文章编号：1000－7598－(2007) 增刊－0863－05

库水动态对沿岸路基应力的影响

张丽娟[1,2]，王俊杰[1,2]，柴贺军[2]，张昌林[2]

（1. 重庆交通大学 土木学院，重庆 400074；2. 重庆交通科研设计院，重庆 400067）

摘　要：基于室内物理模拟试验和 FLAC 数值模拟方法，对沿河（库）路基岩土体内部的孔隙水应力和总应力在河（库）水位动态变化条件下的变化特征进行了研究，两种模拟方法得出的结果是一致的。研究表明，水位上升阶段，总应力和孔隙水应力的总体变化趋势是增大的，但是总应力增大的幅度小，因而有效应力的总体变化趋势是减小的；水位下降阶段，总应力也略有减小，但由于孔隙水应力的大幅度减小，使得填土内有效应力总体上是增大变化的。同时，用 FLAC 数值模拟方法，能够很好地研究数据的规律性和掌握数据的连续性。因此，用 FLAC 有限差分法可以有效地模拟沿河（岸）路基在各种水力边界条件下应力场和渗流场的变化情况。

关　键　词：沿岸路基；物理模拟试验；FLAC 数值模拟；孔隙水应力；总应力；有效应力

中图分类号：TU 431　　**文献标识码：**A

Influence of fluctuation of water level on stresses of roadbed along reservoir

ZHANG Li-juan[1,2],　WANG Jun-jie[1,2],　CHAI He-jun[2],　ZHANG Chang-lin[2]

(1. College of Civil Architecture, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;
2. Chongqing Communications Research & Design Institute, Chongqing 400067, China)

Abstract: Based on an indoor physical simulation test and FLAC numerical simulation method, changing regulations of pore water stress and total stress of roadbed along reservoir or river are studied in the dynamic fluctuation of river or reservoir water level. And the results of the two methods are congruous. It's been proved that when water level rises, the whole changing trends of water stress and total stress are both increasing, but the increasing value of earth stress is smaller than that of water stress. So the effective stress is decreasing. When water level falls, total stress is decreasing, but water stress is decreasing greatly. So the effective stress was increasing. Meanwhile, the method of FLAC numerical simulation can better study the regulation of data and get the continuity of data. Therefore, FLAC finite difference method can be effectively used to simulate the changing conditions of stress field and seepage field of roadbed along reservoir or river under different hydraulic boundary conditions.

Key words: roadbed along reservoir or river; physical simulation test; FLAC numerical simulation; pore water stress; total stress; effective stress

1　引　言

由于受地形、地貌、地质条件等的限制，山区公路多沿河布置，形成沿河路基。沿河路基所处的环境具有如下 3 个鲜明的特点：（1）路基受到水流冲刷与淘蚀作用；（2）江河水位变化使路基侵蚀部位变化，坡体内孔隙水压力、渗透压力也发生变化；（3）在水岩耦合作用下，路基岩土材料的流变作用会加剧透水层孔隙水压力变化，甚至产生超孔隙水压，使不透水层产生上浮力，导致路基失稳。沿河路基的动态失稳过程是个长期的过程，是水-岩相互作用下，以及岸坡水流冲击作用下的长期岩土体应力场和渗流场耦合的过程，要研究沿河路基的失稳机制，必须首先明确沿河路基的渗透压力、渗透系数以及岩土体的变形破坏机制。

在沿河路基方面的研究，前人从沿河路基的水力冲刷的机制、防护结构物的设置原理和方法等方面进行了大量的研究工作[1-4]。文献[5]从分析影响路基稳定的因素出发，探讨了沿河路基的动态失稳机制，认为山区公路沿河路基的失稳是一个多因素

收稿日期：2007-06-06
基金项目：交通部交通应用基础研究项目“山区公路沿河路基动态失稳机理与防治技术”(No. 2005319740090)；重庆市教育委员会科学技术研究项目“水库塌岸稳定评价和预测方法”（No. KJ070416）
作者简介：张丽娟，女，1982 年生，硕士研究生，研究方向为路基工程的设计和应用。E-mail：zhlijuan_10@126.com

