

总302号
综 20 号

国外大坝混凝土入仓设施 栈 桥 与 缆 机

长江流域规划办公室技术情报科

一九八〇年十二月





0404194

5915627

TV53

乙

前言

编写本专题综述的目的是为制订三峡水利枢纽混凝土工程的施工方案作参考用。三峡水利枢纽具有防洪、发电、航运、灌溉及南水北调、渔业、旅游等综合效益，是长江流域规划的主体工程，也是世界上规模最大的水力发电工程。三峡大坝的建成，将对我国社会主义现代化建设起巨大的促进作用。

三峡大坝既有河谷开阔、两岸地势平缓的宽敞坝址，也有河谷较窄、两岸地势陡峻的峡谷坝址。前者施工场地宽阔，施工方便，惟坝顶较长，混凝土方量较大；后者施工场地较小，开挖量大，但坝顶较短，混凝土方量小些。目前，这两种不同类型的坝址尚待最后确定。大规模的混凝土工程施工，需要强有力的混凝土运输系统和入仓设施。根据国外经验，宽河谷坝址混凝土入仓设施一般多用栈桥——起重机方案，峡谷坝址常用缆机方案。但采用单独一种入仓设施有时还不足以复盖整个大坝及其他水工建筑物的混凝土浇筑仓面，尚须辅以其他手段。例如采取以栈桥为主、自卸汽车为辅；以缆机为主、皮带机为辅；或以栈桥为主、固定塔机为辅等综合设施进行浇筑。国外实践还表明，在中等宽度河谷坝址修建混凝土坝，无论是建高坝或低坝，直线坝还是曲线坝，栈桥和缆机方案均可考虑，但以采用何种方案为好，关键是要经济合理，使投资最小，这牵涉到地形、地质、水文、施工导流方案、施工进度、设备供应等多种因素，应根据实际情况而定。

据目前资料，国外最长的栈桥是委内瑞拉古里大坝的钢栈桥，长1540米；最高的栈桥是美国利贝坝的钢栈桥，高96米；跨度最大的缆道是巴西与巴拉圭合建的伊太普大坝的施工缆道，其跨度达1360米；起重能力最大的是美国格兰峡谷坝的施工缆道，其起重量为50美吨（45,360公斤）；运行速度最快的缆机是美国德沃歇克、新布拉巴、莫西罗克的施工缆机，其横向速度为670米/分，竖向速度290米/分，每两分钟就可吊运一罐（6.12立米）混凝土入仓，每台缆机每天可浇筑混凝土3700立米，每月可浇78000立米。

栈桥和缆机都属于临时建筑物，一般大坝建成后即行拆除，但栈桥的铁塔，一部分埋入混凝土中，无法回收。据苏联资料，钢材损失可达30%。缆机虽可全部拆除并转移到别处继续使用，但缆索本身往往磨损甚剧。据美国资料，每浇完153万立米混凝土，即须更换主索和牵引索；而更换一根直径82毫米的主索，大约需要3~4个月的时间。

由于所掌握的资料有限和编写水平低，本综述一定存在不少错漏误笔之处，希望读者批评指正。

* * *

编者注：为了叙述方便，本资料将单一承重钢索称为主索（Track Cable），加上主索的支承设施（例如铁塔、轨道、柱杆、锚墩等）后称为缆道（Cableway），再加上起重小车、牵引系统、机械、电机、控制设备等，即称为缆式起重机（Cable Crane），或简称缆机。

目 录

前 言

第一部分 施工栈桥	(1)
一、概 述	(1)
二、栈桥的设计与计算	(6)
三、栈桥上的起重机	(11)
四、国外大坝混凝土施工栈桥实例	(19)
1、伊太普坝的混凝土施工栈桥	(19)
2、苏联乌斯特——伊里姆坝的混凝土施工栈桥	(20)
3、苏联卡霍夫坝的混凝土施工栈桥	(24)
4、苏联布拉茨克坝的混凝土施工栈桥	(26)
5、美国方塔纳坝的混凝土施工栈桥	(28)
6、美国大古力坝的混凝土施工栈桥	(31)
7、日本下久保坝的混凝土施工栈桥	(32)
8、日本土师坝的混凝土施工栈桥	(34)
第二部分 缆式起重机	(36)
一、概 述	(36)
二、缆道的布置	(45)
三、缆机的牵引系统	(51)
四、主索的计算	(55)
五、国外大坝混凝土施工缆机实例	(61)
1、伊太普坝的混凝土施工缆机	(61)
2、瑞士洪格林双拱坝的混凝土施工缆机	(63)
3、美国当纳尔斯坝的混凝土施工缆机	(65)
4、美国饿马坝的混凝土施工缆机	(67)
5、美国格兰峡坝的混凝土施工缆机	(68)
6、美国松坪坝的混凝土施工缆机	(69)
7、美国德沃歇克坝的混凝土施工缆机	(70)
8、美国莫西罗克坝的混凝土施工缆机	(71)
附表 国外大型缆机 (主索跨度 > 600 米者) 一览表	(73)
参考文献	(76)

注: 本文图表方括号 [] 中数字系资料来源, 亦即参考文献编号。

国外大坝混凝土入仓设施

栈桥与缆机

第一部分 施工栈桥

一、概 述

国外的实践表明,当大坝混凝土从拌和厂运输到坝下后,采用的入仓设施和设备有很多,其中主要是缆机和行驶于栈桥上的起重机(例如双悬臂起重机、塔式起重机、门式起重机)以及自卸汽车等。本文第一部分介绍国外大坝施工中的栈桥设施,缆机设施拟在第二部分叙述。

大坝混凝土工程施工,不论是采用栈桥——起重机方案还是缆机方案吊运入仓,基本要求是“一气呵成”,即栈桥和缆道的布置,应考虑使其一次就能复盖整个大坝的浇筑仓面,而不要中途拆迁或转移,以免中途停工,造成浪费,增大开支,影响施工进度。但国外许多大坝的施工实践表明,要求这些设施和设备全部复盖所有的浇筑仓面有时是不可能的,也是不必要的。由于枢纽布置关系有一部分水工建筑物也会处于预定的浇筑圈之外,对于这一小部分浇筑仓面,则可另用其他方法,例如用移动式皮带机、履带式起重机、自卸汽车、固定式塔机等配合进行浇筑,而不必勉强扩大栈桥或缆机的作业范围,以免增加工程投资。

