



梁场蒸汽养护系统研究

曹 土

(中交第三航务工程局有限公司宁波分公司, 浙江 宁波 315200)

摘要: 在对梁场蒸汽养护系统的研究中, 通过对砂石料温度控制系统、混凝土拌和站水温控制系统和箱梁蒸汽养护系统3个组成部分理论分析、科学试验和数值计算, 确定整个系统的能量消耗和蒸汽供应量, 建立了一套经济、科学的蒸汽养护系统, 并实现了箱梁蒸汽养护的自动化控制。

关键词: 箱梁; 温度; 蒸汽养护; 控制

中图分类号: U 445.471

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)01-0058-06

Beam field of steam curing system

CAO Tu

(Ningbo Branch, CCCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Ningbo 315200, China)

Abstract: In the research on the beam field of steam curing system, based on the calculation, scientific experiments and theory concerning the aggregate temperature control system of concrete mixing station, water temperature control system and box girder system consisting of three parts, we determine the overall system energy consumption and steam supply steam curing system, establish an economic reasonable and scientific steam curing system, and realize the automatic control of box girder.

Key words: box girder; temperature; steam curing; control

我国铁路、公路、跨海桥梁、码头等工程建设过程中, 施工单位通常采用场地内集中生产的方法对箱梁进行制作, 然后再用运架设备将预制好的箱梁架设上桥。在箱梁的生产过程中, 广泛使用蒸汽养护技术, 它可以有效提升箱梁混凝土的强度, 明显缩短箱梁的制作周期, 加快施工进度, 并能严格保证箱梁的各项技术指标。特别是地处北方的工程, 冬季气温较低, 昼夜温差较大, 为保证箱梁的质量, 箱梁生产必须采用蒸汽养护。本文以北方地区某工程中某一箱梁预制场为例(简称“梁场”), 对梁场需配置的蒸汽养护系统进行研究。

1 梁场规模和蒸汽养护系统

1.1 梁场规模

梁场按600孔箱梁的生产规模进行布置, 按3孔/d的生产能力进行计算。梁场设计面积为 0.17 km^2 , 设置12个制梁台座, 按箱梁日生产能力计算, 每个台座的周转周期为4 d, 即96 h。在日平均气温低于 $5 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 必须采用蒸汽养护才能保证箱梁混凝土强度的有效增长, 才能保证3孔/d的生产能力。

1.2 蒸汽养护系统

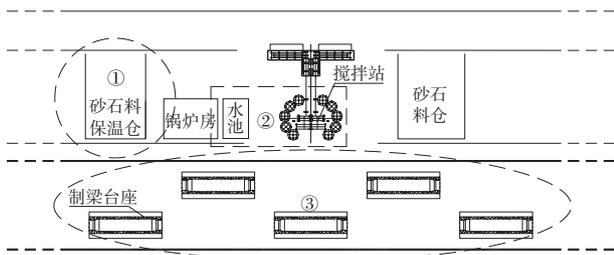
根据箱梁的生产特点和高性能混凝土的技术要求, 梁场设置的蒸汽养护系统包括3个部分: 砂

收稿日期: 2013-04-24

作者简介: 曹土(1981—), 男, 工程师, 主要从事港口与航道工程的施工建设。

石料温度控制系统、混凝土拌和站水温控制系统和箱梁蒸汽养护系统。

箱梁混凝土采用蒸汽进行养护,砂石料、拌和用水亦采用蒸汽进行加热和保温,因此梁场的蒸汽养护系统核心部件是生成蒸汽的锅炉,蒸汽通过蒸汽管道贯通至砂石料仓、拌和站水池和12个制梁台座。梁场的蒸汽养护系统布置见图1。



注: ①为砂石料温度控制系统; ②为混凝土拌和站水温控制系统; ③为箱梁蒸汽养护系统。

图1 梁场蒸汽养护系统布置

根据梁场生产能力为3孔/d的要求,本文对蒸汽养护系统3个组成部分进行合理性分析,通过现场试验和理论数据计算,确定蒸汽锅炉的蒸发量和蒸汽养护系统经济合理的配置要求。

