

混凝土损伤本构理论研究综述

何建涛, 马怀发, 陈厚群

(中国水利水电科学研究院工程抗震研究中心, 北京 100048)

摘要: 首先论述混凝土本构模型研究的重要性, 并说明损伤力学理论较适于构建混凝土本构模型; 然后对损伤变量的定义、损伤演化方程的确定、损伤本构模型的建立以及如何考虑不可恢复变形与率效应进行较为详细的论述, 最后就混凝土损伤本构模型的发展方向提出了看法。

关键词: 混凝土本构模型; 损伤力学; 率效应; 综述

中图分类号: TV431 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-7647(2010)03-0089-06

Research review on concrete damage constitutive theory//HE Jian-tao, MA Huai-fa, CHEN Hou-qun (Earthquake Engineering Research Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China)

Abstract: First, the importance of researches on concrete constitutive models was presented. The theory of damage mechanics was shown to be suitable for the establishment of concrete constitutive models. Then, the definition of damage variables, the determination of damage evolution equations, the establishment of concrete constitutive models as well as how to consider the irreversible deformation and strain rate effect were discussed. Finally, some opinions about the development direction of concrete damage constitutive models were proposed.

Key words: concrete constitutive model; damage mechanics; strain rate effect; review

混凝土由于具有抗压强度高、耐久性好、适应性强、能够和钢筋较好地共同工作等优点, 在很多领域得到了广泛应用。混凝土的力学性能受很多因素影响, 非常复杂, 目前主要采用试验和数值模拟 2 种方法进行研究。在数值模拟方法中, 有限元法由于其适用性强而最为常用。然而, 在采用有限元法研究混凝土结构的力学性能时, 不可避免地会遇到一个问题, 即如何构造合理的混凝土本构模型和相应的破坏准则。

目前, 混凝土本构模型的研究主要采用弹性力学理论、塑性力学理论、内蕴时间理论、断裂力学理论、损伤力学理论以及上述理论的组合^[1-3]。混凝土材料的性能在很大程度上取决于其内部微裂缝。在荷载作用下, 混凝土内部的微裂缝会扩展和汇合, 最后形成宏观裂缝, 导致强度、刚度等性能的劣化甚至材料的破坏, 即材料发生损伤。而损伤力学正是研究材料损伤的物理过程及其对材料行为影响的一门固体力学分支学科。根据特征尺度和研究方法, 损伤理论分为微观、细观和宏观损伤理论^[4]。其中, 微观、细观损伤理论的研究虽已取得一定进展, 但要实际应用尚存在相当难度, 仍需进一步研究。宏观损

伤理论(又称连续损伤力学或唯象损伤力学)假定材料均质、裂缝均布、损伤非局部, 基于连续介质力学和不可逆热力学, 在本构模型中引入损伤变量表征微观缺陷对材料宏观力学性质的影响, 构造带有损伤变量的本构模型和损伤演化方程来真实地描述受损材料的宏观力学行为, 通过试验拟合有关材料参数。由于微观、细观损伤理论是从微、细结构层次上研究损伤的形态和演化, 而宏观损伤理论模拟的是材料微观、细观损伤的宏观响应, 因此宏观损伤理论更容易被关心实际应用的工程人员所接受。

应用损伤力学分析问题可分为 3 个步骤^[5]: ①认清缺陷(如微裂缝)如何影响材料的宏观性能, 定义合适的损伤变量以描述这种缺陷; ②建立损伤变量演化法则, 反映应力和应变的发展如何引起新的材料损伤; ③对已建立的损伤本构模型和力学基本方程进行求解, 预测混凝土结构宏观缺陷(如裂缝)的产生和发展直至结构失效的过程。

