

文章编号: 1000-7598-(2003) 04-0661-05

海堤工程软基土工布加筋的抗滑作用分析

陈善民¹, 周洪峰², 孟松兔¹, 骆晓明³

(1. 浙江工业大学建工学院, 杭州 310032; 2. 浙江大学岩土工程研究所, 杭州 310027; 3. 浙江省钱塘江管理局, 杭州 310016)

摘 要: 克服了现有的堤坝稳定分析法只能计及土工布的拉力对海堤抗滑稳定的有利作用(荷兰法或瑞典法), 而对于土工布与土体的界面摩阻力所产生的有利作用不能有效地计入的弱点, 结合具体工程的原型观测结果分析, 提出了利用土工布加固堤坝的弹性薄膜理论进行有限差分计算, 编制程序计算了土工布拉力以及与土界面摩阻力的实际分布及其对海堤稳定的影响。并以瑞安市飞云江北岸标准海堤工程为例进行了计算分析, 认为土工布与土界面摩阻力比土工布的拉力对海堤抗滑稳定安全系数的提高作用更大。

关 键 词: 土工布; 加筋; 海堤工程; 稳定分析

中图分类号: TU 472.3⁺4 **文献标识码:** A

Stability analysis of seawall built on soft subgrade reinforced by geotextile

CHEN Shan-min¹, ZHOU Hong-feng², Meng Song-tu¹, LUO Xiao-ming³

(1. Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China; 2. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

3. Management Bureau of Qiantang River of Zhejiang Province, Hangzhou 310016, China)

Abstract: Only the pull of geotextile can be considered by the current analysis method of seawall stability. The influence of the friction between geotextile and soil on the seawall stability is ignored. In this paper, a new method to calculate the practical distribution of the friction and the pull of geotextile based on the elastic membrane theory and the finite difference method is developed. The field observation result is considered simultaneously in this method. Furthermore, the effects of the friction and the pull of geotextile on the seawall stability are discussed. A conclusion that the friction between geotextile and soil contributes more to the seawall stability than the pull of geotextile, is got.

Key words: geotextile; reinforcement; seawall; stability analysis

1 引 言

现行规范的土工布加筋软基稳定分析法是在传统圆弧滑动分析的基础上, 考虑土工布设计抗拉力所提供的抗滑力矩。对于该抗滑力矩的计算方法, 又可分为瑞典法(刚性法)和荷兰法(柔性法)。但是采用现行的软基稳定分析法, 对于加筋与未加筋情况, 所得的安全系数 $K_{\min}$ 相差无几, 考虑土工布产生的抗滑力矩后, $K_{\min}$ 只提高小数点后第 2 位, 与施工后堤坝稳定性的实际提高有很大的不符, 这已成为工程界的共识。

为从理论上解决这一难题, 已有学者在这方面作了些研究工作。刘吉福和龚晓南^[1]提出了一种考

虑土工布与地基土摩阻作用的稳定分析法。该法认为, 摩阻力的存在对地基的应力状态有很大的影响, 将该摩阻力作为一种外荷载, 用有限元方法计算地基中的附加应力, 再施加到传统圆弧滑动法的地基土条重上计算 $K_{\min}$ 。该法分析时必须同时使用有限元方法和圆弧滑动法, 使分析过程过于繁复, 不便于使用。徐少曼^[2]认为文献[1]中假定的土工布与土的界面摩阻力沿堤底的分布形式值得商榷, 并假定土工布与土的摩阻力分布的两种形式, 即三角形分布和梯形分布, 同时还考虑了加筋垫层的应力扩散作用, 提出了一种新的加筋软基稳定分析法。徐少曼^[3]还探讨了堤坝下软基土工织物的允许抗拉强度确定方法, 认为在确定堤坝下软基加筋土工布的允

收稿日期: 2002-08-27

基金项目: 浙江省教育厅纵向科研项目(20020141)。

作者简介: 陈善民, 男, 1969 年生, 博士, 讲师, 主要从事岩土工程方面的研究。

许抗拉强度时,应根据两条原则:一是以土工布的允许应变控制,采用应变法;二是应以堤坝允许土工布产生的应变来控制,而不是仅考虑土工布所能提供的拉力确定。从上述土工布加筋软基稳定分析的研究现状来看,笔者认为还存在以下问题值得探讨:

