文章编号:1674-2974(2016)03-0149-06

碎石桩桩身鼓胀变形测试技术研究*

张 玲†,赵明华,罗 宏
(湖南大学 岩土工程研究所,湖南 长沙 410082)

摘 要:针对竖向荷载作用下碎石桩等散体材料桩桩身竖向压缩同时伴有侧向鼓胀变形这一特性,自行开发研制出量测桩身鼓胀变形的测试仪器,其原理是通过量测变形后的桩身周长来确定碎石桩的鼓胀量.通过与水玻璃胶结碎石桩量测其变形后周长等方法测试结果对比分析,验证碎石桩桩身鼓胀变形测试技术的可行性和测试精度.将该技术应用于室内模型试验中碎石桩鼓胀变形量的量测,测试结果表明,碎石桩鼓胀变形量随上部竖向荷载的增加而增加,同一荷载等级下鼓胀变形先随深度的增加而增加,后又随深度的增加而减小.

关键词:模型试验;测试技术;碎石桩;鼓胀变形
中图分类号:U416.1 **文献标识码**:A

A New Measuring Technique for Lateral Bulging of Stone Columns

ZHANG Ling†, ZHAO Ming-hua, LUO Hong
(Institute of Geotechnical Engineering, Hunan Univ, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract: It is known that axial compressive deformation is usually generated in a stone column under vertical loads, and often accompanied by a radial expansion against the surrounding soil near the top portion of the column. With the consideration of this deformation characteristic of the stone column, a new technique to measure the lateral bulging of the stone column was proposed, where the lateral bulging of the column was determined by circumferential measurements. The variability and accuracy of the proposed measuring technique was fully verified by the comparison with the other measuring methods. Moreover, this measuring technique was employed to study the deformation behavior of stone columns in an indoor laboratory test. The measuring results show that the lateral bulging of the stone column increases with the increase of vertical loads. Furthermore, under a certain load, the column bulging increases along with the column length firstly, then decreases with the column length after the maximum bulging.

Key words: laboratory test; measuring technique; stone column; lateral bulging

碎石桩是指采用振冲或沉管法等在软基中成孔,再在孔内填入碎石、卵石等粗骨料,形成具有一定直径的密实桩体.碎石桩与桩周土体形成复合地基,协调变形、共同承载,提高地基承载力和抗液化能力,减小地基沉降.碎石桩复合地基因其取材方便、施工简单、造价低廉,且具有良好的振密挤密、置

* 收稿日期:2015-04-14
基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2006AA11Z104);国家自然科学基金(青年基金)资助项目(51208191),National Natural Science Foundation of China(51208191);湖南大学青年教师成长计划资助项目
作者简介:张 玲(1982—),女,浙江台州人,湖南大学助理教授,博士
†通讯联系人,E-mail:zhanglhd@163.com

换、排水固结等加固作用而在公路、铁路等软土地基处治中广泛应用[1-2]. 然而碎石桩复合地基的承载机理及其设计计算理论研究尚有待进一步深入[3-6].

试验研究可直接揭示研究对象的某些特性,为理论分析提供良好的基础. 其中室内模型试验具有投资相对较少、时间灵活、影响因素容易控制等优点,因而成为揭示研究对象工作机理、探讨发展规律等的重要手段之一. 在竖向荷载作用下,碎石桩竖向压缩变形的同时伴有侧向鼓胀变形,如何量测碎石桩侧向鼓胀变形量是试验研究的一大难题. Hughes 和 Withers[7] 采用放射线照相技术(laboratory radiography),研究碎石桩单桩的受力变形特性;胡炜等[8] 在载荷试验后,采用改装后的真空吸尘器吸走黏土中的砂桩,之后立马在孔洞中注入石膏浆,待石膏凝固后挖掉桩周黏土,石膏模型即为最终变形后的砂桩,以此来研究黏土地基中散体材料桩的变形及破坏机理;Wood 等[9]、Ambily 等[10]、Ali 等[11]、Shahu 等[12] 在载荷试验结束后,采用挖掘技术(exhumation technique),先将黏土中的碎石桩挖出,再在孔洞中注入石膏浆以研究碎石桩的鼓胀变形特性;Deb 等[13] 用水泥浆将碎石桩胶结起来,Black 等[14] 沿桩身轴线方向切割出桩土复合地基的剖面图,以观察载荷试验后碎石桩的鼓胀变形情况;Mckelvey 等[15] 通过配置一透明材料模拟桩间软土,来研究在加载过程中碎石桩的变形情况. 上述方法中,放射线法试验成本较高;石膏成型法[8-12]、水泥浆胶结法[13]、直接切割法[14] 等可得加载后碎石桩最终的鼓胀变形情况,但无法反应鼓胀变形随荷载增加的发展变化过程,且石膏成型法[8-12] 需先将碎石等散体材料从复合地基中挖掘出来,工作难度较大;而透明材料模拟桩间软土时与实际地基土体的性质有差异,试验费用较高,且不适于大比例模型试验研究.

