

# 基于材料选用和温度监测的大尺度混凝土构件跳仓法施工的裂缝控制技术

毕英伟

上海建工二建集团, 上海 200080

**[摘要]**文中首先梳理了混凝土结构的概念、基本特征、主要产物,以及混凝土施工时的一些常见情况与施工方法等。重点分析了混凝土结构裂缝成因。在此基础上,介绍了跳仓法产生的原因、原理,及施工方法。并且结合跳仓法的施工技术,给出了相应的材料选取建议。并重点整理和总结了裂缝控制的方法。最后给出了两个与跳仓法相关的大尺度混凝土构件在裂缝控制中所采用的方法以及三个破坏案例中裂缝成因分析。

**[关键词]**大尺度混凝土;跳仓法;裂缝控制;温度监测

DOI: 10.33142/aem.v6i9.13822

中图分类号: TU745

文献标识码: A

## Crack Control Technology for Large Scale Concrete Component Jumping Construction Based on Material Selection and Temperature Monitoring

BI Yingwei

Shanghai Construction No. 2 Construction Group Co., Ltd., Shanghai, 200080, China

**Abstract:** The article first summarizes the concept, basic characteristics, main products, and some common situations and construction methods during concrete construction of concrete structures. The focus was on analyzing the causes of cracks in concrete structures. On this basis, the reasons, principles, and construction methods of the jumping warehouse method were introduced, and combined with the construction technology of jumping warehouse method, corresponding material selection suggestions were given, and focused on organizing and summarizing the methods of crack control. Finally, two methods for crack control in large scale concrete components related to the jumping chamber method were presented, as well as an analysis of crack causes in three failure cases.

**Keywords:** large scale concrete; jumping warehouse method; crack control; temperature monitoring

### 引言

钢筋混凝土结构物已广泛应用于建筑、桥梁、高架、地铁、防波堤、栈桥、港湾设施、能源设施等。素混凝土结构物则多用于水坝、公路,隧道。当混凝土构件的一般截面尺寸大于 0.5m 就需要考虑水化放热。此外,在邻水与极端环境条件下,还需要有耐久性设计与防腐蚀施工方法。混凝土的宏观力学特性(比如抗压强度和弹性模量等)的最终形成需要一个水化过程,即 28 天。此期间的室外养护条件,主要是温度和湿度的控制会决定混凝土质量(包括主应力和弹性模量  $E$ )和混凝土的体积变化(收缩  $S$  与徐变  $C$ )。从组成上看,混凝土是水泥浆(水化物)和粗、细骨料结合而成的胶凝复合体,并包含尺寸大小各异的孔隙。混凝土的抗压强度和抗拉强度会随着水泥水化的进行而表现为关于龄期的一个函数。

给定材料的基本参数后,计算大体积混凝土构件的受力情况,可以大致预测裂缝的扩展。此外,还要关注收缩、徐变等特性。从施工阶段到荷载形成后的使用阶段,在温度和湿度等环境条件下,结构在材料本身的特性(主要是收缩、徐变或松弛)变化引起下的强度、徐变、刚度/弹性模量的力学参数的变化。

水泥基胶凝材料在水化过程中,1~3d 达到峰值,然

后迅速下降并趋于平缓。7~14d 后接近环境温度<sup>[1]</sup>。在浇筑后随着温度的变化发生收缩或者膨胀,其特点是混凝土早期外冷内热,后期随温度变化而变化。在浇筑后,随着强度的不断增长,产生水化热,失去大量水分,导致混凝土收缩变形。特点是早期收缩大、后期收缩小、表面收缩大,以及内部收缩小。

需指出的是,混凝土的抗拉特性约为抗压特性的 1/10~1/8。大多数混凝土的抗压破坏,也只是非主应力面上的抗拉破坏,在早期大体积混凝土还未形成最终强度前尤其明显。沿着梁或板的主应力方向上会有很大的膨胀压应力和收缩拉应力。所以,作为侧向的表面(可观察到的结构表面)非常容易产生拉应力裂缝,而无论它是水化放热阶段的膨胀受压非主应力面上的拉应力裂缝,还是收缩受拉的主应力面上的拉应力裂缝。

