

④

經建

抗震结构

低周疲劳

倒塌

1996

第18卷 第1期
1996年1月

重庆建筑大学学报
Journal of Chongqing Jianzhu University

Vol. 18 No. 1
Mar. 1996

32-33

多层建筑考虑低周疲劳特性的 抗倒塌验算实用方法

刘 鸣

刘伯权

赖 明[√]

(西北建筑工程学院)

(重庆建筑大学)

TU 973.31

摘 要 通过理论分析和大量数值计算,对作者提出的抗震结构的等效延性破坏准则^[1]中诸参数进行统计回归,总结出剪切型结构考虑低周疲劳特性的抗倒塌验算的简化方法,便于工程实际应用。

关键词 抗震结构, 低周疲劳, 实用方法

中图法分类号 TU973.2

唐山地震后,我国地震工程界提出了“小震不坏,大震不倒”的抗震设计思想。这就是在多发“小震”作用下,结构应保持在弹性阶段,能正常使用,不发生破坏;在罕遇的“大震”作用下,允许结构进入弹塑性状态,产生一定程度的损伤,甚至是严重的损伤,但应确保结构的整体安全,防止倒塌。这个抗震设计的原则,目前已为许多国家的抗震规范所采用。

根据统计分析,当基本烈度为7度、8度、9度时,罕遇地震烈度设计的地面加速度峰值将是多遇地震的6、5、4倍左右。所以,对于构件截面依然按多遇地震烈度设计的结构,在罕遇地震烈度下,势必进入弹塑性阶段而且是接近或达到抗震受力极限状态。

由于结构进入屈服后,结构强度多无储备,为了抗御地震作用,只能通过发展塑性变形来吸收、耗散地震输入能量。若结构变形能力不足,则会发生倒塌。而地震造成的人员伤亡和财产损失,主要来自建筑物的倒塌,防止建筑物的倒塌是减轻地震灾害的主要措施之一。我国现行抗震设计规范是通过限制结构楼层的最大层间变形在罕遇地震时不超过结构相应的极限变形能力来实现防止结构倒塌这一目的。文献[2]、[3]对多层剪切型结构的弹塑性变形提出了实用计算方法。

几十年来,随着工程抗震理论由静力理论发展到动力理论,人们已承认结构在地震作用下具有动力特性,而地震输入也是随时间变化的振动过程。结构的损伤、破坏、倒塌应在地震动引起的振动全过程中考察,而不应只考虑最大层间变形的影响。由于结构在地震动引起的振动过程中变形多次循环反复,反复次数越多,结构破坏就越严重,所以,地震动持时引起的结构累积损伤对结构最终倒塌所起的作用不容忽视。

文献[1]提出的抗震结构的等效延性破坏准则,将结构由大位移脉冲引起的首超破坏与弹塑性变形的循环作用引起的累积损伤破坏统一在一个表达式中,其物理内涵合理,概念清晰,

收稿日期:1995-11-10.

刘 鸣,女,1947年生,讲师,西北建筑工程学院建工系(710061).

国家自然科学基金及国家教委博士点研究基金资助项目.

形式简单。但是,应用此式需进行结构的弹塑性时程反应分析,得到结构薄弱层的位移时程反应。注意到地震作用的复杂性和随机性,加上结构构件自身抗震能力的离散性,具有可接受精度的时程分析法对一般结构设计来说从工作量上是很难接受的。欲得出符合我国实际情况、便于广大设计人员掌握的实用方法,还需在此基础上进行简化。

由文献[4]的分析可知,根据楼层屈服强度系数 $\xi_i(i)$ 的大小,结构可分为强结构、中强结构和弱结构三种类型。强结构的破坏指数 D 一般不会超过 1。大震倒塌的可能性很小,可不进行抗倒塌验算;弱结构的倒塌主要由层间弹塑性位移超过结构层间极限变形能力所致,其倒塌验算可仍按目前规范方法校核罕遇地震下的层间变位;对于中强结构,则不能不考虑结构本身的低周疲劳性能导致结构在地震动过程中的累积损伤对其倒塌破坏的影响。本文主要针对此类结构探讨其抗倒塌验算的简化方法。

1 破坏指数的确定方法

文献[1]提出的钢筋混凝土柱的等效延性破坏准则为:

$$\mu^* = (4\bar{N})^{-\beta} \mu_p = k \mu_p \quad (1)$$

式中

μ^* —文献[1]作者定义的考虑结构低周疲劳特性的等效层间延性系数,简称等效延性;

