

多相土石复合介质电阻率特性的试验研究

赵明阶¹, 李庚¹, 黄卫东², 李健²

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆市公路工程监理咨询有限公司, 重庆 400060)

摘要: 在对大量多相土石复合介质试件的电阻率测试试验基础上, 分析了土石复合介质土石比、压实特性、含水量等参数对电阻率的影响规律; 基于试验数据的统计分析, 给出了多相土石复合介质电阻率方程, 该方程与 Keller 非饱和土电阻率方程具有完全相同的结构形式。研究表明: 多相土石复合介质电阻率随含水量的增加呈幂函数衰减, 随击实次数的增大而减小, 随含石量的增大而增大; 在相同条件下对电阻率的影响以含水量最为敏感、击实次数和含石量次之; 在考虑含石量对土性参数、胶结系数以及饱和度指数的影响后, 多相土石复合介质电阻率特性完全可以用 Keller 非饱和土电阻率方程来描述。

关键词: 多相介质; 土石复合介质; 电阻率

中图分类号: TV148

文献标志码: A

文章编号: 1674-0696(2010)06-0928-06

Experiment on Electrical Resistivity Properties of Polyphase Soil-stone Mediums

ZHAO Ming-jie¹, LI Geng¹, HUANG Wei-dong², LI Jian²

(1. Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. Chongqing Traffic Engineering Supervision Co., Ltd., Chongqing 400060, China)

Abstract: Based on experimental test of electrical resistivity of polyphase soil-rock samples, the relationship between electrical resistivity and physical parameters, such as soil-rock ratio and compaction properties and moisture content of polyphase soil-rock mediums, was analyzed. The electrical resistivity equation of polyphase soil-rock mediums was proposed and it was the same form as Keller equation on unsaturation soil electrical resistivity. The research results indicated that the electrical resistivity equation of polyphase soil-rock mediums could be analyzed by taking Keller equation after taking the influence of soil-rock ratio for soil indicators and cementation coefficients and saturation exponents into consideration.

Key words: polyphase mediums; soil-rock mediums; electrical resistivity

土石复合介质具有压实性能好、密度大、抗剪强度高、承载力高、透水性强等特点, 是一种工程性能良好的填筑材料, 因此在水利工程中被广泛用于堤坝(如土石坝)、人工地基、港口码头堆场、防洪大堤、城市江岸综合治理等工程中。近年来随着科学技术的发展, 电阻率测试技术被广泛应用于各类工程的隐患检测和质量评价^[1-5]。电阻率测试技术的理论基础是对被测对象的电阻率特性的研究, 目前国内外对纯岩石介质和纯土介质的电阻率特性研究已有大量的研究成果^[6-12], 并基本形成了相应的理论体系, 使得电阻率测试技术在岩石地基或土质地基中应用均能获得较满意的结果^[13]。然而土石复合介质是由土颗粒、岩石颗粒、颗粒间的孔隙以及孔隙中的气体和水等部分组成的典型多相介质, 其级配变化大、含水量极其不均匀, 并且颗粒粒径、岩石

类型、含石量、含水量、压实程度等均对工程特性有巨大影响, 其物理力学特性与纯土介质和纯岩石介质有着本质的区别, 因此采用纯土体介质或纯岩石的电阻率理论显然是无法准确评价土石复合材料的结构性及其物理力学参数, 这也使得多相土石复合介质的电阻率特性研究成为当前运用电阻率测试技术解决土石混合料水工建筑物质量评定和隐患诊断的关键基础理论问题。

由于目前对土石复合介质电阻率特性研究处于一片空白, 从而无法运用电阻率测试技术定量测试和分析土石混合材料的结构性; 因此为准确判断土石坝隐患及其稳定性、内河港口码头土石混填堆场地基压实质量、土石基础的承载能力以及其他以土石为材料的建筑物的稳定性等提供理论基础, 笔者通过大量多相土石复合介质试件的电阻率测试, 寻

