

# 振冲碎石桩加固软土地基试验研究\*

余震<sup>1</sup>, 张玉成<sup>1</sup>, 张玉平<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 土木建筑工程学院, 武汉 430072; 2. 北京师范大学 地理学与遥感科学学院, 北京 100875)

**摘要:**以某水库拦河大坝地基处理工程为背景,介绍了振冲碎石桩加固软土地基的现场试验,并对碎石桩处理后复合地基的加固效果进行了检测分析,包括碎石桩桩体和桩间土以及桩土应力比等项的检测。最后综合重型动力触探试验、标准贯入试验、载荷试验和土压力盒读数的检测结果得出:碎石桩对工程软土地基的处理能达到预期的加固效果,其复合地基承载力高于设计要求,抗液化能力明显提高,并且这种复合地基可以有效减小地基总沉降,加速地基的固结,具有良好的导水性;桩土应力比变化曲线上凸抛物线型,其值一般在1~4之间;碎石桩桩身附加应力随深度衰减很快,在接近桩底时,其附加应力几乎为零,所以在用碎石桩处理地基时应注意碎石桩的有效长度。该方法在随后进行的地基大面积加固中得到成功应用。

**关键词:**振冲碎石桩;软土地基;桩土应力比

**中图分类号:** TU472 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7329(2007)06-057-05

## Test Study on Vibro Replacement Stone Columns to Improve Soft Soil Foundation

YU Zhen<sup>1</sup>, ZHANG Yu-cheng<sup>2</sup>, ZHANG Yu-ping<sup>2</sup>

(1. School of Civil and Architectural Engineering, Wuhan University, Wuhan, 430072, P. R. China, 2. School of Geography and Remote Sensing Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, P. R. China)

**Abstract:** This paper presents the systematic experiment investigation for soft soil treatment by vibro replacement stone columns. The research is based on the foundation treatment of a dam. Then the consolidation effect of the composite foundation is inspected and analyzed. This includes pile shaft inspection, soil between piles and pile-soil stress ratio. The following conclusions are drawn according to the results of the dynamic penetration test, the standard penetration test, the plate load test and the value of the earth pressure cell: the consolidation effect can reach the expectant intention; the bearing capacity of the composite foundation exceeds the design requirement; and liquefaction resistance of the foundation is improved after vibrofloatation compaction. The composite foundation can significantly reduce the ground settlement, accelerate the consolidation rate, and effectively drain water from soft foundation. In addition, it is also indicated that the curve form of the pile-soil stress ratio is a top-protruding parabola with values of approximately 1~4. The additional piles stress markedly declines with depth and reduces to nearly zero at the bottom of the piles. The effective length of the piles therefore should be noticed in practice. The method is successfully applied to the large-scale practice of the dam.

**Keywords:** vibro replacement stone columns; soft soil foundation; pile-soil stress ratio

振冲碎石桩是地基处理的一种形式,它是利用一个产生水平向振动的管状设备在高压水流下边振边冲,在软弱地基上成孔,再在孔内分批填入碎石等坚硬

材料制成一根根桩体,桩体和原来的地基构成复合地基,这样的复合地基同原来地基相比,承载力提高了,也减少了地基的沉降量,并且这种粗大的桩体具有排

\* 收稿日期:2007-06-10

作者简介:余震(1970-),男,博士生,主要从事大型水工建筑得抗震与减震研究。

水和置换功能,能有效地消散地震等震动引起的超静孔隙水压力,有效减少砂土地基的液化现象<sup>[1,2]</sup>。文献[3,4]中作者认为对大坝地基进行加固的方法很多,但一般用振冲碎石桩加固不仅效果显著,而且比较经济,碎石桩的存在,不仅增强了地基承载力强度和对砂类土地基的抗液化能力,还有起到排水减压和加筋的作用,从长远角度看,用碎石桩加固坝基有广阔的应用价值。论文通过对某水库大坝坝基进行振冲碎石桩加固的现场试验,采用重型动力触探、标准贯入试验和静载荷试验等手段进行了检测;在桩土中埋置压力盒,用来分析桩土应力比在软土地基中的变化规律;通过沿桩身埋设土压力盒来研究碎石桩在荷载作用下沿桩身的应力分布规律等;同时对大量的试验结果进行综合和分析,探讨了振冲碎石桩加固软土地基的效果。

