

文章编号: 1000-7598 (2012) 增 2-0371-06

基于非线性统一强度理论的节理 岩体地基承载力研究

师 林^{1,2}, 朱大勇^{1,2}, 沈银斌^{1,2}

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 合肥 230009; 2. 合肥工业大学 安徽土木工程结构与材料省级实验室, 合肥 230009)

摘 要: 现有的节理岩体地基承载力计算方法大多是以 Hoek-Brown 强度准则为基础建立的, 没有考虑中间主应力的效应, 不能充分发挥岩体的强度潜能。综合统一强度理论和 Hoek-Brown 强度准则的优点, 结合临界滑动场理论求解地基承载力, 并考虑地震荷载的影响。计算结果表明, 基于非线性统一强度理论的地基承载力有不同程度的提高, 现有方法中的地基承载力偏于保守; 在地震荷载作用下地基承载力有一定程度的降低。

关 键 词: 岩体力学; 地基承载力; 非线性统一强度准则; Hoek-Brown 非线性破坏准则; 临界滑动场; 地震荷载

中图分类号: TU 452

文献标识码: A

Study of foundation bearing capacity of jointed rock masses based on nonlinear unified strength theory

SHI Lin^{1,2}, ZHU Da-yong^{1,2}, SHEN Yin-bin^{1,2}

(1. School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. Anhui Provincial Laboratory of Structure and Materials of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: For most of the existing algorithms for calculating ultimate bearing capacity of jointed rock masses based on Hoek-Brown strength theory, they have not considered the effect of intermediate principal stress; so these algorithms cannot make full use of rock strength. Combining the advantage of nonlinear unified strength criterion and Hoek-Brown nonlinear failure criterion, and taking the impacts of earthquake loads into account, a new algorithm for computing the bearing capacity of foundation based on critical sliding field theory is proposed. The experiment results demonstrate that the bearing capacity of the foundation is enhanced based on nonlinear unified strength theory; the existing methods of bearing capacity of foundation are relatively conservative, so the bearing capacity of foundation will reduce under the effects of earthquake loads.

Key words: rock mass mechanics; foundation bearing capacity; nonlinear unified strength criterion; Hoek-Brown nonlinear failure criterion; critical slip fields; earthquake loads

1 引 言

由于水电开发和公路、铁路等工程建设的需要, 岩体工程得到迅速发展, 常常遇到节理岩体地基承载力问题。针对节理岩体剪应力和正应力之间的非线性关系特征, Hoek 等^[1-3]提出了节理岩体的 Hoek-Brown 强度经验准则, 能较好地反映节理岩体强度的非线性特征, 已在节理岩体地基承载力计算中得到广泛应用。但是, Hoek-Brown 强度准则没有考虑中间主应力的作用, 只适用于三轴等围压应力状态, 不能完全反映岩石地基的实际应力情

况, 不利于充分发挥岩体的强度潜能。

针对中主应力 σ_2 在不同应力条件下对材料屈服或破坏的影响, 国内学者也进行了大量的理论研究^[4-11], 如 1985 年俞茂宏提出双剪强度理论^[6]; 1991 年俞茂宏提出统一强度理论, 适用于拉压强度不等的岩石材料, 并能充分反映中间主应力的效应^[7]; 咎月稳等^[11]提出岩石的非线性统一强度准则, 认为 Hoek-Brown 强度准则是其特例, 并将该强度准则推广到节理化岩体。此外, 周小平等^[12-15]将统一强度理论引入传统地基承载力计算方法, 得到了一些合理的结论。

收稿日期: 2011-10-27

基金项目: 教育部博士点基金资助(No. 20090111110014); 国家自然科学基金资助(No. 51078123)。

第一作者简介: 师林, 男, 1986 年生, 硕士研究生, 从事岩土力学与工程方面的研究。E-mail: shilin20053321@163.com

临界滑动场理论是近年来发展的一种新的岩土稳定性分析方法,能够快速、准确地解决节理岩体地基承载力问题^[16-17]。然而,师林等^[17]提出的临界滑动场方法尚不能考虑中主应力对地基承载力的影响。本文将统一强度理论引入 Hoek-Brown 强度准则中,在文献[17]的基础上将基于统一强度理论的 Hoek-Brown 准则与临界滑动场理论相结合,推导地震荷载作用下的承载力计算公式,进一步拓展临界滑动场理论的应用范围。

