

文章编号:1671-7619(2005)03-0019-05

深汕西高速公路浸水路段路基稳定性的评估

刘仕顺, 刘仰韶, 吕建兵

(广东交通集团检测中心, 广州 510800)

摘要:借助室内试验、可靠度分析和有限元技术,采用 Duncan - Chang 非线性本构关系,建立了土性参数随机场模型,对深汕西高速公路浸水路段路基的稳定性进行了评估。评估得出的结论与现场监测反馈的结果相一致,从而证实了采用非线性摄动随机有限元法评估浸水路段路基稳定性可靠度是可行的,可供今后类似的工程处理提供借鉴。

关键词: 高速公路; 浸水路段; 路基; 稳定性评估

中图分类号: U416.1

文献标识码: B

1 概述

深汕高速公路西段 K91 + 000 ~ K94 + 000 段为软土地基,路基长期处于干燥状态。2002 年,在该段路基的右侧修建了一个高尔夫球场,并在球场与路基之间修筑了一条水沟,使得路基长期受浸,改变了其原来的工作状态。由于路基主要由粉砂、粗砂等砂性土填筑而成,水沟水位上下波动变化时,路基中的地下水位也随之变化,使得路基长期处于浸水状态中,从而使浸水段路基土体的抗剪强度指标大为降低。在各种荷载尤其是车辆的动力荷载作用下,砂性土路基的状态将发生变化,可能对公路路面产生较明显的附加沉降,甚至影响路基的稳定性。为有效地做好预防性的养护工作,有必要对此浸水路段路基的稳定性进行评估。

针对该路段系修建在软土地基上的砂性土填筑体的特点,本文从试验研究、理论分析和计算模拟三方面进行,互相渗透和结合,从不同的角度、采用不同的方法进行试验和分析,成果相互印证。为了准确确定该段路基土的物理力学指标,选取了 3 个断面进行钻探。K92 + 200 钻孔柱状图如图 1 所示,并取有代表性的土层不同深度的原状砂土样和粘土样,在三轴仪中进行浸水湿化压缩实验,研究湿化后的变形模量 E_0 变化规律和强度变化规律。在对试验资料进行分析的基础上,建立了计算湿化变形的计算模式,并进行数值模拟计算,研究了浸水前后路基稳定性的变化规律,结合现场试验和监测资料的反演分析,验证了计算分析的正确性,从而对该高速公路浸水路段路基的稳定性进行了有效的评估。

2 试验工作

2.1 试验方法与内容

高速公路路基浸水时常常产生较大的变形,这种变形主要是由以下两方面的原因引起的:(1) 浸水部分土体的土骨架受到水的浮力,该部分土体的有效容重由天然容重变成了浮容重,填筑体有膨胀的趋势;(2) 浸水部分土体的变形模量和强度降低,使填筑体产生较大的湿化沉降和侧向位移,并引起填筑体应力变化。大量的资料表明,浸水后填筑体产生下沉,这表明湿化变形是相当可观的,不容忽视。由于三轴“单线法”试验工作量大,故本文采用三轴“双线法”进行湿化变形研究。三轴剪切仪由压力室、轴向加荷系统、施加周围压力系统、孔隙水压力量测系统等组成。

年代与成因	层号	厚度 (m)	层底深度 (m)	层顶深度 (m)	含水率 (%)	柱状图	土质描述	编号	深度 (m)	土质	深度 (m)
Q ⁴	1	0.05	0.05	-0.05	100		淤泥, 黑色。				
	2	4.00	3.95	-4.00	95.0		填土, 浅黄色、红褐色, 湿, 可塑—硬塑, 主要由花岗岩残积土组成, 遇水易崩解。0.05~1.50m 处少量粒径 1~3cm 的微风化岩块。	1	2.30~2.50		
	3	7.00	3.00	-7.00	91.0		粉砂, 深灰色, 饱和, 松散, 局部夹少量贝壳碎片。	2	2.70~2.90		
	4	9.50	2.50	-9.50	95.0		粗砂, 浅黄褐色, 饱和, 松散, 夹大量贝壳碎片。	3	5.30~5.50		
	5	10.0	0.50	-10.0	90.0		粉砂, 深灰色, 饱和, 松散。	4	5.70~5.90		
								5	8.30~8.50		
								6	8.70~8.90		

