



# 超长沉管碎石桩复合地基 在鱼山大桥接线成陆工程中的应用

李守龙<sup>1</sup>, 邹桐<sup>1</sup>, 项存平<sup>2</sup>

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032;  
2. 舟山绿色石化基地管理委员会, 浙江 舟山 316000)

**摘要:**以鱼山大桥接线成陆工程为依托,根据基础设计资料确定采用沉管碎石桩复合地基加固永久堤。采用 Slide 及理正计算软件对堤身稳定及沉降进行分析,提出相应的检测要求。将试桩检测数据与理论计算进行复核,提供类似沉管碎石桩复合地基设计时有关参数的建议取值。

**关键词:**碎石桩;稳定、沉降计算;试桩;动力触探试验

中图分类号: T 473; U 65

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2021)05-0035-06

## Application of super-long sunken tube and gravel columns composite foundation in the Yushan Bridge connection area

LI Shou-long<sup>1</sup>, ZOU Tong<sup>1</sup>, XIANG Cun-ping<sup>2</sup>

(1. CCCC Third Flight Engineering Survey and Design Institute Co., Ltd., Shanghai 200032, China;  
2. Zhoushan Green Petrochemical Base Management Committee, Zhoushan 316000, China)

**Abstract:** Relying on the Yushan Bridge connection area project, it is determined that the permanent embankment shall be reinforced with the sunken tube and gravel columns composite foundation based on basic design information. The Slide and Lizeheng software are used for the analysis of the stability and settlement of the dike, thus the corresponding inspection requirements are proposed. The test tube inspection data and theoretical calculations are rechecked, and the recommended values of related parameters in the design of foundations similar to sunken tube and gravel columns composite foundation are provided.

**Keywords:** sunken tube and gravel columns; stability calculation and settlement calculation; gravel columns test; dynamic penetration test

振动沉管碎石桩是近 30 年发展推广很快的一种地基处理方法,以往主要用于处理松散砂土、粉土、黏性土及素填土等地基。它的基本原理是:碎石桩的成桩过程是对周围砂土、粉土层的击密、振密过程,靠碎石的压入进行地基加固,增加砂土及粉土层的密实性<sup>[1-3]</sup>。

随着港口工程的大力发展,振动沉管碎石桩工艺在港口工程围堤、堆场地基中的应用普遍起来。沿海区域一般表层为一定厚度的淤泥土或淤

泥质软土层等,具有含水量高、透水性差、压缩性大等特点,在这些土层中,碎石桩很难发挥挤密作用,其与桩间土形成共同起作用的复合地基。碎石桩在复合地基中起到两个作用:1)置换作用。由密实的碎石桩体取代了与桩体体积相同的软弱土,提高了地基的整体稳定性和抗破坏的能力。2)排水作用。碎石桩为软黏土固结提供排水通道,加快固结速率。复合地基在附加荷载作用下抗剪强度增加,提高土层地基承载力和抗滑能力<sup>[4-6]</sup>。

收稿日期: 2020-12-01

作者简介: 李守龙(1977—),男,硕士,高级工程师,从事岩土与结构设计工作。

碎石桩陆上施工工况简单，质量可控，而海上施工存在诸多不确定性，如水流影响、定位偏差、潮涨潮落、不可见施工等，使得海上碎石桩的施工及质量控制难度加大，尤其是水深大、水流速度快的海上区域<sup>[7]</sup>。为分析沉管碎石桩在海上深水及深厚软土区的适用性及地基处理效果，结合鱼山大桥接线成陆工程，通过分析设计参数符合性、控制施工过程及检测工后效果评价地基处理效果。

1 工程概况

工程位于舟山市岱山县大小鱼山东侧，由3条堤组成，为鱼山大桥登陆后的主要通道，靠近登

陆点区域泥面高程约-7.0 m、水深约 7.5 m，此范围建设永久堤。拟建围堤为 I 级围堤，防护标准采用 200 a 一遇水位及 100 a 一遇波浪，其对应最大波浪要素为  $H_{1\%} = 6.14$  m ( NE 向 )、 $H_{5\%} = 5.27$  m ( NE 向 )。堤顶高程 8.0 m，堤身填筑高度约 15 m。

