

结合砼的软化理论进行钢筋砼 低剪力墙的全过程分析*

程远兵

(河南南召县建筑管理局设计室)

摘 要: 借助于砼的软化理论, 根据平衡条件和变形协调条件, 本文利用桁架模型理论提出了低剪力墙的受力和变形性能的全过程分析方法, 编制了电算框图。理论分析和试验结果进行了对比, 两者的符合较好。

关键词: 砼的软化, 桁架模型理论, 剪力墙。

中国图书分类号: TU31

剪力墙和框架—剪力墙结构, 能够较好地控制变形、吸收和耗散地震能量, 因而成为目前高层建筑采用的主要结构形式。随着国民经济的发展和建筑形式的多样化, 一些中低层建筑也采用了剪力墙结构, 还有些高层建筑仅在底层设置剪力墙。在上述两种情况下, 剪力墙的高宽比一般都小于 1 即形成低剪力墙。目前, 国内外对高剪力墙的研究较多, 而对低剪力墙的研究还很少。低剪力墙以剪切变形为主, 至今还没有令人满意的方法来分析这种剪力墙的性能。80 年代初提出的砼软化理论同桁架模型理论相结合, 已成功地用于分析受剪力或扭转为主要的结构或构件中, 并展示了广阔的发展前景。为了给低剪力墙的结构设计提供可靠的依据, 本文拟结合砼的软化理论对钢筋砼低剪力墙进行全过程分析研究。

1 桁架模型理论

承受剪力作用的低剪力墙, 在产生斜裂缝之后, 可以把低剪力墙比拟成一平面桁架来承受外部荷载。斜裂缝间的砼作为斜压杆, 斜压杆和竖向、水平向的钢筋形成桁架的腹杆和弦杆, 这就是桁架模型理论。

1.1 分析模型

根据桁架模型理论, 建立钢筋砼低剪力墙在荷载作用下的全过程分析模型如图 1, 并做如下假设:

(1) 开裂后的砼只承受压力而不承受拉力;

* 收稿日期: 1992-02-26

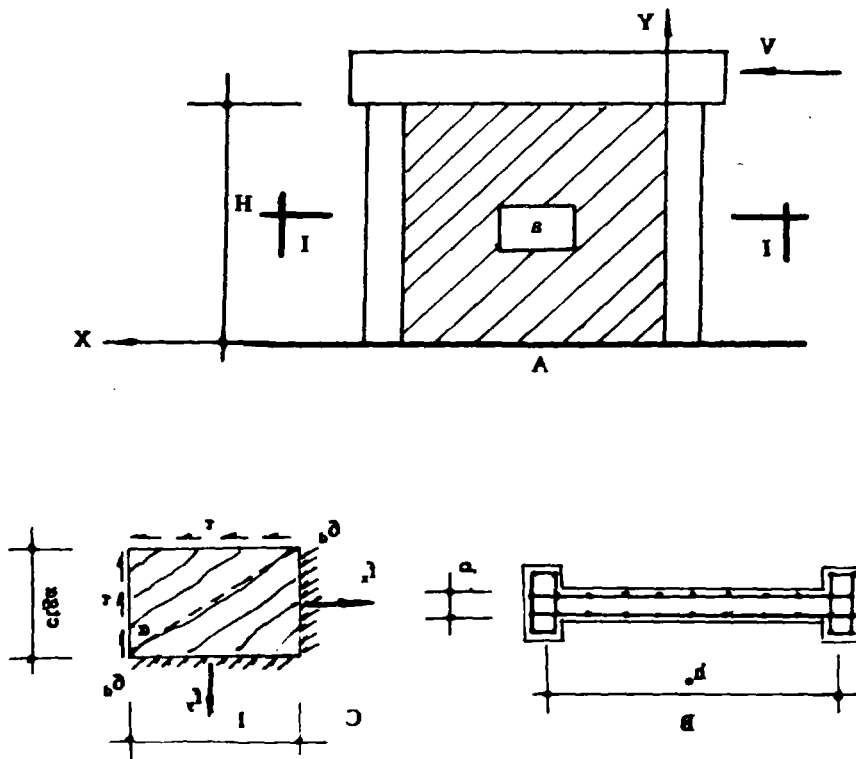
- (2) 钢筋只承受轴力, 忽略其暗销作用;
 (3) 砼的主压应力和主压应变方向重合。