图 1 K92 + 200 钻孔柱状图

本次试验的主要内容是在三轴仪中对现场钻取的原状粘性土、粗砂与粉砂土样进行浸水湿化

三轴压缩试验,测得“湿样”的应力与附加湿化应变的关系参数,以便解决有限元分析中湿化附加应变和附加应力的问题。

2.2 试验结果分析

根据试验结果并运用三轴“双线法”得出了主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与有效主应力比 σ'_1/σ'_3 ,然后绘制主应力差 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 与轴向应变 ε_1 的关系曲线,有效主应力比 σ'_1/σ'_3 与轴向应变 ε_1 的关系曲线,分别如图2~图7所示。

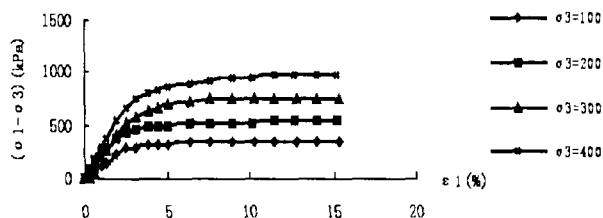


图2 粘性土饱和样主应力差与轴向应变关系曲线

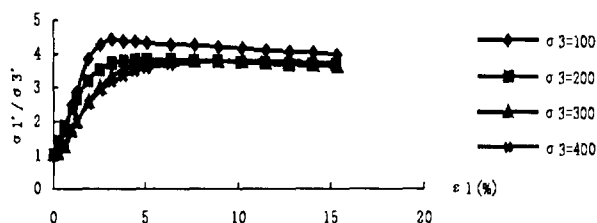


图3 粘性土饱和样有效应力比与轴向应变关系曲线

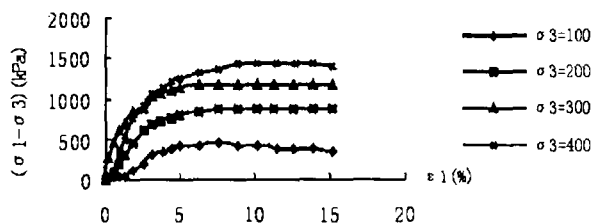


图4 粗砂饱和样主应力差与轴向应变关系曲线

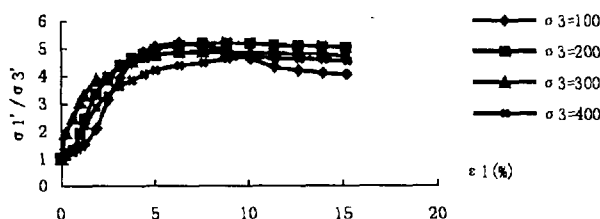


图5 粗砂饱和样有效应力比与轴向应变关系曲线

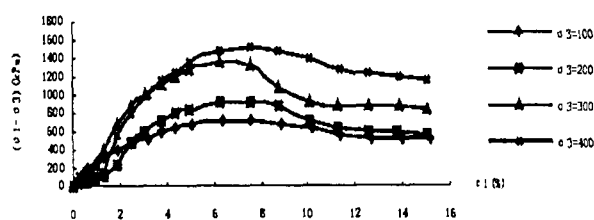


图6 粉砂饱和样主应力差与轴向应变关系曲线

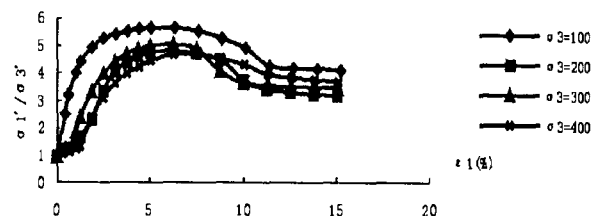


图7 粉砂饱和样有效应力比与轴向应变关系曲线

由图2~图7试验曲线可得出以下结论:

(1)粘性土干样、饱和样的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 无明显的峰值, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 随轴向应变 ε_1 的增加而增加,当 ε_1 超过10%时,其增幅很小。粘性土不排水剪切过程中,围压较小时体积有缩小的趋势(剪缩),产生正的孔隙水压力。较大围压及轴向应变较大时,粘土样中产生负值孔隙水压力(剪胀)。