(1) 土工布与土的界面摩阻力的合理分布形式,以往的研究都是假定某种分布形式,而这种假定尚缺少实测结果的支持;

(2) 土工布在稳定分析中所发挥的拉力一般是取土工布的允许抗拉强度,而事实上土工布的拉力沿堤坝横向并不是均匀分布的,稳定分析中最危险滑弧和土工布的交点处往往不是土工布拉力最大值所在之处。

本文针对上述问题,结合瑞安市飞云江北岸标准海堤工程的原型观测结果分析,运用土工布加固堤坝的弹性薄膜理论及其有限差分解法,编制了程序计算土工布和土界面摩阻力以及土工布拉力的实际分布,在此基础上对海堤工程软基土工布加筋的抗滑作用进行了分析。

2 弹性薄膜理论及其在海堤工程应用

应用弹性薄膜理论时,由于堤坝都是长度尺寸远大于横断面尺寸的,可以作为平面应变问题来考虑。求解的问题为:

$$\begin{cases} \frac{\partial N_x}{\partial x} + F_x = 0 \\ N_x \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + q = 0 \\ N_y = \mu N_x \\ \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 = \frac{1 - \mu^2}{E_t} N_x \end{cases} \quad (1)$$

式中 N_x , N_y 分别为土工布在 x (沿堤坝横向), y (沿堤坝纵向) 方向单位宽度的拉力, u , w 分别为土工布沿 x 方向的水平位移和沿 z 方向的沉降。求解时假设地基反力满足温克勒 (winkler) 假设,并且土工布是线弹性材料。

在实际工程中,土工布受到的竖向荷载 q 一般是上部填土重量与地基反力的合力,即:

$$q = P - kw \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} F_x &= F_{1x} + F_{2x} \\ F_{1x} &= f_1 P \\ F_{2x} &= f_2 kw \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中 P 为填土荷载; k 为地基反力系数; F_{1x} 为由填土重量产生的上界面摩擦力; F_{2x} 为由地基反力产

生的下界面摩擦力; f_1 为填土与土工布上界面之间的摩擦系数; f_2 为地基土与土工布下界面之间的摩擦系数。

由于摩擦系数 f_1 , f_2 并不是常量,因此,在进行数值求解时,摩擦系数用下式表示:

$$f = \begin{cases} \frac{\Delta}{\Delta_{\max}} f_{\max} & (\Delta \leq \Delta_{\max}) \\ f_{\max} & (\Delta > \Delta_{\max}) \end{cases}$$

$$\Delta = \int_0^x \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 - \frac{1 - \mu^2}{E_t} N_x \right] dx \quad (4)$$

式中 Δ 为土与土工布之间的相对位移, E_t 为土工布的模量,取 $f_{\max} = \tan \varphi$ (φ 为土的内摩擦角); $\Delta_{\max}$ 根据经验取为 6 mm。

在上面由 4 个方程组成的方程组中,未知数 N_x , w , N_y , u 也是 4 个。因此,引入适当的定解条件便可以解出全部的未知数。经仔细分析,先解式

(1) 中前两个方程求出 N_x , w 以后,便可以求出 N_y , u , 无需联立求解。

现在再讨论求解方程组的定解条件。由于在推导过程中已经假设了摩擦力的方向是沿 x 轴的正方向,因此坐标原点选在摩擦力方向改变的点上。一般认为摩擦力的方向在沿 z 方向的沉降最大点处改变方向。故有以下定解条件 (两端自由):

$$\begin{aligned} \text{当 } x=0, \quad \frac{\partial w}{\partial x} &= 0, \quad u=0 \\ \text{当 } x=L, \quad N_x &= 0, \quad w=P/k \\ \text{由 } \frac{\partial N_x}{\partial x} + f_1 P + f_2 kw &= 0 \text{ 可见, } N_x \text{ 是 } w \text{ 的函数,} \end{aligned}$$

且摩擦系数 f_1 , f_2 并不是常量,这就使方程组呈非线性,目前,尚无解析方法来求解这类方程组。为求解这一方程组,将方程组用差分形式离散后,采用牛顿法来进行迭代求解,具体过程从略。

