

饱和软土路基长期沉降计算研究

胡安峰^{1,2}, 张晓冬^{1,2}, 贾玉帅^{1,2}, 李良^{1,2}

(1. 浙江大学滨海和城市岩土工程研究中心, 浙江 杭州 310058; 2. 浙江大学软弱土与环境土工教育部重点实验室, 浙江 杭州 310058)

摘要: 在车辆荷载作用下, 公路路面会产生长期沉降。尤其对于长三角地区, 路基多为饱和软黏土, 在长期循环荷载作用下其强度和刚度均发生衰减, 并有超静孔压的累积。基于现有试验结果提出新的刚度衰减模型, 建立了考虑孔隙水压力的刚度衰减系数与循环次数的关系, 并提出有效应力计算公式。同时与工程实用的分层总和法相结合, 对某低路堤公路长期沉降进行了预测。计算结果表明: 在交通荷载作用初期, 沉降迅速增加, 随后趋于稳定; 由于路面结构层的刚度很大, 其压缩量很小, 沉降主要由第④层淤泥质黏土产生, 由于土层中应力扩散, 第⑤层粉砂层受到很小的竖向动偏应力, 因而其沉降也很小。

关键词: 车辆荷载; 刚度衰减; 有效应力; 孔压; 长期沉降; 循环三轴试验

中图分类号: TU47 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4548(2013)S2-0788-05

作者简介: 胡安峰(1974-), 男, 山东枣庄人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事桩基工程、土动力学等方面的研究与教学工作。E-mail: anfenghu@zju.edu.cn。

Permanent settlement of subgrade of saturated soft soils

HU An-feng^{1,2}, ZHANG Xiao-dong^{1,2}, JIA Yu-shuai^{1,2}, LI Liang^{1,2}

(1. Research Center of Coastal and Urban Geotechnical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China; 2. MOE Key

Laboratory of Soft Soils and Geoenvironmental Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Under vehicle loads, the permanent settlement of highway pavement is induced, especially in the Yangtze River Delta area, the traffic loading induces the degradation of the strength and stiffness and the accumulation of the excess pore pressure. Based on the former cyclic triaxial test results, a new degradation of stiffness model is proposed, which is expressed by the effective stress increment compared with the initial condition divided by the corresponding deformation, and a formula for the effective stress is established. Moreover, by combining with the layer-wise summation method, a method is suggested to estimate the long-term settlement of soft ground caused by traffic loads. The calculated results show that the settlement increases rapidly in the early phase, then tends to stable. Because the stiffness of the pavement layer is very large, the compression deformation is very small, and the settlement of road surface is mainly composed of the deformation of the 4th layer of silt clay. Due to the stress dispersion, the vertical dynamic deviator stress of the 5th layer of silt is small, so its settlement is very small.

Key words: vehicles load; stiffness degradation; effective stress; pore water pressure; permanent settlement; cyclic triaxial test

0 引言

国内外实测资料表明, 公路、铁路、飞机跑道等在交通荷载长期作用下会产生累积沉降, 导致路面出现变形, 严重者将影响道路的正常运营。例如建于 Ariake 黏土上的日本某低路堤高速公路, 在投入运行后发生惊人的沉降, 5 a 达 $1\sim 2\text{ m}$ ^[1]; 凌建民等^[2]对上海外环线北翟路交通开放后的附加沉降进行监测, 发现两年内沉降达 $8\sim 10\text{ cm}$ 。特别对于饱和软黏土地基, 在长期循环荷载作用下, 土体将发生软化, 产生更大的工后沉降。因此对建于软土地基上低路堤高速公路、铁路等在循环荷载作用下的沉降问题应引起足够的重

视。

现有路面沉降计算方法有 3 种: ①数值模拟法^[2-3], 由于交通荷载作用下, 路堤模型应为三维, 且循环次数很大, 加上模型中材料参数在循环荷载作用下需进一步研究, 因而数值模拟法很难用到实际工程; ②等效静荷载法^[4-5], 由于未考虑车辆荷载造成的土体材料特性的变化, 预测的沉降往往比实际偏小; ③经验公式法^[6-7], 通过室内循环三轴试验结果拟合得到土体材料参数和累积孔压的经验公式, 再利用分层总和法计

