

文章编号:1673-2049(2009)03-0049-06

基于裂缝扩展准则的混凝土重力坝裂缝 扩展全过程数值分析

许青,邓涛,董伟,吴智敏

(大连理工大学 土木水利学院,辽宁 大连 116024)

摘要:将裂缝扩展准则应用于混凝土重力坝裂缝扩展全过程分析,结合虚拟裂缝模型计算了经典混凝土重力坝模型的断裂特性,并与其他数值方法进行了对比。结果表明:利用该数值方法得到的混凝土重力坝模型的外荷载-裂缝口张开位移曲线及裂缝扩展路径与试验结果均吻合良好;当给定了混凝土材料的起裂断裂韧度、断裂能、抗拉强度等参数后,即可采用该数值方法对混凝土重力坝裂缝扩展全过程进行分析。

关键词:裂缝扩展准则;混凝土重力坝;数值分析;虚拟裂缝模型;抗拉强度

中图分类号:TU37 **文献标志码:**A

Numerical Analysis of Complete Crack Propagation Process in Concrete Gravity Dams Based on Crack Propagation Criterion

XU Qing, DENG Tao, DONG Wei, WU Zhi-min

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, Liaoning, China)

Abstract: Crack propagation criterion was used to analyze the complete crack propagation process in concrete gravity dams. Utilizing the criterion combined with fictitious crack model, the fracture behaviors for a classical concrete gravity dam model were calculated and compared with other numerical methods. The results show that the load versus crack mouth opening displacement curve and crack propagation trajectory in concrete gravity dam model are good agreements with experimental results. When some concrete material parameters, such as initial cracking toughness, fracture energy, tensile strength are given, the complete crack propagation process in concrete gravity dams can be analyzed by using the numerical method.

Key words: crack propagation criterion; concrete gravity dam; numerical analysis; fictitious crack model; tensile strength

0 引言

近40年来,混凝土断裂力学理论取得了巨大的进展并被广泛应用于混凝土结构的断裂分析中,如混凝土结构裂缝稳定性分析及裂缝扩展问题等。而对于重力坝这类有特殊功能要求的大型混凝土结

构,其安全性问题越来越受到研究者的关注。在研究初期,各国学者^[1-2]将线弹性断裂力学(LEFM)应用于混凝土重力坝的开裂问题分析,但线弹性断裂力学中忽略了混凝土断裂过程区非线性的影响,并假定整个坝体区域材料呈线弹性,并采用经典的线弹性断裂力学判据来判断裂缝扩展的稳定性。在非

收稿日期:2009-05-06

基金项目:国家自然科学基金项目(50878036);辽宁省教育厅项目(200707)

作者简介:许青(1966-),女,辽宁大连人,副教授,工学硕士,E-mail:xuqing@dl.cn。

线性断裂力学分析数值方法尚未成熟之前,线弹性断裂力学大大简化了问题,因此在 20 世纪 90 年代被广泛应用于研究重力坝的断裂行为,如文献[3]中利用基于线弹性断裂力学的离散裂缝模型方法分析了 Koyna 重力坝,并且指出此断裂力学方法比传统的零拉应力设计更为合适;文献[4]中提出了实体重力坝与岩基交界面处裂缝应力强度因子的近似解析表达式,并对各种影响因素进行了参数化研究,文献[5]中同样采用线弹性断裂力学的方法对 100 m 和 200 m 的重力坝进行了研究,并指出线弹性断裂力学可以很好地预测裂缝的扩展方向。

