

基于损伤的 PHC 桩单轴受拉动态本构模型研究

朱建新^{1,2}, 丁 曲^{1,2}, 张秋阳¹, 过新华¹

(1. 中南大学 现代复杂装备设计与极端制造教育部重点实验室, 湖南 长沙 410083;

2. 湖南山河智能机械股份有限公司, 湖南 长沙 410100)

摘 要:通过引入应变率强化因子、损伤弱化因子和预应力强化因子,并分析它们对预应力混凝土强度的影响,建立了一个单轴受拉动态本构模型用于描述 PHC 桩在冲击载荷作用下的冲击特性.对比了试验结果与该模型的数值模拟结果,结果表明,模型预示结果在变形趋势上符合很好,在数值精度上与试验结果符合良好.本成果可为振动沉桩过程中控制振动锤参数提供依据,能有效防止因拉应力过大而导致 PHC 桩被拉断的事故.

关键词:PHC 桩;预应力混凝土;损伤;单轴受拉;动态本构模型

中图分类号:TU473.1

文献标志码:A

文章编号:1006-7930(2011)01-0013-04

预应力高强度混凝土管桩(以下简称 PHC 桩)以其适应性强、造价经济、桩身质量可靠等优点,使其应用范围越来越广.但由于其应用时间不长,在研究和应用等方面都还存在着不少问题.在振动沉桩施工过程中,在桩顶部引起压应力波并迅速下传,如果桩底端以下土层松软时,传至桩底端的压应力波将变为拉应力波反射回桩体,使桩体受拉,拉应力值很大时会引起桩身横向裂缝^[1].然而,目前针对于 PHC 桩的研究焦点大多集中于在桩基施工完成后,桩在静、动态载荷作用下的承载力、动力响应等方面.虽然有部分研究针对于素混凝土建立了基于损伤的动态本构模型^[2],但是并不适用于预应力混凝土材料及受轴向动载荷的桩身.因此,建立一个适用于 PHC 桩的单轴受拉动态本构模型用来描述在振动沉桩过程中拉应力对桩身的作用很有必要.

1 本构模型的建立

1.1 模型构建思想

混凝土的动态本构模型基本可分为粘弹性本构模型、粘塑性本构模型和基于动态试验分析得出的本构模型.前两者一般都是利用原理论的概念、原理和方法,对混凝土的基本性能作出简化假设,经过严密的理论推导而得出相应的计算式,其中所需参数值由少量试验结果加以标定或直接给出.但这类模型仍处于探索阶段,目前还不成熟,离工程实际应用有较大差距.从试验出发,在静态本构模型的基础上考虑应变率效应、损伤弱化效应的影响对其进行修改以构建混凝土的动态本构模型,是一种最简单而实用的方法,在对混凝土动态变形机理的研究还不成熟的情况下,这种无需严密理论推导、基于试验结果而提出的动态本构模型被工程界广泛接受^[3].

混凝土作为一种具有微裂纹的非均质材料,在动态载荷作用下的响应包括两部分:应变率强化效应和损伤弱化效应^[4].考虑到 PHC 桩的特点,预应力的施加同样也会对混凝土的抗拉强度产生强化效应.

基于以上思想,通过在混凝土静态本构模型体系上分别叠加应变率强化因子、损伤弱化因子和预应力强化因子,从而构成基于损伤的单轴受拉动态本构模型.

收稿日期:2010-03-12 修改稿日期:2010-12-30

基金项目:国家 863 项目高技术研究发展计划资助项目(2003AA430200)

作者简介:朱建新(1965-),男,湖南湘潭人,博士生导师,教授,主要从事振动理论在工程机械中的应用,机电液一体化技术研究.

1.2 多项式型单轴受拉静态本构模型

在实际工程应用中,一般将混凝土单向受拉下的应力应变关系简化为线性、双线性或分段线性关系.但也有大量动力分析结果表明混凝土在单轴受拉时也表现出比较明显的非线性.为了更准确地描述混凝土在受拉时的本构关系,众多研究者采用多项式、指数、分数等形式来描述.本文采用《混凝土结构设计规范 GB500010-2002》^[5]中推荐的多项式型静态单轴受拉本构模型,见式(1).

$$y = \begin{cases} 1.2x - 0.2x^6 & x \leq 1 \\ \frac{x}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x} & x > 1 \end{cases} \quad (1)$$

$$x = \frac{\epsilon}{\epsilon_t} \quad y = \frac{\sigma}{f_t^*}$$

式中: α_t 为混凝土单轴受拉应力-应变曲线下降段的参数值; f_t^* 表示混凝土的单轴抗拉强度; ϵ_t 是与 f_t^* 相应的混凝土峰值拉应变.