1.2 平衡条件

剪力墙在水平截面上的剪应力为:

$$\tau = \frac{V}{bh_0} \quad (1)$$

式中: V 是作用在剪力墙上的水平力, b 是剪力墙的厚度, h_0 是剪力墙的有效宽度, τ 是截面上的平均剪应力。



A 剪力墙立面

B I-I 剖面

C 墙体单元 a 的受力

图 1 分析模型

根据图 1C, 有:

$$\tau \times b \times l = \sigma_d \cos \alpha \times \sin \alpha \times b$$

$$\tau = \sigma_d \sin \alpha \cos \alpha$$

$$\alpha = \frac{1}{2} \arcsin \frac{2\tau}{\sigma_d} \quad (2)$$

式中: σ_d 为砼斜压杆中的(主)压应力, α 为斜压杆(中砼主压应力的)方向和 y 轴的夹角。

由 $\sum y = 0$, 得:

$$\begin{aligned} A_y f_y \times \frac{b \times l}{b \times h_0} &= \sigma_d \times b \times \cos \alpha \times l \times \cos \alpha \\ \cos^2 \alpha &= \frac{A_y f_y}{\sigma_d b h_0} \end{aligned} \quad (3)$$

式中: A_y 为剪力墙中沿 y 轴方向的钢筋面积, f_y 为钢筋的抗拉强度。

根据(2)和(3), 有:

$$\begin{aligned} \frac{A_y f_y}{b h_0} &= \tau \operatorname{ctg} \alpha \\ f_y &= \frac{b h_0 \operatorname{ctg} \alpha}{A_y} \tau \end{aligned} \quad (4)$$

由 $\sum x = 0$, 得:

$$\begin{aligned} \frac{A_x f_x}{H} \times \operatorname{ctg} \alpha &= \sigma_d \times b \times \cos \alpha \times \sin \alpha \\ f_x &= \frac{b H \sin^2 \alpha}{A_x} \sigma_d \end{aligned} \quad (5)$$

式中: A_x 为剪力墙中沿 x 轴方向的钢筋面积, f_x 为钢筋的抗拉强度。

2 变形协调条件

剪力墙中的单元体 a 在受剪变形后, 其剪应变 γ , x 、 y 方向钢筋的拉应变 ε_x 、 ε_y , 砼的(主)压应变 ε_d , 满足下列关系⁽¹⁾:

$$\gamma = 2(\varepsilon_d + \varepsilon_y) \operatorname{ctg} \alpha \quad (6)$$

$$\gamma = 2(\varepsilon_d + \varepsilon_x) \operatorname{tg} \alpha \quad (7)$$

由(6)、(7)得:

$$\varepsilon_d = \frac{\varepsilon_y - \varepsilon_x \operatorname{tg}^2 \alpha}{\operatorname{tg}^2 \alpha - 1} \quad (8)$$

3 应力—应变关系

3.1 软化砼的应力—应变关系

钢筋砼构件出裂后, 斜压杆中砼的抗压强度远低于标准圆柱体的抗压强度, 这一现象称为砼的软化。砼的软化效应最初是由 Robinson 和 Demoricux⁽²⁾ 在 1972 年通过配有钢筋的砼平板试验得出的。1982 年, Vecchio 和 Collins⁽³⁾ 在钢筋砼平板受剪试验基础上, 提出了软化砼的应力—应变关系为(图 2):