因此,便于实际操作的桩身鼓胀变形量测技术的研发对揭示碎石桩等散体材料桩复合地基的承载变形机理非常重要. 为此,本文基于碎石桩的受力变形机理,对碎石桩等散体材料桩鼓胀变形的量测技术进行研究.

1 碎石桩受力变形机理

碎石桩属于散体材料桩,桩体自身缺乏粘结强度,需靠桩周土体的环箍作用才能成桩. 荷载作用下,碎石桩较易发生鼓胀变形. 图 1 为南京水科院孟广训等[16] 通过室内模型试验测得的碎石桩轴向和径向应力沿深度的变化情况. 该模型桩置于粉质黏土中,桩体轴向和径向应力通过埋于不同深度截面和侧面处的土压力传感器测得. 图 1 中 p_p 为桩顶表面荷载,σ_z 和 σ_r 分别表示桩体轴向应力和径向应力. 由图 1 可见,碎石桩桩身轴向应力 σ_z 随深度迅速衰减,$3d_p$(d_p 为桩径)深度处桩体轴向应力平均值只有表面荷载 p_p 的 27.4%,而且在(2~3)d_p 深度内桩身轴向应力和径向应力均较大,为高应力区. Hughes 和 Withers[7] 也曾得到类似的试验结论(图 2),$2d_p$ 深度范围内桩的侧向位移比较大,深度超过(2~3)d_p 时,径向位移可忽略不计,其原因主要是随深度的增大,桩身轴向应力逐渐减小,而桩间土能提供的抵抗侧向位移的约束力则逐渐增大.

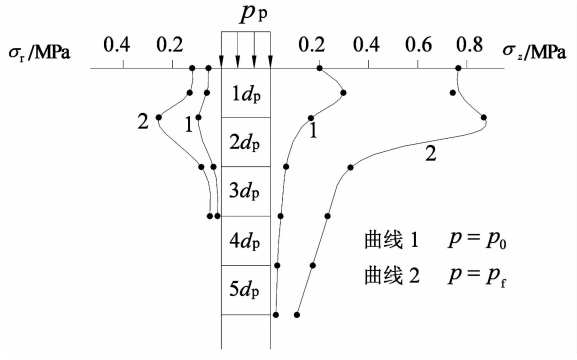

图 1 σ_r,σ_z 随深度变化曲线

Fig. 1 Variation of σ_r and σ_z in depth

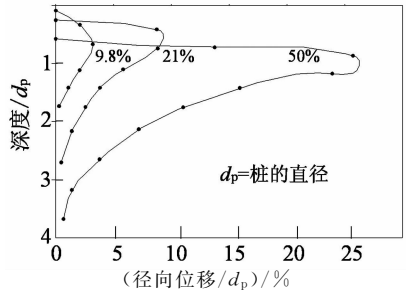

图 2 桩侧径向位移与深度的关系

Fig. 2 Variation of lateral deformation in depth

由此可见,碎石桩承载力主要取决于桩周土体的侧向约束力,该约束力的发挥对碎石桩桩复合地基的承载力起着关键作用. 竖向荷载作用下,当桩周土体强度较低而不能提供足够的侧向约束力时,碎石桩极易发生侧向鼓胀而导致整个复合地基失效.

