

我国桥梁的进展

林元培

(上海市市政工程设计研究总院,上海市 200092)

摘要:该文叙述我国桥梁的发展情况,所达到的水平及今后发展方向。概论中提出考察技术进步的五个重要视点:即:1、桥型选择;2、材料选择;3、施工工艺;4、结构分析;5、方案综合。桥梁类别分三大体系,按桥面受力状态分,可分为九种桥型即:拱桥体系:斜腿刚架、拱桥、系杆拱;梁桥体系:简支梁、连续梁、悬臂梁;悬吊体系:斜拉桥、悬索桥、第九种桥。上述中八种已变为现实,唯第九种桥因找不到合适的材料去构成,尚在研究中。该文用上述5个视点去考察桥梁三大体系。考察结果是我国混凝土拱桥和钢拱桥达国际领先水平。我国梁桥体系已达国际水平,仍须总结提高。我国斜拉桥正在走向国际领先水平。我国悬索桥已达到国际先进水平。今后桥梁发展的方向是:1、各种桥型跨度的进步;2、施工工艺的进步;3、科学研究的进步。

关键词:桥梁;桥型;材料;施工工艺;结构分析;方案综合

中图分类号:U448 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0001-06

1 概论

桥梁是一种跨过障碍物(河流或深谷等)的结构物。建造什么样的桥,影响因素很多大体上有:水文、气象、地质、环境、大气腐蚀、交通规划、美学、桥位、材料选择、制造工艺、施工工艺、结构分析、方案综合等。

其中最主要的5个要点是:

- (1)桥型选择;
- (2)材料选择;
- (3)施工工艺;
- (4)结构分析;
- (5)方案综合;

1.1 桥型选择。

桥梁体系有三种:(1)拱桥体系;(2)梁桥体系;(3)悬吊桥系。

在任何体系中有一条近于水平线的构造用来走人或车辆的结构称之为桥面构造。

支承桥面构造的构造,称之为支承构造。整个桥梁体系由桥面构造和支承构造组成。

凡受拉为主的构造记为“-”,凡受弯为主的构造记为“0”,凡受压为主的构造记为“+”,则桥梁体系一切可能的排列为:

- (+,+) , (+,0) , (+,-)
(0,+) , (0,0) , (0,-)
(-,+) , (-,0) , (-,-)

1.1.1 拱桥体系

(1)拱桥体系中桥面构造以受压力为主的桥

称之为“斜腿刚构”(见图1)。



图1

(2)拱桥体系中桥面构造以受弯曲为主的桥称之为拱桥(见图2)。

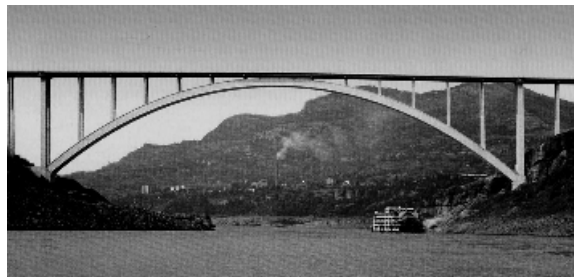


图2

(3)拱桥体系中桥面构造以受拉为主的桥称之为系杆拱桥(见图3)

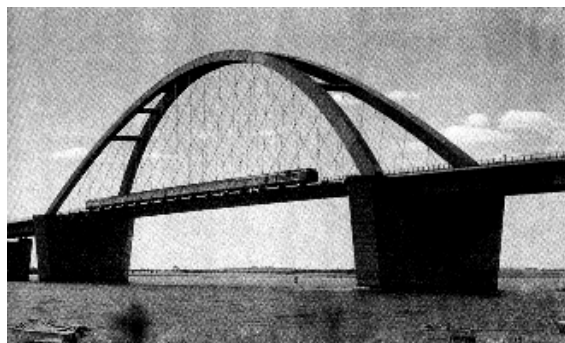


图3

1.1.2 梁桥体系

收稿日期:2006-06-01

作者简介:林元培(1936-),男,福建莆田人,中国工程院院士,教授级高工,院顾问总工程师,主要从事桥梁工程设计科研工作。

(1)梁桥体系中,桥面构造以受压力为主的桥称之为简支梁桥(见图4)

