

加筋土挡土墙水平位移研究

杨广庆¹, 周敏娟², 张保俭¹

(1. 石家庄铁道学院 土木工程分院, 河北 石家庄 050043; 2. 石家庄铁路职业技术学院, 河北 石家庄 050041)

摘要: 视加筋土挡土墙为一粘结重力式挡土墙来考虑, 受到墙后土压力作用时会产生水平位移, 其大小是加筋土挡土墙墙面水平位移的重要组成部分。本文将加筋土挡土墙墙体等效成各向异性的弹性体, 视为 L 宽度的悬臂梁, 当受到墙背水平土压力三角形荷载作用时, 分别计算纯弯曲和纯剪切两种情况下的水平位移。通过理论计算与工程实例测试结果比较, 验证了该方法的正确性。

关键词: 土力学; 加筋土挡土墙; 各向异性; 土压力; 水平位移

中图分类号: TU 472.3

文献标识码: A

文章编号: 1000-6915(2005)07-1248-05

STUDY ON THE HORIZONTAL DEFORMATION OF REINFORCED RETAINING WALLS OF SOILS

YANG Guang-qing¹, ZHOU Min-juan², ZHANG Bao-jian¹

(1. School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China;

2. Shijiazhuang Railway Engineering Vocational and Technical College, Shijiazhuang 050041, China)

Abstract: A new method of calculating the horizontal deformation of the reinforced retaining walls is proposed. Assuming that the reinforced soil retaining wall acts as a coherent block, just like the situation of a conventional retaining wall under the horizontal earth pressure backfill material. The reinforced soil retaining wall is taken as an equivalent anisotropic elastic medium and all the elastic properties are derived. During calculating the horizontal deformation of the reinforced soil retaining wall, the reinforced soil block as a cantilever beam is assumed. The horizontal deformation of the cantilever beam is calculated for pure bend and pure shear modes. The design method is proved to be correct, as compared with testing data.

Key words: soil mechanics; reinforced soil wall; anisotropic; earth pressure; horizontal deformation

1 引言

加筋土挡土墙水平位移的控制是确保墙体内、外部稳定的重要措施, 近年来, 越来越受到国内外学者的关注。一般而言, 加筋土挡土墙墙面的水平位移可能来源于图 1 中的 5 个区域, 即 A 区——主动

区; B 区——锚固区; C 区——加筋土挡土墙墙后土体; D 区——地基土; E 区——面板。大多数的研究主要集中于对墙面整体水平位移的分析与计算^[1-6]。而实际上加筋土挡土墙墙面产生水平位移的主要原因有拉筋的拉伸特性和蠕变特性、拉筋与土的相对位移、面板与拉筋连接点的位移、柔性面板的位移、刚性面板的平移或旋转、加筋土挡土墙

收稿日期: 2003-11-08; **修回日期:** 2003-01-02

基金项目: 铁道部建设司资助项目(铁建技字 2002-1)

作者简介: 杨广庆(1971-), 男, 1993 年毕业于石家庄铁道学院铁道建筑系铁道工程专业, 现为博士研究生、教授, 主要从事岩土工程方面的教学和科研工作。E-mail: gtsyang@163.com.

墙体的水平位移和外部荷载的作用等等^[6]。

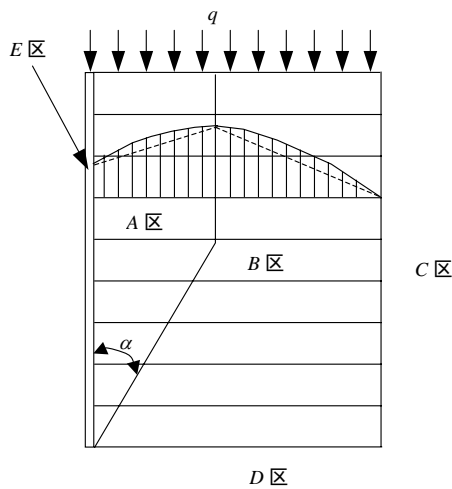


图 1 加筋土挡土墙的水平位移来源
Fig.1 Sources and zones of deformation

加筋土挡土墙墙体水平位移作为墙面水平位移的重要组成部分，在计算时一般将其作为一粘结重力式挡土墙来考虑。文[7]将水泥土挡土墙简化为竖直放置的弹性地基梁，按荷载函数处理作用于挡土墙上的土压力，继而建立水泥土挡土墙挠曲变形的微分方程；文[8]把水泥土挡土墙当作刚性桩，把地基当作线弹性体，同时考虑挡土墙的空间作用计算其水平位移；文[9]按照“m”法对水泥土搅拌桩挡土的侧向位移进行了计算；文[10]把加筋土结构视为均质横等向的复合体，基于 Kelvin 粘弹性模型确定了加筋土结构的本构关系。本文提出了一种视加筋土挡土墙墙体为各向异性的弹性体，基于悬臂梁的假定，计算在其后填土三角形分布水平土压力作用下，承受纯弯曲和纯剪切作用时的水平位移的新方法。

