

钢筋混凝土构件有限元弹塑性分析(Ⅲ)

剪力墙数值模拟分析

陈 忠 汉

(土木工程系)

摘 要

通过计算机执行的数值分析模拟构件实际受力全过程反应,结合少量实测资料对不同参变量作系统分析,是改进复杂结构设计理论的有效方法。高层建筑中,带边框开洞剪力墙的设计是尚未妥善解决的课题。本文采用非线性分析方法,把作者在前文^[1]提出的裂缝开展随机数学模型扩充用于此类复杂结构的数值分析中,并对各种情况进行系列分析。

一、前 言

高层结构工程抗震性能的研究,是20世纪初开始的。震害现象直接提供了各类构件的实际破坏形态,但限于理论分析和测试技术的水平,直至50年代末此项研究才得以较快地开展。

随着试验研究的深入,设计理论的不完善,国际上美、日先后取消了对地震区建筑物层数及总高的限制。同期内我国的有关设计和研究也取得了较大进展,我国的高层建筑以钢筋混凝土结构为主,结构体系又以框架—剪力墙结构为多见。

框剪体系中的剪力墙是体系的主要抗侧力构件。剪力墙从结构功能上要求连续、均匀,要求整体性好,少开洞,但从使用功能出发又需要在适用的位置上开洞以沟通空间,这是高层结构的方案设计中常见的突出矛盾之一。因此,剪力墙内开洞在大多数情况下是难以避免的,开洞剪力墙受力性能研究无疑是一个重要的课题。国内外学者对开洞剪力墙在弹性状态下的受力变形特性作了较多的研究^[2],借助于有限元分析和光弹试验,给出了一般解析法无法求解的内部应力应变状态等。近年来,缩尺模型试验和考虑材料非线性的数值分析法的研究^[3-5]也有较大进展。但是,对于钢筋混凝土构件非线性能中的特殊现象——砼在低应力状态下的开裂及其裂缝开展形式仍未得到妥善处理,砼的开裂直接影响构件各部分的应力应变分布,直接影响构件的破坏型式。这一问题不解决,要通过数值分析来讨论构件的受力破坏机理将是十分困难的。

本文1987年3月13日收到。

本文在考虑钢筋和砼各自的材料非线性的同时,着重应用文[1]由作者建立的裂缝开展的数学模型解决钢筋砼构件的这一特殊现象,编制了比前文适用范围更广的分析程序,与实测试件相比,在承载力-变形关系和最后构件破坏形态(包括开裂形式)都相当一致。在此基础上,本文对开洞剪力墙中的主要参变量——洞口的大小和形状作了系统分析,得到颇有规律的结果,并对现有计算方法提出修改建议。

二、数值分析原理

无论是只考虑弹性情况的数值分析,还是考虑材料非线性的分析,其基本原理是一致的。简单地说,就是把假定连续的介质分成有限个单体,这些单体只在结点处相关,单体内部的情况可由结点状态来决定。这样只要建立有限个结点之间的力-变形关系,即可由外力求解位移,反之亦然。用公式表达,即为

$$\{\delta\} = [K]^{-1} \{P\} \quad (1)$$

$$\{\epsilon\} = [B] \{\delta\}^e \quad (2)$$

$$\{\sigma\} = [D][B] \{\delta\}^e = [D] \{\epsilon\} \quad (3)$$

对于理想的各向同性材料,这一方法可以得到相当精确的解(在足够的单元数量情况下),而对于弹性材料可以直接求得最后解。对于非线性材料只要给出合适的刚度变化模式(随应力或应变而变化),分步调整求解,问题亦不致于很复杂。但是对于钢筋砼构件,既非弹性材料,又非均质材料,再加上砼极低的抗拉能力和开裂方向的随机性,致使在改善数值分析方法上还有许多工作要做。有关材料非线性的数值处理方法已在文[6]介绍,以下主要描述砼开裂状态的数值处理方法,讨论砼开裂的随机因素,提出具体的开裂模拟方法。

1. 砼开裂的数值处理方法

砼的抗拉强度通常只有其抗压强度的 1/10 左右,对于要求延性破坏的钢筋砼构件,其开裂荷载比极限强度小得多。因此充分利用材料强度的构件必然是带裂缝工作的,现行的基于极限状态的设计理论更不能忽略开裂的影响(包括开裂方式对构件破坏机理的影响)。