2 基于统一强度理论的 Hoek-Brown 强度准则

普遍应用于岩体工程的 Hoek-Brown 强度准则和 Mohr-Coulomb 强度准则等均无法反映中主应力对岩体实际应力情况的影响,为了寻找适用范围更广的强度准则,俞茂宏等^[6-7]根据双剪多滑移单元体力学模型建立了双剪理论体系和统一强度理论,充分考虑了中主应力 σ_2 对材料屈服破坏的影响。统一强度理论可以灵活地适用于各种材料,其主应力形式的表达式^[7]为

$$\left. \begin{aligned} &\text{当 } \sigma_2 \leq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时, 有} \\ &\quad F = \sigma_1 - \frac{\alpha}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = \sigma_t \\ &\text{当 } \sigma_2 \geq \frac{\sigma_1 + \alpha\sigma_3}{1 + \alpha} \text{ 时, 有} \\ &\quad F' = \frac{1}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_1) - \alpha\sigma_3 = \sigma_t \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: σ_1 、 σ_3 分别为最大主应力和最小主应力 (MPa); σ_t 为材料拉伸强度极限; α 为材料拉压强度比; b 为统一强度理论中引进的反映中间主应力及相应面上的正应力对材料破坏的影响程度系数。

根据统一强度理论处理 σ_2 效应区间性的方法,咎月稳将中间主应力效应的区间性通过双剪力学模型和双剪函数表示,推导得到了岩石的非线性统一强度准则,其表达形式^[11]为

$$\left. \begin{aligned} &\text{当 } F \geq F' \text{ 时,} \\ &\quad F = \left[\sigma_1 - \frac{1}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_3) \right]^2 - m\sigma_c \frac{1}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_3) = s\sigma_c^2 \\ &\text{当 } F < F' \text{ 时,} \\ &\quad F' = \left[\frac{1}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_1) - \sigma_3 \right]^2 - m\sigma_c \sigma_3 = s\sigma_c^2 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式中: m 为岩体经验参数; s 为与岩体特征有关的参数; σ_c 为岩体单轴抗压强度 (MPa)。

当 $b = 0$ 时,式 (2) 蜕化为 Hoek-Brown 强度准则,中间主应力作用为 0,是屈服或破坏极限线的下限;当 $b = 1$ 时,式 (2) 蜕化为岩石的非线性双剪强度准则,中间主应力作用达到最大,对应于屈服或破坏极限线的上限。咎月稳^[11]的研究表明,不同岩性的岩石中主应力效应是不同的,硬岩的中主应力效应要大于软岩,其中砂岩 b 取 0.3~0.5,灰岩 b 取 0.5,白云岩 b 取 0.5~1.0,花岗岩、火山岩 b 取 1.0。

平面应变应力场问题属于超静定问题,为求解这一超静定问题,可以利用的限制条件是平面应变条件和刚塑性假设。现阶段最常采用的是 Prandtl-Reuss 假设和 Levy-Mises 假设,通过限制条件得到中主应力的大小^[9-10]为

$$\sigma_2 = \sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (3)$$

Prandtl-Reuss 假设由相关流动法则和 Mises 屈服条件推导得到,但是,不加证明的将这一假设引入 Mohr-Coulomb 材料和 Hoek-Brown 材料是不合适的。为了解决这一问题,俞茂宏等^[8]引入新的参数 k , 得到

$$\sigma_2 = k(\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (4)$$

式中: k 为中间主应力系数,通过理论和实验来确定。根据经验,在弹性区可取 $k = 2\nu$ (ν 为材料的泊松比)。在塑性区可取 $k \rightarrow 1$,最简单的方法是假定 $k = 1$,此时对应于塑性不可压缩假设,即

$$\sigma_2 = (\sigma_1 + \sigma_3)/2 \quad (5)$$

由式 (5) 可知,在塑性区进行极限承载力计算时 $F < F'$, 满足岩石非线性统一强度准则第 2 式的条件,即岩石的非线性统一强度准则为

$$F' = \left[\frac{1}{1 + b}(b\sigma_2 + \sigma_1) - \sigma_3 \right]^2 - m\sigma_c \sigma_3 = s\sigma_c^2 \quad (6)$$

