

# 长江中下游特大桥主要工程地质问题的勘察与研究

徐福兴, 石 林

(长江水利委员会综合勘测局, 湖北武汉 430010)

**摘要:** 20世纪90年代以来, 长江中下游特大跨江公路专用桥建设开始起步, 至今已有黄石、铜陵、江阴、武汉、南京等长江公路大桥建成通车, 并有多座大桥正在建设和勘测设计。在大桥建设中遇到了地震与断裂构造、软弱层带、极软岩、岩溶等复杂的工程地质问题。在解决这些问题中除了采用常规的工程地质勘察和试验技术外, 还进行了软岩流变试验、钻孔内彩色电视录像、原位承载力及压桩试验、桥基地质力学模型试验等技术和方法, 取得了可靠的数据, 为大桥设计提供了依据, 并通过已建成大桥的实践得到了证明。这些勘察研究的技术方法为长江中下游特大桥建设提供了经验。

**关键词:** 长江中下游; 特大桥; 勘察。

中图分类号: P642.2 文献标识码: A

文章编号: 1000-2383(2001)04-0377-04

**作者简介:** 徐福兴(1939—), 男, 教授级高工, 1964年毕业于北京水利水电学院, 长期从事工程勘察与研究。

## 0 引言

长江中下游是我国经济最发达的地区之一, 为长江经济带的东段, 从宜昌至上海, 包括湖北、湖南、江西、安徽、江苏、上海等省市。沿江有上海、南京、武汉等特大城市, 主要的大中城市有南通、无锡、镇江、扬州、芜湖、铜陵、安庆、九江、黄石、鄂州、岳阳、荆州和宜昌, 长江天堑阻隔了南北交通, 一定程度上影响了这些省市乃至全国经济的发展。在20世纪90年代以前, 先后修建了武汉、南京、枝城和九江等4座大桥, 对国民经济建设和发展起到了极其重要的作用。90年代以来, 长江公路专用桥建设开始起步, 先后已有黄石、铜陵、武汉长江二桥、三桥、江阴、南京二桥等大桥建成通车, 在建的大桥有扬州、鄂州、军山、荆州、宜昌、夷陵等大桥, 正在进行勘察设计的有安庆、南通、南京三桥、武汉四桥等。长江水利委员会综合勘测局承担了包括黄石、铜陵、江阴三种桥型的10余座大桥的工程地质勘察工作, 遇到了各种复杂的工程地质问题, 如软岩和极软岩容许承载力、地震及砂性土震动液化、断裂构造破碎带及软弱夹层、岩溶等对桥基稳定的影响、松散层基坑渗透变形、岩溶

和斜坡桥基稳定等。在解决这些问题中, 除了常规的工程地质勘察和试验工作外, 还进行了软岩流变试验、孔内彩色电视录像、原位压桩试验、桥基地质力学模型试验等技术和方法, 取得了良好的效果, 为大桥工程地质勘察研究提供了经验。

## 1 地震与断裂构造勘察研究

### 1.1 地震

根据《中国地震烈度区划图(1990)》<sup>[1]</sup>, 长江中下游地区, 除了南京—镇江河段和上海市部分地区为地震基本烈度Ⅶ度区外, 其余河段为Ⅵ度或小于Ⅵ度区。总体而言, 长江中下游为弱震区, 地震强度不高, 对于建设特大桥是有利的。由于长江大桥属于特大型工程, 抗震要求较高, 地震烈度区划图所给出的地震烈度, 是指50年超越概率为10%的地震烈度值, 显然是不能满足大桥抗震设计要求的。因此, 在长江特大桥的勘察研究中要进行地震烈度复核和地震危险性分析, 为大桥设计提供抗震设计参数。

抗震设计参数的确定, 目前一般采用地震危险性概率分析方法。该方法考虑了地震发生时间、空间和强度的不确定性、不均匀性, 以及地震衰减的不确定性, 采用概率分析方法, 对桥址未来若干年内可能

遭遇到的地震强度作出估计。研究的主要内容:根据桥址及外围地震活动性和地震地质条件划分潜在震源区;确定各潜在震源区的地震活动性参数;确定适合于本区的地震动衰减关系;建立统计分析模型;计算场区地震的概率,并进行不确定性校正,最终得出不同年限、不同超越概率水平下的地震烈度值和基岩水平加速度峰值及相关的基岩水平加速度标准反应谱。对位于第四纪松散堆积层上的建筑物,则应进行土层的地震反应分析计算,测定土层剪切波速度。