2 蒸汽养护系统研究

梁场蒸汽养护系统最关键的是箱梁蒸汽养护系统,也是整个系统中需供热量最大、设备配置要求最高的部分。

2.1 砂石料温度控制系统

混凝土施工需要尽量避开低温和高温两种情况,只有很好地控制混凝土的温度,才能保证混凝土的和易性、可操作性等各项指标,才能保证梁体的实体和外观质量。在日平均气温低于5℃时,对砂石料、拌和用水、外加剂等混凝土原材料进行加热和保温,主要是为保证混凝土的入模温度不低于5℃。

梁场设置的砂石料加热保温仓见图1,纵深25 m,宽18 m,平均高度约6 m,宽度方向设置一道隔墙,一侧加温砂,另一侧加温碎石。加温仓三面用砖墙封闭,正面采用厚实的帆布封闭,使仓内与外界相对隔热。加热保温仓侧墙和地面上设置蒸汽管道,蒸汽管道统一向仓后侧倾斜,方便在未使用时将管道内的水排出。

根据梁场3孔/d的生产能力,每孔箱梁的混凝土方量为330 m³,加温仓每天需要加热砂石料约1 500 t,其中砂约580 t,碎石约920 t。在确定蒸汽养护系统供气量时,还需要事先确定砂石料的加热温度。即将砂石料加热至某个温度时,既能保证混凝土入模温度不低于5℃,又能保证供汽量经济合理。

1) 确定胶凝材料和水的温度。

箱梁高性能混凝土的拌和物包括水泥、中粗砂、碎石、粉煤灰、矿粉、高效减水剂、水等^[1]。试验开始前,需要先确定水泥、粉煤灰、矿粉、水的温度,然后对砂石料的加热温度进行动态分析。对水泥、粉煤灰、矿粉,采用对历史资料统计分析的方法确定其温度;减水剂由于用量很少,且温度容易控制,暂不列入计算范围中;水温将在下一小节中详细分析确定,这里暂时取较低水温10℃进行分析。表1内数据是以往进入10月份以后冬季施工时,实际测得的水泥、粉煤灰、矿粉3种胶凝材料的出仓温度,试验中分别取其平均值作为拌和试验时的温度。

表1 2009年北方某客专梁场冬季施工胶凝材料温度实测值

| 月份 | 日期 | 水泥/℃ | 粉煤灰/℃ | 矿粉/℃ |
|-----|----|------|-------|------|
| 10月 | 15 | 20.5 | 19.2 | 18.7 |
| | 20 | 21.7 | 19.5 | 17.7 |
| | 25 | 19.4 | 17.5 | 16.2 |
| | 30 | 17.4 | 15.5 | 13.2 |
| 11月 | 5 | 17.5 | 16.3 | 13.5 |
| | 10 | 16.4 | 14.9 | 14.1 |
| | 15 | 17.6 | 14.5 | 13.7 |
| | 20 | 16.2 | 14.7 | 12.5 |
| | 25 | 18.3 | 15.4 | 13.5 |
| 12月 | 30 | 17.1 | 14.5 | 12.2 |
| | 5 | 16.6 | 13.7 | 13.3 |
| | 10 | 15.9 | 14.3 | 12.5 |
| | 15 | 17.1 | 13.7 | 12.9 |
| 均值 | | 17.8 | 15.7 | 14.1 |

2) 确定砂石料加热温度。

当水温加热至10℃时,砂石料加热至5~25℃区间内某一温度,将混凝土各种材料拌和后,实测混凝土温度随砂石料温度变化而变化的值,描绘出混凝土温度的变化特征点(图2)。通过对数据的回归分析,建立回归方程: $Y_j = a + kX_j$,计算可以得到回归系数 $a = 4.357$, $k = 0.694$,由此得到混凝土拌和物随砂石料温度变化的回归线^[2]。

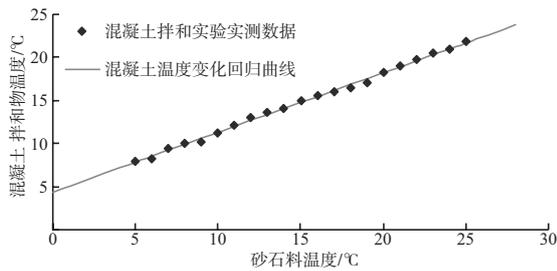


图2 混凝土随砂石料温度变化实测数据回归分析

分析图2中回归线,混凝土拌和物随砂石料温度上升至一定值后,混凝土拌和物的温度上升绝对值小于砂石料温度的上升绝对值。从经济角度考虑,砂石料温度不宜过高。从回归方程可以计算出,只要砂石料温度不低于5℃,混凝土的拌和温度就不会低于7.8℃。

