

国家科技支撑计划项目 (2008BAG07B01)资助

龚维明 戴国亮 宋晖 编著

大直径深长嵌岩桩 承载机理 研究与应用



人民交通出版社

China Communications Press

国家科技支撑计划项目 (2008BAG07B01)资助

龚维明 戴国亮 宋晖 编著

大直径深长嵌岩桩 承载机理 研究与应用



人民交通出版社
China Communications Press

内 容 提 要

结合国家科技支撑计划,采用理论分析、现场试桩试验研究、室内模型试验研究、数值模拟等相结合的方法对大跨度桥梁深长嵌岩桩进行了一系列的研究。本书系统介绍了大直径深长嵌岩桩的荷载传递机理,以及岩石特性和尺寸效应对嵌岩段侧摩阻力和端阻力的影响因素研究,通过室内模型和原位试验研究了孔壁粗糙度和沉渣厚度对承载力的影响,建立了大直径深长嵌岩桩的设计计算方法,并应用于工程实例。

图书在版编目(CIP)数据

大直径深长嵌岩桩承载机理研究与应用 / 龚维明等
编著. —北京:人民交通出版社, 2010.10
ISBN 978-7-114-08715-8

I. ①大… II. ①龚… III. ①桩承载力—研究 IV. ①TU473.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第194931号

书 名: 大直径深长嵌岩桩承载机理研究与应用

著 者: 龚维明 戴国亮 宋 晖

责任编辑: 钱悦良

出版发行: 人民交通出版社

地 址: (100011) 北京市朝阳区安定门外外馆斜街3号

网 址: <http://www.ccpres.com.cn>

销售电话: (010) 59757969, 59757973

总 经 销: 人民交通出版社发行部

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京交通印务实业公司

开 本: 787×1092 1/16

印 张: 18.25

字 数: 451千

版 次: 2010年10月 第1版

印 次: 2010年10月 第1次印刷

书 号: ISBN 978-7-114-08715-8

定 价: 48.00元

(如有印刷、装订质量问题的图书由本社负责调换)

前 言

《大直径深长嵌岩桩承载机理研究与应用》课题为 2008 年度国家科技支撑计划“跨海特大跨径钢箱梁悬索桥关键技术研究及工程示范”之课题一“跨海特大跨径钢箱梁悬索桥结构特性及技术标准研究”的子课题三“大直径深长嵌岩桩承载特性及设计标准研究(2008BAG07B01)”。

随着国民经济的快速发展,我国的交通事业也有了长足的进步,近些年来,全国各地修建了大批跨江跨海桥梁及超高层建筑,而嵌岩桩基础作为一种适应性强的基础形式,也得到了广泛的应用。但是由于这些大型工程的嵌岩桩基所处地质条件的差异、桩身混凝土质量的不稳定、施工工艺的多样性、桩极限承载力较高、试桩试验不能达到破坏等原因,嵌岩桩的承载性状至今尚不完全清楚,人们对嵌岩桩的承载性状存在着不同的认识,各国规范、各地区规程,在其承载力及位移计算上相差较大。这样便产生两方面的问题,一是保守设计造成大量浪费;二是对桩承载力估计过高和施工质量问题等种种原因造成工程事故。因此,认清嵌岩桩的承载性能,正确选择嵌岩桩设计参数,确定其承载力计算公式就成为当今桩基工程的一个热点问题。

采用了理论分析、现场试桩试验研究、室内模型试验研究、数值模拟等相结合的方法对大跨度桥梁深长嵌岩桩进行一系列的研究,本书深入探讨了大直径深长嵌岩桩桩—岩体系的荷载传递机理,对嵌岩桩桩土摩阻力、桩岩摩阻力以及桩端阻力的受力机理和破坏模式进行了分析,并对成桩工艺、桩岩界面特征及桩底沉渣对嵌岩桩性能的影响进行了总结。针对嵌岩桩竖向承载机理,利用 Hoek - Brown 岩石的破坏准则和 Pan & Hudson(1988)破坏准则分别对尺寸效应和岩石特性对嵌岩桩嵌岩段侧阻力和嵌岩段端阻力的影响以及计算方法进行了研究。进行了 8 组室内模型试验,考察了桩径和嵌岩比对嵌岩桩承载特性的影响以及不同孔壁粗糙度及桩底沉渣厚度对嵌岩桩承载特性的影响,并采用有限元分析软件对影响因素进行了模拟分析。通过大量室内模型试验和原位试验成果的统计分析,对嵌岩桩嵌岩段桩侧阻力、桩端阻力以及上覆土层摩阻力的分项系数进行了研究,并在国内外规范的基础上,建立了深长嵌岩桩的设计方法。在课题研究基础

上,编制了大直径深长嵌岩桩基础的设计指南。

在编制本书过程中,作者得到了各位前辈及同行的鼓励和支持,也得到了许多博士生及硕士生的帮助,更得到了众多设计人员、施工单位、建设单位的鼎力相助,作者在此一并表示感谢。

鉴于问题的复杂性,大直径深长嵌岩桩的许多方面还有待于进一步研究和经验积累,本书所述如有不妥之处,期待着读者的批评指正。

作者
撰于东南大学
2010年7月26日

目 录

第一章 绪论	1
1.1 立项背景	1
1.2 国内外嵌岩桩承载机理研究现状	2
1.3 嵌岩桩承载性能的研究方法	8
1.4 主要研究内容	9
第二章 岩石基本特性	11
2.1 岩体的性质及分类.....	11
2.2 岩石的强度特性.....	13
2.3 岩石的强度理论.....	14
第三章 大直径嵌岩桩荷载传递机理	18
3.1 嵌岩桩荷载传递的基本特征.....	18
3.2 嵌岩桩侧摩阻力分析.....	18
3.3 嵌岩桩桩端阻力分析.....	21
3.4 嵌岩桩破坏模式分析.....	24
3.5 成桩工艺、成孔时间及泥皮对嵌岩桩承载特性影响	24
3.6 桩岩界面特征及桩底沉渣对嵌岩桩承载特性影响.....	30
3.7 小结.....	36
第四章 嵌岩桩承载性能的理论研究	37
4.1 尺寸效应及岩石特性对嵌岩段侧摩阻力影响.....	37
4.2 尺寸效应及岩石特性对嵌岩桩桩端阻力影响.....	50
第五章 室内模型试验研究	62
5.1 尺寸效应室内模型试验研究.....	62
5.2 孔壁粗糙度及桩底沉渣室内模型研究.....	77
第六章 大直径深长嵌岩桩承载力计算方法	123
6.1 尺寸效应及岩石特性对嵌岩桩承载分项系数影响	123
6.2 规范中有关嵌岩桩承载力的计算方法	150
6.3 本课题研究成果下的嵌岩桩承载力公式	154
6.4 工程实例验算	156

