

对管涌机理的新认识

罗玉龙, 速宝玉, 盛金昌, 詹美礼

(河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 基于原状土的实际受力特点, 提出新的管涌机理: 管涌是涉及孔隙水渗流、可动细颗粒侵蚀运移、多孔介质变形等众多复杂力学行为的多相多场耦合现象。在详细归纳评述最新研究进展的基础上, 提出了今后研究的总体思路: 首先利用三向受压状态下土体的渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验, 建立耦合管涌本构方程, 揭示三向受压状态下土体管涌发展的渗流-侵蚀-应力耦合机理; 然后基于溶质运移的思想, 建立预报原状地基土体管涌发展过程的渗流-侵蚀-应力耦合数学模型。同时指出渗流-侵蚀-应力耦合试验的可重复性及三相三场全耦合纯对流管涌模型的高效求解策略是需要重点解决的关键科学问题。提出的新的管涌机理为客观认识管涌问题的本质提供了一种新的角度, 今后的研究成果将对堤坝管涌险情的科学预报和有效治理具有重要的指导作用。

关键词: 管涌; 三向受压; 可动细颗粒; 渗流-侵蚀-应力耦合机理; 溶质运移

中图分类号: TV139.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2011)12-1895-08

作者简介: 罗玉龙(1980-), 男, 辽宁凌源人, 博士后, 讲师, 从事渗流力学研究。E-mail: ly18766@126.com。

New understandings on piping mechanism

LUO Yu-long, SU Bao-yu, SHENG Jin-chang, ZHAN Mei-li

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A new piping mechanism is proposed based on the real stress state of undisturbed soil: piping is a multi-phase and multi-field coupling phenomenon involving numerous complicated mechanical behaviors, such as pore water seepage, fluidized particle erosion and migration, and deformation of porous media. Based on summarizing and reviewing the new achievements of the piping mechanism, the general idea on the future studies is proposed: firstly, a list of triaxial compression seepage-erosion-stress coupling piping experiments is put forward, and the coupling piping constitutive equations revealing the seepage-erosion-stress coupling mechanism are established based on the coupling experiments. Then the seepage-erosion-stress coupling piping mathematical model for predicting undisturbed soil is proposed based on the solute transport theory. The key scientific problems including the repeatability of coupling experiments and efficient solution strategy for the multi-phase and multi-field full coupling pure convection piping model are also put forward. The proposed new piping mechanism provides a new point of view on the essence of piping, and the future research results will be of significance to the prediction and treatment of embankment piping. The proposed new piping mechanism provides a new point of view on the essence of piping, and the future research results will be of significance to the prediction and treatment of embankment piping.

Key words: piping; triaxial compression; fluidized particle; seepage-erosion-stress coupling mechanism; solute transport

0 引言

据统计, 20 世纪 90 年代, 中国平均每年洪灾经济损失 1343.1 亿元, 1998 年的损失更是多达 2550.9 亿元^[1]。2010 年, 中国 28 个省市遭受洪涝灾害, 直接经济损失 2096 亿元, 水利工程水毁损失 400 多亿元。洪水导致众多堤坝发生大面积渗透破坏, 其中管涌是一种主要的渗透破坏形式。因此, 开展堤坝管涌机理及其发展过程预报的相关研究, 避免或有效控制管涌破坏, 是岩土工程和水利工程领域亟待解决的应用基础性研究课题, 对保障沿岸居民生命财产安全和城市

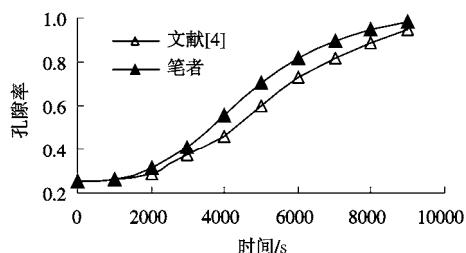
经济的可持续发展具有十分重要的意义。

1996 年大洪水后, “管涌”一词经常被使用, 但其实有不少研究的渗透变形本身并不是真正意义上的管涌, 如二元堤基的渗透破坏往往是首先发生流土, 然后导致接触冲刷破坏。这里需要特别指出的是, 本文研究的“管涌”现象是指土体中可动细颗粒在骨架孔隙中的运移流失过程。

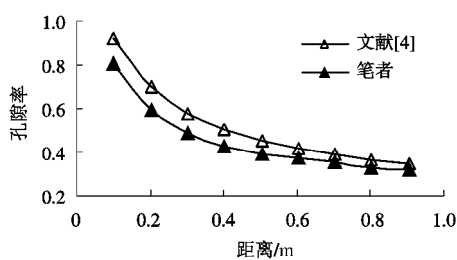
基金项目: 国家自然科学基金项目(51009053); 高等学校博士学科点专项科研基金项目(20100094120004); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(水利工程)

