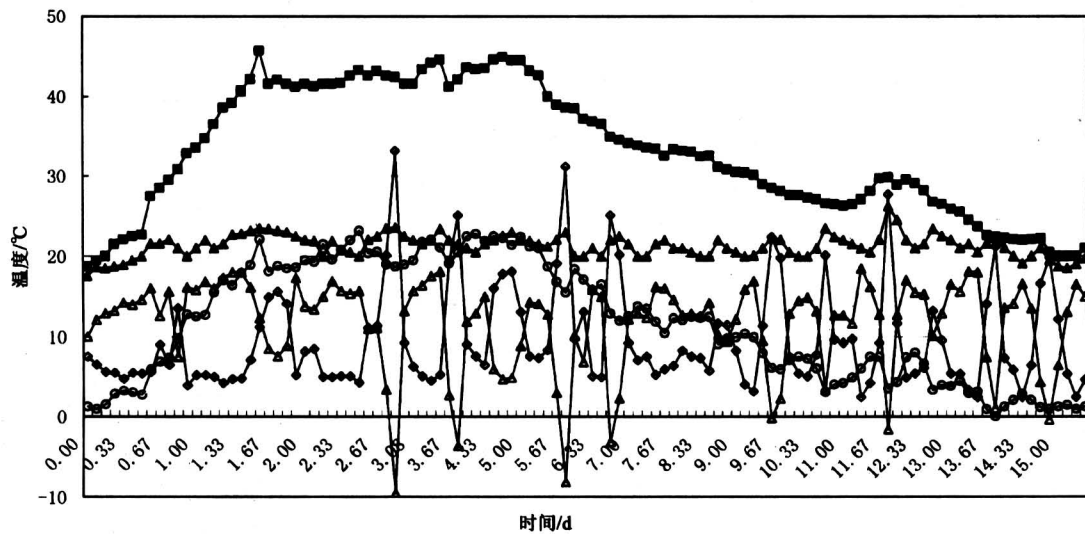
根据成熟度理论，从图 1，图 2 中混凝土表面及中心温度曲线推算，混凝土可在短期内获得抗冻

表 2 不同工况下混凝土温度下降到 0℃ 所需时间

Table 2 Time needed for concrete temperature dropping to 0℃ under different working conditions

| $t_1 / ^\circ\text{C}$ | $t_2 / ^\circ\text{C}$ | $d / \text{cm}$ |       |       |         |         |         |         |
|------------------------|------------------------|-----------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------|
|                        |                        | 0               | 5     | 10    | 15      | 20      | 25      | 30      |
| 0                      | 5                      | 210 h           | 585 h | 900 h | 1 250 h | 1 650 h | 2 000 h | 2 350 h |
|                        | 10                     | 210 h           | 585 h | 900 h | 1 250 h | 1 650 h | 2 000 h | 2 350 h |
| -5                     | 5                      | —               | 257 h | 410 h | 566 h   | 724 h   | 868 h   | 1 009 h |
|                        | 10                     | —               | 258 h | 413 h | 573 h   | 735 h   | 882 h   | 1 026 h |
| -10                    | 5                      | —               | 192 h | 322 h | 447 h   | 570 h   | 679 h   | 787 h   |
|                        | 10                     | —               | 194 h | 326 h | 454 h   | 580 h   | 693 h   | 803 h   |
| -15                    | 5                      | —               | 151 h | 269 h | 377 h   | 481 h   | 573 h   | 662 h   |
|                        | 10                     | —               | 154 h | 273 h | 384 h   | 491 h   | 586 h   | 678 h   |

