

强夯加固机理研究现状及展望*

周世良^{1,2}, 王江³, 张明强⁴

(1. 重庆交通学院 河海学院, 重庆 400074; 2. 重庆大学 工程力学系, 重庆 400044; 3. 重庆工商大学 理学院, 重庆 400067; 4. 重庆市交通委员会基本建设工程质量监督站, 重庆 400067)

摘要:介绍了强夯法的工程应用,分析了地基土的强夯加固基本原理,总结了强夯加固机理的研究现状及存在的不足,并就今后的研究重点和发展方向提出了一些构想——强夯加固机理可采用以混合物理论为基础的多孔介质理论和合理的土动弹塑性本构模型进行系统研究,并应实现饱和土和非饱和土的统一,土体液化破坏机理也是强夯加固机理研究的重要内容。

关键词:强夯加固;多孔介质;本构模型;液化破坏

中图分类号: TU472 文献标识码: B 文章编号: 1001-716X(2006)01-0065-06

强夯法加固地基是60年代末由法国梅纳公司首先创用,就是将很重的夯锤(一般100~400kN)从很高处(落距一般6~40m)自由落下,在地基土中形成冲击波和动应力,使地基土层达到很高的致密程度,并使之具有良好的力学性能。经过几十年的应用与发展,已适用于加固从砾石到粘性土的各类地基土。由于它具有设备简单、施工方便、适用范围广、经济易行、效果显著和节省材料等优点,很快传播到世界各地,目前已有几十个国家和地区1000余项工程采用了此法加固地基。

我国于70年代末引入此法,首先由钱征等人于1978年在天津新港成功地对软土进行强夯试验研究,在此基础上又对秦皇岛细砂地基成功地进行试验。自此,强夯加固方法在国内迅速得到推广,据不完全统计,迄今全国已有十几个省市在数百项工程采用了这一加固方法。值得一提的是,近几年来中国民航机场建设工程公司在机场建设中,包括深圳、福州、海口、浦东和杭州等国际机场广泛采用此法。在最近几届全国性的地基处理学术会议上,强夯法均被列为交流的重点之一。目前,应用强夯法处理地基的范围包括工业与民用建筑、仓库、油罐、储仓、公路、铁路路基,机场飞机跑道、港口码头及护岸工程等。

虽然强夯实践发展较快,但对强夯机理和设计理论的研究仍处于初期阶段。强夯理论研究主要集

中在宏观机理上,主要利用某种理论对强夯加固机理的某些方面进行研究,如夯锤与地面的接触应力、夯能沿土层深度的分配、强夯加固深度、强夯地基承载力和沉降等。微观机理方面的研究相对较少,陈东佐^[1]曾通过X光衍射和扫描电子显微镜试验,分析研究了陕西潞城湿陷性黄土的全矿物成分及其强夯前后主要物理力学指标的变化规律。而基于地基土中土颗粒、水、气(干气、湿气)、水气膜等各自的力学行为及其相互作用对强夯机理进行系统研究,到目前为止几乎是空白。强夯设计方面则主要利用规范给出的经验公式确定强夯参数,并利用工程现场试夯修正参数。尽管国内外许多专家学者如Menard、Scott、Skipp、Gambin、钱征、张永均、王钟琦、郑颖人等在强夯加固机理的理论研究方面作了大量的工作,但更多的则是通过依托个别实际工程的强夯试验,对试验结果进行整理、分析,得出一些针对性强、推广有限的结论,这极大的限制了强夯理论的发展及强夯法的推广应用。

本文首先对地基土的强夯加固基本原理及加固机理的研究现状作一阐述,然后在分析当前研究动向的基础上,对今后研究工作的发展方向提出一些构想,希望能给从事强夯法的理论研究及推广应用的科技工作者以启发。