数值分析中用调整单元刚度分项值来反映单元开裂后抗力的变化:当单元在与主拉应力垂直方向开裂后,设定单元在主拉应力方向的弹性模量为零,而平行于开裂方向(主压应力方向)的弹性模量不变,并保留剪切项。

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E_2 & 0 \\ 0 & 0 & \beta G \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (4)$$

如考虑双轴应力状态的影响,则有

$$\begin{Bmatrix} d\sigma_1 \\ d\sigma_2 \\ d\tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & E'_{2b} & 0 \\ 0 & 0 & 0.1E_0(1 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon_p}) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\epsilon_1 \\ d\epsilon_2 \\ d\gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

式中

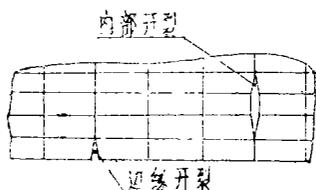
$$E'_{2b} = E_0 \left[1 - \frac{\epsilon_2}{\epsilon_{2c}} \right]^2 \left/ \left[1 + \left(\frac{E_0}{E_2} - 2 \right) \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_{2c}} \right) + \left(\frac{\epsilon_2}{\epsilon_{2c}} \right)^2 \right]^2 \right.$$

由于弹性模量变化后，单元的抗力产生变化。在荷载不变情况下，这部分差值应力将由开裂单元的临近区域承受。具体地，把开裂引起的差值应力 $\Delta\sigma_1, \Delta\sigma_2$ 转换为附加单元节点力，在计算中重新形成新的平衡状态。这实际上反映了局部单元开裂后构件内部实现应力重分布的物理过程：

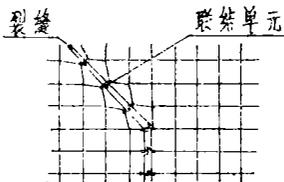
$$\Delta\sigma_{i_{cr}} = \sigma_i - \sigma_{i_{cr}} \tag{6}$$

$$\begin{aligned} \{ \Delta F \}^e &= [K] \{ \delta \}^e [B]^T [D] [B] \cdot t \cdot \Delta \cdot \{ \delta \}^e \\ &= [B]^T \{ \Delta \sigma \}_{cr} \cdot t \cdot \Delta \end{aligned} \tag{7}$$

这种分布裂缝 (Smearred cracks) 模式，其开裂方向完全受主拉应力方向控制，不受单元形状和相邻单元边界的限制。另一类是离散裂缝 (Discrete cracks) 模式，假定砼开裂是沿着单元边界发展的，因此裂缝形式是条状的，还可通过开裂边界的间距得出裂缝宽度和长度。这类模式中有代表性的是 Ngo 等^[7] 提出的预定裂缝分析方法 (图 1) 和 Nilson、野口博等提出的改变分割的分析方法 (图 2)。

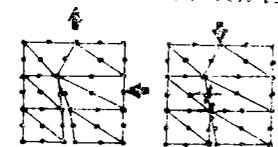
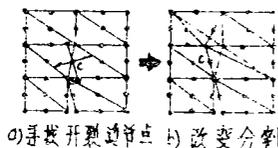


(a) Nilson 模型



(b) Ngo, Scordelis, Franklin 模型

图 1 预定裂缝单元示意图



(c) 下一级单元 (d) 开裂角点

图 2 改变分割的野口模型

前者用预先设定的裂缝位置和方向不同的构件对比分析，比较同一荷载形式下不同开裂形态的构件应力状态，探讨不同裂缝对构件内力的影响程度。

这种分析方法预先人为规定裂缝位置和走向，在预定裂缝处用联结单元传递内力，虽然可以较具体地考虑缝间的受力变形特性，但是无法反映裂缝位置，间距以及方向上随机变化的特点，不适于构件性能的全过程分析。

改变分割的分析方法，克服了由于人为假定裂缝形式而带来的附加约束，由实际分析中的平均应力来确定裂缝的位置和方向。当相邻单元的平均拉应力超过砼抗拉强度时，即按主

拉应力方向调整其共同边界(见图2a、b)并相应调整有关邻近单元,亦即改变分割,此时这一共同边界为开裂边界,并把开裂释放荷载施加到相应结点(见图2c)。这种方法部分反映了开裂过程内应力不断重分布的现象,但仍假定裂缝与主拉应力垂直,而且分析过程中需不断调整单元数量和结点位置,计算十分复杂。

