

横观各向同性岩体边坡与预应力锚索框架梁 相互作用研究

方理刚¹, 段靛靛², 梁 锴³, 曲广琇¹

(1. 中南大学 土木建筑学院, 湖南 长沙 410075; 2. 中南林业科技大学 土木建筑与力学学院, 湖南 长沙 410075;
3. 铁道第五勘察设计院, 北京 102600)

摘要: 为研究横观各向同性岩体边坡与支护结构的相互作用机制, 结合高速公路边坡工程, 对现场岩样进行分组实验, 通过不同层理面走向的岩样进行单轴压缩实验, 确定边坡横观各向同性岩体的弹性特征参数。在横观各向同性岩体的应力-应变关系等理论上, 建立横观各向同性岩体边坡与预应力锚索框架梁相互作用的分析模型, 提出预应力锚索最佳锚固角的概念, 利用有限元法进行数值分析, 对各种横观各向同性岩体边坡的预应力锚索锚固角度以及横观同性岩体边坡与预应力锚索框架梁相互作用进行参数研究, 提出层理的方向性对支护结构影响的规律。研究表明, 所提出的分析模型和方法可为横观各向同性岩体边坡的预应力锚索框架梁支护设计提供了理论依据和工程借鉴。

关键词: 岩石力学; 横观各向同性; 预应力锚索; 有限元分析; 锚固角

中图分类号: TD 824.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2008)01-0135-09

INTERACTION BETWEEN TRANSVERSE ISOTROPY ROCK SLOPE AND PRESTRESSED ANCHOR CABLE WITH FRAME BEAM SUPPORT

FANG Ligang¹, DUAN Liangliang², LIANG Kai³, QU Guangxiu¹

(1. *School of Civil and Architectural Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410075, China;*
2. *College of Civil Engineering, Architecture and Mechanics, Central South University of Forestry and Technology, Changsha, Hunan 410075, China;* 3. *The 5th Survey and Design Institute of China Railway, Beijing 102600, China*)

Abstract: The rock mass in natural state is a discontinuous anisotropy mass, therefore, if rock mass is still regarded as isotropy mass, it will not agree with the actual situation. In general analysis of engineering cases, anisotropy material includes orthotropy material and transverse isotropy material. In order to study the interaction between transverse isotropy rock mass and supporting structure, engineering geology of the slope at an expressway project is considered. Then, the laboratory tests for rock samples from field were carried out; and the uniaxial compression tests for rock samples with different stratification planes are performed to determine the indices of describing elasticity characteristics of transverse isotropic rock. Based on the theory of stress-strain relationship of transverse isotropy rock mass, the analytical model of interaction between rock mass transverse isotropy of slope and prestressed anchor cable with frame beam is established; and the notion of the optimum

收稿日期: 2007-05-27; **修回日期:** 2007-08-20

基金项目: 中南林业科技大学青年科学研究基金项目

作者简介: 方理刚(1959-), 男, 硕士, 1983年毕业于河北理工大学采矿工程专业, 现任教授, 主要从事岩石力学与岩土工程方面的教学与研究工作。
E-mail: 13308464499@hn165.com

anchorage angle in prestressed anchor cable is presented. The interaction between rock mass transverse isotropy of slope and prestressed anchor cable with frame beam was analyzed with finite element analysis. At the same time, the study on parameters of the interaction between rock mass transverse isotropy of slope and prestressed anchor cable with frame beam and the optimum anchorage angle in prestressed anchor cable is performed. The rules of the influence on directivity of stratification plane of supporting structure are determined. The results show that some reasonable and reliable references and actual engineering experiences on the design of prestressed anchor cable with frame beam supporting for transverse isotropy rock slope can be accepted.

Key words: rock mechanics; transverse isotropy; prestressed anchor cable; finite element analysis; anchorage angle

1 引言

由于在岩体内部存在层理、片理、断层，或在某一方向有非常发育的节理系统，因此，沿着层理方向和垂直层理方向具有不同的弹性模量，如弹性模量有的相差几倍、十几倍，甚至几十倍。而平行于层面的所有各个方向(即所谓“横向”)都具有相同的弹性性能，这种岩体即称为横观各向同性岩体，或称为层状岩体^[1, 2]。如果仍然把这种岩体当作各向同性来计算，将不符合实际情况。正是由于岩体的横观各向同性，常使边坡的力学和数值分析变得十分复杂，而且对边坡的支护结构产生强烈影响。

对于横观各向同性岩质边坡，寻求合理有效的边坡加固措施，在工程实践中显得尤为重要。预应力锚索框架等新型抗滑结构已经在工程中大量应用，其设计计算理论研究取得了一定成就^[3, 4]。预应力锚索框架结构是一种将框架梁护坡与锚固工程相结合形成的新型抗滑支挡结构，其原理主要有两方面：一是预应力锚索将被加固体作为支护体系中的一个重要组成部分，充分利用和调动岩体的物理力学特性，通过灌浆技术将预应力提供给深置于边坡后部的稳定岩体中，从而为获得足够的稳定预应力值提供保证。同时岩体在正向压力作用下，可使浅表层滑移面的摩擦力增大，从而提高滑移面的抗剪强度，增大坡体阻滑力，阻止滑坡体沿既有滑移面继续滑动，使弱面间产生挤压结合，即所谓的“反压”技术。二是混凝土框架梁在预应力锚索拉力作用下，较大范围地抑制了边坡变形，即通过坡面上混凝土框架梁和预应力锚索的有效连接，形成一个由表及里的加固体系，从而达到防止整体边坡失稳的目的。