共同作用的动态过程，其中导致路基失稳的一个主要原因就是河（库）水水位的变化引起路基岩土体内的孔隙压力及渗透压力的变化，进而使路基岩土体发生变形破坏。文献[6]为了研究沿河路基这种动态失稳的机制，设计了室内模型试验设备。文献[7，8]假定沿河路基处于饱和状态，利用朗肯土压力理论，对路基内设置不同形式排水系统时作用于沿河路基挡墙上的主动土压力进行了研究。

河（库）水位的变化将引起沿河路基内的孔隙水压力变化，因而影响沿河路基失稳性，为研究该问题，笔者分别对文献[6]设计的模型试验和 FLAC 数值模拟方法进行了描述，然后对两种方法的模拟结果进行了对比分析，研究了沿河路基岩土体内部的孔隙水应力和总应力在河（库）水位变化条件下的变化规律，对进一步分析沿河路基的稳定性具有重要的指导意义。

2 物理模拟试验

根据沿河路基的特点和研究目的，基于平面应变原理，设计了研究沿河路基的室内物理模型，模型长为 220 cm，高为 110 cm，如图 1 所示。试验装置的构成及其功能详见文献[6]。模型左侧水和土体之间设置一透水刚性挡板，一方面起挡墙作用，支撑土体，防止土体的坍塌破坏；另一方面是一个完全透水边界，水可以透过挡板流入土体，用于模拟河（库）水对路基的作用。当然，实际的沿河路基防护结构包括完全透水、不完全透水和完全不透水等多种类型。本文仅就完全透水的情况开展研究。上边界为自由面，在竖向可以自由变形；其余边界均为固定边界。

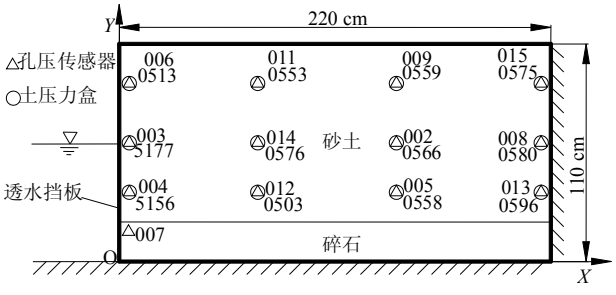


图 1 模型试验简图和传感器分布示意图

Fig.1 Diagram of model test and distribution of transducers

试验所用材料分为两层，其中底部为碎石，碎石渗透系数大，因此，当有地下水存在时，下部可视为水力边界；上部为砂土，砂土的颗粒级配曲线如图 2 所示。模型试验前对砂土的密度、渗透系数、孔隙率及强度指标都进行了室内试验测定，结果见表 1。砂土的渗透系数较大，试验中水位升降时渗流较快，试验所用时间较短，可以较快地检测土体内任一点的土压力和孔隙水压力的变化情况。由于砂土渗透系数大，稳定时间较短，因此，水位的控制方法主要由人工控制到所需的每一级稳定水位。

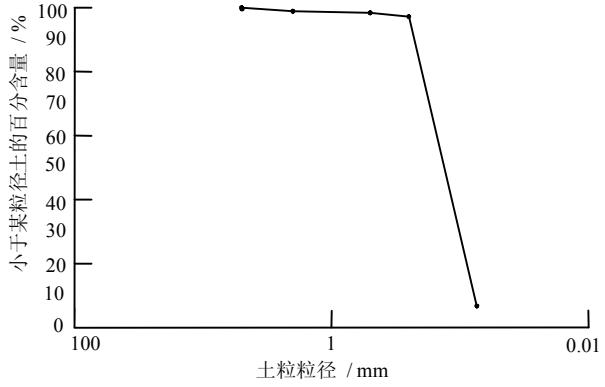


图 2 砂土的颗粒级配曲线

Fig.2 Curve of sand particle-size analysis

表 1 计算参数表

Table 1 Parameters for calculation

参数	材料		
	碎石	砂	水
密度/ g · cm^{-3}	1.95	1.65	1.00
弹性模量/ kPa	5.0×10^5	3.5×10^4	
c / kPa	10.0	23.4	
Φ / (°)	40.0	30.2	10 kPa
泊松比	0.25	0.30	（体积模量）
渗透系数/cm · s^{-1}	1.5×10^{-2}	2.0×10^{-3}	
孔隙率	0.40	0.38	

