

文章编号:1673-0062(2008)04-0040-06

山区高速公路岩体边坡稳定性处理技术

刘 霁^{1,2}, 陈建宏¹, 周智勇¹, 永学艳¹

(1. 中南大学 资源与安全工程学院, 湖南 长沙 410083; 2. 湖南城市学院 土木工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘 要:在分析岩体边坡稳定性的基础上,建立受非均布线形荷载作用的地基力学模型,应用叠加原理推导出岩体表面在上述荷载作用下,预应力锚索-地梁结构中垂直于梁轴线的平面内的地基中深 z 处的应力和位移计算公式,为研究预应力锚索-地梁结构在岩体中传递规律提供了理论基础.并以湖南省常张高速公路 K123+160~K123+369 边坡为实验区域,现场实验得出在对锚索施加预应力后,锚索预应力通过地梁传递给被加固的岩土体,其传递方式在垂直于地梁轴线的平面内是以梁轴线与该平面的交点为端点的近似椭圆的等值面形式由内向外呈逐渐衰减趋势分布的.藉此证明预应力锚索-地梁结构在山区高速公路岩体边坡中是一种可靠的处理技术.

关键词:岩体边坡;稳定性分析;下滑应力值;边坡加固;预应力锚索-地梁结构

中图分类号:TU457;TD824.7+2

文献标识码:B

Stability Analysis and Processing Technology of Mountain Highway Rock Slope

LIU Ji^{1,2}, CHEN Jian-hong¹, ZHOU Zhi-yong¹, YONG Xue-yan¹

(1. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha, Hunan 410083, China;

2. School of civil engineering, Hunan city university, Yiyang, Hunan 413000, China)

Abstract: Based on the analysis of rock slope stability, and the foundation mechanical model of non linear unipoium load was established, the formulas for stress and displacement of depth of z in a foundation were deduced by superposition principle in the plane perpendicular to the axis of the beam in prestressed anchor - Rope and groundsill structure. So the theoretical basis for the force transmission law was provided. This paper used the slope of K123 + 160 ~ K123 + 369 of Changde - Zhangjiajie Expressway of Hunan Province as experimental region. According to the theoretical analysis, after the anchor cable has been prestressed, the prestress in prestressed cable anchor transferred to the strengthening geotechnical body through ground beam. The transfer mode was decaying

收稿日期:2008-10-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50774092);全国优秀博士学位论文专项资金资助(200449).

作者简介:刘 霁(1974-),男,湖南常德人,中南大学副教授,博士研究生.主要研究方向:建筑施工与管理、资源与环境经济学.

gradually from inner to outer in an approximate ellipse iso - surface in the plane perpendicular to the axis of the beam. By the field experiment we can get the result that the compression strain increased with depth, after peak value it decayed gradually to 0, this distribution form was in accordance with theoretical conclusions.

Key words: rock slope; stability analysis; stress value of downslide; slope consolidation; prestressed anchor - Rope and ground sill structure

0 前言

山区高速公路岩体边坡经常在各种自然条件如洪水、泥石流等下,岩体边坡失去稳定性发生边坡坍塌,堵塞交通甚至造成交通瘫痪,给社会造成重大损失.研究岩体边坡坍塌的机理,采取可靠的处理技术保证岩体边坡稳定性具有重要的现实意义.采用预应力锚索-地梁结构对岩体边坡稳定性处理是一种新型的处理技术.预应力锚索地梁作为一种新型的支挡结构近年来发展得很快,被广泛的运用到边坡的加固,预应力锚索地梁是预应力锚索和地梁共同构成的一种新型支护体系^[1-4,6].与抗滑桩相比具有以下优点:1)双向受压结构;2)施工简单、灵活、速度快,更适用于抢险工程;3)布置灵活,锚索的长度和地点可以根据钻孔反馈的地质资料进行调整^[5].对预应力锚索地梁荷载传递规律的研究目前还主要集中在预应力锚索荷载传递机理的研究和锚头预应力在岩土体中传递规律上,程良奎等对具体深基坑工程的拉力型锚杆锚固段粘结应力的分布形态进行了现场监测.吕庆等对破碎岩质边坡的预应力锚固机制开展系统的数值模拟分析得出锚墩加框格梁的结构形式,明显改善了边坡坡体表层的受力和变形状态^[6].在利用弹性理论推导出在预应力锚索加载后预应力通过地梁在岩土体中的传递机制的基础上^[7],并以湖南慈利县常张高速公路 K123 + 160 ~ K123 + 369 右边坡作为现场试验地点,验证了预应力锚索-地梁结构传力机制的理论分析结果的正确性和岩体边坡加固的有效性.