对于断面形状对称的路堤等,在堤轴线两侧,土工布和土的摩阻力都是向轴线的,亦即其方向相反,在轴线处为零,在该点摩阻力改变方向。海堤断面一般都是非对称的,故土工布和土摩阻力的零点一般不在堤轴线处,稍有偏移,因此,需通过试算确定其位置。从式 (1) 可以看出, k 的取值对方程组解答结果的影响是很大的,而 k 一般按经验取值,有较大的误差。在本文中,通过对实际工程的沉降观测结果的反分析来确定 k ,即通过寻求目标函数 J 的极小值来求得 k :

$$J = \sum \left(\frac{w_i}{S_i} - 1 \right)^2 \rightarrow \min \quad (5)$$

式中 S_i 表示沉降实测值; w_i 为 k 取一定值时的数

值计算得到的沉降计算值。

3 土工布加筋作用对海堤稳定影响分析

本文用有效应力的瑞典圆弧滑动法进行稳定分析, 以替代容重法来考虑渗流对海堤稳定的影响^[4], 以荷兰法来考虑土工布的拉力, 计算简图如下。

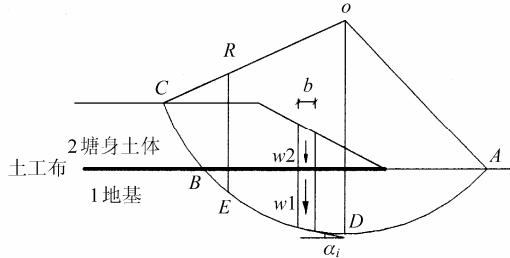


图1 抗滑安全系数计算简图

Fig. 1 Sketch for calculation of safety factor of sliding stability

为分别研究土工布的拉力与摩阻力对海堤稳定的影响, 可以分以下3种工况分别计算。

(1) 不考虑土工布的拉力与摩阻力 在该情况下, 其抗滑稳定安全系数计算公式为^[4]:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^B (c_{1i} L_{1i} + W_{1i} \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{1i} + W_{2i} \bar{U}^1 \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{cu})}{\sum_{i=1}^B (W_{1i} + W_{2i}) \sin \alpha_{1i} + \sum_{i=1}^C W_{2i} \sin \alpha_{2i}} + \frac{\sum_{i=1}^C (c_{2i} L_{2i} + W_{2i} \cos \alpha_{2i} \tan \varphi_{2i})}{\sum_{i=1}^B (W_{1i} + W_{2i}) \sin \alpha_{1i} + \sum_{i=1}^C W_{2i} \sin \alpha_{2i}} \quad (6)$$

式中 K 为抗滑稳定安全系数; W_i 为土条重量; $\bar{U}^1$ 为修正后地基土的平均固结度; α_i 为滑弧圆心垂线与通过条块底面中点的半径夹角; W_{1i} , W_{2i} 为第 i 土条地基部分和塘身部分的重量; c_{1i} , φ_{1i} , c_{2i} , φ_{2i} 为第 i 土条地基土和塘身土的不排水强度指标; φ_{cu} 为地基土的固结不排水剪内摩擦角。

(2) 只考虑土工布拉力 采用荷兰法计算模型, 假设在滑弧面上, 土工布产生与滑弧面相适应的扭曲, 土工布的拉力方向与滑弧相切, 其抗滑稳定计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^B (c_{1i} L_{1i} + W_{1i} \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{1i} + W_{2i} \bar{U}^1 \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{cu})}{\sum_{i=1}^B (W_{1i} + W_{2i}) \sin \alpha_{1i} + \sum_{i=1}^C W_{2i} \sin \alpha_{2i}} + \frac{\sum_{i=1}^C (c_{2i} L_{2i} + W_{2i} \cos \alpha_{2i} \tan \varphi_{2i}) + S}{\sum_{i=1}^B (W_{1i} + W_{2i}) \sin \alpha_{1i} + \sum_{i=1}^C W_{2i} \sin \alpha_{2i}} \quad (7)$$

式中 S 为滑弧和土工布交点处单位宽度土工布拉力, 其它参数与式 (6) 相同。为计算方便, S 的取值可以是土工布的允许抗拉强度。而事实上, 土工布的拉力沿海堤横向不是均匀分布的, 因此, 可以以土工布与滑弧的交点处的计算拉力作为土工布拉力 S 的值。