在模型槽内埋设了25个传感器，土压力传感器12个，孔压传感器13个（位置见图1），用于测量不同水位时土体内不同位置的孔隙水压力和土压力值。孔隙水压力和土压力分别采用JDKYJ 系列和JDTYJ 系列传感器进行测量，其量程分别为30 kPa和50 kPa，分辨力分别为≤0.08 %F·S (F·S为满量程的意思，分辨率的单位即满量程的百分数) 和≤0.1 %F·S，二者的观测误差控制在±0.2 % F·S。试验在左侧加水或是放水，可以测出在升降水时不同水位下的路基内部各部位的孔隙水压力和土压力值。根据试验所测数据和各传感器的标定参数，由各传感器计算公式可以计算出各点的孔隙水压力和土压力值。所测点的土压力值为土体内该点的总应力。

3 FLAC 数值模拟

在室内模型试验的基础上，对试验模型进行数

值模拟。利用 FLAC^{2D} 有限差分法理论和内嵌渗流模块[9,10]，建立 FLAC 数值模型，在不同的水力边界条件下进行模型的渗流场分析，模拟在不同水力边界条件下模型内的孔隙水应力和总应力的分布。

3.1　几何模型和计算参数的选定

为了与物理模型试验对比，几何模型和室内物理模拟试验一致，几何尺寸为 220 cm×110 cm，共划分为 110×55 个单元。模型下部为碎石层，高度为 20 cm，上部为砂土。模型材料为均质、各向同性，采用 Mohr-Coulumb 准则。模拟过程中监测了 13 个网格点的总应力和孔隙水应力的变化情况，这些位置与物理模拟试验中的监测位置相对应。

模拟试验采用的材料参数如表 1。表中，密度、渗透系数、孔隙率及砂土强度指标皆来源于室内试验；弹性模量、泊松比来源于经验数据。

用于地下水分析的模型涉及到水的体积模量 K_w，其取值依赖于分析的目的。分析稳态流动或是求初始孔隙压力的分布状态则尽量要用比较低的 K_w，但是 K_w 又不能取值太低，以免解答失真。于是为了减少求解时间又不至于解答失真，模型选用 K_w = 10 kPa。

3.2　边界条件

3.2.1 位移边界

模型的左右边界的水平位移受到限制，底边界的所有方向的位移受到限制，用命令“fix x_i = 1；fix y_i = 111；fix xy_j = 1”来控制位移边界条件。

3.2.2　力学边界

在FLAC默认条件下所有边界为不透水边界。在本模型中，右侧和底边界为不透水边界。模型上表面边界为自由面，左边界为透水边界，水流从左边界流入或排出。其中左边界排水条件由孔隙水压力边界控制，在升降水过程中，用命令“Fix *pp*”控制，意思是在渗流过程中，外界水位是保持不变的。需要注意的一点是，虽然在土力学中边界条件更常见的是用水头表示，但是FLAC中边界条件以压力的形式表示，只能用命令“Fix *pp*”控制。

4　物理试验和FLAC模拟结果分析

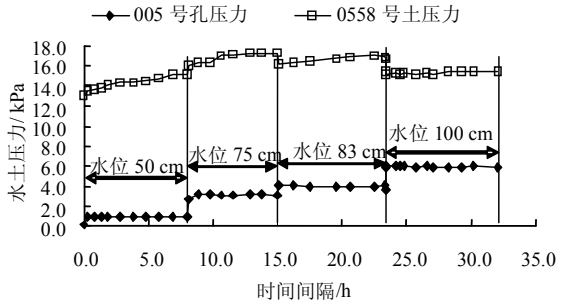
为了清楚研究土体内某一点的孔隙水应力和总应力的变化情况，以物理模拟试验中靠近土体下面以及位于土体中间的005号、014号孔压传感器和0558号、0576号土压力传感器为例，位置即为图1中坐标（140，40）和（70，65），与FLAC模型中的网格点位置i = 71，j = 21和i = 36，j = 33相对应。选择靠近土体下面的检测点（005号、0558号传感器即网格点位置i = 71，j = 21）是为了更清楚地观测每一级水位由于渗流的影响对土体内的孔隙水应力和总应力的影响，加上土体中间的检测点（014号、0576号传感器即网格点位置i = 36，j = 33），两者可以进行对比分析。