1 损伤变量的定义

损伤力学首先必须定义合适的损伤变量以表征材料微观缺陷对宏观力学性能的影响。由于材料的

宏观性能指标易于测量,所以常用弹性模量、屈服应力、延伸率、质量密度、电阻率、超声波速度、声发射参量、残余寿命等易测宏观物理量来定义损伤变量。

损伤变量有标量和张量 2 种形式。标量损伤变量一般定义为 $d = 1 - \Phi/\Phi_0$, 式中 Φ_0 和 Φ 分别为初始无损状态和损伤状态的宏观可测力学参数,由此可见损伤变量表征了相应宏观力学性能的退化。弹性模量常被用来定义损伤变量。标量损伤模型概念简单,物理意义比较明确,计算效率也较高,但它只能描述各向同性损伤。由于混凝土内部微裂缝的损伤演化具有明显的方向性,即损伤各向异性,所以损伤变量用张量表征更为合理,如 Ortiz^[6]、王怀亮等^[7]直接用材料初始无损状态和损伤状态的弹性刚度或柔度张量定义四阶损伤张量,但张量损伤模型比较复杂,在实际工程中很难应用。

考虑到当前的研究水平和工程实用性,目前绝大多数的损伤模型仍采用标量损伤变量,但由于单标量损伤模型无法模拟混凝土的单边效应,所以很多学者采用双标量损伤模型^[7-14],即定义 2 个损伤变量以描述拉、压应力状态下不同的损伤状态。Resende^[8]根据静水压力大于零还是小于零判断当前应力状态是拉伸还是压缩,对于拉伸,球量空间为受拉损伤,偏量空间忽略受剪损伤(由于混凝土抗拉强度远低于抗剪强度且受拉损伤发展快);对于压缩,球量空间和偏量空间均为受剪损伤。在拉、压应力状态下分别采用受拉损伤变量和受剪损伤变量,在球量空间和偏量空间表征损伤演化具有明确的物理意义。另外一种做法是将应力张量分为拉、压 2 个部分,Mazars 等^[9]直接将 Cauchy 应力张量分解,但由于 Cauchy 应力张量事先未知,需要先对其迭代收敛后分解才能进行。可能注意到这个问题,Faria 等^[13-14]、Oliveira 等^[15]将有效应力张量分解,有效应力张量可由弹性应变张量直接求得,便于数值计算。

从能量的角度看,损伤和塑性应变(不可恢复变形)都是不可逆的能量耗散过程,所以在损伤变量与塑性应变之间建立起一定的关系不失为一种度量损伤的好办法。而在塑性力学中,常采用有效塑性应变(可看作塑性应变的累积)和塑性功(与塑性应变有关的能量耗散)来记录塑性变形历史。Lubliner 等^[16]、Oller 等^[17]、Lee 等^[11-12]基于应力~应变全曲线建立了损伤变量与塑性功之间的关系。但是,在应力空间中,如果材料发生随动强化,即弹性区仅做刚性平移,则当弹性区完全处于拉伸区时,即使应力减小,塑性变形也会发生,此时塑性功减小^[18],用其表征塑性变形历史就会发生错误,所以采用有效塑性应变度量损伤应该更为合理,而且有效塑性应变

的表达式较塑性功的简单,使用起来更为简便。

2 损伤演化方程的确定

定义了合适的损伤变量后,还必须给出准确合理的损伤演化方程。目前,建立损伤演化方程主要有 2 种方法:一种是试验方法,另一种是不可逆热力学方法^[19-21]。前者是在一定理论指导下,根据试验结果假定损伤演化方程的形式,然后由试验结果拟合其中的参数,这种方法没有明确的物理意义;后者仿照经典塑性理论,引入 1 个包含损伤变量的损伤面以定义弹性可逆域,损伤演化方向应和损伤面正交并且保证材料的应力状态保持在后继损伤面上。

由于在热力学意义上损伤能释放率 Y 与损伤变量 d 共轭,即 $Y = -\frac{\partial \psi}{\partial d}$,其中 $\psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e, \boldsymbol{q}^p, d) = \psi(\boldsymbol{\varepsilon}^e, d) + \psi(\boldsymbol{q}^p, d)$,式中 ψ 为霍尔姆兹自由能势, $\boldsymbol{q}^p$ 为塑性内变量, $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ 为弹性应变张量。基于 Y 的损伤准则能够同时考虑弹性和塑性加载历史,并且较其他损伤准则具有更加坚实的热力学基础,通过 Y 建立损伤准则后,根据正交流动法则(即最大损伤耗能原理)即可得到损伤变量演化方程。