1 强夯法加固地基的基本原理分析

强夯是在极短的时间内(加荷历时几十毫秒至

收稿日期:2004-12-28;修订日期:2005-03-10

基金项目:重庆市教委科技项目资助课题

作者简介:周世良(1972-),男,浙江宁波人,副教授,博士生,从事港口工程、工程力学的教学与研究。

一百毫秒)对地基土体施加一个巨大的冲击能量,冲击能转化为各种波形传递到地基土体内.由强夯产生的冲击波按其在土中传播和对土作用的特性可分为体波和面波,见图 1.体波包括纵波(P波)和横波(S波),从夯击点沿着一个半球波阵面径向向地基深处传播,对地基土可起压缩和剪切作用,引起地基土的压密固结.面波(R波)从夯击点沿地表传播,其随离震源距离的增加而衰减的幅度比体波慢得多,对地基土不起加固作用,其竖向分量对表层土起松动作用.因此,强夯的结果是在地基土中沿深度形成性质不同的三个区(见图 2):地基表层松动区;松动区下面某一深度,受到体波的作用,使土体产生沉降和压密,形成加固区;加固区下面冲击波逐渐衰减,不足以使土体产生塑性变形,对地基土不起加固作用,即为弹性区.

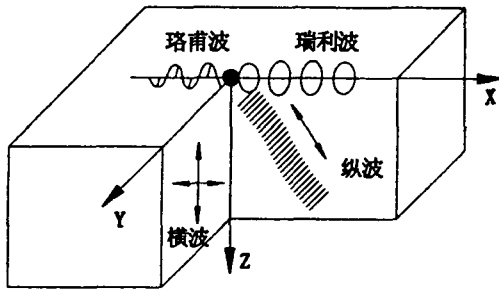


图 1 强夯形成的冲击波体系

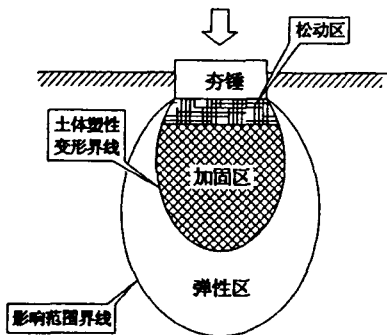


图 2 强夯作用模式

根据地基土的种类不同,强夯加固基本原理可分为动力夯实、动力固结两种情况,其共同特点都是通过破坏土体的天然结构并达到新的稳定状态.

1.1 非饱和土的强夯加固原理

采用强夯法加固非饱和土,特别是孔隙多、颗粒粗大的土,是基于动力夯实的概念,即强夯巨大的夯击能力所产生的冲击波和动应力在土体中传播,使土颗粒破碎或使土颗粒产生瞬间的相对运动,土体孔隙中的气体迅速排出或压缩,孔隙体积减少,从而使地基土形成较密实结构.因此,非饱和土的夯实过程,主要是土中的气体被挤出的过程.

1.2 饱和土的强夯加固原理

传统的固结理论认为,饱和软土在快速加荷条件下,由于孔隙水无法瞬时排出,所以是不可压缩的.L. Menard 则根据饱和土在强夯后瞬时能产生数十厘米的压缩这一事实,认为饱和土强夯加固原理可解释为压密、液化和触变恢复等特征.

1.2.1 饱和土的可压缩性

对于理论上的二相饱和土,由于水及土颗粒的压缩系数都很小,因此当土中水未排出时,可以认为饱和土是不可压缩的.但由于饱和土中含有 1% ~ 4% 的封闭气体和少量溶解在液相中的气体,故仍具有一定的压缩性.在强夯能量的作用下,气体体积先压缩,部分封闭气泡被排出,孔隙水压增大,随后气体有所膨胀,孔隙水排出,超孔隙水压力减少.在此过程中,土中的固相体积是基本不变的,而液相、气相体积会减少.也就是说在重锤的夯击作用下,饱和土会瞬时发生有效的压缩变形.

另外,当重锤反复夯击土层表面时,在地基中会产生极大的冲击能,使土体中的水和土颗粒两种介质产生不同的振动效应,当两者的动应力差大于土颗粒的吸附能时,土颗粒周围的部分结合水从颗粒间析出,最后从上面或四周逸出,从而使土体进一步压缩.

1.2.2 饱和土的局部液化

在夯锤的反复作用下,饱和土中将引起很大的超孔隙水压力,随着夯击次数的增加,超孔隙水压力也不断提高,致使土中有效应力减少.当土中某点的超孔隙水压力等于上覆的土压力(对于饱和粉细砂土)或等于上覆土压力加上土的粘聚力(对于粉土和粉质粘土)时,土中的有效应力完全消失,土的抗剪强度降为零,土颗粒将处于悬浮状态-达到局部液化.此时由于土粒骨架联结完全被破坏,土体强度降到最低,使饱和土体中水流阻力也大大降低,即土体的渗透系数大大增加.而处于很大的水力梯度作用下的孔隙水,就能沿着土中已经由夯击而产生的裂缝面或者击穿土体中的薄弱面而迅速排出,超孔隙水压力比较快地消散,加速了饱和土的固结,遂使土体的抗剪强度和变形模量均有明显的增加.