该区域海底地势变化不大，主要为第四纪沉积土，土层由上至下主要为灰黄-灰色淤泥、灰色淤泥质粉质黏土、灰绿色粉砂、灰色粉质黏土、灰色砂质粉土、灰绿色粉砂、灰色粉质黏土等，土层主要物理力学性质见表 1。主要软土层为灰黄-灰色淤泥、灰色淤泥质粉质黏土，总厚度约 36.5 m。

表 1 主要土层物理力学性质指标

岩土名称	天然含水率/%	天然密度/( $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ )	孔隙比	压缩模量/ MPa	压缩系数/ $\text{MPa}^{-1}$	液性指数/ %	固快 $C/\text{kPa}$	固快 $\varphi/(^{\circ})$
灰色淤泥质粉质黏土	45.0	1.73	1.250	2.6	0.87	1.49	11.4	16.2
灰色粉质黏土	35.5	1.77	1.030	3.4	0.59	0.91	14.4	17.3
灰色砂质粉土	28.6	1.84	0.807	7.5	0.24	—	8.8	29.5
灰绿-灰黄色粉质黏土	27.2	1.92	0.775	7.4	0.24	0.40	36.3	19.1

对灰色淤泥质粉质黏土进行了原位十字板剪切试验，其抗剪强度  $C_u$  与试验深度  $H$  关系见图 1，回归表达式为： $C_u = 1.629\ 1H + 7.381\ 5$ ，相关系数  $R = 0.91$ 。结合附近区域以往工程经验，其最大值  $C_{u\max} \leq 40\text{ kPa}$ 。

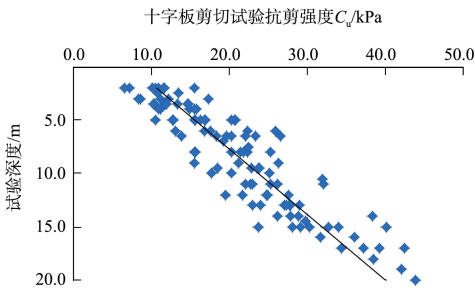


图 1 灰色淤泥质粉质黏土  $C_u$ - $H$  关系曲线

2 设计方案及验算

2.1 设计方案

堤身采用抛填堤心石结构，外坡护面采用 10 t 扭王字块体及 600~800 kg 抛石棱体；内坡为临时护面，采用 300~500 kg 抛理块石。堤顶挡浪墙设计高程为 9.5 m。

堤心处采用水上振动沉管碎石桩进行地基处理，桩径 1 000 mm、桩间距 2 300 mm，正方形布置，置换率 15%，桩底原则打穿灰色淤泥质粉质黏土层，平均桩底高程-45.0~-43.0 m，桩长 37.2~39.6 m，总根数 12 331 根；内外侧放坡反压平台范围采用水上打设 C 型塑料排水板，间距 1.1 m，正方形布置，控制底高程-34.0 m，板长约 29 m。典型断面见图 2。