2 加筋土挡墙等效的各向异性弹性体

加筋土挡土墙是由每层相互交替的拉筋和土体组成的复合体。当假定层间界面为水平时，就每层材料而言，水平方向上是均质的、各向同性的连续介质，且拉筋和土体的弹性模量和泊松比分别为 E_r, ν_r 和 E_s, ν_s 。在基于各向异性弹性体的假定条件下，加筋土挡土墙可等效成如图 2 所示的系统。假定 E_v 为弹性体竖直方向的弹性模量， E_h 为水平方向的弹性模量， G_v 为竖直平面内由剪切应变引起的剪切模量， G_h 为水平面内由剪切应变引起的剪切模量， ν_{hz} 表征弹性体由于 h 方向水平应力引起的 z 方向水平应变时对应的泊松比， ν_{hv} 表征弹性体由于 h 方向水平应力引起的 v 方向竖向应变时对应的泊松比， ν_{vh}

表征弹性体由于 v 方向竖向应力引起的 h 方向水平应变时对应的泊松比。

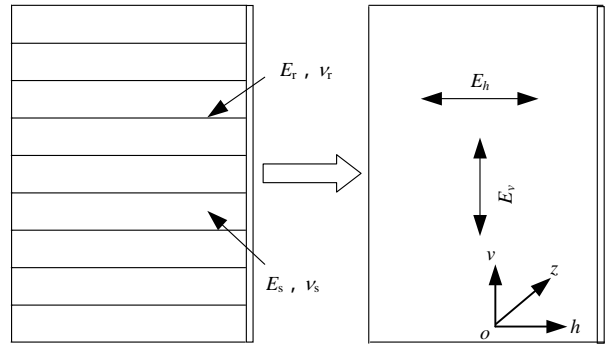


图 2 加筋土结构理想的各向异性系统
Fig.2 Idealized anisotropic system of reinforced soil mass

3 各向异性加筋土挡土墙的弹性特征

设加筋土挡土墙墙高为 S ，每层拉筋厚度为 s ，加筋土挡土墙中拉筋厚度比 t 可表示为

$$t = \frac{\sum s}{S} \quad (1)$$

3.1 求解 E_h 和 ν_{hz}

假定加筋土挡土墙在水平方向上是均质的、各向同性的连续介质，如图 3 所示。由广义虎克定律可得

$$\delta \varepsilon_h = \frac{\delta \sigma_h}{E_h} - \nu_{vh} \frac{\delta \sigma_v}{E_v} - \nu_{zh} \frac{\delta \sigma_z}{E_h} \quad (2)$$

$$\delta \varepsilon_v = \frac{\delta \sigma_v}{E_v} - \nu_{hv} \frac{\delta \sigma_h}{E_h} - \nu_{zv} \frac{\delta \sigma_z}{E_h} \quad (3)$$

$$\delta \varepsilon_z = \frac{\delta \sigma_z}{E_h} - \nu_{vz} \frac{\delta \sigma_v}{E_v} - \nu_{hz} \frac{\delta \sigma_h}{E_h} \quad (4)$$

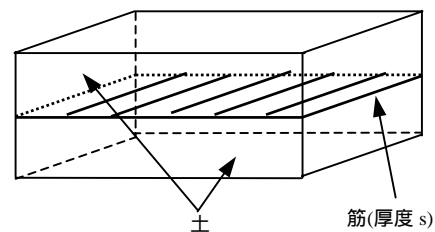


图 3 加筋土结构计算图示
Fig.3 Schematic diagram for calculation of reinforced soil mass

同理：

$$\delta \varepsilon_{hr} = \frac{\delta \sigma_{hr}}{E_r} - \nu_r \frac{\delta \sigma_{vr}}{E_r} - \nu_r \frac{\delta \sigma_{zr}}{E_r} \quad (5)$$

$$\delta\varepsilon_{hs} = \frac{\delta\sigma_{hs}}{E_s} - \nu_s \frac{\delta\sigma_{vs}}{E_s} - \nu_s \frac{\delta\sigma_{zs}}{E_s} \quad (6)$$