不可逆热力学方法的困难在于如何在应力空间或热力学空间选择合理的损伤面,通常要借助试验结果同时考虑热力学条件。另外,不可逆热力学方法也有其不足之处,如有摩擦或复杂加载时,损伤往往不满足正交性,但在当前研究水平下采用不可逆热力学方法建立损伤演化方程是一个相对较好的选择。

3 损伤本构模型的建立

确定了损伤变量及其演化方程以后,就可以建立损伤材料的本构模型,一般的做法是假设在损伤构型和虚拟的无损构型之间存在某一等价关系,如应变等效、应力等效、能量等效和位移等效^[22-25],据此可以从相应的无损材料本构模型获得损伤材料的本构模型,此法简单,因此被广泛采用。

应变等效、应力等效、能量等效和位移等效分别假定在损伤构型和无损构型之间的弹性应变、应力、弹性应变能(或余能)和位移相等。其中,应变等效没有考虑泊松比的损伤效应;应力等效不能很好地描述弹塑性损伤,且两者都只能用于各向同性材料的各向同性损伤情况;能量等效虽可用于各向异性材料的各向异性损伤情况,但它没有考虑损伤引起的能量耗散和材料的几何形状变化(例如有效体积的减小);位移等效考虑了泊松比的损伤效应和损伤构型到无损构型的体积变化,并在一定程度上考虑

了能量耗散,但要实际应用尚有相当难度。另外,在不可逆热力学中,通过直接规定某一包含损伤变量的自由能或应变能的表达式,也可以得到耦合损伤的本构模型,但此时的损伤变量可能没有明确的物理意义,且自由能的表达式不易确定。总之,建立损伤本构模型时损伤构型和无损构型之间的等效假定都存在一定的缺陷,不能完全反映两者之间的关系,为了简化问题,常采用应变等效假定^[26]。

4 不可恢复变形的考虑

早期的混凝土损伤模型主要为弹性损伤模型,没有考虑不可恢复变形的影响,在理论和实际应用方面都缺乏科学性。而塑性力学中的流动理论能够较好地模拟不可恢复变形的发展,虽然其基于金属材料发展起来,但从唯象学的角度看,混凝土和金属的变形过程较为类似,另外限于目前的研究水平,在描述混凝土不可恢复变形的发展时仍较多地采用塑性流动理论。

塑性流动理论基于应力空间或应变空间描述^[2]。在应变空间,随着塑性应变单调增加,屈服面始终膨胀,便于同时研究混凝土强化和软化特性,一维情况下实现起来较为简单,多维情况下由于泊松效应而较难实现。应力空间又可分为 Cauchy 应力空间和有效应力空间。在 Cauchy 应力空间,如果材料处于应变软化范围,则进一步的塑性应变将导致应力减小,即应力增量指向加载面内部,屈服面随之收缩,而弹性卸载时应力增量也指向加载面内部,在 Cauchy 应力空间很难区分这 2 种情况,处理起来比较麻烦。

混凝土内部微裂缝引起的损伤在宏观上可解释为^[3]:在开始加载阶段,微裂缝处于均匀分布状态。在每一独立的微裂缝周围有一应力释放区,即损伤区,损伤区的应力为零,继续加载,应力释放区增大,独立裂缝开始连通,直到最后形成宏观裂缝,造成局部破坏。由于损伤区的应力为零,所以可以认为损伤材料的不可恢复变形完全发生在材料的无损部分(即实际承担荷载部分)。可能基于此, Ju^[19-20]、Lee 等^[11-12]和吴建营^[21]采用有效应力张量代替 Cauchy 应力张量,利用有效应力空间塑性力学方法研究不可恢复变形的发展。由于有效应力随着弹性应变的增大而增大,所以屈服面一直膨胀,不会出现 Cauchy 应力空间因材料软化导致的屈服面收缩情况,因此只需考虑应力强化,避开了处理软化段的麻烦。用塑性流动理论研究混凝土不可恢复变形的发展,其关键是基于已有混凝土试验资料,合理地构造屈服面和流动势等,这方面的系统论述可参考相关文献^[1-2]。