算地基的长期沉降。

本文在现有试验结果的基础上提出考虑累积孔压的饱和软黏土的刚度衰减模型及有效应力增量计算公式, 并与分层总和法相结合, 建立了计算循环荷载作用下土体中累积塑性变形引起土体沉降的方法。首先利用ABAQUS有限元软件计算得到在附加荷载作用下各土层所受到的竖向动偏应力, 考虑了交通荷载在土体中的应力扩散及相互叠加。再根据给定的循环次数和经验拟合公式计算出第*N*次循环的刚度和有效应力增量, 最后利用分层总和法计算出竖向动偏应力导致的累积沉降。

1 循环累积塑性应变经验公式

目前为止, 已发表的计算循环累积塑性应变 ε_p 的公式多由室内循环三轴试验、直剪试验的结果拟合得到。Monismith等^[8]根据循环三轴试验或直剪试验提出计算黏土的塑性应变的指数型公式:

$$\varepsilon_p = AN^b \quad (1)$$

式中, *A*和*b*为材料参数, 通过室内试验数据拟合求得。

此后, Li等^[9]对比前人的试验结果, 考虑土体物理状态的影响, 引入静力荷载下土的强度参数 σ_f 。Chai等^[10]依据Samang试验结果, 考虑土体静偏应力影响, 假设累积塑性应变随初始静偏应力增加而增加, 提出新的修正公式。刘明等^[11]、黄茂松等^[12]对上海地区典型饱和软黏土进行循环三轴试验, 根据试验结果提出指数型经验公式。

通过比较, 可以发现当 $N=1$ 时, $\varepsilon_p^1 = A$, 认为是第一次循环后的永久变形, 受土的性质、土的物理状态、动偏应力水平和静偏应力水平的影响。对 ε_p^1 归一化 $\varepsilon_p^N / \varepsilon_p^1$ 后, 可不考虑土的性质、土的物理状态、动偏应力水平和静偏应力水平的影响, 从而达到简化参数的作用, 整理后得

$$\varepsilon_p^N / \varepsilon_p^1 = N^b \quad (2)$$

式中, *b*为材料参数, 通过室内循环三轴试验结果拟合确定。本文计算实例中采用刘明等^[11]确定的值为 0.148。

2 有效应力计算公式

现有研究表明, 在循环三轴试验中, 饱和软黏土在不排水循环荷载作用下, 随着循环次数 *N* 的增加, 孔隙水压力会不断增加, 如图 1 所示。在循环加荷的初始, 孔隙水压力增长较快, 但当循环周数增加到一定周数以后, 孔隙水压力增长速度逐渐缓慢。

文献[11]采用半正弦波形模拟交通荷载, 频率为 1 Hz。考虑到土体非等向固结, 取偏压比 ($\sigma'_{3c} / \sigma'_{1c}$) 为 0.7 (上海淤泥质软黏土的 K_0 为 0.7 左右) 的偏压固结 ($\sigma'_{3c} = 100$ kPa 和 200 kPa)。不排水条件下, 动偏

应力比 ($\eta_d = q_d / \sigma'_{3c}$) 分别为 0.1, 0.2 和 0.3 的循环三轴试验。

本文基于上述试验结果, 对数据进行整理得出每次循环的轴向有效应力的增量为

$$\Delta\sigma'_N = q_d - u_N \quad (3)$$

式中, q_d 为动偏应力, u_N 为第*N*次循环对应的孔隙水压力。

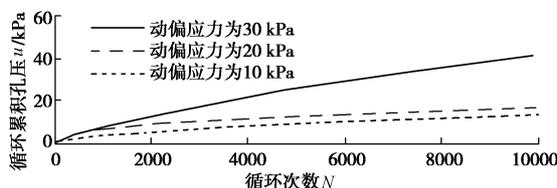


图 1 循环累积孔压与循环次数关系曲线

Fig. 1 Relationship between cumulative pore water pressure and number of cycles

$\Delta\sigma'_N$ 对 q_d 归一化后得, 有效应力的增量所占动偏应力的百分比。提出有效应力增量比计算公式:

$$\Delta\sigma'_N / q_d = (q_d - u_N) / q_d = m + n\sqrt{N} \quad (4)$$

式中, *m*, *n* 为试验常数, 通过试验数据拟合得到对于上海地区饱和淤泥质软黏土, 其取值范围分别为 0.94004~1.25874 和 -0.01591~-0.00751。限于现有试验数据较少, 参数 *m*, *n* 通过对动偏应力比加权取值, 分别取 1.09084 与 -0.01190。

