

# 基于扩展有限元的双锚受拉破坏形态分析及试验研究

孟宪宏,倪明阳,潘 月

(沈阳建筑大学土木工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘 要** 目的 研究双锚在受拉荷载作用下的受力性能,为双锚在实际工程中的应用以及数值模拟方法提供参考依据。方法 基于 ABAQUS 平台,应用扩展有限元数值模拟方法,通过二维建模方式对双锚在不同埋深下的受拉破坏形态、极限承载力及裂纹扩展情况进行模拟分析,并进行同条件下的双锚受拉试验,与扩展有限元模拟结果进行对比。结果 埋深 70 mm 的双锚在受拉荷载下产生了锚栓之间无影响的单独的锥体破坏,埋深 100 mm 的双锚产生了锚栓之间有影响的联合锥体破坏,锥体破坏区域的叠加降低了双锚的极限承载力,扩展有限元的模拟结果与试验结果较吻合。结论 扩展有限元法可以较好地模拟双锚在受拉荷载作用下裂纹的扩展,双锚模拟结果与试验现象较吻合。

**关键词** 双锚;扩展有限元;受拉荷载;破坏形态

中图分类号 TU375

文献标志码 A

## Analysis and Experimental Research of Tensile Failure Mode of the Double Anchor Based on Extended Finite Element Method

MENG Xianhong, NI Mingyang, PAN Yue

(School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang, China, 110168)

**Abstract:** The study of the mechanical performance of double anchor under tensile load provides a reference for the application of double anchor in actual engineering and numerical simulation methods. Based on the ABAQUS platform, the extended finite element numerical simulation method is used to simulate and analyze the tensile failure form, ultimate bearing capacity and crack growth of the double anchor at different buried depths through two-dimensional modeling, and the tensile tests of double anchor under the same conditions are carried out, and the results are compared with those of the extended finite element simulation. A double anchor with a buried depth of 70 mm produced a single cone failure between the anchor bolts under tensile load, and a

收稿日期:2021-01-15

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0701706)

作者简介:孟宪宏(1978—),男,教授,博士,主要从事装配式混凝土结构方面研究。

double anchor with a buried depth of 100 mm produced an influential joint cone failure between the anchor bolts. The superposition of the failure area reduces the ultimate bearing capacity of the double anchor. The simulation results of the extended finite element are in good agreement with the test results. The extended finite element method can better simulate the crack propagation of the double anchor under tensile load, and the simulation results of the double anchor are in good agreement with the test phenomenon.

**Key words:** double anchor; extended finite element; tensile load; ultimate failure mode

群锚是工程中一种常见的形式,群锚受拉性能的研究也一直是热点问题。在实际工程中,双锚是最为常用的锚固形式,目前我国对于双锚的研究较少,且相关研究方法多以试验为主,何勇等<sup>[1]</sup>在研究了双筋粘结锚固性能,通过双锚受拉试验主要分析了埋深对化学锚栓锚固性能的影响,得出了埋深与破坏形态的关系。但是如果全部采用试验研究,大数量的试件制作与安装会耗时耗力,既不可行亦不必要。因此,有必要寻找合适的数值模拟方法分析双锚的受拉性能。

国内外学者对于在对模拟裂缝的数值方法进行了大量研究,提出了有限元、离散元、无网格法以及扩展有限元模拟方法。周萌等<sup>[2]</sup>应用有限元法对化学锚栓的群锚受拉进行了模拟计算分析并与试验进行对比验证。Y. Sawamoto 等<sup>[3]</sup>应用离散元法研究了冲击荷载作用下混凝土结构的损伤破坏。L. B. Lucy<sup>[4]</sup>的研究报告中提出无网格法不需要划分网格,消除了网格依赖性,相比于有限元法有着更好的效果。基于上述分析,可用于裂纹扩展模拟的数值方法有传统的有限元、离散元以及无网格法均存在着计算效率低,但存在模拟结果精度不足等问题。扩展有限元法相比于上述数值方法则具有一定优势<sup>[5]</sup>。