2. 砼开裂方向的随机性

上述砼开裂的数值处理方法中均未反映裂缝位置、方向的随机性。第一类方法预定的裂缝通常呈二线型,与实际情况相差较大,第二类方法虽可计入相邻区域开裂引起的内力重分布对主应力方向的影响,但亦无法反映实际构件中裂缝并不完全垂直于分析主拉应力方向的现象。

砼开裂的位置和方向的随机性是由许多因素引起的。粗骨料相对位置的随机性是一个主要因素。一般认为,在各类初始微裂缝中,发展较快而最后贯通形成宏观裂缝的是砂浆凝胶体和粗骨料表面之间的界面裂缝(亦称粘结裂缝),鉴于粗骨料的抗拉强度远大于界面的粘结拉力,裂缝极少穿过骨料开展。实际混凝土制品中粗骨料的大小、形状差别很大,一般粗骨料的大小足以引起裂缝方向的变化,因此粗骨料之间的相对位置直接决定了裂缝开展的随机性。

材料强度的随机性是另一个重要因素。由水泥、砂浆和粗骨料加水拌合而成的砼构件,其制作、浇制过程中质量的不均匀是难以避免的,尤其是砂浆与骨料的粘结强度同时受两者质量的影响;另外,钢筋与砼之间粘结力蜕化的不均匀也是砼开裂位置和方向随机性的起因之一;还有,砼终凝前的泌水沉陷和硬化收缩都使砼材料的不均匀性更为明显。

综上所述,砼构件开裂的随机性是由众多因素引起的。目前要求定量给出各影响因素的作用方式尚属困难。这种情况下,用随机序列分析方法建立有关数学模型^[1],综合考虑各因素的影响应是有效的方法。

剪力墙结构的砼开裂可能先在墙板内开展(剪力影响较大时),也可能首先在边界构件处开裂(弯矩作用明显时)。而且,裂缝通常同时向二端开展,比受弯梁开裂始于梁底并朝一个方向开展的情况更为复杂。这主要表现在以下的开裂条件的判别方法中。

3. 开裂判别方法

在一般的有限元分析中,单元的开裂是成片的,不仅在单元内成片,在整个构件分析结果来看也是成片的,只能求出开裂区域,与实际试验不符,若不引入适当的约束条件,在数值分析中,在一个荷载增量中将使一个区域范围内的单元都超过砼的抗拉强度,都达到开裂状态。然而,实际开裂的发展并非如此,开裂首先在相对薄弱处发生,同时引起附近受拉砼的应力(或应变)的释放。若不考虑配筋影响,根据圣维南原理可知^[6],在与裂缝长度相当的邻近区域内应力是相当低的。配筋可以跨过裂缝传递内力,但这是通过粘结应力逐步传递的,因此必然存在一个裂缝间的最小间距。

另一个由试验反映的现象是裂缝的连续性,这是由于缝端应力集中引起的。由材料科学的分析可知,若不存在缝端应力集中的影响,材料的抗拉强度将提高二个数量级。因此,在同一拉应力区域内,缝端具有优先发展的条件。

考虑上述情况,本文结合文[1]的裂缝模型,提出以下二级判别的方法。

(1) 初级判别:

初级判别包含二项内容：一项为初裂判别，即构件内某单元的初次开裂（指非续裂情况）需受裂缝间最小间距的条件制约，对于素砼区域由 St·Venant 原理控制，即可求出“允许初裂区域”（图 3），在这一区域内的单元已通过初级判别。具体地，要求 $d \geq l_{cr}$ ， l_{cr} 为某缝两端的间距，由解析法可知：

$$d = 2 * S_1 / l_{cr} \tag{8}$$

式中

$$S_1 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} x_1 - x_3 & y_1 - y_3 \\ x_2 - x_3 & y_2 - y_3 \end{vmatrix}$$

$$l_{cr} = [(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2]^{1/2}$$

上式中 (x_i, y_i) 分别为缝端坐标及考察点坐标（图 3）。

对于配筋砼，可根据钢筋与砼之间粘结力传递的递增过程来确定 d ，即 $d \geq a_{min}^{[8]}$ ：

$$a_{min} = f'_t d_b / 4 \sigma_{to} \mu_e \tag{9}$$

式中， f'_t 为砼抗拉强度； d_b 为配筋直径； σ_{to} 为平均粘结应力； μ_e 为等效配筋率。

另一项为续裂判别，鉴于缝端的集中应力效应，裂缝指向到达的单元与区间将首先开裂，如图 3 所示，可由缝端坐标给出允许续裂区域。只要通过上述二项判别之一，即可进入二级判别。

