

文章编号 1000-5013(2005)02-0156-05

隔震结构抗倾覆可靠度影响因素分析

许宏洲 王全凤

(华侨大学土木工程学院, 福建 泉州 362021)

摘要 隔震结构从某种意义上讲, 是一种上部结构与基础“分离”的结构. 在没有设计抗拉装置的情况下, 其抗倾覆力矩全部由自重来承担, 讨论其抗倾覆可靠度在某些情况下更有实际意义. 文中首先确定隔震结构倾覆的极限状态方程, 进而推导出倾覆可靠度公式. 最后通过一个具体的例子, 讨论隔震结构在没有抗拉装置的情况下, 影响其倾覆可靠度的一些因素.

关键词 隔震结构, 可靠度指标, 抗倾覆可靠度

中图分类号 TU 352.1+20.2

文献标识码 A

基础隔震是采用改变结构支承条件的方法来减小地震波向结构的传递, 即在上部结构与基础之间设置水平刚度很小但竖向刚度很大的隔震垫层(一般为橡胶支座). 水平刚度很小, 可以使结构的变形集中在隔震层, 阻断地震波的能量传递到上部结构; 竖向刚度很大, 则有利于承担上部结构传递下来的荷载. 地震作用下, 隔震结构的倾覆是其主要的破坏形式, 抗倾覆可靠度是评价隔震结构安全性的重要指标. 它与众多的参数有关, 比如结构的质量 m 、刚度 k 、阻尼 c 等的变化, 都会引起结构可靠度的变化. 本文通过一个具体的算例, 研究几个参数对隔震结构可靠度的影响.

1 隔震结构抗倾覆可靠度公式的推导

在地震过程中, 橡胶垫的受力由两部分组成: 一部分为重力, 另一部分为水平地震作用. 重力在橡胶垫中产生的是均布荷载(令此时一排纵向橡胶垫所受分布力的总和为 f_g); 而水平地震作用产生的是一端受拉、一端受压的不均匀荷载(令边缘一排橡胶垫所受分布力的总和为 f_m). 决定隔震结构抗倾覆极限状态的主要条件有 2 个. (1) 隔震层边缘橡胶垫不受拉力. (2) 隔震层边缘橡胶垫所受压力不超过橡胶垫的极限抗压强度. 即

$$f_g - f_m \geq 0, \quad f_g + f_m \leq f. \quad (1)$$

满足式的两个条件后, 就可以保证在地震作用下整体结构不倾覆. 在式(1)中, f 是橡胶垫的极限抗压强度, 一般可达 15~20 MPa. 由文献[1]可以得到满足式的极限状态方程为

$$z_1 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{2r} - \frac{\sum_{i=1}^n K_{vi} b_{li} m_i (\ddot{x}_i + \ddot{x}_g) h_i}{2 \sum_{i=1}^r K_{vi} b_i^2} = 0, \quad z_2 = \frac{\sum_{i=1}^n m_i}{2r} + \frac{\sum_{i=1}^n K_{vi} b_{li} m_i (\ddot{x}_i + \ddot{x}_g) h_i}{2 \sum_{i=1}^r K_{vi} b_i^2} - f = 0, \quad (2)$$

上式中, b 为在基础宽度的一半, b_l 为第 l 排橡胶到建筑物中线的距离, h_i 为第 i 层距离地面的高度, \ddot{x}_g 为地面运动加速度, \ddot{x}_i 为第 i 层的地震加速度反应, K_{vi} 为第 l 排橡胶垫总的竖向刚度, m_i 为各层的集中质量, r 为半宽度 b 内橡胶垫的排数, 基础隔震结构如图 1 所示. 对式(2)求均值与方差, 可得到

$$E(z_1) = \frac{\sum_{i=1}^n E(m_i)}{2r} - \frac{\sum_{i=1}^n K_{vi} b_{li} E(m_i) [E(\ddot{x}_i) + \ddot{x}_g] h_i}{2 \sum_{i=1}^r K_{vi} b_i^2}, \quad (3a)$$

