

# 杭州湾跨海大桥工程简介及若干技术方案探讨

章汉斌<sup>1</sup> 唐明翰<sup>2</sup> 张少俊<sup>3</sup> 郭伟光<sup>3</sup> 朱健<sup>3</sup>

(1.金华市婺城区公路段 321000 2.上海市基础工程公司 200002 3.中国建筑总公司上海公司 200052)

**摘要:** 本文摘自杭州湾跨海大桥设计、施工及招标有关资料并补充了笔者的一些见解。

**关键词:** 跨海大桥 海工混凝土 钢管桩 结构防腐

## 1. 地理位置与自然环境

杭州湾位于我国沿海中段,东侧为舟山群岛,为我国最大的河口湾,呈喇叭形,东西纵长约100km,湾口处宽约100km,湾顶处宽约20km,大桥跨越海湾中部,桥位处海面宽达32km。

大桥北起浙江海盐县境内郑家埭,向南跨乍浦港规划港池、北航道、南航道,经南岸滩涂区,跨慈溪十塘,经九塘、八塘后到达大桥终点慈溪境内的水路湾,全长36km,其中桥梁长35.673km,为当今世界上最长的跨海大桥。大桥建成后上海至宁波的陆上距离将缩短120km。

杭州湾两岸为广阔平原,北岸为凹岸,由冲刷形成,陆地标高+3.0m左右,南岸为凸岸,陆地标高+3.0~+3.5m。桥区两岸滩涂发育,北岸宽约1.6km,海床标高-2.0~+2.0m。南岸宽约9.7km,标高约-3.0~+2.0m。退潮时可见滩面。南北滩涂间的海床较为平坦,标高约为-11.0m,平均水深8~10m,北深南浅。杭州湾口的东海大桥桥位处平均水深8~12m。

杭州湾为半日潮,紧挨桥位的乍浦港水文站近七十年的观测资料统计,最高潮位为5.24m,最低为-4.01m,最大潮差为7.57m。大桥开工后实测到的涨潮时最大流速为5.16m/s,落潮时为4.18m/s,最大波高北岸3.23m,南岸4.72m。

杭州湾是世界三大强海潮区之一,由于风、雾、潮汐、流和浪的影响,大桥全年可施工作业日仅为180日左右。

大桥主要工程量为:砼215.85万方,钢筋

24.45万吨,普通钢材40.63万吨,高强钢材4.52万吨。桥位地质为第四系沉积层,为亚粘土、亚砂土、淤泥质粘土、粉砂、细砂、砂砾和细砂。覆盖层总厚度北岸约150~200m,南岸约80~130m。

大桥指挥部自1994年以来组织进行了88项科研项目,为大桥的建设和建成后大桥的安全性与耐久性提供了科学保证。

大桥概算总投资108亿元。计划用五年时间即2008年建成,2009年通车。

## 2. 技术标准与总体布置

### 2.1 技术标准

①道路等级:全线采用双向六车道高速公路标准建设

②行车速度:大桥为100km/h 引线为120km/h

③路基宽:大桥为33m 引线为35m

④设计荷载:汽—超20级 挂—120

⑤最大纵坡: < 3%

⑥桥面横坡: 2%

⑦设计洪水频率:大桥1/300 引线1/100

⑧设计基准期:桥梁上下部100年、斜拉索25~30年、支座30~50年、伸缩缝30年

⑨地震基本烈度为IV级

⑩通航标准:按设计最高通航水位+5.19m,北航道按3.5万吨海轮,净空为325×47m,南航道按3000级海轮,净空为125×31m。

引桥为双幅。

### 2.2 总体布置

见图1、表1

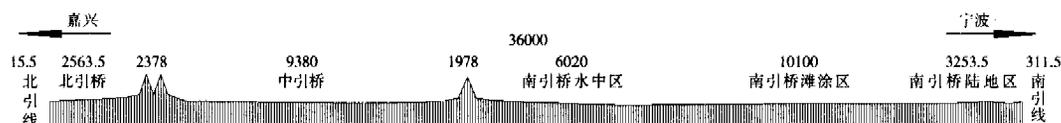


图1 总体布置图(尺寸单位: m)

