

民用机场水泥混凝土道面强度变异性分析

袁捷¹, 张昊¹, 柴震林², 苏新³

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室, 上海 200092; 2. 上海机场(集团)有限公司建设开发公司, 上海 201207;

3. 中国民航机场建设集团公司机场工程科研基地, 北京 100101)

摘要: 根据国内 35 个民用机场 427 个实测水泥道面芯样的劈裂强度测试结果, 分析了道面结构强度变异性的分布规律, 并采用方差分析手段计算了道面结构强度与机场使用年限、飞行区等级、道面位置、不同机场等因素之间的显著性影响水平。分析表明民用机场水泥混凝土道面结构强度的变异性是客观存在的, 采用基于结构强度变异水平等级的可靠度系数处理这一问题更为合理。为此, 根据道面结构强度变异系数的累积分布频率推荐了其变异水平分级标准, 并计算了相应的可靠度系数, 可为我国民用机场水泥混凝土道面设计规范修编中引入可靠度方法提供参考。

关键词: 机场道面; 水泥混凝土; 结构强度; 分布规律; 变异性; 可靠度

中图分类号: U 416.216

文献标志码: A

Variability Analysis of Civil Airfield Concrete Pavement Structure Strength

YUAN Jie¹, ZHANG Hao¹, CHAI Zhenlin², SU Xin³

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Airport Authority Constructure and Development Company, Shanghai 201207, China; 3. Research and Development Center, China Airport Construction Group Corporation of Civil Aviation Administration of China, Beijing 100101, China)

Abstract: Based on the in-situ data of 427 pavement cores including 35 civil airports, the structural strength variability was analyzed and the variability distribution pattern was provided. The results of the analysis of variance indicate that pavement service time, airfield grades, various locations, and respective airports accept the significance test mostly, so the pavement structural design based on reliability is more reasonable. In the end, the reliability coefficient in pavement design was proposed based on the structural strength variability accumulative frequency distribution.

Key words: airport pavements; cement concrete; structural

strength; distribution pattern; variability; reliability

混凝土弯拉强度是水泥混凝土道面结构设计及评价中非常重要的技术指标。由于施工面积大、水泥生产工艺不同、集料等地材来源广泛,加之施工管理水平与环境差异等原因,弯拉强度具有一定的变异性,设计中结构强度采用定值分析具有一定的片面性。因此,为反映混凝土强度的不确定性,公路水泥混凝土路面设计规范^[1]已经采用了以可靠度理论为基础的设计方法,而采用可靠度理论必须掌握道面强度的分布规律与实际的变异性水平。为此,本文依据国内 35 个民用机场水泥混凝土道面现场实测数据,采用统计分析手段对道面强度的变异范围、影响因素、变异水平分级标准等进行了系统研究,并据此推荐了基于不同目标可靠度与变异水平的可靠度系数,用于反映混凝土弯拉强度变异性的影响,可为将来我国民用机场水泥混凝土道面设计规范中引入可靠度系数提供技术参考。

1 数据采集与分析方法

水泥道面材料强度可采用直接拉伸强度、间接拉伸(劈裂)强度和弯拉强度三项指标表征,其中弯拉强度最符合板块的实际受力状态^[2]。但直接采用小梁弯拉强度表征材料的变异性存在以下问题:一是实验室制备的试件无法反映混凝土在运输、摊铺、振捣、养生等施工环节的质量差异,二是从道面上切取标准尺寸的小梁操作难度很大。因此,采用从道面上钻取芯样测定劈裂强度,并根据换算关系推算弯拉强度的方法更为简单和合理。

为了分析我国民用机场水泥混凝土道面强度的变异性,根据近 10 年国内多个民用机场水泥道面评

价数据,按照使用年限、机场等级、道面位置等因素,选择了 35 个机场 427 个实测道面芯样的劈裂强度数据进行研究,用于分析的样本基本情况见表 1,表

中所有混凝土芯样的劈裂强度试验分别由中国民航机场建设集团公司机场工程科研基地和同济大学机场工程研究中心两家单位实施。

表 1 混凝土劈裂强度测试样本基本情况

Tab.1 Statistical summaries for selected pavement core test

考虑因素	抽样数/个	机场数量/个	备 注
使用年限	新机场	120	指道面自建成至现场检测的时间,按照≤10 年(新机场)和>10 年(旧机场)划分
	旧机场	307	
机场等级	4E	108	“其他”指通用航空机场
	4D	106	
	4C	122	
	3C	63	
	其他	28	
芯样位置	跑道	336	“其他”指滑行道和停机坪道面
	其他	91	