收稿日期: 2011-01-20

多年来,众多学者采用试验、数值模拟等各种技术手段对管涌机理进行了广泛深入的研究,但是目前对管涌发展机理的认识仍然是十分有限的。笔者等^[2-3]也对管涌机理进行了初步的探索:在假设管涌发展过程中土骨架不发生变形的前提下,提出渗流侵蚀耦合管涌机理,基于溶质运移的思想,把土体分成土骨架相、水相及可动细颗粒相,将可动细颗粒相作为一种特殊的溶质,随水相运移流失。利用三相质量守恒微分方程,建立了堤坝土水耦合管涌模型。该模型既能动态考虑水相渗流对土骨架相的侵蚀冲刷作用,又能考虑土骨架相侵蚀、可动细颗粒流失引起的土体孔隙率、渗透性的变化对水相渗流场(孔隙水压力)分布的影响。不足之处是不能考虑管涌发展过程中土体应力状态的动态变化,局部区域计算结果与实际不符(如图1所示,渗流出口附近的孔隙率竟达到0.9,实际情况可能早已经发生局部坍塌,但是该模型无法反映)。因此,为了科学合理地预报管涌发展过程,非常有必要对管涌机理进行更加深入全面的研究。



(a) 渗流出口处孔隙率随时间变化规律



(b) 孔隙率沿程变化(0.1 m为渗流出口位置)

图1 笔者提出的管涌模型与文献[4]结果对比

Fig. 1 Comparison between piping models proposed by authors and Reference [4]

1 对管涌机理的新认识

1.1 管涌的渗流-侵蚀-应力耦合机理

根据前期研究,笔者认为管涌是涉及孔隙水渗流、可动细颗粒侵蚀运移、多孔介质变形等众多复杂力学行为的多相多场耦合现象:孔隙水渗流冲刷侵蚀土骨架产生可动细颗粒,可动细颗粒跟随孔隙水渗流运移流失,土颗粒重新排列、沉积,导致土体细观结构和力学特性发生改变,如孔隙率、渗透系数、刚度及抗

剪强度的不均匀变化等。土体渗透性的不均匀变化导致孔隙水压力发生变化。由于土体一般处于三向受压状态,根据有效应力原理,土骨架承受的有效应力必将随着孔隙水压力的变化而变化,进而导致土体内部应力状态的变化,应力状态的改变反过来再次影响渗流场分布及其对土骨架的侵蚀作用,即管涌发展过程肯定伴随着孔隙水渗流-可动细颗粒侵蚀-多孔介质应力状态的不断调整变化,如图2所示。

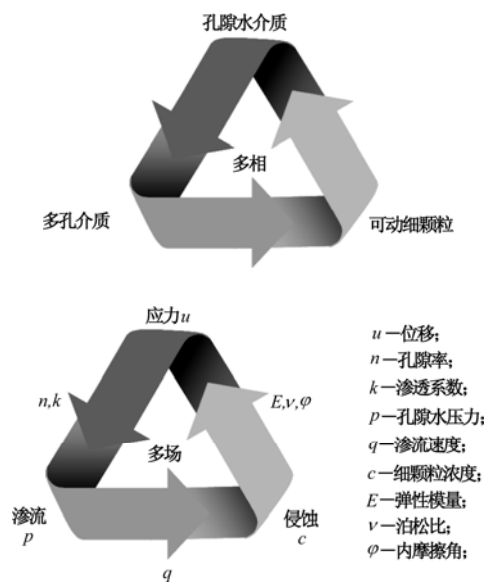


图2 渗流-侵蚀-应力耦合管涌机理

Fig. 2 Seepage-erosion-stress coupling piping mechanism

1.2 已有研究成果的印证

已有的一些研究成果证明笔者对管涌机理的新认识是正确的。毛昶熙先生在与蒋国澄先生关于“砂砾地基上土坝的渗流控制”一文^[5]的讨论中指出:如果能设法进行原状地基土的管涌测定实验,将具有更大的实际意义^[6]。曹敦履^[7]对葛洲坝枢纽砂卵石层的原状样和扰动样渗透试验也印证了毛昶熙的想法,扰动样与原状样的管涌发展过程截然不同:所有扰动样在相对较小渗透坡降下即发生破坏,而多数原状样始终未破坏。这些现象表明土体所处应力状态是影响其管涌发展过程的重要因素,必须予以考虑。

Tomlinson 等^[8]的研究(如图3所示)显示:土体中可动细颗粒的流失会导致土体产生较大沉降。这说明,可动细颗粒的流失显著地改变了土体的细观结构,导致土体应力状态发生了较大变化。Tomlinson 等的研究表明,管涌发展过程中必须考虑应力状态的变化及其对管涌本身发展的影响。

周健等^[9]的试验结果也给出了佐证。图4描述了可动细颗粒逐渐侵蚀流失的过程:随着可动细颗粒的流失,土颗粒重新分布排列,土体细观结构发生显著变化。因此,可以推断:与土体细观结构密切相关的

土体水力特性(如渗透性)和力学特性(如抗剪强度)等也必将随之产生较大变化。

虽然现有的一些研究成果已经表明：土体所处的应力状态能够显著地影响管涌的发展过程，但是对于管涌的这种渗流－侵蚀－应力耦合作用机制仍然缺乏更加深入、系统的研究。

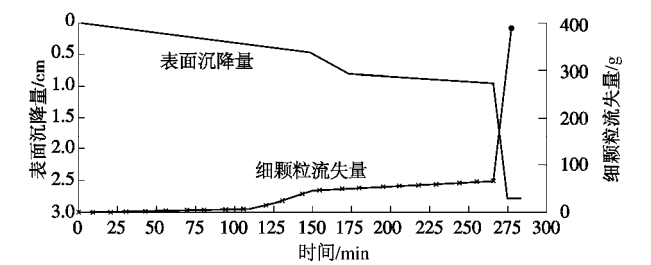


图 3 试样表面沉降、可动细颗粒流失量随时间变化曲线^[8]
Fig. 3 Surface settlement and eroded particles at different time^[8]