1 岩体边坡稳定性分析

在山区高速公路的边坡经开挖后,边坡岩体受到风化、地质构造变化等的长期作用,节理裂隙相当发达,成为水体渗流的主要通道和储水空间.应力场的作用导致裂隙几何特性的改变,从而影响渗流量改变渗流场,而渗流场的变化通过改变渗透体积力对应力场产生影响,这种相互影响作用即称之为耦合作用.应力场的分布将影响岩体

结构,引起岩体中地下水性态的改变,最终影响岩体的稳定性^[8].在暴雨引发洪水导致岩体边坡坍塌而造成泥石流,主要是在雾化雨入渗影响下,对坡体表面存在较厚全、强风化带的裂隙岩体边坡,边坡沿浅表层滑动造成的,其失稳破坏的物理力学机制是雾化雨入渗前,边坡内非饱和带的基质吸力较大,边坡岩土介质的凝聚力较大、抗剪强度较高,边坡较为稳定;随着雾化雨入渗的不断进行,坡体内非饱和带的基质吸力逐渐减小,并在非饱和带中形成一些暂态的饱和区,非饱和带基质吸力的减小和暂态饱和区的形成不仅导致岩体抗剪强度显著降低,而且也增加边坡的下滑力,导致边坡安全系数不断降低,当边坡抗滑安全系数随着雾化雨的入渗降至某一值时,岩体边坡就将沿滑裂面产生滑坡破坏或失稳^[9].

2 预应力锚索-地梁结构的传力规律

预应力锚索-地梁结构作为一种加固处理技术,首先研究它的传力规律.将边坡岩体视为一个具有水平表面沿三个空间坐标(x, y, z)方向无限延伸的均质弹性体.设此地基表面作用着一个竖向集中力 P 如图 1,此集中力在地基中引起的应力和位移可用 Boussinesq 弹性力学方法求解半空间弹性体内任意一点 $M(x, y, z)$ 的竖向应力和位移,由式(1)、式(2)得出.

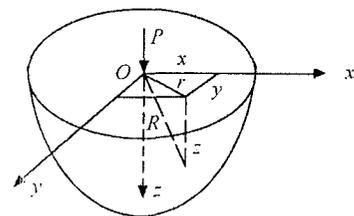


图 1 空间半无限体表面受法向集中力 P 作用的力学模型

Fig. 1 The mechanical model of spatial semiinfinite body surface under the function of normal concentrated force P

$$\left. \begin{aligned}
 u &= \frac{(1+\mu)P}{2E\pi} \left[-\frac{(1-2\mu)x}{R(R+z)} + \frac{xz}{R^3} \right] \\
 v &= \frac{(1+\mu)}{2E\pi} \left[-\frac{(1-2\mu)y}{R(R+z)} + \frac{yz}{R^3} \right] \\
 w &= \frac{(1+\mu)P}{2E\pi R} \left[\frac{z^2}{R^2} + 2(1-\mu) \right]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

$$\left. \begin{aligned}
 \sigma_x &= \frac{P}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3x^2z}{R^3} - (1-2\mu) \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} + \frac{x^2(2R+z)}{R(R+z)^2} \right] \right\} \\
 \sigma_y &= \frac{P}{2\pi R^2} \left\{ \frac{3y^2z}{R^3} - (1-2\mu) \left[\frac{z}{R} - \frac{R}{R+z} + \frac{y^2(2R+z)}{R(R+z)^2} \right] \right\} \\
 \sigma_z &= \frac{3P^3z}{2\pi R^5} \\
 \tau_{yz} &= \frac{3Py^2z}{2\pi R^5} \\
 \tau_{xz} &= \frac{3Px^2z}{2\pi R^5} \\
 \tau_{xy} &= \frac{P}{2\pi R^2} \left[\frac{3xyz}{R^3} - \frac{(1-2\mu)(2R+Z)}{R(R+z)^2} \right]
 \end{aligned} \right\} (2)$$

