

砌体结构学

丁大钧 主编

中国建筑工业出版社

砌体结构学

丁大钧 主编

中国建筑工业出版社

(京)新登字 035 号

图书在版编目(CIP)数据

砌体结构学/丁大钧主编. -北京:中国建筑工程出版社,1997

ISBN 7-112-03109-5

I. 砌… II. 丁… III. 砌块结构 IV. TU36

中国版本图书馆 CIP 数据核字(96)第 24472 号

砌体结构学

丁大钧 主编

*

中国建筑工程出版社出版、发行(北京西郊百万庄)

新华书店经销

北京市彩桥印刷厂印刷

*

开本:787×1092 毫米 1/16 印张:25½ 字数:620 千字

1997 年 6 月第一版 1997 年 6 月第一次印刷

印数:1—2000 册 定价:33.00 元

ISBN7-112-03109-5

TU·2396(8243)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题,可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

由本人主编的《砌体结构》教材因限于篇幅，有些内容被删去，有的不得不精简。为了提供在建筑工程领域中工作的工程技术和科研人员参考阅读有关砌体结构资料的方便，也为了提供担任砌体结构课程教师备课时能有较深入而系统的参考书，中国建筑工业出版社于1991年约稿，由本人主编《砌体结构学》一书，期能对上述同志有所裨益。

本书编写的指导思想是在砌体结构的广度和深度上作一些工作。因此除教材中内容外，增加了较多的章节，同时在我们有限水平上，尽可能地予以适当提高。对国外砌体结构的历史和现状以及国外现用的粘土砖和块材也作了较多的介绍，藉知梗概并希望能有所借鉴。至于计算体系则仍按我国现行规范。为了本书的系统性某些内容和教材不得不有所重复，但有些方面如表格则尽可能予以精减。为了较好地领会砌体结构的受力特点——其结构机理，书中也引入我们的一些研究成果和有关讨论。

本书编写分工如下：第1~8章由丁大钧执笔；第9、11章由邱洪兴执笔；第10章由曾征良执笔；第12、13章由蒋永生执笔；第14章由李爱群执笔；第15章由曹双寅执笔；第16章由蓝宗建、肖万鹏执笔。全书由丁大钧主编。

在编写本书时曾得到国内外朋友的热情支持，他们或为赠送资料，或为发表有关论文，特在此一并致谢。国内同行有：王三瑾主编、巴荣光高工、史尔毅教授、吕锡昭工程师、孙荣植主编、李德寿高工、张幼启主编、陆勇博士（现在希腊）、陈行之教授、陈茂义高工、范锡盛主编、尚迺伟主编、胡玉山高工、唐岱新教授、黄云天主编；国外同行有：Prof. J. Binda（意），Dr. M. Brusin（法），Prof. R. G. Drysdale（加），Mr. A. Golay和Mr. R. Greenspan（瑞士），Dr. D. Greiner—Mai（德），Prof. T. Kaku（日），Prof. G. Macchi（意），Dr. R. Narayanan（印），Dr. S. Pyrak（波），Prof. G. Tassi（匈），Prof. O. Ural（美），Dr. H. W. H. West（英）。

在本书稿整理过程中承李漪林和邵扣霞同志分别描绘部分底图和抄写部分内容，编者在此表示衷心感谢。

由于水平限制，虽各尽了努力，但不当之处和错误一定不少，主编者尤难辞其咎，敬请批评指正，裨便修改！

丁大钧

目 录

第一章 绪 论	1
1-1 概述	1
1-2 砌体结构的优缺点	2
1-3 砌体结构的应用范围	3
参考文献	4
第二章 砌体结构的历史现状和发展	6
2-1 我国古今砌体结构介绍及其发展阶段	6
2-2 国外砌体结构简介	25
2-3 发展趋势	41
2-4 砌体结构的进一步试验研究	44
参考文献	54
第三章 砌 筑 材 料	58
3-1 砖块	58
3-2 石材	67
3-3 贴面材料	68
3-4 砂浆	69
3-5 对砌体材料耐久性要求	70
3-6 关于砌体材料的保温和隔音性能	71
参考文献	72
第四章 砌 体	74
4-1 概述	74
4-2 砖和砌块砌体	74
4-3 石砌体	78
4-4 国外建筑中的夹心墙	79
4-5 钢筋和锚拉件	79
4-6 板材	80
参考文献	84
第五章 无筋砌体的力学性能	85
5-1 砌体轴心受压的应力状态特点	85
5-2 砖砌体轴心受压应力状态阶段	88
5-3 影响砖砌体抗压强度的因素	90
5-4 砌体抗拉、弯曲抗拉和抗剪强度	96
5-5 砌体抗压应力—应变曲线、弹性模量和纵向弯曲系数及波桑比	99
5-6 摩擦系数和线胀系数	104