1.2.3 饱和土的触变恢复

饱和细粒土在强夯冲击波作用下,土中原来处于静平衡状态的颗粒、阳离子、定向水分子受到破坏,水分子的定向排列被打乱,颗粒结构从原先的絮凝结构变成某种程度的分散结构,粒间联系削弱,强度降低.但在夯后经过一定时间的休置后,由于组成土骨架中的最小颗粒-胶体颗粒的分子水膜重新逐渐联结,恢复其原有的稠度和结构,和自由水又粘结

在一起形成一种新的空间结构,于是土体又恢复并达到更高的强度,这就是饱和土的触变特性.根据实测资料,饱和土经强夯后的强度增长能延续几个月的时间.

2 强夯机理研究现状

由于强夯法的机理较为复杂,其应用迄今也只不过是近 30 年的事,因此,有关强夯法的研究仍处于初期阶段,至今尚未形成成熟和完善的理论,一般针对某一个方面的研究较多^[3-12],而系统研究则较少.目前对强夯法的研究主要集中在以下几方面:(1)强夯过程中夯击能的传递机制;(2)强夯过程中土性改善机制;(3)强夯设计参数的确定,特别是有效加固深度的确定;(4)土性对强夯的适应性(采用强夯处理特殊土,特别是消除黄土湿陷性的研究,占有很大比重),一般认为采用强夯加固粗粒土没有问题,而加固细粒土则未有定论;(5)强夯的力学模型;(6)在夯击能作用下的孔隙水变化机制;(7)强夯时振动影响范围的研究.

对强夯法加固地基的机理认识,文献[2]认为首先应区分宏观和微观机理.宏观机理从加固区土所受冲击力、应力波的传播、土的强度对土加密的影响作出解释;微观机理则对冲击力作用下土的微观结构的变化,如土颗粒的重新排列、连接作出解释.宏观机理是外部表现,微观机理是内部依据.其次,应对饱和土和非饱和土加以区别,饱和土存在孔隙水排出并被压密的固结问题,并应区分粘性土和无粘性土,它们的渗透性不同,粘性土存在固化内聚力,砂土则不然.另外,对一些特殊土,如湿陷性黄土、填土、淤泥等,由于它们具有各自的特殊性能,其加固机理也存在特殊性.强夯机理研究中还有一个必须研究的内容就是夯击能力的传递,即确定夯击能量中真正用于加固地基的那部分能力和该部分能量如何加固地基.

在强夯加固的宏观机理研究方面,目前主要以某种理论结合室内外试验对强夯加固机理的某些方面进行定性和定量研究,且对不同的土性、不同的研究内容采用不同的理论方法.文献[2]提出对于饱和和粘性土主要采用 L. Menard 提出的动力固结模型来分析土强度的增长过程、夯击能量的传递机理,在夯击能量作用下孔隙水的变化机理以及强夯的时间效应等,但它对饱和和粘性土在强夯作用下渗透系数的变化以及强夯作用饱和和粘性土的触变机理,只做了定性的解释,而未作进一步的探讨;对非饱和土的研究则是基于动力密实的机理,简单地将非饱和土的夯实过程视为土中气相(空气)被挤出的过程,

而忽略孔隙水的作用.王钟琦^[3]利用能量法推出强夯加固深度公式.钱学德^[4]以波的传播理论为基础,提出了强夯法理论计算的数学模型.董小东^[5]利用弹性本构方程和接触面上的位移条件用总应力法求解了锤-土作用问题,得出了接触面应力分布和夯坑规律.C. J. Poran^[6]等利用双屈服和多屈服面本构模型,对砂土强夯进行了有限元分析.郭见扬^[7,8]利用物理学的动量定理和碰撞理论对强夯夯锤的冲击力问题和夯能沿土层深度的分配问题进行研究.郑颖人^[11]对饱和土或高饱和度土及软粘土地基的强夯机理进行了定性研究及工程试验验证.宋修广^[12]等综合考虑地基土的流固动力耦合和地基与夯锤接触表面的动力耦合情况,给出了基于三维有限元法的计算方法和迭代格式,并对一具体算例进行了耦合数值分析,总结了地基位移、应力及接触反力等在强夯作用时间内的变化规律和在空间上的分布特征.