将式 (5) 代入式 (6) 即可得到基于统一强度理论的 Hoek-Brown 强度准则:

$$(\sigma_1 - \sigma_3) = \frac{2(1 + b)}{2 + b} \sqrt{m_b \sigma_c \sigma_3 + s\sigma_c^2} \quad (7)$$

式中: m_b 为岩体经验参数 m 的值,其他符号意义同前。

3 基于统一强度理论的 Hoek-Brown 强度准则强度参数的确定

1983 年, Bray 根据 Hoek-Brown 强度包络线的形状, 将 Hoek-Brown 强度准则改写为剪切强度形式^[3]:

$$\tau = (\cot \varphi_i - \cos \varphi_i) m \sigma_c / 8 \quad (8)$$

并在此基础上推导了瞬时内摩擦角和瞬时黏聚力的计算公式。Londe^[18]也进行过类似的推导, 根据 Londe 的方法将式 (7) 可改写为

$$\frac{\sigma_1}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2} = \frac{\sigma_3}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2} + L \left(\frac{\sigma_3}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2} \right)^{1/2} \quad (9)$$

式中: $L = 2(1+b)/(2+b)$ 。

$$\text{令 } N_1 = \frac{\sigma_1}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2}, \quad N_3 = \frac{\sigma_3}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2}, \text{ 则式 (8)}$$

可以转换为

$$N_1 - N_3 = L N_3^{1/2} \quad (10)$$

$$\text{令 } N_1 - N_3 = d, \quad N_3 = d^2 / L^2, \quad N = \frac{\sigma}{m_b \sigma_c} + \frac{s}{m_b^2},$$

$T = \tau / m_b \sigma_c$, 则如图 1 所示, 点 (N, T) 即为包络线与摩尔圆的惟一切点, 切线与水平方向的夹角即为瞬时内摩擦角 φ 。

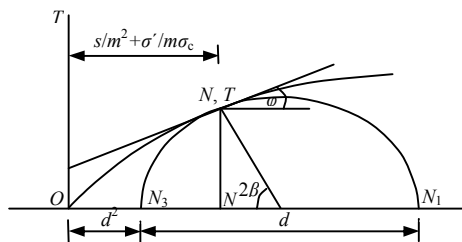


图 1 N_1 、 N_3 对应的摩尔应力圆

Fig.1 Mohr's stress circle corresponds to the N_1, N_3

由摩尔圆可得

$$\left. \begin{aligned} N^2 + T^2 - (d + 2d^2/L^2)N + d^3/L^3 + d^4/L^4 &= 0 \\ \sin \varphi &= (4d/L^2 + 1)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

以上两式结合起来, N 、 T 可将表示为瞬时内摩擦角 φ 的表达式:

$$N/L^2 = \frac{1}{16} [2 \sin \varphi + (\sin \varphi)^{-2} - 3] \quad (12)$$

$$T = \frac{L^2}{8} [\cot \varphi - \cos \varphi] \quad (13)$$

求解式 (12) 可得

$$\varphi = \arcsin \left(2h^{1/2} \cos \theta \right)^{-1} \quad (14)$$

$$\text{式中: } h = 1 + \frac{16}{3} (N/L^2) \quad (15)$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos(-h)^{-3/2} \quad (16)$$

求得瞬时内摩擦角 φ 后, 即可根据抗剪强度公式求解瞬时黏聚力:

$$c = \tau - \sigma \tan \varphi \quad (17)$$

$$\text{式中: } \tau = m \sigma_c T = \frac{m \sigma_c L^2}{8} [\cot \varphi - \cos \varphi] \quad (18)$$