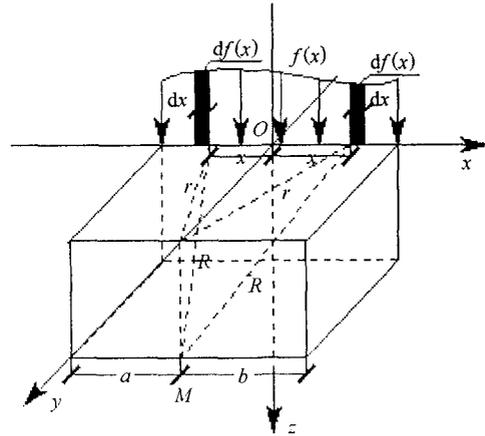


图2 岩体受非均布线形荷载作用力学模型
Fig.2 The mechanical model of foundation under the non linear unipolium load

应用叠加原理则可以计算出地表作用若干个集中力 $P_1, P_2, P_3 \dots$ 时地基中任意点 M 的应力 σ_z 和位移 w 的值。

岩体表面作用于一非均布的线形荷载 $P = f(x)$ 时如图2, 梁中间垂直于梁轴线的平面内的地基中深 z 处的 M 点的应力和位移计算公式可采用微元和应力叠加原理进行推导得出:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \sigma_z &= \frac{3z^3}{2\pi} \left[\int_0^{-a} \frac{f(x)dx}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} + \int_0^b \frac{f(x)dx}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{5}{2}}} \right] \\
 w &= \frac{1+\mu}{2E\pi} \int_0^{-a} \frac{f(x)}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \times \\
 &\quad \left(\frac{z^2}{(x^2+y^2+z^2)} + 2(1-\mu) \right) dx + \\
 &\quad \frac{1+\mu}{2E\pi} \int_0^b \frac{f(x)}{(x^2+y^2+z^2)^{\frac{1}{2}}} \times \\
 &\quad \left(\frac{z^2}{(x^2+y^2+z^2)} + 2(1-\mu) \right) dx
 \end{aligned} \right. (3)$$

3 预应力锚索-地梁荷载传递规律的现场实验研究

3.1 试验边坡地质概况

试验地点在湖南慈利县沙刀湾常~张高速公路 K123+160~K123+369 右边坡见图3。

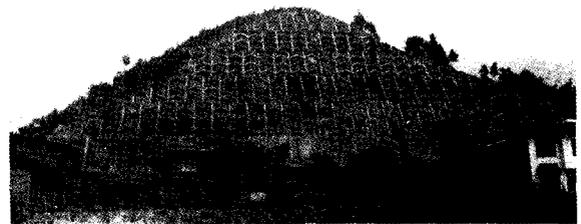


图3 K123+160~K123+369 右边坡加固段
Fig.3 The consolidation segment to the right slope of K123+160~K123+369

该边坡位于走向 SN400 左右的长条形山丘, 坡面宽度 230 m, 坡顶高程 196.2 m, 坡脚最低标高 120 m, 高差 76 m, 自然山坡坡比 1:1.16, 该山丘两侧冲沟最低标高为 117 m. 该坡面与岩层倾向属于逆向坡, 风化层上厚下薄, 属于强风化页岩边坡. 坡面岩层覆盖层为块石质土, 厚度 0.8~2.5 m, 岩石内摩擦系数为 0.5, 容许承载力为 300 kPa. 在边坡防止边坡滑移的设计中, 采用预应力锚索配合地梁加固页岩强风化岩质边坡, 锚索施加的预应力为 $p = 600$ kN, 沿梁长度方向设 3 孔锚索, 在中心部位设一处, 其余 2 处分别设在距梁左、右端各 2 m 处, 地梁和被加固岩土体各强度参数如下: 岩土体基床系数 $k = 2.24 \times 10^4$ kN/m³, 岩土体弹性模量 $E = 1600$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.39$, 混凝土弹性模量 $E = 2.25 \times 10^4$ MPa, 泊松比 $\mu = 0.167$, 地梁宽度 $b = 0.4$ m, 高度 $h = 0.5$ m. 试验点锚索地梁设计参数见表 1.

仪器布设与连接形式见图 4,应变测孔布设在地梁一侧与地梁轴线垂直,每个观测断面设 3 孔,深度各不相同,水平间距为 0.6 m,在每眼测

孔中的不同深度共埋设应变测点 5 个,每测点具体位置与应变计编号见图 5.