随着裂缝研究的不断发展,线弹性断裂力学中忽略了断裂过程区长度的假设不再成立。严格来讲,由于断裂过程区高度的非线性行为,非线性断裂力学(NLEFM)模型在描述这类问题时更为准确。常见的非线性断裂力学裂缝模型有:虚拟裂缝模型(FCM)^[6]、裂缝带模型(CBM)^[7]等。目前,非线性断裂力学在混凝土裂缝扩展计算方面已经发展比较成熟,并且成为该类问题计算的主流方法,如 Carpinteri 等^[8]利用分离式粘聚力裂缝模型对重力坝试验模型进行了数值模拟;Barpi 等^[9]用基于强度准则的虚拟裂缝模型再次对该系列重力坝模型进行了非线性断裂数值分析,并取得了满意的结果;Bhattacharjee 等^[10]分别用固定裂缝和旋转裂缝的弥散裂缝模型对重力坝模型及 Koyna 实体重力坝进行了数值分析;杜效鹄等^[11]将有限元富集技术引入重力坝裂缝扩展的数值分析中;Shi^[12]探讨了不同剪应力软化曲线对整个裂缝扩展计算结果的影响,该学者提出的数值方法还能同时处理多条裂缝的扩展问题。

以往文献中均认为在粘聚力的作用下,裂纹尖端的奇异性消失,扩展准则多采用基于第一主应力的强度判据。而事实上,虚拟裂纹尖端附近的应力状态是很复杂的,不能简单用裂纹尖端处应力值来判断该区域的稳定性,因此本文将具有明确物理意义的裂缝扩展准则^[13]用于判断混凝土重力坝的裂缝扩展,即当外荷载引起的裂纹尖端应力强度因子与粘聚力引起的裂纹尖端应力强度因子的差值达到起裂时的临界曲线时,裂缝便开始扩展。利用裂缝扩展准则在有限元软件 ANSYS 平台进行二次开发,成功地实现了重力坝模型的裂缝扩展计算,并与其他数值方法的计算结果进行了比较,包括荷载-裂缝口张开位移曲线和裂缝扩展路径。结果表明:基于裂缝扩展准则的数值方法在分析重力坝断裂问题

时是有效的。

1 裂缝模型

对于像混凝土之类的准脆性材料裂缝扩展的问题,主要涉及以下 2 方面的问题;①如何将粘聚力裂缝模型(虚拟裂缝模型)引入到数值分析中;②如何在程序中实现裂缝的自动扩展。对于前一个问题,分离式裂缝模型大多是在裂缝面处设置弹簧单元或者直接插入界面单元,这类特殊单元需要准确地反映断裂过程区的特殊本构关系;而要实现裂缝的扩展,则需要采用合适的扩展准则,如强度准则、双 K 准则等。借助扩展准则在一些商业软件(如 ABAQUS、ANSYS 等)中就可以很好地实现裂缝的扩展。

1.1 虚拟裂缝模型

由于混凝土材料具有应变软化特性,对于有初始缺陷(如裂缝)的混凝土结构,当外荷载达到一定值时,会在裂缝前端产生局部化的破坏带,其变形较周边材料的变形大得多,而该区域外混凝土材料的本构关系依然保持线弹性。

Hillerborg 等利用有限元方法,首先成功地将虚拟裂缝模型用于解决事先预知裂缝扩展方向的 I 型混凝土结构的裂缝扩展问题,之后虚拟裂缝模型被延伸用于解决复合型裂缝扩展问题。虚拟裂缝模型中认为裂缝由 2 个部分组成,即真实裂缝段和由微裂缝构成的断裂过程区。真实裂缝段是自由裂缝,不传递任何应力,而断裂过程区虽然出现高度的局部化变形,但仍能承受一定的拉应力,其法向方向的闭合力大小与裂缝口张开位移、混凝土抗拉强度以及 I 型断裂能有关。实际上,虚拟裂缝模型采用 2 种本构关系描述开裂混凝土整个结构特性:一方面利用线弹性本构关系描述裂缝周边的混凝土材料;另一方面利用混凝土软化曲线描述断裂过程区的力学行为。目前,混凝土软化曲线有多种形式,本文中采用 Petersson 简化的双线性计算公式,即

$$\sigma(w) = \begin{cases} f_t - \frac{f_t - \sigma_s}{w_s} w & 0 \leq w \leq w_s \\ \frac{\sigma_s}{w_s - w_0} (w - w_0) & w_s < w \leq w_0 \\ 0 & w > w_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: w 为裂缝面任意点处的张开位移; $\sigma(w)$ 为作用于断裂过程区的粘聚力; σ_s 、 w_s 分别为拐点处的粘聚力和张开位移, $\sigma_s = f_t/3$, $w_s = 0.8G_f/f_t$, f_t 为混凝土抗拉强度, G_f 为混凝土的断裂能; w_0 为粘聚力为 0 时的临界裂缝张开位移, $w_0 = 3.6G_f/f_t$ 。