式中：下标 s, r 分别代表土体介质和拉筋介质。

考虑到加筋土单元 3 个方向上的应力分布情况，其垂直方向的应力增量 $\delta\sigma_v = 0$ 。根据平面应变条件有 $\delta\varepsilon_z = 0$ ，且 $\delta\varepsilon_h = \delta\varepsilon_{hs} = \delta\varepsilon_{hr}$ 。

因此，

$$\delta\sigma_z = \nu_{hz} \delta\sigma_h, \quad \delta\sigma_{zr} = \nu_r \delta\sigma_{hr}, \quad \delta\sigma_{zs} = \nu_s \delta\sigma_{hs} \quad (7)$$

根据式(1)和图 3 可得

$$\delta\sigma_h = t\delta\sigma_{hr} + (1-t)\delta\sigma_{hs} \quad (8)$$

$$\delta\sigma_{hs} = \frac{E_s(1-\nu_{hz}^2)}{E_h(1-\nu_s^2)} \delta\sigma_h \quad (9)$$

$$\delta\sigma_{hr} = \frac{E_r(1-\nu_{hz}^2)}{E_h(1-\nu_r^2)} \delta\sigma_h \quad (10)$$

因此，

$$E_h = \left[\frac{(1-t)E_s}{1-\nu_s^2} + \frac{tE_r}{1-\nu_r^2} \right] (1-\nu_{hz}^2) \quad (11)$$

同理可得

$$\delta\sigma_z = t\delta\sigma_{zr} + (1-t)\delta\sigma_{zs} \quad (12)$$

$$\delta\sigma_z = t\nu_r \delta\sigma_{hr} + (1-t)\nu_s \delta\sigma_{hs} \quad (13)$$

将式(7), (9), (10)带入式(13), 有

$$\nu_{hz} = \left[\frac{t\nu_r E_r}{E_h(1-\nu_r^2)} + \frac{(1-t)\nu_s E_s}{E_h(1-\nu_s^2)} \right] (1-\nu_{hz}^2) \quad (14)$$

由式(11), (14)有

$$\nu_{hz} = \frac{\frac{t\nu_r E_r}{1-\nu_r^2} + \frac{(1-t)\nu_s E_s}{1-\nu_s^2}}{\frac{(1-t)E_s}{1-\nu_s^2} + \frac{tE_r}{1-\nu_r^2}} \quad (15)$$

3.2 求解 ν_{hv} , ν_{vh} 和 E_v

由于

$$\delta\varepsilon_{vs} = \frac{\delta\sigma_{vs}}{E_s} - \nu_s \frac{\delta\sigma_{hs}}{E_s} - \nu_s \frac{\delta\sigma_{zs}}{E_s} \quad (16)$$

$$\delta\varepsilon_{vr} = \frac{\delta\sigma_{vr}}{E_r} - \nu_r \frac{\delta\sigma_{hr}}{E_r} - \nu_r \frac{\delta\sigma_{zr}}{E_r} \quad (17)$$

所以，

$$\delta\varepsilon_v = -\frac{\nu_{hv}}{E_h} (\delta\sigma_h + \delta\sigma_z) \quad (18)$$

同理可得

$$\delta\varepsilon_{vr} = -\frac{\nu_r}{E_r} (\delta\sigma_{hr} + \delta\sigma_{zr}) \quad (19)$$

$$\delta\varepsilon_{vs} = -\frac{\nu_s}{E_s} (\delta\sigma_{hs} + \delta\sigma_{zs}) \quad (20)$$

又因

$$\delta\varepsilon_v = t\delta\varepsilon_{vr} + (1-t)\delta\varepsilon_{vs} \quad (21)$$

将式(7), (18)~(20)带入式(21)可得

$$\nu_{hv} = (1-\nu_{hz}) \left[\frac{(1-t)\nu_s}{1-\nu_s^2} + \frac{t\nu_r}{1-\nu_r^2} \right] \quad (22)$$

对于各向异性弹性体而言^[11]

$$\frac{\nu_{hv}}{E_h} = \frac{\nu_{vh}}{E_v} \quad (23)$$

同理可求出：

$$\frac{1}{E_v} = \frac{1-t}{E_s} \left(1 - \frac{2\nu_s^2}{1-\nu_s^2} \right) + \frac{t}{E_r} \left(1 - \frac{2\nu_r^2}{1-\nu_r^2} \right) + \frac{2\nu_{hv}^2}{(1-\nu_{hz})E_h} \quad (24)$$

