

挤扩支盘桩抗拔承载力的有限元分析

唐孟雄^{1,2} 李 森¹

(1. 广州市建筑科学研究院, 广东广州 510440; 2. 中山大学工学院, 广东广州 510275)

【摘 要】 挤扩支盘桩是近年来发展起来的一种新桩型, 具有广阔的工程应用前景。运用 ANSYS 有限元软件, 建立了广州软土中挤扩支盘桩二维桩土模型, 探讨了上拔荷载作用下桩身荷载传递规律和支盘承载特性, 并分析了支盘大小、数量、间距和桩、土材料参数等因素对支盘桩抗拔承载力的影响。进一步揭示了挤扩支盘桩单桩抗拔承载机理, 可为该类桩的设计和施工提供参考。

【关键词】 挤扩支盘桩; 承载机理; 抗拔承载力; 影响因素; 有限元分析

【中图分类号】 TU 473. 11

Finite Element Analysis of Uplift Bearing Capacity of Squeezed Branch Pile

Tang Mengxiong^{1,2} Li Sen¹

(1. Guangzhou Institute of Building Science, Guangzhou Guangdong 510440;

2. College of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou Guangdong 510275 China)

【Abstract】 Squeezed branch pile, which has a remarkable potential in engineering practices, is a new type of pile developed in recent years. To study the load transfer mode of squeezed branch pile and bearing characteristics of branch plates in uplift forces, several two-dimensional pile-soil models of squeezed branch pile in soft soil of Guangzhou are established in ANSYS, and the effects of branch size, branch number, branch space and material parameters of pile and soil on the uplift bearing capacity of squeezed branch pile are analyzed also. The uplift bearing mechanism of single squeezed branch pile is investigated progressively, and the results provide a reference for the design and construction of similar piles.

【Key Words】 squeezed branch pile; bearing mechanism; uplift bearing capacity; effect factors; finite element analysis

0 引言

挤扩支盘桩又称 DX 桩, 是在原有等截面钻孔灌注桩基础上发展起来的一种变截面灌注桩。即在普通灌注桩成孔后, 吊入专用的挤扩设备扩孔形成支盘, 通过支盘的端承作用, 提高承载力、减小位移量, 从而获得较好的经济技术效果。

自上世纪 90 年代以来, 挤扩支盘桩在我国得到了较快的发展和广泛的应用。吴兴龙^[1]、陈 轮^[2-3]、钱德玲^[4]、方 崇^[5]、Ergun^[6]等国内外学者对支盘桩承载规律作了深入研究, 得到了一些有价值的结论。但这些研究工作主要集中于支盘桩在竖向压荷载作用下的承载规律, 或仅通过工程实例、简化计算等手段分析桩的抗拔承载性能。随着电视塔、斜拉桥等高

耸建筑物和船坞、地下停车场等承受浮托力结构物的日益增多, 抗拔桩的应用日趋广泛。挤扩支盘桩因具有技术简单、施工方便、低污染、经济效益高等优点^[7], 逐渐应用于抗拔桩基础。本文采用有限元方法, 对支盘桩在竖向上拔荷载作用下荷载传递规律, 支盘大小、数量、间距和桩、土材料参数等对承载力的影响规律进行研究, 以为工程应用提供参考。

1 有限元模型的建立

本文采用 ANSYS 有限元程序建模。桩体和地基土为空间轴对称, 桩土间设置面-面接触, 桩体采用线弹性模型, 地基土采用 Drucker-Prager 屈服准则。Drucker-Prager 屈服准则是对 Mohr-coulomb 准则的修正, 其等效应力表达式为^[8]

基金项目: 广东省科技基金资助项目(2004B36001028)

作者简介: 唐孟雄, 1963 年生, 男, 汉族, 湖南人, 博士, 教授级高工, 主要从事岩土工程科研、设计和施工方面工作。E-mail: tmxiong@21cn.com

$$\sigma_e = 3\beta\sigma_m + [\{S\}^T[M]\{S\}/2]^{1/2} \quad (1)$$

式中： $\sigma_m = 1/3(\sigma_x + \sigma_y + \sigma_z)$ 为平均应力或静水压力； $\{S\}$ 为偏差应力； $\{M\}$ 为 Mises 屈服准则中的 $\{M\}$ ； β 为材料常数，其表达式为

$$\beta = \frac{\sigma_c - \sigma_t}{\sqrt{3}(\sigma_c + \sigma_t)} = \frac{2\sin\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (2)$$