在强夯加固的微观机理研究方面,则主要以试验为主.Hansbo 提出,在他所做的粘土试验研究中发现孔隙水中存在着可活动粒子.Osipov 做了一系列试验来观察高岭土、蒙脱土试样微观结构的变化规律.直剪试验中发现:要使微观结构充分发挥作用,就需要另外附加的能量;触变试验中发现:触变后强度恢复过程中伴随着微观结构的重新组合.陈东佐^[1]曾通过 X 光衍射和扫描电子显微镜试验,分析了陕西潞城湿陷性黄土的全矿物成分及其强夯前后主要物理力学指标的变化规律,研究发现在加固效果最好的夯后土体中存在着旋涡状的微结构.

尽管国内外许多学者从不同的角度对强夯机理进行了研究,但至今尚未取得满意的结果,其主要原因是各类地基土的性质千差万别,很难建立系统的强夯加固理论.这也导致目前的有关强夯机理的理论研究很难指导工程实践.因此,目前工程界通常的做法是针对某个工程的实际情况,根据经验初步选定设计参数,在通过现场试夯结果,并经必要的修改后,最终确立它适合于现场土质条件的强夯设计参数.这些强夯设计计算方法大多比较粗糙,凭经验而定,有的设计过于保守而容易造成浪费,或设计偏于乐观而达不到地基承载力的要求.

3 现有研究工作的问题和今后的研究方向

3.1 强夯机理的系统研究

虽然,强夯的应用发展较快,关于应用强夯的工程报告也较多,已积累了较丰富的资料,而且强夯处理对地基的结构性、强度和变形一般皆有较大影响的事实已为工程界所共识,但是迄今仍没有文献对

其作系统的研究,这与现有研究工作所采用的方法有关.因此,我们认为,今后对于地基土的强夯加固机理应着重于寻求合适的理论进行系统性研究,这是强夯理论成熟的一个重要标志.

地基土通常是由土颗粒、水、气(干气和湿气)、水气膜等组成的多相混合物,因此,对地基土强夯机理可从以混合物理论为基础的多孔介质理论(PMT)^[13]出发,采用合适的土体本构模型进行系统性研究.系统性研究方法应能适用于各种类型的饱和土或非饱和土;应能阐明强夯动力作用下地基土中变形场、应力场和渗流场等的演化规律;应能解决夯击能的传递、分配及有效加固深度问题;应能预测地基土的强夯加固效果;应能良好地指导工程实践.

多孔介质理论研究始于本世纪60年代, Morland^[14]针对纯力学状态,建立了一个饱和多孔固体的简单本构理论,他还研究了多孔固体的弹塑性和一种饱和多孔凝灰岩. Kenyon^[15]使用了混合物理论和一个体积分数的平衡方程,描述了固-流混合物的热静力学理论. Bedford 和 Drumheller^[16]介绍了一种研究饱和多孔固体的新方法,即创建一种多孔介质的变分原理. Nunziato 和 Passman^[17]回顾并扩展了多相混合物理论,这个理论的特色主要是引入了附加平衡方程,以便弥补由于引入体积分数而缺少的场方程. Bowen^[18,19]总结了60年代和70年代关于混合物理论的全部成果,引入体积分数概念,建立了可压和不可压多孔介质在一般情况下的场方程,他还讨论了从其一般结果蜕化的特殊问题:刚性多孔固体、经典的 Biot 多孔介质模型和不可压多孔弹性体, Bowen 的模型获得了较广泛的影响. 90年代以来, Schrefler^[20-23], de Boer^[24,25], Ehlers^[26,27], Li^[28], Wilmanski^[29], 陈正汉^[30,31]、愈茂宏^[32]等学者进一步开展了模型的改进工作,取得了许多重要的研究成果.如 Schrefler^[23]提出的用于非饱和可变形多孔介质动力特性分析的全耦合动力模型、陈正汉^[30,31]以混合物理论为基础提出的非饱和土固结的数学模型等.目前,以混合物理论为基础的多孔介质理论研究已日趋成熟,但用该理论去指导工程实践尚处于初期阶段.例如,对于地基土强夯加固这样的实际工程问题,利用该理论研究其机理,到目前为止几乎为空白.因此,这是今后强夯加固机理研究的一个重要发展方向.