参考文献	105
第六章 接近似概率法的设计方法	106
6-1 结构设计方法的历史演变	106
6-2 结构的功能、极限状态与设计基准期	107
6-3 结构的作用效应和结构抗力	108
6-4 随机现象分布规律和概率方法	109
6-5 结构可靠度	110
6-6 砌体结构极限状态表达式	111
6-7 设计表达式中的分项系数	112
6-8 无筋砌体结构可靠度分析	114
6-9 砌体设计强度	115
参考文献	117
第七章 无筋砌体结构构件承载力的计算	118
7-1 受压	118
7-2 局部受压	133
7-3 轴心受拉、受弯和受剪计算	143
参考文献	144
第八章 配筋砌体承载力的计算	146
8-1 横配筋砖砌体	146
8-2 纵配筋砖砌体与组合砌体	156
参考文献	161
第九章 砌体结构的加固	163
9-1 概述	163
9-2 加固砌体的受力特征	163
9-3 加固砌体的计算方法	164
9-4 砌体加固的构造要求	165
参考文献	169
第十章 砖楼板和砖拱房屋	170
10-1 钢筋砖楼板	170
10-2 筒拱	172
10-3 双曲砖拱屋盖	186
10-4 砖薄壳	197
参考文献	209
第十一章 砌体墙柱构造措施	210
11-1 墙柱的高厚比验算	210
11-2 一般构造要求	216
11-3 墙体开裂的原因及预防措施	218
11-4 圈梁的作用和设置	222
参考文献	224

第十二章 房屋整体空间作用	225
12-1 房屋整体空间作用的基本概念	225
12-2 考虑空间作用时内力分析的特点	226
12-3 单、多层房屋空间作用的实测与分析	228
12-4 空间性能影响系数的确定	235
12-5 房屋静力计算方案	239
参考文献	240
第十三章 房屋静力计算实例	241
13-1 关于计算简图的讨论	241
13-2 考虑空间作用后的二层房屋内力分析实例	243
13-3 考虑空间作用后的二层房屋设计计算实例	246
13-4 带升高中跨的单层厂房设计计算实例	253
参考文献	269
第十四章 墙梁和挑梁	270
14-1 墙梁	270
14-2 挑梁和雨篷	285
参考文献	292
第十五章 砌体特种结构	293
15-1 水池	293
15-2 筒仓	306
15-3 挡墙	315
15-4 烟囱	327
参考文献	348
第十六章 砌体结构的抗震设计	349
16-1 概述	349
16-2 场地、地基和基础	353
16-3 建筑物的震害及抗震构造措施	361
16-4 砌体结构抗震验算	379
参考文献	399

第一章 绪 论

1—1 概 述

上古人民野处穴居。旧石器时代的北京猿人,都住在天然岩洞里。距今1万8千年前,山顶洞人,亦还住在天然岩洞里。直至新石器时代后期(约4500年前),才有了地面上人造的木构架建筑和木骨泥墙,如1954年开始发掘的西安东郊半坡遗址中已有居住区,并且有制造陶器的窑场。

古人在浅滩、溪涧中用大小砾石或较整齐的条石在水中筑起一个接一个石磴,形成一座堤梁式的“石桥”,这就是《考工典拾遗记》等书中记载的“舜命禹(约公元前2100年)疏川奠岳,济巨海,鼃鼃以为梁”。所谓“鼃鼃以为梁”,因这些石磴、大石块,远远望去就像一个又一个露出水面的乌龟背,古人形象化地称其为“鼃鼃”。现代人称之为“汀步桥”,“过水桥”或“过水明桥”。今天不少山区还可见到这种型式古“桥”,如浙江泰顺仕阳溪堤梁桥^[1]。这可以认为是最早的石结构雏形。

随着地下考古发掘工作的进展,人类文明史将可能推前。现谨就已有资料作简述。

我国在公元前20世纪(相当于夏代),已发现有夯土的城墙^①。商代以后,逐渐采用了粘土做成的版筑墙。殷代(公元前1388~公元前1122年)以后,逐渐改用日光晒干的粘土砖(土坯)来砌墙,到西周时期(公元前1122~公元前771年)已有烧制的瓦,而在战国时期(公元前403~公元前221年)的墓中发现有烧制的大尺寸空心砖,这种空心砖盛行于西汉(公元前206~公元8年),但由于制造复杂,到东汉(公元25~219年)末年似已不再生产。六朝时^②(实心)砖的使用已很普遍,有完全用砖建成的塔。

琉璃瓦的制造,始于北魏(公元336~534年)中叶,后来才制作琉璃砖,到明朝(公元1368~1644年)又在瓦内掺入陶土以提高瓦的强度,同时琉璃砖亦自明代获得更大的发展。

石料在我国应用是多方面的。我们祖先即用石料刻制各种建筑装饰用的浮雕,用石料砌筑台基和制作栏杆,也用石料砌筑建筑物和构筑物。

我国拱圈的采用,虽说洛阳北郊东周墓中已有发现,但非正式记载。在西汉末年,才有实物证明,当时拱圈系用于浅葬的墓中^[2]。

我国原先的建筑为木构架制,其中墙壁仅作填充围护之用。清代鸦片战争(公元1840~1842年)后,我国建筑受到欧洲建筑的影响,开始建造承重墙,砖石砌体遂成为结构中不可分割的一环,研究和确定其计算方法,自属必然的趋势^[2]。

① 近年在湖南澧县东溪乡南岳村发掘出4600~4700年前的古城遗址,又发现屈家岭文化和大溪文化时期房屋10多座。屈家岭文化为新石器时代晚期的一种文化,约为公元前2750~2650年;1954年发现于湖北京山屈家岭。

② 吴(公元229~280年)、东晋(公元317~419年)、宋(公元420~478年)、齐(公元479~501年)、梁(公元502~556年)、陈(公元557~588年)相继建都建康(南京),是为六朝。此处所指的六朝时,一般可理解为东晋以后的年代。