图 4 土体细观结构随可动细颗粒流失演变过程^[9]
Fig. 4 Evolvement of soil microstructure^[9]

2 国内外研究现状

多年来，许多学者从不同角度探讨了管涌机理。其中，从渗流角度切入的研究是一个十分重要的学派，该学派认为外界水力条件是影响管涌发展进程的关键因素，忽略土体所处应力状态对管涌的影响，忽略了管涌发展过程中土水的相互作用。近年来，有学者开始从渗流－应力耦合角度研究管涌机理，认为管涌的发展过程是土水相互作用、不断调整变化的动态过程，这种考虑更加接近土体的实际工作状态，因此，也最有可能获得更加符合真实情况的管涌机理。本节将根据这两个角度，分别从试验和数学模型两方面介绍国内外的研究现状。

2.1 试验研究进展

试验方面，国外学者侧重于定量研究，总体上经历了两个发展阶段：渗流角度和渗流－应力耦合角度。

(1) 渗流角度

Kenney 等^[10]认为土体由固定的土骨架和松散的可动细颗粒组成，其中只有可动细颗粒能在渗流作用下在骨架孔隙中移动。基于试验结果提出了利用颗粒级配曲线确定可动细颗粒流失量的方法。Skempton 等^[11]研究了内部稳定和不稳定的两种砂砾料的管涌发展过程，试验结果表明水土相互作用贯穿了管涌发展

的全过程。Sterpi^[12]研究了初始细颗粒含量为 23% 的粉细砂的细颗粒流失过程，建立了细颗粒流失量与渗透坡降、时间的经验公式。

(2) 渗流－应力耦合角度

从 20 世纪 90 年代开始，加拿大英属哥伦比亚大学(简称 UBC)的研究小组便一直致力于研制和完善 UBC 管涌试验装置^[8, 13-14]，如图 5 示。该装置的特点是能够考虑轴向压力对细颗粒流失及管涌发展过程的影响。研究表明：在保证试验条件完全相同的情况下，试验具有可重复性；渗透坡降及其增大速度对试样沉降、细颗粒流失、流量及渗透系数的变化具有较大影响，而轴向压力对管涌发展过程的影响次之。

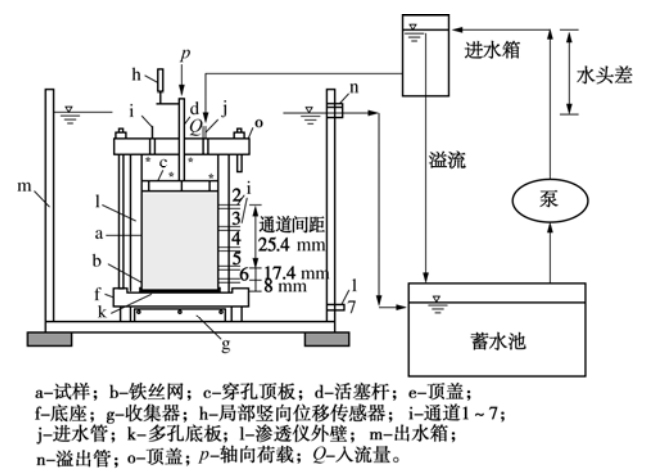


图 5 UBC 管涌试验装置^[8, 13-14]
Fig. 5 Piping experimental device of UBC^[8, 13-14]

Bendahmane 等^[15]设计了图 6 所示的试验装置研究罗亚尔砂和高岭土混合料的可动细颗粒流失过程。该装置即可以考虑渗透坡降等水力条件对可动细颗粒流失的影响，又能够反映处于三向受压状态的土体的特殊的管涌发展规律。Bendahmane 等重点探讨了渗透坡降、细颗粒含量(5%~30%)、围压 3 个重要因素对管涌发展过程的影响。但是没有考虑土体的孔隙率或密实度对管涌发展的影响，也没有考虑细颗粒流失引起的混合料的刚度、抗剪强度指标的变化。

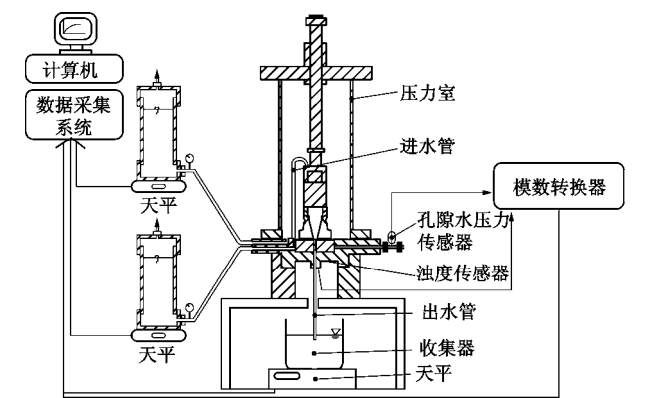


图 6 Bendahmane 等^[15]设计的三轴管涌试验装置
Fig. 6 Triaxial piping cell designed by Bendahmane et al^[15]