扩展有限元法是以传统有限元为基础,遵循传统有限元的单位分解思想并对裂纹单元采用裂纹位移解进行增强,用扩充带有不连续性质的形函数来描述计算区域的间断的一种处理不连续问题的方法<sup>[6]</sup>。扩展有限元的特点可表示为标准有限元函数与富集函

数的结合。李录贤等<sup>[7]</sup>在国内首次介绍了扩展有限元法,对其做了较为详细的综述,为国内扩展有限元的发展提供了一个开端。方修君等<sup>[8]</sup>首次把预设虚拟节点法应用在有限元平台上,完成了对扩展有限元的改进,并与传统有限元模拟结果进行对比分析,结果表明扩展有限元比传统有限元对于裂纹扩展的模拟更加准确。龚迪光等<sup>[9]</sup>在基于ABAQUS平台应用扩展有限元模拟方法模拟并分析了不同井型的储层、相关的物理参数以及开裂压断时的工程参数,研究结果表明,裂纹扩展准确且清晰,裂纹的表面凹凸现象可见,扩展有限元模拟的结果与实际情况接近。

基于此,笔者基于扩展有限元方法,建立了二维双锚受拉模型分析双锚在受拉荷载作用下的最终破坏形态、极限承载力以及裂纹扩展情况,并通过对预埋槽进行双锚受拉试验,对比验证扩展有限元结果的准确性。研究表明,扩展有限元模拟出的双锚受拉破坏呈现出不同形式的锥体破坏,与试验结果相对应。

# 1 扩展有限元法

## 1.1 单位分解法

单位分解法<sup>[10-11]</sup>的基本思想是先通过分离单元的方式让每一个单元准确地靠近局部的函数,之后再进行整合单元,得出近似的整个单元的解,其方程表示为

$$\psi(x) = \sum_l N_l(x) \varphi(x). \quad (1)$$

其中, $\varphi(x)$ 为扩充函数;要满足单位分解的

条件,即  $\sum_l N_l(x) = 1$ 。

扩展有限元通常用不连续的富集函数来描述裂纹附近的位移场<sup>[12]</sup>,其表达式为

$$u^h(x) = \sum_{i \in l} N_i(x) u_i + \sum_{j \in J} \sum_{ih \in CH} N_j(x) H_j^{ih}(x) a_j^{ih}.$$

(2)

其中,  $N_l(x)$  为有限单元形函数;  $u_i$  为常规节点位移;  $N_j(x)$  为富集场的形函数;  $a_j^{ih}$  为附加自由度;  $H_j^{ih}$  为 Heaviside 阶跃函数,其主要描述位移场的不连续;  $J$  为裂缝贯穿中没有裂纹尖端的节点集。

1.2 水平集法

水平集法的原理是先把一个随时间变化的物质界面定义为一个等值的界面,再通过计算求解出等值界面的位置,进而确定物质界面的位置,完成对裂纹界面的追踪。水平集法的裂纹定义如图 1 所示。

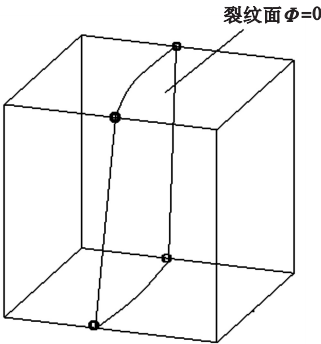


图 1 裂纹定义  
Fig. 1 Crack definition

当一个单元出现裂纹时,通过水平集函数可以表示被裂纹分割的单元。其中,裂纹面  $\gamma(t)$  可表示为

$$\gamma(t) = \{x \in R^2, \varphi(x, t) = 0\}.$$

(3)

裂纹面的运动方程可用  $\varphi(x, t)$  的演化方程来表示:

$$\varphi_i + F \parallel \nabla \varphi \parallel = 0.$$

(4)

其中,  $\varphi(x, t = 0)$  为定值。

2 扩展有限元数值模拟

2.1 模型建立

在 ABAQUS 平台应用最大主应力准

则<sup>[13]</sup>建立 1:1 比例的锚栓埋深不同的 M-70、M-100 两个二维混凝土裂纹扩展模型。混凝土模型长×高为 1 000 mm×400 mm,锚栓直径 12 mm,具体尺寸如图 2、图 3 所示。