收稿日期 2004-09-17

作者简介 许宏洲(1976-), 男, 硕士, 主要从事防灾工程的研究. E-mail: superkugua@163.com

基金项目 福建省建设厅科研基金资助项目(闽建科[2001]44号)

$$E(z_2) = \frac{g_{i=1}^n E(m_i)}{2r} + \frac{K_{vl} b_{i=1}^n E(m_i) [E(\ddot{x}_i) + \ddot{x}_g] h_i}{2_{l=1}^r K_{vl} b_l^2} - f, \quad (3b)$$

$$^2(z_1) = ^2(z_2) \left(\frac{g}{2r} \right)^2_{i=1}^n ^2(m_i) + \left(\frac{K_{vl} b}{2_{l=1}^r K_{vl} b_l^2} \right)^2_{i=1}^n ^2(h_i^2), \quad (4)$$

在式(4)中, $^2_i = E^2(m_i) ^2(\ddot{x}_i) + E^2[\ddot{x}_i + \ddot{x}_g]^2(m_i) \cdot E(\ddot{x}_i)$, $^2(\ddot{x}_i)$ 可由文献[2]用随机有限元法得到. 假设 m_i 的变异系数为 0.1, 就可以求出式(3)和式(4)的值. 假设 z_1, z_2 服从正态分布, 可靠度指标为 $\beta_i = E(z_i) / \sigma(z_i)$, $i = 1, 2$, 则满足 $z_i \geq 0$ 的可靠度, $P_{ri} = \Phi(\beta_i)$. 失效概率为 $P_{fi} = 1 - P_{ri} = 1 - \Phi(\beta_i)$. 结构不倾覆, 意味着式中的两个条件要同时满足. 假设两个条件相互独立, 则抗倾覆可靠度为 $P_{rto} = \prod_{i=1}^2 P_{ri}$, 倾覆失效概率为 $P_{rto} = 1 - P_{rto}$.

2 隔震结构可靠度影响因素分析

通过一个具体的算例, 可以研究几个因素对隔震结构的抗倾覆可靠度的影响. 某 8 层框架结构, 计算简图如图 2 所示. 设计烈度为 8°, 二类场地土. 有关设计参数分别是, 梁的尺寸为 25 cm × 55 cm, 混凝土强度等级均为 C30, 混凝土弹性模量 E 为 25.48 GPa. 上部结构各层阻尼比 β_i 取 0.05, 隔震垫有关参数如表 1 所示. 各层质量、侧移刚度, 如表 2 所示. 地震波为 EL-cen-

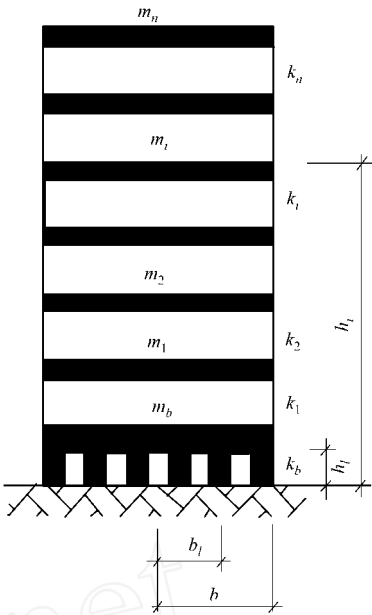


图 1 基础隔震结构 (r=3)

