

钢筋混凝土柱

美国混凝土协会

丁祖堪
翁大厚 译

中国建筑工业出版社

Basu及Suryanarayana 在第九篇论文中 提供了 对弹性约束的钢筋混凝土柱承受双向弯曲时计算机分析的结果。

Gouwens在第十篇论文中也提出设计 双向弯曲 钢筋混凝土柱的另一简化方法。这套方法适用手工计算。

最后两篇论文是Berwanger及Berwanger和Rasul 写的。文章阐述承受弯曲荷载的普通和预应力混凝土受压构件的弯矩与曲率之间关系的实验结果。

本书包括有关钢筋混凝土柱的学术论文十二篇，涉及到钢筋混凝土柱计算的许多重要课题。在有的论文中还附有供设计用的计算图表。

REINFORCED CONCRETE COLUMNS

American Concrete Institute

1975, Detroit

* * *

钢筋混凝土柱

丁祖堪 翁大厚 译

*

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

*

开本: 850×1168毫米 1/32 印张: 8⁵/₈ 字数: 231千字

1984年5月第一版 1984年5月第一次印刷

印数: 1—16,300册 定价: 1.40元

统一书号: 15040·4585

绪 言

本书涉及到混凝土研究和设计者当前有兴趣的一些问题，其中很多与1971年ACI建筑规范使用中发生的问题有密切关系。

由MacGregor, Oelhafen及Hage等写的第一篇论文是研究这样一个困难的问题，即如何获得在计算弯矩放大系数时要用的柱子有效刚度 EI 的既简单又可靠的公式。文中提出一个新的方法。

由Blomeier及Breen 等写的第二篇论文是处理与柱子联结的楼盖梁能留有余余地地对柱子提供多大约束这一复杂问题。

第三篇论文是由Green及 Hellesland 合写的。文中报导了柱子的重复和循环荷载试验。并将实测的承载能力与按ACI规范计算的进行了比较。

由Heimdahl及Bianchini 合写的第四篇论文，报导了双偏心受压柱试验结果。这些柱子用不同型式的钢筋（其中包括高强钢筋）配筋的。试验结果也与ACI规范的承载力进行了比较。

第五篇论文中，Wang及 Liu 用矩阵位移法及有限元法进行柱与无梁楼盖相互作用的计算机分析。假定板是弹性的，但柱为非弹性。未考虑徐变。

第六篇论文是由Abdel-Sayed及 Gardner 合写的。文章中提出承受双向弯曲对称配筋细长混凝土柱的新设计方法，并附有供设计用的无量纲计算图表。

由Colville写的第七篇论文，提供了考虑受拉裂缝、混凝土受压时的非线性、钢筋屈服作用以及二次弯曲对混凝土柱的影响等因素的简化算法。这套简化方法是通过计算机分析与试验结果对比导得的，既不预测承载力，也不考虑收缩和徐变。

在第八篇论文中，Bunni提供了矩形柱中矩形箍筋对纵向钢筋受实际受力作用的数据。

目 录

细长柱 EI 值的再审查.....	1
支承约束的屈服对无侧移细长混凝土柱的影响.....	40
钢筋混凝土柱的重复加荷试验.....	64
配有高强钢筋的双向偏心受压钢筋混凝土柱的极限强度.....	86
无梁楼盖结构中钢筋混凝土柱的工作性能	110
承受双向偏心荷载的方形对称细长钢筋混凝土柱的设计	133
长细比对方形截面钢筋混凝土柱的影响	147
钢筋混凝土柱中的矩形箍筋	170
受约束的双向受弯钢筋混凝土柱的分析	189
双向弯曲的简化	206
轴向荷载对钢筋混凝土构件弯矩—曲率关系的影响	226
预应力混凝土构件轴向荷载—弯矩—曲率的特征	249
美国、加拿大通用单位与SI（国际制）的换算	269

细长柱 EI 值的再审查

J.G. MacGregor U.H. Oelhafen S.E. Hage

简 介

1971年ACI房屋建筑规范^[1]给出了一种弯矩放大系数法^①来分析柱子长细比对其强度的影响。在这种设计程序中,计算取用

- ① “弯矩放大系数法”原文为“moment-magnifier method”。按照《ACI 318-71》,由一般方法刚架分析求得的柱端弯矩分别以 M_1 和 M_2 表示之。 M_2 表示绝对值较大者,总是取正号; M_1 表示绝对值较小者,当柱仅有单曲率时取正号,如系双曲率则取负号。截面设计时,应将弯矩 M_2 乘以系数 δ ,即:

$$M_c = \delta M_2 \quad (a)$$

$$\delta = \frac{C_m}{1 - \frac{P_u}{\phi P_c}} \geq 1.0 \quad (b)$$

$$P_c = \frac{\pi^2 EI}{(kl_u)^2} \quad (c)$$

以代替更精确计算,在方程式(c)中的 EI 可取:

$$EI = \frac{\frac{E_c I_g}{5} + E_s I_{se}}{1 + \beta_d} \quad (d)$$

或者偏于保守取:

$$EI = \frac{\frac{E_c I_g}{2.5}}{1 + \beta_d} \quad (e)$$

当刚架无侧移、且柱高范围内无横向荷载时:

$$C_m = 0.6 + 0.4 \frac{M_1}{M_2} \leq 0.4 \quad (f)$$

对其他情况,取 $C_m = 1.0$ 。

式中

k —— 有效长度系数;

l_u —— 柱的无支长度;

