

压力型锚杆力学性能模型试验研究

张永兴¹, 卢黎¹, 饶泉宇², 李剑²

(1.重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045; 2.重庆交通科研设计院, 重庆 400067)

摘要: 为了研究在软质沉积岩条件下压力型锚杆的力学性能, 进行了缩尺模型试验。设计的试验锚杆构造良好, 模拟的承载体和无黏结形式简单可靠。通过设计不同的锚固段长度, 试验获得了岩石条件下压力型锚杆的荷载-位移全曲线。与相同条件的普通拉力型锚索对比, 压力型锚杆体现出优秀的抗拔极限承载力、良好的位移延性特征和残余强度; 在归纳压力型锚杆破坏模式的基础上提出最佳锚固长度的基本范围, 并按理论解进行了算例验证, 计算结果与试验结果吻合良好。模型试验对压力型锚杆的力学性能进行了较深入探索, 可供相关理论研究、科学试验和工程实践参考。

关键词: 压力型锚杆; 模型试验; 力学性能; 最佳锚固长度

中图分类号: TU 32

文献标识码: A

Model test research on mechanical behavior of compression type rock bolt

ZHANG Yong-xing¹, LU Li¹, RAO Xiao-yu², LI Jian²

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China;

2. Chongqing Communications Research and Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Behavior of compression type rock bolt in soft sedimentary rock is studied by the scale model test in laboratory. Well-designed test rock bolts have good constructional detail of bearing plates and reliable unbonded steel strands. The full load-displacement curves are obtained by test rock bolts with different fixed anchor lengths. Compression type rock bolts show much higher ultimate bearing capacity, better ductility and residual strength than usual tension type rock bolts in the same condition. The test data accord with analytic solution. Optimum anchorage length is obtained based on failure patterns. The research is a good reference for related studies, tests and engineering practice.

Key words: compression type rock bolt; model test; mechanical behavior; optimum anchorage length

1 前言

压力型锚杆(索)在工程实践中的应用日益广泛^[1-2], 而针对这种锚杆的理论和试验研究还相对匮乏。与普通的全长黏结性锚杆不同, 压力型锚杆中的钢筋(或高强钢绞线, 此时为锚索)与锚固段注浆体是完全分离的, 其承载力的传递完全通过底部与钢筋牢固连接的承载板反压锚固段注浆体而实现。因为压力型锚杆结构构造的特殊性, 其承载力由3个基本条件控制, 一是钢筋的抗拉强度; 二是锚固段注浆体的抗压承载力; 三是锚固注浆体与周围岩土体之间的黏结应力强度^[3]。需要说明的是, 对于压力型锚固体系——压力型和压力分散型锚杆

(锚索), 由于构造上钢筋(钢绞线)与砂浆锚固体全长无黏结, 不存在砂浆与钢筋(钢绞线)脱黏的破坏形态, 因此, 在单纯的抗拔力学性能试验中, 采用相同强度的锚杆或锚索结果是一样的。即本研究的相关结果同样适用于相同条件的压力型锚索。岩土锚固的设计目的之一是充分调动岩土体的承载能力, 因此, 设计者不希望第1和第2个条件成为控制因素。而由于岩土体的不均匀性和不确定性, 要弄清第3个破坏条件下的力学性能及参数, 主要需依靠大量的试验。在目前的已进行的压力型锚杆试验中^[4-6], 一般都是钢筋或钢绞线的抗拉强度起到控制作用, 当然这是压力型锚杆承载力高的体现, 但这些试验没有获得完整的荷载位移曲线, 也无法

收稿日期: 2009-07-17

基金项目: 国家杰出青年科学基金(No. 50625824); 重庆市科委科技计划公关项目(No. CSTC2008AC0077)。

第一作者简介: 张永兴, 男, 1961年生, 教授, 博导, 主要从事岩土工程研究。E-mail: cqyxyzhang@163.com

通讯作者: 卢黎, 男, 1977年生, 博士, 主要从事岩土工程教学和科研工作。E-mail: lulicq@126.com

分析锚固段整体拔出破坏时压力型锚杆的力学性能, 本文通过实际材料的室内模型试验, 克服了这个不足, 获得了荷载-位移全曲线, 为进一步研究压力型锚杆的受力特点和破坏机制创造了条件。