在欧洲,大约在 8 千年前已开始采用晒干的砖;凿琢的自然石的采用,大约在 5~6 千年左右;至于在建筑中采用烧制的砖,亦有 3 千年的历史。

砖石砌体大都用于建筑物中承受垂直荷载的部分,如墙、柱、桥墩及基础等。洞口上的结构通常用整块的大石跨过,后来才知道建造拱圈(约在纪元前 3000 年),起初采用石料建造,从公元一世纪开始,在意大利即采用天然的火山灰制作混凝土建造拱圈结构^[3]。

当时建筑中砖石砌体的体积都是很大的。为了便利使用并顾及经济,要求减小构件的截面尺寸,因此对砌筑材料提出较高的要求,但是改进和发展的过程是很缓慢的。

19 世纪在欧洲建造了各式各样的砖石建筑物,特别是多层房屋。强砂浆以及水泥的发现,更进一步地提高了砖石砌体的质量及其在建筑中的价值。

最近 60 年的研究,在国际上提出了许多新型结构,例如,配筋砖石结构,薄壁拱顶以及轻型墙砌体等,更扩大了砖石砌体应用的范围。

1-2 砌体结构的优缺点

砌体结构应用广泛,特别是在我国住宅建筑中用砌体内外墙承重、钢筋混凝土楼板的混合结构房屋占主要位置,这是因为它具有如下的优点。

1. 由于能制砖的粘土几乎到处都有,大规模的砖瓦厂很多,分布也广,群众建造的土窑更多,所以我国粘土砖的年产量超过 6 千亿块;有些产石地区能很熟练地掌握石材的开采、加工和砌筑;拌制砂浆的砂也易就地取材,水泥用量不多,因而材料易于获得。掌握砌筑技术的瓦工也多。不需木、钢模板(或很少用到)。因此,砌体结构的造价较低。

2. 烧透的砖具有很好的化学稳定性和大气稳定性。意大利帕维亚 900 年前建造的意大利契维克(Civic)塔倒塌后的研究表明,其中砖的风化和因冻融循环乃至侵蚀因素导致材料性能退化的现象仅发生在表面 1~2cm 的范围内^[4]。我国嵩岳寺砖塔迄今已经历 1400 余年的风风雨雨,虽有一定风化,但仍屹立万山丛中。安济石拱桥也约有 1400 年,在未经 50 年代的大修前亦仍起着其结构作用。在希腊第二大城底萨洛尼契(Thessaloniki)还残存少量公元前 316 年至公元前 168 年(Hellenistic 时期)的砖石砌体古防御工事等部分建筑^[5]。至于埃及的石建金字塔则经历时间更为久远。

3. 和现浇钢筋混凝土结构比较,采用砖石结构可以节约水泥、钢材和木材,即节约三材,当采用预制混凝土结构时,虽可节约木材,但增加工序。新砌砌体上可承受一定荷载,因而可连续施工;在寒冷地区,还可采用冻结法作业。砌体结构施工不要求特殊的技术设备,因此能普遍推广采用。

4. 当采用大型砌块和大型板材结构墙体时,可加快施工速度,实现工业化生产和施工。薄的振动砖墙板结构,减小墙厚,还可略略增加室内有效居住面积,在目前我国条件下,也是有意义的。

5. 砖墙房屋能调节室内湿度,偏潮湿地区居住在混凝土大板房屋中的住户有闷湿感。此外砖墙保温亦较重混凝土墙板为好。

砌体结构也有一些缺点,阐述如下:

(1)砌体结构自重大,而砌体强度不高,特别是抗拉、抗剪强度很低,因此砌体结构截面尺寸一般较大,体积大,自重也大,普通混合结构多层房屋,墙重约占建筑物总重一半及以

上。材料用量多,也加重了运输任务。同时自重大,对基础和抗震也都是不利的。因此,应加强轻质高强材料的研究、生产和应用;发展新型墙体材料,尽可能减小结构截面尺寸和减轻结构自重。

由于温度或沉降(不均匀)往往导致砖墙窗洞上、下出现倒八字或八字形裂缝。因为房屋基础等下部结构温度变化较小,当温度变化时由于下部的约束导致窗口出现斜裂缝。这时,下部因约束影响大,裂缝宽度亦大,向上则逐渐减小。如果因屋面未设隔热层而导致因温度引起的斜裂缝,自是上部裂缝宽度大。因此伸缩缝,包括沉降缝应妥善设置。屋面隔热也应很好解决。由于砌体抗拉、剪强度低,对裂缝是很敏感的,非配筋砌体裂缝一旦出现,其展开宽度即很大。例如,伸缩缝设置不当,温度应力往往使墙体内出现水平裂缝,有时错位显著。在柱墩中这种错位将是很危险的,有时会造成柱墩倒塌,影响整个结构的安全。

(2)砖石结构砌筑工作量大,劳动强度高。在砌筑中,应充分利用各种机具运输材料,同时进一步推广砌块和墙体材料等工业化施工方法,以逐步克服这一缺点。

(3)砂浆和砖石间粘结力弱,无筋砌体抗拉、抗剪强度低,延性差,因此抗震能力低。砖块面的清洁度与潮湿程度,也大大影响粘结强度,必须保持砖面清洁和湿润,尽可能地保证其粘结强度;必要时采用配筋砌体或高粘结砂浆来提高结构的承载力和延性。