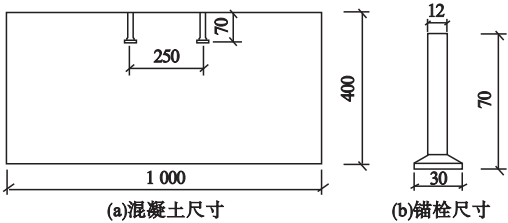


图 2 M-70 模型尺寸  
Fig. 2 The size of M-70 model

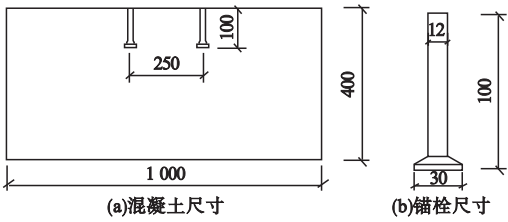


图 3 M-100 模型尺寸  
Fig. 3 The size of M-100 model

该二维模型锚栓设置有两种埋深,分别为 70 mm 和 100 mm,锚栓间距控制不变,其中混凝土设置为脆性材料,采用标准值。该模型中混凝土强度等级为 20 MPa,混凝土的弹性模量  $E = 2.0 \times 10^4$  MPa,选用 Damage Traction Separation Laws 模块中最合适扩展有限元模拟分析的 Maxps 损伤<sup>[14]</sup>,二维混凝土模型具体参数如表 1 所示。

表 1 二维材料参数表

Table 1 Two-dimensional material parameter table			
编号	$E/10^4$ MPa	立方体抗压强度标准值/MPa	泊松比
M-70	2.0	20	1/6
M-100	2.0	20	1/6

2.2 本构模型

二维混凝土模型的本构关系是查阅《混凝土结构设计规范》(GB50010—2010)<sup>[15]</sup>中相关内容,并计算得出。

单轴受拉应力-应变曲线计算公式:

$$\sigma = (1 - d_1) E_c \varepsilon.$$

(5)

$$d_t = \begin{cases} 1 - \rho_t(1.2 - 0.2x^5), & x \leq 1; \\ 1 - \frac{\rho_t}{\alpha_t(x-1)^{1.7} + x}, & x > 1. \end{cases} \quad (6)$$

$$x = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{t,r}}. \quad (7)$$

$$\rho_t = \frac{f_{t,r}}{E_c \varepsilon_{t,r}}. \quad (8)$$

式中: $\alpha_t$ 为混凝土单轴受拉的应力-应变曲线下降段参数值; $f_{t,r}$ 为单轴混凝土抗拉强度。为了消除混凝土由于材料不均匀产生的强度离散性,笔者取混凝土抗拉强度标准值; $\varepsilon_{t,r}$ 为混凝土峰值拉应变,相对应于单轴混凝土抗拉强度代表值; $d_t$ 为混凝土单轴受拉损伤演化参数。