Richards 等^[16]研制了图 7 所示的真三轴管涌试验装置。该装置可以模拟黏性土、无黏性土在渗流和三向压力作用下的管涌发展过程。研究结果表明：试验具有可重复性，多次重复试验的误差在 10% 以内；渗流方向与重力之间的角度是影响管涌发展的重要因素。

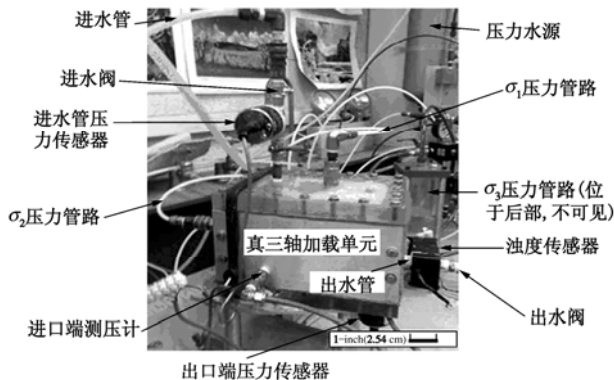


图 7 Richards 等^[16]设计的真三轴管涌试验装置

Fig. 7 True triaxial piping cell designed by Richards et al^[16]

从渗流-应力耦合角度研究管涌机理比单纯从渗流角度研究有了较大提高，土体所处状态也更加接近原生状态，但是对土体初始状态的考虑仍然不够全面，如仅考虑了细颗粒含量的影响，忽略了密实度等因素的影响，此外，也没有考虑细颗粒流失引起的土体力学特性的变化。

中国学者也开展了大量卓有成效的试验研究，与外国学者相比，中国学者研究更加侧重于定性研究，且主要从渗流角度探讨不同堤基结构的管涌发展规律及防渗措施的管涌控制效果等。

a) 不同结构堤基的管涌发展机理研究

李广信等^[17]研究了二元堤基的管涌发展模式。毛昶熙等^[18-19]给出了粉细砂堤基发生管涌时影响大堤安全的水平临界坡降。丁留谦等^[20-21]系统地研究了单层、双层及三层堤基的管涌发展机理。刘杰等^[22]探讨了不同渗透系数比值、不同地层结构的双层地基的渗透破坏机理。

b) 防渗墙的管涌控制效果研究

张家发等^[23]通过砂槽模型模拟细砂堤基中存在悬挂式防渗墙时，管涌的发生和扩展过程。毛昶熙等^[24]研究了二元结构堤基中悬挂式防渗墙对截断管涌通道的作用。李广信等^[17]分析了悬挂式防渗墙深度与出砂量的关系及其对管涌发展的控制作用。

c) 从土体细观结构角度开展的研究

周健等^[9, 25]对不同级配砂样在各种渗透坡降下的管涌发展过程进行了研究。从细观角度揭示了管涌发展过程中土体几何特性和水力特性的复杂变化。刘杰等^[26]研究了双层地基中不同细颗粒含量的砂砾石土管涌破坏后的危害性。试验表明，当细颗粒含量小于 20% 时，细颗粒带出量可达 100%，土骨架的结构不会

产生明显变化；当细颗粒含量大于 20% 时，渗流通道形成后将影响上部土层的稳定性。

2.2 管涌数学模型研究

管涌数学模型主要包括随机模型、井流模型、细颗粒运移模型、渗流有限元模型、毛管模型、颗粒流模型、渗流和管流耦合模型以及堤坝土水耦合模型等。

(1) 随机模型。曹敦履等^[27-28]基于随机理论，考虑管涌通道端点的随机游动，建立了一维及二维随机模型。研究了渗径长度、渗透坡降增大速度、土体横向尺寸及土层均匀性等因素对管涌发展的影响。

(2) 井流模型。陈建生等^[29]根据井流理论，分析管涌初期河水向管涌口补给时地下水流场，确定管涌发生范围及发展过程。毛昶熙等^[30]利用完整井和不完整井理论推导管涌口附近的涌砂范围，提出迭代逼近法鉴别管涌发展的危害程度。井流模型充分考虑渗流场内各点的具体情况，又结合整个区域的水力联系，反映出绝对对渗径对管涌的影响。

(3) 细颗粒运移模型。Sterpi^[12]根据可动细颗粒的连续方程和渗流方程，引入描述可动细颗粒流失量与渗透坡降的经验公式，建立了研究可动细颗粒流失过程的有限差分模型。Cividini 等^[31]基于文献[12]，建立了描述可动细颗粒侵蚀和运移过程的有限元模型。文献[12, 31]虽然考虑了渗流对土体内可动细颗粒流失的影响，但并未考虑可动细颗粒流失引起的土体渗透性变化。

(4) 渗流有限元模型。张家发等^[32]引入渗透变形的判别条件，将管涌区单元的渗透系数增大几个量级，模拟管涌通道从渗流出口逐渐逆水流方向扩展的过程。丁留谦等^[33]研究了管涌发展前端锋面土体渗透坡降的变化过程。