(4)烧制粘土砖大量占用农田^①,影响农业生产。应加强利用工业废料,如粉煤灰、煤矸石等,这不但减轻农田的毁坏,而且也改善环境污染问题。我国计划发展新型墙体材料中非粘土材料即占 60%。用地方性材料代替粘土砖也是值得提倡的,这不仅要求强度,而且还需考虑耐久性。例如,江苏南通市沿江砖厂利用长江淤泥已有 10 多年历史,拥有较完整的长江挖泥积土设施和生产工艺设备,1980 年以来成功地利用当地电厂粉煤灰掺入淤泥中,生产粉煤灰烧结砖。目前这种经验已推广到沿江所有砖厂。1 万块砖利用淤泥 22m³、粉煤灰 6.6t。根据城市发展规划,将在长江沿岸建成年产 10 亿块粉煤灰烧结砖的建材基地,年利用长江淤泥 220 万 m³,粉煤灰 66 万 t,可节约农田 400 公顷,节约成本 600 万元^[6]。一举数得,这是值得提倡的。

此外很多地方对粉煤灰的综合利用,节能节土,如生产粉煤灰空心砌块、粉煤灰烧结砖等,取得可喜成绩并不断提高利用率。

此外,某些砌体材料在受潮时有软化现象,使强度有所降低。在泛霜和较长时间受湿热作用(如浴室)时,粘土砖、页岩砖、煤矸石砖、炉渣和灰砂砖等的强度都有所降低。当泛霜严重时,强度可能降低达 25%^[7],这一问题也值得注意。

1—3 砌体结构的应用范围

砌体结构应用范围极广,当然受到材料特性的限制,因而也影响其应用范围。

采用砌体不但可以建造房屋的承重结构及其中的部件,包括基础。也可用以建造桥梁、隧道、挡墙、涵洞以及水工结构,如坝、堰、渡槽等,也可用以建造特种结构,如水池、水塔支架、料仓、烟囱等结构。当采用配筋砌体,乃至预应力砌体时,砌体结构的尺度可以增大而截

① 1949~1990 年,仅北京即挖地 5.96 万亩。1993 年全国实心砖产量 6000 多亿块,约有砖厂 12 万家,占地 450 万亩,毁田 7~8 万亩。

面可以减小,同时应用范围还可扩大。

我国居住建筑大多为多层混合结构,即墙体为砌体结构,楼屋面为混凝土板(非预应力或预应力的),近些年来由于高层建筑的发展,多层混合结构居住建筑比重有所下降,但仍属主流。截至1991年6月,全国城镇人均居住面积为 7.1m^2 ,今后10年计划将建造16.5亿 m^2 城镇住宅,同时大力提高住房成套率,而在地震区多层住宅采用“外砖内浇”体系^[8]。可见墙体改革对我国国民经济和提高人民住宅条件是何等重要。

在福建有用整块花岗石建造楼(屋)面板和梁、柱以砌筑多层建筑^[9]。

我国对石材的应用是多方面的,主要就地取材,因地制宜地采用。除上述外,还采用未加工的乱毛石甚至采用卵石建造结构。我国用乱毛石砌筑墙壁的房屋最高达6层。在唐山某厂3层职工宿舍,用M10水泥砂浆砌筑40cm厚乱毛石外墙,内墙为24cm砖墙。该建筑因地基好,设计合理,施工质量保证,经强烈地震后仅山墙产生局部水平裂缝^[10]。但由于在地震区采用乱毛石建筑经验不多,采用时应持慎重态度。

四川彭县位于沱江上游,漂积卵石极为丰富,因此就地取材建造了(1967)湔河人民大桥。桥的全长416.2m,桥面净宽6m。原设计为18孔20m跨实腹式卵石拱桥。当最后一组(6孔)拱圈砌筑只剩最后一孔时,洪水提前到来,致使已修好的5孔全被冲毁;后将该组6孔改建成无筋无肋双曲拱桥^[11]。

对建筑的维护与加固,在国内外都得到应有的重视,而且也积累了一定的经验和掌握了成套技术。由于街道和广场的改造与古建筑的保留有时发生矛盾。在国外往往采用整体迁移的办法。前苏联在30年代即开始将一幢大楼整体后移14m,后来又将一幢18世纪的建筑后移80m,“转体”90°。整体迁移是先将建筑物基底挖空,架到很多只钢滚子上,用大吨位液压千斤顶推进,沿若干条钢轨缓缓移动至指定的位置^[12]。其他国家如罗马尼亚在这方面也有成功的经验^①。我国曾将清代一戏台整体吊移。

参 考 文 献

- [1] 中国科技史话丛书. 桥梁史话. 上海科技出版社, 上海. 1979(pp. 320)
- [2] 东南大学·郑州工学院(丁大钧主编). 砌体结构(高校教学用书). 中国建工出版社. 北京. 1990(pp. 180)
- [3] 中国大百科全书, 建筑、园林、城市规划类. 中国大百科全书出版社. 北京. 上海. 1988(pp. 649)
- [4] 林洋、丁大钧. 意大利帕维亚 Civic 塔的坍塌——材料试验与结构分析,《建筑结构》, No. 8, 1994. (pp. 40~47)
- [5] George C. Manos : Earthquake Performance of Masonry Structures during the Thessaloniki 1978 Earthquake, Proceedings of the 4th Canadian Masonry Symposium, Fredericton, N. B., Canada. June 1986, Vol. 1(pp. 423~437)
- [6] 朱锡华、潘信国. 利用本地资源发展新型墙体材料,《砖瓦》. No. 3, 1994(pp. 3~4)
- [7] 姚忠国等. 泛霜和湿热作用对砌墙砖力学性质影响的试验研究,《砖瓦》. No. 2, 1994(pp. 31~32)
- [8] 李明顺. 1988年我国建筑结构发展综述,《建筑结构学报》. 北京. 10卷4期(p. 36)
- [9] 福建省石结构调查小组. 石结构调查报告,《建筑技术》. No. 1, 1974(pp. 1~60)

