维普资讯 http://www.cqvip.com

文章编号：1000-4750(2006)02-0126-05

灌注桩竖向承载力的分项系数研究

*赵春风[1,2]，徐 超[1,2]，高大钊[1,2]

(1. 同济大学地下建筑与工程系，上海 200092; 2. 同济大学岩土工程重点实验室，上海 200092)

摘 要：在荷载规范给定的分项系数前提下，利用可靠度理论和一维随机场理论，对灌注桩单桩竖向抗压承载力由总安全系数设计方法过渡为分项系数设计方法进行了深入研究，并得出了对应上海地区3种确定灌注桩单桩竖向承载力的分项系数设计的理论公式。在由经验公式计算单桩竖向承载力的推导过程中，考虑了土的分层特点；而在按静力触探比贯入阻力计算单桩竖向承载力的推导过程中，不仅考虑了土的分层特点，同时还考虑了土性的相关性。同时推导出相应于3种分项系数设计方法的抗力分项系数公式，并说明了抗力分项系数的计算方法。所得结果可供规范转轨时参考。

关键词：岩土工程；灌注桩；可靠度；极限承载力；静力触探；分项系数；统计特性；

中图分类号：TU47 **文献标识码**：A

ON PARTIAL FACTORS OF VERTICAL BEARING CAPACITY OF CAST-IN-PLACE PILES

*ZHAO Chun-feng[1,2], XU Chao[1,2], GAO Da-zhao[1,2]

(1. Department of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

2. Key Laboratory of Geotechnical Engineering, Tongji University, Shanghai 20092, China)

Abstract: The design method of the vertical compression bearing capacity of cast-in-place piles from one safety factor to partial factors is discussed. The reliability theory and one-dimensional random field theory are employed. For the three types of design methods to determine the vertical bearing capacity of cast-in-place piles in Shanghai area, theoretical formulae of partial factors are obtained. To derive the bearing capacity based on empirical correlation, the characteristics of earth strata are taken into account. To deduce the bearing capacity based on the specific penetration resistance of cone penetration test, both of the characteristics of earth strata and the correlation between soil properties are considered. Three formulae to calculate the partial factors of resistance are deduced, and the computational methods of partial factors of resistance are explained.

Key words: geotechnical engineering; cast-in-place pile; reliability; ultimate bearing capacity; cone penetration test; partial factors; statistical properties

1 灌注桩的设计表达式

《建筑结构可靠度设计统一标准》[1]是以概率理论为基础的极限状态设计方法，设计表达式以各种标准值和分项系数来表示，它是制定各类结构规

收稿日期：2004-02-12；修改日期：2004-07-15

基金项目：上海市建委科技委建设基金(A9702154)；上海市重点学科基金资助项目(沪教委科[2001]44号)

作者简介：*赵春风(1964)，男，安徽人，教授，博士，博士生导师，从事桩基础、软土地基变形控制及岩土工程可靠度等的教学和研究(E-mail: tjzhchf@sohu.com)；

徐 超(1965)，男，河南人，副教授，博士，从事岩土工程原位测试、地基处理和工程地质的教学和研究；

高大钊(1935)，男，浙江人，教授，博士生导师，从事土力学与基础工程的教学和研究.

维普资讯 http://www.cqvip.com

范以及地基基础规范时应遵守的准则。如何结合地基基础的特点，依据《建筑结构可靠度设计统一标准》的原则，提出各设计参数，这是有待解决的问题。

按总安全系数方法设计桩基，当承受中心荷载时，由试桩及分层参数计算单桩容许承载力 N_d 的设计表达式分别为[2]：

$$N_d = \frac{Q_u}{K} \tag{1}$$

$$N_d = \frac{1}{K}(Q_p A_p + U_p \sum_{i=1}^{n} Q_i l_i) \tag{2}$$

式中：N_d ——单桩竖向允许承载力(kN)；

Q_u ——单桩竖向极限承载力(kN)；

K ——总安全系数；Q_p—极限端阻力(kPa)；

Q_i ——第 i 层土桩侧极限摩阻力(kPa)；

A_P ——桩端全断面面积(m^2)；

U_P ——桩周长(m)；

l_i ——第 i 层土的厚度(m)；

n ——桩所穿过的土层数。

当采用分项系数方法设计桩基时，将总安全系数分解为荷载和抗力两部分分项系数。桩顶荷载由恒载和活载组成，两者的变异系数不同，因而分别用不同的分项系数乘以相应的荷载标准值。由于桩所穿过的土层往往具有不相同的桩侧摩阻力统计参数，应采用不同的分项系数。如桩所穿过的土层有 n 个，那么在不考虑桩径变异性的前提下，具有 $n+3$ 个分项系数的设计表达式为：