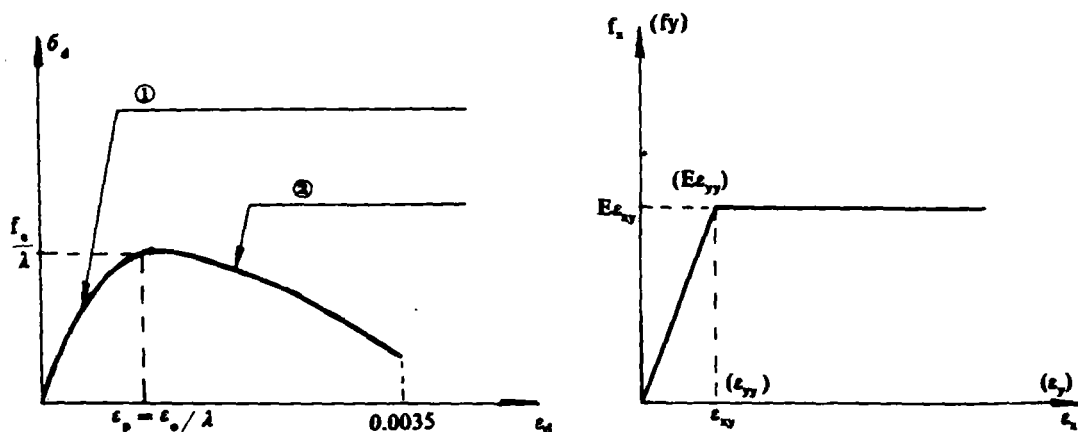
$$\sigma_d = \begin{cases} f_c [2 \frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0} - \lambda (\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0})^2] & \varepsilon_d \leq \varepsilon_p = \frac{\varepsilon_0}{\lambda} \\ \frac{f_c}{\lambda} [1 - (\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p})^2] & \varepsilon_d > \varepsilon_p \end{cases} \quad (9)$$

式中: f_c 是砼标准圆柱体的抗压强度, ε_0 是普通砼应力—应变曲线中与最大应力相对应的应变, 通常取为 0.002, λ 是软化效应系数, $1/\lambda$ 是软化系数。

$$\lambda = \sqrt{\frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y + 2\varepsilon_d}{\varepsilon_d}} - 0.3 \quad (10)$$

3.2 钢筋的应力—应变关系

对于工程上常用的低碳钢, 不考虑强化阶段, 并假设为理想的弹塑性材料, 其应力—应变关系为(图 3):



$$\textcircled{1} \sigma_d = f_c [2 (\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0}) - \lambda (\frac{\varepsilon_d}{\varepsilon_0})^2] \quad \textcircled{2} \sigma_d = \frac{f_c}{\lambda} [1 - (\frac{\varepsilon_d - \varepsilon_p}{2\varepsilon_0 - \varepsilon_p})^2]$$

图 2 软化砼的应力—应变关系

图 3 钢筋的应力—应变关系

$$f_x = \begin{cases} E\varepsilon_x & \varepsilon_x \leq \varepsilon_y \\ E\varepsilon_y & \varepsilon_x > \varepsilon_y \end{cases} \quad (11)$$

$$f_y = \begin{cases} E\varepsilon_y & \varepsilon_y \leq \varepsilon_{yy} \\ E\varepsilon_{yy} & \varepsilon_y > \varepsilon_{yy} \end{cases} \quad (12)$$

4 全过程分析方法

根据已推导的 10 个独立方程, 即可用迭代法进行全过程分析。未知量有 V 、 τ 、 σ_d 、 α 、 f_x 、 f_y 、 ε_x 、 ε_y 、 ε_d 、 γ 和 λ 共 11 个, 用迭代法求解的步骤如下:

- ① 给定 V , 由方程(1)求 τ ;
- ② 假设 σ_d , 由方程(2)求 α ;
- ③ 由方程(4)求 f_y ;
- ④ 由方程(5)求 f_x ;
- ⑤ 由方程(12)求 ε_y ;
- ⑥ 由方程(11)求 ε_x ;
- ⑦ 由方程(8)求 ε_d ;
- ⑧ 由方程(10)求 λ ;
- ⑨ 由方程(9)反求 σ_d , 如所得值与假设值足够接近, 进行步骤 10 计算; 否则, 重复步骤 2 到 9;
- ⑩ 由方程(6)求 γ 。

这样, 每给定一个荷载 V 值, 即可计算出剪力墙中砼的应力、应变, 钢筋的应力、应变。在进行全过程分析时, V 值从零开始, 以一定步长增加, 根据上述步骤, 可计算出每级荷载下剪力墙的应力、应变, 由这些数据, 可绘出低剪力墙在荷载作用全过程下的受力—变形曲线。计算过程的电算框图见图 4。