2 劈裂强度的总体分布

行正态性检验,显著性水平取 0.05,正态分布检验表见表 2。

将 427 组劈裂强度的测试结果作为一个总体进

表 2 混凝土劈裂强度正态分布检验表

Tab.2 Test of normality of concrete core splitting strength

Kolmogorov-Smirnov(K-S)检验			Shapiro-Wilk(S-W)检验		
K-S 检验统计量	自由度	K-S 检验统计量概率 p	S-W 检验统计量	自由度	S-W 检验统计量概率 p
0.026	427	0.200	0.995	427	0.246

由表 2 可以看出,K-S 检验和 S-W 检验统计量的概率 p 均大于正态性检验的显著性水平(0.05),可以接受劈裂强度服从正态分布的 H_0 原假设。劈裂强度频率分布的直方图如图 1 所示,其正态分布的两个数字特征均值 $\mu=4.07$ MPa,均方差 $\sigma=0.937$ MPa;描述分布形态的两个统计量分别是偏度(Skewness)为 0.57 和峰度(Kurtosis)为 0.455,说明劈裂强度的分布形态在对称性方面为“右偏分布”,在扁平程度方面为“扁平分布”。

般情况下混凝土的劈裂强度小于弯拉强度^[3],从劈裂强度的均值(4.07 MPa)可以推测民用机场水泥道面的弯拉强度基本满足设计要求^[4]。

表 3 混凝土劈裂强度统计量描述

Tab.3 Descriptive statistics about concrete splitting strength

统计内容	均值 /MPa	95%置信区间 范围/MPa	实测值范围/MPa	均方差 /MPa	变异系数/%
统计值	4.07	3.98~4.16	1.15~7.23	0.937	23

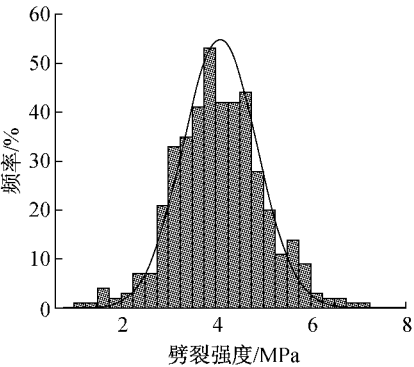


图 1 劈裂强度频率直方图

Fig.1 Frequency histogram for splitting strength

劈裂强度统计特征值的分析结果见表 3。由于一

3 道面强度的影响因素

3.1 道面建成使用年限差异

为分析不同使用年限道面在结构强度方面是否存在显著性差异,将劈裂强度按道面使用年限分为两类,即将建成使用年限小于 10 年的道面定义为“新机场”,而建成使用年限大于 10 年的道面定义为“老机场”,采用单因素方差分析方法分析不同年限道面劈裂强度是否具有显著性差异(显著性水平取 0.05),结果见表 4,表中, F 为检验统计量(下同)。

方差显著性检验结果拒绝 H_0 假设,即建成使用

表 4 不同使用时间民用机场道面劈裂强度的统计及方差分析

Tab.4 Variance analysis of splitting strength on various service times

方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
组 间	26.02	1	26.016	31.75	拒绝假设
组 内	348.26	425	0.819		
总 和	374.28	426			
统计明细	统计分类	样本数量	劈裂强度均值/MPa	劈裂强度均方差/MPa	
	新机场	120	4.46	1.02	
	旧机场	307	3.92	0.86	

年限不同的道面在结构强度方面存在显著性差异。从统计明细可以看出,新机场道面劈裂强度均值比老机场高 14%,一方面可能在于混凝土的结构强度在荷载与环境共同作用下有所衰减,另一方面可能在于后期建设的民用机场在设计时弯拉强度设计标准较之前有所提高。

3.2 飞行区等级差异

针对不同时期建设的机场,根据飞行区等级分别对道面劈裂强度影响的显著性进行了方差分析(显著性水平取 0.05),结果见表 5。表中,飞行区等级划分为 4E、4D、4C、3C 和通用航空机场 5 个等级。

