

细观结构不均匀性对混凝土动弯拉强度的影响

马怀发^{1,2}, 陈厚群², 黎保琨¹

(1. 北京工业大学, 北京 100044; 2. 中国水利水电科学研究院 工程抗震研究中心, 北京 100044)

摘要: 本文在随机骨料模型的基础上, 提出了既能反映混凝土骨料分布随机性又能反映混凝土细观各相材料力学特性随机性的随机骨料随机参数模型。利用该模型并考虑材料的细观力学的应变率效应, 对湿筛混凝土和全级配混凝土梁进行了三分点冲击弯拉断裂数值模拟, 分析了混凝土材料参数的离散性、混凝土级配以及初始静预载水平对其动弯拉强度的影响。研究表明: (1) 随混凝土材料的弹性模量和抗拉强度的离散性增大, 静弯拉强度和动弯拉强度降低, 但动弯拉强度增强系数得到提高; (2) 一定条件下全级配的混凝土梁的动弯拉强度增强系数高于湿筛混凝土梁的动弯拉强度增强系数; (3) 为了更准确地确定动弯拉强度增强系数, 应该考虑混凝土级配和初始预静载水平所产生的应变率效应对其的影响。

关键词: 细观力学; 混凝土; 应变率效应; 动弯拉强度; 不均匀性; 随机骨料随机参数模型

中图分类号: TV313 **文献标识码:** A

在强震作用下, 由于坝体横缝的反复开合, 使作为整体结构时动态响应最为显著的坝体上部拱冠附近的拱向应力大为减弱, 而坝体沿坝基交结面附近成为抗震薄弱部位。在强震时坝体薄弱部位主要因坝体混凝土的动弯拉应力引起开裂, 因此, 动弯拉强度是高拱坝抗震设计中的控制性指标之一。

有关试验研究发现^[1~7], 应变率效应是固体材料的基本特性, 而不均匀材料率效应较均匀材料明显; 混凝土强度对加载过程有高度的敏感性; 静态与动态加载到同样的荷载水平, 试件所产生的损伤积累不同, 而应变率效应受材料损伤的影响; 混凝土拉、压的率效应基本相同; 混凝土的弹性模量随应变率的增大也会增加, 但没有强度增加明显。基于前人的这些研究成果, 文献[8]在宏观层次上将混凝土作为宏观均匀材料, 考虑了混凝土材料断裂损伤、强度和弹性模量的应变率效应, 建立了混凝土梁静加载、动加载以及有预静载的动弯拉过程的非线性有限元数值模型, 并利用该模型进行了在不同初始预静载水平下三分点梁冲击弯拉破坏过程的数值模拟, 讨论了混凝土动弯拉强度增强系数随应变率强化参数变化的规律。该项研究表明, 混凝土材料的应变率效应使得混凝土动弯拉强度高于静弯拉强度, 动弹性模量高于静弹性模量; 在复杂加载情况下, 动强度与应变历史和应变率历史有关; 应变率效应和混凝土材料的损伤积累的共同作用产生了在一定静预载水平下混凝土梁的静动综合弯拉强度高于其受纯动载作用时的动弯拉强度的物理现象^[9~11]。

不均匀性是混凝土材料的本质特点, 也正是这种不均匀性反映出混凝土宏观力学性能的差异和非线性特征。混凝土细观结构的差异和不均匀性取决于骨料尺寸及级配、水泥用量、水灰比、固化强度、养护条件、环境湿度和混凝土的发热量等因素。本文试图从混凝土细观力学的方法^[12~14], 考虑骨料尺寸、骨料级配及其混凝土细观各相力学参数随机分布, 分析混凝土不均匀性的应变率效应对其动弯拉强度的影响。

收稿日期: 2004-09-10

作者简介: 马怀发(1962-), 男, 山东人, 副教授, 主要从事计算力学数值方法和水工结构抗震研究。

E-mail: mahuaifa@bjut.edu.cn

1 数值计算模型

1.1 随机骨料随机参数模型 借助由富勒(Fuller)三维骨料级配曲线转化到二维骨料级配曲线的瓦拉文(Walaraven J C)公式[13]确定骨料颗粒数,按照蒙特卡罗方法(Monte Carlo Method)在试件内截面随机生成骨料分布模型,然后,按文献[14]剖分方法生成有限元网格并确定单元属性。本文假定混凝土及其细观各相单元的抗拉强度和弹性模量为随机参数,遵循对数正态分布

$$P_{\ln}(x) = \begin{cases} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma x} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right] & x > 0 \\ 0 & x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