3) 混凝土浇筑过程热能损耗。

考虑混凝土从搅拌机出料、用混凝土罐车运输至台座、再由混凝土输送泵送入模的过程中,会有热能的损失,导致混凝土温度的下降。通过下面的计算可以确定此过程中混凝土温度的下降值。

假定混凝土拌和温度 $T_0=12\text{℃}$,混凝土的出机温度由式(1)^[3]进行计算:

$$T_1 = T_0 - 0.16(T_0 - T_b) \quad (1)$$

式中: T_1 为混凝土的出机温度; T_0 为混凝土的拌和温度; T_b 为搅拌机的环境温度。现场施工时,对搅拌机房内通蒸汽管道,保证机房内温度不低于5℃,由此 T_b 取值为最不利情况下的5℃。计算可得 $T_1=10.88\text{℃}$ 。

混凝土的入模温度可由式(2)^[3]进行计算:

$$T_2 = T_1 - (0.25t_1 + 0.032)(T_1 - T_a) \quad (2)$$

式中: T_1 为混凝土的出机温度; T_2 为混凝土的入模温度; T_a 为环境温度,北方地区日平均气温低于0℃时暂不进行混凝土施工,因此 T_a 取0℃; t_1 为混凝土由罐车运输,再泵送入模,此过程花费的时间。混凝土搅拌站至制梁台座最远距离根据丈量测得为249m,混凝土从搅拌机出料至浇筑入模的过程所需时间经过统计和计算,正常情况下,可以确定 t_1 一般不超过15min。计算可得 $T_2=9.85\text{℃}$ 。

混凝土浇筑过程中温度下降值 $\Delta T = T_0 -$

$T_2=2.15\text{℃}$ 。由此可知,在其他原材料温度保证前提下,只要砂石料温度不低于5℃,混凝土的入模温度一般不会低于5℃,能够保证冬季施工混凝土浇筑的技术要求。但为预防混凝土浇筑过程特殊情况的出现,例如设备故障,将砂石料温度富裕量预留2℃,即砂石料温度控制在7℃左右。

根据热平衡原理,可以计算出每日将1500t砂石料从0℃加热至7℃约需50t蒸汽,即砂石料温度控制系统需锅炉提供约2.08t/h的蒸汽量。

2.2 混凝土拌和站水温控制系统

混凝土的拌和用水量每孔箱梁约需要32t,按3孔/d的生产能力计算,梁场设置一个储水量为100t的蓄水池。水池采用地埋式,采用钢筋混凝土现浇结构,顶板上覆盖保温材料,保证水温与外界相对隔热。输水管线深埋至冻土层以下,外露部分采用发泡聚氨酯保温材料包裹保温。水池进水口和出水口安置大功率的电热棒对水池进行预热,每根电热棒功率为7kW,两个口各安置5根。水加热采用管道式汽水混合加热器,用锅炉房引出来的蒸汽直接与管道中的水混合加热达到所要求的温度。同时安装温控仪,用传感器实时监控出水温度,通过调节蒸汽量来达到供水温度的稳定。

混凝土拌和用水采用两种方法同时加热,保证拌和水温到达冬季施工要求。至于具体加热至某一温度,依然通过拌和试验来分析和确定。在上一小节中,确定了混凝土各种原材料的温度,这节中将以水温为变量进行混凝土拌和试验,梁场用水为深层地下水,经过输水管道后温度有所下降,经过实际测定,进入蓄水池的水温一般不低于5℃,这样可以假定水的初始温度为5℃。

拌和试验中,水温在5~50℃变化,将混凝土各种原料拌和后,实测混凝土温度随水温变化而变化的值,描绘出混凝土温度的变化特征点(图3)。通过对数据的回归分析,建立回归方程: $Y_j = a + kX_j$,计算可以得到回归系数 $a=6.854$, $k=0.183$,由此可以混凝土拌和物随拌和用水温度变化的回归线^[2]。