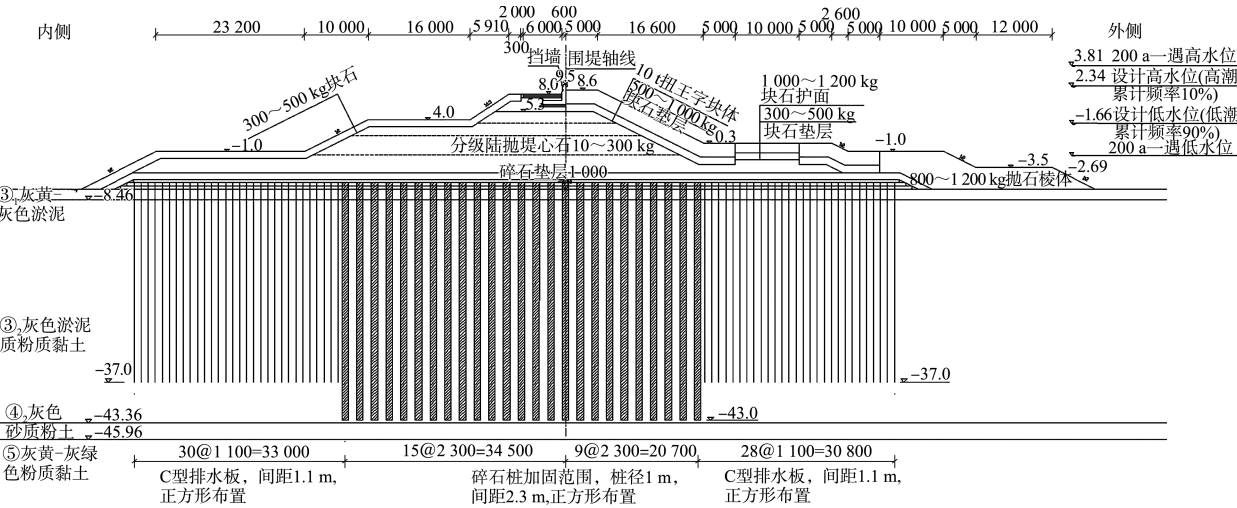


图 2 围堤典型断面 ( 高程: m; 尺寸: mm )

2.2 围堤稳定验算

围堤整体稳定计算采用费伦纽斯条分法。灰色淤泥质粉质黏土原始指标采用十字板剪切强度指标，其余土体采用直剪指标，并考虑地基加固范围内强度增长。排水板加固范围内仅考虑土体  $C$  的增长，碎石桩加固区域考虑桩体置换和桩间土强度增长，体现在复合地基土的  $C$ 、 $\varphi$  均有所提高<sup>[8]</sup>。根据 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》，复合地基强度指标计算如下：

$$\tan\varphi_{sp} = m\mu_p \tan\varphi_p + (1 - m\mu_p) \tan\varphi_s \tag{1}$$

$$C_{sp} = \eta(1 - m\mu_p)(U\mu_s\sigma_z \tan\varphi_{cu} + C_s) \tag{2}$$

$$\begin{cases} \mu_p = \frac{n}{1 + (n - 1)m} \\ \mu_s = \frac{1}{1 + (n - 1)m} \end{cases} \tag{3}$$

式中： $\varphi_{sp}$ 为复合地基土层内摩擦角标准值(°)； $m$ 为面积置换率； $\mu_p$ 为应力集中系数； $\mu_s$ 为应力降低系数； $\varphi_p$ 为桩体材料内摩擦角标准值(°)； $\varphi_s$ 为桩间土内摩擦角标准值(°)； $C_{sp}$ 为复合土层黏聚力标准值(kPa)； $C_s$ 为原始土体十字板  $C$  值； $n$ 为桩土应力比，取 2； $\eta$ 为强度折减系数，取 0.9； $U$ 为地基或土层的平均应力固结度； $\varphi_{cu}$ 为地基或土层的固结快剪内摩擦角标准值(°)； $\sigma_z$ 为地基或土层垂直附加应力平均值标准值(kPa)。

堤身整体稳定验算采用 Slide 计算软件。根据堤身加载分级及后方场地吹填施工，堤身整体稳

定验算共有 8 种计算工况，包含施工期 6 个工况、1 个使用期工况及地震工况。施工期外侧计算水位取设计低水位，内侧水位取设计高水位或吹填水位；使用期外侧计算水位取极端低水位，内侧水位取极端高水位；地震工况外侧计算水位取设计低水位，内侧水位取设计高水位<sup>[9]</sup>。

围堤为 I 级海堤，其整体稳定安全系数要求为：施工期外坡  $\geq 1.2$ ，施工期内坡  $\geq 1.1$ ，使用期外坡  $\geq 1.2$ ，地震工况外坡  $\geq 1.1$ 。围堤整体稳定计算结果见表 2。各工况稳定系数均可满足规范要求，内坡稳定控制工况为工况 2，外坡稳定控制工况为工况 5。

表 2 整体稳定计算结果

时段	工况	稳定系数要求	内坡	外坡
施工期	1	内坡>1.1,外坡>1.2	2.010	2.223
	2		1.167	1.354
	3		1.170	1.354
	4		1.245	1.459
	5		1.203	1.218
	6			1.256
使用期	7	>1.3		1.725
地震期	8	>1.1		1.547