表 5 飞行区等级对道面劈裂强度影响显著性的方差分析

Tab.5 Variance analysis of splitting strength on various airfield grades

类 别	方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
新机场	组 间	30.25	4	7.562	9.355	拒绝假设
	组 内	92.96	115	0.808		
	总 和	123.21	119			
旧机场	组 间	4.52	4	1.129	1.546	接受假设
	组 内	220.54	302	0.730		
	总 和	225.05	306			

方差分析结果表明,新机场飞行区等级差异与劈裂强度之间具有显著性差异(拒绝 H_0 假设),而老机场的影响则不显著(接受 H_0 假设)。原因可能是近年来高等级飞行区道面的施工及管理相对低等级飞行区道面都更加高一些,而这一情况在上世纪八九十年代(及更早)建设的机场中,则并不存在很大差异。

3.3 飞行区道面位置差异

按照同样思路,将劈裂强度按照跑道和飞行区其他位置进行分组后,进行了方差分析(表 6),表中,芯样位置按照跑道和其他位置(滑行道与停机坪)分为 2 个等级。结果与飞行区等级显著性影响分析结论相似。

表 6 芯样位置对道面劈裂强度影响显著性的方差分析

Tab.6 Variance analysis of splitting strength on various airfield locations

类 别	方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
新机场	组 间	18.98	1	18.977	21.483	拒绝假设
	组 内	104.23	118	0.883		
	总 和	123.21	119			
旧机场	组 间	0.880	1	0.880	1.198	接受假设
	组 内	224.17	305	0.735		
	总 和	225.05	306			

进一步分析发现,新机场在跑道与其他位置上劈裂强度的均值分别为 4.66 和 3.67 MPa,跑道的强度明显高于其他位置,而老机场跑道与其他位置劈裂强度的均值则相反,分别为 3.89 MPa(跑道)和 4.02 MPa(其他位置)。笔者推测,造成新机场跑道混凝土强度明显高于其他位置的主要原因可能在于建设单位对于跑道施工质量的重视程度更高。由于滑行道和停机坪的道面结构承载要求高于跑道,因

此建议在今后的机场建设中,应进一步加强飞行区其他位置的道面施工质量控制。

3.4 不同机场的差异

为了考察不同机场的道面劈裂强度是否存在显著性差异,对 427 个芯样按照机场进行分组后进行了劈裂强度的方差分析,见表 7。表中为了消除新机场不同位置对于劈裂强度的影响,方差分析时新机场样本为跑道位置的芯样,考虑到新机场如果按照

不同飞行区等级进行分组后各组的样本规模太小,因此方差分析中没有根据飞行区等级进行分组,对影响显著性分析的结果会造成一定的影响.可以看出,不论是新机场还是老机场,不同机场之间的道面劈裂强度存在显著性差异(均拒绝 H_0 假设).其差异来源是多方面的,除施工质量控制水平方面的差异

外,水泥与地材来源不同等因素也是不同机场之间水泥道面强度存在显著性差异的重要原因.因此,由于水泥道面强度的变异性是客观存在的,在民用机场水泥混凝土道面结构设计中应该考虑引入弯拉强度的可靠度系数.

表 7 不同机场道面劈裂强度影响显著性的方差分析

Tab.7 Variance analysis of splitting strength on respective airports

类 别	方差来源	平方和	自由度	均方和	F 值	显著性检验结果
新机场	组 间	39.89	10	3.989	6.683	拒绝假设
	组 内	50.73	85	0.597		
	总 和	90.62	95			
旧机场	组 间	116.29	23	5.056	13.153	拒绝假设
	组 内	108.76	283	0.384		
	总 和	225.05	306			

4 道面强度变异性分布

水泥道面强度变异性分布规律研究中的分组方法为:① 老机场将同一个机场的芯样作为同一个批次计算组内样本的变异系数;② 新机场由于跑道与其他位置道面劈裂强度之间存在显著性差异,因此根据芯样取样位置不同分别计算各批次芯样劈裂强度的变异系数.