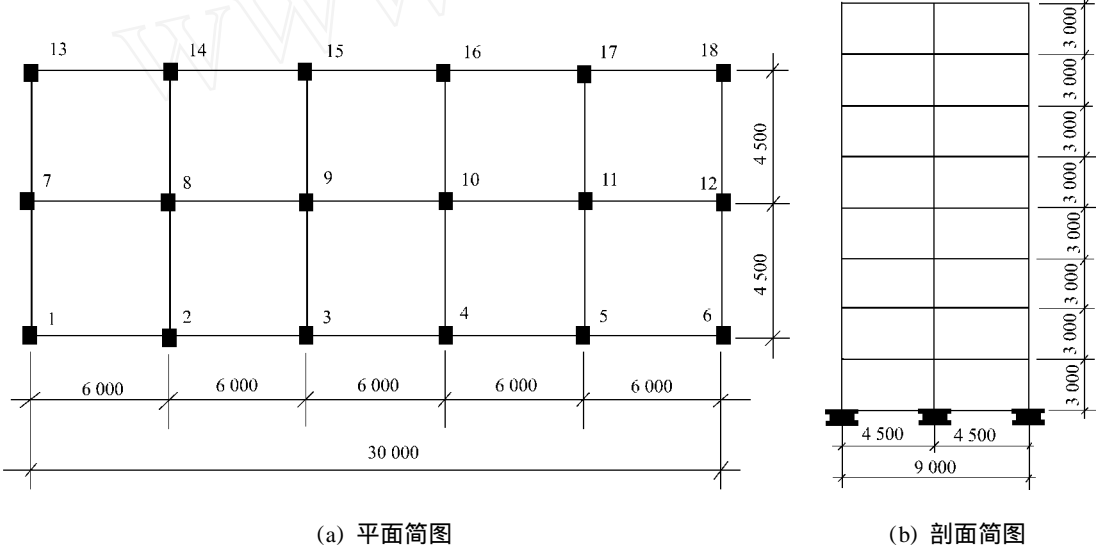


图 2 某 8 层框架结构

震波, 峰值加速度 (a) 调整为 $4.0 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. 表 1 中, F 为设计承载力, K_{eq} 为等效刚度, β_{eq} 为等效粘滞阻尼比, r 为叠层橡胶支座的水平剪切应变. 表 2 中, m, k, h 分别表示质量、刚度和层高.

表 1 叠层橡胶隔震垫的有关参数

型 号	F/kN	$K_{eq}/\text{kN} \cdot \text{mm}^{-1}$		$\beta_{eq}/(\%)$	
		= 50 %	= 250 %	= 50 %	= 250 %
LRB400	3 000	1.52	1.03	17	10

2.1 变异系数大小对抗倾覆可靠度的影响

令刚度 k 的变异系数 δ_k 从 0.1 变化到 0.9, 阻尼、质量的变异系数 δ_c, δ_m 保持 0.1 不变, 计算结构的抗倾覆可靠度指标 β_1, β_2 (β_1 是表示隔震支座不发生拉应力的可靠度指标, β_2 是保证隔震支座的压应力不超过其承载力的可靠度指标), 抗倾覆可靠度 P_{rto} . 计算结果如图 3 所示. 同理, 可令 δ_c 从 0.1 变化到 0.9, δ_k, δ_m 保持 0.1. 令 δ_m 从 0.1 变化到 0.9, δ_k, δ_c 保持 0.1, 进行同样的计算, 结果如图 4, 5 所示. 从图 3, 4, 5 可以看出, 抗倾覆可靠度指标都随着 $\delta_k, \delta_c, \delta_m$ 的增大而降低, β_2 降低的幅度比 β_1 大, 但仍然保持

大

表 2 各楼层质量及刚度

楼层	m/t	$k/N \cdot m^{-1}$	h/m	楼层	m/t	$k/N \cdot m^{-1}$	h/m
8	275.0	138 200 0	3.0	4	286.4	175 000 0	3.0
7	275.0	138 200 0	3.0	3	286.4	175 000 0	3.0
6	275.0	138 200 0	3.0	2	299.4	216 000 0	3.0
5	286.4	138 200 0	3.0	1	299.4	216 000 0	3.0
隔震	300.0	27 360(= 50 %)	0.5	隔震	300.0	18 540(= 250 %)	0.5

于 1. 隔震结构的抗倾覆可靠度受 k, c, m 的影响不大. 2 \gg 1, 抗倾覆可靠度主要受 β_1 控制, 且 β_2 在设计时是可以控制的, 所以讨论 β_1 的变化情况更有意义. 需要注意的是, 在进行结构时程分析时, 上部结构的阻尼是根据瑞雷假设确定的, 所以, 应该更加关注 k 与 m 的确定.

