

DOI: 10.11779/CJGE2017S1020

水泥砾质土渗透特性试验研究

刘忠¹, 朱俊高², 乔瑞社³, 郝伯瑾¹, 王娟⁴

(1. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2. 河海大学岩土工程研究所, 江苏 南京 210098; 3. 黑河黄藏寺水利枢纽工程建设管理中心, 甘肃 兰州 730030; 4. 郑州大学环境与水利学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 为研究水泥砾质土渗透特性, 改进了常规三轴试验装置, 并在该装置上进行了水泥砾质土三轴渗透试验, 分析了水泥掺入比、掺砾量、压实度和渗透压对水泥砾质土渗透特性的影响。研究结果表明: 水泥砾质土的抗渗性能随水泥掺入比的增加而得到较大幅度的提高; 当掺砾量在30%~50%范围时, 水泥砾质土的渗透系数在 10^{-7} cm/s数量级, 且满足土石坝心墙抗渗要求; 相同掺砾量下, 水泥砾质土渗透系数随着压实度的增加而降低, 尤其是压实度 $\geq 98\%$ 时, 其抗渗性能得到大幅度提高; 在相同应力状态下, 水泥砾质土渗透系数 k_{20} 与渗透压力比 P (渗透压力 p /大气压力 p_a) 符合双曲线模型, 且该双曲线可转换成 P/k_{20} 与渗透压力比 P 之间的线性关系。该研究成果为水泥砾质土应用于高土石坝心墙提供科学支撑。

关键词: 水泥砾质土; 渗透特性; 高土石坝; 心墙料

中图分类号: TU411 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2017)S1-0101-05

作者简介: 刘忠(1981-), 男, 河南信阳人, 高级工程师, 主要从事水泥砾质土基本性质及本构关系, 岩土工程数值分析等方面的科研工作。E-mail: liuzhong200707@163.com。

Permeability characteristics of cement-gravel soil

LIU Zhong¹, ZHU Jun-gao², QIAO Rui-she³, HAO Bo-jin¹, WANG Juan⁴

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China; 2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Construction Management Center for Huangzangsi Water Conservancy Project in Heihe River, Lanzhou 730030, China; 4. School of Water Conservancy and Environment, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: The triaxial permeability tests on cement-gravel soil are conducted using the improved triaxial test apparatus. Various factors including cement mixing ratio, gravel content, degree of compaction and seepage pressure that have effects on the permeability characteristics of cement-gravel soil are analyzed and discussed. The results show that the permeability resistance of cement-gravel soil is improved significantly with the increase of the cement mixing ratio. The permeability resistance of cement-gravel soil satisfies the requirements of core wall of earth-rockfill dams in the range of 30%~50% of mixed gravel. Under the same mixing amount of gravel, the permeability coefficient of cement-gravel soil decreases with the increase of the degree of compaction. The permeability resistance of cement-gravel soil is greatly improved with the compaction degree of 98%. Under the same stress state, k_{20} - P curve meets hyperbola model, and the hyperbola model can be converted into the linear relationship between P/k_{20} and P . The results can provide technical support for the permeability characteristics of cement-gravel soil applied to the core of high earth-rockfill dams.

Key words: cement-gravel soil; permeability characteristic; high earth-rockfill dam; core material

0 引言

目前, 中国已建和在建的百米以上高土石坝达两百多座, 另有多座高度超过200 m以上的高土石坝正在建设和设计论证之中, 其中包括如美心墙堆石坝(坝高315 m)、双江口心墙堆石坝(坝高316 m)、两河口心墙堆石坝(坝高293 m)、糯扎渡心墙堆石坝(坝高261.5 m)和长河心墙堆石坝(坝高240 m)等。

但在高土石坝设计建设中仍有许多关键的岩土工

程技术问题亟待解决, 如大坝防渗系统的可靠性与安全性等, 这关系到数以万计的人民生命及重大财产安全的大问题。国内外因垮坝引起的重大财产损失和人员伤亡实例较多: 如美国Teton坝于1976年6月发生

基金项目: 水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心开放课题基金项目(2016002); 国家自然科学基金项目(51609098, 51309203); 黄河水利科学研究院科研基金项目(HKY-JBYW-2014-03)

