

# 深圳湾公路大桥设计风速的推算\*

陈正洪 向玉春 杨宏青

(武汉城市气象工程技术中心,武汉 430074)

毛 夏 张小丽 周 新

(深圳市气象台,深圳 518008)

刘晓东

(中交公路规划设计院,北京 100010)

## 摘 要

从资料的完整性和合理性、方法的规范性等几方面着手,对深圳湾公路大桥设计风速进行推算。利用深圳市气象站 1954~2001 年逐年年最大风速资料,通过时距、高度、地形等订正后得到相当于开阔平地上方 10 m 高度 10 min 年最大风速 48 年序列,使之符合建筑抗风指南或规范的要求。再利用极值 I 型计算出不同重现期的基本风速,同时用耿贝尔的参数估算法和修正后的矩法参数估计法计算出不同重现期(200、120、100、60、50、30、10 年)的基本风速。研究发现桥位区自动气象站与深圳市气象站最大风速正相关显著,前者是后者的 1.1 倍,从而可将基本风速外推到桥位区,进一步根据规范将该值放大  $1.1^{1/2}$  (1.049) 倍至海面上,最终得到设计风速。还利用近地层风的指数和对数曲线推算出 150 m 内每 10 m 高度层的最大风速。

关键词:深圳湾公路大桥 年最大风速 基本风速 设计风速 极值 I 型

## 引 言

即将建设的深圳湾公路大桥横跨深圳湾,计划于 2003 年初开工建设,2005 年底建成,是打通深圳与香港西部通道的一项重要工程,建成后可有效缓解深圳市中心区道路及公路口岸的交通压力,改善市中心区的环境。而现代大桥跨度越来越大,建筑材质越来越轻,风压与风振成为现代大桥设计中的最重要的限制因子,对抗风设计要求更高<sup>[1~7]</sup>。由于深圳地处低纬海岸,每年都要受到热带气旋和台风的影响,伴有暴雨、风暴潮等,对经济建设和生命财产造成严重威胁<sup>[8]</sup>。根据 1953~2001 年的资料统计<sup>[9]</sup>,影响深圳的热带气旋和台风年均 4.3 次,最多年 10 次(1964 年),最少也有 1 次(1968、1982 年),其中严重影响的有 1.5 次,主要集中在 7~9 月份。可见抗御大风是深圳湾大桥设计中必需考虑的问题,本文就是对设计风速的专门研究。研究中重点做到:取得完整而合格的资料,对气象台年最大风资料序列进行概率推算前需作均一性审查和订正<sup>[10~13]</sup>,设计风速的推算必须符合规范,注重局地地形气候条件的考察和分析。

20 世纪 90 年代以来,我国在基本风速的概率计算中有两大进展,一是风速资料大部

\* 深圳市交通局资助。

2003-02-13 收到,2003-04-14 收到修改稿。

分取自自记记录,并且为 10 min 平均最大值;二是明确用极值 I 型分布函数来进行年最大风速的概率计算。本文将严格按这些规定来求取桥位附近的“基本风速”(桥梁所在地区开阔平坦地面以上 10 m 高处 100 年重现期的 10 min 平均年最大风速),并将其合理移植到桥位区(海边),即可得到设计(基准)风速。因海边开阔,摩擦系数小,其风速会大于内陆风速<sup>[1,3,10,14]</sup>。

## 1 资料及步骤

资料来源于深圳市气象局档案室,该市只有 1 个国家基本气象站,位于市区中心,离桥位约 10 km。由于观测场地、仪器种类及其离地高度、风速取值的时间间隔等对风的大小有很大影响,表 1 列出了深圳市气象局观测场地、仪器变更情况。深圳市拥有 40 个自动气象站,是全国最稠密的自动气象站观测网,在桥位区附近有几个站,集中在 1997 年后建成使用,观测要素中包括风向、风速等。