图2为有效应力增量比与循环次数根值的关系曲线。图中实线为式(4)的曲线, 散点分别对应动偏应力比为 0.3, 0.2, 0.1 时的试验数据。从图中可以看出, $\Delta\sigma'_N / q_d$ 与 \sqrt{N} 近似成线性变化, 且动偏应力比对 $\Delta\sigma'_N / q_d$ 的影响较小, 所提出的有效应力增量计算公式能比较合理的模拟非等向固结条件下的有效应力增量。

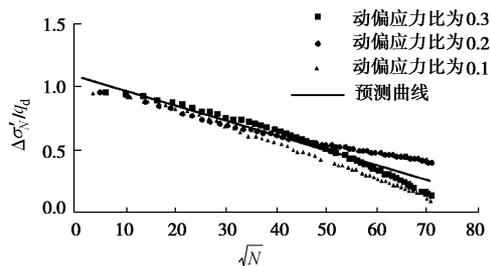


图 2 有效应力增量比与循环次数根值的关系

Fig. 2 Relationship between effective stress increment and number of cycles

3 刚度衰减模型

图3为理想化的循环三轴试验中偏应力*q*与轴向应变 ε_N^a 的关系曲线, 从图中可以看出, 饱和软黏土在不排水条件下受循环荷载时, 轴向应变随着循环荷载作用次数的增加而增加, 轴向应变与土壤状态、初始围

压及轴向循环应力大小有关。轴向应变的增加和有效应力的减小引起割线模量的衰减。在长期循环荷载作用下，轴向应变主要由塑性应变组成，相比塑性应变，弹性应变可忽略不计。第 N 次循环的割线模量 E_N ：

$$E_N = \frac{\Delta\sigma'}{\varepsilon_N^a} = \frac{q_d - u_N}{\varepsilon_{cp, N}^a + \varepsilon_{ce, N}^a} \cong \frac{q_d - u_N}{\varepsilon_{cp, N}^a} \quad (5)$$

式中， $\Delta\sigma'$ 为动偏应力达到峰值 q_b 时轴向有效应力的增加量， u_N 为动偏应力达到峰值 q_b 时的循环累加孔压， $\varepsilon_{cp, N}^a$ 为第 N 次循环累积轴向塑性应变， $\varepsilon_{ce, N}^a$ 为第 N 次循环轴向弹性应变。

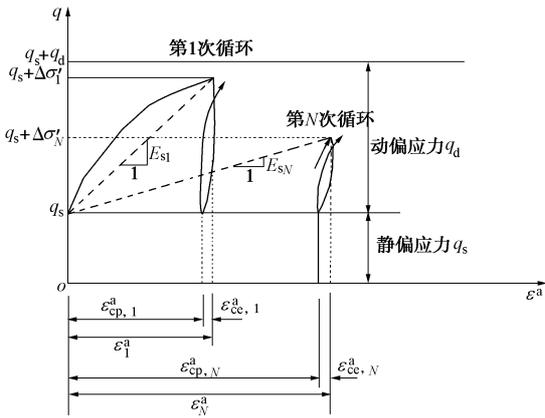


图3 不排水条件下饱和软黏土受循环荷载时的割线刚度衰减
Fig. 3 Degradation of secant modulus under cyclic loading in undrained triaxial tests

刚度衰减模型第一次由Idriss等^[13]提出，用软化指数 δ_d 来表示第 N 次与第一次循环中土体的剪切模量之比，并给出了软化指数与循环次数之间的关系指数表达式，即

$$\delta_d = \frac{G_N}{G_1} = N^{-d} \quad (6)$$

式中， d 为软化参数。

其后，Yashuhara等^[14]通过对粉土的研究，建立了软化指数与循环次数之间的半对数关系；王军等^[15]、黄茂松等^[16]通过对饱和软土提出各自的软化指数经验公式。但是前人的研究均针对单个应力应变滞回环中剪切模量的割线模量，而且并未考虑循环累积孔压的影响。本文结合已有的研究结果，提出刚度衰减模型的新的计算公式，即

$$\delta_d = \frac{E_N}{E_1} = \frac{(q_d - u_N) / \varepsilon_N}{(q_d - u_1) / \varepsilon_1} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_N} \frac{q_d - u_N}{q_d - u_1} = N^{-b} \left(\frac{m + n\sqrt{N}}{m + n} \right) \quad (7)$$