3.2 土的动弹塑性本构模型

强夯加固机理的系统研究应基于土的合理的本构模型.强夯动力作用下,地基土处于反复的加载-卸载过程中,以往用于描述地基土在静力单调加载条件下系列特征的经典塑性模型显然已经不适用

了,因为经典塑性理论中的屈服面的概念不能描述土随加载方向变化的变形模量的改变.资料表明,地基土在动力加载、卸载及反向加载过程中同时有弹性和塑性应变产生,并伴随着塑性应变能引起的各向异性现象的出现.这就需要对土在卸载时的非线性、再加载时不可恢复的塑性应变及反向加载时引起的各向异性进行描述,使得模型的模拟变得极其复杂.

建立这些模型的基本思路有两条,即抛开经典塑性理论的本构模型转而采用内时粘塑性模型,或者对经典塑性理论模型进行修正,形成各向异性硬化模量场理论^[33].由于基于经典理论的模型对于静力单调加载时土特性的模拟在工程实际中已取得了一定的成功,并为广大从事实际工作的工程师所接受,又由于土体材料基本上呈现为弹塑性特性,故后一种途径成为研究者关注的焦点.以经典塑性理论为基础建立的模型,放弃其中单屈服面的描述,代之以各向同性硬化和运动硬化组合的多重屈服模型,如 Prevost(1977年)等学者提出的多屈服面硬化模量场模型、Bardet(1986年)等提出的边界模型、Hueckel & Nova(1979年)提出的超弹性滞后模型以及 Zienkiewicz 等提出的压密模型.但这些模型理论都不同程度地存在着参数测定困难且无明确物理含义及理论描述复杂等缺点,以至一直未能在实际中获得广泛的应用.

因此,建立能反映土在卸载时的非线性、再加载时不可恢复的塑性应变及反向加载时引起的各向异性、且能较方便地用于工程实际的土动弹塑性本构模型是对强夯加固机理进行系统研究的另一关键.

3.3 非饱和土和饱和土的统一性

目前对于非饱和土和饱和土的强夯机理的研究采用了不同的方法^[2],这反映了强夯机理研究理论的不成熟.要实现非饱和土和饱和土的统一,首先要求研究采用的理论具有一般性,即能考虑非饱和土的一般性状,一定条件下又能简化为饱和状态.以混合物理论为基础的多孔介质理论能同时考虑土颗粒、水、气(干气、湿气)、水气膜等的特性及其相互作用,能满足这一要求.例如 Schrefler^[23]提出的用于可变形多孔介质动力特性分析的全耦合动力模型.其次,采用的土体本构模型应具有一般性.同一试样饱和状态与非饱和状态有较大差异,许多人往往给予两组不同的力学参数来描述饱和和非饱和试样的应力-应变特性.这样做显然不合理,因为从机理看,造成差别的原因仅仅是两者的吸力不同而已,饱和土只不过是而非饱和土的特例.因此,正确的做法应是对每一种土料给予统一的计算参数,而在有关的计算

公式中引入吸力项以说明两者的不同^[34]。

3.4 液化破坏理论

液化是指无粘性土、低塑性粘土、粉煤灰、尾矿砂及沙砾石等土类由于孔隙压力增加和有效应力减小从固态变为液态的过程^[35],而土的振动液化是指由于振动力等动荷载引起的液化。地基土强夯处理时,由于夯锤的作用,会在地基土中形成冲击波和动应力,而使松软土体体积收缩,如果土体是饱和的,且内部的孔隙水无法及时排出,就会引起内压升高,当内压升高到等于围压,土体就完全失去强度,达到液化(或局部液化)状态,这在强夯施工中十分常见。因此,在地基土强夯加固机理的系统研究中,对土体液化破坏机理的研究是必不可少的。