式中： σ_c 为受压屈服应力； σ_t 为受拉屈服应力； φ 为材料内摩擦角； c 为材料粘聚力，则屈服准则的表达式为

$$F = 3\beta\sigma_m + [\{S\}^T[M]\{S\}/2]^{1/2} - \sigma_y = 0 \quad (3)$$

$$\sigma_y = \frac{6c \cdot \cos\varphi}{\sqrt{3}(3 - \sin\varphi)} \quad (4)$$

地基土采用广州地区典型软土，其 Drucker-Prage 模型参数主要参照文献[9]确定。地基土、桩身材料参数见表 1。

表 1 桩土材料参数

材料	弹性模量 E/MPa	泊松比 ν	重度 γ / $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	膨胀角 $\psi/(\text{°})$
桩体	30 000	0.2	25			
软土	4.5	0.35	16	10	8	0

根据对称性，取一半桩体和地基土建立二维桩土模型。计算中保持桩长 $L=10\text{m}$ 、桩径 $d=0.5\text{m}$ 、支盘受荷面与水平面夹角 $\theta=45^\circ$ ，支盘直径、数量、间距和桩、土弹性模量等参数则有数种变化。计算范围在水平向取 10 倍桩径，竖直向取 1.5 倍桩长，即计算网格尺寸为宽 \times 高=5m \times 15m。地基土外围设置水平向和竖直向位移约束，底端设置竖直向位移约束。桩身结构见图 1，划分网格后的有限元模型见图 2(以桩身带二支盘为例)。

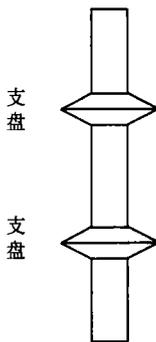


图 1 支盘桩桩身结构图

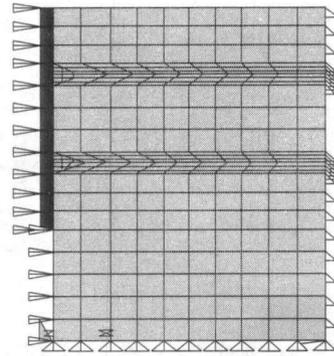


图 2 有限元网格模型图

2 支盘桩承载特性分析

2.1 支盘桩抗拔荷载传递规律

桩径 $d=0.5\text{m}$ 的直杆桩与距桩底端 2.0 m 处设置一盘径 $D=1.5\text{m}$ 的支盘桩，在各级荷载作用下桩身轴力变化见图 3、图 4。由图可知，直杆桩在均匀土质中，轴力沿桩身自上而下成线性递减分布，而支盘桩在支盘上下端轴力急剧降低，且随着荷载增大，降低幅度亦增大。直杆桩主要依靠桩侧摩阻力承受上拔荷载，支盘桩则可通过支盘将部分荷载传递到上部土层中，图 4 中急剧降低的轴力即由支盘承担。支盘的端承作用，使抗拔桩由单纯的摩擦桩变为摩擦端承桩，改善了桩基的承载性能。

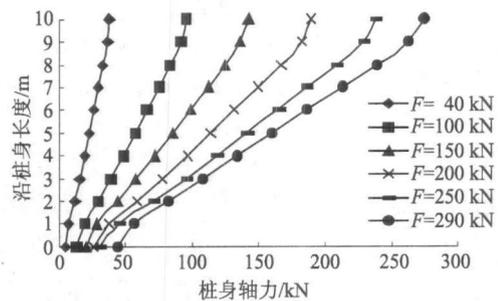


图 3 等截面桩轴力传递图

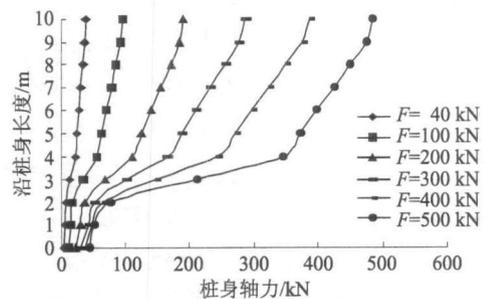


图 4 支盘桩轴力传递图

支盘间距 $H=D=1.5\text{m}$ 时，不同支盘数目支盘桩支盘承担荷载总比例变化曲线及 4 支盘桩各支盘(自上而下依次表示为支盘 1, 2, 3, 4)承担荷

