

doi:10.11835/j.issn.1674-4764.2018.04.018



微生物加固路基强度及稳定性

冉进瑜¹, 王雪亮², 汪杨¹, 肖杨¹, 何想¹, 楚剑¹

(1. 重庆大学 山地城镇建设与新技术教育部重点实验室; 土木工程学院, 重庆 400045;

2. 中铁工程设计咨询集团有限公司, 北京 100055)

摘要:微生物诱导沉积碳酸钙沉积技术(MICP, Microbially Induced Calcite Precipitation)是利用岩土层中的细菌微生物,在人为诱导作用下,生成具有胶结作用的碳酸盐沉淀,附着于岩土层间隙内,用于改善岩土层的强度,增强地基稳定性。利用 MICP 技术加固福建标准砂,进行不同围压下的三轴试验,结果表明,标准砂加固前后黏聚力的提高值为 60.1 kPa。利用 Plaxis 软件模拟高速公路路基加固技术,通过 MICP 诱导碳酸钙沉淀技术对高速公路路基加固,改变岩土体基本性能,利用强度折减法模拟在 MICP 技术加固前后路基的强度及稳定性变化,稳定性系数由 1.096 增大为 1.827,高速公路路基经过 MICP 加固后,稳定性大大提高,边坡破坏面由坡脚移动至坡面。

关键词:微生物诱导沉积碳酸钙沉积技术;路基;强度;稳定性

中图分类号:TU472.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1674-4764(2018)04-0128-07

Strength and stability of embankment foundation strengthened by MICP

Ran Jinyu¹, Wang Xueliang², Wang Yang¹, Xiao Yang¹, He Xiang¹, Chu Jian¹

(1. Key Laboratory of New Techonlogy for Construction of Cities in Mountain Area, Ministry of Education; School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China; 2. China Railway Engineering Design Consulting Group Co., Ltd., Beijing 100055, P. R. China)

Abstract: Microbially Induced Calcite Precipitation (MICP) is a kind of novel biomineralization technique that utilizes natural bacteria isolated from farm land to generate calcite in the pore of soils or rock fracture. This technique could increase both the strength and stability of soil foundation. In this paper, Fujian standard sand was used to process a series of MICP experiments and the mechanical properties were also evaluated by static triaxial test under different confining pressures. It was found that the cohesion of sands improved by 60.1kPa after the MICP treatment. Then, Plaxis was also used to simulate the improvement of soil foundation treated by MICP technique. The improvement of both strength and stability in the embankment of expressway were measured by Shear Strength Reduction Methods. Result shows that MICP technique reinforced the mechanical property of soil foundation, and the slope stability factor was improved

收稿日期:2017-11-28

基金项目:国家自然科学基金(51578096);高等学校学科创新引智计划(B13024)

作者简介:冉进瑜(1993-),男,主要从事岩土工程研究,E-mail: ran_jinyu@163.com。

肖杨(通信作者),男,副教授,博士生导师,E-mail: hhuxyanson@163.com。

Received:2017-11-28

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (No. 51578096); Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (No. B13024)

Author brief: Ran Jinyu (1993-), main research interest: geotechnical engineering, E-mail: ran_jinyu@163.com.

Xiao Yang (corresponding author), associate professor, doctoral supervisor, E-mail: hhuxyanson @ 163.com.

from 1. 096 to 1. 827 after treatment. The stability of expressway embankment improved significantly. Meanwhile, the ultimate slope slip surfaces moved from slope foot to slope surface.

Keywords: microbially induced calcite precipitation; triaxial test; strength characteristics; embankment foundation stability; numerical simulation.