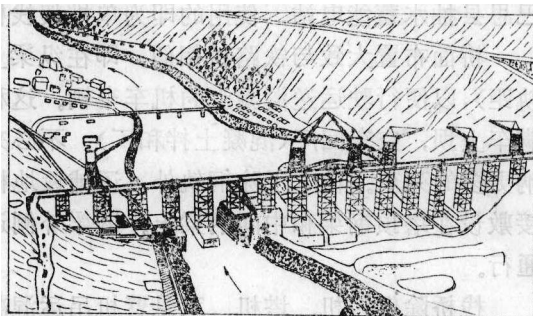


图1 美国利贝坝(施工期间1968—1973)施工栈桥〔1〕

图1为美国利贝坝混凝土工程施工栈桥的素描图(根据照片描绘)。该坝为一直线重力坝,坝顶全长883米,最大坝高135米,混凝土方量305万立方米,采用栈桥——起重机吊运入仓。施工栈桥为金属结构,全长610米,桥面宽11米,由17跨钢梁及16座铁塔(支架)组成。铁塔最大高度96米(约为最大坝高的71%)。共用金属5100吨,即每立方米混凝土金属用量为1.7公斤。栈桥安装强度87米/月,即730吨/月。桥上安有6台全回转式高架门机,其中4台的门架高度为30米,另2台高33.5米,门机臂长45米。栈桥位置在坝轴线下游,大致居于大体积混凝土中心处。桥面低于坝顶44.8米。

国外实践表明,混凝土施工采用栈桥或缆机要根据经济比较而定。凡河谷宽阔的坝址,一般以采用栈桥设施为宜(见表15,第37页)。河谷虽然不宽,但由于两岸切割剧烈,沟壑纵横,修筑缆道铁塔轨道路基工程艰巨,甚至无法架设缆道时,也可考虑采用栈桥——起重机的入仓方案。

国外施工栈桥一般由铁塔(桥墩,支架)、钢梁、桥面三部分组成。铁塔多为空间结

构,由4根立柱外加横撑、斜撑组成。立柱常用H型钢,也有用钢管制作的;横撑及斜撑多为角钢杆件,也有使用管材的。横撑和斜撑与立柱的连接方式,既不用焊接,也不用铆接,而是采用螺栓连接,以便于拆卸。随着大坝混凝土的浇筑面逐渐升高,可将最下面的角钢杆件逐一拆除,以便回收利用,减少钢材消耗。H型钢立柱除露出坝面以上的那一部分外,其余部分将永远埋入混凝土中,无法回收。

铁塔的四根立柱,彼此平行,从上到下均按正方形排列,,正方形的边长适等于塔顶钢梁的纵向跨度或其横向中线间距,亦即等于起重机轨道的中心距。故铁塔的平面尺寸和每一层的高度,完全取决于起重机门架的轮距。钢梁大都采用一般的组合式板梁,支承于H立柱顶上。两根板梁间用横梁连接,横梁上再安装纵梁,以便承托桥面。这种钢梁称为铁塔(钢)梁,两座铁塔之间的钢梁则称为中间(钢)梁。中间(钢)梁的长度没有统一的规定,可长可短。例如美国方塔纳大坝施工栈桥,中间(钢)梁约为铁塔(钢)梁的1.5倍,利贝坝约为3.25倍;苏联布拉茨克坝约为6倍。但不论中间(钢)梁与铁塔(钢)梁的长度高度如何变化,其顶部总是齐平的,都在同一水平面上。除四立柱式铁塔即由双排架组成的铁塔之外,国外也有采用两立柱式铁塔即单排架支承的,例如美国正在施工中的赫尔姆斯及巴思县抽水蓄能电站,使用的即为单排架栈桥。

桥面布置大致与铁路桥相似,即在纵梁上铺设枕木,枕木上铺设钢轨(标准轨距或其他轨距),以便行驶运送混凝土的机车车辆。这种轨道至少要铺双线,以利机车车辆单向行驶,满车上坝,空车回厂(混凝土拌和厂),不必来回错车。也有铺设三线或四线的,这样可以容纳更多的列车。枕木上除钢轨外,还铺设地板,便于施工人员行走。起重机的重型钢轨都直接敷设在塔顶钢梁和中间钢梁上。钢梁外侧还装设悬臂式人行道,宽约2米,以利施工人员通行。

栈桥除供门机、塔机、双悬臂机吊运混凝土入仓外,国外也有利用栈桥来敷设缆道铁塔轨道的。国外资料表明,若地形复杂,填筑铁塔轨道路基工程过于艰巨时,便以采用栈桥较为经济。一俟混凝土浇完,缆道转移至他处时,此种栈桥亦同时拆除,材料可全部回收利用。图2是美国底特律大坝缆道铁塔轨道的桥式支承。该坝由于路基填筑方量很大,缆道铁塔轨道采用临时钢栈桥支承。桥上共有两座缆道铁塔。两条缆道的主索跨度为604.42米,直径83毫米,起重量各为20吨。日本黑部川第四坝为高186米的拱坝,其混凝土采用缆机吊运入仓,由于坝址两岸陡削,地形复杂,缆道铁塔轨道亦用栈桥支承,桥长190米,桥墩为混凝土结构。

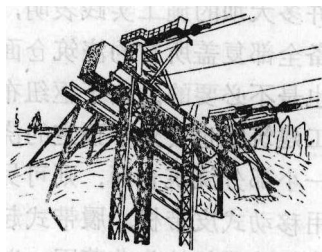


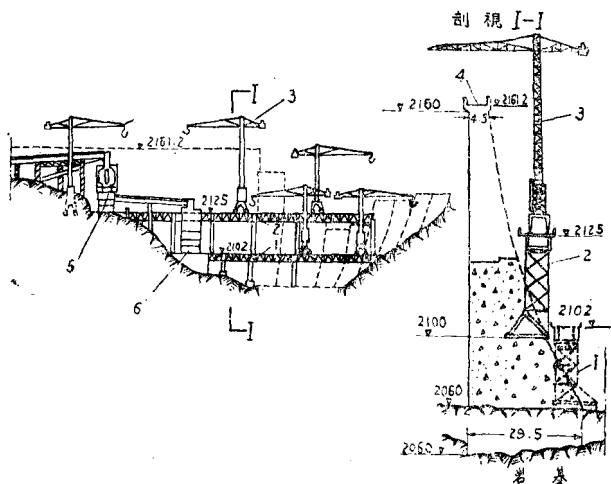
图2 美国底特律坝用来支承施工缆道铁塔轨道的栈桥

资料来源:《施工方法及设备》,1951年2月号, p59〔3〕

委内瑞拉古里水电站,其第一期工程的混凝土是用缆机浇筑的,已于1977年完工。第二期工程于1978年开工,将现有混凝土重力坝加高52米,并另建一座新的混凝土重力坝,同时还要加高溢洪道和建造一座6公里长的副坝,以及新建一座装机10台的第二厂房。完工后,该电站装机容量将达1009万千瓦,为仅次于伊太普的最大水电站。第二期工程混凝土总方量670万立方米,全部改用栈桥和起重机浇筑。栈桥长1540米,宽16.5米,高出地面68.6米。除浇筑混凝土外,该栈桥还将用来安装压力钢管。栈桥总重量达17,300吨。

