

文章编号: 0258-2724(2013)03-0435-07 DOI: 10.3969/j.issn.0258-2724.2013.03.007

碎石土强夯加固效果荷载试验分析

黄 达^{1,2}, 金华辉^{1,3}, 吴雄伟³

(1. 重庆大学土木工程学院, 重庆 400045; 2. 重庆大学教育部山地城市建设与新技术重点实验室, 重庆 400045; 3. 浙江省水利河口研究院, 浙江 杭州 310020)

摘 要: 为探讨碎石含量及其分布对强夯地基承载力和差异沉降的影响规律, 采用平板荷载试验, 对3种不同碎石含量强夯地基的加固效果进行了检测. 结果表明: 碎石土强夯地基具有较好的承载力, 平均承载力均超过250 kPa; 随碎石含量增加和分布不均匀性增强, 地基承载力的不均匀性增强, 差异沉降增大; 对于碎石含量较高且分布不均的强夯地基, 当荷载接近或达到地基承载力以后, 将出现更大的差异沉降; 对于重庆市开县某强夯地基, 不同碎石含量可导致强夯地基的差异沉降量相差3~4倍.

关键词: 强夯地基; 碎石土; 不均匀性; 载荷试验; 差异沉降

中图分类号: TU472 文献标志码: A

Plate Load Test Investigation of Dynamic Compaction Effect of Gravel Soil

HUANG Da^{1,2}, JIN Huahui^{1,3}, WU Xiongwei³

(1. College of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Key Laboratory of New Technology for Construction of Cities in Mountain Area (Chongqing University), Ministry of Education, Chongqing 400045, China; 3. Zhejiang Institute of Hydraulics and Estuary, Hangzhou 310020, China)

Abstract: In order to deeply probe into influences of gravel content and distribution on bearing capacity and differential settlement, 18 plate loading tests were carried out on 3 dynamic compaction foundations with different gravel contents. The research result shows that the dynamic compaction foundation of gravel soil has a better bearing capacity with a mean of above 250 kPa. The non-uniform bearing capacity and differential settlement of foundation are more obvious with the increase of gravel content and uneven distribution. For dynamic compaction foundation with a high gravel content and uneven distribution, great differential settlement occurs when load is close to or reaches at its bearing capacity. The differential settlement can be as large as 3 to 4 times because of the difference of gravel content of a dynamic compaction foundation in Kai County in Chongqing.

Key words: dynamic compaction foundation; gravel soil; non-uniformity; load test; differential settlement

由于强夯冲击压缩过程的复杂性、碎石土介质的不均匀性和不连续性, 目前对于山区碎石土强夯地基仍处在工程应用的经验积累阶段^[1-8]. 对于碎石土强夯地基的代表性研究成果大致可归纳为以

下三方面: 强夯冲击波传播特征及固结变形演化^[1]; 主要工程问题及存在的技术难点^[2]; 基于夯后检测的加固效果评价, 主要是密实度、承载力、波速及变形特征等的检测分析^[3-8].

收稿日期: 2012-08-30

基金项目: 教育部创新团队发展计划资助项目(IRT1045); 中央高校基本科研业务费重点项目(CDJZR12 20 55 01); 中国博士后科学基金特别资助项目(201003315)

作者简介: 黄达(1976-), 男, 副教授, 博士, 研究方向为岩土工程和工程地质, 电话: 023-65129587, E-mail: hdcqy@126.com

我国西南地区的众多山区城镇处于地质条件复杂、地形狭窄的河谷地带,很少有真正适宜于城镇建设的“开阔平地”,较多建设场地不得不采用大挖大填等方式. 回填碎石土强夯是山区工程及城镇建设常见的地基处理方式,多见于山沟、坡地建筑地基及交通路基. 由于碎石土回填材料一般为建设工程就近开挖的土石方,其物质组成、碎石含量及形态特征均不尽相同,故实例总结成果的应用具有较强的局限性^[9-13].