收稿日期: 2010-06-10; 修订日期: 2010-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(50779081); 重庆市科技攻关项目(CSTC2007AC6037)

作者简介: 赵明阶(1967-), 男, 四川广元人, 教授, 博士, 主要从事岩土及水工结构工程教学与科研工作。E-mail: m.j.zhao@163.com。

求土石复合介质的电阻率与土石比、压实特性、含水量等参数之间的相关关系,为运用电阻率测试技术解决土石混合料水工建筑物质量评定和隐患诊断问题奠定理论基础。

1 多相土石复合试样的电阻率测试

1.1 试样制作

试验采用的土为重庆地区常见的强风化泥岩风化、破碎后形成的土,石料则采用石灰岩。土体的容重为 20.2 kN/m³,岩石的容重为 26.8 kN/m³,土体含水量为 10%。材料的级配曲线如图 1。试验用水为本地自来水,其电阻率为 3.42 Ω·m。

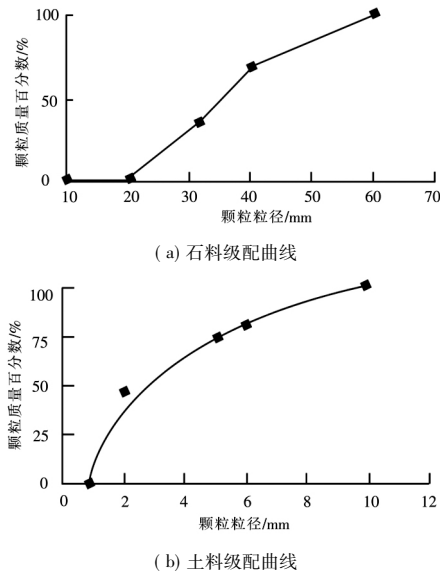


图 1 土和石的级配曲线

Fig. 1 Gradation curve of rock and soil

试验目的主要是测试不含水率、击实次数、土石比条件下多相土石复合介质的电阻率,因此选取多相土石复合介质试样的含水量、击实次数、和土石比 3 个因素进行试样配置,各试样工况如表 1。

表 1 试样工况

Tab. 1 Species of testing samples

土石比	5:5	6:4	7:3	8:2
击实次数/次	8	16	24	32
含水量/%	5	10	15	20

试样采用电动击实仪制作,试样直径 10 cm,试样长度 20 cm。称量制备好的多相土石复合介质及相应含水量所需的水,在容器里拌匀,将拌匀后的多相土石复合介质放入击实筒内击实成型。本次试验共制作试样 60 个。

1.2 电阻率测试

制作好的试样采用万用表、自制圆形铜片进行电阻率测试,试验装置见图 2。在试样上下两表面黏贴自制铜片,铜片后用导线接出,用万用表测得电阻 ρ ,土样的电阻率计算式为: $\rho_s = \rho \pi R^2 / l$ 。