这里 $-\infty < \mu < \infty$, $\sigma > 0$, 则 $\ln x$ 满足正态分布 $N(\mu, \sigma)$ 。随机变量 x 的均值为 $\mu_x = \exp(\mu + \frac{1}{2}\sigma^2)$, 方差 $\sigma_x^2 = \mu_x^2[\exp(\sigma^2) - 1]$ 。假定各相材料力学特性参数统计均值 μ_x 和变异系数 $V_x (V_x^2 = \sigma_x^2 / \mu_x^2)$ 为已知, 则 $\sigma^2 = \ln(1 + V_x^2)$, $\mu = \ln \mu_x - \sigma^2 / 2$ 。

由蒙特卡罗方法生成在(0, 1)区间的两个均匀随机数 u_n 和 u_{n+1} , 则可得到符合正态分布 $N(0, 1)$ 的两个相互独立的随机数^[15] y_n, y_{n+1} , 为

$$y_n = \sqrt{-2 \ln u_n} \cos(2\pi u_{n+1}); \quad y_{n+1} = \sqrt{-2 \ln u_n} \sin(2\pi u_{n+1}) \quad (2)$$

由变换式

$$\ln x_n = y_n \sigma + \mu; \quad \ln x_{n+1} = y_{n+1} \sigma + \mu \quad (3)$$

得到 $\ln x_n$ 和 $\ln x_{n+1}$ 满足 $N(\mu, \sigma)$ 的正态分布。由式(3)解得混凝土各相对数正态分布的材料参数

$$x_n = \exp(y_n \sigma + \mu); \quad x_{n+1} = \exp(y_{n+1} \sigma + \mu) \quad (4)$$

1.2 动力学增量方程 混凝土及其细观各相材料的应变率效应抗拉强度强化系数 H_t 和弹性模量强化系数 H_E 采用文献[8]给出的关系式, 即:

$$H_t = \exp\{[A_t(\lg |\dot{\epsilon}| + B_t)]^{C_t}\}; \quad H_E = \exp\{[A_E(\lg |\dot{\epsilon}| + B_E)]^{C_E}\} \quad (5)$$

式中: A_t, B_t, C_t 为相应材料的强度强化参数; A_E, B_E, C_E 为弹性模量强化参数。

上述参数可由试验确定。因此, 混凝土及其细观各相材料的动拉强度、动弹性模量可表示为

$$f_1(\dot{\varepsilon}) = H_t f_{ts}; \quad E(\dot{\varepsilon}) = H_E E_s \quad (6)$$

式中： f_{ts} 为轴向静载抗拉强度； E_s 为静弹性模量。

关于应变率强化参数取值对混凝土动弯拉强度的影响文献[8]已经讨论过，本文主要探究混凝土因细观结构不均匀性率效应对其动弯拉强度所产生影响的一般规律，因此，这里暂且取混凝土及其细观各相强化系数 B_t (B_E)为6， C_E 取1.5， C_t 取2.0， A_E 取0.14， A_t 取0.20，并认为泊松比不受率效应的影响^[5, 6]。针对具体混凝土材料的取值有待于进一步的实验研究。

动力学增量方程^[8]为

$$[M]\{\Delta\ddot{U}_d(t)\} + [C]\{\Delta\dot{U}_d(t)\} + [K_d(t)]\{\Delta U_c(t)\} = \{\Delta P_d(t)\} + \{\Delta P'_d(D)\} + \{\Delta P_s(D)\} \quad (7)$$

式中：

$$\{\Delta P'_d(D)\} = \sum_e H_E^e(\dot{\varepsilon}^e)\Delta D^e(\varepsilon^e)[K_0^e]\{U_d(t+\Delta t)\}; \{\Delta P_s(D)\} = \sum_e \Delta D^e(\varepsilon^e)[K_0^e]\{U_s\} \quad (8)$$

式中： $\Delta D^e(\varepsilon^e)$ 为单元损伤变量增量， $\Delta D^e(\varepsilon^e) = [D^e(\varepsilon_{t+\Delta t}^e) - D^e(\varepsilon_t^e)]$ ； $[\varepsilon_0^e]$ 为单元的应变率； $[K_0^e]$ 为初始单元刚度矩阵； $[M]$ 为质量阵； $[C]$ 为阻尼阵； $K_d(t)$ 表示动刚度阵； $\{\Delta\ddot{U}_d(t)\}$ 、 $\{\Delta\dot{U}_d(t)\}$ 和 $\{\Delta U_d(t)\}$ 分别为结点加速度增量、速度增量和动位移增量； $\{\Delta P_d(t)\}$ 为结点动荷载列阵增量； $\{U_d\}$ 为结点动位移； $\{U_s\}$ 为施加动载的前一时刻的结点静位移， $\{U_s\} = \{U_s(t=0)\}$ 。