本文主要是通过实验研究确定岩石边坡岩体的横观同性参数，基于各向异性岩体的强度准则，提出了预应力锚索加固横观各向同性边坡的最佳锚固角；并通过对实际问题的有限元模拟，从 3 个角度分析框架梁和锚索对横观各向同性边坡产生的应力分布以及框架梁受力情况。

2 岩体横观各向同性理论

线弹性岩石材料的本构方程为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \tag{1a}$$

或

$$e_{ij} = C_{ijkl} \delta_{kl} \tag{1b}$$

式中： C_{ijkl} 为个弹性柔度常数。在工程中，最常见的各向异性岩体材料为正交各向异性和横观各向同性。对于正交各向异性材料，坐标轴 x, y, z 是其弹性主轴，剪应力不会引起正应变，其弹性常数可简化为 9 个。当 xy 平面是各向同性的弹性主轴， z 轴方向是各向异性的弹性主轴，即横观各向同性时，其应力 - 应变关系可表示为

$$\begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{Bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_1}{E_1} & \frac{1}{E_1} & -\frac{\nu_2}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu_2}{E_2} & -\frac{\nu_2}{E_2} & \frac{1}{E_2} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_1} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{xz} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

式中: E_1 为各向同性平面(xy 平面)内所有方向的弹性模量; E_2 为垂直于各向同性平面即 z 方向的弹性模量; ν_1 为各向同性平面内的泊松比; ν_2 为各向同性平面法向应力引起的各向同性平面方向的应变与其法线方向应变之比; G_1 为各向同性平面的剪切模量, 且 $G_1 = E_1/[2(1+\nu_1)]$; G_2 为垂直于各向同性平面上的剪切模量。各向异性介质的材料常数取决于所选直角坐标系的坐标轴方向^[5]。S. G. Lekhnitskii^[6]指出, 弹性常数系依据张量法则而转换。考虑一种 x, y, z 坐标系中的横向同性介质, 选择 z 轴为其旋转(见图 1)对称轴。绕 x 轴转动 β 角, 则相应于新坐标系的本构方程中的弹性柔度常数 C_{ijkl} 均可由 $E_1, E_2, \nu_1, \nu_2, G_2$ 及 β 决定。因此, 对于 $\bar{x}, \bar{y}, \bar{z}$ 坐标系, 其弹性常数^[7]可表示为

$$\bar{E}_1 = E_1$$

$$\bar{E}_2 = \frac{E_1}{\cos^4 \beta + \frac{E_1}{E_2} \sin^4 \beta + \left(\frac{E_1}{G_2} - 2\nu_2 \frac{E_1}{E_2} \right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta}$$

$$\bar{E}_3 = \frac{E_1}{\sin^4 \beta + \frac{E_1}{E_2} \cos^4 \beta + \left(\frac{E_1}{G_1} - 2\nu_1 \frac{E_1}{E_2} \right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta}$$

$$\bar{\nu}_{12} = E_1 \left(\frac{\nu_1}{E_1} \cos^2 \beta + \frac{\nu_2}{E_2} \sin^2 \beta \right)$$

$$\bar{\nu}_{23} = \frac{\bar{E}_1}{E_1} \left[\nu_2 \frac{E_1}{E_2} - \left(1 + \frac{E_1}{E_2} + 2\nu_2 \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_2} \right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta \right]$$

$$\bar{\nu}_{13} = E_1 \left(\frac{\nu_1}{E_1} \sin^2 \beta + \frac{\nu_2}{E_2} \cos^2 \beta \right)$$

$$\frac{G_2}{\bar{G}_{23}} = \frac{G_2}{E_1} \left[4 \left(1 + \frac{E_1}{E_2} + 2\nu_2 \frac{E_1}{E_2} - \frac{E_1}{G_2} \right) \sin^2 \beta \cos^2 \beta + \frac{E_1}{G_2} \right]$$

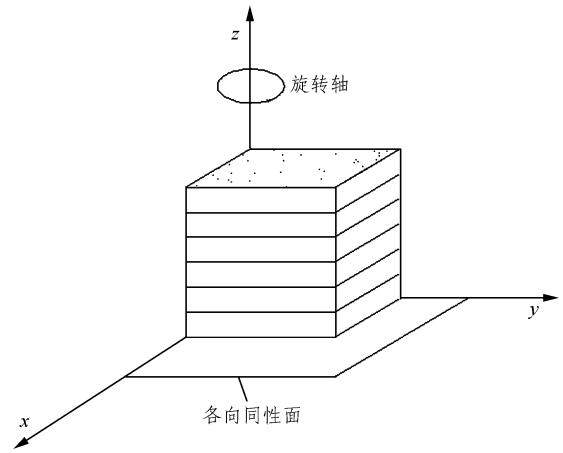


图 1 横观各向同性材料示意图

Fig.1 Schematic diagram of transverse isotropic material

$$\frac{G_2}{\bar{G}_{12}} = \sin^2 \beta + 2(1 + \nu_1) \frac{G_2}{E_1} \cos^2 \beta$$

$$\frac{G_2}{\bar{G}_{13}} = \cos^2 \beta + 2(1 + \nu_1) \frac{G_2}{E_1} \sin^2 \beta \quad (3)$$