表 1 工点锚索地梁设计参数

Table 1 The anchor - Rope and groundsill design parameters of industrial point

地梁规格: 长×宽×高 /m×m×m	锚索规格	倾角 /°	锚孔直径 /mm	锚孔长度 /m	锚固段长度 /m	地梁间距 /m	孔数/排
14.14×1.0×0.8	900 kN 6×φ15.2	25	130	30.5~57.5	10	3	3



图 4 试验地梁检测仪布设情况图

Fig. 4 The layout of experimental groundsill detecting instrument

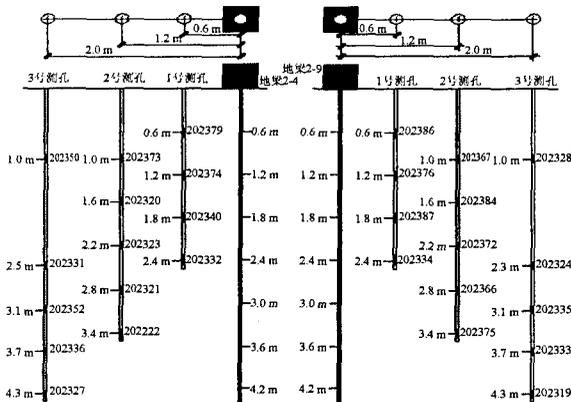


图 5 各应变测孔应变计布设情况图

Fig. 5 The layout of strain gauge to each strain measuring holes

本次试验的主要是要观测地梁在施加预应力后应变在岩体内部的分布规律,以达到边坡加固的目的.观测地梁为 2-4 和 2-9 两根,每根地梁上均作用着三根 600 kN 的预应力锚索,二者分别位于二级平台左右两侧,观测在每根地梁的一边

分别布设 3 个观测孔,地梁 2-4 的观测位置设在梁中间与梁轴线垂直的平面内,地梁 2-9 的观测位置设在距梁端 2 m 且垂直于梁轴线的平面内.测量仪器采用长沙金码公司生产的检测仪器,应变测量选用 ZX-215A 型弦式数码应变计分辨率 1 με,最大量程 ±1500 με,观测仪器为 JMZX-3006 智能振弦数码检测仪.

3.2 试验结果与分析

对应变的观察是在锚索施加预应力后即刻进行的,每天分早上和下午两次连续观察 5 天.图 6 至图 11 分别为地梁 2-4 和地梁 2-9 工作锚在距其距离分别为 0.6 m、1.2 m 和 2.0 m 位置上应变沿深度的分布曲线.由于应力同应变具有相同的分布形式,所以通过对应变分布曲线的观察和分析,就可以判断出应力的分布规律.由图 6~图 7 可以看出,两地梁周边岩体中的应变沿深度的分布曲线基本一致,遵循压应变(为负值)随深度增加由小到大增至峰值,然后逐渐衰减为 0,这种分布形式与理论推导出的距施力点不同距离处岩体中的应力分布曲线形式基本相同.