总结点位移为 $\{U\} = \{U_d\} + \{U_s\}$ ，在时域上采用纽马克(Newmark)方法进行离散。

采用文献[14]给出的双折线弹性损伤演化模型如图1，图1中残余强度系数 $\lambda = f_{tr}/f_{st}$ ， f_{st} 为混凝土及其细观各相材料的轴向静载抗拉强度； f_{tr} 为破坏单元的抗拉残余强度；残余应变系数 $\eta = \varepsilon_r/\varepsilon_0$ ， ε_0 为单元应力达到抗拉强度时的主拉应变， ε_r 为与抗拉残余强度相对应的残余应变；极限应变系数 $\xi = \varepsilon_u/\varepsilon_0$ ， ε_u 为极限拉应变。在以下计算中，参照已有的试验资料暂取混凝土及其细观各相的残余强度系数 λ 为0.1；残余应变系数 η 为3；极限应变系数 ξ 为10。采用三分点加载方法进行梁抗弯拉试验^[16]，如图2，在应力-位移曲线中，取混凝土梁下边缘中点的名义应力($\sigma = PL/bh^2$ ， P 为荷载， L 为支座间距， b 为梁厚度， h 为梁高度)与梁上边缘中点竖向位移(v/h)相对应。弯拉强度为应力-位移失稳时极限名义应力。

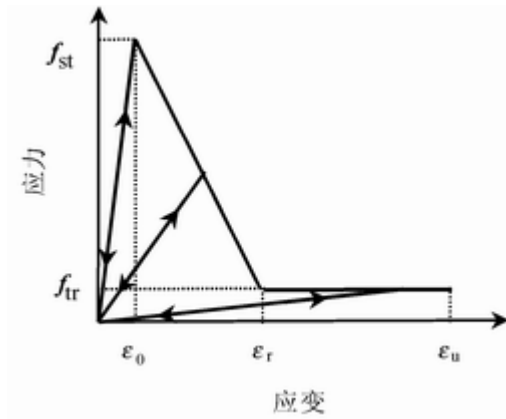


图1 双折线损伤模型

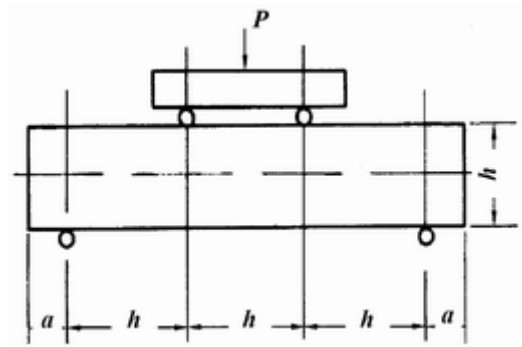


图2 弯拉试验示意

在动力计算过程中，采用瑞利阻尼，阻尼比取0.02，抗拉强度、弹性模量的率效应分别按式(5)和式(6)计算。

2 混凝土力学参数的离散性对混凝土动弯拉强度的影响

首先将150mm×150mm×550mm湿筛混凝土梁剖分为图3所示的有限元网格，两支座间细分三角形单元，其横向和纵向尺度为15/4mm，即小骨料粒径的四分之一。共5025个结点，9780个单元。混凝土单元材料的泊松比0.20，容重24.00kN/m³。为了反映混凝土材料内部缺陷和梁各部位力学特性的不均匀性，假定图3中单元的弹性模量和抗拉强度服从对数正态分布，其均值分别为28.00GPa和3.00MPa，3组变异系数(V_E, V_t)分别取(0.00, 0.00)，(0.10, 0.10)和(0.10, 0.20)，静加载步长取0.25kN，冲击荷载加载速率为150kN/s，时间步长取0.001s。计算结果如图4所示。