3 岩石横观各向同性参数的确定

试样主要岩性为含炭页岩, 走向为 SW210°, 倾角为 30°。采用钻孔取芯法, 按一定的 β 方向取样(β 为层理面与样品端面间的夹角)。 β 取值分别为 0°, 30°, 60°, 90°, 共取样 4 组, 每组 5 个试样, 蜡封后运抵实验室进行实验^[8]。

采用单轴压缩实验测定岩石强度和横观各向同性岩石的 5 个弹性常数, 实验结果见表 1 和图 2~4。

表 1 单轴压缩实验结果

Table1 Results of uniaxial compression test

试样组号	β / (°)	取样个数	弹性模量 E_2 /GPa	泊松比		实测单轴抗压强度 R_{β} /MPa
				ν_{zx}	ν_{zy}	
1	0	5	17.654	0.186	0.186	47.30
2	30	5	18.270	0.181	0.224	36.97
3	60	5	21.415	0.222	0.256	26.69
4	90	5	24.550	0.245	0.253	35.47

横观各向同性岩石的 5 个弹性参数应满足热力学约束有关的不等式, 使得岩石的应变能永远为正^[9], 由此有

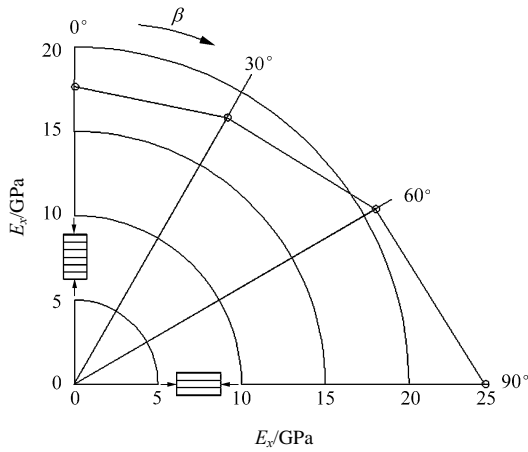


图 2 单轴压缩实验的弹性模量 E_x 随 β 的变化

Fig.2 Variation of elastic modulus E_x in uniaxial compression test with parameter β

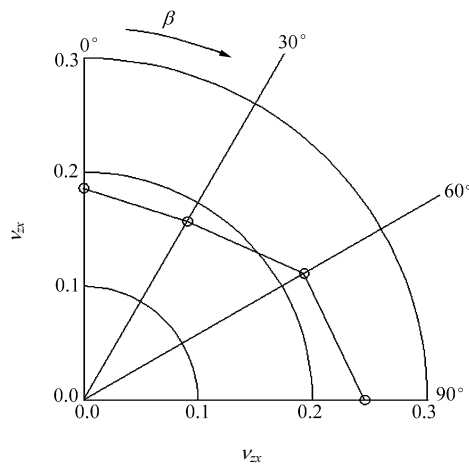


图 3 单轴压缩实验的泊松比 ν_x 随 β 的变化

Fig.3 Variation of Poisson's ratio ν_x in uniaxial compression test with parameter β

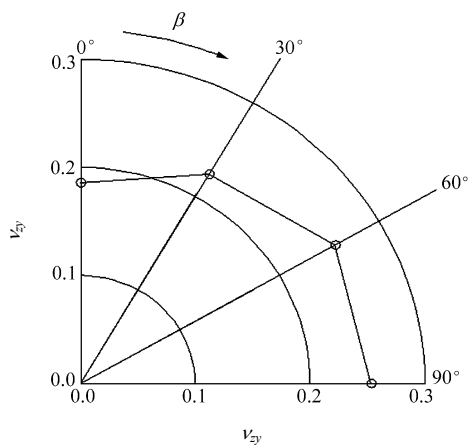


图 4 单轴压缩实验的泊松比 ν_y 随 β 的变化

Fig.4 Variation of Poisson's ratio ν_y in uniaxial compression test with parameter β

$$\left. \begin{aligned} E_1, E_2, G_2 > 0 \\ -1 < \nu < 1 \\ -\sqrt{\frac{E_2(1-\nu_1)}{E_1}} < \nu_2 < \sqrt{\frac{E_2(1-\nu_1)}{E_1}} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

4 锚索锚固角与结构面的关系

当岩体含 1 组结构面时，其破坏方式受结构面的方位控制。若结构面与最大主应力平面的夹角为 γ (见图 5)，则作用于该结构面上的正应力 σ 和剪应力 τ 可分别表示为

$$\left. \begin{aligned} \sigma &= \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos(2\gamma) \\ \tau &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin(2\gamma) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