(5) 毛管模型。刘忠玉等^[34]根据可动颗粒在骨架孔隙中的运动和受力情况，建立了描述无黏性土中管涌发生、发展的毛管模型。

(6) 颗粒流模型。周健等^[35-36]基于颗粒流方法，考虑土水耦合作用，从细观角度研究砂土管涌的形成机制，模拟了管涌发展过程中孔隙率、流速、颗粒流失量等参数的动态变化过程。

(7) 渗流-管流耦合模型。周晓杰等^[37]对渗流有限元模型进行改进，在未发生渗透变形的区域，采用常规渗流理论计算；在管涌通道区域，用管流理论计算，基于无网格伽辽金法，建立了渗流-管流耦合模型。该模型能够模拟管涌通道绕过防渗墙等复杂建筑物的发展过程。

(8) 堤坝土水耦合管涌模型。罗玉龙等^[2-3]根据管涌与石油工程中出砂问题的相似性，将出砂预测模型^[4, 38]应用于管涌问题研究，提出堤坝土水耦合管涌模型。该模型弥补了现有模型的一些不足，如：不

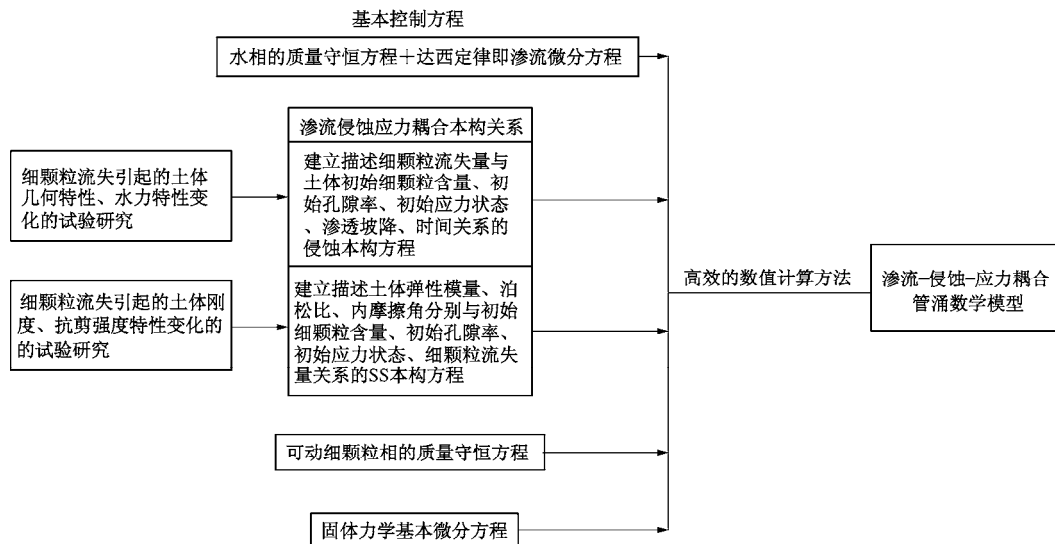


图 8 渗流-侵蚀-应力耦合管涌数学模型的基本框架

Fig. 8 Framework of seepage-erosion-stress coupling piping mathematical model

需要预先设置管涌通道；可以反映管涌发展过程中可动细颗粒流失引起的土体几何特性、渗透特性及内部渗流场的动态变化；可以较为真实地再现管涌发展过程中非稳态，渐进性破坏等重要特征；能够直观模拟防渗墙等复杂结构的管涌通道扩展过程。该模型的不足是不能考虑管涌发展过程中土体内部应力状态及土体力学指标的变化等。

综上所述，目前关于管涌机理的研究仍然主要从渗流角度切入，将渗流与土体割裂开来，很少考虑土体所处的应力状态对管涌的影响以及管涌发展过程中的土水耦合作用。近年来，虽然国内外学者开始逐渐重视对土体应力状态的研究，但是对三向受压状态下土体的管涌发展机理依然缺乏深入全面的认识，仍有众多问题亟待解决，如土体初始细颗粒含量、孔隙率、应力状态等因素对管涌发展过程的影响，土体力学特性指标在管涌发展过程中的演变规律，预报管涌发展过程的数学模型等。因此，非常有必要开展土体管涌的渗流-侵蚀-应力耦合机制的试验及理论研究。

3 开展进一步研究的思路

根据前期研究及针对管涌机理的全面详细调研，笔者提出进一步研究的大体思路：首先利用三向受压状态下土体的渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验，建立耦合本构方程，揭示三向受压状态下土体管涌发展的渗流-侵蚀-应力耦合机理。然后基于溶质运移的思想，提出预报原状地基土体管涌发展过程的渗流-侵蚀-应力耦合数学模型，具体研究思路如下。

3.1 三向受压状态下管涌型土体渗流-侵蚀-应力耦合试验研究

(1) 细颗粒流失引起土体几何特性、水力特性变

化的试验研究。主要研究初始细颗粒含量、初始孔隙率及初始应力状态等因素对土体管涌发展过程的影响。建立描述细颗粒流失量与土体孔隙率演变规律的耦合本构关系（简称侵蚀本构方程）。