注： $t_1$ —环境温度； $t_2$ —入模温度； $d$ —保温层厚度



—◇—环境温度 —■—混凝土内部温度 —▲—混凝土表面温度  
—○—混凝土内外差 —△—混凝土表面与环境差

图 1 休冬曲大桥 9 号承台温度曲线

Fig.1 Temperature graph of the Xiudongqu Bridge's 9th abutment

临界强度并最终获得设计强度。

混凝土中心温度在 3 d 以内达到最大，持续时间 4 d 左右，此阶段混凝土内外温差最大，是防止裂缝的关键阶段。随着环境温度的下降，混凝土内外温差增大，必须及时调整保温层厚度以控制混凝土内外温差。按《青藏铁路高原冻土区混凝土技术条件》（以下简称《技术条件》）施工要求，混凝土内外温差不超过 15℃，但从温差监控及混凝土实

体开裂统计情况看，该技术条件过于保守，将温差控制指标定为 25℃ 似更为适宜。

### 2.3 混凝土入模温度问题

2.3.1 《技术条件》对混凝土拌合物的温度要求  
浇注对冻土有直接影响的混凝土（例如钻孔桩混凝土），其入模温度宜控制在 2℃~5℃，暖季困难时可放宽到 10℃，但必须采取降低水化热的措施：浇注在低温或负温条件下养护不直接与冻土

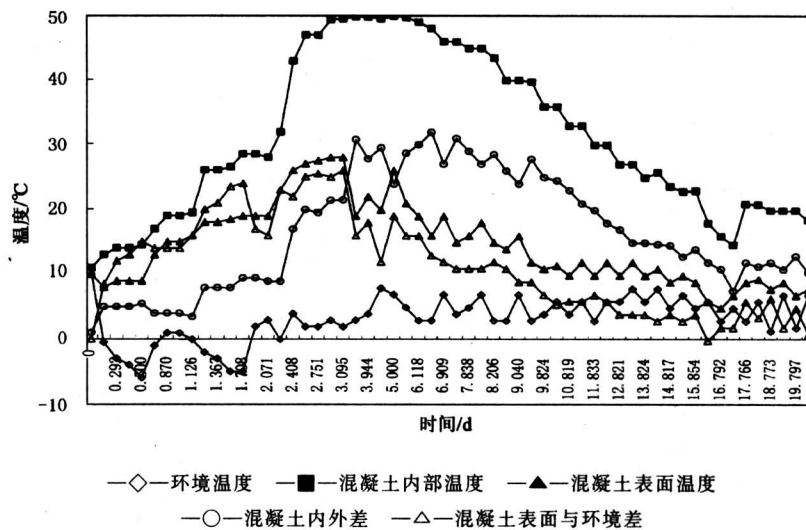


图2 DK1432+883 特大桥拉舍承台温度曲线

Fig.2 Temperature graph of the DK Bridge's Lasha abutment

接触的混凝土,其入模温度宜以 $5^{\circ}\text{C}\sim 10^{\circ}\text{C}$ 为宜。

2.3.2 满足入模温度的工况 以配合比为符合青藏铁路高原冻土区混凝土耐久性技术条件要求的桩基混凝土配合比,碎石露天堆放,温度与外界环境温度一致,水泥及外加剂存放在暖棚内,温度与搅拌棚温度一致,运输环境温度与外界环境温度一致为计算条件,满足入模温度的各工况参见文献[1]。

2.3.3 对入模温度的认识 根据表2,可知混凝土的入模温度由 $5^{\circ}\text{C}$ 提高到 $10^{\circ}\text{C}$ ,混凝土温度下降延续的时间变化很小,即混凝土入模温度对降温时间的影响可以忽略不计,混凝土的入模温度只需达到规定下限即可。因此应该改变以往冬季混凝土施工强调加热原材料拌制“热混凝土”以自体御寒的做法:更合理的做法是拌制“低温混凝土”,强调体外保温以达到抗冻临界强度。混凝土拌制温度低时,其拌合用水量较低,和易性好,流动性大,有利于混凝土浇注均匀密实和混凝土的耐久性,也有利于增强混凝土的抗裂性。减少拌合用水意味着增加骨料含量,这又可减低混凝土的干缩性。也就是说,低温混凝土不仅可以减少温缩裂缝和干缩裂缝,还能提高混凝土的耐久性<sup>[2]</sup>。