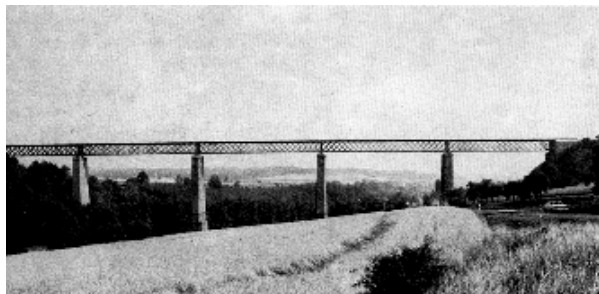


图4

(2)梁桥体系中桥面构造以受弯曲为主桥称之为连续梁桥(见图5)



图5

(3)梁桥体系中桥面构造以受拉力为主的桥称之为悬臂梁桥(见图6)

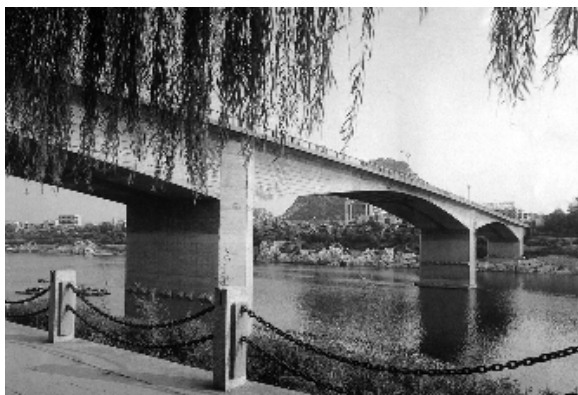


图6

1.1.3 悬吊体系

(1)悬吊体系中桥面构造受压力者称之为“斜拉桥”(见图7)

(2)悬吊体系中桥面构造受弯曲者称之为悬索桥(见图8)

(3)悬吊体系中桥面构造以受拉力为主者称之为第九种桥型,因为这种桥型找不到合适材料去构成,尚在研究中,暂不讨论。



图7



图8

综合上述讨论,尽管桥梁可能有千姿百态,但从力学观点来看只有三大体系:即拱桥体系,梁桥体系,悬吊体系。而每种体系中其桥面构造只有三种可能受力即或受压力,或受弯曲,或受拉力。所以桥型一切可能的排列只有九种,除第九种桥型正在探索中,其他八种桥型都已变为现实。在具体的桥梁设计中可根据当地情况,适当地挑选几种桥型(或其组合)进行方案比较即可。

1.2 材料的选择

当前桥梁工程中所用的材料为石、木、混凝土、钢筋、低合金钢、钢材、高强钢丝、高碳纤维。钢筋与混凝土相结合成钢筋混凝土构件克服了抗拉能力差的缺点,成了很好的梁柱构件。高强钢丝与钢筋混凝土相结合克服了钢筋混凝土有徐变收缩的缺点可以制造出与钢构件相竞争的构件。钢材杆件由于其重量轻,强度高,施工简单,在土建工程中一向有很大市场。最新一种材料是高碳纤维其应用正在发展中,其有强度高,重量轻的优点但价格十分昂贵,在工程中未能大量推广,多应用于混凝土构件的修补和维护。随着生产工艺改进,工程中不断推广,加大需求量,其价格会逐步降下来。

在桥梁中随着跨度的增大。混凝土材料,钢材的强度渐渐不够使用,例如混凝土预应力梁桥当跨度超过300m后应力几乎用足,只有提高标号或改变材料才能把跨度继续做大。又如在斜拉桥中如果用碳纤维取代钢索则跨度更大,最有利于