大桥抗震设计中,可根据建筑物的重要性,选择不同超越概率水平下的地震动参数作为设计依据,使抗震设计安全、可靠和经济合理。

## 1.2 断裂构造

断裂构造是大桥建设中较多遇到的地质问题之一,对桥位、桥墩选择、基础形式和埋置深度等都有较大的影响。

对于区域性大断裂的勘察研究,主要是了解断裂的活动性和是否属发震构造。大桥桥位应尽可能避开区域性活动断裂或发震断裂。如:黄石长江大桥避开了襄樊—广济断裂,鄂黄大桥避开了团风—麻城断裂,安庆 I 桥位避开了宿松—枞阳断裂等。

南京长江二桥右岸引桥有幕府山—焦山断裂通过,详细勘察研究表明,断裂主要活动时期为中更新世( $30 \times 10^4 \sim 50 \times 10^4$  a),断层上部高漫滩沉积层未发现变形迹象。虽然在该断裂带上曾发生过 4.75, 5.5 级地震,影响到桥址的地震烈度仅 7 度。在大桥设计中采用了墩位跨越断层和较好的抗震措施。

在桥位勘察中,常常会遇到宽度(或厚度)较大、性状较差的断层,这些断层主要影响墩位选择、基础型式、埋置深度等工程问题。在黄石和军山大桥勘察中,都曾因遇到较大断层的影响而进行了墩位调整。当较大的断层破碎带位于墩位而无法避开时,应将持力层选在断层下盘的完整岩体上,以免造成桥墩过大的变形和不均匀沉陷,如黄石长江大桥的 1<sup>#</sup>、4<sup>#</sup> 主墩。当性状差的断层位于桥墩一侧,岩体中有倾向断层的软弱结构面时,也应注意桥墩沿软弱结构面向断层侧向变形的问题。相反,当侧向的断层胶结较好,又切断了岩体中的软弱夹层,可以阻止桥基岩体滑移。如江阴长江大桥南塔墩 F<sub>23</sub> 断层胶结较好,切断了岩体中的软弱夹层,可将断层视为滑移的终点。

表 1 极软岩原位承载力试验成果与室内岩块单轴抗压强度对比

Table 1 Comparison between uniaxial compression tests and field bearing tests in extreme softrocks

岩性	$p_1$ /MPa	$p_2$ /MPa	备注
砾岩	>60	2.5~5.8	
砂砾岩	>50		
砂砾岩、泥质粉砂岩	31	2.2~2.3	
砾岩	$\geq 235$	16~22	泥钙质、钙泥质胶结
粗砂质砾岩	8.5~12.5	0.05~1.00	碎屑结构、较松散
砂岩夹粘土团块	28~62	3.0~4.7	胶结中等较好

长江科学院柳赋铮测试。 $p_1$ : 极限承载力; $p_2$ : 岩块单轴抗压强度。

## 2 软岩和极软岩勘察研究

长江中下游地区广泛分布有白垩纪—第三纪红色砂砾岩、粉细砂岩、粘土岩等软岩和极软岩,砂砾岩、粉细砂岩胶结较好时,单轴抗压强度可达 10 MPa 以上,粘土岩和胶结较差的砂砾岩、粉细砂岩,单轴抗压强度一般小于 5 MPa。尤其是胶结差的粘土岩、泥质粉砂岩、疏松砂岩等,单轴抗压强度大多为 1~2 MPa。

极软岩最大的工程地质问题是承载力低、变形大。由于其成岩时间较短,固化程度低,胶结较差,在钻孔中采取的样品都已经过围压释放,机械振动,利用室内常规的物理力学试验所取得的成果与天然状态有较大的差异(表 1)。另一方面,极软岩虽然强度低,但与松散堆积层有明显的不同。因此,确定极软岩的承载力和桩周摩阻力常常是桥位勘察工作的难题之一。在施工阶段采用试桩的办法能够比较可靠地确定极软岩的承载力和桩周极限摩阻力,但在勘察设计阶段很难做到。

通过铜陵大桥和南京长江二桥的实践,在现场选择与持力层性质相同或相近的岩体,进行原位“压桩”试验,配合室内岩样三轴试验,以确定持力层岩体的极限承载力和桩周极限摩阻力,为设计提供依据(图 1)。如铜陵大桥和南京长江二桥进行原位“压桩”试验后,对岩石力学参数进行了调整,减少了桩长。