### 3 耐久混凝土施工质量控制

#### 3.1 耐久混凝土指标

除格尔木和拉萨外,沿线年平均气温 $-2^{\circ}\text{C}\sim -6^{\circ}\text{C}$ ,年日正负温交替天数约180d左右;沿线地区年均降水量248.5mm,而年均蒸发量达到

1945.5mm,气候干燥缺水。年大风天数达178d之多,大风挟裹砂子,冲击到混凝土表面,对混凝土表面产生强烈的风砂磨蚀。沿线大部分河流的水中存在有害离子,有害离子种类主要有氯离子和硫酸根离子。此外,沿线砂石骨料很大程度上存在碱骨料或潜在的碱骨料反应。青藏高原恶劣的自然环境条件下混凝土除必须具备常规的物理力学指标外,混凝土的耐久性显得尤为重要。为此,根据铁道部科技发展计划项目“青藏线低温早强耐腐蚀高性能混凝土应用试验研究”的要求及相关科研成果,对青藏铁路多年冻土区桥梁混凝土提出了8项耐久性指标:

抗冻性——抗冻融循环次数不小于300;

抗渗性——抗渗等级应不低于P12;

护筋性——混凝土砂浆中的钢筋不得锈蚀;

抗氯离子渗透性——氯离子渗透值不得大于1000C;

抗裂性——表面非受力裂缝平均宽度不得大于0.20mm;

耐腐蚀性——当环境水或岩土中存在有害离子侵蚀时,混凝土受有害离子侵蚀的浓度允许值应符合要求;

抗碱——骨料反应性;

耐风蚀性——暴露于大气中的混凝土,其砂浆的磨耗率不大于 $0.5\text{kg}/\text{m}^2$ 。

#### 3.2 专用高效外加剂及参考配合比

3.2.1 DZ系列专用高效外加剂性能 掺加DZ系

列专用高效外加剂的混凝土性能要求如下：

1) 超塑化。在塌落度达到 200 mm 的条件下，混凝土不泌水、不离析。

2) 负温增强效果明显。在单位胶凝材料用量相同的条件下，DZ 型混凝土在规定温度为  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  的条件下 7 d 和 28 d 龄期的抗压强度比同期基准混凝土分别提高 20%~40% 和 10%~25%。

3) 对冻土的热扰动小。当入模温度在  $5\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右时，离钻孔灌注桩表面 20 cm 处冻土的最大温升为  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，离桩表面 1 m 处冻土的最大温升为  $0.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，离桩表面 2 m 处的最大温升为  $0.21\text{ }^{\circ}\text{C}$ （去除环境温度影响因素）。

4) 塌落度损失适宜。当初始塌落度为 200~

210 mm 时，1 h 后混凝土的塌落度可保持在 170~180 mm。

5) 凝结时间适宜。凝结时间差一般在 30~60 min。

6) 使用范围广。 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ~ $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

7) 高耐久性。塌落度达到 200 mm 左右时，混凝土的抗冻融循环次数达 300 次以上；采用适当的配比混凝土耐  $\text{SO}_4^{2-}$  的极限浓度达 15 000 mg/L 的硫酸盐腐蚀；混凝土的氯离子渗透值不超过 1 000 C；混凝土耐风蚀性能达到或超过道路水泥混凝土的相应水平。

3.2.2 参考配合比 表 3 所列为耐久混凝土的参数配比。

表 3 青藏铁路耐久混凝土参考配合比

Table 3 Referenced ratios of confecting perdurable concrete applied in Qinghai-Tibet railway