同悬索桥的竞争。要推动桥梁跨度发展、材料的发展是一根本问题。

1.3 施工工艺

施工工艺分制造工艺和安装工艺两部分,制造工艺大多在工厂完成,工艺一般都比较成熟。

而安装工艺同桥梁结构性质有关,应由设计单位与施工单位共同协商制定。

在桥梁跨度不大时,起重能力不大时容易安装,即使是混凝土构件在支架上现场浇筑也可建成。但当在大江大河上建筑桥梁时,就不可能搭支架去浇筑,也没有那么大的起吊设备去吊装,必须要提出一套可操作的安装工艺,在不妨碍河道上的船舶通行情况下,一段段安装制造直至合龙。这一套安装工艺往往归结为一套设备或措施,其费用称之为施工措施费。整个桥的造价大体上就是材料费加制作费加施工措施费等等。一套好的施工工艺将占有较小的施工措施费。桥梁的尺寸个性很强,这一套措施设备施工完了以后在下一座桥梁中往往难于重复利用,所以深入地研究施工工艺及其设备,降低施工措施费是设计施工中重大的课题。

比如说在有些场合建拱桥就比斜拉桥要贵,从材料费来看相差不多,而是施工措施费拱桥比斜拉桥贵,这是因为斜拉桥在该施工阶段所发生的应力同斜拉桥处在该阶段时所能承受的应力大体上是协调的,所以只要添置少量施工设备即可完成全桥的施工;而拱桥在该施工阶段所发生的应力同拱桥在该施工阶段结构所能承受的应力不太协调,即导致添置较多的构造和设备去解决上述的不太协调问题。所以施工措施费就增加了,以至拱桥就显得贵了。作为设计不仅要设计出其桥型与构造,而且要设计出一套在各阶段施工应力能与桥型在该阶段所能提供的承受应力相协调的施工图式,使之添置尽可能少的设备去完成全桥的施工。

例如 DYWIDAG 公司发明的挂兰悬臂浇筑工艺,它的施工图式在该阶段施工应力与在该阶段结构所能提供的承载应力大体上是协调的,结果用很小的挂兰代价去施工,其施工措施费很低,最后总造价也很低。

再比如用顶推法施工混凝土连续梁桥,虽然梁高要设计得稍高一点,但是它的施工阶段应力与该阶段梁体所能提供的承受应力大体上协调。最后只化了一些制作平台,千斤顶及梁的代价,施工措施费大为降低,总造价也随之下降。

梁桥体系如此,悬臂梁桥也是如此,唯独拱桥

系统不大协调,如何以最少的设备把各施工阶段的应力与该阶段结构能提供的承受应力相协调是拱桥系统技术进步的方向。

1.4 结构分析

当桥型选定,材料选定,施工工艺选定后,就要根据外在的条件进行结构分析,自从电子计算机出现后,有限单元的应用,对大多数的弹性力学计算问题已迎刃而解,即使一些非线性问题亦可通过线性的迭代而解决。目前在结构分析方面除少数特殊问题外,多数问题可用商业化程序可预解决。

例如 Ansis 程序等等。

利用这些程序可算出恒载、活载、冲击、预应力、收缩、徐变、温度、地震、风力、支座沉降、施工误差等引起的应力及变形,检算结构的总体稳定及局部稳定。检算是否符合规范要求,特别是一些现代结构要检查是否会引起人体的不适的感觉。例如不久前国外有一座桥,结构的刚度没有设计好,人群上挤后,桥发生晃动,使许多人发生惊慌。从而对结构进行加固。