2 试验方案

本次模型试验的主要目的是研究在较软岩条件下的压力型锚杆传力机制, 参照前人的试验经验, 采用实际材料的缩尺模型试验。用重庆地区工程建设中的常见砂岩作为嵌固段母岩, 其天然单轴抗压强度为 22.9 MPa, 弹性模量为 3 330 MPa, 泊松比为 0.11。本试验用砂浆作为注浆材料, 配合比为水: 灰: 砂=0.6: 1: 1, 经测试其抗压强度为 39 MPa, 凝聚力 1.46 MPa, 内摩擦角 51.8°。用光面消除应力钢筋模拟锚杆, 钢筋直径 5 mm, 极限承载力为 31 kN, 张拉控制最大拉力为 28 kN。弹性模量 2.05×10^5 MPa。试验锚孔直径 20 mm。岩锚试件的钢筋横截面积占锚孔横截面积的百分率与实际工程中的百分率相近。根据已有试验和工程经验, 压力型锚杆与拉力型锚杆类似, 存在锚固的深度效应, 即锚固长度达到某一临界值之后, 注浆体与岩壁之间的黏结应力不再成为承载力的控制条件。为了减少钻孔进尺, 节约造价, 可以称这种锚固长度为最佳锚固长度。为了确定最佳锚固长度, 本次试验的 15 根锚杆分别拟定了不同的锚固长度, 以观察锚杆性能的变化。表 1 列出了代表性试验锚杆的尺寸。

表 1 代表性压力型锚杆设计尺寸

Table 1 Typical compression type rock bolt dimensions

锚杆 编号	锚固段 长度 / mm	非锚固 段长度 / mm	锚杆 编号	锚固段 长度 / mm	非锚固 段长度 / mm	锚杆 编号	锚固段 长度 / mm	非锚固 段长度 / mm
1	40	45	8	130	45	11	170	30
5	100	45	9	150	45	12	200	30
6	100	45	10	150	45	14	220	30

试验压力型锚杆的构造如图 1 所示, 设计的承载体采用 1.5 cm 厚的 Q235 钢板制作圆环, 圆环中央钻孔, 钢筋穿过中孔后用冷墩扩头, 结构简单可靠, 试验中没有出现冷墩扩头损坏。钢筋上涂抹黄油后缠裹塑料薄膜与砂浆脱黏。在事先的准备性试验中, 将脱黏段穿过 PVC 管, 再灌浆, 砂浆达到强度后, 用手即可抽出钢筋, 证明了这种脱黏方式不会对试验结果造成不利影响。

本试验用混凝土作为周围介质, 将岩体牢靠地固定在地面, 竖直向下钻孔, 通过钢制张拉台提供反力, 手动液压千斤顶进行张拉, 试验张拉装置如

图 2 所示。

为了对比, 在同一场地, 也进行了普通锚索的模型试验^[7], 采用 $7\phi 1.6$ mm, 直径为 4.8 mm, 屈服荷载为 15.79 kN 的钢绞线模拟锚索。其他试验做法相同。需要说明的是, 对于压力型锚固体系, 由于锚杆与注浆体全长无黏结, 所以在单纯张拉性能模拟试验中, 采用钢绞线还是钢筋, 区别并不大。本试验采用钢筋的目的是其抗拉强度更高, 有利于获得注浆体与岩壁的极限承载力。



图 1 压力型试验锚杆

Fig.1 The photo of a test compression type rock bolt

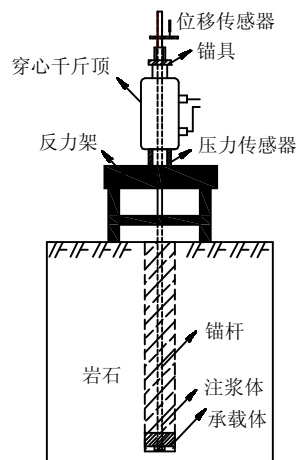


图 2 张拉装置简图

Fig.2 The sketch of stretching equipment

3 试验结果及分析

锚杆在受拉时的荷载-位移关系曲线是锚杆各种力学性能的综合宏观反应, 曲线的几何形状和特征反映了锚杆受力后锚固段的变形, 黏结应力的增长和衰减过程, 岩石裂缝的开展和损伤积累状况等全部力学特性。本次试验得到的荷载-位移曲线如图 3~7 所示。下面分 4 个方面对本次试验得到的成果进行分析。

