

文章编号: 1000-7598(2009)11-3352-05

不同固结条件下黏土数值化建模的研究

程涛¹, 晏克勤¹, 王靖涛²

(1. 黄石理工学院 土木建筑工程学院, 湖北 黄石 435003; 2. 华中科技大学 土木工程与力学学院, 武汉 430074)

摘要: 研究了不同初始固结压力条件对黏土本构关系的影响。进行了2组不同固结条件下的排水压缩试验, 即等压固结条件和 K_0 固结条件。采用数值建模方法, 以 $\bar{\epsilon}^p$ 和 ϵ_v^p 为硬化参数的双屈服面模型为框架, 通过对试验数据空间的反演获得两种不同初始条件下的黏土弹塑性本构关系, 并在整个应力场 (p', q) 可视化。将该数值模型嵌入有限元程序对三轴压缩试验进行数值模拟, 并与试验曲线及相同路径下的剑桥模型和 Duncan-Chang 模型关系曲线进行对比。结果表明, 数值建模方法有较好的容错性, 能很好地反映应力历史的影响, 能模拟真实应力路径。

关键词: 数值建模方法; 应力路径; 应力历史; 本构关系; 黏土;

中图分类号: TU 443

文献标识码: A

Study of numerical model for triaxial compression test on clay under different consolidation conditions

CHENG Tao¹, YAN Ke-qin¹, WANG Jing-tao²

(1. Department of Civil Engineering, Huangshi Institute of Technology, Huangshi 435003, China;

2. College of Civil Engineering & Mechanics, Huangzhong Univ. of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The effects of different initial stress states on the constitutive relations of clay are studied. With clay selected as test sample, two series of triaxial consolidation draining compression tests are performed under different consolidation conditions, isotropic consolidation and K_0 consolidation. Based on the tests under the two different initial consolidation conditions, the elastoplastic constitutive models which contain two yield surfaces of two relatively independent hardening parameters $\bar{\epsilon}^p$ and ϵ_v^p are derived by using numerical modeling method. The three-dimensional surfaces of the stress-strain relations in the whole stress field (p', q) are drawn through visualization. Moreover, the comparisons of the stress-strain relation curves with the simulated results obtained by the numerical model, Cam-clay model, Duncan-Chang hyperbolic model and from test data are made. It is shown that the numerical modeling method is reasonable, which can reflect the effects of stress paths and stress history.

Key words: numerical modeling method; stress path; stress history; constitutive relation; clay

1 引言

岩土介质是一种多相体摩擦型材料, 其力学性质比较复杂, 具有压硬性、剪胀性等力学特性, 且应力历史和应力路径以及土的结构性均对土的本构模型具有影响^[1-2]。

天然沉积黏土中的初始应力状态通常处于各向不等压固结状态, 即静止侧压力系数 $K_0 \neq 1$ 。初始应力状态以及应变的各向异性, 导致其强度和变形有差异, 反映在本构关系上会与等压固结条件下的本构关系有所不同, 而目前常用的本构关系多采用常规三轴压缩应力路径, 即在各向等压条件下固结后再进行剪切, 显然与天然沉积土 K_0 固结的实际初

始应力状态及应力路径不相符合。

目前已有一些学者^[3-4]对黏土应力路径的影响进行了研究, 得出一些重要结论, 但并未将应力路径的影响在黏土本构关系中定量地体现出来。针对上述情况, 笔者对黏土进行了 K_0 固结和等压固结两种初始条件下的三轴排水压缩试验, 采用数值建模方法^[5], 建立了黏土的弹塑性本构模型, 并将该模型与试验结果及传统双曲线模型等进行了对比分析。

2 试验分析

2.1 试样制备

以饱和黏土为试验对象, 本次试验采用武汉地区黏土, 其天然含水率为 28.53%, 孔隙比为 0.77,

收稿日期: 2008-01-30

基金项目: 湖北省教育厅优秀青年人才基金项目(No. Q200830002); 黄石理工学院科研基金重点项目(No.07yz03R)。

第一作者简介: 程涛, 男, 1975年生, 博士, 副教授, 主要从事岩土本构数值建模及数值仿真研究。E-mail: chtao_hust@163.com

平均干密度为 1.53 g/cm^3 , 塑性含水率为 28.18% , 饱和度接近 100% 。考虑到取土时难以避免的扰动影响, 以及由于不同取土位置原状土的力学物理指标存在差异性, 从而导致试验结果有一定的离散性。因此, 根据实测确定的风干含水率, 将所取的代表性原状土样制备成饱和含水率下均匀土样, 在击实器内分 5 层击实, 通过抽气饱和, 制备成试验用的重塑土样^[6]。试验时, 土样安装完毕后, 进行反压力饱和, 直至饱和度达到 99% 以上, 进行相应的三轴压缩试验。