6.5	荷载一位移计算方法研究	162
6.6	小结	164
第七章	嵌岩桩质量检测	165
7.1	深长嵌岩基桩成孔质量检测	165
7.2	钻芯法完整性检测	167
7.3	桩身混凝土强度检测	168
7.4	嵌岩桩基承载力检测方法	169
7.5	小结	178
第八章	工程应用	179
8.1	西墩门大桥	179
8.2	青岛海湾大桥	184
8.3	荆岳长江公路大桥	192
8.4	南京长江三桥	217
8.5	贵州坝陵河大桥	220
第九章	结论	226
9.1	主要结论及成果	226
9.2	展望	230
参考文献	231
附录 1	岩块的扰动系数 D	240
附录 2	不同岩石 m_i 值	242
附录 3	浅基础的破坏模式和计算方法	244
附录 4	岩石的分类指标 RMR	251
附录 5	嵌岩段桩侧极限摩阻力统计表	255
附录 6	桩端极限阻力统计表	260
附录 7	上覆土层桩侧极限摩阻力统计表	265
附录 8	大直径深长嵌岩桩设计指南	268
附录参考文献	281

第一章 绪 论

1.1 立 项 背 景

近几十年来,随着国民经济的高速发展,高速和重载成为公路和铁路的发展趋势,建筑物也越来越高大,因此,它们的基础承受的荷载也越来越大,桩基因其独特的优势越来越多地被人们所采用,特别是现在大型桥梁基础工程中大多采用桩基础。与其他基础形式相比,桩能够将上部结构的荷载传递到深层稳定的土层或基岩中去,从而大大减少基础的沉降和不均匀沉降,所以桩基础在地震、软土地区以及冻土地区等都有着广泛的应用。

嵌岩桩作为钻孔灌注桩的一种重要类型,正日益受到人们的重视和信任。嵌岩桩是指桩身一部分或全部埋设于岩石中的桩基础。嵌岩桩与其他类型的桩基相比具有明显的优点,它充分利用了基岩的承载性能,从而提高了单桩承载力。更重要的是嵌岩桩由于桩端持力层是压缩性极小的基岩,单桩沉降量很小,群桩效应小,而且建筑物的沉降在施工过程中便可完成。以嵌岩桩为基础的建筑物在地震过程中产生的地震反应也比其他基础型式更轻微、抗震性能更好。嵌岩桩具有单桩承载力高、沉降小且收敛快、抗震性能好、群桩效应小等特点,是桥梁、高层建筑、重型厂房等结构荷载较大、沉降要求较高的建(构)筑物的重要基础形式,在工程实践中得到了越来越广泛应用。

西堍门大桥主跨达 1650m,是世界上首座特大跨径分体钢箱梁悬索桥,跨径 578m + 1650m + 485m,如图 1-1 所示。西堍门大桥是浙江省舟山连岛工程的核心工程。项目位于浙江省东北部的东海海域,连接舟山、宁波两市,是国家高速公路网规划中杭州湾环线的联络线的重要组成部分。西堍门大桥地处台风影响频繁的舟山群岛,气象条件复杂,风速高,且面临恶劣的海洋腐蚀环境;水深流急,流态复杂,施工条件极端恶劣,桩基水下施工难度大。西堍门



图 1-1 西堍门大桥

大桥北塔桩基采用 24 根 $\phi 2.8\text{m}$ 钻孔灌注桩。左区 1~12 号桩基础底标高均为 -25.00m , 顶标高 15.00m , 桩长 40m 。右区桩基 13~21 号桩基础底标高为 -25.00m , 桩长 40m ; 22~23 号桩基础底标高为 -38.5m , 桩长 53.5m ; 24 号桩基础底标高为 -40.5m , 桩长 55.5m 。为保证桩基竖向荷载直接传递到深层基础, 桩体嵌入微风化层, 整桩基本全嵌入岩层。

荆岳长江公路大桥总建设里程为 5.42km , 主桥采用主跨 816m 双塔混合梁斜拉桥方案。桥址位于湖北、湖南两省交界处, 地处长江中游江汉冲湖积平原和江南低山丘陵过渡地带, 北岸以平原为主, 沿江一带零星分布低山残丘; 南岸主要是低山丘陵地形, 湖泊星罗棋布。为保证桩基竖向荷载直接传递给深层基础, 桩体嵌入微风化泥岩中。

青岛海湾大桥是国家高速公路网规划中的青岛至兰州高速(M36)青岛段的起点, 山东省“五纵四横一环”公路网主框架中南济青线的重要组成部分; 是青岛市道路交通规划网络布局中胶州湾东西岸跨海通道中的“一路、一桥、一隧”重要组成部分。青岛海湾大桥东起青岛主城区 308 国道, 跨越胶州湾海域, 西至黄岛红石崖, 路线全长新建里程约 35.4km , 其中海上段长度 26.75km , 青岛侧陆上桥梁 5.85km , 红石崖侧陆上段桥梁及道路共 0.9km , 红岛连接线长 1.9km , 总投资 99.38 亿元。因其特殊的地理位置, 桥梁基础要承受较大的荷载。根据场地地质条件、工程特点, 必须选用桩基础, 以微、弱风化岩层为持力层。