μ_p —极限延性系数,即单向荷载下结构的层间最大延性;在本文计算中为便于分析,取

$$\mu_p = 5。$$

β —非负常数,由低周疲劳试验确定。对于钢筋砼结构,可取 $\beta = 0.152$;

\bar{N} —等效滞回次数; $\bar{N} = \sum_i n_i \left(\frac{\mu_i}{\mu_p}\right)^{\frac{1}{\beta}}$

k —等效系数; $k = (4\bar{N})^{-\beta}$

结构的破坏指数 D 是义为:

$$D = \mu_{max} / \mu^* \quad (2)$$

式中, μ_{max} 为通过地震反应分析所确定的最大反应延性。当结构某层 $D \geq 1$ 时,认为结构倒塌破坏。

可见,判定一个结构在地震荷载作用下的倒塌,关键是计算出结构的破坏指数 D 值,而 D 值的确定则依赖于最大反应延性 μ_{max} 和等效延性 μ^* 。其中 μ^* 与 μ_p 和 k 有关。 μ_p 为由试验确定的结构层部最大延性;对于具体的结构, μ_p 是一定值。 k 为与等效滞回次数 \bar{N} 有关的等效系数,通过 k 反映了地震动对结构累积损伤的效应。因此, D 值的确定最终归结为与结构最大层间变形有关的 μ_{max} 的确定和与结构累积损伤有关的 k 的确定。

1.1 最大反应延性 μ_{max} 的确定方法

为了计算地震作用下结构的弹塑性位移,采用时分析虽可获得较满意的效果,但计算颇繁,难于在工程设计中使用。对此,国内外学者先后提出了一些简化计算方法:

- (1) 等能量准则法,即 $\frac{1}{\sqrt{2\mu-1}}$ 法;
- (2) 弹塑性反应谱和振型分解法;
- (3) 替代结构法;

- (4) IBANEZ 能量法。
- (5) 加藤能量法。

上述几种简化计算方法,大体可分为两大类。其一是假定弹塑性阶段能量(或位移)沿各层的分布服从结构在弹性阶段时的分布,因而采用了仅适用于弹性分析的振型分解法,如(2)、(3)、(4)。其二则是考虑了由于结构薄弱层进入塑性从而在弹塑性阶段出现的能量(或位移)集中的现象,如(5)。根据能量相等的原则,文献[2]提出了一种改进的实用计算方法。这种方法虽然考虑了层屈服强度系数、场地土和结构自振周期的影响,但地震动未按场地类别输入,且结构基本周期 T 与结构层 n 关系不明确。鉴于这种状况,本文试图从按实际场地土类别输入和结构基本周期满足 $T=0.1n$ 的关系出发,寻找出一种比较符合实际情况的最大反应延性的实用计算方法。

1.1.1 均匀结构

本文所指的均匀结构是各层屈服强度系数 ξ_i 相同的结构。此处所谓的均匀并不意味着其弹塑性层间位移反应呈均匀分布。大量的计算表明,在强烈地震作用下,“均匀”结构的层间最大位移反应沿高度的分布并不均匀,更不会相同。但其不均匀的程度与一般非均匀结构相比要小很多。事实上,由于地震波本身的随机性、材料的离散性、施工质量等问题,设计上要求结构弹塑性层间位移均匀是很难实现的。

经本文的分析及大量计算发现,均匀结构的最大反应延性有如下规律:

- 1) 楼层屈服强度系数 ξ_i 是对结构层间弹塑性位移影响最显著的因素。 μ_{max} 与 ξ_i 的关系一般呈双曲线型,图 1 为 μ_{max} 与 ξ_i 关系的一部分计算结果。
- 2) 随结构基本周期(本文中取 $T=0.1n$, n 为结构层数)的增长,结构的最大反应延性呈较缓慢增长的趋势。如图 2 所示。