2.2 三轴试验路径

在两种不同初始固结条件下分别进行三轴压缩试验: 一组是等压固结条件下三轴排水压缩试验, 另一组为 K_0 固结条件下的三轴排水压缩试验^[7], 系数 K_0 经过两次平行的排水三轴试验^[8]测定为 0.562 。两组试验路径如图 1 所示。在等压固结三轴压缩试验中, 先期固结压力分别为 $50 \sim 300 \text{ kPa}$, 每个试验的先期固结压力相差 50 kPa , 在该固结压力下维持到孔压消散至 95% 以上即认为固结过程完成, 可进行三轴压缩试验。与之类似, K_0 固结三轴压缩试验分为 6 组不同固结压力下的平行试验, 固结时逐级按比例施加轴压和侧压, 直至初始固结压力分别达到 $50 \sim 300 \text{ kPa}$ 为止。

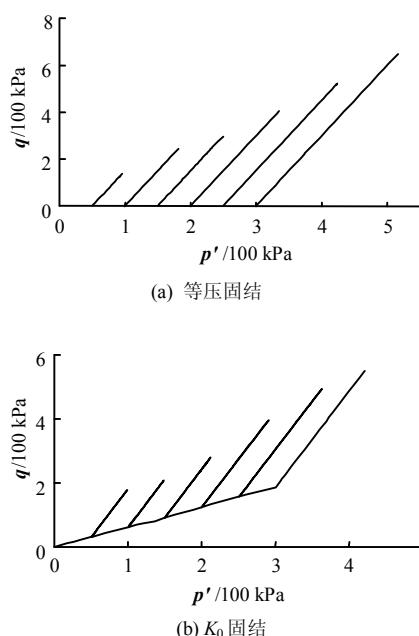


图 1 试验的应力路径

Fig.1 Stress paths of compression experiment

2.3 试验结果

图 2 为初始固结压力为 200 kPa 的两种不同路径下广义剪应力 q 与广义剪应变 $\bar{\epsilon}$ 的试验关系曲线。由图可以看出, 在不同应力历史条件下黏土的

应力-应变关系有一定的区别。加载初期, 等压固结条件下的剪应力增长稍慢。在加载后期, K_0 固结条件下的剪应变增长较等压固结条件快。最终, 等压固结条件下的剪应力峰值强度略高于 K_0 固结条件下的剪应力峰值, 这也表明应力历史、应力路径对土的本构关系的影响不可忽略。

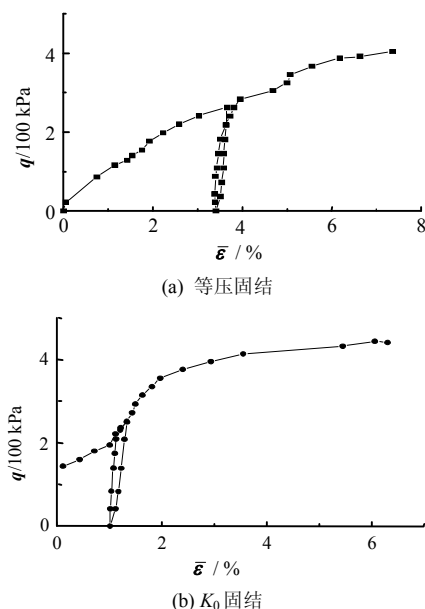


图 2 两种应力路径下 $q-\bar{\epsilon}$ 试验曲线
Fig.2 $q-\bar{\epsilon}$ curves of two paths

图 3 为初始固结压力为 100 kPa 条件下两种试验路径的 $p'-\bar{\epsilon}$ 试验曲线。可以看出, 平均主应力 p' 对剪应变产生影响。加载初期, 剪应变增长较慢, 随着 p' 逐渐增大到峰值, 剪应变的增长较初期更为明显。