式中， b 、 m 和 n 均为试验常数，可通过室内循环三轴试验由Matlab程序中的最小二乘法曲线拟合工具拟合得到。对于上海地区饱和软黏土，分别取为0.148、1.109084和-0.01190。

计算土体在循环荷载作用下的累积变形，只要确

定了循环次数，及第一次循环应变，便可计算出在第 N 次循环时的等效变形模量 E_N ，及竖向有效应力增量 $\Delta q'_N$ ，根据广义胡可定律便可计算出在第 N 次循环荷载作用时的总的塑性应变 ε_N^p 。图4为循环累积变形与循环次数之间的关系曲线，其中，实线为刘明等^[11]的实测数据，虚线为本模型的预测曲线。从图中可以看出，随着循环次数的增加，本模型的预测曲线与试验曲线吻合程度较好。

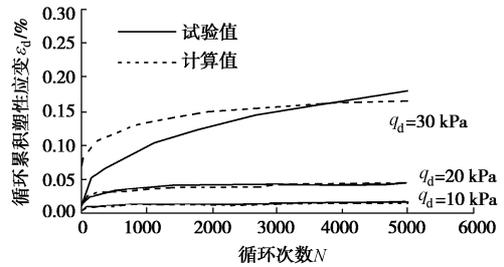


图4 循环累积塑性应变与循环次数关系曲线(围压为100 kPa)
Fig. 4 Relationship between cumulative plastic strain and number of cycles (confining pressure=100 kPa)

此模型一方面考虑了循环荷载作用下饱和软黏土中产生的孔压对土体软化的影响；另一方面建立了 N 次循环后的割线模量与第一次循环时割线模量的关系，不需要进行迭代计算，减小了计算量，便于工程应用。对于扰动后的土样， E_1 可由相同应力条件下的静三轴试验得到。对于未受扰动的土体可以采用初始状态的压缩模量。

4 某低路堤公路沉降计算

公路路面的长期沉降主要包括交通荷载在路基中引起的竖向动偏应力导致的塑性变形和动荷载引起的循环累积孔压消散产生的固结沉降。由于对循环动荷载作用后土体性状的研究较少，各项参数难以确定，因而本文主要介绍竖向动偏应力导致的塑性变形。

本节结合静力有限元计算和刚度衰减模型，来预测某低路堤公路在交通荷载作用下的循环累积沉降。首先利用ABAQUS有限元软件计算得到重力作用下土体初始竖向应力 σ_0 ，地应力平衡后，施加交通荷载的拟静力荷载，得到竖向应力 σ_d ， $\sigma_d - \sigma_0$ 即为各层土所受到的动偏应力 q_d 。再根据给定的循环次数和前面建立的经验拟合公式计算出 N 次循环后的刚度和有效动应力增量，最后利用分层总和法计算出竖向动偏应力导致的累积沉降。

4.1 有限元模型的确定

该低路堤公路的路面和路基材料参数见表1，地下水位在④层顶面，此外假设第①、②、③结构层和⑤粉砂在循环荷载下刚度保持不变，并无超静孔压产生。路面车辆荷载的确定参考《公路桥涵设计通用规

范》^[17], 采用汽—20级活载, 后轴重力为2×70 kN, 后轮着地面积为0.3 m×0.2 m, 荷载等效为均布矩形荷载, 大小为1166.67 kPa。

表 1 路面结构层和路基的材料参数

Table 1 Parameters of soils and pavement structural layers

层号	土体类型	厚度/m	重度/(kN·m ⁻³)	压缩模量/MPa	泊松比
①	混凝土面层	0.1	24.0	30000.0	0.20
②	二灰碎石基层	0.4	20.0	1400.0	0.20
③	素填土路基	1.0	18.0	18.0	0.25
④	淤泥质黏土	10.0	18.3	3.1	0.30
⑤	粉砂	12.0	19.4	11.2	0.25

考虑荷载在土中应力扩散和相互叠加效应, 建立三维模型, 长20 m, 宽20 m, 土层总厚度为23.5 m, ④、⑤层土密度采用有效密度。在距荷载中心径向距离越近处, 对网格进行加密处理。