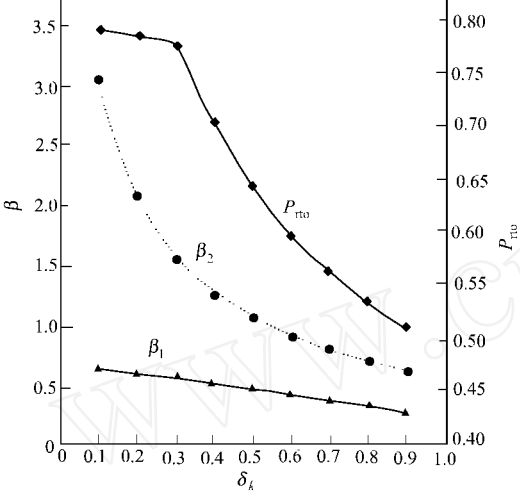


图 3 抗倾覆可靠度指标及可靠度与 k 的关系

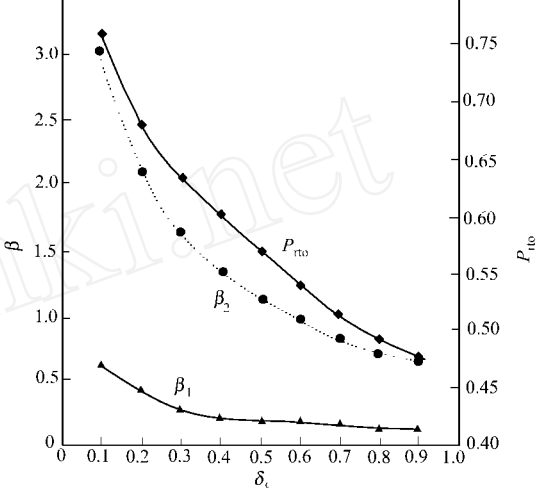


图 4 抗倾覆可靠度指标及可靠度与 c 的关系

2.2 高宽比的影响

令算例中结构的宽度从 7.0 m 变化到 12.0 m. 计算结构抗倾覆可靠度指标 β_1 和抗倾覆可靠度 P_{rto} , 如图 6 所示. 从图 6 中可以看出, 高宽比 (n) 从 2.0 变化到 3.5, 抗倾覆可靠度指标 β_1 迅速从接近 3