收稿日期: 2016-11-28

垮塌，事后调查认为其发生破坏的基本原因为集中渗流引起坝体底部冲刷，发展为管涌后导致大坝完全破坏^[1-3]；2013年2月2日6时许，新疆乌鲁木齐市七道湾乡联丰水库因渗漏发生溃坝。从事故调查结果可以看出，渗流是引起并导致土石坝溃坝事故发生的重要因素。

目前，工程界一般采取黏土掺砾石的方法来提高高土石坝心墙的变形模量，减少心墙与堆石坝壳间的不均匀变形，防止心墙水力劈裂现象的发生。但对200 m甚至300 m级超高心墙坝，这些不均匀变形依然难以避免，而且引起的心墙应力拱效应通常较强烈，对心墙抗水力劈裂不利^[4-6]。由于砾质土心墙材料和岸坡基岩等材料的物理力学性质差别很大，在接触部位常常存在剪应力并发生较大的剪切错位变形甚至剪切裂缝，特别是当岸坡较陡或坡度不平顺的情况下，这种不均匀变形更为严重，易导致坝体产生较大剪切变形甚至裂缝^[7]。如果黏土心墙掺入更多的砾石，心墙变形模量无疑可以提高，心墙与堆石体、岸坡之间较大的剪切变形可以得到有效改善，但小变形即可引起抗渗性能难以满足心墙防渗要求的结果。

为此，朱俊高等提出水泥砾质土心墙料即在砾质土心墙料中掺入一定量胶凝材料（水泥），改善其力学特性后用作土石坝心墙料，提高心墙料的强度和变形模量，降低心墙与堆石料间的不均匀变形，同时又能更大可能的满足心墙防渗要求^[8]。

因此，本文以某心墙堆石坝所用土料及砾石料作为基材，掺入一定比例水泥制成水泥砾质土。对不同水泥掺入比、掺砾量、压实度和渗透压下的水泥砾质土进行三轴渗透试验，研究水泥掺入比、掺砾量、压实度和渗透压对水泥砾质土渗透特性的影响。

1 试验土料与试验方案

试验所用黏土为某堆石坝掺砾心墙料所用的土料其液限34.8%，塑限为16.4%，塑性指数为19.4，土粒相对密度为2.61，黏土分类为CL（低液限黏土）。

掺砾所用砾石料为人工碎石，最大粒径为20 mm，水泥砾质土掺砾量（砾石质量/干黏土质量）分别为30%和50%，其级配曲线如图1所示。

配制试验用水泥砾质土料时，首先将黏土样烘干粉碎过2 mm筛；与水泥、砾石料等按照比例搅拌均匀，加入预定质量的水，搅拌使土、水和掺入材料均匀混合，静置30 min；将混合料分5层装入制样筒并击实至预定密度。

水泥砾质土所掺水泥为普通硅酸盐水泥（P.O

32.5）。水泥掺入量多少以水泥掺入比 w_c （水泥质量/干黏土质量）控制。本文对3种水泥掺入比 w_c （3%，5%和8%）的水泥砾质土进行了试验。由于水泥在水化过程中需要吸收水分，同时考虑到最优含水率制样时容易压实，因此，配料时所加入的水量包含砾质土最优含水率对应的水量和水泥水化用水量。考虑水泥水化用水，水灰比（水质量/水泥质量）控制为0.4。水泥砾质土的配合比见表1。

表1 水泥砾质土配合比及击实试验结果

Table 1 Proportions and compaction test results of cement-gravel soil

名 称	水泥掺入比/%	掺砾量/%	干黏 土/g	砾石料质 量/g	水泥质量/g	最大干密度 /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)
水 泥	3	30	2100	900	63	1.926
	5	30	2100	900	105	1.925
砾 质	8	30	2100	900	168	1.916
土	3	50	1500	1500	45	2.038
	5	50	1500	1500	75	2.029
	8	50	1500	1500	120	2.024