图3为法国长岬拱坝的施工栈桥。该坝为混凝土重力拱坝,其断面形状:上游垂直,

上游呈弧形。整个拱坝分为左右两段。左段为主拱，平面半径160米，坝顶长275米，最大坝高101米，坝顶宽4.5米，底宽29.5米，混凝土方量225,000立米；右段为副坝，平面半径400米，坝顶长270米，平均高12米，混凝土方量25,000立米。栈桥在平面上布置成弧形。低栈桥（高程2102米），架设在坝趾附近，高22米；高栈桥（高程2125米）位于下游坝面上，高25米。两座栈桥共有别依茨——90型塔机5台，混凝土吊罐容量1.8立米。混凝土由高低栈桥左端的拌和厂直接供给，毋需中途转运。采用这种弧形金属结构栈桥及塔机吊运混凝土入仓，其平均浇筑强度为11,300立米/月，最大浇筑强度为36,000立米/月。



1—低栈桥；2—高栈桥；3—塔式起重机；
4—坝顶；5、6—混凝土拌和厂

图3 法国长岬拱坝混凝土施工栈桥布置图

资料来源：《水工建设中大体积混凝土的运输》，
p62〔4〕

国外混凝土坝施工，也有同时采用栈桥——起重机与缆机吊运混凝土入仓的。图4是日本草木坝混凝土工程的联合入仓设施布置图。该坝是一座直线重力坝，最大高度为140米，坝顶长405米，混凝土方量140万立米，已于1976年浇毕。该坝断面的上游部分混凝土由缆机吊运入仓，下游部分则用栈桥和门机进行浇筑，消能工程则直接利用无栈桥的9吨旋臂式门机施工。缆机起重量20吨，其左岸为固定塔（首塔），靠近混凝土厂；右岸为活动塔，轨道成弧形，其有效长度为115米。缆道的复盖面积为一扇形，故可用来浇筑大坝断面上游部分的混凝土（包括坝顶在内），其额定浇筑率为100立米/小时。混凝土用10吨柴油机车牵引能装两个6立米吊罐的平车运到缆道下方，再由起重小车吊运入仓。栈桥沿大坝断面下游侧布置，桥高70米，桥面高程390米，门机起重量13.5吨，其活动半径为37立米，额定浇筑率75立米/小时。混凝土用10吨柴油机车牵引能装3个4.5立米吊罐的平车运送上桥。浇筑消能工程用一台9吨门机，其活动半径为50米，复盖面积为一圆形。混凝土由河床附近的设备拌和，然后装入吊罐，送到这台门机的取料场。上述3种入仓设施可将整个大坝仓面复盖无遗，其实际运用情况如表1所示：

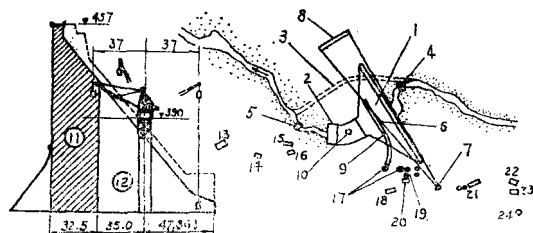
表1 日本草木坝三种浇筑设备的运用情况

设备名称	运用时间 (小时)	工作天数 (天)	混凝土浇筑方量 (立米)	平均浇筑强度 (立米/小时)	每天平均 工作时间 (小时一分)
缆机（起重量20吨）	11274	935	836,900	74.2	10：5
栈桥（13.5吨门机）	7941	780	504,760	63.6	10：10
单独门机（起重量9吨）	2238	304	64,300	28.7	7：20

如图4所示，缆机复盖的仓面与栈桥门机复盖的仓面有一部分是重迭的，因此存在着纜

机与门机互相发生冲突的危险。经研究确定采用了一种装有冲突警报设备的同步电动机以策安全。

混凝土重力坝亦可不用栈桥而用自升式塔机来进行浇筑。图5和图6为日本有峰第三发电站小口川坝采用自升式塔机进行浇筑的情况。该坝为一直线重力坝，最大坝高72米，坝顶长245米，坝体混凝土方量25万立方米，连同消能工在内，混凝土方量合计30万立方米，计划于1979~1980年度在18个月内全部浇完，平均月浇筑强度为16,700立方米/月。

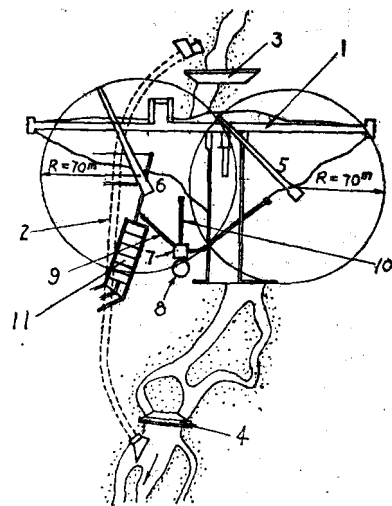


1—大坝；2—消力池尾槛；3—导流隧洞；4—上游围堰；5—下游围堰；6—缆机(起重重量20吨)；7—缆道首塔；8—缆道尾塔行走轨道；9—施工栈桥(上载13.5吨门机)；10—9吨旋臂式门机；11—缆机所浇筑的混凝土；12—通过栈桥用门机浇筑的混凝土；13—变电所；14—第一水泵室；15—水塔(2×150立方米)；16—第二水泵室；17—混凝土配料厂；18—骨料选配仓；19—水泥筒仓；20—混凝土拌和厂；21—砂仓；22—制砂厂；23—破石厂；24—原砂仓