设计风速推算基本思路和步骤为:(1) 深圳市及桥位区气象资料和风灾资料的收集;(2) 建立 1954~2001 年逐年最大风速序列;(3) 进行均一性审查和订正(时距订正、高度订正、地形订正),从而得到 48 年完整的 10 m 高度上 10 min 平均年最大风速序列;(4) 利用极值 I 型方法推算出气象站不同重现期的基本风速;(5) 利用海边自动气象站资料将其向深圳海边订正,再根据规范向海上订正(放大  $\sqrt{1.1}$ ),得到桥位区不同重现期的设计风速;(6) 再应用指数曲线推算出桥位区水面以上 150 m 内各层最大风速,供设计、施工、维护直接应用或参考。

表 1 深圳市气象站(风)观测场地、仪器变更情况

序号	项目	变更情况
1	站址	未变,位置为 22.33°N,114.06°E,观测场海拔 18.2 m
2	资料读取	1952~1970 年为 2 min 平均正点观测;1971 年后为 10 min 平均自记观测
3	观测仪器	1954~1970 年用风压器;1971 年 1 月起用 EL 型电接风向风速计
4	风仪离地高度(m)	1953 年:13.4; 1954~1960 年:6.9; 1961~1965 年:13.4; 1966~1967 年:12.2; 1968~1974 年:10.53; 1975~1981 年:10.5; 1982~1985 年:15.9(平台离地 9.4); 1986~1994 年:38.6(平台离地 20.9); 1995 年起:38.6(平台离地 29.3)

## 2 桥位区设计风速的推算

### 2.1 深圳市气象站年最大风速序列均一性的审查和订正

#### 2.1.1 1954~1970 年风压器观测的年最大风速序列时次和高度订正

由于深圳 1954~1970 年间年最大风速取自 2 min 观测,必须进行“时距换算”<sup>[12]</sup>(表 2):

$$Y = 0.88 X + 0.80 \quad (Y: \text{自记 } 10 \text{ min 平均最大风速}, X: 2 \text{ min 平均最大风速})$$

另外 1954~1970 年间风观测仪器离地的高度有 3 次变化,还须换算到 10 m 高度,在近地层内,风速随高度变化的指数公式:

$$V_n = V_1 \left( \frac{Z_n}{Z_1} \right)^\alpha$$

式中  $V_n$ 、 $V_1$  分别为高度为  $Z_n$ 、 $Z_1$  处的风速,  $\alpha$  为地面粗糙度指数(也叫风廓线指数), 取  $\alpha=0.13$ (因只是靠近海边, 故取值比海边略大)。将各参数代入求出各时段订正方程为: 1954~1960 年:  $V_{10\text{ m}} = 1.049 V_{6.9\text{ m}}$ , 1961~1965 年:  $V_{10\text{ m}} = 0.962 V_{13.4\text{ m}}$ , 1966~1967 年:  $V_{10\text{ m}} = 0.975 V_{12.2\text{ m}}$ , 1968~1970 年:  $V_{10\text{ m}} = 0.993 V_{10.53\text{ m}}$ 。

表 2 深圳市气象站 1954~1970 年的年最大风速及其时次和高度转换

年份	2 min 年 最大风速 ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	转换成自记 10 min 年最 大风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	风仪离地 高度 (m)	转换成 10 m 高度 自记 10 min 年 最大风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )
1954	28	25.4	6.9	26.6
1955	16	14.9	6.9	15.6
1956	14	13.1	6.9	13.7
1957	34	30.7	6.9	32.2
1958	16	14.9	6.9	15.6
1959	12	11.4	6.9	12.0
1960	34	30.7	6.9	32.2
1961	20	18.4	13.4	17.7
1962	28	25.4	13.4	24.4
1963	20	18.4	13.4	17.7
1964	34	30.7	13.4	29.5
1965	18	16.6	13.4	16.0
1966	20	18.4	12.2	17.9
1967	16	14.9	12.2	14.5
1968	20	18.4	10.53	17.9
1969	17	15.8	10.53	15.8
1970	16	14.9	10.53	14.9
1954~1960 平均	22.0	20.2		21.1
1961~1965 平均	24.0	21.9		21.1
1966~1967 平均	18.0	16.6		16.2
1968~1970 平均	17.7	16.4		16.4

由表 2 可见, 经两次订正后, 年最大风速在 1966~1970 年的平均值( $16.2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  $16.4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 与此后 1971~1993 年的平均值( $15.3\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) 基本一致, 说明订正合理。至于 1954~1965 年间平均值仍高达  $21.1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 可能反映的是气候变化, 当时常出现大风。