(2)粉砂、粗砂的干样、饱和样的 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 有明显的峰值强度和较大变形时的终值强度(残余强度),粉砂和粗砂超过峰值强度以后强度降低与剪胀性相对应。当试样轴向应变 ε_1 较小(如小于3%~5%)时,土样中产生正的孔隙水压力,反之轴向应变增大形成剪切膨胀时,产生负的孔隙水压力。随着围压的增加,破坏时的轴向应变和体积应变也都加大,剪胀倾向减小。

(3)所有试样,随围压的增大, σ'_1/σ'_3 的峰值逐渐降低。

(4)所有试样湿化后, $(\sigma_1 - \sigma_3)$ 或 σ'_1/σ'_3 及变形模量均有所降低。

(5)所有试样 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \varepsilon_1$ 关系曲线,当最初两至三次读数,曲线较为平缓,变形模量较小。但第三至第四次读数以后,曲线坡度变陡,变形模量和强度增加较快。当轴向应变继续增大时,曲线坡度又趋于平缓,变形模量和强度几乎不变,甚至降低。

3 路基稳定性可靠度的非线性摄动随机有限元分析

高速公路浸水路段路基稳定性的评估仍然以有限元法为主。在有限元计算中考虑随机参数(随机物理参数和随机几何参数)对计算结果的影响,将可靠度分析与有限元技术结合起来,可以克服传统的有限元法解决非线性问题的不足。本文借助室内试验并采用非线性摄动随机有限元对深

汕西高速公路浸水路段路基整体稳定的可靠度指标进行了效果分析与评价。

3.1 本构模型和弹性矩阵的偏导矩阵

本文采用能较好反映土体变形特性的 Duncan - Chang 改进模型作为土的本构关系。 E_t 和 B_t 的表达式如下:

$$E_t = K \cdot Pa \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^n \times \left[1 - \frac{R_f(1 - \sin\varphi)(\sigma_1 - \sigma_3)}{2c \times \cos\varphi + 2\sigma_3 \times \sin\varphi} \right]^2 \quad (1)$$

$$B_t = K_b \times Pa \times \left(\frac{\sigma_3}{Pa} \right)^m \quad (2)$$

其中, $B_t = 1/3E_t \sim 17E_t$, $K, n, R_f, c, \varphi, K_b, m$ 为参数, 可以通过常规三轴排水剪切试验测定。对于土体的卸载一再加载情况, 可以用卸载一再加载的模量 E_w 来代替上式的 E_t 。

受随机土性参数的影响, E_t 和 B_t 也为随机变量。对于平面应变问题, 弹性矩阵 $[D]_t^e$ 关于 E_t 和 B_t 的一阶、二阶偏导数分别为:

$$\frac{\partial [D]_t^e}{\partial E_t} = \frac{1}{(9B_t - E_t)^2} \times \begin{bmatrix} 36B_t^2 & -18B_t^2 & 0 \\ -18B_t^2 & 36B_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 27B_t^2 \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\frac{\partial [D]_t^e}{\partial B_t} = \frac{1}{(9B_t - E_t)^2} \times \begin{bmatrix} 81B_t^2 - 18B_tE_t - 3E_t^2 & 81B_t^2 - 18B_tE_t + 3E_t^2 & 0 \\ 81B_t^2 - 18B_tE_t + 3E_t^2 & 81B_t^2 - 18B_tE_t - 3E_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & -3E_t^2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 [D]_t^e}{\partial E_t^2} = \frac{2}{(9B_t - E_t)^3} \times \begin{bmatrix} 36B_t^2 & -18B_t^2 & 0 \\ -18B_t^2 & 36B_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 27B_t^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 [D]_t^e}{\partial B_t^2} = \frac{1}{(9B_t - E_t)^3} \times \begin{bmatrix} 72E_t^2 & -36E_t^2 & 0 \\ -36E_t^2 & 72E_t^2 & 0 \\ 0 & 0 & 54E_t^2 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\frac{\partial^2 [D]_t^e}{\partial B_t \partial E_t} = \frac{1}{(9B_t - E_t)^3} \times \begin{bmatrix} -72B_tE_t & 36B_tE_t & 0 \\ 36B_tE_t & -72B_tE_t & 0 \\ 0 & 0 & -54B_tE_t \end{bmatrix} \quad (7)$$