桥跨布置一览表

表1

区域位置	工程长度 (m)	桥跨布置 (m)	结构形式	施工方案	
				下部结构	上部结构
北引线	15.5	15.5	软土路基	道路工程	
北岸陆地及滩涂区引桥	2563.5	3.5+15×30+10×50+3×60+50+50+80+50+24×50	预应力砼连续箱梁	D1.0, D1.5, D2.0钻孔桩承台墩身现浇	30m梁满布支架现浇施工, 50m梁用移动模架现浇施工, 其余各跨用挂兰悬臂浇注
北航道北侧高墩区引桥	490	3×70+4×70	预应力砼连续梁	D2.5m钻孔桩, 旋转钻机成孔灌注水下砼, 承台墩身现浇	整孔预制、浮吊运架
北航道桥	908	70+160+448+160+70	五跨连续半漂浮体系斜拉桥	D2.5m, D2.8m钻孔桩, 旋转钻机成孔, 灌注水下砼墩身、承台现浇、索塔爬模施工	桥面吊机分段吊装、栓焊拼接
北航道南侧高墩区引桥	980	5×70+5×70+4×70	预应力砼连续梁	D1.6m钢管桩, 打桩船插打、承台墩身现浇	整孔预制、浮吊运架
中引桥	9380	134×70	预应力砼连续梁	D1.5m钢管桩, 打桩船插打、承台现浇墩身预制, 用现浇墩座与承台连接	整孔预制、浮吊运架
南航道北侧高墩区引桥	700	5×70+5×70	预应力砼连续梁	D1.6m钢管桩打桩船插打, 承台现浇墩身现浇	整孔预制、浮吊运架
南航道桥	578	100+160+318	三跨连续半漂浮体系斜拉桥	D2.5, D2.8m钻孔桩, 旋转钻机成孔灌注水下砼、承台、墩身现浇、索塔爬模施工	桥面吊机分段吊装、栓焊拼接
南航道南侧高墩区引桥	700	5×70+5×70	预应力砼连续梁	D1.6m钢管桩、打桩、船插打承台、墩身现浇	整孔预制、浮吊运架
南引桥水中区	6020	86×70	预应力砼连续梁	D1.5m钢管桩、打桩船插打墩身预制用现浇墩座与承台连接	整孔预制、浮吊运架
南引桥滩涂区	10100	202×50	预应力砼连续梁	D1.5m钻孔桩、旋转钻机成孔承台、墩身现浇	整孔预制、梁顶运梁架桥机架梁
南岸陆地区	3253.5	50+80+50+4×50+60×30+50×34×30+3.5	预应力砼连续梁	D1.0m、D1.5m钻孔桩、旋转钻机成孔承台墩身现浇	满布支架现浇
南引线	311.5	311.5	软土路基	道路工程	

### 3. 陆地区与北岸滩涂区引桥

由于受控因素较多,根据地物的跨越和经济性以及施工的可行性等要求,设计确定了不同跨径组合,不同现浇方案的连续梁结构,桩基均为钻孔桩,承台与墩身均为现浇。

### 4. 南北航道桥

南航道桥为(100+160+318m)三跨连续半漂浮体系单塔双索面钢箱梁斜拉桥。跨中桥面设计高程+42.141m(见图3)。北航道桥为(70+160+448+160+70m)五跨半漂浮体系双塔双索面钢箱梁斜拉桥,桥塔处桥面最高,设计高程为57.56m(见图2)。桥面铺装层为3cm厚的环氧沥青砼。

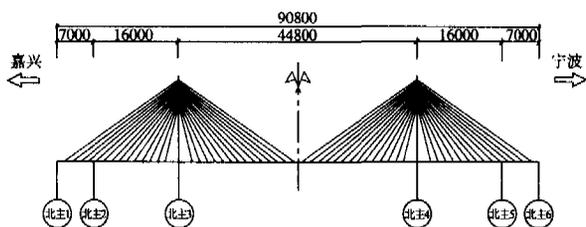


图2 北航道桥桥跨布置图(尺寸单位:cm)

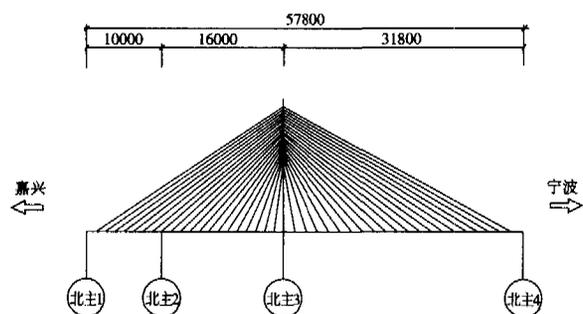


图3 南航道桥桥跨布置图(尺寸单位:cm)