### 2.1.2 1971~2001 年电接风仪观测的年最大风速序列均一性审查和订正

深圳 1980 年成立特区, 此前不存在城市发展对最大风速序列的影响, 年最大风速最有代表性。成立特区以来, 城市的发展、城市规模的扩大对年最大风速的影响, 也有一个从没有影响到影响不大再到影响显著的发展过程, 深圳市气象台在 20 世纪 80 年代两次提高风速观测平台的离地高度, 就是为了消除城市发展对风速的影响而采取的有效措施。

由图 1 可见, 1982~1993 年期间的年最大风速值并没有因为风仪离地高度的增高而显著增长, 而是和不受城市发展影响的 1971~1981 年期间的年最大风速值很接近, 这说

明了风仪离地高度的增高部分,在 1993 年以前抵消了城市发展对风速的影响。因此,有理由把 1982 年以后的风仪离地高度视同 1971 ~ 1981 年期间的离地高度 10.53 m,因为这个高度与 10 m 很接近,所以可以不进行高度订正了。而 1994 ~ 2001 年间的年最大风速比 1971 ~ 1993 年间的年最大风速明显偏小,显然与深圳台四周出现了更高的建筑有关,不仅不需作高度(降低)订正,而且需要作系统(提高)订正。前后两个序列的均值经作  $t$  检验<sup>[15]</sup>差异显著:1971 ~ 1993 年,  $n_1 = 23$ ,  $\bar{x}_1 = 15.3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $s_1 = 4.1177$ ; 1994 ~ 2001 年,  $n_2 = 8$ ,  $\bar{x}_2 = 11.6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $s_2 = 2.827$ , 据此算出  $t = 2.273$ 。取信度 0.05, 自由度  $n_1 + n_2 - 2 = 29$ , 查表得  $t_{0.05} = 2.045$ 。因为  $t = 2.273 > t_{0.05} = 2.045$ , 所以  $\bar{x}_1$  与  $\bar{x}_2$  的差异显著。两个均值的比值为 1.31, 用比值法将 1994 ~ 2001 年期间历年年最大风速乘上 1.31, 就可以消除不均匀现象, 图 1 中的粗实线即是订正后的年最大风速(表 3)。

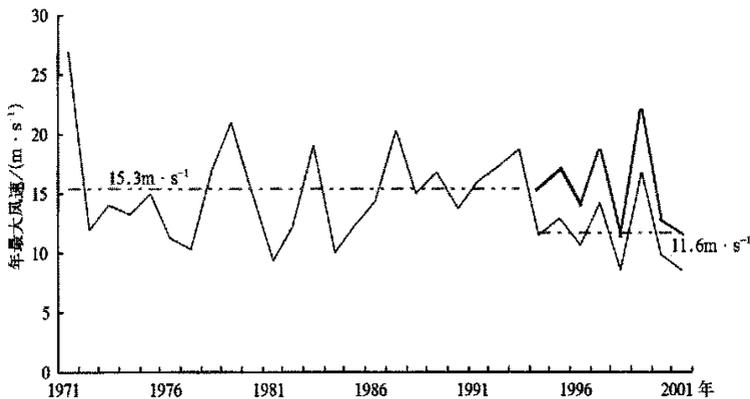


图 1 深圳市气象台的年最大风速变化图

表 3 深圳市气象站 1971 ~ 2001 年的年最大风速

年份	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979	1980	1981
年最大风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	27.0	12.0	14.0	13.3	15.0	11.3	10.3	17.0	21.0	15.0	9.3
年份	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992
年最大风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	12.3	19.0	10.0	12.3	14.3	20.3	15.0	16.7	13.7	16.0	17.3
年份	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001		
年最大风速( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )	18.7	11.5	12.9	10.7	14.2	8.5	16.7	9.8	8.5		
订正后的值		(15.1)	(16.9)	(14.0)	(18.6)	(11.4)	(21.9)	(12.8)	(11.4)		

表 2 和表 3 共同构成了 1954 ~ 2001 年 48 年完整的相当于空旷地上的 10 m 高度 10 min 平均年最大风速序列, 可用于基本风速的概率推算。