碎石土的介质特性对强夯加固效果有重要影响,如文献[14]通过瑞利波检测分析发现,碎石含量及大块石粒径对强夯加固深度影响明显. 现有研究大多均针对同一填料(主要强调工程特征和夯击能等的影响)^[1-13],而对碎石含量等内因对加固效果的影响规律的研究相对很少^[14].

减小地基承载力的不均匀性和差异沉降是建筑地基、交通路基等安全运行的重要基础问题和控制难点. 为此,我们通过荷载试验,研究了碎石含量对地基承载力、变形模量以及差异沉降的影响规律.

1 填土特征及载荷试验

1.1 填土含石量估计及强夯施工

重庆市开县某移民安置点强夯地基回填料为场地爆破开挖的碎石土,场地施工新填碎石土厚约5~7 m,其下方为厚约5~7 m的碾压填土(已自然固结3年,承载力约180~220 kPa). 新填碎石土主要由砂质泥岩、砂岩碎石及粉质黏土等组成,其中碎石粒径大多介于0.2~0.7 m之间,呈强—中等风化.

采用2次点夯和2次满夯的强夯施工工序进行加固. 前2遍采用点夯(夯击能为3 000 kN·m),夯点梅花形布置,间距6.0 m. 然后,低能量级满夯2遍至地基平整. 强夯施工参数见表1.

根据试验段土体级配特征,约定碎石含量为粒径不小于1 cm的碎石所占填土的三维体积或二维

面积百分比. 碎石含量通过钻探取土和现场探槽断面统计估算确定.

具体估算方法:

(1) 通过钻探估算碎石含量与岩体质量指标RQD的计算类似. 通过钻孔取土,统计土样的碎石岩芯长度,碎石含量即为累积岩芯长度与钻孔深度的比值. 钻探估算误差可控制在5%~8%.

(2) 探槽断面统计采用现场布置精测网(网格间距为10 cm)定位,通过现场精细素描和照片(正面拍照)图像处理,可较好地估算探槽断面碎石所占面积,碎石覆盖面积与统计断面面积之比即为碎石含量. 探槽断面统计精度较高,误差可控制在2%~4%.

选取3个典型的碎石含量及其分布的场地A、B、C,进行夯后地基平板荷载试验研究:

试验段A:碎石含量约40%,分布较均匀,块石粒径相对较小(粒径普遍约5~30 cm).

试验段B:碎石含量约50%,分布较不均匀,存在少量较大粒径的块石(粒径普遍约10~40 cm).

试验段C:碎石含量约73%,分布不均匀,存在较多不均匀分布的较大粒径块石(粒径普遍约10~50 cm).

1.2 试验情况

平板荷载试验(简称PLT)是一种较为直观、可靠的原位土工试验,其主要目的是评价地基承载力和变形特征^[14-15].

强夯施工完成约14 d后进行荷载试验,每个试验段6个试验点,共18个试验点. 为使试验点反映整个场地的地基特性,以场地为中心沿十字交叉线随机布置试验点,间距超过8 m(约为强夯加固深度)^[14].

试验时,人工刨开表层约0.5 m的扰动松弛填土(为减小表层松弛填土刨开施工对下方试验土体的扰动,先用盘刀切割设备在试验点周边切割出约1.5 m×1.5 m的方形坑(深约0.4 m),然后人工刨空方形坑,最后用薄刀人工剃除厚约10 cm的上层),平整场地后铺设不大于2 cm厚的粗、中砂垫层找平,再平放承压板进行试验.

采用液压千斤顶加载,夯机提供反力,圆形刚性承压板直径为0.8 m.

试验加载过程按照JGJ79—2002《建筑地基处理技术规范》^[15]相关规程执行. 图1为现场荷载试验情况.