#### 4.1 钢箱梁

钢箱梁为各向正交异性板、栓焊结构。二桥箱梁截面构造基本相同,由二边斜腹板与二道中纵直腹板构成单箱三室扁平箱梁,顶宽37.1m(含风阻室,计五室)底宽25.1m,中心高3.5m,边高3.158m横隔板间距3.75m,顶板厚14-20mm,底板厚12-16mm,斜腹板厚20mm,塔中心为D段(即0#段)箱梁。

北航道桥D段长6.5m,重193.8t;两端的C段长8.75m,重166.4t;向外为B段,长15m,重

264.71t;再外接A段(即标准段)长15m,重258.4t,全桥48个标准段。

南航道桥D段长7m,重199.1t;C段长8.5m重159.8t;B段长15m,重264.4;A段(标准段)长15m,重258.3t。

钢箱梁在工厂先加工成各个板单元,再在胎架上组装成箱梁,并进行不少于三段的试拼装,然后“去二留一”即前二段运至存梁处。

钢箱梁采用驳船水运至桥下。

安装时用浮吊将D段吊在索塔横梁上,精确调位后,进行各种支座安装和临时固结工作,然后用浮吊安装C段与D段栓焊连接,此时桥面长24m,拼装主跨桥面吊机。在浮吊配合下用主跨桥面吊安装主跨B段,并完成与C段的连接,安装张拉主跨Z1号索,主跨桥面吊前移,拼装边跨桥面吊,同样在浮吊配合下,用边跨桥面吊安装边跨B段梁并与边跨C段连接,安装张拉边跨B1号拉索,此后进入对称安装标准梁段(A段)的工作状态。

箱梁须四点平衡起吊,位置与标高准确到位后,迅速用临时匹配件连接,然后先进行“U”型肋的栓接,再接下来按设计师顺序进行全断面的焊接工作。

#### 4.2 斜拉索

本桥拉索为厂制热挤双层PE护套高强钢丝绳(俗称“成品索”)按国标GB/T18365-2001标准生产,南北航道桥拉索在PES7-109~199丝间各有6种规格,北航道桥最长索长248.18m,重14.96t,南航道最长索长340.091m,重19.215t。

拉索下端通过钢销与梁顶的耳板相连。塔内张拉,通过螺母锚于上塔柱的钢锚箱内。

斜拉索的安全系数为2.5。

#### 4.3 索塔

##### 4.3.1 设计

北航道桥索塔为钻石形,总高为178.8m,南航道桥索塔为A字形总高为194.3m(见图4)。

塔柱均由上、中、下三段组成,三角形的

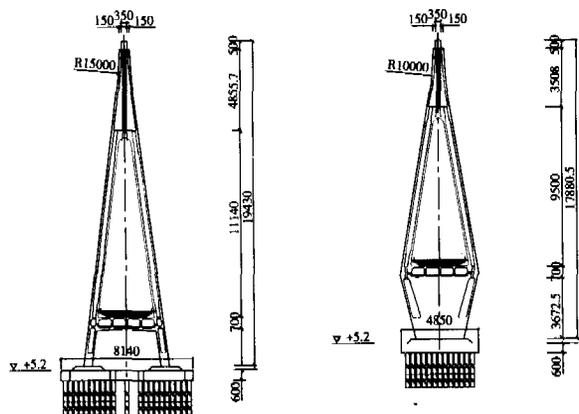


图4 南、北航道桥索塔构造 (尺寸单位: cm)

上塔柱为拉索锚固段,其横截面均由两侧(上下游)的砣和中间的钢锚箱构成,锚箱通过 $\phi 22 \times 200\text{mm}$ 抗剪栓钉与“U”形预应力索与砣连成一体。北航道桥钢锚箱横断面 $6.0\text{m}$ (顺桥) $\times 2.5\text{m}$ (横桥),高 $33.975\text{m}$ 。南航道桥钢锚箱横断面 $6.5$ (顺桥) $\times 2.5\text{m}$ (横桥),高 $47.457\text{m}$ (见图5)。