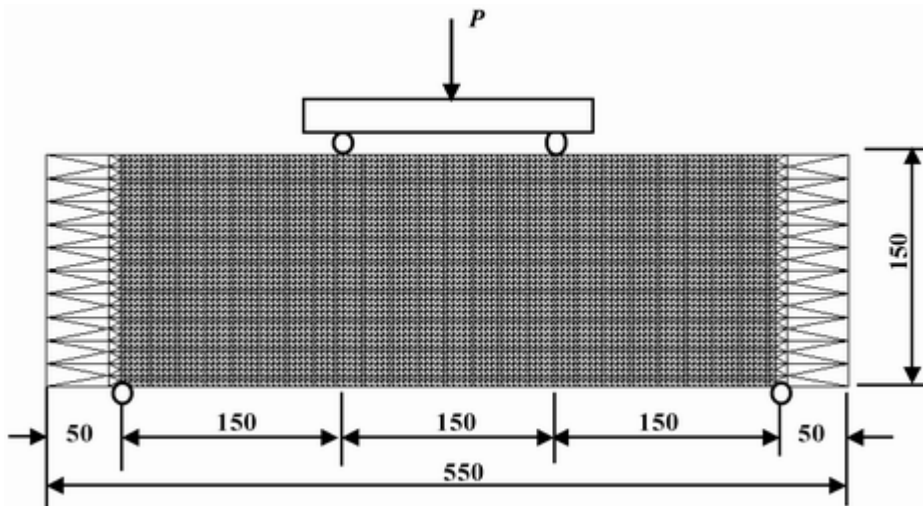


图3 混凝土梁弯拉试验及单元剖分(单位: mm)

对应3组离散系数，梁静弯拉强度为3.40MPa、2.90MPa和2.50MPa；动弯拉强度为4.06MPa、3.55MPa和

3.11MPa，对应的动弯拉强度增强系数(静动综合弯拉强度与静弯拉强度之比分别为119.4%、122.4%和124.4%)。随着混凝土的弹性模量和抗拉强度离散性增大，静弯拉强度和动弯拉强度降低，这是符合通常规律的。但通过图4还发现，随着离散性增大，静动综合弯拉强度对预静载的感性增强，动弯拉强度增强系

数提高。随单元刚度和强度离散性增大，在同一荷载水平下受损单元增多，损伤使单元刚度弱化，而应变率增大，应变率效应使其强度和刚度得到强化提高。相反地，应变率的提高也加速了单元的进一步损伤劣化。这种强化和弱化矛盾的两方面共同作用产生了如图4所示的现象，即当强化占优势时动强度提升，当损伤劣化占优势时动强度下降，因此，预静载水平在80%以前强化占优势，大于80%以后动强度急剧下降。

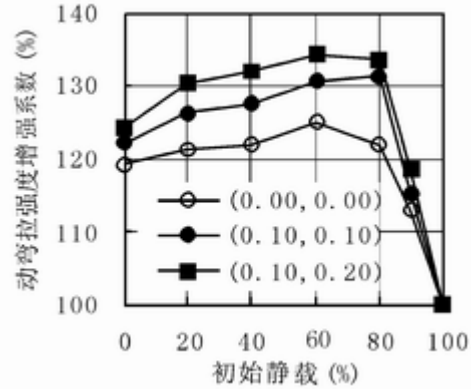


图4 不均匀性对静动综合弯拉强度的影响

在细观层次上，混凝土是由粗骨料、水泥水化物、孔隙及骨料与水泥砂浆粘界面等细观结构组成的多相复合材料。考虑到骨料级配及其混凝土细观各相力学特性的差异，按照随机骨料随机参数模型生成的一种骨料分布投影到图3的有限元网格上，并形成如图5所示的结构性细观网格模型。其中，中骨料18颗，粒径为30mm；小骨料107颗，粒径为15mm；骨料单元2702个，固化水泥砂浆体单元3142个，粘结界面单元3756个，两支座外侧混凝土单元180个。各类单元力学特性取值如表1。

表1 混凝土各相组分材料力学特性参数

材料	弹性模量		泊松比	抗拉强度		容重/(kN/m ³)
	均值/GPa	变异系数V _E		均值/MPa	变异系数V _t	
骨料	50.00	0.10	0.20	6.00	0.10	27.00
固化水泥砂浆体	25.00	0.10	0.20	3.00	0.10	21.00
粘结界面	21.00	0.10	0.20	2.70	0.10	24.00
混凝土	28.00	0.10	0.20	3.00	0.10	24.00