近年来,中国高速公路建设进入了高速发展时期,高速公路作为经济发展的重要组成部分,联系了社会生产、人民生活的各个方面。高速公路的沉降及变形问题成为现役高速公路在运营和养护中迫切需要解决的问题^[1-3]。目前采用的方法虽然能够解决高速公路变形沉降等问题,但施工复杂、成本较高,且容易对环境造成污染。例如,现阶段对于整治高速公路沉降及变形的的方法主要是采用大面积填补路边材料,从而使路面平整,但长期使用此方法会增加地基的外加荷载,附加应力会使地基持续发生固结变形,所以,此方法并没有真正达到控制高速公路沉降变形的目的^[4-6]。

在对高速公路路基加固时,可以考虑用微生物诱导沉积碳酸钙(MICP, Microbially Induced Calcite Precipitation)技术,其原理是利用岩土层中的微生物,使其分解产生的钙离子和碳酸根离子相结合为能够填充在岩土颗粒间具有胶结作用的碳酸钙沉淀^[7-9]。微生物诱导沉积碳酸钙技术加固路基方法一经提出,便得到了学者们的高度重视和广泛研究^[10-12]。Burbank 等^[13]通过 MICP 和普通硅酸盐水泥的循环环剪试验对比,发现 MICP 处理后的地基具有更高动剪应力比,具有更高的抗液化能力;Montoya 等^[14]利用 MICP 加固砂土动力模型试验,采用不同离心震荡试验,发现 MICP 能够使岩土层中孔隙水压力减小,且超孔隙水压力的消散时间明显延长,竖向变形减少,增加了砂土的抗液化能力;Qubany 等^[15]研究了碳酸钙含量的影响,结果表明,碳酸钙含量的增加,加大了岩土间的黏结物质,增大了强度和稳定性,但以上研究仅限于实验室研究,并未与工程相结合,未考虑 MICP 技术的工程应用。

笔者通过基础三轴试验,得出砂土颗粒在 MICP 胶结前后的不同物理力学参数之差,通过 Plaxis 模拟出在 MICP 试验胶结前后,高速公路路基在变形及稳定性等方面宏观力学性质的提高,推断了微生物诱导沉淀碳酸钙技术加固路基方法在岩土工程中的应用领域。

1 微生物加固试验

1.1 试验准备

试验选用中国 ISO 中级标准砂(标准石英砂)为

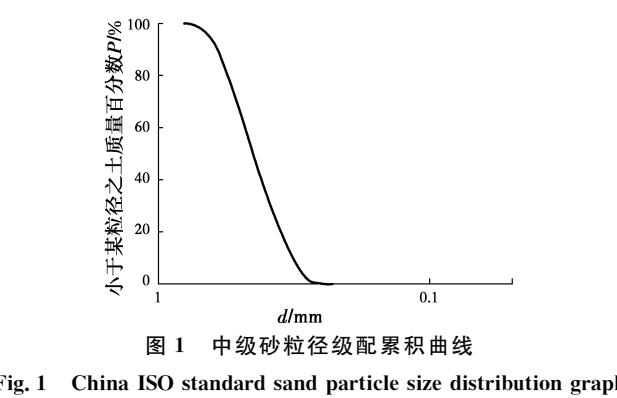
加固材料,粒径分布为 0.5~1.0 mm,其力学特性如表 1 所示。

表 1 标准砂物理性质

Table 1 The mechanical properties of standard sand

初始孔隙率/%	初始密度/(g·cm ⁻³)	最小干密度/(g·cm ⁻³)	最大干密度/(g·cm ⁻³)
31.4	1.414	1.408	1.736

其粒径级配累积曲线如图 1 所示。



试验需用的材料还包括透明 PVC 套管、橡皮膜、百洁布、滤料鹅卵石、橡皮塞、蠕动泵、导管、真空泵等,如图 2 所示。



1)透明 PVC 套管内径为 40 mm,在筒壁上开一

- 小孔用于抽出管内空气,沿直径将套管剖成两半,并配有固定 PVC 套管的月牙形紧铜箍,目的是保护试样装样时成形,拆模时不变形。
- 2)橡皮膜为直径 39.1 mm 的圆筒形。
- 3)百洁布裁剪为直径 39.1 mm,厚度 1 mm 的圆形。
- 4)滤料鹅卵石采用的粒径为 2~4 mm。

5)橡皮塞为带透水管圆形状。

1.2 细菌培养过程

试验选用的产脲酶细菌为中国普通微生物菌种保藏管理中心 (CGMCC, China General Microbiological Culture Collection Center)购买的巴氏生孢八叠球菌 (*Sporosarcina pasteurii*),其基本信息如表 2 所示。