目前有关土体液化问题的研究主要有两种途径。其一是半经验性的,即用经验曲线拟合室内动力试验所得的动强度、液化周期性剪应力及振动孔隙压力等变化曲线,试验曲线因试验条件而异,难于符合千差万别的现场情况。因此这种研究的局限性是不言而喻的。另一种途径是基于运动硬化的弹塑性理论或各种各样的变种,如边界理论^[36]和时理论^[36]。有关这方面的研究也已有20多年的历史,提出的模型不下几十种,但没有一个能完满解释土体的体积收缩特性。研究表明^[37],对于液化破坏这样复杂荷载下的土体变形过程采用传统的弹塑性理论已无法描述。为了更好的描述实际的土体变形特性,一些学者对经典弹塑性理论提出了许多修正方案,如多重屈服面、似弹性应变等概念^[36],但这些模型均没有根本上解决土体液化问题。文献^[37]认为,解决土体液化破坏问题必须和土体结构性模型相结合,并做了一些尝试。另外,目前有关土体液化问题的研究主要集中在砂性土上,砂土液化已经成为一个专门名词,这对液化破坏理论研究的发展是不利的。事实上,正如液化的定义所述,软粘土和其它大孔隙土同样可能液化。目前,土体液化破坏理论研究尚处于初期阶段,有待于土力学工作者不断深入研究。

4 结 语

本文分析了地基土的强夯加固的基本原理,总结了强夯加固机理的研究现状及存在的不足,并提出了今后的研究重点和发展方向。

1)地基土的强夯加固机理应着重于寻求合适的理论进行系统性研究,这是强夯理论成熟的一个重要标志,而采用以混合物理理论为基础的多孔介质理论和合理的土动弹塑性本构模型可对强夯加固机理加以系统研究。

2)目前对于非饱和土和饱和土的强夯机理的研

究采用了不同的方法,这反映了强夯机理研究理论的不成熟,采用多孔介质理论和相应的本构模型可实现非饱和土和饱和土强夯机理研究的统一。

3)土体液化或局部液化是强夯加固过程中的重要现象,因此加强土体液化破坏理论的研究是完善强夯加固机理研究的重要环节。

参考文献:

- [1] 陈东佐.强夯作用前后潞城湿陷性黄土显微结构的研究[A].第四届全国土力学与基础工程学术会议论文集[C].1983.
- [2] 《地基处理手册》编写委员会.地基处理手册[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [3] 王钟琦,等.强夯机理及其环境效应[A].第四届全国土力学与基础工程学术会议论文集[C].1983.
- [4] 钱学德.强夯法室内试验和理论计算[J].工程勘察,1983,(1):31-35.
- [5] 董小东.强夯法与砂井预压法加固软土地基[D].南京:河海大学,1995.
- [6] PORAN, C J. et al. Finite Element Analysis of Impact Behavior of Sand[J]. Soils and Foundations, 1992, 32(4):68-80.
- [7] 郭见扬.强夯夯锤的冲击力问题(强夯加固机理探讨之一)[J].土工基础,1996,10(2):35-39.
- [8] 郭见扬.夯能沿土层深度的分配问题(强夯加固机理探讨之二)[J].土工基础,1996,10(3):24-28.
- [9] 张永钧.平涌潮.强夯法处理大块抛石地基的试验研究[A].第三届全国地基处理学术讨论会论文集[C].1992:395-400.
- [10] 卢小兵,张倬元.强夯地基效应及加固机制浅析[J].地质灾害与环境保护,1998,9(4):11-15.
- [11] 郑颖人,李学志,周良忠.软粘土地基的强夯机理及其工艺研究[J].岩石力学与工程学报,1998,17(5):571-580.
- [12] 宋修广,李英勇,韩军.强夯加固地基的多重耦合分析[J].岩土力学,2003,24(3):471-474.
- [13] 刘占芳.多孔介质理论发展史上的重要成果[M].重庆:重庆大学出版社,1995.
- [14] MORLAND L W. A simple constitutive theory for a fluid-saturated porous solid[J]. J. Geophys. Res, 1972, 77: 890-900.
- [15] KENYON D E. The theory of an incompressible solid-fluid mixture[J]. Arch. Rational Mech. Anal, 1976, 62:131-147.
- [16] BEDFORD A. & DRUMBELLER D S. A variational theory of porous media[J]. Int. J. Solids and Structures, 1979, 15:967-980.
- [17] NUNZIATO J W. & PASSMAN S L. A multiphase mixture theory for fluid-saturated granular materials[J]. In: Mechanics of Structured Media. ed. by A. P. S. Selvadurai,