混凝土双线性软化曲线见图 1。

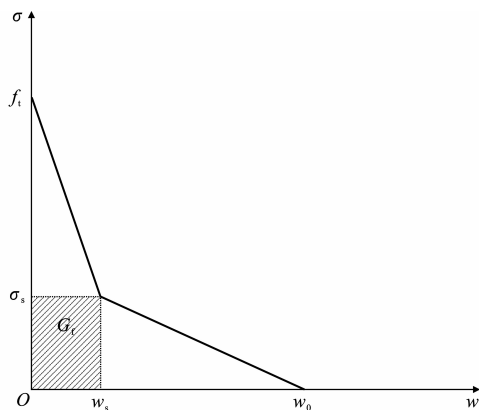


图 1 混凝土双线性软化曲线

Fig. 1 Concrete Bilinear Soften Curve

1.2 复合型裂缝扩展准则

对于金属材料,当塑性区尺寸较大时,其裂纹尖端的奇异性会消失。而对于混凝土这类准脆性材料,其裂纹尖端仍然存在一定的奇异性,因而直接利用基于强度的准则是不合适的。大量试验表明,混凝土断裂是一个由线弹性到非线性最后到失稳破坏的三阶段过程。徐世烺等^[14]通过对大型紧凑拉伸试件进行断裂试验提出了能描述裂缝不同状态的双 K 断裂准则,之后吴智敏等^[15]将虚拟裂缝模型与线弹性断裂力学相结合,采用解析的方法研究了不同尺寸系列楔入劈拉混凝土试件的双 K 断裂韧度值的尺寸效应。文献^[13]中针对以往的混凝土复合型断裂扩展准则的缺陷并基于线弹性的叠加原理,提出了裂缝扩展准则,该准则利用线弹性断裂力学中应力强度因子判断裂缝扩展的稳定性,即当外荷载和粘聚力共同引起的裂纹尖端处应力强度因子的差值达到起裂时的 $K_I - K_{II}$ 临界曲线时,裂缝扩展,从而形成新的裂缝, K_I 、 K_{II} 分别为外荷载和粘聚力共同作用下的 I 型、II 型应力强度因子。相应地,对于复合型裂缝而言,该扩展准则可以表述如下:①当 $(K_P - K_\sigma)_{I,II} < K_{(I,II)C}$ 时,裂缝不扩展;②当 $(K_P - K_\sigma)_{I,II} = K_{(I,II)C}$ 时,裂缝处于临界状态;③当 $(K_P - K_\sigma)_{I,II} > K_{(I,II)C}$ 时,裂缝扩展。 K_P 、 K_σ 分别为在外荷载和粘聚力作用下的应力强度因子, $K_{(I,II)C}$ 为混凝土起裂时的 $K_I - K_{II}$ 临界曲线。

扩展准则直接关系到数值模拟的结果,上述扩展准则中采用裂纹尖端处应力强度因子来判断裂缝的稳定性和扩展的路径。为了准确预测裂缝的扩展,需要精确计算裂纹尖端处的应力强度因子,本文中利用 ANSYS 的断裂模块,在裂纹尖端周边设置环状奇异单元,采用位移外推法计算裂纹尖端处的

I 型、II 型应力强度因子。复合型的断裂准则采用线弹性断裂力学中的最大周向应力准则,即

$$K_{IC}^{ini} = \cos \frac{\theta}{2} \cdot (K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta) \quad (2)$$

$$\theta = 2 \arctan \frac{1}{4} [K_I / K_{II} \pm \sqrt{(K_I / K_{II})^2 + 8}] \quad (3)$$