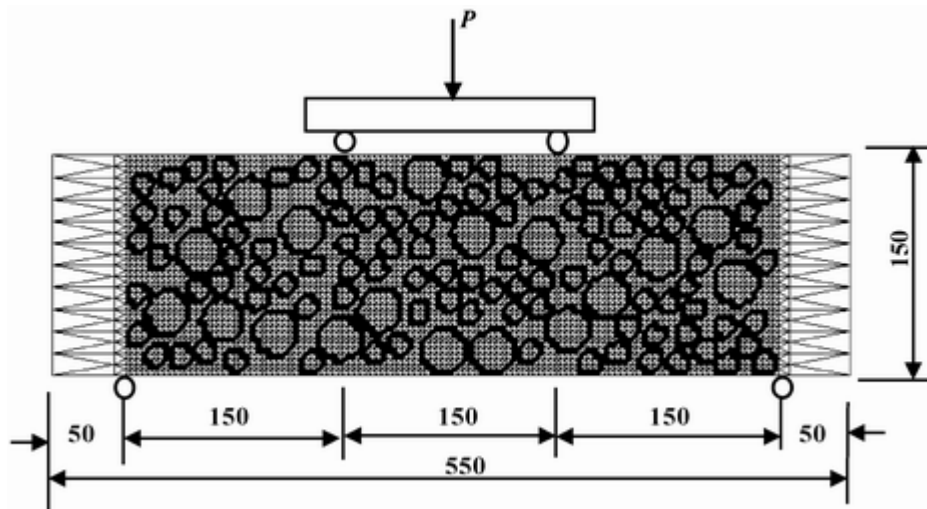


图5 湿筛混凝土细观有限单元模型(单位: mm)

由该细观模型计算得到静载时的应力-位移曲线与上述宏观分析中变异系数(V_E, V_t)为(0.10, 0.10)时的应力-位移曲线相吻合,其静载强度均为2.90MPa,但两种模型的动弯拉强度增强系数随初始静预载水平的变化情况不同,如图6所示。因为混凝土细观各相材料力学特性差异,使其动弯拉强度增强系数对初始静预载的敏感性增强。根据该随机骨料随机参数模型三种骨料随机分布的计算出的静载强度均值为2.92MPa。如图7所示,同一随机骨料随机参数模型的三种骨料分布的动弯拉强度增强系数随预静载水平的变化基本一致。

以上算例说明,材料参数的离散性越大,动弯拉强度增强系数、初始静预载对静动综合强度影响程度越大。通常全级配混凝土具有比湿筛混凝土更为明显的细观结构不均匀性,因此就不难解释一定条件下全级配混凝土动弯拉强度增强系数高于湿筛混凝土的动弯拉强度增强系数的现象^[9, 10]

3 混凝土级配对混凝土动弯拉强度的影响

以上计算分析已显示,混凝土细观力学特性的不均匀性对混凝土梁的动弯拉强度有明显影响。文献[9, 10]的试验结果显示,全级配混凝土的静、动弯拉强度小于湿筛混凝土相应的静、动弯拉强度,但全级配混凝土动弯拉强度增长系数大于湿筛混凝土动弯拉强度增长系数。全级配混凝土骨料大,粘结界面多,较湿筛混凝土更突出了细观结构及其力学特性的不均匀特性。下面将进一步对全级配混凝土梁进行细观弯拉破坏数值分析。

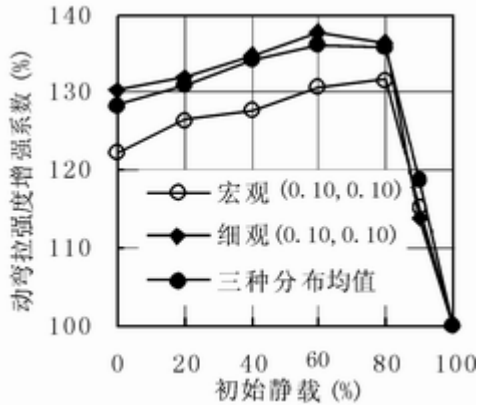


图6 细观不均匀性对静动综合弯拉强度的影响

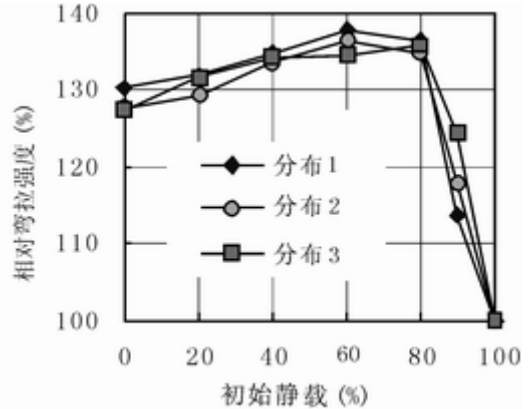


图7 三种骨料分布静动综合弯拉强度

3.1 全级配混凝土梁随机骨料随机参数模型

全级配混凝土的抗弯拉试验加荷方式^[16]如图3。试件尺寸为450mm×450mm×1700mm。在图2中, 泐a泐取175mm, 泐h泐取450mm。细观剖分区域取跨中宽度为450mm, 其余部分单元取宏观均质全级配混凝土力学特性参数。随机骨料模型生成的全级配混凝土骨料颗粒分布及单元剖分如图8, 其中特大骨料3颗, 粒径为120mm; 大骨料12颗, 粒径为60mm; 中骨料37颗, 粒径为30mm; 小骨料167颗, 粒径为15mm; 骨料13?505个单元, 固化水泥砂浆体7086单元, 粘结界面8209单元以及宏观