2.3 网格划分

将二维混凝土网格设置为 12,锚栓网格设置为 2,如图 4 所示。

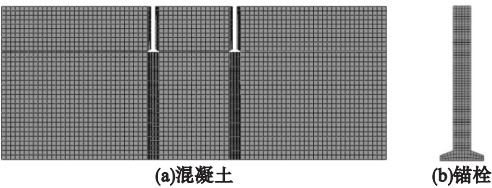


图 4 裂纹定义  
Fig. 4 Crack definition

2.4 荷载及边界条件

对两个锚栓加竖向为 10 mm 的位移荷载在锚栓顶端,将基材混凝土的三边采用铰接的形式进行约束,如图 5 所示。

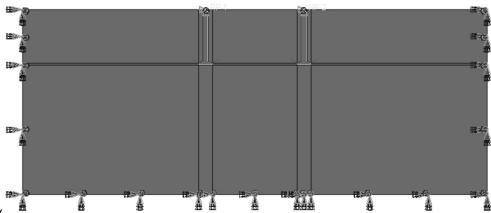


图 5 荷载及边界条件设置  
Fig. 5 Load and boundary condition settings

2.5 裂纹设定

笔者加入了新的设置裂纹的方法—虚拟节点法<sup>[16]</sup>,通过虚拟节点与真实节点相结合的方法,预制裂纹位置。该模型从锚栓底部

开始设置预制裂纹,设置两道初始裂纹,初始裂纹初始角度设为 35°,沿基材混凝土向上自动扩展,如图 6 所示。

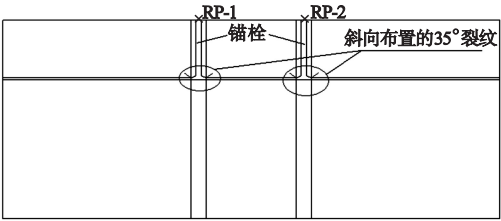


图 6 预制裂纹设置  
Fig. 6 Pre-crack settings

2.6 模拟结果

(1) M-70 最终模拟结果

M-70 模拟结果如图 7 所示。刚开始施加荷载时,锚栓底部的混凝土沿着 35°的方向开始向上扩展,以锚栓为中心的混凝土锥体开始产生拉力方向上的变形。当锥体破坏完成的时候,裂纹扩展停止,荷载逐渐减小,但是锚栓位移还有所增加,且增加迅速。最终双锚发生两个独立的混凝土锥体破坏,两个锚栓之间无相互影响,锚栓处的混凝土发生向上的微小凸起,极限承载力为 51.79 kN,裂纹扩展角度为 30°,极限荷载时锚栓位移为 1.32 mm。

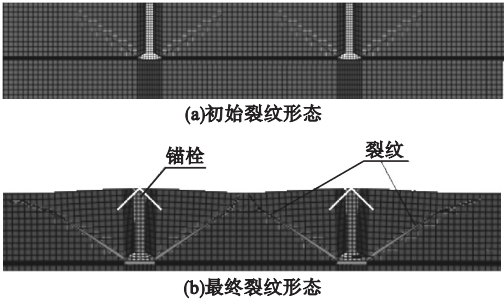


图 7 M-70 最终破坏形态  
Fig. 7 Final destruction form of M-70

裂纹从最预设的两道 35°方向裂纹开始扩展(见图 7(a)),施加位移荷载后,锚栓开始受拉并向上产生位移,裂纹开始扩展。其最终扩展图如图 7(b)所示,裂纹穿过单元网格,扩展到基材混凝土上表面,且裂纹没有发生相交,形成了两个倒锥形的裂纹。

(2)M-100 最终模拟结果

M-100 最终模拟结果如图 8 所示。该模型锚栓埋深设置为 100 mm,向上施加拉力荷载,通过锚栓与混凝土之间的粘结力产生的摩擦,通过摩擦力的方式把拉力传递到混凝土中。随着荷载的增加,锚栓不断向上移动,混凝土锥体破坏的投影面积越来越大,但由于间距较小,锚栓间距小于 3 倍的埋深,在两锚栓中间混凝土处发生裂纹的交汇,混凝土锥体发生重叠,两侧裂纹最终扩展至基材混凝土的表面,混凝土发生破坏。当锥体破坏完成的时候,裂纹扩展停止,荷载逐渐减小,但是锚栓位移继续增加。最终双锚发生联合锥体破坏,两个锚栓之间产生相互影响,极限承载力为 44.31 kN,裂纹扩展角度为 17°,达到极限承载力时锚栓位移为 1.13 mm。

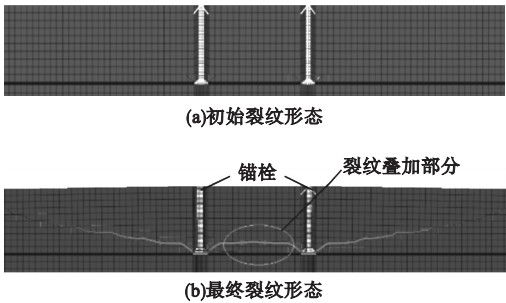


图 8 M-100 裂纹扩展

Fig. 8 Crack pattern of M-100

裂纹在完成预设的初始 35°方向段扩展后,裂纹开始自由扩展,中间部分发生裂纹的交汇,两端裂纹继续扩展。其最终扩展图如图 8(b)所示,形成了一个联合锥体的裂纹形状,两个锚栓下面的裂纹产生了相互影响。