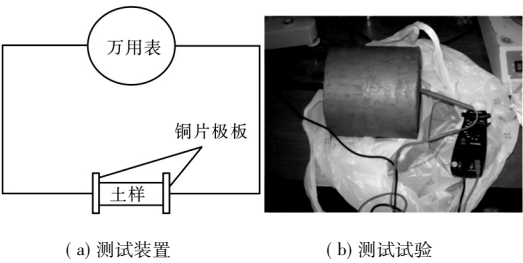


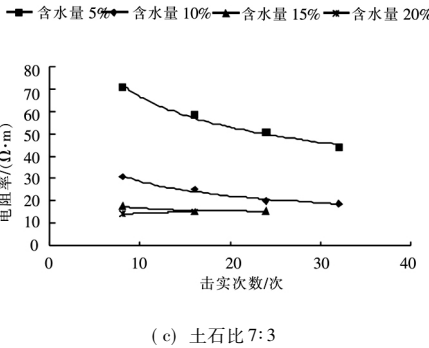
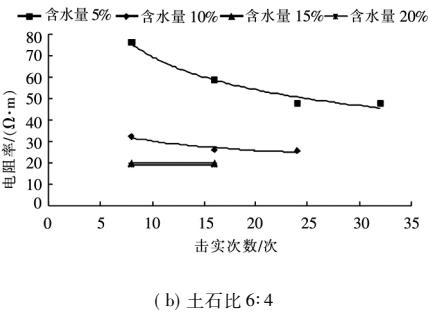
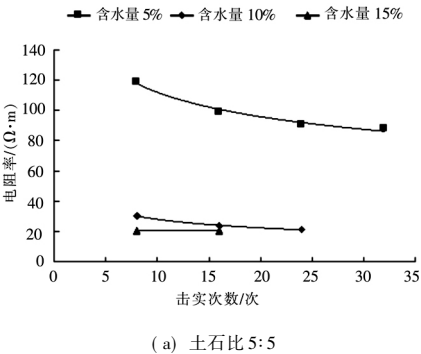
图 2 多相土石复合介质电阻率试验装置
Fig. 2 Installation of electrical resistivity test of polyphase soil-rock samples

2 多相土石复合介质电阻率试验结果

为了获得多相土石复合介质电阻率特性的统计关系,首先根据试验测试数据,分别对土石比、击实次数、含水量与电阻率的影响规律进行分析。

2.1 击实次数对电阻率影响

由试验数据分别绘制相同土石比和含水量条件下不同击实次数对电阻率影响的关系曲线,如图 3。可以看出,在保持土石比和含水量不变的情况下,多相土石复合介质电阻率随击实次数的增大而减小。



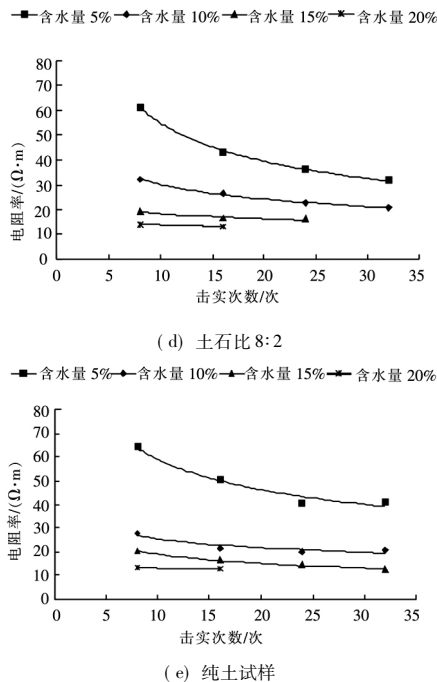


图3 多相土石复合试样的电阻率与击实次数关系

Fig.3 Relationship curve between electrical resistivity and compaction times of polyphase soil-rock samples

击实次数的增大,代表着土石复合介质的干密度增大,介质中的空隙减小。由于空气的电阻率远大于岩石和土体的电阻率,因此通过击实次数的不断增加可以使得多相土石复合介质总体积迅速变小,从而使得多相土石复合介质电阻率迅速变小。

上述关系随着含水量的增大,电阻率随击实次数的变化幅度逐渐减小,因含水量增大造成击实次数对多相土石复合介质中空气所占比例的减小趋于不明显,也就造成击实次数对电阻率的影响越来越不明显。

从上述分析中可以得出结论,击实次数对电阻率影响主要取决于击实造成的土石复合介质中空气所占比例的变化,或者说击实次数对电阻率影响实际上代表了介质中空气体积大小对电阻率的影响。

2.2 含水量对电阻率影响

由试验数据分别绘制相同土石比和击实次数条件下不同含水量对电阻率影响的关系曲线,如图4。可以看出,在保持土石比和击实次数不变的情况下,多相土石复合介质电阻率随含水量的增大而减小。