(2) 二级判别：

通过初级判别只表明该单元的开裂条件优于其它单元，然而是否开裂还要通过指定方向的应力值判别才能确定。指定方向是由模拟裂缝开展的随机数学模型给出的，它具体体现了构件开裂方向与理论主拉应力方向的随机偏差。由模型给出方向偏差量 θ_i 后，即可利用转轴公式求出指定方向的应力值 σ_n ， σ_t 及 $\tau_{\xi\eta}$ （图 4），亦即

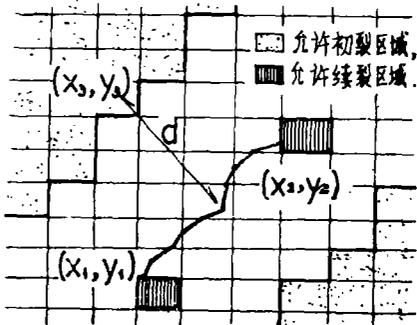


图 3 开裂初级判别示意图

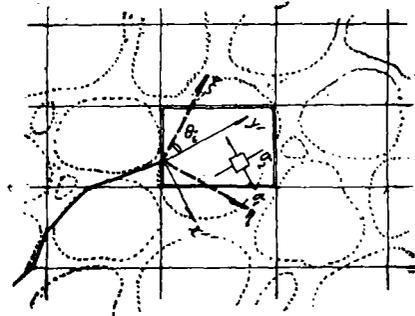


图 4 开裂二级判别示意图

$$\begin{pmatrix} \sigma_n \\ \sigma_t \\ \tau_{\xi\eta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta_i & \sin^2 \theta_i \\ \sin^2 \theta_i & \cos^2 \theta_i \\ \sin \theta_i \cos \theta_i & -\sin \theta_i \cos \theta_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{pmatrix} \tag{10}$$

若不计正应力 σ_t 的影响，则判别式为

$$\sigma_n \geq \sqrt{[1 - (\tau/\tau_0)^2]} (f'_t)^2 \quad (11)$$

如果上式成立, 则为通过二级判别, 该单元与区间接开裂处理。

由于二级判别比较复杂, 为尽量减少判别工作量, 在实际计算中先进行一般的主拉应力判别, 排除主拉应力小于砼抗拉强度的单元。第二步再作缝端位置判别, 即初级判别, 如果通过应力初判别的 i 单元坐标 (x_i, y_i) 分别属于允许初裂区域坐标域, 或者允许续裂区域坐标域, 即

$$x_i \in \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_M \end{Bmatrix}, \text{ 同时 } y_i \in \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_M \end{Bmatrix} \quad (12)$$

便可进行二级判别的定向应力判别(图 5), 对于初裂单元可跳过定向应力判别, 而按主应力方向取初值。开裂多级判别子程序框图如图 5 所示。

关于钢筋, 砼材料的非线性性能, 二轴应力的影响, 裂缝间残余应力的处理已在文(6)说明, 此处不再赘述。

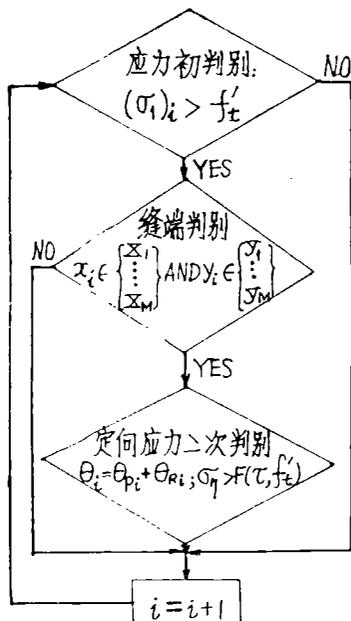


图 5 开裂多级判别子程序框图

三、剪力墙构件实例分析

根据上述原理, 作者编制了适于剪力墙构件非线性全过程数值分析程序, 并对照实测的带框剪力墙资料^[9]作了实例分析。

试件为一带框剪力墙的缩尺模型, 试件的外型尺寸以及配筋情况(图 6)。

试件砼强度为 27.46 MPa, 钢筋屈服强度($\phi 10$)为 355.98 MPa。试验中柱顶各施加 40kN 轴向力(两柱共计 80kN), 然后在上部横梁施加横向水平力 P , 直至破坏。