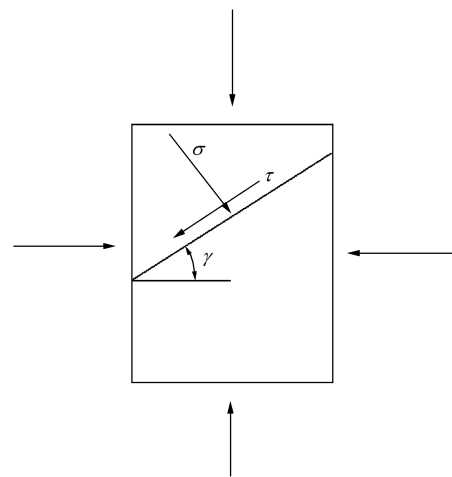


图 5 受力单元体

Fig.5 Unit-cell with various stresses

结构面上的正应力和剪应力随结构面倾角而变化。

如果岩体中的结构面满足 Mohr-Coulomb 强度理论，则强度表达式为

$$\tau = c_j + \sigma \tan \varphi_j \quad (6)$$

式中： c_j 、 φ_j 分别为结构面的黏聚力和内摩擦角。

P. H. S. W. Kulatilake 等^[10~12]利用 Mohr-Coulomb 强度准则提出了单组结构面岩体的强度理论，若

$$\left. \begin{aligned} \sigma_1 - \sigma_3 &\geq \frac{2(c_j + \sigma_3 \tan \varphi_j)}{(1 + \tan \varphi_j \tan \gamma) \sin(2\gamma)} \\ \varphi_j &< \gamma < \frac{\pi}{2} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

则岩体将沿结构面滑动破坏。

由此可见, 主应力差 $\sigma_1 - \sigma_3$ 随结构面的倾角 γ 的变化而不同, 其中 $\gamma = 45^\circ + \varphi_j$ 其值最小。当 γ 趋近 2 个极值时, 岩体将切穿结构面在岩石材料内部发生破坏; 当 $\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2$ 时, 岩体沿结构面破坏, 其中 γ_1, γ_2 由下式给出:

$$2\gamma_1 = \arcsin \left[\frac{c_j \cot \varphi_j + (\sigma_1 + \sigma_3)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2} \sin \varphi_j \right] + \varphi_j \quad (8)$$

$$2\gamma_2 = 180^\circ + \varphi_j -$$

$$\arcsin \left[\frac{c_j \cot \varphi_j + (\sigma_1 + \sigma_3)/2}{(\sigma_1 + \sigma_3)/2} - \sin \varphi_j \right] \quad (9)$$

对于横观各向同性岩体, 层间的黏聚力和内摩擦角均相同, 其强度准则跟单组结构面岩体的破坏准则相同。

因此, 当 $\gamma_1 \leq \gamma \leq \gamma_2$ 时, 边坡岩体沿层理面破坏, 破坏面倾角即为层理面的倾角 γ (见图 6)。

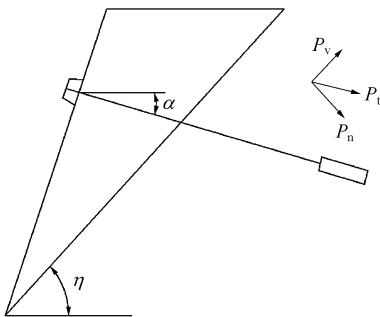


图 6 预应力锚索加固示意图

Fig.6 Schematic diagram of prestressed anchor cable

采用预应力锚索加固岩体时, 由预应力锚索的加固力所增加的抗滑阻力 P 可表示为

$$P = P_n \tan \varphi_j + P_v = P_t [\sin(\alpha + \gamma) \tan \varphi_j + \cos(\alpha + \gamma)] \quad (10)$$

式中: P 为增加的抗滑阻力增量; P_t 为锚索设计预应力值; P_n 为 P_t 沿滑动面的法向分力; P_v 为 P_t 沿滑动面的切向分力; α 为锚索与水平方向的夹角。

对于单根锚索来说, 其所提供的最大抗滑力可通过对式(10)求导, 即 $dP/d\alpha = 0$, 可得

$$\left. \begin{aligned} \cos(\alpha + \gamma) \tan \varphi_j &= \sin(\alpha + \gamma) \\ \tan(\alpha + \gamma) &= \tan \varphi_j \\ \alpha &= \varphi_j - \gamma \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

当以 $\alpha = \varphi_j - \gamma$ 的角度安设预应力锚索时, 可以使所施加的预应力提供最大的抗滑阻力增量。为了取得良好的加固效果, 在边坡加固工程中应根据具体条件, 从加固效果和加固成本等方面进行综合考虑, 求出合理的预应力锚索与水平面的夹角, 即在边坡岩体完整性比较好的情况下, 以能使滑动面上得到最大的抗滑阻力增量为主并兼顾所需锚索的长度来确定预应力锚索与水平面的夹角; 在边坡岩体完整性较差时, 预应力锚索与水平面夹角的确定, 既要考虑边坡岩体整体性的提高, 又要考虑到在滑动面上提供所需的抗滑阻力^[13, 14]。