## 1 工程概况及工程地质条件

某水库拦河大坝为沥青混凝土心墙土石坝,整个河床台地段有较深的松软第四纪冲积层分布,最深达10 m,在冲洪积层内有中粗砂、细砂、粉砂、淤泥和淤泥质粘土,各层分布厚度不一,分布规律较差,抗剪强度低,压缩性大,地基承载力不能满足设计要求,并且在地震作用下大坝地基可能会发生液化,致使不能满足其稳定性要求。为确保水库大坝的安全,选择了施工简便、工期短、造价低的振冲碎石桩对大坝地基进行加固,在正式施工前,通过现场试验确定来实际施工参数,为复合地基的设计和优化提供可靠依据。

根据地质勘探报告,场地地质剖面图,场区土层自上而下为:

- 1)填筑土:黄红色、灰黄色为主,稍湿~湿,呈松散或松散状,0.6~2.8 m;
- 2)中细砂:灰色、灰蓝色,饱和,松散,含多量细粒土,0.3~1.6 m;
- 3)泥炭土:灰黑色、黑色,饱和,松软或呈流塑状,0.6~6.3 m;
- 4)粉质粘土:黄褐色,含少量粉细砂,湿,可塑状,厚度0.5~1.0 m;
- 5)淤泥质粘土:灰色夹黄褐色,湿,可塑一软塑状,厚度3.0~4.2 m;
- 6)中细砂:灰白色,中密,含有少量粘土,厚度1.0~1.6 m;
- 7)细砂:灰黑色,中密,含植物根系和少量粘土,厚度0.9~2.1 m;
- 8)~1414砂卵砾石:上部灰白色,下部灰黄色,由上到下粒径变粗,厚度0.5~2.1 m;
- 9)1515~1717第四系风化残积层:黄褐色、黄白色,

稍湿,可一硬塑状,为砂质粘性土,厚度0.5~6.7 m;

10)1818全风化花岗岩:黄白色、灰蓝色、黄绿色等,呈坚硬土状,岩芯易折断,厚度0.2~5.4 m;

11)1919强风化花岗岩:黄白色带肉红色、局部灰蓝色、黄绿色等,呈坚硬半岩状,厚度0.5~8.4 m;

12)2020弱风化花岗岩:黄白色、灰白色带斑点状黑色,粒状结构,块状构造。较硬岩,厚度0.4~4.6 m。

## 2 现场试验概况

### 2.1 试验桩参数及布置情况

现场试验桩位于坝基中轴线附近,试验分三个试验区,分别为A、B、C区,每个试验区施工25根试验桩,试验桩采用正三角形布置,平面布置图见图1。试验桩设计参数为:桩径为1 000 mm,A、B、C三个区的桩间距分别为1 600 mm、1 800 mm、2 000 mm,桩长深入全风化不少于1 m。选择三种桩间距主要是为了在后期大面积施工时节省工程投资,因为大坝坝基的应力分布是靠近坝趾处最大,坝脚根处最小,这样可以在不同的部位用不同间距的碎石桩来加固。振冲器功率为55 kW。