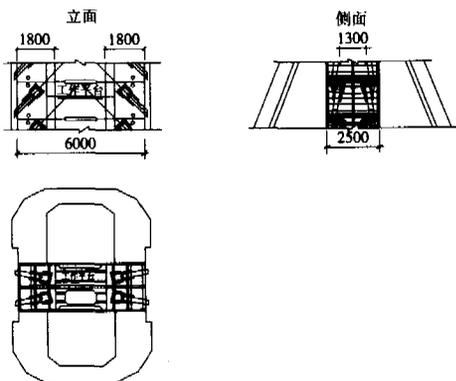


图5 钢锚箱构造 (尺寸单位: cm)

北航道桥索塔承台为带圆头的矩形钢筋砣结构,外包尺寸 $48.5 \times 23.7 \times 6\text{m}$ ,下设 $26 \phi 2.8\text{m}$ 钻孔桩,桩长 $125\text{m}$ ,进入粉细砂层约 $3\text{m}$ 。南航道桥索塔平面呈哑铃状,外包尺寸为 $81.4 \times 23.7 \times 6\text{m}$ ,下设 $38 \phi 2.8\text{m}$ 钻孔桩,桩长 $120\text{m}$ 。

成桩后钢护筒保留,桩内钢筋保护层厚 $75\text{mm}$ ,采用高性能海工砣,承台除采用海工砣尚掺入钢筋阻锈剂。

#### 4.3.2 桩基施工

##### ①北航道桥

搭设辅助平台,安装导向架,用ICE360振

动锤插打 $\phi 3100$ 钢护筒,利用护筒支撑钻机平台,然后用KP-3500型旋转钻机和四翼刮刀钻头成孔,以海水与安吉陶土等材料配制的泥浆护壁。

笔者1992年负责珠海横琴大桥施工时,桩基为 $\phi 3000$ 钻孔嵌岩桩,钢筋笼是采用长线法制作,主筋连接为锥螺纹套筒连接,它虽然制笼时有点麻烦,但具有能缩短现场钢筋笼的下放时间:接头质量比现场焊接更有保障,能减少泥浆沉淀和减少坍孔的可能性。

本航道桥钢筋笼也采用长线法制作,主筋是采用墩粗头直螺纹连接技术。

桩身水下砣灌注后进行了孔底压浆。

##### ③南航道桥

本标段的钻机平台是另用 $\Phi 1500 \times 20\text{mm}$ 钢管桩作支撑,除此之外其他施工工艺与北航道桥相仿。

单根桩砣800余方,由“航工1602工”号水上搅拌船供应,其生产能力为 $160\text{m}^3/\text{h}$ ,该船能储备 $1250\text{m}^3$ 原材料。

钢筋笼长线制作时,笼壁内侧附有 $4 \Phi 60 \times 3.5\text{mm}$ 声测管和 $4 \Phi 33.5 \times 3\text{mm}$ 钢管,一对一组成4个“U”形回路,声测工作完成后,从管内进行桩底压浆,第23号桩试验证明,压浆后桩基承载能力提高了 $30.9\%$ 。

笔者上世纪70年代负责上海地区“土层锚杆”课题研究时曾在首次压浆成“锚”后进行了二次压浆。部份锚杆成孔后先放入一定数量的碎石,然后再放锚筋和压浆。抗拔和抗压试验结果,二次压浆后其承载能力分别提高了近一倍和 $40\%$ 。其机理是成孔时土体应力被释放,孔底有沉渣,在锚杆壁与孔壁间存有一层泥膜,二次压浆时使孔底沉渣胶结,同时浆液会沿孔壁上升,不但重新将孔壁土挤密,土体应力得到恢复,而且孔壁泥膜也被胶结,从而大大提高了土壁的抗剪强度。

## 5. 滩涂区南引桥

### 5.1 设计

本桥为多联多跨连续梁，长10.1km，计202孔，其下部为钻孔桩和现浇的承台与墩身。

结构为50m跨的先简支后连续全预应力连续梁结构，基本联为20联8×50m和6联7×50m，共有404片箱梁。

横桥向为双幅，中心距为17m，单幅为单箱单室，箱梁顶宽15.8m，底宽6.625m，梁高内侧3.516m，外侧3.2m，两侧各悬臂3.9m，其根部和端部厚为50cm和20cm；顶板厚26cm，顶板横坡2%，底板厚25cm，支点处加厚至60cm；腹板上端厚60cm，下端40cm（见图6）。为了制梁时内模方便脱出，墩顶处未设横隔板。考虑到架桥机支腿荷载很大，对墩顶处箱梁截面进行了加厚，腹板加厚至110cm，加厚长4m，另设长2m的过渡段，顶底板加厚到60cm。50m端梁重1430t，中梁1425t。