① 1995年11月17日下午,河南省焦作市孟县人民政府办公楼,共4层高18.25m,砖混结构,总建筑面积3585.3 m^2 ,总重量5552.3t,整体迁移146.3m,二楼以上办公室照常工作,且始终保持水电供应(载《服务导报》1995.12.5)。

- [10] 丁大钧主编. 简明砖石结构. 上海科技出版社. 上海. 1981(pp. 183)
- [11] 罗世勋主编. 当代四川公路桥梁. 四川科学技术出版社. 成都. 1988(pp. 196)
- [12] 丁大钧、蒋永生. 土木工程概论. 东南大学出版社. 南京. 1989(pp. 261)

第二章 砌体结构的历史现状和发展

2-1 我国古今砌体结构介绍及其发展阶段

1. 古代砌体建设

我国历史上有名的、甚至现在还保存下来的砖石建筑物很多,这里举几个例子来说明一下。从这些例子里已可清楚看出我国文化历史的悠久和古代劳动人民的智慧,我们应该继承着祖先优良的传统,努力学习来发扬光大它。

首先我们知道,我国伟大工程——万里长城(图 2-1),它是古代劳动人民勇敢、智慧与血汗的结晶。

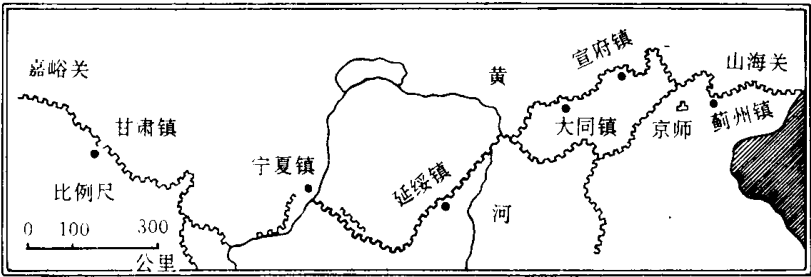
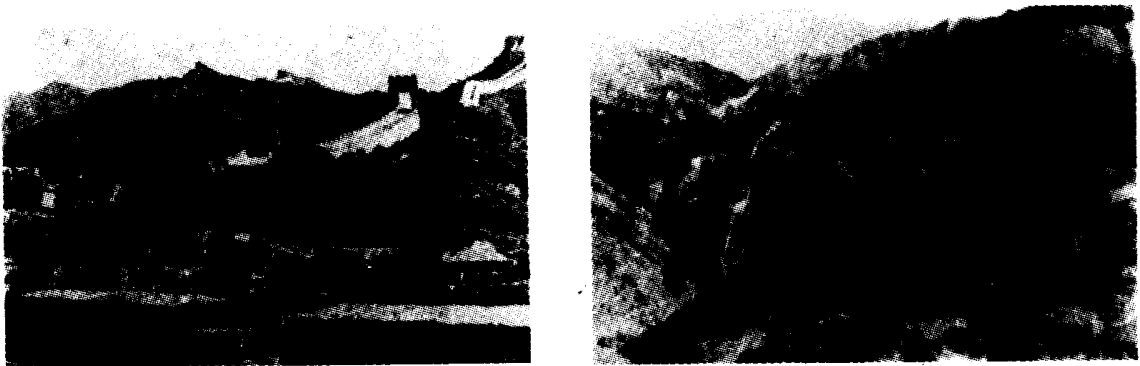


图 2-1 长城平面图

长城原是春秋(春秋时期的起迄年代一种说法为公元前 770 年~公元前 476 年)战国时各国为了互相防御,各在形势险要处修筑的城墙^①。秦始皇(公元前 246 年~公元前 210 年在位)于公元前 221 年统一全国后,为了防御北方匈奴贵族的南侵,于公元前 214 年将秦、赵、燕三国的北边长城,予以修缮,连贯为一。故址西起临洮(甘肃岷县)北傍阴山,东至辽东。明代为了防御鞑靼、瓦剌族的侵扰,自洪武(公元 1368 年~1389 年)至万历(公元 1572 年~1602 年)时,前后修筑长城达 18 次,西起嘉峪关,东至山海关,称为“边墙”。宣化、大同二镇之南,直隶、山西界上,并筑有内长城称为“次边”(图 2-1)。总长 6700 公里,称“万里长城”,大部分至今仍基本完好^[1]。旧长城原为粘土拌和乱石建造的。现在河北、山西北部的长城明代中叶改用大块精制城砖重修(图 2-2)、墙高约 12m,宽约 7~10m,全部材料约 3 亿 m³,比埃及最大的胡夫金字塔约大 120 倍(113 倍),是世界上伟大的工程之一。图 2-2(a)示距北京