应用本文数值分析程序对此实例进行分析, 计算结果整理后于图 7、8, 与相应的实测结果相比, 吻合程度可称满意。图 7 所示的荷载-位移曲线表明, 分析和试验结果是接近的, 分析的初始刚度较大, 并且所得的最大承载力偏小(为实测的 96% 左右)。图 8 所示的构

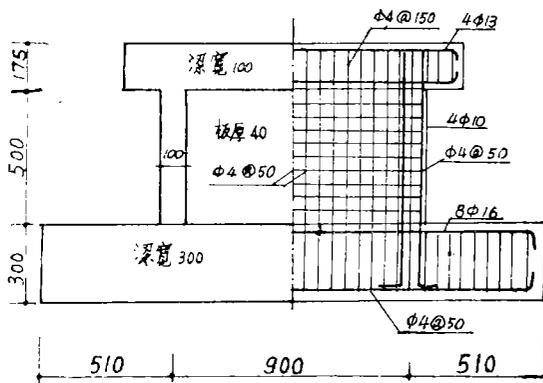


图 6 实例分析构件及配筋

件开裂形式，两者比较十分相似，裂缝的间距尤其是走向和实测的符合相当好，左侧柱端开裂的方向沿柱高的变化几乎与试验值同步，但尚未反映裂缝分叉的现象和压碎区域连片的情况，这是今后需进一步分析解决的。裂缝图式较好的一致性表明裂缝随机模型在剪力墙中的推广应用是可行的，为利用计算机的数值分析模拟构件实际试验情况的模拟系统的建立，提供了一个有效简便的途径。

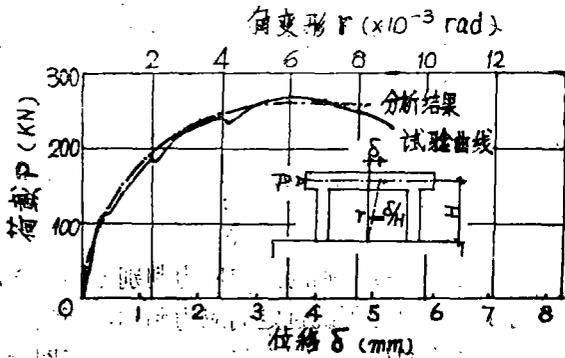


图7 试件荷载位移曲线比较

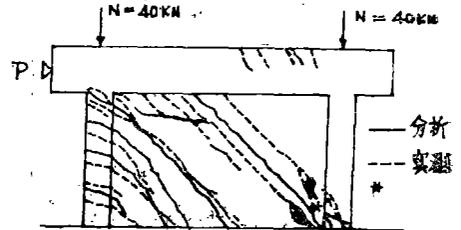


图8 实测与分析构件破坏形式

开洞带框剪力墙的强度计算与破坏机理，仍是目前正待查明的问题。这类结构的强度与洞口尺寸（包括形状与大小）、洞口位置、荷载形式和材料强度等有关。本文通过数值计算分析洞口变化对强度的影响，试件外形尺寸为400×660（cm），四周均设边框构件（截面尺寸为50×50 cm），板厚20 cm，板内配筋率为0.25%，边框梁、柱配筋率为0.8%（箍筋φ8全长加密），砼强度为24.5MP_a，主筋强度为333.4MP_a。分析试件共18个，洞口尺寸系列为 $h_b/h_0 = 0.071, 0.1428, 0.4285, 0.7143$ 及 $l_b/l_0 = 0.167, 0.333, 0.667, 1.00$ ，洞口位置均中心对称，边框柱施加竖向荷载180kN，水平荷载施加于上部横梁。部分分析试件的开裂形式如图9所示。

若以洞口尺寸与相应墙板尺寸的比值 h_a/h_0 以及 l_a/l_0 为纵坐标和横坐标，再以构件最大承载力与无洞口剪力墙承载力的比值 P/P_0 画出等强度线，则可对洞口的强度影响有一直观的比较，如图10所示。