3 试验研究

为了验证模型的准确性,对双锚进行受拉试验,双锚采用哈芬预埋槽的方式,该双锚锚栓设置有两种埋深,分别为 70 mm、100 mm。每个埋深制作 2 个试件,共计 4 个试件。本试验主要研究在受拉荷载作用下双锚的最终破坏形态、极限承载力以及裂纹扩展情况。

3.1 试验概况

本次试验选用商用混凝土,选用工字型混凝土试件,以便加载架的安装,其相关参数如图 9 所示。本次试验所用哈芬预埋槽都由工厂定制,本身是由不锈钢打造而成。哈芬预埋槽共由三部分组成。上部是 C 型预埋槽道,C 型槽道下部焊接了两根锚腿。其具体形式如图 10 所示,预埋槽相关参数见表 2 所示。

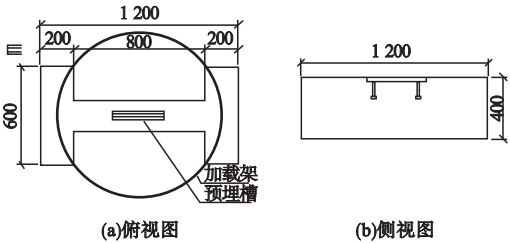


图 9 试件尺寸

Fig. 9 Specimen size

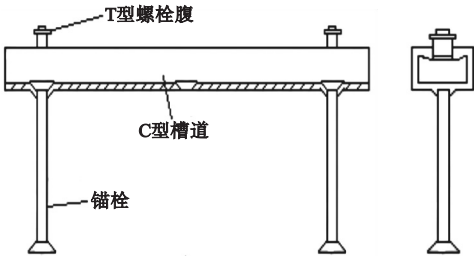


图 10 预埋槽示意图

Fig. 10 Schematic diagram of embedded tank

表 2 预埋槽相关参数

Table 2 Related parameters of embedded groove			
吊件名称	锚腿间距/mm	埋深/mm	锚栓直径/mm
PEC-1	250	70	12
PEC-2	250	100	12

笔者试验是研究双锚的最终破坏形态、极限承载力以及裂纹扩展情况,如出现锚栓本身的拔断、拔出、基材混凝土产生整体的贯通裂缝以及出现规范规定的破坏状态或者 DH—3818 静态应变仪采集的荷载—位移曲线发生急剧的下降,当出现上述的情况之一时,则判定试验结束,停止加载。加载装置示意图如图 11 所示。



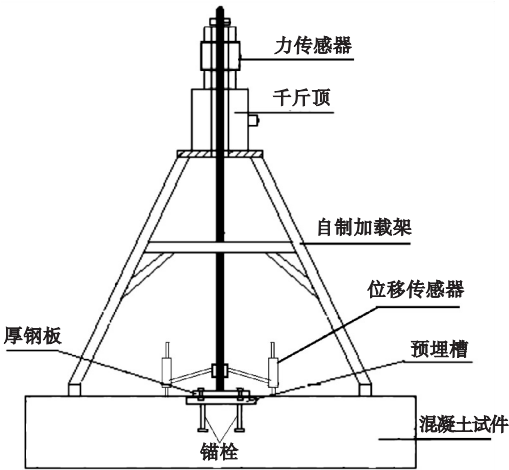


图 11 试验加载装置示意图

Fig. 11 Schematic diagram of test loading device

3.2 试验现象及结果

(1) 试件 M-70 双锚受拉破坏现象

小边距混凝土中有效埋置深度为70 mm, 双锚受拉的破坏现象如图 12 所示。在试验加载初期, 荷载逐渐开始增加, 混凝土尚未发生开裂, 位移增量微小, 构件处于弹性阶段。随着荷载的不断增加, 混凝土侧面从下面的两个锚栓底部出现较大裂纹并向斜上方发展逐渐扩展形成倒锥体的形状, 右侧锚栓形成倒锥体的裂纹比较清晰且迅速, 另一条则相对较为细小且缓慢, 位移增量相比较最开始有所提高。当荷载达到 58kN 时, 倒锥体形状的裂纹继续扩展直到混凝土表面形成两个独立的混凝土锥体破坏区域, 同时左侧锚栓下部裂纹不断扩展一直缓慢延伸至基材混凝土的最底部, 此时荷载不再增加, 判断锚栓达