4.1　水位上升阶段的水、土压力变化

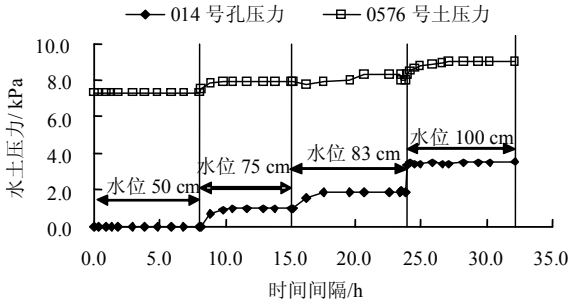
在水位上升阶段，土体内的孔隙水应力和总应力变化的物理试验模拟和 FLAC 模拟结果分别如图 3 和图 4 所示。

无论是试验模拟还是数值模拟，在水位上升过程中，孔隙水应力的总体变化趋势为：随水位的上升而增大。在图 3(b)和图 4(b)中，水位为 75 cm 之前的孔隙水应力为 0，是因为检测点的位置位于水位以上，因此，孔隙水应力为 0。在物理试验模拟中，每一级水位的孔隙水应力的变化趋势为开始迅速增大，然后很快趋于平缓。而在 FLAC 数值模拟中，孔隙水应力的变化就看得比较清楚，可以看到增大是连续的，最后趋于稳定。FLAC 模拟结果与我们通常所认识的是一致的，因为渗流是需要一定的时间才能达到稳定。而试验结果出现的孔隙水应力的突变主要由于砂土的渗透系数比较大，渗流比较快造成的。

总应力的变化趋势为：随着水位的上升，总体



(a)



(b)

图 3　水位上升阶段的物理模型试验模拟

Fig.3　Physical model test simulation when water level rising

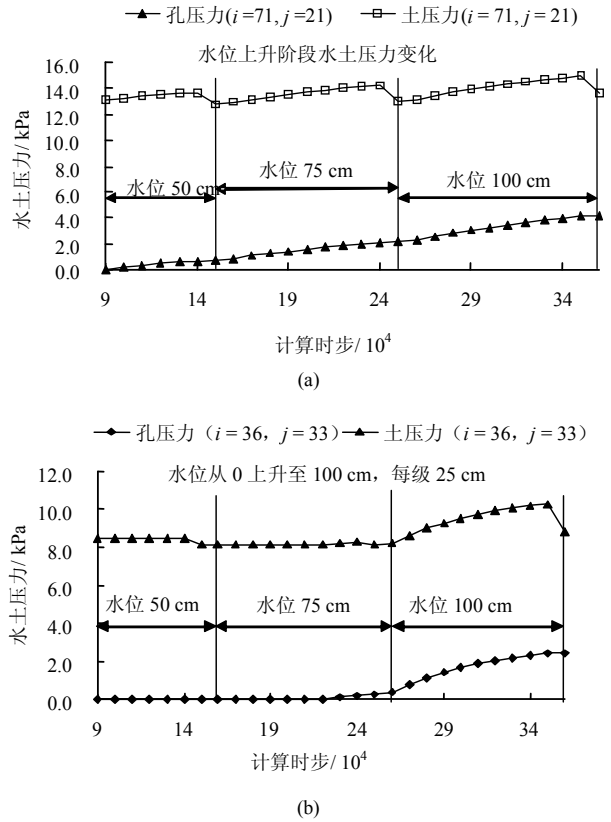


图 4 水位上升阶段的 FLAC 数值模拟

Fig.4 FLAC numerical simulation when water level rising

有增大的趋势，但变化幅度小。按照人们通常的认识，水位上升过程中，土体由非饱和变为饱和，因此，土体总应力应该有一定幅度的增大。而在物理试验中，水位上升至 83 cm 后总应力有开始有下降的趋势，如图 3(a)，分析原因主要是因为水体通过物理的、化学的作用改变了土体的结构，软化了土体强度，因此，出现了总应力减小的趋势。而在每一级水位的最后阶段，总应力有个突减，这是由于试验读数条件的限制造成的。

在 FLAC 模拟中(图 4)，每一级水位的总应力变化：先是平稳的增大，最后有一定程度的减小，这与 FLAC 模拟方法有关。在本模型中，采用的流-固耦合方法是先进行渗流场计算，然后进行力学模式计算使模型达到平衡，因此，模拟结果中每一级水位变化时总应力先增大，然后减小，是分别与上述的两个过程相对应的，而总的总应力变化幅度应该为两个过程的总的变化值。同样的原因在水位下降阶段也是有两个这么明显的过程，如图 6。