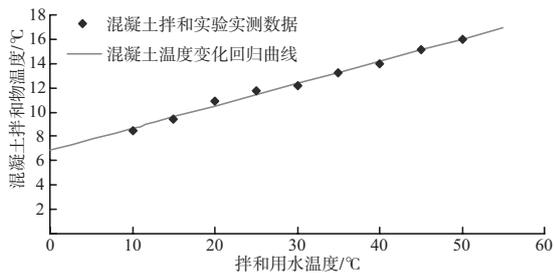


图3 混凝土随水温变化实测数据回归分析

由图3可以确定混凝土温度同样随着水温的变化成线性变化,从经济性角度出发,水温加热至30℃相对较易控制,且又能保证混凝土温度不低于10℃,因此梁场在混凝土施工时需将水温从5℃加热至30℃。

第1种电热棒加热方法,根据热平衡方程,用10根7 kW的电热棒将100 t水加热24 h,水温可以上升约14.4℃;第2种蒸汽混合加热器加热只需要加热提升水温约11℃。根据热平衡方程,可以计算出拌和站水温控制系统需要锅炉提供约0.90 t/h的蒸汽量。

2.3 箱梁蒸汽养护系统

箱梁蒸汽养护系统对保证梁体质量、加快模具周转速度、提高箱梁的生产能力都有重大意义。箱梁蒸汽养护系统主要由4个部分构成,即:蒸汽养护罩、蒸汽加热系统、通风冷却系统和温度控制系统。

2.3.1 蒸汽养护罩

蒸汽养护罩具有良好的保温性能,能最大限度地减少箱梁与外界的环境接触,创造一个适宜的养护环境,考虑到北方地区的气候环境,必须按照制梁时最低环境温度设计养护罩系统,以保证最低的热量损失和较低的设备成本投资。图4是梁场设计和制作的箱梁蒸汽养护罩断面。

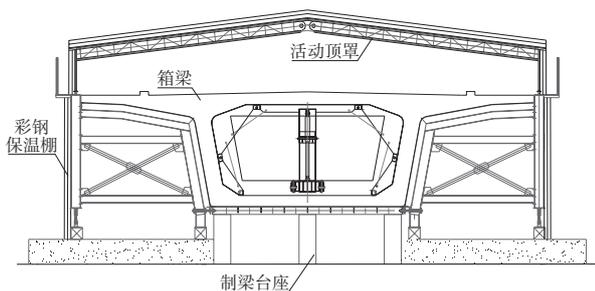


图4 箱梁蒸汽养护罩断面

2.3.2 蒸汽加热系统

蒸汽加热系统是将锅炉的蒸汽按照控制规则,自动喷射到养护罩内,为了保证升温均衡、最佳热量供给和设备投资比率,锅炉的型号、供热管道的管径、供热方式、管道的敷设及蒸汽的喷射孔口径和间距都需经过科学的计算。

1) 热量计算。

为确定供热系统的热源——锅炉的容量,应该首先计算蒸汽养护过程中的热量消耗。热量消耗的计算主要考虑升温期的热量消耗和恒温阶段的热量消耗。

①升温期的热量消耗主要由下面6个部分组成。

a. 加热混凝土制品所消耗的热量 Q_1 。

前文已确定混凝土入模温度不低于10℃,蒸养升温阶段混凝土表面温度按45℃进行控制,箱梁的混凝土设计方量为330 m³,由此可以计算得到: $Q_1=26\ 047\ 350\ \text{kJ}$ 。

b. 混凝土拌和物中水分蒸发所消耗的热量 $Q_2=2\ 290\ 028\ \text{kJ}$ 。

c. 钢模板消耗的热量 Q_3 。

钢模由内模和外模组成,内模的质量约为100 t,外模的质量约为150 t,则钢模的总质量为250 t。蒸养开始前,钢模温度较环境温度低,由实测数据确定取初始温度为-5℃,蒸养升温后同混凝土表面温度为45℃。计算可得 $Q_3=6\ 000\ 000\ \text{kJ}$ 。

d. 充满养护设备自由空间的蒸汽耗热量 $Q_4=156\ 741\ \text{kJ}$ 。

e. 养护设备蓄热和散失的热量、冷凝水带走的热量、逸失介质的耗热量 Q_5 。 Q_5 一般取升温阶段总支出的30%^[3],即

$$Q_5 = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5) \times 30\% = Q_2 \times 30\%$$

则升温阶段的热量总支出: $Q_2 = (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) / (1 - 30\%) = 49\ 277\ 313\ \text{kJ}$ 。

f. 水泥的水化热 Q_6 。

混凝土浇筑完成15 h内水泥水化热按90 kJ/kg进行计算^[4],根据混凝土方量和配合比资料,可以计算得到 $Q_6=10\ 543\ 500\ \text{kJ}$ 。