## 2.2 年最大风速的概率计算

本文使用的资料是经过订正的 10 min 平均年最大风速, 有 48 年资料, 符合指南或规范对资料的要求。并用极值 I 型<sup>[16]</sup>计算出不同重现期的基本风速, 由于耿贝尔的参数估算法的估算误差较小, 所以, 我们建议采用耿贝尔法计算出的基本风速。为了让设计人员有一个选择的余地, 也为了有一个相互比较、相互验证的结果, 我们也给出修正后的矩法

参数估计法<sup>①</sup> 计算出的基本风速。

$$\text{极值 I 型的分布函数是: } F(x) = p(X_{\max} < X) = e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (1)$$

$$\text{其超过保证率函数是: } p(x) = 1 - e^{-e^{-\alpha(x-u)}} \quad (2)$$

2.2.1 用耿贝尔法估计参数  $\alpha$  和  $u$

令  $y = \alpha(x - u)$ , 求得  $y$  的保证率函数为:

$$p(y) = p(Y \geq y) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad (3)$$

$$E(Y) = \alpha[E(X_M) - u]$$

$$D(Y) = \alpha^2 D(X_M)$$

$$\text{由此得到: } \alpha = \frac{\sigma_y}{\sigma_{xM}} \quad (4)$$

$$u = E(X_M) - \frac{1}{\alpha} E(y) = E(X_M) - \frac{\sigma_{xM}}{\sigma_y} E(y) \quad (5)$$

可用表 2 和表 3 中订正后的年最大风速的均值  $\bar{x} = 16.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , 及标准差  $S_x = 5.4213$  作为  $E(X_M)$  及  $\sigma_{xM}$  的近似估计值。而  $E(y)$  和  $\sigma_y$  的近似估计值  $\bar{y}$  及  $S_y$  只与  $N$  有关, 有表可查。本文  $N = 48$ , 查表得:  $\bar{y} = 0.5477$ ,  $S_y = 1.1574$ , 将估计值代入式(4)和(5)得:

$$\hat{\alpha} = \frac{S_y}{S_x} = 0.2135 \quad \hat{u} = \bar{x} - \frac{S_x}{S_y} \bar{y} = 14.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

$$\text{由式(2)可得: } X_p = \hat{u} - \frac{1}{\hat{\alpha}} \ln[-\ln(1-p)] \quad (6)$$

由式(6)算出 7 个重现期的基本风速如下:

表 4 利用极值 I 型(用耿贝尔法)计算出的不同重现期基本风速

重现期(a)	200	120	100	60	50	30	10
基本风速( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	38.2	36.4	35.6	33.2	32.3	30.4	24.7

## 2.2.2 矩法参数估算法

中国气象科学研究院的专家在 1999 年给出了修正后的矩法参数估算法<sup>①</sup>, 方法较新, 用这个方法再进行一次计算, 目的是用来检验以上的计算结果。

极值 I 型分布函数也可以写成:

$$F(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x-u)]\}$$

式中  $u$  是分布的位置参数, 即其分布的众值;

$\alpha$  是分布的尺度参数, 它们与矩的关系为:

$$\text{一阶矩(均值): } E(x) = \frac{a}{\alpha} + u, \text{ 式中 } a = 0.57722$$

$$\text{二阶矩(方差): } \sigma^2 = \frac{C^2}{\alpha^2}, \text{ 式中 } C = \frac{\pi}{\sqrt{6}} = 1.28255$$

① 中国气象科学研究院. 全国公路桥涵设计风压图研究报告, 1999 年。

因此,得:  $\alpha = \frac{1.28255}{\sigma}$   $u = E(x) - \frac{0.57722}{\alpha}$

在实际计算工作中,可用有限样本的均值  $\bar{x}$  和标准差  $S$  作为理论值  $E(x)$  和  $\sigma$  的近似估计,参数则可用下式估计:

$$\hat{\alpha} = \frac{C_1}{S} \quad \hat{u} = \bar{x} - \frac{a_1}{\hat{\alpha}}$$