4.1 劈裂强度变异系数累积分布频率

按照 39 组(新机场:15 组,其中 4 个机场的芯样分为跑道和其他位置,旧机场:24 组)实测劈裂强度统计了变异系数,将新机场与旧机场道面劈裂强度变异系数的累积分布频率分别绘制(图 2),两条变异系数累积分布曲线比较接近,因此在道面强度变异水平分级中将 39 组样本统一考虑,得到民用机场水泥混凝土道面劈裂强度变异系数的累积分布曲线(图 2),变异系数在不同分位区间的累积分布频率见表 8.

表 8 劈裂强度变异系数的累积分布频率

Tab.8 Accumulative frequency distribution of splitting strength variability

累积频率分位区间/%	5	25	35	50	65	75	95
劈裂强度变异系数/%	4.1	10.5	13.3	14.9	17.1	19.6	35.5

表 9 弯拉强度与劈裂强度的经验关系式

Tab.9 Experimental relationship between flexural strength and splitting strength

公式来源	关系式	备 注
空军工程设计研究院	$f_r=1.58+1.04f_{sp}$	机场旧道面碎石混凝土和卵石混凝土试件
我国公路水泥混凝土设计规范	$f_r=2.64+0.621f_{sp}$	旧混凝土 76 组碎石混凝土和 38 组卵石混凝土的结果

根据表 9 中的两个经验换算公式将劈裂强度转换为弯拉强度,结果见表 10,从均值上看,两种不

同方法得到的结果差异较大,采用空军设计院方法得到的结果比公路设计规范方法大 12.4%.如按照

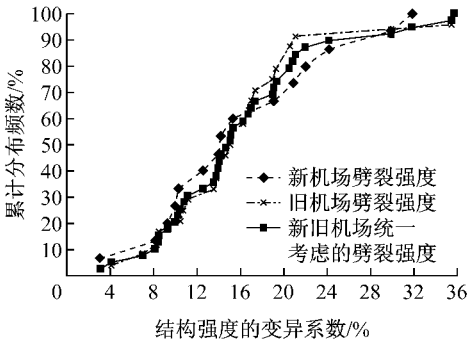


图 2 道面结构强度变异系数的累积频率分布

Fig.2 Accumulative frequency distribution curve of structural strength

根据统计结果,我国民用机场水泥道面劈裂强度的变异系数分布范围为 3.1%~35.7%,唐伯明等^[5]从公路 18 个新建路段和 48 个旧路段样本数据统计得到的混凝土劈裂强度变异系数的范围分别为 4%~25%和 8%~26%,可见我国不同机场水泥道面强度的变异性相对较大.

4.2 劈裂强度变异性与弯拉强度变异性的关系

在水泥道面结构设计及结构评价中,均采用弯拉强度指标.弯拉强度与劈裂强度之间的关系可根据试验研究推算,机场和公路常用经验关系式见表 9,表中 f_r 为混凝土弯拉强度, f_{sp} 为混凝土劈裂强度.

空军设计院的方法,总体样本中 7.3 % 的混凝土弯拉强度不满足机场水泥道面结构强度的最低要求 (4.5 MPa),而按照公路设计规范方法,这一比例为 10.8 %。

表 10 混凝土弯拉强度统计量描述

Tab.10 Descriptive statistics about concrete structure strength

统计内容	均值/MPa	95%置信区间/MPa	均方差/MPa	变异系数/%
空军设计院经验公式	5.81	5.72~5.91	0.975	17
公路设计规范经验公式	5.17	5.11~5.22	0.582	11

笔者整理了近年国内公开发表的有关水泥路面劈裂强度与弯拉强度对应关系的有关资料(表 11),选择线性和指数两种方程形式,假定回归曲线经过坐标轴原点,采用最小二乘法对劈裂强度与弯拉强度变异系数之间的相关性进行了回归分析(图 3),回归方程参见式(1)和(2)。