4 地震荷载下的地基承载力计算

地震时, 由于地基破坏引起的危害被历次地震所证明, 众多学者的研究也表明在地震及其他动力作用下地基承载力会有显著的下降。在工程应用中, 习惯不考虑地震引起的液化作用, 将地震荷载作为惯性力转化为静荷载来计算地基承载力, 若地震时的水平地震系数为 k_h , 竖直地震系数为 k_v , 则所产生的水平向震动加速度为 $k_h g$, 竖直向震动加速度为 $k_v g$ 。如图 2 所示, 在地震荷载作用下的刚性条形基础位于节理岩体之上, 基础上受集中力 Q 作用, 首先将岩体分成两个区: 朗肯区和过渡区。对于朗肯区, 计算时单独作为一个条块, 根据塑性力学理论, 朗肯区由 2 条共轭滑移线组成, 直接从塑性应力分析得出朗肯区的几何参数^[16]:

$$\theta_0 = \frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} - \frac{\beta}{2} - \frac{1}{2} \arcsin \left(\frac{\sin \beta}{\sin \varphi} \right) \quad (19)$$

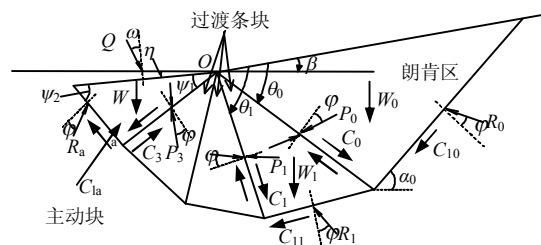


图 2 地基破坏示意图

Fig.2 Sketch of foundation damage

地基破坏模式取由众多共顶点的刚性三角条块组成的单向滑动机制。为了简要说明, 图 2 中只给出了 5 个示意条块, 其中包括中间 3 个过渡条块, 左边一个主动楔块, 最右边一个被动朗肯区。在实际计算中, 过渡条块的个数要远远大于 3 个。 ψ_1 与

首先分析结合统一强度理论 ($b \neq 0$) 后计算所得地基承载力与未结合统一强度理论 ($b = 0$) 时计算所得地基承载力之间的关系, 不同 b 值情况下的地基承载力变化情况如图 5 所示。当 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$ 时, 不同 b 值对应的基础破坏滑面如图 6 所示。

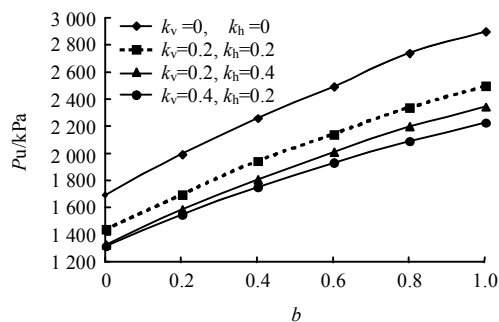


图 5 不同 b 值下承载力变化情况

Fig.5 Changes of bearing capacity under various values of b

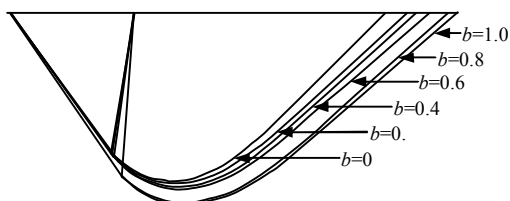


图 6 $k_v=0.2$, $k_h=0.2$ 时, 不同 b 值下地基破坏滑面示意图

Fig.6 Sketch of ground failure mode under various values of b when $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$