在大跨度结构中,施工阶段的内力分析,线形控制,局部构造应力分析,地基沉降分析,都是必要的,只是有的结构分析在初步设计阶段完成,有的在施工阶段完成。

1.5 方案综合

上面谈到任何桥梁方案要受到体系的选择,材料的选择,施工工艺的选择,结构分析等等的影

响,会作出很多的方案,从中去选择合适的造价合适的工期,造型相对美观的桥梁。以上我们是从造价、工期、美观的角度来选方案的,还有一个重要角度就是对方案的风险进行评估,凭当事人自身的经验判断哪一个方案最有把握。当然不同的当事人会对同一方案的把握性会作不同判断,这是难免的,只能是谁设计谁负责。

风险大致来源于三方面:

(1)当事人经验不足不应该出问题的地方出了问题。这是第一种风险;

(2)理论与实际之间有差距,这是常有的事,比如地基基础对上部构造引起的内力重分配研究了一百多年,论文不下几十万篇,仍然不能做到理论指导实际,然而也不能因为没有正确的理论就可以不做工程,工程师还是要用前人成功的经验去对现有的工程作出正确的判断,但经验又不是放之四海皆准,有时还会出问题,这是第二种风险。

(3)所设计的工程某些方面超越了世界水平(比如跨度),这时设计工程师一定会设想若干预案,在工程中采取措施以防止意外,但最危险的事往往发生在预案之外,眼看事故发生,束然无策而造成重大事故,这是第三种风险。

以上三种风险常有发生,但风险常会带来利益,当事人要正确认识自己,正确认识工程,正确评估风险,最后选定方案。

2 拱桥体系在我国的进展

2.1 万县长江大桥

我国万县长江大桥跨度 420 m,为混凝土拱桥世界之最,属国际领先水平。

万县长江大桥构造概况:

孔径布置为 $5 \times 30.66 \text{ m} + 420 \text{ m} + 8 \times 30.66 \text{ m}$ 大桥全长为 856.12 m,桥面全宽 24 m,矢跨比 1/5(见图 9)。



图 9

2.2 上海卢浦大桥(见图 10)

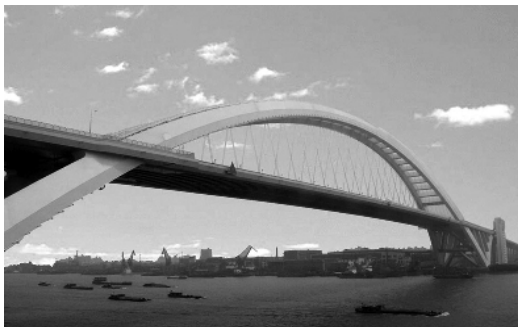


图 10

其断面采用全焊箱形构造(见图 11)

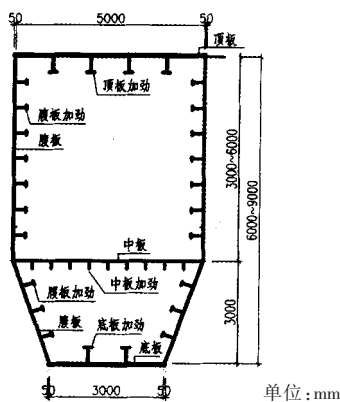


图 11

其主箱断面纵向变截面,梁高 6 m ~ 9 m,宽 5 m,从美学上考虑,在高度 3 m 处有一折点以造成阴影线面,在箱内设置加劲肋以保证板的局部稳定。

为加强侧向稳定,简化构造,大桥呈提篮式空间结构(见图 12)



图 12

水平拉索长达 761 m,单根拉索重 110 t,共 16 根索,为结构安全尽管每根钢束可以更换,但仍将其中 8 根钢束设在箱内,为施工须要另外 8 根设置在箱外,即使箱外 8 根遭到意外损坏,箱内 8 根仍可使结构保持在极限状态,其安全性与岩石地基上建拱桥一样可靠。