I_{se} —— 钢筋对构件横截面中和轴的惯性矩。

—— 译者注

的有效抗弯刚度 EI 起着重要作用。现已发现, ACI规范所给的 EI 值在很多情况下是不够准确的^[2]。

关于长期持续荷载对混凝土柱承载能力影响的认识, 在过去15年里已由于实验^[3~8]和分析^[6~12]而有所提高。用现有的分析方法预测试验中的柱子的状况, 有着合理的精确性, 但一般说来在设计中应用它是比较复杂的。然而, 进行电算试验^①来研究幅度很大的参变数的影响, 从而整理设计的方程式时, 这样的分析是有用的。

这篇论文的第一部分简要叙述承受长期持续荷载的柱子的一种逐次“徐变速度”分析法。第二部分叙述用这种分析方法进行的一系列电算试验。这些结果已用来推导ACI规范中弯矩放大系数法设计细长柱所用的抗弯刚度 EI 的设计方程式。

细长铰接柱承载能力的分析

材 料 性 质

假定钢筋为理想的弹塑性材料。混凝土的瞬时应力—应变关系假定为:

1. 下列应变范围内为线性:

$$\frac{f'_t}{E_c} \leq \varepsilon \leq 0$$

式中 $f'_t = 6 \sqrt{f'_c}$

E_c ——ACI318-71第8.3.1节规定的弹性模量。

2. 下列应变范围内为二次抛物线:

① “电算试验”原文是“Computer experiment”。近年来, 对某些应力状态复杂、受多参数制约的烦复结构计算问题, 常在拟定合理的数学模型、输入必要的试验数据后, 利用电子计算机进行反复的复杂运算, 并通过数理统计分析, 找出影响结构受力性能的主要参数及其影响规律, 得到分析结果和简化计算公式。这种方法在某种程度上可以减少实物试验数量和代替一部分实物试验。人们常称之为“电算试验”。——译者注

$$0 < \varepsilon < \frac{2f'_c}{E_0}$$

3. 在下列范围内为完全塑性:

$$\frac{2f'_c}{E_c} \leq \varepsilon \leq \varepsilon_u$$

卸荷与再加荷曲线的斜率 (slope of unloading and re-loading branch) 等于弹性模量 E_0 。在短期荷载作用下取 ε_u 为 0.0035。

虽然在钢筋混凝土构件设计中混凝土抗拉强度一般是被忽略的, 但这里的分析在于阐明细长柱合理的和接近真实的状况, 所以研究柱子的稳定性时, 用电算分析出的数据和用真实柱子的试验得出的数据是同样对待的。为此, 将混凝土的抗拉强度也包括在这项分析中。 f'_t 的值宁取 ACI318-71^[1] 11.5.2 节一致的值, 而不取 9.5.2.2 节的值, 以求对柱子状况的保守估算值。

混凝土的性质受时间影响, 并按养护和加荷条件的不同有大幅度的变化。本研究假定混凝土是非线性的粘弹塑性材料。分析中运用的非线性的与应力有关的徐变函数是由参考资料^[11] 中的试验数据得来的。这些试验是在承受不同应力的素混凝土棱柱体上做的, 但在试验期间每一个试件上的应力是常数。收缩应变是分别在未加荷的试件上量出的。在 t 时间的徐变应变 $\varepsilon_{cr}(t)$, 是在 t 时间量得的应变 $\varepsilon(t)$ 减去初始应变 ε_0 及在 t 时间的收缩应变 $\varepsilon_s(t)$:

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon(t) - \varepsilon_0 - \varepsilon_s(t) \quad (1)$$

ε_0 是按下列短期应力—应变曲线方程式求出:

$$\varepsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_0} \left(1 - \sqrt{1 - \frac{f_c}{f'_c}} \right) \quad (2)$$