3.1 抗拔承载力分析

从荷载-位移曲线可以看出, 压力型锚杆体现了良好的承载性能。图 3 的锚固段长度仅有 10 cm,

但两根压力型锚杆都达到了较高的极限承载力, 5号锚杆在荷载为 6.18 kN 时进入了一个短暂的试件承载力屈服阶段, 此时的位移很小, 只有 2.33 mm, 这种现象只有 5 号锚杆中出现, 因此, 屈服段产生的原因很可能是钢筋扩头与承载体间隙的挤紧, 是一种假的“屈服”, 然后随位移增加, 承载力进一步增加直至达到钢筋的最大拉力 28 kN。6 号锚杆在荷载为 20.05 kN 时才进入试件承载力屈服阶段, 这两根锚杆的极限承载力均达到 24 kN 以上, 远高于相同条件下的对比普通锚索, 后者的极限承载力仅为 2.79 kN。压力型锚杆以仅仅 10 cm 的锚固长度就承担起了 2 t 多的拉力, 是让人惊讶的。图 4、5 的结果表明, 15 cm 和 20 cm 锚固长度的压力型锚杆承载力毫无悬念的达到了钢筋的最大拉力 28 kN, 这时钢筋强度已经耗尽, 而砂浆与岩壁的黏结应力尚未达到极限, 而同样条件下的普通锚索极限承载力虽然随锚固长度的增加而有所增大, 但仍远逊于压力型锚杆。对比图 3~5 的压力型锚杆最大位移不难发现, 随着锚固长度的增加, 最大承载力对应的最大位移有减小的趋势。说明达到相同承载力时, 锚固段长的压力型锚杆整体位移更小, 但在锚固段达到钻孔直径 8 倍左右时位移不再明显减小。

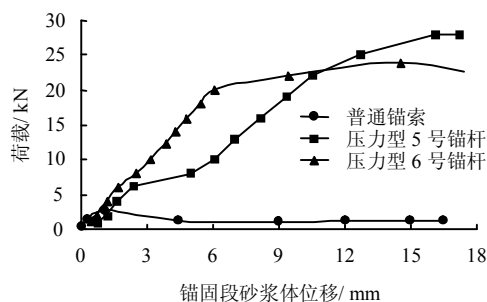


图3 10 cm 锚固段长度的荷载-位移曲线
Fig.3 Load-displacement curves of 10 cm fixed anchor lengths

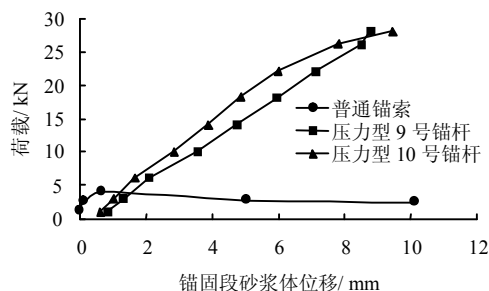


图4 15 cm 锚固段长度的荷载-位移曲线
Fig.4 Load-displacement curves of 15 cm fixed anchor lengths

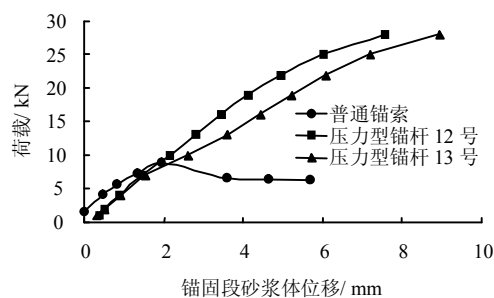


图5 20 cm 锚固段长度的荷载-位移曲线
Fig.5 Load-displacement curves of 20 cm fixed anchor lengths