3.3 求解 G_h 和 G_v

由图 3 可得

$$G_h = \frac{\tau_{hz}}{\gamma_{hz}} = \frac{E_h}{2(1+\nu_{hz})} \quad (25)$$

$$\frac{1}{G_v} = \frac{\gamma_{hv}}{\tau_{hv}} = \frac{t\gamma_r + (1-t)\gamma_s}{\tau_{hv}} \quad (26)$$

$$\tau_{hv} = \tau_s = \tau_r \quad (27)$$

故

$$\frac{1}{G_v} = \frac{2t(1+\nu_r)}{E_r} + \frac{2(1-t)(1+\nu_s)}{E_s} \quad (28)$$

4 加筋土挡土墙墙体的水平位移

把加筋土挡土墙视为一粘结重力式挡土墙来考虑，其受到的墙后填土土压力分布形式为三角形分布，将加筋土墙体简化为悬臂梁，分别计算悬臂梁在三角形荷载作用下由于纯弯曲和纯剪切作用引起的水平位移^[6]。

4.1 三角形荷载作用下，只考虑纯弯作用时悬臂梁的水平位移

在三角形荷载作用下(图 4)，悬臂梁的挠曲线微分方程为

$$E_h I \frac{d^2 u_b(v)}{dv^2} = M(v) \quad (29)$$

$$M(v) = \frac{P}{6H} v^3 \quad (30)$$

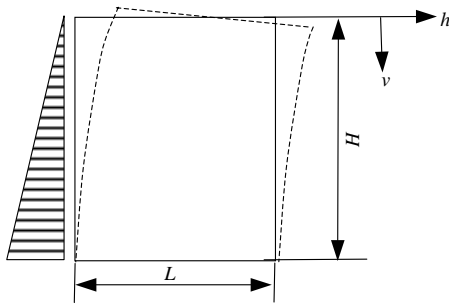


图 4 悬臂梁在纯弯作用下引起的水平位移

Fig.4 Cantilever beam with triangular loading in pure bending

式中： $u_b(v)$ 为水平位移； p 为水平力压力， $p = k_0\gamma H$ ， k_0 为静止土压力系数， γ 为加筋土墙体后填料的重量； H 为墙高。

将式(30)代入式(29)进行二次积分得

$$u_{h1}(v) = \frac{1}{E_h I} \frac{p}{6H} \frac{v^5}{20} + C_1 v + C_2 \quad (31)$$

由边界条件 $u_{h1}(v=H) = \frac{du_{h1}}{dv}(v=H) = 0$ ，有

$$C_1 = -\frac{1}{E_h I} \frac{p}{6H} \frac{H^4}{4}, \quad C_2 = \frac{1}{E_h I} \frac{p}{6H} \frac{H^5}{5}$$

故

$$u_{h1}(v) = \frac{1}{E_h I} \frac{p}{120H} (v^5 - 5H^4 v + 4H^5) \quad (32)$$

其中，

$$I = \frac{L^3}{12}$$

因此，

$$u_{h1}(v) = \frac{k_0\gamma}{10E_h L^3} (v^5 - 5H^4 v + 4H^5) \quad (33)$$

4.2 三角形荷载作用下，只考虑纯剪作用时悬臂梁的水平位移

距墙顶以下 v 处的剪应力(图 5)为

$$p(v) = \frac{p}{H} v \quad (34)$$

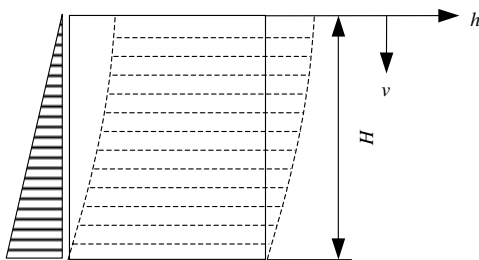


图 5 悬臂梁在纯剪作用下引起的水平位移

Fig.5 Cantilever beam with triangular loading in pure shear

如图 6 所示，取梁上一厚度为 dz 的微单元体分

析，根据静力平衡条件，有

$$\left[\tau(v) + \frac{d\tau(v)}{dv} dv \right] L - \tau(v)L - \frac{1}{2} [p(v) + p(v+d(v))] dv = 0 \quad (35)$$