因此, 从经济方面考虑, 锚固角应兼顾使滑动面上得到最大的抗滑力和所需锚索的长度较小为原则。自由张拉段长度与锚固角度有关, 可以将自由张拉段长度作为经济指标。最经济锚固角是单位自由张拉段长度的锚索提供的抗滑力最大, 据此可推知最经济锚固角, 即 $\alpha = 45^\circ + \varphi_j/2 - \gamma$ 。

若 γ 趋近 2 个极值时, 则预应力锚索的最大抗滑力锚固角 $\alpha = \varphi_k - \eta$ (η 为滑动面倾角), 最经济锚固角 $\alpha = 45^\circ + \varphi_k/2 - \eta$ 。

5 边坡横观各向同性与预应力锚索框架梁相互作用的有限元分析

本文主要研究目的是边坡横观各向同性对预应力锚索框架各种参数的影响。本模型模拟的是重庆垫邻高速公路工程 DL06 合同段边坡现场实际情况, 所选择的边坡实体模型为 42.5 m, 宽 48.9 m, 长 12 m 的三维模型。在第 1~4 级边坡处设置锚索框架, 取这么大的模型原因在于对锚索预应力的模拟。框架梁选取十字交叉梁形式, 其示意图见图 7。

框架梁的横梁和纵梁高度及宽度均为 0.6 m, 横向间距与纵向间距均为 3.6 m。对模型底部约束各个方向的位移, 在 2 个侧面只限制其 z 方向位移, 在前后两侧面限制其 x 方向位移, 上部处于自然状态, 没有加任何荷载, 预应力锚索设计荷载为 500 kN。

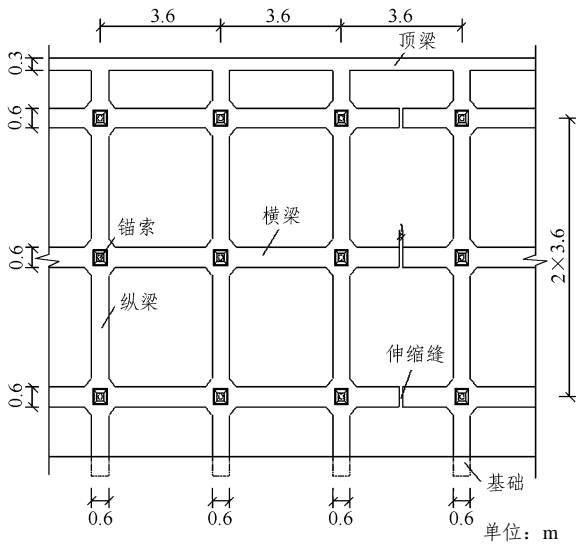


图7 预应力锚索框架梁正面图

Fig.7 Elevation view of prestressed anchor cable with frame beam support

对于锚索预应力的施加本文采用降温法来实现，当温度降低时锚索收缩，对框架产生拉力；当框架变形时，其拉力减小，较好地模拟了预应力锚索的作用形式。在整个模型中最主要的问题是锚索的模拟，由于本结构中锚索不垂直于坡面，所以只能先把土体用坐标面剖开，在中间形成一个六面体，先对其进行网格划分，然后再在其4个边上选取节点创建锚索单元。锚索一端在土体内部锚固，实现方法是使其与土体有共同节点，另一端与框架连接。

加载模式为在锚索上加温度以模拟预应力，其加载依据为

$$\left. \begin{aligned} \Delta L &= \alpha L T \\ \frac{\Delta L}{L} &= \varepsilon = \frac{\sigma A}{EA} = \frac{N}{EA} \\ N &= \frac{\Delta L}{L} EA \\ T &= \frac{N}{A \alpha E} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

先选定热膨胀系数，然后再确定需要的轴拉力就可以算出需加的温度，由于本模型假定为锚索两端完全约束，而计算出的预应力在锚索变形后会有预应力损失，所以可以从软件结果采集锚索受力^[15, 16]。

根据实验资料，选取本计算模型的参数见表2，3；有限元分析模型及网格划分见图8。

表2 计算模型的物理力学参数

Table 2 Physico-mechanical parameters for calculation

介质	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	密度 ρ/(kg·m ⁻³)	热膨胀系数 α/(kN·m ⁻³)
预应力锚索	300.0	0.30	-	1×10 ⁻⁵
钢筋混凝土框架梁	31.5	0.19	2 500	-

表3 横观各向同性岩体的参数选择

Table 3 Parameters choice of transverse isotropic rock mass

E ₁ /GPa	E ₂ /GPa	ν ₁	ν ₂	G ₂ /GPa
24.55	17.65	0.245	0.186	7.72

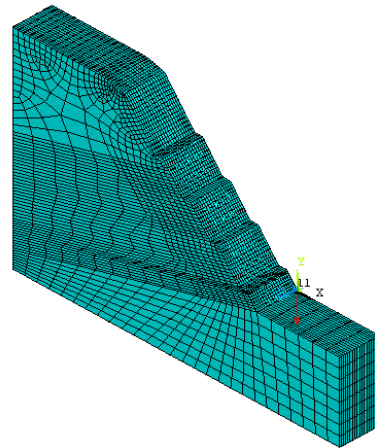


图8 有限元分析模型及网格划分

Fig.8 Finite element analysis model and grid generation

为了使研究具有推广意义，以实际工程为依托，进行了更为深入的研究，模拟分为3个部分：

(1) 未加固时，考虑自重下边坡岩体层理面倾角变化对横观同性边坡应力分布的影响。通过分别对0°，30°，45°，60°和90°倾角的顺层边坡和逆层边坡进行有限元分析可知，无论是顺层边坡还是逆层边坡，当层理面与水平面成45°时，自重下边坡内产生的应力最大，当边坡为水平层理时，边坡内产生的应力最小。