式中 E_0 是在 t 时间的混凝土初始切线弹性模量。徐变函数 $\varphi(t)$ 为徐变应变与初始应变之比:

$$\varphi(t) = \frac{\varepsilon_{cr}(t)}{\varepsilon_0} \quad (3)$$

一个徐变函数是从 20 个不同定值应力级别 ($f_c/f'_c = 0.185 \sim$

0.808) 中的相应一个试件得出的。绘制不同时间的 $\varphi(t)$ 与 f_o/f'_o 关系图, 可以发现在任何时间 t 与应力有关的徐变函数, 可用下列函数表达:

$$\varphi(t)=c_1(t)+c_2(t)\frac{f_o}{f'_o} \tag{4}$$

系数 $c_1(t)$ 及 $c_2(t)$ 是在加荷后的不同时间用线性回归法分析确定的, 如图 1 所示。徐变函数中只有 f_o/f'_o 的影响是由参考资料 [11]研究得出的, 其他都是用CEB (CEB 为“欧洲混凝土委员会”——译者注) 的徐变函数计算的^[13]。

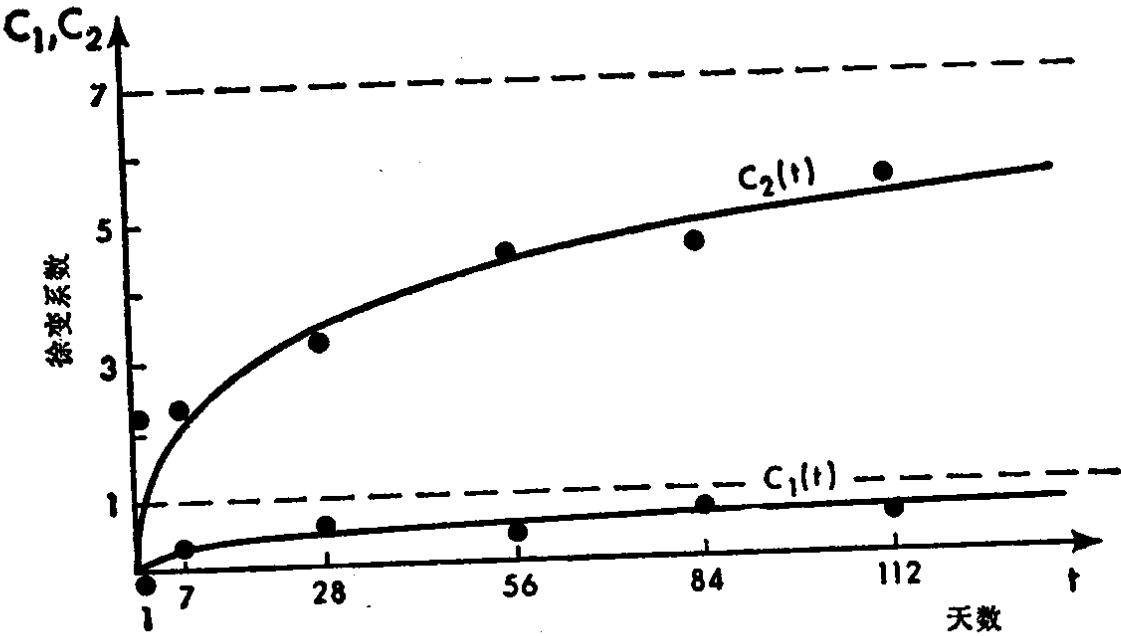


图 1 徐变系数

为了分析, 假定系数 $c_1(t)$ 及 $c_2(t)$ 可以用下列一般形式的函数来表达:

$$c_n(t)=\bar{c}_n[1-\exp(-\alpha_n t^{\delta_n})] \tag{5}$$

式中 c_n 等指的是 c_1 或 c_2 等。

分析中用的系数值是参考资料[11]推导出来的, 并取:

$$\bar{c}_1=\bar{c}_n\frac{[\varphi(\infty, 0.40)-0.8]}{3} \tag{6}$$

及

$$\bar{c}_2=2.5[\varphi(\infty, 0.40)-\bar{c}_1] \tag{7}$$

在这些方程式中, $\varphi(\infty, 0.40)$ 指的是时间 $t = \infty$, $f_c/f'_c = 0.40$ 时徐变函数 φ 的值, 取等于CEB建议的 φ 值^[13]。

这时总应变可表达为:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \left[1 + c_1(t) + c_2(t) \left(\frac{f_c}{f'_c} \right) \right] + \varepsilon_s(t) \quad (8)$$

至于对称配筋的柱子, 收缩影响不大[5,12], 因此, 在这一研究中未加考虑。

混凝土由于硬化而增长抗压强度也包括这一分析中。在本论文中, 以后讨论设计问题时把 $t = \infty$ 时的强度保守地假定为1.10乘28天的强度。当具有很高的长期持续应力时, 混凝土强度的降低可假定为短期强度的百分之二十^[14]。

