

# 岩溶地区桥梁的工程地质勘察与研究

张 洪 煦

(湖南省交通规划勘察设计院)

本文系据湘省近二十年来在碳酸盐岩岩溶区兴建公路桥梁,进行勘察、设计、施工所获实际资料,经综合分析研究,归纳了岩溶桥基工程地质类型及其特征,借以指导桥位选择和评价,及岩溶的处理和营运安全。

湘省碳酸盐类岩石分布较广,约占全省面积的28%。碳酸盐岩经受水的溶蚀和侵蚀作用,产生各种溶蚀裂隙、溶沟溶槽、溶洞等岩溶现象。由于受岩性、地质构造、水动力条件和气候等因素影响,在建桥的不同河谷地段,岩溶发育特征各异,空间分布规律复杂。例如,小江口、祁阳等大桥,在勘察与施工中,均曾遇见强烈发育的岩溶,且多被第四系覆盖或填充,不易探明。施工实践证明,桥墩(台)基础下岩溶化岩基的工程地质特征是:岩面高差悬殊、沟槽纵横深邃、基底软硬不一、岩体强度降低,且因洞穴发育和基坑涌水,可影响基础沉落不匀,超过允许变形甚至造成岩体失稳,构成了复杂的桥基工程地质条件。因此,进行建桥区岩溶的工程地质勘察评价,对于选勘桥位、确定桥型、跨径、基础类型、埋置深度及处理岩溶,均具有理论与工程经济意义。

## 一、岩溶桥基工程地质类型及其特征

经地质调查、综合勘探、现场分析、施工检验,观察到湘省岩溶桥梁地基有以下几种不同的工程地质类型与特征。现分述于下:

(一) 轻微溶蚀型桥基 岩溶沿河谷基岩表层或风化带发育。碳酸盐岩岩性不纯,含泥质及其他杂质,岩体完整性好,构造变动影响极小,岩基面仅有溶蚀裂隙与少量石芽溶沟,且高差小。如溪口大桥(图1)。桥基工程地质条件优良,覆盖层浅薄,常可采用天然地基,明挖施工,扩大基础,清除填物,凿平石芽,填塞混凝土,即可奠基。

(二) 浅溶沟发育型桥基 岩溶沿岩层面或碳酸盐岩与非碳酸盐岩接触面发育,但受岩性及隔水层制约,平面上石芽与溶沟呈平行条状相间分布,如新宁大桥(图2)与竹市大桥(图3)。桥基工程地质条件良好,溶蚀规模小,沿走向发育,呈倾斜状,岩石出露面积达70%以上,岩体稳定性好,但砂页岩层风化甚剧。灰岩中偶有小型浅层溶洞出现。

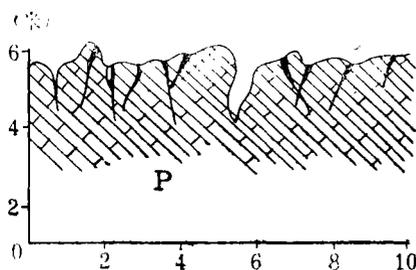


图1 溪口大桥墩基岩溶发育微弱示意图  
Fig. 1 Karst slightly developed in the bedrock of the pier of Xikou Bridge

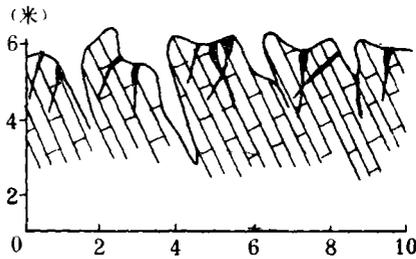


图2 新宁大桥墩基岩溶沿层面发育示意图

Fig. 2 Karst developed in the bedrock of the pier of Xinning Bridge along the bedding plane

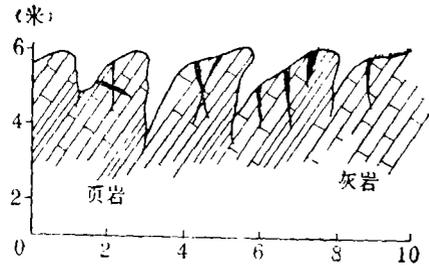


图3 竹市大桥墩基岩溶沿灰岩、页岩接触面发育示意图

Fig. 3 Karst developed in the pier of Zhushi Bridge along the contact surface of limestone with shale