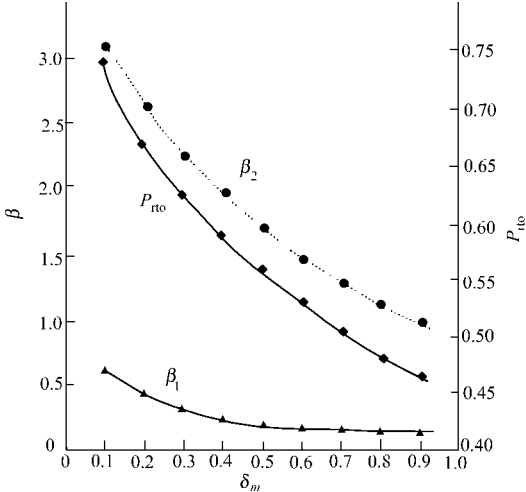


图 5 抗倾覆可靠度指标及可靠度与 m 的关系

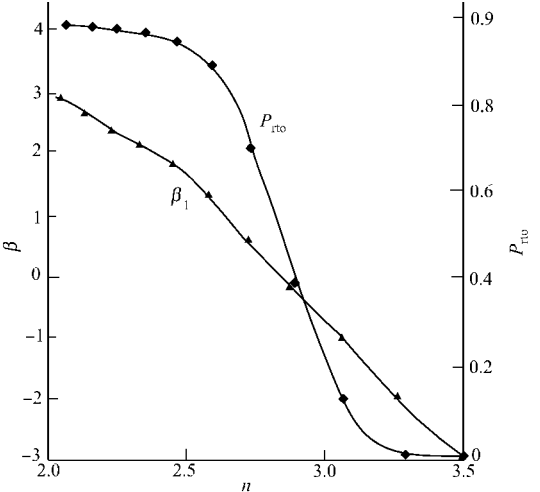


图 6 高宽比对抗倾覆可靠度的影响

下降到 - 3. 抗倾覆可靠度开始变化比较平缓, 当高宽比达到 2.6 以后迅速下降, 大于 3.2 后, 已接近于 0. 这表明隔震结构在这样的情况下已发生倾覆破坏. 抗倾覆可靠度主要受倾覆力矩所控制, 高宽比增大, 倾覆力矩对隔震支座产生的“拉”应力就迅速增加. 当倾覆力矩产生的“拉”应力接近重力产生的“压”应力时, 结构倾覆的可能性将大大增加, 此时, 抗倾覆可靠度就迅速下降. 计算表明, 倾覆力矩对结构边缘隔震支座产生“拉”应力的标准差与均值相比是比较小的.

2.3 隔震层阻尼比的影响

隔震层的阻尼比是隔震设计的一项重要内容. 令隔震层阻尼比从 0.05 变化到 0.4 (实际的叠层橡胶隔震垫的有效阻尼比 为 0.18~0.28), 计算结果如图 7,8 所示. 从图 7 中可以看出, 为 0.05~0.4 时, 各层的地震加速度反应大多随着 的升高而降低, 显示增加隔震层的阻尼有利于降低结构的地震加速度反应. 从图 8 可以看出, 隔震层的抗倾覆可靠度指标 β_1 及 β_2 先是随着隔震层的阻尼比的增加而增加, 然后缓慢下降, 其峰值出现在 0.2~0.3 之间. 结构的抗倾覆可靠度在隔震层阻尼比 从 0.05 增大