| 结构类型  | 环境水质或岩土土质   | 施工方法 | 水泥品种     | 水胶比         | 水泥+外加剂+<br>粉煤灰/ $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ | 外加剂掺<br>量/% | 砂率/%  | 含气量/%                      |
|-------|-------------|------|----------|-------------|---|-------------|-------|----------------------------|
| 灌注桩   | 中等及以下腐蚀     | 导管法  | 32.5 级普硅 | $\leq 0.39$ | 440~470                                       | 内掺 10       | 40~45 | 3~5                        |
|       | 强腐蚀         |      |          | $\leq 0.38$ | 450~480                                       |             |       |                            |
| 基础,墩台 | 中等及以下腐蚀性或淡水 | 泵送法  | 32.5 级普硅 | $\leq 0.39$ | 420~440                                       | 内掺 10       | 38~42 | 3~6                        |
|       | 冻融区         | 斗送法  |          | $\leq 0.38$ | 400~420                                       |             | 32~36 |                            |
|       | 强腐蚀性或矿水冻融区  | 泵送法  |          | $\leq 0.38$ | 440~460                                       |             | 38~42 |                            |
|       |             | 斗送法  |          | $\leq 0.37$ | 420~440                                       |             | 32~36 |                            |
| 预制构件  | 中等及以下腐蚀性或淡水 | 斗送法  | 32.5 级普硅 | $\leq 0.37$ | 380~400                                       | 内掺 10%      | 32~36 | 自然养护 4~6;<br>整齐养护 $\leq 3$ |
|       | 冻融区         |      |          | $\leq 0.36$ | 420~440                                       |             |       |                            |
|       | 强腐蚀性或矿水冻融区  |      |          | $\leq 0.36$ | 420~440                                       |             |       |                            |

### 3.3 耐久混凝土质量控制

3.3.1 质量控制程序及内容 由于混凝土耐久性抽检试验的周期较长，检测结果相对滞后于施工过程，信息不能及时反馈给施工单位，因此耐久性检验应遵循过程控制的方法，分施工前检验、施工过程中检验和施工后检验。

1) 施工前检验：对混凝土原材料品质检验及按《技术条件》要求对配合比混凝土 8 项耐久性指标进行的检验。

2) 施工过程中检验：原材料品质的抽检、现场混凝土拌合物性能检验包括首盘混凝土塌落度、含气量、0.5 h 泌水率以及施工现场抽取的混凝土耐久性试件检验。施工过程混凝土试件耐久性检验项目为抗冻性、抗渗性、抗氯离子渗透性。

3) 施工后检验：对混凝土结构物表面裂缝进行观测<sup>[3]</sup>。

3.3.2 影响混凝土拌合物含气量的因素 在现场

混凝土拌合物三项指标中最困难的是含气量控制，含气量往往偏低，达不到 3%，而混凝土中适量的含气量不仅可减少混凝土拌合物泌水离析，改善和易性，更重要的是能显著提高硬化混凝土抗冻融耐久性，同时提高新拌混凝土抵抗早期冻害的能力。因此必须针对影响混凝土含气量的各种因素进行综合控制，使混凝土含气量达到 3%~6%。影响混凝土含气量的主要因素有：

引气剂掺量——用量增加含气量增大，但达到某一极限值时含气量不再随掺量增多而增大。

水泥——水泥用量增大，含气量减少，每增加  $90\text{ kg}/\text{m}^3$  水泥，含气量约减少 1%；水泥细度增大，含气量减少；水泥中增加矿物混合材，含气量减少；当含碳量高的粉煤灰掺和料加入时，由于碳的吸附，需要掺入较多的引气剂。

砂子和碎石——砂子粒径在 0.3~0.6 mm 时，含气量较大；小于 0.3 mm 和大于 0.6 mm 颗粒较



多时, 含气量显著下降; 含气量随着砂率增大而增大, 随着碎石粒径增大而减少。

水——水的硬度增加, 含气量减少。

温度——温度升高含气量减少。

搅拌及振捣——含气量随搅拌时间延长而增大, 搅拌时间在 5 min 之内增大较明显, 搅拌时间过长含气量又减少, 搅拌 10 min 后含气量明显减少; 振捣会引起含气量的损失, 振捣 2 min 含气量损失约 50%, 振捣 9 min 损失约 80%<sup>[4]</sup>。