基坑开挖高差较大，施工与处理方法同轻微溶蚀性桥基。

(三) 深溶沟、溶槽发育型桥基 岩溶沿整个河谷发育。岩体厚层质纯块状，无夹层，构造裂隙发育，溶沟溶槽纵横割切，岩体完整性差，发育深度可达数十米。如小江口桥(图4)。基坑岩石出露面积，仍可达50%以上，表层岩体易失稳，工程地质条件中等，施工清基时，沟槽内填充的软塑状粘性土或砂砾石，只能部分清除，常采取片石混凝土嵌填，利用出露的方块状岩体，作钢筋混凝土板基础。

(四) 溶槽与溶洞发育型桥基 岩溶沿古剥蚀面或断层破碎带发育。发育强度与岩体破碎规模及其渗透性相关。平面上呈线状分布，剖面则沿古剥蚀面或构造破碎带密集了各种岩溶形态，沟、槽、洞相连。如醴陵大桥(图5)、祁阳大桥城关桥位(图6)及罗依溪大桥(图7)。作为墩台地基，工程地质条件不良，稳定性差，承载力小且难以定量评价，常以深桩基础穿越，但施工难度大，地基处理复杂。因岩溶呈线状分布，向两侧则不发育，常可加大跨径跨越，而不直接在其上奠基。故在桥位选勘时，虽河床出现深槽，仍视为良好桥位。

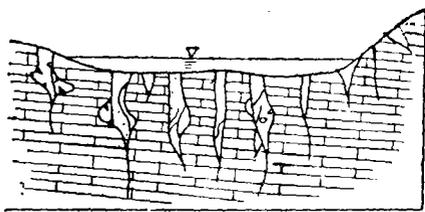


图4 小江口大桥桥基岩溶发育，形成纵横深邃密集的溶沟槽使岩体割裂示意图

Fig. 4 Deep and density karst fissure developed and cut apart the rock mass in the Xiaojiangkou Bridge base

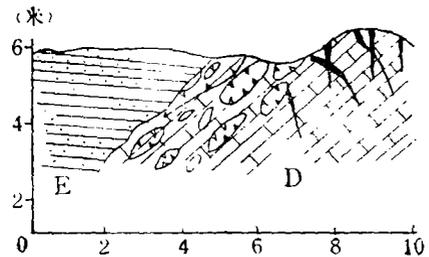


图5 醴陵大桥桥台地基岩溶沿不整合面发育示意图

Fig. 5 Karst developed along the unconformity surface in the abutment base of Lilin Bridge

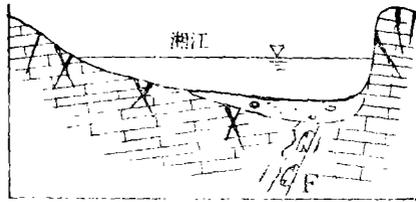


图6 祁阳大桥城关桥位岩溶沿断裂发育形成深水河床沉积示意图

Fig. 6 Karst of Qiyang Bridge, developed along the fracture of rocks and formed deep water sediments, the site just outside the city gates

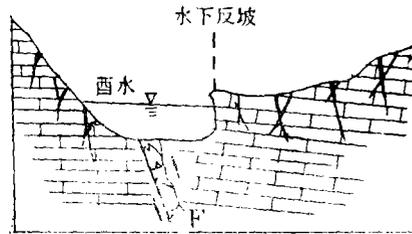


图7 罗依溪大桥岩溶沿断裂发育, 形成深水河槽示意图

Fig. 7 Karst of Luoyixi Bridge, developed along the fracture of rocks and formed deep trough of river

(五) 溶沟、溶槽、溶洞发育的复杂型桥基 岩溶沿整个河谷及河床深部发育, 地表出现潜蚀塌陷, 沟槽纵横溶蚀剧烈; 地下溶沟槽与溶洞, 相互通连, 如秀水大桥 (图8)。工程地质勘察时, 发现河岸与河床各出现三层溶洞, 各层顶板甚薄, 电探资料表明, 岩基面以下25米, 尚有溶洞发育, 桥基稳定性不良, 工程地质条件差, 成为湘省条件最复杂的岩溶桥基。其勘察周期长, 地基处理复杂。

上述各类岩溶桥基, 由于它们在河谷形态, 河谷地质结构、岩溶形态与发育强度上各具特征, 故工程地质条件有明显差异。应用上述规律, 对于指导勘探, 缩短其周期, 和加速桥位选勘, 决定基础类型与处治措施均具有工程实际意义。