按混凝土990个单元, 共计15049个结点, 29790个单元。相似准则, $P_f/P_s=(L_f/L_s)^2(E_f/E_s)$, P_f 、 P_s 、 L_f 、 L_s 、 E_f 和 E_s 分别为全级配混凝土试件和湿筛混凝土试件的集中荷载、几何尺度和弹性模量。当 $E_f=E_s$, $L_f/L_s=3$, 则 $P_f=9P_s$, 即 $\Delta P_f=9 \Delta P_s$ 。为了将全级配混凝土试件与湿筛混凝土试件的计算结果进行比较, 按相似准则取全级配试件静加载步长、动力加载速率为9倍湿筛试件的相应值。本节的全级配混凝土试件的静载步长取2.25kN, 冲击荷载加载速率为1350kN/s, 时间步长仍取0.001s。

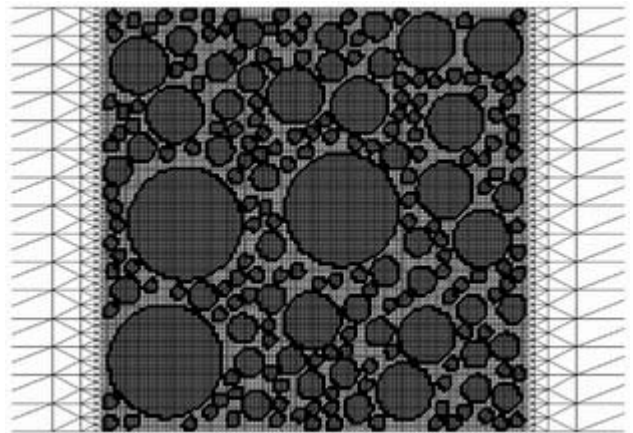


图8 全级配混凝土骨料颗粒分布及单元剖分

3.2 预静载作用下全级配混凝土的动弯拉强度

混凝土及其细观各相材料的弹性模量和抗拉强度遵循对数正态分布, 全级配混凝土梁细观各相统计特性参数仍按表1取值。梁的应力-位移曲线如图9所示。静载强度为2.77MPa, 纯动载时动弯拉强度增强系数为1.32, 对应加预静载至静极限荷载20%、40%、60%和80%时的动弯拉强度增强系数分别为1.34、1.36、1.38和1.40。为了便于比较混凝土级配对动强度的影响, 现将该全级配混凝土模型的动弯拉强度增强系数随预静载水平影响曲线与图6湿筛混凝土细观不均匀性对静动综合弯拉强度的影响曲线一起放在图10中进行比较分析。显然, 考虑细观差异时的全级配混凝土的动弯拉强度增强系数高于考虑细观差异的湿筛混凝土时的动弯拉强度增强系数, 而考虑细观差异时的湿筛混凝土的动弯拉强度增强系数高于不考虑细观差异时的湿筛混凝土的动弯拉强度增强系数; 同时, 动弯拉强

度增强系数对预静载水平的敏感性依次增强。这个结论已在文献[9~11]的试验结果中得到证实。

3.3 跨中细观剖分区域选取对计算结果的影响 由于计算机储存量和计算速度的限制,有时不得不取试件的一部分进行细观计算,其它作为宏观均质的混凝土材料处理。除上一节取跨中区域宽度为450mm进行细观分析外,本文又分别取跨中区域宽度为375mm和525mm(被最小骨料颗粒粒径整除)对全级配混凝土梁进行了细观数值计算,其计算结果如图11所示。随着区域宽度加大,细观不均匀性增强,动弯拉强度增强系数有所提高,动弯拉强度增强系数对预静载水平的敏感性增强。这与上述混凝土细观结构对动弯拉强度的影响的结论是一致的。但从图11可看出,细观取跨中区域宽度450mm和525mm计算结果接近。