研究裂缝控制的对象主要是结构工程中的大体积构件:比如大底板、楼板、墙体。从材料角度仍然可以理解施工中的一些常见现象:比如夏季施工时,混凝土结构收缩厉害;雨季施工时收缩量小,甚至会有先膨胀后收缩的现象。水泥硬化体的重要水化产物为水化硅酸钙(C-S-H)的细微结晶(C:CaO, Si:SiO<sub>2</sub>, H:H<sub>2</sub>O)构成了的混凝土体积,并伴随其他材料填充其中。雨季施工时,其中的一

些氧化物 CaO 和 MgO 等会继续和水反应,产生更多物质。

此外,还有 10%~15% 的尺寸不一的孔隙。这些孔隙,多半会被水占据。当然,还会有水化的 CH, Aft, Afm, 包括可能的外加剂、杂质等很多产物混杂在一起。若搅拌不均匀和充分会产生“离析”现象。新拌制的混凝土,最轻的水上浮,重的骨料下降,导致上下部强度相差能达到 10MPa。此外,还需要关注碱骨料、环境腐蚀因子(二氧化碳、氯离子)的影响、钢筋粘结强度、水的分离,以及钢筋粘结强度的区别。

### 1 裂缝成因分析

裂缝产生的原因包括设计不妥、材料缺陷、施工质量、使用维护不当、环境侵蚀的耐久,和偶然作用的残余裂缝等。从能量的角度看,固体断裂的本质是一个应力应变集中,能量积聚并释放的过程。混凝土结构在水泥基胶凝材料水化放热并逐渐凝固骨料形成强度的过程中,其结构应力会随着时间有一个变化。当然,混凝土属于多孔介质的带有弹塑性和粘弹性特征的非连续介质固体材料。混凝土凝固后产生裂缝的几率很小。

#### 1.1 裂缝产生的因素

混凝土结构的裂缝主要是混凝土结构形成具有宏观尺寸的构件在承受压、拉、弯、剪、扭的作用。尤其是拉,以及弯、剪、扭作用中可以分解出来的拉的作用力。因为混凝土结构其抗拉强度一般只有 1/10~1/8。相比于压,混凝土并不抗拉,也就不抗弯、剪、扭。

##### 1.1.1 荷载作用

承载受力的构件裂缝总是在侧面上,沿着受压方向产生和延伸的。主拉应力大于抗拉强度,则垂直于主拉应力方向混凝土结构会开裂。所以才会工程中增加钢筋结构,根据需要的受力情况,设计并实际工程中用模板工程搭设并浇捣混凝土,形成一个钢筋混凝土整体结构很好的受力体系。即使是受压构件柱的破坏或裂缝的形成,也是由于构件是三维的,其破坏也往往是非主应力上的受拉破坏。

##### 1.1.2 非荷载作用

除了荷载作用下混凝土会产生裂缝外,其他一些因素也会。这些因素包括:混凝土的脆性、混凝土的收缩、温差引起的约束应力、强迫位移引起的约束应变、设计与施工缺陷、耐久性环境作用。其中,收缩又包括:凝胶收缩、干燥收缩,和碳化收缩。水泥净浆硬化后的收缩应变约为 1500~6000  $\mu\epsilon$ , 平均为 3000  $\mu\epsilon$  ( $1\mu\epsilon=10^{-6}$ )。

#### 1.2 制约裂缝发展的因素

在混凝土结构施工过程中,仍有一些因素会制约混凝土的裂缝发生和拓展。主要包括:

混凝土材料的塑性(徐变和应力松弛)、压应力闭合裂缝,以及裂缝的自愈。

现行混凝土规范中,大尺度混凝土结构为了避免施工和使用时的收缩裂缝,均要求设置永久伸缩缝和施工后浇

带<sup>[2-3]</sup>。永久伸缩缝在防水材料老化后经常成为渗漏水的原因<sup>[4]</sup>。后浇带不仅清理困难,施工前始终处于漏水状态,影响施工;施工时,质量不易保证,常常成为开裂和渗漏的薄弱处。大底板处的后浇带还有抗浮稳定性等安全隐患;楼板处的后浇带使得模板架设时间更长,影响室内施工和装修,延长工期。墙体上的后浇带在预防墙体与楼板处收缩裂缝的效果不佳,常成为经常开裂和漏水的原因。此外,越来越多的预应力施工技术应用在大尺度的混凝土结构中,这与后浇带留置存在矛盾:当预应力筋跨过后浇带时,预应力筋必须等后浇带封闭且达到强度后才能张拉,减缓了施工进度;在逆作法基坑开挖时,后浇带也会带来换撑时的底板抗水平力不足等问题。