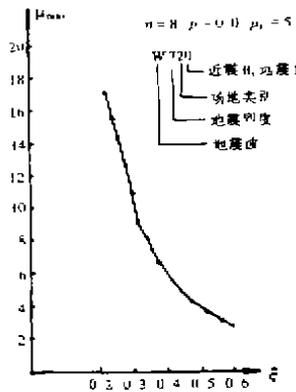


图 1 μ_{max} 与 ξ_i 的关系

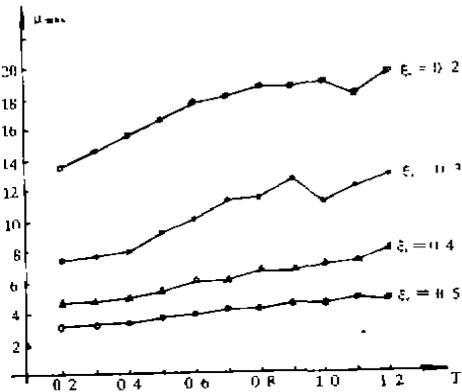


图 2 T 与 μ_{max} 的关系

3) 烈度变化对层最大反应延性影响不明显,如图 3。事实上,由于 ξ_i 表征了结构实际所能承受的地震强度的相对大小,故在结构的 ξ_i 固定的前提下,烈度变化对实际结构的影响已在 ξ_i 中考虑进去。

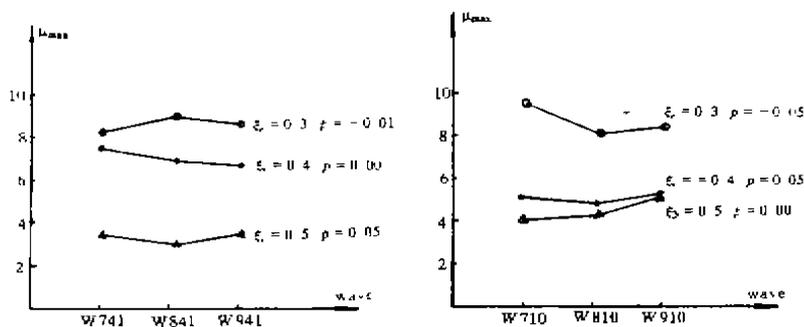


图 3 地震烈度变化与的 μ_{max} 关系

基于以上分析和计算结果, 本文提出结构层间最大反应延性的简化计算公式如下:

$$\mu_{max} = \frac{a}{\xi_x^2} + \frac{b}{\xi_y} + \frac{c}{\xi_z} (T_g - T) + d \tag{3}$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为待定参数;

T_g —场地土特征周期;

T —结构基本周期。

采用复合形方法, 以由弹塑性时程反应分析所得的数值试验结果作为拟合对象, 对公式 (3) 进行多元非线性回归分析, 得到其中的待定参数如下:

$$a = -0.1166 \quad b = 3.7142 \quad c = -0.5734 \quad d = -3.4620$$

公式 (3) 可写为:

$$\mu_{max} = \frac{0.1166}{\xi_x^2} + \frac{3.7142}{\xi_y} + \frac{0.5734}{\xi_z} (T_g - T) - 3.4620 \tag{4}$$

1.1.2 非均匀结构

若结构某一层的层屈服强度系数 ξ_y 小于或大于 (如加强层) 相邻楼层的层屈服强度系数, 则结构成为不均匀结构。

对于层屈服强度系数明显小于相邻层而形成薄弱层的不均匀结构, 大量地震反应分析表明, 薄弱层将形成塑性形集中, 破坏指标在此处突变且显著大于相邻层, ξ_y 较相邻层越小, 该层塑性变形集中的现象越突出, 而相邻层的层间变形与均匀结构相应层间变形相比则变小。薄弱层的弹塑性形越大, 相邻层的层间变位减小越多。图 4 为八层结构的 ξ_y (i 分别为 1、4、7) 减小, 该层 μ_{max} 值明显增大的现象。

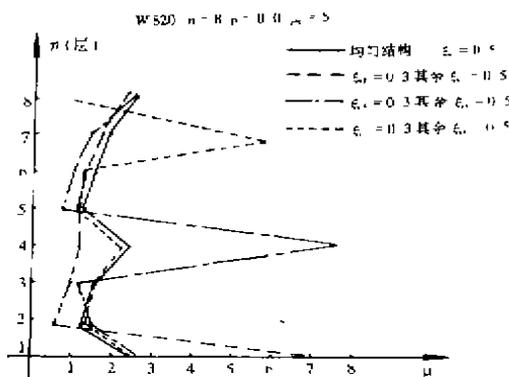


图 4 非均匀结构薄弱楼层与相应的 μ 值的

根据大量数值计算的统计分析并考虑计算公式的简便, 本文考虑对于有明显薄弱层的非

均匀结构, 其层间最大延性反应 μ_{max} 的计算可在均匀结构最大延性反应的计算公式中乘以大于 1 的系数 β , 以反映本层 ξ_s (薄弱层) 减小的影响:

$$\mu_{max}(i) = \beta \left[\frac{0.1166}{\xi_s^2} + \frac{3.7142}{\xi_s} + \frac{0.5734}{\xi_s} (T_g - T) - 3.4620 \right] \quad (5)$$