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \le \frac{Q_{PK} A_P}{\gamma_P} + U_P \sum \frac{Q_{f_i K} l}{\gamma_{f_i}} \tag{3}$$

对试桩情况则为：

$$\gamma_G Q_{GK} + \gamma_L Q_{LK} \le \frac{Q_{uK}}{\gamma_R} \tag{4}$$

式中：γ_G、γ_L、γ_P、γ_{f_i} 和 γ_R 分别代表恒载、活载、桩端阻力、侧摩阻力和总抗力的分项系数；Q_{GK}、Q_{LK}、Q_{PK}、$Q_{f_i K}$ 和 Q_{uK} 分别代表恒载、活载、桩端阻力、侧摩阻力和总抗力的标准值。

2 分项系数的定义及确定原则

在利用 JC 法进行可靠度分析时，设计验算点坐标为：

$$X_i^* = \overline{X}_i(1 - \alpha_i \beta \delta_i) \tag{5}$$

在基本变量已标准化的空间，坐标原点(各变量的均值点)到失效界面的最短距离即为可靠度指标 β，而该最短线段同失效界面的交点即为设计验算点，这样，可以定义设计验算点坐标即为设计值，如设该设计变量的标准值为 X_{iK}，则抗力分项系数定义为：

$$\frac{1}{\gamma_i} = \frac{X_i^*}{X_{iK}} \tag{6}$$

由式(5)、(6)可得：

$$\frac{1}{\gamma_i} = \frac{\overline{X}_i}{X_{iK}}(1 - \alpha_i \beta \delta_i) \tag{7}$$

3 分项系数的计算方法

为使所得分项系数能与现行荷载规范配套，采用荷载规范规定的统计参数，把上部结构规范的荷载分项系数用于桩基荷载分项系数，即恒载和活载的分项系数分别为 1.20 和 1.40，荷载的统计参数：恒载的变异系数为 0.07；活载分两种情况，持久性楼面活载如办公楼为 0.292，住宅为 0.229。钻孔灌注桩桩径的变异性同很多因素有关，如土层性质、施工质量等，本文不考虑桩径的变异性，即认为桩径为设计桩径，为确定性量。因而只需考虑荷载与抗力的变异性，又由于荷载系数组合已设定，因而只需讨论单桩竖向承载力(即抗力)的变异因素，另一方面，由于不考虑桩径的变异性，因而极限状态方程为线性方程。下面分别推导出对应于上海市标准[2]和利用静力触探比贯入阻力确定灌注桩单桩竖向承载力[3][4]的分项系数。

3.1 由试桩结果计算单桩竖向承载力的分项系数

式(4)中令荷载比 $\rho = \frac{Q_{LK}}{Q_{GK}}$，并同式(1)联立求解可得：

$$\frac{1+\rho}{\gamma_G + \rho \gamma_L} = \frac{\gamma_R}{K} \tag{8}$$

由式(8)可知，在荷载分项系数给定的前提下，对不同的总安全系数和荷载比可得相应的抗力分项系数，见表 1。此结果同中华人民共和国行业标准《建筑桩基技术规范》[5]推荐的由静载荷试验法确定单桩承载力的分项系数值相吻合。

表 1 γ_R 值

Table 1 Values of γ_R

	K=1.7			K=2.0		
ρ	0.2	0.5	1.0	0.2	0.5	1.0
γ_R	1.38	1.34	1.31	1.62	1.58	1.54

维普资讯 http://www.cqvip.com

3.2 由经验公式计算单桩竖向承载力的分项系数[6]