2　碎石桩鼓胀变形测试仪

竖向荷载作用下碎石桩发生鼓胀变形,进而引起桩身截面周长的变化,通过量测变形后的桩身周长来确定碎石桩的鼓胀量,其工作原理如图 3 所示.

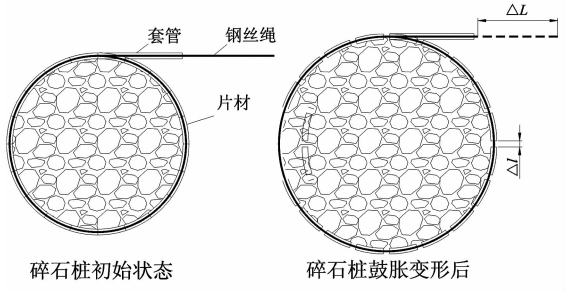

图 3　碎石桩鼓胀变形量测原理图
Fig. 3　Illustrative diagram of measuring column bulging

根据上述工作原理,课题组自行研发出散体材料桩桩身鼓胀变形量测试仪(图 4). 用柔性钢丝绳作牵引绳串联排列紧密的片材,并将其紧密包裹在碎石桩桩身周围,牵引绳一端固定于紧固件,另一端穿过定位片连接于位移传感器. 碎石桩受荷载鼓胀变形时,片材随碎石料一起向周围土体挤压,牵引绳随之在片材孔洞中滑动,将片材之间产生的微小变化进行集中反应,最后通过位移传感器量测牵引绳长度的减小量来反应碎石桩鼓胀变形引起的桩身周长增量.

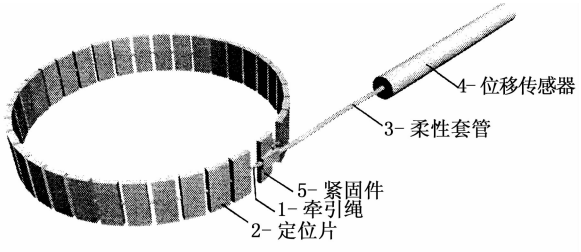

图 4　散体材料桩鼓胀变形测试仪
Fig. 4　A diagram of the measuring technique of lateral bulging of stone column

设置如图 4 所示位于紧固件与位移传感器间柔性套管的目的除保护钢丝绳外,主要是将钢丝绳与软土及碎石隔开,减小牵引绳的滑动摩擦,因为若钢丝绳外露,被软土包裹,牵引绳的滑动受到很大的阻力,进而会约束碎石桩的鼓胀变形,甚至会造成在测试仪埋设的位置出现碎石桩"缩颈"现象.

此外,钢丝绳虽具有一定的柔性,但是由于片材的打孔是直的,钢丝绳串联片材使其紧贴碎石桩桩身时,会导致钢丝绳有弯折,钢丝绳与片材之间会产生较大摩擦阻力,为尽量减小钢丝绳与片材间的摩擦影响,采取了如下措施:1) 选用较细的钢丝绳(直径 1.5 mm);2) 片材的宽度不宜过大,经反复试验发现片材宽度选择在 10～12 mm 左右较为合适;3) 片材选用酚醛树脂材料(稳定性好,摩擦系数小),厚 5 mm,高 35 mm,中间穿孔的直径 2 mm.

为验证研制的散体材料桩鼓胀变形量测试仪的可行性及测试精度,采用 3 种不同测试方法对 4 根长 500 mm,桩径 200 mm 的碎石桩在不同竖向荷载下的鼓胀变形量进行量测,方法 1 的测试思路如图 5 所示,沿直径方向布置 3 个交叉 60°的量测装置,通过量测变形前后桩径的变化来反应桩体的鼓胀变形情况,量测装置埋设位置距桩顶 200 mm;方法 2 是试验完成后通过自行调配的水玻璃将桩身碎石料胶结,然后挖去周围土体直接量测变形后的桩身周长增量,图 6 为试验现场挖出的胶结碎石桩实物图,量测的位置距桩顶 225 mm. 方法 3 是采用自行研制的膨胀变形测试仪进行量测,测试仪埋置于距桩顶 250 mm 处. 各种方法测试结果如表 1 所示,其中方法 1 对应的平均周长增量为该方法 3 个直径增量换算成周长增量再取平均所得.