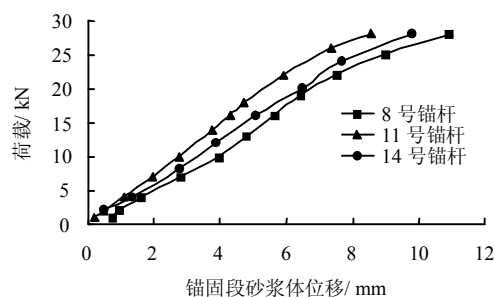


图6 其他锚固段长度的荷载-位移曲线
Fig.6 Load-displacement curves of another fixed anchor lengths

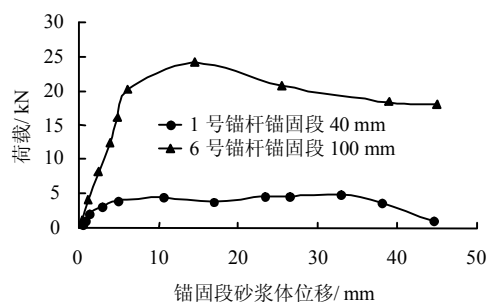


图7 延性特征荷载-位移曲线
Fig.7 Load-displacement curves of ductility

图6中3根较长锚固段的压力型锚杆承载力都达到了 28 kN, 压力型锚杆锚固段砂浆体的径向膨胀会对岩壁产生正压力, 从而大大提高砂浆与岩壁间的黏结剪切应力, 理论分析表明^[8], 这种三向应力状态是压力型锚杆的独特优点, 这种优点在本次试验中体现得很充分。事实上, 本次试验中所有锚固段 130 mm 以上的压力型锚杆无一例外地达到了 28 kN 的控制拉力。

3.2 位移延性和残余强度

一个优秀的结构不仅仅在于有较高的承载力, 同时这种结构在破坏前应该有较大的变形, 这种变形能够发出将要破坏的预警, 从而避免生命财产的损失, 如果在大变形的同时, 承载力没有大量的下降, 可称之为良好的延性结构。

对于压力型锚杆, 要达到黏结应力的极限而将注浆体整体拔出是不太容易的, 本次试验最终得到了两根比较完整的整体拔出的荷载-位移全曲线, 如图 7 所示。从这两条曲线可以看出, 压力型锚杆具有较好的延性特征。以 6 号锚杆为例, 在荷载在 20.05 kN 时进入承载力拐点 (试件承载力屈服点), 到承载力峰值 24.01 kN 这一段为屈服段。屈服段明显平缓, 而且延伸较长, 说明在较大的位移下面, 压力型锚杆仍然具有承载力进一步增长的趋势。1 号锚杆甚至出现了双峰值的情况。45 mm 的最大位移已将非锚固段全部挤出锚孔, 而锚固段总长才为 40 mm 和 100 mm, 即锚固段的底部都已拔到张拉前锚固段的顶部 (1 号锚杆), 这时锚固段已完全离开了其原来所在的位置。

如果把锚杆整体视为一个锚固结构, 可按如下表达式定义锚杆的位移延性比:

$$\lambda = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

式中: λ 为锚杆的延性指标; Δ_u 为锚杆到达极限承载力时的位移; Δ_y 为锚杆屈服 (开始破坏) 时的位移。

按式 (1) 计算, 1 号锚杆的位移延性比可达 3.1, 6 号锚杆的位移延性比也有 2.4, 即是说承载力极限状态的位移可达到屈服时位移的 2~3 倍, 这是十分优良的性能。对比的普通锚索均没有出现明显的屈服点, 承载力达到峰值后立即下降, 呈现出比较明显的突发脆性破坏特征。

压力型锚杆的残余强度也有良好的表现, 经过承载力峰值后, 随位移的增长, 承载力衰减较慢, 残余强度较高。对试验结果进行分析, 压力锚杆的残余强度仍有其峰值强度的 75%~85%, 而普通锚索的这个比值只能达到 50%~70%。

3.3 破坏模式分析

压力型锚杆存在 3 种破坏模式, 一是钢筋极限强度不足; 二是注浆体与岩壁之间黏结应力破坏 (以下简称注岩破坏); 三是承载力下部砂浆局部压坏。与普通锚索不同, 由于全长无黏结构造, 压力型锚不存在锚杆 (锚索) 与注浆体之间的黏结破坏这种破坏形态。