### 2.2 压板载荷试验概况

试验采用压重平台反力装置:压重平台由组合钢梁加砂包组成;加压部分由反力台、千斤顶、承压板组成;沉降观测仪表是与基准梁相连的百分表组成。

本次压板载荷试验中,在每个试验区单桩承载力试验、单桩复合地基承载力试验和桩间土地基承载力试验分别选3个试验检测点,各试验区检测点平面布置如图1。

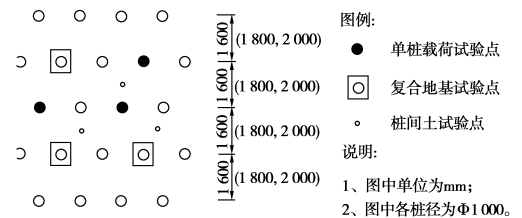


图1 碎石桩平面及检测点布置示意图

单桩承载力试验承压板采用 $\phi 1\ 000$  mm厚40 mm的圆形钢板。

单桩复合地基承载力试验承压板根据试验桩的桩间距采用相应方形钢板;桩间距1 600 mm采用1 600 mm $\times$ 1 600 mm(厚40 mm)方形钢板;桩间距1 800 mm采用1 800 mm $\times$ 1 800 mm(厚40 mm)方形钢板;桩间距2 000 mm采用2 000 mm $\times$ 2 000 mm(厚40 mm)方形钢板;其形心与桩芯对齐。

桩间土地基承载力试验承压板采用 $\phi 800$  mm厚40 mm的圆形钢板(定型产品,面积为0.5 m<sup>2</sup>)。压板尺寸、桩长及试验编号见表1。

表 1 压板尺寸、桩长及试验编号

试验区号	试验编号	压板尺寸/m	桩长/m
A	AP-1	$\phi=1.00$	8.00
A	AP-2	$\phi=1.00$	8.60
A	AP-3	$\phi=1.00$	7.50
A	AC-1	$1.6 \times 1.6$	8.80
A	AC-2	$1.6 \times 1.6$	7.20
A	AC-3	$1.6 \times 1.6$	7.20
A	AS-1	$\phi=0.80$	/
A	AS-2	$\phi=0.80$	/
A	AS-3	$\phi=0.80$	/
B	BP-1	$\phi=1.00$	8.70
B	BP-2	$\phi=1.00$	8.80
B	BP-3	$\phi=1.00$	6.50
B	BC-1	$1.8 \times 1.8$	8.90
B	BC-2	$1.8 \times 1.8$	8.90
B	BC-3	$1.8 \times 1.8$	9.20
B	BS-1	$\phi=0.80$	/
B	BS-2	$\phi=0.80$	/
B	BS-3	$\phi=0.80$	/
C	CP-1	$\phi=1.00$	8.00
C	CP-2	$\phi=1.00$	7.60
C	CP-3	$\phi=1.00$	7.50
C	CC-1	$2.0 \times 2.0$	8.20
C	CC-2	$2.0 \times 2.0$	7.20
C	CS-3	$\phi=0.80$	/

备注:AP-、BP-、CP-表示各区单桩压板荷载试验对应的编号;AC-、BC-、CC-表示各区单桩复合地基压板荷载试验对应的编号;AS-、BS-、CS-表示各区桩间土压板试验。

### 3 试验结果分析

#### 3.1 沉降量

本次压板荷载试验加载至预估的极限荷载,当出现现象之一时终止加载:1)沉降急剧增大,土被挤出或承压板周围出现明显的裂缝;2)承压板的累计沉降量大于其宽度或直径的 6%;3)当达不到极限荷载,而最大加载压力已大于设计要求压力值的 2 倍<sup>[5]</sup>。图 2~图 4 分别是单桩压板荷载试验、单桩复合地基压板荷载试验和桩间土压板试验的荷载 Q~位移 S 曲线,从图