式中: K_{IC}^{ini} 为材料的起裂断裂韧度值; θ 为断裂角,取应力 σ_θ 较大时所对应的值,其正负号由 K_{II} 的符号而定。

对于给定任一裂缝扩展长度,当结构同时满足整体平衡方程和裂缝扩展准则时,虚拟裂纹尖端节点便会扩展至新的位置,在本文中裂缝扩展方向垂直于裂纹尖端最大主拉应变的方向,裂缝扩展角的计算公式为

$$\alpha = \frac{1}{2} \arctan \frac{\gamma_{xy}}{\epsilon_x - \epsilon_y} \quad (4)$$

式中: α 为裂缝的扩展角; ϵ_x 、 ϵ_y 分别为裂纹尖端节点处的 x 向、 y 向正应变; γ_{xy} 为裂纹尖端处 x 、 y 向之间的剪应变。

2 裂缝扩展的计算方法

目前,混凝土结构断裂问题的数值模拟方法主要有 2 种:分离式裂缝模型和弥散裂缝模型。文献^[16]中对这 2 种方法进行了比较,结果表明:这 2 种方法的计算精度相差不大。各国对重力坝的断裂数值分析多采用分离式裂缝模型,这主要是因为分离裂缝模型能给出裂缝的细部信息,并且能方便施加缝隙水压力^[17-28]。

本文中的裂缝模型同样采用分离式粘聚力裂缝模型,见图 2,其中, a_0 为初始裂缝的长度; w_{CMOD} 为裂缝口张开位移; δa 为数值计算中每步裂缝扩展长度。计算时采用裂缝扩展长度控制的方案,即预先设定裂缝的扩展长度 δa ,找出满足平衡方程和扩展条件的断裂过程区长度和相应外荷载,之后利用式(4)计算下步裂缝的扩展角,而对于开裂结构裂缝调整则采用动态的网格重划分技术。整个计算迭代过程可以写成如下的循环格式:

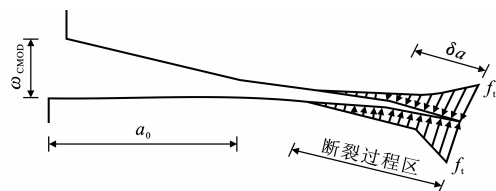


图 2 裂缝扩展的计算模型

Fig. 2 Computational Model of Crack Propagation

步骤 1:对于初始起裂状态(裂缝尚未扩展),此

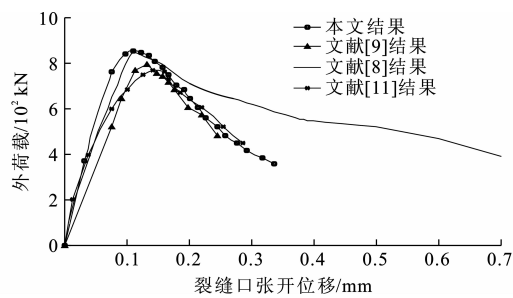


图 5 外荷载-裂缝口张开位移曲线

Fig. 5 Relations of External Loads and Crack Mouth Opening Displacements

程中由于各种因素的影响,测得的裂缝口张开位移往往较真实值偏大,尤其在曲线的下降段,因此可以看到所有数值曲线的下降段处裂缝口张开位移均较试验值偏小。

图 6 为重力坝模型裂缝扩展路径对比。从图 6 可以看出,3 种数值方法求得的裂缝扩展路径均与文献[8]的试验结果很接近,这也说明线弹性的裂缝扩展准则在预测混凝土裂缝的扩展方向是合适的。