本次试验观察到了第 1 和第 2 种破坏模式, 钢筋承载力不足出现得较多, 且多数锚杆在钢筋达到屈服时没有出现明显的整体外移 (非锚固段没有缩短); 注岩破坏也获得了试验的验证, 其破坏特征分 3 个阶段, 首先, 在承载体作用下, 锚固段砂浆体

发生弹性变形, 这种变形受围岩约束的影响, 不会很大; 然后, 黏结应力局部损伤, 损伤积累到锚固段最前端之后锚固段发生刚体位移, 相对岩石外移, 由于注浆体与岩壁之间仍然存在滑动摩擦和机械咬合作用, 锚杆的承载力不会有大的下降, 如果由于孔钻的不规则, 孔壁中有突出部, 锚杆有可能会受到更强机械约束作用, 甚至体现出更强的承载力。最后, 锚固体逐渐拔出, 承载力下降, 伴随锚固体出露, 孔口岩石出现高脚杯状破坏, 如图 8 所示; 第 3 种破坏模式没能观察到, 因为整体拔出的锚杆都没有出现这种破坏, 而在荷载较高时, 没有拔出的锚杆内部是否出现了砂浆压碎还难以判定, 但可以肯定的是, 即使出现了这种破坏, 其承载力也没有大的下降。

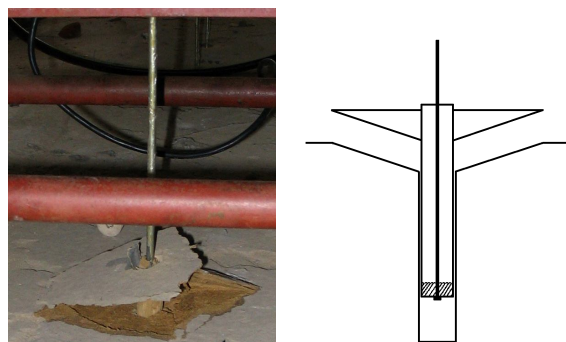


图 8 锚固段整体拔出破坏照片和简图
Fig.8 The photo and sketch of test bolt overall pull-out failure

本次试验研究了压力型锚杆破坏模式与锚固长度的关系, 通过缩短锚固长度研究了注岩破坏出现条件。目前的试验中绝大多数都是钢筋屈服, 钢筋屈服除了证明压力型锚杆承载力强以外, 并不能研究重要的注岩黏结应力破坏性能。

试验结果证明, 破坏模式与锚固段长度和锚孔直径有较大的关系。本次试验试验结果列于表 2。

表 2 压力型锚杆破坏模式分析表

Table 2 Failure pattern analysis of compression type rock bolt

破坏模式	锚固段长度		
	本试验	文献[4]试验	文献[6]试验
注岩破坏	(4~5)d		
钢筋屈服	(6~11)d	(6~8)d	(8~14)d
异常失效	(2~3)d		7d (1 根)

注: d 为锚孔直径。

在本试验的条件下, 注岩破坏大约在锚固段长度与锚孔直径之比 4~5 时出现。而更短的锚固长度有

异常失效的风险, 试验中有两根锚杆出现异常失效, 表现为承载力很低, 可能与灌浆质量有关, 这是值得注意的问题。锚固长度达到 $8d$ 以上时, 都是出现钢筋屈服破坏, 更长的锚固长度似无必要。

总的来说, 由于岩石的侧向约束作用, 锚固段处于三向应力状态, 不但可以提高砂浆的抗压强度, 而且可以大大增强注浆体与岩壁之间的摩擦和机械咬合作用, 随着岩石与砂浆刚度比的增加, 这种侧向约束作用的发挥会更充分。

3.4 最佳锚固长度和理论算例对比

大量试验表明, 压力型锚杆的承载力随锚固长度的增加而增大, 在工程上能接受的钢筋强度和配筋率下, 这种增大到了一定时就受到钢筋屈服的制约, 即钢筋屈服起到控制作用, 这时更长的锚固长度就没有必要了。