(3) 同时考虑摩阻力和土工布的拉力 土工布与土上、下界面均有摩擦力, 计算时取其合力 $F = F_1 + F_2$ 来考虑, 其中 F_1 , F_2 由前述弹性薄膜理论求得, 而不是假设其分布形式。该合力作用于土条的中部, 需将其移置到土条底面中点处, 并用一个附加力矩 Fh 来补偿, h 是 F 由土条中部到土条底面中点处的平移距离 (见图2)。

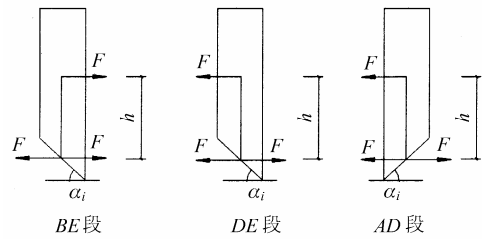


图2 摩阻力的移置

Fig. 2 Displacing the position of the friction

在图1中, E 点表示摩擦力改变方向的位置, 该点的横坐标可由所编制的程序求出, OD 为一条竖直线, 在 D 点两侧土条底面倾角改变方向。分三段进行考虑: (1) 对于 BE 段, 附加力矩 Fh 是抗滑力矩, 而两个分力 $F \sin \alpha_i$ 和 $F \cos \alpha_i$ 都对抗滑不利 (其中 $F \sin \alpha_i$ 将减小法向力, 从而导致抗滑力的降低, $F \cos \alpha_i$ 将使滑动力增大); (2) 对于 DE 段, 附加力矩 Fh 为滑动力矩, 而两个分力 $F \sin \alpha_i$ 和 $F \cos \alpha_i$ 都对抗滑有利 (其中 $F \sin \alpha_i$ 将增大法向力, 从而导致抗滑力的增大, $F \cos \alpha_i$ 将使滑动力减小); (3) 对于 AD 段, 附加力矩 Fh 为滑动力矩, 两个分力中, $F \sin \alpha_i$ 对抗滑不利 (减小法向力), $F \cos \alpha_i$ 对抗滑有利 (减小滑动力)。综合上述各种情况, 其抗滑稳定安全系数计算公式为:

$$K = \frac{\sum_{i=1}^B J + \sum_{i=1}^B K + \sum_{i=1}^A L + \sum_{i=1}^D M + \sum_{i=1}^E N + SR}{\sum_{i=1}^B O + \sum_{i=1}^B P + \sum_{i=1}^E Q + \sum_{i=1}^E T + \sum_{i=1}^A U + \sum_{i=1}^A N} \quad (8)$$

式中 $J = (c_{2i} L_{2i} + W_{2i} \cos \alpha_{2i} \tan \varphi_{2i}) R$;

$K = (c_{1i} L_{1i} + W_{1i} \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{1i} + W_{2i} \bar{U}^1 \cos \alpha_{1i} \tan \varphi_{cu}) R$;

$$L = F_i \cos \alpha_i R; M = F_i \sin \alpha_i \tan \varphi_{cu} R; N = F_i h_i$$

$$O = (W_{li} + W_{2i}) \sin \alpha_{li} R; P = W_{2i} \sin \alpha_{2i} R;$$

$$Q = F_i \cos \alpha_i R; T = F_i \sin \alpha_i \tan \varphi_{cu} R;$$

$$U = F_i \sin \alpha_i \tan \varphi_{cu} R;$$

F_i 为摩擦力的合力; S 的取值同式 (7); 其它参数同式 (6)。按上述方法考虑摩阻力的抗滑作用, 可以避免如文献[1]和文献[2]中所用方法带来的繁杂的计算。

4 工程分析

瑞安市飞云江北岸标准海堤一期工程位于浙江省瑞安市城关镇南门至东山下埠浦口, 全长 4 838m。海堤采用上部为空箱结构、下部为斜坡式的混合式海堤的结构型式, 在堤底铺设 200 kN/m 的超高强土工布一层, 地基打设塑料排水带进行处理。由于海底原地基为淤泥和淤泥质软土, 为了确保施工期间地基土体的稳定性, 保障海堤施工的正常进行, 共对 5 个观测断面的海堤施工全过程进行原型观测, 并在 0+780 和 1+360 两个主观测断面进行多项观测项目, 即地表沉降、孔隙水压力、分层沉降、水平位移、海堤浸润线、十字板抗剪强度对比测试等观测 [5]。本文以 0+780 断面为例进行计算分析, 按前述方法进行摩阻力和土工布拉力的计算, 计算结果如图 4~6 所示。