(2) 预应力锚索框架梁加固后，取锚固角为20°，假定岩体层理面倾角发生变化，分析这种变化对边坡的应力分布影响以及锚索及框架梁的受力情况。

通过有限元分析可知，层理面与水平面成150°的顺层边坡内产生的应力最大，而垂直层理的横观各向同性边坡内所产生的应力最小。

再取一品预应力锚索框架梁进行有限元受力分析，分析结果如表4所示。

表 4 预应力锚索框架梁受力分析

Table 4 Force analysis of frame beam with prestressed anchor cables

边坡类型	岩层角度 $\beta(^{\circ})$	框架梁纵梁 y 方向最大内力/kN	框架梁横梁 y 方向最大内力/kN	锚索处岩体应力/kPa
逆层	0	254.90	245.10	307.595
	30	252.40	247.50	303.900
	45	249.10	250.80	300.459
	60	246.11	253.86	296.844
顺层	90	243.31	256.69	293.906
	120	245.57	254.39	296.844
	135	249.39	250.57	299.340
	150	253.62	246.35	303.900

图 9 给出了锚索处岩体应力随层理面与 β 的变化关系; 图 10 给出了框架梁纵梁与横梁 y 方向最大内力随 β 的变化关系。由图 9, 10 及表 5 可知, 当横观各向同性边坡岩体为水平层理时, 锚索处岩体应力最大。

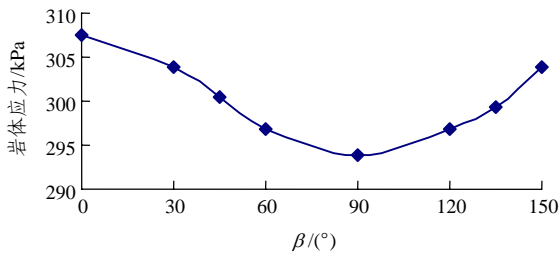


图 9 锚索处岩体应力随层理面与 β 的变化关系

Fig.9 Rock's stress change in anchor's position with parameter β determined by bedding surface and level

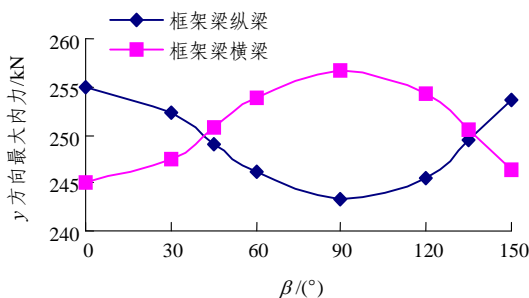


图 10 框架梁纵梁与横梁 y 方向最大内力随 β 的变化关系
 Fig.10 Large internal force's change in direction of frame's carling and transom with parameter β determined by bedding surface and level

锚索拉力由横梁与纵梁共同承担, 对于刚度相同的框架梁横梁与纵梁按 1 : 1 的比例分配锚索拉

力。由图 9 可知, 横梁与纵梁受力基本符合 1 : 1 的分配模式, 且对于顺层和逆层边坡, 层理面与水平面成 90° 的边坡, 纵梁所受力最小, 横梁所受力最大; 层理面与水平面成 0° 的边坡, 纵梁所受力最大, 横梁所受力最小。

从图 11 中可以看出, 锚索点处岩体应力较大, 框架梁底岩体应力也是随着远离锚索点而迅速减小。从图 12 中可以清楚地看出岩体发生应变范围和大小, 锚索点处岩体的应变较大, 也可以看出框架梁作用的范围^[17]。