- 1981, Elsevier, Amsterdam, 243-254.
- [18] BOWEN R M. Incompressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. *Int. J. Engng. Sci.*, 1980, 18:1129-1148.
- [19] BOWEN R M. Compressible porous media models by use of the theory of mixtures[J]. *Int. J. Engng. Sci.*, 1982, 20: 697-735.
- [20] ZHANG H W, SANAVIA L, SCHREFLER B A. Numerical analysis of dynamic strain localization in initially water saturated dense sand with a modified generalized plasticity model [J]. *Computers and Structures*, 2001:441-459.
- [21] SCHREFLER B A, MAJARNA C E & SANAVIA L. Shear band localization in saturated porous media [J]. *Arch. Mech.*, 1995, 47:577-599.
- [22] SCHREFLER B A, SANAVIA L & MAJORANA C E. A multiphase medium model for localization and postlocalisation simulation in geomaterials[J]. *Mech. Cohes-Frict. Mater.* 1996, 1:95-114.
- [23] SCHREFLER B A. A fully coupled dynamic model for two-phase fluid flow in deformable porous media[J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2001: 3223-3246.
- [24] De Boer R. Highlights in the historical development of the porous media theory: Toward a consistent macroscopic theory [J]. *Appl. Mech. Rev.*, 1996, 49(4):201-262.
- [25] De Boer R. *Theory of Porous Media: Highlights in Historical development and Current State*[M]. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 1999.
- [26] EHLERS W & KUBIK J. On finite dynamic equations for fluid-saturated porous media[J]. *Acta Mechanica*, 1994, 105:101-117.
- [27] EHLERS W & VOLK W. On shear band localization phenomena of fluid-saturated granular elasto-plastic porous solid materials accounting for fluid viscosity and micropolar solid rotation [J]. *Mech. Cohesive-Frictional Mater. Struct.*, 1997, 2(4):301-320.
- [28] XIANGYUE Li & XIANGWEI Li On the thermoelasticity of multicomponent fluid-saturated reacting porous media [J]. *Int. J. Engng. Sci.*, 1992, 30:891-912.
- [29] WILMANSKI K. Lagrangian model of two-phase porous materials. *J. Non-equilib[J]. Thermodyn.*, 1995, 20:50-77.
- [30] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论(I) [J]. *应用数学和力学*, 1993, 14(2):127-137.
- [31] 陈正汉. 非饱和土固结的混合物理论(II) [J]. *应用数学和力学*, 1993, 14(8):687-698.
- [32] 愈茂宏, 范寿昌. 双剪统一弹塑性本构模型及其工程应用[J]. *岩土工程学报*, 1997, 19(6):2-10.
- [33] 徐干成. 饱和砂土循环动应力应变特性的弹塑性模拟研究[J]. *岩土工程学报*, 1995, 17(2):1-12.
- [34] 沈珠江. 非饱和土力学的回顾与展望[J]. *水利水电科技进展*, 1996, 16(1):1-5.
- [35] 钱家欢, 殷宗泽. *土工原理与计算* [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1980.
- [36] 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.
- [37] 沈珠江. 现代土力学的基本问题[J]. *力学与实践*, 1998, 20(6):1-6.

The actuality and prospect of the mechanism research in dynamic consolidation

ZHOU Shi-liang^{1,2}, WANG Jiang³, ZHANG Ming-qing⁴

(1. College of River and Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Department of Engineering Mechanics, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. College of Science, Chongqing Technology and Business University, Chongqing 400067, China; 4. Chongqing Quality Supervision Station of Foundation Construction of Communication Committee, Chongqing 400067, China)

Abstract: The application of dynamic consolidation in civil engineering is introduced, its basal principle is analyzed, the research actuality on the mechanism of dynamic consolidation and its limitation are summarized, finally, some key topics of its further research is put forward-The mechanism of dynamic consolidation can be studied systematically with the porous media theory and appropriate dynamic elastic-plastic constitutive model of soil, the unification between saturated soil and unsaturated soil should be realized; besides, the liquefaction failure theory is an important content in studying on the mechanism of dynamic consolidation.

Key words: dynamic consolidation; porous media; constitutive model; liquefaction failure