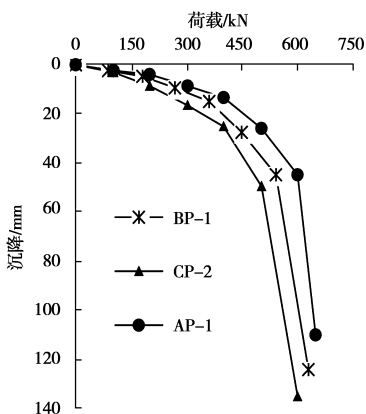


图 2 单桩荷载试验荷载 Q~沉降 S 曲线

可以发现:加固处理后的复合地基可以有效减小地基沉降,并对于直径相等碎石桩,在相同荷载作用下,沉降量随着桩间距的减小而减小;从图 3、4 可以看出经过碎石桩处理后,复合地基和桩间土的沉降量均明显小于天然地基

的沉降量。

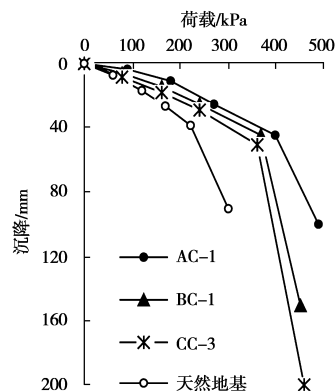


图 3 单桩复合地基荷载试验荷载 Q~沉降 S 曲线

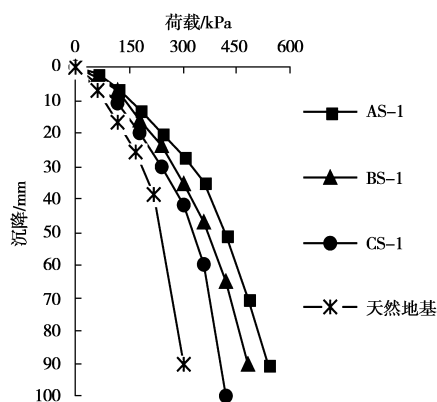


图 4 桩间土荷载 Q~沉降 S 曲线

#### 3.2 承载力

根据规范《建筑地基处理技术规范》(JGJ79-2002),当 Q-S 曲线上有明显的比例极限时,可取该比例极限所对应的荷载作为复合地基的承载力基本值。图 4 给出单桩复合地基 Q~S 曲线,由图可知,碎

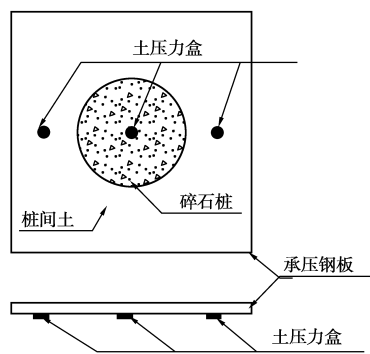


图 5 土压盒埋设示意图

石桩复合地基能较好地改善软土地基的承载特性,提高地基承载能力,并且桩间距越小承载力提高幅度越大。由荷载试验确定求得各区复合地基承载力平均值均大于设计值(300 kPa),碎石桩地基复合承载力标准值按照公式 1 计算<sup>[6]</sup>。