因此,预防混凝土裂缝,需要从设计时考虑材料、施工、环境等因素,采取综合性控制办法,有条件地取消后浇带和结构伸缩缝,从而方便施工,保证施工质量。在大尺度混凝土结构中,推荐使用跳仓法施工技术。

### 2 跳仓法施工

最初,跳仓法是以混凝土本身抗拉强度抵抗后期收缩应力,控制混凝土收缩裂缝的施工技术<sup>[4]</sup>。随着技术的发展,跳仓法发展为集设计、材料、施工、环境、管理为一体的综合性施工管理技术。

从技术角度来说,跳仓法是把建筑物分成若干区块(仓),相邻区块混凝土至少间隔 7d 才浇筑相连,通过跳仓间隔,释放部分大体积混凝土水化热前期产生的温度变形和干缩变形。它是以施工缝替代后浇带,从而取消永久变形缝,实现无缝设计的施工方法。跳仓法施工,取消了所有底板后浇带,减少底板后浇带区域混凝土用量,降低后浇带混凝土标号,减少钢板止水带、钢筋和钢板网用量,并取消后浇带中的橡胶止水带、满涂沥青软木和钢支撑传力带<sup>[2]</sup>。跳仓法施工显著缩短工期,节约清洗后浇带的人工成本,规避了底板渗漏的风险,节约堵漏的成本,规避了后浇带封闭对后期水电及装饰施工等的影响。

从水泥基材料的水化放热过程角度来说,跳仓法是利用了混凝土水化放热且逐步硬化形成主体结构强度的过程中,早期收缩量大、抗裂性能差、后期收缩相对小,和强度高的特性,采用“分割”大尺度的混凝土构件成多个较小尺度施工区域的施工方法。

从施工组织和管理角度来说,跳仓法技术的应用能同时允许许多工种同时参与工程建设,流水搭接施工,缩短流水节拍,大大减少了工程整体施工时间<sup>[5]</sup>。

### 3 材料选取

除了温控和湿度控制,提升大尺度的钢筋混凝土结构的整体强度的办法仍需要着眼于混凝土和钢筋。首先需要选购性能优质的原材料,优化混凝土配合比,选择合适的骨料粒径与级配,减少杂质和含泥量,减少胶凝材料用量和用水量,降低水化热。控制混凝土入模温度与入模塌落

度,保证混凝土均匀密实。加强构造钢筋,包括梁中的腰筋、分仓缝附加筋,以及板角处的放射筋等。

### 3.1 水泥

混凝土的选择是根据混凝土建筑物的设计和承载力要求决定的。跳仓法施工大尺度混凝土结构的原则是在确保抗压强度足够的情况下,尽可能选用抗拉强度高的混凝土配合比方案。同时需要通过尽可能降低混凝土配合比中的水泥和水的用量,这样能最大程度地降低混凝土的温度裂缝和干缩裂缝。在混凝土试配阶段,需要掌握所用混凝土1d、3d,和7d的水化热、缓凝时间,和外加剂。推荐使用抗裂防渗的混凝土。必要时,可添加抗裂纤维。抗裂纤维可以很好地与配筋相配合,一同增加抵抗硬化后干缩的内部拉应力,从而减少干缩裂缝的形成。

### 3.2 外加剂

膨胀剂补偿混凝土收缩,提高混凝土抗渗性作用,增强防水和抗裂性能。除了正式浇筑前需要做三组不同水灰比的混凝土级配对比试验(两组对比水灰比一般与标准级配的水灰比相差5%)。还建议描绘出混凝土水化放热曲线,从而计算出不同时间段该体积(仓段)整体放热量,以及由于温度变化而产生的膨胀和收缩。

工程中水泥宜采用普通的硅酸盐水泥、矿渣水泥。不应采用铝酸盐水泥、铁铝酸盐水泥、高铝水泥、早强水泥、快硬水泥,砂的粒径应在5mm以下,细度模数控制在2.3~3.0的河沙,不得采用细砂、特细砂,含泥量小于3%,砂率控制在35%~45%,粗骨料含泥量小于1%。粉煤灰掺量不应大于15%的水泥用量,矿渣掺量不得超过水泥用量的20%。水胶比控制在0.35~0.50。控制现场浇筑塌落度宜小于15cm。