抗力分项系数共有$n+1$个，分别为n个桩侧摩阻力分项系数和一个桩端阻力分项系数，在求分项系数时，涉及到如何取抗力标准值问题，标准值视情况取均值或取概率分布的某一置信概率的分位值，为不失一般性，本文取均值。这样由式(7)可得：

$$\gamma_i^{-1}=1-\beta\delta_i\cos\theta_i \qquad (i=1,2,\cdots,n+1) \tag{9}$$

又

$$\cos\theta_i=\frac{\sigma_i}{\sigma_Z} \tag{10}$$

式中σ_i为某一抗力分量的标准差；σ_Z为功能函数的标准差。将式(10)代入式(9)并令σ_R为总抗力的标准差，则可得：

$$\gamma_i^{-1}=1-\beta\delta_i^2\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}\cdot\rho_i \tag{11}$$

式中$\rho_i=\frac{m_i}{m_R}$为某一抗力分量均值与总抗力均值之比值。

令

$$\Delta_i=\beta\delta_i^2\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}\cdot\rho_i \tag{12}$$

当参与统计的子样确定之后，对任一抗力分项，$\frac{\sigma_R}{\sigma_Z\delta_R}$为常数，故而：

$$\frac{\Delta_i}{\Delta_j}=\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_j^2\rho_j} \tag{13}$$

$$\gamma_i^{-1}=1-\Delta_i \tag{14}$$

用$n+1$项分项系数表示的第i项分项系数为：

$$\gamma_i^{-1}=1-\frac{\delta_i^2\rho_i}{\delta_{n+1}^2\rho_{n+1}}(1-\gamma_{n+1}^{-1}) \tag{15}$$

共有n个方程，再加上闭合条件：

$$\sum_{i=1}^{n+1}\gamma_i^{-1}\rho_i=\gamma_R^{-1} \tag{16}$$

共计有$n+1$个方程，可解出$n+1$个抗力分项系数，经推导可得：

$$\gamma_i^{-1}=1-(1-\gamma_R^{-1})\frac{\delta_i^2\rho_i\sum_{i=1}^{n+1}\rho_i^2}{\left[\sum_{i=1}^{n+1}(\delta_i\rho_i)^2\right]^2} \tag{17}$$

在已知桩及土层的统计参数情况下，就可算出桩侧摩阻力和桩端阻力的统计特性，进而可求出δ_i、ρ_i，代入式(17)即可求得每个抗力分量的分项系数。

3.3 按静力触探比贯入阻力计算单桩竖向承载力的分项系数

3.3.1 静力触探比贯入阻力计算单桩竖向承载力的表达式

在利用静力触探比贯入阻力确定钻孔灌注桩极限承载力时，首先应确定计算模式，本文引用文献[3][4]的计算模式，即：

$$Q_u=\sum_{i=1}^{n}f_iU_il_i+\alpha_bP_{sb}A_p \tag{18}$$

式中：f_i——用静力触探比贯入阻力估算的第i层土桩侧极限摩阻力标准值(kPa)；

U_i——第i层土中桩身的平均周长(m)；

l_i——第i层土的厚度(m)；

α_b——桩端阻力修正系数(α_b取值见文献[3][4])：

P_{sb}——桩端附近静力触探比贯入阻力的平均值(kPa)；

A_p——桩端横截面的面积(m^2)。而f_i、P_{sb}同P_s的关系为(其中a、b、c取值见文献[3][4])：

$$f_i=a+bP_{si}+cP_{si}^2 \tag{19}$$

$$P_{sb}=\frac{1}{2}(P_{sb1}+P_{sb2}) \tag{20}$$

式中P_{sb1}和P_{sb2}分别为桩端以上4倍桩径范围内的静力触探比贯入阻力的平均值和桩端以下1倍桩径范围内的静力触探比贯入阻力平均值。

当桩端持力层为砂土、粉土，而桩端进入持力层深度不足$10d$ (d为设计桩径)时，则桩端以上$4d$范围内的桩侧极限摩阻力标准值应修正如下：

$$f_i^*=\eta f_i \qquad (\eta=0.5) \tag{21}$$

当采用分项系数方法设计桩基时的设计表达式为：

$$\gamma_GQ_{GK}+\gamma_LQ_{LK}\le\frac{\alpha_bQ_{PK}A_P}{\gamma_P}+U_P\sum\frac{Q_{f_iK}l_i}{\gamma_{f_i}} \tag{22}$$