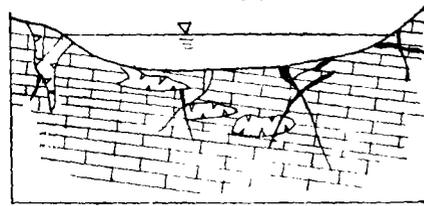


图8 秀水大桥岩溶发育, 溶洞成层分布示意图

Fig. 8 Karst development and distribution of storeyed cave of Xiushui Bridge

## 二、桥位选择的勘察研究

桥位选择服从线路总方向。因此, 可选桥位的河段十分局限。尽管如此, 仍需选择区域稳定性较好、岩溶发育相对较弱、地形地貌条件适宜、工程地质条件较简单的地址作桥位。

### (一) 研究岩溶河谷地质结构类型及其特征

许多桥基工程地质勘察资料证明, 尽管河谷地质结构不同, 岩溶发育条件各异, 但依据岩性及岩层组合、地质构造及其所反映出的岩溶桥基工程地质类型与特征, 可将其划分为三类。

第一类，单一性碳酸盐岩河谷：形态多呈“U”型或“UV”混合型、河水较深。一般纯质灰岩比泥质和其他杂质的碳酸盐岩岩溶发育；薄层碳酸盐岩岩溶往往顺层面发育；厚层碳酸盐岩常沿垂直裂隙溶蚀，扩大沟槽与孔洞，并延伸至河床深部，使整个河谷岩溶化。前述秀水、小江口桥基是该类河谷地质结构的代表。该两桥勘察表明：即使桥位已选定，但在详勘或施工中，仍可能发现新的地下岩溶形态；此时，不宜轻易改变桥位，而应在桥型、跨径、基础类型上研究和处理。如秀水大桥，在施工中将原设计多孔桥改为单孔50米拱桥，两侧桥台也据基坑开挖出现的复杂岩溶形态而稍有移动，采取了钢筋混凝土梁板跨越宽深的溶槽与洞穴。

第二类，夹有砂页岩的碳酸盐岩河谷：形态多呈宽坦型或不对称型，河水深浅不一，一般呈浅水卵石河床。不同岩性组合类型的岩层，岩溶发育强度具有明显的差异。岩溶作用沿碳酸盐岩与砂页岩接触面发育；平缓岩层岩溶发育受下部砂页岩隔水层制约；陡倾岩层岩溶发育常呈线状或向纵深发育。桥位选择在岩层横向河谷时，应探查非可溶的砂页岩夹层，将桥位适当向河流上、下游移动，利用砂页岩奠基，减少地基处理费用。如竹市、溪口等大桥；当岩层平行或斜交河流时，常有平行的、沿层面发育的岩溶带及砂页岩的强烈风化带，在选勘桥位，布设桥墩（台）时，则应尽量利用地基稳定性相对较好的层位。

第三类，复杂的断裂河谷：形态多呈“U”型或不对称型与呈现“谷中谷”、深槽等，多为深水基岩河床。断裂构造对河谷成因与岩溶发育起着控制作用。沿断裂带岩溶作用加强，高角度的断裂破碎带，有利于地下水向深部循环，岩溶向深部发育，如祁阳大桥城关桥位，河床右侧初期时发现宽达40米左右、深达25米的深槽带，曾设想加大跨径跨越，终因无法避开水下20米的深基高难度施工，而予放弃，另选定上游岩溶发育相对较浅的、水深与覆盖层也较浅的浯溪桥位，再如罗依溪大桥则采取118米大跨径跨越宽深的“谷中谷”河床。

## （二）桥位工程地质勘察的基本问题

通过桥头接点测量、地质测绘，在浅水卵石河床或深水基岩河床的河段，常拟两个或三个以上桥位选勘。采取综合物探、钎探及少量钻探进行探查。在多桥位的选勘中，利用电法、地震探测建立地下岩溶发育强弱的相对概念，从而按比选桥位的初拟最优跨径方案，结合河谷地质特点或桥墩（台）位置，施工少量钻孔，勘研各桥位工程地质条件的优劣，配合设计，选定最佳桥位。本阶段着重解决的问题是：