载比例变化曲线见图 5、图 6。由图可看出,荷载较小时,支盘承担荷载总比例及各支盘承担荷载变化均不大,达到一定值后,支盘承担荷载总比例急剧增大,各支盘承担荷载亦自上而下依次增大。4 支盘时,支盘承担荷载总比例达 50% 以上,到支盘 4 发挥极限承载力时,桩顶位移已超过 30 mm。支盘桩受上拔荷载作用时,桩侧摩阻力先于支盘端阻力发挥,支盘发挥极限承载力需较大的相对位移,各支盘极限承载力亦不同时发挥^[10-11],当土质条件相差不大时,上面支盘先进入极限状态,然后下面支盘依次进入极限状态。

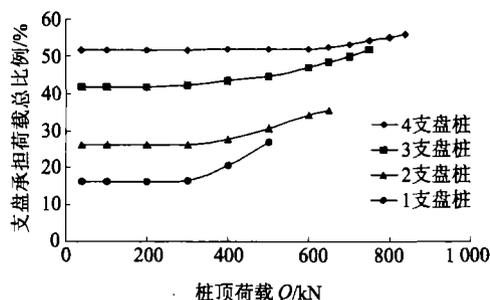


图 5 支盘承担荷载总比例变化图

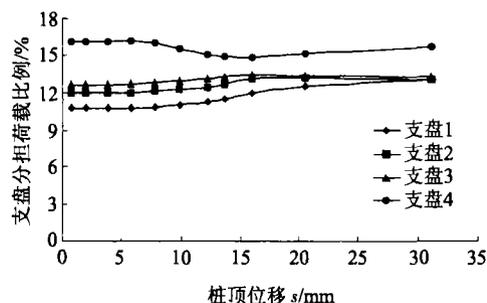


图 6 4 支盘桩各支盘承担荷载比例变化图

2.2 影响支盘桩承载力的主要因素

2.2.1 支盘大小对承载力的影响

支盘直径 $D=(2\sim 4)d(1.0\sim 2.0\text{ m})$ 时,单支盘桩 $Q-s$ 曲线和固定荷载作用下桩顶位移变化曲线见图 7、图 8。由图可看出,支盘直径 D 越大, $Q-s$ 曲线后期变化越平缓;桩顶荷载 $Q=100\text{ kN}$ 、 200 kN 时,位移曲线随支盘直径变化甚微; $Q=380\text{ kN}$ 、 $D\leq 3d$ 时,桩顶位移随支盘直径 D 的增大显著减小, $D\geq 3d$ 后,位移曲线趋于平缓。增大支盘直径,有利于荷载作用后期支盘桩抗拔承载力的提高,但超过 $3d$ 后,效果减弱,且支盘大小受施工工艺和地质条件限制,设计过大支盘直径,既不符合工程实际,亦不经济。

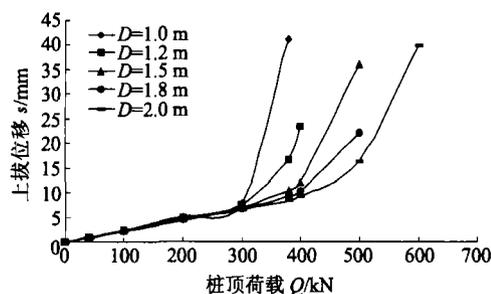
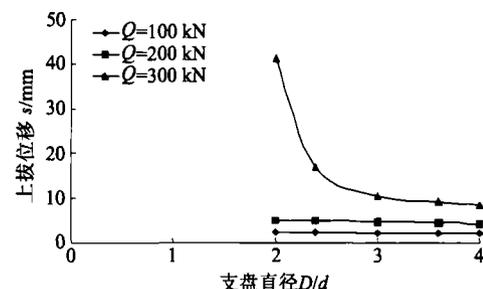
图 7 支盘直径对 $Q-s$ 曲线影响