^① 英国哈德里安墙东起泰恩河上的纽卡斯尔,西迄爱尔兰海索尔威湾,是罗马皇帝哈德里安(Hadrian, 公元 117~138 年在位)在罗马帝国占领(自公元 34 年开始)不列颠期间命令其驻军第 2、第 6、第 20 军团成员于公元 122 年开始修建并于 136 年建成的,除作防御用外,也起海关关卡作用。墙宽约 6~8 英尺(1.83~2.44m),高约 15 英尺(4.57m),用 2500 万块整齐石块垒成,全长 73 英里(117.5 公里),其中约 20 英里长是沿着峭壁边缘建造的,相当壮观,亦系古代一大土木工程。此外澳大利亚长城建于本世纪 60 年代,位于昆士兰州,长 5531 公里,仅次于我国长城,是国外最长的长城。德国长城,公元 1 世纪时由古罗马人在莱茵河和多瑙河之间修建的一座防御墙,以后不断扩建延长,计达 584 公里,是国外最早修筑的长城,比我国约晚 400 年。朝鲜长城修建于 1033~1044 年,从朝鲜西北的鸭绿江下游起,沿山岭向东海的朝鲜湾海滨延伸,全长 370 公里,称“朝鲜千里长城”。

75km 处的长城,图 2-2(b)示蜿蜒在万山之中的长城,气势磅礴、气魄雄伟^[2]。



(a) (b)
图 2-2 万里长城
(a)距北京 75 公里处的长城; (b)在万山之中的长城

根据近 30 年来的考证,明辽东镇(明九边之一)长城从山海关起迤逦向东,再折向东北至镇北关,又折而向北至鸭绿江边(图 2-3),是石砌长城,为辽东镇长城,长约 1050km,图 2-4(a)、(b)分别示靠近山海关的吾名口瞭望台(靠近山海关向北)和大安堡(在广宁后屯卫之西、大凌河之南、小凌河之北,靠近大凌河)城遗址^[3]。所以明长城总的长度达 7750km。

西安附近渭桥有三,中渭桥秦始皇始建,原名横桥,汉改名渭桥,另建有东西渭桥,中渭桥为石柱桥^①,68 跨,由 750 根柱组成 67 个桥墩,每墩 11 或 12 根柱,南北 380 步,按秦制一步为 6 尺,其一尺约合 0.23m,即长约 524m,宽 13.8m^[4]。

宋代(北宋 960~1126 年,南宋 1127~1279 年)建造了很多石墩石梁桥。200 多年间仅福建泉州一地,见于古籍的桥梁达 110 座,其中名桥 10 座,如安平桥、万安桥(洛阳桥)、盘光桥、无尾桥、东洋

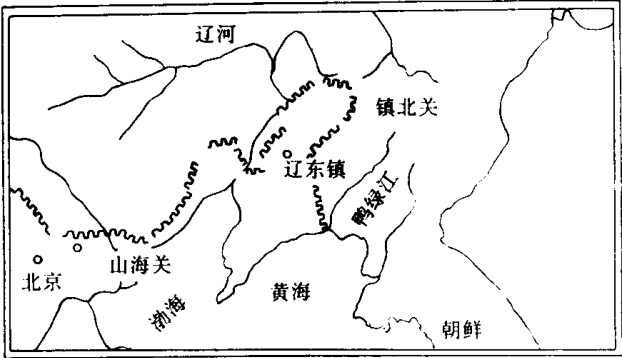


图 2-3 明辽东镇长城平面图

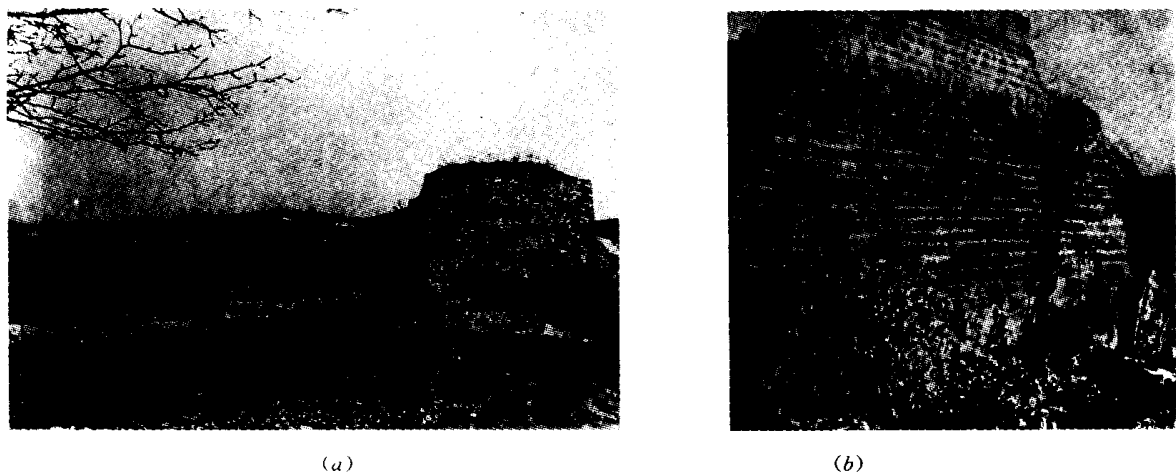
桥、玉澜桥(长 3000 余 m)、獭窟屿桥(770 跨)等。安平桥始建于南宋绍兴 8 年(1138 年),于绍兴 21 年(1151 年)建成,原有 362 跨,总长约 2223m,由于淤积,现存 332 跨,约长 2100m,为现存的最长古石桥^[5]。可见上列后二桥长度或跨度都超过安平桥,惜已先后倾毁。

福建漳州江东桥,于宋嘉熙元年(1237 年)由木梁改为石梁,原有 15 跨,每跨 3 片石梁,现存 5 孔,其中最大的石梁长 23.7m、宽 1.7m、高 1.9m,重达 2000kN(约 200t)。如此巨大的石梁,在当时没有重型起重设备的条件下,其开采、运输和安装等工作是十分艰巨的^[5]。

还值得一提的是唐武后时李昭德重修洛阳利涉桥,叠石代柱,复锐其前(朝向上游),以分水势,遂开今日“分水金刚桥”之先河,如上述安平桥的深水桥墩即采用这种型式^[1]。

拱桥最早见于记载的为晋太康 3 年(282 年)所建造的洛阳七里涧桥(旅人桥),距洛阳

① 见《辞海》p. 976.