图4 草木坝混凝土施工栈桥及缆机布置图〔5〕

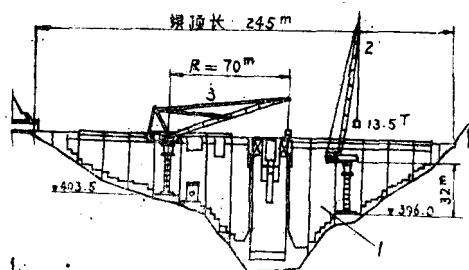
资料来源：日本山海堂《土木工事施工例集》，第五卷，p243，246〔5〕

该坝施工时，采用了两台塔机。从图可以看出，大坝浇筑仓面基本上复盖无遗。塔机是固定的，塔柱高32米，外径3米，系由3米高的钢板与型钢组成，呈圆筒形。塔机通过液压千斤顶能随混凝土上升而升高。塔机起重重量13.5吨，最大浇筑半径70米，提升高度可达120米。提升速度：满罐37.5米/分，空罐75米/分。下放速度：满罐50米/分，空罐100米/分。塔机旋转速度0.3~0.6转/分。塔柱升降速度0.3米/分。运转室、机械室、电机室均设在塔柱顶端的平台上，施工人员可从运转室直接看到现场的浇筑情况，并可通过专门的无线电话与仓内施工人员进行联系，十分方便。由于机



1—大坝；2—导流隧洞；3—上游围堰；4—下游围堰；5—一号塔机；6—二号塔机；7—混凝土拌和厂(由3台1.5立方米拌和机组成)；8—水泥筒仓(1000吨)；9—皮带机；10—供料线；11—骨料堆场

图5 小口川坝施工塔机平面布置图



1—大坝；2—一号塔机；3—二号塔机 图5及图6的资料来源：日本“建设之机械化”，1979年2月号，p16〔7〕

图6 小口川坝用塔机浇筑混凝土时下游立面图

电设备都安装在一个平台上,检修也非常容易。除浇筑混凝土外,塔机还可用来吊运闸门、钢管和其他设备。同时,更换缆索也比较简单。

苏联萨彦——舒申斯克重力拱坝,高245米,混凝土方量962万立方米,目前还在施工中(第一台机组1978年投入运转时,主体工程已完成混凝土320万立方米)。该坝采用的主要浇筑设备是行驶于自升式栈桥上的25吨塔机,一共架设了10座自升式栈桥。该栈桥为板梁结构,分别固定在4根空心钢柱($\phi 1000$ 毫米)上,钢柱里面装有螺旋千斤顶,当4台螺旋千斤顶同时启动时,钢板梁即随之上升,上升速度2.3米/小时。自升式栈桥总重245吨,其承载能力为513吨。

塔机沿栈桥轨道可移动20米。1977年9月,第一座自升式栈桥架成后,配用KBГC—1000型塔机来浇筑混凝土,到1978年3月,在第29~31坝段范围内,共浇混凝土5.2万立方米栈桥上升了29米。国外应用自升式栈桥配合KBГC—1000型塔机进行浇筑的初步经验表明,这种栈桥和塔机不仅浇筑效率高而且运行可靠。萨彦——舒申斯克坝每年可浇筑混凝土250万立方米,浇筑强度超过布拉茨克坝和克拉斯诺雅尔斯克坝一倍。

上述自升式栈桥的铁塔有一部分浇入大坝混凝土中,无法回收利用。但南非逢戈拉普尔特拱坝的施工栈桥,则位于坝体之外,可不消耗钢材。该坝为一89.3米高的双曲拱坝,拱顶长448米,两端各有一座112.78米长的重力式推力墩,坝顶全长673.56米。施工时,在大坝上下游紧靠坝踵坝趾处各设弧形栈桥一座,桥面敷设轨道,轨道上有塔机多台,每天可浇筑混凝土573.4立方米。塔机除吊运混凝土而外,还可以用来吊运其它材料和设备。

国外一些大坝施工栈桥的安装强度如表2所示。

表2 国外一些大坝施工栈桥安装强度

大坝名称	栈桥长度 (米)	耗用钢材 (吨)	安装历时 (月)	安 装 强 度	
				(米/月)	(吨/月)
大古力	1095 915	8900	3	365	2950
方塔纳	470	3000	4.6	102	653
契罗克	532	3200	4	133	800
赫尔斯峡	204	1200	3	68	400
利 贝	200	2100	3	70	700
	410	3000	4	100	750
平 均	500	3680	3.5	143	1050

资料来源:A.П.别琴:《近代大型混凝土坝的建造速度》,p98〔2〕

从表2资料可以看出,栈桥安装速度,以四十年代初期的大古力坝为最高,六十年代后期的赫尔斯峡坝反而最低;二十多年不但没有任何进展,反而倒退了许多倍。栈桥的利用率也是如此(见表3)其原因可能是栈桥乃属于临时建筑物,安装时间一般不过3~4个月,对总的施工进度影响不大,因此没有投入过多的人力和机械设备加速栈桥的安装进程;另一方面,大古力坝施工速度快,也可能是出于战时的要求。

表3

美国一些大坝施工栈桥的利用情况

大 坝	起重机种类	台数	栈桥主要尺寸 (米)			耗用钢材 (吨)	每立方米混凝土 耗用钢材 (公斤/立方米)
			高	宽	长		
大古力	双悬臂起重机	3	49 61	13 13	915 1095*	8900	1.1
弗里安特	双悬臂起重机	2	86	13.5	705	3800	2.3
契罗克	门架式起重机	3	30	15.7	532	3200	6.1
道格拉斯	门架式起重机	3	38	15.7	400	2200	5.2
方塔纳	双悬臂起重机	2	69	17.1	305	5336	2.5
	门架式起重机	5	61	17.1	470 165		
公牛滩	双悬臂起重机	2	56	11.6	580	3500	2.1
赫尔斯峡	门架式起重机	2	61	11.0	204	1200	2.3
利 贝	门架式起重机	6	84	11.0	610	5100	1.7
平 均			60	13.6	582	4800	2.9

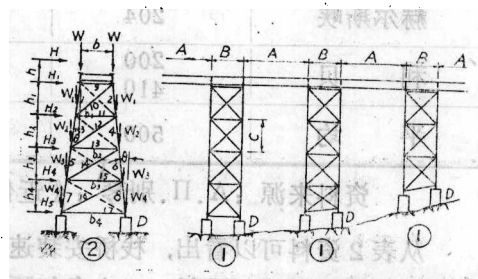
资料来源: A. II. 别琴: 《近代大型混凝土坝的建造速度》, p96—97