式中

$$\beta = [1 + \bar{\xi} - \xi(i)] \quad (6)$$

$\bar{\xi}$ —非均匀结构薄弱层上下相邻两层屈服强度系数的平均值

$$\bar{\xi} = \frac{1}{2} [\xi(i+1) + \xi(i-1)] \quad (7)$$

对于因设加强层而使本层 $\xi_s(i)$ 大于相邻层形成的不均匀结构, 将在相邻层形成弹塑性变形的突变, 使其延性反应大于其它层, 但计算结果表明, 如果加强层的层屈服剪力与相邻层屈服剪力相差不是太大时, 相邻层的弹塑性变形一般不会超过没有加强层时的情况。从简化设计的角度, 此类结构 μ_{max} 可按均匀结构计算。但应注意加强层的强度与相邻层不能相差太大。较好的处理方法是使加强层的上、下层 ξ_s 值逐渐过渡, 不致形式强度、刚度突变。

1.2 等效系数 k 的确定方法

式(1)表达的破坏准则中等效延性 μ^* 为

$$\mu^* = (4\bar{N})^{-p} \mu_p = k \mu_p$$

等效系数 k 为

$$k = (4\bar{N})^{-p} \quad (8)$$

可以看出, 上式通过等效系数 k 反映了累积损伤对结构破坏的影响。通过大量的数值计算和统计分析, 得到了结构的等效滞回次数 \bar{N} 与 ξ_s 、地震烈度、结构基本周期及场地性质之间的关系图^[5]。为了得到简便的公式计算累积损伤对结构破坏的影响, 本文仍采用复合形法, 根据由动力时程反应分析得到的大量算例结果, 直接对等效系数 k 值进行回归。

对于均匀结构, 建立如下数学模型:

$$k = \frac{a}{\xi_s^2} + \frac{b}{\xi_s} + c(T_g - T) \xi_s + d \quad (9)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 亦为待定常数, 回归得:

$$a = 0.0243, \quad b = -0.1229, \quad c = 0.1101, \quad d = 1.2039$$

均匀结构的等效系数表达式为:

$$k = \frac{0.0243}{\xi_s^2} - \frac{0.1229}{\xi_s} + 0.1101(T_g - T) \xi_s + 1.2039 \quad (10)$$

对于非均匀结构, 弹塑性变形集中造成等效系数降低。为简化计算, 可在均匀结构的计算公式前乘以小于 1 的系数 γ 近似考虑这种影响。即对于非均匀结构, 等效系数 k 为

$$k = \gamma \left[\frac{0.0243}{\xi_s^2} - \frac{0.1229}{\xi_s} + 0.1101(T_g - T) \xi_s + 1.2039 \right] \quad (11)$$

式中

$$\gamma = [1 - (\bar{\xi} - \xi_s(i))] \quad (12)$$

$\bar{\xi}$ —非均匀结构薄弱层上下相邻两层屈服强度系数的均值。

$$\bar{\xi} = \frac{1}{2} [\xi_s(i+1) + \xi_s(i-1)] \quad (13)$$

2 算 例

例 1 某均匀十层钢筋混凝土框架结构, 建在 III 类场地上, 受 8 度地震作用, 其基本周期由近似公式 $T = 0.1n$ 确定 ($T = 1.0$ s)。结构参数为: 质量 $m(i) = 100 \cdot 10^3$ kg, 刚度 $K(i) = 87.37 \cdot 10^3$ kN/m, 瑞雷阻尼系数 $\alpha(i) = 0.0749$, $\beta(i) = 2.514 \cdot 10^{-2}$, 层屈服强度系数 $\xi(i) = 0.35$, 极限延性系数 $\mu_p = 8$ 。