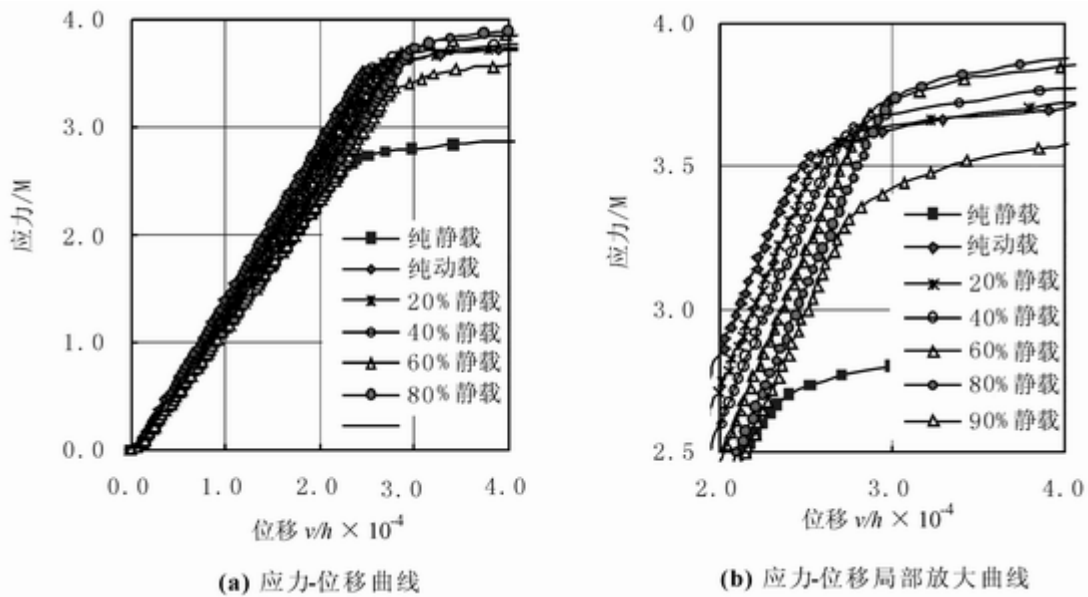


图9 预静载作用下全级配混凝土梁的应力-应变曲线

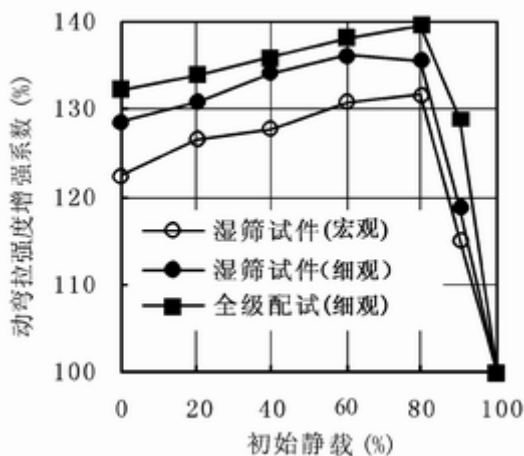


图10 混凝土级配对动静综合弯拉强度的影响

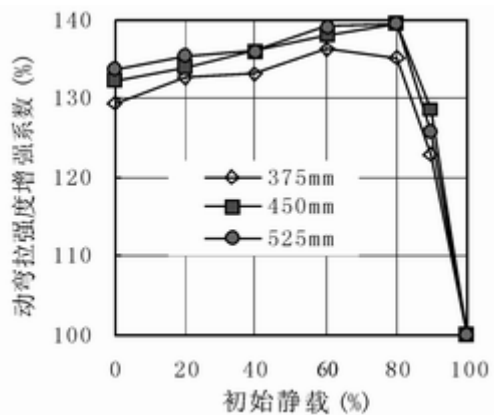


图11 不同细观区域数值计算结果比较

4 结束语

本文在随机骨料模型的基础上,考虑了混凝土细观各相力学特性的随机分布,提出了随机骨料随机参数模型使得细观模型更接近实际混凝土细观内部结构及其力学分布特性,更能反映出混凝土细观结构的不均匀特征。利用文献[8]建立的动力计算模型,数值模拟了湿筛混凝土和全级配混凝土梁动加载和在一定初始预载下静动联合加载的三分点冲击弯拉试验。分析了混凝土同一级配的不同骨料分布、不同混凝土级配以及不同初始静预载水平而产生的率效应对动弯拉强度的影响。计算分析表明:(1)混凝土材料的力学特性的离散性对其动弯拉强度有较大影响。随混凝土材料的弹性模量和抗拉强度的离散性增大,静弯拉强度和动弯拉强度降低,但动弯拉强度增强系数得到提高;(2)一定条件下全级配的混凝土梁的动弯拉强度增强系数高于湿筛混凝土梁的动弯拉强度增强系数;(3)为了更准确地确定动弯拉强度增强系数,应该考虑混凝土级配和初始预静载水平所产生的率效应的影响。这些初步结果基本上与已有的大坝混凝土在初始预静载下动态强度特性试验成果^[9~11]的规律性相符。应该指出,本文所采用混凝土细观各相材料的应变率强化曲线只是参照混凝土强度和弹性模量随应变率强化的有关模拟数据规律概化得出的,对于具体的混凝土试件细观力学模型中各相材料的力学参数取值,还需作进一步研究确定。另外,本文是针对冲击荷载作用下三分点混凝土梁的动弯拉强度随预静载变化规律进行讨论,而混凝土抗压强度随预静载变化规律与此可能有所不同^[9, 10, 17]。