2.3 堤身沉降计算

软土地基在荷载作用下，地基总沉降量  $S_{\infty}$  包括：瞬时沉降量  $S_d$ 、主固结沉降  $S_c$  和次固结沉降  $S_s$ 。总沉降量  $S_{\infty}$  在计算过程中较难将三者区分开，

总沉降量采用修正后的主固结沉降量  $S_c$  计算结果作为最终总沉降量。主固结沉降量采用分层总和法计算, 孔隙比由  $e-p$  曲线确定, 根据 JTS 147—2017《水运工程地基设计规范》, 计算公式如下:

$$S_{\infty} = m_s \sum_i \frac{e_{1i} - e_{2i}}{1 + e_{1i}} \cdot h_i \tag{4}$$

式中:  $S_{\infty}$  为地基最终沉降量设计值;  $e_{1i}$ 、 $e_{2i}$  分别为第  $i$  层土受到平均自重应力设计值和平均最终应力设计值压缩稳定时的孔隙比设计值;  $h_i$  为第  $i$  层土厚度;  $m_s$  为修正系数, 按经验选取或由现场试验确定, 根据类似工程经验, 淤泥质黏土取 1.3, 非淤泥质黏土按 1.1 考虑。

碎石桩加固的复合地基范围内土体沉降, 应在原计算土体沉降基础上考虑碎石桩加固后调整, 按下式计算调整后复合地基沉降<sup>[10-11]</sup>:

$$S_{sp} = \frac{S_s}{1 + m(n - 1)} \tag{5}$$

式中:  $S_{sp}$  为复合地基沉降计算值;  $S_s$  为原土体沉降计算值;  $m$  为面积置换率;  $n$  为桩土应力比, 取 2。

作用组合中的永久作用采用标准值, 可变作用采用准永久值; 水位采用设计低水位; 地基压缩层计算深度至  $\sigma_z = 0.2\sigma_c$  的深度为止, 其中  $\sigma_z$  为计算深度处地基垂直附加应力设计值(kPa),  $\sigma_c$  为计算深度处地基自重压力设计值(kPa)。计算软件采用理正岩土计算软件。

堤顶中心沉降计算结果见表 3, 堤身使用期仍将有一定的工后沉降发生, 且沉降时间较长, 应根据施工期的沉降观测情况修正堤顶预留超高。

表 3 堤顶中心沉降计算结果

土层	施工期 沉降/m	工后 5 a 沉降/m	总沉降/ m
灰色淤泥质粉质黏土	2.059	0.496	2.591
灰色砂质粉土	0.023	0.000	0.023
灰绿-灰黄色粉质黏土	0.288	0.000	0.288
合计	2.407	0.496	2.903

2.4 碎石桩检(监)测要求

围堤建设过程中, 除对围堤进行竖向沉降、水平位移、孔隙水压力等保证堤身安全加载的监

测外, 对碎石桩应有针对性的检(监)测。本工程中碎石桩用于堤身下地基的加固, 其主要目的是保证围堤整体稳定及减小工后沉降, 确保碎石桩的完整性及密实性, 基本可保证软土地基的置换和固结排水通道的作用。碎石桩的检(监)测项目及

要求如下:

1) 完整性监测。碎石桩充盈系数应不小于 1.3, 并应根据试桩调整, 指导每延米灌石量。

2) 密实性检测。碎石桩密实度检测采用重型动力触探法, 桩身每米设一个检测点, 并进行杆长修改。碎石桩桩身填料达到较密实-密实程度。表层 2 m 的碎石桩重型动力触探锤击数均不小于 7 击, 2 m 以下锤击数均不小于 10 击。

碎石桩密实度检测数量宜取总桩数的 1% ~ 2%。对黏性土地基, 检测宜在成桩后 10 d 左右进行。

3 试桩及现场施工

3.1 试桩及施工参数选取

成桩试验桩数为 60 根, 按照充盈系数 1.30、1.35、1.40 和拔管速度 1.5、1.8、2.2 m/min 的参数通过组合进行试验, 每个参数试验 2 组(6 根), 共试验 54 根。根据 1.30 和 1.35 的充盈系数加料, 到了顶部 4 m 左右发现石料不足后补料, 故现场实际试桩充盈系数在 1.38 左右。最后又增加了 2 组(6 根)1.38 的充盈系数的试验桩。