图 8 支盘直径-上拔位移关系曲线

2.2.2 支盘数量对承载力的影响

支盘间距 $H=D=1.5\text{ m}$ 、支盘数量 1~4 个时,单桩 $Q-s$ 曲线和固定荷载作用下桩顶位移变化曲线见图 9、图 10。由图可见, $Q\leq 200\text{ kN}$ 时,不同支盘数目支盘桩对应的 $Q-s$ 曲线基本重合,桩顶位移变化亦不大; $Q\geq 200\text{ kN}$ 后,随着支盘个数增加, $Q-s$ 曲线逐渐变缓,桩顶位移逐渐减小,但减小幅度变小。荷载较小时,桩顶荷载主要由桩侧摩阻力承担,随着荷载增大,桩土相对位移增加,支盘端承作用开始显现。支盘数量增加能有效改善荷载作用后期支盘桩的抗拔承载性能,提高承载力,但受桩长限制和桩周土体性质影响,到达 4 个时,效果已不明显。

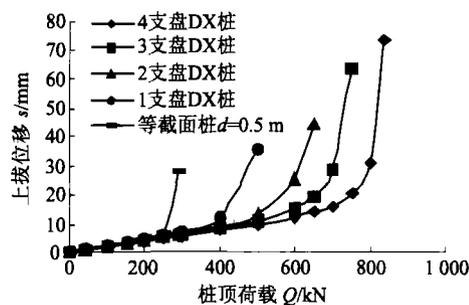
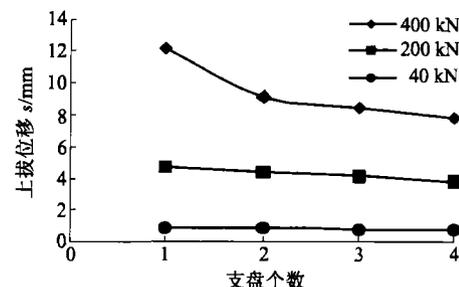
图 9 支盘数量对 $Q-s$ 曲线影响

图 10 支盘数量-上拔位移关系曲线

2.2.3 支盘间距对承载力的影响

支盘数量为2,支盘间距 $H=0.5\sim 4D$ ($0.75\sim 6.0\text{m}$),单桩 $Q-s$ 曲线和固定荷载作用下桩顶位移变化曲线见图11、图12。图中显示, $H\leq 2D$ 时,随着支盘间距增大,单桩 $Q-s$ 曲线变缓,桩顶位移亦明显减小; $H\geq 2D$ 后, $Q-s$ 曲线变缓幅度减小,位移曲线亦趋于平缓,桩顶荷载 $Q=650\text{ kN}$ 时,位移略有回升。支盘间距较小时,各支盘上方土体受力区域相互重叠,达到一定值后,各支盘独立承担荷载,但继续增大间距将导致上盘距地表土层变薄,承载力减小。

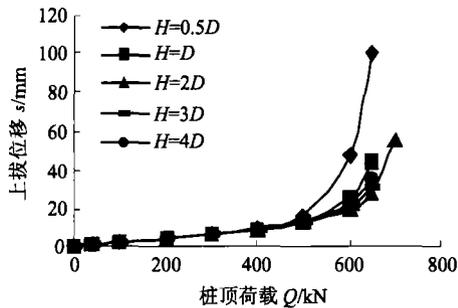


图11 支盘间距对 $Q-s$ 曲线影响

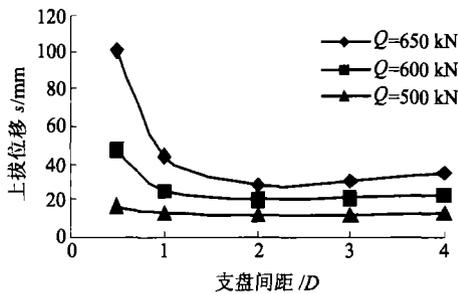


图12 支盘间距-上拔位移关系曲线

2.2.4 桩、土材料参数对承载力的影响

支盘间距 $H=2D=1.5\text{ m}$,桩身混凝土等级在C15—C80间(对应弹性模量 $22\sim 38\text{ GPa}$),土体弹性模量 $1.5\sim 15\text{ MPa}$ 间,2支盘桩在固定荷载作用下桩顶位移变化曲线见图13、图14。由图可知,桩身弹性模量对桩顶位移影响甚微,土体弹性模量则影响较为显著,但超过 9 MPa 后,影响亦开始减弱。可见,选择强度较高的土层布置支盘,比单纯依靠桩身混凝土强度提高承载力更有意义。