5 理论分析和试验结果的对比

根据本文的方法, 对从参考文献^[4, 5, 6]中查到的 19 个低剪力墙进行了全过程分析, 试验测得的破坏剪应力同理论计算值之比的总平均值为 1.03, 试验测得的剪力墙顶部水平位移同理论计算值之比的总平均值为 1.15。总的来看, 理论计算同试验结果的符合程度还是较好的。图 5 和图 6 给出了其中两个试件的试验曲线同理论计算所得曲线的对比情况。表 1 是剪力墙破坏时试验值与理论值的对比情况。

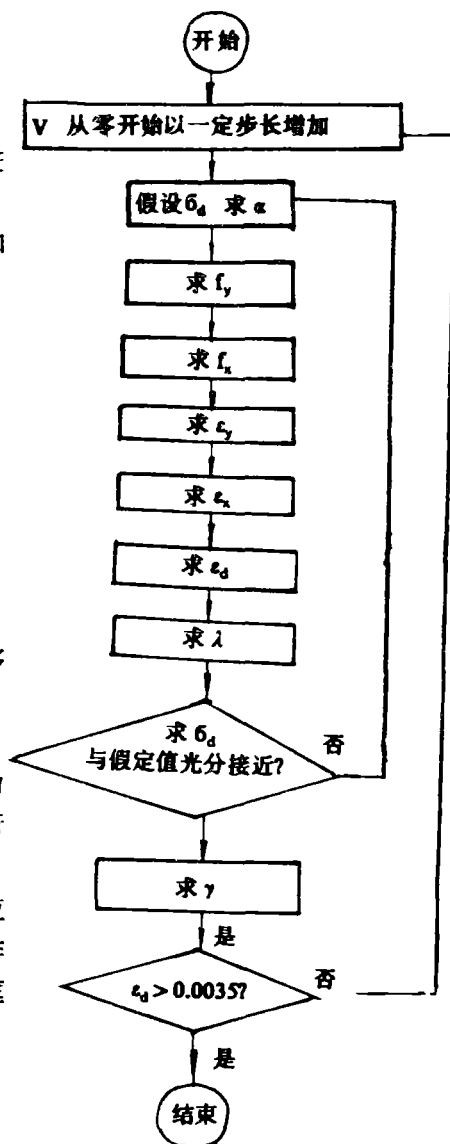


图 4 电算框图

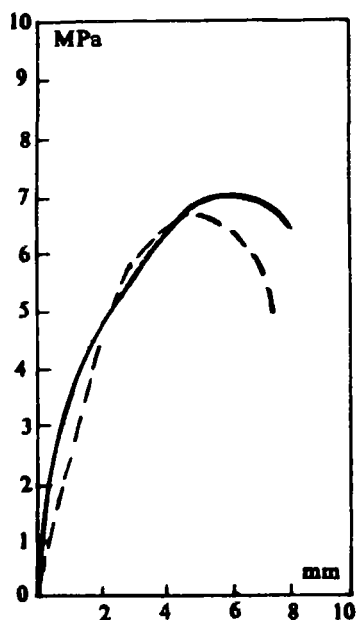
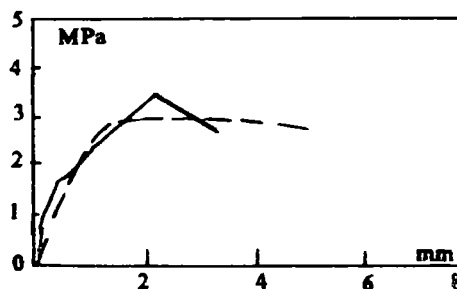
图 5 试件 B1-1⁴ 的剪应力-顶部水平位移曲线图 6 试件 4BII-1⁵ 的剪应力-顶部水平位移曲线