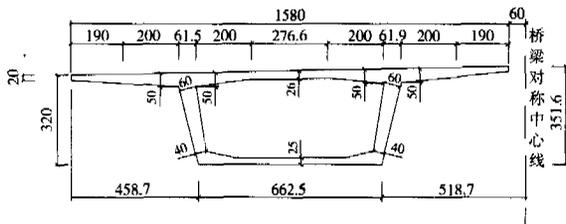


图6 50m箱梁跨中横断面（尺寸单位：m）

## 5.2 本司竞标的50m梁施工方案。

### 5.2.1 预制

#### ①预制场

预制场设在业主指定的南岸桥头陆地，大桥西侧，长560m，宽300m，占地面积16.8万m<sup>2</sup>。设6个制梁台座，36个存梁台座，3个钢筋制作台座，3个内模堆场，每月生产14片梁，可满足总工期和架梁的需要。

存梁台座和制梁台座两端均采用桩基，在无详细地勘报告的情况下，初步估算台座每端均为2根Φ1.2m钻孔灌注桩，桩长约62m。制梁台座中间部分采用平板式浅基础，为减少台座中部和两端的不均匀沉降，台座底板下卧50cm厚毛石，上铺10cm厚碎石，用压路机碾压密实，铺毛石前对地基土进行轻型井点降水，然后堆载预压，确保地基土密实。见图7。

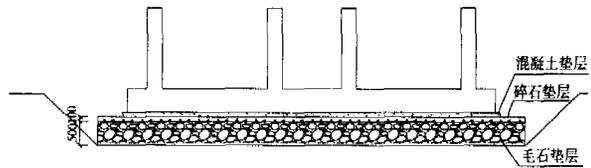


图7

#### ②模板

箱梁模板采用定制钢模：

底模板分块加工，整体安装在混凝土台座上，在梁的支点部位，采用液压支点底模台车；

外模板纵向分为9节，每节由横梁底座，支架和模板三部分构成，在模板堆场拼装成整体后，滑入箱梁浇筑台座，拆除时，整体脱模，整体倒运，整体复位；

内模板纵向分为13节，横向分为5块，每节均由模板系统，车架系统和液压系统三部分构成，分段滑入箱梁浇筑台座拼装，拆除时采用2个油路系统分段收缩脱模，分段外运。

#### ③钢筋笼

箱梁的底板和腹板钢筋在专门的钢筋制作台座上绑扎完成，然后采用2台横跨制梁台座和钢筋制作台座的65t龙门吊将成型钢筋整体吊入制梁台座。

钢筋骨架长度为50m，高度约3.2m，宽度约为6.63m，重约80t。设简易工具架辅助钢筋绑扎成型，采用专用吊装工具式钢架控制钢筋骨架吊装时的变形，见图8、图9。

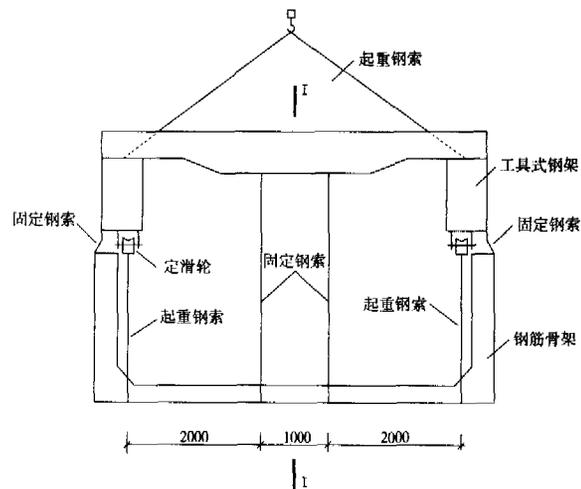


图8

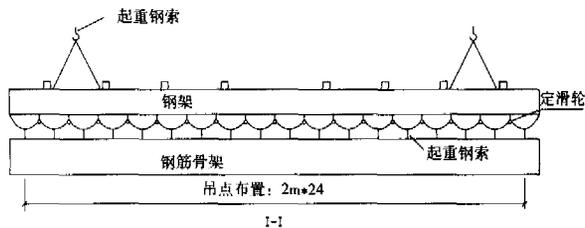


图9

④混凝土

预制场设HZS100型搅拌站两座，理论生产率200m<sup>3</sup>/h。单榀箱梁混凝土（约550m<sup>3</sup>）浇筑采用HBT50型泵3台，另备用1台，并配备相应的布料机3台，完成单榀混凝土浇筑需时约6小时。从混凝土搅拌站到浇筑点的运输采用8m<sup>3</sup>混凝土搅拌车，配备5台搅拌车，每台车每小时来回2~3趟。