* 第二期工程

二、栈桥的设计与计算

栈桥是一种临时建筑, 大坝完工后即行拆除, 大部分钢材可以回收并转移到另一工地继续使用, 有一小部分则埋入混凝土中, 无法回收。栈桥也可仿照铁路高架桥进行设计, 但因系临时设施, 其设计要求及计算方法比之铁路桥要简单一些。例如铁路高架桥的杆件多采用铆钉或销钉连接, 固定不动, 而施工栈桥的杆件则采用螺栓连接, 横撑和斜撑可随混凝土上升而拆除; 铁路高架桥要通高速火车, 其纵向冲击力和横向摇动力都很大, 而施工栈桥桥面上只行走双悬臂机、塔机或门机, 其移动速度比较缓慢, 因此可以不考虑冲击力和摇动力; 铁路高架桥的立柱多用组合型钢截面, 结构复杂, 而施工栈桥为了安装和拆卸方便, 其立柱断面都比较简单, 或为H型钢, 或为工字钢, 或为管柱。

施工栈桥主要由铁塔(桥墩)、钢梁和桥面等三部分组成, 如图7所示。每座铁塔又由两片排架组成, 每片排架各有两根立柱, 故每座铁塔共有立柱4根。立柱之间用横撑(水平支撑)和斜撑(对角线支撑)联接, 以增加排架和铁塔的稳定性。钢梁有两种, 位于两排架之间的称为铁塔桥跨钢梁(简称铁塔梁)、位于两铁桥之间净跨度上的称为中间跨度钢梁(简称中间梁)。一座施工栈桥所有的铁塔梁和中间梁本身长度都相同, 但各自的跨度未必都相等。常见的铁塔梁长度, 低栈桥为30英尺(9.14米), 高栈桥为45英尺(13.72米); 中间



①铁塔(桥墩); ②排架; A—中间桥跨钢梁; B—铁塔桥跨钢梁; C—层高; D—钢筋混凝土塔脚

图7 栈桥设计及计算简图 [10]

梁的跨度则随铁塔高度的增加而增加, 常见的跨度为60英尺(18.29米), 一般为铁塔梁的2倍。铁塔梁与中间梁均为组合型钢截面, 由于跨度不同, 梁高本应各异, 但因是临时建筑, 将来是要拆除的, 为了架设方便, 有时也采用同一高度。两片组合大梁彼此用横梁(工字梁)联接, 横梁之间安设纵梁, 纵梁上铺设枕木和厚木板作成桥面。两片组合大梁的中心间距与所用起重机的轨距相等, 排架的顶部宽度则等于此轨距加上大梁翼缘宽度。

美国土木工程手册介绍铁塔排架的应力计算方法如下:

1、垂直荷载所引起的铁塔杆件内力

垂直荷载包括起重机、吊罐加混凝土、输送混凝土的机车、车辆、其他设备和行人等活荷载以及钢梁桥面和铁塔自重等组合荷载。

设 W 为作用于每一柱顶处的总活荷载与静荷载;

$W_1, W_2, \dots, W_4$ 为作用于各节点处的静荷载;

$N_1, N_2, \dots, N_{13}$ 为作用于杆1、2、……13的内力;

θ 为任何杆件与铅垂线间的夹角; (图7)

则

$$N_1 = N_2 = W \sec \theta;$$

$$N_3 = N_4 = (W + W_1) \sec \theta;$$

$$N_5 = N_6 = (W + W_1 + W_2) \sec \theta;$$

$$N_7 = N_8 = (W + W_1 + W_2 + W_3) \sec \theta;$$

$$N_9 = W \tan \theta;$$

$$N_{11} = W_1 \tan \theta$$

$$N_{13} = W_2 \tan \theta;$$

$$N_{15} = W_3 \tan \theta;$$

$$N_{17} = (W + W_1 + W_2 + W_3) \tan \theta.$$

在竖向荷载作用下, 斜撑中不产生内力。除 N_{17} 外, 其余杆件中的内力都是压力。

2、风荷载所引起的铁塔杆件内力

设 H 为作用于起重机和输送混凝土的机车车辆及吊罐上的水平风压力;

$H_1, H_2, \dots, H_4$ 为分别作用于铁塔上的水平风压力(假定在外力作用下, 所有斜撑、

拉杆、虚线杆都不受力); (图7)

则

$$N_1 = Hh \sec \theta / b;$$

$$N_2 = - [H(h + h_1) + H_1 h_1] \sec \theta / b_1;$$

$$N_3 = [H(h + h_1) + H_1 h_1] \sec \theta / b_1;$$

$$N_4 = - [H(h + h_1 + h_2) + H_1(h_1 + h_2) + H_2 h_2] \sec \theta / b_2;$$

$$N_5 = -N_4;$$

$$N_6 = - [H(h + h_1 + h_2 + h_3) + H_1(h_1 + h_2 + h_3) + H_2(h_2 + h_3) + H_3 h_3] \sec \theta / b_3;$$

$$N_7 = -N_6;$$

$$N_8 = - [H(h + h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + H_1(h_1 + h_2 + h_3 + h_4) + H_2(h_2 + h_3 + h_4) + H_3(h_3 + h_4) + H_4 h_4] \sec \theta / b_4;$$

式中正号表示拉力, 负号表示压力。

水平杆及斜杆中的内力, 应用结构静力学方法很容易求出。

铁塔本是空间超静定结构, 以上是把铁塔分为两片排架并按静定法来分析的, 因而计算大大简化, 并且偏于安全。由于施工栈桥是临时结构物, 故美国的这一计算方法是可行的, 但须注意排架顶部两端节点上的活荷载并不都等于 W , 而应根据起重机的实际工作情况来确定。

如果铁塔立柱是铅直的（例如苏联布拉茨克栈桥及其他各国的大多数栈桥），即 $\theta = 0^\circ$ ， $\sec\theta = 1$ ， $\operatorname{tg}\theta = 0$ ，则上述诸公式还可大大简化。

栈桥设计所采用的荷载及荷载组合，各国有不同的规定，典型实例可参见“苏联布拉茨克坝施工栈桥”（实例4），“美国方塔纳坝施工栈桥”（实例5）。下面举一个日本临时栈桥的计算实例。其中活荷载为轮式起重机，该栈桥使用的支架虽是单排架，且其工作条件也与浇筑大坝混凝土不同，但仍可作为大坝混凝土施工栈桥设计的参考。单排架的应力计算可按上述方法进行。计算时只需采用简单的材料力学方法。