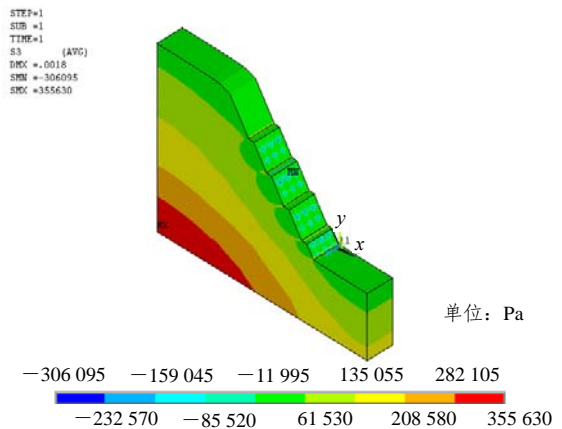


图 11 0° 边坡单元节点第三主应力图

Fig.11 Map of the third principal stress in 0° slope's element node

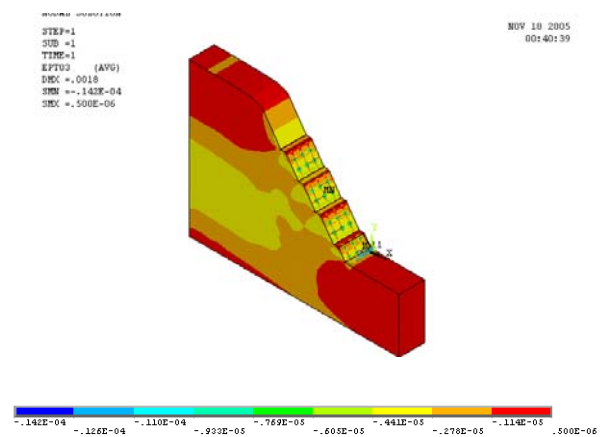


图 12 0° 边坡单元节点第三主应变图

Fig.12 Map of the third principal strain in 0° slope's element node

(3) 若边坡岩体的层理面与水平面夹角为 30° , 预应力锚索锚固角变化对横观各向同性边坡的影响。

由于从施工工艺考虑, 锚索锚固角多采用下倾 $15^{\circ} \sim 30^{\circ}$, 因此锚固角取为 15° , 20° , 25° 及 30° 。

取一品预应力锚索框架梁进行分析，其分析结果见表 5。

表 5 预应力锚索锚固角变化对锚索框架梁的受力

Table 5 Effect of the change in prestressed cable's anchorage angle on the anchor cable with frame beam's force

锚固角 $\alpha(^{\circ})$	框架梁横梁锚索处 y 方向受力/kN	框架梁纵梁锚索处 y 方向受力/kN	锚索处岩体应力/kPa
15	248.6	251.1	316.20
20	252.4	247.5	303.90
25	254.1	245.7	307.41
30	253.8	246.1	309.84

由图 13, 14 可知，在横观各向同性边坡条件下，当预应力锚索锚固角为 25°时，框架梁横梁锚索处受力最大，框架梁纵梁锚索处受力最小，当预应力锚索的锚固角为 15°时，框架梁横梁锚索处受力最小，框架梁纵梁锚索处受力最大。

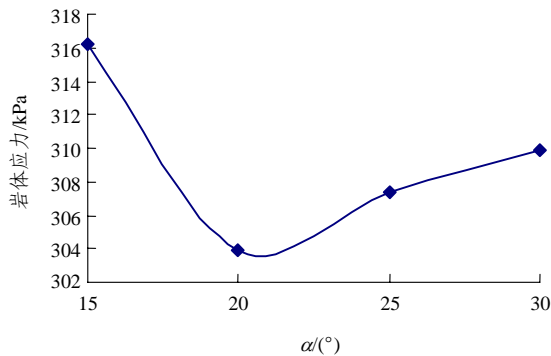


图 13 锚索处岩体应力随锚固角 α 改变的变化

Fig.13 Variation of rock's stress in anchor's position with anchorage angle α

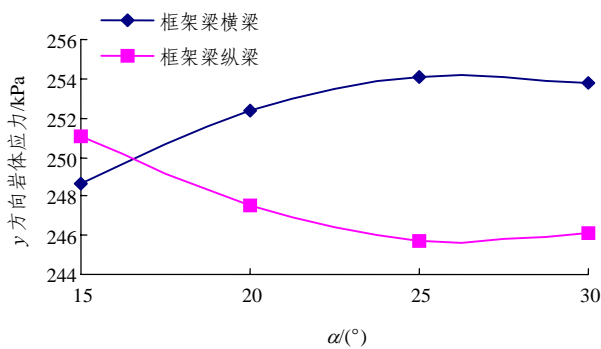


图 14 框架梁随锚固角 α 改变的受力情况

Fig.14 Curves of frame beam's forces with anchorage angle α

6 结 论

本文结合高速公路边坡的工程地质情况，在国内外相关研究资料的基础上，通过对现场取样的岩芯进行室内实验，得到岩石横观各向同性的 5 个弹性常数，并根据岩石各向异性理论，采用有限元分析方法对横观各向同性边坡与锚索框架梁支护结构进行分析。主要结论如下：

(1) 提出了预应力锚索加固横观同性边坡的理论，分析了如何确定锚索加固横观各向同性边坡的最优锚固角，得出了横观各向同性边坡若沿着层层面破坏，则最大抗滑锚固角 $\alpha = \varphi_j - \gamma$ ，经济锚固角 $\alpha = 45^{\circ} + \varphi_j / 2 - \gamma$ ；若是岩体内部破坏时，则预应力锚索的最大抗滑力锚固角 $\alpha = \varphi_k - \eta$ ，经济锚固角 $\alpha = 45^{\circ} + \varphi_k / 2 - \eta$ 。