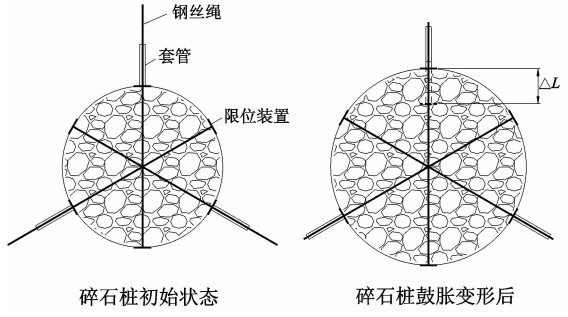

图 5　方法 1 的测试原理示意图
Fig. 5　Measuring illustrative diagram of technique 1

表 1　不同方法测试结果比较
Tab. 1　Comparison of measuring results from different methods　　mm

桩号	方法 1				方法 2	方法 3
	直径增量	直径增量	直径增量	平均周长增量	周长增量	周长增量
桩 1	18.2	15.0	18.1	53.7	50.2	46.8
桩 2	25.9	26.5	29.0	85.1	82.3	75.4
桩 3	28.1	34.2	31.9	98.6	94.1	86.4
桩 4	35.5	29.1	32.8	102.1	97.8	83.9

虽然 3 种方法碎石桩桩身的测量位置不相同,方法 1—3 测点距桩顶的距离分别为 200 mm,225

mm,250 mm,但各测点相对间隔较近,由表 1 可见,3 种方法结果较为接近. 方法 1 所得周长增量较方法 3 偏大,其原因除了由于鼓胀变形测试仪(方法 3)对桩体附加环向加筋作用,使鼓胀变形测试仪对应位置桩身鼓胀变形偏小外,主要是由各方法测试位置不同所引起,方法 1 测点距桩顶 200 mm,该深度处碎石桩可能发生最大鼓胀变形,该深度往下碎石桩鼓胀变形量随深度增加逐渐减小,故 3 种方法实测周长增量大小为:方法 1>方法 2>方法 3.

此外,方法 1 通过直接测试直径的变化反应碎石桩的鼓胀变形情况,3 个方向的测试结果有离散性(表 1),且 3 个方向的直径变化不能全面反应整个周长的变化;同时 3 个方向的测试装置埋设,对桩体也会起到附加的横向加筋作用. 方法 2 的主要不足同前石膏成型法:只能得到加载后碎石桩最终的鼓胀变形,无法反应鼓胀变形随荷载增加的发展变化过程. 经对比分析可见,本课题组研发的散体材料桩鼓胀变形测试仪是可行的,可在试验中推广应用.

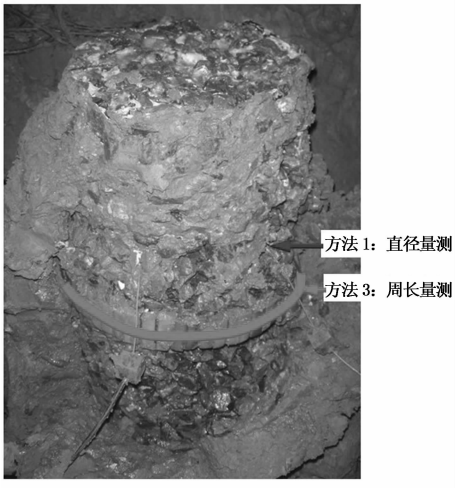

图 6 水玻璃胶结成型碎石桩实物图
Fig. 6 A map of stone column cemented by sodium silicate binder

3 模型试验中的应用

3.1 鼓胀变形测试仪的布置

将自行研发的散体材料桩鼓胀变形测试仪应用于路埋下碎石桩复合地基承载变形大比例室内模型试验中. 考虑到碎石桩可能发生的鼓胀变形在靠近桩顶一定深度范围内,因此本次试验中鼓胀变形测试仪主要埋置在距桩顶分别为 0.1 m,0.4 m 及 0.9 m 3 个深度处(图 7). 试验桩的平面及剖面图如图 8 所示,试验的设计与步骤另文叙述. 图 9 为试验操作过程中鼓胀变形测试仪的安装.