从总应力和孔隙水应力的变化幅度上看，无论是物理模拟试验还是 FLAC 数值模拟，总应力的增大幅度明显小于孔隙水应力的增大幅度，因而根据有效应力原理可知，有效应力的总体变化趋势是减小的。

4.2 水位下降阶段水、土压力变化

研究对象与水位上升阶段一致，模拟结果分别如图 5 和图 6 所示。

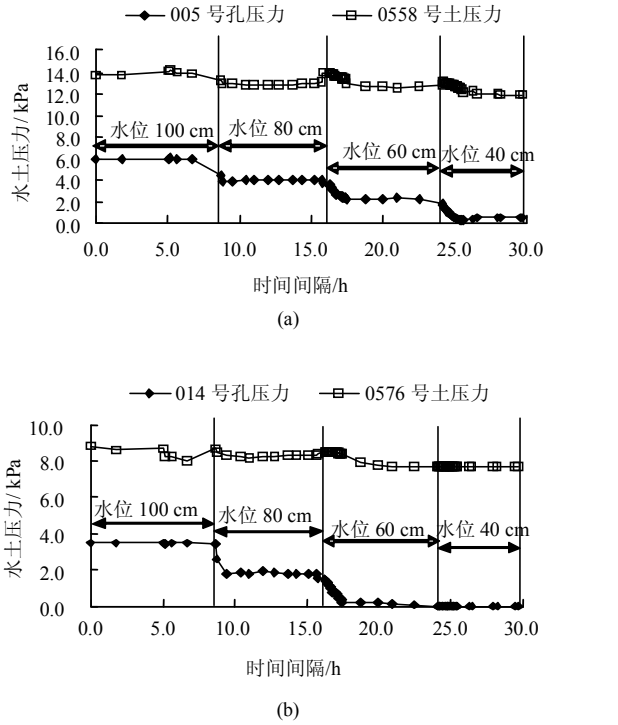


图 5 水位下降阶段的物理模型试验模拟

Fig.5 Physical model test simulation when water level is falling

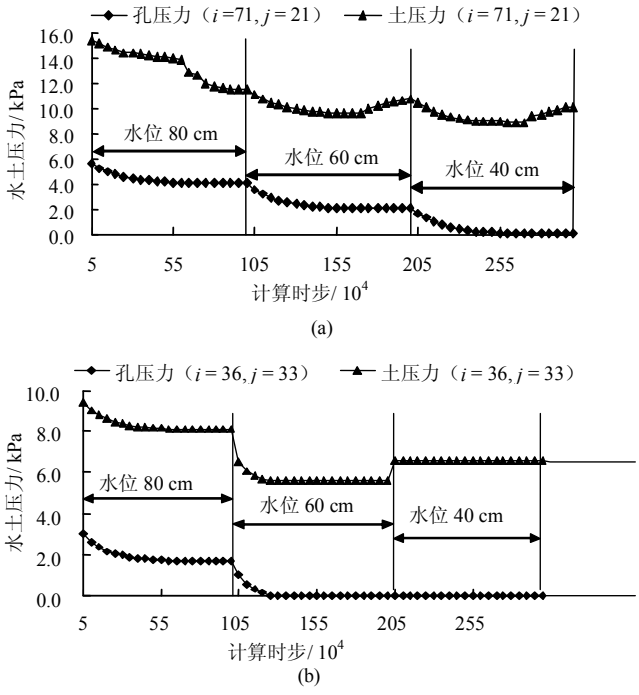


图 6 水位下降阶段的 FLAC 数值模拟结果

Fig.6 FLAC numerical simulation when water level is falling

可以看出，无论是物理模拟试验还是数值模拟，在水位下降过程中，孔隙水应力的总体变化趋势随水位的下降而减小。当水位高度低于检测点的高度后，孔隙水应力的值变为 0，如图 5(b)和图 6(b)。在物理模拟试验中，每一级水位的孔隙水应力的变化趋势为开始迅速减小，然后稳定。但是孔隙水压力传感器有一定滞后，因此，当 FLAC 数值模拟结果的孔压力已经为 0 时，传感器测量结果还有一定的孔压残余，如图 5(a)和图 5(b)。