(2) 利用实验获得的数据，通过有限元分析，探讨了横观各向同性边坡的应力分布特点及锚索和框架梁的受力情况。若边坡层层面变化，层层面与水平面成 150°的顺层边坡内产生的应力最大，而垂直层理的横观各向同性边坡内所产生的应力最小。对于顺层和逆层边坡，层层面与水平面成 90°的边坡，纵梁所受力最小，横梁所受力最大；层层面与水平面成 0°的边坡，纵梁所受力最大，横梁所受力最小。若锚固角变化，在横观各向同性边坡的条件下，当预应力锚索的锚固角为 25°时，框架梁横梁锚索处受力最大，框架梁纵梁锚索处受力最小；当预应力锚索的锚固角为 15°时，框架梁横梁锚索处受力最小，框架梁纵梁锚索处受力最大。

参考文献(References):

[1] CHEN C S, PAN E, AMADEI B. Determination of deformability and tensile strength of anisotropic rock using Brazilian tests[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1998, 35(1): 43 - 61.

[2] 陈洪凯, 唐红梅. 岩石工程岩体各向异性的显现模式研究——以三峡工程永久船闸边坡工程为例[J]. 重庆交通学院学报, 2000, 19(1): 92 - 97.(CHEN Hongkai, TANG Hongmei. Visualization research on anisotropy of rock mass in rock project—taking the slope engineering of permanent shiplocks of the Three Gorges Project as an example[J]. Journal of Chongqing Jiaotong Institute, 2000, 19(1): 92 - 97.(in Chinese))

- [3] 夏 雄, 周德培. 预应力锚索框架型地梁在边坡加固中的应用[J]. 路基工程, 2006, (2): 68 - 70.(XIA Xiong, ZHOU Depei. Application for prestressed anchor rope and frame beam-on-foundation on the slope stability[J]. Subgrade Engineering, 2006, (2): 68 - 70.(in Chinese))
- [4] 梁 瑶, 周德培, 赵 刚. 预应力锚索框架梁支护结构的设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(2): 318 - 322.(LIANG Yao, ZHOU Depei, ZHAO Gang. Design of support of frame beam and prestressed anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(2): 318 - 322.(in Chinese))
- [5] 胡 琦, 凌道盛, 陈云敏. 桩土均质化横观各向同性模型理论研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(4): 853 - 859.(HU Qi, LIN Daosheng, CHEN Yunmin. Theoretical study on pile-soil homogeneous transversely isotropic model[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(4): 853 - 859.(in Chinese))
- [6] LEKHNITSKII S G. Theory of elasticity of an anisotropic rock[M]. Moscow: Mir. Publishers, 1981.
- [7] MILOU L. 岩石力学[M]. 李世平, 冯震海, 译. 北京: 煤炭工业出版社, 1981.(MILOU L. Rock mechanics[M]. Translated by LI Shiping, FENG Zhenhai. Beijing: China Coal Industry Publishing House, 1981.(in Chinese))
- [8] 邓 涛, 杨林德. 各向异性岩石纵、横波的波速比特性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(10): 2 023 - 2 029.(DENG Tao, YANG Linde. Characteristics of velocity ratio of P-wave and S-wave for anisotropic rock[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(10): 2 023 - 2 029.(in Chinese))
- [9] AMADEI B. Importance of anisotropy when estimating and measuring in-situ stresses in rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts, 1996, 33(3): 293 - 325.
- [10] KULATILAKE P H S W, WU T H, WATHUGALA D N. Probabilistic modeling of joint orientation[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1990, 14(5): 325 - 350.
- [11] HOOPER J A. Elastic settlement of a transversely isotropic continuum with surface loading over a polygonal region[C]// Proceedings of the Institution of Civil Engineers(London): [S. l.]: [s. n.], 1985: 247 - 273.
- [12] HUNER D F C. Deformability of joints and its relation to rock foundation settlement[J]. Canadian Center for Mineral and Energy Technology, 1978, 15(2): 239 - 249.
- [13] 许英姿, 唐辉明. 格构梁与预应力锚索复合结构的设计方法研究[J]. 中南公路工程, 2004, 29(2): 1 - 4.(XU Yingzi, TANG Huiming. Design of compound structure of lattice frame beam and prestressed anchor[J]. Journal of Central South Highway Engineering, 2004, 29(2): 1 - 4.(in Chinese))
- [14] 熊文林, 何则干, 陈胜宏. 边坡加固中预应力锚索方向角的优化设计[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2 260 - 2 266.(XIONG Wenlin, HE Zegan, CHEN Shenghong. Optimum design of direction angle of prestressed anchor cable in slope reinforcement[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2 260 - 2 266.(in Chinese))
- [15] 李 权. ANSYS 在土木工程中的应用[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.(LI Quan. Application of ANSYS to civil engineering[M]. Beijing: People's Posts and Telecom Press, 2005.(in Chinese))
- [16] 郝文化. ANSYS 土木工程应用实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.(HAO Wenhua. Application instances of ANSYS to civil engineering[M]. Beijing: China Water Power Press, 2005.(in Chinese))
- [17] 朱宝龙, 杨 明, 胡厚田, 等. 土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 697 - 702.(ZHU Baolong, YANG Ming, HU Houtian, et al. Testing study on internal forces for prestressed anchor cable frame in reinforced soil slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(4): 697 - 702.(in Chinese))