南京长江第三大桥位于南京长江大桥上游约 19km 处。南岸位于新秦淮河口上游约 800m , 属南京市雨花台区; 北岸在西江口下游约 1000m , 属南京市江浦区。大桥全长 4744m , 由主桥和引桥两部分组成, 其中主桥长 1284m , 设计为双柱钢箱梁斜拉桥, 主跨 648m ; 引桥长 3460m , 其中南引桥长 680m , 北引桥长 2780m , 桥宽 32m 。该大桥为沪蓉国道主干线的重要组成部分。为保证桩基竖向荷载直接传递给深层基础, 桩体嵌入微风化泥岩中。

为了保证施工的顺利进行和结构的安全可靠, 上述大型工程桩基础直径都在 1.2m 以上, 桩长在 40m 以上, 有的甚至达到 100m , 大部分嵌入中风化岩层, 嵌岩深度一般都在 10m 以上。本课题定义桩径在 2m 以上, 嵌岩深度超过 $5d$ (d 为桩身直径) 的嵌岩桩为大直径深长嵌岩桩。

但是由于这些大型工程的嵌岩桩基所处地质条件的差异、桩身混凝土质量的不稳定、施工工艺的多样性、桩极限承载力较高、试桩试验不能达到破坏等原因, 嵌岩桩的承载性状至今尚不完全清楚, 人们对嵌岩桩的承载性状存在着不同的认识, 各国规范、各地区规程, 在其承载力及位移计算上相差较大。这样便产生两方面的问题: 一是保守设计造成大量浪费; 二是对桩承载力估计过高和施工质量等问题等种种原因造成工程事故。因此, 认清嵌岩桩的承载性能, 正确选择嵌岩桩设计参数, 确定其承载力计算公式就成为当今桩基工程的一个热点问题。

为此, 有必要研究大直径深长嵌岩桩的荷载传递机理、桩径、嵌岩比、岩石特性、成桩工艺、桩底沉渣厚度、孔壁粗糙度、泥皮对嵌岩桩承载力的影响。

1.2 国内外嵌岩桩承载机理研究现状

大量试验结果和有限元分析结果表明, 影响嵌岩桩承载力的因素是极其多样的, 并且各种因素的作用往往并不独立, 而是结合在一起发挥作用, 这就使得嵌岩桩的承载性状变得更为复杂。从直观和经验的角度来看, 嵌岩段长度、桩直径、岩石强度、岩块质量、成桩工艺、桩底沉渣、孔壁粗糙度、泥皮等因素对嵌岩桩承载力的影响是显而易见的。

1.2.1 国外研究现状

早在1969年 Reese 等在第七届国际土力学及基础工程会议上就发表了世界较早的一根埋设量测元件的嵌岩桩桩顶荷载随深度传递的量测资料。该桩长度 5.5m (18ft), 桩径 0.76m (30in), 嵌岩深度 $h_r = 4.2D$ 。实测结果表明, 桩端反力约占总荷载的 15% ~ 25%。

Benmokrane 等通过嵌岩桩模型试验说明, 在嵌岩桩桩底存在岩体软弱夹层面时, 夹层面倾角不同对嵌岩桩的极限承载力影响也不同, 但如何考虑其影响有待进一步研究。

Vesic 认为桩土相对位移达到 10mm 时, 桩侧摩阻力充分发挥达到极限, 而且该值与土类、桩尺寸及施工方法无关; 同时, Vesic 认为桩端阻力要充分发挥所需的桩端相对沉降量约为 8% ~ 25% 桩径的沉降量。

阪口理认为相对位移量达到 10 ~ 20mm 时, 桩侧摩阻力达到充分发挥。Hassan 和 O' Neill 认为由荷载试验得到的 s_{max} 受到桩侧土体塑性剪切流动的影响, 从而使 $\tau \sim s$ 曲线更加非线性化, $\tau \sim s$ 曲线的形状很大一部分取决于荷载试验的方法和桩侧土的蠕变特性。Pells 和 Turner 认为嵌岩桩达到极限承载状态时岩石的破坏为塑性破坏, 利用类似土力学的承载力理论进行分析或根据破坏包线峰值弯曲形状进行修正, 指出充分发挥桩端承力所需的沉降量很大, 并给出了基础平均沉降的折减系数和刚性基础的沉降折减系数; 同时用弹性有限元法分析岩石弹性模量 $E_{岩}$ 与桩体弹性模量 $E_{桩}$ 比值较低的短桩的沉降影响系数与嵌入深度 L/D 及 $E_{岩}/E_{桩}$ 的关系。他们的工作是弹性有限元分析的一个标志, 使定性分析阶段转向定量分析阶段, 同时认为桩端荷载分担比是桩岩模量比和嵌岩深度的函数, 并提出了相应的设计思路。

Williams et al. (1981) 提出岩块节理降低桩侧摩阻力, 其原因是岩块里的节理降低其法向刚度, 并于同年提出了考虑岩块节理对桩侧摩阻力影响的计算式, 如图 1-2 所示。

Pells, Rowe 和 Turner (1980) 在室内模型试验和现场试验的基础上得出了一些有意义的结论: ① 桩岩界面的粗糙度是影响荷载位移曲线变化的主要因素; ② 桩岩交界面的清洁程度对侧阻也有重要影响; ③ 对风化程度不太严重的岩石, 可以建立极限侧阻与岩石单轴抗压强度的相关关系。但他们的研究局限在桩整体的受荷反应上, 没有涉及桩岩界面各点的剪应力的变化。

Horvath, Kenney 和 Trow (1980) 在总结澳大利亚、英国、美国 50 多处嵌岩桩试桩资料的基础上, 建立了桩侧阻力与岩石饱和单轴抗压强度的关系。