式中各变量意义同(3)式。

下面给出求分项系数的方法。

3.3.2 静力触探比贯入阻力P_s的统计原则及程序实现

式(18)中极限摩阻力标准值和极限端阻力标准值均由静力触探比贯入阻力P_s值按经验公式求得，因而其参数统计依赖于P_s值的参数统计。由于静力触探得到的是P_s值沿深度的连续变化曲线，这样就带来了沿深度方向对某一层土的P_s值如何取值进行统计的问题。由于土性的相关性，为使所取P_s

维普资讯 http://www.cqvip.com

值相互独立，同时不至于由于少取值而造成统计结果的统计误差，应按上海地区典型土层相关距离来取值再进行统计，这样获得的方差为点方差，并可求得基于点方差的变异系数，最后按一维随机场理论[7]求得变异系数，即：

$$\delta_i = \delta_i' \sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{l_i}} \tag{23}$$

式中：δ_i'—根据某一静探孔第 i 层土的点方差求得的变异系数；

δ_i ——根据一维随机场理论计算得到的该静探孔第 i 层土的变异系数；

$\delta_{i,0}$——第 i 层土的相关距离；

l_i ——第 i 层土的厚度。

以上仅考虑了深度方向的统计特性，对于场地来说，还要考虑场地的变异性。由于静力触探孔的间距较大且一般工程场地的静力触探孔数不会很多，因而可用随机变量理论平均值方差的方法来近似计算空间均值方差，其变异系数 δ_{hi} 为：

$$\delta_{hi} = \delta_h' \frac{1}{\sqrt{m}} \tag{24}$$

式中 δ_h' 为场地的变异系数，按点方差计算；m 为场地的静力触探孔数。

另一方面，在用随机场理论对实际土层进行计算时，会出现实际土层的厚度并非正好为该土层相关距离的整数倍，为解决此矛盾，本文采取先以实际厚度除以相关距离，然后按四舍五入取整数的方法来定实际计算厚度(以 h_{il} 表示)。

按以上方法经一系列推导可得计算 P_s 统计特性的公式为：

$$\overline{P}_{si} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P}_{sil} \tag{25}$$

$$\delta_{si} = \left\{\frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m}\delta_{sil}'\sqrt{\frac{\delta_{i,0}}{h_{il}}}\right)^2 + \frac{\sum_{l=1}^{m}(\overline{P}_{sil}-\overline{P}_{si})^2}{m(m-1)\overline{P}_{si}^2}\right\}^{\frac{1}{2}} \tag{26}$$

式(25)和式(26)中：$\overline{P}_{sil}$ ——某一场地第 l 个静力触探孔处第 i 土层 P_s 的均值；$\overline{P}_{si}$——某一场地第 i 土层 P_s 的均值；δ_{sil}'——某一场地第 l 个静力触探孔处第 i 土层 P_s 的点变异系数。

3.3.3 侧摩阻力 f_i 的统计原则、程序实现和分项系数

在求出 P_s 统计特性后，即可利用极限侧摩阻力标准值同静力触探比贯入阻力的关系，按误差传递理论求出侧摩阻力的统计特性[8,9]。假定 P_s 符合正态分布，经推导得极限侧摩阻力标准值的均值 $\bar{f}_i$ 和变异系数 δ_{f_i} 为：

$$\bar{f}_i = a + b\overline{P}_{si} + c(\overline{P}_{si}^2 + \sigma_{P_{si}}^2) \tag{27}$$

$$\delta_{f_i} = \frac{\sigma_{P_{si}}[(b+2c\overline{P}_{si})^2 + 2c^2\sigma_{P_{si}}^2]^{\frac{1}{2}}}{a + b\overline{P}_{si} + c(\overline{P}_{si}^2 + \sigma_{P_{si}}^2)} \tag{28}$$