5 率效应的考虑

静态荷载(静载)作用下混凝土的力学特性和本构模型的研究已较为完善,而动态荷载(动载)作用下的研究明显不足。动载作用下混凝土存在应变率效应,这方面的试验成果总结如下^[27-31]:混凝土动拉、动压强度随应变率的增大而增长,两者规律类似,但动拉强度的率敏感性高于动压强度的率敏感性,低强度时的率敏感性高于高强度时的率敏感性;割线模量增加,初始切线弹性模量不变或稍有增加,其率敏感性低于强度的率敏感性;一般认为泊松比不变,峰值应力处应变不变或略有增加;应力-应变全曲线具有良好的相似性,在地震作用频率范围内的变幅循环荷载作用下,混凝土的动态强度主要取决于每一循环内最大应变率时的动态强度,循环增幅的影响相对较小,而每一循环内最大应变率对应的动态强度与单调加载时相同应变率下的动态强度较为接近。根据试验结果,很多学者^[28-30,32-34]对混凝土的动态力学性能拟合给出了相应的经验公式。下面介绍一些考虑率效应的方法。

过应力理论认为材料的率效应由过应力(材料在动力作用下的瞬时应力与对应于相同应变时的静态应力之差)产生,即认为动载作用下材料内部所产生的应力 σ 是静态屈服应力 $\sigma_s(\epsilon)$ 和过应力 $\sigma_d(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 之和,可以表示为 $\sigma = \sigma_s(\epsilon) + \sigma_d(\epsilon, \dot{\epsilon})$ ^[26], 式中 ϵ 为应变, $\dot{\epsilon}$ 为应变率。由于混凝土在弹性阶段几乎无率敏感性现象,仅当加载至出现损伤(往往伴随塑性变形的产生)时才呈现率敏感性,所以也有学者认为过应力只是塑性应变率 $\dot{\epsilon}_p$ 的函数,与应变的大小无关,即 $\sigma = \sigma_s(\epsilon) + \sigma_d(\dot{\epsilon}_p)$ ^[35], 其中 $\sigma_d(\dot{\epsilon}_p)$ 可根据试验数据拟合得到具体形式。另外,一些学者(如 Lee 等^[11-12]、冯明璋^[36]、刘长春^[37])基于黏塑性理论提出的模型,其实质也是过应力模型,由于这些模型基于黏塑性理论,允许应力状态在屈服面之外,所以不能满足一致性条件。

应变率越高,混凝土越难屈服,所以可以使屈服函数中的强化参数具有率敏感性以反映这种影响,即让强化参数率相关。一致黏塑性模型正是沿着这一思路,即将静态屈服函数 $f(\sigma_{ij}, \kappa)$ 用 $f(\sigma_{ij}, \kappa, \dot{\kappa})$ 代替^[38], 式中 σ_{ij} 为应力张量分量, $\kappa, \dot{\kappa}$ 分别为强化参数及其变化率,这样就保证了一致性条件的满足,使黏塑性流动过程中所产生的真实应力状态始终保持在屈服面上。也可以将静态屈服函数 $f(\sigma_{ij}, \kappa)$ 中的强化参数 κ 替换为相应应变率下的动态值或根据应变率大小相应地扩大静态屈服面^[39]以反映率敏感性。

文献[31]指出,初始预静载小于80%极限静载时的动态弯拉强度较无静预载时的大,说明忽略预静载的影响是偏安全的,对薄弱部位更是如此。另外,强震作用下混凝土结构一般会经历几次到几十次的循环加、卸载,属于低周疲劳问题,疲劳也会引起损伤,进而使强度降低。但地震作用下的低周疲劳由于循环次数较少,由其引起的强度降低也较少,应该不会超过初始预静载对动态强度的增强作用。此外,就目前的研究水平来看,对以上因素都进行考虑也是不现实的。所以,可以选取混凝土纯动载单调加载试验结果确定计算参数,以考虑率效应的影响。采用这种方法得出的预测结果需要大量动态试验结果进行验证,所以要加强多轴动态试验特别是动态拉伸试验的研究。

