

多伦多电讯塔的预应力施工

周 华 摘译

摘 要 本文简要介绍了多伦多 CN 塔在进行预应力施工时所遇到的问题 and 解决问题的方法。

关键词 预应力混凝土 预应力筋 施工

多伦多电讯塔(以下简称 CN 塔)高 553m,为世界上最高的独立式构筑物。该塔建造于 1973 年~1975 年。其结构的主要特点是,在基础及上部结构中(大部分塔高范围内)都采用了现场后张预应力。除某些部位设计为钢结构外,其余均为预应力混凝土结构。基本上所有的预应力都是同心布置,设计不允许出现拉应力。

地上结构 442m 高的混凝土塔身采用三叉形截面和向上收缩的构造。中央塔身用滑模法施工,工期约八个月。

高空中的塔楼分为七层,内部设有观光餐厅和为广播服务的各项设施。塔楼的基本支承结构是一组十二片径向布置的悬挑式混凝土墙,这些墙开始用一些预应力筋与滑升塔身连成一体,墙体施工完毕后,再用一道后张预应力环梁把悬挑结构箍住。

位于塔顶的 106m 钢桅杆是用直升飞机吊装的。作为保护措施,在安装后的钢桅杆表面涂覆了一层玻璃钢外壳,以防其在冬季结冰,而大量的破碎冰块会掉到附近的建筑物或街道上,造成危害。

一、设计考虑

由于 CN 塔的绝对重要性以及相当广泛地应用了颇为先进的施工方法,因此要十分谨慎地研究现有的技术,以确定其在新的工况下的有效性和实用性。

1. 要应付因使用大量高强预应力筋而产生的非常巨大的力(最后共使用了 1000 余吨预应力筋)。这些力的大部分基本上都作用于一个单独的结构物上,即都作用在塔身上。

2. 采用滑模技术建筑塔身是相当先进的技术,但它也对时间进度计划和有关的细部处理、预应力筋的就位及张拉工序所需的空间等问题带来了严格的限制。

3. 由于破记录的塔身高度,预计施工至少要经历一个冬季。因此,浇筑混凝土和后张预应力的操作就必须得经得住非常严酷的气候条件的考验(实际上,在大风和寒冷的天气产生了不少麻烦,而且延误了工期)。

4. 竖向和长线预应力筋的施工同以往所熟悉的实践经验有很大差别,这就需要引入一整套全新的有关就位、固定、张拉以及孔道灌浆等的实用方案。比如,对后张预应力损失的精确预测就非常困难,因为对这类预应力施工缺少足够经验。

5. 竖向孔道灌浆将会在孔道内产生相当大的静液压力,这一静液压力产生的后果也很难预料。

6. 决定在基础中配置后张预应力筋,需要对(有断裂的)岩石地基受预应力作用的效应进行广泛的研究。

7. 决定用后张预应力环梁作为塔楼的支承结构,这就提出了涉及受限制的空间及需要在十二边的多边形上产生均匀和对称的最终应力等复杂的几何问题。

8. 实际上,有一部分预应力筋不得不在寒冷的季节就位并张拉,当塔身混凝土的温度降到冰点以下时,灌浆是不可能的,只能推到数月后进行。因此必须考虑预应力筋锈蚀的可能性。

上述的几个问题仅仅是可以预料到的影响后张预应力施工的主要问题,在施工期间还会有许

多更为具体的直接与设计及施工有关的急待解决的问题出现,所有可以预料到的技术问题必须在设计过程中加以确认和解决。但是,许多无法确定的和不利的因素不可避免地会在未知情况下和施工过程中出现。这意味着对这些问题要有预见并且要在所留设的安全储备内加以补偿。由于这个构筑物的重要性和非凡的规模,适当调整了安全储备度,而且事实上,从经济的观点出发,即使是相当微小的施工差错和误工都是不能允许的。

由于在建造和设计这座塔中出现了那么多的新情况,所有可用的技术和操作手段都不得全部动用。设计部门和施工单位之间那种职责分明的做法必须加以摒弃。在这个工程上,设计者和建造者之间最大限度的合作是高于一切的。