4.2 竖向动偏应力 q_d

车辆荷载作用后土层的竖向应力与初始竖向应力的差值即为竖向动偏应力 q_d 。荷载中心点下的竖向动偏应力随深度的变化曲线如图5所示, 从图中可以看出, 动偏应力在路面结构层迅速减小, 这是由于路面结构层刚度远比路基的大, 荷载在结构层内扩散到更大的作用范围, 导致竖向动偏应力减小。

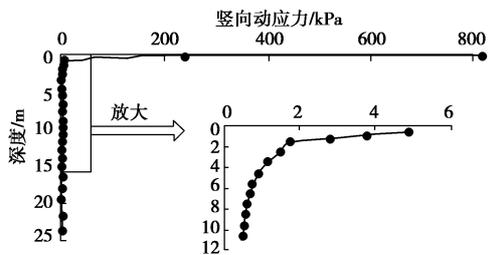


图 5 荷载中心点下竖向动偏应力随深度的变化曲线

Fig. 5 Variation of vertical additional dynamic deviator stress with depth

4.3 计算结果

根据有限元计算确定的竖向动偏应力 q_d , 基于已建立的循环荷载作用下非等向固结饱和软黏土的刚度衰减模型和有效应力计算公式求得 N 次循环后各层土的压缩模量 E_N 和有效应力增量 $\Delta\sigma'_N$, 利用分层总和法计算路面沉降。

图6为荷载中心点下深度为0 (即路面)、1.5 m和 5.5 m处的沉降随汽—20级荷载作用次数的变化曲线。从图中可知, 在交通荷载作用初期, 沉降迅速增加, 随后趋于稳定, 在5000次循环后沉降大约为1 cm。

图7为循环次数分别为1, 100, 1000, 2500和5000时荷载中心点下不同深度处的沉降。可以看出, 由于路面结构层的刚度很大, 其压缩量很小; 沉降主要由第④层淤泥质黏土产生, $N=5000$ 时, 其压缩量大约占总沉降量的94%; 由于土层中应力扩散, 第⑤层粉砂层受到很小的竖向动偏应力, 因而其压缩量也很小。因此, 在文中给定条件下, 交通荷载的有效影响深度约为路面下12 m。

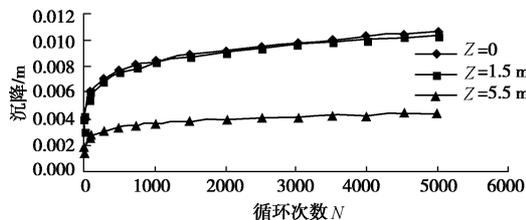


图 6 不同深度处沉降随循环次数的变化曲线

Fig. 6 Variation of settlement at different depths with number of cycles

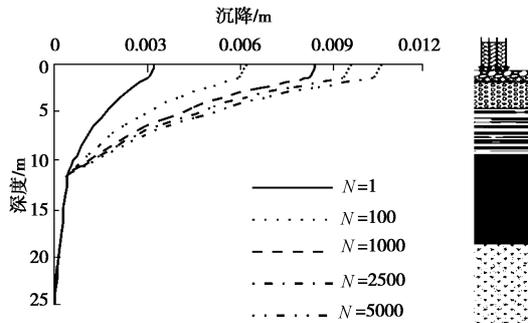


图 7 不同循环次数下沉降随深度的变化曲线

Fig. 7 Variation of settlement with depth after different cycles

5 结 论

针对车辆荷载作用下路面长期沉降问题, 将刚度衰减模型、有限元计算、分层总和法相结合, 提出考虑刚度衰减和超静孔压的循环累积沉降计算方法。

(1) 在现有试验结果的基础上提出考虑累积孔隙水压力的饱和软黏土刚度衰减模型及有效应力增量计算公式。但考虑的因素仍不全面, 需要进行不同土性、不同条件下的循环三轴试验, 以便对循环荷载下土的性质有更深入的研究。

(2) 考虑了路面结构层对车辆荷载的扩散作用, 利用 ABAQUS 有限元软件建立公路三维模型, 用来计算竖向动偏应力。

(3) 本文将饱和软黏土的刚度衰减模型和有效应力增量计算公式与分层总和法相结合, 计算交通荷载作用下土体塑性变形导致的路面沉降。计算结果表明: 路面沉降在车辆荷载作用初期迅速增长, 随后趋于稳定, 且沉降主要由饱和软黏土层的压缩引起。

