

基于能量标准的混凝土结构抗冲击设计

王宝庭 张廷毅 高丹盈 朱海堂

(郑州大学新型建材与结构研究中心, 河南 郑州 450002)

摘要 将冲击荷载分为软冲击和硬冲击,以受到软冲击作用的结构为研究对象,建立韧性设计方法的流程图。构思安全分析设计的思路,给出能量标准的安全系数概念,建立以能量标准对混凝土结构整体破坏进行安全校核的方法和准则,并以常见的混凝土板的冲击破坏为例,说明如何考虑破坏模式的影响。

关键词 韧性设计方法;破坏能;软冲击;设计流程;能量准则;安全系数

中图分类号 :TU37 **文献标识码** :A **文章编号** :1006-7647(2008)01-0001-03

Impact resisting design for concrete structures based on energy criterion//WANG Bao-ting, ZHANG Ting-yi, GAO Dan-ying, ZHU Hai-tang(*Research Center of New Style Building Material & Structure, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China*)

Abstract : The study was performed on concrete structure design. The impact load was divided into soft impact and hard impact. With the structure under soft impact as the objective of study, the flow chart for toughness design method was drawn, and the idea for safety analysis design and concept of safety factor for energy criterion were put forward. Then, the method and criterion for safety checking of the integral failure of concrete structures based on energy criterion were established. With the impact failure of common concrete slabs as an example, the influences of failure modes on design result were described.

Key words : toughness design method; failure energy; soft impact; flow chart for design; energy criterion; safety factor

在现行混凝土结构的设计方法中,一般都使用简便的理论或经验公式。但随着理论分析、计算技术的进步,将各种最新的知识引入到数值分析中,建立高精度的设计方法变得越来越重要。

ACI446 委员会早在 1992 年的报告里就建议将混凝土结构的韧性设计方法引入到混凝土的结构设计中,将此作为重要的研究课题做具体的研究^[1]。我国在这方面的研究还很少。由于混凝土结构的规模越来越大,冲击带来的危害也越来越大。因此,基于能量准则的抗冲击设计理应成为我国今后的研究方向。

混凝土结构设计时考虑的冲击荷载可以分为由人为事故引起和由自然灾害引起的 2 种。属于人为事故产生的冲击现象有道路桥梁的护栏或者高架桥的桥柱受到车辆的碰撞,防波堤、桥墩等港湾、海岸结构受到船舶的碰撞,飞机等对核电站及相关设施的碰撞,重化学工业工厂的爆炸事故以及战争中的蓄意破坏等。考虑结构的抗冲击能力进行设计时,要求保护生命财产安全、抑制冲击破坏以及防止破

坏引发的二次灾难。另外,发生由滚石、土崩、滑坡等自然灾害引起的冲击时,结构如果倒塌会发生重大灾难,因此有时有必要设置抵抗冲击的防护墙。

这种冲击发生的破坏现象一般可以解释为:由于物体的冲撞或者爆炸,短时间内发生能量交换,不仅惯性力或者应力波对结构的性能会产生重大影响,而且材料中产生的应变或应力速度效应比结构行为更加复杂^[2]。

传统上,在各种混凝土结构的设计中,将冲击引起的动态效应利用一个动载系数换算成静力荷载作为设计冲击荷载,然后根据容许应力进行设计。例如国外的设计指导书中,考虑飞机对核电站及其相关设施的冲撞时,飞机的冲击荷载用冲击力与时间的关系形式给出^[2-3]。但是这种方法只是着眼于随时间变化的应力最大值这一片面的效果,并不能适当处理诸如冲击荷载作用初期的高频震动成分的显著影响,以及由于发生应力波引起的断裂模式的变化或者说由于发生内面剥离等冲击特有的断裂现象。随着交通的高速化和复杂化,重要的土木结构

发生撞击事故的危險性在增加。冲击荷载造成结构破坏时,发生大规模灾害的概率也在升高。再加上受冲击作用时结构的变形性能和断裂模式的变迁,如何确保结构的抗冲击性能变得越来越重要。