表 1 剪力墙破坏时试验值与理论值的对比

资料来源	试件编号	高宽比	配筋率(%)		$f_c(\text{MPa})$	剪应力 $\tau(\text{MPa})$		τ 试验 τ 理论	顶部水平位移 $\delta(\text{mm})$		δ 试验 δ 理论
			x 向	y 向		试验值	理论值		试验值	理论值	
Bara, F. and et al ⁽⁴⁾	B1-1	0.5	0.5	0.5	29.0	6.96	6.57	1.06	6.35	5.33	1.19
	B2-1	0.5	0.5	0.5	16.3	5.29	4.59	1.15	4.5-6.6	4.10	1.35
	B3-2	0.5	0.5	0.5	27.0	6.07	6.60	0.92	5.33	4.90	1.08
	B4-3	0.5	0.5	0.5	19.0	5.58	5.00	1.12	5.08	4.48	1.13
	B6-4	0.5	0.5	0.5	21.2	4.73	5.10	0.93	5.84	4.88	1.13
	B7-5	0.25	0.5	0.25	25.7	6.25	6.34	0.98	4.06	2.43	1.67
Benjamin, J. R. and et al ^[5]	4BII-1	1.11	0.5	0.5	20.1	3.45	2.98	1.15	2.24	2.03	1.10
	4BII-3	0.5	0.5	0.5	19.5	3.55	3.17	1.12	2.62	2.05	1.27
	A1-A	0.33	1.0	1.0	21.7	4.18	5.00	0.84	1.57	1.93	0.81
	A1-B	0.33	1.0	1.0	22.6	4.92	5.12	0.96	2.23	2.00	1.12
	A2-B	0.33	1.5	1.5	20.4	4.42	5.57	0.80	2.11	2.47	0.85
Galletly, G. D. and et al ^[6]	A-8	0.72	0.90	0.9	35.8	7.57	5.52	1.37			
	A-4	0.72	1.57	1.57	29.6	8.80	7.00	1.25			
	A-2	0.72	2.95	2.95	35.1	10.10	9.90	1.02			
	B-8	0.72	0.9	0.9	33.8	6.28	5.65	1.11			
	B-4	0.72	1.57	1.57	34.5	7.87	7.84	1.00			
	B-2	0.72	2.95	2.95	35.1	9.51	9.90	0.96			
	C-8	0.72	0.9	0.9	31.7	5.04	5.50	0.92			
	C-4	0.72	1.57	1.57	29.6	6.37	7.31	0.87			
平 均	共 19 个							1.03			1.15

6 结论

本文根据桁架模型理论, 结合软化砼的应力—应变关系, 提出了低剪力墙在剪力作用下的全过程分析方法。根据该方法, 可计算出钢筋砼低剪力墙在荷载作用全过程下钢筋的应力、应变, 砼的应力、应变等。理论计算同试验结果的符合程度较好。

[致谢]: 本文的工作得到了天津大学土木系康谷贻和姚崇德教授的精心指导, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- (1) Hsu, Thomas T.C., and Mo, Y. L., Softening of Concrete in Torsional Members ——Theory and Tests. ACI Journal, Proceedings V. 82, No. 3, May-June 1985, pp.290-303.
- (2) Robinson, J. R., and Demoricux, J. M., Essais du Traction-Compression sur Modeles dame du Poutre en Beton Arme. Institute Recherches Appliquees de Beton Arme (IRABA), Part 1, June 1968 and Part 2, May 1972.
- (3) Vecchio, F., and Collins, M. P., The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stresses. Publication No. 82-03, Department of Civil Engineering, University of Toronto, Mar. 1982, 332pp.
- (4) Bara, F., Hanson, J. M., and Corley, W.G., Shear Strength of Low-Rise Walls with Boundary Elements. Research and Development Bulletin No. RD 043D, Portland Cement Association, Skokie, 1976, 20pp.
- (5) Benjamin, J. R., and Williams, H. A., The Behavior of one-Story Reinforced Concrete Shear Walls. Proceedings, ASCE, V. 83, ST3, May 1957, P1254.
- (6) Galletly, G. D., Behavior of Reinforced Concrete Shear Walls Under Static Load. Department of Civil and Sanitary Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Aug. 1952, 123pp.

Complete Response Process Analysis of the Behavior of R. C. Low-Rise Shearwalls Based on Softening Theory of Concrete

Cheng Yuanbing

Abstract: Based on the softening theory of concrete, as well as equilibrium and compatibility conditions, this paper presented a method of analyzing the behavior of R. C. low-rise shearwalls during all loading history by using of truss model theory, computer diagram was made. Comparison in theory results with test results was made and unified agreement was obtained.

Keywords: Softening of concrete, Truss model theory, Shear wall.