为了统一起见,将式(1)等价变换成应力 σ 与应变 ϵ 的关系,见式(2).

$$\sigma_s = \begin{cases} 0.2f_t^* \left[\frac{6\epsilon}{\epsilon_t} - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_t} \right)^6 \right] & \sigma \leq f_t^* \\ \frac{f_t^* \frac{\epsilon}{\epsilon_t}}{\alpha_t \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_t} - 1 \right)^{1.7} + \frac{\epsilon}{\epsilon_t}} & \sigma > f_t^* \end{cases} \quad (2)$$

式中各参数的含义同式(1).

1.3 应变率强化因子

研究表明^[6],在动态载荷作用下,混凝土存在应变率强化效应.在 $10^{-5}/s \sim 10^0/s$ 范围内,应变率每提高一个数量级,抗拉强度增加15%左右;在 $10^0/s \sim 10^4/s$ 范围内,混凝土抗拉性能存在一个应变率临界值,强度会有陡然升高的情况,单轴动态抗拉强度会增加至静态抗拉强度的3~12倍,也有保守的结果认为只能增加62%~110%.表1是各种载荷的应变率范围,振动沉桩过程中PHC桩在振动锤的冲击载荷下应变率范围大概在 $10^0/s \sim 10^1/s$,其应变率强化效应明显.

表1 各种载荷的应变率范围
Tab.1 Strain rate range of various loads

Status	Creep	Static	Earthquake	Impact	Explosion
Strain rate range /s	$10^{-8} \sim 10^{-6}$	$10^{-6} \sim 10^{-4}$	$10^{-3} \sim 10^{-2}$	$10^0 \sim 10^1$	$10^2 \sim 10^3$

在应变率比较低的冲击动载荷作用下,只有当应变率发生数量级变化时,混凝土材料的力学性能才会有明显的变化,因此采用如下的半对数形式来表示混凝土动态受拉时的应变率强化因子 R_t ,具体见式(3).

$$R_t = 1 + a_t \log \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_s} \right) \quad (3)$$

式中, a_t 是材料参数,反映混凝土材料受拉时的率效应; $\dot{\epsilon}_s$ 为受拉试验中的静态应变率; $\dot{\epsilon}$ 表示在动态载荷作用下材料响应的总应变率.

1.4 损伤弱化因子

混凝土材料在制作成型时呈现为一种疏孔、微裂纹弥散的结构状态,外载荷或环境因素又使原有缺陷扩张,凡材料因微裂纹和空洞萌生、发展、聚合之后形成具有一定尺寸的宏观裂纹,都将引起宏观强度、刚度下降甚至破坏.混凝土试件的宏观试验显示^[7]:受拉时,当应力超过某一数值后,材料的刚度会下降,即抵抗变形的能力会降低.

混凝土材料由于损伤而导致的弱化效应用损伤因子 D 表示.本文以在岩石、混凝土等材料中应用最多的Loland损伤模型^[8]为基础,将Loland损伤模型中峰值应力前的损伤演化规律推广应用至下降

段,即认为混凝土在整个变形范围内有相同的损伤演化规律,具体见式(4).

$$D = D_0 + m\varepsilon^n \tag{4}$$

式中: D_0 表示混凝土材料的初始损伤; ε 为应变; m, n 是材料常数.

1.5 预应力强化因子

PHC 桩在吊运和振动沉桩过程中均产生压、拉应力,特别是拉应力值一般都超过混凝土的抗拉强度,因此需要在混凝土桩内预加一定的压应力值,以提高桩的抗裂性能^[1].而预应力的施加必定增加管桩的混凝土抗拉强度,所以在建立 PHC 桩的单轴受拉动态本构模型时必须考虑预应力的影响.汪训流^[9]等将混凝土模型与预应力钢筋模型通过自由度耦合考虑了预应力的强化效应.为简化起见,本文从工程实际出发,使用预应力强化因子 p 来表征这种强化效应.根据 PHC 桩预压应力与桩身混凝土单轴抗拉强度的比值来确定 p 值,如式(5)

$$P = K \frac{\sigma_p}{f_t^*} \tag{5}$$

式中: σ_p 为 PHC 桩预压应力值(MPa); K 为修正系数,受非沉桩锤击应力影响.