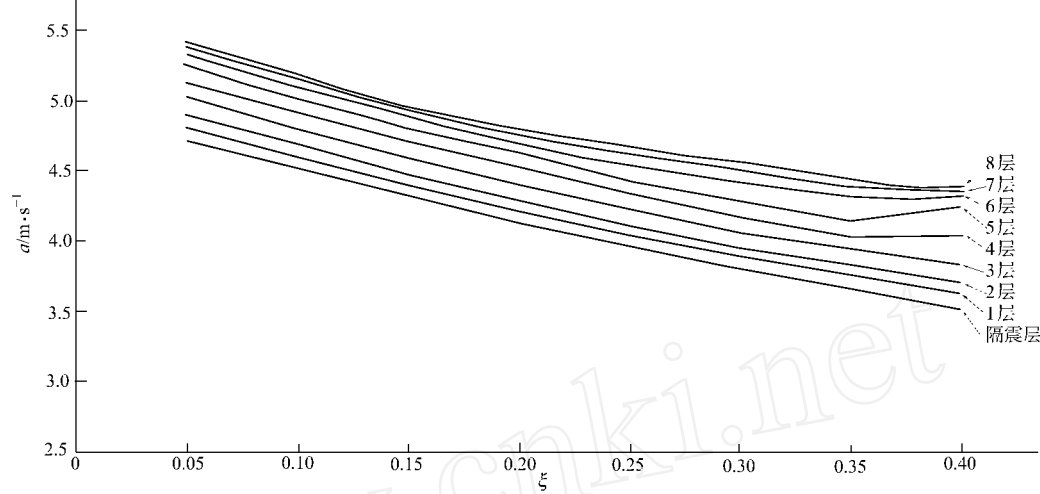


图 7 峰值加速度与隔震层阻尼比 的关系

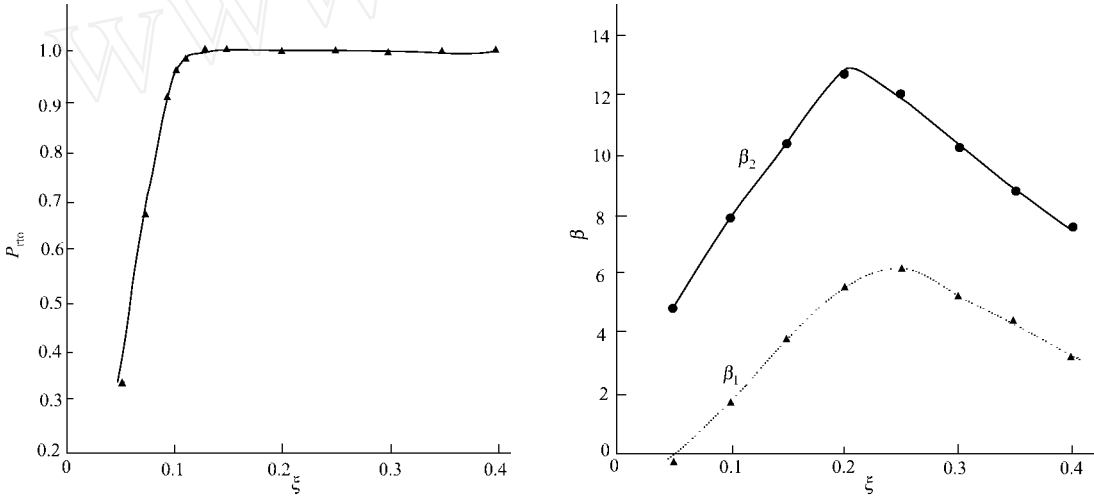


图 8 抗倾覆可靠度 P_{rto} 和抗倾覆可靠度指标 β_1 及 β_2 与隔震层阻尼比 的关系

到 0.15 时, 抗倾覆可靠度 P_{rto} 迅速增加, 大于 0.15 后, 保持接近于 1. 从本算例可以看出, 铅芯橡胶隔震垫的等效阻尼比为 0.18~0.28, 是比较合理的. 阻尼太小, 会引起支座侧移过大; 阻尼太高, 会加大建设成本, 而对提高隔震结构的承载力可靠度和抗倾覆可靠度的作用不大.

2.4 底层刚度与隔震层刚度比的影响

隔震结构隔震层的刚度对隔震效果起着至关重要的影响. 刚度太高, 起不到隔震的作用; 刚度太低, 则地震时产生的侧移过大, 容易造成失稳, 也不利于抗震. 在有关文献里的算例中, 隔震层与底层的刚度比 () 约在 10~90 之间. 为了找出合理的刚度比, 令隔震层与底层的刚度比从 5 变化到 100, 计算结构的抗倾覆可靠度, 结果如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 当刚度比小于 30 时, 抗倾覆可靠度指标 β_1 , β_2 迅速增加. 但从抗倾覆可靠度 P_{rto} 上看, 抗倾覆可靠度几乎等于 0, 显示重力矩不足以平衡倾覆力矩. 在刚度比为 30~40 之间的时候, 抗倾覆可靠度迅速上长升到接近 1. 在刚度比为 40 左右的时候, 无论是 β_1 , β_2 还是抗倾覆可靠度都出现一个峰值, 之后三者在小范围内波动. 抗倾覆可靠度, 在刚度变化过程中不是保持平滑变化, 而是出现一定程度的波动. 这主要是因为地震动本质是一种波动. 当隔震层刚度变化时,