处理冲击问题时,一般根据冲击体与被冲击结构性能之间的相互关系,分类为软冲击和硬冲击^[4-5]。一般的冲击如车辆、船舶、飞机、巨浪、洪水对混凝土结构的冲击,冲击体本身也伴随着变形,结果导致冲击力的攀升相对缓慢,并且冲击作用时间也比较长,因而可以看做是软冲击。其他冲击诸如爆炸则可以归结为硬冲击。

本文以软冲击作用为研究对象,提出以能量标准对混凝土结构整体破坏进行安全校核的方法及其分析设计思路。在基于能量的安全性校核里,计算混凝土构件的能量吸收时,可以通过引入混凝土的开裂、动态效果等断裂力学性能进行冲击破坏分析而求得,然后进行安全系数的分析。

1 抗冲击设计的思路

一般需要进行抗冲击设计的混凝土结构是以发生概率很小的冲击事件为研究对象的,因此只以终结极限状态为目标进行安全性的确认是合理的。混凝土结构在软冲击作用下发生的破坏模式(整体破坏)主要是受弯破坏和冲切破坏。其中,冲切破坏模式在破坏之前吸收的能量小,并且诱发内面剥离的可能性大。因此,抗冲击设计里将受弯破坏作为极限状态。冲击荷载下的破坏分析与静载下的破坏分析不同,同一个混凝土结构(被冲击体)由于冲击体的种类或冲击速度不同,破坏模式也不一样^[6],因此有必要用能量的标准进行安全性校核。冲击的能量传播机制是冲击体冲击以前具有的动能部分或大部分传给了结构,变为结构本身的动能和结构吸收的能量。结构吸收的能量又分为弹性应变能和开裂、摩擦、混凝土的塑性变形等不能恢复的能量部分。前者可恢复性的弹性应变能作为动能消耗在结构的震动上,在此过程中又产生非恢复性的变形能成为结构吸收的能量。另外,假如能够以冲击力和时间的关系给出设计冲击力,就可以以承载力为标准进行安全性的探讨。

图1所示的流程表示按照能量标准和承载力标准进行的抗冲击设计方法。图中以实线标出的流程是按照能量标准进行的,以虚线标出的流程是按照承载力标准进行的。

- 以下沿图1叙述设计顺序。
- a. 选定对象结构。
 - b. 是否有设计冲击力标准:在规范等设计标准

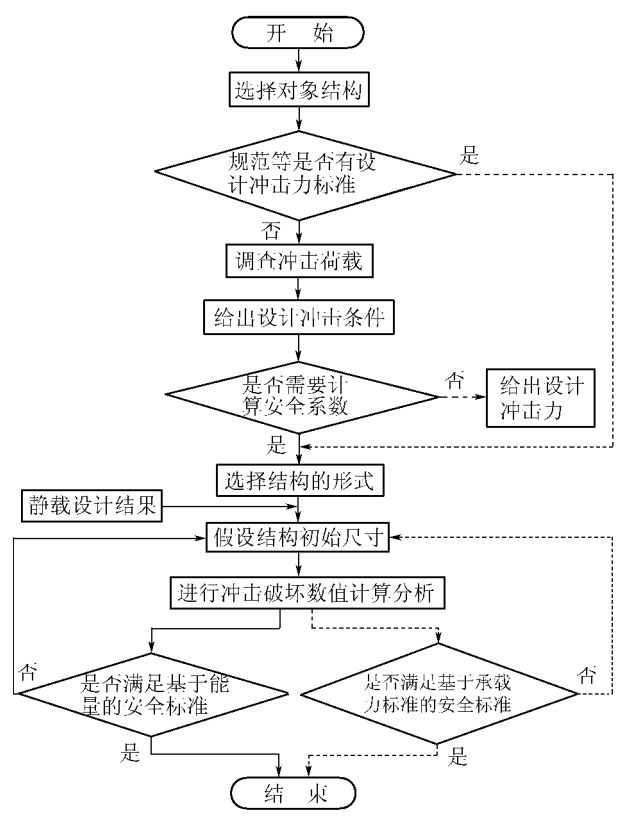


图1 抗冲击设计的整体流程

里,给出应该使用的冲击力-时间关系时,就按照承载力标准进行安全校核。如果没有给出,就按照能量标准校核。

c. 调查冲击荷载:调查可能与对象结构发生碰撞的冲击体的种类、冲击速度等,根据概率统计的方法,预测危险程度。

d. 给出设计冲击条件:根据冲击条件的调查结果,给出抗冲击设计时应该考虑的冲击体的种类、冲击速度、冲击角度等冲击条件。

e. 判断是否需要计算安全系数:如果不需要计算安全系数,即按是否满足给定承载力标准进行设计时,从给出的冲击条件模拟作为设计冲击力的“冲击力-时间关系”,决定以设计冲击力进行冲击破坏性能分析时的冲击位置和载荷面积。