(a) (b)

图 2-4 明辽东镇长城

(a)吾名口台(靠近山海关)及长城; (b)大安堡城墙遗址

官约 3 公里,悉用大石,下圆以通水。



图 2-5 安 济 桥

我国河北赵县安济桥(图 2-5)是在 591~599 年间(隋朝开皇 11 年—开皇 19 年)^①由石工李春设计建造,为敞肩式坦拱桥^[6],桥长 64.4m,桥面宽约 10m,跨径 37.02m,净矢高 7.23m,即矢高比约 1/5;桥坡度约为 6.5%;桥由 28 圈拱石平行砌筑,每圈由 43 块拱石砌成。拱石厚度均为 1.03m,长 0.7~1.09m,宽约 0.25~0.4m 不等,以便砌成变宽度的拱圈,即在拱脚处宽 9.6m,逐渐收分至拱冠处为 9.0m,这样拱脚处反力将略向内斜,对防止平砌拱圈向外塌落是有利的,但倾斜很小,这种作用是不大的。由于单个薄拱圈出平面稳定性原即很差。西侧 5 券和东侧 3 券在明、清时曾塌落过即表明这一点。为了加强拱石间的结合,在其各面均凿有相当细密的斜纹。对纵向联系则在各拱石间设置二块 X 形腰铁(图 2-6),有

① 河南小商河(岳飞麾下名将杨再兴即在此战死殉国),桥在漯河市北小商河上,于隋开皇 4 年(584 年)建造,桥长约 21m,跨度约 11m,宽约 6.5m,现尚基本完好待修(1995 年 2 月 17 日中央 4 台晚间广播)。

1/3至 1955~1958 年进行一次历代最大的修缮时尚保存完好。为了加强各拱圈的横向联系,采取了下列措施:在主拱背上设置 5 根横穿拱背并带帽头的铁锚杆,每个小拱上各一根,此外在桥的两侧各设置长 1.8m、外头向下有凸榫的钩联石 6 块(图 2-7),然后在主拱背上交

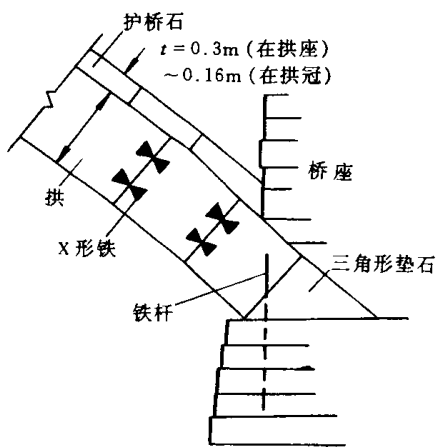


图 2-6 安济桥桥身中 X 形腰铁和桥座

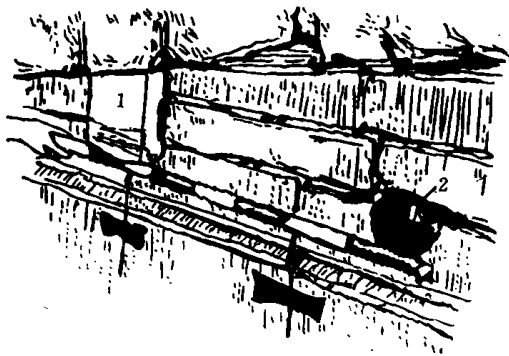


图 2-7 桥拱背上的铁锚杆及钩联石
1— 钩联石; 2— 铁锚杆

错铺置护拱石,其厚度从拱脚处的 30cm 向拱顶逐渐减薄至 16cm。如上所述,只外面几道薄拱券塌落,而整个大拱仍处在整体稳定中,说明这些措施是有效的。根据拱轴为理想的圆弧,假定一个集中活荷载 $P=98\text{kN}$,经过力学分析^[7],当 P 作用在 1/4 跨度时,结构安全度最小,为 3.703,这是足够的而并不过大。桥的造型优美、构造合理、施工精度很高,修缮时曾用精密仪器量测,桥台顶端起拱线处的高程,北端东西相差 17mm,南端东西相差仅 3mm,东侧南北相差 12mm,西侧南北相差亦仅 23mm,这样微小的变位量(假定建成时起拱线各测点在同一水平上)在建成开放长时间的现代拱桥中,亦不多见。桥台只用 5 层料石砌筑,厚 1.549m,宽度较拱宽略大,直接支承在天然粗砂层上,较其他古石桥桥台轻巧得多。桥台构造如图 2-6 所示。

1991 年,安济桥被美国土木工程师学会(ASCE)选为第十二个国际历史上土木工程里程碑,这对弘扬我国历史文物具有重要意义。

安济桥在 1955 年修缮前,还可通现代的重载车。修缮时除外露护拱石采用原石外,其中间范围内改置 C14 的钢筋混凝土盖板,与护拱石间采用齿缝连接。水泥砂浆采用 M8,此外还加设了防水层。