表 2 巴氏生孢八叠球菌基本信息

Table 2 Basic Information of *Sporosarcina pasteurii*

编号	拉丁学名	曾用名	中文学名	其它编号	分离源	特征
1.368 7	<i>Sporosarcina pasteurii</i> (Miquel 1889) Yoon et al. 2001	<i>Bacillus pasteurii</i> (Miquel 1889) Chester 1898	巴氏生孢八叠球菌	= ATCC 11859 = CCM 2056 = NCIB 8841 = NCTC 4822	土壤	直径为 0.5~1.5 μm,长为 2~3 μm,革兰氏阳性,具有少数鞭毛运动,芽孢呈圆形,化能异养菌,广泛分布于土壤等环境。

细菌活化过程,全程温度控制为 30 ℃,环境为无菌环境,先采用平板培养基在恒温震荡箱中进行活化,时间为 36~48 h,将成群的菌种挑入液体培养基中,以 80 r/min 的速率继续在恒温震荡箱中进行扩大培养,培养时间时间为 24 h。培养完成后,采用比浊法测定细菌的 OD 值为 0.8~1.0。将合格后的细菌菌液置于离心机中,在温度为 4 ℃,转速为 4 000 r/min 的离心运动下离心 20 min,去除上层清液,加入 0.9%的氯化钠溶液。菌液保存在 4 ℃ 的温度下,并于一周内使用。细菌固体和液体培养基的配方如下:酵母提取物 20 g/L、氯化铵 10 g/L、MnCl₂ · H₂O 12 mg/L、NiCl₂ · 6H₂O 24 mg/L、蒸馏水 1 000 g/L、琼脂 15 g/L(固体培养基使用),培养基配置完成,用 1 mol/L 的氢氧化钠溶液将培养基 Ph 值调制为 9.0。

1.3 微生物加固试验

为保证同一条件下的制样质量水平相差不大,试验采用分层装样法,并控制试验其他外界因素相同;1)试样密度控制与初始密度一致,并保证分层装样前充分搅拌颗粒,避免骨料不均匀分布;2)环境温度控制在 24±1 ℃;3)每个试样的初始菌液体积为 70 mL;4)每个试样砂颗粒质量为 150 g;5)反应过程中灌入的反应液统一配比为 0.5 mol/L CaCl₂ + 0.5 mol/L Urea,灌入反应液的体积为 300 mL;6)蠕动泵灌入反应液的速率为 40 mL/h。

试样胶结加固过程采用重力式无压灌入,利用蠕动泵转动速率来控制反应液的灌入速率,反应过程如图 3 所示。

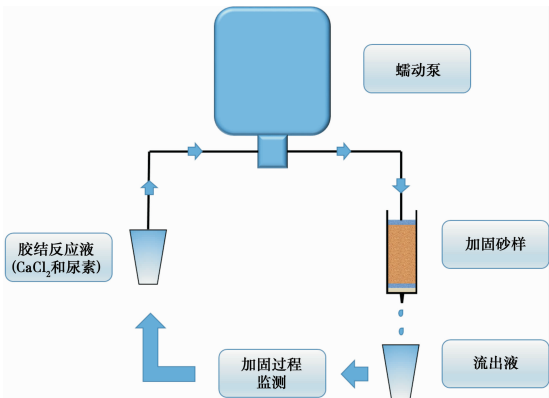


图 3 试验装置设计示意图

Fig. 3 Testing apparatus design

装样时,先在套管底部平铺鹅卵石过滤层和百洁布,再用真空泵抽出管套与橡皮膜之间的空气,将砂颗粒分层倒入至设计高度,表面平整后再铺上一层百洁布。用止水夹夹住橡胶塞上的滤水管后,将 70 mL 菌液以 0.5 rpm 的速率缓慢灌入试样中,当所有菌液灌入完毕后,浸泡试样 6 h。打开止水夹将菌液排除后,用蠕动泵以 40 mL/h 的速率灌入反应液,试验装置如图 4 所示。

收集橡胶筛下方流出反应液,采用 EDTA 滴定法 (GB 7477—87) 检验流出反应液中钙离子的浓度,当钙离子浓度低于原浓度的 20% 时,可认为此次反应完成,不再将反应液循环灌入,胶结过程完成。