表1 强夯施工参数

Tab. 1 Construction parameters of dynamic compaction

遍次	夯击能/ (kN·m)	击数	点(行) 距/m	布点方式
1	3 000	12	6×6	梅花形(点夯)
2	3 000	12	6×6	梅花形(点夯)
3	1 500	3	相切	满夯
4	1 000	2	1/3 搭接	满夯

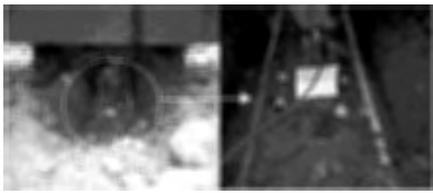


图1 现场荷载试验
Fig.1 Photo of field loading test

2 试验结果分析

2.1 $p-s$ 曲线特征

图2为强夯地基荷载试验的荷载-沉降量($p-s$)曲线。

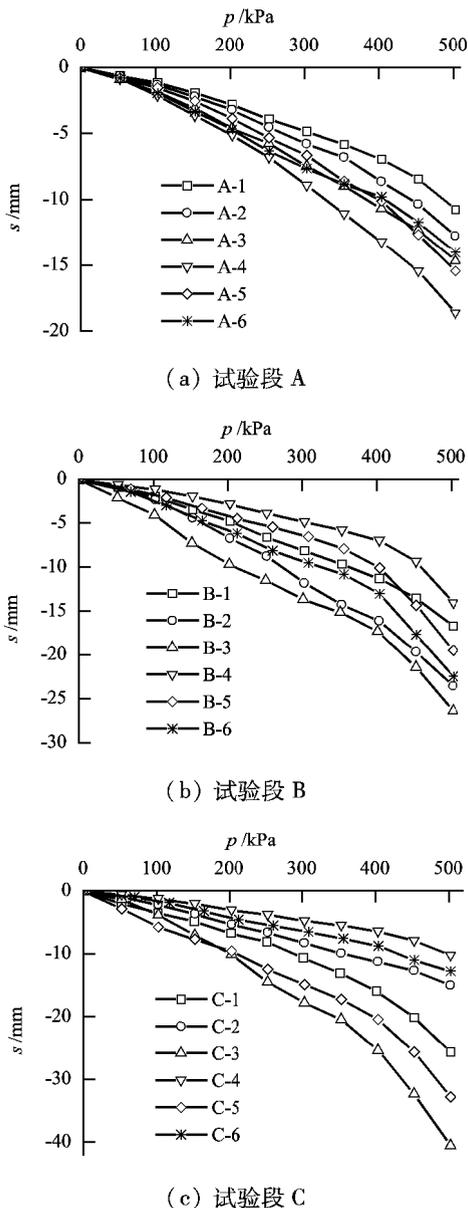


图2 试验段地基荷载试验的 $p-s$ 曲线
Fig.2 The $p-s$ curves of dynamic compaction foundations based on plate loading test

图2中,A-k($k=1,2,\dots,6$)表示试验段A第k个试验点,其余类似。由图2可知:

(1) 在最大荷载约500 kPa范围内,碎石土强夯地基的 $p-s$ 曲线多呈近以线型或缓降型。其中,试验段A的 $p-s$ 曲线基本呈近似线型,没有出现明显的塑性变形和破坏陡降段(图2(a));试验段B的 $p-s$ 曲线基本为缓降型,且大多曲线存在塑性变形段但没有破坏陡降段(图2(b));试验段C的 $p-s$ 曲线的形态差异明显,既有近直线型(曲线C-2、C-4、C-6),也存在较强塑性变形甚至破坏陡降段的曲线(曲线C-1、C-3、C-5,图2(c))。

(2) 总体来说,试验荷载范围内地基沉降量不大。试验段A最大沉降量小于20 mm,平均约14.38 mm;试验段B最大沉降量小于30 mm,平均约20.42 mm;试验段C最大沉降量小于45 mm,平均约22.83 mm。

(3) 随荷载增大,同一试验段不同试验点的沉降量差别增大;随碎石含量增大及其分布不均性增强,在相同荷载作用下,同一试验段沉降量差别增大。

通过分析 $p-s$ 曲线特征可以初步判定:碎石土强夯地基具有较高的承载力和较小的沉降变形;但当碎石含量较高且分布不均匀时,特别是如果存在较多、较大粒径的块石时,地基将会出现较强的差异沉降。

2.2 承载力不均匀性

基于荷载试验,地基变形模量的计算公式为

$$E_0 = I_0(1 - \mu^2) \frac{dp}{s} \tag{1}$$

式中: E_0 为地基土的变形模量,MPa; I_0 为刚性承压板形状系数,圆形板取0.79; p 为承压板底的荷载,kPa; s 为荷载 p 作用下的沉降量,mm; d 为承压板直径,m; μ 为泊松比,取0.27。