$$C_{fr} = 0.457 C_{fsp}^{1.076}, r^2 = 0.867 \quad (1)$$

$$C_{fr} = 0.570 C_{fsp}, r^2 = 0.670 \quad (2)$$

式(1)~(2)中: C_{fr} 为混凝土弯拉强度的变异系数,%; C_{fsp} 为混凝土劈裂强度的变异系数,%; r 为相关系数。

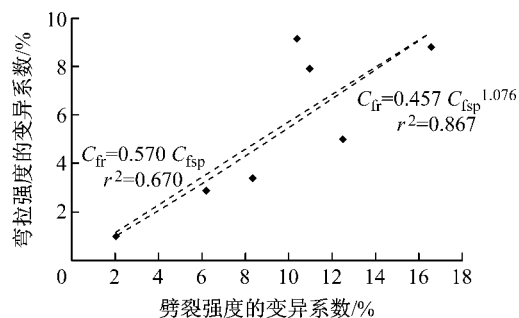


图 3 劈裂强度变异系数与弯拉强度变异系数的回归关系

Fig.3 Regulation of variability between flexural tensile strength and splitting strength

表 11 水泥混凝土路面劈裂强度与弯拉强度变异系数的统计

Tab.11 Variation correlation between flexural tensile strength and splitting strength

数据来源	样本数量	小梁抗折强度的变异系数/%	圆柱体芯样劈裂强度的变异系数/%	备注
文献[6]	5	3.40	8.34	抗折强度为小梁标准性养护 28 d 实测结果,劈裂强度为小梁试件断块取 $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 圆柱体实测结果。
	5	1.01	2.03	
	5	2.89	6.19	
文献[7]	25	5.01	12.47	同上
文献[8]	26	7.94	10.97	同上
文献[9]	20	8.83	16.58	未说明
文献[10]	54	9.17	10.38	抗折强度为现场制备的小梁标准性养护 28 d 结果,劈裂强度为现场取芯 $\phi 100 \text{ mm} \times 150 \text{ mm}$ 结果。

根据劈裂强度变异系数的累积分布频率(表 8)和回归公式(1)和(2),可以得到弯拉强度变异系数在不同分位区间的累积分布频率(表 12)。

表 12 弯拉强度变异系数的累积分布频率

Tab.12 Accumulative frequency distribution of flexural tensile strength variability

累积频率分位区间/%									
式(1)弯拉强度变异系数/%	2.1	5.8	7.4	8.4	9.8	11.3	21.4		
式(2)弯拉强度变异系数/%	2.3	6.0	7.6	8.5	9.7	11.2	20.2		

参照公路水泥混凝土设计规范^[1]中对于变异水平的分级标准,道面结构强度按照其变异系数的累积分布范围线性划分为三个等级,不同变异水平下变异系数的分级统计标准见表 13。

考虑到公式(1)和公式(2)仅包括 7 个样本点,回归公式的相关系数也较低,因此在确定机场水泥道面弯拉强度变异性分级参考标准时,对表 13 中的

表 13 民用机场道面结构强度变异水平分级统计标准

Tab.13 Level of structural strength variability of civil airport pavements based on statistical data

变异水平	累积频率范围/%	劈裂强度变异系数/%	弯拉强度变异系数/%	
			式(1)	式(2)
低	5~35	4.1~13.3	2.1~7.4	2.3~7.6
中	35~65	13.3~17.1	7.4~9.8	7.6~9.7
高	65~95	17.1~35.5	9.8~21.4	9.7~20.2

结果进行取整(表 14),作为可靠度系数的计算依据。

表 14 民用机场道面结构强度变异水平参考分级标准

Tab.14 Recommended level of structural strength variability of civil airport pavements

变异水平	累积频率范围/%	弯拉强度变异系数/%
低	5~35	2~7
中	35~65	7~10
高	65~95	10~21

4.3 基于弯拉强度变异水平等级的可靠度系数

设计中通过引入强度可靠度系数 γ_r 考虑道面弯拉强度变异性的影响,由于弯拉强度符合正态分布特征,其不同置信水平下的单侧置信区间下限的表达式如下:

$$f_{rp} = f_r \cdot (1 - u_p c_v) \quad (3)$$

式中: f_{rp} 为满足目标可靠度 $(1-p)$ 的实际弯拉强度,MPa; f_r 为混凝土设计弯拉强度,MPa; u_p 为标准正态分布的 p 分位数; c_v 为弯拉强度的变异系数。