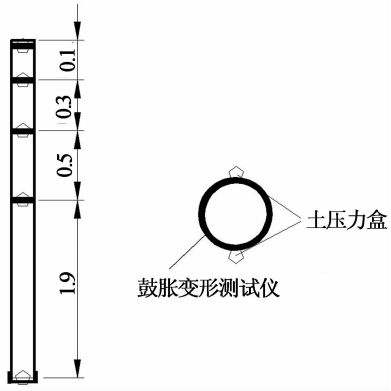

图 7 鼓胀变形测试仪及侧向土压力盒布置(单位:m)
Fig. 7 Arrangement of displacement measurements and soil pressure cells for lateral bulging and lateral soil pressure (unit: m)

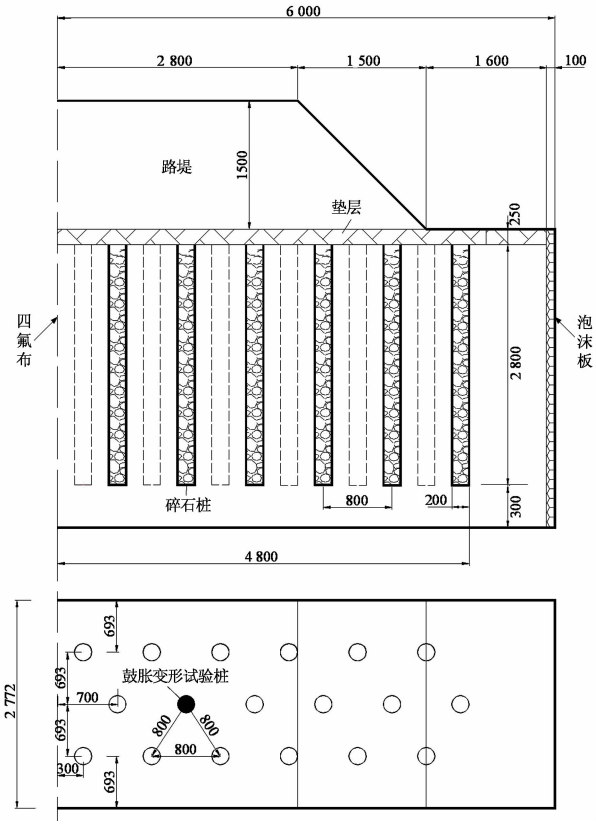

图 8 模型试验桩位布置图(单位:mm)
Fig. 8 Physical dimension of the laboratory experiment (unit: mm)

3.2 试验数据分析

图 10 为由鼓胀变形测试仪实测的土工格室+碎石桩双向增强复合地基试验中相应碎石桩(即图 8 中距路堤中线 1.5 m 处的第 2 排碎石桩)的鼓胀

变形随时间的变化情况. 图中各时间点对应的荷载与试验进程相关:2008 年 11 月 4 日开始填筑路堤,11 月 5 日上午路堤填土高度 0.8 m,下午填土高度 1.0 m;11 月 6 日路堤填土高度 1.2 m,下午填土 1.5 m;11 月 8 日在靠近路堤中线处施加钢梁荷载 27.7 kN;11 月 10 日在 1.5 m 高路堤表面距路堤中线 1.0 m 处施加 1.0 m 宽的 52 kN 砝码荷载;11 月 18 日卸掉砝码荷载.

由图 10 可见,随着作用于桩顶竖向荷载的逐渐增加,距桩顶 3 个深度(0.1 m,0.4 m,0.9 m)处的桩体鼓胀变形量也各自随荷载逐渐增加,且距桩顶 0.4 m 处的桩体鼓胀变形量较距桩顶 0.1 m 处或桩顶 0.9 m 处的鼓胀变形量要大,进一步证明了鼓胀变形是先随着深度的增加而增加,而后又随深度的增加而减小,即碎石桩最大鼓胀变形发生于距桩顶某一深度处.