二、基础预应力施工

作为最终施工采用的基础底板方案,是经过长期设计研究的结果。因此决定对底板施加预应力。

底板的几何形状呈“丫”型,这主要是由塔身的形状所决定的,同时也是根据基础必须座落在相当浅的深度上这一情况所决定的。

就CN塔的情况来看,力的传递、发布以及应力的形成可分为三种机构(见图1):

1. 基础底板混凝土中的拉应力。
2. 岩石与混凝土接触面上的摩擦力。
3. 基础底板周边岩壁的被动反力。

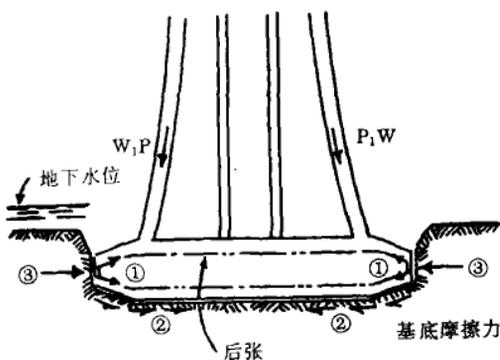


图1 基础底板的受力

- ①混凝土中的拉应力
- ②岩石与混凝土间的摩擦力
- ③岩壁的被动反力

据此,进行了如下的推断:

由于岩石的性质(夹有粘土的若干薄岩层,并随瞬时动力荷载而出现很高的孔隙水压力),摩擦力的变动变得很难预料,而且,只有在发生了某种运动之后,摩擦力才可能出现。这种受力机制必然会使基础产生开裂,而这种开裂是最不希望出现的,因为水位处于高出基础底面约9m的高度上。所以,为阻止水的侵入和防止大范围的开裂,决定对混凝土基脚施加预应力。这样,整个底板就按无裂缝设计,并且混凝土将不承受拉应力。

预应力筋是按照对称三角形的形式布置的,而且还必须躲开基脚中的空洞,这个空洞是给塔身的后张预应力张拉操作预留的(见图2)。最后确定的预应力筋的布置形式如图3所示。

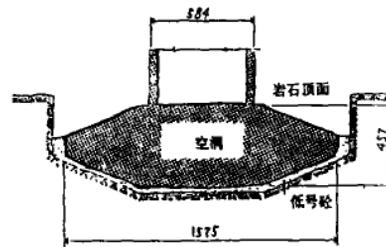


图2 基础剖面

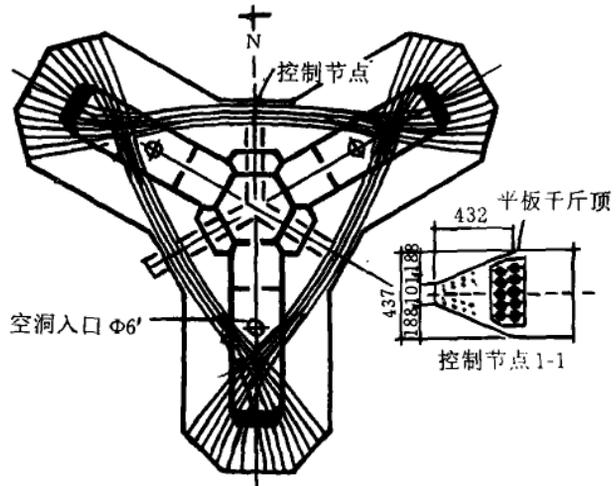


图3 基础预应力筋平面布置和安放平板千斤顶的控制节点断面

施工期间,特别是在张拉预应力筋的工序期间,岩石基层的运动效应必须加以考虑。由于在施加预应力时,座落在岩石上的基础要产生移动,故上述区域内对岩石的任何扰动都必须加以避免。尤其是不能允许岩石中存在的竖向断裂沿基础底板边缘伸展,或形成新的裂缝。显然,这意味着基础底板尽端的所有运动都必须消除并成为运动为零的点,但预应力张拉又只能在各Y形分肢的端