现行道面设计规范^[4]采用极限状态表达式控制荷载应力水平,因此考虑了道面强度变异性影响的

极限状态表达式可修正为

$$\sigma_p \leq (1 - u_p \cdot c_v) \cdot f_m \quad (4)$$

式中: σ_p 为板边计算荷载应力,MPa; f_m 为混凝土弯拉疲劳强度,MPa。

根据式(4),考虑道面强度变异性影响的可靠度系数可用式(5)表示^[11],其物理意义为在确定变异水平的情况下,实际的道面强度可以满足目标可靠度的强度要求。

$$\gamma_r = 1/(1 - u_p c_v) \quad (5)$$

参照公路工程结构可靠性设计统一标准(GB/T 50283),道面强度在三类变异水平下的可靠度系数建议取值见表 15。

表 15 民用机场水泥混凝土道面结构强度可靠度系数参考取值

Tab.15 Recommended structural reliability coefficients of civil airport cement pavements

		目标可靠度/%			
		95	90	85	80
结构强度可靠度系数	低	1.03~1.13	1.03~1.10	1.02~1.08	1.02~1.06
	中	1.13~1.20	1.10~1.15	1.08~1.12	1.06~1.09
	高	1.20~1.53	1.15~1.37	1.12~1.28	1.09~1.21

5 结 语

(1) 根据 35 个民用机场共 427 个现场芯样劈裂强度的统计分析表明,民用机场水泥道面劈裂强度的分布符合正态分布的特征,在对称性方面为“右偏分布”,在扁平程度方面为“扁平分布”。

(2) 单因素方差分析表明,民用机场不同以及道面建成使用年限不同,均与道面强度之间存在显著性差异;对于建成使用年限少于 10 年的机场,飞行区等级及道面位置也与道面强度之间存在显著性差异,而建成使用年限大于 10 年的机场,则不存在这一现象;民用机场水泥混凝土道面强度的变异性是客观存在的,应在道面结构设计中予以考虑。

(3) 在民用机场道面劈裂强度变异系数累积分布频率的基础上,参考有关资料统计分析了劈裂强度变异系数与弯拉强度变异系数之间的相关关系,计算了民用机场道面弯拉强度变异系数的累积分布频率,并参照公路水泥混凝土道面设计规范的方法对民用机场水泥混凝土道面强度的变异水平进行了分级。

(4) 基于现行设计规范道面结构极限状态表达式与民用机场水泥混凝土道面弯拉强度变异性水平的分级标准,推荐了不同目标可靠度水平下的可靠度系数,可以在道面结构设计中比较合理地考虑结构强度变异性的影响。

参考文献:

- [1] JTG D40—2002 公路水泥混凝土路面设计规范[S]. 北京:中华人民共和国交通部, 2002.
JTG D40—2002 Specifications of cement concrete pavement design for highway [S]. Beijing: Ministry of Transport of People's Republic of China, 2002.
- [2] 姚祖康. 水泥混凝土路面设计[M]. 合肥:安徽科学技术出版社, 1999.
YAO Zukang. Design of cement concrete pavements [M]. Hefei: Anhui Science and Technology Press, 1999.
- [3] 蔡正咏, 李世琦. 路面水泥混凝土抗折强度的经验关系[J]. 中国公路学报, 1992, 5(1):14.
CAI Zhengyong, LI Shiqi. The experimental correlation between flexural tensile strength and flexural compressive strength of cement concrete pavement [J]. China Journal of Highway and Transport, 1992, 5(1):14.
- [4] MHJ 5004—2009 民用机场水泥混凝土道面设计规范[S]. 北京:中国民用航空局, 2009.
MHJ 5004—2009 Specifications for cement concrete pavement design of airports [S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2009.
- [5] 唐伯明, 姚祖康, 沈惠生, 等. 水泥混凝土路面结构参数的变异性分析 [J]. 中国公路学报, 1996, 9(4):17.
TANG Boming, YAO Zukang, SHEN Huisheng, et al. Variability analysis of concrete pavement structure parameters [J]. China Journal of Highway and Transport, 1996, 9(4):17.
- [6] 曾鹏飞. 面层水泥混凝土弯拉强度与劈裂强度经验关系式的确定[J]. 中外公路, 2009, 29(5):266.
ZENG Pengfei. The experimental correlation between flexural