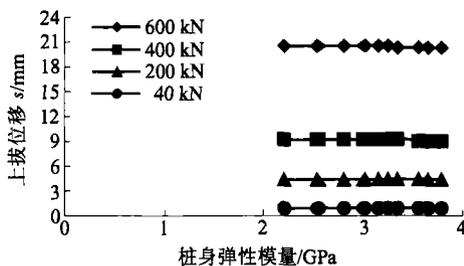


图13 桩身弹性模量-上拔位移关系曲线

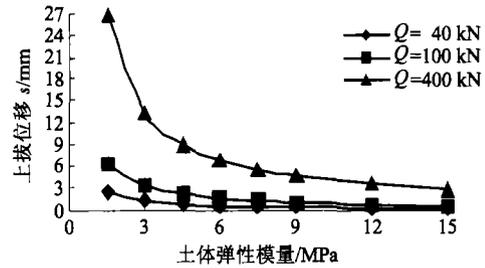


图14 土体弹性模量-上拔位移关系曲线

不同土体粘聚力和内摩擦角对应的单桩 $Q-s$ 曲线见图15、图16。可以看出,土体粘聚力的提高使 $Q-s$ 曲线大幅度变缓,而内摩擦角的变化对曲线影响则较小。选择支盘布置土层时,应优先考虑粘聚力较高的土层。

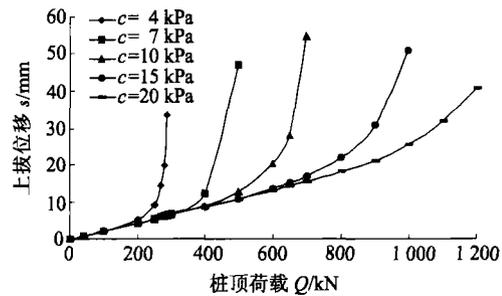


图15 土体粘聚力对 $Q-s$ 曲线影响

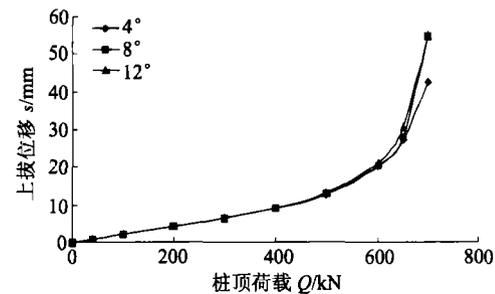


图16 土体内摩擦角对 $Q-s$ 曲线影响

3 结论

本文通过建立二维桩土模型进行有限元分析,对广州典型软土中挤扩支盘桩在上拔荷载作用下,荷载传递规律及承载力影响因素作了探讨,得出如下结论:

1) 支盘的端承作用能有效改善支盘桩的承载性能,充分发挥地基土的承载力,在一定支盘数量下,支盘承担荷载总比例达 50% 以上,具有良好的经济效益。

2) 承受上拔荷载时,挤扩支盘桩的桩侧摩阻力先于支盘端阻力发挥,支盘极限承载力的发挥需较大的相对位移。4支盘桩底层支盘发挥极限承载力时,桩顶位移已超过 30 mm ($0.06d$)。这对位移控制条件较高的结构物,应引起注意。

3)支盘直径 D 增大,支盘数量增多,均有利于提高荷载作用后期支盘桩抗拔承载力。但 $D \geq 3d$ 后,效果骤然减弱,支盘数量到达 4 个时,继续增设支盘已不经济。

4)支盘间距 $H \leq 2D$ 时,增大间距,有利于充分发挥各支盘作用; $H \geq 2D$ 后,各支盘已能够独立承担荷载,继续增大间距,对改善桩体承载性能意义不大。