1. 区域稳定性评价。目的在于探查现今活动断裂与动力地质作用，避开不利因素，选择相对稳定的河段，作为桥位。评价时要注意：

（1）地质构造稳定性。诸如蠕动活动断裂、地震、火山等，立足桥梁设计。采取综合手段与综合分析来评价活动断裂的性质和强度，地震活动性及其地质条件，确定场地烈度（委请地震部门鉴定），有无震害介质条件（如液化砂土）等。全新世以来活动过的断裂。因其形成时间新、胶结不良、导水性强、岩体强度低，使地基稳定不利，故对工程安全有直接意义。对跨越水库区的桥梁，尚存在诱发地震问题。

（2）动力地质作用稳定性。诸如桥位区的滑坡、崩塌、泥石流、岩溶塌陷等的分布、成因、规模及其对桥位区的影响程度等的调查。由于碳酸盐岩区谷坡陡峻、沟谷深切，常易沿软弱夹层或溶蚀裂隙产生大规模滑坡与崩塌，故需查明各种动力地质作用发生的自然因素、

激发因素及预测桥台、引道开挖爆破等诱发边坡失稳的人为因素,注意其隐蔽性及复活性,采取对策避开或处治。

2.合理利用河谷地形地貌。碳酸盐岩岩体经受溶蚀与流水动力切割,两岸边坡陡峻,桥头接线困难,河床水深,基础施工难度大。但岩体也常在两岸或一侧裸露,构成侵蚀或侵蚀堆积阶地,在桥头接线通畅的情况下,是一可资利用的、经济优越的天然桥台地基。但需根据岸坡卸荷裂隙发育情况,适当移动桥台位置,以保证其地基稳定的安全度。河床也常出现礁滩与深槽相间分布,礁滩基岩出露高程高,可利用作为跨越深槽岩溶区的天然墩基。此外,碳酸盐岩上升区的河谷,狭窄深邃,为缩短桥长,节省造价,可以单孔大跨越过深谷,如黄虎港大桥。对于河床中出现深槽(谷中谷),在利用礁滩作墩基跨越宽深河槽时,尚应勘察两侧水下出现的反坡地形。如罗依溪大桥,对河槽右侧水下反坡,经工程地质钻探、岩体结构稳定性分析与潜水员实地观测后,方正确决定了高达60余米的墩位地基。

3.加强对河谷覆盖层的研究。不同桥型对地基承载力的要求不同,拱桥的荷载与推力大,梁桥则相对较小。勘察中除对岩溶化岩体稳定性与承载力应作评价外,还要对上覆的亚粘土、砾石层及河床较厚的卵石层(厚度大于桥基局部冲刷深度)的承载力,作深入研究。当河谷岩溶发育,沟槽纵横,溶蚀深邃,岩体破碎时,常利用两岸盖层作扩大基础的持力层奠基。如河床卵石层较厚,可采用轻型结构的梁桥,直接奠基于卵石层上。

### (三) 选择最优桥位的准则

1.服从线路总方向,使联结甲乙两地的线路里程最短,故常局限在某一局部河段,进行综合比较,勘察选定;

2.尽可能选择在直线河段,使桥位与河流向正交。合理利用河谷地貌,节省基础工程量;

3.注意不同河谷地质结构对不同桥梁类型的适宜性,充分利用不同地层岩(土)性奠基,注意绕避活动断层或以大跨径跨越活动断裂;

4.尽可能选择岩溶发育相对较弱的桥位,使深基工程减少,处理岩溶的难度降低;

上述准则在自然条件中,不是都能达到的,尚需结合岩溶化程度,在桥型、跨径、基础类型与施工难度等方面,认真勘察、全面比较、避险就夷、防害兴利,按最佳工程经济效益选定桥位。

## 三、桥梁地基的工程地质勘察方法研究

### (一) 综合勘探与测试

在选定的桥位上按最优孔径墩(台)位详勘。通过墩(台)基钻探资料分析,进一步查清岩溶发育的形态,找出岩体相对完整的墩位,即可评价桥基的稳定性。但在第一类河谷地质结构桥基勘察中,仍有可能发现复杂的岩溶形态或成层洞穴,在需要改变桥型、跨径的情况下,勘探原则应是先在水中进行墩基勘选,探查岩溶不发育的局部岩体作墩基,尽力减少水下基础,配合设计选定最优桥型、跨径,采取经济合理的基础类型与处治措施。