苏州宝带桥(图 2-8)相传系唐代刺史王仲舒捐宝带助资修建(公元 806 年),故名宝带桥。为 53 孔连续石拱桥,重建四、五次,现存的为清代修建,全长

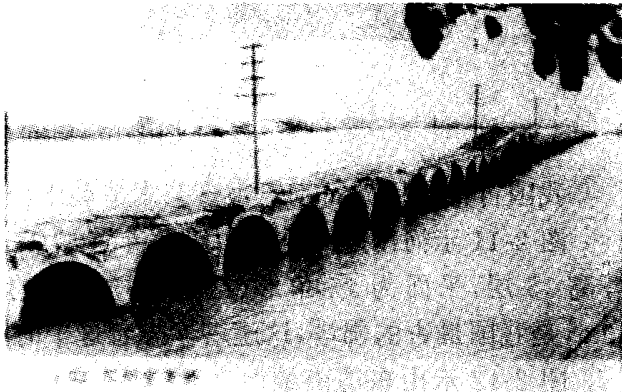


图 2-8 苏州宝带桥

316m,是国内最长的圆形石拱桥,其中三个高跨为通航孔。

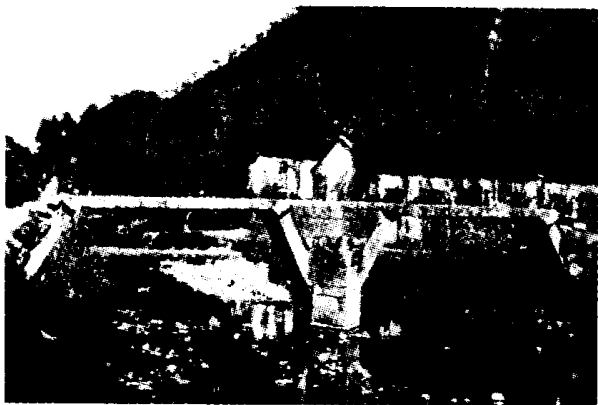
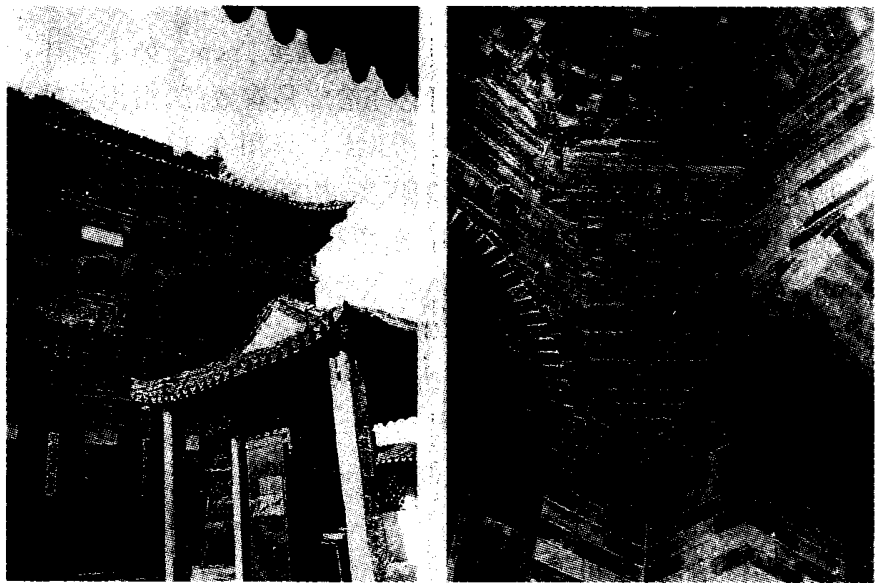


图 2-9 镇安石桥

此外,还值得一提的是浙江仙居县镇安桥(图 2-9),是清光绪 11 年(1885)建造的,其中 V 形墩是明显的;由于斜撑内存在一定的斜向力,故将桥石端部做成斜面。根据石材的特性,V 形凹进部分虽可使中空而用石材跨过,但实际填实似较合理^[8]。这与 60 年代中最先由 T. Y. Lin International 在设计美国加州海根贝格(Hegenberger)混凝土桥^[9]时采用的有相似处(减小计算跨度)。现世界上建成多座 V 形墩混凝土桥结构,包括我国雉山漓江刚架桥,主跨 95m(带 40m 挂梁),V 形墩上口 20m^[10]。

明代建造的苏州开元寺的无梁殿和南京灵谷寺的无梁殿是我国古代典型的砖砌穹窿,它显示我国古代应用砌体结构的一个方面的成就。图 2-10(a)(b)分别示开元寺无梁殿的正面和内部^[11]。



(a)

(b)

图 2-10 苏州开元寺无梁殿

我国古代也用砖石砌筑很多艺术造型十分优美的佛塔。

图 2-11 示河南登封县嵩山嵩岳寺塔,为完全用砖砌成,建于公元 520 年(南北朝时代)。塔高 15 层,平面为 12 角形(这是国内唯一的 12 角形塔),每角用砖砌起一根柱子,高约 40m,是我国最古的佛塔,这座塔标志着这个时期我国在用砖技术上的伟大成就。

图 2-12 示山东济南神通寺四门塔,它建于北齐(公元 550~577 年,但也有认为系建于公元 611 年)是我国现存的最古石塔,为四边形,每边 7.4m,高 15.74m,现仍保持完好。

我国现存最高的砖塔为 11 层的河北定县开元寺塔(图 2-13),建于一较高的台座上,于