短期荷载的分析方法

在分析的第一个阶段, 计算出一组弯矩一曲率关系 (a family of moment curvature relationships)。在第二阶段, 用储存于计算机中的弯矩一曲率关系 (the stored moment curvature relationships) 和迭代数值积分程序来计算已知柱子的承载能力和变位。除去考虑抗拉强度的方法外, 这一分析中的程序和资料[15]中的类似。

将承受单轴弯曲和压力柱子的横截面分成为很多混凝土纤维和钢筋纤维, 这些纤维垂直于对称轴并与中和轴平行。将极限压应变 ε_u 也分成为 NE 个应变分段。这些分段被选作横截面受压边的应变增量, 如图2所示。对应于 ε_i 的任何值只要假定一种沿着截面高度的任意应变分布, 即可利用基本的应力—应变关系计算出混凝土纤维力 c 及钢筋层的力 s 。方程式(9)及(10)给出与假定的应变分布相关的力 P 及 M :

$$\sum c + \sum s = P \quad (9)$$

$$\sum (c y_c) + \sum (s y_s) = M \quad (10)$$

对给定的受压边 ε_i 值, 只要变化应变的分布即可用试算法 (如图2所示), 使内力 P 的总和等于外力 P_i 。对全部已知的 P_i

The diagram illustrates a beam cross-section with a rectangular core and a circular outer shell. The core is divided into 10 horizontal layers, numbered 1 to 10 from top to bottom. The outer shell is divided into 10 horizontal layers, numbered 1 to 10 from top to bottom. The total height of the beam is E_v . The strain at the top of the beam is $\epsilon_1 = \epsilon_j$. The strain at the bottom of the beam is ϵ_2 . The angle of rotation is $\phi_{i,j}$. The internal forces are $M_{i,j}$ (moment) and P_i (axial force). The diagram also shows the neutral axis (NE) and the center of gravity (CG).

在上述的程序中，未考虑混凝土受拉区的影响。考虑此项影响，从计算出的曲率值 Φ 中减去一个修正值 $\Delta\Phi$ （图3）。如果在全部横截面上均为压应变，则可不作修正。受拉区的影响及随之而产生的修正值 $\Delta\Phi$ ，在开裂弯矩 M_{oo} 时达到最大。用下列方法计算修正值 $\Delta\Phi_{oo}$ 。对轴力 P_i 的任何值，其开裂弯矩用试错法计算，除应变的分布选为使横截面底边的极限拉应变为 $\varepsilon_2 = f'_c/E_c$ 外，其余同于图2所示。在这一个别的分析中，因为考虑到横截面未开裂，方程（9）及（10）中也包括混凝土的拉力。令 Φ_{oo} 为按截面未开裂求得的曲率， Φ_{oo} 为按开裂截面计算的，且 Φ_{oo} 和 Φ_{oo} 均系按 $M = M_{oo}$ 确定的，则 Φ_{oo} 与 Φ_{oo} 之差即为 $\Delta\Phi_{oo}$ 。 M 的其他值则按下列方程式修正：

$$M_0 < M < M_{oo}; \quad \Delta\Phi = \Delta\Phi_{oo} \frac{M - M_0}{M_{oo} - M_0} \quad (12)$$

$$M_{oo} \leq M; \quad \Delta\Phi = \Delta\Phi_{oo} \frac{M_{oo} - M_0}{M - M_0} \quad (13)$$