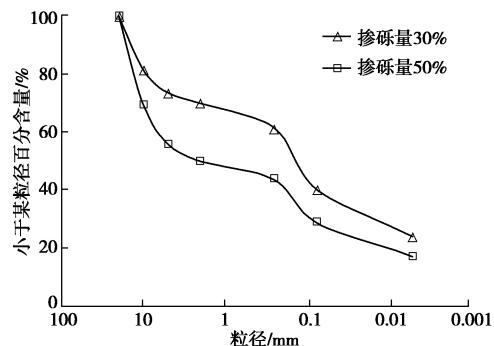


图1 不同掺砾量下的水泥砾质土级配曲线

Fig. 1 Grading curves of cement-gravel soil with different gravel contents

从表1可以看出，随水泥掺入比的增加，水泥砾质土的最大干密度呈递减趋势。主要是制样时水泥加水拌和后，产生水化硅酸钙(C-S-H)凝胶、钙矾石(Af)晶体和氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体等水化产物，附着在水泥颗粒的表面。随着水泥掺入比的增加，新生水化物随之增多，颗粒间接触点数目增加，要克服这些晶体之间的作用力需要更多压实功。故在相同击实功下水泥砾质土的最大干密度随水泥掺入比的增加呈递减趋势。

对于不同水泥掺入比、掺砾量、压实度和渗透压下的水泥砾质土采用柔性壁式渗透试验，具体方案见表2。对于表2中编号，以30-3-95为例解释如下：30表示掺砾量30%，3表示水泥掺入比3%，95表示压实度95%。

表 2 水泥砾质土渗透试验方案

Table 2 Permeability test programs of cement-gravel soil

试样 编号	水泥掺 入比/%	掺砾量 /%	围压 /kPa	渗透压 /kPa
30-3-95	3	30		
30-5-95	5	30		
30-8-95	8	30		
30-3-96	3	30		
30-5-96	5	30	1200	20, 50, 100, 200, 500
30-8-96	8	30		
30-3-98	3	30		
30-5-98	5	30		
30-8-98	8	30		
50-3-95	3	50		
50-5-95	5	50		
50-8-95	8	50		
50-3-96	3	50		
50-5-96	5	50	1200	20, 50, 100, 200, 500
50-8-96	8	50		
50-3-98	3	50		
50-5-98	5	50		
50-8-98	8	50		

2 试验结果及分析

2.1 水泥砾质土 $k_{20} - P$

图2给出了不同水泥掺入比、压实度和渗透压下，掺砾量30%的水泥砾质土渗透系数 k_{20} （标准温度20℃试样的渗透系数）与渗透压力比 P （渗透压力 p /大气压 p_a ）关系曲线；不同水泥掺入比、压实度和渗透压下，掺砾量50%水泥砾质土渗透系数 k_{20} 与渗透压力比 P 关系曲线与掺砾量30%相似，这里不再列出。

对不同水泥掺入比、掺砾量、压实度和渗透压下水泥砾质土试验数据进行回归分析，发现相同应力状态下，水泥砾质土渗透系数 k_{20} 与渗透压比 P 符合双曲线模型，可以用下式表示：