(4) 由于动荷载作用后土的特性难以确定, 因而

循环荷载引起的循环累积超静孔压消散引起的固结沉降,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] YASUHARA K, HIRAO K, HYODO M. Partial-drained behaviour of clay under cyclic loading[C]// Proc 6th Int'l Conf on Numerical Methods in Geomechanics. Rotterdam: Balkema, 1988: 659 - 664.
- [2] 凌建明, 王伟. 行车荷载作用下湿软路基残余变形的研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版. 2002, **30**(11): 1315 - 1320. (LING Jian-ming, WANG Wei. On residual deformation of saturated clay subgrade under vehicle load[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2002, **30**(11): 1315 - 1320. (in Chinese))
- [3] HYODO M, YASUHARA K, MURATA H. Deformation analysis of the soft clay foundation of low embankment road under traffic load[C]// Proc 31st Symposium of Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering. 27-32. (in Japanese).
- [4] FUJIKAWA K. On optimistic design of low embankment road on soft subsoil by considering the traffic-load-induced settlement[D]. Saga: Saga Univ, 1996. (in Japanese)
- [5] KUTARA K, MIKI H, MASHITA Y, et al. Settlement and countermeasures of the road with low embankment on soft ground[J]. Tech Rep of Civil Eng, JSCE, **22**(8): 13 - 16. (in Japanese).
- [6] LI D, SELIG E T. Method for railroad track foundation design. II: Application[J]. J Geotech Geoenviron Eng, **124**(4): 323 - 329.
- [7] JIN Chun Chai, MIURA N. Traffic-load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. J Geotech Geoenviron Eng. 2002, **128**: 907 - 916.
- [8] MONISMITH C L, OGAWA N, FREEME C R. Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading[J]. Transport Research Record, 1975, **537**: 1 - 17.
- [9] LI D, SELIG E T. Resilient modulus for fine-grained subgrade soils[J]. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 1994, **120**(6): 939 - 957.
- [10] CHAI J C, MIURA N, et al. Traffic—load-induced permanent deformation of road on soft subsoil[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2002, **128**(11): 907 - 916.
- [11] 刘明, 黄茂松, 柳艳华. 车振荷载引起的软土越江隧道长期沉降分析[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(11): 1703 - 1709. (LIU Ming, HUANG Mao-song, LIU Yan-hua. Analysis for long-term settlement of tunnel across river induced by vehicle operation[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(11): 1703 - 1709. (in Chinese))
- [12] 黄茂松, 姚兆明. 循环荷载下饱和软黏土的累积变形显式模型[J]. 岩土工程学报, 2011, **33**(3): 325 - 331. (HUANG Mao-song, YAO Zhao-ming. Explicit model for saturated clay behavior subjected to cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, **33**(3): 325 - 331. (in Chinese))
- [13] IDRIS I M, DOBRY R, SING R D. Nonlinear behavior of soft clays during cyclic loading[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 1978, **V104**, 1427 - 1447.
- [14] YASUHARA K, HYDE A, TOYOTA N, et al. Cyclic stiffness of plastic silt with an initial drained shear stress[C]// Proceedings of the Geotechnique Symposium in Print on Prefailure Deformation Behavior of Geomaterials. London, 1998: 371 - 382.
- [15] 王军, 蔡袁强, 徐长节. 循环荷载作用下饱和软黏土应变软化模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2007, **26**(8): 1713 - 1719. (WANG Jun, CAI Yuan-qiang, XUN Chang-jie. Study on strain softening model of saturated soft clay under cyclic loading[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2007, **26**(8): 1713 - 1719. (in Chinese))
- [16] 黄茂松, 李帅. 长期往复荷载作用下近海饱和软黏土强度和刚度的弱化特性[J]. 岩土工程学报, 2010, **32**(10): 1491 - 1498. (HUANG Mao-song, LI Shuai. Degradation of stiffness and strength of offshore saturated soft clay under long-term cyclic loading[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, **32**(10): 1491 - 1498. (in Chinese))
- [17] JTG D60—2004 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2004. (JTG D60—2004 General specifications for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press, 2004. (in Chinese))

(本文责编 胡海霞)