混凝土的率效应不仅与应力、应变和应变率有关,而且与应变率历史有关,例如,循环动载作用下试件破坏多是发生在应力~应变曲线的峰值位置,在该位置应变率近似为零,按照通常的假设 $\sigma(t) = f(\epsilon, \dot{\epsilon})|_{\dot{\epsilon}=0}$,此时试件只能通过其静力强度来承载,但实际上试件却有更高的承载能力。这是由于动载作用时混凝土中自由水的黏性效应(即 Stefan 效应)和惯性效应使变形及由其所产生的损伤具有延迟特性(相对于静力作用时裂缝发展滞后,损伤能量滞后释放),此时试件的承载能力对应的是应变率降为零之前的某一状态(应变率大于零),所以承载能力较静力强度高^[5]。所以,如果用反映微裂缝发展的某种变形量(如不可恢复应变/变形)度量材料的损伤,则可以不区分静、动态损伤,因为动态时微裂缝发展较静态时滞后,损伤程度较小,强度自然提高。

最近,一些新的混凝土损伤本构模型被陆续提出。彭向和等^[40]提出的损伤本构模型采用标量损伤变量,以避免采用各向异性损伤张量造成分析与计算上的困难,同时采用 Lode 参数 μ_σ 描述不同应力状态及非比例加载史下材料的各向异性损伤与损伤的各向异性效果,并发展了相应的算法。Francois 等^[41]考虑到混凝土中存在的小尺寸砂、石使弥散微裂缝缝面具有相当的粗糙度,首次建立了考虑黏性摩擦滑移影响的混凝土损伤模型。Contrafatto 等^[42]在其弹塑性损伤模型中引入了控制材料压密的强化变量,可以模拟三轴压缩加载过程中的体积强化现象。Lignon 等^[43]考虑激励和结构的不确定性,基于凸分析方法研究了地震中结构损伤演化的不确定性,提出了相应的地震损伤评价方法。Sima 等^[44]基于弥散裂缝模型,建立了混凝土循环本构模型,该模型的输入数据通过传统的单调加载试验即可获得。Haußler-Combe 等^[45]基于 Eibl 等^[46]的模型的基本思

想,将梯度连续损伤理论中的梯度部分用损伤的惯性延迟加以扩展,模拟高应变率对混凝土等准脆性材料行为的影响。

6 结 语

建立合理的混凝土本构模型是分析混凝土结构力学性能的前提,混凝土本构模型的合理程度直接决定了数值计算结果的可信度。损伤力学理论为构建合理的混凝土本构模型提供了一个通用的框架,但是由于混凝土性能受多种因素影响,所以在用损伤力学理论构建混凝土本构模型时,仍需要对其各个方面继续深入研究,使构建的本构模型更加准确地反映混凝土材料的力学性能。

随着损伤的发展,混凝土最终会出现宏观定向裂缝。这就要求考虑损伤的方向性,以便在某个方向完全损伤时将其转变为离散的宏观裂缝,并赋予相应的缝面力学参数(如摩擦系数 f 和黏聚力 c 等),在尚未完全损伤的材料方向上仍采用损伤本构模型,而完全损伤的材料方向上形成的宏观离散裂缝按接触力学理论模拟,这样就可以准确地分析已经形成的宏观裂缝的开合行为和滑移行为,使得微裂缝的产生、扩展到最终形成宏观裂缝的整个过程都能够进行连续的分析,也便于研究渗透压力对混凝土建筑物中裂缝扩展的影响(典型的如高压水劈裂对混凝土坝的影响)。另外,近年来迅速发展的扩展有限元法(extended finite element method, XFEM)在传统有限元中引入非连续位移模式,使得非连续位移场的描述独立于网格划分,非连续界面可以直接穿过网格,这样就不需要重新划分网格或预设裂缝。将损伤本构模型和扩展有限元法相结合更便于研究混凝土的整个开裂过程。此外,随着混凝土损伤的发展,其渗透性也必然发生变化,这就需要建立渗透性与损伤之间的定量关系。

参考文献:

- [1] 江见鲸,陆新征,叶列平.混凝土结构有限元分析[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [2] 陈惠发.混凝土和土的本构方程[M].北京:中国建筑工程工业出版社,2004.
- [3] 宋玉普,赵国藩.混凝土内时损伤本构模型[J].大连理工大学学报,1990,30(5):577-584.
- [4] 冯西桥,余寿文.准脆性材料细观损伤力学[M].北京:高等教育出版社,2002.
- [5] 马怀发,陈厚群.全级配大坝混凝土动态损伤破坏机理研究及其细观力学分析方法[M].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [6] ORTIZ M. A constitutive theory for the inelastic behavior of