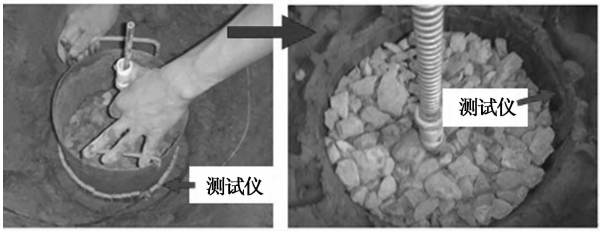

图 9　试验中散体材料桩鼓胀变形测试仪的安装
Fig. 9　Instruction of the bulging measurement in the experiment

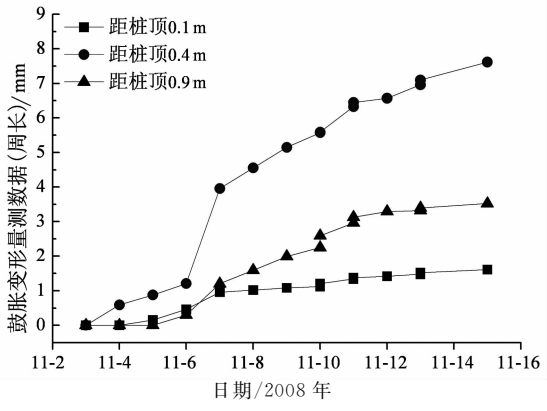

图 10　碎石桩鼓胀变形(周长)随时间的变化
Fig. 10　Variation of the lateral bulging (represented in perimeter) of stone column with time

为了更直观地反应碎石桩鼓胀变形随上部竖向荷载及其沿深度的发展规律,将鼓胀变形测试仪量测的桩身周长增量转化为径向位移数据,如图 11 所示. 由图 11 可见,本次试验中距桩顶 3 个深度(0.1 m,0.4 m,0.9 m)处,0.4 m 处的桩体径向鼓胀变形值最大,且随上部竖向荷载增加,各处的鼓胀变形也相应增加,但又以 0.4 m 处的鼓胀变形增加最快.

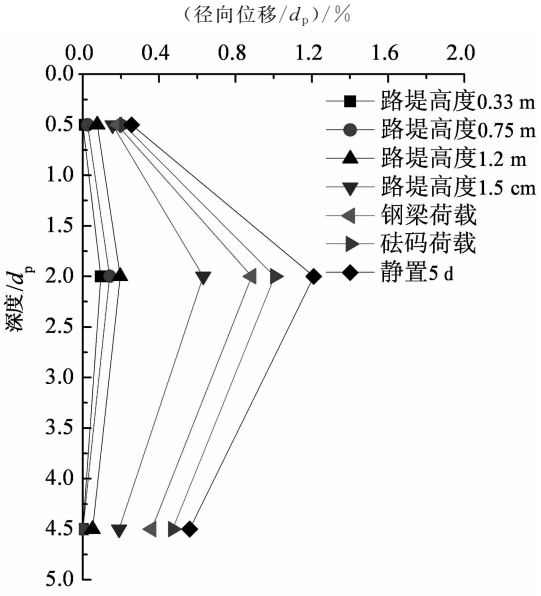

图 11　碎石桩鼓胀变形(直径)随荷载的变化
Fig. 11　Variation of the lateral bulging (represented in diameter) of stone column with vertical loads

4　结束语

1) 针对碎石桩等散体材料桩的受力变形特性,发明了散体材料桩鼓胀变形量测试系统装置,提出了相应的测试技术方法,并成功应用于室内模型试验. 该测试技术便于实际操作,可在散体材料桩大比例室内模型试验中推广应用.

2) 该测试技术通过量测受荷前后碎石桩桩身周长的变化以反应碎石桩的鼓胀变形情况,通过沿不同深度处埋设鼓胀变形测试仪,可直观反应出碎石桩桩身鼓胀变形随上部竖向荷载及其沿深度的发展规律:鼓胀变形随上部荷载的增加逐渐增加;同一荷载等级下鼓胀变形先随深度的增加而增加,后又随深度的增加而减小.