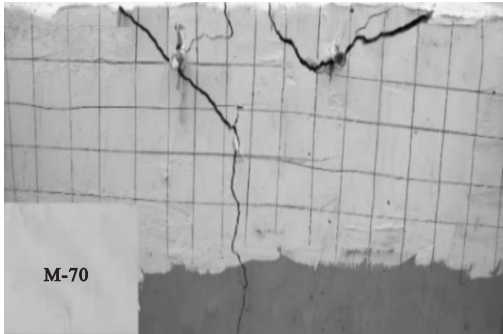


图 12 M-70 试件锥体破坏

Fig. 12 Cone destruction of M-70 specimen

到极限承载力, 开始发生失效。随后荷载开始减小, 但是位移在一定时间内迅速增大, 直到锚栓拔出基材混凝土。试验结果发现两个锚栓的锥体破坏区域完全独立, 没有产生相互影响, 锥面角度在 27°左右。

(2) 试件 M-100 双锚受拉破坏现象

在 100 mm 埋深的情况下, 试件 M-100 在受拉荷载的作用下, 两个锚栓联合锥体的破坏形态如图 13 所示。在受拉荷载的加载初始阶段, 混凝土尚未发生开裂, 位移只有微量变化, 试件处于弹性阶段。前期荷载持续增加, 在试件侧表面出现了微小裂纹; 随着荷载不断加载, 裂纹逐渐延伸变长并向两边斜向扩展形成了倒锥体形状的裂纹, 并向混凝土试件的上面与侧面交界处伸展, 位移也在持续增大。同时混凝土下侧还出现了较为细小的从锥形破坏的最底部开始起裂并向混凝土底面竖直向下延伸的破坏裂纹。当荷载达到 49 kN 时, 混凝土侧面的裂纹已经扩展至混凝土试件的上面与侧面交界处, 锥体破坏区域最大, 混凝土发生破坏, 混凝土上表面两侧出现裂纹, 且两个锚栓中间部分的裂纹出现相交现象, 下面的竖直裂纹也扩展到混凝土最低面, 形成贯通, 破坏达到最大程度, 此时荷载不再增加, 已经达到极限承载力, 开始失效。继续加力, 荷载开始减小, 但是位移突然迅速增大, 直到下部锚栓与周围的基材混凝土一起拔出。试验结果发现两个锚栓的混凝土锥体破坏区域发生重叠, 产生相互影响, 锥面角度在 30°左右。

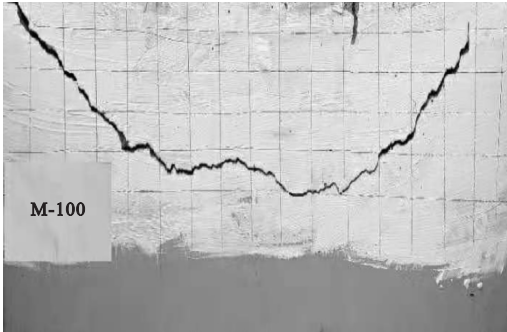


图 13 M-100 试件锥体破坏

Fig. 13 Cone destruction of M-100 specimen

3.3 模拟结果与试验结果对比分析

为了验证扩展有限元模拟结果的准确性,现将双锚承载力的模拟结果与试验结果进行对比,如表3所示,荷载位移曲线对比如图14、图15所示,破坏形态对比如图16、图17所示。