加固过程完成后,为清除残留在试样中的菌液和氯离子杂物,用蠕动泵灌入 5 倍反应液体积的蒸馏水清洗干净,将试样放入 65 ℃ 烘箱烘干于 48 h 以上待用。

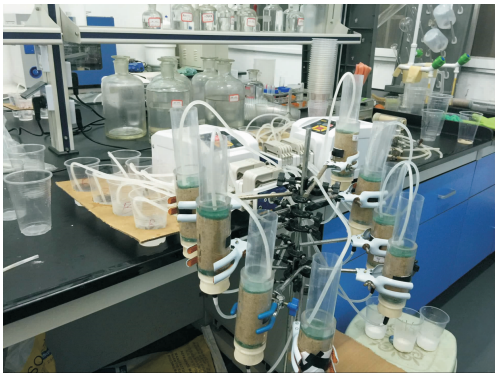


图 4 试验装置实物图
Fig. 4 Testing apparatus

2 MICP 加固砂土三轴试验

三轴试验采用的仪器为常规静三轴仪器,由围压室、压力测控柜、加载装置、二氧化碳罐等部分组成。试验过程严格按照《土工试验规程》(SL 237—1999)^[16]进行。试验时,分别对未经过 MICP 胶结的标准砂以及经 MICP 胶结的标准砂分别进行三轴试验。试验前采用通二氧化碳的方法将试样饱和度达到 95% 以上,试验过程采用应变控制式,剪切速度采用 0.166 mm/min。试验采用固结不排水条件进行,分别对未经过 MICP 胶结的试样以及经 MICP 胶结的试样施加 50、100、200 kPa 围压,为避免应力路径变化对试验结果的影响,统一采用标准三轴试验应力路径,即保持 σ_3 不变,轴向荷载增加直至试样破坏。试样破坏标准为轴向应变达到 20%。

根据 MICP 加固后试样三轴反应的结果,将标准砂样在不同围压下(50、100、200 kPa)的应力应变图绘制为 σ - τ 曲线,同时将未经 MICP 胶结的标准砂装样进行同条件下(50、100、200 kPa)的三轴试验,根据试验结果绘制出 σ - τ 图像,根据图 5、图 6,利用摩尔-库伦理论,得出标准砂在 MICP 胶结前后黏聚力 c 和内摩擦角 φ 。

表 3 测定三轴试验参数

Table 3 Triaxial test parameters were determined

砂	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
未胶结标准砂	0	40.12
MICP 胶结砂	60.1	41.38