式中, M_0 是受拉边应力为零时的的弯矩。

这些方程式已与参考资料[11]的分析和试验作过比较, 并已看出是完全一致的。

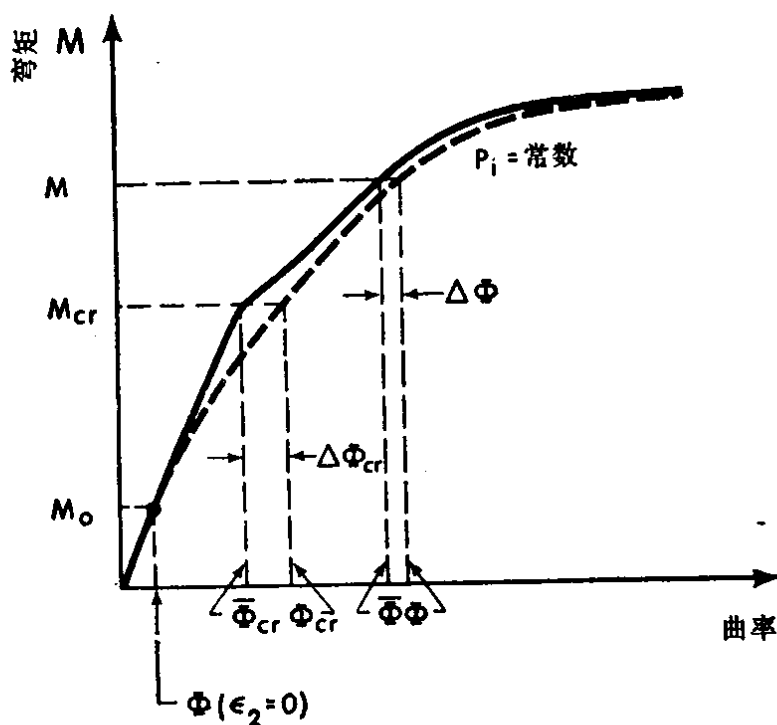


图 3 在弯矩一曲率关系中, 混凝土受拉区的影响

利用求得的弯矩曲率关系, 并借助于迭代数值积分程序^[15], 即可确定柱子承受 P_i 力时的变位 w 。重复不同 P_i 值的变位计算, 即可求出说明柱子工作情况的 P_i 、 M 关系式, 此处 $M = P_i(e + W)$ 是柱一半高度处的最大弯矩。假定柱子的破坏将发生在上述 P_i 、 M 曲线与 P 、 M 相互作用曲线的交点, 如图 4 所示。相互作用曲线是根据弯矩、曲率关系对 P_i 、 $M_{i,j-NB}$ ($J=N$ 时, $\epsilon_1 = \epsilon_u$) 求得的。分析的结果是极限荷载能力 P_u 及极限弯矩 M_u 。在失稳的情况下, 极限荷载 P_u 是失稳的荷载, 而极限弯矩则取 P 、 M 相互作用图上与计算出的极限荷载 P_u 相对应的点。