采用本文的实用计算方法, 由均匀构最大反应延性计算公式 (4) 及等效计算公式 (10) 计算, 得:

$$\mu_{max} = 5.9549$$

$$k = 0.7885$$

于是, $\mu^* = k \mu_p = 6.308$

破坏指数

$$D = \frac{\mu_{max}}{\mu^*} = 0.9440$$

如果以同一集系 30 条人工波作为地震动输入, 由时程反应分析方法 (Wilson- θ 法) 进行计算统计, 得出该结构首层为薄弱楼层。

其中: $\mu_{max} = 6.1365$, $\mu^* = 6.6167$

所以, 结构的破坏指数为:

$$D = \frac{\mu_{max}}{\mu^*} = 0.9454$$

例 2. 某八层非均匀结构, 建在 II 类场地上, 受 8 度近震作用, 其基本周期仍由 $T = 0.1n$ 确定 ($T = 0.8$ s)。其它参数为: 质量 $m(i) = 100 \cdot 10^3$ kg, 刚度 $K(i) = 90.57 \cdot 10^3$ kN/m 瑞雷阻尼系数 $\alpha(i) = 0.0935$, $\beta(i) = 2.017 \cdot 10^{-2}$, 极限延性系数 $\mu_p = 5$ 。第七层的层屈服强度系数 $\xi_p(7) = 0.3$, 其余各层 $\xi_p(i) \triangleq 0.5$ ($i \neq 7$)。

若采用本文的实用计算方法, 则由非均匀结构最大延性反应计算公式 (5)、(6)、(7) 及等效系数计算公式 (11)、(12)、(13) 的计算, 得:

$$\mu_{max} = 4.888$$

$$k = 0.7165, \quad \xi_p = 0.5, \quad \gamma = 0.8$$

于是, $\mu^* = k \mu_p = 3.583$

结构破坏指数

$$D = \frac{\mu_{max}}{\mu^*} = 1.3643$$

同例 1, 由时程反应分析求得结构薄弱层 (第 x 层) 的层间延性如下:

$$\mu_{max} = 5.237, \quad \mu^* = 3.999$$

结构破坏指数

$$D = \frac{\mu_{max}}{\mu^*} = 1.3095$$

以上两例计算结果说明, 由本文提出的实用计算方法和由地震反应分析算得的结构破坏指数 D 接近, 完全满足工程实用要求。因此, 对于考虑低周疲劳特性的多层剪切型结构, 可按本文回归得到的最大层间延性 μ_{max} 和等效系数 k 的实用公式, 通过计算破坏指数 D 来进行

抗倒塌验算,而不需再对结构进行时程反应分析,这样,大大简化了结构的抗倒塌验算,便于工程使用。

参 考 文 献

- 1 刘伯权. 钢筋混凝土抗震结构的破坏准则及可靠性分析. 重庆建筑大学博士论文, 1995. 1
- 2 高小旺. 地震作用下多层剪切型结构弹塑性位移反应的实用计算方法. 土木工程学报, 17(3)
- 3 陈光华. 地震作用下多层剪切型结构弹塑性位移反应的简化计算. 建筑结构学报, 1984, (2)
- 4 刘伯权, 赖明, 杨红. 多层建筑考虑低周疲劳特性的地震倒塌反应分析. 地震工程与工程振动, 1994, 14(2)
- 5 刘 鸣. 基于累积损伤的“大震不倒”分析方法研究. 重庆建筑大学硕士论文, 1995. 6.

(编辑:刘家凯)

AN EFFECTIVE DESIGN METHOD FOR PREVENTING COLLAPSE OF MULTI-STORY BUILDINGS TAKING ACCOUNT OF STRUCTURAL LOW-CYCLE FATIGUE CHARACTER

Liu Ming Liu Boquan Lai Ming

(Northwestern Inst. of Arch & Eng.) (Chongqing Jianzhu University)

ABSTRACT In this paper, through the theoretical analysis and a number of calculating, the statistic regression about the parameters in the failure criteria for aseismic structures presented by the authors are made. Based on this work, a simplified method for preventing collapse of multistory buildings taking account of structural low-cycle fatigue character is proposed.

KEY WORDS aseismic structures, failure criteria, practical method

(上接 8 页)

SPIRIT OF THE CITY — TO THE 100TH ANNIVERSARY OF MUMFORD'S BIRTH

Huang Guangyu

ABSTRACT This paper expounds Lewis Mumford's urban theory and academic thought, significant for reference in our urban science research and urban planning and construction, with seven aspects: the cultural function of a city, the citizens' dominating role, the construction of city's cultural facilities, the urban renewal without demolishing all old buildings and the meaning of historical-cultural buildings, that it is not the larger the better for a city, the combination and intergration of city and countryside and the advocacy of going toward an ecological civilization.

KEY WORDS memorializing LEWIS MUMFORD, spirit of city, ecological civilization