最优锚固长度的确定与锚固体与岩体界面上的黏结应力的分布有密切的关系, 根据文^[8-11]的理论分析结果, 在距离承载板近的地方, 黏结应力大, 随着与承载板距离的增大, 黏结应力渐渐减小, 并最终趋近于 0。当黏结应力的峰值超过界面上的抗剪强度时, 锚固体与岩体脱黏损伤, 黏结应力下降, 而峰值向前转移, 这时, 更长的锚固长度也无助于承载力的增加。经过分析, 文献[8]的计算结果与试验的吻合较好, 现根据文献[8]提出的公式, 见式(2), 对 6 号锚杆进行计算, 并将结果绘于图 9 中。

计算参数为: $P=24\text{ kN}$, $\mu=0.21$, $\varphi=35^\circ$, $a=0.010\text{ m}$, $E_a=21\ 072\text{ MPa}$, $E=3\ 330\text{ MPa}$ 。

$$\tau = \frac{F}{\pi D} \exp \left[\frac{B}{A^2} \ln \left(\frac{Az+B}{B} \right) - \frac{z}{A} \right] \left(\frac{z}{Az+B} \right) \quad (2)$$

式中: τ 为黏结应力; F 为集中力; d 为锚孔直径; z 为承载板距离; A 、 B 为计算参数; E_a 为锚固体弹性模量; E 为岩体弹性模量。

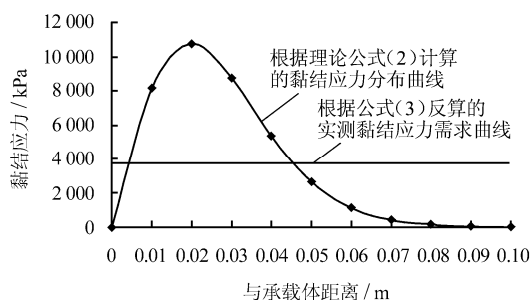


图9 理论计算与实测需求的黏结应力对比

Fig.9 Comparison between analytic solution and test data of stresses on fixed anchor lengths

目前国内的规范大量采用 BS8081 (英国) 建议的方法来计算岩土体中锚杆的极限承载力, 为

$$T_{ult} = \tau_{ult} \pi d L \quad (3)$$

式中: T_{ult} 为锚杆的极限承载力; τ_{ult} 为地层与注浆体界面上的极限承载力; d 为锚孔直径; L 为锚固段长度。

本算例中, 6 号锚杆的锚固段长度为 10 cm , 实测的极限承载力为 24 kN , 根据式(3)反算的 τ_{ult} 为 $3\ 800\text{ kPa}$, 沿锚固段全长均匀分布, 如图 9 中的直线。这是一种理想化的假定分布, 主要是为了方便工程应用, 同时也说明了根据实测, 界面上的平均黏结应力必须达到 $3\ 800\text{ kPa}$ 才能提供足够的承载力。因此, 这根直线与 x 轴的围合面积即为实测的黏结应力需求面积。理论分析的结果同样绘在图 9 中, 进行对比可知, 理论计算曲线与 x 轴围合的黏结应力面积与实测需求的黏结应力面积是相同的, 说明文献[8]的理论公式可以比较准确的预测黏结应力分布。

根据上面的算例分析, 本次试验中, 6 号锚杆的锚固长度成为注岩破坏和钢筋屈服的分界点可以得到理论上的证明。因此, 结合第 3.3 的分析结果可以推断, 在试验岩石条件下, 锚杆的最佳锚固长度是 $6\sim 8$ 倍 d 。

4 结 语

通过室内模型试验, 获得了在岩石条件下压力型锚杆的荷载-位移全过程曲线, 进而分析了压力型锚杆的各项力学性能。试验结果表明, 压力型锚杆具有优越的性能。这些性能主要体现在下面 4 个方面:

(1) 锚固段的三向应力状态对压力型锚杆承载力的提高起到了非常显著的作用。与相同条件下的普通锚索的承载力对比可以看出, 压力型锚杆具有大幅超越传统锚杆(索)的优良性能。

(2) 压力型锚杆具有很好的位移延性。荷载-位移全曲线表明, 这种锚杆在破坏前有很大的位移, 同时承载力不会明显下降, 能够提供充分的破坏预警, 同时残余强度也比较高, 是优良的工程锚固结构。