混凝土浇筑从两端对称向中间，分层分段逐步推进。先浇筑底板混凝土，再腹板，最后顶板，完成混凝土浇筑。混凝土振捣采用插入式与附着式相结合的方案。

养护：为了加快模板台座的周转和施工进度，方案考虑采用蒸汽法养护混凝土。即混凝土浇筑后和蒸汽养护前先停放2~6小时（停放温度宜为10~20℃）→升温至60℃（升温速率每小时不超过15℃）→恒温24小时左右，相对湿度90~100%（混凝土的温度不超过60℃）→降温至与外界温度之差不超过20℃（降温速率每小时不超过15℃）。通常养护48小时，混凝土强度可达到设计强度的100%，可满足张拉和出模需要。

⑤预应力施工

采用内径90mm和100mm波纹管成孔。纵向预应力分两期张拉，在混凝土养生达到85%设计强度以上后，张拉部分纵向预应力，张拉原

则遵循对称张拉，先长索后短索；待混凝土达到设计强度后，张拉余下的纵向预应力和横向预应力。所有预应力钢束的张拉均采用张拉吨位与伸长量双控，即当钢束达到设计张拉吨位时，其实际伸长量与理论计算值之间的误差应控制在6%之内。

压浆采用真空灌浆工艺，浆体的性能必须达到：水泥浆体的水灰比应控制在0.30~0.35；水泥浆的泌水率宜控制在2%，泌水应在24h内被浆体吸收；浆体流动度宜控制在14~18s；浆体膨胀率<5%；初凝时间应>3h，终凝时间应<24h；压浆体浆体温度应不超过35℃。

5.2.2 箱梁运输

①场内移梁

经过科学的分析及实例考证，选择滑道移梁的方案，该方法安全、可靠、经济，并已有类似工程实施成功的经验。

工艺流程：移梁台车进位 → 垂直千斤顶将梁顶起脱离底模 → 利用水平千斤顶平移出制梁台座 → 垂直千斤顶收回上支座直接落在台车下支座上（由台车支座直接受力）→ 利用水平千斤顶平移箱梁至存梁台座边 → 垂直千斤顶再次将梁顶起（高于存梁支座约10cm）→ 平移梁至存梁位置 → 垂直千斤顶收回梁直接落在存梁支座上（存梁过程完毕）→ 将梁移至纵向滑道（方法同前）→ 利用卷扬机将梁牵引至提升站。

方案考虑六对（每对二条）横向滑道，供横向移梁及存梁使用，一对纵向滑道，供将梁移至场外提升站使用。滑道的工作原理是利用移梁台车底部的聚四氟乙烯板与滑道面的不锈钢板（摩擦系数=5%）的接触来滑动。滑道构造见图10。

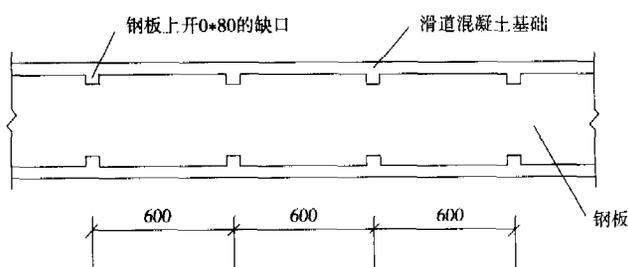
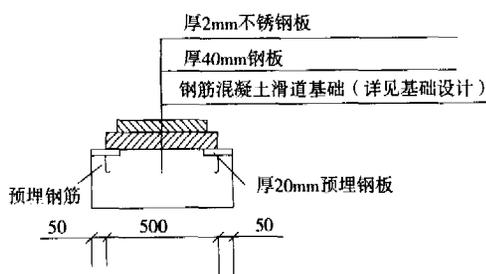