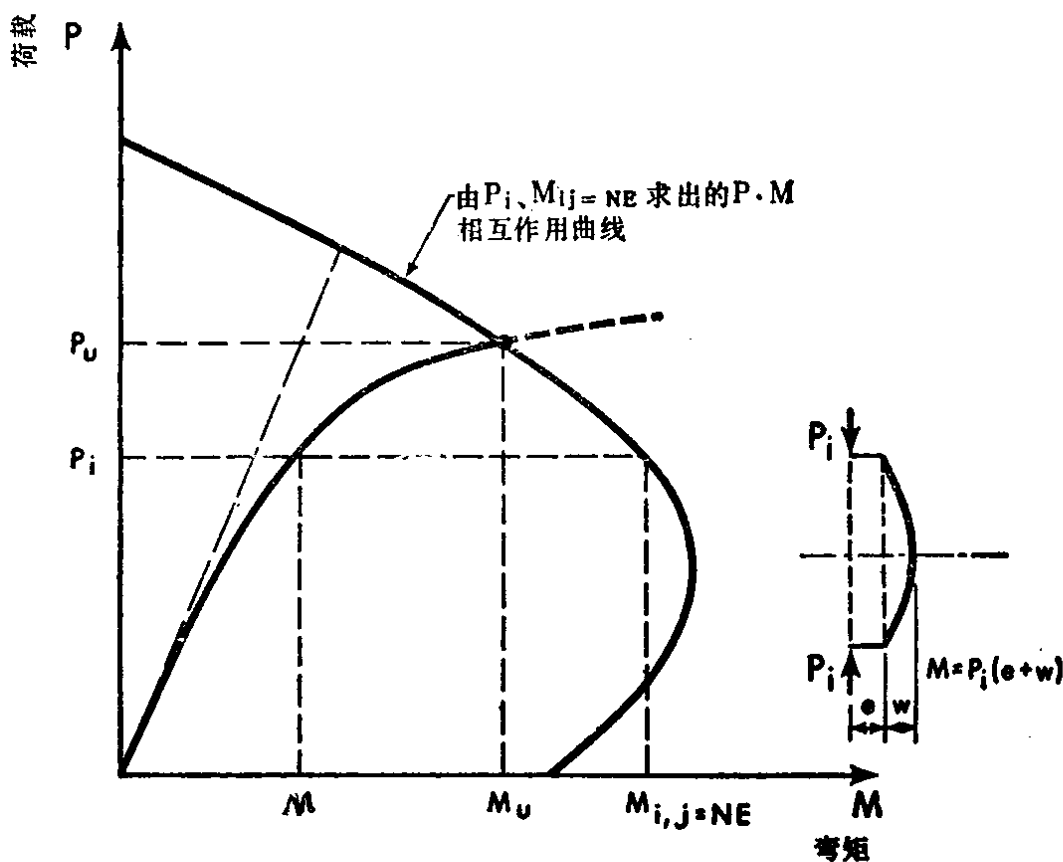


图 4 在短期荷载作用下长细柱的荷载与弯矩

对长期持续荷载的分析方法

包括徐变影响在内，弯矩曲率关系展开为 $M_{i,j}$, $\Phi_{i,j,k}$, 脚注 k 表示时间，而 $k=1$ 时，表示 $\Phi_{i,j}$ 的短期荷载情况的数值。当 $K=2.3\cdots NT$ 时， $\Phi_{i,j,k}$ 以时间为离散的变数用徐变速度法计算。图 5 所示为徐变阶段 k 开始时的应变的分布和曲率 $\Phi_{i,j,k}$ 。首先，对每一受压混凝土纤维的未约束的徐变应变 $\Delta\epsilon_{c,r}$ 用公式 (3) 和 (4) 计算。其次，加残余力 Δc 和 Δs 以保持平衡并恢复到线性应变分布。 Δc 及 Δs 值及应变的增值 $\Delta\epsilon_1$ 及 $\Delta\epsilon_2$ 可从以下平衡条件得出：

$$\Sigma \Delta c + \Sigma \Delta s = 0 \quad (14)$$

$$\Sigma (\Delta c y_c) + (\Delta s y_s) = 0 \quad (15)$$

在徐变 $k+1$ 阶段开始时的曲率 $\Phi_{i,j,k+1}$ 可按式计算：

$$\Phi_{i,j,k+1} = \Phi_{i,j,k} + \frac{\Delta\epsilon_1 - \Delta\epsilon_2}{h} \quad (16)$$

这样的程序需对全部徐变阶段重复进行。

按前述方法计入混凝土受拉区对 Φ 的影响（如图 3 所示）。假设开裂弯矩 M_{oo} 不因时间而变化。

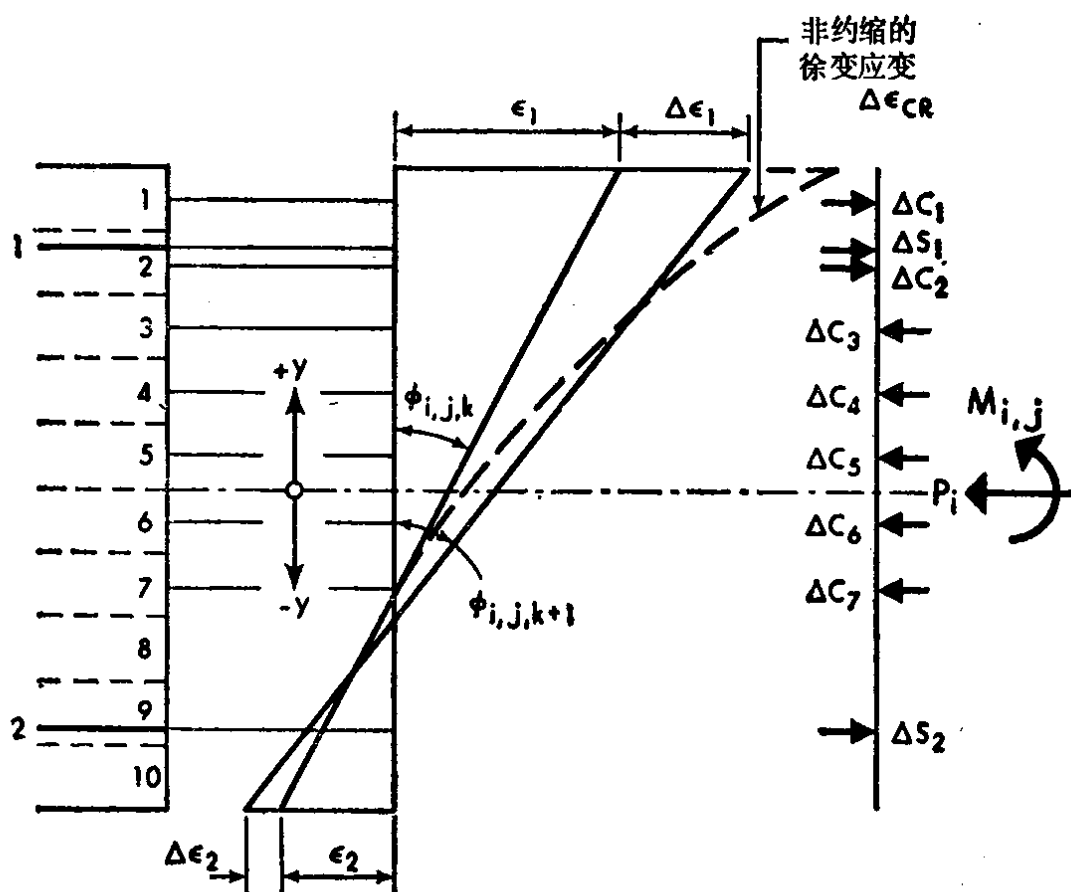


图 5 在徐变阶段 k 时曲率及纤维中残余力的变化

柱变位及承载能力的计算

柱子承受长期持续荷载 P_i 时，与时间有关的变位，可根据 $M_{i,j}$ 、 $\Phi_{i,j,k}$ 关系用徐变速度法计算。为了对曲率进行数字积分，将柱长分成很多段。用 $M_{i,j}$ 、 $\Phi_{i,j,k}$ 的关系计算出柱子的瞬时变位 W_0 。计算发生在徐变第一阶段的徐变变位 ΔW_1 时，由于徐变而产生的曲率增量按下式确定：

$$\Delta\bar{\Phi}_{i,j,1} = \bar{\Phi}_{i,j,2} - \bar{\Phi}_{i,j,1} \quad (17)$$