f. 选择结构的形式:依据冲击体的种类、冲击条件、频度等,决定是采用PC结构还是采用RC结构,以及采用简单支撑还是采用固定支撑等支撑条件,详细决定结构形式。

g. 静载设计及决定结构的几何尺寸:利用静载设计决定混凝土的种类、截面尺寸、钢筋用量、PC钢筋等。

h. 冲击性能分析:给定的冲击体的冲击条件,或者设计冲击力下,进行冲击性能分析。以能量基准进行安全性校核时,输入设计用冲击条件进行破坏性能分析。以承载力基准进行安全性校核时,将

设计冲击力作为输入数据^[7]。这些性能分析都可以采用 ANSYS 等商用有限单元法分析软件或自主开发的包含非线性动态分析的软件。

i. 安全性校核 选择是以能量基准进行安全性校核,还是以承载力基准进行安全性校核,确认结构的安全性。

如果不满足任一安全标准,就回到步骤 g,重新假设结构的几何尺寸进行破坏分析。

2 以能量基准进行安全性校核的方法

软冲击荷载作用下,冲击体施加给结构的能量称为施加能 E_{fe} ,可以用下式表示:

$$E_{fe} = E_0 - E_p - E_r - E_n \quad (1)$$

式中: E_0 为冲击前冲击体的动能; E_p 为冲击体发生塑性变形时吸收的能量; E_r 为冲击体冲击后保留的动能; E_n 为其他没有传给结构的动能。

可以通过各种数值方法或通用的有限元分析软件计算各个构件最终吸收的能量 E_{fu} ,判断结构是否能够吸收冲击体传来的施加能 E_{fe} 。具体地说,各个构件最终吸收的能量主要随着加载速度而变,由冲击体冲击条件产生的加载速度作为输入数据,进行冲击破坏分析,计算出 E_{fu} 与 E_{fe} 进行比较。当 $E_{fu} \geq E_{fe}$ 时表示结构安全。当这个条件不满足时,需要变更截面尺寸、配筋率、混凝土种类等,重新进行分析。

这里,引入一个表示输入到结构的冲击力性能特征的冲量 I 的概念,定义结构的安全系数表达式为

$$r_i = \frac{E_{fu} I_u}{E_{fe} I_e} \quad (2)$$

式中: I_u 为结构失效时的冲量; I_e 为最大位移时的冲量。图 2 是 $E_{fu} I_u$ 、 E_{fe} 、 I_e 等关系的概念图,各量以曲线下的阴影表示。另外,以上都是假设冲击破坏