容易理解,在相同土石比和击实次数条件下,含水量越大,介质中的空隙饱和度就越大,空气体积就越小。而水的电阻率远小于空气的电阻率,因此造成多相土石复合介质电阻率随含水量的增大而减小。此时如果增大击实次数,将使多相土石复合介质中的空隙饱和度增大,因此从图中表现出增大击实次数增大,多相土石复合介质的电阻率减小。

从上述分析中可以得出结论,含水量对电阻率

影响主要取决于土石复合介质中空隙饱和度,含水量增大,介质饱和度增加,电阻率减小,反之亦然。

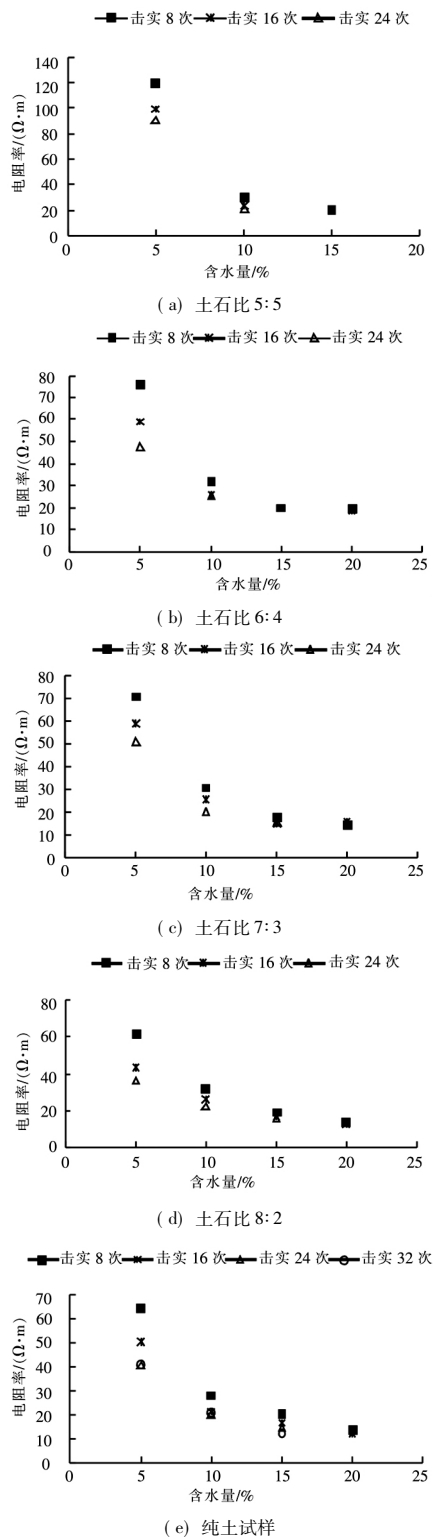


图4 多相土石复合试样的电阻率与含水量关系

Fig.4 Relationship curve between electrical resistivity and moisture content of polyphase soil-rock samples

根据上述观点,当介质空隙饱和度趋近于1.0时,介质的电阻率也将趋近于一个极小值,这个极小值就是饱和土石复合介质的电阻率,如果介质空隙

连通,这个极小值将接近于介质孔隙水电阻率。从图 4 中可以看出,当含水量超过 15% 时,电阻率已趋近于一个定值。

2.3 土石比对电阻率影响

由试验数据分别绘制相同含水量和击实次数条件下不同土石比对电阻率影响的关系曲线,如图 5。可以看出,在保持含水量和击实次数不变的情况下,多相土石复合介质电阻率随含石量的增大而增大。这主要是由于岩石颗粒的电阻率比土体的电阻率大的缘故。但这种关系同样受到含水量的影响,当含水量增大时,含石量对电阻率影响减小。表明,含石量对电阻率影响仍然取决与介质的含水量。