总应力的变化趋势为：在物理模拟试验中，随着水位的上升，总应力有减小的趋势，但幅度很小，每一级水位的变化为先减小，然后有少许的增大，整体变化平稳，特别是对 0576 号传感器（图 5(b)）。而在每一级水位的最后阶段如图 5，可以看到总应力有些突增，同样是由于试验读数的影响。在 FLAC 数值模拟中，总应力总体减小，但比物理模拟试验的减小要大，每一级水位的变化情况为先减小，然后有一定的增大。这也是由于前面提到的 FLAC 采用的流-固耦合模拟方法造成的。对图 6(b)中水位为 60 cm 时，水位已经低于检测点的位置，理论上总应力应该趋于稳定，但在图中却出现了突增，也是由于力学模式计算产生的。

从变化幅度上看，无论是物理模拟试验还是 FLAC 数值模拟，在水位下降阶段，孔隙水应力减小的幅度要比总应力减小的幅度大，使得填土内有效应力总体上是增大变化的。

5　结　论

通过物理模拟试验和 FLAC 数值模拟，对水位上升和下降阶段下的沿岸路基应力的变化进行了研究。对试验现象中出现的不规律性进行了分析。将试验结果和 FLAC 模拟结果进行了对比分析，得出在水位升降过程中，两种方法得出的结果是一致的，并得到以下结论：

（1）水位上升阶段，总应力和孔隙水应力的总体变化趋势是增大的，但是总应力增大的幅度要小，因而有效应力的总体变化趋势是减小的；水位下降阶段，总应力也略有减小，但由于孔隙水应力的大幅度减小，使得填土内有效应力总体上是增大变化的。

（2）FLAC 数值模拟方法，与物理模拟试验方法相比，能够很好地研究其规律性，而且可以很好地掌握数据的连续性。因此，用 FLAC 有限差分法可以有效地模拟沿河（岸）路基在各种水力边界条件下应力场和渗流场的变化情况。

参 考 文 献

[1] 梁光模, 程尊兰, 吴积善，等. 沿河公路路基防治技术及水力计算[M]. 成都：四川科技出版社，2004.

[2] Kellerhals R, Miles M, Seagel G G. River Channel Encroachments by Highways and Railways[A]. **Proceedings of the Annual Conference and the 7th Canadian Hydrotechnical Conference**[C]: Saskatoon: [s. n.], 1985. (1B): 77－96.

[3] 田伟平, 李惠萍, 高冬光. 沿河路基冲刷机理与冲刷深度[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2002, 22(4): 39－42. TIAN Wei-ping, LI Hui-ping, GAO Dong-guang. Scour depth and mechanism of highway subgrade along river[J]. **Journal of Chang'an Unversity (Natural Science Edition)**, 2002, 22(4): 39－42.

[4] 高冬光. 公路与桥梁水毁防治[M]. 北京：人民交通出版社，2002.

[5] Wang Jun-Jie, Chai He-Jun, Hu Yuan-Xin, et al. Mechanism of dynamic instability for riverside subgrade[A]. **Proceedings of the First International Conference of Transportation Engineering**[C]. [s. l.]: [s. n.], 2007, 7: 1 933－1 939.

[6] Hu Yuan-Xin, Wang Jun-Jie, Chai He-Jun, et al. A model equipment used to investigate mechanism of dynamic instability for riverside roadbed[A]. **Proceedings of the First International Conference of Transportation Engineering**[C]. [s. l.]: [s. n.], 2007,7: 704－710.

[7] 王俊杰, 张丽娟, 柴贺军, 等. 车辆荷载对沿河路肩挡墙主动土压力的影响[A]. 交通资源节约和环境保护新技术研讨会论文集[C]. 北京：人民交通出版社，2007. 4: 92－99.

[8] 王俊杰, 柴贺军, 蒋崇军, 等. 稳定渗流条件下Rankine主动土压力计算[A]. **中国土木工程学会第十届土力学及岩土工程学术会议论文集**[C]. 2007.

[9] Itasca Consulting Group, Inc. Theory and Background[R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2005.

[10] Itasca Consulting Group, Inc. Fluid-Mechanical Interaction[R]. USA: Itasca Consulting Group Inc, 2005.