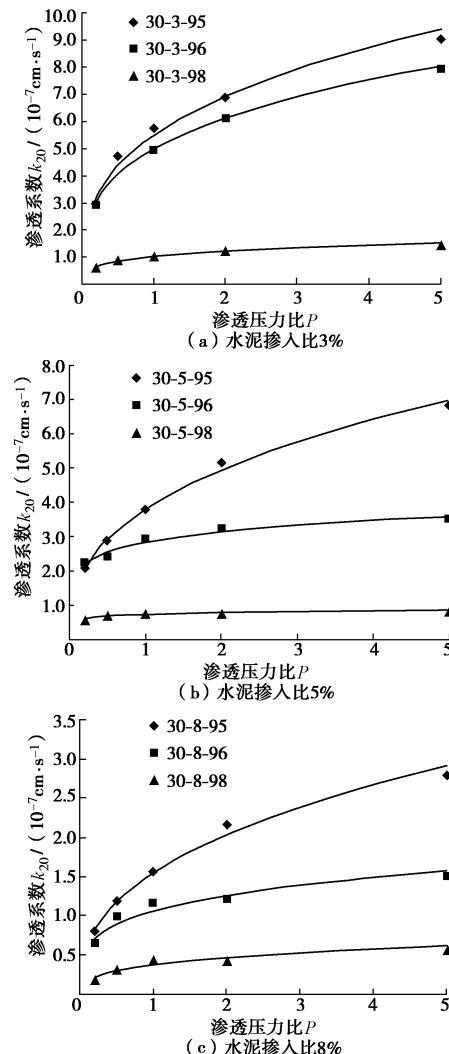
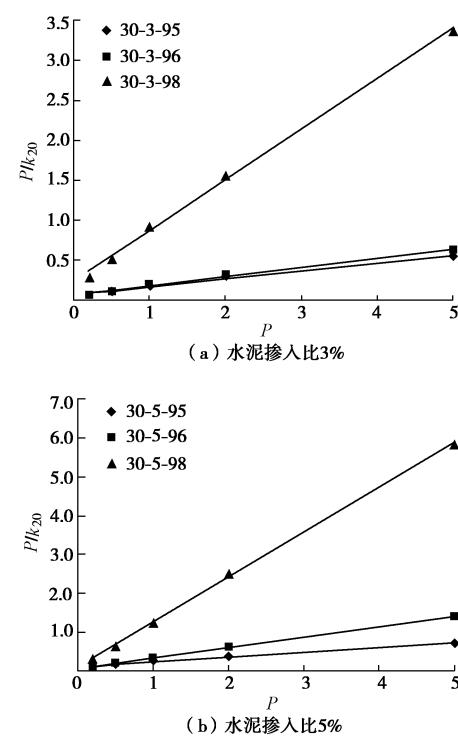
$$k_{20} = \frac{P}{a + bP}, \quad (1)$$

式中， k_{20} 为标准温度20℃试样的渗透系数($\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$)， a 为试验常数， b 为试验常数， P 为渗透压比。

式(1)可改写为

$$\frac{P}{k_{20}} = a + bP. \quad (2)$$

若以 P/k_{20} 为纵坐标，渗透压力比 P 为横坐标构成新的坐标系，则双曲线转换成直线如图3、4所示，其中截距为 a ，斜率为 b 。

图2 掺砾量30%水泥砾质土 $k_{20} - P$ 关系曲线Fig. 2 $k_{20} - P$ curves of cement-gravel soil with mixed gravel of 30%

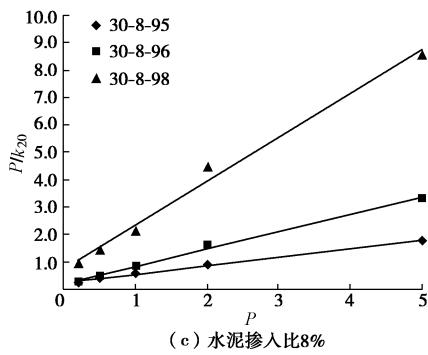
图 3 掺砾量 30% 水泥砾质土 P/k_{20} - P 关系曲线

Fig. 3 P/k₂₀ - P curves of cement-gravel soil with mixed gravel of 30%

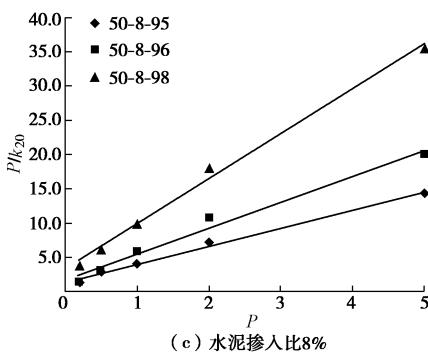
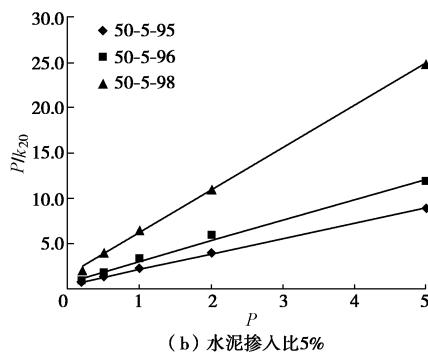
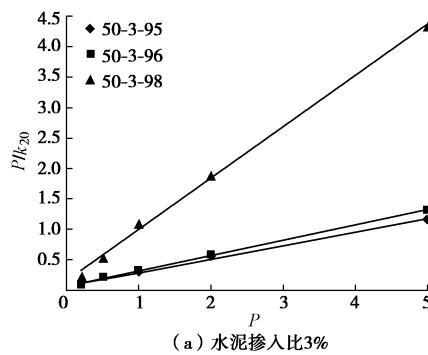
图 4 掺砾量 50% 水泥砾质土 P/k_{20} - P 关系曲线