1.6 本构模型

根据上述所讲的模型构建思想,在静态本构模型的基础上,分别考虑应变率强化效应、损伤弱化效应和预应力强化效应,从而得到单轴受拉状态下基于损伤的预应力混凝土的动态本构模型,表达式见式(6)

$$\sigma = (1 - D)R_t P \sigma_s \tag{6}$$

将式(2)、(3)、(4)、(5)带入式(6)可得:

$$\sigma = \begin{cases} 0.2 P f_t^* [1 - (D_0 + m\varepsilon^n)] \left(1 + a_t \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)\right) \left[\frac{6\varepsilon}{\varepsilon_t} - \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}\right)^6\right] & \sigma \leq f_t^* \\ \frac{P f_t^* [1 - (D_0 + m\varepsilon^n)] \left(1 + a_t \log\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_s}\right)\right) \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}}{\alpha_t \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}\right)^{1.7} + \frac{\varepsilon}{\varepsilon_t}} & \sigma > f_t^* \end{cases}$$

式中: σ 为应力; ε 为应变;其他参数同式式(1)、(3)、(4)、(5).

2 数值模拟

大连理工大学尚仁杰在其博士论文^[10]中论述了一系列的混凝土轴向拉伸、压缩全曲线试验研究,具体试验方案、内容及试验成果见文献[10].由于其试验结果被不少文献所引用,因此本文的部分模型参数也采用该文献的成果,见表 2,表 3.方兆麟^[1]等人也进行了预应力混凝土桩打桩拉应力的试验研究,本文可从理论上验证该文献的部分试验数据.

表 2 PHC 桩参数值表

Tab. 2 Parameter values of PHC piles

σ_p	f_t^*	ε_t	D_0	k
5.0	3.11	120.0E-06	0.025	0.9

表 3 本构模型其它参数值表

Tab. 3 Other parameter values of the constitutive model

α_t	a_t	$\dot{\varepsilon}_s$	$\dot{\varepsilon}$	m	n	P
3.02	0.15	1.0E-05	1.0E+1	1.10E+06	2.06	1.44

由本文建立的本构方程在应变率为 $10^1/s$ 的冲击载荷作用下的理论加载曲线与试验应力-应变曲线加载段相比较,在变形趋势上符合很好,数值精度上符合良好见图 1.说明本文建立的 PHC 桩单轴受拉动态本构模型是正确的.

3 结 论

在静态本构模型的基础上考虑应变率强化效应、损伤弱化效应及预应力强化效应的影响,建立 PHC 桩的单轴受拉动态本构模型,通过比较模型仿真结果与试验值,验证了模型的正确性;并首次提出以预应力强化因子简化预应力钢筋模型与混凝土模型的耦合关系,其结果满足工程实际的要求,但由于混凝土材料材性复杂,动态下力学特性多变,其可靠性还需进行更多的试验加以验证;本研究成果能为进一步研究在振动沉桩过程中控制振动锤参数,从而降低打桩拉应力对桩身的破坏提供依据。

参考文献 References

- [1] 方兆麟. 预应力混凝土桩打桩拉应力试验研究[J]. 水运工程, 1979(8):1-6.
FANG Zhao-ling. The experimental research on tensile stress of piling prestressed concrete piles[J]. Water Engineering, 1979(8):1-6.
- [2] 余海洋, 武建华, 李 强. 混凝土损伤本构模型研究评述[J]. 重庆建筑大学学报, 2007, 29(2):68-72.
YU Hai-yang, WU Jian-hua, LI Qiang. A review of concrete damage constitutive models[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2007, 29(2):68-72.
- [3] 田红伟. 基于损伤的混凝土动态本构模型研究及其在有限元分析中的应用[D]. 南京:河海大学, 2005.
TIAN Hong-wei. The research on dynamic constitutive model of concrete base on damage and Its application in finite element analysis[D]. Nanjing: Hehai University, 2005.
- [4] 过镇海. 混凝土的强度和变形[M]. 北京:清华大学出版社, 1997.
GUO Zhen-hai. The strength and deformation of concrete[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [5] 李明顺, 徐有邻. GB50010-2002 混凝土结构设计规范实施手册 [M]. 北京:知识产权出版社, 2005.
LI Ming-shun, XU You-ling. GB50010-2002 The Implementation Manual Design of Concrete Structures [M]. Beijing: Intellectual Property Press, 2005.
- [6] 肖诗云, 林 皋, 王 哲. 应变率对混凝土抗拉特性的影响[J]. 大连理工大学学报, 2001, 41(6):721-725.
XIAO Shi-yun, LIN Ao, WANG Zhe. Strain rate on tensile properties of concrete[J]. Journal of Dalian University of Technology, 2001, 41(6):721-725.
- [7] 沈新普, 黄志强, 鲍文博, 等. 混凝土断裂的理论与试验研究[M]. 北京:中国水利水电出版社, 知识产权出版社, 2008.
SHEN Xin-pu, HUANG Zhi-qiang, BAO Wen-bo, et al. The theoretical and experimental research of concrete fracture[M]. Beijing: China Water Power Press, Intellectual Property Press, 2008.
- [8] 李兆霞. 损伤力学及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.
LI Zhao-xia. Damage mechanics and its application[M]. Beijing: Science Press, 2002.
- [9] 汪训流, 叶列平, 陆新征. 往复荷载下预应力混凝土结构的数值模拟[J]. 工程抗震与加固改造, 2006, 28(6):25-29.
WANG Shun-liu, YE Lie-ping, LU Xin-zheng. The numerical simulation of prestressed concrete on reciprocating Load[J]. Engineering and Retrofitting, 2006, 28(6):25-29.
- [10] 尚仁杰. 混凝土动态本构行为研究[D]. 大连:大连理工大学, 1994.
SHANG Ren-jie. The research of dynamic constitutive behavior of concrete[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 1994.