确定各试验点的地基承载力 f_{ak} 及其对应的沉降量 s_0 、变形模量 E_0 见表2^[15]。

采用样本标准差 σ 衡量试验结果的离散程度,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (r_j - \bar{r})^2}{n - 1}} \tag{2}$$

式中: r_j 为样本变量; \bar{r} 为样本集变量均值; n 为样本量。

表3为地基承载力、对应的沉降量、变形模量的平均值及标准差。由表2和表3可知:

(1) 试验段 A: 地基承载力 $f_{ak} = 300 \sim 400$ kPa, 平均 325 kPa, 标准差为 18.71 kPa. f_{ak} 加载时, 变形模量 $E_0 = 19.71 \sim 33.72$ MPa, 平均 26.09 MPa, 标准差为 2.30 MPa; 地基沉降量 $s_0 = 6.65 \sim 8.92$ mm, 平均 7.41 mm, 标准差为 0.38 mm.

(2) 试验段 B: 地基承载力 $f_{ak} = 150 \sim 350$ kPa, 平均 275 kPa, 标准差为 33.91 kPa; f_{ak} 加载时, $E_0 = 12.11 \sim 35.24$ MPa, 平均 21.72 MPa, 标准差为 3.69 MPa; $s_0 = 5.82 \sim 9.64$ mm, 平均 7.69 mm, 标准差为 0.64 mm.

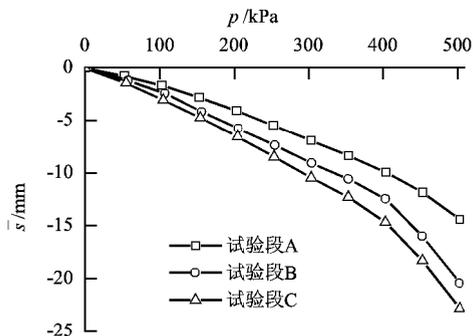
(3) 试验段 C: 地基承载力 $f_{ak} = 150 \sim 400$ kPa, 平均 283 kPa, 标准差为 43.97 kPa; f_{ak} 加载时, $E_0 = 12.45 \sim 36.68$ MPa, 平均 21.42 MPa, 标准差为 4.20 MPa; $s_0 = 6.39 \sim 9.91$ mm, 平均 8.10 mm, 标准差为 0.62 mm.

(4) 随着碎石含量的增大和分布不匀性的加强, 地基承载力标准差越大, 对应的变形模量及沉

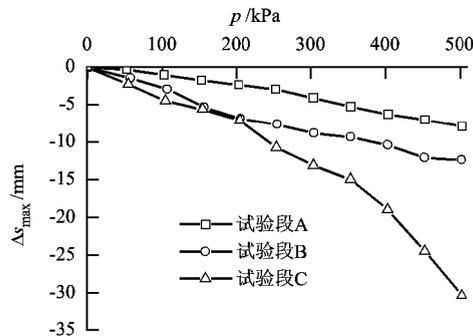
降量标准差也增大. 碎石含量约 40% 的试验段 A, 不但具有较好的承载力而且标准差小, 差异沉降也较小.

2.3 差异沉降量

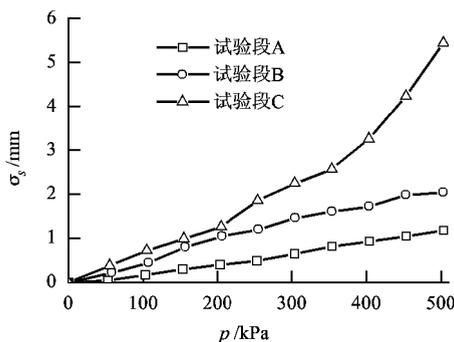
较大的差异沉降对建筑地基和路基等工程结构稳定性有很大影响, 甚至导致结构破坏而无法运行. 由于试验过程中荷载每增加 50 kPa 读一次沉降量, 故以各试验段加载过程中的沉降数据为样本集, 可以得到加载过程中平均沉降量 \bar{s} 、最大差异沉降量 Δs_{max} 和沉降量标准差 σ_s , 见图 3. 可见:



(a) 平均沉降量



(b) 最大差异沉降量



(c) 沉降量标准差

图 3 加载过程中沉降参数变化
Fig. 3 Variation of settlement parameters in loading process

表 2 地基承载力及其对应的沉降量和变形模量

Tab.2 Bearing capacity of foundation, corresponding settlement and deformation modulus

参数	试验段 A					
	A-1	A-2	A-3	A-4	A-5	A-6
f_{ak}/kPa	400	350	300	300	300	300
E_0/MPa	33.72	30.20	23.50	19.71	26.43	22.98
s_0/mm	6.95	6.79	7.48	8.92	6.65	7.65
参数	试验段 B					
	B-1	B-2	B-3	B-4	B-5	B-6
f_{ak}/kPa	350	250	150	350	300	250
E_0/MPa	21.27	16.76	12.11	35.24	26.92	18.04
s_0/mm	9.64	8.74	7.26	5.82	6.53	8.12
参数	试验段 C					
	C-1	C-2	C-3	C-4	C-5	C-6
f_{ak}/kPa	250	350	150	400	200	350
E_0/MPa	18.08	20.69	12.45	36.68	12.26	27.05
s_0/mm	8.10	9.91	7.06	6.39	9.56	7.58

表 3 地基承载力、变形模量的平均值及标准差

Tab.3 Average values and standard deviations of bearing capacity and deformation modulus of foundation

参数	试验段 A		试验段 B		试验段 C	
	平均值	标准差	平均值	标准差	平均值	标准差
f_{ak}/kPa	325	18.71	275	33.91	283	43.97
E_0/MPa	26.09	2.30	21.72	3.69	21.20	4.20
s_0/mm	7.41	0.38	7.69	0.64	8.10	0.62

(1) 任一荷载作用下, 平均沉降量、最大差异沉降量和沉降量标准差均随碎石含量的增加而

增大。

(2) 平均沉降量、最大差异沉降量和沉降量标准差均随荷载的增大而增大,且平均沉降量的差值也略有增大。

(3) 最大差异沉降量和沉降量标准差随荷载增大的变化规律相似,其中,试验段 A 和 B 的变化趋势基本一致。但在碎石含量约 73% 的试验段 C,当荷载接近或达到地基承载力以后,最大差异沉降量和沉降量标准差均随荷载的增大而明显增大。

(4) 在地基承载力 f_{ak} 为 150 ~ 400 kPa 的范围内,沉降参数分别为:① 平均沉降量:试验段 A 为 2.79 ~ 9.90 mm,试验段 B 为 4.18 ~ 12.46 mm,试验段 C 为 4.74 ~ 14.66 mm;② 最大差异沉降量:试验段 A 为 1.72 ~ 6.27 mm,试验段 B 为 5.34 ~ 10.37 mm,试验段 C 为 5.60 ~ 18.98 mm;③ 沉降量标准差:试验段 A 为 0.30 ~ 0.94 mm,试验段 B 为 0.81 ~ 1.73 mm,试验段 C 为 0.99 ~ 3.26 mm。

通过分析差异沉降表明:碎石含量及其分布对强夯地基差异沉降的影响较大。当不均匀分布的碎石含量增大到一定程度后,地基的差异沉降将会较显著,且作用荷载越大,差异沉降量越大。山区工程及城镇建设中大量的回填材料普遍为就近挖方的土石方,很难进行筛分级配,故去除回填土体中较大的块石及尽可能减少碎石含量,这对减小地基差异沉降尤为重要。