3 梁桥体系在我国的进展

中国的混凝土梁桥已达国际水平。

当前国际上混凝土梁跨度已达到 301 m 是挪威的 Auetevoll Stalmasundet 桥建成于 1998 年。我国已建成混凝土连续梁桥有虎门桥跨度是 270 m,最近完成的重庆黄花园桥跨度 250 m,在重庆将建 300 m 的组合式连续梁桥(300 m 跨中 100 m 做钢箱梁其余做混凝土)我国 60 年代开始建造这一类桥梁,在不断完善中。

4 悬吊体系在我国的进展

中国的斜拉桥正在走向国际领先水平。

中国的悬索桥已到达国际先进水平。

4.1 斜拉桥国内外发展情况

1956 年瑞典的 Stromsand 桥开创了现代斜拉桥序幕至今已建成 300 余座,中国建成 30 余座,它比悬索桥发展得晚,但发展十分迅速,曾经破过世界纪录的斜拉桥。

未来可能破世界纪录的是中国香港昂船洲大

桥及苏通大桥其跨度都在 1000 m 以上。

苏通大桥构造概况如下:

我国在建的苏通大桥跨度为 1 088 m, 其跨径组合为 $2 \times 100 \text{ m} + 300 \text{ m} + 1\,088 \text{ m} + 300 \text{ m} + 2 \times 100 \text{ m}$ 的七跨连续钢斜拉桥, 是世界跨度最大的斜拉桥, 结构体系采用纵向阻尼约束的飘浮体系, 将于 2008 年建成。其总布置图如下(见图 13)。

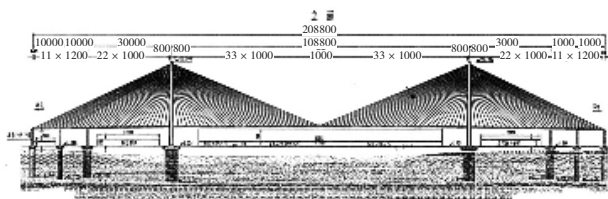


图 13 主桥总体布置图

其主梁横断面外形采用底板水平宽度较大的流线形扁平钢箱梁, 梁高 4m(见图 14)。其纵横隔板在纵向采用桁架式, 横向采用实腹式。

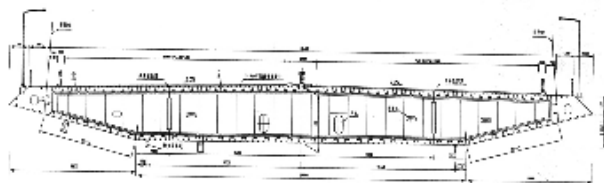


图 14 主横梁断面图

其斜拉索采用平行钢丝, 防腐外套有气动措施。端部设阻尼减振器。

其主塔采用倒 Y 形有下横梁, 索塔锚固采用钢箱锚固(见图 15)。

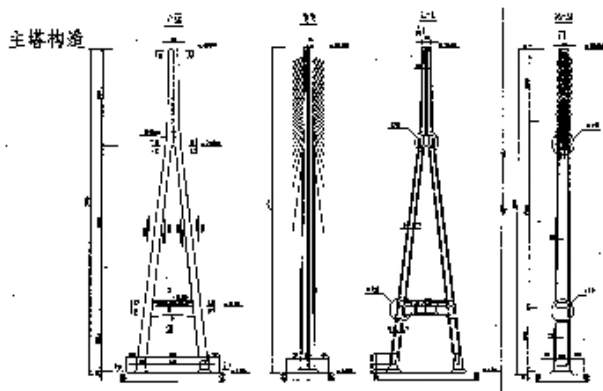


图 15 索塔锚固图

其基础为钻孔灌注桩加钢套箱基础(见图 16)。

4.2 悬索桥在国内外发展情况

悬索桥在十八世纪就有纽约的布鲁克林桥, 发展到今天跨度已达近 2000 m 的日本明石海峡大桥, 它的梁体采用桁架式。40 年前梁的断面发展成扁平箱形梁构造。例如英国跨度 990 m 的 Severn 桥和跨度 1410 m 的 Humber 桥, 我国则多