收集 MICP 加固试样三轴试验后样本,采用 SEM 拍摄试样微观构造,如图 7 所示。

由图 7 可见,MICP 在颗粒表面及颗粒之间生产碳酸盐颗粒,将散状颗粒体结合在一起,从而改变

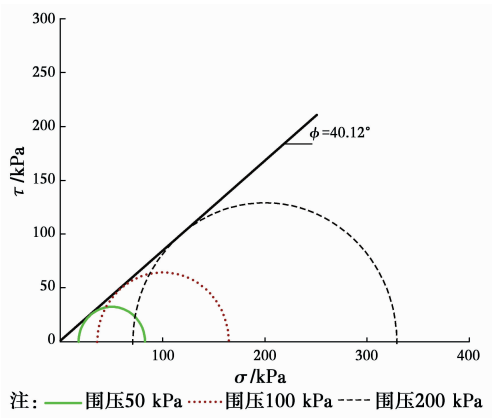


图 5 未加固砂土 σ - τ 图
Fig. 5 Diagram of unsaturated sand

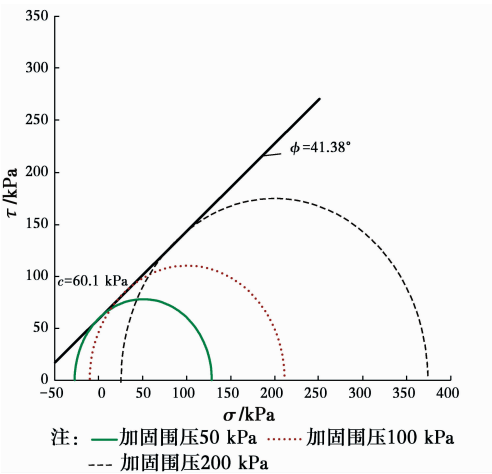


图 6 MICP 加固砂土 σ - τ 图
Fig. 6 Diagram of saturated sand in MICP

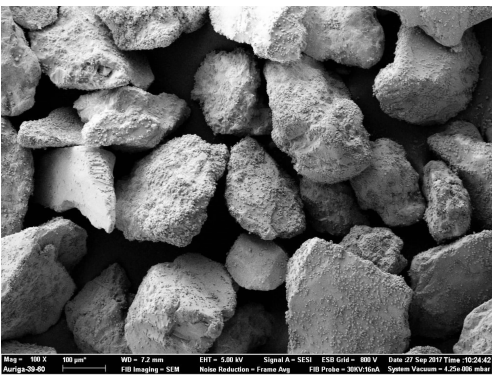


图 7 SEM 图
Fig. 7 Picture of SEM

其物理力学参数及宏观力学性质。

3 微生物加固路基填筑数值模拟

基于得到的微生物加固土的强度参数,结合 Plaxis 数值计算手段,分别模拟在天然地基和微生物加固地基上的填筑路堤并对其进行稳定性分析。

3.1 数值模型

考虑到路堤长度远大于宽度和高度,且左右对称,因而建立半幅路堤的平面应变模型^[17-19],如图 8 所示。

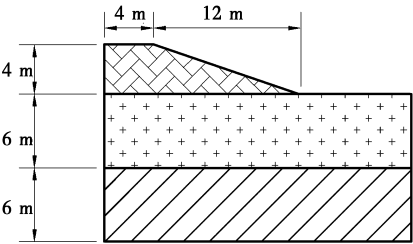


图 8 路堤模型尺寸
Fig. 8 Embankment model size

模型地基宽 50 m,高 12 m;路堤高 4 m,宽 6 m (半幅),坡度 1:3;地基加固区为地表下深 6 m,宽 22 m(半幅)区域,即坡脚向外延伸 4 m。初始地下水位为原地表面。路堤分两次填筑,每次填筑高度为 2 m,每次填筑后使用强度折减法计算得出稳定性系数 F_s 。加固前后地基土与填料均使用摩尔库伦本构模型模拟,参数见表 4。

表 4 Plaxis 数值模拟基本参数

Table 4 Basic parameters of plaxis numerical simulation

材料	C/kPa	$\varphi/(^{\circ})$	E/kPa	μ
路基填料	0.1	30	10 000	0.3
天然基土	0.1	15	3 000	0.35
MICP 加固基土	60.1	40	3 000	0.35

3.2 计算结果

在天然地基上填筑第 1 级路基时,路堤下地基承担着路堤的重力荷载,进入塑性。当第 2 级路基填筑完成时,由于地基中附加应力增大,塑性区扩展至更深处,坡脚处塑性也开始发展,如图 9 所示。当路基加固之后,在第 1 级路堤自重荷载下,地基没有出现塑性区。第 2 级路基填筑后,加固区仍处于弹性阶段,仅在加固区下卧的地基区域有部分塑性发展,路堤边坡没有出现滑动的趋势,如图 10 所示。在每级路堤填筑之后采用强度折减法进行稳定性分析,得到了稳定性系数,由 1.096 提高至 1.827,如表 5 所示。在未加固地基土的情况下,完成路基填筑后路堤边坡稳定系数仅为 1.096,边坡处于失效边缘。而局部加固地基土后,路堤边坡稳定性大幅提高,结合图 9 和图 10 来看,加固区强度指标大幅提高,从而抑制了地基中塑性区的发展。

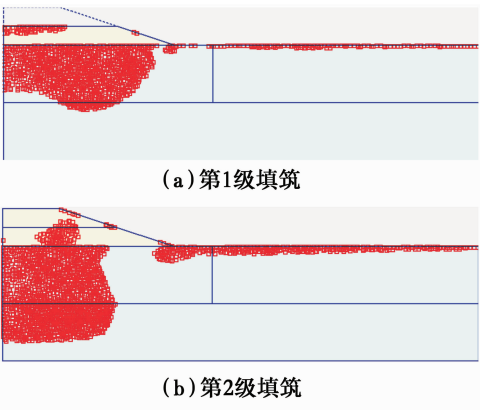


图 9 天然地基上填筑路堤后的塑性区
Fig. 9 Plastic foundation filled embankment on natural foundation