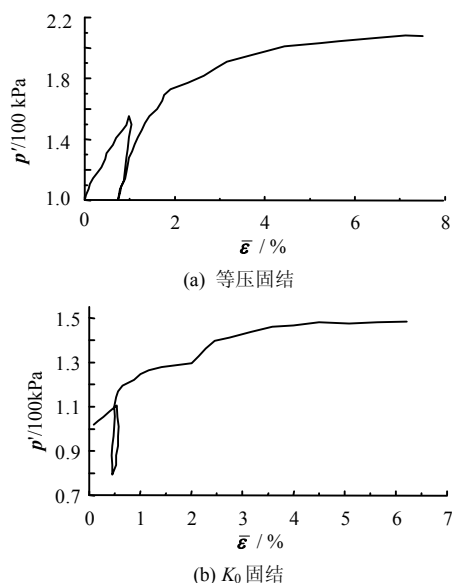
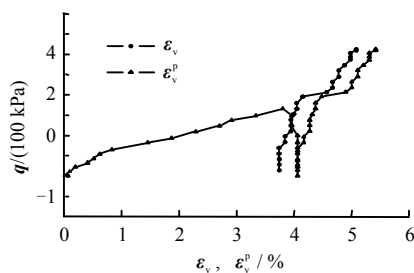
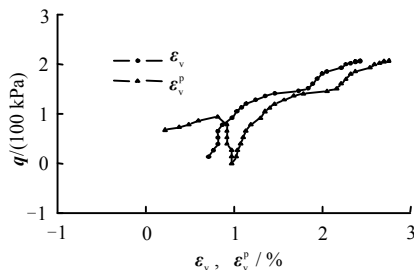


图 3 两种应力路径下 $p'-\bar{\epsilon}$ 试验曲线
Fig.3 $p'-\bar{\epsilon}$ curves of two paths

图 4 为初始固结压力为 100 kPa 下两种试验路径的 q - ε_v 试验曲线, 图中同时给出了再加载时的剪应力 q 与塑性体应变 ε_v^p 的关系曲线。图 4 明显表明, 无论在等压固结还是 K_0 固结条件下, 黏性土都有一定的剪胀性, 也就是随着广义剪应力 q 的增大 ε_v 也相应增大, 即发生体缩, 而在加载后期, 体缩逐渐变缓, 特别是等压固结条件下的试验曲线中甚至出现较微小的体胀。这可能是由于等向固结条件下, 侧压力及固结密实程度较 K_0 固结高, 更容易达到密实状态, 以至后期加载产生颗粒滑移导致体胀。图 3 和图 4 表明应力张量 p' 和 q 对应变张量 ε_v 和 $\bar{\varepsilon}$ 的交叉耦合作用是明显的。



(a) 等压固结条件下的 q - ε_v 试验曲线



(b) K_0 固结条件下的 q - ε_v 试验曲线

图 4 两种应力路径下 q - ε_v 试验曲线

Fig.4 q - ε_v curves of two paths

3 弹塑性模型

由于数值建模方法是直接从试验数据空间反演出本构关系及数值场, 因此, 建立的本构关系更能反映真实应力路径, 本文将采用数值建模方法分别建立上述两种试验路径下的本构关系。

根据上述试验特性, 考虑到黏土事实上存在的 2 个应力张量 p' 和 q 对应变张量 ε_v 和 $\bar{\varepsilon}$ 的交叉影响, 这里采用双屈服面分别描述以塑性体积应变 ε_v^p 和塑性广义剪应变 $\bar{\varepsilon}^p$ 为硬化参数的加工硬化过程, 直接通过试验确定的 ε_v^p 和 $\bar{\varepsilon}^p$ 等值线确定屈服轨迹, 并以此为加卸载判定标准^[5]。为了反映出上述交叉影响以及应力路径效应, 采用如下增量化模型

框架:

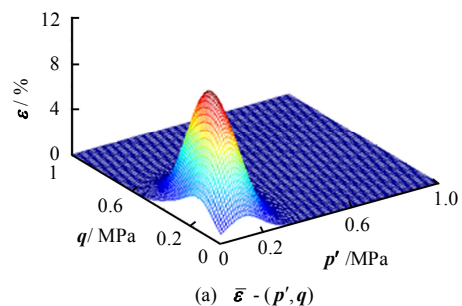
$$\left. \begin{aligned} d\varepsilon_v^p &= f_1(dp', dq) = \frac{\partial f_1}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f_1}{\partial q} dq \\ d\bar{\varepsilon}^p &= f_2(dp', dq) = \frac{\partial f_2}{\partial p'} dp' + \frac{\partial f_2}{\partial q} dq \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式 (1) 为非全微分式, 该方程的 4 个系数: $\partial f_1/\partial p'$ 、 $\partial f_1/\partial q$ 、 $\partial f_2/\partial p'$ 、 $\partial f_2/\partial q$ 均为应力状态量 (p' , q) 的函数, 由试验直接确定, 并随应力路径的不同而不同, 由此定量体现应力路径效应。根据试验数值直接反演^[2]得上述 4 个参变量函数, 如式 (2) 所示:

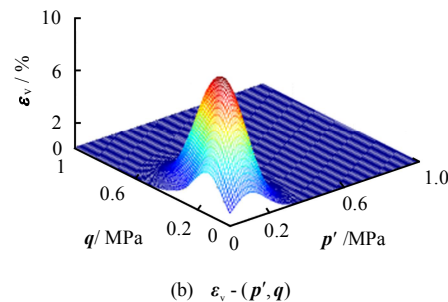
$$\frac{\partial f}{\partial (p', q)} = \sum_{i=1}^n w_i \sum_{j=1}^m \exp(-s((p'_i - p'_{j0})^2 + (q_i - q_{j0})^2)) \quad (2)$$

式中: $\partial f/\partial (p', q)$ 为待求的偏导数序列; p'_{j0} 和 q_{j0} 分别为模型空间网格中高斯核函数中心点对应的有效平均主应力值和广义剪应力值; p'_i 和 q_i 为按加密步长遍历模型空间获取的有效平均主应力值和广义剪应力, 本文步长加密为初始固结压力间距的 1/2; w_i 为各搜索步对应的权值; s 为根据反演精度要求确定的系数。

将偏导数序列代入式 (1), 即构成增量化的本构关系。用 Matlab 软件将本构关系数值场可视化, 如图 5 和图 6 所示。

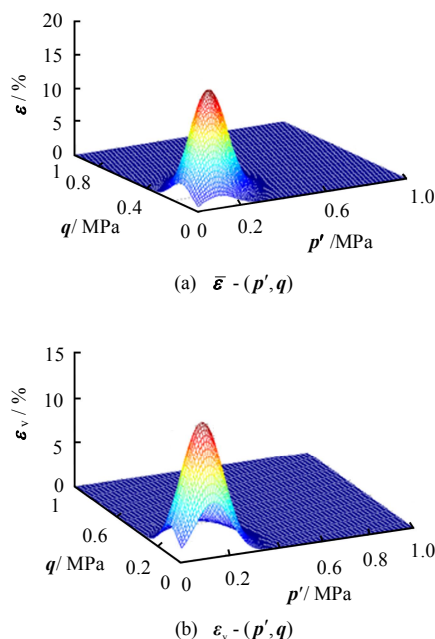


(a) $\bar{\varepsilon} - (p', q)$



(b) $\varepsilon_v - (p', q)$

图 5 等压固结条件下的 $\varepsilon - (p', q)$ 关系曲面
Fig.5 $\varepsilon - (p', q)$ relation surfaces on isotropic consolidation condition

图 6 K_0 固结条件下的 $\varepsilon - (p', q)$ 关系曲面Fig.6 $\varepsilon - (p', q)$ relation surfaces on K_0 consolidation condition

对比图 5 和图 6 可知, K_0 固结条件下的应力-应变曲面较等压固结条件下的应力-应变关系曲面更陡, 但极限应变值与等压固结条件相差不大, 这是由于等压固结条件比 K_0 固结条件下侧限更大, 导致变形受到较大约束所致, 说明初始固结条件的不同导致应力路径的差异, 并对本构关系产生不可忽略的影响。