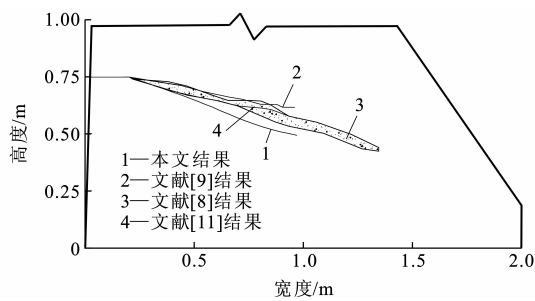


图 6 重力坝模型裂缝扩展路径对比

Fig. 6 Contrasts of Crack Propagation Trajectories of Gravity Dam Model

4 结 语

(1)相对于强度判据,引入起裂断裂韧度这个材料参数的裂缝扩展准则,其物理意义更为明确。

(2)数值计算结果表明,该数值方法能得到与试验的荷载-裂缝口张开位移曲线和裂缝扩展路径较吻合的结果,说明结合 ANSYS 平台的该数值方法能有效分析重力坝的复合型裂缝扩展问题。

参考文献:

References:

[1] 潘家铮. 断裂力学在水工结构设计中的应用[J]. 水利学报, 1980(1): 45-59.
PAN Jia-zheng. Applications of Fracture Mechanics to the Design of Hydraulic Structures[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1980(1): 45-59.

[2] INGRAFFEA A R. Case Studies of Simulation of Fracture in Concrete Dams [J]. Engineering Fracture Mechanics, 1990, 35(1/2/3): 553-564.
[3] GIOIA G, BAZANT Z P, POHL B P. Is No-tension Dam Design Always Safe? —a Numerical Study[J]. Dam Engineering, 1992, 3(1): 23-34.
[4] PLIZZARI G A. LEFM Applications to Concrete Gravity Dams[J]. Journal of Engineering Mechanics, 1997, 123(8): 808-815.
[5] KUMAR R, NAYAK G C. Numerical Modeling of Tensile Crack Propagation in Concrete Dams [J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120 (4): 1053-1074.
[6] HILLERBORG A. Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Element [J]. Cement and Concrete Research, 1976, 6(6): 773-782.
[7] BAZANT Z P, OH B H. Crack Band Theory for Fracture of Concrete[J]. Materials and Structures, 1983, 16(3): 155-177.
[8] CARPINTERI A, VALENTE S, FERRARA G, et al. Experimental and Numerical Fracture Modelling of a Gravity Dam[C]//BAZANT Z P. Fracture Mechanics of Concrete Structures. Amsterdam: Elsevier Science, 1992: 351-360.
[9] BARPI F, VALENTE S. Numerical Simulation of Prenotched Gravity Dam Models[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2000, 126(6): 611-619.
[10] BHATTACHARJEE S S, LEGER P. Application of NLFM Models to Predict Cracking in Concrete Gravity Dams[J]. Journal of Structural Engineering, 1994, 120(4): 1255-1271.
[11] 杜效鹄, 段云岭, 王光纶. 重力坝断裂数值研究[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1035-1042.
DU Xiao-hu, DUAN Yun-ling, WANG Guang-lun. Numerical Analysis of Fracture in Gravity Dam[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1035-1042.
[12] SHI Z H. Numerical Analysis of Mixed-mode Fracture in Concrete Using Extended Fictitious Crack Model[J]. Journal of Structural Engineering, 2004, 130(11): 1738-1747.
[13] 吴智敏, 董 伟, 许 青. 混凝土 I-II 复合型裂缝扩展准则及扩展全过程的数值模拟[J]. 水利学报, 2009, 40(2): 180-187.
WU Zhi-min, DONG Wei, XU Qing. Propagation Criterion for Mixed Mode I-II Crack Propagation and Numerical Simulation of the Whole Propagation