临时栈桥设计实例〔11〕

资料来源：日本《现场技术人员使用的附属企业设工事施工计划手册》1977年版，第1—80至1—83页）

临时栈桥的结构如附图（图8）所示。桥墩由4根支柱（H300×300×10/15）组成，间距5.5米，用打桩锤打入河底复盖层12.5米，河底以上柱高5.5米。这4根立柱排架，顶部用两根横梁（[300×90×9）夹持，用螺栓紧接于立柱上端；中部用两根斜撑（[300×90×9）加固，由 $\phi 19$ 螺栓连帽连接。横梁上面为H300×300，紧靠支柱的上端布置。承台上安装纵梁（H300×300×10/15）4根，每根纵梁长11米，支于三个排架上，成为两跨连续梁。纵梁在桥面板上呈交替布置，其接头在承台上彼此互相错开。纵梁上铺设桥面板（1000×2000×204），桥面板由5根（H200×204）型钢并列而成。用螺栓固定在纵梁上。桥面宽6米，可行驶起重量为35吨的轮式起重机。起重机行走时重42.2吨。当提升量为最大时，桥面板承受的总压力为77.2吨，作用于桥面板中心处的最大集中荷载为20吨。

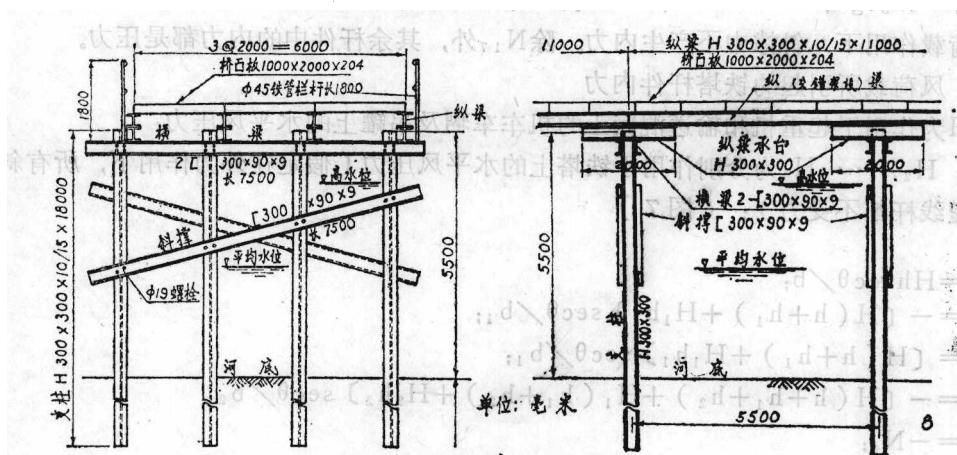


图8 临时栈桥结构图

1、桥面板计算

计算简图如图9所示。

$$\text{跨中最大弯矩 } M = \frac{Pl}{4} + \frac{ql^2}{8} \times 5$$

（桥面板由5根H梁组成）

$$M = \frac{20 \times 2}{4} + \frac{0.0326 \times 2^2}{8} \times 5 = 10.082 \text{ 吨} \cdot \text{米}$$

$$= 1,008,200 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$$

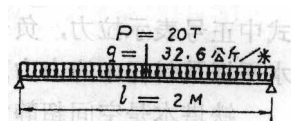


图9

$$\sigma = \frac{M}{Z_x} = \frac{1,008,200}{312 \times 2.5} = 1292.5 \text{ 公斤/厘米}^2$$

(桥面板的5根H梁只考虑半数受荷, 故除以2.5)

由于 $\sigma < [\sigma] = 1400 \text{ 公斤/厘米}^2$, 可。

2、纵梁计算

纵梁断面为 H300×300×10/15, 每米自重94公斤, 断面模量 $Z_x = 1360 \text{ 厘米}^3$, 容许应力 $[\sigma] = 2400 \text{ 公斤/厘米}^2$

桥面板均布荷载为311公斤/米; 附件为189公斤/米, 故

$$q_1 = 311 + 189 = 500 \text{ 公斤/米} = 0.5 \text{ 吨/米}$$

纵梁自重 $q_2 = 94 \text{ 公斤/米} = 0.094 \text{ 吨/米}$

起重机集中荷载 $P = 20 \text{ 吨}$

纵梁跨中最大弯矩为

$$M = \frac{PL}{4} + \frac{q_1 L^2}{8} + \frac{q_2 L^2}{8}$$

$$M = \frac{20 \times 5.5}{4} + \frac{0.5 (5.5)^2}{8} + \frac{0.094 (5.5)^2}{8} = 29.745 \text{ 吨} \cdot \text{米} = 2,974,500 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$$

$$Z_x = \frac{M}{[\sigma]} = \frac{2,974,500}{2400} = 1239 \text{ 厘米}^3 < 1360 \text{ 厘米}^3, \text{ 可。}$$

3、横梁计算

横梁由两根槽钢 (300×90×9) 组成, 其断面模量 $Z_x = 429 \text{ 厘米}^3$, 断面面积 $A = 48.57 \text{ 厘米}^2$, 容许抗扰强度 $[\sigma] = 2400 \text{ 公斤/厘米}^2$, 容许抗剪强度 $[\tau] = 800 \text{ 公斤/厘米}^2$

作用于横梁上的集中荷载 = 桥面板重量 + 纵梁重量 + 起重机传来的荷载 = $\frac{1}{2} \times 0.5 \times 5.5 + \frac{1}{2} \times 0.094 \times 5.5 + 20 = 1.375 + 0.259 + 20$, $P = 21.634 \text{ 吨}$

计算简图如图10。

$$R_A = \frac{21.634 \times 1.55}{2} = 16.766 \text{ 吨}$$

$$R_B = 21.634 - 16.766 = 4.868 \text{ 吨}$$

$$M_{\max} = 16.766 \times 0.45 = 7.545 \text{ 吨} \cdot \text{米} = 754,500 \text{ 公斤} \cdot \text{厘米}$$

最大剪力 $Q = 16.766 \text{ 吨}$

$$\sigma = \frac{M}{Z_x} = \frac{754,500}{429} = 1758 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$< [\sigma] = 2400 \text{ 公斤/厘米}^2$, 可。

$$\tau = \frac{Q}{A} = \frac{16766}{48.57} = 345 \text{ 公斤/厘米}^2$$

$< [\tau] = 800 \text{ 公斤/厘米}^2$, 可。

4、支柱计算

支柱由 H300×300 型钢组成, 长18米, 下部打入河床12.5米, 外露部分长5.5米。其计算简图及各柱荷载如图11所示。

支柱的承载能力用多尔 (Dörr) 公式计算, 得:

$$R = A_p l \gamma k_p + \frac{u \gamma l^2 f}{2} (1 + \operatorname{tg} \phi) + 1 \cdot u \cdot c$$