本次试桩采用振动沉管法, 施工船只为改装船。在桩位确认无误后松开套管吊钩, 先在套管自重作用下沉, 待套管不再下沉后开启振动锤, 振动锤采用 ZDJ400A 型, 在激振力的作用下套管继续下沉。停锤标准为双控: 1) 套管下沉速度突然减缓, 停止下沉, 继续振动 60 s, 桩管下沉量在 30 cm 以内停锤; 2) 实际桩长达到该区域设计平均桩长。

试桩后共检测 9 根, 按照试桩时的 3 种拔管速度, 每种拔管速度随机抽取 3 根。各拔管速度下的桩身重型动力触探检测结果见表 4。



表 4 试验桩重型动力触探检测

拔管速度/( m·min <sup>-1</sup> )	桩体表面以下深度/m	平均贯入击数/击
2.2	0~2	5.5~7.9
	2~7	7.5~9.8
	>7	>10
1.8	0~2	5.9~9.5
	2~5	7.1~9.9
	>5	>10
1.5	0~2	6.8~9.2
	>2	>10

考虑到工期的紧迫性及深厚软土的实际条件、现行水运工程质量检验标准中关于碎石桩检验标准的可操作性不强,且考虑碎石桩为散体桩,重型动力触探击数存在一定的离散性,对碎石桩密实度检测要求适当调整,使其在现场更具实操性:

- 1)碎石桩表层 2 m 以内重型动力触探检测点平均击数不得低于 7 击,击数大于等于 7 击的点数占 80%以上,且最小单点击数不得低于 5 击;2)碎石桩表层 2 m 以下单桩重型动力触探检测点平均击数不得低于 10 击,击数大于等于 10 击的点数占 80%以上,且最小单点击数不得低于 7 击。

另根据试桩报告,其余碎石桩施工指导参数如下:1)平均拔管速度 1.5 m/min;2)桩体充盈系数 1.38;3)电动机工作电流控制在 0.4 kA。

3.2 现场施工

打桩顺序宜从中间开始,向两端或四周进行,并采用隔排、隔桩跳打。振动成桩时采用逐步拔管法。

- 1)桩管垂直对准桩位。
- 2)碎石桩打穿淤泥类黏土层,使桩管周围的土进行挤密或挤压。
- 3)从桩管上端投料漏斗加入碎石料,数量根据计算及试验确定。
- 4)逐步拔管,边振动边拔管,每拔管 50 cm 留振 10~20 s,直至将桩管拔出地面。
- 5)移动桩架至下一孔位,重复作业。

4 检测结果分析

碎石桩密实度检测频率为总桩数 1%,共计 126 根,除工程试验段已检测 9 根,后期需检测根数 117 根。

检测设备采用回转式钻机及配套钻具,探头直径 74 mm、锥角 60°,自动落锤质量 63.5 kg,钻杆直径 42 mm。钻孔定位及高程测量采用 GPS-RTK。动力触探试验孔为水域检测孔,检测孔位根据实地情况随机选取,钻探过程中保持探杆竖直状态,触探杆最大斜度不应超过 2%,锤击贯入应连续进行,防止锤击偏心、探杆倾斜和侧向晃动。

动力触探现场试验修正系数取值:桩长在 20 m 范围内修正系数按 GB 50021—2001《岩土工程勘察规范》(2009 年版)表 B.0.1 取值,桩长超过 20 m 深度的修正系数按照  $L=20\text{ m}$  修正系数取值。

表 5 试验桩重型动力触探检测击数

检测深度 $L$ /m	项目	检测击数/击			试验次数	合格次数	合格率/%
		最大值	最小值	平均值			
$L\leq 2$	试验值	15.6	5.9	8.3	234	192	82.1
	试验要求	—	$\geq 5$	$\geq 7$	—	—	$\geq 80$
$L>2$	试验值	16.3	7.1	11.5	1 866	1 560	83.6
	试验要求	—	$\geq 7$	$\geq 10$	—	—	$\geq 80$

注:检测击数均为考虑杆长修正系数后的修正值。

由表 5 可知,  $L\leq 2\text{ m}$  及  $L>2\text{ m}$  深度范围内修正后的碎石桩重型动力触探试验值均能满足相关要求,即碎石桩桩身质量可以得到保证,碎石桩可发挥桩体置换及排水通道功能,达到设计对碎