有

$$\frac{d\tau}{dv} dv = \frac{1}{2L} \left[\frac{p}{H} v + \frac{p}{H} (v+dv) \right] dv \quad (36)$$

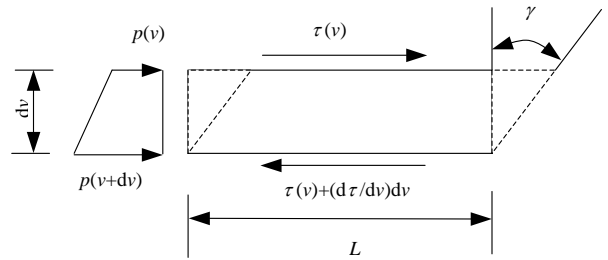


图 6 纯剪过程单元变形

Fig.6 Deformation of an element in shear

当 $dv \rightarrow 0$ 时

$$\frac{d\tau}{dv} = \frac{p}{HL} v \quad (37)$$

由剪切模量 $G_h = \frac{\tau}{\gamma}$ 可得

$$\tau = G_h \frac{du_{h2}}{dv} \quad (38)$$

故

$$\frac{d\tau}{dv} = G \frac{d^2 u_{h2}}{dv^2} = \frac{p}{HL} v \quad (39)$$

$$\frac{du_{h2}}{dv} = \frac{p}{2G_h LH} v^2 + C_1 \quad (40)$$

$$u_{h2} = \frac{p}{6G_h LH} v^3 + C_1 v + C_2 \quad (41)$$

将边界条件 $u_{h2}(v=H) = 0$ ， $\tau(v=H) = \frac{pH}{2L}$ 代入式(38)，(40)，(41)可得

$$C_1 = 0 \quad C_2 = -\frac{pH^2}{6G_h L}$$

故

$$u_{h2} = \frac{k_0\gamma}{6G_h L} (H^3 - v^3) \quad (42)$$

因此，在墙后填土水平土压力作用下，基于纯弯和纯剪作用引起的加筋土挡土墙墙体的水平位移为

$$u_h = u_{h1} + u_{h2} =$$

$$\frac{k_0\gamma}{10E_h L^3} (v^5 - 5H^4 v + 4H^5) + \frac{k_0\gamma}{6G_h L} (H^3 - v^3) \quad (43)$$

5 算 例

加拿大某海岸加筋土挡土墙长 99 m ,高 5.3 m ,筋材采用坦萨 SR2 HDPE 土工格栅,自墙底至上垂直间距逐渐增大,长期设计强度为 21.5 kN/m ;面板为高 1.5 ~ 2.0 m、宽 3.0 m 的预制混凝土面板;墙体及墙后填料为碎石土,有效内摩擦角 $\varphi' = 30^\circ$,重度 $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$ 。该墙自 1985 年 8 月施工,竣工后观测了不同时期的墙面,墙后土体的水平位移及土工格栅的应变。计算时取 $t = 0.004$, $E_r = 100 \text{ MPa}$, $\nu_r = 0.15$, $E_s = 56 \text{ MPa}$, $\nu_s = 0.25$,计算得 $E_h = 56.2 \text{ MPa}$, $\nu_{hz} = 0.25$, $G_h = 22.5 \text{ MPa}$ 。图 7 中分别列出了实测墙体后土体的水平位移和计算值,两者结果相差很小,结果显示该方法可较好的计算出加筋土挡土墙墙体的水平位移^[12]。

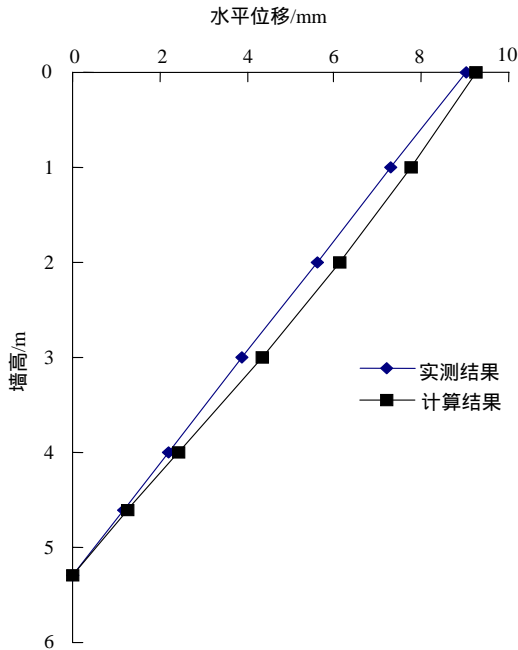


图 7 加筋土墙体水平位移实测结果与计算结果

Fig.7 The test and calculation data of horizontal deformation of the reinforced soil block