实际海堤的土工布铺设不是水平的, 为方便计算, 假设其为水平铺设。为保证土工布上的填土和抛石的重量即高度不变。经调整后的海堤横截面如图 3 所示。根据有关资料, 飞云江平均高水位为 6.17 m, 平均低潮位为 3.04 m, 内陆水位按 0.00 计。堤身填料强度指标选用如下 [6]: 堆石湿容重 $\gamma_{湿} = 19.0$ kN/m³, 浮容重 $\gamma_{浮} = 12.0$ kN/m³, $C = 0$, $\varphi = 38^\circ$; 填土在浸润线以上: $\gamma_{湿} = 18.0$ kN/m³, $C = 10$ kPa, $\varphi = 22^\circ$; 浸润线以下: $\gamma_{浮} = 9$ kN/m³, $C = 5$ kPa, $\varphi = 11^\circ$ 。

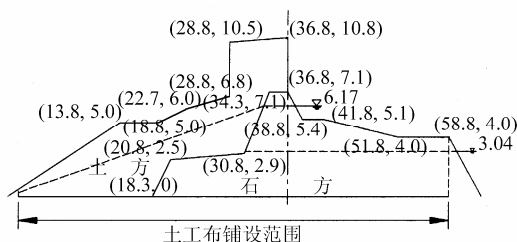


图 3 海堤横断面示意图

Fig. 3 The cross-section of the seawall

在进行沉降、土工布的拉力、土工布与土体的摩擦力计算时, 以原型观测结束、地基固结接近完成时的实测沉降值为准。从图 4 可以看出, 土工布拉力最大区域集中在堤轴线附近, 到堤趾处拉力为零。从图 5 可知, 摩擦系数在土工布的铺设长度方向 (沿海堤横向) 并非常数, 堤轴线附近的摩擦系数 f_1 与 f_2 均较小, 几乎为零, 在堤趾处达到最大值。理论上 f_1 、 f_2 能达到的最大值 $f_{1max} = 0.7813$, $f_{2max} = 0.404$, 但从图 5 可以看出, 实际 f_1 的发挥最大值为 0.392 8, f_2 的发挥最大值为 0.224 2, 分别仅占 f_{1max} 的 50.3%, f_{2max} 的 55.5%。

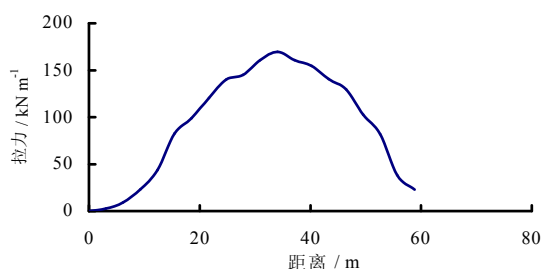


图 4 土工布拉力曲线

Fig. 4 The distribution of the pull of geotextile

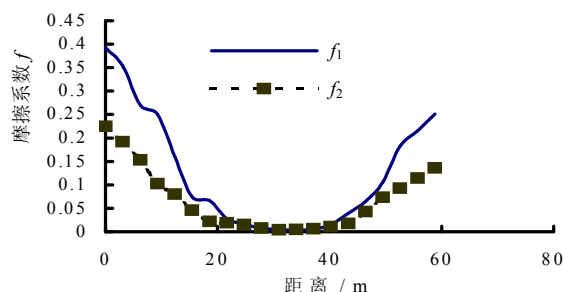


图 5 土工布与上下界面的摩擦系数

Fig. 5 The distribution of the friction coefficient between geotextile and the soil above and underside