$$f_{sp} = m \cdot f_p + (1 - m)f_s \quad (1)$$

式中: $f_{sp}$ —复合地基承载力标准值; $f_p$ —桩体承载力标准值; $f_s$ —桩间土承载力标准值; $m$ —置换率。

#### 3.3 桩土应力比

为了进一步了解碎石桩复合地基桩土承载机理及桩土应力比的变化规律,深入研究碎石桩复合地基的

承载机理,现场试验中,在做 AC-1、BC-1、CC-3 单桩复合地基载荷试验时,分别在桩顶和两侧桩间土中共埋置了 9 个经过标定的钢弦式土压力盒,土压力盒埋设的平面图和立面图见图 5,图 6 是桩土应力比关系图,从图中可以看出:碎石桩桩土应力比不是一个常数,而是随荷载呈曲线变化,随着荷载的增大,桩土应力比先增大,后趋于平缓并略有减小,并且最大值出现在复合地基容许承载力值附近,其值一般在 1~4 之间;在相同荷载下,碎石桩间距越小,桩土应力比越小,桩间距为 1 600 mm(AC-1)的碎石桩的桩土应力比最小,1 800 mm(BC-1)的次子,2 000 mm(CC-3)的最大,但复合地基的总体承载力是桩距越小承载力越大。同时,相关文献<sup>[7]</sup>研究也表明,影响碎石桩桩土应力比的因素很多,包括:地基土的性、荷载水平和作用时间、桩长、桩数等,变化规律是:在一般情况下,地基土强度越高, $E_s$  越大,则桩土应力比越小;桩土应力比随外荷载的提高和作用时间的延长而逐渐增大,但当土中应力达到极限承载力时,桩土应力比值明显增大;碎石桩数越多,桩土应力比越小,但复合地基的总体承载力越高;桩体的密实度越高,桩土应力比越大;碎石桩桩距和桩长对桩土应力值影响不大。

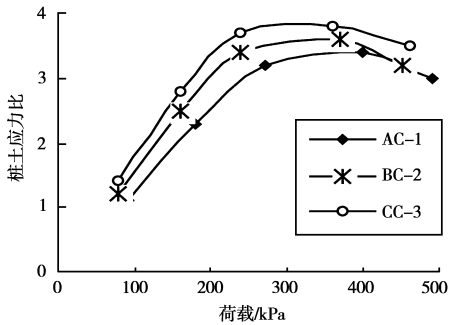


图 6 桩土应力比关系图

### 3.4 碎石桩桩身应力变化

为了研究复合地基中碎石桩体应力沿深度的分布规律,在碎石桩施工的过程中,在 AC-1 桩身的不同深度放置 5 个土压力盒,分别在桩身的 0 m、2 m、4 m、6 m 和 8 m 处。由于在施工中直接从振冲口把土压力盒子放入碎石桩中很难保证其不受损坏和受力面水平,所以采用如下方法放置,等试验的碎石桩施工好后,在碎石桩旁开挖 0.5 m 宽的竖曹,通过该竖曹把土压力盒子放入设计的位置,为了保证压力盒子和碎石桩间接触面均匀受力,应在土压力盒子周围用中粗砂找平,并用砂和小碎石将碎石桩上空隙(放土压力盒子时形成的)回填密实,竖曹用开挖出来的土混合粗砂来回填,砂土比例为 1:3。

在进行编号为 AC-1 单桩复合地基载荷试验时,记录下在各级荷载作用下各土压力盒的读数,并将同

一级荷载作用下的读数连成曲线,如图 7 所示,从曲线可知:桩体所受的附加应力随深度衰减很快,在 3 m~4 m 深处其附加应力不及桩顶的 30%,在接近桩底时,其附加应力几乎为零,这一规律和天然地基土载荷试验附加应力分布规律类似。

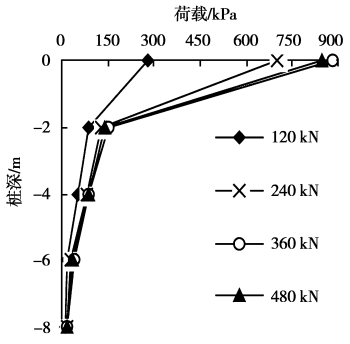


图 7 桩身受力曲线图

这说明试验时荷载对碎石桩的影响范围在一定长度范围内,所以在用碎石桩处理地基是应考虑碎石桩的有效长度,考虑其加固效果和经济性<sup>[8]</sup>。

### 3.5 动力触探和标贯试验分析

图 8 为碎石桩身的重型动力触探( $N_{63.5}$ )试验曲线图,从图中可看出,在被检测桩中,随着触探深度的增加,击实数明显升高,并在距地表 2.5 m 以下的部位,其锤击数已大于 15 击,这表明碎石桩桩身质量良好。