头附近进行。

上述问题因采用在塔心附近设置的开放式节点(见图3)而得以解决。在那里装设的平板千斤顶抵消了因预应力张拉所引起的基础底板的缩短。

48m 预应力筋的张拉是通过控制平板千斤顶的行程交替加压进行的。为达到应力对称,采取了两端同时张拉的方法。

每束预应力筋先张拉到 2400kN 力,然后再减至 1800kN 力。这样,建立在基础底板中的两维空间应力平均约为 0.7MPa。

三、出现的问题和解决的方法

采用半刚性套管作为预埋管,其在大体积混凝土的浇筑中与混凝土的结合出现问题。例如,因没能提供足够数量的定位支撑而导致的管道位移,有碍于预应力筋的穿入就位。穿筋作业是安排在浇筑混凝土之后进行的。管道位移造成了工期拖延,并且原来安排的一些预应力筋因管道堵塞和折弯无法穿入而损失。

由于远端锚固端没能夹持住钢绞线,在进行两端交替张拉时也损失了一束预应力筋。这束预应力筋后来被替换了。张拉时,已建立在预应力筋中的应力的能量非常之大,以致没夹持住的那束钢绞线把张拉千斤顶从操作位置上弹射了出去。幸好这个故事没有造成人员伤亡。

四、塔身预应力施工

设计准则

有关塔身的基本设计思想早在研究阶段就建立起来了,决定塔身要全部施加预应力,这样,在预期的极端荷载作用下,混凝土中将不产生拉应力,这一极端荷载为 50 年一遇的最大风荷。

对于最大的受压纤维处,整个横截面上允许的上限应力为 17.5MPa。这个允许应力包括由自重、风荷以及后张预应力等产生的所有效应。

规定了塔壁的混凝土抗压强度为 35.0MPa,用于竖向的低碳钢钢筋的含筋率在 0.5~1.0% 之间。

万一出现飓风的情况(超出前面规定的风压值),那塔实际上就会因可能出现的裂缝而变成一个“部分”预应力结构了。但是,考虑到这种情况是罕见的,因此并不认为这种可能性严重到必须增

加钢材和混凝土的用量以提高保险性的程度。极限强度分析也表明,配置了一定数量的后张预应力筋和非预应力筋后,便提供了阻止破坏的足够的安全系数。(注:对于 50 年一遇的风力作用,在包括动力效应和次生效应等所有因素的极限状态下,把有效荷载系数定为大约 2.3。)

塔身的后张预应力筋共 144 束,每束含有 16 股至 31 股由 7 根钢丝组成的直径为 12.7mm 的钢绞线。除塔翼截面的外侧部以外,这些预应力筋是均匀分布在塔壁的大部分地区的。所有塔壁的厚度从基础到顶端几乎不变。