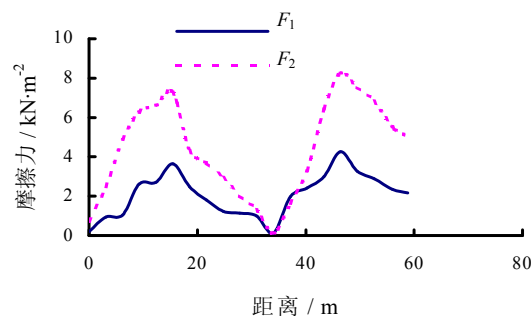


图 6 土工布与上下界面的摩擦力分布曲线

Fig. 6 The distribution of the friction between geotextile and the soil above and underside

由图6可见,土工布在堤轴线处和堤趾处的摩擦力几乎为零。

为计算方便,取考虑了土工布拉力的最小抗滑安全系数所在的滑弧为本文计算稳定所需的滑弧^[7],即假设计入摩擦力作用后,海堤稳定最小抗滑安全系数所在的滑弧保持不变。从前面的分析中,我们可以看到,土工布的拉力沿海堤横向不是均匀分布的。土工布与滑弧的交点 B 点处的拉力可从图4相应位置处查得。按前述方法,分三种工况进行计算。根据图4,得到 B 点处土工布拉力 $S=121.4$ kN/m。其它计算参数如下:取固结度 $U=90\%$;地基土($\gamma_{\text{浮}}=7.8$ kN/m³, $C=5$ kPa, $\varphi=5^\circ$);土工布上的土($C=5$ kPa, $\varphi=11^\circ$)。

对于工况(1),在不考虑土工布时,根据文献[7], $K_{\min}=1.121$;对于工况(2),取拉力值为土工布抗拉力的一半即100 kN/m时,根据文献[7], $K_{\min}=1.218$,比未考虑土工布时的 K 值提高了8.7%;取由程序计算所得的拉力 $S=121.4$ 作为拉力值,其 $K_{\min}=1.23$,比未考虑土工布时的 K 值提高了9.7%;对于工况(3),在考虑土工布的拉力和摩擦力时, $K_{\min}=1.346$,比未考虑土工布时的 K 值提高了20.1%。

可见,在考虑了土工布的拉力和摩擦力之后,海堤的抗滑稳定安全系数有了很大程度的提高,说明土工布对抗滑稳定有积极的作用,土工布与土体之间的摩阻力比土工布的拉力对海堤抗滑稳定安全系数的提高作用更大。

5 结论

(1) 土工布的拉力沿海堤横向是不均匀分布的,土工布与滑弧交点处的拉力应通过实际计算确定。

(2) 土工布与土的摩擦系数沿海堤横向并不

是常数,并且其实际发挥值远没有达到极限状态。

(3) 土工布的应用提高了海堤断面整体抗滑安全系数,考虑土工布的拉力和摩擦力,使计算分析更接近于实际情况,得到的安全系数明显大于未考虑时的安全系数,说明土工布对抗滑稳定有积极的作用。在不考虑土工布的拉力和摩擦力时,抗滑稳定安全系数 k 只有1.121;只考虑土工布的拉力,抗滑稳定安全系数 k 可达到1.23(提高了9.7%);既考虑土工布的拉力又考虑摩擦力,抗滑稳定安全系数 k 达到了1.346(提高了20.1%)。据此,我们可以知道,土工布与土的界面摩阻力比土工布的拉力对海堤抗滑稳定安全系数的提高作用更大。

参考文献

- [1] 刘吉福,龚晓南,王盛源.一种考虑土工织物抗滑作用的稳定分析方法[J].地基处理,1996,7(2):1-5.
- [2] 徐少曼,洪昌华.考虑加筋垫层的堤坝下软基稳定分析法[J].土木工程学报,2000,33(4):88-91.
- [3] 徐少曼.堤坝下软基加筋土工布的允许抗拉强度确定[J].岩土工程学报,1999,21(2):247.
- [4] 浙江省行业标准,浙江省海塘工程技术规定[S](下册).
- [5] “瑞安市飞云江北岸标准海堤工程”原型观测报告[R].天津:交通部第一航务工程勘察设计院,天津海陆岩土工程有限公司.1999.
- [6] 瑞安飞云江北岸标准海堤工程(南门~东山上埠浦口)初步设计报告[R].杭州:浙江省钱塘江管理局勘测设计院.1995.
- [7] 浙江省钱塘江管理局勘测设计院.超高强土工布在海塘工程设计中的应用[R].科技成果评审证书(浙水科鉴(99)第04号),1999.