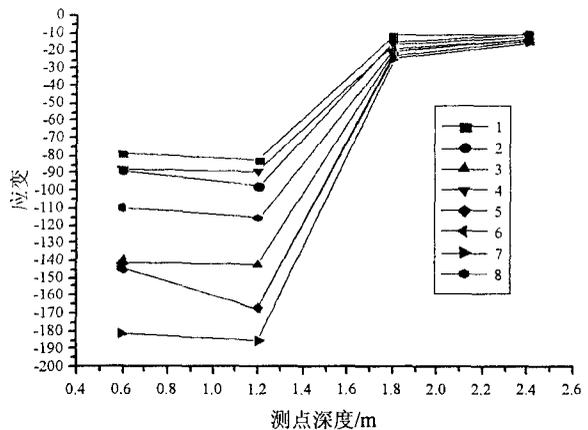


图 6 2-4-1 测孔应变分布图

Fig. 6 The strain distribution map of 2-4-1 measuring hole

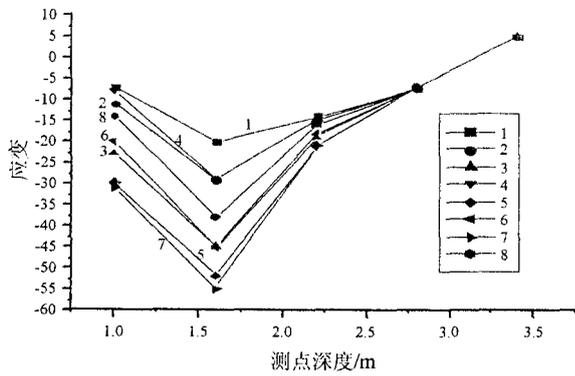


图7 2-4-2 测孔应变分布图
Fig.7 The strain distribution map
of 2-4-2 measuring hole

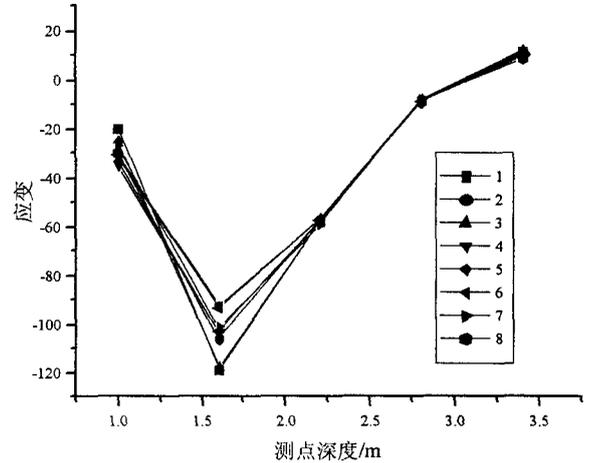


图10 2-9-2 测孔应变分布图
Fig.10 The strain distribution map
of 2-9-2 measuring hole

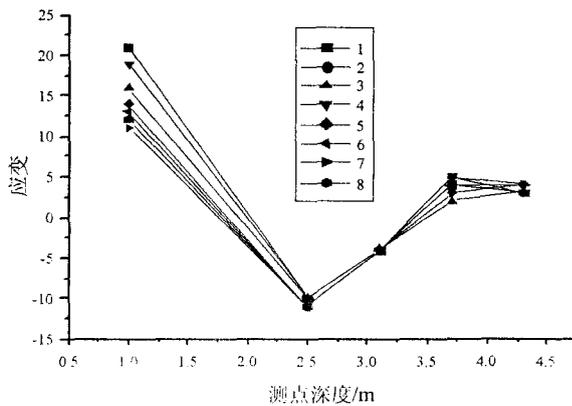


图8 2-4-3 测孔应变分布图
Fig.8 The strain distribution map
of 2-4-3 measuring hole

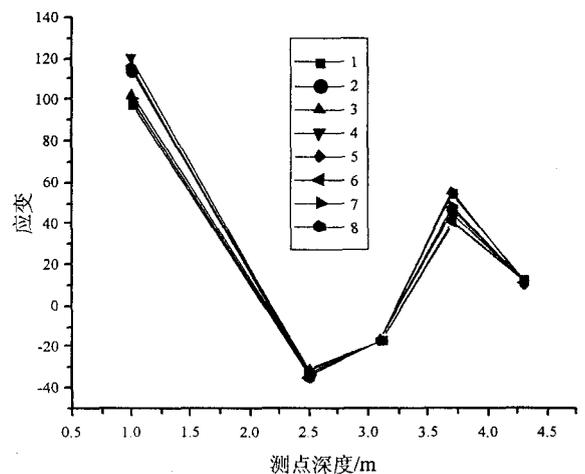


图11 2-9-3 测孔应变分布图
Fig.11 The strain distribution map
of 2-9-3 measuring hole

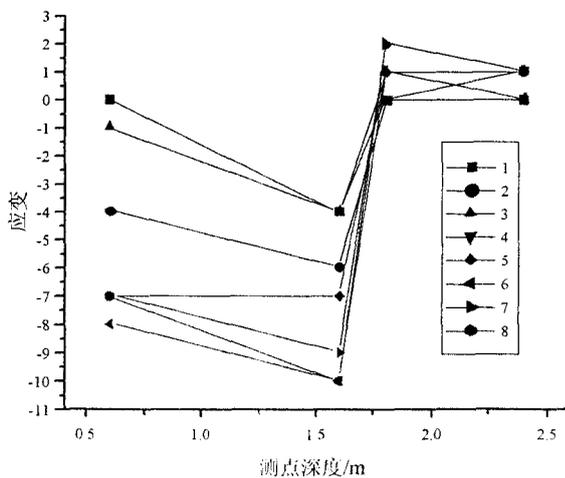


图9 2-9-1 测孔应变分布图
Fig.9 The strain distribution map
of 2-9-1 measuring hole

图9和图11中应变在第一个测点处都不同程度的出现了拉应变,这可能是由于测孔距工作锚距离较远(已达2.0m),压应力分布范围小于测控距离,岩体中单位面积上的下滑应力值已超过压应力的大小,所以造成该位置处的岩体产生一定程度上的拉应变,这从另一方面也说明了岩体中应力等值线的分布形式结论的正确性.这里第一个测点已距工作锚较远,应处于压应力较小的椭圆形等值面中.这一点说明尽管施加了预应力锚索地梁加固,但是坡面上一定范围内和深度内仍然存在拉应变,可能造成浅层岩土体滑移或坍塌.这就是为什么要采用在单根地梁间加横

梁加固边坡的原因所在. 另外,从图中可看出应变观察值的离散程度较大,这可能主要是边坡岩体受温度影响所致,因为每天两次观察是在早上和下午进行的,两次观察环境温差平均高达 12°C ,所以环境气温对观察数据造成了一定程度上的影响,但这对应变沿不同深度的分布趋势并不造成较大影响.