Kulhawy 和 Goodman (1980) 提出了考虑水平节理间距和竖向节理间距对极限端阻力的计算式 (见附录 3)。

Rowe 和 Armitage (1987a) 对影响侧阻力发挥的几个因素包括桩岩模量比、嵌岩比、界面粗糙度等进行了数值模拟。

Rowe 和 Armitage (1987b) 在文章中根据桩岩接触面的粗糙度不同提出了计算桩侧阻力的方法, Dykeman 和 Valsangkan (1996) 通过模型试验验证了其合理性。

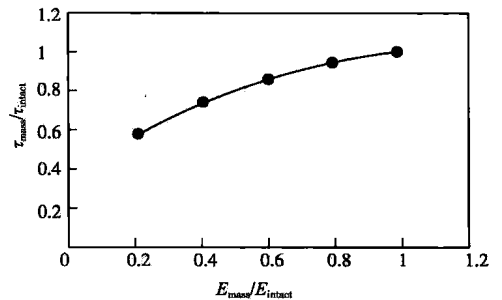


图 1-2 岩体的破碎程度与桩侧摩阻力的关系

Leong 和 Randolph(1994)得出结论,即嵌岩比增大,桩侧阻力略有减小;桩径增大,单位侧阻力略有减小;岩性越好,桩侧阻力越大。

O' Neil 和 Hassan(1994)提出了双曲线型式的桩侧荷载传递模型。该模型建立在桩岩交界面粗糙度均匀,且接触式形式为刚性的基础上。此模型见式(1-1),后来被广泛认同。

$$\tau(z) = \frac{\omega(z)}{\frac{2.5B}{E_m} + \frac{\omega(z)}{\tau_{\max}(z)}} \quad (1-1)$$

式中: B ——桩径;

E_m ——岩石的弹性模量;

$\omega(z)$ ——桩—岩相对位移;

$\tau(z)$ ——嵌岩段桩侧摩阻力;

$\tau_{\max}(z)$ ——嵌岩段桩侧极限摩阻力。

Carrubba(1997)以现场实测荷载位移曲线为基础,桩侧和桩端采用双曲线型式的荷载传递模型,寻求桩侧阻力和桩端阻力的数值解法。

Serrano A. 和 Olalla C(2003)利用 Hoek-Brown 强度准则推算出最小嵌岩深度和极限端阻力;2004年,运用 Hoek-Brown 强度准则推导出计算桩侧极限侧阻力的理论公式,并把推导出的计算公式和多种经验公式对比,发现推导出的计算公式对深长嵌岩桩侧摩阻力的计算比较合理,对短桩的计算偏于安全。2006年 Serrano A. 和 Olalla C 将 Hoek-Brown 推导出来的桩侧平均摩阻力计算公式与现场实测数据对比,发现用公式计算出来的桩侧平均摩阻力数值过于保守。

M. G. Zertsalov 和 D. S. Konyukhov (2007)论述到桩身荷载传递率不仅是嵌岩比的函数同时也是桩体材料弹性模量与岩体弹性模量比值的函数,如图 1-3 所示。图中 Q_x 为桩顶以下 L_x 长度时桩身截面轴力, Q 为桩顶荷载, L 为桩长。

当 L 增加时,桩侧承担大部分荷载,并且荷载传递曲线会越不均匀;当 $L/D = 1$ 时,桩端承担 50% 的桩顶荷载;而当 $L/D = 4$ 时,桩顶荷载大部分由桩侧上部承担。

当 $E_r/E_c = 5.0$ 时,桩体受压产生侧向膨胀,桩周岩体阻止其侧向膨胀,由于岩体弹性模量高于桩体弹性模量,导致作用于桩侧法向应力增加,桩侧摩阻力增加;相反,当 $E_r/E_c = 0.5$ 时,桩侧摩阻力减小。

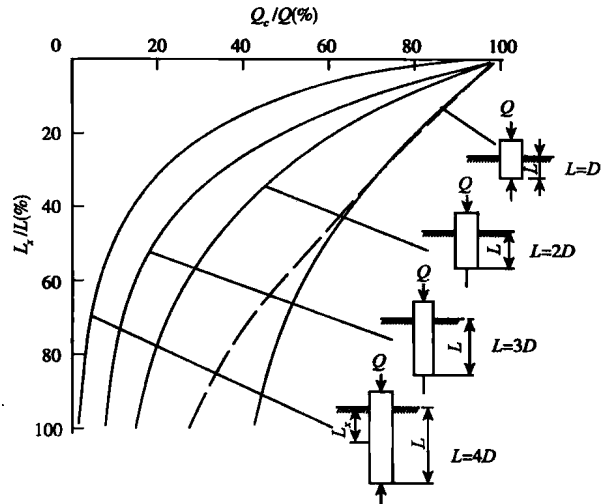


图 1-3 桩身荷载传递曲线与嵌岩比和 E_r/E_c 的关系
 E_r 为桩周岩体弹性模量; E_c 为混凝土弹性模量
 $E_r/E_c = 5$ (实线); $E_r/E_c = 0.5$ (虚线)

1.2.2 国内研究现状

20 世纪 90 年代以前,国内规范将嵌岩桩当成端承桩来处理,只重视对桩端阻力发挥的研

究。近年来,随着对嵌岩桩研究的不断深入,人们在工程实践中逐渐认识到,嵌岩桩的侧阻力也同样不可忽视,有时甚至成为承担外荷载的主要作用反力,即嵌岩桩有时也会呈现出摩擦桩或端承摩擦桩的承载性状。但由于对嵌岩桩的受力模式和受力机制的认识还不是很清楚,导致设计人员进行嵌岩桩设计时仍过于保守。同时,嵌岩桩承载性状的结论多集中在试验研究和经验分析上,对嵌岩桩荷载传递的理论分析,由于所嵌岩石性质和状态的不同而造成的嵌岩桩承载特性的差异等问题还缺乏更深入的研究。

四川省公路规划勘察设计研究院试验室(1984)认为,嵌入无覆盖层的软质岩石中的桩轴向受力机理是在桩底有足够刚度的条件下,荷载主要由互相嵌合的桩岩界面传入地基中,认为用端承力加侧阻力再取安全系数的计算方法需要考虑。