式中系数  $C_1$  和  $a_1$  也只与  $N$  有关,也有表可查。 $N = 48$ ,查表得  $C_1 = 1.15714$ ,  $a_1 = 0.54764$ 。由表 2 和表 3 计算出年最大风速的平均值  $\bar{x} = 16.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,标准差  $S = 5.4213$ 。求得  $\hat{\alpha} = 0.2135$ ,  $\hat{u} = 14.2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,仍用式(6)计算出不同重现期的基本风速,其结果与用耿贝尔法结果一致(表略)。

### 2.3 深圳湾公路大桥桥位区设计风速的估算

为了求出深圳湾公路大桥桥位区设计风速,对以上求出的基本风速还需进行两步移植工作,先按一定比例( $B_1$ ,增大系数 1)将由气象站资料求得的基本风速移植到桥位岸边,再按一定比例( $B_2$ ,增大系数 2)将其移植到离海岸一定距离的海面上,最终的增大系数为  $B = B_1 \times B_2$ 。

为了求出  $B_1$ ,我们在桥位区附近选取蛇口和福永两个自动气象站,由于自动站观测时间短(最早始于 1997 年 1 月),观测工作常常中断,为了增加样本,我们选取 10 min 平均月最大风速,这样蛇口共有 15 个有效样本(1997 年 8 月~1998 年 3 月、2000 年 9~11 月、2001 年 9~12 月),福永共有 43 个有效样本(1997 年 6~11 月、1998 年 1 月、1998 年 4 月~2000 年 11 月、2001 年 9~12 月)。

先将以上序列与深圳气象站对应风序列建立回归方程,并绘制相关图(图 2):

$$V_{\text{蛇口}} = 4.87 + 0.39 V_{\text{深圳}} \quad (n = 15, r = 0.54, r_{0.05} = 0.4821)$$

$$V_{\text{福永}} = 4.07 + 0.62 V_{\text{深圳}} \quad (n = 43, r = 0.62, r_{0.001} = 0.4797)$$

以上两方程分别通过了 0.05、0.001 的信度检验,说明桥位区风速与深圳气象站风速正相关显著,福永与气象站相关达到极显著,将气象站风速向桥位区外推是可行的。

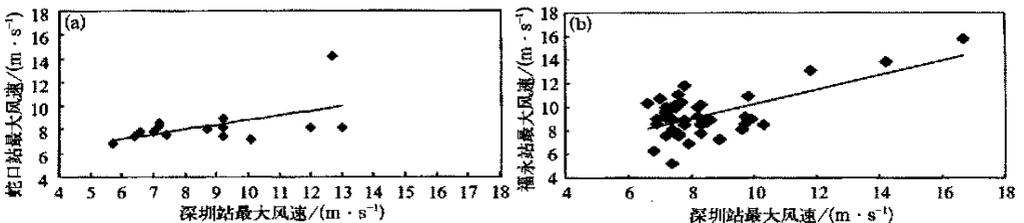


图 2 深圳市气象站与桥位区自动气象站月最大风速的对比与线性拟合

再分别求出蛇口和福永全部样本的均值( $8.75$ 、 $9.28 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),并分别求出气象站所有对应月份的 10 min 平均月最大风速的均值( $8.31$ 、 $8.44 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),便可得到  $B_1$  值。福永的  $B_1 = 1.100$ ,蛇口的  $B_1 = 1.057$ ,从大桥的安全性考虑,本文取两者中的大值  $B_1 = 1.100$ 。

至于增大系数  $B_2$ ,有规范可查<sup>[1,3]</sup>,一般离开海岸或在海岛上, $B_2$ 可取  $1.0 \sim 1.2^{1/2}$ 。

考虑到深圳湾只是内海湾,又处于全年主盛行风向的下风向,我们取中间值  $B_2 = 1.1^{1/2}$  (1.049)。于是  $B = B_1 \times B_2 = 1.100 \times 1.049 = 1.154$ 。

有了这个增大系数之后,就可以将气象站不同重现期的 10 min 平均年最大风速值(表 3)乘上该系数 1.154,即可得到大桥桥位区的不同重现期的 10 min 平均年最大风速(表 5)。

表 5 深圳湾公路大桥桥位区的不同重现期 10 min 平均年最大风速 ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