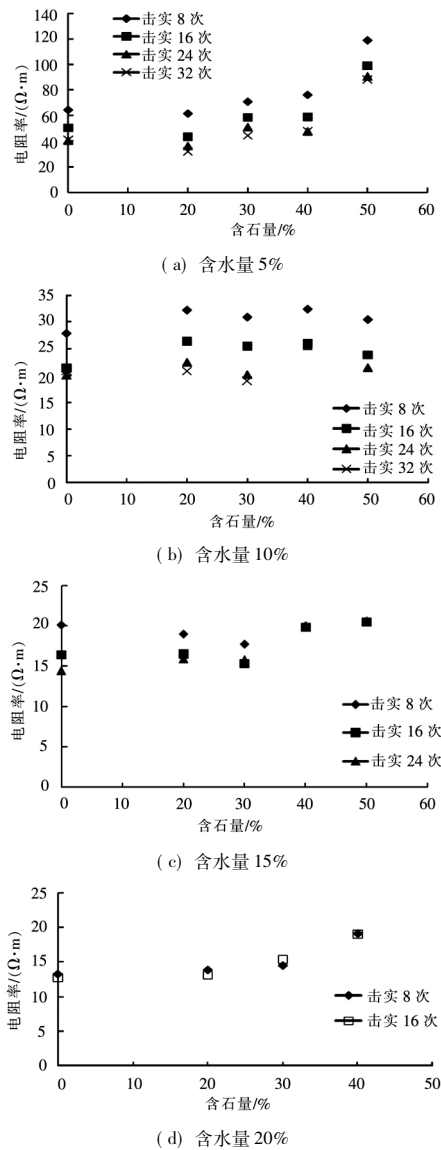


图 5 多相土石复合试样的电阻率与土石比关系
Fig. 5 Relationship curve between electrical resistivity and soil-rock ratio of polyphase soil-rock samples

由图 5 可以看出,多相土石复合介质试件的土石比与电阻率关系较为复杂。总的来说,从纯土到土石比 5:5 电阻率成先减小后增大的趋势。

3 电阻率特性的统计规律分析

为了获得多相土石复合介质电阻率特性随含水量、土石比、击实次数之间的定量关系,在实验数据的基础上,采用回归分析方法建立多相土石复合介质电阻率特性的统计规律。

从试验结果中可以看出,含水量、土石比、击实次数三者对电阻率的影响,以含水量最为敏感。以含水量为基本变量进行分析。根据实验数据,设含水量与电阻率之间满足如下幂函数关系:

$$\rho = a\omega^{-b}$$
 (1)

式中: ρ 为多相土石复合介质电阻率; ω 为含水量; a 、 b 为待定系数。由图 4 可得不同含石量与击实次数下的待定系数 a 、 b 值,如表 2。含石量与击实次数对待定系数得影响曲线如图 6、图 7。

表 2 不同含石量与击实次数下的待定系数值
Tab. 2 Undetermined coefficient of samples with different rock content compacted by several times

击实次数/次	含石量/%				
	50	40	30	20	0
8	0.834 / 1.635	1.048 / 3.100	1.175 / 2.060	1.081 / 2.488	1.109 / 2.229
16	0.995 / 1.501	0.849 / 4.256	1.030 / 2.521	0.880 / 3.216	0.988 / 2.474
24	1.106 / 1.430	0.690 / 5.701	0.935 / 2.785	0.741 / 3.971	0.854 / 2.300
32	1.281 / 1.383	0.690 / 5.701	0.827 / 3.362	0.634 / 4.376	0.910 / 2.586