- concrete[J]. Mech Mater ,1985 ,1(1) :67-93.
- [7] 王怀亮 ,宋玉普.混凝土的弹塑性损伤双面本构模型[J]. 计算力学学报 ,2008 ,25(2) :218-223.
- [8] RESENDE L. A damage mechanics constitutive theory for the inelastic behavior of concrete[J]. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering ,1987 ,60(1) :57-93.
- [9] MAZARS J ,PIJAUDIER-CABOT G. Continuum damage theory-application to concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1989 ,115(2) :345-365.
- [10] TAO Xiao-ya ,PHILLIPS D V. A simplified isotropic damage model for concrete under bi-axial stress states[J]. Cement and Concrete Composites ,2005 ,27(6) :716-726.
- [11] LEE J ,FENVES G L. Plastic-damage model for cyclic loading of concrete structures[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1998 ,124(8) :892-900.
- [12] LEE J ,FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake Engineering and Structural dynamics ,1998 ,27(9) :937-956.
- [13] FARIA R ,OLIVER J ,CERVERA M. A strain-based plastic viscous-damage model for massive concrete structures[J]. International Journal of Solids Structures ,1998 ,35(14) :1533-1558.
- [14] FARIA R ,OLIVER J ,CERVERA M. Modeling material failure in concrete structures under cyclic actions[J]. Journal of Structural Engineering ,2004 ,130(12) :1997-2005.
- [15] OLIVEIRA S ,FARIA R. Numerical simulation of collapse scenarios in reduced scale tests of arch dams[J]. Engineering Structures ,2006 ,28(10) :1430-1439.
- [16] LUBLINER J ,OLIVER J ,OLLER S ,et al. A plastic-damage model for concrete[J]. Int J Solids and Struct ,1989 ,25(3) :299-326.
- [17] OLLER S ,ONATE E ,OLIVER J ,et al. Finite element nonlinear analysis of concrete structures using a plastic-damage model[J]. Engrg Fracture Mech ,1990 ,35(1/2/3) :219-231.
- [18] 陈惠发.弹性和塑性力学[M]. 北京 :中国建筑工业出版社 ,2004.
- [19] JU J W. Energy-based coupled elastoplastic damage models at finite strain[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1989 ,115(11) :2507-2525.
- [20] JU J W. On energy-based coupled elastoplastic damage theories : constitutive modeling and computational aspects [J]. International Journal of Solids Structures ,1989 ,25(7) :803-833.
- [21] 吴建营.基于损伤能释放率的混凝土弹塑性损伤本构模型及其在结构非线性分析中的应用[D]. 上海 :同济大学 ,2004.
- [22] SOH C K ,LIU Yu ,YANG Y ,et al. A displacement equivalence-based damage model for brittle material-part I : theory[J]. Journal of Applied Mechanics ,2003 ,70(5) :681-687.
- [23] LIU Yu ,SOH C K ,DONG Y ,et al. A displacement equivalence-based damage model for brittle material-part II : verification[J]. Journal of Applied Mechanics ,2003 ,70(5) :688-695.
- [24] LIU Yu ,TENG S ,SOH C K. Three-dimensional damage model for concrete I : theory[J]. Journal of Engineering Mechanics ,2008 ,134(1) :72-81.
- [25] LIU Yu ,TENG S ,SOH C K. Three-dimensional damage model for concrete II : verification [J]. Journal of Engineering Mechanics ,2008 ,134(1) :82-89.
- [26] 宁建国 ,商霖 ,孙远翔.混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论和唯象本构模型[J]. 力学进展 ,2006 ,36(3) :389-405.
- [27] BISCHOFF P H ,PERRY S H. Compressive behavior of concrete at high strain rates [J]. Materials and Structures ,1991 ,24(6) :425-450.
- [28] MALVAR L J ,ROSS C A. Review of strain rate effects for concrete in tension[J]. ACI Materials Journal ,1998 ,95(6) :435-439.
- [29] 尚仁杰.混凝土动态本构行为研究[D]. 大连 :大连理工大学 ,1994.
- [30] 闫东明.混凝土动态力学性能试验与理论研究[D]. 大连 :大连理工大学 ,2006.
- [31] 马怀发.全级配大坝混凝土动态性能细观力学分析研究[D]. 北京 :中国水利水电科学研究院 ,2005.
- [32] CEB. Concrete structures under impact and implosive loading [R]. Lausanne : Committee Europe International du Béton ,1998 :187.
- [33] TEDSCO J W ,ROSS C A. Strain-rate-dependent constitutive equation for concrete [J]. Journal of Pressure Vessel Technology ,1998 ,120 :398-405.
- [34] 肖诗云 ,林皋 ,王哲 ,等.应变率对混凝土抗拉特性影响[J]. 大连理工大学学报 ,2001 ,41(6) :721-724.
- [35] 杨桂通.弹塑性动力学基础[M]. 北京 :科学出版社 ,2008.
- [36] 冯明琿.黏弹塑性统一本构理论[D]. 大连 :大连理工大学 ,2000.
- [37] 刘长春.黏塑性统一本构理论及其在混凝土中的应用[D]. 大连 :大连理工大学 ,2007.
- [38] 肖诗云.混凝土率型本构模型及其在拱坝动力分析中的应用[D]. 大连 :大连理工大学 ,2002.
- [39] PANDEY A K ,KUMAR R ,PAUL D K ,et al. Strain rate model for dynamic analysis of reinforced concrete structures[J]. Journal of Structural Engineering ,2006 ,132(9) :1393-1401.
- [40] 彭向和 ,杨春和 ,万玲.一种简化的混凝土损伤本构模型及其应用[J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 ,23(19) :3232-3239.
- [41] FRANCOIS M ,ROYER-CARFAGNI G. Structured deformation of damaged continua with cohesive-frictional sliding rough fractures[J]. European Journal of Mechanics :Solids ,2005 ,24(4) :644-660.