表3 双锚承载力的模拟值与试验值对比

Table 3 Simulated and test results comparison of double anchor bearing capacity

试件编号	承载力模拟 值/kN	承载力试验 值/kN	相对误差/%
M-70	51.79	58.10	10.86
M-100	44.31	49.14	9.82

注:相对误差 =  $\frac{\text{试验值} - \text{模拟值}}{\text{试验值}} \times 100\%$ 。

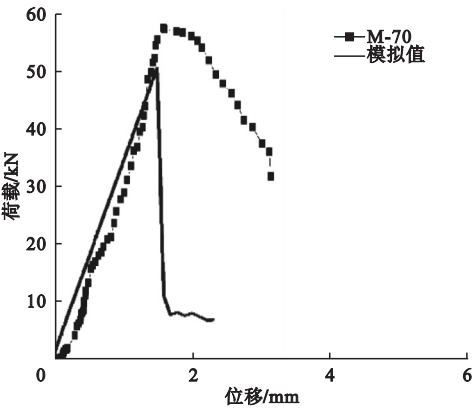


图14 M-70 荷载 - 位移曲线对比

Fig. 14 The load-displacement curve of M-70

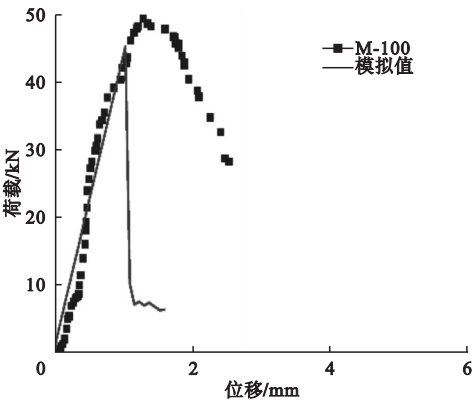


图15 M-100 荷载 - 位移曲线对比

Fig. 15 The load-displacement curve of M100

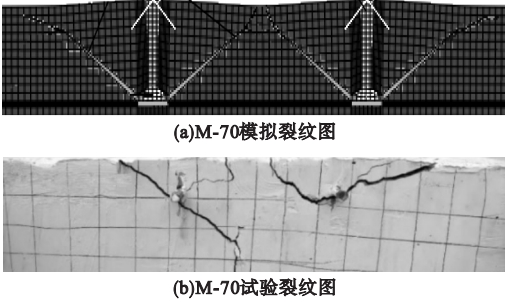


图16 M-70 破坏形态对比

Fig. 16 The destruction form comparison of M-70

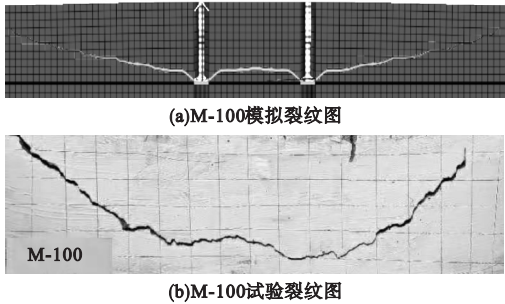


图17 M-100 破坏形态对比

Fig. 17 The destruction form comparison of M-100

把扩展有限元模拟结果与试验结果进行对比可以看出:①模拟值与试验值的相对误差保持在16%以内,因此,应用扩展有限元方法可以有效且准确地模拟双锚受拉的情况;②扩展有限元方法对双锚最终破坏结果的模拟与试验结果较为吻合,荷载 - 位移曲线初始阶段处于弹性阶段,直线保持上升状态,荷载位移一直保持线性关系,并在到达极限承载力后迅速下降,弹性阶段结束。当达到屈服强度后,锚栓承载力下降,但是锚栓的位移仍在不断增加,一直到达模拟设定值后才会停止。

4 结 论

(1)在 ABAQUS 有限元分析平台上建立扩展有限元模型来模拟双锚受拉的研究表明,当锚栓间距大于3倍埋深,即 $s > 3h$ 时,双锚的最终破坏形态为锚栓单独的锥体破坏,锚栓之间无相互影响;当锚栓间距小于3倍埋深,即 $s < 3h$ 时,双锚的最终破坏形态为

联合锥体破坏,混凝土锥体破坏区域相互叠加,锚栓之间存在相互影响。

(2)完成了两种埋深、4个试件的双锚受拉的试验,试验结果表明: $s > 3h$ 的2个试件发生了锚栓无相互影响的单独锥体破坏, $s < 3h$ 的2个试件发生了存在相互影响的联合锥体破坏,说明扩展有限元模拟结果与试验结果较为一致。