#### 4 对耐久混凝土非结构性开裂问题的探讨

耐久混凝土在青藏铁路应用出现了不同程度的非结构性开裂, 裂缝主要是 <0.2 mm 的龟裂。

##### 4.1 混凝土开裂的主要因素及开裂情况

造成开裂的主要因素有: 寒冷、日温差大、干燥、多风的恶劣自然条件, 以及低温早强耐久混凝土胶凝材料用量大, 收缩量大, 水化热大且释放集中。

关于开裂情况: 以承台为例, 在混凝土浇注过程及以后的 1 个月的养生期内, 开裂主要集中在承台顶面及承台侧面上边缘及侧面上 1/3 范围内; 经过冬季, 混凝土表面裂纹显著增多, 遍及承台侧面, 承台侧面上边缘裂纹有增长、增宽迹象。

##### 4.2 开裂原因分析

1) 在混凝土内外温差得到适度控制的情况下(见图 1、图 2), 出现上述开裂情况主要原因应是干缩裂纹。大体积混凝土在内约束条件下产生的干缩裂纹是浅表性的。混凝土脱水干燥始发于裸露表面, 愈深入内部, 脱水愈少, 超过相当深度后(如深过 30 cm)甚至可不予考虑<sup>[5]</sup>。从现场情况看, 干缩裂纹的深度一般不大于 5 cm。

2) 冬季混凝土表面受到寒流冲击, 混凝土表面温度梯度大造成表面裂纹增多和边缘裂纹增长增宽。我国水工混凝土的施工经验表明, 当日平均气温在 2~4 d 内连续下降 6~9℃时, 混凝土(材龄 5~20 d)裸露面可能产生裂缝。在大坝块体的表面裂缝中, 曾有过因遭多次气温骤降发展成为深层裂缝的例子<sup>[6]</sup>。

##### 4.3 耐久混凝土防裂措施探讨

制约混凝土开裂的三大因素是混凝土变形量的大小、抗拉性能及约束条件。影响混凝土变形量大小的内因是混凝土的材质, 外因是混凝土所处的环

境条件。在约束条件、自然环境不可改变的情况下, 混凝土防裂措施主要应着眼于提高混凝土的品质, 减少混凝土干缩, 提高混凝土的均质性和抗拉强度。

##### 4.3.1 降低混凝土的干缩 可采取下述三个措施:

1) 优化配合比。混凝土的收缩主要来源于水泥的干缩, 降低胶凝材料用量可直接降低混凝土的干缩量, 对此有一经验公式:

$$\epsilon_s = \epsilon_{s0}(1 - V_a)^{2[7]}$$

式中  $\epsilon_s$  为混凝土收缩量,  $\epsilon_{s0}$  为水泥石收缩量,  $V_a$  为骨料容积。采用较小拌合水量、较小的水灰比、较好的骨料级配以及较小的塌落度、较低的拌合温度, 都有助于减低混凝土的干缩。

2) 选用优质骨料。粗骨料的岩石种类和骨料品质(吸水率、密度)对混凝土干缩产生的影响见表 4。

表 4 混凝土干缩率受骨料岩种的影响<sup>[8]</sup>

Table 4 Concrete shrinkage percentage using different kinds of macadam

| 骨料岩种 | 密度<br>/kg·m <sup>-3</sup> | 吸水率<br>/% | 混凝土 1 年材<br>龄的干缩率/% |
|------|---------------------------|-----------|---------------------|
| 砂岩   | 2.47                      | 5.0       | 0.116               |
| 黏板岩  | 2.75                      | 1.3       | 0.068               |
| 花岗岩  | 2.67                      | 0.8       | 0.047               |
| 石灰岩  | 2.74                      | 0.2       | 0.041               |
| 石英岩  | 2.66                      | 0.3       | 0.032               |

3) 选用优质水泥。水泥品质影响水泥凝胶的组分、结构和数量, 进而影响到混凝土的干缩性。水泥石干缩性随下列因素而降低: 较低的 C<sub>3</sub>A/SO<sub>3</sub> 比、较低的 Na<sub>2</sub>O, K<sub>2</sub>O 含量、较高的 C<sub>4</sub>AF 含量<sup>[8]</sup>。