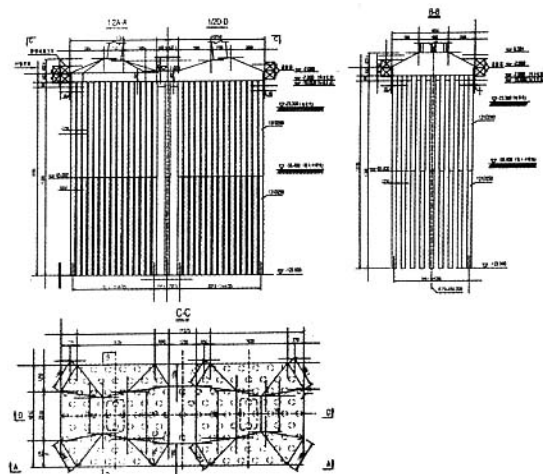


图 16 基础方案示意图

采用扁平箱形梁悬索桥。有香港跨度 1377 m 的青马大桥、跨度 1385 m 的江阴长江大桥。跨度 1490 m 的润扬大桥, 跨度属国内第一世界第三, 已到达国际先进水平。

润扬大桥构造概况如下:

悬索桥为主缆跨径($470 \text{ m} + 1490 \text{ m} + 470 \text{ m}$)单跨双铰简支悬索桥, 采用多层门式框架型索塔及其基础、重力式锚碇, 全焊钢箱加劲梁预制平行用索股主缆及销接式吊索(见图 17)。

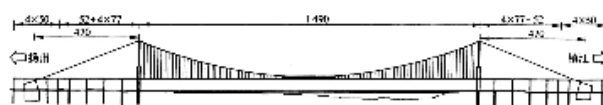


图 17 润扬大桥总体布置图

垂跨比 1/10, 中心距 34.3 m, 吊索间距 16.1 m 端吊索距索塔中心 20.5 m。

5 未来桥梁设计中的若干问题

5.1 桥梁结构刚度的控制

在跨度不大的中小桥中, 结构变形不大, 人在车上犹如船在河流中行驶, 十分平静。但在超大跨度的桥梁中, 结构变形很大, 会上下波动及左右摆动, 人在车上犹如船在有风浪的大海中行驶, 多数人感觉上不能适应, 如上面 1/4 中提到的国外有座桥, 刚度没有控制好, 致使桥上的人惊慌失措。

因此有必要制订一套刚度标准, 以满足大多数人能接受的感觉要求。

5.2 大跨度桥梁全面引入动力设计

在一般的桥梁中, 其结构刚度较大, 结构振动幅较小, 动力影响较小, 一般情况下, 偏重于静力分析, 而动力分析仅是对少数几个问题进行校核即可, 在大跨度桥梁设计中, 结构频率较低, 振动

幅较大,对结构应力,位移的影响已到不可忽略地步,单是校核已不能满足设计要求必须静力,动力并重进行结构分析。

动力方程由质量矩阵,刚度矩阵,阻尼矩阵,外力矢量及时间组成,一般情况下方程是线性的,一些特殊情况可能会有非线性,但在数学上不会有原则性困难,况且可用高容量的电子计算机操作。同时其中的阻尼矩阵不可忽略,也未必是对角阵,其外力矢量的参数尽可能规范性确定避免每个方案都去做试验,总之通过研究工作,可以得到像静力设计一样简单的动力设计方法。应用于桥梁设计。