黄求顺(1992)在山区嵌岩桩试验基础上,提出了最佳嵌岩深度和最大嵌岩深度的概念。这里的最佳嵌岩深度是指从桩的承载力发挥效果、经济性和施工方便的角度综合考虑,确定的有明显绩效的入岩深度;最大嵌岩深度指嵌岩桩在嵌入岩石时,桩端阻力为零的临界入岩深度。黄求顺认为嵌岩桩的最佳嵌岩深度为3倍桩径,最大嵌岩深度为5倍桩径。史佩栋、梁晋渝(1994)通过对国内外150根嵌岩桩的静载试验资料的研究,得出了嵌岩桩在竖向荷载下桩端阻力分担荷载比(Q_b/Q)随桩的长径比(L/D)而变化的规律,从图1-4可以看出:嵌岩桩即使是 $L/D < 5$ 的短桩,也并非都是端承桩。当 $1 < L/D < 20$ 时, Q_b/Q 自100%随 L/D 增大而递减至大约30%;当 $20 < L/D < 63.7$ 时, Q_b/Q 一般不超过30%,其中大部分桩在20%以下,不少桩在5%以下。与此对应,桩侧摩阻力 Q_s 常在 $L/D \geq 10 \sim 15$ 时(有时在 L/D 更小时)即起主要作用, Q_s/Q 随 L/D 增大而增大,一般保持在70%以上,大部分在80%以上,不少桩在95%以上。

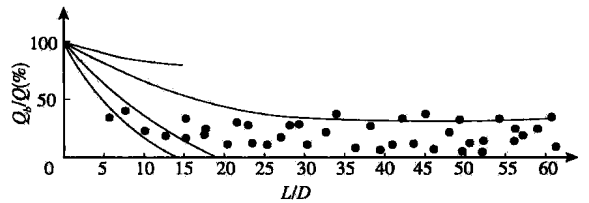


图1-4 150根嵌岩桩 Q_b/Q (%)与 L/D 的关系

宰金珉,宰金璋(1993)提供了嵌入软岩不同深度的完全嵌岩桩模型试验,结果表明在岩性条件、桩身强度相同的情况下,随着长径比的增加,传递到桩端的荷载将逐渐减小,桩身的轴力传递率(P_z/P (%))随着 L/D 的增大而提高,这也就是说,在其他条件相同的情况下随着 L/D 的增大,在同一截面上的轴力也增大。因此,随着桩长的增加,桩顶荷载向桩身上部集中的趋势极为明显。

《桩基工程手册》(1995)对直径为1000mm的模型嵌岩桩桩侧阻力随深度变化的情况进行了量测和计算,在 $h_s/D = 0.5$ 左右时,桩侧阻力达到最大值,随着深度增加又有所减小。

董金荣(1995)总结多个工程实例发现,以硬质岩为桩端持力层的嵌岩桩,其承载力受桩身混凝土强度控制。吕福庆(1996)根据71根嵌岩桩静载试验的实测资料,按桩顶沉降量的大小对 $Q \sim s$ 曲线进行了分区,划分了嵌岩桩的破坏类型;同时发现持力层的岩性和混凝土与岩石壁面的胶结程度对桩岩嵌固力的大小具有决定性影响。

1996年,王国民发现软岩嵌岩桩当嵌岩深度为10倍桩径时,桩底反力仅为桩顶荷载的0.25%~0.3%,即“红层”类软质岩的最大嵌岩深度为10倍桩径。明可前(1998)认为,钻孔嵌岩桩的承载力及桩岩嵌固力随嵌岩深度线性增加,当嵌岩深度为4倍桩径时,承载力发挥最好。刘利民(1997)在对嵌岩桩桩端阻力的研究中认为,规范依据桩端岩石的单轴抗压强度确

定端阻力虽然应用方便,但很难反映岩石真实的受力状态,因而往往会得到偏小的计算结果,给工程带来不必要的浪费。刘松玉(1998)等人在对南京地区软岩嵌岩桩荷载传递性状的研究中发现,泥质软岩地区嵌岩桩的最大嵌岩深度为7倍桩径。由此可见,不同的地质条件有着不同的最佳嵌岩深度和最大嵌岩深度,即使地质条件相同,其最佳嵌岩深度和最大嵌岩深度也会因施工因素而不一定相同。

明可前(1998)通过中风化砂岩中嵌岩桩的模型试验对嵌岩桩桩侧摩阻力的分布模式进行了系统分析,桩身和桩周岩体的力学参数为: $E_p = 22.44\text{GPa}$ 、 $\mu_p = 0.168$ 、 $E_r = 400.4\text{MPa}$ 、 $\mu_r = 0.214$;通过对实验数据进行处理和分析后提出,对于桩长较短的桩,桩侧摩阻力呈“上小下大”的分布模式,桩端附近的桩侧阻力呈现明显的强化效应,即桩侧阻力沿桩长是不断增加的;而对于中长的桩,桩侧摩阻力分布呈两头大、中间小的“抛物线”分布模式;对于长桩桩侧摩阻力呈“上大下小”的分布模式。

邱钰,刘松玉,周琳(1999)采用线弹性与弹塑性模型,运用有限元法对大直径深长单桩的承载力性状进行了分析。分析表明:桩身弹性模量、嵌入岩石弹性模量是影响单桩承载力及沉降的主要因素;当嵌入软质岩石时,嵌岩深度可适当加深。