目前设计中通常采用的开洞剪力墙强度值的建议公式^[10]为

$$KQ \leq r(Q_q + \Sigma Q_z)$$

$$r = \left\{ \begin{array}{l} r_1 = 1 - l_a/l_0 \\ r_2 = 1 - \sqrt{\frac{l_a h_a}{l_0 h_0}} \end{array} \right\}_{\min} \quad (13)$$

并且只适用于 $l_a h_a \leq 0.16 h_0 l_0$ 的情况，对于大于 $0.16 h_0 l_0$ 的情况并无合适的计算公式。但在建筑布置中要求超出这一限制的情况是不少的。即使是在符合这一限制的范围内，公式给出的强度与分析结果并不一致：在 $\sqrt{A_d A_0} < 0.1$ 的情况下尤为明显（图11），在 $\sqrt{A_d A_0} = 0.2$ 时（图12），虽在 $l_a/l_0 > 0.2$ 时，可由 r_1 控制得到偏于安全的计算值，但当 $l_a/l_0 < 0.2$

时, 计算公式中 r_1 、 r_2 均给出小于分析值的结果, 似不安全。

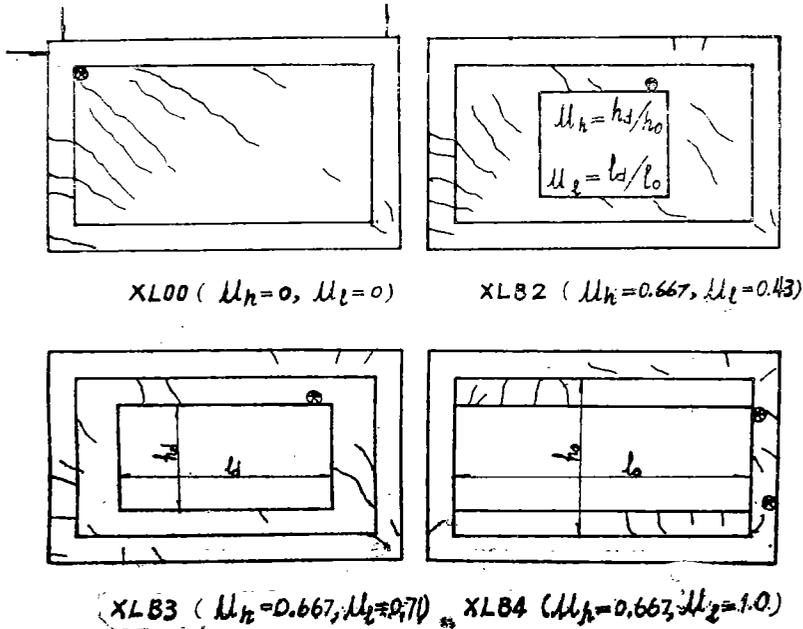


图 9 分析试件开裂破坏形式 (*为混凝土压碎区)

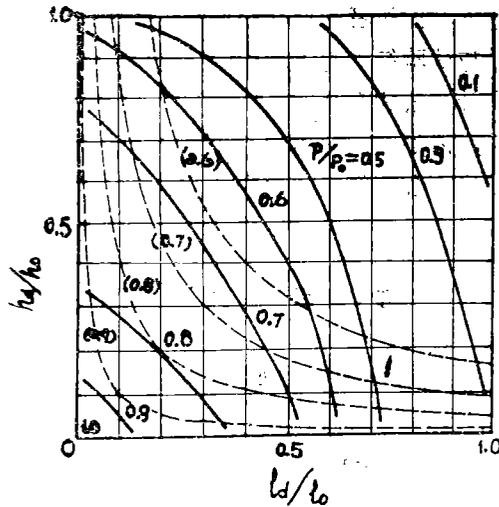


图 10 开洞率对强度的影响

由 P_0/P_0 与 l_d/l_0 及 h_d/h_0 的关系 (图11、12) 可知, 开洞剪力墙 的强度在 $\sqrt{A_d/A_0}$ 为常量时并非定值, 在洞口接近正方形时强度最大, 偏高与偏长洞口的剪力墙强度都要降