注:表中斜杠“/”上方为 a 值,下方为 b 值。

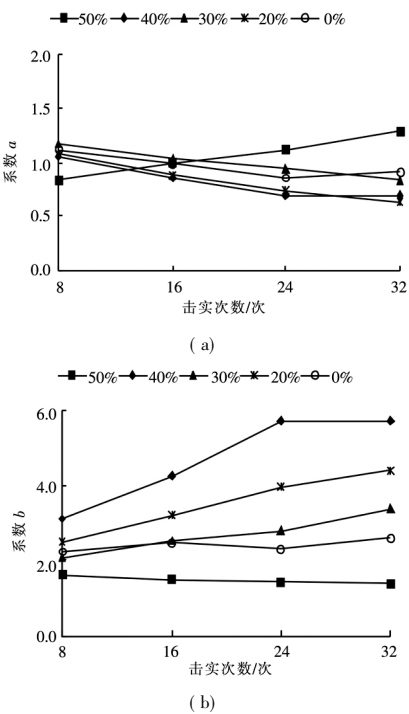


图 6 待定系数随击实次数的变化关系
Fig. 6 Relationship curve between compaction times and undetermined coefficient a and b

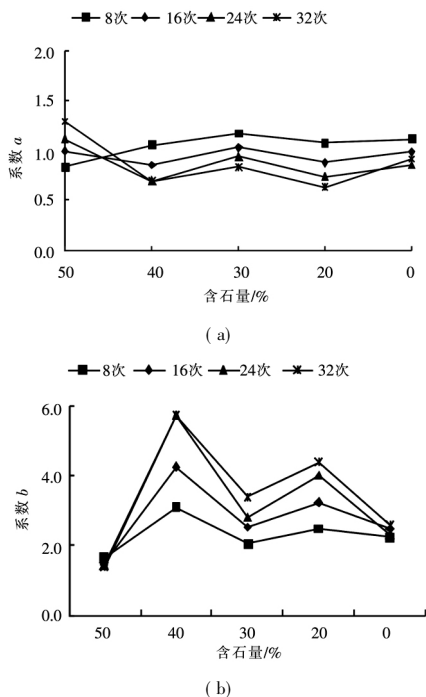


图7 待定系数随含石量的变化关系

Fig. 7 Relationship curve between soil-rock ratio and undetermined coefficient a and b

由图6可以看出,待定系数 a 随击实次数呈幂函数关系变化,而待定系数 b 随击实次数呈线性函数关系变化。由于击实次数对电阻率的影响主要反映在介质孔隙中空气的体积的大小对电阻率的影响,因此,可以将式(1)写为:

$$\rho = kV_a^{-m}\omega^{-b} \quad (2)$$

式中: V_a 为介质孔隙中的空气体积; k, m 为与土性参数相关的系数; 其余参数同前。根据土体物理性质参数之间的关系,式(2)可进一步写成:

$$\rho = kn^{-m}S_r^{-m}\omega^{-b} \quad (3)$$

式中: S_r 为介质饱和度; n 为介质的空隙度; 其余参数同前。

从图7可以看出,在相同的击实次数条件下,土石比对系数 a 和 b 的影响并不明显,因此式(3)中所有待定系数均可以看成是构成土石复合介质的水、土颗粒、岩石颗粒的电阻率的某种组合关系。

如果将多相土石复合介质等效为干燥土粒、干燥岩石、干燥空气和水的并联电阻模型,由于水的电阻率远小于干燥土粒、干燥岩石、干燥空气的电阻率,因此可将视干燥土粒、干燥岩石、干燥空气的电阻率为无穷大,而多相土石复合介质主要通过孔隙水导电。因此式(3)可以写成:

$$\rho = c\rho_w n^{-m}S_r^{-m}\omega^{-b} \quad (4)$$

式中: ρ_w 为孔隙水电阻率; m 为与土性参数相关的系数; 其余参数同前。

考虑到介质空隙率、饱和度和含水量之间的相

关关系,将式(4)进一步写成:

$$\rho = c\rho_w n^{-p}S_r^{-q} \quad (5)$$

式中: p 为空隙度指数; q 为饱和度指数; 其余参数同前。

1966年Keller与Frischknecht在Archie模型的基础上,曾拓展出用于非饱和土的电阻率方程:

$$\rho = a\rho_w n^{-m_1}S_r^{-p_1} \quad (6)$$

式中: ρ 为土电阻率; ρ_w 为孔隙水电阻率; a 为土性参数; m_1 为胶结系数; n 为孔隙率; S_r 为土体饱和度; p_1 为土饱和度指数。

从式(5)和式(6)可以看出,多相土石复合介质的电阻率方程在形式上与Keller方程完全一致,所不同的是多相土石复合介质由于含石量的影响,其土性参数、胶结系数以及土饱和度指数将与纯土介质有较大差异,关于这一点有待进一步研究。但上述研究表明,在考虑含石量对土性参数、胶结系数以及饱和度指数的影响后,多相土石复合介质电阻率特性完全可以用Keller非饱和土电阻率方程来描述。