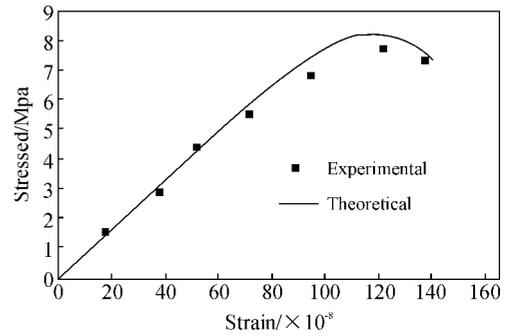


图1 单轴受拉动态本构模型应力-应变曲线理论值和试验值

Fig. 1 The theoretical and experimental values of stress-strain curves of uniaxial tensile dynamic constitutive model

Research on uniaxial tensile dynamic constitutive model of PHC piles based on damage

ZHU Jian-xin^{1,2}, DING Qu^{1,2}, ZHANG Qiu-yang¹, GUO Xin-hua¹

(1. Key Laboratory of Modern Complex Equipment Design and Extreme Manufacturing, Central South University, Changsha 410083, China;

2. Hunan Sunward Intelligent Machinery Co., LTD. Changsha 410100, China)

Abstract: Based on the strain rate enhancement factor, damage weakening factor and pre-stressed enhancement factor, this paper has analyzed their impact on the strength of pre-stressed concrete and established a uniaxial tensile dynamic constitutive model which is used to describe the impact properties of PHC piles under impact load. The model simulation results were compared with the experimental results, which shows that the results indicated by this model is good agreement with the deformation trend and agreement with the experimental results in numerical accuracy. The results of this paper can provide the basis for controlling the vibration parameters in the process of vibrating pile.

Key words: PHC piles; Pre-stressed concrete; damage; uniaxial tension; dynamic constitutive model

Biography: ZHU Jian-xin, Ph. D., Prof. Changsha 410100, P. R. China, Tel: 0086-15973119881, E-mail: dingqu2008@163.com

(上接第 012 页)

The research of recycled bearing concrete hollow blocks

BAI Guo-liang^{1,2}, ZHANG Feng-jian^{1,3}, AN Yu-yi¹, XIAO Hui⁴, QUAN Zong-gang⁴

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China;

2. State key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China (XAUAT), Xi'an 710055, China;

3. Henan University of Urban Construction, Pingdingshan 467000, China;

4. Xi'an Research and Design Institute of wall & Roof Materials, Xi'an 710061, China)

Abstract: From the test of the 190 single row recycled concrete hollow blocks, the effect of the main factors of recycled concrete hollow blocks is obviously identified. A new kind of 240 three-row hollow blocks is made on this basis. Its impressing strength can come up to MU5.0, MU7.5 and MU10.0 from the test of right mixture ratio. They can be used in bearing masonry structure and earthquake resistant masonry structure. As the three-row hollow blocks have longer heat conduction route, they have better thermal insulation performance.

Key words: Orthogonal test; recycled coarse aggregate; recycled fine aggregate; recycled concrete block

Biography: BAI Guo-liang, Ph. D., Proessor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13609123149, E-mail: guoliangbai@126.com