(3)扩展有限元方法可以准确地模拟双锚的受拉破坏形态,为双锚受拉计算模拟以及相关试验提供参考。

## 参考文献

- [1] 何勇,徐远杰,林涛.混凝土结构的双筋粘结锚固性能试验研究[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(2):89-91.  
(HE Yong, XU Yuanjie, LIN Tao. Experimental study on performance double adhesive anchors for strengthening concrete structure [J]. Engineering journal of Wuhan university (engineering edition), 2003, 36(2): 89-91.)
- [2] 周萌.混凝土结构化学锚栓群锚抗拉性能研究[J].土木工程与管理学报,2017,34(3):91-96.  
(ZHOU Meng. Study on the tensile properties of bonded-metal-anchor group for post-installed fastenings in concrete structures [J]. Journal of civil engineering and management, 2017, 34(3): 91-96.)
- [3] SAWAMOTO Y, TSUBOTA H, KASAI Y. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method [J]. Nuclear engineering & design, 1998, 179: 157-177.
- [4] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. The astronomical journal, 1977, 8: 1013-1024.
- [5] 赵雪薇,尹大刚.基于扩展有限元法的平板裂纹研究[J].价值工程,2020(5):273-274.  
(ZHAO Xuewei, YIN Dagang. Study on plate crack based on extended finite element method [J]. Value engineering, 2020(5): 273-274.)
- [6] DUARTE C A, ODEN J T. An h-p adaptive method using clouds [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996(139): 237-262.
- [7] 李录贤,王铁军.扩展有限元(XFEM)及其应用[J].力学进展,2005,35(1):5-20.  
(LI Luxian, WANG Tiejun. Extended finite element (XFEM) and its application [J]. Advances in mechanics, 2005, 35(1): 5-20.)
- [8] 方修君,金峰,王进廷.用扩展有限元方法模拟混凝土的复合型开裂过程[J].工程力学,2007,24(增刊1):46-52.  
(FANG Xiujun, JIN Feng, WANG Jinting. Simulation of mixed-mode fracture of concrete using extended finite element method [J]. Engineering mechanics, 2007, 24(S1): 46-52.)
- [9] 龚迪光,曲占庆,李建雄,等.基于ABAQUS平台的水力裂缝扩展有限元模拟研究[J].岩土力学,2016,37(5):1512-1520.  
(GONG Diguang, QU Zhanqing, LI Jianxiong, et al. Extended finite element simulation of hydraulic fracture based on ABAQUS platform [J]. Rock and soil mechanics, 2016, 37(5): 1512-1520.)
- [10] SUKUMAR N, PREVOST J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method. part I: computer implementation [J]. International journal of solids and structures, 2003, 40(26): 7513-7537.
- [11] MELENK J M. The partition of unity finite element method: basic theory and application [J]. Computer methods in applied mechanics and engineering, 1996(139): 289-314.
- [12] BAIETTO M C, PIERRES E, GRAVOUIL A, et al. Fretting fatigue crack growth simulation based on a combined experimental and XFEM strategy [J]. International journal of fatigue, 2013, 47: 31-43.
- [13] 张皓,曹光伟,李宏男,等.基于ABAQUS纤维梁的钢筋混凝土材料模型二次开发[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2018,34(4):645-654.  
(ZHANG Hao, CAO Guangwei, LI Hongnan, et al. Secondary development on constitutive model of concrete and steel for beam element in ABAQUS [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2018, 34(4): 645-654.)
- [14] SUKUMAR N, PREVOST J H. Modeling quasi-static crack growth with the extended finite element method. part 1: computer implementation [J]. International journal of solids and structures, 2003, 40(26): 7513-7537.
- [15] 中华人民共和国住房和城乡建设部.混凝土结构设计规范:GB50010—2010[S].北京:中国建筑工业出版社,2010.  
(Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of concrete structures: GB50010—2010 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2010.)
- [16] MAREK W. Influence of headed anchor group layout on concrete failure in tension [J]. Procedia engineering, 2017, 193: 242-249.  
(责任编辑:刘春光 英文审校:范丽婷)