**钻孔布置：**根据设计方案要求与各桥墩（台）地质特点，基础类型等，综合考虑，因地制宜地采取梅花形布孔与加密孔相结合。

**钻孔深度：**应以探明地下岩溶形态的空间分布特点、成层性、层位、规模、高程，延伸方向为主。采取浅孔、深孔相结合，尤其是墩（台）中心孔，应达到探明深部岩溶的发育为准。一般孔深应钻入完整岩基3—5米；对钻孔灌注桩基础，在复杂的岩溶洞穴区，常常是逐桩勘探，深达桩端以下完整岩基2—4米。勘探中着重探查溶洞大小，填充物特性，顶板厚薄，溶沟槽的宽深度，统计各墩（台）钻孔遇洞率、层数、揭露的最大洞高。关键是分析判定钻孔中所揭露的洞高是真正的溶洞还是钻孔打在溶沟槽壁悬吊处。判别不准将会给墩（台）地基的岩体稳定性分析、承载力评价造成误差。

应用无线电波透视，查明墩（台）基岩溶形态特征，以弥补钻孔控制不足的缺陷，为设计提供准确的依据。

在地下岩溶复杂桥位，注意探查上覆盖层，测试其承载力，评价其作为天然垫层奠基的可能性，达到不处理地下岩溶，而取得地基稳定、工程经济效益良好的目的。

## （二）桥基稳定性评价

桥基为桥梁之本。岩溶地区建桥，常因岩溶作用而使地基刚度和稳定性降低，工程地质评价必须建立在宏观区域稳定性查研、岩溶发育分布规律及形态勘研基础之上，应用工程地质力学分析与力学验算，结合桥型、跨径、荷载条件综合分析，方能正确评价地基稳定性与研究处理岩溶的方法。

1. 定性评价。根据区域岩溶发育分布基本特征，划分岩溶桥基工程地质类型。类型不同，工程地质条件优劣悬殊，这涉及地基基础处理与施工方法的工程经济效益。因此，要求勘察定性准确，避免给施工造成被动，延长工期，增加造价。

2. 定量评价。岩溶化岩体地基的稳定性与强度，主要用奠基标高、地基承载力这个综合的力学指标来反映，并作为工程设计依据。对岩溶区利用非可溶岩作桥基的承载力，可查规范值或作现场载荷试验评价；但对岩溶桥基的承载力，不能仅仅据规范按岩块单轴抗压强度除以安全值来取值，必须考虑岩溶化岩体的溶蚀软弱结构面与溶蚀结构体在基础面积内的割裂破碎程度、占基础总面积的百分比及结构体大小、溶蚀结构体岩块强度与岩体强度、地基处理后承载力的提高等诸因素与数值，经综合分析、定量计算后，综合工程地质判断提出地基承载力数据，作为设计计算参数。定量计算要在定性基础之上，根据详细的工程地质调查和勘探、试验资料，慎重地选择合理的方法，逐墩逐段进行。必须强调：桥基下的溶洞实为一较大的力学非连续体，在桥基应力范围内，虽可定量计算，但难定量使用。评价之后应提出避开或处治措施，提出桥基奠基高程及其相应高程的地基容许承载力。

## （三）施工补勘

复杂的岩溶桥基，虽经详勘，施工开挖，仍可能出现其他岩溶形态。例如两钻孔中间，发现有宽深溶槽或溶洞，则需补充钎探或钻探进行具体探查。根据其形态特征，配合施工，研究出处理方法：缩小基础尺寸、或降低基础埋深、或跨越宽槽深沟、或填塞浅层溶洞。使桥墩（台）基础稳妥可靠。

#### 四、岩溶桥基处理

岩溶桥基处理应据工程地质条件基础类型,分别考虑,其主要方法有:

(一)混凝土人工垫层,处理溶蚀裂隙、溶沟槽与浅层溶洞。采取明挖施工,凿平石芽,清除全部或部份填充物;其内嵌填片石或在溶沟槽按一定间距横置旧钢轨;浅层溶洞爆破开挖清填后,其上作混凝土人工垫层,使与基岩的弹性模量尽量接近。

(二)石砌拱或混凝土拱、钢筋混凝土盖板、梁板、跨越宽深溶槽、漏斗或顶板薄的溶洞。例如安仁大桥2号墩基,采用跨径7.5米的石砌拱跨越宽溶槽,但需注意溶槽两侧支承端岩体结构强度,能否承担由拱所产生的推力;若岩体结构破碎,尚应采取钢筋混凝土盖板或梁板跨越,如秀水大桥。