因为锚具可以从基脚中的空洞内带入,所有的预加应力筋就都锚固在基础上。预应力筋沿各自的塔壁向上延伸,直至顶端,在那里由顶端锚具锚固(见图4)。

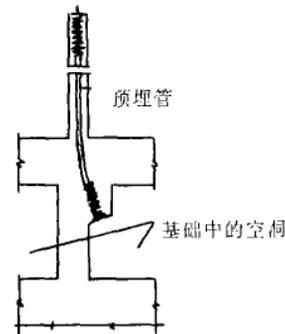


图4 预应力筋的锚固

除一束以外,其余的预应力筋都成功地从基础处进行了张拉。之所以安排在下端张拉,是为使破坏作用降低到最小程度和尽可能不影响滑模施工。

图5表示了塔壁中预应力设计约束曲线以及由后张预应力实际建立起来的有效值。整个塔身预应力筋的实际分布情况汇总于图6。

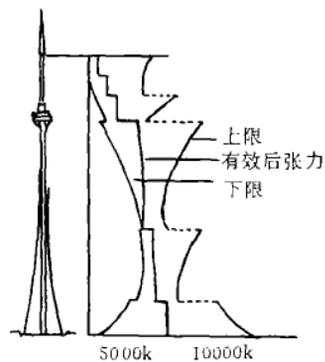


图5 塔身预应力的设计曲线与实际值

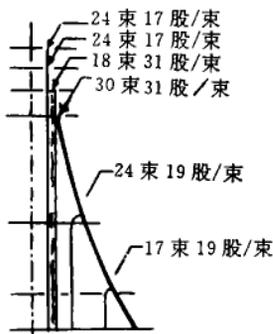


图6 塔身预应力筋的分布

所有的预应力筋都是整根穿入孔道的，这免去了使用连接装置及中间张拉工序，但是应力伸长也相当大。

在设计阶段，无论是施工的具体顺序还是季节与施工工序的关系都是未知数。在计划安排中，天气条件会造成工期拖延以及带来许多困难是预料到了的，但是天气条件究竟能影响到什么程度却无法确定。其它预料到的困难有：由于把预埋管碰扁或混凝土稀浆流入管中造成的堵塞；在穿筋前对预埋管进行清扫的可能性无法确定。总而言之，就位和张拉这样长的竖向后张预应力筋，肯定会遇到很多难以预料的困难。因此损失几根甚或整束预应力筋是十分可能的。恢复或更换这些损失掉的预应力筋，将会造成工期严重拖延及费用高昂。

另外，就预应力来说，本应在塔身的危险部位有效地建立起来，但在设计阶段却存在着许多未知因素。这是由于缺乏对预应力损失值进行评估的经验和许多无法预料的困难。因此，配置了比基本需要大得多的预应力筋，用以弥补这些未知因素可能产生的不利后果。在施工中，根据每组筋张拉时预计会出现的危害和困难以及实践中获得的经验，对这些超量配置的后张预应力筋进行了不断地重新估计和调整。

补偿的方法还包括预留一些备用的孔道。如果用不着的话，就同有筋的孔道一起灌浆，不使其空着。所用管子的直径也做了选择，原则是要能使多于设计数量的预应力筋穿入其中。这一灵活措施使得补充那些部分或全部损失了的以及无法穿入或张拉的预应力筋成为可能。

图7表示这些备用管道的设置以及它们最终被使用的情况，这充分证明了它们所起的作用。造成图7所示现状的实际情况简要回顾如下：

1. 所有构筑在混凝土中的孔道都留有比所需直径大12.7mm或更大一些的余地，这一措施可使穿入的预应力筋比设计要求的数量增加20%。

2. 每一组预应力筋中安插2根备用管，每根管中可穿入10根筋。实际上，这些管子最后真派上了用场，因为已经证明在某些情况下取出堵塞物或穿入所需的全部预应力筋是不可能的。

3. 配置了多于设计所需数量的5%的预应力筋，以补偿由于预应力损失及未预料到的施工问题等未知因素。

4. 作为后备措施，上端锚具选用了应力锚固型，这一安全措施使从上端也能实施张拉，既可以替代从下端进行的张拉，也可以作为对超过预计的摩擦损失以及其他损失的一种补偿办法。

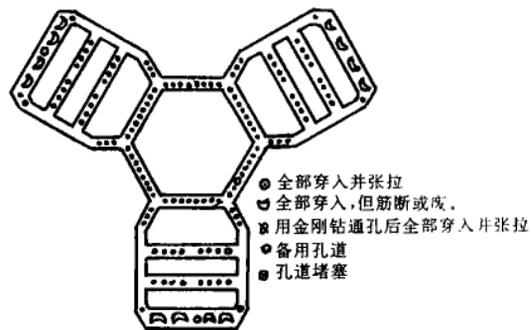


图7 塔身竖向预应力筋实况

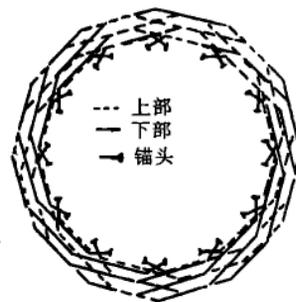


图8 塔楼环梁的预应力筋布置

图7汇总了下列发生了问题并可由预先提供的安全储备措施加以补偿的情况。

1. 孔道堵塞。

2. 由于穿筋困难造成的预应力筋损失。
3. 由于在制动或千斤顶张拉时失控造成的预应力筋报废。
4. 在张拉操作中预应力筋被拉断。

在有些情况下,预设的安全储备远远大于所需的量,而在另一些场合,它们却又几乎全被用尽。

五、预应力损失

客观地说,要准确地预测由于徐变、收缩、弹性缩短以及钢筋松弛所造成的预应力损失是很困难的。也可以这样说,从实际出发不必追求过分精确。这一点已为本塔的建造事实所证明。然而,在十分有把握之前,对预应力损失问题进行一定程度的试验研究还是有必要的。