再考虑到场地的变异性，最终可得侧摩阻力的变异系数 δ_i 为：

$$\delta_i = (\delta_{f_i}^2 + \delta_{hi}^2)^{\frac{1}{2}} \tag{29}$$

式中 δ_{hi} 为场地的变异系数。最后由式(7)并令抗力标准值为均值，可得桩侧摩阻力的分项系数为：

$$\gamma_i^{-1} = 1 - \beta\delta_i\cos\theta_i \tag{30}$$

3.3.4 桩端附近静力触探比贯入阻力平均值 P_{sb} 的统计原则及程序实现

按竖向承载桩施工要求，钻孔灌注桩进入持力层深度不应小于 2 倍设计桩径，为不失一般性，本文假定桩端全断面进入持力层深度为 $2d$(d 为直径)。按第 3.3.1 的规定，极限端阻力应分别求桩端全端面上、下 4 倍及 1 倍桩径范围内静力触探比贯入阻力的平均值，可是在求统计特性时，一方面，由于要考虑相关距离的因素，可能会出现同 3.3.2 所述相同的情况，即：$\frac{d}{\delta_{i,0}}$、$\frac{2d}{\delta_{i-1,0}}$ 及 $\frac{2d}{\delta_{i-1,0}}$ 不是整数的情况，在此，仍采用 3.3.2 的处理方法并令其整数分别为 n_3、n_2、n_1；另一方面，当桩端全截面上第 $i-1$ 层土厚度不到 $2d$ 时，会出现计算范围超出第 $i-1$ 层而进入第 $i-2$ 层的情况，本文在编程时已考虑这一情况(桩端以下同样处理)。经推导[9,10]可得桩端附近静力触探比贯入阻力平均值的均值 $\overline{P}_{sb}$ 和变异系数 $\delta_{P_{sb}}$ 为：

$$P_{sb} = \frac{1}{2}(\overline{P}_{i1} + \overline{P}_{i2}) \tag{31}$$

$$\delta_{P_{sb}} = \frac{(\overline{P}_{i1}^2\delta_{p1}^2 + \overline{P}_{i2}^2\delta_{p2}^2)^{\frac{1}{2}}}{\overline{P}_{i1} + \overline{P}_{i2}} \tag{32}$$

$$\overline{P}_{i1} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\frac{n_1\delta_{i-1,0}\overline{P}_{si-1l2} + n_2\delta_{i,0}\overline{P}_{sil1}}{n_1\delta_{i-1,0} + n_2\delta_{i,0}} \tag{33}$$

$$\overline{P}_{i2} = \frac{1}{m}\sum_{l=1}^{m}\overline{P}_{sil3} \tag{34}$$

维普资讯 http://www.cqvip.com

$$\delta_{p1}=\left[\frac{\sum_{l=1}^{m}(\overline{P}_{il1}-\overline{P}_{i1})^2}{m(m-1)\overline{P}_{i1}^2}+\frac{1}{m^2}\left(\sum_{l=1}^{m}\frac{n_1\delta_{i-1,0}\delta_{si-1l2}+n_2\delta_{i,0}\delta_{sil1}}{n_1\delta_{i-1,0}+n_2\delta_{i,0}}\right)^2\right]^{1/2} \tag{35}$$

$$\delta_{p2}=\left[\frac{\sum_{l=1}^{m}(\overline{P}_{sil3}-\overline{P}_{i2})^2}{m(m-1)\overline{P}_{i2}^2}+\frac{\left(\sum_{l=1}^{m}\delta_{sil3}\right)^2}{m^2}\right]^{1/2} \tag{36}$$

式中：$\overline{P}_{i1}$、$\overline{P}_{i2}$和δ_{p1}、δ_{p2}分别表示某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端上、下计算范围内静力触探比贯入阻力 P_s 的均值和变异系数；$\overline{P}_{il1}$、$\overline{P}_{sil3}$分别为第 l 个静力触探孔处桩端上、下静力触探比贯入阻力的均值；δ_{si-1l2}、δ_{sil1}、δ_{sil3}分别为第 l 个静力触探孔处桩端上第$(i-1)$土层、第 i 土层、桩端下第 i 土层比贯入阻力的均值变异系数；$\overline{P}_{si-1l2}$、$\overline{P}_{sil1}$分别为桩端上、下第$(i-1)$土层、第 i 土层静力触探比贯入阻力的均值。