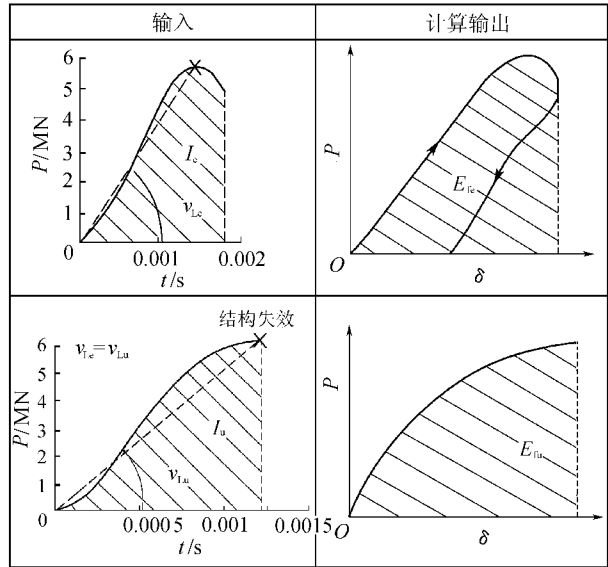


图 2 冲量和能量吸收的概念

模式只由加载速度支配。

如果计算得到的安全系数 r_i 超过 1.0,就表明结构是安全的。

在此,对结构的破坏模式进行简要讨论。即在静力荷载下,一般的设计结构为冲切破坏的抗剪承载力比弯曲破坏的抗弯承载力大(冲切抗剪破坏能不小于弯曲破坏能),即受弯破坏是希望的模式;但受冲击作用的混凝土结构随着加载速度的增加,更容易产生冲切破坏模式^[6]。因此,即使弯曲裂纹先行发生,逐渐增加加载速度,超过某个值,冲切破坏的剪切破坏能就会小于弯曲破坏能(冲切抗剪破坏能小于弯曲破坏能)。这种关系可以用图 3 来说明。在设计冲击条件下,通过破坏性能数值分析判断结构为安全时,例如图 3 中的点①和点③,进一步分析其临界的破坏模式,点①和点③分别落入受弯破坏模式(图 3 中点⑤)和冲切受剪破坏模式(图 3 中点⑥)两种情况。冲切受剪破坏模式的抗冲击设计破坏模式是不希望看到的,为了提高抗冲击性能,改善冲击破坏模式,需按照抗冲击性能指标变更截面各尺寸等量,临界破坏时的抗弯破坏能由 $E_k(B)$ 提高到 $E_k(B')$,受剪破坏能由 $E_k(PS)$ 提高到 $E_k(PS')$,再度进行冲击破坏性能分析,这样点①和点③以及不同的冲击速度的点②就都是受弯破坏模式。对于更高的冲击速度点④,则只需改变冲切受剪破坏模式设计,就可以防止冲切抗剪破坏先行发生。

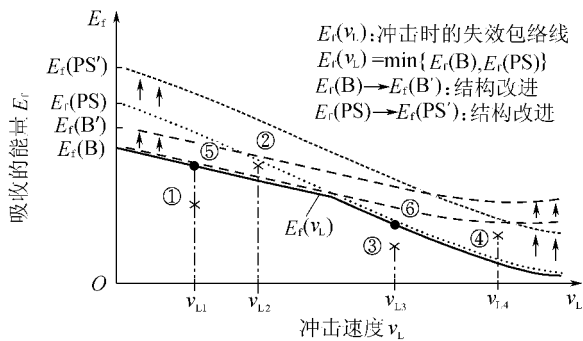


图 3 破坏能量和加载速度的关系^[7]

3 结 语

本文从能量的角度,以结构的极限吸收能量的大小为设计依据,将所谓的韧性设计方法引入到混凝土结构的设计里,提出了韧性设计的思路 and 基于能量标准的安全校核方法。今后将此应用于具体的设计实例,开展实用化研究,以提高设计精度和水平,为基于能量标准的抗冲击设计的规范积累经验。

(下转第 7 页)



图2 竣工期 $E-B$ 模型应力水平等值线

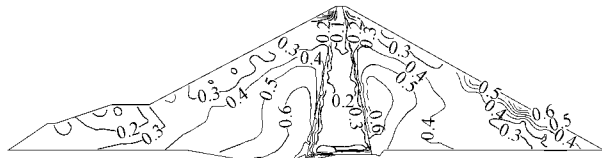


图3 竣工期 $E-\nu$ 模型应力水平等值线

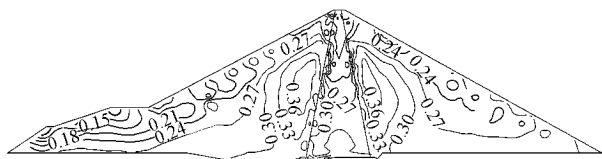


图4 竣工期 $E-B$ 模型泊松比等值线

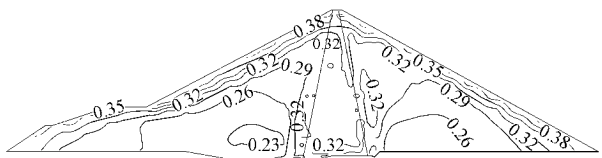


图5 竣工期 $E-\nu$ 模型泊松比等值线



图6 竣工期 $E-B$ 模型弹性模量等值线(单位:MPa)