参考文献:

- [1] Eibl J, Schmidt-Hurtienne B. Strain-rate-sensitive constitutive law for concrete [J]. Journal of Engineering Mechanics, Dec.1999, 1411-1420.
- [2] Yon J H, Hawkins N M, Kobayashi A S. Strain-rate sensitivity of concrete mechanical properties [J]. ACI Material Journal, 1992, 89 (2): 146-153.
- [3] 李兆霞. 工程材料的应变率效应及其损伤本构模拟计算[J]. 河海大学学报, 1994, 22(计算力学专辑): 75-82.
- [4] 李兆霞, 钱济成, 余颖禾. 动态损伤力学进展[J]. 河海大学学报, 1994, 22(计算力学专辑): 112-118.
- [5] 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, (6): 721-725.
- [6] 肖诗云, 林皋, 逯静洲, 等. 应变率对混凝土抗压特性的影响[J]. 哈尔滨建筑大学学报, 2002, (10): 35-39.
- [7] Dan Zheng, Qingbin Li. An explanation for rate effect of concrete strength based on fracture toughness including free water viscosity [J]. Engineering Fracture Mechanics, 2004, 71 (16/17): 2319-2327.
- [8] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 应变率效应对混凝土动载弯拉强度的影响[J]. 水利学报, 2005, 36(1): 69-76.
- [9] 侯顺载, 李金玉, 曹建国, 等. 高拱坝全级配混凝土动态试验研究[J]. 水力发电, 2002, (1): 51-53.
- [10] 中国水利水电科学研究院. 高拱坝地震应力控制标准和抗震结构工程措施研究-高拱坝全级配混凝土动态试验研究[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2000.
- [11] 中国水利水电科学研究院. 全级配大坝混凝土动态性能研究报告[R]. 北京: 中国水利水电科学研究院, 2004.
- [12] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土细观力学研究进展及评述[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2004, 2(2): 124-130.
- [13] Walraven J C. Aggregate Interlock: A theoretical and experimental Analysis [M]. Delft University Press, 1980. 67-72.
- [14] 马怀发, 陈厚群, 黎保琨. 混凝土试件细观结构的数值模拟[J]. 水利学报, 2004, (10): 27-35.
- [15] 中山大学数学力学系. 概率论及数理统计[M]. 北京: 人民教育出版社, 1980. 343-364.
- [16] DL/T 5150-2001. 水工混凝土试验规程[S].
- [17] Seyit A K. Factors affecting the relationship between rate of loading and measured compressive strength of concrete [J]. Magazine of Concrete Research, 1980, 32 (11): 79-88.

Influence of meso-structure heterogeneity on dynamic bending strength of concreteMA Huai-fa¹, CHEN Hou-qun², LI Bao-kun¹

(1. Beijing University of Technology, Beijing 100044, China;

2. China Institute of Water Resource and Hydropower Research, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on the random aggregate model a random aggregated and random parametric model describing the random characteristics of meso-structure and mechanical properties of concrete material is proposed. The model is applied to numerically calculate the dynamic bending strength of concrete trisection beams subjected to impact load with the strain-rate effects of the meso-structure taken into account. The effects of concrete grading, divergence of elemental mechanical behaviors and static preload levels on dynamic bending strength are investigated. It is found that: 1. the static bending strength and dynamic bending strength decrease but the dynamic enhancement coefficients increase when the elastic modulus of concrete and the divergence of tensile strength increases; 2. the enhancement coefficients of dynamic bending strength of full grading concrete beams are greater than those of wet-screened concrete, under the given condition; 3. concrete grading and static preload effects should be considered in valuating the dynamic bending strength of concrete.

Key words: meso-structure; heterogeneity; random aggregate and random parametric model; concrete; strain rate effect; dynamic bending strength

(责任编辑: 王冰伟)