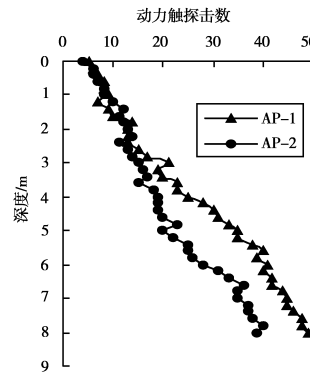


图 8 区碎石桩桩身动力触探曲线图

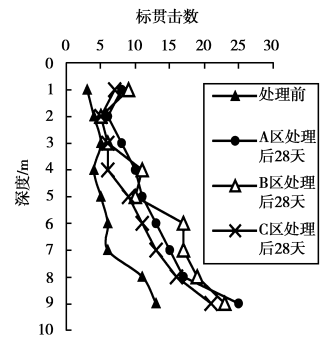


图 9 桩间土标贯试验曲线图

图 9 是各试验区碎石桩处理前后桩间土的标准贯入试验( $N_{63.5}$ )结果曲线,从图中可以看出,地基处理前后土性有了明显的改善,碎石桩对桩间土挤密效果明显,通过粉砂层标贯击数的提高可以知道地基的抗液化能力也提高了,达到了设计预期处理软基的目的。

### 3.6 地基加固后的抗液化分析

根据我国《建筑抗震设计规范》规定<sup>[9]</sup>:碎石桩处理后的桩间土标准贯入锤击数不易小于临界值  $N_{cr}$ ,计算公式见(2)式。该天然地基的地下水位深度为 3.5 m,抗震烈度为 7 度,经上式计算求得的液化判别标准贯入锤击数临界值如表 2 所示,该地基加固前在地下 4~6.5 m 处容易发生液化,但从表 2 可以看出用振冲碎石桩加固后地基不会发生液化,说明振冲碎石桩加固后的地基抗液化能力明显提高。

表2 标贯锤击数临界值与实测值对比表

深度/m	$N_{cr}$	加固前		A桩加固区		B桩加固区		C桩加固区	
		是否 /击数	是否 液化	平均击数	是否液化	平均击数	是否液化	平均击数	是否液化
1	/	3	否	7.6	否	9	否	7	否
2	/	4	否	7	否	6	否	6	否
3	/	5	否	8.5	否	7.1	否	7.7	否
4	5.5	4	是	10.6	否	11	否	10	否
5	5.9	5	是	11.4	否	10	否	9.8	否
6	6.4	6	是	18	否	17.3	否	14	否
7	6.8	6	是	15.2	否	17	否	14.2	否
8	8.2	11	否	17	否	18.8	否	16	否
9	9.4	13	否	25.7	否	23	否	21.5	否

$$N_{cr} = N_0 [0.9 + 0.1(d_s - d_w)] \sqrt{\frac{3}{\rho_c}} \quad (d_s \leq 15 \text{ m}) \quad (2)$$

式中: $N_{cr}$ ——液化判别处的标准贯入锤击数临界值; $N_0$ ——液化判别标准贯入锤击数基本值,在文献9中查得; $d_s$ ——饱和土标准贯入点深度(m); $d_w$ ——地下水位深度(m); $\rho_c$ ——粘土含量百分率,当小于3或为砂土时,均采用3。

#### 4 结论

根据对某水库坝基用振冲碎石桩加固的现场试验结果和随后进行的大面积加固实践可以得出下述结论:

1)结合天然地基的实际情况和工程性质,采用正确的振冲工艺和施工参数可以取得显著的加固效果,加固后复合地基的承载力和抗液化能力明显提高,并且可以有效减小地基总沉降,加速地基的固结;

2)不同桩间距的加固效果不同。如果桩径相同,桩间距越小,置换率越大,加固效果越显著;