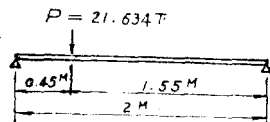


图10

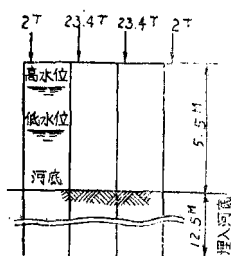


图11

	一号桩	二号桩	三号桩	四号桩
桥面板	$\frac{1}{2} \times 500 \times 0.5$ =1375公斤	500×5.5 =2750公斤	500×5.5 =2750公斤	$\frac{1}{2} \times 500 \times 0.5$ =1375公斤
H 300 × 300	100×5.5 =550公斤	550公斤	550公斤	550公斤
[300 × 90	40×1.5 =60公斤	40×2 =80公斤	40×2 =80公斤	40×1.5 =60公斤
活载重		20000公斤	20000公斤	
合 计	1985公斤	23380公斤	23380公斤	1985公斤

式中:

A_P —支柱下端桩尖面积 (0.09米^2)

l —支柱埋入土内的长度 (12.5米)

φ —土壤的抗剪角 (20°)

k_P —被动土压系数 $= \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2}\right) = \tan^2 55^\circ = 2.045$

u —支柱周长 (1.2米)

γ —土的容重 ($1.6\text{吨}/\text{米}^3$)

f —桩与土的摩擦系数 (平均为 0.319)

c —粘结力 (零)

将上述数据代入Dörr公式, 得:

$$R = 0.09 \times 12.5 \times 1.6 \times 2.45 + \frac{1.2 \times 1.6 \times (12.5^2) \times 0.319}{2} (1 + 0.364) + 0 = 57.8\text{吨}$$

在短期荷载作用下, 安全系数取 $n = 2$, 支柱的承载能力只有 $57.8\text{吨} / 2 = 28.9\text{吨}$

$> 23.4\text{吨}$, $\therefore$ 可。

由于地质条件很差, 有效埋入长度不能按 12.5米 计算, 而只考虑取其三分之一, 即大约 4米 计算,

故 $l = 5.5 + 4 = 9.5\text{米} = 950\text{厘米}$ 。又 H300 × 300 的最小回转半径 $r = 13.1\text{厘米}$, 故细长比

$$\lambda = \frac{l}{r} = \frac{950}{13.1} = 72.5 < 100, \text{可。}$$

支柱最大压应力

$$\sigma = \frac{P}{A} \cdot W = \frac{18500}{119.8} \times 1.39 = 214.65\text{公斤}/\text{厘米}^2 < [\sigma] = 2400\text{公斤}/\text{厘米}^2, \text{可。}$$

用直线方程式校核:

$$\sigma_K = 3100 - 11.4 \frac{l}{r} = 2273.5\text{公斤}/\text{厘米}^2$$

$$P = \sigma_K \cdot A = 272,235\text{公斤} = 272.24\text{吨}$$

采用安全系数 3

$$P = 272.24 \times \frac{1}{3} = 90.7\text{吨} > 23.4\text{吨}, \text{可。}$$

另外正在施工中的美国两座抽水蓄能水电站, 混凝土工程施工采用的也是单排梁栈桥。这两座水电站, 一座是西弗吉尼亚州的巴思县 (Bath County) 水电站, 一座是加利福尼亚

亚州的赫尔姆斯(Helms)水电站。前者装机6台,单机容量357,000千瓦,总容量2,142,000千瓦,总水头330米,其上池蓄水量可满足8~10小时的峰荷需要。后者装机3台,单机容量350,000千瓦,总容量1,050,000千瓦,总水头476米。这两座电站将分别于1982和1981年开始发电。(据美籍华人杨国华先生1980年6月6日上午在长办惠济路招待所学术报告)

委内瑞拉古里水电站第二期工程所用的施工栈桥,长1540米,是目前世界上最长的钢栈桥。该栈桥为一多跨结构,铁塔安装在基岩上圆形混凝土桥脚上,桥脚混凝土方量19,000立米。铁塔顶端都安有外伸的悬臂梁,相邻两铁塔悬臂梁之间的缺口用简支梁连接,简支梁两端铰接于悬臂梁终端。这种布置与前述“铁塔梁”“中间梁”略有不同,但栈桥的计算方法仍相同。古里坝施工栈桥已经用去A36型钢材12000吨,比美国大古力坝栈桥的钢材用量(8900吨,见表3)还要多。

三、栈桥上的起重机

行走于栈桥上的起重机,常见者有下列三种:

1、双悬臂起重机(双悬臂机)

这是一种不能回转的大型起重机,当混凝土浇筑仓面位于其下栈桥两侧时,用这种起重机吊运混凝土入仓比较方便。双悬臂机有一个可沿栈桥轨道行走的钢性门座,门座下面可通行运送混凝土吊罐的机车车辆,门座上面安有双向外伸桁架(悬臂),外伸长度可达50米,起重重量可达22吨。用这种起重机进行浇筑时,混凝土

地由沿外伸桁架移动的起重小车吊运吊罐分别送到起重机控制范围内的各浇筑地点。外伸梁可沿栈桥平行移动,其复盖面积为一矩形,因此要浇筑矩形大面积仓面,采用双悬臂机就比较有利。图12是美国公牛滩坝混凝土施工栈桥及其上的两种起重机;溢流坝段的混凝土用双悬臂机浇筑,非溢流坝段及厂房坝段则用门式起重机浇筑。栈桥采用钢结构,全长585.22米,最大桥高51.82米。栈桥中线位于坝轴线下游38.1米,与坝轴线平行布置。桥面铺设起重机轨道和机车车辆轨道,前者轨距11.582米,后者为标准轨距。

栈桥上有双悬臂机2台,其悬臂长度,从栈桥中线向两侧各外伸44.5米,该坝位于阿肯色州的怀特河上,是一座混凝土重力坝,最大坝高86.3米,坝顶长687.63米,共浇混凝土160.6万立米。溢流坝位于河床中间,长246.28米,两端接非溢流坝,右端非溢流坝长286.51米,埋有8根压力钢管(直径为5.5米),分别通向电站房的8台机组,单机容量40000千瓦,总装机容量为32万千瓦。左端非溢流坝长154.84米。

双悬臂起重机的优点是:起重量大;范围宽;工作速度快;由于悬臂固定,机身不回转,故下料位置准确;多机并列,不易互相干扰。其缺点是:结构甚重,安装复杂,造价昂贵。双悬臂机的起重重量很大,一般为20~25吨,可吊6立米混凝土吊罐。