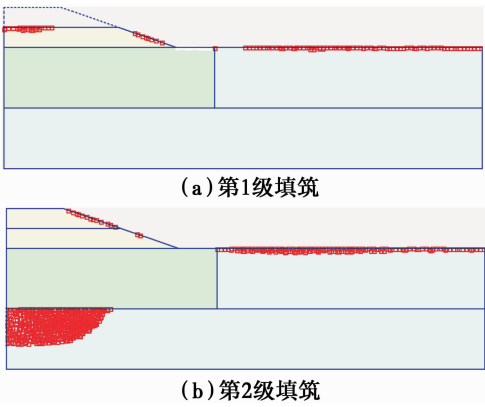


图 10 微生物加固地基上填筑路堤后的塑性区
Fig. 10 MICP reinforcement of plastic-filled embankment on the foundation

表 5 加固前后稳定性系数

Table 5 Stability coefficient before and after reinforcement

填筑情况	天然状态	MICP 加固后
第 1 级填筑	1.137	1.888
第 2 级填筑	1.096	1.827

进行强度折减计算后,从图 11 和图 12 可以观察临界破坏模式。路基未加固的情况下,临界滑动面穿过了地基土,坡脚发生破坏。而加固后临界滑动面并没有穿过地基土,仅发生了坡面破坏,地基土的加固使得临界滑动面转移到了强度相对更低的路堤中。据此,路基防护工作重点由坡脚转移到了坡面。

4 结论

根据三轴试验发现 MICP 技术加固后砂土基本参数的提高,利用 Plaxis 软件进行高速公路路基的 MICP 技术加固模拟测试,结果表明:



图 11 天然地基上填筑路堤后的强度折减计算下临界破坏位移增量矢量

Fig. 11 Calculation of critical damage displacement increment vector based on strength reduction of embankment on natural foundation

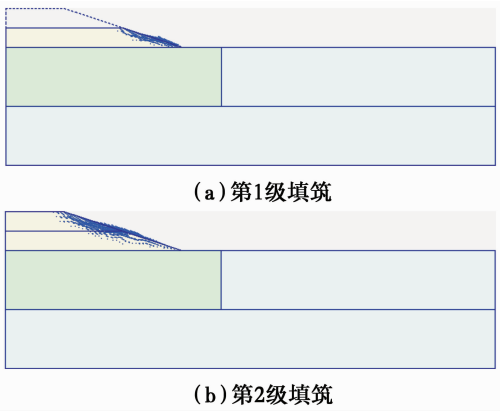


图 12 微生物加固地基上填筑路堤后的强度折减计算下临界破坏位移增量矢量

Fig. 12 MICP reinforcement ground embankment strength reduction calculation under the critical damage displacement incremental vector

- 1) MICP 胶结标准砂试样,增大了试样的黏聚力。
- 2)经 MICP 地基加固技术处理过的高速公路路基,加固前边坡处于塑性状态,加固后抑制了塑性区发展,安全系数明显提高。
- 3)天然状态下,边坡的临界破坏状态在坡脚处,经 MICP 技术加固后,路堤强度增大,破坏面由坡脚移至坡面处,减小了防护工作的难度。

参考文献:

[1] 李建斌,刘汉龙,孔纲强,等. 侧向辐射注浆技术处治现役高速公路沉降分析[J]. 岩土力学,2017, 38(Sup1): 479-487.
LI J B, LIU H L, Kong G Q, et al. Analysis of

settlement of reinforced operating expressway using lateral radiation grouting technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2017, 38(Sup1): 479-487. (in Chinese)

[2] 刘汉龙,赵明华. 地基处理研究进展[J]. 土木工程学报,2016, 49(1): 96-115.
LIU H L, ZHAO M H, Review of ground improvement technical and its application in China [J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49 (1): 96-115. (in Chinese)

[3] 自航,范夏玲,卢才金. 岩溶区高速公路路堤及溶洞顶板稳定性数值分析[J]. 岩土力学,2014, 35(Sup1): 382-390.
ZI H, FAN X L, LU C J. Numerical analysis of stability of highway embankments and karst cave roofs in karst region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35 (Sup1): 382-390. (in Chinese)