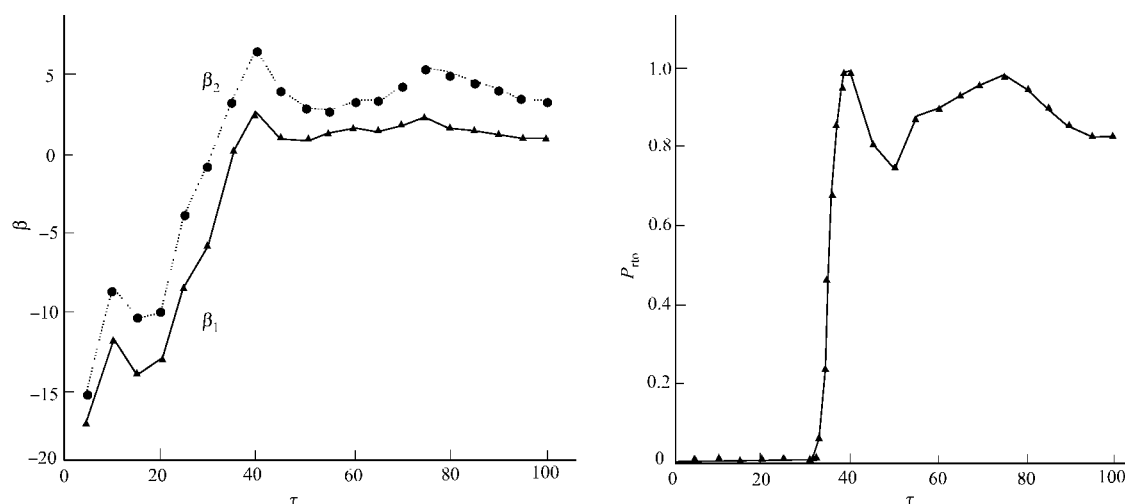


图9 抗倾覆可靠度指标及可靠度与刚度比的关系

会引起结构体系自震频率的变化.当地震波的占优频率与体系的自震周期接近时,会引起体系的一定程度的“共振”,此时结构的加速度、速度和位移等的反应变大,从而引起可靠度的“异常”变化.

3 结束语

从分析结果看,可以得出以下3个结论.(1) 隔震结构的抗倾覆可靠度受阻尼 c 、刚度 k 、质量 m 变异系数影响不大敏感.这是因为三者变异系数的变化,主要影响结构反应的方差,且影响幅度不是很大,对结构反应均值的影响则比较小.(2) 实际的橡胶隔震垫的等效阻尼比 η_{eq} 对抗倾覆可靠度没有的影响.结构的抗倾覆可靠度对刚度比的变化敏感,当刚度比达到40以上时,抗倾覆可靠度变化不大,但过高的刚度比,会导致隔震层的过大位移,引起隔震层的失稳破坏.这一点必须注意.(3) 抗倾覆可靠度对高宽比非常敏感,这是进行隔震设计要考虑的一个重要问题.

参 考 文 献

- 1 李宏男,吴香香.橡胶垫隔震支座结构高宽比限值研究[J].建筑结构学报,2003,24(2):214~19
- 2 陈以新.含材料参数变异的框架剪力墙结构抗震模糊可靠度分析[D]:[学位论文].泉州:华侨大学土木工程系,1999. 24~26
- 3 江近仁,孙景江.考虑参数不确定性的结构动力可靠度分析[J].世界地震工程,1992,(1):30~36
- 4 张新培.抗震结构变形能力可靠度的时程分析法[J].工程力学,1996,13(4):82~88
- 5 赵国藩,曹居易,张宽权.工程结构可靠度[M].北京:水利电力出版社,1984. 47~49

Analysing Factors Influencing Anti-Overturning Reliability of Isolation Structure

Xu Hongzhou Wang Quanfeng

(College of Civil Engineering, Huaqiao University, 362021, Quanzhou, China)

Abstract Isolation structure or vibration isolating structure is in some sense a structure isolating the upper structure from the foundation. In a condition of lacking the design of tensile device and all the anti-overturning moment is held by dead weight, to discuss the anti-overturning reliability is of even more practical significance. To this end, the authors determine firstly the limiting state equation for the over-turning of isolation structure; and secondly, infer the formula of anti-overturning reliability; and finally, discuss by exemplification the factors influencing anti-overturning reliability of isolation structure in the condition of lacking the design of tensile device.

Keywords isolation structure, reliability index, anti-overturning reliability