## 4 裂缝控制方法

跳仓法施工需配合相应的减小收缩和增强抗裂性能的设计与施工措施,以“先抗后放”的设计思路,来控制裂缝的发展。无法及无需跳仓施工的区域使用膨胀加强带施工。跳仓施工缝采取钢丝网,施工缝表面粗糙,无需凿毛,清洗后可再次浇筑。相比于留置永久变形缝和设置后浇带的做法,避免了后浇带的清理困难,提高了施工效率,方便现场施工,减少了后期渗漏的隐患。

### 4.1 技术要点

“先抗”即通过跳仓间隔施工减小前期大部分的温度变形,释放早期大量的温度收缩应力。初凝后(一般是2~3h),需要细致的抹密压实,尽可能消弭大体积放热而引起的混凝土整体塑性膨胀变形而产生的初始裂缝。

“后放”指的是通过浇筑后及时地保温、保湿养护,让混凝土缓慢降温、缓慢干燥,让水化放热过程平缓,不出现温差过大的情况,水化反应引起的主体结构硬化过程充分。从材料的微观力学角度看,即生成整体性较好的水合硅酸钙(C-S-H)。让放热反应的前期膨胀压应力阶段的

应力曲线平缓,硬化后干缩拉应力曲线平缓,且两条曲线尽量叠加,而减小整体混凝土单元的应力。让混凝土在整个形成的过程中尽量在材料自身的弹塑性和粘弹性能力范围内。以混凝土的抗拉能力抵抗后期的收缩应力,防止混凝土断裂。

跳仓法一般需要编制专项施工方案。选择合理的混凝土配合比、增加钢筋用量、选取合适的养护措施,和控制施工时的温度变化是有效的控制大尺度混凝土施工裂缝的有效方法。施工缝留置原则及部位:尽量避开集水井、电梯坑、高低跨等结构变化较大的部位,且设置在结构受力较小部位。底板施工缝留置在所在跨1/4~1/3处,外墙水平施工缝留置在底板500mm处。竖向施工缝留置在所在跨的1/4~1/3处,梁板施工缝留置在所在跨的1/4~1/3处。

### 4.2 养护措施

养护根据季节的不同,分为薄膜加保温材料养护、喷雾养护,和水养护等。养护时间不小于14d。在内部与环境温差小于20℃时可掀开保温层。全部空麻袋不宜在一天内全部掀去,宜分两天进行。第一天采用间隔方式掀去半幅,使温度通过有限空间散去,避免急剧降温,余下部分应在第二天中午掀去。混凝土表面弹线工作应在养护完成后进行。放线时,只揭开轴线位置,放线时间应避开中午高温时期。温差控制在25℃之内;施工加强混凝土养护;充分考虑混凝土自身收缩的危害,采取一定的抗裂措施。夏季高温天气应掺加一些缓凝剂。

### 4.3 施工过程管理

施工前,与设计等单位充分沟通,技术交底详尽。与泵站建立联动机制,提前适配混凝土,掌握混凝土坍落度和和易性;施工过程中充分振捣,抽查混凝土塌落度。通过温度监测和调节,掌握水化反应过程,了解最大温度和干缩应力出现时间,及时检查,必要时二次抹压;施工完成时需严格验收钢筋、机电、人防、模板等隐蔽工程。妥善处理施工缝、止水钢板、钢丝网片、测温设施的预埋。

## 5 实例一:温度监测范例

以上海虹桥二期项目为例,其底板和承台均由项目部进行温度监测与控制。在混凝土浇筑及固化过程中,监测内容包括监测时间、混凝土水化热即时温度、内表温差、温降速率和大气温度。混凝土浇筑完成后,表面点温度与中心点温度温差达到25℃或测温点温降速率达到-2.0℃/h,以书面报告形式警示。

### 5.1 控制指标

混凝土入模温度 $\leq 30^{\circ}\text{C}$ (在50mm~100mm深的温度);混凝土在入模温度基础上升温不宜大于30℃;混凝土浇筑块体的里表温差不宜大于20℃;混凝土柱体降温速率不宜大于1.5~2℃/d;混凝土表面与大气的温差不宜大于25℃。