(2) 细颗粒流失引起土体刚度、抗剪强度特性变化的试验研究。主要研究不同初始细颗粒含量、初始孔隙率及初始应力状态的土体在不同侵蚀阶段（细颗粒流失量不同，土体内部孔隙通道扩展程度不同）的刚度和抗剪强度的演变规律。建立土体刚度（Stiffness）、抗剪强度（Shear strength）分别与初始孔隙率、初始细颗粒含量、围压、细颗粒流失量的耦合本构关系（简称 SS 本构方程）。

试验的目的主要是揭示处于三向受压状态下的土体，其内部细观结构（几何特性、水力特性、力学特性等）随管涌发展过程的演变规律，分析管涌的渗流-侵蚀-应力耦合作用机制，建立渗流-侵蚀-应力耦合本构关系，为进一步建立三向受压状态下土体的渗流-侵蚀-应力耦合管涌数学模型提供重要的试验和理论基础。

3.2 建立渗流-侵蚀-应力耦合管涌数学模型

根据试验揭示的渗流-侵蚀-应力耦合作用机制，对笔者前期提出的堤坝土水耦合管涌模型进行改进，分别建立土骨架相、水相及可动细颗粒相质量守恒方程，同时引入渗流-侵蚀-应力耦合本构关系、有效应力原理和固体力学基本微分方程（如图 8 所示），建立能够真实反映原状地基土体管涌发展特点的渗流-侵蚀-应力耦合管涌模型。同时，深入分析影响土体管涌发展过程的关键因素（土体初始条件、应力、水力条件等）及其敏感性，为科学预报和有效治理管涌提供理论依据。

3.3 拟解决的关键科学问题

(1) 渗流-侵蚀-应力耦合试验必须具有可重复性。不同侵蚀阶段土体的刚度和抗剪强度需要通过多个相同试样的三轴压缩试验才能确定。“多个相同试样”的含义就是在保证试样的初始条件和加载历史完全一致的条件下,利用渗流-侵蚀-应力耦合试验能够获得某一特定侵蚀阶段的多个相同的试样,要满足这一要求,耦合试验必须具有可重复性。

(2) 渗流-侵蚀-应力三场全耦合管涌数学模型的高性能求解策略。多场耦合作用关系的强非线性、可动细颗粒质量守恒方程的纯对流特性,导致耦合模型总体矩阵高度病态、非对称、非协调,这给全耦合模型求解带来了巨大的挑战。要实现三场全耦合模型的高效求解,避免求解中出现不稳定性或强烈的伪振荡,必须严密设计全耦合迭代、大型非对称矩阵的高性能存储、高度病态矩阵的高效求解等一系列关键技术。因此,三场全耦合模型的高效求解方法研究是本研究的另一个关键科学问题。

4 结论与展望

(1) 管涌是涉及孔隙水渗流、可动细颗粒侵蚀运移、多孔介质变形等众多复杂力学行为的多相多场耦合现象:渗流冲刷侵蚀土骨架产生可动细颗粒,可动细颗粒跟随孔隙水运移流失,土颗粒重新排列、沉积,导致土体细观结构和力学特性发生改变。土体渗透性的不均匀变化导致孔隙水压力变化,土骨架承受的有效应力也随之变化,进而导致土体应力状态的变化,应力状态地改变反过来影响渗流场及其对土骨架的侵蚀作用,即管涌的发展过程就是孔隙水渗流-可动细颗粒侵蚀-多孔介质应力三相三场相互影响、相互促进的过程。

(2) 三向受压状态下管涌型土体渗流-侵蚀-应力耦合机理研究的总体思路:首先利用三向受压状态下土体的渗流-侵蚀-应力耦合管涌试验,建立耦合本构方程,揭示三向受压状态下土体管涌发展的渗流-侵蚀-应力耦合机理。然后基于溶质运移的思想,提出预报原状地基土体管涌发展过程的渗流-侵蚀-应力耦合数学模型。

(3) 今后研究中可能遇到的关键科学问题:渗流-侵蚀-应力耦合试验的可重复性;三相三场全耦合纯对流管涌模型的高性能求解策略。

(4) 今后的研究成果可以将抽象的多相多场耦合管涌机理加以量化,阐明管涌发展过程中土体细观结构、几何、水力、力学特性的演变规律,揭示三向受压状态下土体管涌发展的渗流-侵蚀-应力耦合

用机制,加深对原状地基土管涌发生发展过程地认识。建立的渗流-侵蚀-应力耦合管涌数学模型,能够较真实地再现原状地基土体管涌发生-发展-破坏的全过程,为科学预报及有效治理管涌提供理论依据。

参考文献:

- [1] 姜付仁,程晓陶,向立云,等. 美国 20 世纪洪水损失分析及中美 90 年代比较研究[J]. 水科学进展, 2003, 14(3): 384-388. (JIANG Fu-ren, CHENG Xiao-tao, XIANG Li-yun, et al. Review on the flood losses of the 20th century in the United States and comparative study on flood damages between China and USA in 1990s[J]. Advances in Water Science, 2003, 14(3): 384-388. (in Chinese))
- [2] 罗玉龙,彭 华,张 晋. 基于 SUPG 稳定有限元技术的纯对流耦合管涌模型[J]. 岩土工程学报, 2010, 32(7): 1072-1078. (LUO Yu-long, PENG Hua, ZHANG Jin. Pure convection coupled piping model based on stabilized finite element SUPG[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2010, 32(7): 1072-1078. (in Chinese))
- [3] 罗玉龙,彭 华,张 晋. 一维三相渗流侵蚀耦合管涌程序的研制与验证[J]. 固体力学学报, 2008, 29(增刊): 118-121. (LUO Yu-long, PENG Hua, ZHANG Jin. Design and validation of 1D three-phase seepage erosion coupled piping program[J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2008, 29(S0): 118-121. (in Chinese))
- [4] STAVROPOULOU M, PAPANASTASIOU P, VARDOULAKIS I. Coupled wellbore erosion and stability analysis[J]. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 1998, 22(9): 749-769.
- [5] 蒋国澄,刘宏梅. 砂砾地基上土坝的渗流控制[J]. 水利学报, 1961(1): 33-43. (JIANG Guo-cheng, LIU Hong-mei. Seepage control of earth dam on the sand-gravel foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1961(1): 33-43. (in Chinese))
- [6] 毛昶熙. 关于砂砾地基上土坝的渗流控制的讨论[J]. 水利学报, 1963, 7(3): 66-69. (MAO Chang-xi. Discussion of "seepage control of earth dam on the sand-gravel foundation"[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1963, 7(3): 66-69. (in Chinese))
- [7] 曹敦履. 葛洲坝工程大江围堰地基渗流控制[J]. 水利学报, 1988, 19(2): 49-55. (CAO Dun-lv. Cofferdam seepage control of Gezhouba project [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1988, 19(2): 49-55. (in Chinese))
- [8] TOMLINSON S S, VAID Y P. Seepage forces and confining

- pressure effects on piping erosion [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2000, **37**(1): 1 – 13.
- [9] 周 健, 姚志雄, 白彦峰, 等. 砂土管涌的细观机理研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2008, **36**(6): 733 – 737. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, BAI Yan-feng, et al. Meso-mechanical study on piping in sandy soils[J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2008, **36**(6): 733 – 737. (in Chinese))
- [10] KENNEY T C, LAU D. Internal stability of granular filters [J]. Canadian Geotechnical Journal, 1985, **22**(2): 215 – 225.
- [11] SKEMPTON A W, BROGAN J M. Experiments on piping in sandy gravels [J]. Géotechnique, 1994, **44**(3): 449 – 460.
- [12] STERPI D. Effect of the erosion and transport of fine particles due to seepage flow[J]. International Journal of Geomechanics, 2003, **3**(1): 111 – 122.
- [13] PALMEIRA E M, FANNIN R J, VAID Y P. A study on the behaviour of soil-geotextile systems in filtration tests[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1996, **33**(6): 899 – 912.
- [14] MOFFAT R A, FANNIN R J. A large permeameter for study of internal stability in cohesionless soils[J]. Geotechnical Testing Journal, 2006, **29**(4): 273 – 279.
- [15] BENDAHMANE F, MAROT D, ALEXIS A. Experimental parametric study of suffusion and backward erosion[J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2008, **134**(1): 57 – 67.
- [16] RICHARDS K S, REDDY K R. True triaxial piping test apparatus for evaluation of piping potential in earth structures[J]. Geotechnical Testing Journal, 2010, **33**(1): 1 – 13.
- [17] 李广信, 周晓杰. 堤基管涌发生发展过程的试验模拟[J]. 水利水电科技进展, 2005, **25**(6): 21-24. (LI Guang-xin, ZHOU Xiao-jie. Laboratory simulation on generation and evolution of piping in embankment foundation[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2005, **25**(6): 21 – 24. (in Chinese))
- [18] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 堤基渗流无害管涌试验研究[J]. 水利学报, 2004, **35**(11): 46 – 53, 61. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Experimental study on harmless seepage piping in levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, **35**(11): 46 – 53, 61. (in Chinese))
- [19] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 北江大堤典型堤段管涌试验研究与分析[J]. 水利学报, 2005, **36**(7): 818 – 824. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Experimental study and analysis on piping of levee in Beijiang River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(7): 818 – 824. (in Chinese))
- [20] 姚秋玲, 丁留谦, 孙东亚, 等. 单层和双层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(2): 13 – 18. (YAO Qiu-ling, DING Liu-qian, SUN Dong-ya, et al. Experimental studies on piping in single and two-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, **38**(2): 13 – 18. (in Chinese))
- [21] 丁留谦, 姚秋玲, 孙东亚, 等. 三层堤基管涌砂槽模型试验研究[J]. 水利水电技术, 2007, **38**(2): 19 – 22. (DING Liu-qian, YAO Qiu-ling, SUN Dong-ya, et al. Experimental studies on piping in three-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, **38**(2): 19 – 22. (in Chinese))
- [22] 刘 杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤双层地基渗透破坏机理模型试验研究[J]. 水利学报, 2008, **39**(11): 1211 – 1220. (LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Failure mechanism of seepage in levees with double-layer foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, **39**(11): 1211 – 1220. (in Chinese))
- [23] 张家发, 吴昌瑜, 朱国胜. 堤基渗透变形扩展过程及悬挂式防渗墙控制作用的试验模拟[J]. 水利学报, 2002, **33**(9): 108 – 111, 116. (ZHANG Jia-fa, WU Chang-yu, ZHU Guo-sheng. Experimental study on seepage deformation propagation control using impervious wall of suspension type[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, **33**(9): 108 – 111, 116. (in Chinese))
- [24] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金傍, 等. 悬挂式防渗墙控制管涌发展的试验研究[J]. 水利学报, 2005, **36**(1): 42 – 50. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Experimental study on piping development control by means of suspended cut-off wall[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, **36**(1): 42 – 50. (in Chinese))
- [25] 姚志雄, 周 健, 张 刚. 砂土管涌机理的细观试验研究[J]. 岩土力学, 2009, **30**(6): 1604 – 1610. (YAO Zhi-xiong, ZHOU Jian, ZHANG Gang. Meso-experimental research on piping mechanism in sandy soils[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, **30**(6): 1604 – 1610. (in Chinese))
- [26] 刘 杰, 谢定松, 崔亦昊. 江河大堤堤基砂砾石层管涌破坏危害性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, **31**(8): 1188 – 1191. (LIU Jie, XIE Ding-song, CUI Yi-hao. Destructive tests on piping failure of sandy gravel layer of river dikes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, **31**(8):