刘兴远,郑颖人(2000)以BP网络模型为基础,讨论了桩径、桩长、岩体风化程度、岩石强度及嵌岩深度对嵌岩段承载特性的影响,并认为岩体风化程度是影响嵌岩桩嵌岩段特性的主要因素。张忠苗对600多根嵌岩桩试桩资料的统计分析表明:在泥浆护壁的钻孔嵌岩桩中,即使嵌入中等风化岩石的深度达 $8D$,在较大的荷载作用下仍有端阻力存在,并不存在端阻为零的最大嵌岩深度。刘树亚(2000)提出桩岩模量比越大,剪切模量越小,界面的剪应力分布越均匀,只要桩端分担比例不高,桩侧岩体的破坏对桩的荷载~位移曲线影响不大;当桩岩界面条件较差时,端阻承担的荷载比例增大,破坏区不仅发生在桩侧,桩底单元也出现拉裂和屈服,荷载~位移关系表现为明显的曲线图,位移的大小可能成为设计的控制条件。

陈斌,卓家寿(2002)采用Duncan非线性E-B模型对完全嵌岩桩在垂直荷载作用下的承载性状进行了分析,得出的结论很有意义,从计算结果可以看出:①绝大多数情况下,嵌岩桩桩侧阻力与桩基规范中所给定的分布形式有较大差异;②嵌岩桩桩侧阻力非线性分布的现象突出,明显表现为“双峰”,即桩身上部和下部出现局部增大,上部的峰值多出现在 $0.15L$ (L 为桩长)附近的位置,下部的峰值多出现在 $0.75L$ 附近的位置。该文献并没有对造成桩侧阻力上述分布的原因做进一步的分析。初步认为,出现上部峰值的根源在于嵌岩桩桩侧阻力较大,使得桩侧阻力一开始就能承担很大的荷载,因此就会出现上部的峰值;在桩身材料强度一定的情况下,嵌岩桩的极限承载力并不会随着桩长的增加而线性增加,这样,传递到桩端荷载的比例将随着桩长的增加而逐渐减小,明显削弱了桩端岩石对桩侧阻力的强化效应,导致下部峰值的减小。

张建新、吴东云(2003)通过模型试验发现,嵌岩段的破坏模式与桩岩相对强度有关,随着桩岩相对刚度的变化,破坏位置可能发生在桩岩界面、桩周岩体或桩体本身。

由于嵌岩桩桩端嵌岩的特殊性,众学者对于嵌岩深度(h_r)的选择以及嵌岩深度对嵌岩桩承载性状的影响程度众说纷纭。吴玉山等对无覆盖嵌岩短模型桩所做的穿透试验表明:穿透试验桩侧阻力很高,嵌岩桩侧阻力沿桩身并不递减,要充分利用桩端承载力,嵌岩深度不宜过深,一般取 $1.0 \sim 1.5\text{m}$ 即可,嵌岩段应力作为整体来考虑。吕福庆、吴文等对武汉地区71根

嵌岩桩静载试验成果进行了分析,特别是对破坏性试桩的分析后得出,在高荷载水平下沿着桩周岩石壁面的剪应力超过桩岩界面的侧阻力时且桩身混凝土强度较低时就发生剪切破坏,同时指出嵌岩桩的最佳嵌岩深度与许多因素有关,难以定论。

赵明华,曹文贵,刘齐建,杨明辉(2004)以现场嵌岩桩试桩资料为基础,桩侧采用佐腾悟(1965)线弹性—全塑性数学模型(图 1-5),桩端采用三折线模型(图 1-6),建立按桩顶沉降控制嵌岩桩竖向承载力的计算方法。该方法充分考虑桩侧土(岩)阻力及桩端岩层阻力发挥程度,尤其适用于超长嵌岩灌注桩竖向承载力的计算。

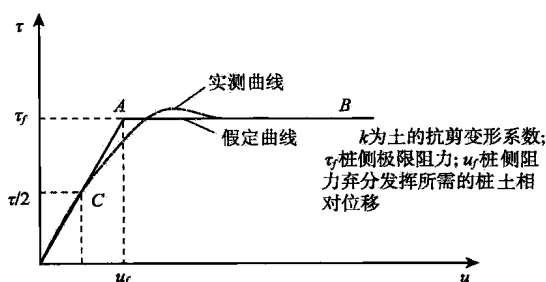


图 1-5 桩侧荷载传递函数 $\tau(z) \sim u$ 曲线

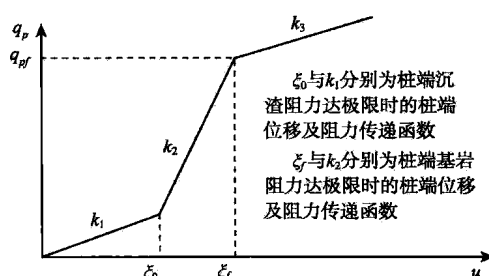


图 1-6 桩端荷载传递函数 $q_p \sim u$ 曲线

《建筑桩基设计规范》(JGJ 94—2008)给出了嵌岩桩桩侧阻系数随嵌岩深度变化而变化的情况,从中可以看出,嵌岩段端、侧阻综合系数 ζ 随嵌岩深度增加而增大,但最终趋于平缓。

邱钰,刘松玉,周琳(1999)鉴于嵌岩桩所处土层、岩层性质差异,桩侧土层、岩层及桩端岩层采用不同的双折线荷载传递函数(弹性—全塑性模型、弹性—硬化模型),导出了嵌岩桩单桩沉降计算的一种解析算法。并利用所得的公式对深长嵌岩桩沉降曲线特点,影响嵌岩桩单桩承载力、单桩沉降的因素等进行了讨论。讨论表明:桩身弹性模量 E 、桩端岩石刚度 C_b 是影响桩端阻力发挥的重要因素,也是影响单桩承载力、单桩沉降的重要因素。

赵明华,雷勇,刘晓明(2009)基于桩岩结构面剪胀及破坏机制,建立适于弱质岩石嵌岩桩侧摩阻力传递模型,求得破坏及弹性条件下桩侧摩阻力及桩身轴力的解析式,并由此推导出嵌岩桩的临界长度。基于所获得的解答,深入探讨桩侧摩阻力和桩身轴力随深度变化的分布规律,从理论上分析嵌岩桩桩径、桩岩模量比、剪胀角对嵌岩桩荷载传递的影响,并提出有关设计建议。提出可近似考虑各因素综合影响系数 η ,作为嵌岩桩承载性能的宏观控制指标。同等条件下, η 值越大,嵌岩桩承载性能越好,能承受的极限荷载也越大。工程算例对比分析结果表明,理论计算与实测结果吻合较好,对嵌岩桩设计有一定参考价值。