3.3.5 端阻力 Q_b 的统计原则、程序实现和分项系数

由静力触探比贯入阻力均值 P_{sb} 估算的端阻力极限值为 $Q_b=\alpha_p P_{sb}A_p$，根据 P_{sb} 的统计原则和误差传递理论，可得考虑深度方向变异性和场地变异性后 Q_b 的均值和变异系数：

$$\overline{Q}_b=\frac{1}{2}\alpha_p A_p(\overline{P}_{i1}+\overline{P}_{i2}) \tag{37}$$

$$\delta_{Q_b}=\left[\frac{\overline{P}_{i1}^2\frac{\delta_{0,1}}{4d}\delta_{p1}'^2+\overline{P}_{i2}^{\,2}\frac{\delta_{0,2}}{d}\delta_{p2}'^2}{(\overline{P}_{i1}+\overline{P}_{i2})^2}+\frac{1}{m}\delta'^2\right]^{\frac{1}{2}} \tag{38}$$

式中 δ_{p1}'、δ_{p2}'分别表示某一场地第 i 层土为桩端持力层时，桩端全截面以上 4 倍桩径范围和桩端全截面以下 1 倍桩径范围 P_s 的点方差变异系数；$\delta_{0,1}$、$\delta_{0,2}$分别表示桩端全截面上、下的相关距离；δ'为场地点方差变异系数。

最后由式(7)并令抗力标准值为均值，可得桩端阻力的分项系数为：

$$\gamma_P^{-1}=1-\beta\delta_P\cos\theta_P \tag{39}$$

式中方向余弦为：

$$\cos\theta_i=\frac{Q_i\delta_i}{\left[(0.07Q_G)^2+(0.29Q_L)^2+(Q_P\delta_P)^2+\sum_{i=1}^{n}(Q_i\delta_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{40}$$

$$\cos\theta_p=\frac{Q_p\delta_p}{\left[(0.07Q_G)^2+(0.29Q_L)^2+(Q_P\delta_P)^2+\sum_{i=1}^{n}(Q_i\delta_i)^2\right]^{\frac{1}{2}}} \tag{41}$$

在按场地统计出抗力的均值及变异系数，同时考虑恒载和活载的比例关系以及总安全系数 K 和闭合条件，即可由式(30)和式(39)计算出各抗力分项系数值。

4 结论

本文详细给出了荷载规范给定的分项系数前提下，上海地区三种确定灌注桩单桩竖向承载力由总安全系数设计方法过渡为分项系数设计方法的理论公式，在由静力触探比贯入阻力确定单桩竖向承载力中，利用一维随机场理论，充分考虑了土性的相关性，所得结果可供规范转轨时参考。

值得说明的是，本文没有考虑计算模式和桩径的变异性。

参考文献：

[1] GB 50068-2001, 建筑结构可靠度设计统一标准[S].
GB 50068-2001, Unified Standard for Reliability Design of Building Structures [S]. (in Chinese)

[2] DBJ08-11-89, 地基基础设计规范[S].
DBJ08-11-89, Foundation Design Code [S]. (in Chinese)

[3] 陈强华, 鲁智明, 张鹏飞. 静力触探估算钻孔灌注桩单桩极限承载力[C]. 第七届土力学及基础工程学术会议论文集, 北京: 中国建筑工业出版社, 1994. 373~376.
Chen Qianghua, Lu Zhimin, Zhang Pengfei. Estimation of single pile ultimate bearing capacity of cast-in-place pile by cone penetration test [A]. Proc. of 7th national conference of soil mechanics and foundation engineering [C]. Beijing: China Construction Industry Press. 1994. 373~376. (in Chinese)

[4] 赵春风, 高大钊, 李建新, 叶观宝. 由CPT确定灌注桩极限承载力的可靠性研究[J]. 岩土力学, 1999, 20(1): 65~69.
Zhao Chunfeng, Gao Dazhao, Li Jianxin, Ye Guanbao. Reliability Study of ultimate bearing capacity of cast-in-place pile determined by cone penetration test [J]. Soil and Rock Mechanism, 1999, 20(1): 65~69. (in Chinese)

(参考文献[5]~[10]转第 125 页)

维普资讯 http://www.cqvip.com

工业出版社, 1993.
Yu Tianqing, Qian Jicheng. Damage Theory and its Application [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1993. (in Chinese)

[10] 朱万成, 赵启林, 唐春安, 卓家寿. 混凝土断裂过程的力学模型与数值模拟[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 579-598.
Zhu Wancheng, Zhao Qilin, Tang Chun'an, Zhuo Jiashou. Mechanical model and numerical simulation of fracture process of concrete [J]. Advances in Mechanics, 2002, 32(4): 579~598. (in Chinese)

[11] Rabier P J. Some remarks on damage mechanics [J]. Int. J. Eng. Sci., 1989, 27(1): 29~54.