比较图 5 发现, 引入了统一强度理论的地基静、动承载力均有明显增加, 随着 b 值的增加, 地基承载力近乎呈线性增加, 增幅最大达 77% ($b = 1$, $k_v = 0.2$, $k_h = 0.4$ 时)。分析图 6 可知, 在地震力系数一定的情况下, 随着系数 b 的增加, 基础最危险破坏滑面不断向深部发展, 抗破坏能力不断提高。引入统一强度理论后, 地基静、动承载力均有较大程度的增加, 这也表明现有的地基承载力计算方法未考虑中主应力的影响, 其计算结果偏于保守, 可以通过乘以相应的修正系数来修正现有的地基承载力计算方法。通过图 5 分析可以得到近似的修正系数:

$$\zeta_b = -0.033 \ 6b^3 - 0.216 \ 7b^2 + 0.954 \ 2b + 1 \quad (22)$$

对比不同地震荷载下的地基承载力大小可以发现, 岩质地基承载力随着地震荷载的增加而减小, 当 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$ 时, 地基承载力比无地震荷载时减少约 15%。同时, 由图 7 可知, 随着地震荷载的增加, 基础最危险破坏滑面逐渐向浅部发展, 抗破坏能力下降。分析表 2 可见, 不同 b 值下地震荷载

对地基承载力大小的影响较为接近, 因此可通过地震荷载修正系数来反映地震荷载的影响。地震荷载修正系数可近似取为

$$\xi_y = 0.59 \exp \left(\frac{1}{2} - \frac{k_v}{2(1-k_h)} \right) \quad (23)$$

对比发现, 竖直向地震力和水平向地震力对地基承载力的影响是不一样的。以 $b = 0.2$ 时为例进行分析, 当 $k_v = 0.4$, $k_h = 0.2$ 时, 地基承载力比 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$ 时减小了 8.7%; 与 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.4$ 时与 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$ 时相比, 地基承载力减小了 6.4%, 从图 5 中也可以看出, 当 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.4$ 时, 地基最危险破坏滑面更接近于 $k_v = 0.2$, $k_h = 0.2$ 时的破坏滑面, 这均说明竖直向地震力对地基承载力的影响大于水平向地震力。

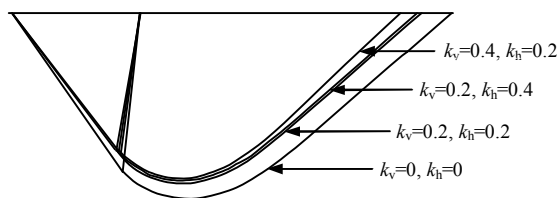


图 7 $b = 0.2$ 时不同地震力系数下地基破坏滑面示意图

Fig.7 Sketch of ground failure mode under various earthquake coefficients when $b = 0.2$

6 结 论

(1) 引入统一强度理论后, 静或动荷载下, 随着反映中主应力作用的系数 b 的增加岩质地基承载力均有明显增加。现有的地基承载力计算理论没有考虑中主应力的影响, 使计算结果偏于保守, 不能充分发挥岩体的强度潜能。

(2) 在地震荷载作用下, 岩质地基的动承载力与静承载力相比有 5%~10% 的降低, 且岩质地基的承载力随着地震荷载的增加而降低。

(3) 竖直向地震力和水平向地震力对地基承载力的影响是不同的, 竖直向地震力对岩质地基承载力的影响大于水平向地震力。

参 考 文 献

- [1] HOEK E, BROWN E T. Underground excavations in rock[M]. London: Institution of Mining and Metallurgy, 1980.
- [2] HOEK E. Strength of jointed rock mass[J]. *Geotechnique*, 1983, 33(3): 187—223.
- [3] HOEK E. Strength of rock and rock mass[J]. *ISRM News*