5)桩身混凝土强度的提高与土体内摩擦角的增大对提高支盘桩承载力作用较小;土体弹性模量 $E \leq 9 \text{ MPa}$ 时,提高土体强度能显著改善桩基承载性能, $E \geq 9 \text{ MPa}$ 后,效果逐渐减弱;粘聚力的增大有利于提高桩基承载能力,布置支盘时,应优先选择粘聚力大的土层。

参 考 文 献

- [1] 吴兴龙,李光茂,魏章和. DX 桩单桩承载力设计分析[J]. 岩土工程学报,2000,22(5):581-585.
- [2] 陈 轮,常冬冬,李广信. DX 桩单桩承载力的有限元分析[J]. 工程力学,2002,19(6): 67-72.
- [3] 陈 轮,蒋 力,王海燕. DX 桩抗拔位移的弹性理论解析解[J]. 计算力学学报,2006,23(3):381-384.
- [4] 钱德玲. 挤扩支盘桩的荷载传递规律及 FEM 模拟的研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(3):371-375.
- [5] 方 崇,张信贵,闭历平. 挤扩支盘桩在地下建筑抗浮设计中的应用[J]. 岩土工程技术,2005,19(6): 281-283.
- [6] Ergun M U, Akbulut H. Bearing capacity of shaft-expanded driven model piles in sand[J]. Geotechnique,1995,45(4):715-718.
- [7] 武 熙,武继承,孙 和. 挤扩支盘桩及其成形设备[M]. 北京:机械工业出版社,2004.
- [8] 唐世栋,李 阳. 基于 ANSYS 软件模拟桩的挤入过程[J]. 岩土力学,2006,27(6): 973-976.
- [9] 梁令枝,童华炜. 广州软土工程特性研究[C]// 第 16 届全国结构工程学术会议论文集 II. 北京:《工程力学》杂志社,2007: 327-331.
- [10] 沈保汉,陈 轮,王海燕. DX 桩侧阻力和端阻力的现场试验研究[J]. 工业建筑,2004,34(3):9-14.
- [11] 赵明华,李微哲,单远铭. DX 桩抗拔承载力及设计计算方法研究[J]. 岩土力学,2006,27(2): 199-203.

收稿日期:2008-07-14

(上接第 226 页)

意滑面或者滑块的稳定安全系数。既能考虑到非线性变形及弹塑性应力调整对稳定安全系数的影响,也可以得到滑面上精确的法向力、剪切力分布及变化情况,提高滑块的计算精度,从而对滑块体变形直至失稳的全过程进行深入的分析,为加固措施的实施提供更符合实际的指导。

参 考 文 献

- [1] James Michael Duncan. State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes [J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1996,122(7): 577-596.
- [2] 陈祖煜,汪小刚,杨 键,等. 岩质边坡稳定分析—原理方法程序(M). 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [3] Jongmin Kim, Rodrigo Salgado, Junhwan Lee. Stability Analysis of Complex Soil Slopes using Limit Analysis[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2002,128(7):546-557.
- [4] Yang Xiaoli, Yin Jianhua. Slope Stability Analysis with Nonlinear Failure Criterion [J]. Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 2004,130(3):267-273.
- [5] 孙增奎,童海涛. 岩质边坡稳定性分析中极限平衡法与有限元法的对比[J]. 岩土工程技术,2005,19(2): 98-100.
- [6] 张鲁渝,郑颖人,赵尚毅,等. 有限元强度折减系数法计算边坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报,2003(1): 21-27.
- [7] 刘立鹏,陈 奇,张 彬. 基于 FLAC 强度折减理论的边坡稳定性研究. 岩土工程技术[J],2008. 22(1): 6-10.
- [8] 杨 强,陈 新,周维垣. 岩土工程加固分析的弹塑性力学基础[J]. 岩土力学,2005,26(4): 553-557.
- [9] 杨 强,朱 玲,刘福深. 高拱坝坝肩稳定分析中拉裂面的作用机理研究[J]. 水力发电,2005(7): 36-38.
- [10] 杨 强,朱 玲,翟明杰. 基于三维非线性有限元的坝肩稳定刚体极限平衡法机理研究[J]. 岩石力学与工程学报,2005,24(19): 3403-3409.

收稿日期:2008-07-07