## 3 岩溶桥基勘察研究

碳酸盐岩一般具有较高的强度,属于硬岩类,是建桥的良好持力层。由于碳酸盐岩中发育有岩溶洞穴、岩溶裂隙,这些洞、隙在岩体中分布极不规则,其

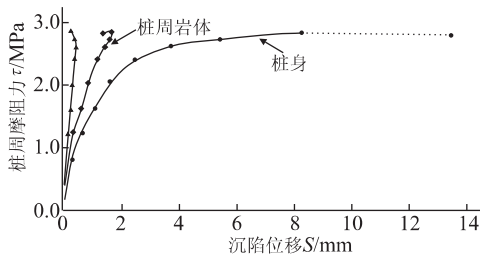


图 1 岩体桩周摩阻力  $\tau$  与沉陷位移  $S$  曲线  
Fig. 1  $\tau$ - $S$  curves between pier and rock

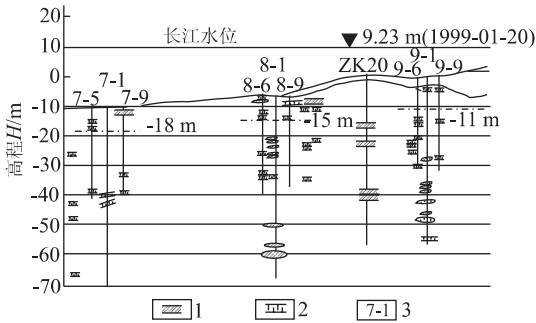


图 2 鄂黄长江公路大桥桥基岩溶发育示意  
Fig. 2 Sketch of karst caves in pier foundation of Ezhou-Huangshi bridge across the Changjiang River  
1. 充填粘土及碎块石溶洞; 2. 无充填溶洞; 3. 钻孔编号

中可能充填泥沙,或者完全为空洞。因此,岩溶桥基主要的工程地质问题是岩溶化岩体的承载力和变形稳定问题。

勘察阶段,首先应对桥位区岩溶发育规律有总体认识,如岩体的岩溶化程度、非岩溶岩体的厚度及性状,岩溶洞穴的空间分布特点、充填物及性状,强岩溶化岩体中相对弱岩溶化岩体的厚度等。根据岩溶地区的勘察经验,在断裂带和断裂交汇部位、岩性较纯的厚层灰岩、可溶岩与非可溶岩接触部位、背斜和向斜轴部、含煤地层附近、地下水循环强烈地带等部位,岩溶发育较强烈。桥位选择时,主要墩位尽可能避开这些地段。

对具体墩位的勘察评价,首要的是根据设计荷载要求确定持力层。在弱岩溶化地层或有非岩溶层可以利用的条件下,持力层较易确定。在强岩溶地层中,由于岩溶洞穴分布的随机性和复杂性,为安全可靠,一般应在施工阶段进行逐桩打先导孔,探明桥基岩体中每根桩基础下的岩溶发育情况,以确定稳妥可靠的持力层。鄂黄长江大桥南塔墩、边主墩和引桥区,为二叠、三叠系灰岩,岩溶强烈发育,钻孔遇洞率达 63%,垂直岩溶最高线率达 37%,在施工阶段即

采用先导孔确定桩基持力层,使桩端以下有 5 m 以上的完整岩体(为 2 倍桩径)(图 2)。

#### 4 软弱层带勘察研究

在桥基岩体中常常存在一些比围岩强度低得多的软弱层带,从其成因分析,有的是构造形成的,如断层破碎;有的是沉积岩中的软弱层经构造错动、风化作用,形成泥化层;有的是蚀变作用形成的。软弱层带的厚度从几 cm 至数 m。软弱层带造成的工程地质问题主要是基础沉陷变形和滑移。

实例一,黄石长江公路大桥一个主墩基础下为侏罗系砂岩、粘土岩、夹一层凝灰岩,夹层厚度 0.5 m 左右,全风化呈土状,单轴抗压强度 0.6~1.9 MPa,强风化凝灰岩单轴抗压强度 2.9~9.0 MPa,而饱和强度仅 0.9 MPa。勘察阶段建议桩端距凝灰岩夹层顶面有 15~20 m,为桩径的 5~8 倍,实际施工时加长了桩,桩端距该层顶板仅 7~15 m,为桩径的 2~5 倍。引桥部位,凝灰岩层以上完整岩体小于 6 m 者(2.5~3 倍桩径)桩端均穿过夹层到达下部完整岩体。