参考文献

[1]　张建立. 夯扩挤密碎石桩在沿海高速公路地基处理中的应用[J]. 公路交通技术,2007 (2):8－10.
ZHANG Jian-li. Application of ram-compaction gravel piles in foundation treatment for coastal expressways[J]. Technology of Highway and Transport,2007 (2):8－10. (In Chinese)

[2]　文松霖,任佳丽,姜志全,等. 碎石桩红黏土复合地基的实例分析[J]. 岩土工程学报,2010,32(增 2):302－305.

WEN Song-lin, REN Jia-li, JANG Zhi-quan, *et al*. Case analysis of red clay gravel pile composite foundation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(S2): 302－305. (In Chinese)

[3] 高彦斌，叶观宝，徐超，等. 一种新的碎石桩法处理液化粉土地基的设计方法[J]. 土木工程学报，2005，38(5)：77－81.
GAO Yan-bin, YE Guan-bao, XU Chao, *et al*. A new design method for gravel pile treatment in liquescent silt ground[J]. China Civil Engineering Journal, 2005, 38(5): 77－81. (In Chinese)

[4] 刘杰，赵明华. 碎石桩复合地基性状的弹塑性分析[J]. 岩土力学，2006，27(10)：1678－1684.
LIU Jie, ZHAO Ming-hua. Elastoplastic analysis of character for composite foundation with gravel columns[J]. Rock and Soil Mechanics, 2006, 27(10): 1678－1684. (In Chinese)

[5] 张玲，赵明华. 散体材料桩复合地基承载力计算[J]. 湖南大学学报：自然科学版，2007，34(6)：10－14.
ZHANG Ling, ZHAO Ming-hua. Study on bearing capacity calculation method of discrete material pile composite foundation[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2007, 34(6): 10－14. (In Chinese)

[6] 马崇武，慕青松，马君伟，等. 碎石桩单桩和多桩荷载传递方式的实验研究[J]. 岩石力学与工程学报，2008，27(增 1)：3116－3121.
MA Chong-wu, MU Qing-song, MA Jun-wei, *et al*. Testing research on load transfer modes of single and multiple gravel piles[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(S1): 3116－3121. (In Chinese)

[7] HUGHES J M O, WITHERS N J. Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns[J]. Ground Engineering, 1974, 7(3): 42－49.

[8] HU W. Physical modeling of group behavior of stone column foundations[D]. Scotland, UK: University of Glasgow, 1995: 42－50.

[9] WOOD D M, HU W, NASH D F T. Group effects in stone column foundations: model tests [J]. Geotechnique, 2000, 50(6): 689－698.

[10] AMBILY A P, GANDHI S R. Behavior of stone columns based on experimental and FEM analysis [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(4): 405－415.

[11] ALI K, SHAHU J T, SHARMA K G. Behaviour of reinforced stone columns in soft soils: an experimental study[C]//Indian Geotechnical Conference. Mumbai, India: Indian Institute of Technology Bombay, 2010: 625－628.

[12] SHAHU J T, REDDY Y R. Clayey soil reinforced with stone column group: model tests and analyses [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2011, 137(12): 1265－1274.

[13] DEB K, SAMADHIYA N K, NAMDEO J B. Laboratory model studies on unreinforced and geogrid-reinforced sand bed over stone column-improved soft clay[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2011, 29(2): 190－196.

[14] BLACK J A, SIVAKUMAR V, MADHAV M R, *et al*. Reinforced stone columns in weak deposits: laboratory model study [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2007, 133(9): 1154－1161.

[15] MCKELVEY D, SIVAKUMAR V, BELL A, *et al*. Modeling vibrated stone columns in soft clay[C]//Proceedings of the Institute of Civil Engineers-Geotechnical Engineering. 2004, 157(3): 137－149.

[16] 孟广训，沈定贤. 模型碎石桩应力的测定及其分析[J]. 水利水运工程学报，1987，6(2)：69－80.
MENG Guang-xun, SHEN Ding-xian. Stress measurement and analyses of stone column in model test[J]. Journal of Nanjing Hydraulic Reearch Institute, 1987, 6(2): 69－80. (In Chinese)