刘利民经过研究总结了孔壁粗糙度对嵌岩桩承载力影响的规律,探讨了孔壁粗糙度影响嵌岩桩承载性状的机理,分析了影响嵌岩桩孔壁粗糙度的因素,指出改善孔壁粗糙度是提高钻孔灌注桩承载力的有效途径。

陈竹昌认为桩岩界面粗糙度和成孔时间是影响侧摩阻力的重要因素,嵌岩段孔壁越粗糙,对桩岩侧阻力的发挥越有利,并能减少泥皮的不利影响,因此施工过程中不仅要控制泥皮厚度,还应尽量增大孔壁粗糙度。成孔时间过长会引起钻孔应力释放、孔壁泡水软化、泥皮厚度增大等不利影响。

何剑根据西宁地区泥岩地基中 3 根大直径钻孔灌注桩的竖向抗压静载试验,通过对基桩

的承载力特性、桩身轴力传递以及桩侧和桩端土阻力发挥性状的测试分析,结合施工工艺以及施工过程中出现的异常现象,研究了钻孔对桩侧阻力和桩身轴力传递的影响、泥浆循环方式对桩端阻力的影响以及混凝土灌注的连续性对桩承载力的影响,得出了一些对相同地区同类基桩的设计、施工具有指导意义的结论。

张忠苗在超长嵌岩桩的载荷试验中发现:桩底沉渣除了降低桩端阻力之外,还要降低桩侧的阻力。并解释了造成这一现象的原因:桩侧阻力是由于桩与桩侧土之间的相对位移而产生的,并且在桩顶不同荷载水平下自上而下地逐渐发挥。当桩端无沉渣时,靠近桩端处桩与桩间土之间的位移不会很大,随着作用在桩顶荷载的增加,桩侧阻力缓慢增加;而当桩端有较厚的沉渣时,随着桩顶荷载水平的增加,靠近桩端处桩与桩端土迅速滑移,出现破坏,从而降低了桩侧阻力。

张建新为了探讨桩侧的粗糙程度对桩侧阻力的影响,以嵌岩桩为例,通过室内模型试验和数值模拟分析对该问题进行了研究。结果表明桩侧孔壁粗糙程度直接影响着桩侧阻力的大小和分布,也影响着桩侧阻力的发展进程。认识到:当桩侧从光滑到具有一定粗糙度时,桩侧阻力有很大幅度的增长,但随着粗糙度的进一步提高,桩侧阻力提高的幅度将减小。施工时可通过一定的技术方法增加孔壁的粗糙度,从而提高钻孔灌注桩的承载力。

盛俊在大量数据资料的基础上,对竖向荷载作用下嵌岩桩的桩侧摩阻力性状进行了较为系统的研究,指出孔壁越粗糙对桩—岩侧阻力发挥越有利,并且它决定了桩—岩侧阻力与桩岩相对位移之间的曲线形式究竟是加工软化型还是加工硬化型。并结合回转钻进施工方法,探讨了岩石强度、岩体质量、岩石类型、桩径等因素与孔壁粗糙度间的相互关系;得出钻孔桩(嵌岩桩)的桩端效应是同桩端沉渣在导管灌注混凝土过程中形成的附加泥皮有密切关系的,较全面地探讨了不同钻进开挖施工方法对嵌岩桩桩—岩侧阻力的影响,建议采用提高孔壁粗糙度和减小泥皮厚度相结合的施工技术与工艺来充分发挥桩—岩侧阻力潜力。

周东针对广西地区建筑工程中典型泥岩的基本类型和特点,设计了三组嵌岩桩模型试验。试验表明,嵌岩桩在泥浆浸泡后嵌岩段侧阻力下降,泥浆浸泡时间越长,嵌岩段侧阻力下降越大,泥浆浸泡对嵌岩桩破坏范围也有影响;成桩后随放置时间增长,嵌岩段侧阻力先降后升,认为在软岩地区要重视泥浆对嵌岩段侧阻力的影响。

1.3 嵌岩桩承载性能的研究方法

目前,国内外对于嵌岩桩的研究方法主要可归纳为三种:

(1) 原位测试法

这一方法是国内外研究嵌岩桩最为常用的手段。因为测试本身与设计、施工是一致的,设计需要测试结果的验证,测试又是进一步认识嵌岩桩承载性能从而指导嵌岩桩设计的依据。国内对于嵌岩桩的著述大多基于此,研究人员主要有史佩栋、吕福庆、董金荣、刘松玉等,国外主要有 R. Radhakishnan, Chun F. Leung, M. C. McVay, F. C. Townsend 和 R. C. Williams 等。

原位静载试验是检验嵌岩桩承载力最权威的手段,对于影响桩承载力的因素考虑最为全面,所测试状态和桩的工作状态最为接近。但由于每个工程都面临不同的地质条件、不同的上部荷载,各试桩的桩长、桩径、嵌岩深度以及施工造成的不定因素等存在很大差别。这样就会

严重降低各个测试数据之间的可对比性,难以得出严格的规律性认识。

(2) 数值分析法

近几十年来,电算技术迅猛发展,使得数值计算在岩土工程领域异军突起,极大地推动了人们对于这一领域的定量化认识。

在国外,R. W. Vogan(1977)和 J. Osterberg(1973)用弹性有限元模拟了混凝土和岩石的工作状态;R. K. Rowe(1980)采用双节点法模拟岩石界面,分析了界面软化行为的影响因素和桩侧剪阻力发挥的影响因素;I. B. Donald(1980)使用弹塑性有限元法对嵌岩桩进行排水和不排水加载分析;C. F. Leung(1989)用无限元模拟岩体的无界域,认为考虑远域对结果影响不大。