必须计算每一段柱长 $\Delta\bar{\Phi}_{i,j,k}$ 值。由 $\Delta\bar{\Phi}_{i,j,1}$ 产生的徐变变位 ΔW_1 将

增加外弯矩，从而又造成附加的瞬时变位 $\Delta W_{0,1}$ 。假定短期变位的这种增加发生在该徐变阶段的末尾。在徐变第 2 阶段开始时的总变位为：

$$W_1 = W_0 + \Delta W_1 + \Delta W_{0,1} \quad (18)$$

而在徐变 $k+1$ 阶段开始时的通式为：

$$W_k = W_0 + \sum_{m=1}^k (\Delta W_m + \Delta W_{0,m}) \quad (19)$$

更详尽的叙述见参考资料[11]。如果是匀质线性粘弹性材料，则这一公式收敛为适当的微分方程解。因为收敛程度随第二阶变形的增加而下降，所以在本分析中用八个徐变阶段。

为了计算柱子承受一段时间的长期持续荷载以后的最终短期承载力，需增加一组弯矩曲率关系式以考虑因混凝土龄期增加的混凝土强度增长。对于这些短期关系的计算程序与对于 $M_{i,j}$ 、 $\Phi_{i,j,1}$ 的计算程序相同。进行承受长期持续荷载一个时期以后的分析，与计算初始短期荷载下柱子的工作情况相同，但是残余徐变变位（柱子很快卸荷后留下的变位）必须一并计入荷载的初始几何偏心距中。

此处所述的分析，本质上与参考资料[11]叙述的一样。参考资料[11]中的那种分析，需用与 Ramu 所做短期和长期持续荷载作用下柱子的试验结果^[5]进行了比较，无论是从柱子的承载能力还是变位反应来看，均能很好的吻合。

细长柱在长期持续荷载下的工作状态

铰接细长柱单曲率弯曲的典型曲线如图 6 所示。曲线(A)表示以柱子的荷载及柱子高度一半处的弯矩表示的短期瞬时工作状态。假定在曲线(A)及 P, M 相互作用曲线($\bar{A}$)交点处出现破坏——相互作用曲线($\bar{A}$)用最初 28 天的混凝土强度计算。曲线(B)表示柱子在承受长期持续荷载 P ，一段时间后(时间用脚注 k)加荷直至破坏的工作情况。破坏假定发生在用略微增加混凝土强

度计算的相互作用曲线($\bar{B}$)的交点处。曲线(C)和(C)表示柱子加荷至破坏的类似状况,但在长期持续荷载 P_i 作用下所能产生的全部徐变量已经发生。

相互作用曲线由 $P_i, M_{i,j=NB,K}$ 给出。以 $\varepsilon_1=\varepsilon_u=0.0035$ 条件确定相互作用的曲线并不意味着在柱子破坏时最大的总应变等于 ε_u 。与此相反,假定从破坏截面边缘总的应变中减去残余徐变应变后才达到 $\varepsilon_1=\varepsilon_u$ 的。为此假定徐变过程并不影响混凝土在最终的短期荷载下充分发展其极限短期应变的能力^[10]。这一假定与试验结果是完全吻合的。

所有承受偏心荷载的柱子都存在“临界长期持续荷载” P_{scr} 。当长期持续荷载小于 P_{scr} 时,柱子的荷载能增加直至时间 $t=\infty$ 时破坏,如图6曲线(c)所示。当长期持续荷载等于或大于 P_{scr} 时,柱子就将在长期持续荷载下破坏^[9,11]。