[12] 高蕴昕, 郑泉水, 余寿文. 弹性各向同性损伤的双标量描述[J]. 力学学报, 1996, 28(5): 542~549.
Gao Yinxin, Zheng Quanshui, Yu Shouwen. Double-scalar formulation of isotropic elastic damage [J]. Acta Mechanica Sinica, 1996, 28(5): 542~549. (in Chinese)

[13] 唐雪松, 蒋持平, 郑健龙. 各向同性弹性损伤本构方程的一般形式[J]. 应用数学和力学, 2001, 22(12): 1317~1323.
Tang Xue-song, Jiang Chi-ping, Zheng Jian-long. General expressions of constitutive equations for isotropic elastic damaged materials [J]. Appl. Math. Mech., 2001, 22(12): 1468~1475.

[14] Tang X S, Jiang C P, Zheng J L. Anisotropic elastic constitutive relations for damaged materials by application of irreversible thermodynamics [J]. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2002, 38(3): 211~220.

[15] Murakami S. Mechanical modelling of material damage [J]. J. Appl. Mech., 1988, 55(2): 280~286.

[16] Lemaitre J. A Course on Damage Mechanics [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.

[17] Lemaitre J. A continuous damage mechanics model for ductile fracture [J]. J. Eng. Mater. Tech., 1985, 107: 83~89.

[18] 张行, 赵军. 金属构件应用疲劳损伤力学[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
Zhang X, Zhao J. Applied Fatigue Damage Mechanics of Metallic Structural Members [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1998. (in Chinese)

[19] 唐雪松. 损伤力学的热力学理论研究及工程应用[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2001.
Tang Xuesong. Damage Mechanics Based on Irreversible Thermodynamics and its Engineering Applications [D]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2001. (in Chinese)

[20] 唐雪松, 杨继运, 蒋持平, 张行. 轴对称构件疲劳寿命预测的损伤力学—附加载荷—有限元法[J]. 航空学报, 2002, 23(2): 97~101.
Tang Xuesong, Yang Jiyun, Jiang Chiping, Zhang Xing. Damage mechanics – additional load – finite element method for fatigue life prediction of metallic axisymmetrical structural members [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2002, 23(2): 97~101. (in Chinese)

(上接第 130 页)

[5] JGJ94-94, 建筑桩基技术规范[S].
JGJ94-94, Technical Code for Building Pile Foundation [S]. (in Chinese)

[6] 同济大学岩土工程研究所土力学研究室. 桩基础的可靠性研究[Z]. 上海: 同济大学, 1992. 33~62.
Soil Research Division. Geotechnical Engineering Institute. Tongji University. Pile foundation reliability research [Z]. Shanghai: Tongji University, 1992. 33~62. (in Chinese)

[7] Vanmarcke E H. Probabilistic modeling of soil profile[J]. ASCE, 1977, 103: 1227~1246.

[8] 赵春风, 徐超, 缪俊发, 高大钊. 上海标准推荐的预制桩极限承载力分项系数研究[J]. 工程力学, 2003, 20(6): 141~144.
Zhao Chunfeng, Xu Chao, Miao Junfa, Gao Dazhao. On partial factors of limit bearing capacity of precast pile in Shanghai design Code [J]. Engineering Mechanics, 2003, 20(6): 141~144. (in Chinese)

[9] 赵春风, 卢隆宾, 徐超, 高大钊. 预制桩竖向承载力的分项系数研究[J].岩土工程学报, 2003, 25(2): 154~156.
Zhao Chunfeng, Lu Longbin, Xu Chao, Gao Dazhao. Partial factors of vertical bearing capacity of precast piles [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2003, 25(2): 154~156. (in Chinese)

[10] 赵春风, 徐超, 高大钊. 静力触探法设计预制桩的分项系数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(4): 673~677.
Zhao Chunfeng, Xu Chao, Gao Dazhao. Partial factors of prefabricated pile design by CPT [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(4): 673~677. (in Chinese)