Fig. 4 P/k₂₀ - P curves of cement-gravel soil with mixed gravel of 50%

从图 3, 4 可以看出, 相同条件下, 随着压实体度的增加, 水泥砾质土的抗渗性能得到不同程度的提高,

尤其是压实体度 $\geq 98\%$ 时, 其抗渗性能提高显著。

2.2 水泥掺入比

根据水泥砾质土渗透试验结果, 得到水泥掺入比对水泥砾质土渗透特性影响规律。图 5 给出了水泥掺入比对掺砾量分别为 30% 和 50% 水泥砾质土 (以压实体度 96% 为例) P/k_{20} - P 关系曲线的影响。

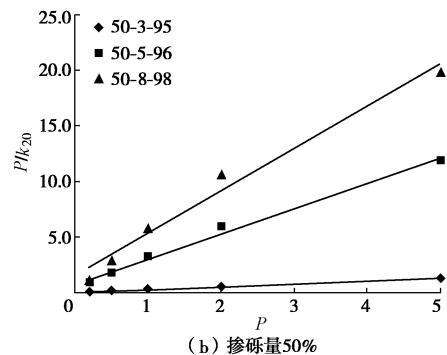
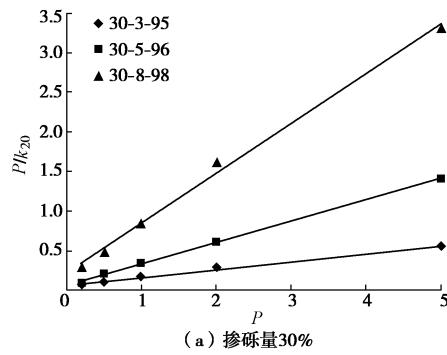
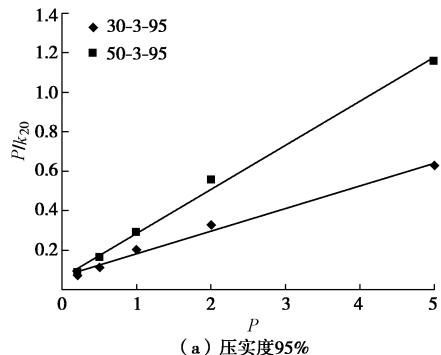
图 5 不同水泥掺入比下水泥砾质土 P/k_{20} - P 关系曲线

Fig. 5 P/k₂₀ - P curves of cement-gravel soil with different cement mixing ratios