3)碎石桩复合地基的桩土应力比变化曲线呈上凸抛物线型,随着荷载的增大,桩土应力比先增大,后趋于平缓并略有减小,并且最大值出现在复合地基容许承载力值附近,其值一般在1~4之间;载荷试验时碎石桩桩身附加应力随深度衰减很快,在接近桩底时,其附加应力几乎为零,这一规律和天然地基土载荷试验附加应力分布规律类似,说明试验时荷载对碎石桩的影响范围在一定长度范围内,所以在用碎石桩处理地基是应考虑碎石桩的有效桩长度及其加固效果和经济性;

4)需要指出:当前工程上大多仍沿用以前天然地基的液化判别标准,主要考虑了加密效应,没有考虑其他效应(如排水、置换、减震效应等)的综合作用及各效应的耦合作用<sup>[10]</sup>,判别结果往往不是很精确,应该研究更有效、更全面,并在工程上实用的判别方法。

#### 参考文献:

[1] 地基处理手册编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,2000.

Compiling committee of handbook of groundwork treatment. Handbook of groundwork treatment [M].

Beijing:China Architecture and Building Press, 2000.

- [2] 高加成,刘恒武.碎石桩—强夯联合法加固湖区填土地基[J].湖南科技大学学报(自然科学版),2005,20(1):49—51.  
GAO Jia-cheng, LIU Heng-wu. Reinforcing Soil Around Lake with Gravel Pile and Dynamic Compaction [J]. Journal of Hunan University of Science & Technology (Natural Science Edition), 2005, 20(1): 49—51.
- [3] 张艳美,张鸿儒,张旭东.碎石桩复合地基的研究进展与分析[J].工程地质学报,2005,13(1):1—7.  
ZHANG Yan-mei, Zhang Hong-ru, ZHANG Xu-dong. Advance in Researches of the Stone Column Composite Foundation and Its Analysis [J]. Journal of Engineering Geology, 2005, 13(1): 1—7.
- [4] 许明军,方磊,姜在田.碎石桩处理液化地基抗液化研究现状及存在问题[J].防灾减灾工程学报,2003,23(3):22—27.  
XU Ming-jun, FANG Lei, JIANG Zai-tian. Current State and Unsolved Problems in Researches of Liquefaction Resistance by Gravel Columns [J]. Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering, 2003, 23(3): 22—27.
- [5] JGJ79—2000.《建筑地基处理技术规范》[S].  
JGJ79—2000. Technical Code for Building Foundation [S].
- [6] 张凤文,周洪彬.强夯置换碎石桩复合地基承载力的试验研究[J].岩石力学与工程学报,2000,19(4):522—525.  
ZHANG Feng-wen, ZHOU Hong-bin. Testing Study on the Dynamically Formed Stone Column Compound Foundation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(4): 522—525.
- [7] 龚文惠.碎石桩复合地基中桩土应力比的试验研究[J].土工基础,2002,14(4):57—60.  
GONG Wen-hui. Testing Study on Pile-Soil Stress Ratio in Crushed-stone-pile Composite Foundation [J]. Soil Eng. and Foundation, 2002, 14(4): 57—60.
- [8] 邢皓枫,杨晓军,龚晓南.碎石桩复合地基试验及固结分析[J].煤田地质与勘探,2005,33(3):48—51.  
XING Hao-feng, YANG Xiao-jun, GONG Xiao-nan. Field Tests and Consolidation Analysis of Gravel Pile Composite Foundation [J]. Coal Geology & Exploration, 2005, 33(3): 48—51.
- [9] GBJ50011—2001.建筑抗震设计规范[S].  
GB50011—2001. Code for Seismic Design of Buildings [S].
- [10] 张艳美,张鸿儒,张旭东,等.碎石桩复合地基抗液化判别方法研究现状与分析[J].中国安全科学学报,2004,14(8):86—88.  
ZHANG Yan-mei, ZHANG Hong-ru, ZHANG Xu-dong etc.. Current Status and Analysis in Research of Anti-Liquefaction Judgment Method for Stone Column Composite Foundation [J]. China Safety Science Journal, 2004, 14(8): 86—88.