- Journal**, 1994, 2(2): 4—16.
- [4] 许东俊, 耿乃光. 岩石强度随中间主应力变化规律[J]. 固体力学学报, 1985, 1(1): 72—80.
XU Dong-jun, GENG Nai-guang. The variation law of rock strength with increase of intermediate principal stress[J]. **Acta Mechanica Solida Sinica**, 1985, 1(1): 72—80.
- [5] 方开泽. 土的破坏准则——考虑中主应力的影响[J]. 滑动水利学院学报, 1986, 14(2): 70—88.
FANG Kai-ze. Failure criterion of soil — Influence of intermediate principal stress[J]. **Journal of East China Technical University of Water Resources**, 1986, 14(2): 70—88.
- [6] 俞茂宏, 何丽南, 宋凌宇. 双剪应力强度理论及其推广[J]. 中国科学(A 辑), 1985, 28(12): 1113—1120.
YU Mao-hong, HE Li-nan, Song Ling-yu. Twin shear stress strength theory with its generalizations[J]. **Journal of Science in China (A)**, 1985, 28(12): 1113—1120.
- [7] YU M H, HE L N. A new model and theory on yield and failure of materials under complex stress state[C]// **Mechanical Behaviour of Materials**. Oxford: Pergamon Press, 1991: 851—856.
- [8] 俞茂宏. 岩土类材料的统一强度及其应用[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(2): 1—9.
YU Mao-hong. Unified strength theory for geomaterials and its applications[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 1994, 16(2): 1—9.
- [9] 俞茂宏, 廖红建, 张永强. 本构模型从单剪到三剪到双剪到统一[J]. 岩石力学与工程学报, 1998, 17(增刊): 739—743.
YU Mao-hong, LIAO Hong-jian, ZHANG Yong-qiang. From single-shear to tri-shear to twin to unification[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 1998, 17(Supp.): 739—743.
- [10] 俞茂宏, 咎月稳, 范文. 20 世纪岩石强度理论的发展[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(5): 545—550.
YU Mao-hong, ZAN Yue-wen, FAN Wen. Advances in strength theory of rock in 20th century[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2000, 19(5): 545—550.
- [11] 咎月稳, 俞茂宏, 王思敬. 岩石非线性统一强度准则[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1435—1441.
ZAN Yue-wen, YU Mao-hong, WANG Si-jing. Nonlinear unified strength criterion of rock[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1435—1441.
- [12] 范文, 林永亮, 秦玉虎. 基于统一强度理论的地基临界何在公式[J]. 长安大学学报(地球科学版), 2003, 25(9): 48—51.
FAN Wen, LIN Yong-liang, QIN Yu-hu. Formula for critical load of foundation based on the unified strength theory[J]. **Journal of Chang'an University(Earth Science Edition)**, 2003, 25(9): 48—51.
- [13] 周小平, 黄煜镔, 丁志诚. 考虑中间主应力的太沙基地基极限承载力公式[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(10): 1554—1556.
ZHOU Xiao-ping, HUANG Yu-bin, DING Zhi-cheng. Influence of intermediate principal stress on the formula of Terzaghi ultimate bearing capacity of foundations[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2002, 21(10): 1554—1556.
- [14] 周小平, 王建华. 考虑中间主应力影响时条形地基极限承载力公式[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(4): 552—555.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua. Influence of intermediate principal stress on ultimate bearing capacity of foundations[J]. **Journal of Shanghai Jiaotong University**, 2003, 37(4): 552—555.
- [15] 周小平, 王建华, 张永兴. 三向应力状态下条形基础极限承载力计算方法[J]. 重庆建筑大学学报, 2002, 24(6): 28—32.
ZHOU Xiao-ping, WANG Jian-hua, ZHANG Yong-xing. Calculation of the ultimate bearing capacity of foundation under triaxial compressive loading[J]. **Journal of Chongqing Jiaotong University**, 2003, 37(4): 552—555.
- [16] 刘传林. 基于三角条块法的临界滑动场在土压力及地基承载力计算中的应用[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2010.
- [17] 师林, 朱大勇, 沈银斌. 基于 Hoek-Brown 非线性破坏准则的节理岩体地基承载力研究[J]. 岩石力学与工程学报, (待刊).
SHI Lin, ZHU Da-yong, SHEN Yin-bin. Study of ultimate bearing capacity of joined rock masses based on generalized Hoek-Brown nonlinear failure criterion[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, in press.
- [18] LONDE P. Discussion of “Determination of the shear failure envelope in rock masses”[J]. **ASCE Journal of Geotechnical Engineering**, 1988, 114(3): 374—376.
- [19] RICHARDS J, ASCE A, ELMS D S, et al. Seismic bearing capacity and settlements of foundations[J]. **J. Geotech. Engrg.**, 1990, 119(4): 662—674.
- [20] BUDHU M, AL-Karni A. Seismic bearing capacity of soils[J]. **Geotechnique**, 1993, 43(1): 181—187.