图10

箱梁自重1400t, 移梁水平推力按摩擦系数5%计算需达到70t, 每榀箱梁平移采用垂直千斤顶4只, 活塞行程300mm, 顶力400t; 采用水平千斤顶2只, 活塞行程1000mm, 顶力50t; 将箱梁沿纵向滑道移至提升架距离较远, 采用2台JK8 (8t) 卷扬机, 同时负责牵引, 初选允许荷载为500kN的五门滑车组作动、定滑组, 采用四、五配置即四个定滑轮和五个动滑轮, 移梁速度为3.7m/min, 最远距离时每移一片梁需用时3小时。

## ②提梁上桥

提升站设在十塘内4孔50米连续梁的近水侧2孔, 由固定式龙门吊和运梁车道两大部分组成。

龙门吊设前后 (纵桥向) 两台, 其中心距 (即箱梁吊距) 45m, 龙门吊高约28m, 净高24m, 净宽39.2m。每台龙门吊由双榀钢主梁和两端的钢筋混凝土门柱构成, 钢主梁简支于门柱上。

运梁车道对称于桥轴线布置各一条, 宽5m, 长100m, 由下部结构、纵梁和面板组成。下部结构除利用十塘内4×50m联的两孔三座永久性的桥墩之外, 在每孔中另增设两座板式混凝土结构的临时墩。车道纵梁采用10片贝雷梁 (又叫桁片) 作承重梁, 梁顶设有5m宽的桥面板。在永久墩处, 10片贝雷片纵梁偏出墩宽, 因此, 在墩顶与纵梁底之间加设一道由3片贝雷片构成的墩顶横梁。 (待续)

## (上接第27页)

浆体泌水以后, 孔道不可能饱满, 也不可能密实的。近几年, 我们通过研制的外加剂JMH-3对浆体配置技术进行了改进, 将水灰比降到0.35以下, 通过高速搅浆机 (转速 $\geq 1000$ 转/分钟), 将浆体的流动度提高到12秒 (规范规定为14-18秒), 只要规范操作, 普通压浆工艺也能保证压浆质量。

从南京长江二桥施工引进瑞士VSL公司真空辅助压浆工艺技术, 获得较佳压浆效果后, 目前国内在推广应用。从压浆工艺原理到浆体配置技术, 应该说是目前比较理想的压浆工艺技术, 值得推广。

## 8. 后张预应力结构的砼保护层失控

砼保护层普遍偏小, 施工时采用的保护层水泥垫块, 多数损坏和移位, 导致梁板保护层失控, 加之预应力孔道压浆多数不到位, 而使箱梁底板和板梁底面出现许多不应产生的纵横向裂缝。建议推广应用塑料垫块控制保护层厚度。

## 9. 结束语

预应力技术从发明到大量推广应用, 已有百年以上历史。从理论到工程实践经过几代人的研究和不断创新, 已发展为比较成熟的技

术。按照科学发展观, 科学技术可以超越前人, 但被科技先辈证明是正确的或证明是错误的东西, 不要轻易否定。超越时要有科学依据, 因为正确的东西已形成规范和标准, 必须执行。错误的东西不能重复出错。以上所质疑的若干预应力技术问题是应该发生的, 而且由于违背科学发展观和违背常规, 为了追求政绩抢工期、追求经济效益和低成本而对技术盲目所造成的。

## 参考文献

- 1、吕志涛、孟少平编著《现代预应力设计》. 中国建筑工业出版社, 1998
- 2、杨宗放、方先和编著《现代预应力混凝土施工》. 中国建筑工业出版社, 1993
- 3、交通部《公路桥涵施工技术规范》JTJ041-2000. 北京人民交通出版社, 2000
- 4、周明华、孟少平《南京长江二桥索塔小曲率半径U形预应力束操作工艺试验研究》. 铁道建筑技术, 2001年第6期
- 5、周明华《真空辅助压浆技术在南京长江二桥索塔预应力施工中的应用》. 建筑技术, 2001年第12期
- 6、周明华《影响夹片式锚具锚固性能的综合因素》. 桥梁建设, 2001年第2期
- 7、周明华《对夹片式扁锚的试验研究与应用述评》. 工程质量, 2002年第8期
- 8、周明华、张蓓《大跨度预应力桥梁施工中金属波纹管选刚原则和质量检验》. 施工技术, 2001年第7期