(三)沉井或钻孔灌注桩,或沉井内加桩基处理。穿过被评价为不稳定的、成层的、地下深部岩溶发育的复杂地基。当岩面高差较小、溶沟槽发育,而上覆土层较厚,承载力低,勘探难以具体探明时,需奠基在岩溶化岩体上。常采用沉井,在井内直接观察或补充探查深岩溶。除按上述处理外,尚可加桩基础,例如邵阳大桥2号墩地基,根据沉井内宽深的溶沟槽发育,则在最大拱推力部位加筑三根深桩。使基岩与桩基共同受力,构成组合基础。一般摩擦桩因其填充物摩擦力小而不适宜,钻孔灌注支承桩则适于处理上部不稳定的岩体,使之支承于下部岩溶不发育的岩基之上。桩基础除在沉井内采用外,常用来穿过溶洞顶板,嵌入洞底板完整岩基。

(四)桥墩(台)埋置深度的增减。施工实践是对工程地质勘察资料的检验,常发现钻孔多打入溶沟槽内,而使得根据勘察资料建议的奠基高程过低,实际是岩体所在位置较高,故除凿平石芽、清除沟槽填充物,尚可提高基础埋置高程、节省工程量;反之,由于岩溶形态的变异,也可根据实际情况适当降低基础埋深,弥补勘察分析之不足。

(五)基坑岩溶化岩体裂隙涌水,宜采取堵塞,浇灌水下混凝土或压浆,承压水宜引不宜堵,以减少基础反力。

#### 五、几点结论性的认识

综上所述,岩溶桥基勘探,可归纳为以下几点:

(一)桥位选勘 由于岩溶地区桥梁水文地质工程地质条件复杂,故选勘桥位先从区域岩溶发育分布规律入手,查研不同河谷地质结构类型、特征及其岩溶桥基的工程地质类型与特征,选址时要对区域地质构造(特别是全新世以来的活动断裂)与动力地质的稳定性,予以勘察评价。以保证工程安全、节省基础工程量、减小施工难度、节约工程总造价为目的。

(二)桥基勘探 应大力发展地下岩溶的综合探测手段,减少墩(台)的钻探工程量,缩短勘察周期,提高经济效益。采取综合物探定性与钻探定量相结合;钻孔布置以梅花形布孔与加密相结合;钻孔深度以浅孔和深孔相结合。探明桥墩(台)基础下碳酸盐岩岩溶发育形态及空间分布特征,为勘察评价与桥梁基础设计提出定量的依据。

(三)工程地质评价 桥位评价,需遵循桥位选择基本准则,在评价区域稳定性和查明

河谷地质结构，以及岩溶桥基工程地质类型、河床水深与覆盖层厚度、力学特性等后，即可评价桥位工程地质条件；桥基评价，采取定性定量相结合，定性评价中要求准确判定岩溶桥基工程地质类型，定量评价中要求在综合勘探测试后，进行岩体工程地质力学分析，以及必要的稳定性与溶洞顶板安全厚度计算，并结合定性分析，提出基础类型、处治措施，基础奠基高程与相应高程的地基、容许承载力。

(四) 桥基处理 根据不同岩溶桥基工程地质类型及特征，岩溶发育形态、规模、成层性、分布深度、填充物特性以及岩体的含水特性等。研究适宜于该岩溶特点的基础类型与处理措施。充分利用岩溶上覆盖层作基础的天然垫层是不处理岩溶、获得最优工程经济效益的有效措施。

(五) 工程地质勘察、设计与施工的紧密配合 有利于更新设计，现场处理问题，缩短工程期限，提高经济和社会效益。

### 参 考 文 献

中国科学院地质研究所岩溶研究组：《中国岩溶研究》，科学出版社1979年

## ENGINEERING GEOLOGICAL SURVEY AND STUDY IN KARST AREAS FOR BRIDGE BUILDING

Zhang Hongxu

(Hunan Design Institute of Traffic Planning & Survey)

### Abstract

This paper summarizes primarily the karst features and types that may be encountered in bridge foundation engineering, on the basis of data collected by the author during his some twenty years experience of the survey, design and construction of highway and bridge in karst areas of Hunan Province.

It is pointed out that in the investigation and selection of bridge site the regional stability, geologic structures of the valley should be studied and landform be appropriately used in order to select the optimum bridge site.

In the investigation of the bridge site, the forms of karst development at the foundation of the bridge are made clear through engineering geologic mapping and exploration, so as to assess the stability of the base rocks and to determine the treatment of the karst caves and adaptable foundation type for safety during and after the construction.