4.3.2 提高混凝土的均质性 混凝土表面发生较大干缩裂纹的主要原因是由于施工工艺不当导致的混凝土周边水泥浆多, 骨料少。因此施工中在严格混凝土搅拌、运输质量控制的同时, 必须加强混凝土浇注过程的质量控制, 做到均匀布料、均匀竖向振捣, 严禁用振动棒拖拉混凝土。同时, 拌制“低温混凝土”, 控制入模温度及混凝土内外温差, 加强养护。

4.3.3 提高混凝土的抗拉强度 桥梁结构设计中通常通过增加构造配筋(护面筋)措施来改善混凝土表面裂缝分布、控制裂缝宽度发展, 但这一措施无益于控制混凝土表面裂缝和混凝土内外温差引起

混凝土内部微裂纹的产生。提高混凝土整体抗拉强度才是解决问题的根本之道,纤维混凝土是混凝土防裂的一种解决方案。在混凝土中掺入适量钢纤维,其抗拉强度提高25%~40%,抗弯强度提高40%~80%,抗剪强度提高50~100,冲击抗压韧性提高2~7倍,收缩值降低7%~9%,抗疲劳性能、耐冻融性、耐热性、耐磨性、抗气蚀性、抗腐蚀性均有显著提高。暴露在污水和海水中5年后刚纤维混凝土试件碳化深度小于5cm,只有表层钢纤维产生锈蚀,内部纤维未锈蚀,不像普通钢筋混凝土中钢筋锈蚀后,锈蚀层体积膨胀而将混凝土胀裂<sup>[9]</sup>。笔者认为桥梁结构宜取消构造配筋改用纤维混凝土来防裂。

## 5 结语

多年冻土区桩基施工、严寒大温差地区混凝土施工、耐久混凝土的应用及防裂技术等青藏铁路施工中相继取得了一定的成功经验,但多年冻土、耐久混凝土对科研、设计、施工单位仍是一个新领域、新课题,对它们的认识有一个逐步加深的过

程,还需要做进一步的深入研究。

### 参考文献

- [1] 陈鹏,等. 青藏铁路多年冻土区桥梁混凝土施工温度控制[J]. 铁道工程学报, 2003, (1): 136~140
- [2] 富文权,等. 混凝土工程裂缝分析与控制[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2002. 122~135
- [3] 铁道部. 青藏铁路混凝土耐久性检验评定暂行标准[S]. 2003
- [4] 项玉璞. 冬期施工手册[M]. 第二版, 北京: 中国建筑工业出版社, 1998. 135~140
- [5] Bazant Z P, et al. Creep and Shrinkage in Concrete Structures[M]. John Wiley & Sons, 1982
- [6] 龚召熊,等. 水工混凝土的温控与防裂[M]. 上海: 上海科技出版社, 1993
- [7] Rusch H, et al. Creep and Shrinkage[M]. Springer Verlag, 1983
- [8] Control of Cracking in Concrete Structure[R]. ACI 224R-80
- [9] 陈希. 钢纤维混凝土性能与应用前景[J]. 中国水利, 2003(5B)

# The Key Technology for Building Bridges in Perennially Frozen Earth Area During Constructing Qinghai - Tibet Railway

Chen Peng

(Qinghai - Tibet Railway Project Headquarters of The 18th Bureau Group  
Ltd of China Railway, Laqu, Tibet 853400, China)

[Abstract] This paper aims to give a compendious introduction of some key technologies in constructing Qinghai-Tibet railway project, which includes: bored pile building technology in perennially frozen earth area, concrete construction schemes under frosty conditions with big difference in temperature, applications and quality control of perdurable concrete, perdurable concrete's cracking cases, cracking reasons and some preventive measures for it.

[Key words] perennially frozen earth; bored pile; perdurable concrete; crack of concrete