4 结 语

通过对大量多相土石复合介质试件的电阻率测试试验与分析,得出如下结论与认识:

1) 多相土石复合介质含水量、土石比、击实次数三者对电阻率的影响,在相同条件下以含水量最为敏感、击实次数和含石量次之。

2) 多相土石复合介质电阻率随含水量的增加呈幂函数衰减;随击实次数的增大而减小,但这种关系随着含水量的增大,其变化幅度逐渐减小。在保持含水量和击实次数不变的情况下,多相土石复合介质电阻率随含石量的增大而增大,但这种关系同样受到含水量的影响,当含水量增大时,含石量对电阻率影响减小。

5) 多相土石复合介质电阻率方程与Keller非饱和土电阻率方程具有完全相同的结构形式。在考虑含石量对土性参数、胶结系数以及饱和度指数的影响后,多相土石复合介质电阻率特性完全可以用Keller非饱和土电阻率方程来描述。但含石量对土性参数、胶结系数以及饱和度指数的影响规律却有待进一步的研究。

参考文献:

- [1] 于小军,刘松玉.电阻率特性参数法应用于高速公路路基结构性研究综述[J].公路交通科技,2004,21(6):8-11.
- [2] 白登海,于晟.电阻率层析成像理论和方法[J].地球物理学进展,1995,10(1):56-75.
- [3] 马骥,郭纪中,戴洪军,等.场地土电阻率测试分析与模糊评价[J].电力勘测设计,2005(6):36-40.

- [4] 严明良. 电阻率法在岩土工程中的应用[J]. 水利水电科技进展, 2004, 24(2): 39-40, 50.
- [5] 赵明阶, 徐容, 王俊杰, 等. 电阻率成像技术在土石坝渗漏诊断中的应用[J]. 重庆交通大学学报: 自然科学版, 2010, 28(6): 1097-1101.
- [6] Archie G E. The electric resistivity log as aid in determining some reservoir characteristics [J]. Trans. American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, 1942, 146: 54-61.
- [7] Arulanandan K, Muraleetharan K. Level ground soil liquefaction analysis using in situ properties [J]. Journal of Geotechnical Eng., 1988, 114(7): 753-789.
- [8] Keller G, Frischknecht F. Electrical methods in geophysical prospecting [M]. New York: Pergamon Press, 1966.
- [9] Mitchell J K, Arulanandan K. Electrical dispersion in relation to soil structure [J]. Soil Mech. and Found. Div., ASCE, 1968, 94(2): 447-471.
- [10] Fukue M, Minato T, Horibe H, et al. The microstructures of clay given by resistivity measurements [J]. Engineering Geology, 1999, 54(1): 43-53.
- [11] 邓少贵, 边瑞雪, 范宜仁, 等. 岩石电阻率频散及其对阿尔奇参数的影响[J]. 测井技术, 1998, 22(4): 227-230.
- [12] 范宜仁, 陆介明, 王光海, 等. 岩石电阻率频散现象的实验研究[J]. 石油大学学报: 自然科学版, 1994, 18(1): 17-23.
- [13] 查甫生, 刘松玉, 杜延年. 电阻率法在地基处理工程中的应用探讨[J]. 工程地质学报, 2006, 14(5): 637-643.