现场试验结果说明了锚索施加预应力后岩体中的应力分布的正确性. 以此证明了预应力锚索-地梁在岩体边坡加固中的有效性.

4 结论

1) 在对锚索施加预应力后,锚索预应力通过地梁传递给被加固的边坡岩土体,其传递方式在垂直于地梁轴线的平面内,是以梁轴线与该平面的交点为端点的近似椭圆的等值面形式由内向外呈逐渐衰减趋势分布的.

2) 实验得出:预应力锚索-地梁周边岩体中的压应变随深度增加由小到大增至峰值,然后逐渐衰减为 0,这种分布形式使预应力锚索-地梁在岩土体中成为可靠的加固处理技术.

3) 施加了预应力锚索地梁加固,但是坡面上一定范围内和深度内仍然存在拉应变,可能造成浅层岩土体滑移或坍塌,在应用预应力锚索-地梁加固技术时应引起重视.

参考文献:

- [1] 丁秀丽,盛 谦,韩 军,等. 预应力锚索锚固机制的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2002,21(7):980-988.
- [2] 夏 雄,周德培. Winkler 弹性地基上预应力锚索地梁内力的计算方法[J]. 线路/路基,2005(1):46-48.
- [3] 李德芳,张友良,陈从新,等. 边坡加固中预应力锚索地梁内力计算[J]. 岩土力学,2000,21(2):170-172.
- [4] 宋从军,周德培,肖世国,等. 预应力锚索地梁在边坡加固中的应用实例[J]. 岩土力学,2002,23(2):242-245.
- [5] Nakayama M, Beaudoin B B. A novel technique determining bond strength developed between cement paste and steel[J]. Cement and Concrete Research,1987,22(3):478-488.
- [6] 吕 庆,孙红月,尚岳全,等. 预应力锚索框格梁体系加固破碎岩质边坡合理问题研究[J]. 岩石力学与工程学报,2006,25(1):136-140.
- [7] 张端良,董燕军,唐乐人,等. 预应力锚索锚固端周边剪应力分布特性的弹性理论分析[J]. 岩石力学与工程学报,2004,23(2):4735-4738.
- [8] 周桂云,李同春,金鹏飞. 裂隙岩体边坡稳定性的渗流与应力耦合分析[J]. 水利水电科技进展,2006,26(5):22-25.
- [9] 张强勇,张绪涛. 雾化雨入渗影响下的岩体边坡稳定性分析方法及其应用[J]. 岩土工程学报,2007,29(10):1572-1576.

(上接第 39 页)

(i) A 是 J -反次正交矩阵;(ii) A 是次对称矩阵($A^{ST} = A$);(iii) $A^2 = -J$.

推论 17 设 $A \in R^{n \times n}$,若下列三个条件中的任何两个成立,则第三个一定成立.

(i) A 是 J -次正交矩阵;(ii) A 是反次对称矩阵($A^{ST} = -A$);(iii) $A^2 = -J$.

推论 18 设 $A \in R^{n \times n}$,若下列三个条件中的任意二个成立,则第三个一定成立.

(i) A 是 J -反次正交矩阵;(ii) A 是反次对称矩阵($A^{ST} = -A$);(iii) $A^2 = J$.

参考文献:

- [1] 秦兆华. 关于次对称矩阵与反次对称矩阵[J]. 西南师范学院学报(自然科学版),1985,10(1):100-110.
- [2] 袁晖坪,张 勇,黄永忠. 次正交矩阵与次合同矩阵[J]. 渝州大学学报(自然科学版),1998,15(1):5-9.
- [3] 王文惠. 关于次正交矩阵[J]. 渝州大学学报(自然科学版),1998,15(2):11-15.
- [4] 陈 琳. 亚次正交矩阵及其性质[J]. 同口师范学院学报,2004,21(5):28-30.
- [5] 袁晖坪. 准正交矩阵与准对称矩阵[J]. 工程数学学报,2004,21(4):642-644.
- [6] 陈景良,陈向晖. 特殊矩阵[M]. 北京:清华大学出版社,2001.