在长期持续高应力作用下,混凝土强度有降低的趋势^[14]。

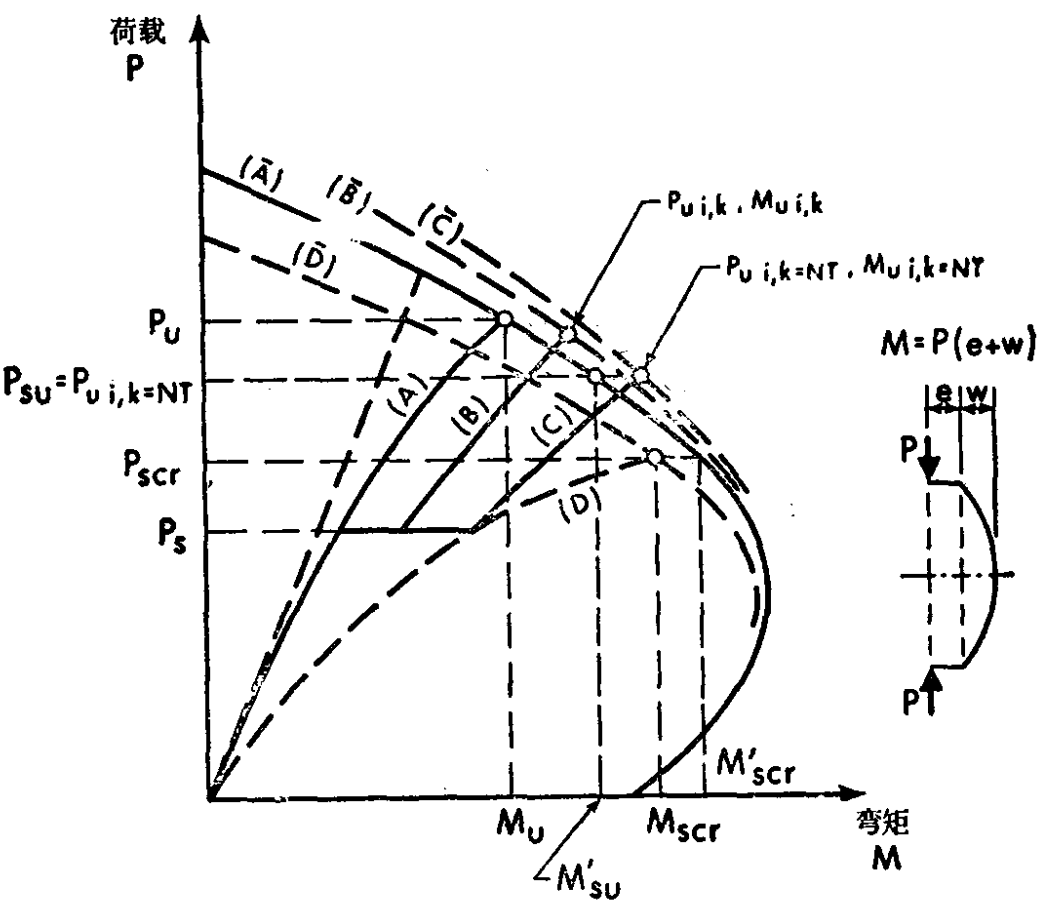


图 6 在短期和长期持续荷载作用下细长柱中的荷载—弯矩

此降低值假定为同样龄期混凝土短期强度的百分之二十。由于在这一研究中曾保守地假设当时间为无限长时的短期强度等于 $1.10f'_{c28}$ ，因此临界长期持续应力假定为 $0.8 \times 1.10f'_{c28}$ 。图 6 中相互作用曲线($\bar{D}$)是从 $M_{t,j}, \Phi_{t,j,k=NT}$ 的关系中求得的，而这里 j 表示受压最大的纤维应变的等级 ε_1 、并取等于临界长期荷载的应变 ε_{us} ，它是由方程式(8)确定的，在计算相互作用曲线时取 $f_c/f'_{c28}=0.88$ 和 $t=\infty$ 。图6中的曲线(D)是表示在破坏截面上由于徐变而最大可能增加的弯矩。极限曲线和相互作用曲线($\bar{D}$)交点给出临界长期持续荷载，此项荷载是在任何已知初始偏心距 e 下所能产生徐变破坏的最低荷载。

一般说来，相互作用曲线($\bar{A}$)和曲线($\bar{B}$)、($\bar{C}$)和($\bar{D}$)的显著差别，仅是在荷载级别高于平衡荷载(balanced load)时才会发生。

设计方程式的推导

电 算 试 验

对细长柱子的工作状况的早期研究^[2]，曾提出对这种柱子的强度和工作状况最有影响的是下面五个参变数：长细比 l/h ；截面形状和配筋位置；配筋率 ρ_t ；最外排钢筋间的距离与全部高度之比 γ 以及偏心率 e/h 。

所研究的柱子中主要一些组是完全的阶乘分块(factorial block)^[16]，包括：

1. 81个配有拉筋的两面配筋柱子(图 7 中的 A 型)，包括下列参变数的每一种组合：

$$\gamma=0.6, 0.75 \text{ 及 } 0.9$$

$$e/h=0.1, 0.25 \text{ 及 } 0.40$$

$$l/h=10, 20, 40$$

$$\rho_t=0.008, 0.040 \text{ 及 } 0.064$$

$$f'_c=4 \text{ 千磅/平方英寸}$$