(上接第 887 页)

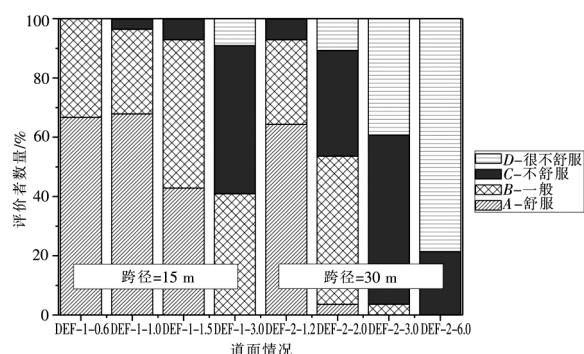


图6 不同弯沉情况下的乘坐舒适性评价

Fig. 6 Riding comfort evaluation of runway with different deflection

3.2 桥路基过渡段不均匀沉降对操作安全性和乘坐舒适性的影响

试验结果见图7。与前面的分析结果类似,操作安全性和乘坐舒适性随着过渡段不均匀沉降量(机场跑道中桥梁和道路相邻处的沉降差)的增加而变差,从舒适性的角度看这种变化规律更为明显;大飞机对不均匀沉降量的变化较小飞机敏感。依据50%的飞行员评价为不舒服或更差这一标准,桥路基过渡段不均匀沉降量应小于4 cm。

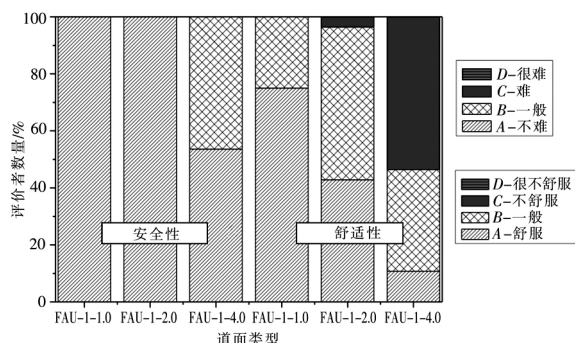


图7 不同错台情况下道面的安全性和舒适性

Fig. 7 Operation safety and riding quality evaluation of runway with different joint faulting

4 结论

通过试验研究及分析,可得出如下结论:

- 1) 不管飞机的类型和运行模式,飞行操作安全性和飞机乘坐舒适性均随着机场道面弯沉和过渡段不均匀沉降量的增加而变差。
- 2) 相对而言,乘坐舒适性对道面的要求更为严格。
- 3) 30 m 跨径、42 cm 板厚的套件结构可以获得较好的安全性和舒适性。
- 4) 路基和桥梁过渡段的不均匀沉降量不宜超过 4 cm。

参考文献:

- [1] Hachiya Y, Maekawa R, Su K. Laboratory performance of pier deck pavement for new runway D at Tokyo Haneda International Airport [C] // 6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology. Sapporo [s. n.], 2008.
- [2] Ishida T, Shirakawa T, Kawamura A, et al. Using the KIT driving simulator to evaluate road surface roughness [C] // TRB Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 2007.
- [3] Wickey C, Printant P, Le C. Faros driving simulators for training: concepts, syllabus and validation [C] // Proceedings of the Driving Simulation Conference. Paris [s. n.], 2001.
- [4] Lee W S, Cho J H. Development of a new Kookmin University driving simulator and its application to a sudden acceleration study [C] // Proceedings of the Driving Simulation Conference. Paris: [s. n.], 2002.
- [5] Ishida T, Kawamura A, Tomiyama K. Quantitative evaluation of ride comfort using a driving simulator [C] // TRB Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 2008.
- [6] Endo K, Himeno K, Kawamura A, et al. Longitudinal surface profiles of an airport runway and aircraft motion [C] // Proceeding of the 2002 FAA Airport Technology Transfer Conference. Atlantic City: [s. n.], 2002.
- [7] Janoff M S. Pavement roughness and ride ability field evaluation [C] // TRB Annual Meeting. Washington, D. C.: TRB, 1988.