[4] 笑冬,王杰,李国峰,等. 公路发展综述[J]. 东北林业大学学报,2001(4):77-79.
XIAO D, WANG J, LI G F, et al. Road development summary [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2001(4):77-79. (in Chinese)

[5] 顾红伟,孔纲强,丁选明,等. 高压旋喷桩处治已通车高速公路软基分析[J]. 施工技术,2014, 43(7): 63-66.
GU H W, KONG G Q, DING X M, et al. Soft ground treatment on opening highway with high-pressure jet grouting pile [J]. Construction Technology, 2014, 43 (7): 63-66. (in Chinese)

[6] 吴跃东,李晓峰. 气泡混合轻质土置换高速公路路堤工后沉降研究[J]. 水利与建筑工程学报,2013, 11(6):16-19.
WU Y D, LI X F. Research on postconstruction settlement by using FCB to replace expressway embankment [J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11 (6): 16-19. (in Chinese)

[7] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. MICP 胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程报,2018, 40(1): 38-45.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 38-45. (in Chinese)

[8] 刘璐,沈扬,刘汉龙,等. 微生物胶结在防治堤坝破坏中的应用研究[J]. 岩土力学,2016, 37(12): 3410-3416.
LIU L, SHEN Y, LIU H L, et al. Application of biocement in erosion control of levees [J]. Rock and Soil Mechanics, 2016, 37(12): 3410-3416. (in Chinese)

[9] XIAO Y, HE X, LIU H L. New lightweight geomaterials; Biocemented sand mixed with expanded

- polystyrene beads [J]. Science China Technological Sciences, 2017, 60(7): 1118-1120.
- [10] 李龙志. 微生物胶结尾砂及其工艺研究 [D]. 南京:东南大学, 2013.
- LI L Z. Study on railings cemented by microbe and process technique [D]. NanJing: Southeast University, 2013. (in Chinese)
- [11] 沈吉云. 微生物成因土工材料实验及应用研究 [D]. 北京:清华大学, 2009
- SHEN J Y. Experiments and applications of bio-geo materials [D]. Beijing: Tsinghua University, 2009. (in Chinese)
- [12] 杨钻. 高强微生物砂浆机理与工作性能研究 [D]. 北京:清华大学, 2013.
- YANG Z. Research on mechanism and performance of high-strength microbial mortar [D]. Beijing: Tsinghua University, 2013. (in Chinese)
- [13] BURBANK M, WEAVER T, LEWIS R, et al. Geotechnical tests of sands following bioinduced calcite precipitation catalyzed by indigenous bacteria [J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2013, 139(6): 928-936.
- [14] MONTOYA B, DEJONG J, BOULANGER R. Dynamic response of liquefiable sand improved by microbial-induced calcite precipitation [J]. Geotechnique, 2013, 63(4): 302-312.
- [15] QABANY A A, MORTENSEN B, MARTINEZ B, et al. Microbial carbonate precipitation: Correlatio of S-wave velocity with calcite precipitation [C]// Geo-frontiers Congress, 2011: 3993-4001.
- [16] 土工试验规程:SL 237—1999 [S]. 北京:中国水利水电出版社, 1999.
- Specification of soil test: SL 237-1999 [S]. Beijing: China Water & Power Press, 1999. (in Chinese)
- [17] 李志清, 胡瑞林, 付伟, 等. 土工格栅在加固高速公路路堤中的应用研究[J]. 岩土力学, 2008, 29(3): 795-799.
- LI Z Q, HU R L, FU W, et al. Study on using geogrids to reinforce embankment of expressway [J]. Rock and Soil Mechanics, 2008, 29(3): 795-799. (in Chinese)
- [18] MUNIANDY R, ABURKABA E, TAHA R. Effect of mineral filler type and particle size on the engineering properties of stone mastic asphalt pavements [J]. The Journal of Engineering Research, 2015, 10(2): 13-32.
- [19] DEMIR A, SARICI T. Bearing capacity of footing supported by geogrid encased stone columns on soft soil [J]. Geomechanics & Engineering, 2017, 12(3): 417-439.

(编辑 胡英奎)