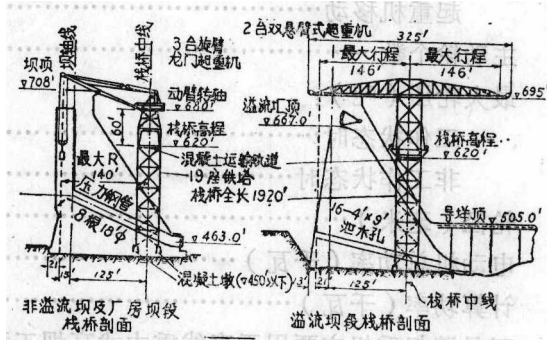


图12 美国公牛滩坝的施工栈桥及起重机〔3〕

资料来源:《施工方法及设备》,

1948年4月号p 88

图13为苏联布拉茨克大坝用栈桥及双悬臂机浇筑大体积混凝土的情况。该坝所用的双悬臂机(ГР—76型)的技术特性如下:

起重量(吨).....	22
双悬臂全长(米).....	117
悬臂有效伸距(米).....	50.5
从栈桥面向上到悬臂下面的净高(米).....	38
桥面以上吊钩最大上升高度(米).....	32
荷重提升总高度(米).....	142
起重机宽度(米):	
门架轨距.....	18.7
栈桥轴线方向起重机支柱中线间距.....	18.7
起重机总高度(米).....	56.41
起重机工作重量(吨).....	430
起重机的吊运速度(米/秒):	
空罐提升.....	3
满罐提升.....	1.33
满罐下降.....	1.75
空罐下降.....	3
起重机移动.....	0.42
主动轮个数.....	16
最大轮压(吨):	
工作状态时.....	46
非工作状态时.....	45
轮径(毫米).....	900
电动机总功率(千瓦).....	1724
计算功率(千瓦).....	650

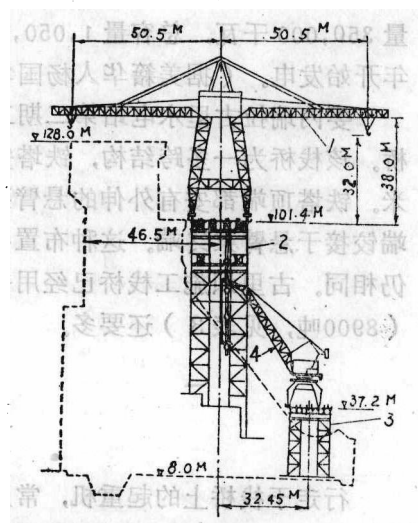
双悬臂起重机主要用于直线重力式高坝工程。为增加起重机的控制高度,应用时一般都需要设置大型栈桥。

表4为国外一些大坝应用双悬臂机浇筑混凝土时的实际生产能力。由表列数字可见,美国双悬臂机生产能力大大超过苏联,约为2.5:1

* 美国大古力坝起重机的特性数据下:

一边悬臂长度	49.3米	门架轨距	12.0米
起重量	21.6吨	双悬臂机重量	300吨
悬臂运用长度	24.4米	栈桥高度49(一期)+61(二期)=110米	
吊罐提升速度	180米/分	栈桥宽度	13米
吊罐下放速度	105米/分	栈桥长度	1095米
门架高度	32米	钢材重量	8900吨
总提升高度	120米	一立米混凝土耗用钢材	1.1公斤

资料来源:同表4。



1—双悬臂起重机; 2—高栈桥(主栈桥); 3—低栈桥(辅助栈桥); 4—门式起重机。
图13 布拉茨克坝的施工栈桥及双悬臂起重机〔4〕

表 4 国外一些大坝双悬臂起重机的实际生产能力〔2〕

国家	大坝名称	施工时间	吊运的混凝土方量 (万立方米)	双悬臂 起重机 台数	栈桥长度 (米)	一台双悬臂起重机的平均生产率 (万立方米/月)
美 国	大古力·	1935—1940	740	7	1095	1.83
	弗里安特	1941—1942	110	2	705	1.85
	方塔纳	1943—1944	130	2	305	1.95
	公牛滩	1948—1950	130	2	580	1.96
	福尔索姆	1954—1955	60	1	440	1.86
		平均			625	1.89
苏联	布拉茨克	1958—1964	196	6	1250	0.72
	乌斯特—伊里姆	1968—1974	264	5	1264	0.82

资料来源：《近代大型混凝土坝的建造速度》，1977.p 108

2、塔式起重机(塔机)

塔机是一种本身能够自由竖立的全面转臂式起重机。此种起重机具有高而直立的塔架，其起重臂则设于塔架的顶部。塔机的特点如下：

- 一、臂架装在塔架顶部，使有效工作范围大大增加；
- 二、机动性好，可以很方便地从建筑物附近的混凝土拌和厂把混凝土直接吊运入仓；
- 三、因臂架幅度大，可在建筑物四周进行工作，不需要在其范围以内占位置。

图14是多瑙河一座水电站混凝土施工塔机的布置，从图中可以清楚地看出塔机的上述三个特点。

塔机由塔身1、门架2、起重臂3、回转端架4和平衡重5等几个部分组成。在工作时，起重臂和端架可以一起回转，整个起重机并可沿轨道移动。图14(多瑙河)水电站上游有一座塔机的起重臂，其倾角是可变的，其余各座塔机的起重臂则在水平方向固定，但起重小车6也可沿起重臂下弦移动，以改变起重幅度。倾角可变的塔机(图14)，起重力矩可达90吨·米，最大起重高度达50米。这种起重机的主要机件和平衡重都装在底部车架上，重心低，因此工作比较稳定，安装也比较方便。

近年来塔机的设计制造和安装有了新的发展。据1979年12月分的《世界建设》杂志(p 73)报导：塔机的工作高度(从轨顶算起的塔身高度)最大已达140米，起重力矩达1200吨·米，塔顶桅杆可以倾斜，起重臂长度为36~80米。倾角可变的塔机，工作高度亦达32.8米，起重力

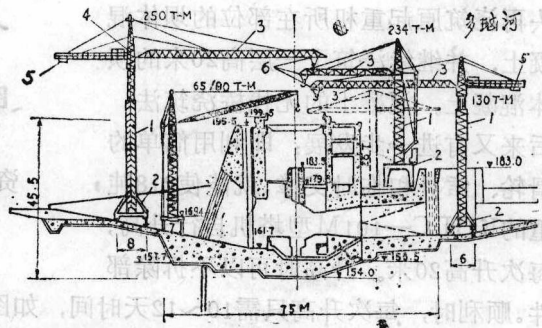


图14 多瑙河一水电站的混凝土施工塔机〔19〕

资料来源：《国际建设》，1978年

2月号，第17卷，第76页