5.3 大跨度斜拉桥的刚度设计

斜拉桥的主要构件是钢束,钢束的水平投影长度较大时将产生垂度其当量的弹性模量将降低,其表达式为:

$$E_i = \frac{E_e}{1 + \frac{(\gamma L)^2}{12 \sigma^3} \cdot E_e}$$

式中: E_i = 钢束有垂度时的当量弹性模量

E_e = 钢束在直线状态受力时的弹性模量

γ = 钢束密度

L = 束的水平投影长度

σ = 钢束所受应力

目前现有的钢束材料采用高碳的高强钢丝,其 γ 、 E 、 σ 、 E_e 为定值,因此其 E_i 随跨度增加即 L 增加而减少,当跨度增到相当大数值时 E_i 值显得很小,即刚度很差,因而我们期待更高强轻质的材料出现来缓解 E_i 减小的矛盾。但新材料的出现并不容易,目前在新材料未出现之前设法在设计上采用使跨度增大而 L 不增大的方案,即在桥面上竖起若干刚性杆支撑钢束达到减少 L 的方案,当前 NORMANDIE 桥钢束与钢束之间用细钢束连接着其目的是减小钢束的振动并非为了提高钢束的刚度、所以刚性杆的设计是十分必要的、设计的要点是刚性杆与钢交叉点的节点构造必须满足 200 万次以上的疲劳要求。

当前大跨度的斜拉桥最大跨度约 1000 m 左右,这问题尚不太突出,以后跨度继续向前推进,这问题将愈加突出,所以应及早研究,及早实践,不断完善,工程问题不可能一下子就很完美。

6 今后发展方向

技术进步的动力是经济利益的驱动。

桥梁将从三方面发展将得到桥梁工程的宏观

经济效益。

6.1 各种桥型跨度的进步

跨度的进步,不仅有方案上的当前利益,且有发展上的长远利益。

从上述可知,拱桥在同斜拉桥竞争,斜拉桥在同悬索桥竞争,即使是斜拉桥,混凝土斜拉桥也要同钢斜拉桥竞争,这在十几年前是不可能有事,这就是多年来,各种桥型跨度各自向前推进的结果。以上面苏通大桥跨度的推进为例。这一千米左右的跨径只有做悬索桥才是稳当的,但造价较高,如果做斜拉桥则没有先例就有风险,然而毕竟有法国的诺曼底桥 856 m 和日本 Tatara 桥 890 m 的成功例子在,不需要做锚碇可省不少钱,利益与风险之间在犹豫不决,最后还是下决心做斜拉桥。作者认为这个决心是正确的,因为不论从施工工艺上,或是结构分析都是有把握的只需再做些仔细的工作就可以。也为后人树立一块成功实例,为此后设计 1400 m 跨度斜拉桥树立信心,工程师总是感到要施工工艺,结构分析有把握后,还要看前人走到什么地步,差距不能太大,太大以后风险就大,出了问题负不起责任的,总是会适可而止的,到什么程度才适可而止,这由当事人自己把握,所以跨度的推进不仅为当事人带来眼前利益亦为后人设计树立信心。

每一种桥型都有自己的传统的跨度适用范围,但时至今日,各种桥型的范围已开始交叉,导致方案上激烈竞争,从而使得造价降低。今后将继续推进各种桥型跨度的进步。

6.2 施工工艺的进步

不论是上部构造安装或是基础施工其施工工艺都必须可靠快速、施工措施费最少。

施工措施费是造价中不小的费用,有时宁可在结构上多花一点材料支持施工工艺减少施工措施费,求得总造价的最低。

这项工作不仅由施工单位做而是由设计施工联手来做。

在拱桥体系中材料费不多而施工措施费较多,今后应研究较合适的施工工艺使以最小的代价去使得施工阶段在结构上,所发生的应力与该阶段在结构上产生承载应力大体协调、措施安全可靠。在梁桥体系和悬吊体系中同样施工措施费和工期要推进(包括通用施工设备的研置)。

基础工程中施工工艺也是重点,首先是工艺安全可靠,再就是工期要短,施工措施费要少。

6.3 科学研究的进步

桥梁的科学研究,将汇集当代科学各领域的

上海地铁网络的重要枢纽——人民广场站

刘建航,俞加康

(上海市隧道工程轨道交通设计研究院,上海市)