从图 5 可以看出, 相同掺砾量下, 随着水泥掺入比的增大, 水泥砾质土的抗渗性能得到较大幅度的提升。

2.3 掺砾量

根据水泥砾质土渗透试验结果, 得到掺砾量对水泥砾质土渗透特性影响规律。图 6 给出了掺砾量对水泥砾质土 P/k_{20} - P 关系曲线的影响。



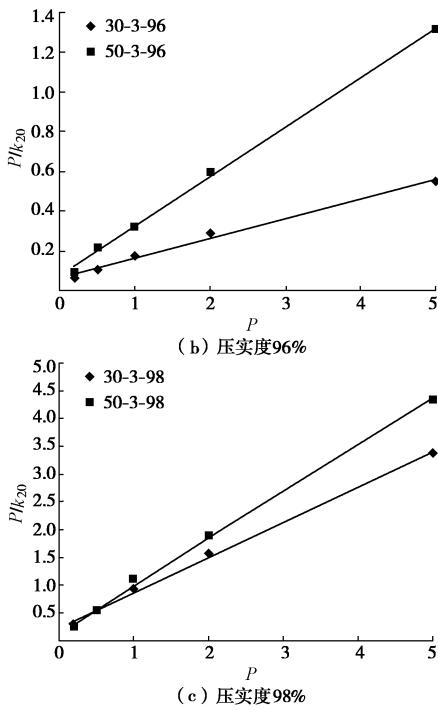
图 6 不同掺砾量下水泥砾质土 P/k_{20} - P 关系曲线

Fig. 6 P/k_{20} - P curves of cement-gravel soil with different gravel contents

从图6以看出,在不同水泥掺入比下,掺砾量50%水泥砾质土抗渗性能均优于掺砾量30%,究其原因是水泥砾质土在掺砾量50%时,形成密实骨架结构,砾石料开始起骨架作用,细颗粒又能填充骨架间的孔隙,两者互相填充和紧密接触,使其抗渗性能优于掺砾量30%水泥砾质土。

3 结 论

(1) 随着水泥掺入比的增加,不同掺砾量下水泥砾质土的抗渗性能均显著提高,掺砾量30%和50%水泥砾质土的渗透系数均为 10^{-7} cm/s 数量级。

(2) 随着压实度的提高,水泥砾质土的抗渗性能得到不同程度的提高,尤其是压实度 $\geq 98\%$ 时,其抗渗性能提高显著。

(3) 在相同应力状态下,水泥砾质土渗透系数 k_{20} (标准温度20℃试样的渗透系数)与渗透压比 P (渗透压力 p /大气压力 p_a)符合双曲线模型,且该双曲线模型可转换成 P/k_{20} 与渗透压力比 P 之间的线性关系模型。

参考文献:

[1] SEED H B, LEPS T M, DUNCAN J M, et al. Hydraulic

fracturing and its possible role in the Teton dam failure[R]. Department of the Interior and State of Idaho on Failure of Teton Dam by Independent Panel to Review Cause of Teton Dam Failure, 1976.

- [2] LEONARDS G A, DAVIDSON L W. Reconsideration of failure initiating mechanisms for Teton Dam[C]// Proc Int Conf Case Histories in Geotechnical Engineering. St. Louis, 1984.
- [3] NAVARATNARAJAH S M S. The failure of Teton Dam-a new theory based on "state based soil mechanics"[D]. Washington: Washington State University, 2003.
- [4] 陈志波, 朱俊高. 两河口心墙堆石坝应力变形及参数敏感性三维有限元分析[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2010, 38(6): 893 - 899. (CHEN Zhi-bo, ZHU Jun-gao. Three-dimensional finite element analysis of stress-strain and materials parameters sensibility of Lianghekou core rockfill dam[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2010, 38(6): 893 - 899. (in Chinese))
- [5] 李国英, 王禄仕, 米占宽. 土质心墙堆石坝应力和变形研究[J]. 岩土工程学报, 2012, 23(8): 1363 - 1369. (LI Guo-ying, WANG Lu-shi, MI Zhan-kuan. Research on stress-strain behavior of soil core rockfill dam[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2004, 23(8): 1363 - 1369. (in Chinese))
- [6] 王俊杰, 朱俊高. 堆石坝心墙抗水力劈裂性能研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, 26(增刊1): 2880 - 2886. (WANG Jun-jie, ZHU Jun-gao. Investigation on ability of rock-filled dam core to resist hydraulic fracturing[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, 26(S1): 2880 - 2886. (in Chinese))
- [7] 雷红军, 卞锋, 于玉贞, 等. 黏土大剪切变形中的渗透特性试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(4): 1130 - 1133. (LEI Hong-jun, BIAN Feng, YU Yu-zhen, etc. Experimental study of permeability of clayey soil during process of large shear deformation[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(4): 1130 - 1133. (in Chinese))
- [8] 刘忠, 朱俊高, 刘汉龙. 水泥砾质土三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(7): 2013 - 2020. (LIU Zhong, ZHU Jun-gao, LIU Han-long. Experimental study of cemented gravelly soil by triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(7): 2013 - 2020. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)