- 1188–1191. (in Chinese))
- [27] 曹敦履. 渗流管涌的随机模型[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1985(2): 39–46. (CAO Dun-lv. A stochastic model for seepage piping[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1985(2): 39–46. (in Chinese))
- [28] 曹敦履, 曹 罡, 邹火元, 等. 水工建筑物渗流管涌的 Monte-Carlo 模型[J]. 人民长江, 1997, 28(6): 11–13, 46. (CAO Dun-lü, CAO Gang, ZOU Huo-yuan, et al. Monte Carlo simulation in seepage piping of hydraulic structure[J]. Yangtze River, 1997, 28(6): 11–13, 46. (in Chinese))
- [29] 陈建生, 李兴文, 赵维柄. 堤防管涌产生集中渗漏通道机理与探测方法研究[J]. 水利学报, 2000, 31(9): 48–54. (CHEN Jian-sheng, LI Xing-wen, ZHAO Wei-bing. Study on piping leakage mechanism[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, 31(9): 48–54. (in Chinese))
- [30] 毛昶熙, 段祥宝, 蔡金榜, 等. 堤基渗流管涌发展的理论分析[J]. 水利学报, 2004, 35(12): 46–50. (MAO Chang-xi, DUAN Xiang-bao, CAI Jin-bang, et al. Theoretical analysis on piping development of levee foundation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 35(12): 46–50. (in Chinese))
- [31] CIVIDINI A, GIODA G. Finite element approach to the erosion and transport of fine particles in granular soils[J]. International Journal of Geomechanics, 2004, 4(3): 191–198.
- [32] 张家发, 朱国胜, 曹敦履. 堤基渗透变形扩展过程和悬挂式防渗墙控制作用的数值模拟研究[J]. 长江科学院院报, 2004, 21(6): 47–50. (ZHANG Jia-fa, ZHU Guo-sheng, CAO Dun-lü. Numerical simulation of seepage deformation propagation in dyke foundation and effects of cut-off wall of suspension type[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2004, 21(6): 47–50. (in Chinese))
- [33] 丁留谦, 吴梦喜, 刘昌军, 等. 双层堤基管涌动态发展的有限元模拟[J]. 水利水电技术, 2007, 38(2): 36–39. (DING Liu-qian, WU Meng-xi, LIU Chang-jun, et al. Numerical simulation of dynamic development of piping in two-stratum dike foundations[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2007, 38(2): 36–39. (in Chinese))
- [34] 刘忠玉, 乐金朝, 苗天德. 无黏性土中管涌的毛管模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(22): 3871–3876. (LIU Zhong-yu, LE Jin-chao, MIAO Tian-de. Capillary-tube model for piping in noncohesive soils and its application[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(22): 3871–3876. (in Chinese))
- [35] 周 健, 姚志雄, 张 刚. 砂土渗流过程的细观数值模拟[J]. 岩土工程学报, 2007, 29(7): 977–981. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Mesomechanical simulation of seepage flow in sandy soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2007, 29(7): 977–981. (in Chinese))
- [36] 周 健, 姚志雄, 张 刚. 基于散体介质理论的砂土管涌机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2008, 27(4): 749–756. (ZHOU Jian, YAO Zhi-xiong, ZHANG Gang. Research on piping mechanism in sandy soils based on discrete element theory[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008, 27(4): 749–756. (in Chinese))
- [37] 周晓杰, 介玉新, 李广信. 基于渗流和管流耦合的管涌数值模拟[J]. 岩土力学, 2009, 30(10): 3154–3158. (ZHOU Xiao-jie, JIE Yu-xin, LI Guang-xin. Numerical simulation of piping based on coupling seepage and pipe flow[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(10): 3154–3158. (in Chinese))
- [38] VARDOULAKIS I, STAVROPOULOU M, PAPANASTASIOU P. Hydro-mechanical aspects of the sand production problem[J]. Transport in Porous Media, 1996, 22(2): 225–244.