- [42] CONTRAFATTO L ,CUOMO M. A framework of elastic-plastic damaging model for concrete under multiaxial stress state[J]. International Journal of Plasticity ,2006 ,22(12) :2272-2300.
- [43] LIGNON S ,JÉZÉQUEL L. A robust approach for seismic damage assessment[J]. Computers and Structures ,2007 ,85 (1/2) :4-14.
- [44] SIMA J F ,ROCA P ,MOLINS C. Cyclic constitutive model for concrete[J]. Engineering Structures ,2008 ,30(3) :695-706.
- [45] HÄUBLER-COMBE U ,KITZIG M. Modeling of concrete behavior under high strain rates with inertially retarded damage [J]. International Journal of Impact Engineering ,2009 ,36 (9) :1106-1115.
- [46] EIBL J ,SCHMIDT-HURTIGNE B. Strain-rate-sensitive constitutive law for concrete[J]. Journal of Engineering Mechanics ,1999 ,125(12) :1411-1420.

(收稿日期 2009-05-22 编辑 高建群)

(上接第 61 页)

参考文献 :

- [1] DUNCAN J M. State of the art :limit equilibrium and finite element analysis of slopes[J]. Journal of Geotechnical Engineering ,ASCE ,1996 ,122(7) :477-596.
- [2] ZIENKIEWICZ O C ,HUMPHESON C ,LEWIS R W. Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics[J]. Geotechnique ,1975 ,25(4) :671-689.
- [3] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报 ,1997 ,19(2) :1-7.
- [4] 张鲁渝 ,郑颖人 ,赵尚毅 ,等. 有限元强度折减系数法计算土坡稳定安全系数的精度研究[J]. 水利学报 ,2003 ,34(1) :21-27.
- [5] GRIFFITH D V ,LANE P A. Slope stability analysis by finite element[J]. Geotechnique ,1999 ,49(3) :387-403.
- [6] DAWSON E M ,ROTH W H ,DRESCHER A. Slope stability analysis by strength reduction[J]. Geotechnique ,1999 ,49 (6) :835-840.
- [7] 赵尚毅 ,郑颖人 ,时卫明 ,等. 用有限元强度折减法求边坡稳定安全系数[J]. 岩土工程学报 ,2002 ,24(3) :343-346.
- [8] 赵尚毅. 用有限元强度折减法及其在土坡与岩坡中的应用[D]. 重庆 :后勤工程学院 ,2004.
- [9] 郑颖人 ,赵尚毅. 用有限元强度折减法求滑(边)坡支挡结构的内力[J]. 岩石力学与工程学报 ,2004 ,23(20) :3552-3558.
- [10] 郑宏 ,李春光 ,李焯芬 ,等. 求解安全系数的有限元法[J]. 岩土工程学报 ,2002 ,24(5) :626-628.