重现期(a)	200	120	100	60	50	30	10
基本风速	44.8	42.0	41.1	38.3	37.3	34.6	28.5

## 2.4 桥位区近地层各高度年最大风速的推算

对桥位区可取  $\alpha = 0.12$ ,利用风速随高度变化的指数公式将 10 m 高度上的最大风速推算到 150 m 以内的各个高度层(10 m 一层),结果列于表(略)。还采用对数公式进行了同样计算( $Z_0$  取 0.01 m,表略),两种方法推算出的同一高度同一重现期最大风速相差很小,最多不超过  $0.5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

## 参 考 文 献

- 1 《公路桥梁抗风设计指南》编写组.公路桥梁抗风设计指南.北京:人民交通出版社,1996.
- 2 交通部重庆公路科学研究所.中华人民共和国行业标准:公路斜拉桥设计规范(试行)(JJJ027-96).北京:人民交通出版社,1996.
- 3 中国建筑科学研究院等.中华人民共和国国家标准:建筑结构荷载规范(GBJ50009-2002).北京:中国建筑工业出版社,2002.
- 4 Highway Department of Government of HK SAR.STRUCTURES DESIGN MANUAL.HK:Government Publication Center,1997(2th edition).
- 5 铁道部大桥工程局著.武汉长江二桥技术总结.北京:科学出版社,1998.
- 6 张忠义,刘聪,居为民.南京长江第二大桥桥位风速观测及设计风速的计算.气象科学,2000,20(2):200~205.
- 7 刘峰,许德德,陈正洪.北盘江大桥设计风速及脉动风频率的确定.中国港湾建设,2002,(1):23~27.
- 8 鹿世瑾.华南气候.北京:气象出版社,1990.
- 9 钟保麟,张小丽,梁碧玲.近 50 年深圳气候特点.广东气象,2002,(增刊):11~14.
- 10 石熙春,焦敦基,王玮.山区污染气象条件研究中地面风资料的订正方法.见:大气湍流扩散及污染气象论文集.北京:气象出版社,1982.139~145.
- 11 傅抱璞.山地气候.北京:科学出版社,1983.
- 12 朱瑞兆主编.应用气候手册.北京:气象出版社,1991.
- 13 章澄昌.产业工程气象学.北京:气象出版社,1997.
- 14 张晓馨,吴志伟.长江江面大风预报系统.江苏气象,1999,(4):9~11.
- 15 H.T.海斯莱特.简明统计学.哈尔滨:黑龙江人民出版社,1981.
- 16 马开玉,丁裕国等.气候统计原理与方法.北京:气象出版社,1993.

## CALCULATION OF DESIGNED WIND VELOCITY FOR SHENZHEN BAY BRIDGE

Chen Zhenghong Xiang Yuchun Yang Hongqing

(*Wuhan Urban Meteorological Engineering & Technological Center, Wuhan 430074*)

Mao Xia Zhang Xiaoli Zhou Xin

(*Shenzhen Meteorological Observatory, Shenzhen 518008*)

Liu Xiaodong

(*China Highway Planning & Designing Institute*)

### Abstract

Beginning from the completeness and rationality of the data and standardization of the methods, the designed wind velocity (DWV) for the Shenzhen Bay Bridge is calculated. A 48-year series of yearly maximum 10-minute averaged wind velocity at the 10 m height above surface is obtained through several correcting steps to the original records of yearly maximum wind velocity (MWV) from 1954 to 2001 at Shenzhen Meteorological Station so that meets the requirement of the guidance or standard for the resistance of building structures against wind pressure. Reference wind velocities (RWV) at different return periods of 200, 120, 100, 60, 50, 30 and 10 years are calculated by adopting the function of Extreme I. It is found that MWV at the automatic meteorological stations near the beach or the bridge is positive correlation with that at Shenzhen Meteorological Station and the averaged value of the former is 10% larger than the later. Further more, the wind velocity over the sea is 4.9% larger than that at the beach according to the standard. So, DWV can be got through enlarging the RWV by a times of  $1.1 \times 1.049$  (1.154), which is out-extended to every 10-m interval layers under 150 m above the sea surface.

**Key words:** Shenzhen Bay Bridge Yearly maximum wind velocity Reference wind velocity  
Designed wind velocity Funtion of Extreme I