在国内,刘树亚(1998)采用薄单元法和相应的界面模拟对嵌岩桩的承载特性进行了模拟。通过模拟每一种影响因素的不同量值,定量地界定每一因素对嵌岩桩工作状态的影响程度,其缺点在于所采用地数学模型均为简化模型,不可能是一个精确的、全面反映嵌岩桩实际工作状态的数学模型,所模拟的情况也只能侧重反映某些因素,所以在应用这些方法时,必须明确其适用条件。

(3) 室内试验法

基于前两种方法的局限性,室内试验在研究嵌岩桩方面有着不可替代的作用。在国外,I. W. Johnson, T. S. K. Lam 和 A. F. Williams(1989)用常量法向刚度直剪试验研究了软岩嵌岩桩中桩岩剪切的情形,得出了该类桩侧阻力的发挥受控于桩侧法向刚度常量的结论,他们还利用混凝土与人工软岩的三角形连接剪切试验,得到了桩岩侧阻力的解析式;B. Indraratna, A. Haque 和 N. Aziz 通过常量法向刚度直剪试验,研究了不同剪胀角条件下,桩岩之间软弱夹层对侧阻力的影响。在国内,由于种种条件的限制,很少见到在室内试验方面对嵌岩桩进行研究的报道。

1.4 主要研究内容

(1)分析岩石的特性及其强度理论,详细说明了勘察孔的布置、数量及深度,并在勘察采用钻探、井探、原位测试和室内试验相结合的勘探方法,多方面全方位地综合评价了地基岩土的工程特性

(2)对大直径嵌岩桩的荷载传递机理进行了初探,分析了嵌岩桩侧摩阻力及端阻力的发挥特性及嵌岩桩的破坏模式。

(3)通过对国内外文献嵌岩桩试桩资料的数据进行处理,并与现行嵌岩桩嵌岩段桩侧极限侧阻力和桩端极限侧阻力计算方法进行对比,研究桩径(D)、桩长(L)、嵌岩比(n)、岩石类别、岩石质量等级[RMR(%),附录4]和完整岩石无侧限抗压强度 σ_c 对嵌岩桩嵌岩段极限侧摩阻力和极限端阻力的影响及其影响的程度;并对现行的计算方法进行评比,提出对于坚硬程度不同的岩石,其极限侧阻和端阻计算公式应该具有的函数模式和系数来反映完整岩石无侧限抗压强度 σ_c 、岩石质量等级 RMR(%) 对其的影响。

(4)通过对桩全长嵌入岩层中的模型试验的试验数据处理与分析,研究当桩全长嵌入软岩中,桩径 D 和嵌岩比 $n = h_r/D$ (H_r 为嵌岩段长)对其承载力的影响。

(5)通过对桩侧摩阻力发挥机理的研究,利用“小孔扩张理论”建立数学模型,模拟“剪

“一切—膨胀”理论,以 Hoek-Brown 破坏准则为标断标准,并对前人成果进行归纳、总结和推导,建立嵌岩桩桩侧极限摩阻力的计算方法;并以实际工程为基础,利用推导出来的嵌岩桩桩侧摩阻力计算式分析桩径(D)、嵌岩比(n)、岩石质量等级 RMR(%) 和完整岩石无侧限抗压强度 σ_c 对极限侧阻力的影响,并与现行的计算方法进行比较,证明推导出的改进桩侧摩阻力计算式能较真实反映嵌岩桩实际的承载力,为嵌岩桩嵌岩段侧摩阻力的计算提供借鉴和参考。

(6)通过对嵌岩桩桩端破坏模式的研究,分析浅基础与深基础的破坏模式的不同,并对现行桩端极限阻力的计算方法和 Zhang & Einstein(1998)建立的基于二维 Hoek-Brown 准则的桩端极限端阻力计算方法进行研究和对比,利用集中力作用于土(岩)体内部时的 Mindlin 解答,建立基于三维 Hoek-Brown 破坏准则的桩端极限阻力的计算方法,考虑到所采用的三维 Hoek-Brown 准则的适用性,对该计算方法进行限定,并计算和分析嵌岩段桩径(D)、嵌岩比(n),桩端岩石的质量等级 RMR(%)、完整岩石无侧限抗压强度 σ_c 等参数对极限端阻力的影响,并与现行的桩端极限端阻力计算方法对比分析,指出各计算方法的优缺点,为嵌岩桩嵌岩段桩端阻力的计算提供借鉴和参考。

(7)孔壁粗糙度、桩底沉渣、成孔时间、泥皮、成桩工艺等对嵌岩桩承载性状的影响均与施工方法有关,而纵观国内外的关于施工因素方面的研究还远远落后于其他方面的研究,而这些因素对承载力的影响在国内外规范中基本上没有反映出来,这就给设计和施工带来一定的隐患或者是浪费。通过引用工程实例探讨成孔时间、泥皮、成桩工艺对嵌岩桩承载特性的影响,通过室内模拟试验研究孔壁粗糙度和桩底沉渣对深长嵌岩桩整体承载力、桩侧摩阻力、桩端阻力的影响及侧摩阻力与桩岩相对位移的关系,进一步探索出嵌岩桩极限承载力的破坏模式,为嵌岩桩的设计和提供研究提供参考。

(8)总结了几种常见的嵌岩桩基承载力试验方法,分析比较各自的特点。重点介绍了桩基承载力的自平衡测试法及其在嵌岩桩承载力测试中的优越性。

(9)以西墩门大桥、青岛海湾大桥、荆岳长江大桥嵌岩桩基静载试验数据为基础,着重研究了大直径嵌岩桩的承载特性。介绍了后压浆技术及其在嵌岩桩基中的应用,并用数值分析方法分析了后压浆对嵌岩群桩基础的承载及沉降影响。

(10)各规范关于嵌岩桩竖向承载力的计算有所区别,通过课题研究,建立更加符合实际情况的承载力公式。