E_t 和 B_t 与单元 e 的应力状态有关。不仅不同单元的 E_t 和 B_t 各不同, 即使对于同一单元, 随着荷载的不断变化, E_t 和 B_t 也在变化。因此 E_t 和 B_t 不满足平稳随机场的条件, 不能模拟为宽平稳随

机场, 但是可以选取 7 个参数 $K, n, R_f, c, \varphi, K_b, m$ 中的某些参数模拟为随机场。将分布参数 $K(x, y), K_b(x, y)$ 模拟为宽平稳随机场, 当随机场离散成随机变量后, 根据复合求导法则, 单元 e 的弹性矩阵 $[D]_t^e$ 关于随机变量 K_i, K_{bi} 的偏导数根据以上各式可以较容易地获得。

3.2 非线性摄动随机有限元分析程序

非线性摄动法随机有限元程序 NLPSFEM. FOR 能根据给定随机场信息, 自动进行类似的随机变量编号。计算步骤为:

(1) 划分有限元单元 (总数为 NE)、随机场单元网格, 根据随机场网格数目和随机场个数计算随机变量总数 N , 并对随机变量编号;

(2) 计算总数为 N 的随机变量自协方差矩阵 $[C_\alpha]_{N \times N}$;

(3) 将非线性递推方程组 (1) 分段线性化。在每级荷载增量 $\{\Delta P\}_i$ 下, 首先用“中点迭代法”计算第一个方程: 对有限元单元 $e = 1 \sim NE$ 循环, 组集 $[K]_0, \frac{\partial [K]}{\partial \alpha_j}|_0$ 和 $\frac{\partial^2 [K]}{\partial \alpha_j \partial \alpha_i}|_0$, 计算 $\Delta_i(\{u\}_0)$ 。根据计算结果组成第二、第三个方程的系数矩阵和右边“荷载”, 并求解该级荷载增量下结点位移偏导数 $\frac{\partial \{u\}}{\partial \alpha_i}, \{u\}_2$ 的增量;

(4) 当最后一级荷载增量作用结束时, 累加位移 $\{u\}_0, \frac{\partial \{u\}}{\partial \alpha_i}, \{u\}_2$ 的增量, 以及各单元的应力状态;

(5) 求出 $\{u\}_0$ 和 $\{u\}_2$ 后, 计算结点位移的均值 $E[\{u\}]$ 、结点位移协方差 $Cov(\{u\}, \{u\}^T)$;

(6) 对有限元单元 $e = 1 \sim NE$ 循环, 对于每个有限元单元再对随机变量 $L = 1 \sim N$ 进行循环, 求出各单元的 $E[\{\sigma\}^e], Cov(\{\sigma\}^{e1}, \{\sigma\}^{e2})$;

(7) 根据给定的极限状态函数和土体强度参数, 以及结点位移或应力的统计结果, 计算失效概率或可靠度指标。

3.3 有限元计算模型及参数

路基土所取范围为: 断面竖向为 27.4m, 水平为 52.0m。选取 K93 + 000 断面进行随机有限元计算。有限元网格设计时, 每一个单元只含一种土层 (材料), 路基中线为对称轴, Y 轴向上为正, X 轴设在路面以下 3.5m 处。随机场用任意四边形

局部平均随机场单元离散,共有 4 个随机场及 441 个随机场网格:砂土中共划分 357 个随机场网格,粘土中共划分 84 个随机场网格,随机场网格的划分如图 8 所示。

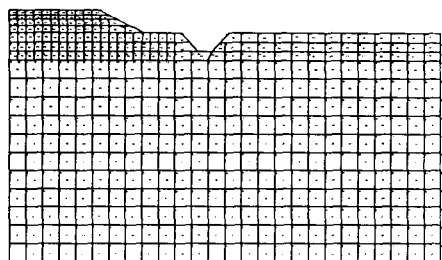


图 8 K93+000 断面随机场网格划分图

计算中考虑汽车一超 20 级荷载效应,按汽车队双排布置在路面的不同位置,考虑两种情况:

(1) 工况一,双排汽车队距路面中线 0.5m 布置;(2) 工况二,双排汽车队距路肩 1.5m 布置。作用在填土上的车辆荷载,近似地按均布荷载考虑,将车辆荷载换算成条状均布荷载 $q = 18\text{kPa}$ 。

对高速公路浸水路段路基稳定性随机有限元计算涉及的力学参数和强度参数有:模量数 K 、泊松比 ν 、容重 γ 、粘聚力 c 和内摩擦角 φ 。通过试验,确定了各土层非线性计算参数(均值 μ 、标准差 σ 、变异系数 δ),如表 1 所示,各随机场的 X 方向的波动幅度取为 $\theta_x = 10\text{m}$, Y 方向的波动幅度取为 $\theta_y = 6\text{m}$ 。

表 1 各材料的非线性参数

材料	容重 γ (kN/m^3)	摩擦角 φ ($^\circ$)	凝聚力 c (kPa)	破坏比 R_f	模量数 K	模量指数 n
填浸土水	μ 11.20	34.70	12.13	0.854	281.38	0.553
	σ	0.356	4.230	0.025	27.897	0.079
	δ	0.010	0.350	0.023	0.099	0.143
粗浸砂水	μ 10.90	37.90	22.07	0.711	922.367	0.551
	σ	2.287	0.737	0.048	73.602	0.044
	δ	0.060	0.033	0.067	0.080	0.080
粉浸砂水	μ 12.10	37.21	18.72	0.736	682.86	0.627
	σ	2.260	9.904	0.117	106.60	0.051
	δ	0.061	0.529	0.158	0.156	0.081

3.4 计算结果与分析

通过非线性摄动随机有限元模拟计算得出了深汕高速公路西段 K93+000 断面各工况下的滑

动面(如图 9 所示)。由图 9 及有限元计算结果可得出以下结论:

(1) 各单元的抗剪可靠度指标均大于 3.0,多数为 3.6,具有较高的可靠度水准,表明该路基不会因浸水而产生剪切破坏;

(2) 通过搜索(如图 9 所示),该路基浸水后,各种工况下,路基沿滑动面产生破坏的最小可靠度指标为:工况 1, $\beta_{\min} = 5.2192$, $r = 15.3108\text{m}$, 圆心坐标(19.2076, 37.7834); 工况 2, $\beta_{\min} = 5.3278$, $r = 15.3108\text{m}$, 圆心坐标(19.2076, 37.7834)。用随机有限元计算出边坡总体稳定性的可靠度指标 $\beta = 5.22 \sim 7.05$, 相对于上部结构的目标可靠度指标或浅基础的“校准”结果,路基整体稳定的可靠度指标较高,表明该路基浸水后整体滑动的可能性很小。

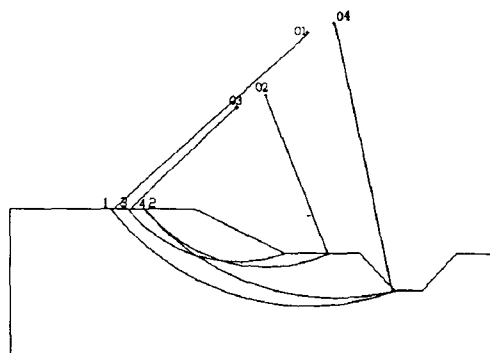


图 9 K93+000 断面各工况下滑动面

4 现场监测结果

为验证深汕西浸水段路基稳定性评估方法的正确性,对所取的三个断面 K92+200、K93+000 和 K93+800 进行了现场监测。浸水段路基横断面监测点布置如图 10 所示。监测过程中所用的主要设备为水准仪,通过水准仪对三个不同横断面的各个固定点进行高程测量,通过高程确定出各固定点的沉降值,用沉降值对该段路基的稳定性进行评定。该路段正常运营多年后,通过 2 年的现场监测得知,该段路基的 1 号、2 号、6 号与 7 号测点的沉降值均不大于 3mm,3 号、4 号与 5 号测点的沉降值均不大于 5mm。三个断面均出现了整体均匀沉降,但小于使路基保持稳定性的最大沉降允许值,表明该段路基浸水后整体滑动的可能性很小,不会因浸水而出现整体滑动,这与采用非线性摄动随机有限元法评估得出的结论相一致。