## 5.2 监测布点

该项目中某地块大底板共设置了 59 个温度传感器,基坑外布置 1 个大气温度监测点;底板承台每个跳仓的仓块中心在承台和底板部位各布置不少于一组测温点,在混凝土表面、底面、中心布点。测点宜在混凝土体外表面下 50~100mm、混凝土中心位置。

测温点采用预埋  $\Phi 16$  钢筋作监测点,配合温度计进行温度测量控制。深度方向每个测点布置三个测温管,平面呈三角排列,间距 500mm。所有测温孔需编号,测温时应将温度计与外界气温隔离,用保温材料将测温管上口塞住 3~5min 后读数。测温孔布置在温度变化大、易散热位置。混凝土浇筑前 3 天进行测杆制作;混凝土浇筑前 1 天开始布置测温点,安装调试仪器;混凝土浇筑时开始监测。

## 5.3 监测频次

里面温差、降温速度以及环境温度在混凝土浇筑后,每昼夜不应少于 4 次。温度达到最高点并稳定时每 8h 测一次。温度开始下降后,每 12h 测一次至结束。入模温度、大气相对湿度测量,每台班不应少于 2 次。监测频次为 1~7 天内,1 次 6 小时,7d 养护结束,1 次 24 小时。底板表面无保温覆盖时温度与中心点温度的温差降至 20℃,或中心点温度降至 50℃ 以下时停止监测。

实时监测报告内容包括:监测时间、天气情况、大气温度、混凝土表面温度和温降速率、中心点温度和温降速率、底部点温度和温降速率、内表温差、布点位置示意图。

## 6 实例三:破坏案例分析

大面积薄层混凝土易出现裂缝。以某个实际工程案例为例分析,该结构构件为一预制大型箱梁,梁 60 米长 17.5 米宽。梁的顶面预制场做横坡。部分裂缝走向顺着梁的长度方向;

部分裂缝既不顺梁长也不顺梁宽,有一个倾斜角度(一般情况下这类裂缝都是裂缝长度垂直于坡度方向);还有部分网裂。

分析裂缝成因时裂缝走向往往是关注点,虽然三处裂缝走向不一样,但成因一样,属于塑性收缩裂缝。这种裂

缝成因是混凝土塌落度比较大,白天浇筑气温较高,风速大,整个过程工艺不连续造成的。即体现在从整平完到搓抹之间的一个时间间隔较长。

工程上普遍认为浇筑过程是重点,搓抹过程是辅助。但对于大面积薄层结构来说,搓抹也重要。分析裂缝可以取芯样检测。对着裂缝从上往下取芯,这类芯样通常不能轻易掰开,但打开之后就会发现结构物顶部这部分(2~10cm),裂缝处骨料完好无损,即裂缝绕着骨料走。这种现象说明,裂缝发生的时间较早,因为混凝土的强度较低,不足以让骨料开裂。故要想避免这类裂缝,除了避免塌落度过大,尽量晚上浇筑、晚上搓面,选择风速较小的浇筑时间。如果搓面时间过长,那么裂缝几乎避免不了。第一次搓面过早,会导致骨料下沉。第二次搓面较晚会加剧裂缝发展。塑性收缩裂缝通过工艺可以很大程度地减少或是避免。

## 7 总结与展望

混凝土除了要有足够的承载力,浇筑过程中湿度和裂缝的控制还需要考虑。在全生命周期要求下结构的使用寿命是在结构的不断劣化和修复中达到的,需要有及时的检测与维护。

### [参考文献]

- [1]陈峰. 浅谈大体积混凝土温度裂缝控制[J]. 江西建材, 2016(28): 247-249.
  - [2]史佳. 超大面积基础底板“跳仓法”施工技术[J]. 浙江建筑, 2018(35): 11.
  - [3]王传胜. 大体积地下室顶板混凝土跳仓法施工技术[J]. 石油化工, 2016(123): 110-182.
  - [4]陆群. 超大面积楼板跳仓法施工及工程应用[J]. 建筑施工, 2017(39): 492-494.
  - [5]朱绪伟, 杨鑫, 卜凡国, 等. 浅谈大体积混凝土温度裂缝控制[J]. 建筑施工, 2016(35): 107-108.
- 作者简介: 毕英伟(1985.10—), 上海大学, 工程管理, 上海建工二建集团有限公司, 工程师。主要从事建筑施工和现场技术管理工作。