由于升温阶段消耗的热量远比恒温阶段大。因此,只要能满足升温阶段的热量消耗就肯定能满足恒温阶段的热量消耗。升温阶段时间控制在

10 h以内，升温期消耗的热量为 $Q_s = Q_2 - Q_6$ ，则单位时间消耗的热量为 $q_m = Q_s/t = 3\ 873\ 381\ \text{kJ/h}$ 。根据热平衡方程，可以计算得到升温阶段蒸汽需用量为1.396 t/h。计算时考虑富裕系数1.4^[3]，因此实际蒸发量为1.954 t/h。

②恒温阶段的热量消耗。

恒温阶段的热量消耗主要是用来维持箱梁的养护温度，其热量消耗主要有散失于周围介质的热量、漏失蒸汽损失的热量两部分。热量计算考虑北方寒冷地区取升温期热量的25%^[3]。即 $Q_h = 25\% \times Q_s = 9\ 683\ 453\ \text{kJ}$ 。

③养护期间单位时间需要供给的最大热量为升温阶段和恒温阶段的热量消耗总和。

根据箱梁蒸汽养护时间性要求，本文按同时3孔梁升温、4孔梁恒温进行计算，箱梁蒸汽养护系统蒸汽需用量为7.82 t/h。

2) 供热设备选择。

锅炉型号的确定需要考虑梁场蒸汽养护系统3个组成部分的热量供应。根据前文的计算结果，所需锅炉的蒸发量： $T = T_1 + T_2 + T_3 = 2.08\ \text{t/h} + 0.90\ \text{t/h} + 7.82\ \text{t/h} = 10.8\ \text{t/h}$ 。

锅炉的选择以其容量满足整个养生期的热量消耗为原则。锅炉主要由引风机、鼓风机、盐水机、除渣机、上煤机、炉体、控制台等组成，要实现节能、环保，并通过ISO9001认证，实现全自动化控制，具有功耗小，蒸汽量大等特点。

经过综合比选，梁场选择两台北方某锅炉厂生产的SZL6-1.25-A II，锅炉的技术参数为：额定蒸发量6 t/h，额定压力1.25 MPa，额定蒸汽温度194 ℃，设计热效率78.7%，锅炉尺寸8.4 m × 6.3 m × 5.4 m，燃料为II类烟煤/褐煤。

3) 蒸汽养护管道布置。

蒸汽养护管道的布置依据为：使整个养生箱梁的空间内均匀充满蒸汽，并保持热量供给和散失的平衡。典型的蒸养管道布置见图5。

蒸汽管道分为主管道和支管道。主管道将蒸汽输送至每个制梁台座，每个台座两端各设置一个电磁阀，其能自动控制台座的蒸汽供应量。支管道分布于制梁台座下底板、侧模、顶罩和箱梁内腔，其中箱梁内腔中分布的支管是活动的，蒸

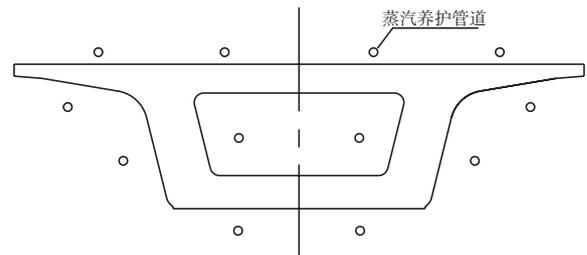


图5 箱梁蒸汽养护管道布置断面

养完成后可以拆除。

2.3.3 通风冷却系统

在箱梁内模端部设置一台风机，实现内模的通风与降温，根据负荷计算及风压要求，选择合适的离心通风机。降温开始后，在温度控制系统的监测下，通过控制风机的开和关来达到控制降温速率。

2.3.4 温度控制系统

程序温度控制系统采用了分布式（DCS）控制策略^[5]，每两个制梁台座由一本地控制柜完成温度的程序控制，可以实现手动蒸养过程和自动蒸养过程。其中，中央控制器与各台座的控制柜之间的指令、数据传输均通过无线网络完成。中央控制机由一台工业控制机及应用程序构成，自动记录各台座箱梁测试点的温度值，按要求下达操作指令等，具有历史数据、温度曲线的查阅功能，人机界面友好，操作简单。台座的温度控制柜包括：多点温度巡检仪、程序温度控制仪、手动的加温按钮及通风降温按钮、蒸汽阀门的控制电气装置等功能。温度控制系统结构见图6。