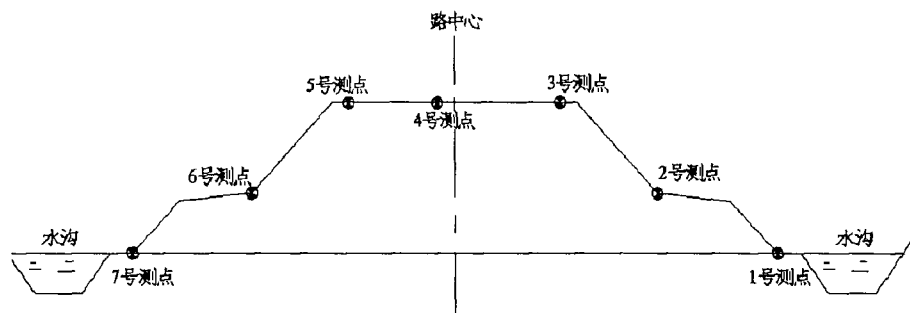


图 10 深汕西浸水路段路基横断面监测点布置图

5 结论

(1) 本文运用了非线性摄动随机有限元数值模拟分析程序, 将随机土性参数模拟为随机场, 建立了粘土样和砂土样的 Duncan - Chang 非线性本构关系, 运用了组集随机变量自协方差矩阵的算法;

(2) 选取了深汕西高速公路浸水路段路基有代表性的土层不同深度的原状砂土样和粘土样进行室内湿化变形试验, 对室内试验资料进行了分析, 运用了计算湿化变形的计算模式和方法, 借助室内试验准确确定了随机有限元的计算参数, 计算参数与现场实际情况相符;

(3) 本文从试验研究、理论分析和计算模拟三方面进行, 互相渗透和结合, 从不同的角度、采用不同的方法对该高速公路浸水路段的路基稳定性进行了客观评估。评估得出的结论与现场监测反馈的结果相一致, 从而验证了本文评估方法的正确性;

(4) 如何对高速公路浸水路段路基稳定性进行合理的评估是困扰工程技术人员的难题之一。

本研究证实, 采用非线性摄动随机有限元法评估浸水路段路基稳定性可靠度是可行的, 故可为今后类似工程中高速公路浸水路段路基稳定性评估提供借鉴。

参考文献:

- [1] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算 (第二版) [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1995.
- [2] 风家骥, 肖明, 韩永兴. 碧流河水库筑坝砂砾料湿化变形试验. 土的抗剪强度与本构关系学术讨论会论文集 [C]. 1985.
- [3] 陈慧远. 土石坝有限元分析 [M]. 南京: 河海大学出版社, 1988.
- [4] Nobari E S, Duncan J M. Movements in dams Due to Reservoir Filling. Proc. of Specialty Conf. on Performance of Earth and Earth - supported Structure [J]. 1972, Vol. 2: 797 - 815.
- [5] Nobari E S, Duncan J M. Effect of Reservoir Filling on Stresses and Movements in Earth and Rockfill Dams [R]. Report No. TE - 72 - 1, University of California, Berkeley, 1972.

(收稿日期: 2005 - 03 - 29)

Evaluation on Reliability of Roadbed Stability in Soaked Road of Western Section of Shenzhen to Shantou Highway

LIU Shi - shun, LIU Yang - shao, LV Jian - bing

(Testing Division, Guang - Dong Transportation Group Company, Guangzhou 510800)

Abstract: In this paper, the stability of soaked roadbed in western section of Shenzhen to Shantou highway is evaluated, which is based on lab tests, reliability analysis and Finite element technology and the Duncan - Chang non - linear constructive relation is applied to build random field model. The result fed back from the site monitoring agree with the evaluation, which has proved that it is feasible to evaluate reliability of the soaked roadbed stability by the nonlinear perturbation random finite element method. Therefore, the method can provide technical guidance for future works in this field.

Key words: Triaxial compression test, Soaked, Duncan - Chang model, random field, reliability, Evaluation of Stability