- [11] 连镇营 ,韩国城 ,孔宪京. 强度折减有限元法研究开挖边坡的稳定性[J]. 岩土工程学报 ,2001 ,23(4) :406-411.
- [12] 栾茂田 ,武亚军 ,年延凯. 强度折减有限元法中边坡失稳的塑性区判据及其应用[J]. 防灾减灾工程学报 ,2003 ,23(3) :1-8.
- [13] 宋二祥. 土工结构安全系数的有限元计算[J]. 岩土工程学报 ,1997 ,19(2) :1-7.
- [14] 周桂云 ,李同春. 饱和-非饱和非稳定渗流作用下岩质边坡稳定性分析[J]. 水电能源科学 ,2006 ,24(5) :79-82.
- [15] 姚纬明 ,李同春 ,任旭华 ,等. 带软弱结构面的弹塑性有限元分析[J]. 河海大学学报 :自然科学版 ,1999 ,27(3) :34-38.
- [16] 刘金龙 ,栾茂田 ,赵少飞 ,等. 关于强度折减有限元方法中边坡失稳判据的讨论[J]. 岩土力学 ,2005 ,26(8) :1345-1348.
- [17] 李同春 ,卢智灵 ,姚纬明 ,等. 边坡抗滑稳定安全系数的有限元迭代解法[J]. 岩石力学与工程学报 ,2003 ,22 (3) :446-450.
- [18] 张丹. 边坡稳定及抗滑桩内力分析方法研究[D]. 南京 :河海大学 ,2004.

(收稿日期 2009-07-17 编辑 高建群)

(上接第 88 页)

- [39] SUH S W. A hybrid near-field/far-field thermal discharge model for coastal area[J]. Marine Pollution Bulletin ,2001 ,43(7/8/9/10/11/12) :225-233.
- [40] MADERICH V , HELING R , BEZHENAR R , et al. Development and application of 3D numerical model THREETOX to the prediction of cooling water transport and mixing in the inland and coastal waters[J]. Hydrological Processes ,2008 ,22 :1000-1013.
- [41] 纪平 ,秦晓 ,袁珏 ,等. 冷却池近区湍射流与远区环流耦合计算模型[J]. 水利水电技术 ,2006 ,37(9) :23-26.
- [42] 倪浩清 ,龙中林 ,周力行. 深度平均的紊流全场水环境新模型及其在大水域冷却池中的应用[J]. 水利学报 ,1991(9) :7-13.
- [43] 倪浩清 ,沈永明 ,陈惠泉. 深度平均的 $k-\epsilon$ 紊流全场模型及其验证[J]. 水利学报 ,1994(11) :8-17.
- [44] 梁书秀 ,沈永明 ,孙昭晨. 深度平均的应力-通量代数全场模型及其验证[J]. 海洋环境科学 ,1999 ,18(3) :33-38.
- [45] 梁书秀 ,沈永明 ,孙昭晨. 潮汐水域中污水侧向排放的数值模拟[J]. 海洋学报 ,2000 ,22(2) :113-119.
- [46] YU Li-ren ,RIGHETTO A M. Depth-averaged turbulence $k-\bar{w}$ model and applications[J]. Advances in Engineering Software ,2001 ,32(5) :375-394.
- [47] 陈惠泉 ,毛世民. 水面蒸发系数全国通用公式的验证[J]. 水科学进展 ,1995 ,16(2) :116-120.
- [48] 毛世民 ,陈惠泉. 超温水体蒸发系数通用公式的研究与应用[J]. 水利水电科技进展 ,2007 ,27(6) :85-89.
- [49] SIMPSON J J ,DICKY T D. Alternative parameterizations of downward irradiance and their dynamical significance[J]. Journal of Physical Oceanography ,1981 ,11(6) :876-882.

(收稿日期 2009-10-21 编辑 骆超)