4 算 例

为了检验本文本构模型的正确性, 将等压固结条件下得到的整个应力场 (p, q) 的本构模型嵌入到有限元计算程序, 对黏土试样 (高为 8 cm, 直径为 3.91 cm) 在等压固结条件下的三轴排水压缩试验进行数值模拟, 通过计算得到 $q-\varepsilon_1$ (轴向应变) 的关系曲线。同时将相应条件下的试验曲线与其对比, 并且将 Duncan-Chang 双曲线模型、修正剑桥模型分别模拟试验等压固结条件所得的关系曲线以及 K_0 固结条件下本文模型的计算曲线同时进行对比。图 7 显示了固结压力为 100 kPa 条件下的试验和计算曲线的对比。

通过对比可以看出, 采用本文获取的弹塑性本构关系能很好还原真实的试验关系曲线, 只是在加载的后期, 计算曲线与试验曲线有部分分离, 主要原因是试件临近破坏时读数不太稳定; 同时由于在有限元计算过程中采用了增量法, 也导致一定的计算误差累积, 但误差在较小的许可范围内。

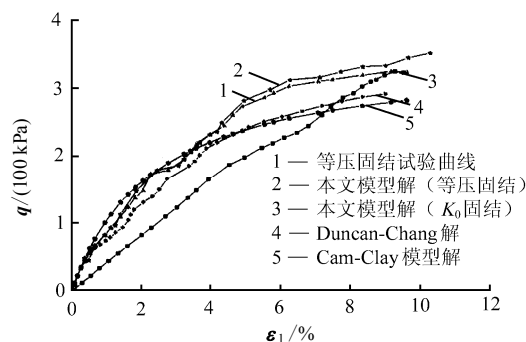


图 7 数值模拟与试验曲线对比

Fig.7 Comparison of observed value and calculated for stress-strain relation curves

由剑桥模型模拟的关系曲线可见, 在加载初期, 当应力比 q/p' 较小时, 应力-应变关系接近线形变化, 且计算的应变值明显偏大, 随后的增长速度减慢, 但最终的计算应变值及强度值都比真实值小。

虽然 Duncan-Chang 双曲线模型在加载初期与试验曲线和数值模拟曲线都比较接近, 但后期则产生一定的偏离, 这是由于 Duncan-Chang 双曲线模型是在等压固结的初始条件下获得的, 应力路径与本文模型相同, 但 Duncan-Chang 双曲线模型受初始弹性模量的影响较大, 而由于加载初期的读数不太稳定, 导致按 Duncan-Chang 模型计算的变形值与真实曲线有明显的偏离。这也反映了本文模型有较好的全局性和容错性, 不会因为个别实测数据的不稳定导致结果的不稳定。

通过本文方法获得两种不同路径下的弹塑性关系, 分别模拟对应路径下试验的曲线对比, 可以看出, 在 K_0 固结条件下应变增长较快, 且最终强度值比试验等压固结条件下的强度值略低, 这也说明, 应力历史、应力路径的影响是不可忽略的。

5 结 论

(1) 数值建模方法直接从试验得到的数据空间经过反演得到模型空间。克服了求取塑性势解析表达式的困难, 也避免了传统弹塑性本构关系中由于过多人为假定导致模型解析式包含一些不合理因素的问题。

(2) 数值建模方法能根据工程实际应力历史、应力路径的不同, 确定相应的试验路径, 并获得相应路径下的本构模型, 可以避免传统本构模型在特定路径下获得却用于其他应力路径下导致的误差, 能更好与工程实际结合。

(3) 本文的本构模型是针对黏土在等压固结和 K_0 固结试验两种初始条件下获得的, 也可以用该方

法获得不同土样在不同应力历史、应力路径下的本构关系。试验与计算对比表明,该模型容错性较好,不会因为局部试验数据的不稳定而导致最终结果产生较大差异。

(4) 初始固结条件对黏土的应力-应变关系影响不可忽略,等压固结条件下的强度比 K_0 固结条件下略大,且应变增长比 K_0 固结条件慢,但两种条件下的极限应变值差别不大。

(5) 按修正剑桥模型计算时,加载初期应变增长较快,最终应变值及强度值比真实值略小。

参考文献

- [1] 郑颖人,沈珠江,龚晓南. 岩土塑性力学原理[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2002: 9—11.
- [2] 程涛,王靖涛,晏克勤,等. 考虑应力路径的黏土弹塑性固结问题的耦合分析方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(2): 403—409.
CHENG Tao, WANG Jing-tao, YAN Ke-qin, et al. Coupling analysis method for elastoplastic consolidation of clay considering stress paths[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2008, 27(2): 403—409.
- [3] 程涛,王靖涛,晏克勤. 基于数值建模方法的弹塑性固

结问题解耦研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(3): 582—586.