- Process[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(2):180-187.
- [14] 徐世烺, 赵国藩. 混凝土结构裂缝扩展的双 K 断裂准则[J]. 土木工程学报, 1992, 25(2):32-38.
XU Shi-lang, ZHAO Guo-fan. A Double-K Fracture Criterion for the Crack Propagation in Concrete Structures[J]. China Civil Engineering Journal, 1992, 25(2):32-38.
- [15] 吴智敏, 徐世烺, 王金来. 基于虚拟裂缝模型的混凝土双 K 断裂参数[J]. 水利学报, 1999(7):12-16.
WU Zhi-min, XU Shi-lang, WANG Jin-lai. Fracture Parameter of Concrete Based on the Fictitious Crack Model[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999 (7):12-16.
- [16] 龙渝川, 张楚汉, 周元德. 基于弥散与分离裂缝模型的混凝土开裂比较研究[J]. 工程力学, 2008, 25(3):80-84.
LONG Yu-chuan, ZHANG Chu-han, ZHOU Yuan-de. A Comparative Study for Concrete Fracture Analysis Using Smeared-and Discrete-crack Model[J]. Engineering Mechanics, 2008, 25(3):80-84.
- [17] 丁发兴, 余志武, 欧进萍. 混凝土单轴受力损伤本构模型[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2008, 28(4):70-73.
DING Fa-xing, YU Zhi-wu, OU Jin-ping. Damage Constitutive Model for Concrete Under Uniaxial Stress Conditions[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2008, 28(4):70-73.
- [18] 王振红, 朱岳明, 于书萍. 薄壁混凝土结构施工期温控防裂研究[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2007, 39(6):773-778.
WANG Zhen-hong, ZHU Yue-ming, YU Shu-ping. Study on Temperature Control and Crack Prevention of Thin-walled Concrete Structures During Construction Period[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2007, 39(6):773-778.
- [19] 李 珠, 李 罡, 刘元珍. 小剪跨比带缝剪力墙非线性分析[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(1):8-12.
LI Zhu, LI Gang, LIU Yuan-zhen. Non-linear Analysis on Small Shear-span Ratio Slitted Shear Wall Structure[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(1):8-12.
- [20] 程云虹, 吕念春. 纤维增强混凝土的动态断裂模型[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2008, 40(4):462-468.
CHENG Yun-hong, LU Nian-chun. Dynamic Crack Model of Fibre Concrete[J]. Journal of Xi'an University of Architecture & Technology: Natural Science Edition, 2008, 40(4):462-468.
- [21] 宋焕生, 赵祥模, 王国强, 等. 混凝土结构层析成像检测系统[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(3):73-77.
SONG Huan-sheng, ZHAO Xiang-mo, WANG Guo-qiang, et al. Ultrasonic-tomography System for Non-destructive Concrete Structure Testing[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(3):73-77.
- [22] 郑木莲. 多孔混凝土的渗透系数及测试方法[J]. 交通运输工程学报, 2006, 6(4):41-46.
ZHENG Mu-lian. Permeability Coefficient and Test Method of Porous Concrete[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2006, 6(4):41-46.
- [23] 赵治港, 谭云亮, 王斐峰. 钢纤维混凝土试验研究与疲劳破坏模拟[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(2):40-43.
ZHAO Zhi-gang, TAN Yun-liang, WANG Fei-feng. Experimental Study and Fatigue Failure Simulation on Steel Fiber Concrete[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(2):40-43.
- [24] 李勋文. 混凝土泵车臂架开裂的修复方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(3):44-45.
LI Xun-wen. Repair Method for Breaking Crack Damage of Concrete Pumping Truck Boom[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(3):44-45.
- [25] 张培成, 及凤云. 商品混凝土在灌注桩施工中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2007, 24(8):40-42.
ZHANG Pei-cheng, JI Feng-yun. Application of Commercial Concrete in Borehole Pile Construction[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2007, 24(8):40-42.
- [26] 汪 伟, 张国云. 桥梁裂缝产生原因及预防[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(6):40-42.
WANG Wei, ZHANG Guo-yun. Reasons and Prevention of Bridge Cracks[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(6):40-42.
- [27] 张建强. 桥梁结构裂缝及常用维修方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(6):43-45.
ZHANG Jian-qiang. Structure Crack and Troubleshooting of Bridge[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(6):43-45.
- [28] 周文欢, 张永利. 天水路黄河大桥裂纹成因分析及施工处理方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(8):33-34.
ZHOU Wen-huan, ZHANG Yong-li. Analysis and Construct Method of the Yellow River Bridge Cracks[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2005, 22(8):33-34.