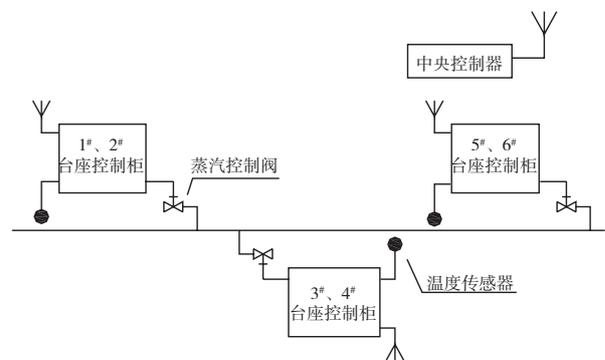


图6 温度控制系统结构

在箱梁蒸汽养护开始前，需在箱梁内外布置温度传感器。箱梁内一般将传感器布置于预应力管道内，箱梁外则布置于梁体表面。传感器如图7

进行布置,箱梁两端各布置4点,分别控制顶板、腹板、内腔、底板的蒸汽管道。温度控制柜通过数据线与温度传感器相连,根据传感器传回的数据,通过系统程序实时对蒸汽供应量进行控制。

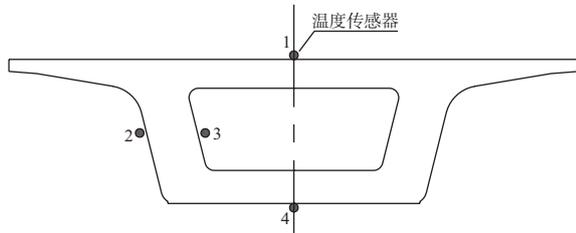


图7 箱梁蒸汽测温点布置

3 结论

1) 本文通过对梁场蒸汽养护系统的分析和研究,最终确定蒸汽养护系统的建设和配置方案;通过科学试验、原理分析和理论计算,建立起一套完整的蒸汽养护系统,做到既实用又经济合理。

2) 通过对混凝土拌和物温度的分析,表明砂石料温度和水温是低温季节混凝土施工的控制重点。而对拌和试验中得出的两条特征线进行比较,可发现砂石料温度变化对混凝土温度的影响更大,在实际施工中砂石料的温度控制需要重点

关注。

3) 梁场蒸汽养护系统中采用温度控制柜、温度传感器、电磁阀等控制设备,配合控制程序,自动完成箱梁的蒸汽养护的控制。由此而建立的一套自动化箱梁蒸汽养护控制系统,减少了施工劳力的投入,提高了箱梁蒸汽养护的实效。

4) 梁场蒸汽养护系统实现了北方地区梁场混凝土冬季施工的目标,同时又能保证施工箱梁混凝土的质量,提高梁场的生产能力。

参考文献:

- [1] 内维尔. 混凝土性能[M]. 4版. 刘数华,译. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [2] 易丹辉. 统计预测: 方法与应用[M]. 北京: 中国统计出版社, 2001.
- [3] 梁敦维, 谢珍兰. 混凝土工程计算手册—建筑工程简明计算手册丛书[M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2006.
- [4] 魏文彪. 混凝土工程—建筑施工快速计算实例解读[M]. 南京: 江苏人民出版社, 2011.
- [5] 王常力, 罗安. 分布式控制系统(DCS)设计与应用实例[M]. 2版. 北京: 电子工业出版社, 2010.

(本文编辑 武亚庆)

· 消 息 ·

中国交建年度荣获省部级以上科技奖首次超过100项

2013年,中国交建科技创新再传捷报,年度荣获省部级以上科技进步奖首次超过100项,总数达109项。其中,《离岸深水港建设关键技术与工程应用》荣获国家科技进步一等奖,省部级科技进步奖108项,获奖数量再创新高。

在省部级科技进步奖中,共获特等奖3项、一等奖29项、二等奖33项,三等奖43项。其中《多塔连跨悬索结构及工程示范》获中国公路学会特等奖,《沙岛—泻湖海岸超大型综合港口工程建设关键技术与工程应用》获中国水运学会特等奖,《国家海上应急搜救系统工程关键技术研究及应用示范》获中国航海学会特等奖。

摘编自《中国交通建设网》