低。原公式只控制 l_d/l_0 长度方向对强度的影响，而图11表明 h_d/h_0 存在同样影响，因此建议用以下公式代替原式中 r_2 ，可得较为安全计算值

$$r_3 = 1 - h_d/h_0 \quad (14)$$

上述分析结果是在中心对称洞口情况得出的，对于偏置洞口情况更为复杂，本文未及探讨，但要更合理解决这一问题宜从构件破坏机理出发，这是需要继续探讨的课题。

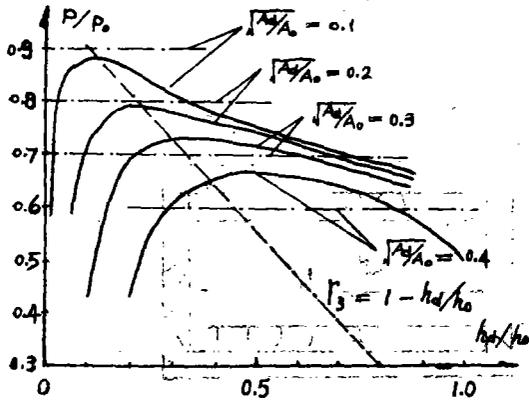


图 11 $p/p_0-h_d/h_0$ 关系图

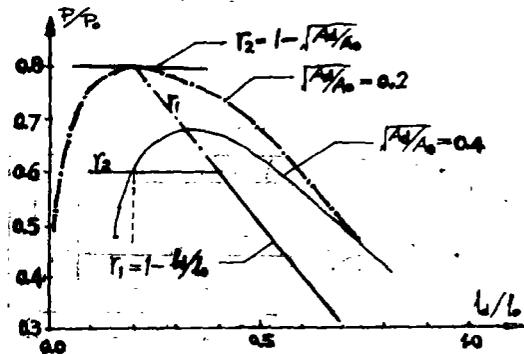


图 12 $p/p_0-l_d/l_0$ 关系图

四、结 束 语

本文采用非线性分析方法，把作者在前文提出的裂缝开展随机数学模型扩充，用于开洞剪力墙结构的数值分析中，与试验结果比较说明这一方法是有效可行的。对分析试件的数值分析结果讨论表明，现有计算公式在某些范围内可能偏于不安全，并提出修改建议。同时指出进一步分析仍是需要的，诸如开洞偏离中心，多个开洞等情况亦需结合试验继续予以查明，以求从破坏机理出发，建立合理简便的统一计算公式。

参 考 文 献

- 〔1〕陈忠汉，钢筋混凝土构件有限元弹塑性分析(Ⅱ)——构件裂缝的随机性分析，华侨大学学报(自然科学版)，2(1987)。
- 〔2〕中国建筑科学研究院结构所，高层建筑结构设计，科学出版社，(1983)。
- 〔3〕瞿伟廉，钢筋混凝土墙板非线性分析，土木工程学报，2(1983)。
- 〔4〕野口博，有限要素法によるコンクリート非線形解析，日本建筑学会论文报告集，260(1977)。
- 〔5〕Thomas T.C.Hsu and Y.L.Mo, Softening of Concrete in Low-Rise Shearwalls, ACI Journal, No.6 Proceedings V.82, NOV/DEC., (1985), 883-889.
- 〔6〕陈忠汉，钢筋混凝土构件有限元弹性分析(Ⅰ)——钢筋混凝土柱的非线性分析，华侨大学学报(自然科学版)，3(1986)。

- [7] 野口博, 井上范夫, 用有限元法分析钢筋混凝土结构抗剪的方法, 钢筋混凝土结构抗剪分析学术会议报告论文集, (1982).
- [8] Perk, R. and Paulay, T. , Reinforced Concrete Structures, John Wiley & Sons, New York, (1975), 769.
- [9] 吉田俊夫, 寺田謙一, 鉄筋エンケリ——ト造可撓耐震壁江关ちる实验的研究, 日本建筑学会大会学术讲演梗概集, 9(1980).
- [10] 工业与民用建筑抗震设计手册编写组, 抗震设计手册, 中国建筑科学研究院抗震所, 12(1981).

Finite Element Elasto-Plastic Analysis of Reinforced Concrete Members (III) Numerical Simulated Analysis of Shear Walls

Chen Zhonghan

Abstract

For improving the complicated structural design theory, an effective way is to simulate the whole course response to practical bearing stress by computerized numerical analysis, and to analyse different parameters and variables of the member in the light of a few measured data.

In high-rise buildings, the design of shear wall with boundary frames and openings remains to be an unsettled task. In view of this, a nonlinear analysis method is adopted here to extend the stochastic model of cracking development which proposed by the author in paper(1) to the numerical analysis of such kinds of complicated structures, and then a series of analysis are made here with respect to various behaviours.