2.4 沉降参数比

为了更为深入地分析不均匀分布的碎石含量对差异沉降的影响程度,将各级荷载下差异沉降量最小的试验段 A 的沉降参数作为比较基数,定义差异沉降参数比

$$R_{B/A}(i) = s_B(i) / s_A(i), \quad (3)$$

$$R_{C/A}(i) = s_C(i) / s_A(i), \quad (4)$$

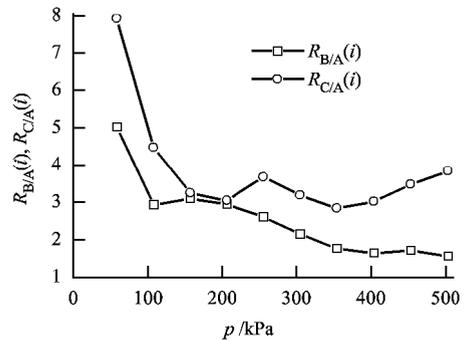
式中: i 为荷载级数; $R_{B/A}(i)$ 为在 i 级荷载作用下,试验段 B 与试验段 A 沉降参数(最大差异沉降量、沉降量标准差)之比; $s_B(i)$ 为 i 级荷载作用下试验段 B 的最大差异沉降量或沉降量标准差。

加载过程中最大差异沉降量和沉降量标准差比值曲线见图 4。可见:

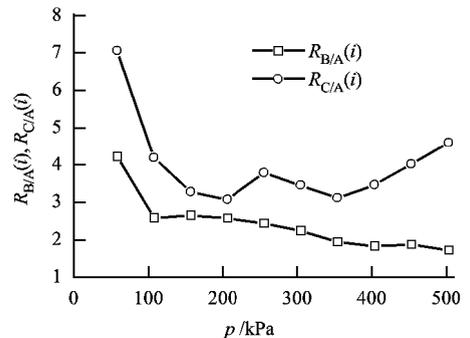
(1) 相对于试验段 A,试验段 B 和 C 均在第 1 级荷载(50 kPa)作用时最大差异沉降量和沉降量标准差比值最大,至第 2 级荷载(100 kPa)后逐渐趋于基本稳定。第 3 级荷载(150 kPa)后,试验段 C 沉降参数比值随加载过程呈现波动增大,而试验段 B 随加载呈现略微减小的趋势。

(2) 在承载力 150 ~ 400 kPa 的范围内,相对于试验段 A,试验段 B 和 C 的沉降参数比值为:最大差异沉降量比值,试验段 B 为 1.65 ~ 3.10,试验段 C 为 2.85 ~ 3.68;沉降量标准差比值,试验段 B 为 1.84 ~ 2.66,试验段 C 为 3.08 ~ 3.79。

基于沉降参数比值的对比分析表明:随碎石含量增加,差异沉降量及其离散程度(标准差)均明显增大,碎石含量约 73% 的试验段 C 甚至比碎石含量 40% 的试验段 A 的差异沉降量约高 3 ~ 4 倍。



(a) 最大差异沉降量比



(b) 沉降量标准差比

图 4 加载过程中差异沉降参数比的变化
Fig. 4 Variation of differential settlement ratio in loading process

3 结 论

根据对碎石土强夯加固的平板荷载试验,可以得到以下结论:

(1) 碎石土强夯地基具有较好的承载力。但随着碎石含量的增加及其分布不均匀性的增强,地基承载力和变形模量的不均性明显增强。

(2) 碎石含量越高,分布越不均匀,强夯地基的差异沉降量越大,且其分布的离散程度(标准差)也越大。

(3) 碎石土强夯地基的差异沉降量及沉降量标准差均随荷载的增大而增大。且当荷载接近或达

到地基承载力以后,较高碎石含量的强夯地基将出现更大的差异沉降。

(4) 碎石土强夯地基施工时,应尽量去除回填土中的较大块石和尽可能减少碎石含量,以减小地基的不均匀沉降。

参考文献:

- [1] 丁振洲,陆新,郑颖人. 山区地基强夯加固机理探讨[C]//中国土木工程学会第九届土力学及岩土工程学术会议论文集. 北京:清华大学出版社,2003: 802-806.
- [2] 甘厚义,周虎鑫,林本奎,等. 关于山区高填工程地基处理问题[J]. 建筑科学,1998,14(6): 16-22.
GAN Houyi, ZHOU Huxin, LIN Benxin, et al. Research into the treatment of high filled up ground with large stones in mountain areas[J]. Building Science, 1998, 14(6): 16-22.
- [3] 周德泉,张可能,刘宏利,等. 强夯加固填土的效果与机理分析[J]. 中南大学学报:自然科学版,2004, 35(2): 321-326.
ZHOU Dequan, ZHANG Keneng, LIU Hongli, et al. Analyses on the results and mechanism of dynamic compactness to fill foundation[J]. Journal of Central South University of Technology, 2004, 35(2): 321-326.
- [4] 谢春庆. 山区机场高填方块碎石夯实地基性状及变形研究[D]. 成都:成都理工大学环境与土木工程学院,2001.
- [5] 谢春庆,刘汉超,甘厚义. 高填方块碎石夯实地基变形的研究[J]. 岩土工程学报,2002,24(1): 38-41.
XIE Chunqing, LIU hanchao, GAN Houyi. Study on deformation of ground under high fill of block and detritus[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(1): 38-41.
- [6] 赵焯恒,李亮,何长明,等. 土石混填路堤强夯加固范围研究[J]. 中国公路学报,2008,21(1): 13-19.
ZHAO Lianheng, LI Liang, HE Changming, et al. Study of reinforcement range of dynamic compaction in soil-stone material embankment[J]. China Journal of Highway and Transport, 2008, 21(1): 13-19.
- [7] 罗恒,邹金锋,李亮,等. 红砂岩碎石土高填方路基强夯加固时的动应力扩散及土体变形试验研究[J]. 岩石力学与工程学报,2007,26(增刊1): 2701-2706.
LUO Heng, ZOU Jinfeng, LI Liang, et al. Test study on soil dynamic stress diffusion and deformation during dynamic compaction in roadbed primed with large granule red sandstone[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(Sup. 1): 2701-2706.
- [8] 何兆益,周虎鑫,张弛. 山区机场高填方土石混填强夯参数的现场试验研究[J]. 公路交通科技,2002, 19(4): 30-32.
HE Zhaoyi, ZHOU Huxin, ZHANG Chi. Soil-stone filling high embankment impact compaction parameter field test study for mountain area airport[J]. Journal of Highway and Transportation Research and Development, 2002, 19(4): 30-32.
- [9] 水伟厚,王铁宏,王亚凌,等. 碎块石回填地基上10 000 kN·m高能级强夯标准贯入试验[J]. 岩土工程学报,2006,28(10): 1309-1312.
SHUI Weihou, WANG Tiehong, WANG Yaling, et al. SPT for dynamic compaction with 10 000 kN·m high energy on foundation backfilled with crushed stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2006, 28(10): 1309-1312.
- [10] 王铁宏,水伟厚,王亚凌,等. 10 000 kN·m高能级强夯时的地面变形与孔压试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(7): 1090-1093.
WANG Tiehong, SHUI Weihou, WANG Yaling, et al. Experimental research on the ground deformation and porewater pressure during 10 000 kN·m high energy level dynamic compaction[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2005, 27(7): 1090-1093.
- [11] 高广运,水伟厚,王亚凌,等. 高能级强夯在大型石化工程中的应用[J]. 岩土力学,2004,25(8): 1275-1278.
GAO Guangyun, SHUI Weihou, WANG Yaling, et al. Application of high energy level dynamic compaction to high-capacity oil tank foundation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(8): 1275-1278.
- [12] 水伟厚,王铁宏,王亚凌. 高能级强夯地基土载荷试验研究[J]. 岩土工程学报,2007,29(7): 1090-1093.
SHUI Weihou, WANG Tiehong, WANG Yaling. PLT for high energy dynamic compaction of foundation backfilled with crushed stone[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 1090-1093.
- [13] 年廷凯,水伟厚,李鸿江,等. 沿海碎块石回填地基上高能级强夯系列试验对比研究[J]. 岩土工程学报,2010,23(7): 1029-1034.
NIAN Tingkai, SHUI Weihou, LI Hongjiang, et al. Field tests of high energy dynamic compaction on foundation backfilled by crushed stone in coastal area[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 23(7): 1029-1034.