实例二,江阴长江公路大桥为大跨度悬索桥,南塔墩基础为泥盆系石英砂岩夹粉砂质页岩和页岩,其中有多层经构造错动后形成的泥化夹层,泥化层厚达 1~3 cm,抗剪强度低。塔墩又位于基岩斜坡上,长江深泓逼岸,斜坡高达 60~70 m。岩层倾向河床,倾角 25°~30°。塔墩基础在巨大荷载作用下,存在沿夹层向长江滑移变形的可能性。为此进行了详细的研究。对夹层与层面的长期强度(抗剪)及岩体的抗压抗剪强度进行了试验,以确定合理的力学参数,建立了地质结构模型,进行了二维和三维稳定性分析计算,并进行了塔墩在不同荷载作用下的地质力学模型试验。综合研究成果,建议采用桩基础,桩端穿过可能滑移的泥化夹层,并将荷载传送到深部岩体,增加侧向抗力岩体的厚度,桩也可起到一定的阻滑作用,使塔墩的稳定性得到保证,也减小了江水侧向侵蚀的危险性(图 3)。

#### 5 砂性土震动液化和渗透变形

长江中下游冲积层中,粉细砂、砂壤土层分布广泛,Ⅶ度地震和强振动时砂性土层可能产生液化,在

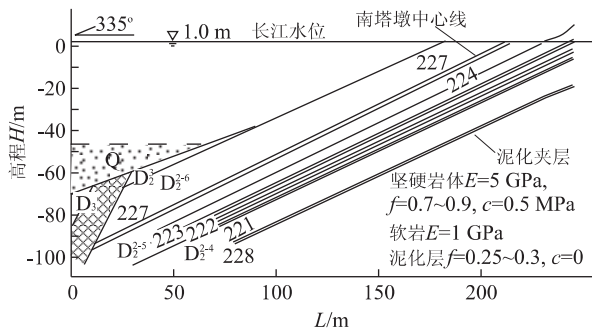


图 3 江阴长江公路大桥南塔墩地质概化剖面(西支墩)

Fig. 3 Scheme geological section of pier foundation of south tower of Jiangyin bridge across the Changjiang River

深基坑开挖时可能发生渗透变形。有关地震引起砂性土震动液化问题的评价有专门的规范可循,长江中下游地震基本烈度Ⅶ度区和通过地震烈度复核后场地烈度达到Ⅶ度的场区,都应进行砂性土震动流

化的判别。

采用深基坑开挖、沉井或地下连续墙等施工时应重视砂性土层的渗透变形问题。如江阴长江大桥北锚碇,基础为冲积层,自上而下分 4 层:(1)粉质粘土夹粉细砂层,厚 20 m;(2)粉细砂层,厚 15~25 m;(3)粉质粘土层,厚 15~25 m;(4)砂及含砾砂层,厚 20~30 m。其中第 2 和 4 层为承压含水层,地下水与长江相通。沉井或地下连续墙揭穿含水层时,长江水向基坑渗流的比降大于粉细砂层的临界比降时,即可产生渗透变形。因此,在施工时要控制地下水的渗流比降,或采取可靠的防护措施。粉细砂层的临界渗流比降可通过试验,或根据土层的颗粒分析成果求得。

参考文献:

[1] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1:400 万)[M]. 北京:地震出版社,1990.

## INVESTIGATION AND RESEARCH ON SOME ENGINEERING GEOLOGICAL PROBLEMS IN CONSTRUCTION OF BRIDGES ACROSS THE CHANGJIANG RIVER

Xu Fuxing, Shi Lin

(Investigation and Survey Bureau of the Changjiang River Water Resources Committee, Wuhan 430010, China)

**Abstract:** Since the 90s, 20th century, the construction of big traffic bridges across middle-lower reaches of the Changjiang River has stepped into fast development. So far, bridges in Huangshi, Tongling, Jiangyin, Wuhan, and Nanjing have been in transport service. Still, some bridges are under construction and design. Various engineering geological problems have occurred, such as fault, soft interlayers, extreme softrocks, karst caves, and so on. In addition to common methods of investigation and mechanical test, the rheology test of softrocks, color video recordings, the field bearing test, and the pier analogue simulating have been taken to deal with the problems. The practice has provided dependable data for bridge design, which has been proved successful in the construction of bridges, and will be of treasury experience for the future bridge construction in middle-lower reaches of the Changjiang River.

**Key words:** middle-lower reaches of Changjiang River; big traffic bridge; investigation.