摘 要:人民广场是上海的政治、文化、娱乐中心,是最大公交枢纽和人员集散地之一。地铁 1、2、8 号线在此交汇。为了改善换乘功能,加设了下沉式广场和“大三角”地下换乘大厅。由于运营线和在建线的交织,实施过程中遇到诸多难题,从而采取有效的处理对策。

关键词:三线交汇;重要枢纽;建设难题;处理对策

中图分类号:U452.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1009-7716(2006)04-0007-04

1 人民广场地区的功能定位

东起西藏中路,西至黄陂南路,南至金陵中路,北到南京西路所围的 1.4 km² 范围内,称之为人民广场地区。

人民广场地区是上海的行政中心,是最重要的公共活动中心和最繁华的商贸、文化娱乐区域,也是近代优秀历史建筑最集中的区域之一。新建的大剧院、博物馆、城市规划展示厅等又成了上海新的标识性建筑。

已通车的地铁 1 号线、2 号线和在建的 8 号线车站交汇于此,还有 52 条公交线路到达或经过(调整前),使该区域成为上海市最大公共交通枢纽和人员集散地之一。

改造后的人民广场地区包括了占地 9 公顷的人民公园、15 公顷的延中绿地一、二、三期和 11 公顷的人民广场,成为市中心最大和最富有魅力的开放空间之一,同时还是上海的绿肺、上海的心脏地带。

该区域与中华商业第一街——南京路步行街相毗邻,所波及的浦西外滩与浦东陆家嘴地区的

中央商务区,以及周围辐射的 30 km² 的中心商业区通过轨道线和诸多公交线紧紧地串联在一起。经预测,人民广场地区日客流量将达到 82 万~84 万人次,高峰小时客流量将超过 10 万人次。

2 三条轨道线交汇概况

2.1 线路

地铁 1 号线一期工程:莘庄——徐家汇——淮海路——人民广场——上海火车站,全长 20.969 km,共设 16 座车站(目前正在北延伸至富锦路)。自 1990 年 1 月 19 日正式开工建设,1995 年 4 月,徐家汇至上海火车站试运营,直到 1997 年 7 月 1 日,一期工程全线通车运营。滞后于世界第一条地铁线——伦敦地铁 134 年,上海第一条地铁终于诞生了,它是上海南北向的交通干线。

2 号线一期工程:中山公园——静安寺——人民广场——陆家嘴——世纪公园——张江,全长 19.72km。共设 13 座车站(目前正在西延伸至临空园区)。1995 年动工,2000 年底正式通车运营,是上海第一条联接浦西浦东的轨道交通线,是上海东西向交通干线。

在建的 8 号线一期工程:开鲁路——虹口足球场——人民广场——世博会地区——成山路,全长 23.218 km,共设 22 车站。自 2002 年 7 月正式开工,计划 2007 年底建成通车,是人民广场连

收稿日期:2006-06-05

作者简介:刘建航(1929-),男,上海人,教授级高级工程师,中国工程院院士,主要从事地铁、越江隧道等地下工程的研究、设计、施工工作。

成就为桥梁技术所用(例如材料科学,信息科学等等)。

桥梁的科学研究多数是一种技术研究,这种技术可在每一项工程中应用总结后再提高再改进再在下一工程中应用,不断应用使这种技术非常有效,不断完善。我们将应用科学研究多立课题,去克服工作中一个又一个困难,比如抗腐蚀课题,这次工程用了,下一工程修正后再开,不断修正完善直到满意为止。

当前先把第一线的问题先予解决,同时继续开发第二线——材料科学目标是高强轻质低价,这是桥梁技术进步的一个重要源泉。

我国疆土辽阔,有着无数的河流山谷,每年有大量资金投入桥梁工程,使我们的同行有着空前的机遇。已经走过成千上万桥梁的同行将继续吸纳当代各科学领域的新成就及当前世界同行的新经验,去走出中国桥梁的新天地。