1. 混凝土收缩

本塔的混凝土未呈现收缩特征,这与一般常规情况明显不同。另外,施加预应力时,大部分混凝土已浇筑了数月之久。

2. 弹性缩短

对于各组预应力束之间以及各个高度之间情况大不一样。由于相当一部分有效预应力是结构自重产生的,还由于大部分重量在对主要预应力束组(即较长的组)进行张拉之前就已经作用在塔上,因此可以断定,对于本塔来说,结构的弹性缩短比标准条件下要小一些。

3. 混凝土徐变

本塔混凝土在徐变特征方面与普通混凝土没有什么不同之处。因为后张法施加的预应力以及结构自重产生的预应力之总和均在正常范围内,预计不会发生什么特别意外的情况。实际上,对于较长的预应力束情况更为有利,因为大部分由于静载产生的预应力所导致的徐变,在施加预应力之前就已经耗散了。

4. 钢筋松弛

近来有关松弛损失的研究结果作为定性分析其正确性已被认可,即损失值随钢筋初始应力的增加而增加。因此,估计本塔中的这一损失,预期应不超过通常的实践结果。其实,完全可以指望损失更少一些。此外,由于大部分预应力效应是结构自重产生的,所以预应力损失的变化就应该比通常的情况下更小一些。

较长的预应力束的预期各类损失分列如下:

收缩	17.6MPa
弹性缩短	12.7MPa
混凝土徐变	77.3MPa
钢筋松弛	91.4MPa
总计	199.0MPa

预期总损失实际上十分接近传统值175.8MPa,因此决定,舍去精确计算得出的超出传统值的23.2MPa,而直接沿用标准值。

摩擦损失和偏差损失

CN塔的后张预应力在若干方面超出了传统经验的范围,它们包括:

1. 预应力筋非常长,约450m。
2. 孔道全长基本上是竖向垂直的,大部分孔道仅在下部锚固端存在显著弯曲。
3. 使用了刚性管,这是预应力工程人员建议的,主要是作为加强孔道可靠性的措施,但也会在摩擦方面起重要作用。
4. 使用了镀锌管,这保证了管子在张拉期间完全不生锈。
5. 安装预埋管时采用了定位样板,以保证偏差尽可能小一些。
6. 采用了“加大尺寸”的孔道方案,使孔道空间有一定富裕量。

上述情况汇总起来,其所产生的不定因素远远超过其他损失涉及的不定因素。因此,必须采取谨慎的办法,包括不断地应用在施工中积累的经验,以及根据最新情报资料而不断修正施工方法。

应当注意,预应力筋生产厂家的保证书所提供的偏差系数和摩擦系数分别为: $K=0.0005$ 和 $\mu=0.2$ 。这意味着需要张拉208束共计9200kN预应力筋。但是,设计上决定采用 $K=0.0001$ 和 $\mu=0.15$ 的系数。这样,实际上就只需要张拉144束共计840kN预应力筋了。因此,这一尝试和设计最终节省了8%的材料和减少了30%的预应力工作量。

六、铺设预埋管和穿筋

所配制的刚性螺旋状波纹管是用24号波纹钢板压成的,直径为10cm和11.4cm。管子的连接是靠一节直径稍大一点的套管搭接起来的。管子的长度从1.5m到6m不等,这要根据各束预应

力筋的位置以及特殊障碍的情况而定。考虑过多种管道的替代材料和安装方法,例如,塑料波纹管、半刚性管以及在滑升墙体中用抽芯法拟成孔道等,但最终还是选定了刚性管,因为刚性管强度高、易于搬运和安装,并且价钱相当便宜。尽管装运粗鲁,管道并未发生损坏,而且因压凹、冲孔或气割以及其他不当操作造成的堵塞也很少。