- tensile strength and splitting strength of cement concrete of pavement [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2009, 29(5):266.
- [7] 文银平, 刘沐泽, 吴玉浩, 等. 信阳地区路面水泥混凝土质量检测与评定研究[J]. *华中科技大学学报*, 2009, 26(2):61.
WEN Yinping, LIU Muze, WU Yuhao, et al. Quality detection and evaluation of pavement cement concrete in xinyang city [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 2009, 26(2):61.
- [8] 雷利玲. 劈裂法评定砼面层强度的试验研究[J]. *公路与汽运*, 2003, 97(4):40.
LEI Liling. Experimental research of pavement strength evaluation by splitting method [J]. *Highways & Automotive Applications*, 2003, 97(4):40.
- [9] 汪振祺, 赵弘亮. 水泥混凝土路面混凝土强度的研究 [J]. *公路*, 1989(11):38.
WANG Zhenqi, ZHAO Hongliang. Research on cement concrete pavement strength [J]. *Highway*, 1989(11):38.
- [10] 光同文. 路面混凝土劈裂强度与弯拉强度的相关关系 [J]. *当代建设*, 2002(1):46.
GUANG Tongwen. Relevance between flexural tensile strength and splitting strength of PCC pavement. [J]. *Current Construction*, 2002(1):46.
- [11] 谈至明, 姚祖康, 刘伯莹. 水泥混凝土路面结构可靠性设计方法[J]. *公路*, 2002(8):7.
TAN Zhiming, YAO Zukang, LIU Boying. Reliability-based design procedure for cement concrete pavements [J]. *Highway*, 2002(8):7.
-
- (上接第341页)
- interacted system [J]. *Engineering Mechanics*, 2010, 28 (Supplement D):195.
- [3] Bittner R B, Gerwick B C, Zhang X. Design and construction of the Sutong bridge foundations [J]. *Journal of Deep Foundations Institute*, 2007, 1(1):2.
- [4] Liu S X, Li Y C, Li G W. Wave current forces on the pile group of base foundation for the east sea bridge, China [J]. *Journal of Hydrodynamics, Ser B*, 2007, 19(6):661.
- [5] Westergaard H M. Water pressures on dams during earthquakes [J]. *ASCE Transactions*, 1933, 98:418.
- [6] Morison J R, O'Brien M P, Johnson J W, et al. The force exerted by surface waves on piles [J]. *Petroleum Transactions, AIME*, 1950, 189:149.
- [7] 赖伟. 地震和波浪作用下深水桥梁的动力响应研究[D]. 上海: 同济大学土木工程学院, 2004.
LAI Wei. Dynamic interaction between deep-water bridges and water during earthquakes and wave [D]. Shanghai: College of Civil Engineering of Tongji University, 2004.
- [8] 刘振宇, 李乔, 赵灿晖, 等. 深水矩形空心桥墩在地震作用下附加动水压力分析[J]. *振动与冲击*, 2008, 27(2):53.
LIU Zhenyu, LI Qiao, ZHAO Canhui, et al. Study of the earthquake induced added hydrodynamic pressure on the deep-water hollow rectangular piers [J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2008, 27(2):53.
- [9] 黄信, 李忠献. 动水压力作用对深水桥墩地震响应的影响[J]. *土木工程学报*, 2011, 44(1):65.
HUANG Xin, LI Zhongxian. Influence of hydrodynamic pressure on seismic response of bridge piers in deep water [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(1):65.
- [10] 宋波, 李悦. 高桩承台动水力简便计算方法[J]. *北京科技大学学报*, 2011, 33(4):509.
SONG Bo, LI Yue. Simplified calculation method of hydrodynamic force for elevated pile caps [J]. *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 2011, 33(4):509.
- [11] Gao Y, Yuan W C, Jin X G. Soil-structure-water interaction of a cable-stayed bridge under seismic excitation [C/CD]//The 14th World Conference on Earthquake Engineering. Beijing: [s. n], 2008.
- [12] Bhatta D D, Rahman M. On scattering and radiation problem for a cylinder in water of finite depth [J]. *International Journal of Engineering Science*, 2003, 41(9):931.
- [13] Miquel B, Bouaanani N. Practical dynamic analysis of structures laterally vibrating in contact with water [J]. *Computers & Structures*, 2011, 89(23-24):2195.
- [14] Liaw C Y, Chopra A K. Dynamics of towers surrounded by water [J]. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 1974, 3(1):33.