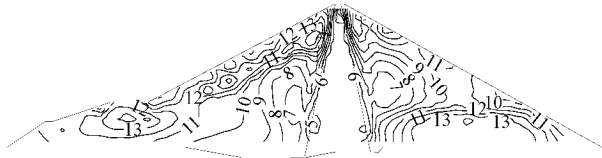


图7 竣工期 $E-\nu$ 模型弹性模量等值线(单位:MPa)

4 结 语

本文对邓肯 $E-\nu$ 模型和 $E-B$ 模型的泊松比和弹性模量取值及分布规律进行了研究。两种模型均表现为泊松比随小主应力增大而减小、随应力水平增大而增大,与一般的认识一致;对 $E-B$ 模型,应力水平对泊松比的影响显著,而在 $E-\nu$ 模型中,应力水平较低时,泊松比受应力水平影响相对较小。两种模型所反映的结构内弹性模量有差异,但差异不大。

整理 $E-B$ 模型参数时,一般应满足 $n > m$ 。使用该模型时,不宜用回弹模量或历史上最大的小主应力求泊松比,而宜用当前状态下的小主应力。

从泊松比的取值大小来看, $E-B$ 模型和 $E-\nu$ 模

型都有各自的缺陷,且笔者认为 $E-B$ 模型的缺陷更值得注意。在高土石坝有限元计算中应考虑这一点,从而合理分析和选用由不同模型分析得到的应力应变。

值得指出,从本文结果看,还很难评价哪个模型更优。事实上,尽管 $E-B$ 模型是在 $E-\nu$ 模型之后提出的,但 $E-B$ 模型只是在文献[2]的研究报告中提出,笔者曾亲询 Duncan 教授,迄今为止,该模型没有在任何正式的刊物或会议上发表。是不是该模型存在缺陷或者至少不比 $E-\nu$ 模型更优,或其他什么原因,还难以确认。因此,国内不少人认为 $E-B$ 模型优于 $E-\nu$ 的说法至少从理论上还没有依据。

参考文献:

- [1] DUNCAN J M, CHANG Chin-yung Y. Non-linear analysis of stress and strain in soil[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, 1970, 96(5): 1629-1653.
- [2] DUNCAN J M, BYRNE P, WONG K, et al. Stress-Strain and bulk modulus parameters for finite element analysis of stress and movements in soils masses, Report No. UCB/GT/80-01 [R]. Berkeley: Univ of California, 1980.
- [3] 钱家欢, 殷宗泽. 土工原理与计算[M]. 北京: 水力电力出版社, 1994.
- [4] 殷宗泽, 张坤勇, 朱俊高. 面板堆石坝应力变形计算中考虑土的各向异性[J]. 水利学报, 2004(11): 22-26.

(收稿日期: 2007-03-01 编辑: 方宇彤)

(上接第3页)

参考文献:

- [1] ACI Committee 446. Fracture mechanics of concrete: concepts, models and determinations of material properties: American concrete institute, special publication [R]. Farmington Hills: Elsevier Applied Science, 1991.
- [2] KTA 2202. Kerkraftwerken gegen Flugzeugabsturz, Grundsätze und Lastannahmen, Entwurf [R]. Koeln: Kerntechnischer Ausschuss (KTA), 1980.
- [3] RCC-G-80. Design and construction rules for civil works of 900 MWe PWR nuclear power plants [S].
- [4] RILEM, CEB, IABSE, et al. Concrete structure under impact and impulsive loading: introductory report and proceeding [R]. Berlin: BAM, 1982.
- [5] 藤井学, 宫本文穗. 击荷重化におけるコンクリート构造物の撓曲[J]. コンクリート工学, 1983, 25(9): 25-36.
- [6] MIYAMOTO A, KING M W, FUJII M. Analysis of failure modes for reinforced concrete slabs under impulsive loads [J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(5): 538-545.
- [7] MIYAMOTO A, KING M W, FUJII M. Nonlinear dynamic analysis of reinforced concrete slabs under impulsive loads [J]. ACI Structural Journal, 1991, 88(4): 411-419.

(收稿日期: 2007-01-18 编辑: 方宇彤)