(3) 试验全面观察到了压力型锚杆的两种破坏模式, 特别是整体拔出破坏后期的高脚杯口状破坏。值得进一步的分析与研究。

(4) 通过理论与试验的拟合, 推断了在试验条件下压力型锚杆的最优锚固长度, 可供工程设计参考。

参考文献

- [1] 邱芙君, 杨贵灏. 压力型预应力锚索在大跨度高边墙地下洞室中的应用[J]. 隧道建设, 2007, 27(3): 62—64.
QIU Fu-jun, YANG Gui-hao. Application of pressure prestressed anchoring cables in underground caverns with large spans and high side walls[J]. **Tunnel Construction**, 2007, 27(3): 62—64.
- [2] 李志强, 周霞, 柳建国, 等. 压力分散型抗浮锚杆在高层建筑抗浮中的研究与应用[J]. 建筑结构, 2007, 37(4): 55—57.
LI Zhi-qiang, ZHOU Xia, LIU Jian-guo, et al. Study and application of anchor rod to against floatation of high-rise building[J]. **Building Structure**, 2007, 37(4): 55—57.
- [3] BARLEY A D, WINDSOR C R. Recent advances in ground anchor and ground reinforcement technology with reference to the development of the art [C]//Proceedings of International Conference on Geotechnical and Geotechnical Engineering. Melbourne: [s. n], 2000: 112—116.
- [4] 张四平, 候庆. 压力分散型锚杆剪应力分布与现场试验研究[J]. 重庆建筑大学学报, 2004, 26(2): 41—47.
ZHANG Si-ping, HOU Qing. Study on shear stress distribution and in-situ test of pressure-dispersive anchor[J]. **Journal of Chongqing Jianzhu University**, 2004, 26(2): 41—47.
- [5] 张景成, 田宝文, 王忠义, 等. 压力分散型预应力锚索抗拉拔破坏试验[J]. 勘察科学技术, 2004, 3: 12—17.
ZHANG Jing-cheng, TIAN Bao-wen, WANG Zhong-yi, et al. Damaged test of pulling for pressure dispersion prestressed anchor rope[J]. **Site Investigation Science and Technology**, 2004, 3: 12—17.
- [6] 陈超. 压力型锚杆现场试验及剪力分布计算[硕士学位论文D]. 重庆:重庆大学, 2003.
- [7] 饶梟宇. 预应力岩锚内锚固段锚固性能及荷载传递机制研究[博士学位论文D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [8] 卢黎, 张永兴, 吴曙光. 压力型锚杆锚固段的应力分布规律研究[J]. 岩土力学, 2008, 6: 1345—1349.
LU Li, ZHANG Yong-xing, WU Shu-guang. Distribution of stresses on bonded transmission length of compression type rock bolt[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 6: 1345—1349.
- [9] 杨庆, 朱训国, 栾茂田. 压力型锚索锚固段应力分布及影响参数分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(增 2): 4065—4070.
YANG Qing, ZHU Xun-guo, LUAN Mao-tian. Analysis of stress distribution and influential parameters of anchorage segment of pressure-type cable[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(Supp.2): 4065—4070.
- [10] 尤春安. 压力型锚索锚固段的受力分析[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(6): 828—831.
YOU Chun-an. Mechanical analysis of anchorage segment of pressure-type cable[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(6): 828—831.
- [11] 夏元友, 范卫琴, 芮瑞, 等. 压力分散型锚索作用效果的数值模拟分析[J]. 岩土力学, 2008, 29(11): 3144—3148.
XIA Yuan-you, FAN Wei-qin, RUI Rui, et al. Numerical simulation analysis of pressure diffusion anchor cable's effect mechanism[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2008, 29(11): 3144—3148.

岩土工程有限元分析：应用

建筑科学类/Potts D. W. Zdravkovic L 著/谢新宇等译/16 开/400 千字/370 页/平装/2010 年 6 月出版

ISBN: 978—7—03—027671—1

本书首先介绍了岩土参数的获取, 然后详细研究了有限元法在隧道、挡土墙结构、开挖边坡、路堤、浅基础和深基础工程中应用分析, 最后给出了有限元计算的校核与验证并分析了有限元法的局限和缺陷。

读者对象: 岩土工程专业科研、教学、设计、施工等方面的科研人员、硕士生、博士生等, 数值分析研究及应用人员。

(摘自 新华书目报)