石桩的相关要求。

5 结语

- 1)碎石桩加固土体复合地基原始土体指标宜

首选现场测试指标，如十字板剪切强度等。

2) 复合地基强度增加，除考虑桩体置换作用，还应考虑桩体作为竖向排水通道对周围土体的快速固结作用。

3) 复合地基沉降估算应充分考虑桩体置换率及桩土应力比的影响。

4) 大面积施工前应进行试桩，并出具试桩报告。应依据试桩报告确定合理施工工艺、施工机械、拔管速度、填料充盈系数、留振时间等参数，指导工程施工。

5) 碎石桩为散体桩，建议碎石桩密实度检测标准采用平均值、保证率及最小值的综合指标体系，便于现场实操。

参考文献：

[1] 刘玉柱, 王国辉, 付景坤, 等. 淤泥质地层中沉管碎石桩复合地基试验研究[J]. 工程勘察, 2014(1): 610-614.

[2] 赵卯龙. 振动沉管碎石桩在软基处理中的应用[J]. 山西建筑, 2008(19): 92-93.

[3] 李东锋. 振动沉管挤密碎石桩加固软土地基技术研究

究[J]. 工程技术研究, 2019, 4(1): 120-121.

[4] 韩振中, 李斌. 碎石桩复合地基作用机理及计算分析[J]. 公路交通科技(应用技术版), 2014, 10(3): 32-34.

[5] 地基处理手册编写委员会. 地基处理手册[M]. 3 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2008.

[6] 工程地质手册编写委员会. 工程地质手册[M]. 4 版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.

[7] 李明玉, 张勇. 碎石桩在深水浅层软土地基处理中的应用[J]. 施工技术, 2019(12): 210-211.

[8] 中交天津港湾工程研究院有限公司. 水运工程地基设计规范: JTS 147—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2018.

[9] 水利水电规划设计总院. 堤防工程设计规范: GB 50286—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.

[10] 中国建筑科学研究院. 建筑地基处理技术规范: JGJ 79—2012[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012.

[11] 武汉港湾工程设计研究院. 港口工程碎石桩复合地基设计与施工规程: JGJ 246—2004[S]. 北京: 人民交通出版社, 2005.

( 本文编辑 武亚庆 )

( 上接第 15 页 )

7 结 论

1) 高含水率固化土作为海堤闭气土材料，不仅能在较短时间内形成具备一定工程性质的闭气土方，同时采用吹填工艺可大大加快施工速度。

2) 固化土的强度、渗透特性主要与固化剂的掺入量、原状土的特性(含水率、有机质含量等)有关。在具体应用前应进行有针对性的工前试验以确定设计参数。

3) 固化土的渗透系数与其强度成正比，但其塑性却会随着强度的增加而降低。对于闭气土结构来说，良好的塑性对土体的防渗性、耐久性尤为重要。因此，用于闭气结构的固化土的强度设计指标不宜过高。

4) 目前由于固化土的相关应用仍处于探索阶段，尚未形成系统的设计、施工以及质量检测标准。因此为确保工程质量，应在工前编制详细的设计、施工、检测、验收方案，一方面便于项目

实施过程中的质量控制，另一方面也可对相关标准、规范的确立积累工程实践经验。

参考文献：

[1] 金国成. 堤身闭气土方施工技术探讨[J]. 黑龙江水利科技, 2012, 40(3): 78-79.

[2] 付全越. 海岸软基堤坝闭气土方加速固结特性的试验与应用研究[D]. 杭州: 浙江科技学院, 2018.

[3] 徐日庆, 邵玉芳. 温州半岛工程海堤淤泥质地基加固试验研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(4): 475-478.

[4] 黄新, 周国钧. 水泥加固土硬化机理初探[J]. 岩土工程学报, 1994, 16(1): 62-68.

[5] 张春雷, 汪顺才, 朱伟, 等. 初始含水率对水泥固化淤泥效果的影响[J]. 岩土力学, 2008, 29(S1): 567-570.

[6] 邓晓轩, 黄新, 宁建国. 外掺剂对水泥固化土强度的影响[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(10): 1628-1633.

( 本文编辑 武亚庆 )