每装接一节新管后都要给管子盖上一个帽,这可以防止无关的物体掉入管中造成堵塞。这一措施是非常成功的,施工期间只有4根管子被堵塞。这4根管子中的3根后来用一种软轴金刚石钻头疏通了。这种设备用于清除孔道中的混凝土块(有的在120m深处)是很有效的。但使用这种钻具费用十分昂贵,并且造成了工期拖延。所以,并不是所有的孔道都是用这种方法清理的。

所有管子的连接部位一经安装完毕便立即用胶带缠上,这一措施可防止水泥浆流入管中。

灌浆孔是按每30m的间距成对设置的,每对灌浆孔间的距离为1.5m。每对灌浆孔的低者用以当作从下泵送浆料的排浆控制孔,而高者则作为下一次灌浆升程的进浆孔。

钢绞线是从上端穿入孔道的,一次穿一根。先把钢绞线从滚筒上拉出,再通过一个专门设计的索具穿入上端锚具。钢绞线在孔道内的下落速度主要取决于自重,并通过设在滚筒上的手闸加以控制。对预应力操作人员来说,进行这一操作需具备相当熟练的技术。由于下落速度快和其他原因,在钢绞线落至下端之前,总有卡在孔中的可能性。这些“卡壳”必须排除,以免工期拖延。

有些张拉中发生的困难问题是与穿筋方法相关的。例如,以很高的下落速度依次穿入的钢绞线会导致在孔中互相缠绕的情况,并在孔道曲线很陡的区段打结。有一束预应力筋就是由于这种情况的发生而不得不在上端张拉,延误了不少工期。

七、张拉作业

采取什么张拉方法取决于预应力筋是从顶端张拉还是从底端张拉。从底端张拉看,紧挨着锚具便是一个很陡的弯曲段,这个弯曲段起着吸收大量的锚具锚固效果的作用,而锚具的锚固作用正是单根楔固的群锚体系的典型特征。因此不须实施超张拉便可锚固。

对于从顶端张拉来说,因为张拉端邻近区域内没有急剧的弯曲段,情况就不一样了。为要把下面相当长的预应力筋建立起应力来,张拉端就得施加足够大的压力,因此超张拉是必须的。

很大的张拉伸长量使千斤顶在张拉过程中要反复回缸多次。对于长度超过300m的预应力筋,要是从底端张拉,有效张拉时间为2~3小时。但要是从顶端张拉,效率则急剧下降,张拉一束预应力筋要耗时5~6小时。

八、灌浆

混凝土墙体中竖向长孔道的灌浆是个比较新的工艺。有三方面的问题需要研究解决:

1. 液状的浆料在其硬化之前将使混凝土受到很大静液压力,这一效应无法通过计算确切地加以估计。

2. 塔身施工要耗时数日,一直在要延续到寒冷的季节。在如此不利的气候条件下,会因塔墙温度太低而无法灌浆。因此,预应力筋只得随施工进度就位并张拉,而灌浆保护工序就只好不进行。这样,锈蚀问题必须事先考虑到并采取防范措施。

3. 有关文献中提到,每一灌浆升程的顶端预计会出现大量的泌水。这个问题变得非常重要,必须要在现场做试验解决它。

在设计阶段,对新搅抖出的浆料在静液压力下的特性知之甚少。因此,进行了一系列的试验来探讨其凝结特性、最适合的化学与物理成分及其产生泌水的趋势。浆料的成分打算大体上和用于灌筑后张预应力孔道的普通浆料相同,即波特兰水泥、水、减水剂和膨胀剂的混合料。

现场试验打算包括所有已知参数与实际施工条件的关系。第一批试验包括使用规格为24号的刚性管(与预期用于塔上的管材相同)的一系列试验。管子的长度为30m和60m,安装在高度为60m的用缆绳固定的脚手架上。水灰比从开始的0.44提高到0.50,这一配比的流动度锥体测试时间约为12秒。适合于进行有效泵送。浆料的平均强度刚好超过350MPa,这一强度值被认为是符合要求的,因为灌浆的主要作用是防止预应力筋锈蚀。减水剂起到了令人满意的作用。在最初的试验中也掺加了膨胀剂,目的是补偿收缩和防止与管子分离。但是,由于30m高灌浆升程的静液