6 结 语

加筋土挡土墙是一种柔性挡土结构物,容易产生较重力式挡墙等其他挡土结构过大的位移。这一位移必须严格控制在工程所允许的范围之内,一方面不影响结构的正常使用,另一方面保证不会导致结构的整体失稳。影响加筋土挡土墙墙面水平位移的因素很多,其中加筋土挡土墙墙体的水平位移是一重要的组成部分。本文将加筋土挡土墙墙体简化为各向异性的弹性体,视作 L 宽度的悬臂梁,当受

到墙背水平土压力三角形荷载作用时,分别计算纯弯曲和纯剪切 2 种情况下的水平位移,结合一工程现场实测验证了该方法的可靠性。

参考文献(Preferences) :

- [1] 杨国林. 现代加筋土技术应用与研究进展[J]. 力学与实践, 2002, 24(1) : 9 - 17.(Yang Guolin. Research progress on reinforced earth[J]. Mechanics in Engineering, 2002, 24(1) : 9 - 17.(in Chinese))
- [2] 杨 明, 吴德伦. 加筋挡墙侧向变形分析模型[J]. 土木工程学报, 2001, 34(5) : 68 - 71.(Yang Ming, Wu Delun. A model for lateral displacement of reinforced soil retaining wall[J]. China Civil Engineering Journal, 2001, 34(5) : 68 - 71.(in Chinese))
- [3] 杨广庆, 蔡 英, 苏 谦. 高路堤加筋土挡土墙的变形和受力研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2) : 321 - 326.(Yang Guangqing, Cai Ying, Su Qian. A study on deformation and strength of high embankment reinforced earth retaining walls[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2) : 321 - 326.(in Chinese))
- [4] Ho S K, Rowe R K. Predicted behaviour of two centrifugally modeled soil walls[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1994, 120(10) : 1 845 - 1 873.
- [5] Kerry R, Rowe, Ho S K. Horizontal deformation in reinforced soil wall[J]. Canada Geotechnical Journal, 1998, 35 : 312 - 327.
- [6] Chew S H. Deformation Behavior of Reinforced Soil Walls[Ph. D. Thesis][D]. U. S. A. : University of California, 1994. 59 - 66.
- [7] 许福贵, 张建新, 刘利民. 水泥土挡墙位移的计算方法[J]. 工业建筑, 1997, 27(8) : 36 - 40.(Xu Fugui, Zhang Jianxin, Liu Limin. DCM bulkhead displacement calculation method[J]. Industrial Construction, 1997, 27(8) : 36 - 40.(in Chinese))
- [8] 李巨文, 张能奎, 顾晓鲁. 水泥土挡墙位移的实用计算方法[J]. 工业建筑, 1998, 28(5) : 9 - 13.(Li Juwen, Zhang Nengkuai, Gu Xiaolu. Applied method in calculating displacement of cement-stabilized soil retaining wall[J]. Industrial Construction, 1998, 28(5) : 9 - 13.(in Chinese))
- [9] 季冲平, 何金华, 胡晓锋. 水泥土搅拌桩挡墙的侧向位移分析与计算[J]. 铁道标准设计, 1999, (3) : 27 - 31.(Ji Chongping, He Jinhua, Hu Xiaofeng. Analysis and calculating of lateral displacement of cement-stabilized soil retaining wall[J]. Railway Standard Design, 1999, (3) : 27 - 31.(in Chinese))
- [10] 张友葩, 方祖烈, 高永涛. 基于均质横等向条件下加筋土的本构关系[J]. 中国矿业, 2001, 10(5) : 74 - 76.(Zhang Youpa, Fang Zulie, Gao Yongtao. The constitutive relation of reinforced soil under the homogenized transversely isotropic model[J]. China Mining, 2001, 10(5) : 74 - 76.(in Chinese))
- [11] Salamon M D G. Elastic moduli of a stratified rock mass[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mineral Sciences, 1968, (5) : 519 - 527.
- [12] Berg R R, La Rochelle P, Bonaparte R, et al. Casper peninsula reinforced soil seawall-case history[A]. In : Proceeding of Soil Improvement—A 10-Years Update[C]. Atlantic City : Geotechnical Engineering, ASCE, 1987. 309 - 328.