CHENG Tao, WANG Jing-tao, YAN Ke-qin. Research of decoupling conditions for elastoplastic consolidation based on numerical modeling method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(3): 582—586.

- [4] 陈铁林,周成,沈珠江. 结构性黏土压缩和剪切特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2004, 26(1): 31—35.
CHEN Tie-lin, ZHOU Cheng, SHEN Zhu-jiang. Compression and shear test of structured clay[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2004, 26(1): 31—35.
- [5] CHENG TAO, WANG JINGTAO, YAN KEQIN. Digitalization modeling system for constitutive relation of geomaterial[J]. **Journal of China University of Mining and Technology**, 2006, 16(3): 338—343.
- [6] 南京水利研究院. SL237—1999, 土工试验规程[S]. 北京: 中国水利出版社, 1999.
- [7] ORTIGAO J A R. Soil mechanics in the light of critical state theories[M]. Rotterdam: Balkema A A, 1995: 164—166.
- [8] 朱思哲,刘虔,包承纲,等. 三轴试验原理与应用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003: 69—72.

上接第 3351 页

参考文献

- [1] 冯秀丽,戚洪帅,王腾,等. 黄河三角洲埋岛海域地貌演化及其地质灾害分析[J]. 岩土力学, 2004, 25(Supp.): 17—20.
FENG Xiu-li, QI Hong-shuai, WANG Teng, et al. Geomorphological evolution and geological disasters analysis in Chengdao sea area of the Yellow River Delta[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(Supp): 17—20.
- [2] 史文君. 波浪导致黄河口水下斜坡硬壳破坏过程研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2004.
- [3] 贾永刚,董好刚,单红仙,等. 黄河三角洲粉质土硬壳层特征及成因研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2029—2035.
JIA Yong-gang, DONG Hao-gang, SHAN Hong-xian, et al. Study of the character and formation mechanism of hard crust on the tidal flat of Yellow River Estuary[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2007, 28(10): 2029—2035.
- [4] 贾永刚,史文君,单红仙,等. 黄河口粉土强度丧失与恢复过程现场振动试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(2): 351—358.
JIA Yong-gang, SHI Wen-jun, SHAN Hong-xian, et al. In-situ test study on slit strength's loss and recovery dueto vibration load in the Yellow River Estuary[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2005, 26(2): 351—358.

- [5] 贾永刚,霍素霞,许国辉,等. 黄河水下三角洲沉积物强度变化原位测试研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(6): 876—881.
JIA Yong-gang, HUO Su-xia, XU Guo-hui, et al. Intensity variation of sediments due to wave loading on subaqueous delta of Yellow River[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2004, 25(6): 876—881.
- [6] 赵文哲. 埋岛海区浅表层地质特点分析[J]. 海岸工程, 2005, 24(4): 27—34.
ZHAO Wen-zhe. Analysis of geologic characteristics of shallow strata in Chengdao sea area[J]. **Coastal Engineering**, 2005, 24(4): 27—34.
- [7] 林缅. 波浪作用下粉土特性研究[J]. 中国科学(E 辑), 2001, 31(1): 86—96.
LIN Mian. Analysis of silt soil prosperities by water waves[J]. **Science of China(E)**, 2001, 31(1): 86—96.
- [8] CONLEY D C, INMAN D L. 1992 Field observation of the fluid-granular boundary lay under near-breaking waves[J]. **J. Geophy. Res.**, 1997, C6, 9631—9643.
- [9] LIN M, JENG D S. A 3-D model for ocean waves over a Columb-damping poroelastic seabed[J]. **Ocean Engineering**, 2004, 31: 561—585.
- [10] 王昌杰. 河流动力学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2000.
- [11] 杨作升,沈渭铨. 黄河口水下底坡不稳定性[M]. 青岛: 青岛海洋大学出版, 1991.