压力作用,发生了一个完全没有料到的现象:膨胀剂(铅粉)产生的气体被排出浆料,在压力下被顶至灌浆升程的顶端。浆料发生水化作用时,在那里聚集了大量的气泡,从而导致在该截面处产生严重的孔隙和结构松软。这一灌浆不实的部分波及约1.5m高的范围,虽然强度上足以承受下道灌浆所作用的静液压力(约0.7MPa),但是完全不满足结构用途和防腐作用的要求,因此放弃了使用产生气体的膨胀剂,而不掺加化学添加剂的试验结果能满足要求。

试验还证实了在灌浆升程的顶部聚集着大量的泌水。可是,这个现象在塔的实际灌浆过程中却又极不明显,确切的原因还不清楚。

试验做完后对灌浆管道多处剖开检查。

第二批试验是用于探讨一些可能发生的问题,特别是塔墙混凝土的抗裂能力,模拟塔墙的实际情况做了一组试件,试验其在静液压力下的变化情况。基于试验结果,决定在设计和施工中采取下述措施:1. 灌浆升程的最大高度为30m,这个高度可以用压力稍高于0.7MPa的泵压送。2. 在灌浆孔处设一个限压卸荷阀,限定压力为0.7MPa,以防意外的超压情况发生。3. 横向布设规格为4号的钢筋,间距45cm,以阻止裂缝开展。由于采取了措施,在施工中未发现墙体开裂。

九、防锈

灌浆是用来防止预应力筋锈蚀的主要介质。可是,大部分预应力筋不得不在冬季就位,而极低的气温阻碍了灌浆的正常进行,这就使得预应力筋得不到保护。因此,必须要找出一种防止锈蚀的办法来。

施工人员采用了“干气”法来隔绝潮气,一直用到来年夏季进行灌浆为止。规范要求,在大气环境温度下,设备要提供约 $11\text{m}^3/\text{min}$ 的无油干气,而且干气要达到结露点的温度,即 -55°C 。使用的

标准设备为:两台压缩机,两组无热脱湿系统及过滤器。全部设备装载在停放于现场附近的一辆12m长的隔热拖车上。用一根大直径的聚乙烯管从空气脱湿系统通向塔基,在塔基处再用小一些的管子把主管与每一个最低位的灌浆孔联通起来。预埋管沿高度方向引出的所有灌浆孔全部封堵。在每根预埋管的上端头,用玻璃钢罩或金属罩把暴露在外的锚具罩上。然后,将极为干燥的气体从每根管道的底端泵入。每根管道的顶端有一个小调节孔,用以保证每小时完成三次换气循环。后来,把罩在锚具上的玻璃钢罩取下,发现预应力筋和锚具均未发生锈蚀。从此处的情况可以得出结论:全长范围内的预应力筋同样没有生锈。因为大部分湿气是聚集在管道的上端部位的,若锈蚀此处首当其冲。

十、塔楼环梁

塔楼设备层结构的主要横向约束是靠位于悬挑墙上端的后张预应力混凝土环梁来实现的(见图8)。环梁的主要作用是抵抗直接作用着的拉力,也抵抗由它支承着的楼板重量所产生的不大的弯曲。因此,预应力是按同心圆和对称的形式布置的。环梁构成了一个有12条边的多边形,用以抗衡它将要承受的放射状荷载。扣除所有的损失,所建立起来的最终预应力估计为10900kN,规定的预应力筋的极限抗拉力为19000kN。这些力分布在12束预应力筋上,每束由49根钢丝组成,钢丝的极限抗拉强度为17.0MPa。环梁的任一截面上都有6束预应力筋。

每束预应力筋的排列形式完全一样,包角 180° ,每 30° 一交叉。所有24个锚固端均按顺序张拉以确保在任何时候都尽可能保持对称性。张拉伸长十分均匀,平均伸长值为26cm,最大变化率约为5%。

国际会议信息

结构工程师世界大会(SEWC2002)

时间:2002年10月9—12日 地点:日本横滨 主办:SEWC2002协会

议题:建筑与桥梁的设计、分析与施工,国际规范与标准,创新结构与材料,空间结构、大型工程,设计与建筑施工管理、风险管理,信息技术的应用。

传真:0081-3-32557377 电子信箱:sewc2002@gp.knt.co.jp